

恐怖活動攻擊隧道空間之救援策略分析 －以雪山隧道火災為例

簡賢文

中央警察大學消防系副教授

國家災害防救科技中心體系組共同召集人

謝蕙如

國家災害防救科技中心雪山隧道專案研究人員

摘要：2001 年美國 911 自殺式襲擊事件、2004 年西班牙 311 恐怖攻擊以及 2005 年英國倫敦地鐵連環爆炸等恐怖攻擊活動，使得各國對於重大建設之安全重視不僅止於一般單純的意外事故發生，人為縱火及恐怖攻擊等蓄意的破壞行為之影響也開始受到關注。而我國之重大建設如台北 101、台北車站及雪山隧道等皆具有大量人流、密閉空間及複合使用的建築結構等共同特點，一旦遭受恐怖攻擊，其所引發的後續效應更是無法想像。尤其居東南亞第一、世界第五長的雪山隧道，一旦遭受恐怖份子襲擊，必重挫台灣本島形象。回顧過往針對隧道安全之研究大都刻意忽略惡意的恐怖活動。隧道遭受恐怖攻擊的機率雖遠小於一般都會區建築，但恐怖攻擊所引發之隧道火災規模及燃燒速率皆高於一般意外事故。因此本文將以雪山隧道遭受恐怖攻擊後引發大規模隧道火災之境況分析，探討有效的緊急應變及救援策略，以提供未來新建隧道及既存隧道防火安全及緊急應變救援之參考。

關鍵字：恐怖攻擊、隧道火災、雪山隧道

綱要

- 一、前言
- 二、隧道重大火災之境況分析
- 三、隧道火災之發展模式
- 四、用路人避難行為分析
- 五、緊急應變及救援策略
- 六、結論

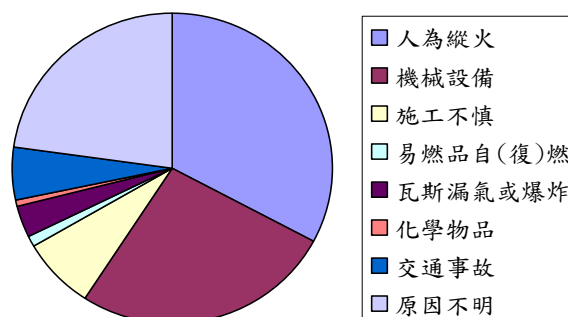
一、前言

2001 年 9 月 11 日於美國本土上發生多架民航飛機遭受挾持，衝撞世界貿易中心、華盛頓五角大廈等數棟重要指標大樓。此自殺式的恐怖攻擊造成將近 3 千多人死亡、數棟大樓倒塌毀損，甚至震撼整個國際社會。2004 年 3 月 11 日西班牙馬德里中央車站遭受恐怖攻擊，四列火車接連發生十起爆炸，造成 191 人死亡，1800 人受傷。2005 年 7 月 7 日英國倫敦民眾還在沉浸於前天取得 2012 年奧運主辦權的喜悅中，首都倫敦就驚

傳遭恐怖攻擊，市中心區數個地鐵站及一輛雙層巴士公車在上班尖峰時間幾乎同時發生四起爆炸案，造成 56 人死亡，700 多人受傷。2005 年 7 月 21 日倫敦再度發生恐怖攻擊，三列地鐵列車與一輛巴士遭到炸彈鎖定，手法幾乎與 7 月 7 日的攻擊如出一轍，但由於炸彈引爆失敗，避免了嚴重傷亡。倫敦兩週內二度發生炸彈攻擊，4 枚炸彈在 1 個小時內分別爆炸或引爆未遂，通勤乘客爭相逃出地鐵站，整個倫敦陷入一片恐怖氣氛中。

層出不窮的恐怖活動是激烈的恐怖份子對於當局政府表達不滿的意識及報復手段，也是一般人民對於現實生活環境產生恐慌感的來源。恐怖活動的發生造成極慘重的人員傷亡、重挫全球經濟，也引發各國關注人為縱火及恐怖攻擊等蓄意破壞行為之影響。台北 101、台北車站及雪山隧道等不但是國內最具地標性之建築，也是國際間矚目的焦點。重大建設皆具有大量人流、密閉空間及複合使用等共同特點，一旦遭受恐怖攻擊，其所引發的後續效應更是無法想像。其中為公路隧道世界排名第五長[1]、居東南亞第一的雪山隧道，一旦遭受恐怖份子襲擊，將重挫台灣政府公共安全管理及防恐應變之能力。在多元動盪的時代，雪山隧道等地下空間是有可能成為恐怖分子攻擊的對象。

概觀國內外隧道安全之相關研究，大都以隧道機電、人為疏失或是一般意外車禍事故等方向進行探討，而刻意忽略惡意的恐怖活動。根據內政部消防署自民國 86 年至 95 年 10 月之全國火災次數及起火原因統計[2]，如圖一所示，人為縱火約佔 32%。雖隧道遭受恐怖攻擊的機率遠小於一般都會區建築，但以雪山隧道之指標性而言，相關政府單位實不能漠視此長公路隧道遭受恐怖攻擊及人為蓄意縱火之可能。此外，恐怖活動一旦於隧道內啟動，其引發的隧道火災規模及燃燒速度皆遠高於一般意外事故；另瑞典 SP（Swedish National Testing and Research Institute）也曾於隧道火災研究中指出蓄意的破壞行為將是未來隧道安全的新威脅[3]。因此對於未來新建長隧道之防火安全設計不能只著重於一般意外事故之防範，也應考量恐怖活動，即使是既存隧道也應及時採取有效的因應措施。



圖一 全國火災次數及起火原因統計

二、隧道重大火災之境況分析

綜觀國內公路隧道火災之事故原因，並無類似因恐怖活動而引發隧道火災，亦無相關研究。若假設載運大量可燃物之大貨車或油罐車於雪山隧道等長公路隧道內起火燃燒，其火勢規模將足以達到使隧道結構崩塌、嚴重毀損，就如同隧道遭恐怖份子放置炸彈後引爆，瞬間引發車輛大火之境況。因此本文參考於挪威 Runehamar Tunnel 所模擬半

拖車 (HGV trailer) 裝載貨物進行之全尺寸火災實驗，以其所得之實驗結果為依據，作為模擬雪山隧道遭受恐怖攻擊之火災境況，據以探析因應恐怖攻擊之防火安全對策及緊急應變救援計劃。

