

北宜高速公路隧道火災避難模擬分析之研究

Analysis of fire and evacuation simulation in Shiue Shan highway tunnel

邱晨瑋 *

Chiu, Chen-Wei

李瑞祥 **

Li, Jui-Hsiang

蔡春進 ***

Tsai, Chuen-Jinn

摘要

雪山隧道自 2006 年 6 月啟用後，為全台灣最長，並為亞洲第九長之隧道，隧道之火災有聯絡困難、狀況不明、救援急迫性、救災不易濃煙大、疏散及避難困難、溫度高、可及性低、進入搶救困難等特性，本研究利用文獻探討之方式，確認隧道內第一個中繼站較易產生煙層，因此選定距離該中繼站最近之 13 號車行聯絡道進行火災模擬，比較該火警分區風機正常啟動及未啟動下，大客車火警及一輛小客車兩輛大客車火警之安全臨界值；並利用交通部高速公路局交通資料庫之車流資料進行一般車流情境及高乘載車流情境之避難模擬，並以避難模擬結果對比火災模擬結果之安全臨界值，分析人員避難失效之情形。

隧道汽車火警經模擬後可發現越大的火源造成之逆煙層越長，安全臨界值之各項指標以氣體溫度及能見度最容易到達，風機啟動後則可確保距火源最近人行聯絡道可持續避難；避難情境經模擬後可發現使用距離火源最近人行聯絡道之避難人員最後一人離開時間分別為一般情境 330 秒及高乘載情境 370 秒。將避難模擬之結果對比火災模擬之結果進一步分析可發現在未延遲通報下，本研究之各情境之避難人員均可安全避難。

關鍵字：長隧道、避難、Pyrosim FDS、Pathfinder、噴流式風機、軸流式風機

Abstract

Since its opening in June 2006, the Shiue Shan highway tunnel has been the longest tunnel in Taiwan, and the ninth longest tunnel in Asia. Tunnel fires have characteristics

* 臺灣警察專科學校消防安全科教授，eswin.wci@gmail.com。

** 國立陽明交通大學產業安全與防災學程碩士班，a3751391@yahoo.com.tw。

*** 國立陽明交通大學環境工程研究所講座教授，cjtsai@nycu.edu.tw。

such as difficulty in communication, uncertainty about the situation, emergency rescue challenges, difficulties in rescue operations, heavy smoke, evacuation challenges, high temperatures, and difficulties in approach and entry.

The research uses literature review to confirm that the first relay station of Shiue Shan highway tunnel is more prone to produce back smoke layering. Therefore, we choose the thirteenth car cross passage as the FDS simulation scenario, which is the closest car cross passage to the first relay station. Then we simulated the fire source of one bus and the fire source of two buses with one car to compare the safety threshold when fans in the Shiue Shan highway tunnel are activated or not. We also use the traffic file of the Freeway Bureau to compare the Pathfinder simulation of the general traffic flow scenario and the high load capacity traffic flow scenario. Finally, we compare Pathfinder simulation with the FDS simulation to analyze whether people in Shiue Shan highway tunnel fail to evacuate or not.

After simulating a car fire in the tunnel, we found can know that the larger the fire source, the longer the backlayering will be. Air temperature and visibility are the thresholds most easily reached among all safety thresholds. The cross passage closest to car fire can still be used after the fans activate. After Pathfinder simulation we know that the last man using cross passage closest to car fire to evacuate spends 330 seconds in the general traffic flow scenario and 370 seconds in the high load capacity traffic flow scenario. After comparing Pathfinder simulation with the FDS simulation we can find that people in all scenario can safely evacuate when the notification works normally.

Key words: Tunnel, Evacuation, Pyrosim, FDS, Pathfinder, Jet Fan, Axial-Flow Fan

壹、緒論

一、研究動機

台灣因為本島地形遍布山地，以及都會區之交通用地缺乏，使得全台各地遍布長短規模不一的隧道，達 1 公里以上之隧道即達到 59 條，隧道火災因而成為重要課題，放眼國內外嚴重的隧道火災災例，雪山隧道於 2012 年 5 月 7 號下午 1 時 27 分所發生的火燒車事故，總共造成 2 死 34 傷的嚴重慘劇，而因通風排煙系統之

設計因素，造成火勢撲滅後之隧道其中仍有大量濃煙；而義大利、法國交界的白朗峰隧道（法語：Tunnel du Mont-Blanc）在 1999 年 3 月 24 日亦有嚴重災例，起因為有輛載運易燃的麵粉和牛油的車輛於隧道內發生火警，總共釀成 39 人死亡，並且動員了包含法國、義大利和瑞士內共三國救災，花了 3 天才撲滅，白朗峰隧道也因高溫造成頂拱崩塌，並且於事故後 3 年的 2002 年才又重新開放通車，另由於雪山隧道尚未有相關避難模擬之研究，鑒於上述重大災例，因而產生進行隧道內通風排煙控制及人員避難研究之想法。

長隧道於火警發生時具有以下特性：

（一）狀況不明

隧道內的火災發生一開始可以利用偵測設備取得初步訊息，但火災不斷的成長，原先設有之設備可能遭受高溫進而失去功能，導致救災人員無法掌握現場之狀況。

（二）聯絡困難

隧道內人員如何迅速利用行動電話與回報外部救災人員內部狀況及加強隧道中無線通訊設備的使用時機及技巧仍是目前長公路隧道之重要課題。

（三）救援急迫性

長公路隧道內部發生火警首先造成交通的壅塞，並且會使得隧道中廢氣量的增加以及高溫等情形，進而造成車輛內部人員及避難人員的身體傷害及引發二次災害，因此隧道內火災之救援具有相當的急迫性。

（四）進入搶救困難、可及性低

長公路隧道內部發生火災時，因缺乏對外之開口，使得救災人員難以進入，只能利用隧道內之既有避難設施進入；或者透過廣播方式告知隧道內支駕駛向兩側避讓，使救災車輛得以從隧道車道之中間通行。

（五）疏散及避難困難

隧道因內部的橫斷面以及道路狹窄，發生火災時因上游車輛無法向前行駛，因而使內部難以避難。隧道中通常設有有車行聯絡隧道，但以過去隧道發生火災之案例可得知，車輛要藉由車行聯絡道離開實在難以達成。

且車輛內部均有油料，因此隧道火災容易造成內部延燒，因而導致難以救援。

（六）濃煙大、溫度高

隧道中火災發生後，因內部的橫斷面以及道路狹窄，狀態如同密閉空間，內部之煙曾容易蓄積，因此燃燒所產生的熱氣及煙霧於內部急速蔓延而可能造成延燒，且視訊監測設備之視野容易受到大量濃煙常遮蔽而無法有效監控內部之狀況；另外，因隧道之封閉特性限縮氣體之供給而導致不完全燃燒現象及產生有害之氣體。另外，隧道內部照明設備容易因火災生成之高溫而造成破壞而使能見度降低以及進而使隧道本身之強度弱化，增加內部人員逃生之困難。

（七）救災不易

隧道內火災發生後內部容易被高溫氣體及煙霧填滿，內部人員及救災人員因而受阻而無法有效逃生及進入，因而難以直接接觸火點及滅火，尤其當火勢發生在長隧道的中心附近時，即便從隧道口或利用其他路徑攻擊火點都會長達數百公尺或甚至上千公尺，在照明設備的故障情況下，以及其他不利因素，搶救更加困難。

二、研究目的

- （一）分析雪山隧道現行運行車種於隧道發生火災時所產生之危害因子。
- （二）檢視雪山隧道現行風機啟動模式對於隧道內之汽車火警之煙控能力。
- （三）利用避難模擬軟體模擬隧道內之乘客所需避難之時間。
- （四）對比危害因子是否造成人員避難失效之情形。

三、研究範圍及研究限制

- （一）本研究煙控模擬部分以針對國道 5 號雪山隧道公路事故暨整體防救災應變計畫中風機啟動模式進行模擬，研究範圍為避難模式之單孔單向。
- （二）避難模擬部分以兩車型聯絡道間做為模擬範圍，距離為 1400 公尺，車流資料以 111 年 4 月交通部高速公路局交通資料庫做為樣本。
- （三）本研究不探討避難人員於避難不利環境之行為，視達到安全臨界值以上為避難失效。

(四) 因全尺寸網格數過多，故採用 5 公里隧道模型作為煙控模擬模型。

(五) 本研究不探討起火車輛人員之避難及延燒情形。

貳、文獻探討

一、長隧道定義及火災特性

(一) 長隧道定義

國內未特別定義，針對隧道進行分級之法規如下：

1. 高速公路及快速公路交通管制規則¹第 16 條第 1 項第 4 款：

四、行駛於長度四公里以上或經管理機關公告之隧道，小型車應保持五十公尺以上之行車安全距離，大型車應保持一百公尺以上之行車安全距離。如因隧道內道路壅塞、事故或其他特殊狀況導致車速低於每小時二十公里或停止時，所有車輛應保持二十公尺以上之行車安全距離。

2. 交通部訂定之「公路隧道消防安全設備設置規範²」中有針對隧道進行分級如下：

隧道長度分成甲、乙、丙、丁、戊共 5 個等級。隧道平均每日單孔交通量超過 4,000 輛時，隧道等級往上提升，致超過 40,000 輛時，則分成甲、乙、丙三個等級。如表 1 及圖 1 所示：

表 1 隧道分級表

	隧道等級	隧道長度
1	甲級	3,000 公尺以上
2	乙級	1,000 公尺以上，未達 3,000 公尺
3	丙級	500 公尺以上，未達 1,000 公尺
4	丁級	300 公尺以上，未達 500 公尺者
5	戊級	100 公尺以上，未達 300 公尺者

資料來源：公路隧道消防安全設備設置規範

¹ 高速公路及快速公路交通管制規則，交通部

² 公路隧道消防安全設備設置規範，交通部

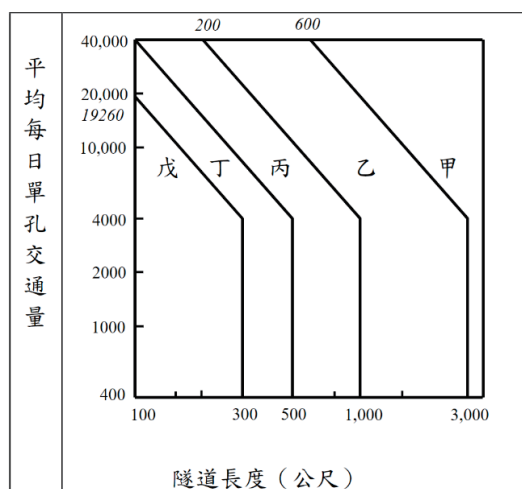


圖 1 隧道分級圖

資料來源：公路隧道消防安全設備設置規範

國外部份，日本之長隧道定義為三公里以上之隧道，歐洲則將長隧道定義為四公里以上之隧道。

（二）長隧道火災特性

長隧道火災之火災特性，依據消防署訂定之救災安全手冊³具有以下特性：

長隧道發生火災意外事故時，有別於開放性路面的各種不利救災之危害境況：

1. 聯絡困難：

用路人如何利用緊急電話迅速與救災人員取得聯繫之機制或強化隧道內無線電或行動電話使用機能之通訊設施為今後長公路隧道之重要課題。

2. 狀況不明：

事故發生初期雖可藉偵測設備取得初步訊息，但隨時間發展，部分偵測設備可能遭受損壞或造成功能喪失，以致外界救人員無法完整掌握現場災情發展。

³ 消防署，第十九之一章搶救長公路隧道火災安全指導原則（民國 111 年 3 月 6 版）

3. 救援急迫性：

長公路隧道發生重大事故除造成交通阻塞外，亦會導致隧道內部廢氣量激增及溫度升高等情形，而造成車輛內駕駛人或乘客身體之傷害，進而引發二次災害，故隧道事故救援具有急迫性。

