

以數值模擬方法研究火場模式對隧道火場環境之影響

李伊平

土木與環境工程系

摘要

台灣繼雪山及八卦山二條長隧道相繼完工通車後，未來國道東部公路若確定施築，其中亦將包含多條長隧道。有鑒於近期國際曾發生多起重大隧道火災災難，因此隧道火災安全議題更值得政府與國人重視。目前學術界與工程界多採數值模擬方法對隧道火場環境進行研究與探討，電腦模擬最重要的關鍵為能否充分地反應出實際隧道之火場情境，如此方能獲致合理且有意義之模擬結果。諸如電腦模擬時以均勻風速運作於隧道橫斷面模擬風機作動所產生氣流之合理性，及忽略火場上游堵車效應對火場火勢現象及煙流影響，有違隧道發生火災時火場上游有車輛回堵之火場情境，隧道火災研究多僅針對隧道火場上游無堵車現象之火場情境進行探討，此與隧道實際發生火災事故時火場上游應發生堵車現象之火場情境有所違背，故本專題即針對上述兩項議題現今隧道火災研究尚待釐清之議題以數值模擬之方法進行探討，同時亦針對當隧道發生巴士火災事故時火場之避難環境進行評析。本研究之成果可做為未來隧道火災數值模擬火場模式建立之參考依據。

關鍵詞：隧道火災、隧道堵車、電腦數值模擬、熱通量

壹、緒論

公路隧道有別於一般開放性之公路，具有密閉化、地下化等特性。當長隧道內發生車輛過熱或互相碰撞等意外事件而引發火災事故時，若該等火災無法於成長期間予以撲滅，將造成燃燒之熱量在密閉之隧道內持續累積，致使隧道結構體及設備因高溫（往往超過 1200°C）而崩坍毀損，亦將造成濃煙於隧道內蓄積。歐洲近期於 1999 年及 2001 年分別發生兩起重大之隧道火災事故，不僅造成嚴重之人員傷亡、車輛毀損及隧道頂部崩塌，更迫使隧道長時間關閉，進而造成重大之社會成本損失。我國近有雪山及八卦山長隧道之相繼通車，未來國道東部公路若確定施築，其中亦將包含多條長隧道。在有如此多條長隧道之我國，更有必要對隧道火災之相關議題進行探討。近期因數值模擬學理之發展已臻成熟且電腦數值運算速度精進，以「數值模擬」方法進行隧道火場情境之模擬已為目前重要趨式。

Fire Dynamics Simulator (FDS)[2,3]火災模擬軟體係由「美國國家標準與技術中心」(The National Institute of Standards and Technology, NIST) 研發完成，該軟體依據使用者回饋之意見持續進行編修並推出更新之版本，目前已為國內外研究或設計單位採用作為隧道火場情境模擬之工具[4-12]。其中文獻 4 及文獻 5 曾分別對全尺寸及縮小尺寸隧道火災試驗之結果以 FDS4.0 進行模擬驗證，其結果顯示 FDS 軟體對火場上下游噴射流之溫度 (ceiling jet temperature)、煙層逆流長度(back layer)及臨界速度(critical velocity)之計算與試驗結果具有良好之一致性。文獻 6 及文獻 7 以 FDS 軟體模擬長隧道發生火災時之火場情境。文獻 8 及文獻 9 亦利用 FDS 電腦模擬之結果對隧道火場避難環境進行探討。

目前之隧道火災數值模擬研究文獻，皆以火場上下游無車輛作為火場模式模擬之假

設，然在現實的情況中，隧道發生火災事故時，火場上游應有車輛回堵現象，近期更有研究認為火場下游亦有可能發生塞車情形[13]，此乃最為嚴厲之火場情境(亦即火場上下游皆有車輛之情形)，當隧道內發生上述堵車現象時，隧道內車輛之車體(尤其大客車)對煙層流動及通風排煙效應將造成相當之干擾，然此種效應在目前火害模擬之文獻中並無相關之探討與研究。且幾乎所有之隧道火害數值模擬皆以均勻風速模擬風機作動所產生之氣流，其合理性尚待釐清，故本研究針對此二項隧道火害研究尚待釐清之議題以數值模擬方法進行探討。

