

行政院及所屬各機關出國報告  
(出國類別：進修類)

赴瑞士巴塞爾參加第四屆國際隧道災害  
研討會議報告

服務機關：交通部  
                  公路總局  
出國人職稱：幫工程司  
                  姓名：陳俊堯  
出國地區：瑞士  
出國期間：91.11.30~91.12.6  
報告日期：92.2.28

G4/  
CO9105668

系統識別號:C09105668

公務出國報告提要

頁數: 69 含附件: 否

報告名稱:

國際隧道管理協會第四屆國際隧道災害會議

主辦機關:

交通部公路局

聯絡人/電話:

/

出國人員:

陳俊堯 局長室 幫工程司

出國類別: 其他

出國地區: 瑞士

出國期間: 民國 91 年 12 月 02 日 - 民國 91 年 12 月 04 日

報告日期: 民國 92 年 03 月 03 日

分類號/目: G4/土木工程 G4/土木工程

關鍵詞: 隧道

內容摘要: 近年來國際間幾次重大的隧道災害事故，使得隧道的消防安全受到熱烈的討論及研究，本屆的國際隧道災害會議，針對各國新興的計畫與研究成果及科技交換資訊，並就近年來的意外事故研討與分享實際經驗。參與之部分課程概分為：一、消防安全設計：(1) 國際消防標準NFPA-130規範。(2) 材料及結構耐火。(3) 逃生避難設施。(4) 隧道火警偵測系統及灑水系統測試。二、煙霧與火的流動與控制：(1) 重力自然排煙方法(2) 機動風扇輔助排煙(3) 重型大貨車火災的嚴重性三、消防與逃生安全(1) 緊急應變計畫(2) 緊急通風應變策略(3) 新的消防概念—FIREPASS

本文電子檔已上傳至出國報告資訊網

## 摘 要

近年來國際間幾次重大的隧道災害事故，使得隧道的消防安全受到熱烈的討論及研究，本屆的國際隧道災害會議，針對各國新興的計畫與研究成果及科技交換資訊，並就近年來的意外事故研討與分享實際經驗，研討資料十分豐富。

全部的課程分為防火安全的設計、火災與濃煙的控制、消防與逃生安全及 CFD（電腦計算流體動力）運算方法與驗證四大部分，主辦單位以分組方式分開研討，個人參與之部分課程概分為：

### 一、消防安全設計：

- (1) 國際消防標準 NFPA-130 規範。
- (2) 材料及結構耐火。
- (3) 逃生避難設施。
- (4) 隧道火警偵測系統及灑水系統測試。

### 二、煙霧與火的流動與控制：

- (1) 重力自然排煙方法
- (2) 機動風扇輔助排煙
- (3) 重型大貨車火災的嚴重性

### 三、消防與逃生安全

- (1) 緊急應變計畫
- (2) 緊急通風應變策略
- (3) 新的消防概念— FIREPASS

## 目 次

摘 要 .....	1
目 次 .....	2
一、目的 .....	4
二、過程 .....	5
2.1 行程 .....	5
2.2 研討會課程 .....	6
2.2.1 消防安全設計 .....	6
1 · 規範 .....	6
2 · 材料與結構耐火 .....	6
3 · 逃生避難設施 .....	7
4 · 隧道火警偵測及灑水系統測試 .....	7
2.2.2 煙霧與火的流動與控制 .....	7
1 · 重力自然排煙方法 .....	7
2 · 機動風扇輔助排煙 .....	8
3 · 重型大貨車火災的嚴重性 .....	8
2.2.3 消防與逃生安全 .....	8
1 · 緊急應變計畫 .....	8
2 · Gotthard Base Tunnel 的緊急通風應變策略 .....	9
3 · 新的消防概念— FIREPASS ( Fire Prevention And Suppression System ) .....	9
三、心得 .....	10
3.1.1 隧道消防安全設計 .....	10
1 · 美國消防協會 2003 年版 NFPA-130 標準 .....	10
2 · 鐵路隧道消防安全評估設計： .....	12

3 · 結合火場測試與風險評估以達隧道安全 .....	12
4 · 在隧道火災時確保疏散環境的安全對策 .....	13
5 · 逃生避難設施方案的選擇計畫—系統選擇矩陣法 (SCM) .....	17
6 · 混凝土結構應用火載當量 (Fire Load) 的設計—FLAMDOCS 程式 .....	26
7 · 隧道結構防火的耐火材料 .....	29
8 · 隧道火警偵測及灑水系統測試 .....	33
3.1.2 煙霧與火的流動與控制 .....	38
1 · 以自然排氣作為隧道排煙方法的研究 .....	38
2 · 限制流速法的評估試驗 .....	42
3 · 鐵路隧道以機動風扇的排煙測試 .....	44
4 · 隧道內重型大貨車火災的嚴重性 .....	45
3.1.3 消防與逃生安全 .....	47
1 · 重大隧道火災事故的緊急應變管理 .....	47
2 · 重大隧道火災事故的緊急應變計畫 .....	51
3 · 在隧道入口處使用噴射風扇以輔助緊急通風 .....	53
4 · 隧道大火災變是可以預防及壓制的 .....	55
<b>四、建議 .....</b>	<b>57</b>
<b>五、附錄 .....</b>	<b>60</b>

## 一、目的

本局辦理東西向快速公路漢寶草屯線 E407-1 標八卦山隧道全長約五公里，甫於九十一年十一月貫通，有鑑於長大型隧道營運通車後的防災措施與需求，故奉派參加國際隧道管理協會 (Tunnel Management International) 於瑞士巴塞爾舉行的第四屆國際隧道災害會議 (Tunnel Fires)，藉以蒐集資料，並整理心得報告。

## 二、過程

### 2.1 行程

會議舉辦地點位於瑞士第二大城巴塞爾市的 Hilton Hotel，該地與台灣時差為七小時，會議時間為當地時間 2002.12.2~2002.12.4 共三日。行程時間為 11 月 30 日下午由桃園中正國際機場出發經香港轉機至瑞士蘇黎士機場，而後再轉往巴塞爾，抵達時已是當地時間 2002.12.1 上午。會議於隔日上午 8:00 登記報到後展開一連三天密集的研討課程，而後於 2002.12.4 下午循去程方式搭機返回，並於 12 月 5 日深夜返抵。行程表如下

行程表

日期	起訖地點	行程摘要
2002.11.30~ 2002.12.1	桃園中正機場-香港-瑞士蘇黎士機場-巴塞爾	去程及抵達
2002.12.2~ 2002.12.4	巴塞爾	會議
2002.12.4~ 2002.12.5	巴塞爾-瑞士蘇黎士機場-香港-桃園中正機場	回程

## 2.2 研討會課程

本屆的國際隧道災害會議，針對各國新興的計畫與研究成果及科技交換資訊，並就近年來的意外事故研討與分享實際經驗，本次會議個人參與之部分課程概分為防火安全的設計、煙霧與火的流動與控制、消防與逃生安全三大部分，全部議程的課程表如附錄一。

### 2.2.1 消防安全設計

#### 1. 規範

美國消防協會（National Fire Protection Association）發布的消防安全標準規範 NFPA，除了應用在美國國家標準外，也為包括台灣在內的許多國家所採用。其中與隧道消防有關的為：NFPA-130—客貨運鐵路系統的標準，NFPA-502—公路、隧道及橋梁標準。近年來國際間許多重大的隧道火災事故，已經使得提升安全功能為隧道設計的首要考量，尤其是鐵路客運隧道災難往往造成慘重的損傷，因此提供鐵路防火新建規範及維修原則的 NFPA-130，更在國際中獲得廣泛的討論

#### 2. 材料與結構耐火

- (1) 現今的消防系統設計是以結合風險評估決定「設計耐火容量（design fire）」；由特定人造火場產生量化的火災大小和特性，藉以作為材料耐火測試的依據及消防設計的基礎。
- (2) 隧道結構在大火高溫作用下，鋼筋混凝土結構勁度、負荷承載容量的變化如何，是否仍能維持穩定？FLAMDOCS 程式以電腦數值運算提供合理的評估結



果。

- (3) 有效的隧道結構防火保護，有助於在高溫和長時間延燒事故中，將大火對結構的損害減到最小。耐火材料 Fire Barrier 135 提供熱的隔絕，抑制火災產生的熱流傳導到結構內造成結構破壞，與逃生通道及避難室等的隔熱

### 3 · 逃生避難設施

- (1) 在隧道火災時如何確保安全的疏散環境，包括緊急疏散通道的設置、交通管制設施及緊急通風灑水設施等。並以日本目前興建中的長隧道說明確保疏散環境的安全對策。
- (2) 隨著交通需求及工程技術的成長，隧道的型式及逃生避難設施日新月異，因此在避難設施型式的選擇上更加複雜及困難。系統選擇矩陣法 (SCMM) 以科學的歸納評分方式，對整個系統方案的決策可以提供理論依據。

### 4 · 隧道火警偵測及灑水系統測試

以一連串的全尺度 (full scale) 試驗，驗證現行隧道消防安全方案的設計，及釐清目前隧道災難的研究與討論中，產生的問題及彌補理論不足之處，並說明灑水系統及線型火警偵測系統的測試結果。

## 2.2.2 煙霧與火的流動與控制

### 1 · 重力自然排煙方法

- (1) 自然排氣系統係利用氣體密度的自然重力作用，在隧道火災中維持煙霧的自然分層，並由隧道頂的排氣孔利用煙囪效應將煙霧自然排出，且在隧

道底層會留有相當程度的乾淨空氣，以提供人員避難至安全地點的疏散環境。

- (2) 在隧道火災中，經由控制隧道縱向空氣流量以限制氣體流速可以阻止煙霧的蔓延，並且維持為穩定流的狀態使煙霧自然成層。重力自然排煙方法的優勢為單純且相當經濟，而且降低空氣流速還可以使火勢成長減緩。

## 2. 機動風扇輔助排煙

測試在隧道火災中使用機動性的風扇排煙的效果，將風扇放在隧道入口處產生強大的噴射氣流，引進新鮮空氣將煙及熱排向另一側，使消防人員能更有效及安全地進入火場並進行搜救行動。

## 3. 重型大貨車火災的嚴重性

在隧道火災中，重型大貨車 HGV (heavy goods vehicle) 事故無論在發生率及嚴重性，皆佔了相當大的比例，因此許多研究探討在 HGV 火災可能的範圍及規模大小，與蔓延至鄰近車輛的可能性。

### 2.2.3 消防與逃生安全

#### 1. 緊急應變計畫

- (1) 在隧道發生重大火災災害或相關緊急事故，管理當局如何應變及管理，相關防災計畫及應變管理的策略，必須依權責事先妥善規劃，其中包括責任區分、應變指揮及控制、災害通報系統與後勤支援等。
- (2) 說明緊急應變計畫需考量包含的內容，及製訂應變計畫的流程，為了能提供更具實際可行的計畫，

藉由檢討及測試演練的循環步驟，使各相關單位獲取經驗，並可在救災行動中更為緊密的結合。隨著科技、裝置及觀念的進步，過去的應變計畫是否適用於最新的狀況，應時常檢討及測試演練。

## 2 · **Gotthard Base Tunnel** 的緊急通風應變策略

正在興建的瑞士的 Gotthard Base Tunnel (GBT) 為深層的鐵路隧道，隧道結構為雙孔隧道，當列車發生著火事件且無法離開隧道時，事故列車的旅客將可利用聯繫兩孔隧道全長 325m 的避難橫坑到達另一孔隧道，同時救援站 (rescue station) 的緊急通風設備將啟動，藉由氣壓的不同以確保煙霧不會擴散到另一側 (非事故) 隧道內。同時隧道進出口的噴射風扇亦啟動以提升進出口與救援站間的空氣壓力，避免避難橫坑閘門開啓時造成事故隧道的煙霧流入及影響另一側 (非事故) 的隧道。

## 3 · 新的消防概念 — **FIREPASS (Fire Prevention And Suppression System)**

FIREPASS 系統可以在火災發生後，以降低空氣中氧氣的含量達到抑制燃燒的目的，並可以維持安全、可呼吸的逃生環境。該系統已在美國註冊專利並申請國際專利。FIREPASS 系統原理為利用氮氣降低大氣中氧氣濃度，以精確控制可提供人類呼吸所需氧氣但又可使物質無法燃燒。將 Hypoxic 氣體製造器放置在隧道口或通風口，輔助通風系統可產生氣壓排除煙霧，又可以防止新鮮空氣進入助長火勢。

### 三、心得

#### 3.1.1 隧道消防安全設計

##### 1. 美國消防協會 2003 年版 NFPA-130 標準

美國消防協會 (National Fire Protection Association) 發布的消防安全標準 (NFPA), 其中與隧道相關的有兩個部分: NFPA-130「固定式軌道運送和客運鐵路系統標準」(Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems), NFPA-502「公路隧道、橋梁和其他限制途徑公路標準」, 相關內容大綱如附錄二。

NFPA-130 標準係由製造商、安裝承包商、維護單位、保險公司、使用人、應用的研究單位、試驗室等專家學者組成的技術委員會參與編纂, 且必須有 33% 以上的代表由非利益團體擔任, 大約每隔三年更新, 為新建築提供消防安全規範和為老舊隧道的修復提供消防設施改善原則。相關資料請參閱該組織網站 <https://www.nfpa.org/codesonline/>。NFPA-130 規範了包含車站、路線、車輛、保養及存儲場等的最小消防和逃生需求, 目前除了是美國國家標準, 也是唯一的運輸和客運鐵路消防安全標準, 並應用在包括台灣在內的許多國家的運輸系統研究、設計上。2003 年版 NFPA-130 由型式、緊急逃生出口、通風及維生系統、車輛、車站和隧道、緊急應變六個任務小組從事必要的研究和起草修改建議。主要變化如下:

##### (1) 型式:

1. 改以 SI 單位制為主要單位系統並進一步標準化。

- 2.用詞上更為精確。
- 3.章節及編號系統改編。

(2) 緊急逃生出口：

- 1.安全避難場所的通風及照明。
- 2.緊急疏散電扶梯。

(3) 通風及維生系統：

- 1.允許特殊情況下自然(non-mechanical)通風系統的使用。
- 2.要求通風系統容量與可能在通風豎井之間的列車數目相符合。
- 3.風扇的高溫測試依據美國暖氣、冷凍和空調學會 (American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning) 第 149 號標準。
- 4.以溫度，輻射等等參數為時間的函數，於高溫的曝露環境下允許逃生的時間將予以縮短。
- 5.排煙控制以 CFD 計算煙層的高度。
- 6.承認火災時維生系統有可能失效；列如在 50 兆瓦能量火災的 30m 範圍內。
- 7.同意於超過一段時間後，可以不需要維生系統。