2003 年 9 月由參與歐洲 UPTUN 計劃 (Cost-effective, Sustainable and Innovative Upgrading Methods for Fire Safety in Existing Tunnels) 之瑞典 SP、荷蘭 TNO (The Netherlands Organization for Applied Scientific Research)、挪威防火實驗室 SINTEF NBL (Norwegian Fire Research Laboratory) 等數個研究單位共同合作進行 Runehamar Tunnel 全尺寸火災實驗。此實驗是於挪威西岸一廢棄的 Runehamar Tunnel 模擬半拖車載運貨物之全尺寸隧道火災，計使用四種不同類型的貨物組合，如表一。Runehamar Tunnel 實驗結果提供了隧道管理者、隧道設計者及消防應變救援單位相關重要資訊。茲簡述 Runehamar Tunnel 火災實驗結果如下：

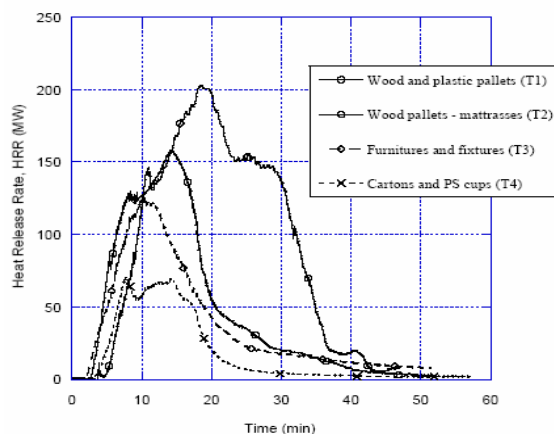
表一 Runehamar Tunnel 火災實驗之貨物裝載

試驗	貨物	目標貨物	總重(kg)	理論熱能(GJ)
T1	380 個木棧板和 74 個 PE 塑料棧板	32 個木棧板和 6 個 PE 棧板	10911	240
T2	216 個木棧板和 24 個 PUR 墊	20 個木棧板和 20 個 PUR 墊	6853	129
T3	傢俱及其配件和 10 個大橡膠輪胎	填充沙發及扶手	8500	152
T4	600 個瓦楞紙箱裝有 18000 個 PS 塑膠杯和 40 個木棧板	4 個木棧板和 40 個裝有 1800 個塑膠杯的紙箱	3120	67

(一) 熱釋放率

圖二為 Runehamar Tunnel 進行 4 種不同貨物組合之熱釋放率成長圖。4 個試驗之火災成長皆呈線性曲線 (linear curve)，線性迴歸係數 R (linear regression coefficient) 也皆大於 0.99。由表二可知 T2 有最快速的火災成長 (29MW/min)，其次為 T1 (21MW/min)。而 T3 和 T4 則有相似的火災成長 (17-18MW/min)。其中，T1 試驗只需 18.5 分鐘即可達最高熱釋放率值 203MW[4]。

國外曾有許多研究針對各種車輛種類進行火災實驗，所有車輛中最高熱釋放率者為油罐車，可達 200MW~300MW[5,6]。歸納上述可知，無論是載有大量可燃物之大貨車、載運危險物之油罐車，以及炸彈爆炸之恐怖活動皆會引發火災強度高達 200MW 以上之隧道火災。但就火災燃燒速度而言，恐怖活動或油罐車一旦引爆燃燒，其達到最高的熱釋放率值之時間將小於大貨車火災之 18.5 分鐘。因此，用路人如何安全逃生，隧道管理者如何有效避免恐怖活動之發生，而消防救援單位又將如何發揮最佳之救災效能，俾將災害降至最小等課題，皆值得深入探討。



圖二 熱釋放率成長曲線

表二 最高熱釋放率及火災成長速度

Test nr	Time from ignition to peak HRR (min)	Linear fire growth rate (MW/min)	R	Peak HRR (MW)
T1	18.5	20.5	0.997	203 (average)
T2	14.3	29.0	0.991	158 (average)
T3	10.4	17.0	0.998	124.9
T4	7.7	17.7	0.996	70.5

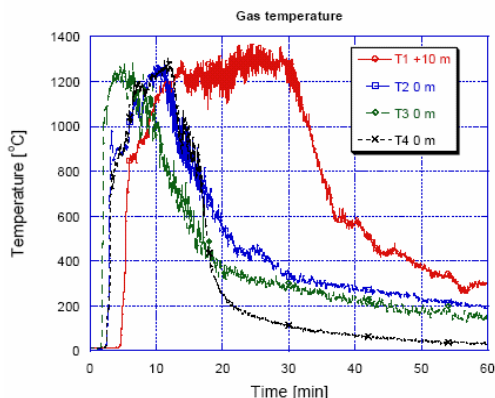
(二) 氣體溫度

4 種不同的貨物組合，其火災成長及最大熱釋放率皆有所不同。T1 為木棧板和塑料棧板之組合，擁有最高的總熱能 (total energy content)，其最大熱釋放率也最高，因此所產生的最高氣體溫度之時間也相對最長，其最高溫度可達 1365°C。而 T2、T3 和 T4 的氣體溫度曲線較為相似，其最高氣體溫度約在 1281°C 和 1305°C 之間。如圖三所示，可看出氣體溫度在急速增加前會有一初期延遲的情形，其原因在於火勢需逐漸擴散延燒到貨物堆裡，所以氣體溫度上升曲線會有初期延遲現象[7]。

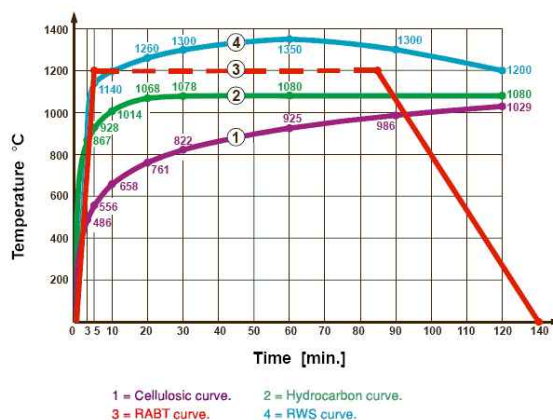
圖四為可能發生在隧道以及其他地下建築的火災類型，與一般建物標準火災之時間/溫度曲線比對。其中 RWS 荷蘭曲線是假設在裝載汽油或燃料油之油罐車起火燃燒，持續 120 分鐘，熱釋放率達 300MW 之最糟的火災情境。碳氫化合物火災曲線 (Hydrocarbon curve) 與 RWS 曲線都為油料火災，但差別在於 RWS 曲線則是火災發生在熱量不能或是很少向周圍散發之侷限空間內，如隧道等[8]。

而由圖四可看出 RWS 曲線在 5 分鐘內即達到 1200°C 以上，最高溫度達 1350°C。比對圖三 (T1 試驗曲線) 及圖四 (RWS 曲線)，可發現大貨車火災及油罐車火災之最高溫度皆約在 1350°C 上下，但油罐車火災維持最高溫度之燃燒時間約 120 分鐘，比大貨車火災維持最高溫度之燃燒時間約 30 分鐘，超出將近 4 倍的時間。再者，火災強度的持續時間依燃料數量和種類而定，換言之，燃料數量越多或燃料愈具可燃性，則其火災持續燃燒時間也相對拉長。