4. 進入搶救困難、可及性低：

長公路隧道發生事故時，因聯外開口有限，救災人員進入不易，僅能利用預設之導坑或橫坑等迂迴進入；或者用路人依平日安全宣導停靠道路兩側，讓出中間通道供救災車輛通行。

5. 濃煙大、溫度高：

隧道內一旦發生火災，由於隧道內側空間狹小，近似密閉空間狀態，無法進行自然排煙，因此燃燒所產生的煙霧及熱氣不易散發而急速瀰漫，有延燒之危險性，且大量濃煙常遮蔽視訊監測設備之視野，以致無法發揮災情監控功能；另外，因隧道新鮮外氣供給受限，致有因不完全燃燒而產生有害氣體及缺氧可能性。除此之外，火勢所產生之高溫常造成隧道內部照明設備之破壞導致能見度降低外，更可能進而導致隧道本體結構之燒毀崩塌，增加人員避難逃生之困難性。

6. 疏散及避難困難：

隧道內部橫斷面及道路矮窄狹小，發生火災時因上游車輛前後緊連，導致人員、車輛疏散困難。隧道內雖設置有車行聯絡隧道，但根據過去發生的火災經驗來看，要疏散火點後方的車輛幾不可能。且車輛皆有油箱，因此火勢在車輛間蔓延將非常迅速，以致救災不易。

7. 救災不易：

火災時隧道內高溫及熱氣濃煙充塞，逃生及滅火活動受到阻礙且救災人員因缺乏順暢的救災道路，以致難以接近火點撲救，尤其當火勢係發生於長隧道中心一帶區域時，即使從隧道口或利用避難聯絡隧道進攻火災現場亦將長達數百公尺或更遠距離，加上缺乏照明設備、在高溫、濃煙、熱氣、缺氧之惡劣狀況下，搶救更顯困難。

二、歷史隧道火警災例

隧道火災之危險性高，以下彙整雪山隧道通車後火燒車一覽表⁴如表 2 所示。

表 2 雪山隧道通車後火燒車一覽表

項次	日期時間	地點	車種	原因	交通管制執行狀況	傷亡情形
1	95 年 12 月 21 日 20:00	南下 25.3K 外側車道	小貨車	底盤起火	暫時封閉外側車道，確認故障車輛駛出隧道外後開放	無
2	96 年 04 月 30 日 09:21	北上 21.5K 內側車道	自用小客車	引擎過熱冒煙（未起火）	封閉北上內側車道	無
3	96 年 05 月 13 日 20:56	北上 27.5K 外側車道	自用小客車	引擎過熱冒煙起火	封閉北上外側車道	1 人受傷（駕駛開啟引擎蓋燙傷）
4	97 年 08 月 03 日 12:13	北上 22.6K 外側車道	自用小客車	故障起火	封閉北上二車道	無
5	97 年 10 月 17 日 10:22	北上 15.8K 外側車道	遊覽車	機件故障冒煙起火	封閉北上二車道及短暫封閉南下線內側車道。	無
6	98 年 7 月 31 日 14:56	北上 22.5K 緊急停車彎	小貨車	後車斗冒煙	封閉北上外側車道	無
7	100 年 3 月 15 日 23:25	南下 26.3K 緊急停車彎	自用小客車	故障起火	封閉南下二車道	無
8	100 年 12 月 7 日 17:30	北上 26.8K 內側車道	自小客車	疑似疲勞駕駛致撞及兩側隧道壁及步道緣石後，車輛故障底盤起火	封閉北上二車道及南下內側車道	無
9	101 年 5 月 7 日	南下 26K	小客車爆胎減速行駛，後方		封閉雙向隧道	2 死、34 傷

⁴ 雪山隧道通車後火燒車一覽，高速公路局
<https://www.freeway.gov.tw/Publish.aspx?cnid=610&p=1152>

項次	日期時間	地點	車種	原因	交通管制 執行狀況	傷亡情形
	13:27	外側車道	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			
10	103 年 7 月 17 日 14:44	南下 16.5K 內側車道	小貨車	引擎起火	封閉南向車道	無
11	105 年 3 月 27 日 01:34	北上 21.8K 外側車道	小貨車	起火冒煙	封閉北上內外側車道	無
12	106 年 9 月 7 日 03:35	南下 27.9K 外側車道	小客車	爆胎仍繼續行駛 導致起火	封閉雙向隧道	無

資料來源：雪山隧道宣導網頁

三、現行隧道通風模式

(一) 公路隧道消防安全設備設置規範⁵

現行隧道通風模式，依據交通部訂定之「公路隧道消防安全設備設置規範」可分位以下幾種：

1. 縱流式通風系統：指通風風向與隧道交通方向平行之通風系統。
2. 橫流式通風系統：指通風風向與隧道交通方向垂直，且全部藉由機械風管通風之系統。
3. 半橫流式通風系統：指通風風向與隧道交通方向垂直，且部分藉由機械風管通風，而部分藉由隧道本身作為風道進行通風之系統。

(二) NFPA 502 2020 年版⁶

1. 縱流式通風系統（Longitudinal Ventilation Systems）
2. 全橫流式通風系統（Full Transverse Ventilation System.）
3. 半橫流式通風系統（Semitransverse Ventilation System.）
4. 點排式通風系統（Single Point Extraction）

⁵ 公路隧道消防安全設備設置規範，交通部

⁶ NFPA 502 2020

四、逆煙層及臨界風速

逆煙層及臨界風速為縱流式通風系統（Longitudinal Ventilation Systems）之火災防治作為所產生之現象，相關說明如下：

（一）逆煙層⁷

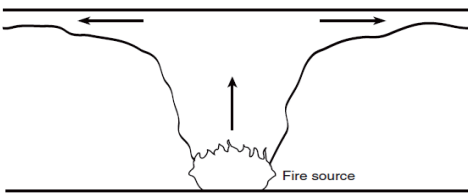
隧道通風排煙系統控制煙層之能力，取決於火源 HRR(Heat release rate) 之大小，火源 HRR 愈大時，其天花板噴流（Ceiling Jet）的速度亦愈大，反之，火源 HRR 愈小時，其天花板噴流的速度亦愈小。隧道內無設置通風排煙系統時，煙層撞擊至天花板後由四周擴散，如圖 15；隧道內雖設置通風排煙系統，但火源產生之天花板噴流速度大於通風排煙系統運轉產生之速度時，將無法有效地控制煙層，使得煙層發生逆流（Backlayering）之現象。

（二）臨界風速⁸

通風排煙系統運轉產生之速度大於火源產生天花板噴流之速度，將可有效地將煙層依循順行方向排除，而不會產生煙層逆流之情形之速度，稱為臨界風速。

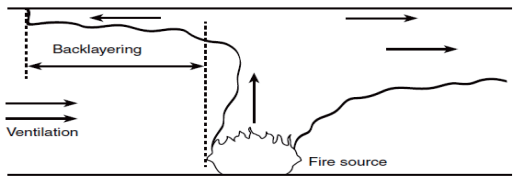
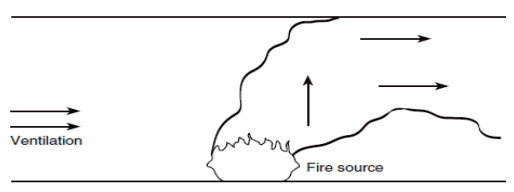
相關圖示如表 3 所示。

表 3 隧道火災圖示表

	圖示	備註
1		隧道火災示意圖

⁷ 莊仁馨、張慧蓓，縮小尺度隧道火災之臨界風速與逆煙層探討，長榮大學，碩士論文，中華民國 108 年 7 月

⁸ 莊仁馨、張慧蓓，縮小尺度隧道火災之臨界風速與逆煙層探討，長榮大學，碩士論文，中華民國 108 年 7 月

	圖示	備註
2		逆煙層示意圖
3		臨界風速示意圖

資料來源：長榮大學碩士論文，縮小尺度隧道火災之臨界風速與逆煙層探討，莊仁馨、張慧蓓，108 年

（三）相關研究

黃晨維⁹等人運用不同的火源大小及不同的距離火源送風距離進行模擬，得出不同火源大小不產生逆煙層之臨界風速，如表 4

表 4 臨界風速整理表

項次	火源大小	臨界風速
1	5 MW（兩輛小客車追撞）	3.3m/s
2	20 MW（巴士引擎過熱起火）	4.8m/s
3	30 MW（裝載貨物卡車起火）	5.3m/s
4	60 MW（不同類型車輛組合火災）	6.2m/s

資料來源：第八屆海峽兩岸隧道與地下工程學術與技術研討會，「隧道性能化設計」，黃晨維、何三平、簡賢文、沈子勝、李宏徹，民國 98 年

鄭嘉宏¹⁰等人模擬結果顯示，大客車火災（釋熱率為 30MW）與兩輛小客車火災（釋熱率為 8MW）的臨界風速分別為 3.7m/s 及 2.5m/s，在縱向通風風速大於此值時，火災產生的濃煙不會產生逆流，可以保持上游避難環境上的安全。另外在撒水設備動作後導致煙層下降對避難環境的影響是

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 鄭嘉宏、吳貫遠，隧道火災縱向通風與臨界風速數值模擬研究，中央警察大學消防科學研究所，碩士論文，民國 97 年

在尚可接收的範圍。

在起火點下游發生堵車的情形時，縱向通風系統的啟動會將濃煙吹向下游造成火勢延燒，形成用路人避難上的危險，在僅有以縱向通風系統作為單一火災防護系統的長公路隧道，應注意火災發生時的避難引導及緊急應變作為。

Olivier Vauquelin¹¹於隧道火災煙控模擬實驗中針對不同的熱釋放率、隧道坡度、隧道高度、隧道寬度進行實驗，實驗後發現越高之熱釋率所需之臨界風速越大、越大之隧道坡度所需之臨界風速越小、越高之隧道高度所需之臨界風速越大、隧道寬度則與臨界風速無正相關，整理如圖 2。

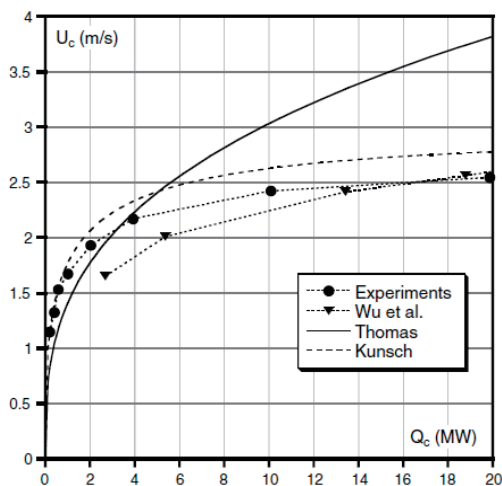


Fig. 5. Critical velocity as a function of the fire HRR.

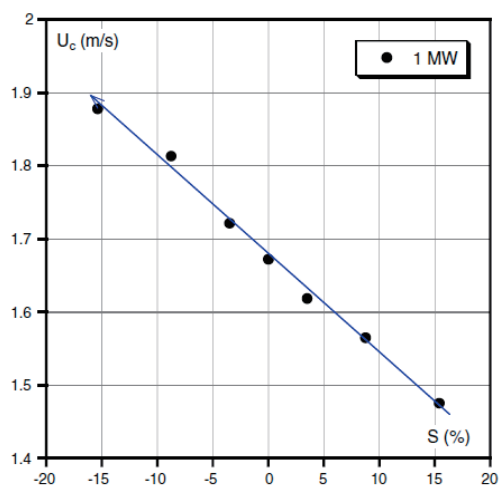


Fig. 6. Critical velocity as a function of the tunnel slope.