(4) 車輛：

- 1.性能基礎的設計選擇。
- 2.材料需求與聯邦運輸署和聯邦鐵路局(美國)一致。

(5) 車站和隧道：

- 1.修訂電纜的試驗標準。
- 2.修訂關於地下儲油槽的用語。
- 3.避難橫坑閘門的壓力要求。

4.月臺緊急出口開門的要求。

(6) 緊急應變：

- 1.火災警報修訂與與 NFPA-72"國際火災警報規定"一致。
- 2.緊急隧道疏散車。係以手動操作沿著軌道運動，並可以從事故現場很容易地撤除。

2 . 鐵路隧道消防安全評估設計：

以西班牙鐵路當局對高速鐵路網內長隧道設計的安全評估說明；近年來歐洲長隧道發生的許多嚴重事故，已經使得提昇用路人安全的功能在隧道設計中成為首要的考量。基本上在發生火災等嚴重事故的風險評估中，影響隧道安全的兩個主要設計元素即為自由斷面和長度。

在鐵路隧道中斷面與長度這兩個內在的設計元素，與行駛的列車速度有關，於初始設計時便依此考量，採將單一隧道長度分開為多個短隧道，或考慮各種架構所需的斷面選擇單孔、雙孔或多孔斷面。

3 . 結合火場測試與風險評估以達隧道安全

傳統隧道消防安全設計是以耐火標準試驗或歷史火場資料分析材料的耐火特性。目前的消防設計則結合了風險分析以決定設計耐火容量 (design fire)。

用於分析之輸入資料的精確度直確關係隧道安全設計的成功與否，所謂設計耐火容量是以藉由特定的人造火場產生量化的火災大小和特性，主要影響因素有燃燒的火源、個別材料的特性、材料之間的相互影響和通風等。對風險評估而

言，設計耐火容量可用作消防系統的設計基礎。

在本篇文章提出澳洲科學及工業研究院 (CSIRO)、州鐵路局和澳洲 New South Wales 鐵路建設公司正在進行的共同研究；並以鐵路車廂的試探性及大規模 (實地) 試驗 (1) 決定車廂自身耐燃的最小火源。(2) 建立車廂內火災試驗的溫度成長比及最大值。試探性試驗是用單獨的座椅經各種不同的火源，以超過 16 次的試驗驗證座椅皆不會發生自燃。大規模試驗以 2 公升的煤油燃燒並量測溫度的成長曲線和極限峰值，得到熱能放射率 HRR 的極限為 180kw。

#### 4 · 在隧道火災時確保疏散環境的安全對策

目前日本幾個長大型隧道正在興建中，本文介紹在這些計畫中部分隧道的安全疏散及消防設備的操作策略，並說明如何在隧道發生火警時確保一個安全的疏散環境。

在隧道發生火災時，應變操作的首要目標在於用路人的生命安全，而整個應變計畫包含例如交通管制、緊急設備運轉、滅火及援救等。從保護生命安全的觀點出發，應變計畫的安全標準是在火災發生後的 5 到 10 分鐘保持安全可靠的疏散環境。由多數的隧道災害經驗中，火災從開始發生到影響人員逃生大約為 10 分鐘，除非火災明顯地較小，否則管理人員應以對用路人提供可安全疏散環境為優先考量，而非預期初始滅火行動能有效控制火勢。安全疏散環境包括必須使用用路人皆能在 5 到 10 分鐘內到達避難坑道，通風控制系統運作維持可疏散環境，另外如果滅火噴灑系統在疏散完成前運作，則可能使疏散環境惡化。

在隧道事故中，人為判斷的錯誤將導致災難，包括忽視

交通號誌持續進入隧道、在車內等待導致延誤疏散、隧道應變管理人員處置錯誤等。因此在應變計畫中必須避免人為錯誤的判斷，減少人為因素的課題為：

- (3) 如何阻止不遵守號誌的車輛
- (4) 如何強迫駕駛人開始疏散
- (5) 隧道緊急事件操作的自動化

解決的方案有設置路柵、用廣播和喇叭催促人員疏散、自動監測系統啟動通風和緊急應變設施，並於火災發生 10 分鐘且確認所有人疏散完成後啟動灑水系統。

在火災發生後，不能預期執行上述應變計畫的管理操作人員能精確完成火災強度的確認、現場及相關單位的聯繫、照明通風及灑水設備的正確運轉等程序，況且在火災後煙霧經常會模糊監視器 (CCTV) 的視界，使得判斷更為困難。且除了盡力減少管理操作人員的人為因素外，用路人的錯誤判斷仍易於使災難擴大，因此尚須針對人為錯誤擬訂對策。

人為判斷錯誤的主要原因包括：

- (1) 視覺因素：號誌訊號的忽視、能見度不佳、訊號的見解差異。
- (2) 聽覺因素：廣播聲音的忽略、未聽到信號、聽不清楚、訊號的見解差異。
- (3) 精神因素：混亂、焦躁不安、憤怒、輕忽、沮喪放棄等。

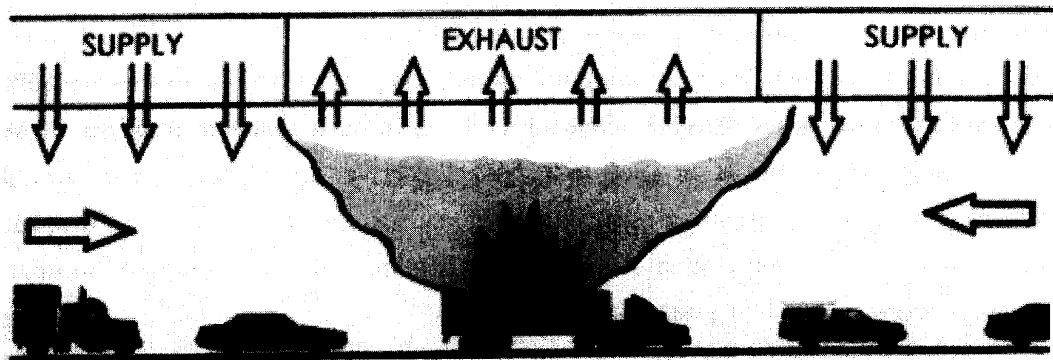
擬訂對策為改進標誌的尺寸和位置、以廣播催促旅客離開車輛以避免在車輛內而沒看見資訊信號等，而因為火災現場十分混亂，因此必須用適切的警報音、足夠的音量及語音，而視覺和聽覺因素的改善可降低精神因素和減少人為錯誤。以下介紹三個日本隧道的消防應變對策。



第二東名-名神高速公路隧道群 ( TUNNELS ON THE SECOND TOMEI-MEISHIN HIGHWAY ): 為連接東京和名古屋全長 320 公里的第二東名線和連接名古屋和神戶全長 170 公里的第二名神線組成。由於這條高速公路位於多山地區，因此隧道總長度佔 20% 以上，隧道標準斷面為雙孔雙向分隔各三車道，車道寬 3.75m，斷面積為 150m<sup>2</sup>，為縱向（順車行方向）通風系統。消防緊急應變對策是使用噴射風扇以壓制縱向氣流速度由正常運作的 5~10m/sec 降低至 2~3m/sec，以使事故的上游側能避免煙霧的回捲，甚至在有嚴重交通擁塞時，必須控制煙霧使事故兩側保持安全，在這個情況下，操作噴射風扇以控制及保持空氣不流動，使在火災爆發後的 5~10 分鐘內製造一個安全的疏散環境。

因為隧道斷面較以前建造的隧道大得多，因此在其中之一的清水 3 號隧道進行一個大規模的火災試驗，以了解燃燒後煙霧的行為。試驗研究結果顯示對應於雙向隧道在大斷面上有相稱的結果，然而避免煙霧回捲的臨界速度變得更大。另外與一般雙向隧道一樣，在三車道隧道將因大量車流和車輛迴轉增加二次事故的可能性。

東山隧道 ( THE HIGASHIYAMA TUNNEL ): 位於名古屋市的中央，連接市中心和東部，全長 3.2 公里並將在 2003 年初通車，為雙孔雙向分隔隧道，單向為雙車道，車道寬各 3.25m，為橫向通風系統。因名古屋為日本最大的城市之一，所以每日擁擠的交通量是可以預見的，應變的通風策略為以不平衡操作，結合數值模擬各種狀況的零氣流速度控制 ( zero velocity control )，使得在火點的兩側保持安全的疏散環境，零氣流速度控制的操作概念如圖一所示：



圖一：以通風系統控制煙霧之操作概念

新宿隧道 (THE SHINJUKU TUNNEL)：位於東京中心的新宿隧道包含幾個交通擁擠路線的匯集連接處，因此安全分析的十分複雜。這個隧道也是單向雙車道 (2x3.25m) 隧道及橫向通風系統，全長 10 公里；將來連接另一個隧道構成總計全長 20 公里的品川線。因此它可望成為日本中最長的隧道。由於這個隧道在東京中央營運，它開放後一天預期交通量是 60,000 到 80,000 個車旅次。為了應付交通擁擠，如同東山隧道也研究零氣流速度控制。在這個隧道，緊急避難橫坑 (連接另一側隧道) 為每 350m 一處，它使旅客能以 1.0~1.5m/s 的速度在 4 到 6 分鐘後到達。考量一輛滿載旅客車廂的疏散時間為 1 到 2 分鐘，疏散指令的廣播必須在火災發生後 2 到 3 分鐘之內發出。當操作員不能確認火災大得足以需要疏散時，疏散指令必須自動地發出。

綜觀以上隧道的應變對策為：

- (1) 如果火災事故在隧道擁擠的情況下發生，緊急應變系統必須控制空氣 (煙霧) 流動速度以確保安全的疏散環境。
- (2) 為了提高消防控制系統的可靠性，必須盡可能使

應變操作自動化，以排除人為因素影響。

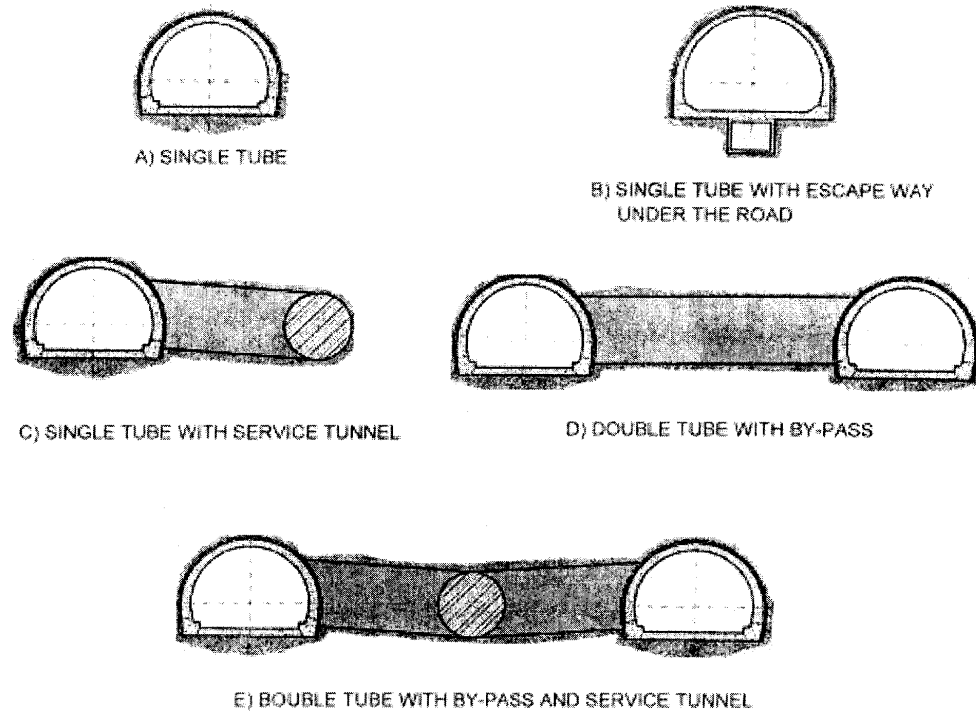
- (3) 考慮視覺、聽覺或者精神因素等人為判斷錯誤是必然的，消防設備和應變操作必須對此預為因應計畫隧道的應變策略。

## 5. 逃生避難設施方案的選擇計畫—系統選擇矩陣法 (SCM)

隨著交通需求及工程技術的成長，隧道的型式及逃生避難設施也在加速的發展中，目前的長隧道經常被設計為兩個獨立的雙孔隧道，或以單孔隧道伴隨一條平行的緊急避難隧道，但也有因交通需求及財政考量，採傳統式單孔雙向的型式，無論採取那一種型式，皆需規劃逃生避難設施。除了新建的隧道外，舊有的隧道在改善安全的計畫時，因增建逃生通道常有相對的困難，所以在避難設施的選擇更加複雜。本文提出以系統選擇矩陣法 (System Choice Matrix Method) 作為方案選擇的建議。

一些目前隧道的設計型式如圖二所示：型式 B 將緊急逃生隧道建造在道路底下，並利用開鑿的避難室連接到主隧道。型式 C 於隧道主體外設置維修通道；維修通道係在施工階段時藉開挖以提供地質情況作為主隧道施工之參考，或作地質處理之工作廊道與緊急避難逃生通路，在通車營運後作為平時維修人員之通道，在隧道內發生事故時，作為緊急避難及救援處理人員通達使用。型式 D 為在雙孔隧道之間藉橫坑連繫，作為避難及緊急使用，例如本局辦理的東西向快速公路漢寶草屯線 E407-1 標八卦山隧道即為此型式。型式 E 為雙孔隧道之間以橫坑連接至維修通道，國內目前設計施工

中最長的北宜高速公路雪山隧道的逃生通路系統即為此型式。



圖二:隧道避難通道佈設型式

在隧道消防安全的操作觀點上，逃生避難無庸置疑是最受到廣泛討論其中的一部分。因為它並無明確的資料可供依循，而是假設使用人的行為模式，且隨著個人的求生能力不同而有所差異，當然經由教育及訓練將會提高使用效能。

系統選擇矩陣法（SCMM）分析的目的在於以數學方法歸納決策過程選擇準則的應用。首先從一系列的推論決定主要的架構，由評估準則在各種不同方案下的相對得分作初步評估，其次以一系列不同的觀點對各個方案評估決定最後實