貳、模擬設計

本研究藉由火災模擬軟體 FDS，計算分析隧道發生火災事故時之火場情境，本模擬涵蓋「前期模擬」與「主要模擬」兩部分，其中前期模擬主要目的在決定數值模擬「網格尺寸」及「邊界尺寸」之大小；「主要模擬」部分則為依據「前期模擬」所得之結論對隧道火場上游有、無車輛回堵現象進行火場情境之模擬。茲將本研究之模擬條件列示如下：

- (一) 火源：本模擬以巴士火災之熱釋放率峰值 30MW[17]作為火源設計之依據。另相關隧道試驗報告指出，質量比例 40% 甲苯及 60% 庚烷之混合液體，其燃燒所產生之煙量能有效模擬汽車火災之燃燒情境，故此研究之火源乃以尺寸 2.4m×2.4m 之油盤內裝甲苯與庚烷之混合液體，模擬隧道發生巴士火災事故之火源。
- (二) 風機佈設與風速：當隧道發生火災事故時，為避免風機作動破壞煙層危及避難及救難之安全性，火場上游 250 公尺及下游 500 公尺範圍內之風機將不作動[14]。有鑑於此，本模擬之風機佈設於火場上游 250 公尺處。另數值模擬風機出口風速 23m/s 乃依火場臨界風速推算求得，有關巴士火災臨界風速之計算公式詳參附錄 1。
- (三) 隧道斷面尺寸：本研究隧道斷面大小係參照國內國道公路隧道單孔單向雙車道之尺寸模擬之，其斷面尺寸詳圖 1。
- (四) 回堵車輛配置：回堵車輛計配置 8 輛巴士 (12m×2.4m×3.6m) 及 62 輛轎車 (4.8m×1.8m×1.5m)。
- (五) 邊界條件：假設隧道兩側洞口與外界相通，其壓力值為自由壓力邊界，依程式計算兩側洞口之氣流量，大氣溫度及起始氣流溫度皆設定為 30°C。

本研究在上述模擬條件下進行下列三種不同火場情境之模擬：

- (一) Case1：為火源配置於隧道斷面中央處，且上游無車輛回堵 (詳圖 2)。
- (二) Case2：為火源配置於隧道斷面中央處，上游有車輛回堵 (詳圖 3)。
- (三) Case3：火場上游有車輛回堵現象，且火源位於回堵車輛之正後方 (詳圖 4)。

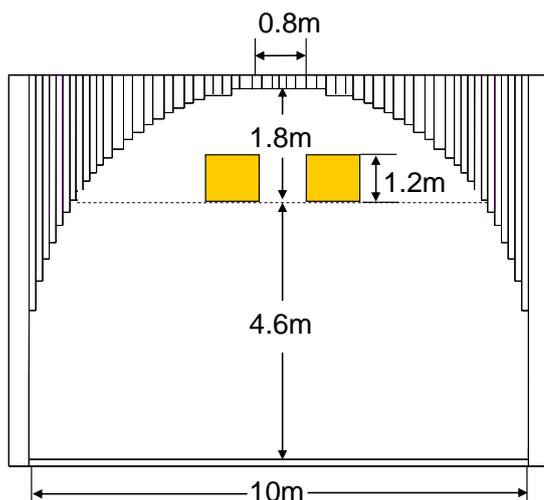


圖 1 模擬隧道正面透視圖



圖 2 Case1 模擬隧道俯視圖



圖 3 Case2 模擬隧道俯視圖



圖 4 Case3 模擬隧道俯視圖

參、前期模擬

一、網格測試

表 1 數值分析網格尺寸表

網格編號	δx	δy	δz	CPU 運算時間
1	0.2	0.2	0.2	67.56hr
2	0.3	0.3	0.3	7.66hr
3	0.4	0.4	0.4	2.31hr
4	0.6	0.6	0.6	0.5hr

