臺灣警察專科學校警專學報，民國 104.10
第六卷第二期：49-76 頁

公路隧道煙控啟動模式設計分析之研究
——以雪山隧道為例

Analysis of smoke control activation model design at road tunnel– Take the Shiue Shan tunnel as the example

邱晨瑋[1]　　黃祈勝

Chen-Wei Chiu　Chi-Sheng Huang

摘要

本研究以目前雪山隧道坪林行控中心在火災發生初期、中期、末期時實際操作的煙控模式進行探討，針對危害性較高的火災情境進行研究；現階段雪山隧道發生火災時主要採取煙控的模式為「避難模式」和「排煙模式」，以及「單孔單向」和「單孔雙向」等分類，實際運作模式分為避難模式 28 種、排煙模式 12 種共有 40 種，本研究僅採用單孔單向並配合原 4 種「避難模式」和 6 種優化「排煙模式」設計作為煙控最適化設計研究方向。

雪山隧道總計 12.9km 長度，本研究採用 5000m 作為全尺寸的模擬，用實際距離設置噴流式風機，而在隧道兩豎井中間假設為最危險的狀況（worse case）作為 FDS 模擬之主要情境，並假設中繼站發生火災為最危險的情況進行模擬，經測試後發現 3 個中繼站以第一站的位置較易產生逆煙層，進一步本研究採用原雪隧使用的煙控模式為避難一（Eva1）至避難四（Eva4）四種情境，以不同噴流式風機（Jet Fan）及軸流式風機（Axial-Flow Fan）啟動機制，做為比較。

原設計使用的緊急運轉之避難模式所啟動的風機為上游 4 組噴流式風機，下游以間隔方式啟動噴流式風機，經過測試，15MW 和 30MW 的火源，用路人在火源上游 30m 處可以達到安全臨界值前進行避難，但截至目前最嚴重的火災為 65MW，則無法進行避難，研究中發現，為防止火災發生之煙層擾動，需要遵守上游 250m 和下游 500m 的風機不啟動之原則。

[1] 副教授；台灣警察專科校消防安全科；eswin.wei@gmail.com

關鍵字：雪山隧道、煙控模式、FDS、隧道豎井、逆煙層

Abstract

The study adopted smoke control modes of actual operation to analysis the hazard of high fire situation while fire occurred on beginning, middle and final stage in emergency control center of Shiue Shan tunnel. At the present stage, while fire occurred in Shiue Shan tunnel, an existing smoke control strategy has been mainly conducted, which divided into "evacuation mode" and "exhaust smoke mode", and " a single hole way " and "two holes–single way ",etc. The actual modes of operation are divided into 28 kinds of evacuation mode, 12 kinds of exhaust smoke modes. This study adopted a single hole way with the original 4 kinds of evacuation mode and 6 kinds of exhaust smoke mode as a smoke control optimum design study direction.

There are 12.9 km length totally in Shiue Shan tunnel, this study adopted 5000 m as a full-scale simulation, which is installed jet fan with the actual distance. The middle of two shafts with relay station fires in the tunnel is assumed to be the most dangerous situation （worse case） as the main FDS simulation scenarios. Through tests, the study find out that the location of the first relay station is easier to produce back smoke layering among three relay stations. Furthermore, this study used original smoke control model: Eva1 to Eva4 with different Jet Fans and Axial-Flow Fan activation mechanism as 4 analysis scenarios as a comparison.

Evacuation mode using the original emergency operation design could activates the four groups upstream Jet Fan, and activates downstream Jet Fan with intervals way. Through a series of tests, the study find out that in accordance with fire sources with 15MW and 30MW, the passers-by upstream 30m at the fire source to could evacuate successfully before achieving safety criteria threshold; however, the most serious fire with 65MW, road users could not evacuate efficiently. In order to prevent the smoke layer disturbance, it is necessary to comply with the activation principles, the Jet Fan could not be activated between 250m upstream position and 500m downstream position.

Keywords: Shiue Shan tunnel, smoke control modes, shafts in tunnel, FDS, back smoke layering

壹、緒論

一、研究動機

雪山隧道在 2012 年 5 月 7 號 13:27，發生了開通以來最為嚴重的車禍火災事故【[2]】，主要原因為小客車爆胎減速行駛，後方車輛未保持行車安全距離，大客車追撞小型車及另一大客車起火，並造成 2 死 34 傷的慘劇，後續報導指出隧道內竄出大量濃煙，由於抽風系統不良，造成火勢撲滅後隧道內仍有大量濃煙，多人因而嗆傷。北上隧道於下午 2 時 40 分疏散完畢，南下隧道則在下午 4 時 26 分完成疏散。消防人員在事發 78 分鐘後完全撲滅火勢及排除煙霧，因排煙時間過長，為本次研究動機之發想。

雪山隧道，原名坪林隧道，簡稱雪隧，是台灣第一、全世界第五長的公路隧道，也是公路隧道中最具代表性的隧道之一，因總長度為 12.9km，因此最常作為研究的目標，其次，因為隧道火災的特性為溫度高、疏散困難、救災急迫、搶救不易。

二、研究目的

為了檢視現有雪山隧道在火災發生時，整體雪山隧道的煙控啟動，是否達到人員安全避難的功能，並期許在煙控啟動後可以將火災產生的濃煙和溫度控制在一定安全臨界值內，透過文獻探討隧道煙控的模式和雪山隧道的相關控制的機制達成以下的目的：

（一）藉由歷史事故或火災事故所產生或可能引發的火災來源，利用文獻探討所找尋到的火源熱釋放率，去設計火源的大小，並量測隧道內上、下游之溫度、輻射熱、一氧化碳濃度以及二氧化碳濃度等達到安全臨界值時間，並和計算出的人員避難時間搭配，驗證是否達到安全。

（二）探討雪山隧道目前使用中的緊急運轉之避難模式，並以最危險的情況（worse case）在不同火源的狀況下，在煙控啟動模組運轉後，判斷各種性能式安全驗證指標是否有達到安全臨界值。

（三）國內在研究雪山隧道時，皆採用短隧道模型及斷面積的模擬部分，本研究藉由區別早期設計雪山隧道使用之斷面積風速的研究，利用現有 FDS 內的

[2] 監察院-國道 5 號雪山隧道火燒車事故案調查報告 http://www.cy.gov.tw/dlCount.asp?fileName=4101317231971.pdf

參數設計隧道內部完整風機位置，期許達到實際測量到情境。

（四）使用量化之方法，分析於何種火災情境下，其危險程度會危及用路人或救災人員之生命安全，希望研究結果可提供用路人與消防搶救單位之參考。

（五）利用雪山隧道原始設計的煙控啟動模式，設計在現有的 FDS 模組內，因為模擬的長度有限，並依照煙控模式產生的煙流方向和結果，探討和規劃人員避難的正確方向。

（六）研究成果，供給「國道 5 號雪山隧道公路事故暨整體防救災應變計畫」未來在需要修改時的依據。

三、研究範圍及研究限制

（一）研究範圍

研究主要針對雪山隧道於火災發生時，會採取單孔單向的避難模式進行風機的煙控啟動模式探討，並依照「國道 5 號雪山隧道公路事故暨整體防災救災應變計畫」的計劃書內容所訂定的 40 種的模式，依照不同的火災發生地區，以最具代表性的情境進行排煙模式的選定，此為雪山隧道避難煙控（Smoke control）的方法，而有限於目前政策的考量，雪山隧道營運時接採取單孔單向，而在南下隧道煙控啟動模式共有 7 種、北上隧道也有 7 種，所以煙控啟動模式共有 14 種。

在實驗前測的結果和實際隧道內的風速有相似的情況，採用南下的煙控啟動模式，並且利用 5000m 的隧道模型測試火源發生在兩豎井中間的中繼風機位置則為最危險的狀況（worse case），測試後只發現 1 種為最危險情況，作為本研究之模擬情境。