¹¹ Olivier Vauquelin, "Experimental simulations of fire-induced smoke control in tunnels using an "air-helium reduced scale model": Principle, limitations, results and future" ScienceDirect, Tunnelling and Underground Space Technology 23 (2008) 171-178

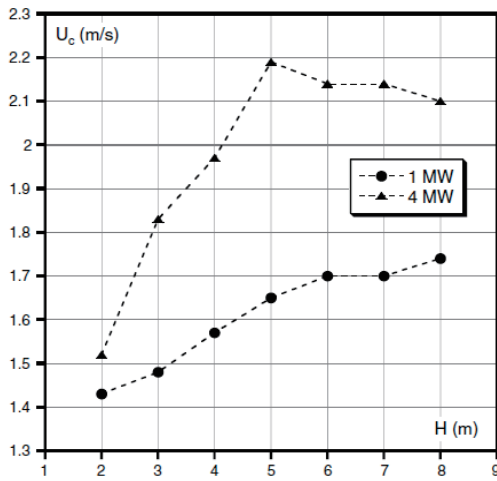


Fig. 7. Critical velocity as a function of the tunnel height.

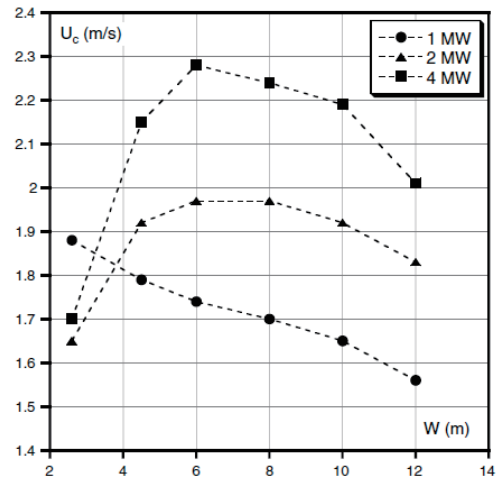


Fig. 8. Critical velocity as a function of the tunnel width.

圖 1 不同影響變因對於臨界風速影響圖

資料來源：Principle, limitations, results and future"ScienceDirect," Experimental simulations of fire-induced smoke control in tunnels using an "air-helium reduced scale model", Olivier Vauquelin, 2008

五、雪山隧道通風排煙策略

(一) 雪山隧道之通風排煙設備如表 5 所示¹²

表 5 雪山隧道通風設備表

設施項目	設施內容說明
通風豎井	1.共 3 組； 2.每組各含進、排氣豎井一座，進、排氣（相隔約 50 公尺）分離。
通風機房	1.共 3 處；配合進、排氣通風豎井設置，每處 2 座； 2.作用：將隧道內污濁空氣經排氣豎井排出，新鮮空氣由進氣豎井引入隧道。
通風中繼站	1.共 3 處；隧道北口 1 號豎井與 2 號豎井間、2 號豎井與 3 號豎井間、3 號豎井與隧道南口間各 1 處，每處 2 座； 2.作用：兩孔隧道間較乾淨空氣之交換。
軸流式風機	1.共 40 具，可變壓變頻控制轉速（風量）； 2.3 處 6 座（進、排）通風機房每座 4 具，共 24 具； 3.3 處 6 座通風中繼站每座 2 具，共 12 具。 4.兩側洞口 2 處各 2 具，共 4 具，提供導坑與聯絡隧道通風系統進氣之用。

¹² 國道 5 號雪山隧道公路事故暨整體防救災應變計畫

設施項目	設施內容說明
	5.依據所屬機電系統 7E 標特定條款規定，軸流風機之耐火 度及時效為： (1)洞口軸流風機：150°C，1 小時以上 (2)排氣軸流風機：250°C，1 小時以上 (3)進氣軸流風氣：無規定（因係用於抽進外界新鮮空氣）
噴流式風機	1.共 112 座； 2.設置於隧道內車道上方。 3.所屬機電系統 7E 標特定條款，無針對噴流式風機耐火 度及時效之規定。
空氣品質偵測設備	1.NO _x （氮氧化物）及 CO（一氧化碳）偵測器：偵測隧道內廢氣濃度； 2.VI（能見度）偵測器：偵測隧道內能見度； 3.與監控系統連動，自動啟動風機排出污濁空氣。

資料來源：國道 5 號雪山隧道公路事故暨整體防救災應變計畫

（二）雪山隧道通風系統運轉模式¹³

現行雪山隧道通風系統運轉模式可分為以下五種：

1. 正常運轉狀況：

- (1) 於正常運轉狀況時，隧道通風量須隨著交通量之改變，在適當之標準值以內時，則不需要啟動任何主風機，在此種情況時，各排風機風門必須打開以利用排風豎井之煙囪效應。
- (2) 當兩孔隧道或其中一孔隧道之交通量增加，以致汽車活塞效應所產生之隧道內空氣流量不足以保持隧道內廢氣濃度在預先設定之標準值以內時，則部分主風機必須啟動，並聯安裝之主風機若只需啟動一台，則另一台風機關閉。

2. 塞車運轉狀況：

- (1) 當車速降到約 40km/hr 以下或甚至停滯不前之狀況，且所有風機皆已啟動，此時如隧道內之一氧化碳濃度達到 150ppm（part per million，百萬分之一）或能見度達到 0.009m⁻¹（透光率單位），則監控系統通知交控系統作必要之交通管制。
- (2) 如一氧化碳濃度超過 200ppm 或者是能見度超過 0.012m⁻¹ 達 15 分鐘之久仍未改善，則必須通知交控系統暫時關閉隧道或採交控方式限制車輛進入。

¹³ 國道 5 號雪山隧道公路事故暨整體防救災應變計畫

3. 緊急運轉狀況：

- (1) 如果隧道內發生火災，則通風機必須依照預先設定之程序來運轉以使用路人有較佳之逃生環境。
- (2) 當區段控制中心工作站（位於雪山隧道北口機房）處於正常工作狀態時，火災通風控制由區段控制中心工作站下達指令，不同區域發生火災時之不同通風指令儲存於區段控制中心工作站，當火警系統將某一地點發生火災之訊號通知區段控制中心工作站時，區段控制中心工作站執行所儲存對於該地點發生火災時之通風指令。
- (3) 當區段控制中心工作站無法下達指令時，則由通風空調控制器各自執行其火災之通風程式，不同區域發生火災時之不同指令儲存於各通風空調控制器。
- (4) 區段控制中心工作站及通風空調控制器之運作狀況訊號均傳送至坪控中心機電監控工作站，由機電人員 24 小時全時駐守監看。
- (5) 隧道內發生火災，通風運轉模式可分為兩個模式，第一為逃生模式，第二為排煙模式。
- (6) 當導坑發生火災時，則必須關閉所有位於導坑與機房或聯絡隧道相鄰處防火防煙閘門。
- (7) 當管線廊道發生火災時，則必須關閉該管線廊道與機房或聯絡道相鄰處之防火防煙閘門。
- (8) 防火防煙閘門動作情形可由坪控中心機電監控工作站監視。

4. 停電運轉狀況：

由於緊急電源之容量有限，只能供應部份風機之運轉，因此全線（包括彭山隧道、南港隧道）之交通量約須控制在尖峰交通量之 35% 以下，以使隧道內之廢氣濃度不超過預先設定之標準。負責北上線（上坡）之送風機及排風機，可啟動並聯安裝之兩台中任何一台至全容量，但中繼風機則不須啟動。負責南下線（下坡）之風機則不必啟動，利用汽車活塞效應所造成之空氣流動即可達到降低隧道內廢氣濃度之需求。

5. 維修運轉狀況：

- (1) 當其中一孔隧道須封閉維修時，採取適當疏導措施以替代道路疏解車流。
- (2) 維修中之隧道則應由控制系統依收集之信號指令啟動適當數量之風機，以使該隧道內之空氣品質達到規定。

緊急運轉狀況¹⁴為雪山隧道現階段火災之運轉模式，其煙控之模式又可分為「避難模式」和「排煙模式」兩種，前兩者又可分為「單孔單向」和「單孔雙向」等分類，避難模式共有 28 種啟動模式、排煙模式 12 種啟動模式，共有 40 種。

1. 避難模式：可分為「單孔單向」及「單孔雙向」兩種
2. 排煙模式：隧道中人員完成避難並完成滅火作業後，針對殘餘的煙霧火將隧道內的空氣品質持續通風達到規定的數值以下的小循環模式及大循環模式。

六、隧道火災安全防護標準

（一）隧道火災安全防護標準在簡賢文¹⁵2012 年的研究中提到防護之標準應如表 6

表 6 隧道火災安全防護標準

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°C
		一氧化碳濃度	< 800 ppm
		能見度	> 10 m
		輻射熱	< 2 kW/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	< 5 kW/m ²
隧道結構完 整性	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°C
	排煙管道混凝土隔版表面下方 5 公分處	氣體溫度	< 500°C
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	< 12.5 kW/m ²

資料來源：公路隧道水霧設備設計原則，簡賢文，2012

（二）NFPA502 2020¹⁶年版針對隧道火災危害因子亦有相關驗證指標，如表 7

¹⁴ 黃祈勝、邱晨瑋，公路隧道煙控啟動模式及避難策略之研究——以雪山隧道為例，國立交通大學，中華民國 104 年 7 月

¹⁵ 簡賢文，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，2012

¹⁶ NFPA, NFPA 502Standard for Road Tunnels, Bridges, and Other Limited Access Highways, 2020

表 7 NFPA 502 隧道火災危險因子驗證指標

危害因子	分析參數	安全臨界值
用路人避難安全	氣體溫度	$< 60^{\circ}\text{C}$
	CO 濃度	最大值 2000ppm 幾秒鐘 平均值 1150ppm 以下 6 分鐘 平均值 450ppm 以下 15 分鐘 平均值 225ppm 以下 30 分鐘 平均值 50ppm 以下無限制
	可視度	距 30m 處可識別 $8.6\text{cd}/\text{m}^2$ 之指示燈 距 10m 處可識別牆壁及門
	輻射熱	$\leq 2.5\text{ kW}/\text{m}^2$
隧道結構完整性	固體溫度	混凝土表面 $< 380^{\circ}\text{C}$
		鋼或鑄鐵隧道結構溫度 $< 300^{\circ}\text{C}$
		混凝土中鋼筋溫度 $< 250^{\circ}\text{C}$

資料來源：NFPA 502

七、隧道避難相關文獻

康哲寅、簡賢文¹⁷以Pathfinder及BuildingExodus分別進行避難境況模擬，觀察避難路徑人流表現與壅塞風險，並比對消防救援動線及避難路徑使用之交互影響。

模擬結果顯示，事故點最近上游人行聯絡道承載過大避難人流，且於內部及入口處產生壅塞，事故點最近下游人行聯絡道使用率則最低，消防人員如規劃使用事故點上游人行聯絡道做為救援動線，抵達現場時間將因與大量避難人流衝突造成將近 7 分鐘之延遲。

葉怡伶、簡賢文、吳貫遠¹⁸以台 9 線蘇花改公路改善工程東澳隧道為研究對象進行文獻探討、實地調查及避難模擬分析（PATHFINDER）。在分析文獻後歸納水霧及通風系統有效或無效啟動下，用路人安全避難容許時間（ASET, Available Safe Egress Time），以此前提下設定交控中心不同的通報預警時間，比較分析交控中心即時通報及延遲通報之避難模擬情形。共執行二種情境，分別以車禍堵車位置的不同進行設定，並假設車輛間距離及人行聯絡隧道緊急出口前方停駐車輛種

¹⁷ 康哲寅、簡賢文，長公路隧道避難行為與緊急應變之整合性研究——以草埔隧道為例，中央警察大學，碩士論文，中華民國 108 年 7 月

¹⁸ 葉怡伶、簡賢文、吳貫遠，水霧與通風系統交互作用下隧道火災之救援應變模式——以台 9 線蘇花公路改善工程東澳隧道為例，中央警察大學，碩士論文，中華民國 107 年 6 月

