

桃園創新技術學院教師專題研究計畫  
成果報告

\*\*\*\*\*

隧道消防安全性能設計研究

\*\*\*\*\*

計畫編號：教專研 102P-040

計畫類別：個別型計畫

執行年度：102 年度

執行期間：102 年 1 月 1 日至 102 年 12 月 31 日

計畫主持人：李伊平

執行單位：環科管系

研發小組審查：同意結案不同意結案 簽名：

(審查人不得與計畫主持人相同)

中華民國九十九年十二月三十一日

## 隧道消防安全性能設計研究

李伊平

環境科技與管理系

### 摘要

自近期國際間發生幾起嚴重之隧道火災事故後，對於長隧道火災之排煙模式已有採「點排式排煙模式」之趨勢。本專題研究執行縮小尺寸實驗及全尺寸隧道火災電腦數值模擬，針對點排煙隧道火災規模對排煙系統啟動所造成隧道二側洞口進氣流速之影響進行探討，其初步之成果可作為點排煙隧道軸流風機排煙能量與臨界風速間經濟效益最佳化決選後續研究之基礎。另本專題研究經由電腦數值模擬全尺寸隧道遮蔽式火源隧道火災情境對隧道火災用路人避難安全性提出一驗證評析之模式，可提供隧道消防設計參考之依據。

### 壹、緒論

#### 一、研究動機

近期國際間發生幾起嚴重之隧道火災事故，因而引發全球對隧道火災議題之重視，歐美國家更相繼執行多起跨國多年期之隧道火災研究案，其中涵蓋「全尺度試驗」、「縮小尺度試驗」及「數值模擬計算」。國際間對於長隧道火災之排煙模式已有採「點排式排煙模式」之趨勢，此種排煙模式係於隧道上方空間佈設排氣管道，復於排煙管道二側裝設軸流風機。當隧道發生火災事故時，排煙管道二側之軸流風機運轉，排煙管道相較於隧道中為負壓，隧道中之濃煙經由排煙孔(smoke damper)進入排煙管道排出，於此同時隧道二側洞口外之新鮮空氣亦將隨之被吸進隧道，此吸入隧道之氣流可提供火場將熱煙儘量局限於火源及排煙孔間之效能，然此侷限濃煙之氣流是否受火場規模而影響直得探討，因此本研究執行縮小尺寸實驗、及全尺寸隧道火災數值模擬，以探討點排煙模式火源規模對隧道二側進氣流量所造成之影響。再查，國內、外隧道火災之相關研究，其試驗及數值模擬所建構之火源模式幾乎皆以開放式之油盤或木條火源模擬汽車火災，此等開放式火源之燃燒機制與汽車火災之車內燃燒模式有所差異，亦即隧道內之通風氣流可直接接觸開放式之火源。因此本專題將探討並發展受遮蔽火源隧道消防安全性能驗證之模式。

#### 二、研究目的

- (一) 探討點排煙模式火源規模對隧道二側進氣流量所造成之影響。
- (二) 探討並發展受遮蔽火源隧道消防安全性能驗證之模式。

## 貳、研究方法

### 一、縮小尺寸實驗

本研究實驗以長 10m、寬 0.6m、高 0.4m 之 1:20 縮小模型進行尺度實驗。隧道模型主體材質為矽酸鈣板，模型側面利用透明壓克力 (PMMA) 作為觀測窗，便於觀察隧道內部氣流變化。本實驗使用液態丙烷(propane)氣體火源，火源設置漁具左側洞口 3.5m 處，且火源面與隧到底版面等高。隧道模型具二側洞口 5m 頂板開孔以風管連接變頻風機模擬排煙孔之抽氣能量，待氣體火源達額定熱釋放率時，於隧道二側洞口以風速計分別量測不同高程位置處之氣流速度，藉以探討在不同火源規模情境下，點排煙系統啟動對隧道二側洞口近氣流所造成之影響。本實驗以固定之抽氣量，火源採用 2.7kW 及 5.4kW，分別量隧道二側洞口進氣流之流速。圖 1 所示為隧道模型外觀及實驗過程照片圖，其中左側照片中之軟管即為連接排煙孔與風機之管線。