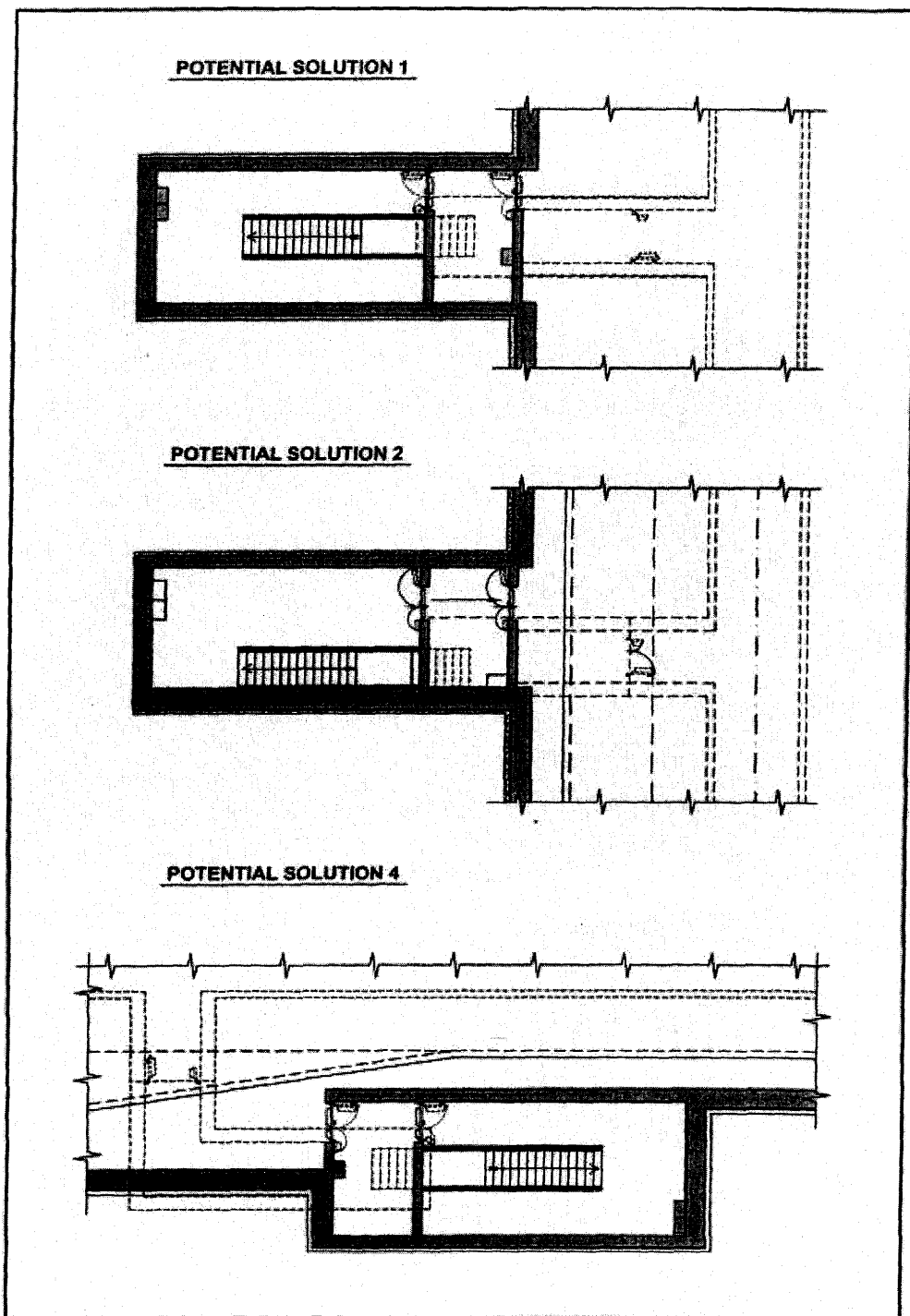
行的方案。SCMM 對於整個系統方案的決策可以提供理論依據。逃生通道及避難室的參考準則如表一。

表一：逃生通道的參考準則

Item	Standard/Recommendation	Application field	Prescription
1	<p><b>ITALY</b></p> <p>Home Office Circular Fire Protection Services 15 February 1951, no. 16</p> <p>Home Office Circular Civil Protection and Fire Protection Services June 1980, no. 16</p> <p>Ministerial Decree 9 April 1994</p>	<p>Public Premises for Shows</p> <p>Hotel and Tourism Sector</p>	<p>Exits, corridors, doors, stairs and passageways in general: minimum width 1.20m or multiples thereof depending on the number of people and the position with respect to escape route</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Stairs and landings must have railings or banisters with a height of at least 1m and support the stresses due to rapid exodus of people under panic</li> <li>Stairs must have rectangular treads and a minimum free width of 1.20m</li> <li>Treads must be between 30 and 33cm deep and risers must be between 15 and 18cm high</li> <li>Treads and risers must be the same size and shape for entire length of stairs</li> <li>Stairs must be straight and must have not less than 3 steps and not more than 15</li> <li>Landings must have same width as the stairs</li> <li>All stairs must have handrails fitted within a slot in wall or jutting out not more than 8cm</li> <li>Fire resistance of main structures and doors must be at least 120 minutes</li> </ul>
2	<p><b>ITALY</b></p> <p>Min. of Transport Decree 11 January 1988, no. 51</p>	Tunnels and underground railway stations	<p>As well as indicating the same requirements for stairs, escape routes and corridors as in public premises, there are the following specifications:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Maximum crowding must not be more than 5 people per m<sup>2</sup> of surface area</li> <li>Doors and main structures with a fire resistance at least of 120 minutes</li> <li>Emergency lighting: min 5 lx</li> </ul>
3	<p><b>FRANCE</b></p> <p>Interdepartmental circular 25 August 2000, no. 63</p>	Road tunnels	<ul style="list-style-type: none"> <li>Minimum surface area of shelter 50m<sup>2</sup></li> <li>Minimum width of shelter 4m and minimum height 2.20m</li> <li>Doors and main structures with a fire resistance at least of 120 minutes</li> <li>Minimum distance between access routes to escape routes 400m for tunnels longer than 500m</li> <li>Emergency lighting: min 10 lx average 2 lx at every point</li> </ul>
4	<p><b>GERMANY</b></p> <p>Requirements for equipping and operation of road tunnels</p>	Road tunnels	<ul style="list-style-type: none"> <li>Distance between escape routes 350m</li> <li>Doors and main structures with a minimum fire resistance of 90 minutes</li> </ul>
5	<p><b>USA</b></p> <p>NFPA 130 – 2000 Edition</p>	Tunnels and underground railway stations	<ul style="list-style-type: none"> <li>Minimum evacuation time: 6 minutes</li> </ul>

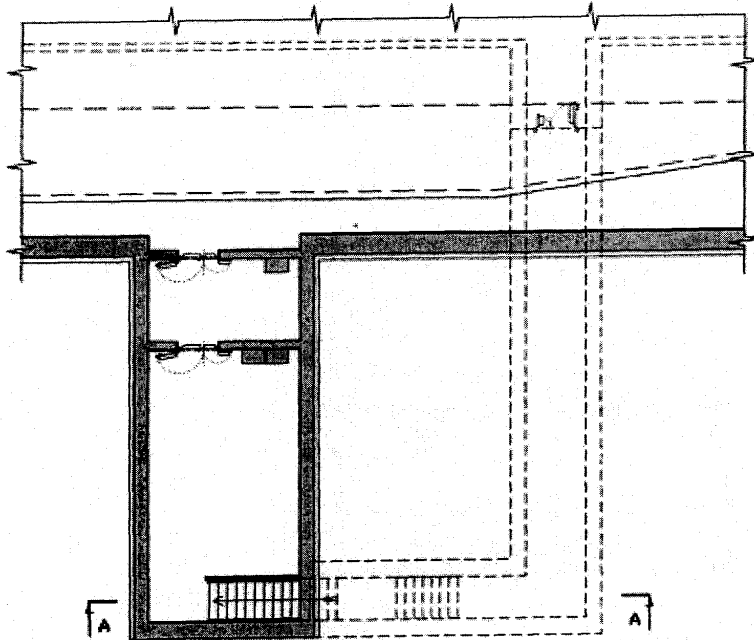
以下以評估逃生避難室的佈設方式為範例，首先決定主要架構，分為架構 1：避難室垂直於隧道軸線，及架構 2：避難室平行於隧道軸線。架構的選擇考量與結構及施工有關；

在架構 1 必須額外於隧道結構外開鑿坑道，架構 2 則是需擴大隧道的開挖面。架構 1 依避難室階梯及逃生通道路線又可分為三種型式 (PS1~PS3)。架構 2 又分二個次架構:完全或部分位於擴大斷面 (如避車道) 內，再依逃生梯位置 (中央、側邊、底端) 共分為六種型式 (PS4~PS9)。示意圖如圖三~圖五。

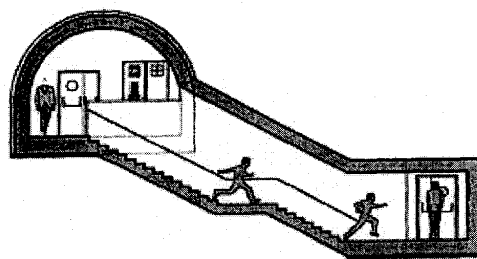


圖三：可能方案 PS1、PS2、PS4

POTENTIAL SOLUTION 3

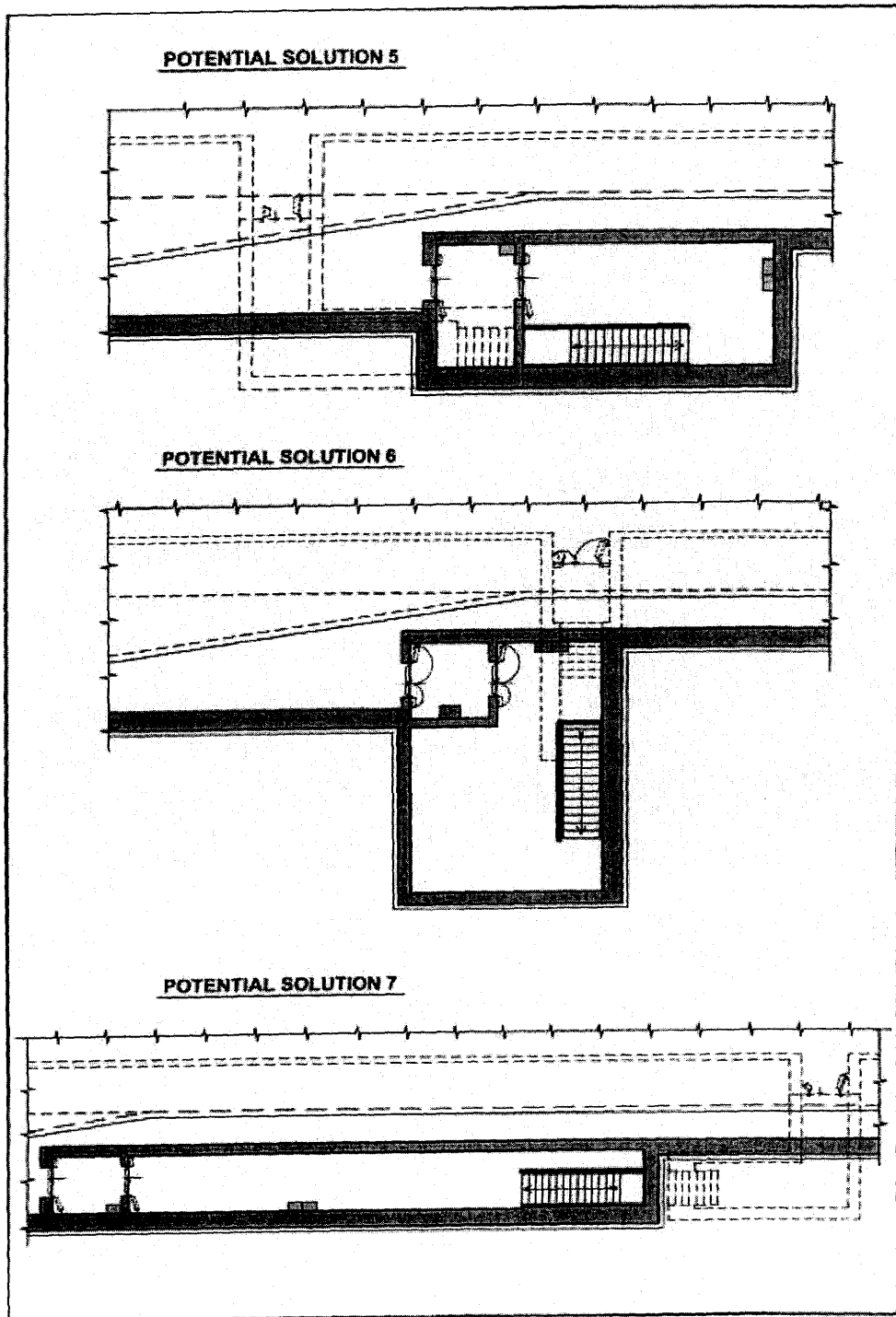


CROSS-SECTION A-A



圖四：可能方案 PS3



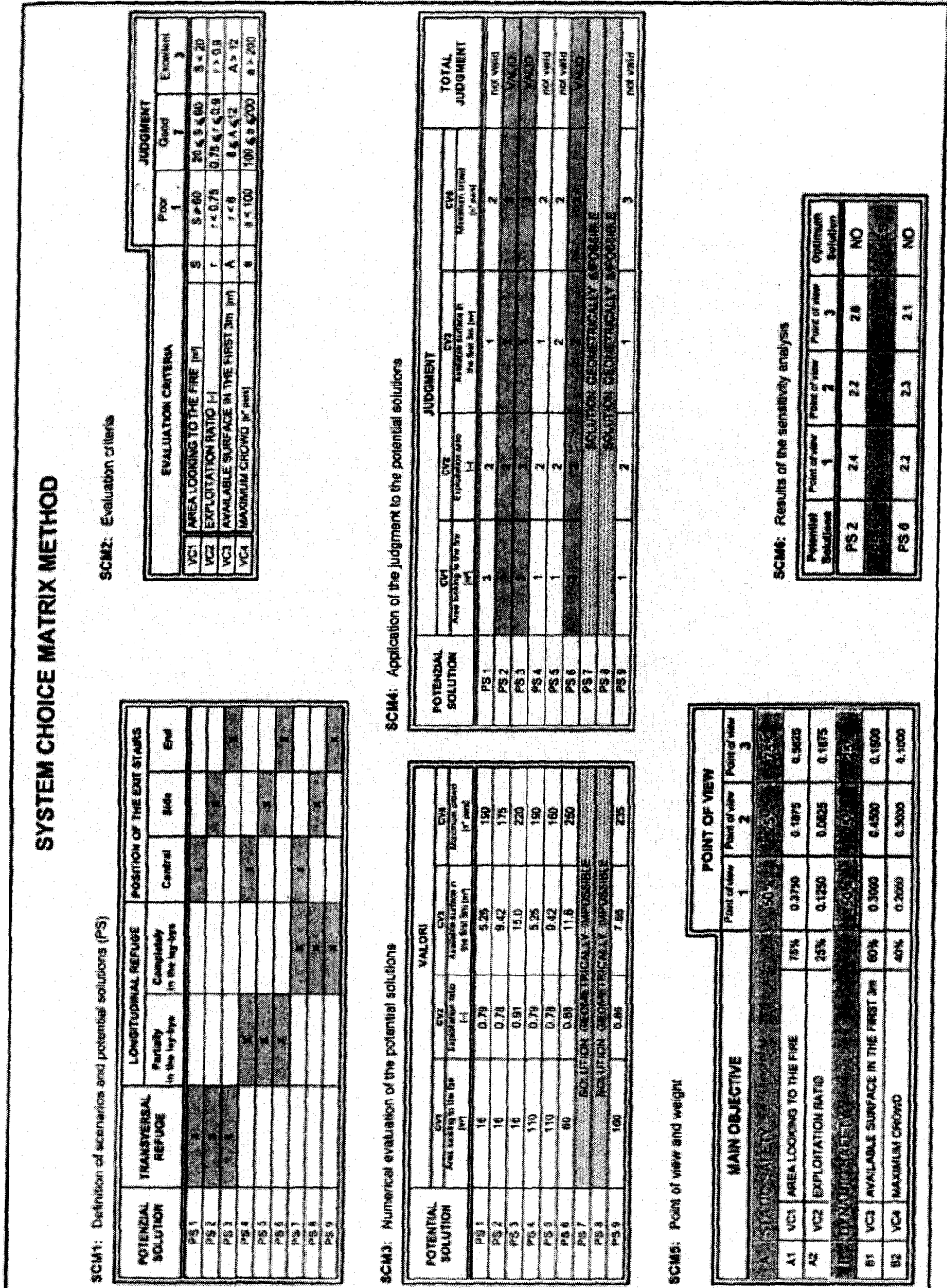


圖五：可能方案 PS5、PS6、PS7

評估的準則有四項；評估準則 1 (VC1) 為避難室曝露於火場的表面積。評估準則 2 (VC2) 為避難室使用與建造面積的比值，比值越大開發效益越大。評估準則 3 (VC3) 為避難室門後方(例如 3m 內)的空間大小；進入逃生門後的空間越狹窄越容易造成人潮的阻塞。評估準則 4 (VC4) 為以每平方公尺不超過五人之標準計算避難室可容納的總人數。評估的流程及結果如表二。SCM2 為評估準則的評分，各方案的數值及評分如 SCM3、SCM4，再將有任一評估準則項目得分為 1 的方案捨棄不用，選出可用的方案為 PS2、PS3 及 PS6。最後再依不同觀點列出評估標準所佔的權重如 SCM5，將可用方案在各評估標準的得分乘上權重，歸納出最佳的方案為 PS3。但是依執行面來看，PS2 及 PS3 皆是可行的方案，可另外再行工期及成本的考量加以選擇。