本研究模擬單孔單向使用數種煙控啟動模式的情況下，模擬火災的煙層擴散移動，並可能影響人員避難的速度和時間以及人員可以承受的煙層高度是否對下游的人員造成影響。

研究工具主要是使用 FDS-EVA 版本 2.2.1 進行模擬，EVA（evacuation）的功能為 FDS 內建的功能，為 FDS 版本 5.5.0 以上的版本，在本研究之前的雪山隧道模擬的部份皆為使用斷面積平均風速，截短型的高速公路隧道模型進行模擬，本研究採用的長度為 5,000m，並將豎井的高度和間距納入該模擬的範圍之內，以完整模擬出火和煙分佈，而火源的部份則是採用三輛小客車的熱釋放率 15MW、大客車的熱釋放率 30MW、兩輛大客車加一輛小客車的熱釋放率 65MW，以最糟的情況（worse case）下進行模擬。

在資料取得方面，目前雪山隧道已經是營運中的公路隧道，資料取得

不容易，僅可依照過去的測試資料和坪控中心給予的資料作為 FDS 建模的基礎資料。

（二）研究限制

研究限制上,FDS 模擬的部分,現有的網格切割為 0.5m × 0.5m × 0.5m 共分割為 312 萬之網格格數，火源設定的參數為 15、30、65MW，主要為雪山隧道在火源建置時是採用 30MW 火源設計，所以現行採用最大可承受之火載量和實際發生車禍的火載量進行模擬，在電腦可以計算的能力且考慮到隧道本身的長度，所以會採用 5,000m 的長度進行模擬，不會加以探討滅火的效果或人力的介入。

本研究因為的網格切割為 0.5m × 0.5m × 0.5m 共分割為 312 萬，最後單一情境的成果就產生 40G 的硬體空間，導致 smokeview 無法開啟，所以最後實驗部分，採用網格切割為 1m × 1m × 1m 所計算之數據，之後的研究就必須考量到格點的數量。

（三）研究方法與流程

本研究由雪山隧道歷史火災事件和國內外文獻探討中實驗的火源為模擬依據，而煙控模式依據「國道 5 號雪山隧道公路事故暨整體防救災應變計畫」的內容進行規劃、使用，其結果分析給予結論與建議。

貳、長隧道火災型態以及相關文獻探討

國內研究特種建築火災之研究人員【[3]、[4]、[5]】之文章中有說明到，在公路隧道火災在長隧道中屬於危險性高、人員不易避難的特性，尤其在雪山隧道 12.9km 的長度下，不僅是針對救災人員的作業或用路人的避難，在緊急狀況下因為隧道的密閉特性以及空間為侷限的環境，所以當事故發生時公路隧道有「溫度高、疏散困難、救災急迫、搶救不易」等特性。隧道起火燃燒後，其中潛在的危機整理為以下幾點：

[3] 簡賢文、施邦築、黃依慧、柯孝勳、謝慧如，〈公路隧道火災緊急應變及救災策略模式之研究〉，地下空間與工程學報，2008 年 04 期。

[4] 蕭力愷、沈子勝、許文勝，《長公路隧道大客車火災大量傷患緊急醫療救護對策之研究——以雪山隧道為例》，中央警察大學消防科學研究所，碩士論文，民國 97 年 6 月。

[5] 宋光鴻．曹文琥，《長隧道消防安全設備之研究——以雪山隧道為例》，中華技術學院，土木防災工程研究所，碩士論文，民國 96 年 7 月。

一、濃煙大、溫度高

公路隧道的特性為：高速、高載量、大型車遊覽車皆可行駛的特性，在國外研究中發現，當火災發生時的 3~5 分，溫度可能上升至 1000°C 以上【[6]、[7]】，其隧道火災的發展模式和隧道內部的溫度分布如圖 1 所示，若在隧道內發生事故時，常會發生因大型車追撞之後，導致的火源加劇或是非法載運危險物品的情況之下，現場的溫度更是使救災人員以及避難人員陷入危險之中。

因隧道空間狹小近似密閉空間，無法進行自然排煙，所以燃燒之煙和熱不易排除且快速瀰漫，且濃煙造成的遮蔽效果造成監控人員無法監控，後續因火勢過大燒毀照明，最終導致隧道崩塌，影響人員避難及救災人員搶救上的困難。

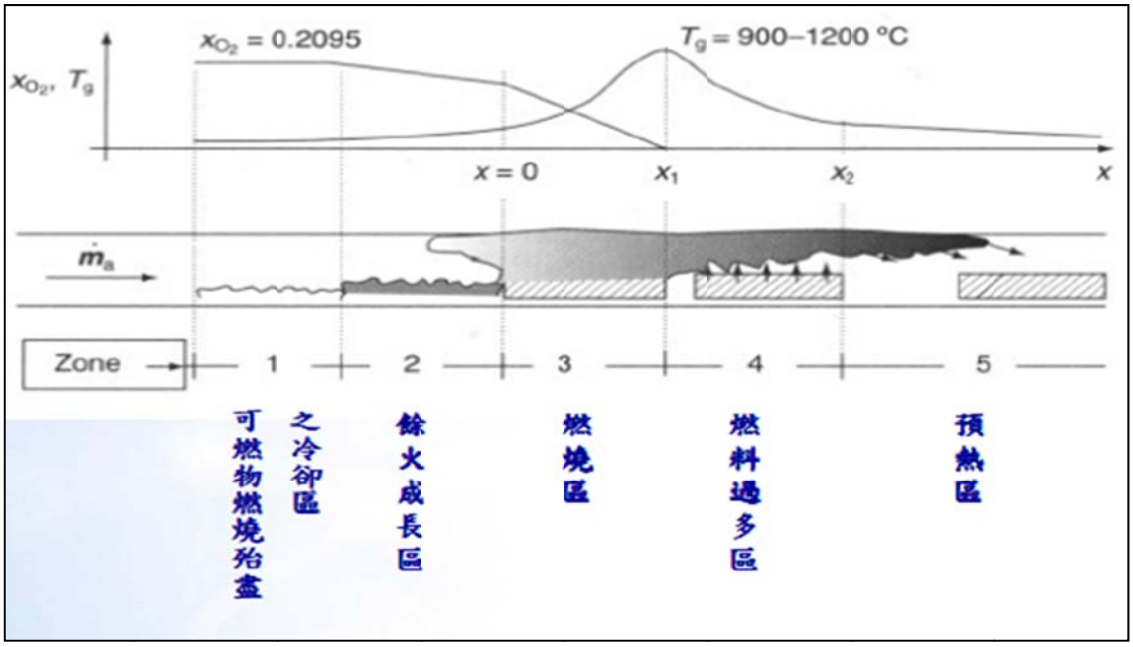


圖 1　隧道火災發展模式

（資料來源：簡賢文，《公路隧道大規模火災緊急應變及救援策略模式之研究》）

二、搶救困難

雪山隧道長度 12.9km，雖有雪山自衛消防編組的民間消防力第一時間的投入外，也在南北入口於宜蘭縣設置頭城特種分隊坪林及台北縣設置雪山消防分隊，

[6] 簡賢文，〈公路隧道大規模火災緊急應變及救援策略模式之研究〉，研究報告，民國 96 年 2 月。
[7] NGASON, HAUKUR. “Fire development in large tunnel fires” Fire Safety Science, 2005, 8: 1497-1508.