圖 1 所示為隧道模型外觀及實驗過程照片圖

### 二、數值模擬計算法

目前國內外較常使用火災模擬之數值計算軟體計有 Fire Dynamics Simulator (FDS)。FDS [1,2] 數值計算軟體係由「美國國家標準與技術中心」(The National Institute of Standards and Technology, NIST)為模擬火災所研發之軟體，該軟體可免費自 NIST 網站下載，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[3-7]。其中文獻[3]及文獻[4]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[7]亦利用 FDS 電腦模擬之結果對隧道火場避難環境進行探討。文獻[5]及文獻[6]以 FDS 軟體模擬公路隧道發生火災時之火場情境，隧道之排煙模式設定為瞬間達到全速運轉之額定值，以此條件探討當隧道火勢達「穩態」設計火災規模階段時，火場避難環境之安危性。綜此，FDS 程式業經縮小尺寸及全尺寸實驗之驗證可有效之預測隧道火場中重要之火場物理參數。因此，本計畫擬採用 FDS 第 5 版程式作為數值模擬之工具。模擬之主要議題列示如下：

(一)點排煙模式火源規模對隧道二側進氣流量所造成之影響。

茲因隧道壁體與氣流間之摩擦阻力將對隧道內通風氣流有所影響，因此在考慮網格尺寸、現有電腦計算能力、數值運算時間、及模擬結果合理性等因素之情形下，本模擬以隧道長度 1 公里模擬之。本模擬於受煙層影響之區域將採用 0.3m 正立方體之細網格佈設；另於不受煙層影響之區域則採用粗網格佈設之，其網格之斷面積為 0.3m\*0.3m，然沿隧道縱向方向則增大其尺寸[8]。排煙孔設於距隧道口 500m 處，火源距排煙口 200m。

### 2.1.1 排煙管道二側軸流風機之排氣能量

排煙管道二側軸流風機之排氣能量以隧道洞口能產生抑制火場煙層逆流所需之臨界風速定義之，此臨界風速可以下式計算求得[9]。因此，電腦數值模擬軸流風機之排氣能量可以  $\dot{V} = V_c A$  定義之。其中 A 為隧道車行空間之斷面積。

$$T_f = \frac{\dot{Q}_c}{c_p \rho_0 A V_c} + T_0 \quad (1)$$

$$V_c = k_1 k_g \left( \frac{g H \dot{Q}_c}{\rho_0 c_p A T_f} \right)^{1/3} \quad (2)$$

$$K_1 = Fr^{-1/3} \quad (3)$$

$$K_g = 1 + 0.0378(\text{grade})^{0.8} \quad (4)$$

### 2.1.2 火源規模

本模擬採用氣體火源模擬之，火源之設定採用 60% 及 40% 質量比例之 n-heptane 及 toluene 混合之火源燃料性質[10]，因本模擬為全尺寸隧道火災模擬，火災規模界定於探討一輛巴士與二輛巴士火災情境之火場燃燒規模。因此，本模擬之火源規模設定為 30MW、40MW、50MW，採用 T-square 火源之成長模式，火源於 420 秒達設計之燃燒熱釋放率值，繼之維持 3 分鐘之穩態燃燒。

(二)受遮蔽火源隧道消防安全性能驗證之模式。

### 2.2.1 模擬網格尺寸及隧道模擬長度

為合理模擬水系統啟動對火場所造成之影響，本模擬採用 0.3m 正立方體之細網格模擬之。另模擬水系統水顆粒運行將耗費大量電腦運算之效能，因此隧道模型長度訂為 325 公尺，火源距離左側洞口 125 公尺，點排煙系統排煙孔距隧道右側洞口 75 公尺。

### 2.2.2 水系統設備佈設及參數設定

本模擬水系統設備採分區啟動放射系統，一放射區間之長度為 25 公尺，當火災發生後，其上下游兩分區之撒水頭同時啟動，故撒水區間之長度計有 75 公尺。沿隧道軸向設置三條主要管線，側管與中央管線之間距為 4.3 公尺，撒水頭之軸向間距為 2 公尺，距地面之高度為 5.2 公尺。撒水系統參數之設定示如表 1。

