

「2020 中華民國營建工程學會第十八屆營建產業永續發展研討會」
以數值方法模擬隧道火災煙流與避難人流安全性

李中生¹、謝宛蓁²、余王翔²、陳致維²、邱宇綺²

¹ 國立聯合大學土木與防災工程學系助理教授

² 國立聯合大學土木與防災工程學系大學部學生

科技部計畫編號：MOST 109-2119-M-239-001 -

摘要

公路隧道因為狹長並且昏暗封閉，加上隧道當中的車輛高速移動，若是因為交通事故導致火災，將容易會造成重大傷亡。本文利用 PyroSim 與 Pathfinder 等數值軟體模擬隧道火災煙流擴散與避難人流動線。在不考慮通風與水霧等作用下，本研究以台 16 線草埔隧道為對象，進行不同規模火災與煙流模擬，避難人流模擬，並探討不同情境下的火災煙流對於避難人流安全性的可能影響。

關鍵字：數值模擬、隧道火災、煙流、人流分析

Using Numerical Simulations on Crowded Flow and Smoke Distribution to Evaluate the Evacuation Safety in Tunnel Fire

Chung-Sheng Lee¹ Wan-Chan Hsieh² Wang-Xiang Yu² Chih-Wei Chen² Chiu-Yu Chi²

Abstract

Due to limited blurred vision, high temperatures and high-speed vehicles, tunnel fires may cause catastrophic disasters. This paper illustrates the work of using numerical programs PyroSim and Pathfinder to simulate the smoke distribution and crowded flow during the evacuation of tunnel fire. The effect of tunnel spray and ventilation system is not considered in the simulations. In this research, Cao-Pu Tunnel is adopted to study the influence of various fire scenarios and smokes to the evacuation safety of different crowded flow lines.

Keywords: numerical simulation, tunnel fire, smoke flow, crowded flow analysis.

一、前言

近年來國內新建公路隧道增加許多，由於公路隧道因為狹長並且昏暗，加上隧道當中的車輛高速移動，因此隧道的安全性極為重要。例如 1999/3/24 發生於法國和義大利跨國境白朗峰隧道，因一輛裝載麵粉及奶油的比利時貨車，在行駛當中貨車自燃引發大量濃煙，火勢延燒三天，造成 39 死，隧道內部結構也嚴重受損。為了瞭解隧道火災發生時可能無法進行救援，或是用路人可能受困等情境，本論文藉由模擬軟體和參考國內外相關的隧道火災案例，進行模擬與討論。

二、隧道火災煙流模擬分析

1. 草埔隧道模擬

台九線南迴公路安朔至草埔段總長 11 公里，其中包括一座 4600 公尺草埔隧道，本研究使用 PyroSim[1] 火災模擬軟體，建構一段隧道長度 900 公尺，模擬安朔至草埔段 STA7+400~STA8+300 之位置。隧道模型包含北上線主隧道及人行聯絡道，並依照實際設計圖說模擬人行聯絡道分別位於 7+501、7+851、8+201 之位置。

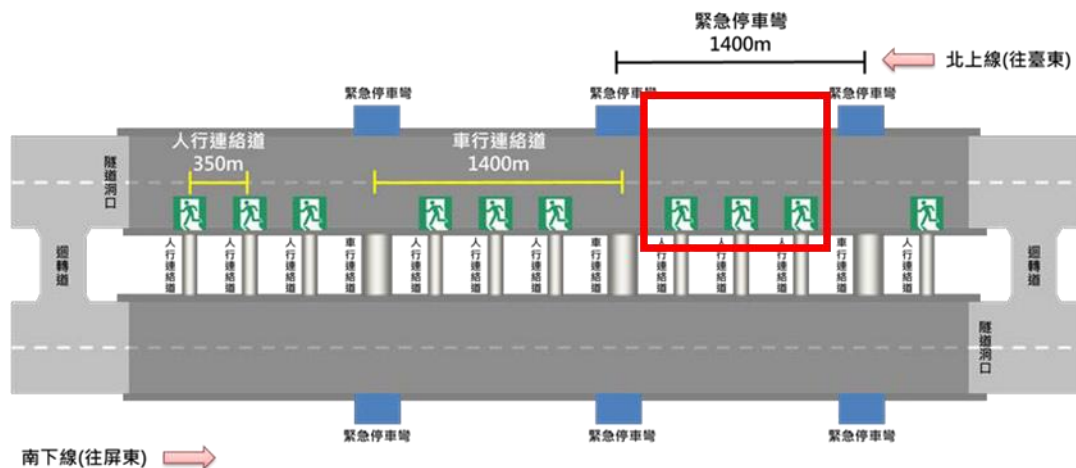


圖1 本研究模擬區域[2]