類會導致避難時間（RSET, Required Safety Egress Time）有不同的結果。最後將模擬結果結合實務單位意見回饋及風險溝通，提出可供初期指揮單位的交控中心能夠引導隧道用路人疏散，以及協助後續公助消防力之實質策略及建議。

參、研究內容與方法

一、避難理論簡介¹⁹

有關避難之理論大多為英國學者 Marchant 所提出之避難理論，此理論之主要參數為時間，分析避難各階段之時間與避難者無法自立逃生環境出現時間的對比關係，同時指出：1.避難設施包括出入口、走廊（通道）及樓梯之設計，基本上需要考慮火場燃燒之成長及變化。2.火場避難者心理、生理變化及行為之變化。3.火場避難環境之變化。其所引伸的公式如下：

$$\frac{T_p + T_r + T_a}{T_f} \leq 1$$

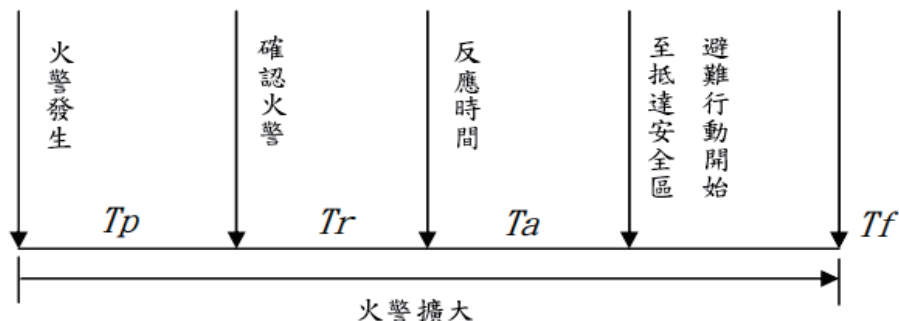
其中

T_p ：偵測火災發生時間

T_r ：對火災做出反應時間

T_a ：對火災作出行動時間

T_f ：避難者無法自立逃生環境出現時間



¹⁹ 弱勢人員防火避難等待空間規劃原則初探，內政部建築研究所自行研究報告，中華民國 98 年 12 月

二、Pathfinder 避難疏散模擬軟體簡介

本研究選擇使用 Pathfinder 模擬軟體進行情境模擬，疏散模擬軟體可用來替代真人演練狀況，並分析真實可能發生的情境應對策略，透過軟體分析，可以減少人事成本花費及風險產生，尤其模擬長照機構發生火災時，避難弱者之生理狀態對避難逃生產生的跌倒、插管患者移動造成的健康風險的耐受程度較小。

Pathfinder 軟體中運動環境是一個三維三角網格設計，意在匹配建築模型的實際尺寸，此運動網格可以手動輸入，也可以根據導入的數據（例如 FDS 幾何形狀）自動輸入以配合實際建設模式，並給予每個模擬的個體一套獨立運動的參數，如最高速度，出口的選擇等。

三、FDS 火災模擬軟體及 Pyrosim 建模模擬軟體簡介

FDS 主要利用統禦方程式（Governing Equation）來分析火災的流場變化情形，適合用於低流速下之流動、火災產生之熱傳問題與熱浮力等相關之流體問題。

FDS 的模擬型態為場模式（Field Model），原理為將欲模擬的對象物細分為許多細小的格點，並利用軟體執行內建之公式，將火災現場的質量、動量、物品組成、紊流參數等非线性偏微分參數方程式離散化代數方程式，可正確的預測火災發生後過程中的各種火災現象，利用 Navier-Stokes 方程式進行運算，得到上述分隔後各格點之壓力、溫度、速度、濃度值。

Pyrosim 為一個將火災模擬軟體（FDS）以圖形化的方式進行建模的用戶介面系統程式，可運用於火災模擬之建構，並且能夠有效的預測包含火災後煙流之流動狀況、火災各階段之溫度以及相關有害氣體之分布情形。

FDS 本身利用流體動力學作為基礎來模擬火場的真實情境，而 Pyrosim 則提供圖形化的編輯以及於建模的同時可查看建模之狀況以即刻查看建模之正確性。

Pyrosim 之應用情形大致如表 8：

表 8 Pyrosim 應用項目表

序號	項目
1	性能化建築防火設計
2	消防安全評估之項目驗收評估
3	火災事故事後調查
4	滅火實際模擬

序號	項目
5	火災自動探測與警報系統開發

資料來源：本研究彙整

四、避難模擬情境設定

（一）雪山隧道避難設備概述

雪山隧道起於坪林終於頭城，全長達 12.9 公里，內部為雙孔雙向之設計，隧道內發生火災時可往人行橫坑、車行橫坑及上游處避難，相關避難設施如表 9：

表 9 雪山設備避難設施介紹

車道寬	3.5m
隧道維修步道寬	兩側各 1.0 m
淨高	4.6m
車道數	雙向共四車道（單向二車道）。
人行聯絡隧道	每 350m 一處，共 28 處。
車行聯絡隧道	每 1400m 一處，共 8 處。

資料來源：雪山隧道宣導網頁

（二）雪山隧道內部疏散路線²⁰

1. 隧道內部之疏散路線，主要為引導災害現場上游受阻車輛，利用車行聯絡隧道迴轉至對向隧道後駛離隧道，駛離隧道後再引導由交流道離開高速公路。
2. 由於隧道內部空間有限，若利用車行聯絡隧道迴轉時，可能與救援車輛衝突，加以用路人可能依指示，離開車輛至聯絡隧道避難，因此進行隧道內部車輛疏散之時機如下：
 - (1) 具有排除受阻車輛以維持救援動線之需要，並經評估不影響救援作業。
 - (2) 災害處理結束或將近結束時，為利於復原作業之進行，評估道路仍須一段時間封閉。
3. 利用車行聯絡隧道疏散車輛，須確認對向車道已管制，並派員於車行聯

²⁰ 國道 5 號雪山隧道公路事故暨整體防救災應變計畫

絡隧道執行指揮管制，以確保安全。

4. 疏散方式為由最靠近事故點之車行聯絡隧道迴轉疏散，惟得由現場人員依狀況研判及採取當之方式。

相關之疏散方式如圖 3 所示。

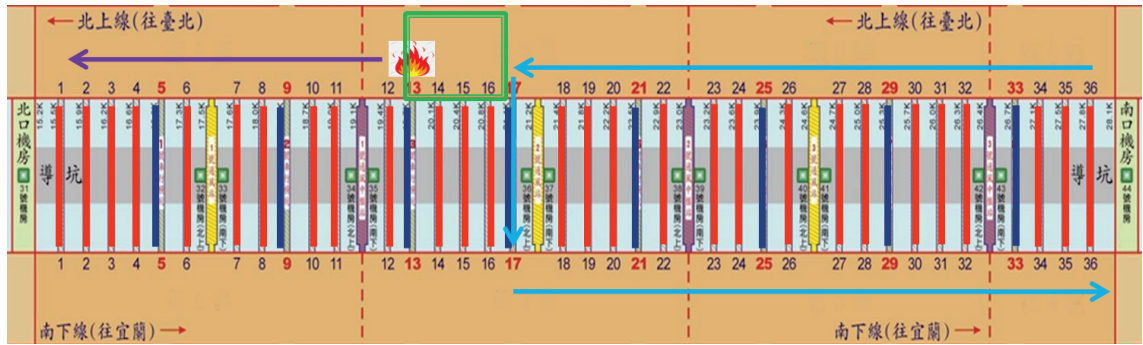


圖 2 雪山隧道內部車輛疏散路線圖（以北上線發生災害事件為例）

資料來源：國道 5 號雪山隧道公路事故暨整體防救災應變計畫及本研究繪製

（三）避難情境設定

1. 避難時序：

雪山隧道通報時間之設定，依據國道 5 號雪山隧道公路事故暨整體防救災應變計畫中災例之分析整理如表 10：

表 10 雪山隧道災例報案分析一覽表

編號	日期	時間	報案至廣播啟動時間	報案方式
1	96.4.30	09:21	60 秒	用路人報案
2	96.5.13	20:56	120 秒	用路人報案
3	97.8.3	12:13	5 秒	用路人報案
4	97.10.17	10:22	0 秒	自衛消防編組人員發現
5	98.5.31	15:02	無資料	雪山分隊通報
6	100.3.15	23:24	0 秒	公警通報
7	103.7.17	14:44	無資料	公警通報
8	105.3.27	1:34	無資料	CCTV
9	106.9.7	3:37	300 秒（簡訊通報）	公警通報
10	108.1.8	8:41	300 秒	CCTV

資料來源：本研究彙整

由上表可得知，隧道火災發生後行控中心最常以人員報案之方式受理到火災發生，比例達到 70%，並且自受理後至啟動廣播之時間之中位數為 60 秒，因而取 60 秒為火災發生之後至廣播啟動之通報時間。

本研究並參考葉怡伶（2018）之研究，設定除距離起火點最近之前兩輛大客車外，其餘之司機及乘客非火災廣播後一開始即避難，有 30 秒之猶豫時間，並於 90 秒後開始避難，大客車之避難則設定乘客及司機於事故後由大客車之兩門離開，相關情境如圖 4 所示。

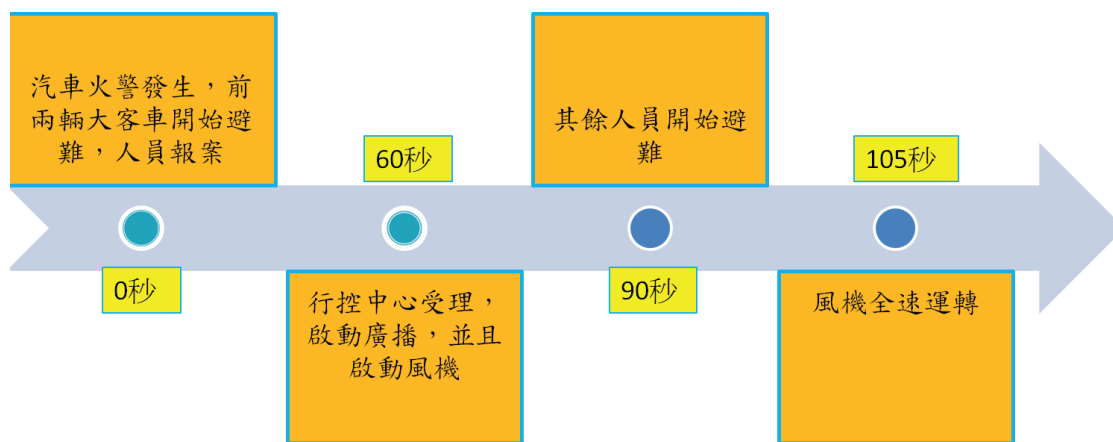


圖 3 隧道火災避難時序圖

資料來源：本研究彙整

2. 車流種類資料:

雪山隧道屬於國道 5 號，為交通部高速公路局管理，交通部高速公路局針對車流種類資料²¹進行相關統計，並且每五分鐘產生一次統計數值，本研究採 111 年 4 月之每周一 13 時至 14 時之北上車流作為一般塞車避難模型依據；另由於國道 5 號星期日 15-20 時常態實施北向「高乘載管制」，因此採 111 年 4 月之每周日 17 時 18 時之北上車流作為高承載塞車避難模型依據，相關之車流統計資料如下表 19，並由下表可發現，一般情境之小客車及小貨車比例約為 3:1，高承載情境之小客車及小貨車比例約為 5:1，如表 11。

²¹ 交通部高速公路局交通資料庫 (<https://tisvcloud.freeway.gov.tw/>)