表 1 水系統設定參數

放射密度	K	噴頭流量	壓力	粒徑
3.3LPM/m <sup>2</sup>	3.63	23L/min	40bar	100μm

### 2.2.3 火源假設

本模擬之火源係採 Runihamer 全尺寸隧道大貨車火災試驗之燃燒熱釋放曲線模擬之。前有試驗顯示車體本身對水系統設備滅火具有遮蔽效應，故水系統設備作動後，僅抑制而不易撲滅火勢[11]，此項試驗之結論與數值模擬木條火災於水系統設備作動前後燃燒熱釋放率曲線所示有相當之一致性，亦即燃燒之熱釋放率於水系統作動後有被抑制之現象，因而呈現平緩之走勢(圖 3a)。有鑑於此，本模擬之火源燃燒熱釋放率曲線即假設於水系統啟動時間點 3 分鐘時，火場燃燒受水系統抑制效應影響，燃燒熱釋放率曲線即發生如圖 3a 趨近於水平發展之趨勢，因此本模擬火源之假設即於水系統啟動前(火勢引燃後 3 分鐘)其熱釋放率引用 Runihamer 全尺寸隧道大貨車火災試驗之燃燒熱釋放曲線，水系統啟動後熱釋放率曲線則維持水平曲線(請參閱圖 3b)。另，為考量車體遮蔽水系統水粒子直接接觸火源之效應，建模時於火源上方建置一塊混凝土板塊模擬車體車遮蔽水顆粒直接接觸火源情境，火源模擬之外觀示意圖請參閱圖 4。火源之長寬高尺寸分別設定為 6m\*4m\*3m。

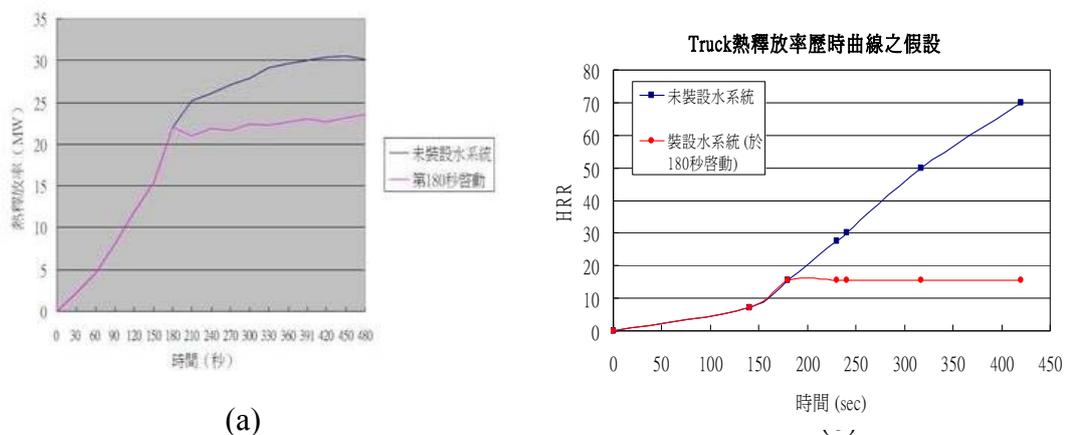


圖 3 火源熱釋放率假設

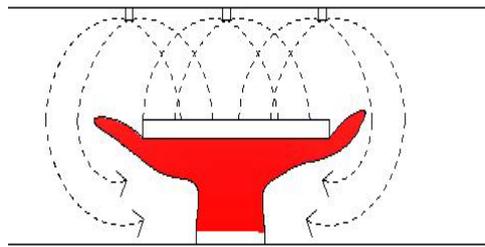


圖4 火源外觀與水系統啟動水顆粒運行軌跡示意圖

2.2.4 隧道內用路人避難安全檢討

2.2.4.1 隧道內某一位置達到危險環境之臨界時間

若隧道內發生火災事故，主要威脅用路人安全之因子為火場中有毒氣體之濃度(CO)、溫度、可視度及是否有混凝土爆裂情事發生。表 2 列示用路人於隧道火場避難時該等危害因子之安全臨界值[12]。從電腦模擬之結果可求得距離火場任一位置處「火場溫度」、「CO 濃度」、「可視度」各項危害因子與時間之歷時關係曲線，檢視該等曲線與表 2 所列示各項危害因子之安全臨界值，即可求得火場中各位置處各危害因子達到安全臨界值之時間。以下將以距火場下游 50 公尺處為例，說明並求得各項驗證指標達安全臨界值所需時間之過程。檢視圖 5，可查知火場下游 50 公尺處用路人達避難溫度及可視度臨界值所需之時間分別為 690 秒及 332 秒。