在應用系統選擇矩陣法 (SCMM) 決定避難室及逃生通道的型式時，有一些選用的參考及定義必須先予釐定，如可能解決的方案、選用的評估準則、標準評分的選擇、不同觀點評估的權重等，另外再加以越精確的分析將得到最佳的選擇。

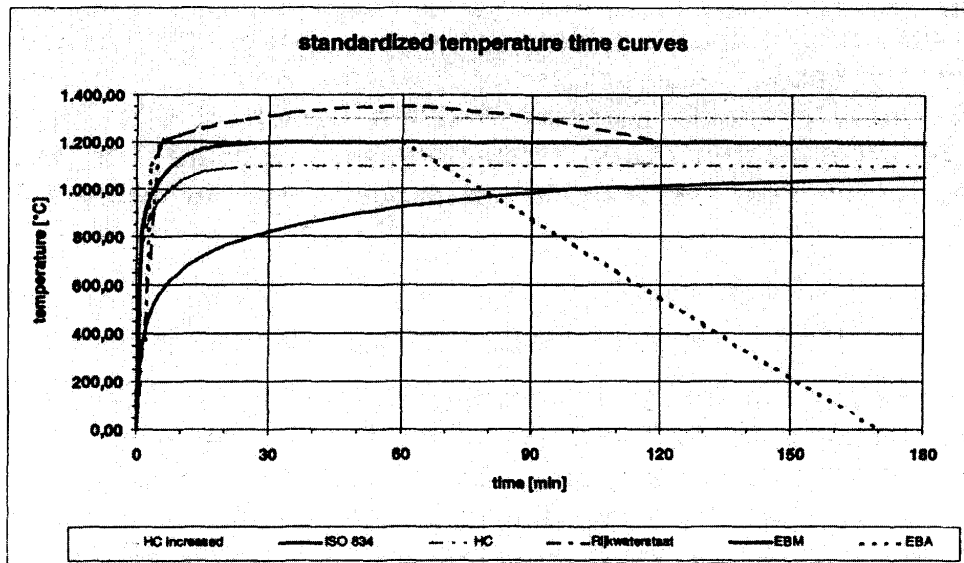
表二：SCM 評估表



## 6 · 混凝土結構應用火載當量 (Fire Load) 的設計—FLAMDOCS 程式

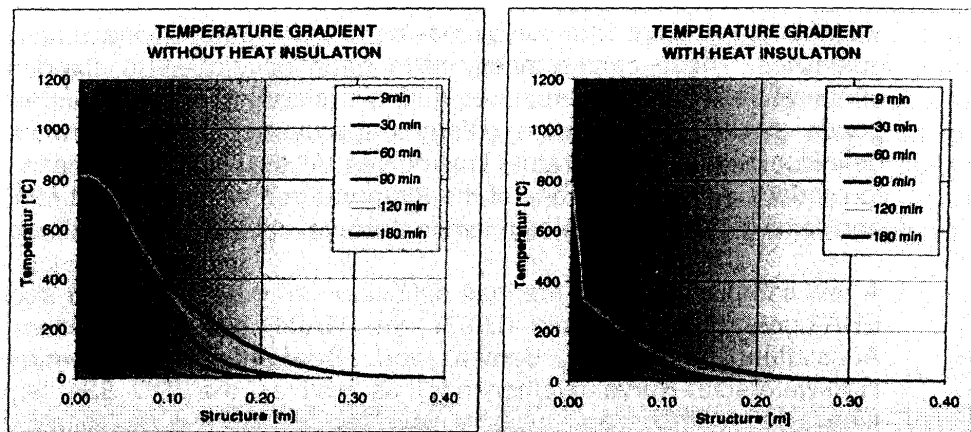
由隧道大火引發的嚴重災難事件已使得隧道安全逐漸被重視及討論，像是安全裝置、通風設備及火載當量對結構的影響，其中對混凝土結構在高溫作用下的負荷承載容量越發受到重視。本文提出的 FLAMDOCS 程式，除了簡單計算模組的作用，並且提供量測混凝土結構負荷承載容量必要的工具。

火載當量 (Fire Load) 為燃燒產生的時間溫度曲線對應相當的單位面積燃料數量。基礎假設是將非線性的溫度變化及材料特性，在燃燒 (溫度加載) 的初始階段視為線性，並維持一段高溫階段，溫度時間曲線如圖六：



圖六：溫度時間曲線

根據以上的定義，以解微分方程式可得熱量的熱傳播方程式，求得在任一時間結構內的溫度梯度如圖七：



圖七：溫度梯度曲線

火載當量結構分析假設結構皆已規格化，包括靜載重、活載重、水壓力、大地應力等，並且需先找出結構材料（包括鋼筋和混凝土）特性與溫度的變化關係。依據任一時間  $t$  之溫度梯度求得之斷面溫度  $T$ ，斷面內的任一剖面將有不同的材料特性（如楊氏係數、降伏強度）。斷面內任一點的楊氏模數  $E$  可寫為：

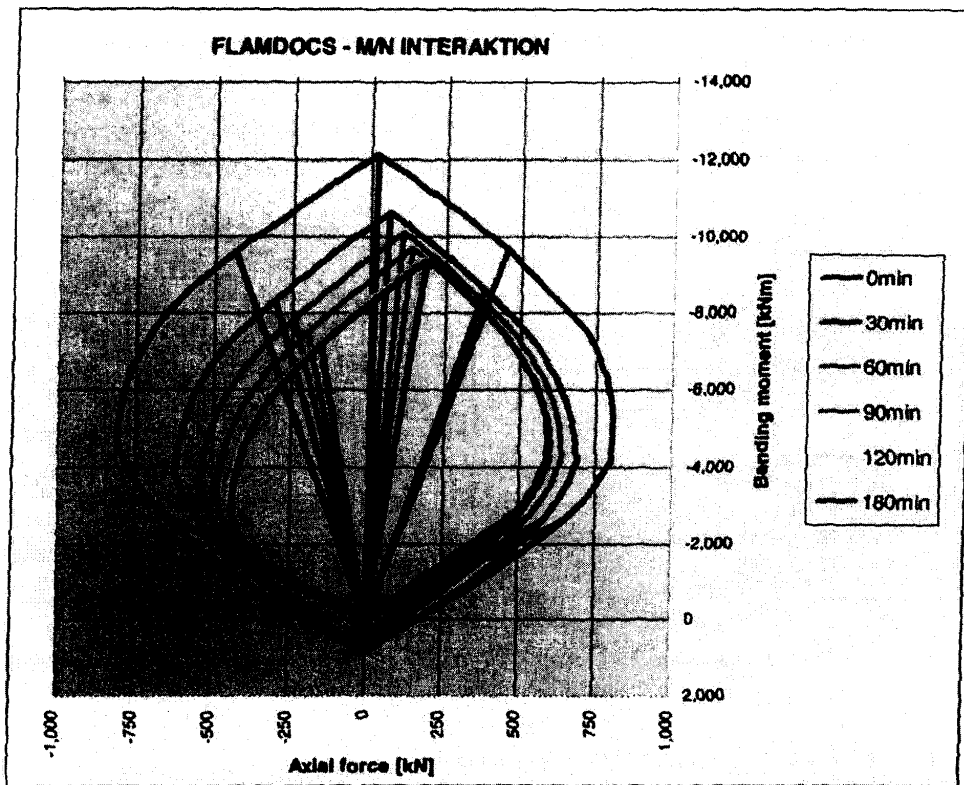
$$E_m = f(T(f(t)))$$

同樣地，鋼筋及混凝土的材料強度可寫成：

$$f_{c,m} = f(T(f(t)))$$

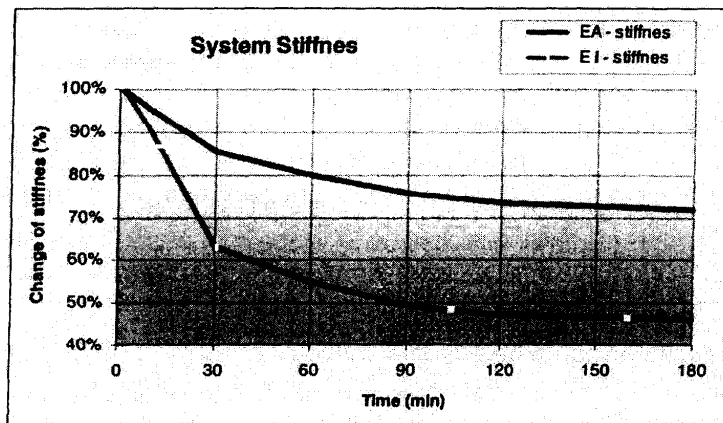
斷面內任一單元的材料特性將可由該單元的溫度得到，依全斷面積分得到全斷面的材料特性，在給定的時間依其溫度梯度可得到唯一的值。材料特性的積分計算是以開發的軟體程式 FLAMCDOCS 運算，求出在假設之極限破壞型式下的極限負荷承載容量。

隨著斷面內溫度的增加，斷面的極限負荷承載容量將降低，如圖八 M/N 交互影響圖：



圖八：在不同溫度加載下 M/N 的交互影響圖

顯然溫度變化對材料性質有很大的影響，如同溫度加載區域勁度對全斷面勁度的貢獻，在溫度加載時整體勁度產生重大的改變。如圖九。



圖九：溫度加載下勁度 EI 及 EA 的變化

FLAMDOCS 程式不需要複雜的計算，利用其簡單構架分析模組便可以模擬在高溫作用下鋼筋混凝土結構勁度的變化、負荷承載容量的減少及其他反應，並為任何結構在受到火載時，結構是否仍維持穩定提供另一種合理的評估結果。另外，還可以研究各種防火保護、隔熱材料等其他結構耐火措施的作用，並提供經濟且有效的設計根據。

## 7. 隧道結構防火的耐火材料

在隧道火災事故發生時，會以長時間高溫持續燃燒，在保護人身安全和隧道結構方面的消防設施已受到廣泛的討論與研究。由案例分析得知交通量的成長與隧道火災事故有密切的關聯，特別是特殊車輛（大貨車、載運易燃物車輛）流量的增加使嚴重事故的風險大大的提高。

選擇有效的隧道結構防火保護，有助於在高溫和長時間延燒事故中，將大火對結構的損害減到最小；包括生命安全、

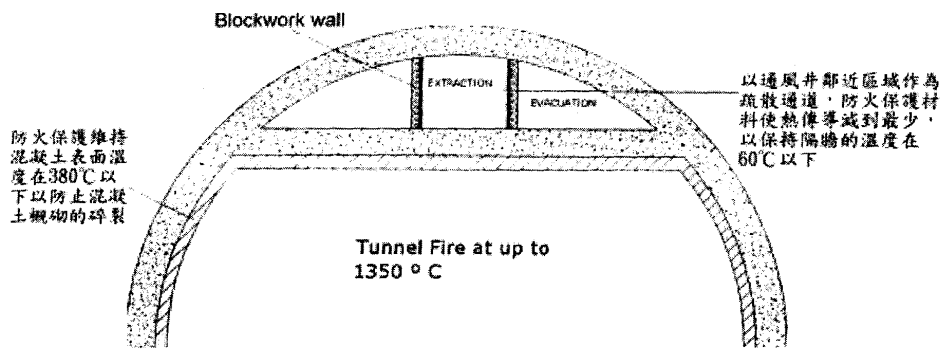
結構損害、隧道封閉時間及隧道維修等。隧道結構防火需求的考量如表三：

表三：隧道結構防火需求

隧道火災影響層面	項目
生命安全	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.安全避難室的防火保護</li> <li>2.逃生設施的防火保護</li> <li>3.滅火/疏散期間崩坍的預防</li> <li>4.預防隧道建造期間因爆發大火引致崩坍。</li> <li>5.避免因隧道在火災後封閉造成替代路線的交通量增加導致進一步的事故/火災。</li> </ol>
經濟	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.避免隧道崩坍造成運輸網路中斷。</li> <li>2.避免隧道營運損失。如果在建造期間發生火災將另導致因計畫延遲對承包廠商的財務衝擊。</li> <li>3.避免隧道因火災後封閉道路，使既有商業或旅遊產業受到衝擊影響。</li> </ol>
環保	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.封閉隧道後，道路改線對環境衝擊的影響。</li> <li>2.封閉隧道後，選擇替代路線需避免造成交通衝擊。</li> </ol>

在大火的高溫下隧道結構防火材料提供熱的隔絕，抑制火災產生的熱流傳導到結構內造成結構破壞，與逃生通道及避難室等的隔熱，示意圖如圖十：





圖十：隧道襯砌與維生管道的防火保護

結構防火使用的耐火材料以有效的熱隔絕材質提供長時間的高溫阻抗，本文介紹耐火材料—Fire Barrier 135。相關材料特性、成本、試驗如表四、表五、表六。溫度時間曲線圖如圖十一。

表四：Fire Barrier 135 的一般特性

Composition	45.8% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 25.5% Si <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 24.8% CaO 15.0% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Density	1550 kg/m <sup>3</sup> Installed 1100 kg/m <sup>3</sup> Dry
Cold Crushing Strength	4.0 MPa Dry
Adhesion Strength	0.63 MPa
Tensile Strength	0.80 MPa (after curing)
Modulus of Elasticity	4050 MPa (after curing)