本研究為兼顧網格精準度與配合計算機硬體之計算能力，首先對「網格尺寸」作最適化分析。先取 120 公尺長之隧道模型且在風機不作動之情境下進行分析，以利觀察火場附近相關物理參數之變化，模型之斷面尺寸詳圖 5，火源設置於隧道模型中央，採用 4

種不同尺寸之均勻網格(詳表 1)佈設於模型中進行模擬。圖 6 為隧道頂部下緣 5 公分位置處沿隧道軸向之溫度分佈圖，其中顯示「網格 1」與「網格 2」模擬所得之結果相當接近且二者 CPU 之運算時間有相當大之差距，因此本研究乃採「網格 2」之格點尺寸進行後續之模擬分析。



圖 5 網格測試模擬隧道俯視圖

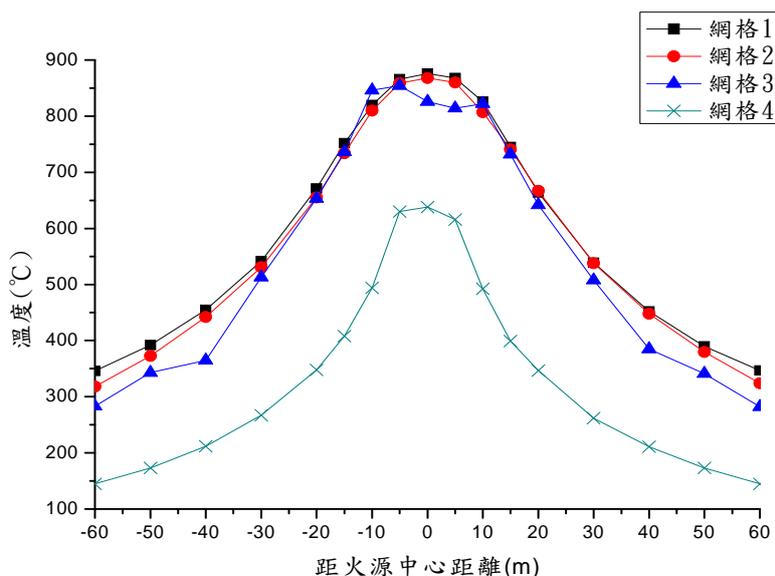


圖 6 隧道頂部下方 5 公分位置處沿軸向之溫度分佈圖

二、邊界尺寸測試

「邊界尺寸」之大小，將影響模擬網格之數量，為克服網格數過多，可能衍生數值計算超出電腦計算負荷之現象，本模擬將數值計算之模型長度由 600 公尺縮減為 420 公尺。為確保模型長度之縮減不致影響模擬之精度，本節分別針對此兩種不同長度之模型進行模擬，兩者採用相同之火源設定，火源之位置距左側洞口之距離為 300 公尺，兩者皆採用相同之網格尺寸 0.3 公尺、相同之通風排煙策略及邊界條件（兩端為開口）進行模擬。圖 7 為隧道頂部下方 5 公分高程位置處沿隧道軸向之溫度分佈圖，其中可發現此二模擬所得之溫度結果極為接近；圖 8~9 為隧道各測點平均風速圖，其結果發現二模擬自風機下游 200 公尺處隧道斷面之氣流速度即呈均勻之穩態狀況，風速約為 5m/s，其位置距火場尚有 50 公尺之距離，亦即自火場上游 50 公尺處隧道斷面之氣流即達均勻速度狀態。因此，本研究乃採 420 公尺作為數值模擬模型之長度。