表 11 車流統計資料表

種類	一般情境	高承載情境
小客車	72.78%	79%
小貨車	25.04%	16.35%
大客車	2.14%	4.87%

資料來源：交通部高速公路局交通資料庫，本研究彙整

3. 避難模擬情境彙整表，表 12

表 12 避難模擬情境彙整表

項目說明	詳細項目說明	
模擬範圍	9m x 1400m	
人員車種設定	一般情境	小客車（男性 1 名、女性 1 名）、小貨車（男性 1 名）、大客車（男性 23 名、女性 22 名）
	高承載情境	小客車（男性 2 名、女性 1 名）、小貨車（男性 3 名）、大客車（男性 23 名、女性 22 名）
車輛尺寸	小客車	寬 2m、長 4.5m
	小貨車	寬 2m、長 5.5m
	大客車	寬 2.5m、長 12.5m，門 76cmX185cm
車輛間距	20 公尺	
避難開始時間	距離起火點最近之車輛	0 秒
	其餘車輛	90 秒（60 秒通報+30 秒猶豫）
步行速度	男性：1.4m/s、女性：1.2m/s ²²	

資料來源：本研究彙整

²² 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，國立臺灣科技大學，碩士論文，中華民國 90 年

4. 模型介紹：

本研究以 Pyrosim 建模之煙控模型來建立避難模型，建立出長度 1400 公尺，寬度 9 公尺之避難模型，並將避難人員設定於車上，如圖 5 及圖 6 所示。

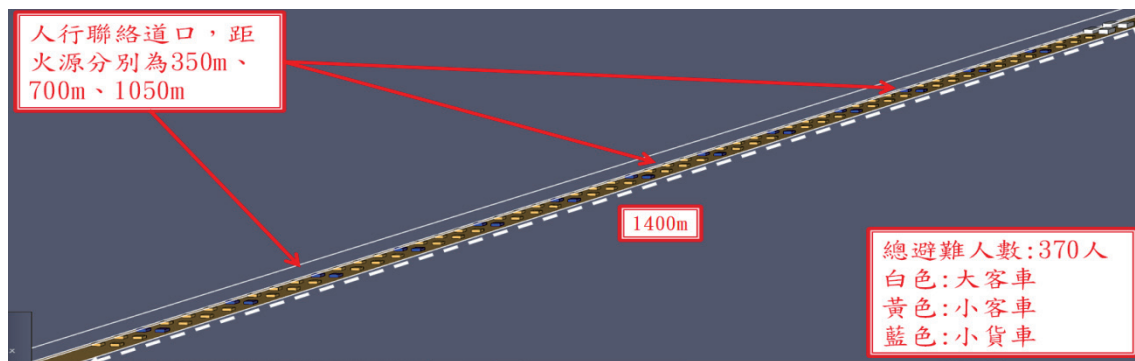


圖 4 一般情境避難模型示意圖

資料來源：本研究彙整

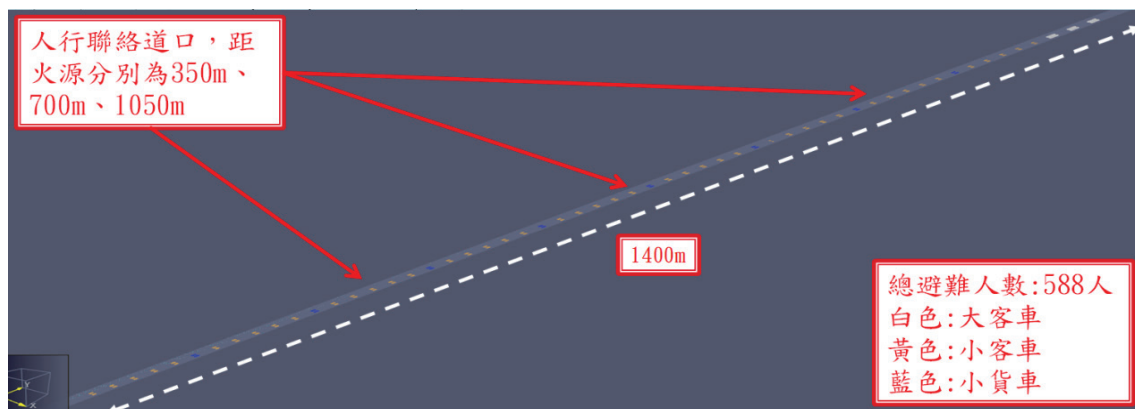


圖 5 高承載情境避難模型示意圖

資料來源：本研究彙整

五、煙控模擬情境設定

(一) 雪山隧道現行煙控模式、火源位置及風機設定

緊急運轉狀況為雪山隧道現階段火災之運轉模式，其煙控之模式又可分為「避難模式」和「排煙模式」兩種，前兩者又可分為「單孔單向」和「單孔雙向」等分類，避難模式共有 28 種啟動模式、排煙模式 12 種啟動模式，共有 40 種。本研究僅探討避難模式之單孔單向模式共 14 種設計風

機位置，並檢討火源設置於何處煙層逆流最長。

雪山隧道中人行聯絡道及車行聯絡道共有 36 個，其中車行聯絡道共有 8 個，編號分別為 5、9、13、17、21、25、29、33，本研究採此 8 個車行聯絡道發生車輛火警擇一進行模擬進行模擬。

黃祈勝²³之研究提到，雪山隧道總計 12.9km 長度，假設隧道內兩豎井發生火災為最危險之火災情境，作為 FDS 模擬之主要情境，並在其研究中認為中繼站發生火災為最危險之情境，經過模擬後可發現三個中繼站中的第一中繼站最容易產生逆煙層，故本研究採最接近第一號中繼站之 13 號車型聯絡道北上線進行火災模擬，相關風機啟動模式如圖 7，因網格數量限制，採火源位置前後 500m 大小 0.5m x 0.5m x 0.5m，其餘 1m x 1m x 1m 之網格建模。

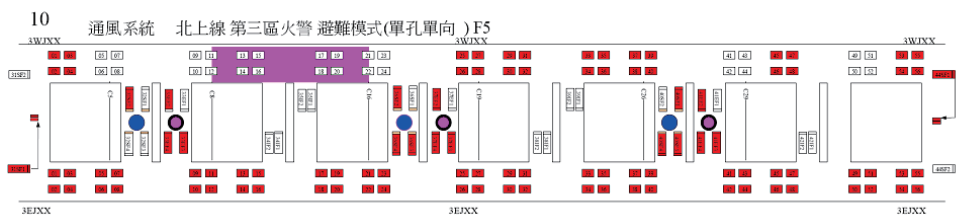


圖 6 北上線第三區火警風機啟動模式

資料來源：國道 5 號雪山隧道公路事故暨整體防救災應變計畫

(二) 煙控模擬情境彙整

1. 各項情境參數之彙整表，如表 13 所示

表 13 煙控模擬情境彙整表

項目說明	詳細項目說明
場景尺寸	10m x 5000m x 5m
模擬時間	1200 秒
火源位置	第 13 號車行聯絡道口

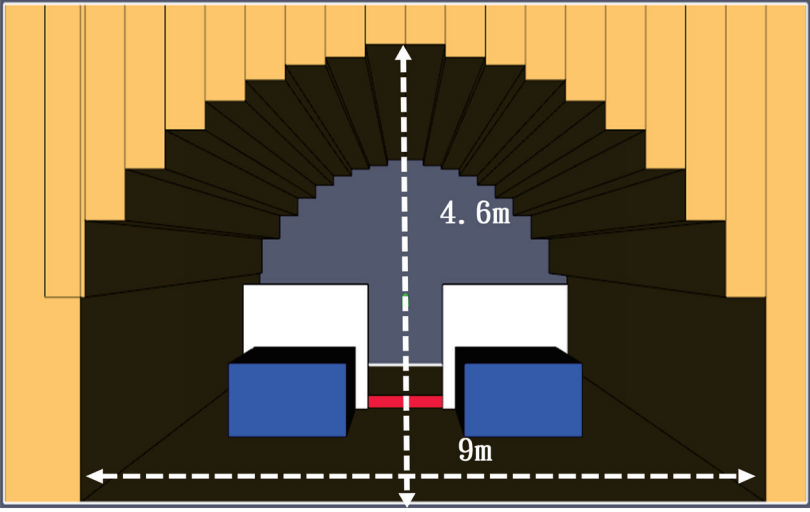
²³ 黃祈勝、邱晨瑋，公路隧道煙控啟動模式及避難策略之研究——以雪山隧道為例，國立交通大學，中華民國 104 年 7 月

項目說明	詳細項目說明
火源大小	30MW（一輛大客車）
	65MW（兩輛大客車及一輛小客車）
燃料種類	柴油
起始溫度	30°C
風機啟動模式	無啟動
	第三區火警分區（第 13 號車型聯絡道）啟動模式
風速	軸流式風機（AF）：面積 6.158m ² 、風速 24m/s
	噴流式風機（JF）：面積 0.785m ² 、風速 24m/s
偵測點	火源正上方、大客車後方及距火源位置 350m、700m、1050m，高度 1.8m

資料來源：本研究彙整

2.模型介紹，表 14：

表 14 雪山隧道建模結果示意表

	圖示	備註
正面		隧道淨高：4.6m 隧道寬度：9m 火源大小：2.5m x 12.5m

	圖示	備註
側面		隧道長度：5000m
風機 啟動 狀況		隧道內建置 11 組共 22 台噴流式風機，實際啟動則為 4 台，並搭配豎井啟動。

資料來源：本研究彙整

六、煙控模擬及避難模擬綜合情境表

綜合前述之煙控參數設定及避難之參數設定，相關之煙控模擬情境及避難模擬情境如表 15 所示。

表 15 煙控模擬及避難模擬綜合情境表

	火源大小		風機啟動模式		車流狀況	
	30MW	65MW	無啟動	正常啟動	一般	高承載
Case1	V		V		V	
Case2	V		V			V
Case3	V			V	V	
Case4	V			V		V
Case5		V	V		V	
Case6		V	V			V
Case7		V		V	V	
Case8		V		V		V

資料來源：本研究彙整

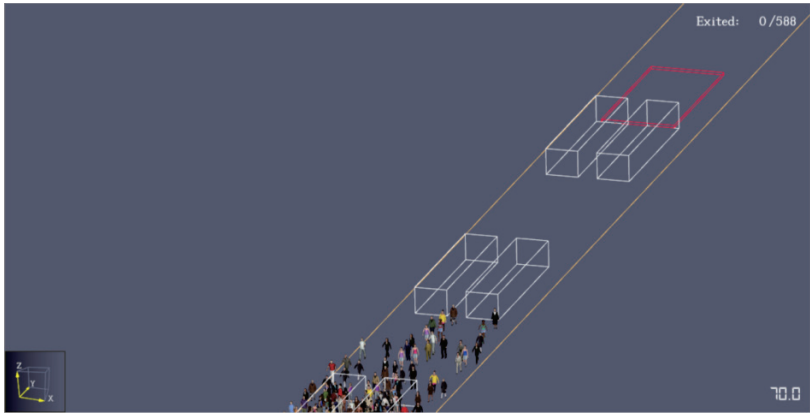
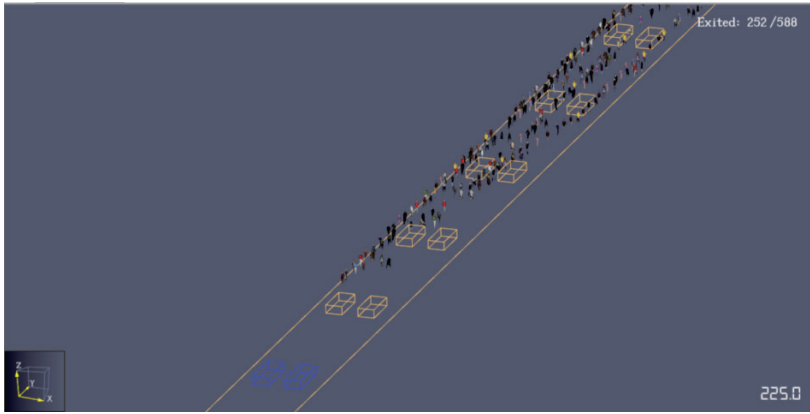
肆、模擬結果分析與評估