假設於隧道發生塞車現象，則陷在車陣內之車輛越多，攜帶之燃料數量也越多。一旦此時隧道遭受攻擊，則恐怖活動引發之隧道火災成長模式將擁有較油罐車火災溫度更高且延燒時間更長之火災境況。歸納上述結果，可推估不論是恐怖活動或油罐車火災，其燃燒物為高易燃性物體，一旦引燃起火將會於極短時間內（約 5 分鐘），甚至是瞬間爆發超大火勢並快速擴展，達到足以讓隧道崩塌之火災溫度，而有別於大貨車火災溫度之延遲現象。因此，一旦受陷災區內之用路人欲於此惡劣環境下生存之機率甚低。此外，長時間的高溫燃燒不僅造成隧道結構崩塌，導致二次災害，且也將考驗救援部隊對於尚未被波及之受困人員人命救助之效能。



圖三 於火源上方之氣體溫度分佈



圖四 火災溫升時間／溫度曲線

(三) 輻射熱[9]

Runehamar Tunnel 之火災試驗中，亦針對火場附近及上游之輻射熱程度進行量測，以評估火勢延燒到其他車輛之風險，並估算隧道壁面之熱載量（thermal load）和救援部隊接近火場進行滅火之可能性。尤其是距離火場上游 20m 之輻射熱程度格外重要，因為此距離通常為消防隊使用消防水柱（water jets）可有效作業的噴射距離。

另外，當火災輻射熱達 12.5kW/m^2 時便足以引燃大部分之物質，一旦在車陣中引爆攻擊則將造成延燒擴大。而當火災輻射熱達 5kW/m^2 ，則為身穿防火衣的消防隊員能有效作業的極限，一般在此情形下只能忍耐 5 分鐘，之後便難以堅持繼續工作。另有文獻 [10] 指完全著裝之消防隊員暴露於 5kW/m^2 的輻射熱下可工作 7 分鐘，但欲工作達 20 分

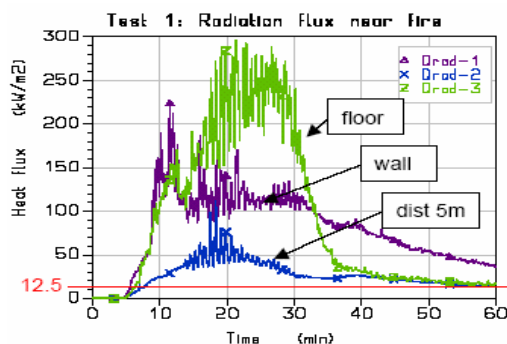
鐘以上，則輻射熱不能超過 $2\text{kW}/\text{m}^2$ 。

1. 火場附近之輻射熱程度

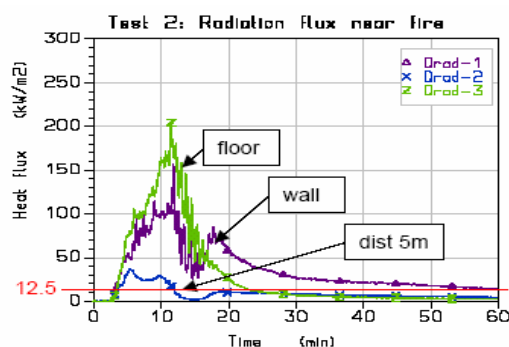
圖五至圖八為 4 個試驗於火場附近所量測之輻射熱通量。由圖五可看出 T1 試驗之地板熱通量為 $250\text{kW}/\text{m}^2$ ，隧道壁面熱通量之尖峰值為 $200\text{kW}/\text{m}^2$ ，平均值約為 $120\text{kW}/\text{m}^2$ ，距火場後方 5 公尺之熱通量仍有 $50\text{kW}/\text{m}^2$ 。4 個試驗中於距離火場 5m 處之熱通量皆超過引燃物體之臨界熱通量 $12.5\text{kW}/\text{m}^2$ ，意即此 5m 處之車輛將會被引燃。而 4 個試驗之不同處主要在於火勢引燃鄰近車輛後，其最具危險性的時間長短不同而已，如 T1 試驗中，距 5m 處之輻射熱約有 55 分鐘的時間皆超過臨界熱通量 $12.5\text{kW}/\text{m}^2$ ，而其他三個試驗約 7-10 分鐘。

2. 輻射熱程度與救援部隊滅火之可能性

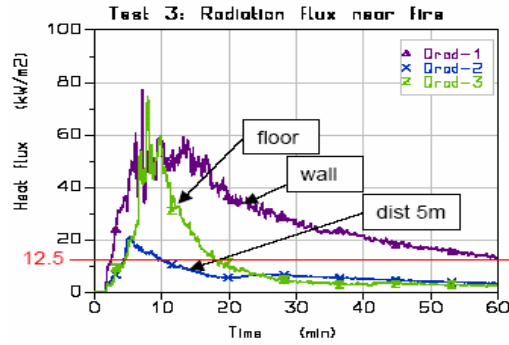
面對隧道火災，決定救援部隊能否使用消防水柱噴抵火源之重點在於距離火源上游 20m 之輻射熱程度。此外，消防隊員可作業環境極限為 $5\text{kW}/\text{m}^2$ 之輻射熱通量。圖九顯示，4 個試驗於距離火場上游 20m 之輻射熱通量均低於消防隊員所能承受之臨界值 $5\text{kW}/\text{m}^2$ ，因此面對類似火場是消防車輛與消防人員是可以接近作業。換言之，使用隧道消防栓的用路人與自衛消防編組是無法獨自接近熱釋放率達 70MW 以上之火災執行其滅火任務。另外，根據 T4 試驗於距火場下游 12m 之地面輻射熱尖峰值高達 $20\text{kW}/\text{m}^2$ (如圖八所示)。而 $20\text{kW}/\text{m}^2$ 是一般建築物發生閃燃之熱輻射強度，因此可預估在最高熱釋放率 70MW 之火災規模下，從火場下游進入隧道內進行救災活動幾乎是不可能的。