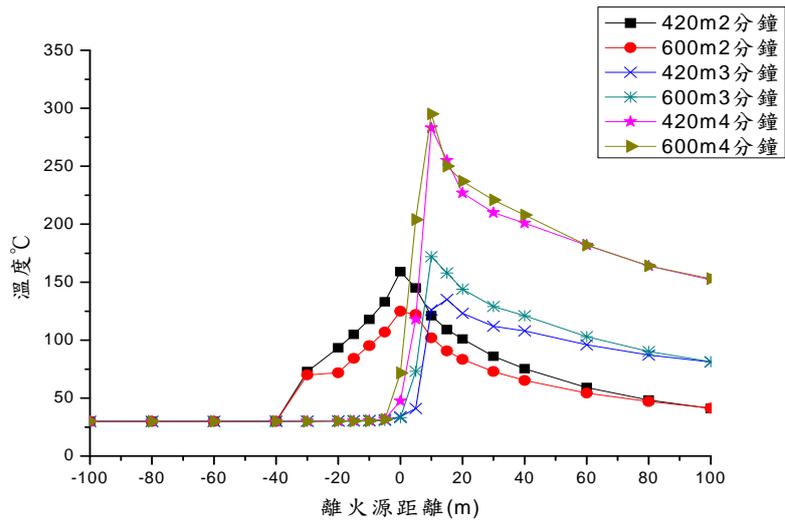


圖 7 隧道頂部下方 5 公分高程位置處沿軸向之溫度分佈圖

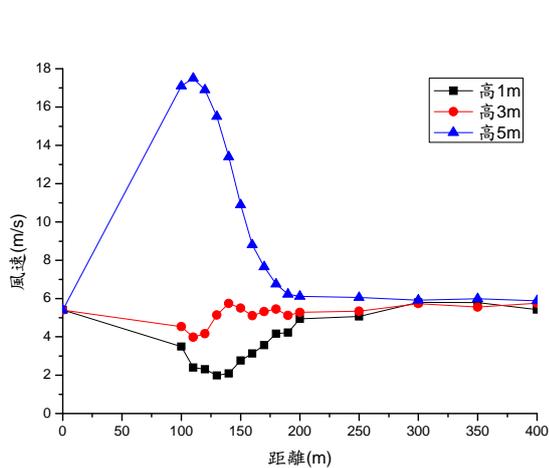


圖 8 420 公尺隧道各測點平均風速圖

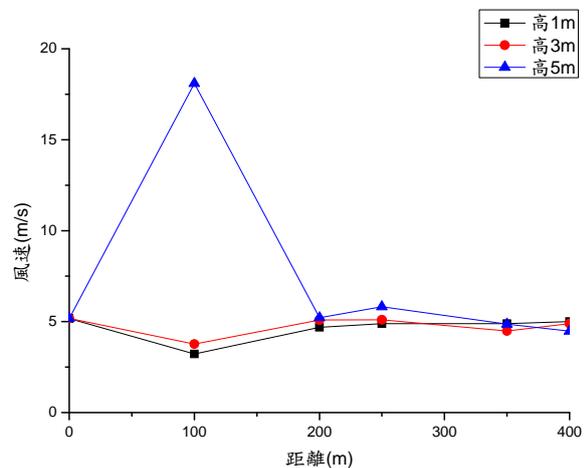


圖 9 600 公尺隧道各測點平均風速圖

肆、結果與討論

圖 10 所示為各種情境模擬所得火場之燃燒熱釋放率歷時曲線圖，其結果發現當火源置於隧道斷面中央時，火場上游有、無堵車情形（參照 Case1 與 Case2）對火場熱釋放率影響不顯著，此乃因隧道火場上游發生堵車情形時，雙線道車輛尚有 2.4 公尺之橫向間距，因而降低堵車效應對火場附近氣流（因風機作動而產生）之影響，故熱釋放率並無明顯之影響；反觀將油盤放置於巴士後方時（Case3），因巴士阻擋了大量之氣流，使可燃蒸氣及熱易於蓄積，導致燃燒的速率快於其他兩種配置，且於約 170 秒時發生閃燃致使燃燒熱釋放率有快速爬升之現象。另由溫度變化圖 11~12 可更清楚看出，當 Case1 與 Case2 火源位於隧道斷面中間，雙向車道的間距與油盤之寬度相等，導致氣流將油盤之熱及煙吹往下游造成火焰偏離，冷卻效應致使溫度之峰值僅達 380°C，且發生在火源下游 15 公尺處；Case3 則因為巴士住阻擋了氣流，使熱及可燃蒸氣易於蓄積，導致發生閃燃，致使溫度之峰值達 900°C。（詳圖 12）