2. FDS火源設置

本研究是以小客車、大客車、大貨車火災做為模擬情境。在車輛行駛隧道過程當中可能因為交通事故、人為疏失...等原因導致油箱漏油進而開始起火燃燒，由於草埔隧道為雙孔單向總長11公里之隧道，因此當隧道火災發生時在救援協助與避難逃生方面有一定程度上的困難。由於各國對於車輛熱釋率均有大小不同定義，本研究參考美國NFPA 502(2008)[3]規範，針對隧道火災模擬分析設計了三個情境模擬，包括Case1: 小客車起火，熱釋燃率大小5MW，Case2.大客車起火(30MW)，以及Case3.大貨車起火(200MW)。圖2為分別對熱釋燃率為5mw、30 mw、200 mw，在不考慮隧道通風以及排煙系統的情況之下模擬隧道內煙層分部情況。

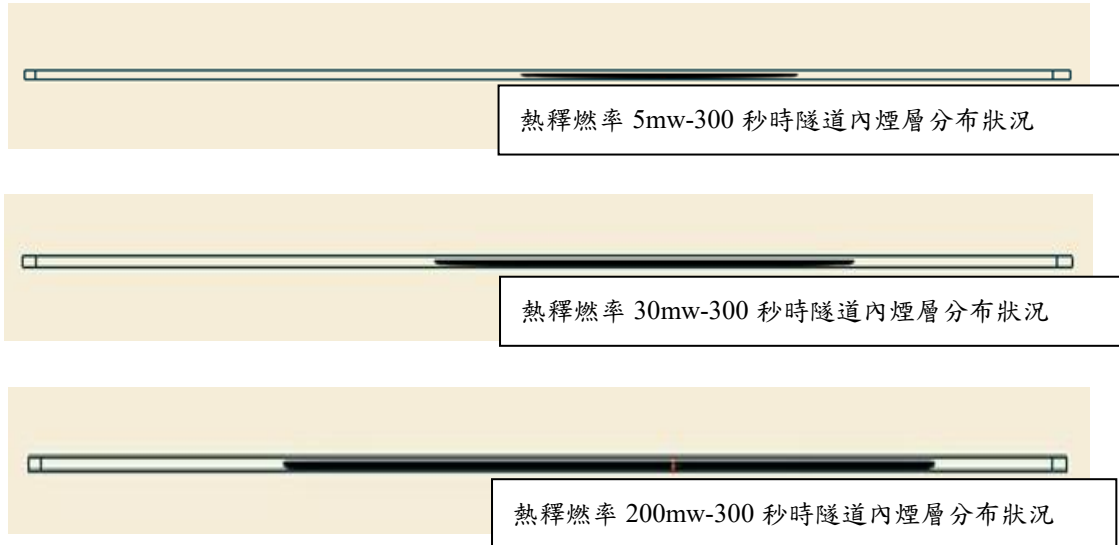


圖2 熱釋燃率200mw-300秒時隧道內煙層分布狀況

三、隧道人流避難模擬

1. 隧道火災假設情況及參數設定

草埔隧道為雙孔單向雙車道設計，隧道內每一車道寬為3.5公尺，內、外側路肩寬各為0.3公尺、維修步道寬為1公尺、車輛設計速度60公里/小時。本研究主要以避難者的角度思考，設定最不利於逃生的情境為考量，假設此隧道車流時間為尖峰時段且有塞車現象，避難疏散則假設2種塞車情境，第一情境為隧道當中包含小型車、大客車、大貨車，第二情境為隧道當中全為小客車。每台車間距為1米，車輛均於隧道中。假設4號人行聯絡道前失火，避難者僅能由主隧道2端出口及3、5號人行聯絡道逃生，以三種不同熱釋燃率大小，判斷避難者是否能逃生成功。

2. 隧道內車輛比例及車輛分布情況

A. 情境一、隧道內所有車輛包含小客車、大客車、大貨車

假設火災發生於北上隧道之4號人行聯絡道前，以致於4號人行聯絡道無法讓避難人員避難，所有避難人員僅能由北上隧道之南、北端出口及3號、5號人行聯絡道逃生。對於隧道內塞車數量與車種比例，本研究參考交通部公路總局105年度公路平均每日交通量調查表[4]，統計台九線大武-楓港小型車、大客車、大貨車車流比例，小型車、大客車、大貨車比例為20、2、1，下圖為隧道內小客車、大客車、大貨車的排列方式。