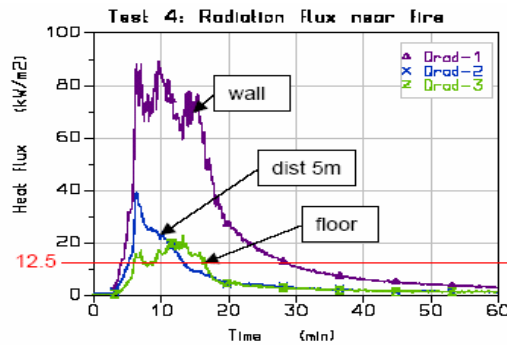
圖五 T1 試驗之輻射熱分佈



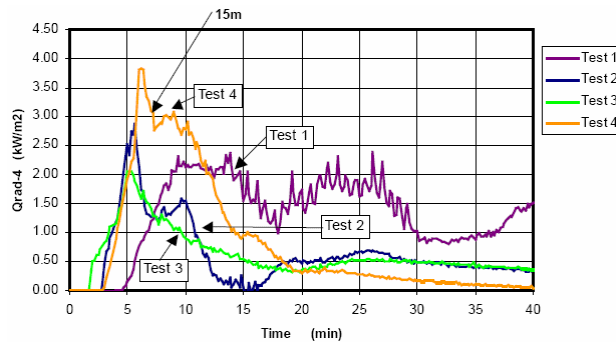
圖六 T2 試驗之輻射熱分佈



圖七 T3 試驗之輻射熱分佈



圖八 T4 試驗之輻射熱分佈



圖九 距火場上游 20 公尺處之輻射熱分佈

三、隧道火災之發展模式

一般恐怖活動大致可區分為危險物品置放及人為蓄意縱火等。而其火災成長模式則需考慮各種可能會發生之情境，若於隧道內置放危險物品，例如：一部大客車放置炸藥或遭後方車輛追撞後引爆，或一部小貨車載運危險物品並於隧道內引發大火，或者是人為的蓄意多處縱火等恐怖活動。不論是恐怖活動或一般意外車禍事故引發大規模隧道火災，由於起火點所引發之火焰高度受到隧道高度之限制，熱量無法即時散發，因此將產生更大的輻射熱引燃其他鄰近車輛，造成延燒效應。隧道火災依延燒發展過程在空間上可分為下列五個區域[11]，如圖十所示。

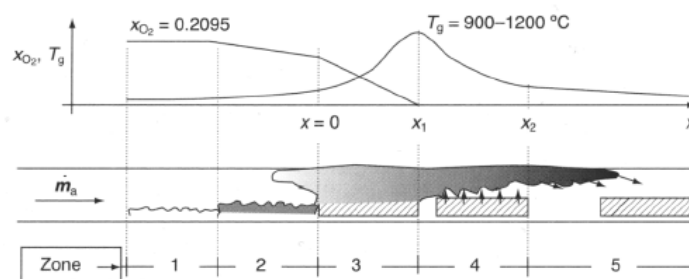
(1) 可燃物燃燒殆盡之冷卻區 (burnt out cooling zone)：指隧道內受火災延燒之車輛已完全燃燒殆盡，且該區域之煙層溫度呈現下降之趨勢。

(2) 餘火成長區 (glowing ember zone)：指被燃燒之車輛，其所殘留的餘燼仍處悶燒狀態之區域。

(3) 燃燒區 (combustion zone)：指現場擁有足夠燃料之車輛，其車輛燃料受到火勢不斷的加熱，導致燃料極快速的蒸發成可燃氣體，助長火勢燃燒。此區域的火勢猛烈程度可依其燃料的蒸發比率及熱釋放率而定，當隧道內之火災溫度到達最高點之溫度時，此瞬間氧氣將會燃燒殆盡。在氧氣完全燃燒殆盡時，僅須控制其進入之空氣即可掌握火勢大小，也就是通風控制燃燒。

(4) 燃料過多區 (excess fuel zone)：指此區有較多之可燃物，因此如欲控制火勢或縮短火災持續燃燒時間，必須將公路隧道內的可燃物（如車輛）移除至會受波及的區域以外，則火勢將因缺少可燃物而無法持續發展，進而受到控制。

(5) 預熱區 (preheating zone)：指火災透過輻射、對流及傳導等熱傳方式，將火災熱能不斷往尚未燃燒之可燃物區延伸，不斷加熱未燃燒之可燃物，使未引燃之可燃物釋出可燃性氣體並與空氣充分混合達燃燒界限後，當隧道內溫度達到著火溫度時，此區域之可燃物會立即被引燃。



圖十 隧道火災之延燒過程

恐怖活動引發之隧道火災不僅擴展迅速，範圍也較一般車輛事故火災廣泛，故遭受恐怖活動波及之車輛和人員大都無一倖免。因此對於恐怖活動引發隧道火災之救援策略上，須使受困於隧道內之車輛保持適當間距，避免延燒效應，故善用車行橫坑將車輛移往對向隧道則為必要的措施。救援部隊也可利用通風豎井將隧道劃分已遭受大火吞噬之熱區及尚未被波及之冷區，並儘速疏散冷區中受困人員。為避免二次災害發生，造成更多人員傷亡，受困人員可經由人行橫坑通往對向隧道進行逃生，或是沿著逃生標誌逃生至最近之避難室等待救援。

四、用路人避難行為分析

在過去的十幾年已有許多火災中人員行為之研究。最初是著重於火災初期人員的避難逃生行為，稱為避難開始階段 (pre-movement phase of the evacuation)。而進一步的研究是如何定量人員的避難行為，例如：避難開始階段所需時間有多長。因此，本節將探討於隧道火災中用路人之行為反應、步行逃生時間及可安全逃生之時間。

（一）用路人行爲反應

1991年 Proulx 和 Sime 在英國 Newcastle 的地下鐵車站執行了五次全尺寸避難實驗，並做成影像記錄報告。由實驗結果觀察到車站內人員之行爲，以及人員確認事件所耗費之時間。藉此掌握人員面對新的和未知的緊急情況中（例如火災）通常會有之行爲[12]。

根據觀察結果顯示人們不會因第一個火災線索或訊息而在事故不明確的狀況下即有所行動。這些線索訊息可能是含糊不清楚的，例如聞到煙的味道。人們不會因為這些含糊的訊息而進行避難，通常必須要有更多的訊息才會進行避難。如果事故狀況僅是模糊不清，則「不進行撤離」將被認為是適當的行爲。

但如果狀況持續存在並出現其他新狀況及訊息刺激人們，則人們會為了瞭解狀況而找尋更多的資訊，以確認事故的真實性。當獲得足夠的訊息，並傳達給他人「有火災正在發生」時，人們才會確定是有必要「撤離建築物或隧道」。由此可知，人們所採取的第一個行動不會是「撤離」，因為在撤離之前，人們可能會採取其他的行動。以隧道火災為例，用路人可能會試圖搶救車子上的物品、滅火或警告他人。如上所述，火災發生時與他人聯繫是典型的行爲模式。因此群聚關係是很重要的，例如人們經常群聚成小團體，決定要做什麼和討論可能發生的情況。