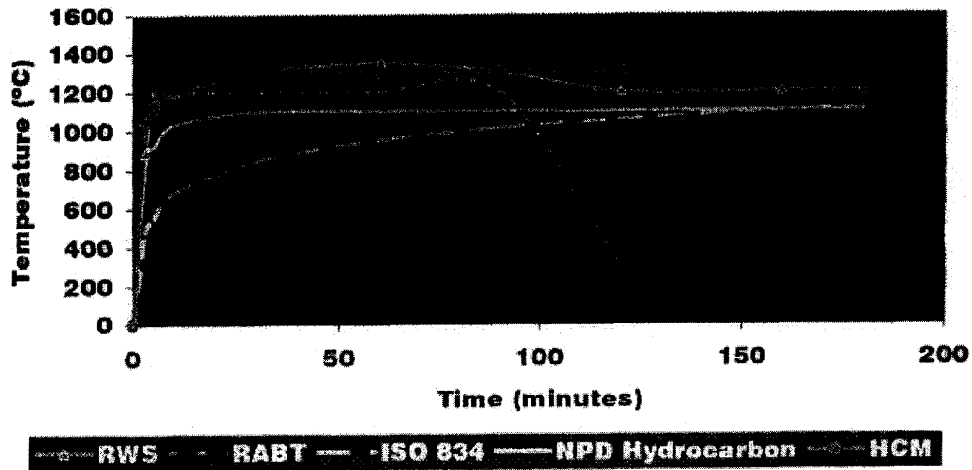
表五：有效完成兼具耐火保護和美觀的隧道襯砌成本。

System	Installed Cost Range
Typical Vitreous Enamel Cladding	€ 200 to 320 per m <sup>2</sup>
FireBarrier System fire protection surface finish combined	€ 50 to 160 per m <sup>2</sup> * *cost varies as fire curve, concrete lining specification, fire duration all influence thickness specification and hence cost

表六：在 SINTEF 實驗室經重覆的耐燃試驗結果

Concrete Thickness 400mm	First Exposure Interface Temperature at 30 mins	Second Exposure Interface Temperature at 30 mins	Third Exposure Interface Temperature at 30 mins	Third Exposure Eventual interface Temperature at End of test
	TEST DURATION 34 mins	TEST DURATION 42 mins	TEST DURATION 120 mins	TEST DURATION 120 mins
Average Temperature Measured: Interface FireBarrier and Concrete Slab	59°C	88°C	84°C	297°C ( RWS requires less than 380°C )

\* 經三組試樣以 RWS Curve 耐燃試驗取平均值



圖十一：結構耐火系統試驗採用的代表性溫度/時間曲線

## 8 · 隧道火警偵測及灑水系統測試

2000/2001 年間荷蘭運輸部的隧道安全中心 (Centre for Tunnel Safety of the Ministry of Transport) 在鹿特丹

(Rotterdam) 附近的 Second Benelux 隧道實施一連串的全尺度試驗，以了解現行的隧道消防安全方案產生的問題及彌補理論不足之處，在現有方案的設計及救難等研究討論中，有些主要問題需要釐清：

- (1) 更加了解在火災延燒時，煙霧和熱的傳播速率與逃生的關聯。
- (2) 縱向通風系統對火災規模及成長的影響。
- (3) 了解大型灑水系統於火災生成階段的效應；包括煙霧和蒸氣、隧道氣流（煙霧）的熱度和及其他接近火源車輛的溫度。
- (4) 當火災發生時，線型火警偵測系統的偵知時間及正確裝設位置。
- (5) 幾種逃生指示標誌型式的可見度。
- (6) 以 CFD(電腦運算流體動力) 方法模擬隧道內火場的正確性。
- (7) 提供了解隧道內火災的規模及特性，並有助於在消防設備的選擇上得到深入的了解和決策。

一系列的測試共分成以下四類：

- (1) 煙霧和熱的傳播：以正庚烷/甲苯產生的小型火災。
- (2) 火災中通風系統的影響：三部汽車和三部卡車的火災。

(3) 灑水系統的測試：一部小貨車火災、二部大卡車火災、一輛裝載大卡車的大型火災。

(4) 火警的偵測：八個小型火災和五個結合其他類型的測試。

本文介紹第(3)及(4)類型的測試。

灑水系統的測試：

灑水系統的目的在於能降低火場溫度與鄰近車輛的溫度以避免火勢擴大，因此採用大型灑水系統結合縱向通風系統。灑水系統的缺點如下 (Piaro 1999)：

- (1) 如果沒有適當的添加物，水會導致汽油等化學物質擴散使火勢更加嚴重。
- (2) 在火熄滅後，可能因易燃的氣體持續產生而引發爆炸。
- (3) 蒸發的水汽可能造成人員的受傷。
- (4) 對於車內的悶燒，滅火效果不佳。
- (5) 煙層降溫後無法成層造成彌漫在整個隧道內。
- (6) 維護費用高。
- (7) 灑水器不易以手動操作。
- (8) 降低能見度。

本文的測試除檢測以上第(3)、(4)、(5)及(8)項，並增加

- (1) 對隧道內溫度、熱輻射及可見度等生存環境的影響。
- (2) 灑水系統延遲啟動的影響。

測試的結果如下：

- (1) 煙層降溫後無法成層：在火場的下風處無法成層，火場附近在火降溫或熄滅前可以形成層流。

- (2) 能見度降低：灑水系統開啓後，煙霧、水霧和蒸氣使能見度降低到 10m 以下。
- (3) 灑水系統延遲開啓：在灑水系統開啓前必須封閉交通，以避免駕駛人因能見度降低和驚慌造成二次事故。延遲開啓灑水器導致在一段時間後火勢擴大，但是在開啓之後即可將火澆熄。立即開啓灑水系統可以使試驗的鋁罩降溫，火雖然不會熄滅但可控制火勢。
- (4) 灑水系統對車輛內的悶燒滅火成效不佳：密閉車廂內的火勢很難被熄滅，但可以控制在一定的大小。試驗的模擬卡車貨艙內幾乎完全燃燒並產生大量的煙霧，但是在延遲 10 分鐘後開啓灑水系統的試驗中，貨艙被燒毀並在灑水系統開啓後熄滅。
- (5) 隧道內的蒸氣和生存環境：雖然在火熄滅後五分鐘仍無法進入火場下風處，但是在量測火場下風處（空氣）溫度，理論上尚未到達傷人的程度。
- (6) 降溫效果：在灑水系統開啓前廂內溫度高達 350℃，開啓五分鐘廂外後溫度降到 100℃，再五分鐘後降到 50℃。
- (7) 其他：額外試驗灑水系統在縱向通風速率 5m/s 及無通風狀態下，通風系統使一半的火滴吹走了，因此在通風狀態下必須將灑水量增加（開大）。

結論：

- (1) 灑水系統無法熄滅密閉車廂內的火。
- (2) 灑水系統在開啓後將立刻降低能見度，使逃生路徑難以看見。且駕駛人無法在「人造雨」中安全

的駕駛。

- (3) 在小於 15MW 能量的火場不會產生大量的蒸氣。
- (4) 在 25MW 以下的火場熄滅後，下風處的生存環境雖然嚴苛但尚不危急。
- (5) 其他車輛能被降溫，減少火源跳蔓延至其他車輛的機會。
- (6) 在 5m/s 的縱向通風下，灑水系統的滅火效果將降低。

線型火警偵測系統的測試：

裝設火警偵測系統的原因可歸納以下兩點：

- (6) 火警自動偵測後可以立即主動反應；如警告用路人、通知消防隊、啓動通風設備。且不需要人為操作。
- (7) 使用自動閥門控制的灑水系統，需要自動偵知火警的發生及發生地點。

在隧道管理上人為操作是最薄弱的環節，因此在荷蘭一此消防部門要求新建隧道裝設自動火警偵知系統。一些型的火警偵知原理如下：

- (1) 能見度：偵測煙霧是要比偵測火焰來得快，但是需要很多的偵測點以便能快速偵知。
- (2) 毒氣：與 (1) 相同，但是需時常維修。
- (3) 熱幅射：偵測熱幅射要比煙霧慢一些，對於縱長範圍的偵測需要許多偵測點以避免被車輛或貨車遮蔽。
- (4) 溫度：偵測氣流（煙流）溫度的上升。線型偵測系統比較簡單也可以偵測熱幅射，且不須經常維護。

- (5) 影像處理：可以同時偵測火焰及煙霧，但是需要足夠的濃煙以與原來的牆面對照，因此在低照度及牆面髒污時易受干擾。

線型偵測系統於溫度測量的進一步研究發現，可以同時偵知火災的發生及發生地點，本文一系列的測試以得到下列問題的答案：

- (1) 線型偵測系統如何對不同型的火場作出反應。
- (2) 在火災發生到偵知需要多少時間。
- (3) 火場位置偵測的精確度。
- (4) 縱向通風的氣流對偵測的潛在影響如何。
- (5) 橫斷面上火場位置與電纜距離長短的影響。
- (6) 卡車垂直的排氣管是否會引發錯誤的警報。
- (7) 會發生那些意料之外的問題。

火警偵測的結論如下：

- (1) 在風速 1m/s 以下且火源位於偵測纜線下方緩慢發展的火災，可在 1-3 分鐘內被偵知。
- (2) 如果緩慢發展的火災不是位於偵測纜線的下方，或風速大於 3m/s，則可能無法偵測到。如偵測到警報可能已延遲 5 分鐘或更久後才發出。
- (3) 快速發展的火災，視風速可在 3 分鐘內偵知。
- (4) 位置的精確度大約在 5m 之內。
- (5) 要避免誤報需將系統調整設定為較不靈敏，相對地在風速大時即無法偵知。

### 3.1.2 煙霧與火的流動與控制

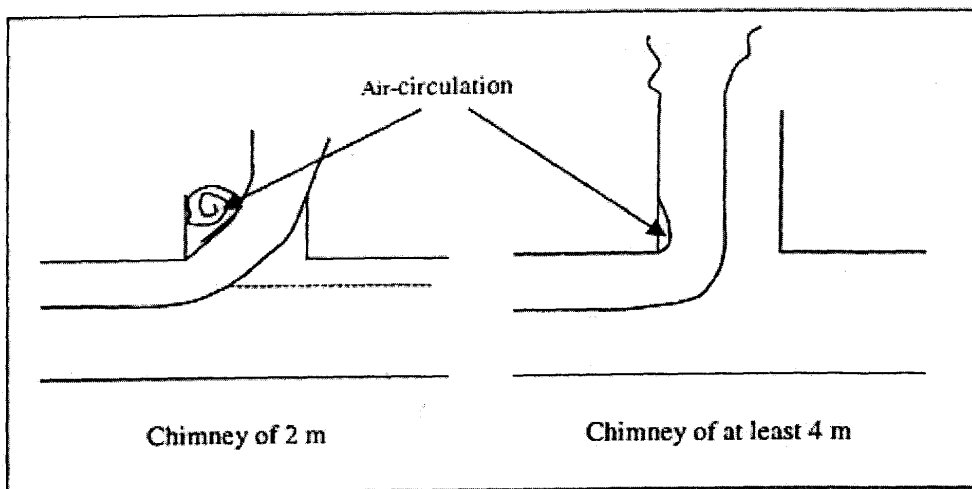
#### 1. 以自然排氣作為隧道排煙方法的研究

長隧道在雙向車流的情況下，採縱向通風系統是非常不經濟的，且必須具備複雜的通風管路及大能量的風扇及風管。本文提供在不同熱釋放比（Heat Released Rates）的隧道火災中僅以自然排氣系統控制煙霧流動的實驗及數值計算結果。以 1/20 比例的隧道模型試驗和數值計算分析相互對照，可知在僅以排氣孔及煙囪自然排氣的方式下，因氣體密度的自然重力作用，可以維持煙霧的自然分層，且可以保存相當乾淨的空氣在隧道底層。

隧道模型試驗以 1/20 的比例模擬一個矩型斷面 5m 高、10m 寬且全長超過 200m 的公路隧道，火源位於二個的排氣孔中間，排氣孔（位於頂版）距火源各 40 公尺。利用空氣和氮氣的混合氣體來模擬 0~30MW 火源產生的對流。首先以 0.1~5MW 不同的 HRR 測試 2.5M 寬 2M 高的排氣孔系統，結果發現大部分的煙會溢過排氣孔往隧道出口流動。而後將排氣孔寬度改為全隧道寬度，結果發現可以有效控制煙霧在兩個排氣孔道之間。再依不同之排氣孔高度（煙囪長度）試驗結果如下：

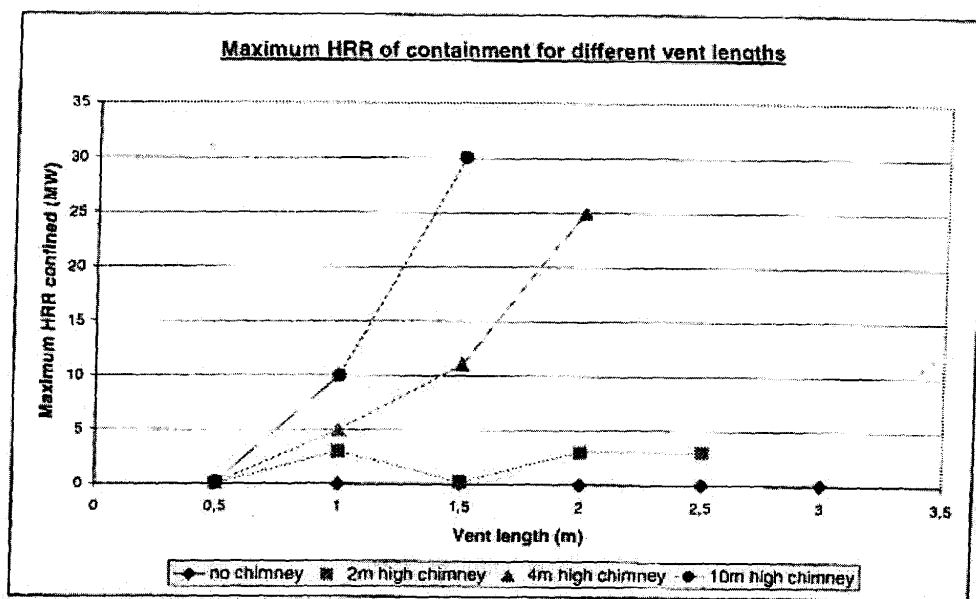
- (1) 排氣孔高度至少要 1m 煙霧才會受到牽引，低於 1m 則煙霧會越過排氣孔。
- (2) 2m 的排氣孔高度比 1m 高度有顯著的改善，但是排氣孔高度與排煙效率並非成正比，由圖十二可知 2m 高的排氣孔效率為何不佳。