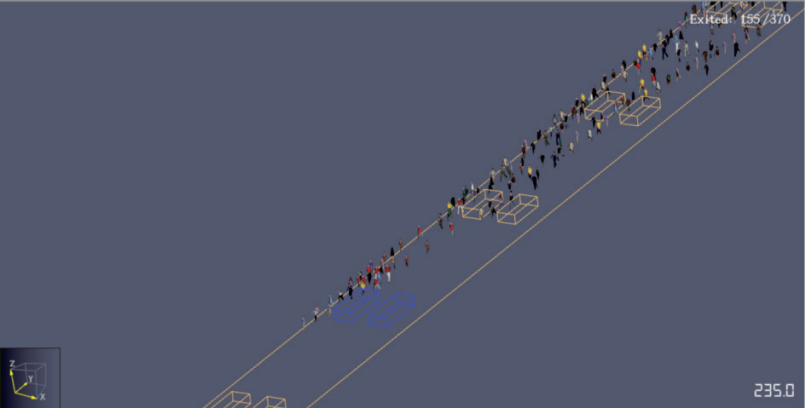
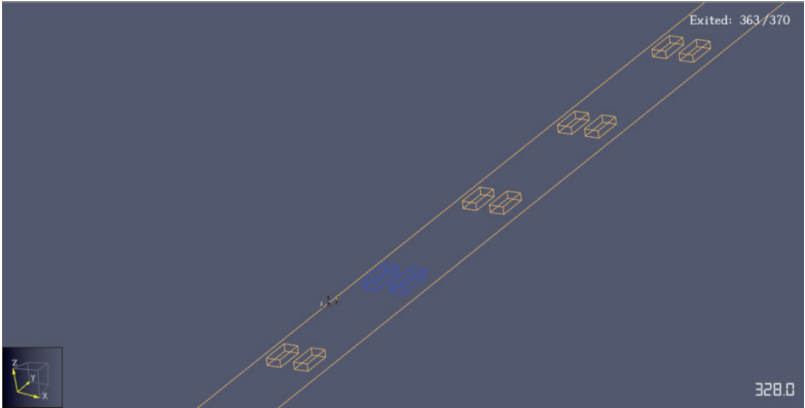
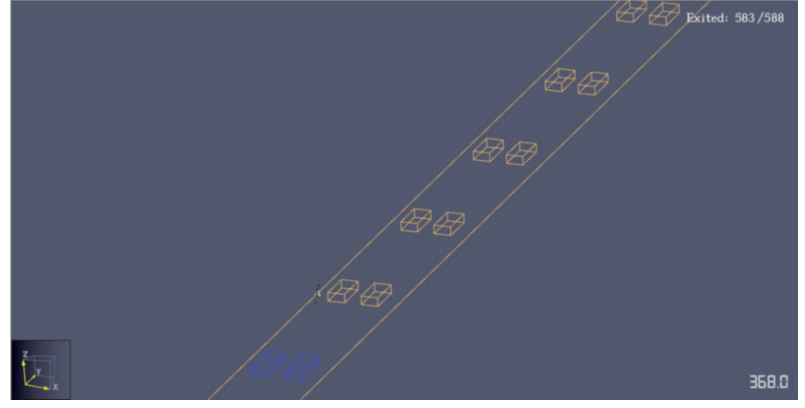
一、Pathfinder 避難模擬

本研究以車行聯絡道發生火災作為最危險之避難情境，以兩車行聯絡道之距離作為本次避難之模型長度，參考交通部高速公路局交通資料庫做為車輛之比例，並設定於火災發生後前兩輛車輛開始避難，60 秒後啟動隧道內廣播，避難人員於聽到廣播後，並經過 30 秒之猶豫時間才開始進行避難。

本研究針對模擬結果之各避難階段進行分析比較，由下表之得知大客車人員約花費 40 秒下車完畢，一般情境與高承載情境分別於約 235 秒及約 225 秒於距離火源最近之人行聯絡道口發生堵塞之情形，並且一般情境及高承載情境使用距離火源最近之人行聯絡道避難之人員最後離開時間分別為約 330 秒及約 370 秒，相差約 40 秒，如表 16 所示。

表 16 避難模擬各階段分析表

序號	秒數	圖示	說明
1	約 40 秒		Case1 及 Case2 兩大客車人員均下車完畢
2	約 70 秒		Case1 及 Case2 兩大客車人員離開車尾
3	約 225 秒		Case2 高承載情境人員於人行聯絡道口發生阻塞

序號	秒數	圖示	說明
4	約 235 秒		Case1 一般情境 人員於人行聯絡道 口發生阻塞
5	約 330 秒		Case1 一般情境 堵塞人員 從距離火 源最近之 人行聯絡 道離開
6	約 370 秒		Case2 高承載情 境堵塞人 員從距離 火源最近 之人行聯 絡道離開

資料來源：本研究繪製

二、FDS 及 Pyrosim 火災模擬

本研究針對一輛大客車之火警（30MW）及兩輛大客車與一輛小客車之火警（65MW），在第 13 號車行聯絡道口發生火警，並以該區之風機啟動模式及未啟動

進行分析，相關情境表如表 17

表 17 火災模擬分析情境表

情境	火源大小	風機啟動狀況
Case1	30MW	無啟動
Case3	30MW	正常啟動
Case5	65MW	無啟動
Case7	65MW	正常啟動

資料來源：本研究繪製

針對避難模擬之結果，於所建之隧道模型中各避難之關鍵位置分別設以下 5 個偵測點，針對氣體溫度、CO 濃度、能見度、輻射熱等指標分別進行分析，位置分別如表 18 及圖 8 所示：

表 18 Pyrosim 模型偵測點設立位置表

編號	位置	備註
0	火源正上方高度 1.8m 處	
1	距火源 350 公尺高度 1.8m 處	人行聯絡道口
2	距火源 700 公尺高度 1.8m 處	人行聯絡道口
3	距火源 1050 公尺高度 1.8m 處	人行聯絡道口
4	兩大客車車尾高度 1.8m 處	

資料來源：本研究彙整

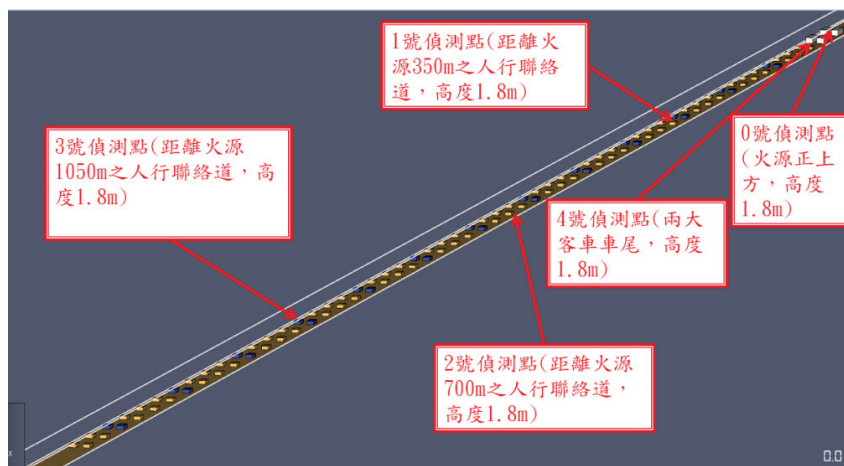


圖 7 偵測點示意圖

資料來源：本研究彙整

並針對上述之偵測特點，以隧道火災安全防護標準之用路人避難安全性進行比較，相關標準如表 19：

表 19 用路人避難安全臨界值彙整表

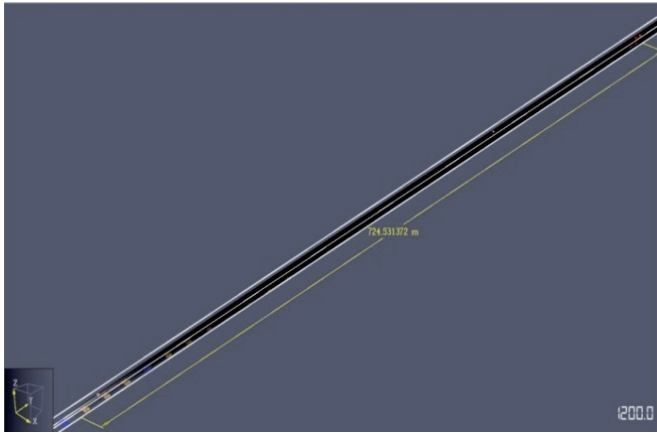
分析點位	分析參數	安全臨界值
距地面高 1.8 公尺	氣體溫度	< 60°C
	一氧化碳濃度	< 800 ppm
	能見度	> 10 m
	輻射熱	< 2 kW/m ²

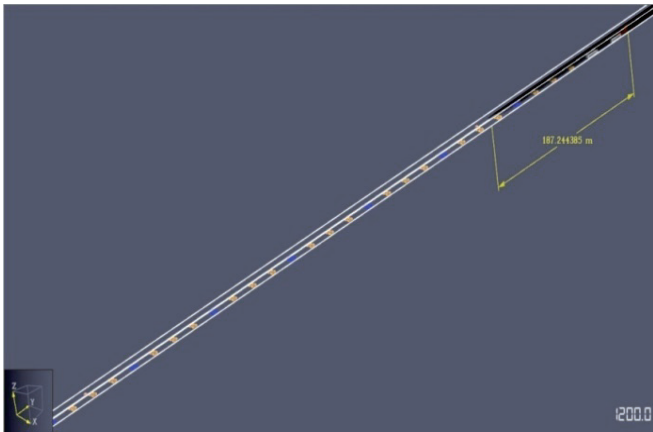
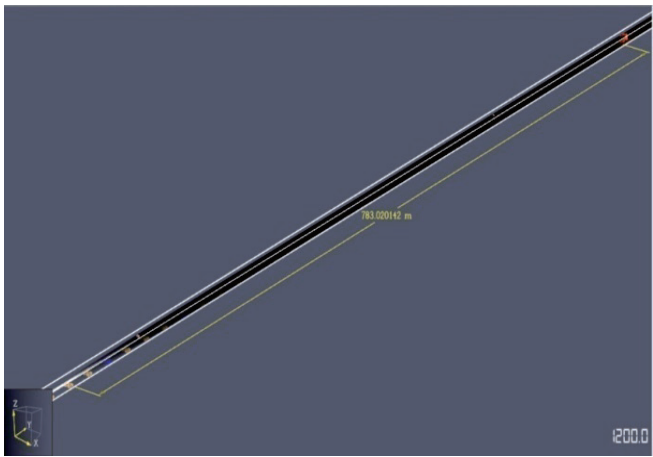
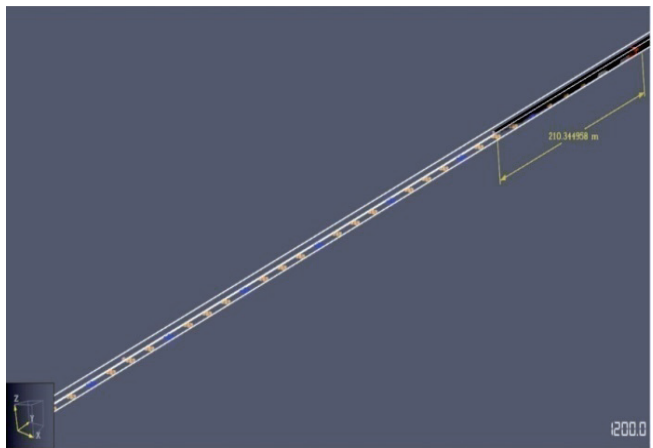
資料來源：本研究彙整