但是考量到事故時的車流狀況、以及人員疏散、事故位置的地點可能只有利用坪控中心第一時間的引導外，會增加搶救時間和困難度。

三、疏散困難

因隧道內部橫斷面及道路狹小，火災時人員及物資疏散困難，車輛前後緊貼，就無法疏散車輛，火勢因延燒車輛而加劇火勢蔓延。

隧道本身受限於周界環境，以致濃煙發生時會朝向前後方向快速蔓延，在公路隧道常常因為不同的車輛行駛，而有不同的風險及火災特性，若不慎發生事故時，最常見的是油箱破裂引起大火，而車輛內部所使用的內裝常為發泡綿等高濃煙的材質，在一般泡綿的發煙特性為一般材質發煙量的 4 倍；且在車輛下方及引擎室則為 pvc 等高壓電線材質為發煙量較大的聚合物質，而引擎室的汽油常常會導致極快速火災（ultra fast）型態的火災，引起猛烈的燃燒。

四、救災急迫

若為大型車輛，如遊覽車的設計，除了本身柴油油箱為 100L 或歐洲車輛 300L（正常裝載 80%）的高火載量的因素外及柴油高發煙的特性；其中座椅為泡綿設計，約 40 個座椅的發煙量，其中燃燒時的發煙量將促使隧道能見度下降快速。

五、搶救不易

火災之高溫及濃煙導致逃生及滅火活動受阻，救災人員缺乏多方位進攻道路，火點接近有困難，尤其火源位於隧道中心，即使從隧道口或利用避難聯絡隧道進攻，也必須前進數百公尺或更遠的距離，且缺乏照明時，高溫、濃煙、熱氣、缺氧之狀況，更難以搶救。

在隧道中發生事故時，會以「濃煙」為危害用路人員的主要因素，除了第一時間告知消防設備的滅火外，更要使用緊急廣播設備進行人員疏散及引導外，避難人員對隧道的出口位置不熟悉也是個問題，必要時將人員引導至對向車道，或利用導坑將人員安置。

六、聯絡困難

因隧道距離過長，在事故或火災初期時，用路人可利用緊急電話和救災人員聯繫較為重要。

七、情況不明

事故初期可利用設備監測災況，但隨時間發展，會損害或影響偵測設備，故無法掌握災情。

八、救援急迫：

除預期之交通組塞外，形成大火時，其溫度會造成內部人員傷害，並損害隧道結構安全。

九、可及性低

事故發生不易進入，僅能利用導坑或橫坑迂迴進入。

十、通風(風向)

亦為影響消防搶救人員安全之重要因素。

參、研究設計與方法

一、火災模擬軟體 FDS 介紹

FDS 為美國國家標準協會（National Institute of Standard and Technology ）簡稱NIST,所研發出來的計算火場中流體力學軟體(Computational Fluid Dynamics)，一種計算 CFD（Computational Fluid Dynamics）的模擬軟體，FDS 的發展時程如表 3.1 所示，其為場模式（Field Model），採用大渦流模擬（Large Eddy Simulation）和直接數值模擬（Direct Numerical Simulation，DNS）來解聯立的偏微分方程式，且方程式中直接由 Navier-Stokes 推導簡化而出來,其中符合質量守恆、動量守恆、物種守恆及能量守恆之流體力學方程式，適用的範圍為低馬赫數（Low Mach Number）的流場分析，就是火場中藉由熱驅動的低速流場。燃燒理論之中則採用混合分率模式（Mixture Fraction Model），算出需計算的區塊中的各種物理變化情況。FDS 的發展時程表 1 所示。

表 1　FDS 發展時程

年份	版本
2000 年 02 月	第 1 版

2001 年 12 月	第 2 版
2002 年 11 月	第 3 版
2004 年 07 月	第 4 版
2007 年 10 月	第 5 版
2012 年 10 月	第 6 版

（資料來源：自行整理）

二、模型建立軟體 PyroSim

PyroSim 是一個互動式模型建立軟體作為火災動力學計算軟體（FDS）之前處理軟體。此套件模軟體提供即時的回饋並確保輸入 FDS 之文件格式正確。建模時可以任意切換公制單位模式或英制單位模式。PyroSim 提供二維和三維模型建立功能，並可使用旋轉、複製、移動等等功能簡化空間建立之程序。

以下介紹建模之步驟順序：

（一）網格劃分（Meshes）

透過 Meshes 可將所建之模型劃分網格，就網格大小可分為單一網格（Uniform Meshes）及非單一網格（Nonuniform Meshes），在較為龐大之模型內使用單一網格易造成網格數過多導致運算時間過長或是無法分析之情形，當網格數目過多但放大網格大小又會導致計算結果誤差過大之情況下，建議使用非單一網格，將模型切割為多個空間，在各空間以不同大小之網格進行劃分，一般以火源附近區域使用最小之網格，而向外區域則可略為放大。

（二）建立幾何外觀（Obstruction）

在 PyroSim 繪圖的介面中，可透過直接建立 3D 模型或是透過 2D 分別繪製各樓層空間幾何，在 2D 的建構模式中，可匯入建築平面圖做為考，可支援之檔案格式如 bmp、dxf、gif、jpg、png、tga 及 tif，複雜之建築空間以 2D 方式進行較為快速。

（三）表面性質設定（Surface）

此步驟用於定義固體（solid）以及通風口（vent）之性質，在此，固體表面可定義熱傳導、或是燃燒性質；通風口則可定義風速或溫度等性質。

（四）消防排煙設備設置（Devices）

建模過程中可依建築設計建立撒水設備、火警探測器以及機械排煙設備，前兩項均屬設備（device）之設定，而機械排煙設備則以通風口（vent）進行設定，其中火警探測器目前具有連動其他設備之功能，此功能亦大為提升模擬之真實度。

（五）量測點設置（Devices）

運用 FDS 計算之前，分析者須先由建築模型判斷模擬空間內何處具有重要之分析結果，如 CO、溫度、能見度、熱輻射及速度場等，由事前之規劃，模型建立時即進行量測點設置，量測點對於不同之量測對象可分氣體及固體之量測點（gas phase and solid phase device），在量測點設置處可獲得對應時間之量化數據。

（六）初始條件設定

模型空間內之初始環境條件亦可在 PyroSim 平台設定，初始條件一般以設定環境溫度為主。

（七）邊界條件設定

模型之邊界條件設定即為重要，在建築空間開口部以及外氣是否有速度場之存在均應詳細考慮以進行設定，對於與外氣連通或是自然風影響均可透過通風口（vent）進行設定。

（八）計算條件設定（Simulation parameter）

在此設定模型運用 FDS 計算之時間及求解方法，運算時間以秒為單位，而求解方法可選擇 Large Dddy（LDS）或是 Direct Numerical（DNS），此兩方法之不同處於可參閱前一節。

三、FDS 邊界條件建立

本研究主要是使用 FDS 版本 5.5.0 的版本，在本研究之前的雪山隧道模擬的部份皆為使用斷面積平均風速，截短型的高速公路隧道模型（如圖 2）進行模擬，本研究採用的長度為 5km，並將豎井的高度和間距納入該模擬的範圍之內，以完整模擬出火煙的分佈，而火源的部份則是採用雪山隧道原始設計量 30MW，亦即最糟的情況（worse case）下進行模擬（如圖 3 及圖 4）。雪山隧道分為南、北兩個方向，其中噴流式風機各有 56 台，軸流式風機設置於豎井的進氣與排氣的位置每組各 2 台共有 24 具，雪隧南下路段的豎井與豎井間距為 2.55 公里和 2.75 公里，而