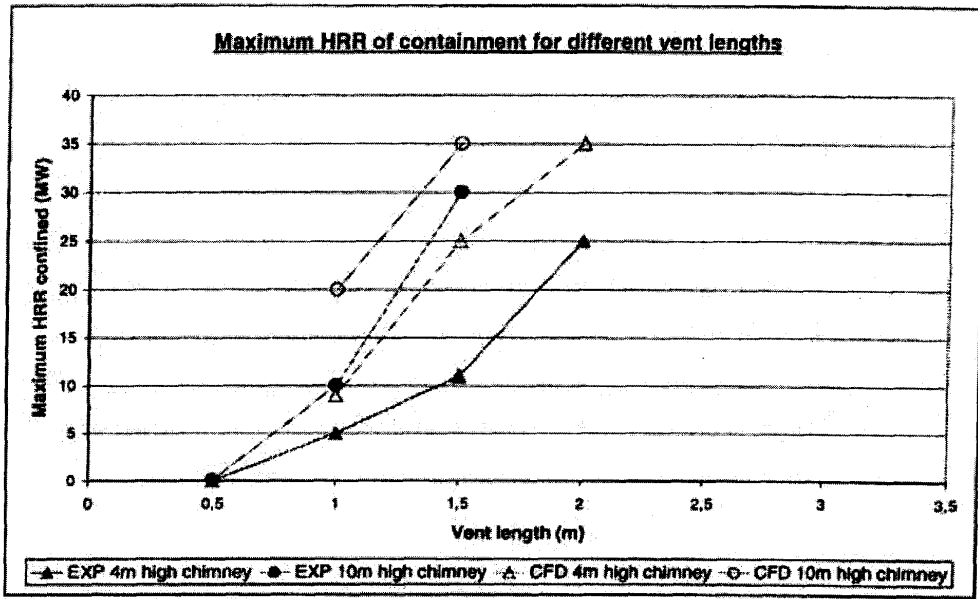
圖十二：不同排氣孔高度的流線

- (3) 對於 4m 高度的排氣孔，最大 HRR 值隨通風孔寬度增加，在通風孔寬度為 2m 時 HRR 值可以到 25MW。
- (4) 10m 高、1.5m 寬的排氣孔可將 HRR 值為 30MW 產生的煙完全排出。且越高及越寬的排氣孔排煙效果越好。
- (5) 試驗的曲線如圖十三：



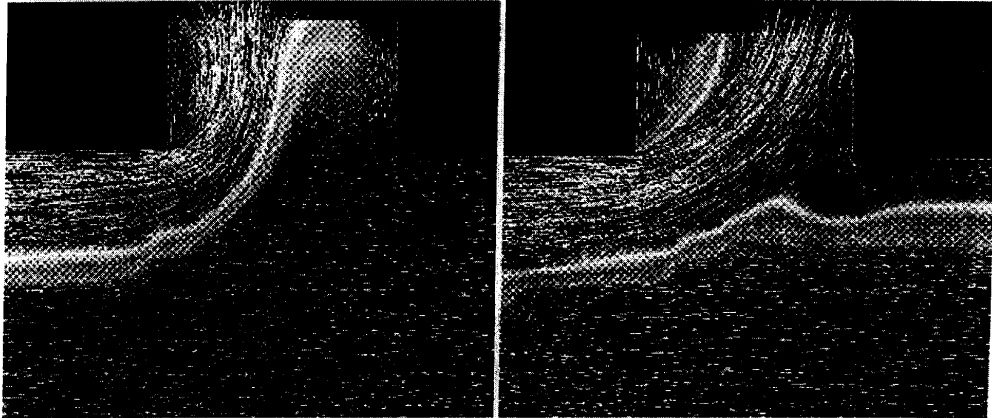
圖十三：在不同長度與高度排氣孔對應的最大 HRR 值

近年來以三度空間 CFD (電腦計算流體動力) 方法模擬運算排煙設計，已經漸漸發展成為實用的工具，以 CFD 嘗試運算自然排氣，在排氣孔 4m~10m 高度，排氣孔寬度和 HRR 值與實驗值比較如圖十四：



圖十四：排氣孔高度 4m 和 10m 時數值運算與實驗值之比較

數值模擬運算的結果與實驗組比較起來明顯高估了排煙效果，這是因為外在的環境對隧道的實驗造成影響，而數值運算將外部環境設定為靜止穩定。而在 0m 和 2m 排氣孔高度的比較上差異更大，因為實驗組在排氣孔的周圍空氣產生擾動，造成效率不佳。圖十五顯示在排氣孔寬度為 1.5m 時，排氣孔上游側牆面產生迴流將煙霧推向排氣孔另一端，造成不穩定的現象。



圖十五：在相同寬度下，不同的 HRR 值產生不同的流線

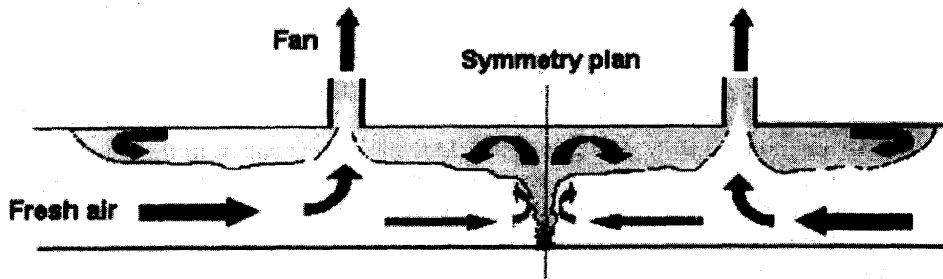
隧道坡度對自然排氣產生影響，斜率越大時自然排氣效率越差，在斜率超過 5% 時，排氣孔幾乎無法控制排煙。

隧道自然排氣系統主要的優勢與其單純且低成本有關，另外煙霧在兩個排氣孔之間流動時，在底層路面上會留有相當程度的新鮮空氣，以提供人員避難至安全地點的疏散環境。且降低空氣流速可以使火勢成長減緩。自然排氣系統在排氣孔寬度越寬時排煙效率越佳，如與隧道寬度相同且有長長的煙囪效果更佳。

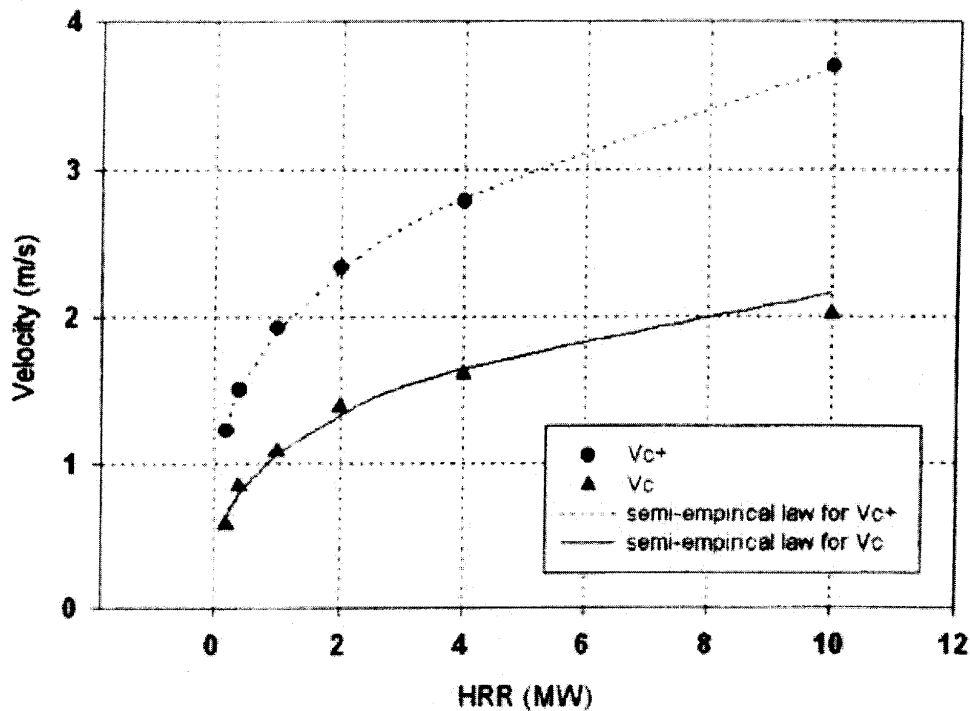
## 2. 限制流速法的評估試驗

隧道火災中通風系統的主要功能在於限制煙霧流動或排出濃煙以提供可維生的環境，在一些案例中發現控制煙霧自然成層分布為一可行的辦法，經過最近理論的分析與實驗的驗證可得到隧道內控制縱向氣流和和煙霧自然成層的關聯。

為了解如何達到煙霧分層的形成，本文以 1：20 隧道模型模擬實驗說明；控制縱向空氣流量以限制氣體流速可以阻止煙霧的蔓延，並且維持為穩定流的狀態（如圖十六）。限制流速有以下二個定義：控制火場產生的濃煙在排風孔之間所需的排風速率為  $V_c+$ ，允許煙霧溢過的溯上長度（backlayering）為四倍隧道高所需的排風速率為  $V_c$ 。隧道在火源兩側頂版上各有一個排氣孔的情形下，限制流速（ $V_c$ ）的值為火源熱釋放比（HRR）三次方根的函數（如圖十七）。



圖十六：流場示意圖解



圖十七：限制速度與 HRR 值的關係圖

### 3. 鐵路隧道以機動風扇的排煙測試

在如同 Mont Blanc 和 St.Gotthard 隧道的大災難中，消防隊員很難進到火場行動，包括能見度和火場溫度都是相當重要的因素。本文評估以機動性的風扇使用在鐵路隧道火災中排煙的效果，將風扇放在隧道入口處產生強大的噴射氣流，引進新鮮空氣將煙及熱排向另一側，使消防人員能更有效及安全地進行搜救行動。

試驗的隧道為 1.1km 長，斷面積為約  $50\text{m}^2$ ，風扇能量為  $110000\text{m}^3/\text{h}$  ( $30\text{m}^3/\text{s}$ )。在火熄滅後風扇開始運轉，約只花了一分鐘就把煙霧壓制回隧道內，大約 4~5 分鐘完全使氣流向另一側排出，最終的氣流速度為  $1.5\text{m/s}\sim 2\text{m/s}$ ，大約 13~14

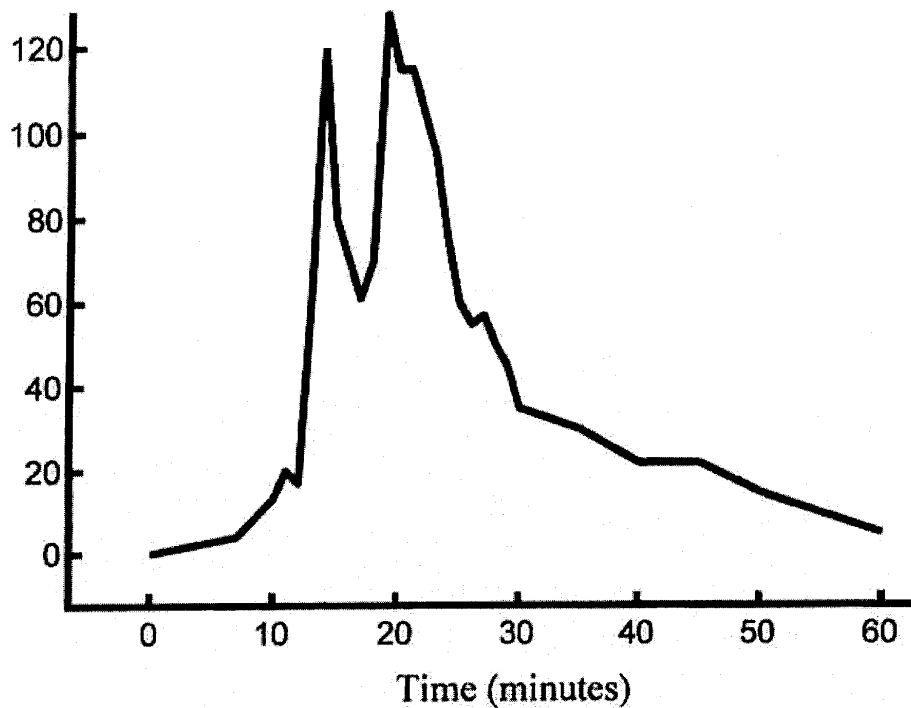
分鐘後將火災產生的煙霧完全排出。

#### 4. 隧道內重型大貨車火災的嚴重性

全世界都在追求更好的交通運輸網路的同時，在一些如同日本和歐洲的地方，受限於地形及過度的開發，只得往地下發展以改善交通運輸。隧道越來越多也越長，相對的發生隧道災難的頻率也增加了，為了確保用路人的安全，隧道的設計及管理單位必須考量各種可能發生火災的情況。重型大貨車 HGV (heavy goods vehicle) 事故無論發生率或嚴重性，在隧道火災中佔了相當大的比例，因此許多研究在探討 HGV 火災可能的範圍及規模大小，及蔓延至鄰近車輛的可能性。

在 1976 年 Heselden 提出隧道內 HGV 的火災規模相當的 HRR 值大約為 20MW，並為許多隧道設計和風險評估所採用，但是在挪威的 EUREKA 試驗和最近的一些阿爾卑斯山脈隧道事故中發現，這個數值明顯的是低估了；在某些幾何型式及通風系統的隧道，HRR 值高達 130MW 以上。

1992 年 11 月在挪威 Hammerfest 附近的廢棄礦坑隧道辦了一個 HGV 的隧道火災實驗：隧道長度為 2.3km，斷面形狀為馬蹄形，斷面積為  $34\text{m}^2 \pm 4\text{m}^2$ ，實驗用的 HGV 拖車置於距離隧道北端 295m 處，拖車長 12.2m 寬 2.4m 高 2.5m，滿載了大約 2 噸重的傢俱並在上覆蓋一層油布，估計燃燒產生的能量為 87400MJ。英國的科學家計算大火的 HRR 值在開始 13 分鐘後到達 120MW，最大值為 18 分鐘後的 128MW (如圖十八)。



圖十八：Hammerfest HGV 試驗 HRR 值與時間變化曲線

但是這個試驗並不符合一般隧道 HGV 火災，因為：

- (1) Hammerfest 隧道斷面較一般隧道 (40~50m<sup>2</sup> 或以上) 小得多。
- (2) 在試驗中的通風速率 (6m/s) 比一般隧道高。一般隧道通常不會超過 3m/s 以上。
- (3) 兩公噸的木頭傢俱不是一般的載貨。

本文以 CERBERUS 程式運算在不同的條件下，模擬例如英倫海峽隧道 (Channel Tunnel) 的 HGV 火災對應的 HRR 值大小，結果如下：

- (1) 模擬 Channel Tunnel 的幾何形狀，在自然通風下最大 HRR 值約為 Hammerfest Tunnel 的 51%。
- (2) 相對於 Hammerfest Tunnel 的排風速率，在 2m/s



的排風速率下，最大的 HRR 值約為 25%。

(3) 以使用者輸入參數 Cargo factor 來計算不同的車載貨物。(傢俱 Cargo factor : 10)