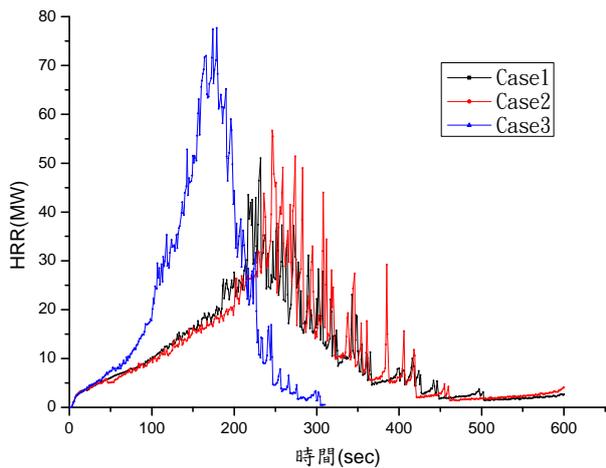


圖 10 各模擬結果熱釋放率圖

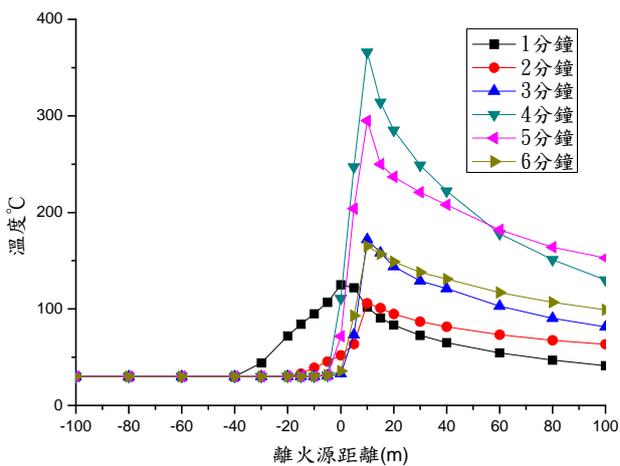


圖 11 Case1 隧道頂部模擬結果溫度圖

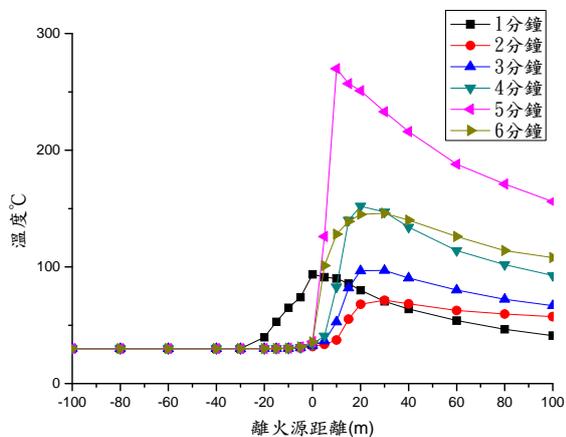


圖 12 Case2 隧道頂部模擬結果溫度圖

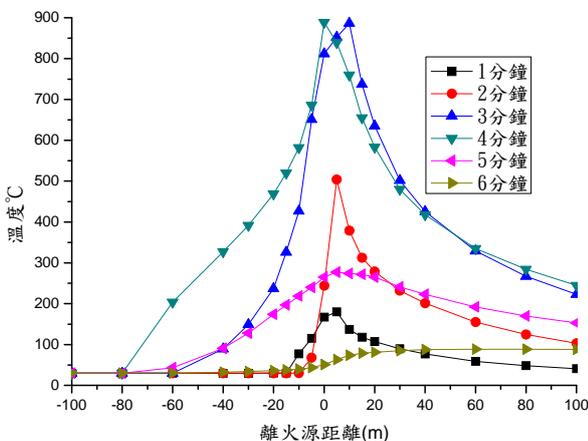


圖 13 Case3 隧道頂部模擬結果溫度圖

一、混凝土爆裂性評估

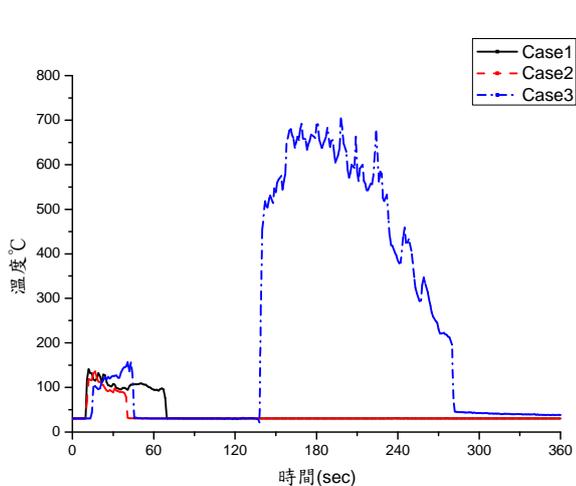


圖 14 隧道火場上游 10m 溫度歷時曲線

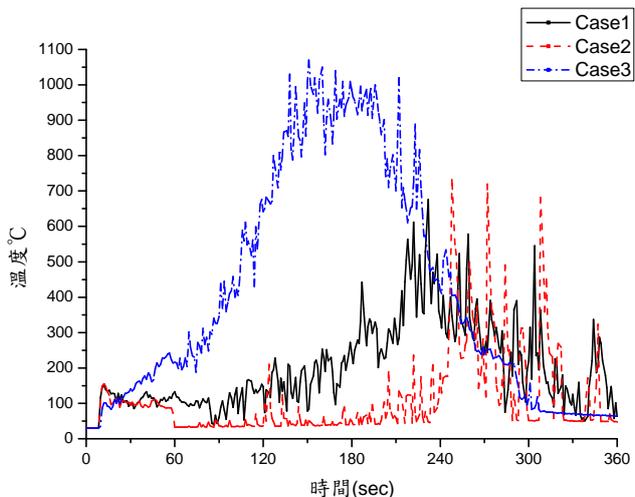


圖 15 隧道火場下游 10m 溫度歷時曲線

圖 14~15 所示為隧道火場上下游 10 公尺位置處，隧道頂部下方 5 公分位置處之溫度歷時曲線，其中顯示當風機系統作動時，可有效降低火場上游隧道頂板附近之溫度，進而避免隧道混凝土發生爆裂之現象，唯 Case3 情境於約 150 秒時溫度陡升至約 600°C，此研判係因發生閃燃現象所致。再察三種情境皆有火場下由溫度高於火場上游之情形，此乃因氣流作用致使火焰有向下游偏斜之現象所致，另 Case3 情境火場下游之隧道頂部下緣溫度已達 1050°C 恐有混凝土爆裂之虞。

二、避難溫度評估

圖 16 所示為隧道火場上游 10 公尺，距路面 1.7 公尺高程處之溫度歷時曲線，圖中顯示在風機系統作動之情境下，可有效降低火場上游之避難溫度，且溫度皆不超過 50°C，仍低於用路人避難承受極限溫度 60°C [16]。故建議當隧道發生火災事故時，用路人宜朝火場上游方向進行避難。