表 2 用路人於隧道火場避難危害因子之安全臨界值

模擬項目	距隧道底面高	安全值
溫度分布	1.8m	60°C
CO 濃度	1.8m	800ppm
可視度	1.8m	10m

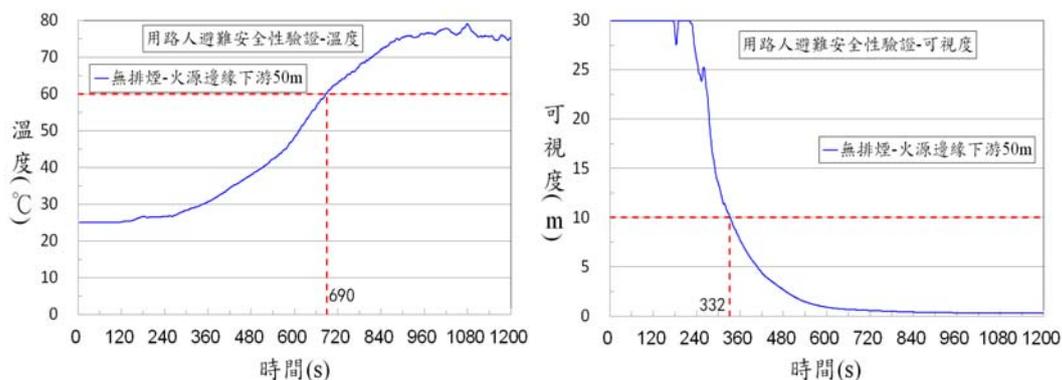


圖 4 用路人避難溫度、可視度歷時曲線

### 2.2.4.2 隧道內用路人避難時間計算

隧道內發生火災事故，用路人發現火災事故至離開車輛避難至某一位置處所需之時間 ( $T_{req}$ )可由下列公式計算之

$$T_{req} = T_{det} + T_{resp} + T_{trav} = T_{det} + T_{resp} + S/V = 180 + S/0.8 \text{ 秒} \quad (5)$$

其中

$T_{det}$  為發現火災事故所需之時間 (秒)，假設火警偵測器於火災發生後第 60 秒時偵知火災事故

$T_{resp}$  為用路人自發現火災事故至離開車輛開始進行避難所需之時間(其中應包含用路人下車所耗費之時間)(秒)。此項參數 120 秒定義之，其中涵蓋用路人自發現火災事故至離開車輛開始進行避難所需之時間。

$T_{trav}$  為用路人離開車輛後在隧道中進行避難所經歷之時間 (秒)

$V$  為用路人之避難速度 (m/sec)。避難弱者步行速度約 0.64~1.12m/sec[13]，此處採 0.8m/sec。

$S$  為用路人避難至某一位置處，其與離開車輛開始避難點之距離

## 參、結果與討論

茲將本研究之成果分節說明如下：

### (一) 點排煙模式火源規模對隧道二側進氣流量所造成之影響

圖 6(a)、(b)分別繪示縮小尺寸實驗不同火源規模隧道左、右洞口進氣流速度。圖 7 顯示當火源規模增大時，二側洞口進氣流之流速將有降低之現象。圖 7 繪示火源規模 2.7kW 實驗隧道左右二側洞口進氣流流速，檢視該圖可發現火源側洞口氣流流速低於另一側洞口之氣流流速。相同之實驗結果亦可於 5.4kW 火源實驗中得到。