(4) 必須考慮火勢會蔓延到鄰近車輛。

完整的運算結果如表七，有關該程式模組的詳細說明，可參閱網址：<http://www.tunnelfiresafety.co.uk> 選 research 項目再選”CERBERUS”。

表七：模擬 Channel Tunnel 運算發生 HGV 火災可能的最大 HRR 值及蔓延到鄰近車輛的機率

Cargo factor	Ventilation velocity (ms <sup>-1</sup> )	Heat release rate distribution (MW)			Probability of spread (%)		
		10 <sup>th</sup> percentile	50 <sup>th</sup> percentile	90 <sup>th</sup> percentile	1m	5m	10m
5	1	4	18	62	89-91	85-87	81-83
	2	7	22	80	34-40	30-35	25-30
	3	9	33	122	27-33	23-29	20-24
	5	16	60	220	23-28	20-25	0-21
	10	30	99	330	10-13	0-11	0
10	1	9	31	88	97-98	95-96	93-94
	2	13	43	130	60-66	56-62	49-56
	3	17	62	210	49-56	45-52	40-46
	5	30	111	365	46-52	42-48	0-43
	10	60	195	630	30-35	0-32	0
20	1	15	47	104	99	99	98-99
	2	24	75	190	83-86	78-84	72-79
	3	32	105	265	71-76	67-73	61-68
	5	55	190	465	68-72	64-69	0-65
	10	110	350	880	54-61	0-58	0

### 3.1.3 消防與逃生安全

#### 1. 重大隧道火災事故的緊急應變管理

在隧道發生重大火災災害或相關緊急事故，管理當局如何應變及管理，相關防災計畫及應變管理的策略必須依權責

妥善規劃，其中包括責任區分、應變指揮及控制與災害通報系統。

應變計畫的整合與管理：

管理單位必須整合應變計畫的權責，以便災害發生時與其他支援單位對於救援活動的進行，能有明確的依循，甚至建議於應變計畫內將不同隸屬之相關單位，整合成立跨機關的應變團隊。

任務分工與責任：

有些事故的管轄權責可以明顯分辨，例如火災的優先處理權責為消防隊，交通意外則為警察局，但如果災難的屬性模糊不清則可能因權責不清而延誤救災，比較有效的方案是將相關單位整合成一團隊，使事權統一。另外對人員及裝備使用的「命令權」、戰略運用領導各單位達成目標的「控制權」等權責分劃是非常重要的，在災難發生時必須清楚界定分層負責與任務分工。

安全衛生的責任：

在災難發生的同時很難去兼顧安全衛生的環境，但是資深的任務指揮官需能注意到工作人員的安全、健康及福利，並予以保障。

命令權與控制權的運用：

事故處理分為戰術與戰略的運用；在重大事故發生時，決定人員調度及各項資源分配的命令權，屬於戰術（現場）的運用，而戰術指揮官通常在災難現場指揮。對於決定救災目標優先順序等的控制權，屬於戰略（行政）的運用，而戰略指揮官的層級高於戰術指揮官，且通常於在非災區成立指

揮所。

#### 指揮和控制的能力

要培養優秀可靠的領導人才必須要經過各種模擬演練，演習的目的在於確定災難發生的同時，能對所有單位有充分領導統御的能力。

#### 應變指揮所（中心）的位置：

為了要提供快速的決策，指揮所地點的選擇非常重要，各單位依其需求特性，建立各自的應變中心，但是對重大災難事故則必須建立現場的應變指揮所，即時下達對人員物資的戰術運用。現場應變指揮所的設置位置考量如下：

- (1) 需避免因隧道燃燒造成任何不利之影響。
- (2) 避免受到隧道事故冒出的危險物質或灌救水溢流的影響。
- (3) 隧道控制室（中心）須具有良好的通訊，且無論在大火或緊急的事故中必須受到完全的保護。
- (4) 能夠滿足所有應變行動所需。
- (5) 能夠符合所有應變行動及隧道操控的通報系統，並且不會干擾隧道管理控制中心的運作。

#### 緊急事故的初期應變：

在意外事故的初期必定會有不完整、不正確的相關資訊產生，指揮官必須加以整理並做資源上調度。在此同時，各單位都會急於通報並請求命令，各單位資深的領導人員應將總指揮權依應變計畫或交與階級最高者，而且不可以隨便更換，以免影響救災的效率。

#### 緊急事件的決策：

在處理緊急事件的決策過程包括：

- (1) 確認問題
- (2) 可選擇的解決方案
- (3) 方案評估
- (4) 決定優選方案及履行

#### 緊急應變的支援

重大緊急災難往往需要大規模的動員，應變計畫在戰略考量上必須依事故層級規劃可運用的資源清單，以利災難發生時立即調度。災難初期應變階段約持續 24 小時，並視情況再予延長，而後事故清除的階段可能要持續幾天或幾週。在派遣人員到達災難現場時，相關安置、食物、通訊設備等必須即時準備妥當，另外在事件結束後也要把相關人員、設備運送回原來地方，且相關人員的生理和心理在災難處理過後的狀況都必須要關心。最後，戰略指揮官在物資的調度上，必須清楚相關法律規定及考量政治生態。

#### 總結

- (1) 在意外事故發生時，如事先無完善有效的應變計畫，則意外事故將不易處理。
- (2) 為了要提高應變效能，與應變（救災）行動相關的成員皆需參與計畫的制定。
- (3) 要確保有效率的命令和控制，則對相關應變（救災）成員的權責要分清楚。
- (4) 包括隧道管理及各應變（救災）相關單位，都必須了解應變管理的控制權、戰術指揮、戰略指揮之不同，並體認在各個階層將有不同的決策考量。
- (5) 在重大緊急災難中要從各地大規模的動員及調度

物資是非常困難的任務，不可低估相關管理的問題，而這個任務的指揮及控制權必須操之於戰略指揮者。

## 2. 重大隧道火災事故的緊急應變計畫

由於隧道火災蔓延的速度是非常快的，相對地應變的反應及速度非常重要，要能有效地快速反應就必須對可能的狀況預先防範，且需要各相關單位整合連繫通力合作才能順利達成。相關單位包括隧道管理單位、消防隊、警察局和救護單位等。

應變計畫需考量包含的內容如下：

- (1) 應變小組能利用的隧道設計圖及硬體、軟體設備等。
- (2) 隧道的主要用途及可能的交通量，包括型式及數量。
- (3) 隧道事故偵知設施及緊急通報相關單位的方式。
- (4) 應變反應小組的成員。
- (5) 相關單位的權責要界定清楚。
- (6) 人員和裝備等可運用的資源。
- (7) 分級指揮及控制概念需清楚規範。
- (8) 決定運作與策略的最高階層 (Gold control)。
- (9) 指揮與控制點應清楚界定。
- (10) 應變團隊集結與責任分區應清楚界定。
- (11) 應明定救援及疏散的程序與路徑。
- (12) 敘述各種不同燃燒物質的滅火對策。
- (13) 敘述各種一般及專業設備的供給及維護權責。

(14) 考量如何向社會大眾發佈交通阻斷訊息。

(15) 必須考量例如溢流的污水等對環境的衝擊。

依理論和想像建立的緊急應變計畫，在執行上往往相當困難，為了能提供更實際可行的計畫，計劃製訂的流程如下：

(1) 隧道相關資料的取得。

(2) 資料處理。

(3) 將資料作成易於使用的型式。

(4) 以”如果…則…”思考步驟決定各種可能的假設狀況。

(5) 對假設狀況作風險評估並選定優先順序。

(6) 對確認狀況計畫應變行動。

(7) 以救災演練檢測應變計畫。

(8) 演練後將過濾得到的資料應用到流程(1)。

藉由上述循環的步驟及操作演練，使各相關單位獲取經驗，並可在救災行動中更為緊密的結合。隨著科技、裝置及觀念的進步，過去的應變計畫是否適用於最新的狀況，應時常檢討及測試演練。在測試中，通風及通報系統的操作是相當重要的。相關單位需建立適當的管道，緊密結合組成應變團隊隨時待命。在演練過程中要將有用的經驗記錄下來，改進應變計畫的流程是一直循環進步的。在計畫中有些狀況是目前資源、設備無法解決的，必須要研究探討以尋求方法。因為應變計畫可能受限於人事、成本花費，對於一些尚無法經濟解決的特殊狀況，另外要尋求在政策上接納風險的觀念。

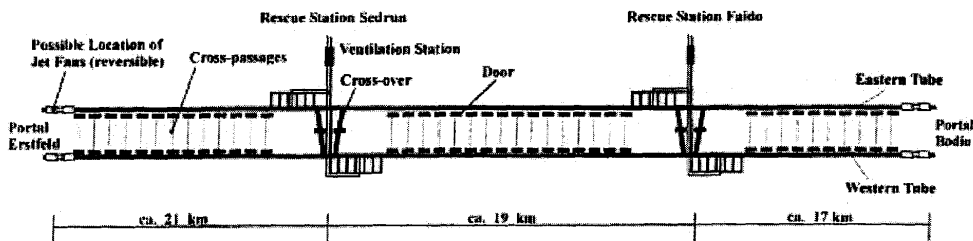
和固定的計畫相比，緊急應變計畫是一項持續不斷改變的過程，藉由演練的過程，使我們得以修正不符合的項目，使達到實際防災的需求，凡是參與演練的人員或單位都必須提出計畫缺失的改善意見，以期在未來的演練中有改進的空

間。

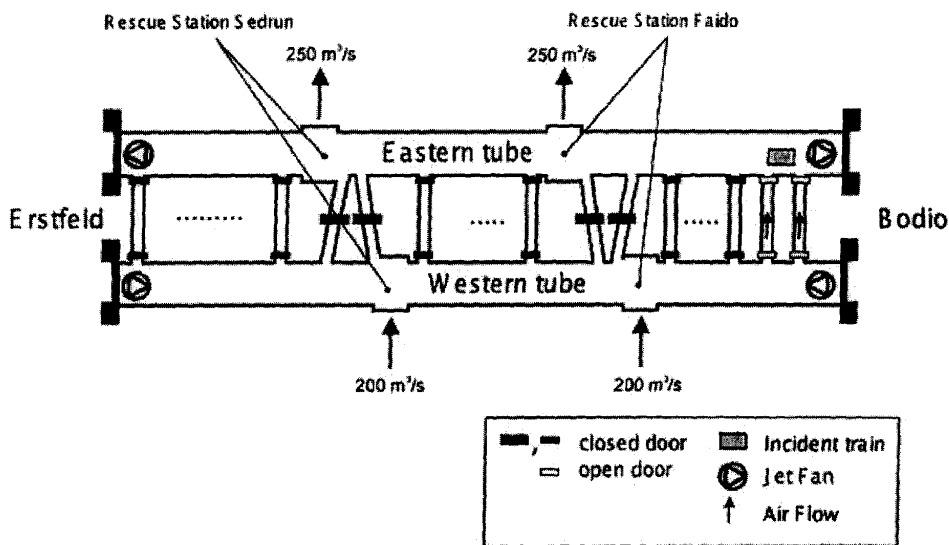
除了演練外，平時亦需巡檢考評，包括通風照明系統、交控系統、消防灑水設備、警示系統及裝備等，並了解備災及保養狀況，如果平時的保養維護不彰，在緊急事故發生時，再完備的系統將無法發揮功效。

### 3. 在隧道入口處使用噴射風扇以輔助緊急通風

正在興建的瑞士的 Gotthard Base Tunnel (GBT) 為深層的鐵路隧道，全長 57 公里，將是歐洲高速鐵路網的中心部分。隧道結構為雙孔隧道，並設有救援站 (rescue station)；當發生列車著火事件且無法離開隧道時，列車將停在救援站，救援站除了有空氣抽排系統外並提供人員安全逃生疏散設備。萬一列車無法停靠在救援站而停在隧道內的任一位置，事故列車的旅客將可利用聯繫兩孔隧道全長 325m 的避難橫坑到達另一孔隧道，同時救援站的緊急通風設備將啟動，藉由氣壓的不同以確保煙霧不會擴散到另一側 (非事故) 隧道內。通風及逃生系統示意圖如圖十九、圖二十：



圖十九：Gotthard Base Tunnel 通風及安全設備示意圖



圖二十：緊急事故（列車火災）案例通風系統示意圖。

發生火災事故列車停在救援站及進出口之間時，救援站的通風系統會輸送新鮮空氣（每站最大風速  $200\text{m}^3/\text{s}$ ）到另一未發生事故隧道，並從事故的隧道以每站最大風速  $250\text{m}^3/\text{s}$  抽風，因此事故隧道的壓力較另一側隧道壓力低，隧道口的噴射風扇能以最大  $4180\text{N}$  的推力輔助緊急通風系統。

在隧道控制中心的警報響起時，火車的路線會自動調整，同時緊急通風系統開始運作，並經由精確的計算控制聯絡橫坑通道門打開後之空氣流量。

在聯絡橫坑通道門保持關閉的情況下，隧道口的噴射風扇可以提升進出口與救援站間的空氣壓力，避免通道門開啓時造成事故隧道的煙霧流入安全的隧道。並由計算結果得知運用噴射風扇確實可以增加緊急通風系統的效率：如在橫坑通道門開啓時能保持隧道內的氣流更穩定，並提升事故中另一側安全隧道的壓力，以避免通道門開啓時煙霧的逆流。另



外在通道門開啓時可以減低對另一安全隧道的影響以維持鐵路交通，並使緊急通風系統更快地達到所需的空氣壓力及速度。

#### 4. 隧道大火災變是可以預防及壓制的

FIREPASS (Fire Prevention And Suppression System) 是一種新的消防概念，FIREPASS 系統以降低空氣中氧氣的含量達到抑制燃燒的目的，並可以維持安全、可呼吸的逃生環境。該系統已在美國註冊專利並申請國際專利。

現今許多的隧道消防系統及設備並無法針對人為縱火（恐怖活動）或意外引發的巨大火災，作有效的壓制及撲滅；面臨的問題包括：

- (1) 燃燒物質因隧道的限制而使災難擴大，直到可燃物質燒完後才停止。
- (2) 燃燒不完全的可燃氣體或液體，在大火被控制之後仍在揮發，導致爆炸的可能。
- (3) 隧道通風系統面臨矛盾的功用；火勢常因通風系統的運轉提供新鮮空氣，使得火勢變得難以控制。
- (4) 灑水系統在運作之後將影響維生環境，而延遲開啓可能造成火勢擴大，且可能造成地面溼滑及駕駛人的驚慌。
- (5) 大火可能造成設備、管線損毀，使消防系統失效。
- (6) 火災從發生到產生有毒氣體致人於死，約僅 15 分鐘，而人為恐怖活動可反應的時間將更短。
- (7) 如果人為恐怖活動蓄意破壞，任何逃生疏散計畫都可能失效。

FIREPASS 系統利用精確控制氧氣含量，可提供人類呼吸所需氧氣但又可使物質無法燃燒。原理為利用氮氣降低大氣中氧氣濃度，藉使無法助燃，在實驗中發現氧氣含量低於 16.8% 的標準值時，一般物質難以燃燒，所以低氧空氣 (Hypoxic) 可以壓制火源，而根據研究 Hypoxic 對人類生理是沒有影響的，且已用在醫療用途上。