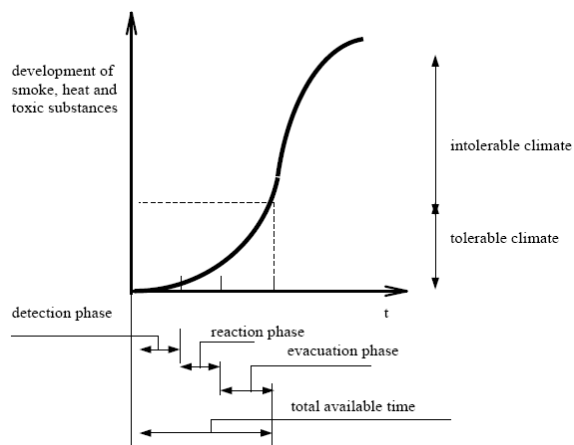
但對恐怖攻擊而言，瞬間已發出明顯之災害訊息，如劇烈的爆炸聲、火球等將造成災區附近之用路人驚嚇受傷及逼迫用路人避難。但對距災區較遠之用路人，則仍因資訊不明而會有上述之反應。

瑞典 Lund 大學曾於隧道內進行避難逃生實驗之研究[13]，其觀察結果顯示人們會留在他們的車內等待好長一段時間，即使是隧道內已有煙的存在。其中「坐著等待」為最初的典型行爲模式。若隧道內在發生堵車，則用路人會認為是「某些東西阻塞道路，且這件事將會被解決」，而並不會認為「火災已經發生」。這就是為什麼人們會選擇滯留在車內的原因了。必須經歷一段時間，在隧道實驗中的人們才開始離開他們的車子，但在真實的火災中，對某些駕駛者來說可能已經太遲了。

當隧道火災發生時，隧道內之用路人接收警訊被告知有火災發生後必須在有限的時間內，從「維持車行方向」之認知轉為採取「警告、求救、滅火及逃離」等緊急避難行爲。而用路人慣有的行爲反應階段可分為偵測階段（detection phase）、反應階段（reaction phase）及逃離階段（evacuation phase），如圖十一所示[14]。

- （1）偵測階段：火災突然發生至火災被偵測到的時間。
- （2）反應階段：火災被偵測到至用路人開始採取行動的時間。
- （3）逃離階段：用路人逃離的時間。（此指環境條件許可下用路人才有可能有逃生的機會）

所有的階段必須在隧道環境為不可忍受前完成。



圖十一 火災發展與用路人可逃生之時間關係

根據研究可知，用路人處於偵測階段時，會因還未察覺到煙、熱及有毒物質之危險性或者是未獲得充分且及時性的資訊前，而對於「火災發生」傾向不相信之態度，或是認為目前還不致於受到威脅而需立即逃生，造成用路人低估災害發生之危險性，並繼續維持原有的行為，例如：待在車內等待。當用路人確定有火災發生時，才會警覺到危險並進入反應階段，試圖採取補救措施，如進行滅火、搶救財產，或通報相關單位和求救等。而最後於逃離階段中，用路人可聽從廣播的引導和依循逃生指標逃至安全區域。

基於上述的分析，於偵測階段中用路人可能因所得火災發生之相關資訊不夠完整，致誤判而喪失可逃生的機會。即使於反應階段中，火災初期雖可透過用路人快速且正確使用簡易滅火設備，達到現場撲滅火災之目的，但前提是須滅火設備使用方便，且用路人能及時掌握於火災初期時之滅火時機。然實際上卻經常發生用路人不會使用滅火設備，以及未立即偵測到起火點而錯失初期滅火時機，造成火勢擴大。

而在逃離階段中，用路人大都需依賴隧道內之避難逃生設計及設備逃至安全處等待救援，如逃生路線、逃生指示燈、避難室、人行聯絡隧道等。但這些逃生設備及指標常會因辨識度不高、設置處不夠明確，或是用路人不熟悉配置而被忽略。此外，當災害發生初期，用路人處於未知狀況中，又只得到不完整、不正確的資訊，進而產生懷疑、矛盾甚至恐慌等情緒及壓力，因此大部分用路人會選擇等待，以得到更明確且充足的資訊及指示，並且部分用路人會選擇留在家人及財產（車子）旁等待資訊或救援。因此往往造成在某些事故中，人們未及時發現危險而導致最後無法避難逃生。例如白朗峰（Mont Blanc）隧道火災中，部份人員最後被發現罹難於車子的座位上而且還繫著安全帶[3]。

然而，由恐怖攻擊引發之隧道火災屬於極快速之火災成長，因此期待用路人自行滅火對於恐怖攻擊而言是不可能的。此外，恐怖活動一旦啟動，隧道內緊急廣播及照明設備可能也會因劇烈的火勢而失效。因此隧道管理單位應配置之消防組織，其人員應具備消防救災及防恐等專業訓練，才能面對嚴苛之救援環境。一旦發生恐怖活動，需第一時間掌握恐怖活動之火災境況，並有效的利用有限的資源進行災害損失控制。

(二) 用路人避難逃生

當隧道火災發生時，於消防救援單位未抵達事故地點前，用路人需離開車輛，步行至最近之人行聯絡隧道，等待救援或直接逃出。其中用路人步行逃生時間受步行速度及緊急出口設置間距所影響。另外，用路人安全逃生與否，則取決於火災境況之發展。

1. 用路人之步行逃生時間

研究[15]指出，男子平均自由步行速度為 1.4m/s，女子平均自由步行速度為 1.2m/s，高齡者水平逃生平均速度為 0.64m/s~1.12m/s。亦有研究[16]指出當高密度群流通過有限出口寬度時，將發生嚴重滯流，甚至產生如雪崩般推擠致死傷的現象。另外，同一空間中若有老年人、孩童和殘障者等避難弱者存在，將導致群流的步行速度降低。

假設雪山隧道內發生恐怖活動引發大火，則將可預期隧道內因事故發生後，而停滿受阻車輛，大量受困人員等待疏散。若再加上考量開放巴士、遊覽車等大型車輛之通行，則用路人步行逃生速度應將孩童、老年人及殘障者等避難弱者列入考量計算中。假設火災地點為某一聯絡隧道口附近，以水平逃生速度以 0.64m/s~1.12m/s 為計算參數，則受困但未受傷的用路人步行逃生至下一個距離 350m 之人行橫坑，將需 5.2 分鐘~9.1 分鐘之逃生時間。

然而，此 5.2 分鐘~9.1 分鐘的步行逃生時間與恐怖活動一旦成災將在 5 分鐘內引發超過 200MW 之火災強度相比，已嚴重威脅安全逃生之可能。一旦用路人因不熟悉隧道內之逃生設計及配置，或逃生指標及人行橫坑入口標示不夠明顯，導致用路人於逃生過程中錯過距離最近的人行橫坑，則用路人需再花更多的時間步行 350m 以上之距離尋找下一個人行橫坑入口，則勢必造成傷亡。