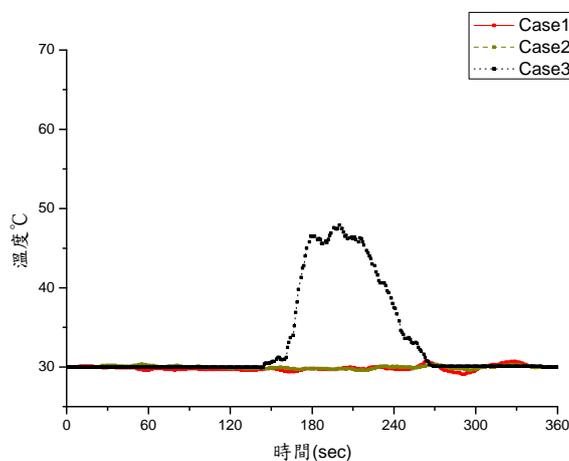


圖 16 隧道火場上游溫度歷時曲線

三、火勢引燃鄰車

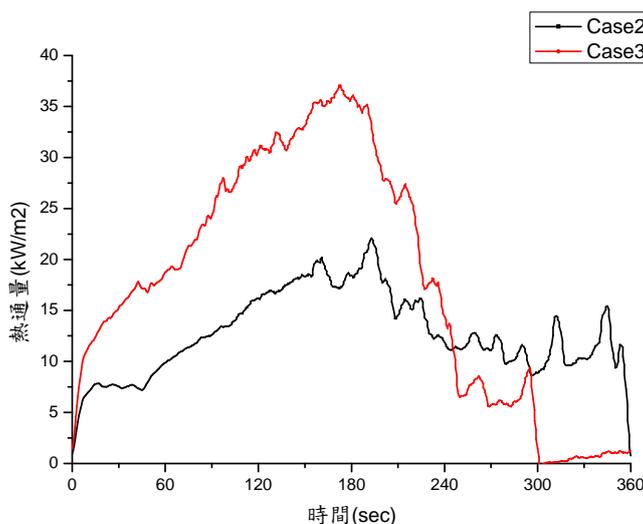


圖 17 距火源最近車輛熱通量歷時曲線

當輻射熱之強度達 12.5kW/m^2 時，大部份材料之物體可被引燃[17]。以此條件，做為鄰車是否會被引燃判斷之基準，圖 17 所示為距火源最近車輛處輻射熱歷時曲線，其可發現當距火源最近距離之車輛其熱通量分別於 120 秒與 25 秒即超過 12.5kW/m^2 ，此即表示當隧道上游有車輛回堵時，可能使火勢延燒至鄰車，造成更嚴重之災害。

伍、結論

本研究以數值模擬方法針對隧道火害研究尚待釐清之議題進行探討。茲將本研究之結論與成果列示如下：

1. 當隧道發生火災事故時，火場上游作動風機與火場間之距離應不小於 250 公尺，本研究對此種實際隧道火場情境進行模擬，其結果發現自風機下游 200 公尺處隧道斷面之氣流速度即呈均勻之穩態狀況，再察此位置距火場尚有 50 公尺之距離，亦即自火場上游 50 公尺處隧道斷面之氣流即達均勻速度狀態。以此檢視現今隧道火害數值模擬與縮小實驗以均勻斷面風速模擬風機所產生之氣流應屬合理。
2. 本研究針對火源上游有無車輛回堵進行模擬發現，當火源位於隧道斷面中央，對於熱釋放、隧道頂部下緣溫度及人員的避難逃生溫度並無造成太大之影響，但當火源位置位於回堵車輛之正前方，因大量的氣流被車體阻擋了，使熱及可燃蒸氣得以蓄積，導致發生閃燃，使隧道內之熱及濃煙瞬間增加，可能對人員的逃生及救難造成阻礙；且不管火源位於中央及回堵車輛下游，輻射熱通量皆有可能引燃火源上游之鄰車，故當以數值計算進行隧道火害設計模擬時仍建議將較危險情境之堵車模式(當火災發生於大型車輛下游正前方)納入模擬情境之考量。