將 Hypoxic 氣體製造器放置在隧道口或通風口，可以預防火災及有毒氣體，但是不適用於公路隧道，因為將導致引擎無法燃燒。但採用 Hypoxic 滅火是相當有效的，以 Hypoxic 輔助通風系統可產生氣壓排除煙霧，又可以防止新鮮空氣進入助長火勢。

和其他消防系統相比，FIREPASS 系統有低維修成本、無運輸及裝填困擾、容易加入既有系統等的優點，是一項經濟實惠的方案。

#### 四、建議

在出國報告撰寫之際，很不幸的於今（九十二）年二月十八日在韓國大邱的地鐵發生了慘絕人寰的縱火悲劇，造成了百餘人死亡的嚴重災難，除了表示哀慟外，也恰好應證了這次研討會的部分內容；1.現今社會除了工程技術與交通需求在進步外，新的意外事故也層出不窮，所以在防災的觀念上（如恐怖活動等人為破壞應變機制）需隨時更新。2. 隧道火災蔓延的速度是非常快的，相對地應變的反應及速度非常重要，要能有效地快速反應就必須對可能的狀況預先防範，整合監控、電力、運訊、營運等系統，建立事故通報流程，以提供指揮控制中心快速判斷應變能力。3. 在隧道內發生火災時，除了初期滅火外，通風與排煙也是非常重要的，如何立即應變及控制通風系統使火勢獲得控制，並使煙霧等有毒物質迅速排出，必須妥善規劃。4. 公共運輸交通工具如果發生意外，往往造成重大的傷亡，因此在車輛上應儘量以耐火材質設計。5. 由許多慘痛的經驗得知，緊急事故發生時，人為的疏失往往是最要命的，所以防災最重要的一點是要確實擬訂緊急應變計畫並配合定期演練，以期在緊急事故發生時能適時發揮效能。

本局辦理東西向快速公路漢寶草屯線 E407-1 標八卦山隧道主體結構即將於本（九十二年）完工，在隧道規劃及土木、機電工程設計中已詳盡考慮防災及應變設施，整體防災系統已達世界級的水準，惟為能符合現今國際上最新的研究成果，以臻追求零災難的理想，個人以本次研討會的所學拋磚引玉提出幾點淺見：1. NFPA 國際消防標準係參酌國際間最新的研究成果及科技資訊，並由實際意外事故獲得寶貴的經

驗，三年即修訂一次以隨時維持最新並符合實際需求的規範。八卦山隧道在緊急疏散設施如照明指示、逃生通道的照明及通風、緊急通風和警示系統等，應依最新版本再予審視。

2. 八卦山隧道為雙孔雙向分隔隧道，為縱向通風系統，可參考報告中日本隧道的氣流控制模式，擬訂緊急通風策略。
3. 在事故發生之後如何控制災情，往往是應變成敗的關鍵，自動化的偵測、警示系統將可以避免人為反應錯誤，導致災情擴大的憾事。惟依部分測試報告可知，靈敏的偵測警示系統誤報的機率將增高，因此可以輔以人工改善。
5. 災難發生後除了應變救災外，還要預防二次事故的發生；例如在意外事故發生後，人、車被導引經過聯絡橫坑通往另一側隧道避難，或經由隧道前的迴轉道改道，但是可能與對向車流產生二次事故，因此警示系統應加以考量，如對向封閉一車道交通等方式。
6. 現行的各種火警偵測系統都有靈敏度及偵知時間的平衡問題，因此在安裝完成後需對現地及本土的環境加以調校，以求得快速且正確的自動反應系統。
7. 自動灑水系統目前在啟動時機與效能上，尚存有許多疑義，如需裝設，建議須對灑水系統的開啓時機及缺點提出改善的策略。
8. 特殊重型大貨車往往是交通事故的殺手，如果無法加以管制路權的行駛，仍應對其在隧道內的駕駛行為加以限制；如降低速限、禁止變換車道等。
9. 由於特殊重型大貨車載運的貨物十分複雜，所以不幸在事故造成後，除儘速疏散及救災外，救災人員亦需注意火源的類型，例如高揮發性物質可能在火熄滅後持續揮發，在溫度回升後造成爆炸。
10. 隧道緊急應變計畫可說是在整個防災、搶災、救災中最重要的一环，一個有效可行的應變計畫牽涉的層面相當廣，建議可以委託研究的方式，並由防、救災應變體系內的所有相關機關共同審查編訂，

妥善規劃包括責任區分、應變指揮及控制與災害通報系統，並整合建立應變團隊，以使於事故發生時能快速反應有效救災。

## 五、附錄

# 附錄一

## Fourth International Conference

### Tunnel Fires

2-4 December 2002, Basel, Switzerland

#### Technical Program

##### MONDAY 2 DECEMBER

0800 - 0845 REGISTRATION AND COFFEE

0845 - 0900 Introduction by Conference Chairman

John Lowndes, LowndesConsult, UK

##### PLENARY SESSIONS

SESSION 1 ENGINEERING DESIGN FOR FIRE SAFETY

Chairman: John Lowndes, LowndesConsult, UK

0900 - 0920 What does quantified fire risk assessment need to do to become  
a routine part of tunnel design decision making

D Charters, Arup Fire. UK

0920 – 0940 Changes proposed for the 2003 edition NFPA 130

W Kennedy, Parsons Brinckerhoff International, USA

0940 - 1000 Fire safety in tunnels: Railway tunnel design

L Fort, Necso, Spain

1000 - 1020 Combining design fires and risk assessment to achieve tunnel safety

J Munro, Rail Infrastructure Corporation, G Smith, State  
RailAuthority, V Dowling & N White, CSIRO, Australia

1020 - 1030 Discussion

1030 - 1100 REFRESHMENT BREAK

Chairman: Alfred Haack, Stuva, Germany

1100 - 1120 On the strategy of securing evacuation environment In the tunnel

fire

A Mizuno & H Yae, Kogakuin University, Japan

1120 – 1140 A proposal of method for choosing escape facility: The SCM method

S Gilia, GIUA & Partners sri & 0 Fagioll ANAS, Italy

1140 - 1200 A fire load application method for the design of concrete structures

J Wageneder, Geoconsult, Austria

1200 - 1220 Refractory materials solutions for tunnel fire protection

A Beeston, Thermal Ceramics, UK

1220 -1230 Discussion

1230 -1400 LUNCH

## SESSION 2

Chairman: John Day, Electrowatt Infra, Switzerland

1400 - 1420 Investigation of natural ventilation for tunnel smoke extraction

J Viot, Mott MacDonald, UK & O Vauquelin, Valenciennes University, France

1420 - 1440 Trial of a mobile fan for fire gas ventilation in a railway tunnel

H Ingason, Swedish National Testing & Research Institute & B Wahlstrom, Brandskyddslaget. Sweden

1440 - 1500 An experimental evaluation of the confinement velocity

D Telle, O Vauquelin, University of Valenciennes & H Biollay, Scetaroute, France

1500 - 1520 HGV fires in tunnels: How severe are they and under what conditions will they spread?

R Carvel, A Beard & P Jowitt, Heriot-Watt University, UK

1520 –1530 Discussion



- 1530 – 1600 REFRESHMENT BREAK
- 1600 – 1620 The options for emergency longitudinal ventilation and a safe haven in twin bore rail tunnels  
R Matthews, CenTAR & M Walker, Rail Link Engineering, UK
- 1620 – 1640 Tests on linear systems for fire detection and sprinkler  
J Huijben, Bowdienst Rijkswaterstaat, The Netherlands
- 1640 - 1700 CST Centre for Safety in Tunnels  
V Wetzig & S Seirer, Haberbach Test Gallery Ltd, Switzerland
- 1700 – 1715 Fire tests video  
J Ranch, MetroconsuSt, Germany
- 1715 - 1730 Discussion

Session IA : MOVEMENT AND CONTROL OF SMOKE AND FIRE

Chairman: Paul Miclea, Earth Tech, USA

- 1100 - 1120 The new ventilation systems of the Mont Blanc Tunnel active smoke control:  
From simulation to successful operation  
N Brichet, A Weatherill, B Crausaz, Bonnard & Gardel Consulting Engineers Ltd, Switzerland & E Casale, Scetauroute, France
- 1120 - 1140 The new ventilation systems of the Mont Blanc Tunnel Specificities and Performances of the fire ventilation  
A Weatherill, X Guigas, Y Trottet, Bonnard & Gardel Consulting Engineers Ltd, Switzerland, E Casale & B Houseaux, Scetauroute, France
- 1140 - 1200 The influence of longitudinal ventilation on fire size and development

J Huijben, Bouwdienst Rijkswaterstaat, The Netherlands

1200 - 1220 Portal jet fans performance for tunnel ventilation

I Maevski & J Fay, Jacobs, USA

1220 - 1230 Discussion

1230 - 1400 LUNCH

## TUESDAY 3 DECEMBER

### PLENARY SESSIONS

#### Session 3 FIRE AND LIFE SAFETY

Chairman: David Charters, Arup Fire, UK

0940 - 1000 Fire safety in tunnels and selection of tunnel concept

T Andersen & B Paaske, Det Norske Veritas, Norway

1000 – 1020 Emergency services response - Managing major tunnel fire

Incidents

D Burns & B Locke, Merseyside Fire Service, UK

1020 - 1040 From safety to integrated safety

R Sturkop, Railinfrastructure, The Netherlands

1040 - 1050 Discussion

1050 - 1120 REFRESHMENT BREAK

1120 - 1140 Tunnel fire engineering practice

The activities of PIARC working group 6 and the 'fires in tunnels'  
thematic network

N Rhodes, Hatch Mott MacDonald, USA

1140 - 1200 Optional use of jet fans in tunnels near portals to support the  
emergency ventilation of the Gotthard Base Tunnel

D Portmann & J Shaha, HBI Haerter AG, Switzerland

- 1200 - 1220 The effects of emergency fan start time on controlling the heat and smoke from a growing station fire - A transient CFD study.  
D McKinney, N Shahcheraghi & P Miclea, Earth Tech Inc, USA
- 1220 - 1230 Discussion
- 1230 - 1400 LUNCH

#### SESSION 4

Chairman: Norman Rhodes, Hatch MottMacDonald, USA

- 1400 - 1420 Improvement of fire safety at an existing subway station with only one existing exit in Stockholm  
S Bengtson, Brandskyddslaget AB, Sweden
- 1420 - 1440 Emergency services response - Planning for major tunnel fire incidents  
B Locke & D Bums, Merseyside Fire Service, UK
- 1440 - 1500 Life safety systems integration in tunnels  
M Kelly, Tyco Systems. UK
- 15W – 1510 Discussion
- 1510 - 1540 REFRESHMENT BREAK
- 1540 – 1600 Catastrophic tunnel fires can be prevented and suppressed  
I Kotliar, FirePASS Corporation, USA
- 1600 - 1620 The effect of smoke spreading and sprinkler on self-rescue  
A Lemaire, TNO. The Netherlands
- 1620 - 1640 Full scale fire tests performed in the Mont Blanc Tunnel - Evaluation of the efficiency of the fully automatic ventilation responses  
E Casale, B Houseauk, Scetaroute, France, A Weatherill, X Guigas.  
Bonnard & Gardel; E Marlier, GEIE Tunnel du Mont Blanc, Italy

& B Brousse, CETU, France

1640 - 1650 Discussion

1650 Closing remarks by Conference Chairman

Session 2A: VALIDATION AND CFD

Chairman: Bill Kennedy, Parsons Brinckerhoff, USA

0900 - 0920 Development of a CFD methodology for predicting the combined effect of sprinklers and smoke ventilation in tunnels

S Miles, S Kumar, BRE, UK & K Chong, Defence Science & Technology Agency, Singapore

0920 - 0940 Numerical simulation of fire and smoke propagation in long railway tunnels

L Torbergsen & B Paaske, Det Norske Veritas, Norway

0940 - 1000 Validation of CFD approaches for modeling smoke movement from fires in tunnels

S Ledin, M Ivings, N Gobeau, R Bettis & J Alien, Health & Safety Laboratory, UK

1000 - 1020 Numerical simulation of smoke descent in tunnel fire accident

Y Kunikane, N Kawabata, N Yamamoto, Fukui University, K Takekuni & A Shimoda, Japan Highway Public Corporation, Japan

1020 - 1030 Discussion

1030 - 1100 REFRESHMENT BREAK

SESSION 3A

Chairman: Luuk Swart, TAB, The Netherlands

1100 - 1120 Comparison of zone and field modeling in tunnel fire simulations

L Schwenzfeier, X Bodart, S Sanquer, CSTB, France

- 1120 - 1140 Validation of the freeware 'Fire dynamics simulator version 2.0  
for simulating tunnel fires  
S Cochard, Electrowatt Infra Ltd, Switzerland
- 1140 - 1200 CFD modeling of the tempest MVU memorial tunnel tests  
N Shahcheraghi, D McKinney & D Shah, Earth Tech Inc, USA
- 1200 - 1220 Heat release rate and smoke production rate using CFD  
Y Kunikane, N Kawabata, Fukui University, Japan Highway Public  
Corporation, Japan
- 1220 - 1230 Discussion
- 1230 - 1400 LUNCH

## 附錄二

NFPA 502 Standard for Road Tunnels, Bridges, and Other Limited Access Highways 2001 Edition	
Chapter 1 Administration	
Chapter 2 Referenced Publications	
Chapter 3 Definitions	
Chapter 4 General Requirements	
Chapter 5 Limited Access Highways	
Chapter 6 Bridges and Elevated Highways	
Chapter 7 Road Tunnels	
Chapter 8 Roadways Beneath Air-Right Structures	
Chapter 9 Standpipe and Water Supply	
Chapter 10 Tunnel Ventilation During Fire Emergencies	
Chapter 11 Electrical Systems	
Chapter 12 Emergency Response	
Chapter 13 Control of Hazardous Materials	
Annex A Explanatory Material	
Annex B Temperature and Velocity Criteria	
Annex C Critical Velocity Calculations	
Annex D Sprinklers in Road Tunnels	
Annex E Emergency Response Plan Outline	
Annex F Alternative Fuels	
Annex G The Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program	
Annex H Tunnel Ventilation System Concepts	
Annex I Fire Apparatus	
Annex J Informational References	
Index	

NFPA 130 Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger  
Rail Systems

Chapter 1 General

Chapter 2 Stations

Chapter 3 Trainways

Chapter 4 Emergency Ventilation Systems

Chapter 5 Vehicles

Chapter 6 Vehicle Storage and Maintenance Areas

Chapter 7 Emergency Procedures

Chapter 8 Communications

Chapter 9 Referenced Publications

Appendix A Explanatory Material

Appendix B Ventilation

Appendix C Emergency Egress

Appendix D Suggested Test Procedures for Fire Hazard  
Assessment

Appendix E Creepage Distance

Appendix F Referenced Publications

Formal Interpretation

Tentative Interim Amendment

Index