此模型目前設置軸流式風機4具和噴流式風機16具並將每具風機設計位置作為1：1完整設置。

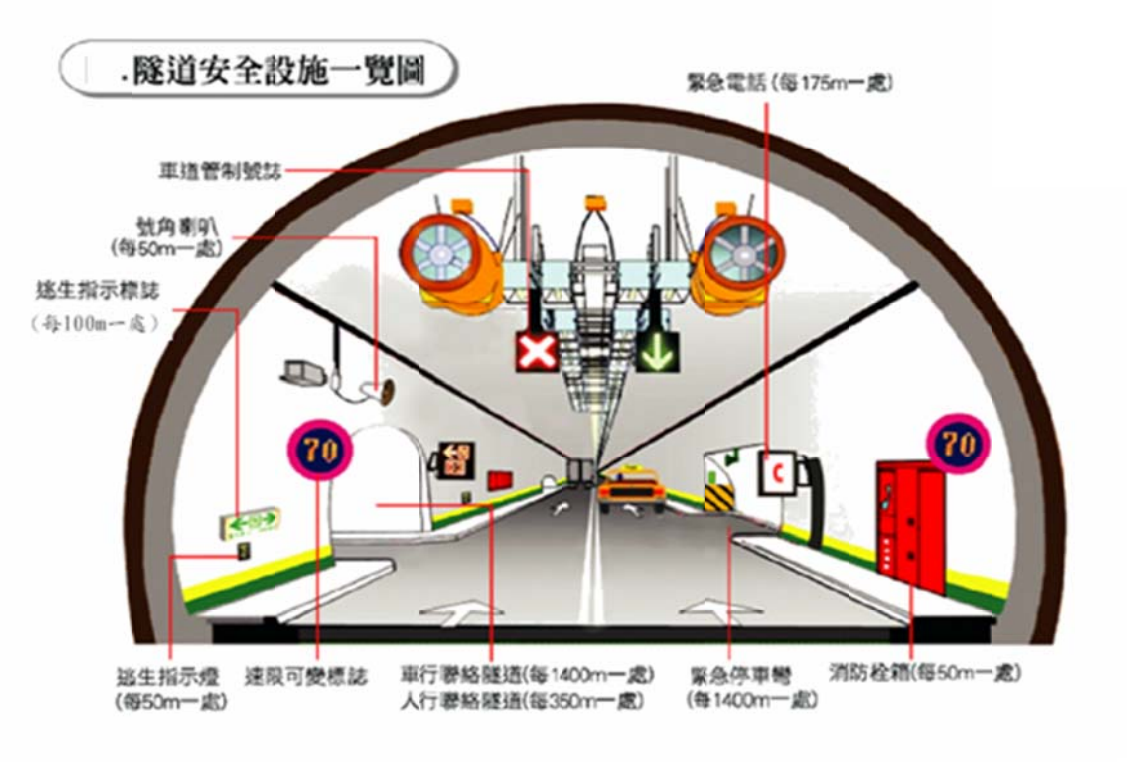


圖 2　雪山隧道設備、設施剖面圖

（資料來源：如【註[8]】）

[8]國道 5 號雪山隧道-設施簡介（https://www.freeway.gov.tw/Publish.aspx?cnid=610&p=120 ），民國 104 年 7 月。

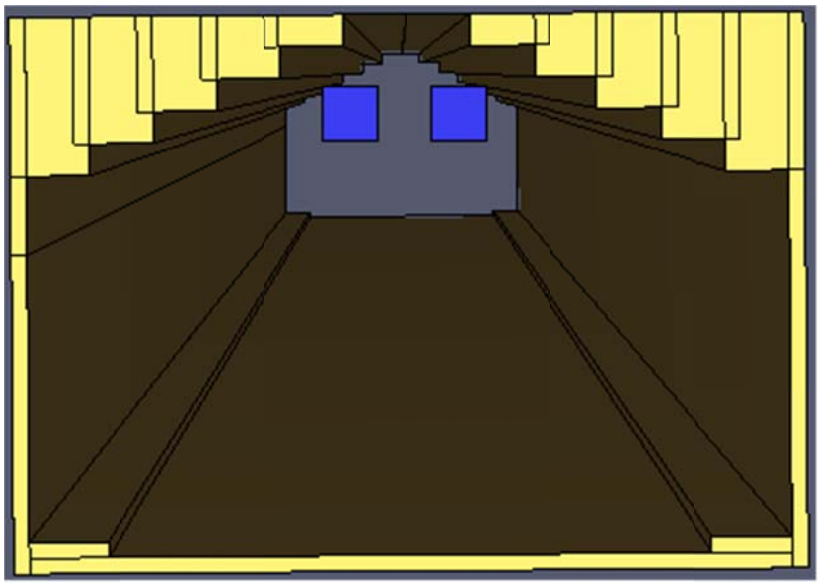


圖 3　FDS-雪山隧道剖面圖

（資料來源：本研究繪製）

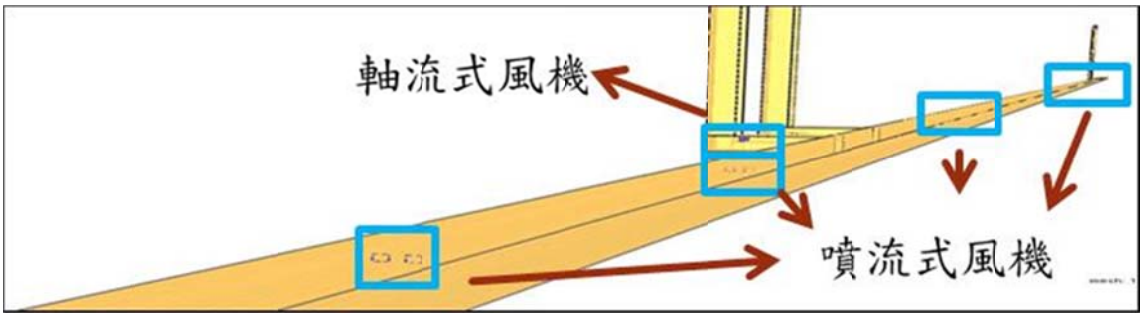


圖 4　FDS-雪山隧道透視圖

（資料來源：本研究繪製）

（一）火源設定

雪山隧道在設計初期是使用 30MW 為最大可以承受之火載量，本研究的重點在於火源若超過 30MW 即超出本身隧道可以承受之負載，有可能造成隧道倒塌會其他無法預期的狀況，所以火源依據文獻中【[2]、[9]、[10]、[11]】

[9] 黃晨維、何三平、簡賢文、沈子勝、李宏徹，〈隧道性能化設計〉，第八屆海峽兩岸隧道與地下工程學術與技術研討會，民國 98 年 11 月。

[10]林明勳何三平，《長公路隧道縱式通風排煙系統之性能化分析》，長榮大學職業安全衛生學系，碩士論文，民國 95 年 12 月。

[11]PIARC ,"Operation Systems and equipment for fire and smoke control in road tunnels", PIARC

的火源設計。

依據國內及國外文獻中所提到之火源大小，依照最危險的情況進行火源的模擬，火源依照實際實驗得到小客車的熱釋放率為 5MW、小貨車為 15MW、大客車為 30MW、大貨車 50MW，如表 2。

表 2　不同種類車輛熱釋放率

車輛熱釋放率（MW）		車輛種類			
		小客車*1	小貨車*1	大客車*1	大貨車*1
車輛種類	小客車*2	15	25	40	60
	小貨車*2	35	45	60	80
	大客車*2	65	75	90	110
	大貨車*2	105	115	130	150

（二）格點設定

本研究在格點設定方面以全區均勻格點及火源周圍局部加密兩種方式作為本計畫格點配置方式，考慮 FDS 模擬之效率與正確性，在評估最佳的隔點尺寸設定上，本計畫採用火源特徵直徑的計算方式來計算最大熱釋放率下的最佳格點尺寸，其原理說明如下。國外學者 Beum et al【[12]、[13]、[14]】定義火源附近最小長度尺寸（length scale）以火災特徵直徑（charscteristic fire diameter）D*表示，公式如下：

$$D^* = \left[\frac{Q^*}{\rho_0 \cdot C_p \cdot T_o \cdot \sqrt{g}} \right]^{2/5} \quad (3.1)$$

其中 Q*為熱釋放率（KW）、$\rho 0$ 為空氣密度（kg/m3）、Cp 為空氣比熱（KJ/Kg-K）、To 為環境溫度（K）、g 為重力加速度（m/s2）。另依據國內外

Publications, 2007,C3.3.

[12]Baum, H. R., and B. J. McCaffrey. ”Fire induced flow field-theory and experiment.”,Fire Safety Science , 1989 , 2: 129-148.

[13]McGrattan, Kevin B., Howard R. Baum, and Ronald G. Rehm.“ Large eddy simulations of smoke movement.” Fire Safety Journal ,1998 ,30.2: 161-178.

[14]Zhong, Wei, et al. “Influence of longitudinal wind on natural ventilation with vertical shaft in a road tunnel fire.” International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013. 57.2: 671-678.