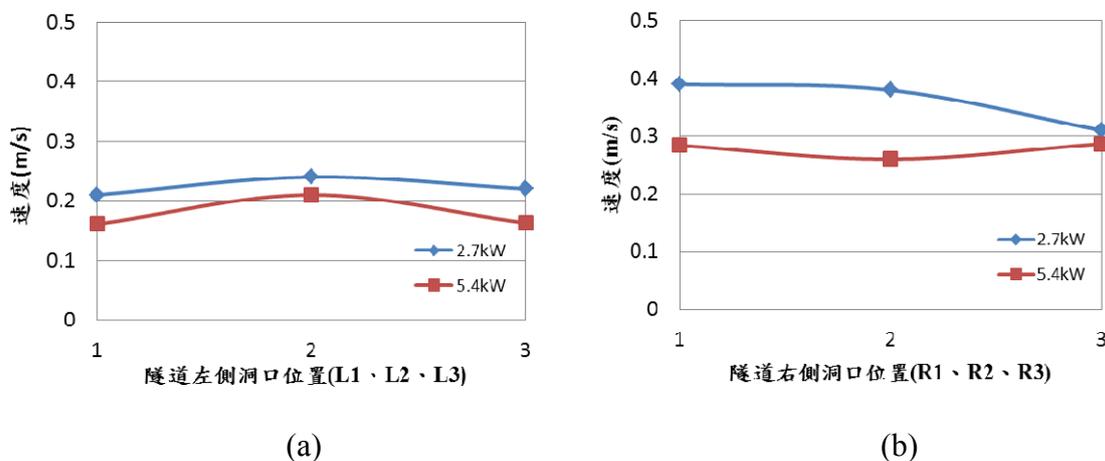


圖 6 不同火源規模隧道左右洞口進氣流速度

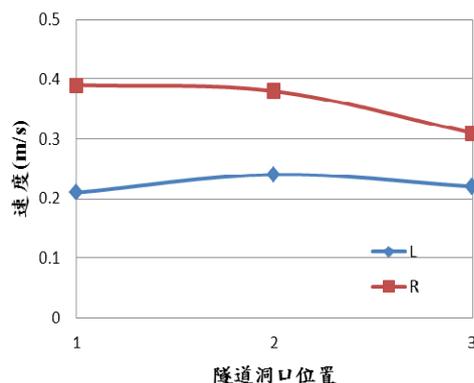


圖 7 火源 2.7kW 實驗隧道左右二側洞口進氣流流速

圖 8、圖 9 分別繪示全尺寸電腦數值模擬隧道左側洞口進氣流速度圖，檢視該二圖，可發現當點排煙隧道中僅排煙系統啟動而隧道中無火源情境隧道二側近氣流之速度相同皆為近 2.25m/s。然當隧道中發生火災事故時，吾等可發現當火災規模逐漸增加時，隧道左側洞口之進氣流速度有逐漸減少之趨勢；反觀隧道右側洞口進氣流速度則有逐漸增大之趨勢。檢討其原因，當道無火災事故時，隧道排煙口抽氣，相對於二側洞口抽進相當之氣流量應屬合理，然依但在排煙口上游(左側)發生火災事故時，排煙口抽氣排煙其上游側因有火焰及濃煙，故原上游側之抽氣能量主要應用於抽排燃燒所產生之濃煙，故僅少量分配於自左側洞口抽進空氣氣流，且此效應將隨火災規模逐漸增大愈形顯著。反觀隧道右側洞口則因排煙口上游側充滿濃煙，而下游側為新鮮空氣，從單一排煙孔抽氣情形觀之，自下游抽取新鮮空氣相較於較上游抽取濃煙較為容易，因此當火災規模增大時，將造成排煙口右側之隧道右側洞口相較於隧道左側洞口抽進較多量之氣流，致使進氣流流速有增加之趨勢。綜此，當吾等設計點排煙隧道之排煙能量時，應將此種效應納入考量，不可僅以縱流式排煙隧道之臨界風速設計點排煙隧道之排煙能量，否則將有低估排煙能量之情形發生，而此低估之情形亦將隨火災規模之增加而愈形嚴重，進而造成煙層回流現象愈形惡化之現象發生。