2. 用路人安全逃生之容許時間

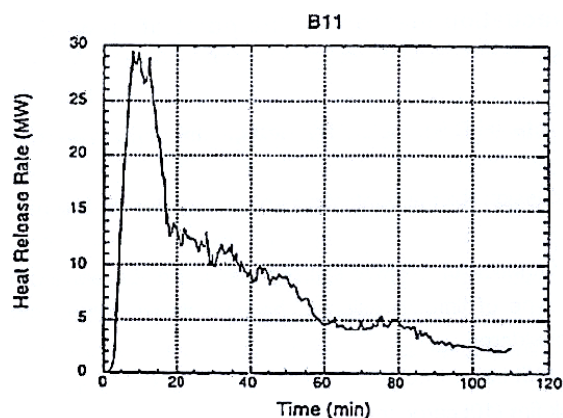
由圖十可知，用路人可於火災境況未達「不可忍受環境」(intolerable climate)前，於「可忍受環境」(tolerable climate)下安全逃生。換言之，用路人可安全逃生之時間(total available evacuation time)主要是取決於火災境況之發展速度，例如：隧道火災之熱釋放率及其產生大量濃煙之境況發展。一般而言，用路人可安全逃生之時間與火災境況發展速度成反比。

一般用路人只能在火災熱釋放率小於 1MW 之火災規模前進行第一時間滅火，而消防隊員則能對於 30MW 之火災進行滅火[17]。但當火災規模達 100MW 以上時，隧道處於此高溫條件下將使隧道結構崩塌、機電設備毀損，造成用路人及救援人員之危險。而其所產生的大量濃煙急速擴散及沉積，亦也將會造成用路人避難之困難度增加。

圖十二為巴士燃燒之火災成長曲線圖。此實驗用之巴士結構為聚酯玻璃纖維材料。由圖可看出只需約 10 分鐘，燃燒中之巴士即可達到最高熱釋放率 30MW[18]。此外，若縱向風速(longitudinal air velocity)為 0，濃煙會從起火點開始往兩邊擴散，而在無排煙的狀況下，濃煙的層流現象能保持 10 分鐘[5]。故保守推算自巴士火災發生起，若無

任何排煙或通風設施運轉之狀況下，用路人可安全逃生之時間約為 10 分鐘。但若車輛運載大量泡棉、塑膠等易燃物或危險物品並起火燃燒，其火災則呈極快速成長，而用路人能安全逃生之時間也相對縮短。

根據前述以平均水平步行速度進行計算，一般用路人將需約 5.2 分鐘~9.1 分鐘進行逃生。因此安全避難時間可以 10 分鐘為基準，則當隧道管理者一警覺到恐怖活動之發生，就必須在 5 分鐘內確定起火點並同時全數撤離隧道災區內之所有用路人。此外，一旦恐怖攻擊成災，則受襲擊之災區環境條件非常惡劣，人員死傷難免。故設置於雪山隧道內之洞口專屬消防隊（雪山分隊及特種消防隊）對於恐怖攻擊之人員救援應以災區上游陷在車陣內之用路人為搶救重點，俾阻止傷亡人數繼續增加。



圖十二 巴士之熱釋放率與時間的關係圖

五、緊急應變及救援策略

公路隧道由於特殊之空間特性，在隧道內發生車輛追撞、翻覆等意外事故或是人為蓄意縱火等恐怖活動，若處理不當通常會使得隧道重大火災事故一觸即發。其隧道火災產生的大量濃煙會在密閉的隧道內急速蔓延沉積，不但降低能見度、遮蔽事故監控設備（CCTV）之視野，以致無法即時監控災情外，更加阻擋照明，影響用路人避難逃生。而恐怖活動所引發之隧道火災通常為極快速之火災成長，猛烈的火勢及持續的高溫可能導致隧道本體建築結構之燒損崩塌，增加用路人避難逃生及救援人員應變搶救之困難性。此外，救援人員如何進入災害現場、如何有效的搶救受困人員（人質）及救護大量傷病患等等問題及突發狀況更是考驗反恐救援單位及隧道管理單位的應變能力。因此本文以雪山隧道火災模擬及設想恐怖活動之火災境況，擬訂恐怖活動攻擊隧道時之緊急應變及救援策略如下：

（一）加強用路人之逃生概念，提高隧道內逃生設計之辨識度

事故發生時的人命搶救及救援安全絕對為第一優先考量，任何救援動作（包括馳援作業、交控反應作業及現場處置作業等）均以人員安全為最主要考量，於執行緊急事故之處理時應以用路人之疏散及助救為首要目標。

隧道安全不能只依賴隧道設備、隧道管理者及消防應變單位之平時維護及救援，更應著重於用路人的習性及行爲。一般當隧道火災發生時，用路人之行爲表現往往會超乎

隧道工程師之預期，大大降低人員避難逃生設計之效能。為此歐洲各國便針對用路人慣有的行為特性，發展不同之隧道安全設計，於用路人通行隧道的同時，也無形中接受隧道安全之相關宣導。如法國 CETU 將用路人行為與隧道安全設計結合，發展出利用聲音、視覺方法（visual means）和及時資訊可變標誌（CMS）等方法來訓練用路人。另外，挪威 SINTEF 認為用路人常有與預期不同之行為，因此緊急應變計劃應簡單不複雜。瑞典 SP 認為避難逃生路線之設計需簡單易懂，並教育用路人使用[3]。而關於逃生標誌設計中，各國作為各有不同：

（1）奧地利 Plabutsch Tunnel：

逃生標誌為全自動化，可於緊急事故時自動顯示逃生方向。

（2）法國 A86 West Beltway Tunnels：

- 1.以顯著顏色之燈光號誌吸引用路人注意。
- 2.將逃生指示繪畫於逃生門周圍的整個牆面，加深用路人印象，如圖十三所示。

（3）義法 Mont Blanc Tunnel：

- 1.隧道牆面畫有標明逃生方向及距離之綠色導引線。
- 2.逃生門整面之顏色為顯著的綠色，並且逃生門上方有高輝度之 LED，提高逃生門之易識性。



圖十三 A86 West Beltway Tunnels 之逃生標誌

為提昇用路人安全逃生之機率，除了救援部隊的搶救效能外，隧道內逃生設計及標誌對於用路人逃生成功佔極重要之影響。因此應提高雪山隧道內逃生標誌及人行橫坑入口之辨識度，使用路人處在濃煙瀰漫之環境下，仍可快速找到逃生入口。

（二）災害初期應變之及時性及有效性

一般公路隧道發生火災時，除事故現場之用路人外，隧道行控中心值勤人員應於第一時間掌握事故現場境況，並立即通報相關之消防救援單位。為此，除了制訂一套完善之緊急應變程序外，行控中心值勤人員平時就應熟悉外，並且舉辦不定期的突發事故應變演練。俾在實際緊急事故發生時，行控中心值勤人員可於極短時間內掌握初期之事故境況，縮短應變時間，並依照緊急應變程序採取適當的應變措施，以達到事故初期應變之及時性及有效性。