學者相關研究可知，若 FDS 格點尺寸為 0.1D*時 LES model 之時間平均軸心速度與溫度會與 MaCaffery 的實驗回歸公式吻合，亦即表示若預正確模擬單一火災煙流燃燒情形，格點尺寸以 0.1D*之尺度最為適合。因此以上述特徵尺寸計算公式計算作為本計畫最佳格點大小的設定依據。

文獻中（註 12）以本計畫最大火源熱釋放率 Q= 65000kW 來計算，可得 D*為 4.8m，則 0.1D*約為 48cm，本研究後續將以 50×50×50 cm 作為火源最佳格點大小的設定依據。本研究以 0.5m×0.5m×0.5m 的格點大小作為此次模擬區域之格點，總格點數為 312 萬個。各項模擬參數列表如表 3 所示。

（三）性能式驗證指標

性能式防火為現代根據國內研究隧道【[15]、[16]】所提出，當火災發生時在隧道中的危害因子如表 3 所示，所以在 FDS 的驗證指標上即需加入分析的參數，此表也為後續隧道建置時模擬必須進行檢視的公路隧道性能式驗證基準指標。

表 3 隧道火災的危險因子

危害因子	分析點位	分析參數	安全臨界值
用路人避難安全性	距地面高 1.8 公尺	氣體溫度	< 60℃
		CO 濃度	< 800ppm
		可視度	> 10m
		輻射熱	< 2kW/m^2
消防救援可及性	距火源上下游 20 公尺，且距地面高 1.5 公尺高處	輻射熱	< 5kW/m^2
隧道結構完整性（註）	A.排煙管道混凝土隔版表面內部深度 0.8 公分處	固體溫度	< 380℃
	B.排煙管道混凝土隔版表	氣體溫度	< 500℃

[15]簡賢文教授研究室，《蘇花改緊急應變計畫專題研究——公路隧道水霧設備設計原則》，中央警察大學消防安全研究所，研究報告，民國 103 年 8 月。

[16]灣能美防災股份有限公司，〈隧道火災消防安全設計驗證模式之建立〉，研究報告，民國 103 年 8 月。

	面下方 5 公分處		
火勢延燒	距火源上下游 5 公尺，且距地面高 1.5 公尺高處	輻射熱	< 12.5kW/m2
備註：隧道結構完整性評估測量項目 A 和項目 B，兩項可擇一測量。			

四、煙控啟動模式

本研究主要是針對公路長隧道（以雪山隧道為例）之煙控方式來探討不同的排煙模式下，對於現有之排煙模式是否有較好的模式可以取代，減少火災發生時人員傷亡。而依據目前行政院核定之雪山隧道「防救災應變計畫」[17]規定，如果隧道內發生火災，則通風機必須依照預先設定之程序運轉，使用路人有較佳之逃生環境。其通風運轉模式可分為兩階段通風模式來進行：

（一）避難模式

是要幫助人員逃離發生火災之隧道，此模式之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隧道，送風機、排風機及噴流式風機之啟動或停止，則依照通風程式指令，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 2~4m/sec 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，以減少對煙層之擾動，同時必須關閉火災隧道全部聯絡道之防火防煙閘門。

（二）排煙模式

當陷在煙霧中之人員皆進入人行或車行聯絡隧道逃離，排煙模式必須由行控中心人員啟動以減少高溫對設備所造成之損害，並協助消防隊能快速救災，所有之送風機、排風機及噴流式風機必須啟動以產生較高之空氣流速。

（三）本研究使用模式

模擬範圍說明，本研究的模型範圍為雪山隧道南下 1 號通風換氣站前方到 2 號通風換氣站後方，即為國道五號 16.792K 到 21.792K，火源位置設定為 19.29K，火警分區為南下第三區火警，Eva1 的啟動模式為避難模式(單

[17]交通部，〈國道 5 號雪山隧道公路事故暨整體防災救災應變計畫〉，民國 96 年 10 月。

孔單向)的 F21，Eva2 則區別 Eva1。

在目前隧道風速因為風機和風機間距不同導致煙控需要探討，並針對原雪隧使用的煙控模式設計 2 種避難模式，情況之說明如下：

1.Eva1：原隧道的避難模式，維持隧道內部之通風運轉模式，對於火災地點上游 250 公尺內及下游 500 公尺內之風機維持不啟動狀態，噴流式風機上游啟動 4 組、下游啟動 0 組，豎井進氣軸流式風機啟動 1 具、排氣啟動 2 具軸流式風機，火源距離最近啟動豎井的軸流式風機位置為 150m。

2.Eva2：原隧道的避難模式，維持隧道內部之通風運轉模式，對於火災地點上游 250 公尺內及下游 500 公尺內之風機維持不啟動狀態，噴流式風機上游啟動 4 組、下游啟動 0 組，豎井進、排氣無啟動軸流式風機，火源距離最近啟動噴流式風機位置為 150m。

肆、煙控啟動機制分析

一、雪山隧道避難模式分析

本部分為測試雪山隧道當火災狀況發生時所會採行的其中一種應變措施，開啟煙控系統之緊急運轉中的避難模式，此模式為本研究前測 40 幾種情境中發現較有問題的，主要的原因在於兩豎井中間的風速是在隧道中最低的，且在南下隧道中，隧道入口的前面兩組風機距離一號豎井前的兩組風機距離有 1.85km，而此避難模式則開啟入口前 2 組噴流式風機和一號豎井前 2 組噴流式風機。

本研究採行 15、30、65MW 三種火源和 Eva1 為有開啟豎井風機、Eva2 為無開啟豎井風機進行比較，Eva1：有啟動豎井風機的情況下，火源距離啟動豎井有 150m、距離啟動噴流式風機有 300m；Eva2：無啟動豎井風機的情況下，火源距離啟動噴流式風機有 300m。

Eva1 和 Eva2，在設計初始為了包含入口端的噴流式風機組，且必須加上後方的豎井和火源設置位置合理化，而入口距離第一組風機組距離為 100m 再間隔 100m 為第二組，但是第三組的噴流式風機卻距離入口的第二組有 1800m，所以 5000m 的距離只能探討一個豎井的部份，火源距離入口 2500m，Ev1 火源前段共開啟 4 組噴流式風機和豎井進氣 1 具、排氣 2 具軸流式風機，測得最高風速 5.3m/s，Eva1 比 Eva2 在設定上多啟動了軸流式，而初始設定時，為了穩定 FDS 內模擬的風速，所以採用漸進式風速提昇，因為瞬間風速過快會導致 FDS 模擬產生數值紊亂而當機，且在前 260 維持 50%的設定風速運轉，即輸出風速 12m/s 等同輸出 75m^3/s 的風量，而一組兩具的風機下，就輸出了 150 m^3/s 的風量，測得最高風速 3.4m/s，

而 Eva4 初始條件為豎井無啟動，所以在 260 秒前的風速 Eva3 較 Eva4 高，260 秒後就是依照設計的煙控模式進行啟動，所以後面是沒有問題的。

（一）Eva1 和 Eva2 能見度分析

在火源上游 30m 的位置，Eva1 為有啟動豎井風機，在 296 秒時即火災發生的 96 秒，能見度下降到 10m。Eva2 為無啟動豎井風機，在 353 秒時即火災發生的 153 秒，能見度下降到 10m。

火源下游游 30m 的位置，Eva1 為有啟動豎井風機，在 331 秒也就是發生極快速火勢成長下約 131 秒，能見度下降到 10m。Eva2 為無啟動豎井風機，在 306 秒也就是發生極快速火勢成長下約 106 秒，能見度下降到 10m。

上述之說明，兩者情境的比較，主要是比較有無豎井風機啟動情況下煙層的變化，結果發現，火源上游 30m 位置，在 Eva1 為有啟動豎井風機，較 Eva2 為無啟動豎井風機快達到安全臨界值，分析發現 Eva1 在火災發生後煙層會被啟動兩具豎井排煙的部份吸走，增加逆煙層的距離外，也減少了人員避難的時間，以 30m 避難的時間計算，成人完成此距離的避難參考表 8 需要 205 秒、避難弱者則是需要 227 秒的距離，在 15MW 的火源下不管是上游或下游人員都無法進行安全避難。其數據分佈如圖 5。