綜上所述，吾等可發現縮小尺寸實驗與全尺寸隧道火災數值模擬可得到相同趨勢之結果。

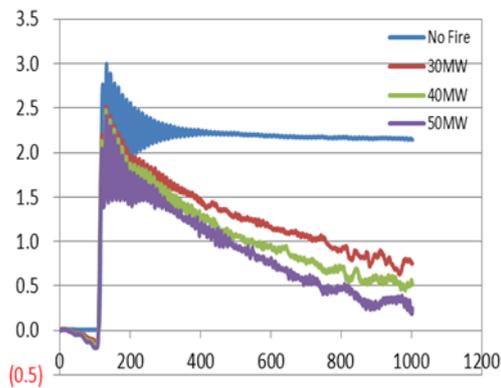


圖 8 隧道左側洞口進氣流速度圖

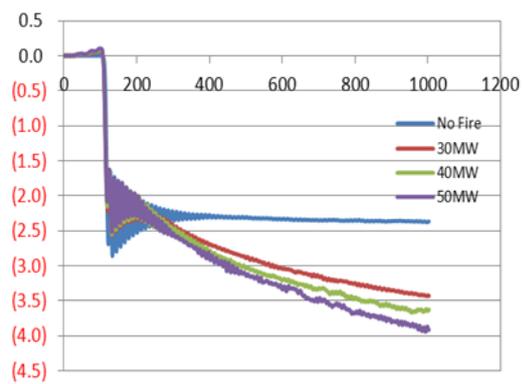


圖 9 隧道右側洞口進氣流速度圖

(二)探討並發展受遮蔽火源隧道消防安全性能驗證之模式

本節參照 2.4 節所述之動態安全性驗證模式，對水霧系統是否啟動情境進行用路人避難安全性進行驗證評析。

3.2.1 避難溫度驗證比較

圖 10 所示為「僅排煙系統啟動」與「排煙及水霧系統皆啟動」模式，用路人朝向火場上、下游方向避難溫度驗證比較圖。圖中可發現用路人朝火場上游方向避難時，二種情境皆不會遭受「溫度」危害因子之威脅。若朝火場下游避難，「僅排煙系統啟動」情境用路人可能於火場下游 140 公尺處遭受到溫度的危害。然「排煙及水霧系統皆啟動」情境，用路人將不受「溫度」危害因子之威脅。

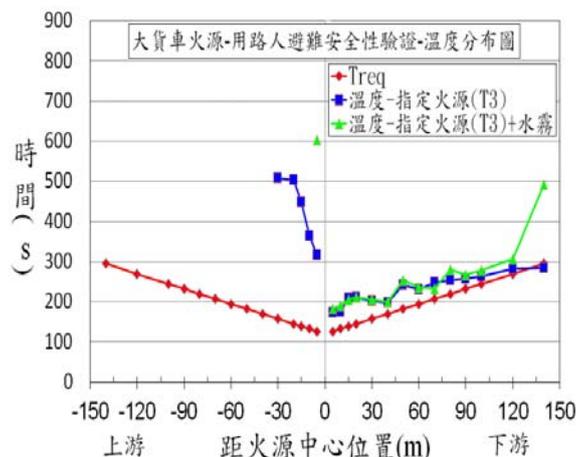


圖 10 水霧系統是否啟動情境避難溫度驗證比較

3.2.2 避難可視度驗證比較

圖 11 所示為「僅排煙系統啟動」與「排煙及水霧系統皆啟動」模式，用路人避難可視度驗證比較圖。檢視該圖可發現二種情境用路人皆可在可視度無虞之情境下向

火場上游方向避難。然而二種情境在火場下游約 5 公尺處則開始有避難可視度不佳之威脅。

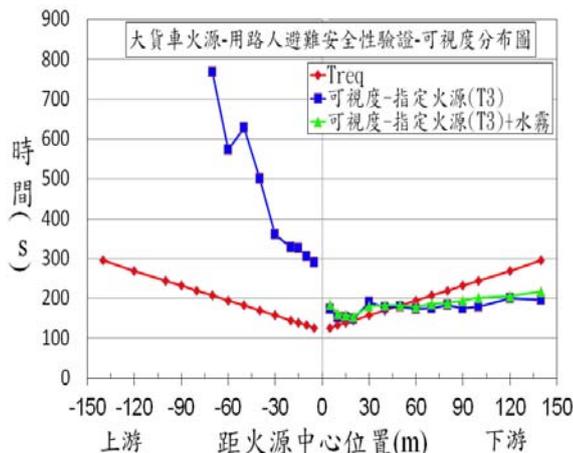


圖 11 水霧系統是否啟動情境避難可視度驗證比較

### 3.2.3 避難 CO 濃度之影響

圖 12 為火場上游、下游 5 公尺處水霧系統是、否啟動用路人避難 CO 濃度之比較圖。檢視此二圖，可發現水霧系統啟動能有效降低火場附近 CO 濃度，使用路人避難不至發生 CO 之威脅。