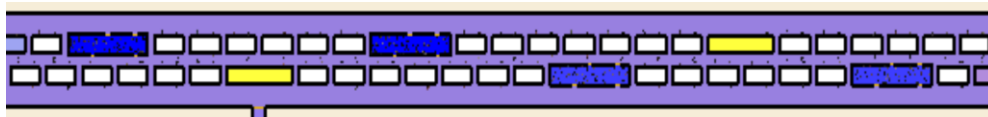


圖3 小客車、大客車、大貨車排列示意圖

B. 情境二、隧道內所有車輛全為小客車 假設火災發生於北上隧道之 4 號人行聯絡道前，以致於 4 號人行聯絡道無法讓避難人員避難，所有避難人員僅能由北上隧道之南、北端出口及 3 號、5 號人行聯絡道逃生。下圖為隧道內小客車的排列方式。

3.避難人流模擬情境結果

本研究假設，隧道火災發生後，當避難人員進入安全的避難環境就視作避難成功。因為受限於電腦硬體以及模擬時間，本研究僅針對發生火災之隧道進行分析，當避難人員進入 3、4、5 號北端人行聯絡道或者離開 7+400、8+300 之兩端隧道範圍即視為避難成功。在 Pathfinder [5]軟體模擬當中，僅針對避難人員的逃生時間、行為、路徑等進行分析。結合 Pyrosim 與 Pathfinder 分析結果，避難人員的速度與路徑不會因為溫度、可視度、吸入有毒氣體而有所變化。本研究分析避難人流之結果包括:1.避難空間當中的人數變化曲線圖、2.避難人員通過避難逃生門累積人數統計表。

A. 避難人流情境一：所有避難空間剩餘人數及避難人員離開所有出口、北上線避難空間、三號人行聯絡道、五號人行聯絡道之人數變化曲線圖，如圖 4 所示。隧道內所有車輛包含小客車、大客車、大貨車，由表 1 可知，有 84.9%的避難人員會使用緊急聯絡道進行避難，可想而知當隧道發生火災時，緊急聯絡道對於避難人員疏散的重要性。由表 1 可知，疏散人員避難於 564 秒時就已全數疏散完畢。另外，模擬中發現到南端逃生時間延長到 607 秒，人員需要額外花費 43 秒左右逃生到南下主隧道。

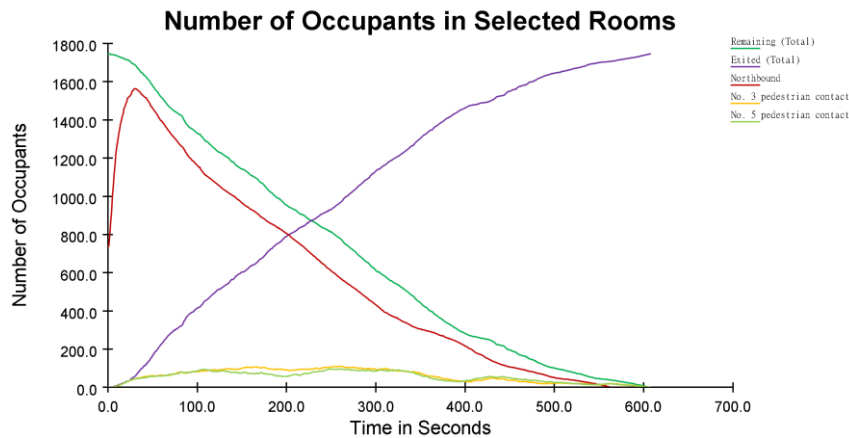


圖 4 人流情境一之避難空間人數變化曲線圖

表 1 情境一避難人員逃生累積人數統計表

位置	累積逃生人數	逃生人數比例	逃生時間(s)
北上線 7+400	131	7.5%	119
北上線 8+300	133	7.6%	109
三號北端人行聯絡道	742	42.5%	562
五號北端人行聯絡道	740	42.4%	564
總計	1746	100%	-

B. 情境二、隧道內所有車輛全為小客車，所有避難空間剩餘人數及避難人員離開所有出口、北上線避難空間、三號人行聯絡道、五號人行聯絡道之出口，如圖 5。由表 2 可知，有 85.9%的避難人員會使用緊急聯絡道進行避難，可想而知當隧道發生火災時，緊急聯絡道對於避難人員疏散的重要性。由表 3-5 可知，疏散人員避難於 550 秒時就已全數疏散完畢，而南端逃生時間延長到 593 秒是因為避難人員雖已到達安全環境，但有一部分避難人員未走到南端的人行聯絡道，模擬範圍包含到人行隧道內主要也是可以分析避難人員額外花費 43 秒左右逃生到南下主隧道。