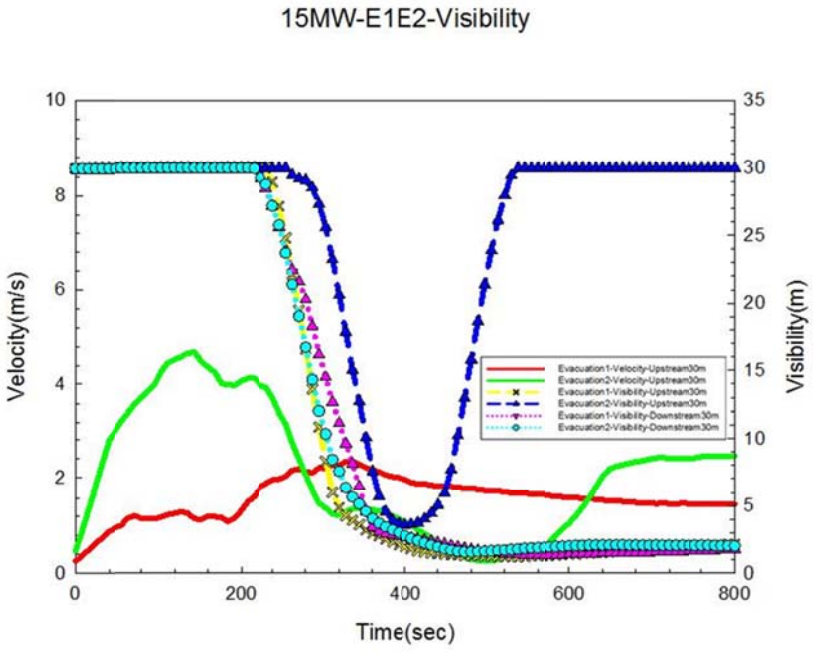


圖 5　Eva1、Eva2 在 15MW 的能見度

（資料來源：本研究繪製）

二、Eva1 和 Eva2 數據分析

Eva1 為原雪山隧道使用之避難模式，以上游 250m、下游 500m 風機不啟動，火源上游啟動 4 組噴流式風機、下游 0 組噴流式風機、軸流式風機進氣啟動 1 具、排氣啟動 2 具；Eva2 為比較 Eva1 而不啟動風機，以上游 250m、下游 500m 風機不啟動，火源上游啟動 4 組噴流式風機、下游 0 組噴流式風機、軸流式風機不啟動，探討能見度和溫度的情況將能見度的部份整理如：

（一）Eva1 和 Eva2 能見度分析

1.Eva1 和 Eva2 在前面 260 秒的風速起伏較大是差別在豎井的軸流式風機在上游增加 2 具軸流式風機的風量，FDS 在大風速短距離會產生當機所以前期有 1 具風機設定 50%風速啟動，此可建立更佳的流場。

2.Eva1 在火源設計的部分，因為火源位於豎井下游 150m 的位置，以致啟動 2 具風機風量過大，導致煙留有逆抽的現象。

3.Eva2 雖為比較 Eva1 的部份，此部份遵守火源上游 250m、下游 500m 的風機關閉之規則，所以煙流沒有逆流的情況發生，但結果顯示上游能見度是無法安全避難的。

4.以 30m 避難的時間計算，成人完成此距離的避難參考表需要 205 秒、避難弱者則是需要 227 秒的距離，所以都是不安全的。

5.Eva1 為有啟動豎井風機,所以能見度較下游較上游慢達到安全臨界值;Eva2 為無啟動豎井風機，所以能見度較上游較下游慢達到安全臨界值。

6.將能見度的部份整理如下表：(如表 4)

表 4　Eva1、Eva2 能見度總整理

Eva1、Eva2 能見度		上游		下游	
情境		火災持續時間	最低能見度	火災持續時間	最低能見度
15	Eva1	96	10	131	10
	Eva2	153	10	106	10
30	Eva1	100	10	121	10
	Eva2	155	10	105	10
65	Eva1	105	10	123	10

	Eva2	153	10	105	10

（二）Eva1 和 Eva2 溫度分析

1.上游的部份，有啟動豎井進排氣比較沒有啟動的部份，有啟動豎井較危險；下游的部份，兩者結果是一樣不安全的。

2.下游的部份，有啟動豎井進、排氣比較沒有啟動的部份，無啟動的部份可以延遲達到安全臨界值的時間。

3.將溫度的部份整理如下表：(如表 5)

表 5　Eva1、Eva2 溫度總整理

Eva1、Eva2 溫度		上游		下游	
情境		火災發生時間	最高溫度	火災發生時間	最高溫度
15	Eva1	196	60	228	60
	Eva2	192	44.14	203	60
30	Eva1	164	60	167	60
	Eva2	216	53.2	164	60
65	Eva1	164	60	164	60
	Eva2	238	60	167	60

三、逆煙層分析

（一）避難模式分析

模擬範圍說明，本研究的模型範圍為雪山隧道南下 1 號通風換氣站前方到 2 號通風換氣站後方，即為國道五號 16.792K 到 21.792K，火源位置設定為 19.29K，火警分區為南下第三區火警，Eva1 的啟動模式為避難模式(單孔單向)的 F21，Eva2 則區別 Eva1 模式，不啟動豎井軸流式風機。

在同一種情境下，逆煙層距離隨火災熱釋放率越大產生逆煙層越長，可是當風機啟動數量越多，逆煙層距離越短，6 種情境分析如下：

1.避難一（Eva1）：

原隧道的避難模式，噴流式風機上游啟動 4 組、下游啟動 0 組，豎井進氣軸流式風機啟動 1 具、排氣啟動 2 具軸流式風機，火源距離最近啟動

豎井的軸流式風機位置為 150m，所以在距離過短且排氣風量過大，煙流會被逆抽，隨火災熱釋放率越大煙層越不可控制。

2.避難二（Eva2）：

原隧道的避難模式，噴流式風機上游啟動 4 組、下游啟動 0 組，豎井進、排氣無啟動軸流式風機，火源距離最近啟動噴流式風機位置為 300m，所以在距離過長且風機風量不足的情況下，逆煙層為風機啟動的情境中最長，距離為 15MW：110m、30MW：123m、65MW：129m，整理如表 6 及圖 11 所示。

表 6　避難模式 4 種情境逆煙層時間、距離表

情境	15MW		30MW		65MW	
	時間（秒）	距離（m）	時間（秒）	距離(m)	時間（秒）	距離（m）
Eva1	-	-	-	-	-	-
Eva2	220	-110	232	-123	309	-129
Eva3	161	-47	133	-50	201	-53
Eva4	180	-81	208	-86	32	-96

備註：

（1）時間意指起火到發生逆煙層的時間。

（2）距離意指逆煙層距離，為火源到上游的距離。

（3）示意圖如下。

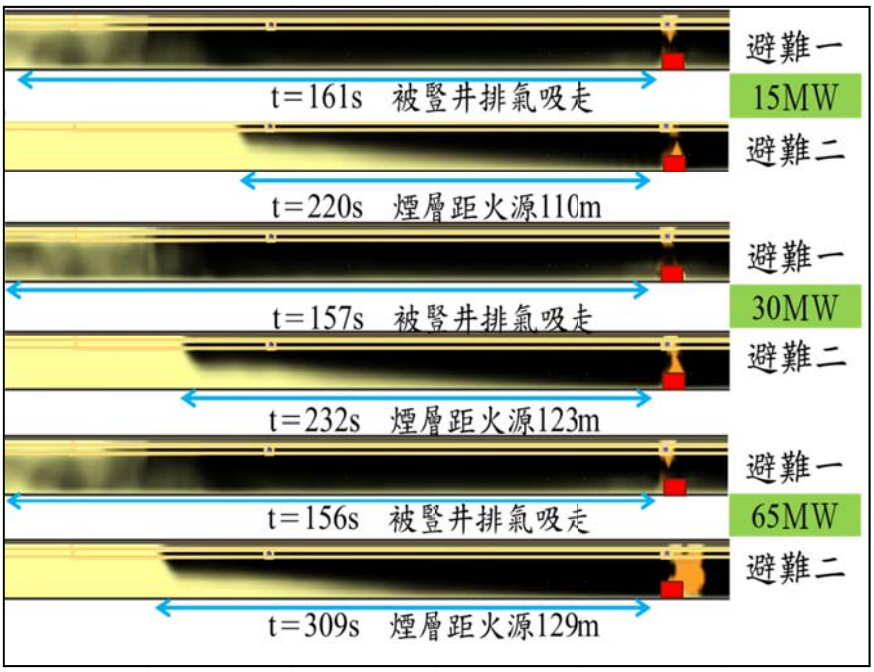


圖 11　Eva1 和 Eva2 最長逆煙層距離

（資料來源：本研究繪製）

四、避難策略分析

雪山隧道現行規定是可以供小客車和大客車行駛的，但禁止載有「消防法」所明訂之公共危險物品，目前雪山隧道速限最高時速為 90 公里/小時，雖然可以增加宜蘭花東等地的經濟發展，但對隧道內的安全還是存有疑慮的，隧道內發生追撞的火災及車輛老舊而引起的火災層出不窮，而在火災發生時人員的避難逃生更顯著重要，在 Ir. Evert Worm 學者[18]提出，人在發生事件時的整體作為可分為三個階段，分別為偵查階段（detection phase）、反應階段（reaction phase）、避難階段（evacuation phase），其所有的階段都要在人體可承受的極限值完成，如圖 12 所示。

1.探測階段（detection phase）：指火災發生初期到火災被偵查到的時間。

2.反應階段（reaction phase）：指火災被偵查到時人員開始採取動作的時間。

3.避難時間（evacuation phase）：指人員採取動作到達安全的環境的時間。

[18]Ir. Evert worm, ”Human behavior influencing tunnel safety”. Dutch ministry of transport public works management, 2003.