若隧道管理者想要減少撤離人員的時間，則必須提供用路人有關隧道的資訊。而這些用路人所需求的訊息包括發生了什麼事，以及應該採取何種合適的行動。在一般的隧道火災中，避難警報與廣播系統可提供這方面的資訊和結果，以縮短避難逃生的時間，並且拯救人命。因此當緊急事故發生時，應由專責的廣播人員不斷通知及指導隧道內用路人安全之避難路線。但雪山隧道遭恐怖攻擊時，災區內之重要設施可能已損壞，故平時應藉高速公路休息站或各縣市防災中心附設之隧道空間橫坑模型，以強化用路人避難之自救能力。反恐人員也應參與雪山隧道之救災演練、熟悉緊急應變計畫、進入救援指揮標準作業程序（SOP）及救災據點和路線，於隧道發生恐怖活動時，能與行控中心和救災部隊等單位配合，以發揮最佳之搶救效能。

另外，駐守於雪山隧道前、中、後段之自衛消防編組可在火勢達 30MW 前採取及時偵知、確認通報、指導用路人避難、實施交管策略、啟動煙控設施、現場事故處理、初期滅火及急難救助等一連串之緊急應變行動。不過，當火勢達 30MW 以上，自衛消防組織應退居引導協助、支援後續消防救災人員進行搶救行動。因此第二線之消防救災人員其除具備豐富的救災經驗及專業的救災訓練及知識外，也應慎選生理及心理狀況皆保持在最佳狀態之隊員，採兩組共 8 人三條水線之救援編組進入災區。

若以一輛巴士起火燃燒，其熱釋放率約在 10 分鐘內即可到達 30MW。因此火災發生初期之 10 分鐘最為關鍵，第一線之隧道行控中心值勤人員及自衛消防編組除須及時掌握火災境況，採取必要及適當之緊急應變措施外，並即時提供第二線消防救災人員目前之火災境況、周圍空間結構和設施之配置等各項資訊，有助於消防救災人員作最正確之判斷，進而採取有效之救援行動。除此之外，事先擬訂的救援路線亦應隨實際災害現場境況、用路人避難地點等資訊作立即且正確的修改。消防救災人員依據上述資訊，藉由主隧道下方之導坑進入隧道，分組進行人員生命安全之救援及災害損害程度之控制。然而，就 10 分鐘內快速發展之災害境況而言，反恐人員能及時介入之可能性不高，故公警及消防人員宜擔負反恐應變作為之責任。

（三）設置自動冷卻控溫系統

以一般隧道火災事故而言，隧道未達不可忍受環境前，計算用路人可安全逃生時間約 10 分鐘，而用路人在事故發生後需 5 分鐘才可全數撤離至安全處等待救援。事故發展境況大都會超乎預期，致形成火災境況發展迅速、用路人來不及撤離，而消防救援單位又延遲搶救行動等慘況。因此，在消防救援人員未抵達事故現場進行搶救前，用路人除自我救援增加逃生機會外，其他則需要依賴隧道內相關消防滅火系統之作動，控制火災發展速度，增加用路人可安全逃生之時間。雖然面對火災熱釋放率高達 200MW 以上之恐怖活動或是油罐車火災，冷卻控溫系統於災區內雖無法發揮直接滅火之效能，但對於災區內外之環境卻有顯著冷卻降溫之效果。不僅使用路人及救援部隊不用處於高溫環境下進行逃生及救援，亦可延遲隧道結構因火災高溫之崩塌，造成二次災害。

綜觀歐洲各國隧道之通風、照明、消防、監控等安全系統設計，可發現各國已有陸續於隧道內設置撒水系統之趨勢，如挪威、荷蘭、法國、德國等。再者，瑞典 SP 針對長公路隧道提出以下建議：(1) 長公路隧道之通風排煙設計應為橫向排煙系統，以改善隧道排煙能力。(2) 隧道內應設置滅火系統，使隧道火災能於初期時即被有效控制。另根據挪威 Runehamar Tunnel 之實驗結果顯示：煙層迅速增加，5 分鐘內即完全被濃煙淹沒，人員只有 1~2 分鐘可逃生，但如果使用滅火系統使火災保持在 30MW 以下，則用路人使可有安全逃生。因此使用自助滅火系統可增加用路人逃生之機會[3]。

因此本文認為若能考量於雪山隧道內設置自動冷卻控溫系統，如細水霧或撒水系統，並在發生隧道火災時有效且及時運作，其不僅對於一般車禍事故引發之隧道火災，可快速控制其火災初期之擴大延燒，增加用路人可安全逃生之時間，及維持讓消防救災人員進入之隧道環境。對於恐怖活動或油罐車引發之大規模隧道火災，亦有冷卻降溫及避免或延遲隧道崩塌之效果。

(四) 階段性通行大型車輛之行車管制措施

裝載危險物品車輛一旦在雪山隧道內發生事故，對於人命、環境、隧道結構毀壞及隧道封閉而導致運輸中斷等，將會付出慘痛代價。另一方面，有關隧道禁止裝載危險物品之車輛通行，則提高企業界的經濟成本，勢必對政府交管政策形成壓力。這也將迫使重車勢必行駛其他更危險的路徑，例如經過市區或人口較稠密處，以整體觀之風險反而更高。由歷年各國隧道火災災例顯示隧道火災，隨存在之可燃物種類、數量、隧道空間尺寸、通風排煙系統運作模式與效能，有各種不同之可能性發展。

2001 瑞士聖哥達隧道火災發生後，日內瓦國際道路聯盟提出隧道安全改善措施[19]，建議(1) 應限制載運危險物品大貨車行駛隧道，(2) 前後貨車車距應保持 150m，(3) 限制每日貨車通行量，(4) 於隧道前設置檢測站，避免過熱、漏油等故障車輛駛入隧道。目前國際也已有許多國家，著手訂定公路隧道的危險物品運輸的管制規則。有關地區法令及管制規則的訂定、決策、責任及執法方面，也都取決於該地區當局及警察單位、隧道管理單位或專家意見。故國內未來開放大型車輛通行，應於車輛進入隧道前，預先進行監控及檢查，避免高危險性車輛進入。並且需確保雪山隧道有充足的事務救援專用車輛、人力素質及裝備[17]。

(五) 擬訂緊急應變及救援程序並定期演練

目前當災害發生時，各相關緊急應變與救援單位接獲通報後，雖能依現有資源至現場執行搶救作業，但目前因有效整合後續支援人力與物力之機制仍未完整建立，故無法充份發揮各類災害救災資源之整合、協調、指揮、佈署及調度之效能。再者，國內雪山隧道並未配置專屬之消防隊組織，且目前所稱之洞口消防隊，仍歸屬地方消防局，必須兼管轄區火災及相關勤務，成本效益難如管理機關之預期。因此一旦發生災變，除需動員當地及鄰近消防機關前往救援處理外，需配合救援的救災單位相當多，如公路警察單