（一）煙層逆流分析

煙層逆流狀況經模擬後並用 Pyrosim 之量測工具可發現，30MW 的火源在風機未啟動情況下 1200 秒約可造成煙層逆流共 724 公尺，風機啟動介入後則減至共 187 公尺；65MW 的火源則在風機未啟動情況下 1200 秒約可造成煙層逆流共 783 公尺，風機啟動介入後則減至共 210 公尺，各時間點相關比較圖如表 20 所示。

表 20 1200 秒煙層逆流比較表

1200 秒			煙層逆流距離
1	case1 30mw 無風機		724 公尺

1200 秒			煙層逆流距離
2	case3 30mw 有風機		187 公尺
3	case5 65mw 無風機		783 公尺
4	case7 65mw 有風機		210 公尺

資料來源：本研究彙整

(二) 氣體溫度分析

本研究之氣體溫度分析針對火源正上方偵測點（0 號偵測點）、兩大客車車尾偵測點（4 號偵測點）及距火源 350 公尺偵測點（最近之人行聯絡道口）三個偵測行比較，並以安全臨界值之指標 60°C 進行分析後可發現：

1. 火源正上方偵測點（0 號偵測點），如圖 9

- (1) 30mw 的火源在沒風機啟動控制下，於 711 秒達到最高溫 1098°C
- (2) 65mw 的火源在沒風機啟動控制下，於 633 秒達到最高溫 1171°C
- (3) 65mw 的火源在有風機啟動控制下，於 850 秒達到最高溫 1239°C

2. 兩大客車車尾偵測點（4 號偵測點），如圖 10：

30mw 的火源在沒風機啟動控制下，兩大客車車尾之探測點於 406 秒達到 60°C ；65mw 的火源在沒風機啟動控制下，兩大客車車尾之探測點於 396 秒達到 60°C 。風機啟動控制下則均未達到。

3. 距火源 350 公尺偵測點（1 號偵測點），如圖 11：

距離火源最近之人行聯絡道僅有在 case5 中(65MW 火源風機未啟動) 於 1137 秒達到 60°C ，較小之火源 case1 及風機啟動控制下之情境則均未

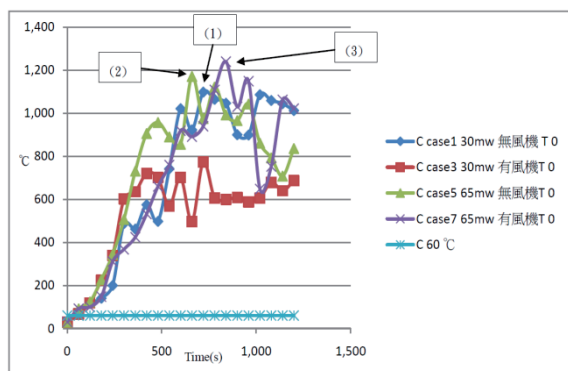


圖 8 火源正上方溫度分析圖

（資料來源：本研究彙整）

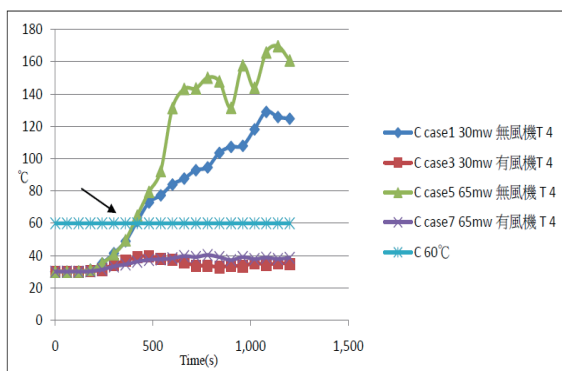


圖 9 兩大客車車尾溫度分析圖

（資料來源：本研究彙整）

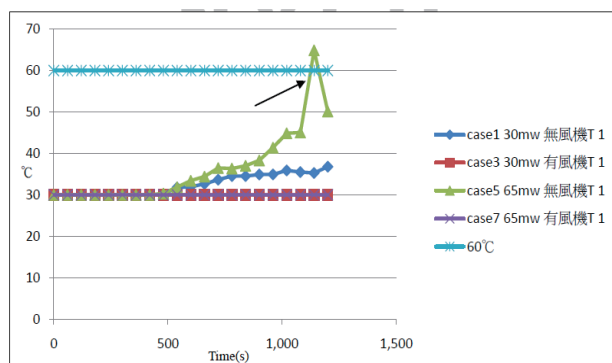


圖 10 距火源 350 公尺溫度分析圖（資料來源：本研究彙整）

（三）CO 分析

本研究之 CO 分析針對火源正上方偵測點（0 號偵測點）、兩大客車車尾偵測點（4 號偵測點）及距火源 350 公尺偵測點（最近之人行聯絡道口）三個偵測點進行比較，並以安全臨界值之指標 800ppm 進行分析後可發現距火源最近之三個偵測點均

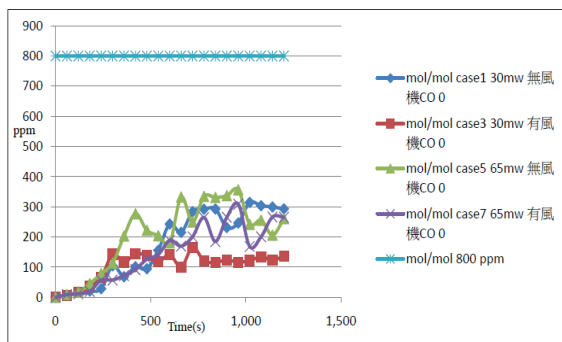


圖 12 火源正上方 CO 分析圖
（資料來源：本研究彙整）

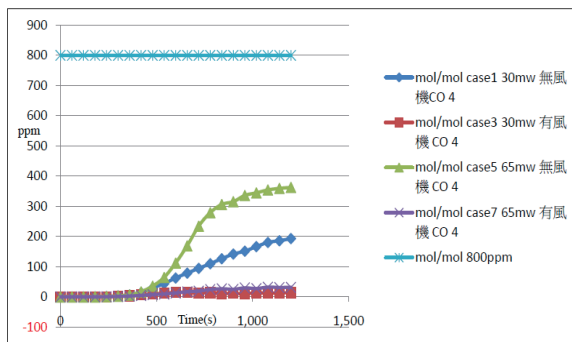


圖 13 兩大客車車尾 CO 分析圖
（資料來源：本研究彙整）

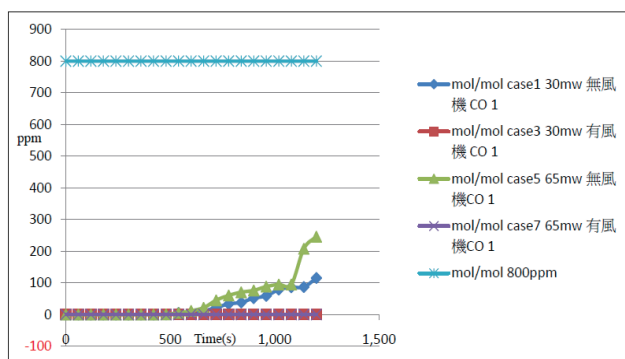


圖 14 距火源 350 公尺 CO 分析圖（資料來源：本研究彙整）

（四）能見度分析

本研究之能見度分析針對火源正上方偵測點（0 號偵測點）、兩大客車車尾偵測點（4 號偵測點）及距火源 350 公尺偵測點（最近之人行聯絡道口）三個偵測點進行比較，並以安全臨界值之指標 10 公尺進行分析後可發現：

1. 火源正上方偵測點（0 號偵測點），如圖 15：

各情境在約 100 秒開始即有能見度降至 10 公尺以下之情形。

2. 兩大客車車尾偵測點（4 號偵測點），如圖 16：

- (1) 30mw 的火源在沒風機啟動控制下，兩大客車車尾之能見度探測點於 406 秒下降至 10m 以下；65mw 的火源在沒風機啟動控制下，兩大客車車尾之能見度探測點於 403 秒下降至 10m 以下。
- (2) 30mw 的火源在風機啟動控制下，兩大客車車尾之能見度探測點於 518 秒下降至 10m 以下；65mw 的火源在風機啟動控制下，兩大客車車尾之能見度探測點於 586 秒下降至 10m 以下。

3. 距火源 350 公尺偵測點（1 號偵測點），如圖 17：

30mw 的火源在沒風機啟動控制下，具火源最近之人行聯絡道之能見度探測點於 632 秒下降至 10m 以下；65mw 的火源在沒風機啟動控制下，兩大客車車尾之能見度探測點於 588 秒下降至 10m 以下。

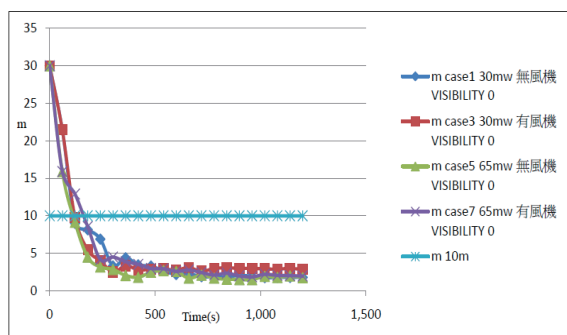


圖 15 火源正上方能見度分析圖

(資料來源：本研究彙整)

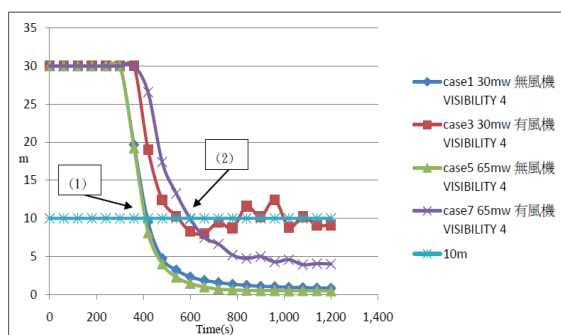


圖 16 兩大客車車尾能見度分析圖

(資料來源：本研究彙整)

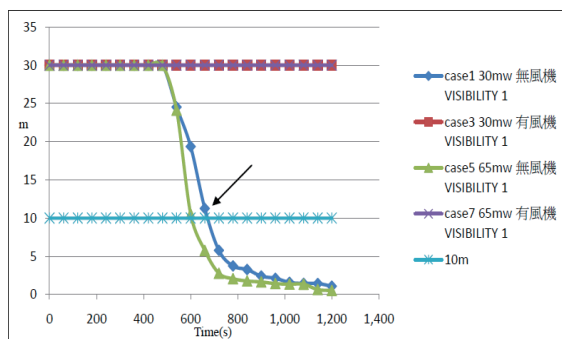


圖 17 距火源 350 公尺能見度分析圖 (資料來源：本研究彙整)

(五) 輻射熱分析

本研究之輻射熱分析針對火源正上方偵測點(0 號偵測點)、兩大客車車尾偵測點(4 號偵測點)及距火源 350 公尺偵測點(最近之人行聯絡道口)三個偵測點進行比較，並以安全臨界值之指標 2kW/m^2 進行分析後可發現：