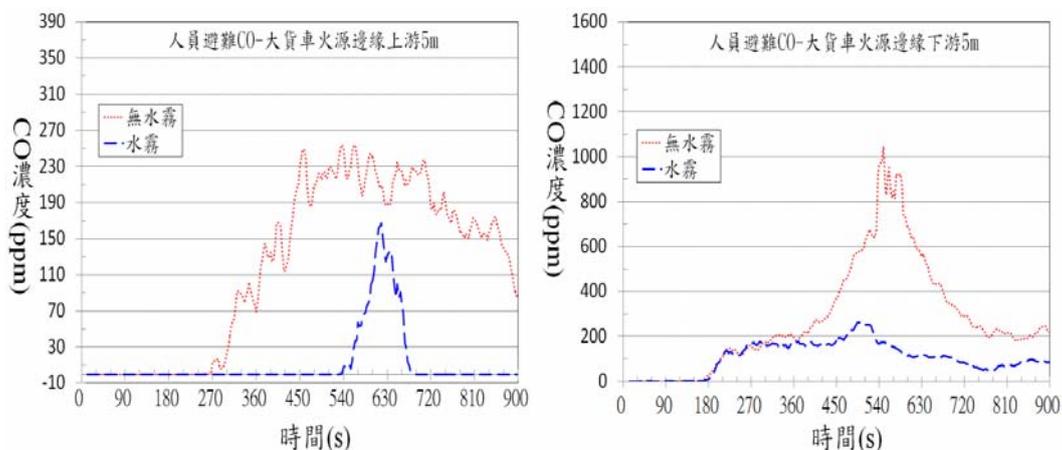


圖 12 火場上、下游 5m 處用路人避難 CO 濃度

### 3.2.4 小結

檢視圖 10~圖 12 之說明，可驗證當隧道發生大貨車火災事故時，「排煙及水霧系統皆啟動」情境，火場上游可提供安全的避難環境。然而該二種情境用路人向火場下游方向避難，在距火場 5 公尺處則開始有避難可視度不佳之情形發生。本專題研究前述之驗證流程可提供隧道用路人安全避難評析之驗證模式。

## 肆、結論

本專題研究之研究成果與其可提供後續研究之方向說明如下：

1. 經由縮小尺寸實驗與全尺寸隧道火災數值模擬所得之結果，吾等可發現點排煙隧道排煙系統啟動，隧道上游側進氣流速度(可將之視為臨界風速)將受隧道火災規模增大而有逐漸減小之趨勢。由此可發現點排煙隧道之臨界風速將受火源規模、軸流風機排氣能量二者交互影響，除此之外亦將與隧道斷面大小、火源與排煙孔距離等因素有關。因此，在本專題研究提出之初步成果基礎上，未來可針對不同火源規模，不同隧道斷面尺寸、及火源距煙孔距離等變因探討隧道點排煙系統排煙能量與臨界風速間經濟效益最佳化決選之依據。此研究方向已向國科會提出103年度專題研究計劃之申請。
2. 本專題研究經由電腦數值模擬方法針對隧道火災用路人避難安全性提出一驗證評析模式，可提供隧道消防設計參考之依據。

## 參考文獻

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. Chi-Ji Lin, Yew Khoy Chuah, A Study on Long Tunnel Smoke Extraction Strategies by Numerical Simulation “Tunnelling and Underground Space Technology 2007”.
6. 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.
7. Haukur Ingason and Anders Lonnermark, “Large-scale Fire Tests in The Runehamar tunnel – Heat Release Rate (HRR) ,” Proceedings of the International Symposium on Catastrophic Tunnel Fires, P.81-92, 2003.

8. 李伊平、蔡匡忠、簡賢文、黃信創、卓子陽、邱重樵，”車輛阻檔效應對隧道火場燃燒及煙流之影響研究”，第十屆海峽兩岸隧道與地下工程學術與技術研討會，烏魯木齊、中國，8月14~15.
9. US Department of Transportation, Research and Special Programs Administration, “Subway Environmental Design Handbook, Volume II: Subway Environmental Simulation Computer Program, SES Version 4.1” Part 1, User’s Manual, 2002.
10. Project “Safety Test” Report on Fire Tests”, 2002.
11. K. Opstad, and J.P. Stensaas, “FIRE MITIGATION MEASURES”, Safe & Reliable Tunnels. Innovative European Achievements.
12. Tung-Chou Tu, Shoei-Bo Shu, and Mei-Chu Yang, A Study of Fire Smoke Control & Personnel Escape on Railway Underground Tunnel “World Long Tunnels 2005” pp 597-602.
13. 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.