參考文獻

1. <http://news.bbc.co.uk/> , BBC NEWS
2. McGrattan, K.B., Forney, G.P., Floyd, J.E. and Hostikka, S., Prasad, K., "Fire Dynamics Simulator (Version 4) – User's Guide", National Institute of Standards and Technology, 2006.
3. McGrattan, K.B., Baum, H.R., Rehm, R.G., Hamins, A., Forney, G.P., Floyd, J.E. and Hostikka, S., "Fire Dynamics Simulator (Version 4) – Technical Reference Guide", National Institute of Standards and Technology, 2006.
4. L.H.Hu, R. Huo and H.B. Wang, "Experimental and Numerical Studies on Longitudinal Smoke Temperature Distribution Upstream and Downstream from the Fire in a Road Tunnel", *Journal of Fire Sciences*.2007"; 25: pp 23-43.
5. Sung Ryong Lee, Hong Sun Ryou, A Numerical Study on Smoke Movement in Longitudinal Ventilation Tunnel Fires for Different Aspect Ratio "Building And Environment. 2006" 41: pp 719-725.

6. Chi-Ji Lin, Yew Khoy Chuah, A Study on Long Tunnel Smoke Extraction Strategies by Numerical Simulation “Tunnelling and Underground Space Technology 2007”.
7. Meng-Hsuan Chung, Ing-Houng Lin and Yi-Ching Huang, Numerical Simulation of Smoke Control System in Long Tunnels –Study on the Effect of the Number of Exhaust Ports “World Long Tunnel 2005, Taipei” pp 627-633.
8. Yunlong Liu, Vivek Apte, Yen Luong, Xijuan Liu and David Yung, “A Methodology for Assessment of Visibility during Road Tunnel Fires”, Journal of Fire Protection Engineering, Vol. 17, pp.65-79, 2007.
9. Yang Gaoshang, Peng Limin et al. Computer Model for People’s Safe Escape From Tunnel Fire” pp 355-359.
10. K.B. McGrattan, A. Hamins, “Numerical Simulation of the Howard Street Tunnel Fire, Baltimore, Maryland, July 2001”, NUREG/CR-6793, NISTIR6902, JANUARY 2003.
11. Tzu-Sheng Shen, “The scenario and Effect Analysis of a Longitudinal Ventilation System to a Tunnel Fire with Traffic Jam”, International Workshop on Practical Application of Computing Fire Models, Taipei, September 2006.
12. 陳昱勳，蔡允溪（民93）：捷運隧道內列車火災安全之模擬研究。2004年能源與冷凍空調學術暨建築物能源管理技術研討會。
13. PIARC, Fire and Smoke Control in Road Tunnels, World Road Association (PIARC) publication, 2007.
14. 李宏徹（民96）：長公路隧道安全管理策略。
15. Schmidt, S., Brescianni, C. and Blackmore, J., “Large Eddy Simulation of Fires: An Introduction”, CSIRO, 2002.
16. The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, SFPE,1995.
17. PIARC, Fire and Smoke Control in Road Tunnels, World Road Association (PIARC) publication, 2007.
18. Subway Environmental Design Handbook, Volume II, Subway Environment Simulation Computer Program, Version 4 Part 1:User's Manual ; Part 1 : User’s Manual, Dec.1997, U.S. Dept. of Transportation.

附件 A

SEDH對臨界風速之計算式[18]

對於一水平的隧道來說 $K_g = 1$ 。

$$V_c = K_1 K_g \left(\frac{gHQ_c}{\rho_0 C_p A T_f} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (A1)$$

$$T_f = \frac{Q_c}{\rho_0 C_p A V_c} + T_\infty \quad (A2)$$

V_c = 臨界風速，m/s g = 重力加速度， m/s^2

H = 隧道高度，m Q = 火災熱釋放率，W

ρ = 空氣密度， kg/m^3 C_p = 定壓空氣比熱， $J/kg \cdot ^\circ C$

A = 隧道淨截面積， m^2 T_f = 熱空氣溫度，K

K_g = 坡度修正因子 T = 外界空氣溫度，K

$$K_1 = Fr_c^{\frac{1}{3}} \quad (A3)$$

Fr_c 範圍為4.5~6.7，文獻中建議 $K_1 = 0.61$

$$K_g = 1 + 0.0378(\text{grade})^{0.8} \quad (A4)$$

grade 為坡度，對 K_g 做修正