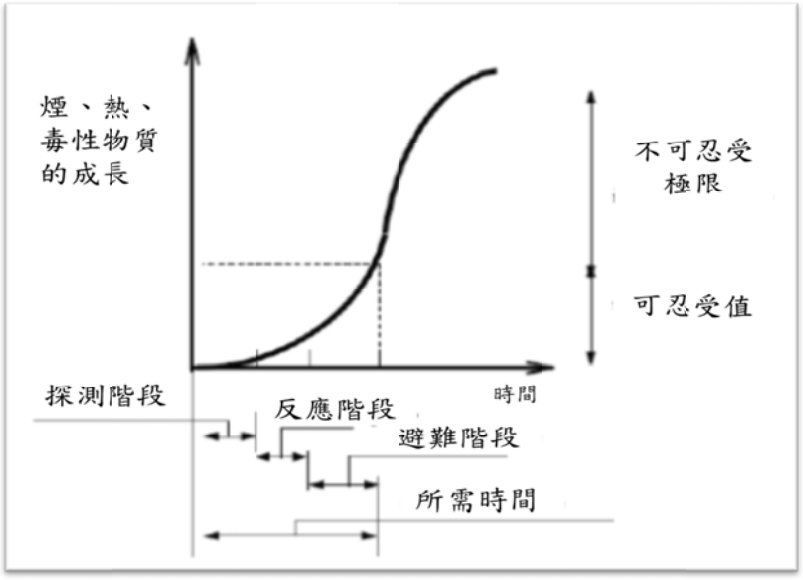


圖 12　火災發展時程和人員階段

（資料來源：如【註[17]】）

（一）人員避難時間計算

一般行駛於國道高速上之人員大多屬於出遊性質的人員居多，也是一般人所稱之避難弱者或是行動較緩慢之長者，但也大多數的人原是屬於壯年跟青年，而本研究探討之目的及採用較危險的狀況（worse case）下探討避難弱者對於隧道內發生火災時，是否得以離開危險區域至安全區域。

在探討避難弱者時，根據文獻【[19]】所中所使用之避難驗證公式，如下：

$$T_{req} = T_{det} + T_{resp} + T_{travel} = T_{det} + T_{resp} + S/V \quad (4.1)$$

其公式參數說明如下表所示。

表 7　用路人避難參數說明

參數名稱	參數說明
T_{req}	用路人避難所需時間（秒）
T_{det}	火警探測器偵測到火災所需時間（秒）

[19]台灣世曦工程顧問股份有限公司，〈緊急應變計畫專題研究期末報告（核定版）〉，交通部公路總局蘇花公路改善工程處，研究報告，頁 6-12，中華民國 102 年 5 月。

T_{resp}	用路人觀望到確認有火警至離開車輛準備展開避難行動所花的時間（秒）
T_{travel}	用路人離開車輛後到避難步行時間（秒）
V	用路人步行速度（公尺/秒）
S	用路人步行距離（公尺）

雪山隧道現有許多公用路人避難的安全防護裝置,如車行橫坑每1400m一處、人行橫坑每350m一處之後再接到下方的導坑，而最差的情況就是直接走出南北向之隧道口，除非發生的地點剛好在隧道的出入口，但火災發生時往往不事最有利的條件，而是屬於較危急的情勢，所以當火災發生時所產生之有毒濃煙和高溫濃煙，可能會造成用路人的傷亡，所以必須考量到最遠的距離，以致規劃避難時間表如表8所示。

依據UPTUN WP3：Human Response【[20]】針對隧道用路人火警避難反應調查重點分述如下：

1.立即反應（immediate response）

（1）沒有猶豫：2%。

（2）1.7鐘以內（up to 100 sec）：3%。

（3）超過1.7分鐘（more than 100 sec）：13%。

2.在廣播通知後開始反應（response after announcement）

（1）沒有猶豫：23%。

（2）仍在猶豫：59%。

3.平均步行速度=1.33m/s ± 0.55。

4.只有60%的駕駛人會自發性的關掉引擎。

5.大部分駕駛人沒有聽廣播的習慣。

6.會離開車輛之用路人並非100%。

範例：避難時間計算：

定義：成年人的步行速度1.2m/s、避難弱者步行速度0.64~1.12m/s

假設成年人步行速度為：

$$T_{req} = T_{\det} + T_{resp} + T_{travel} = 60 + 120 + \frac{350}{1.2} = 471.1 \text{ 秒}$$

[20]Martens, M., “UPTUN WP3: Human Response”, Netherland: TNO Quality of Life, 2007.

假設避難弱者步行速度：

$$\mathrm{T}_{req} = T_{\mathrm{det}} + T_{resp} + T_{travel} = 60 + 120 + \frac{350}{0.64} = 726.9 \text{ 秒}$$

表 8　避難時間表

安全區域距離（公尺）	成人（秒）	避難弱者（秒）
30	205	227
175	326	453
350	472	727
400	513	805
525	618	1000
700	763	1274

備註：情境為假設可能之距離

30 公尺：火源距離人行連絡道的距離。

175 公尺：位於一個距離人行連絡道只有一半的距離。

350 公尺：剛好位於一個人行連絡道距離。

400 公尺：取一個車輛之安全距離（50m）加上距離人行連絡道距離。

525 公尺：當走到一半時遇到濃煙折返。

700 公尺：走到人行連絡道時因無法進入而到下一個橫坑。

五、避難策略

本研究發現，當火災發生的初期，人員至少會花 3 分鐘才會發現火災，若要在火勢成長前完全避難，則需要 4 分鐘，所以，用路人要安全避難至少需要 3~4 分鐘的時間，這裡可以稱隧道黃金避難 4 分鐘。用路人可以藉由最近的人行聯絡道和車行聯絡道進行避難，但是當隧道的噴流式及豎井的軸流式風機啟動時，會加速煙層的流動，屆時火源下游的用路人會相較於上游的用路人危險，所以坪控中心必須迅速以全線號角廣播指引火源下游用路人在火災初期向火源上游移動，或是向左右的人行及車行聯絡道避難，並利用廣播提醒用路人關閉聯絡道的門，以防止歷史案例的重演。

雪山隧道在設計上並沒有路肩設計，但每 1400m 有設一緊急停車彎，南北雙

向共有 16 處，而每 1400m 有車行連絡道、每 350m 有人行連絡道供用路人在避難上使用，隧道內部除了出入口為開口外整體隧道為一封閉空間，容易因為火災的濃煙而失去方向，所以當火災初期時避難的引導和策略就顯得格外重要，以致其避難策略為以下幾點：