位、醫療救護單位、拖吊單位、高公局工務段等。

為保障用路人行車安全及加速與掌握救援行動，需要針對公路隧道在各類災害發生時，如何整合運用既有之組織人力、硬體設備（如主隧道、連絡隧道、導坑、機電交控設備、消防防災設備、救援車輛、救援人力、警消人員、醫院等）、救災策略（災害緊急應變機制、救援指揮系統、相關單位支援體制）及平時人員演訓計畫等，擬定一套明確之緊急應變計畫及救援指揮標準作業程序（SOP），以利災害發生初期能有步驟、有系統地按現場災變情境，迅速採取正確之緊急應變及救災作業並且有效執行各單位間之橫向聯繫機制，俾利即時控制災情以減少人車之傷亡及既有硬體設備之毀損。此外，由高公局建置專責消防隊，平時兼管制站之查核，且於災變時為第一線應變人員。平時隧道安全之查核，可使專責消防隊能隨時提高警覺，嚴密防範各種可能危及隧道安全之可能性發生，且於災變時，可藉重專責消防隊員之專業知識及訓練，及時判斷最有效之搶救行動，以及迅速採取有利於救災之行爲，且成本效益佳，以最適當之人力運用，發揮最大之效能。

另外，結合行控、通風、消防、醫療、反恐單位舉辦各種不同火災情境之消防救援演練，利用綜合演練確定各單位在事故中擔負之任務及權責，使整個應變作業環環相扣。以白朗峰隧道為例，除了 24 小時每梯 14 位員工（其中包括 10 位消防隊員）輪班作業監控白朗峰隧道外，更與法國 CETU 結合，白朗峰隧道每年進行一次防火演習（fire exercise），每 3 個月進行一次全員安全演習（full-scale safety exercises），其隧道內之維修系統則每天測試並每週一次之火災試驗[3]。

六、結論

雪山隧道距離長，發生火災時的救援行動極富挑戰性，如何提供施救人員效率優越的消防救災裝備及較安全的救災環境是我們必須考慮的。隨著科技不斷的進步，國外陸續研發出新的消防救災器材，或許該設備並非適合台灣環境或目前技術尚未完全成熟，但對於改善人員防護及增加救災能力的未來性是可以期待的。雖目前國內並無發生過隧道恐怖活動，但依據本文觀察及探討之結果，認為恐怖活動於具有大量人流之地下空間皆有發生之可能，如地下街、地下車站、地下商場、車行地下道等。

本文依據各項文獻之隧道火災實驗，模擬雪山隧道遭受恐怖活動攻擊時將會引發 200MW~300MW 之隧道火災，且 5 分鐘內就可達到 1350°C 以上之高溫。此外，隧道火災長時間維持高溫燃燒，為主要造成濃煙密佈、隧道崩塌等二次災害之主因，傷亡人數也相對的急劇增加。

因此本文認為應評估雪山隧道各種火災情境（含恐怖攻擊），並事先設想各種事故發生的可能性，以及進行風險分析。就恐怖活動而言，一旦成功啟動恐怖攻擊，其所造成之人員傷亡是無法避免的，則於進行風險分析時，在災害程度設定方面應將人命傷亡列入考量，設定一可容許之傷亡人數。如此一來，救援部隊展開人命搶救時，才能精準

判斷救援時機，採取最適當之救援行動，以發揮最佳之救援能量。此外，除了制定緊急應變程序外，隧道行控中心值勤人員及管理人員皆應加強事故初期之緊急應變，建置一套完整之作業體系及標準作業程序，與救援部隊相互配合，以達到最佳的應變及救災效能。

參考文獻

1. The world's longest Road Tunnel, <http://home.no.net/lotsberg/data/tun10.html>
2. 內政部消防署，「全國火災次數、起火原因及火災損失統計表」，
<http://www.nfa.gov.tw/show/show.aspx?pid=19>
3. Steven Ernst, Mabendra Patel et., “Underground Transportation Systems in Europe : Safety, Operations, and Emergency Response”, P.3-30, 2006.
4. Haukur Ingason and Anders Lonnermark, “Large-scale Fire Tests in The Runehamar tunnel – Heat Release Rate (HRR)”, Proceedings of the International Symposium on Catastrophic Tunnel Fires, P.81-92, 2003.
5. PIARC, “Fire and smoke control in road tunnels”, world road association (PIARC) publication, 1999.
6. Yuguang Li, “Assessment of Vehicle Fires in New Zealand Parking Building”, P.28, 2004.
7. Haukur Ingason and Anders Lonnermark, “Large-scale Fire Tests in The Runehamar tunnel – Gas temperature and radiation”, Proceedings of the International Symposium on Catastrophic Tunnel Fires, P.93-103, 2003.
8. Promat Int., “隧道結構與設備的防火設計技術手冊”, Issue 1, P.8-14, 2001. ,
9. Tony Lemaire, “Runehamar Tunnel Fire Tests : Radiation, Fire Spread and Back Layering”, Proceedings of the International Symposium on Catastrophic Tunnel Fires, P105-115, 2003.
10. Bergqvist A., “What can the fire brigade do about catastrophic tunnel fires?”, Proceedings of the International Symposium on Catastrophic Tunnel Fires, P161-175, 2003.
11. Haukur Ingason, “ Fire Development in Catastrophic Tunnel Fires”, 2003.
12. Håkan Frantzich, “Problems of evacuation in catastrophic tunnel fires”, Proceedings of the International Symposium on Catastrophic Tunnel Fires, P.177-185, 2003.
13. Norén A., Winér J. “Modelling Crowd Evacuation from Road and Train Tunnels – Data and design for faster evacuations.” Report 5127, Dept of Fire Safety Eng. Lund University, Lund, 2003.
14. Ir. Evert Worm, “Human behavior influencing tunnel safety”, Dutch ministry of transport public works and water management,2003.
15. 黃進興，「高齡者水平逃生速度之研究-以台北市立安養機構高齡者為例」國立台灣科技大學建築系碩士論文，P.2-16-2-18，2002.
16. 何明錦、簡賢文等，「都市空間大量人群避難行為基礎研究」，內政部建築研究所，P.1-8，2000.
17. 王朝煌、簡賢文等，「雪山隧道重大災害救援指揮標準作業程序建立」，交通部台灣區國道高速公路局北區工程處，2005.
18. Hauker Ingason, “Heat Release Rate Measurements in Tunnel Fires”, Proceedings of the International Conference on Fires in Tunnels, P.98, 1994.
19. 周胤德等，「從近年國內外重大公路長隧道事探討隧道營運管理安全設施策略」，台灣公路工程，第三十卷第七期，民93.