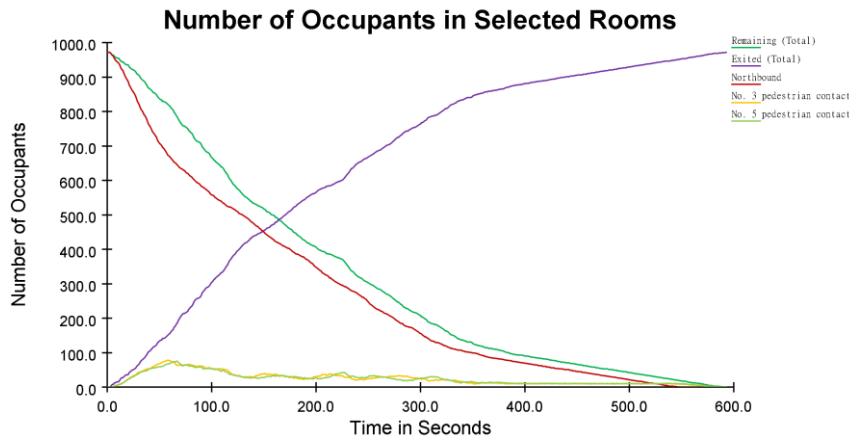


圖 5 人流情境二之避難空間人數變化曲線圖

表2 情境二避難人員逃生累積人數統計表

位置	累積逃生人數	逃生人數比例	逃生時間(s)
北上線 7+400	71	7.3%	99
北上線 8+300	66	6.8%	98
三號北端人行聯絡道	418	43%	548
五號北端人行聯絡道	417	42.9%	550
總計	972	100%	-

四、FDS結合Pathfinder之隧道避難人員結果分析

本研究利用FDS結合Pathfinder的影像，可以辨識避難過程中是否有人員被濃煙遮蓋，如圖5所示。另外，可以分析在避難當中的氣體溫度、一氧化碳濃度、可視度、FED值進行數值的分析及驗證避難人員是否成功避難。在FDS模擬情境中有三個情境，情境分別為小客車起火(5MW)、大客車起火(30MW)、大貨車起火(200MW)，因受限於電腦硬體及軟體問題小客車起火(5MW)採用的網格為0.5m、大客車起火(30MW)及大貨車起火(200MW)採用網格為1m。而Pathfinder模擬情境中有兩個情境，情境分別為隧道內所有車輛包含小客車、大客車、大貨車及隧道內所有車輛全為小客車，因此FDS結合Pathfinder後一共會有六項的事件狀況，如表3所示。比較六項事件發現，隧道內的車種不同進而影響避難人員的避難結果，在隧道內全為小客車當中，處於危險的避難人員人數會少於隧道內包含小客車、大客車、大貨車，其中因為小客車的形狀及大小相同，避難人員只要走到道路路肩的地方就可以直

線通行，而隧道內含有小客車、大客車、大貨車，除了避難人員人數較多以外，也需因為車輛大小不一樣需要閃躲車輛，造成逃生走的路線較長。



圖5 FDS結合Pathfinder影像結合

表3避難人員危害人數統計表

事件分類	熱釋然率	Pathfinder 模擬情境	氣體溫度分析	CO 濃度分析	可視度分析	FED 值分 析
事件一	5MW	情境一	0	0	0	0
事件四		情境二	0	0	0	0
事件二	30MW	情境一	0	0	73	0
事件五		情境二	0	0	31	0
事件三	200MW	情境一	95	0	219	0
事件六		情境二	48	0	173	0

五、結論與建議

本研究結合 Pyrosim 與 Pathfinder 研究隧道內用路人遭遇隧道火災時的避難行為，不僅能夠以畫面呈現煙流擴散以及避難人流之間的關係，亦可利用分析在避難當中的氣體溫度、一氧化碳濃度、可視度、FED 值進行數值的分析及驗證避難人員是否成功避難。在六項事件狀況中，以最 200MW 最嚴峻情境所造成的人員危害數較高，以氣體溫度過高，以及可視度不佳為主。然而本研究的火災與煙流分析中並未加入通風排煙系統及灑水設備之模擬，若是考慮此兩項效果，應會大幅降低氣體溫度過高、避難人流暴露於可視度不佳的人數。未來可針對這部分進行進一步的模擬分析。在 FDS 結合 pathfinder 當中，pathfinder 軟體中的避難人員不會因為火勢大小或者是處於不安全的情況下，避難行為有所改變，未來亦可發展這方面的模擬技術。

參考文獻

1. PyroSim User Manual: <https://support.thunderheadeng.com/docs/pyrosim/2020-1/> (2020/1)
2. 台灣世曦工程顧問股份有限公司，台 9 線南迴公路安朔至草埔段 C2 隧道標 (6K+300~11K+006) 新建工程，101 年 12 月。
3. NEPA 502, Standard for Road Tunnel, Bridges, and Other Limited Access Highways, pp.23,2008.
4. 中華民國交通部公路總局，交通部公路總局 105 年度公路平均每日交通量調查表，2018 年 10 月擷取自：
https://www.thb.gov.tw/sites/ch/modules/download/download_list?node=bcc520be-3e03-4e28-b4cb-7e338ed6d9bd&c=83baff80-2d7f-4a66-9285-d989f48effb4
5. PathFinder User Manual: <https://support.thunderheadeng.com/docs/pathfinder/2020-1/> (2020/1)