（一）火災發生的前導作業

1.針對用路人，如圖 13 所示

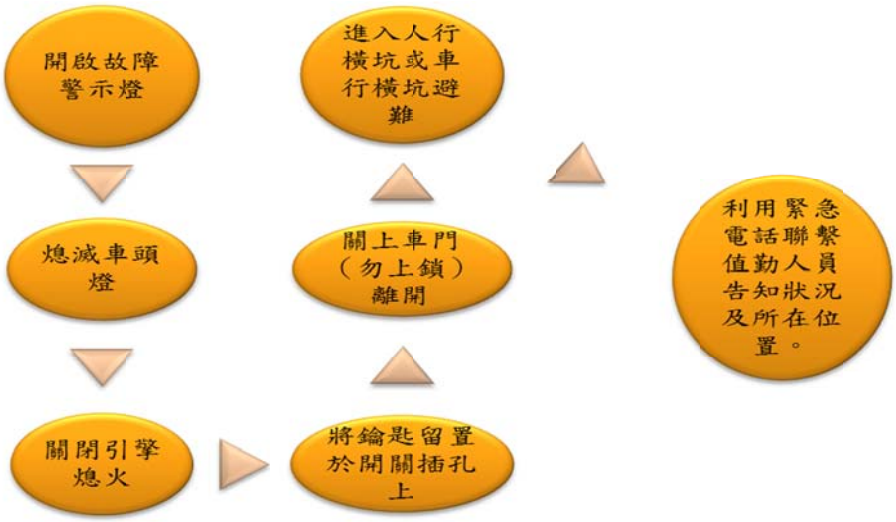


圖 13　用路人前導行為圖

（資料來源：本研究繪製）

2.行控中心

（1）公警單位、自衛消防人員或洞口消防隊抵達現場回報，決定前導管制作業，立即通報相關救災及支援單位。

（2）掌握事故上游交通狀況，對向隧道交通狀況。

（3）指示隧道內用路人利用人行或車行聯絡隧道進行疏散。

（4）視現場狀況指導用路人利用現場消防設備進行初步滅火。

（5)確保現場無線電聯絡通訊正常，雪山隧道內各項設備之操作正常。

（二）人員避難指導及交通疏導管制

1.用路人

（1）受困雪山隧道內之用路人遵循資訊可變標誌及廣播指示，往逆行車方向避難，或往緊急出口或安全地區移動。

（2）上游車輛由交流道離開行駛平面替代道路；雪山隧道外車輛禁止

進入隧道。

2.行控中心

（1）訂定交通疏導管制計畫供應變中心指揮官決策。

（2）操控資訊可變標誌（CMS）及車道管制號誌（LCS）警告後方車輛禁止進入。

（3）掌握隧道內人員狀況，用路人及救災人員位置。

（4）會同公警單位進行交通衝擊分析提供應變中心指揮官決定是否進行大區域交通管制及改道計畫。

(5)確保現場無線電聯絡通訊正常,雪山隧道內各項設備之操作正常。

（三）事故處置及受困者、傷患救助

1.用路人

（1）具活動力者自行疏散避難，並協助其他用路人脫困或避難。

（2）受傷者等待救援並告知救援人員事故情形。

2.行控中心

（1）隨時與現場各分組組長及指揮官保持通訊機能，掌握現場救災單位進入方向及進入路徑俾利指揮調度後續支援單位。

（2）確認交通管制措施，通報指揮官。並通知現場救護車及救援車進出路線。

（3）聯繫指揮官，回報受困人數，提供傷患救助後送資訊。

（4）通知警廣最新交通管制及改道計畫。

（四）避難方向

1.用路人

（1）火災發生後火災下游車輛立即開往出口。

（2）下車後的用路人立即往火災上游的車行或人行連絡道避難。

2.行控中心

（1）以廣播方式告知現場人員立即往上游避難。

（2）立即派人員到現場引導用路人。

伍、結論

一、依照目前雪山隧道所採的煙控為緊急運轉中的避難模式，其風速的量測點為兩豎井的中央位置約為中繼通風站位置，經過 FDS 反覆測試發現風速有低於 2m/s 以下的情況，主要原因在於入口的 2 組風機距離豎井前方的 2 組風機風機有

1850m 的距離，雖有南下入口處的自然風速補充，但還是不夠產生足夠的推力（air purge）使後方煙層推動，而產生逆煙層和減少安全避難時間。

二、研究 Eva1 啟動豎井風機和 Eva2 無啟動豎井風機中發現，如果減少或關閉豎井排氣時，可以增加隧道內穩態流動的風速，而下游風機的開啟，可以決定煙層是否會被豎井排氣的風量逆向反抽，意思即下游噴流式風機啟動可能可以提昇上游的風速。

三、Eva1 當火源在豎井下游 150m 時會導致豎井排煙的風量過大，會抵消原本上游噴流式風機產生的風速，煙層易被逆抽而導致逆煙層距離加大；但是在 Eva2 關閉豎井時，雖有維持上游 250m、下游 500m 不啟動的規則，原先設計避難 30m 為安全距離，但還是在成人避難時間 205 秒和避難弱者 227 秒內超過安全臨界值。

四、Eva1 以通風的概念來看，上游 4 組風機產生的風量共為 192m3/s，而豎井排氣設計 1 具有 150m3/s，兩具便有 300m3/s，雖豎井進氣有增加 1 具 150m3/s，但出風口的位置具豎井排氣有 50m 距離而無太大效益，所以才有風速相抵消的問題，隧道內的風速，主要的產生是上游給予一定體積的風量，而體積加大向下產生壓力而推擠氣體產生風速，而豎井排氣將大量空氣抽離導致風速不足。

五、在火災發生時，行控中心在初期的作為是發現火源，中期為引導人員或車輛的過程，末期為火勢已經延燒告知人員進行避難階段，而火災發生時，行控中心必須在 60 秒內啟動雪山隧道煙控系統，不管是制式的模組或是手動啟動噴流、軸流式風機，而在本研究發現，越早啟動緊急運轉的避難或排煙模式，可以在火災初期時，減緩煙層下降的時間，並增加人員的避難時間。

參考文獻

1. 監察院－國道 5 號雪山隧道火燒車事故案調查報告 http://www.cy.gov.tw/dlCount. asp?fileName =4101317231971.pdf
2. 簡賢文、施邦築、黃依慧、柯孝勳、謝慧如，〈公路隧道火災緊急應變及救災策略模式之研究〉，地下空間與工程學報，2008 年 04 期。
3. 蕭力愷、沈子勝、許文勝，《長公路隧道大客車火災大量傷患緊急醫療救護對策之研究-以雪山隧道為例》，中央警察大學消防科學研究所，碩士論文，民國 97 年 6 月。
4. 宋光鴻．曹文琥，《長隧道消防安全設備之研究-以雪山隧道為例》，中華技術學院，土木防災工程研究所，碩士論文，民國 96 年 7 月。
5. 簡賢文，〈公路隧道大規模火災緊急應變及救援策略模式之研究〉，研究報告，

民國 96 年 2 月。

6.INGASON, HAUKUR. “Fire development in large tunnel fires” Fire Safety Science, 2005, 8: 1497-1508.

7.國道 5 號雪山隧道－設施簡介（ https://www.freeway.gov.tw/Publish.aspx?cnid=610&p=120 ）,民國 104 年 7 月。

8.黃晨維、何三平、簡賢文、沈子勝、李宏徹,〈隧道性能化設計〉，第八屆海峽兩岸隧道與地下工程學術與技術研討會，民國 98 年 11 月。

9.林明勳何三平,《長公路隧道縱式通風排煙系統之性能化分析》，長榮大學職業安全衛生學系，碩士論文，民國 95 年 12 月。

10.PIARC ,”Operation Systems and equipment for fire and smoke control in road tunnels”, PIARC Publications, 2007,C3.3.

11.Baum, H. R., and B. J. McCaffrey. ”Fire induced flow field-theory and experiment.” Fire Safety Science , 1989 , 2: 129-148.

12.McGrattan, Kevin B., Howard R. Baum, and Ronald G. Rehm. “ Large eddy simulations of smoke movement.” Fire Safety Journal ,1998 ,30.2: 161-178.

13.Zhong, Wei, et al. “Influence of longitudinal wind on natural ventilation with vertical shaft in a road tunnel fire.” International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013. 57.2: 671-678.

14.簡賢文教授研究室,《蘇花改緊急應變計畫專題研究——公路隧道水霧設備設計原則》，中央警察大學消防安全研究所，研究報告，民國 103 年 8 月。

15.灣能美防災股份有限公司,〈隧道火災消防安全設計驗證模式之建立〉，研究報告，民國 103 年 8 月。

16.交通部,《國道 5 號雪山隧道公路事故暨整體防災救災應變計畫》，民國 96 年 10 月。

17.Ir. Evert worm,”Human behavior influencing tunnel safety”. Dutch ministry of transport public works management, 2003.

18.台灣世曦工程顧問股份有限公司,〈緊急應變計畫專題研究期末報告(核定版)〉，交通部公路總局蘇花公路改善工程處，研究報告，頁 6-12，中華民國 102 年 5 月。

19.Martens, M.,“UPTUN WP3: Human Response”, Netherland: TNO Quality of Life, 2007.