1. 火源正上方偵測點(0 號偵測點)，圖 18：

各情境在約 100 秒開始即有輻射熱降至 2kW/m^2 以下之情形。

2. 兩大客車車尾偵測點(4 號偵測點)，圖 19：

在 case5 情境中，65mw 的火源在沒風機啟動控制下，兩大客車車尾之輻射熱探測點於 889 秒達 2kW/m^2 ，其餘情境則未達到安全臨界值。

3. 距火源 350 公尺偵測點(1 號偵測點)，圖 20：

各情境之探測點均未達到 2kW/m^2 。

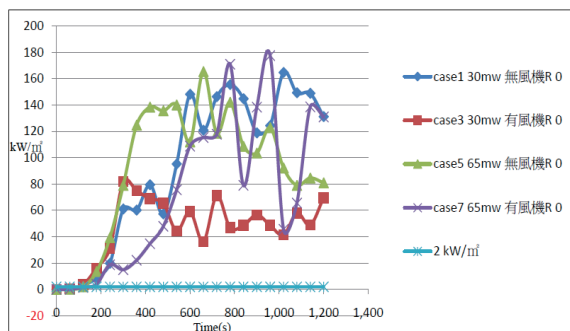


圖 18 火源正上方輻射熱分析圖
(資料來源：本研究彙整)

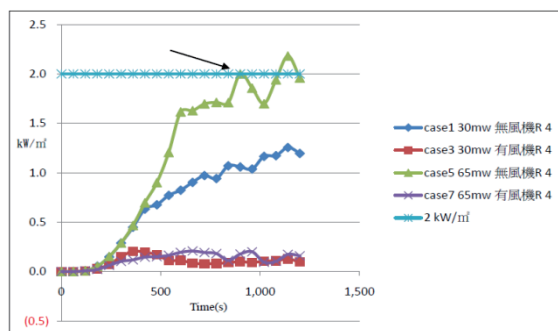


圖 19 兩大客車車尾輻射熱分析圖
(資料來源：本研究彙整)

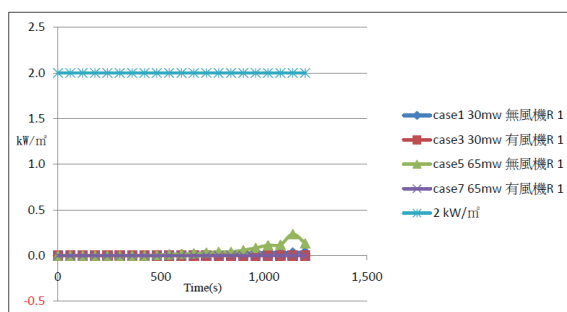


圖 20 距火源 350 公尺輻射熱分析圖 (資料來源：本研究彙整)

(六) 熱釋率分析

在 caes1 及 case3 中，原設定 30MW 之火源無論風機有無啟動，熱釋率均可維持在 30MW 呈現穩態燃燒；但在 case5 中，雖設定火源大小為 65MW，但模擬結果無法到達原設定值，即便風機啟動造成氣流流動及補充氧氣，在 case7 中之熱釋率依然只能達到員額定之 65MW，但無法達到穩態燃燒，各情境之熱釋率如圖 21 所示：

(七) 氧氣分析

針對熱釋率之現象，對火源正上方偵測點（0 號偵測點）、兩大客車車尾偵測點（4 號偵測點）及距火源 350 公尺偵測點（最近之人行聯絡道口）三個偵測點進行比較有以下發現：

1. 火源正上方偵測點（0 號偵測點），圖 22：
- (1) 65mw 的火源在沒風機啟動控制下，火源正上方之氧氣濃度於 352 秒即低於 10%。
 - (2) 除 30mw 的火源在風機啟動控制下未低於 10%，其餘情境之氧氣濃度均在模擬中有低於 10%之情形。

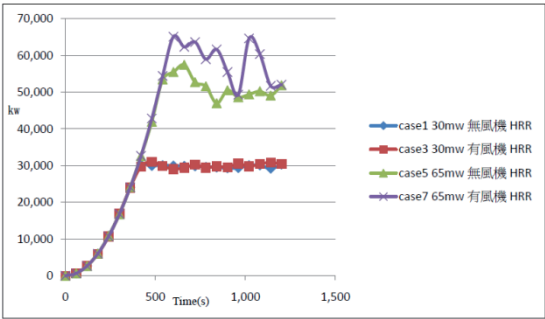


圖 21 熱釋率分析圖

（資料來源：本研究彙整）

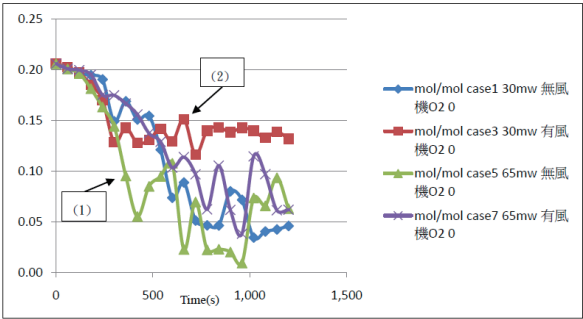


圖 22 火源正上方氧氣分析圖

（資料來源：本研究彙整）

（八）Pyrosim 綜合結果分析

針對上述各項危害因子模擬分析之結果進行整理如表 21：

表 21 pyrosim 綜合結果分析表

分析參數	安全臨界值	偵測點與火源距離	火源大小	風機啟動 狀況	到達安全臨界值 時間
氣體溫度	< 60°C	51.25m (兩大客車車尾)	30MW	O	>1200
				X	406
			65 MW	O	>1200
				X	396
		350m	30 MW	O	>1200
				X	>1200
			65 MW	O	>1200
				X	1137
一氧化碳 濃度	< 800 ppm	51.25m (兩大客車車尾)	30 MW	O	>1200
				X	>1200
			65 MW	O	>1200
				X	>1200

分析參數	安全臨界值	偵測點與火源距離	火源大小	風機啟動 狀況	到達安全臨界值 時間
能見度	>10 m	350m	30 MW	O	>1200
				X	>1200
			65 MW	O	>1200
				X	>1200
		51.25m(兩大客車車尾)	30 MW	O	586
				X	406
			65 MW	O	518
				X	403
輻射熱	<2 kW/m ²	350m	30 MW	O	>1200
				X	632
			65 MW	O	>1200
				X	588
		51.25m(兩大客車車尾)	30 MW	O	>1200
				X	>1200
			65 MW	O	>1200
				X	889

資料來源：本研究彙整

伍、結論與建議

一、結論

本研究透過文獻探討及災例回顧，以 Pathfinder 模擬總避難時間，在以 Pyrosim 進行火災模擬分析各避難截點避難失效之時間，得到以下結論：

- (一) 隧道火災危險性高，以國內外災例可得知，隧道火災容易造成人命傷亡及財產損失，並可能造成造成結構損壞及封閉使用；經模擬後可得知越大火源之隧道火災所產生之逆煙層越長，風機啟動進行控制後則可減少逆煙層之距離。
- (二) 以交通部高速公路局交通資料庫之車輛比例設定之一般避難情境及高乘載

避難情境均在 200 秒後於人行聯絡道口開始發生堵塞之情形，兩種情境均可在 150 秒內疏散完畢，堵塞狀況高承載情境較一般情境多了約 50 秒。

(三) 隧道本身結構封閉，空氣較不易流動，火災發生時之氧氣供給亦較為不足，本研究僅 case1、case3 可達原設定之 30MW 並呈現穩態燃燒，case7 雖然風機啟動，產生之內部流場帶動之氧氣補充仍不足以使 65MW 之火源穩態燃燒，case5 甚至因氧氣不足而無法達到 65MW。

(四) 本研究以設立偵測點量測隧道火警之氣體溫度、CO 濃度、能見度及輻射熱做為避難失效指標，經模擬後有以下發現：

1. CO 濃度及輻射熱為較不容易到達人員避難失效之指標，CO 濃度各偵測點均 800ppm，輻射熱指標則只有 case5 之一個偵測點到達 2 kW/m^2 。
2. 氣體溫度及能見度則較容易到達人員避難失效之指標，氣體溫度指標在風機未啟動之情境中均有偵測點到達 60°C ，能見度指標則是風機未啟動之情境亦有偵測點到達 10m。
3. 風機啟動介入後，氣體溫度指標於四個情境中均未達 60°C ；能見度指標則在風機啟動介入後使距離火源最近之人行聯絡道於 1200 秒內均未達 10m，確保 1200 秒內該人行聯絡道均可使用。

(五) 依據 Marchant 的避難理論，利用火災模擬及避難模擬進行比較，在通報正常情況下本研究設定之各種情境，其避難所需時間 (RSET) 均小於避難容許時間 (ASET)，由此可得知人行聯絡道之間距為合理之間距，人員均能順利避難，並且有風機啟動之情境均可延長其避難容許時間，如表 22 所示。

表 22 避難容許時間及避難所需時間綜合分析表

		避難所需時間 (RSET)		避難容許時間 (ASET)	
兩大客車 車尾	一般情境	70 秒	30MW	風機正常啟動	586
				風機未啟動	406
	高承載情境	70 秒	65MW	風機正常啟動	518
				風機未啟動	396
距火源最近 之人行聯絡 道口	一般情境	330 秒	30MW	風機正常啟動	>1200
				風機未啟動	632
	高承載情境	370 秒	65MW	風機正常啟動	>1200
				風機未啟動	588

資料來源：本研究彙整

二、建議

- (一) 本研究以正常通報後人員避難進行模擬，後續研究可針對延遲通報進行模擬。
- (二) 本研究未考量起火車輛人員避難之情形，後續研究可針對起火車輛人員避難之情形進行研究。
- (三) 未來研究可針對雪山隧道其他火警分區風機啟動與否之危害因子進行研究。
- (四) 雪山隧道現行運行車輛為小客車、小貨車及大客車，排除大貨車，未來研究可針對隧道內大貨車火警進行火災模擬分析，驗證其安全性。
- (五) 本研究排除避難弱者之避難情形，後續研究可針對避難弱者之避難情形加以探討。
- (六) 雪山隧道本身未配置撒水設備，未來研究可針對撒水設備配置進行探討。

參考文獻

高速公路及快速公路交通管制規則，交通部

公路隧道消防安全設備設置規範，交通部

消防署，第十九之一章搶救長公路隧道火災安全指導原則（民國 111 年 3 月 6 版）

雪山隧道通車後火燒車一覽，高速公路局

（<https://www.freeway.gov.tw/Publish.aspx?cnid=610&p=1152>）

NFPA, NFPA 502Standard for Road Tunnels, Bridges, and Other Limited Access Highways, 2020

莊仁馨、張慧蓓，縮小尺度隧道火災之臨界風速與逆煙層探討，長榮大學，碩士論文，中華民國 108 年 7 月

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

鄭嘉宏、吳貫遠，隧道火災縱向通風與臨界風速數值模擬研究，中央警察大學消防科學研究所，碩士論文，民國 97 年

Olivier Vauquelin, “Experimental simulations of fire-induced smoke control in tunnels using an “air-helium reduced scale model”: Principle,limitations, results and future” ScienceDirect , Tunnelling and Underground Space Technology 23

(2008) 171-178

國道 5 號雪山隧道公路事故暨整體防救災應變計畫

黃祈勝、邱晨瑋，公路隧道煙控啟動模式及避難策略之研究——以雪山隧道為例，

國立交通大學，中華民國 104 年 7 月

簡賢文，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，

2012

康哲寅、簡賢文，長公路隧道避難行為與緊急應變之整合性研究——以草埔隧道

為例，中央警察大學，碩士論文，中華民國 108 年 7 月

葉怡伶、簡賢文、吳貫遠，水霧與通風系統交互作用下隧道火災之救援應變模式

——以台 9 線蘇花公路改善工程東澳隧道為例，中央警察大學，碩士論文，

中華民國 107 年 6 月

弱勢人員防火避難等待空間規劃原則初探，內政部建築研究所自行研究報告，中

華民國 98 年 12 月

交通部高速公路局交通資料庫（<https://tisvcloud.freeway.gov.tw/>）

