

長隧道通風技術之研究 (二) 子題壹— 隧道內火災引起之濃煙分佈研究

研究單位：國立臺灣大學應用力學研究所

計畫主持人：陳發林

類別：機電

編號：研究報告 057

出版年月：1995 年 5 月

GPN 9124840050

◎摘要

本研究針對縱流式公路長隧道內火災引起之濃煙漂散情形作一系列的數值分析與探討。我們首先整理出火災濃煙的數學模式，再決定用有限體積法寫成的 FLOW3D 程式來分析之。根據此數學模式及電腦程式，我們首先分析驅動火災濃煙之物理機制。再對火源特性的定位作一討論。也評估了二維平面計算在未考慮邊牆之限制時，所可能導致之誤差。以這些結論作基礎，我們探討了濃煙在隧道內漂散的特性與通風速度及火源種類間的關係。以這三者為三個參數，定出了安全的通風模式與極危險的火災狀況。我們也探討了一些特別的實際狀況，如斜坡對濃煙漂散的影響和有效的排煙策略。最後，我們依據分析結果作一討論及具體結論，以作設計及操控人員在決定火災發生時的特別通風模式所參考。

◎結論與建議

從前面個章的計算結果可整理出許多有關隧道火災的有趣現象，是以以前的研究中所未曾發現的。這些結果與現象對隧道通風之設計與規劃應甚有聲助。故在本章中，我們將根據前面各章所得的結果作一討論，進而作一些結論，作為往後進一步研究隧道火災之參考。

火災濃煙漂散之物理機制及數學模式

由第五章的分析結果知，在隧道火災所生的濃煙中，除高溫及高濃度所引發之溫度與濃度梯度會影響濃煙的漂散外，紊流的擴散效應亦是另一主要驅動濃煙的物理機制。以上三機制對濃煙漂散的驅動力以紊流效應最大，此可由圖 5.23 的順流濃煙前進速度之比較得知。再者即為溫度梯度的驅動力，最弱為濃煙梯度驅動力。此乃因為質量擴散係數往往都是熱擴散係數的百分之一左右，故其驅動力最小。雖三者有大小之分，但缺一則誤差甚大。故考慮火災濃煙之漂散，則三者皆應考慮之。

在數學模式中，隧道的計算範圍大小及二維或三維之考慮皆有其影響。在計算範圍的考慮中，若隧道長度太短，當濃煙漂散到入口或出口邊界時，計算的準確性即大大減少，因進出口之邊界條件已無法滿足。故計算範圍（或隧道之長短）之決定在於

濃煙漂散的速度。而此速度又決定於隧道內的通風速度及火源大小。通風速度愈大及火源發熱量愈大都使濃煙漂散速度愈大。故需較長的隧道作計算範圍。以本文的計算例為例，500公尺長的隧道應是合理的計算範圍。但若計算機容量與速度許可，3公里長則更佳。因為這長度可模擬大部分的長隧道，故具相當程度的代表性。

另外考慮的即二維或三維的計算，亦即邊壁效應。因隧道斷面除豎井或氣交換站等接點外，皆屬於簡單的半圓斷面，故斷面的幾何形狀對流場之整體結構在縱向的特性應不至於造成太大影響。故若考慮三維效應，以第七章中所提之分析方法應能適度地模擬之。由第七章的結果知，邊壁效應造成濃煙漂散速度有20%左右的增大，故不考慮邊壁效應可能導致某種程度的誤差。故第七章所提之方法應不能避免於隧道火災的分析之中。但若計算機之速度與容量許可，則全面性的三維計算應是最佳的選擇。因為畢竟第七章所提之方法也是種近似法則，無法通用於各種狀況，其準確度也有待評估。

火源的特性

在以往及本文的研究中，大部將隧道內可能發生的火災以發熱率大小來區分之。即小型車的燃燒發熱率為1MW到5MW之間，大型車則為10MW左右，油罐車則為高達100MW之譜。以發熱率來區分火源是目前被引用最多的方法。因車輛燃燒時，其可燃物包含汽油、機油、油漆、橡膠、紡織品...等等各種化學產物皆在其中，所燃燒之產物更是無法掌握，故以濃煙的成份作為區分火源的方法實不可行。更何況根據前節的討論得知，濃度梯度是三個驅動濃煙的物理機制中最弱者。故以熱源大小代表不同火源會比濃度源代表火源較接近事實。

又因燃燒物種類繁多，我們選擇CO₂為代表濃煙的唯一產物是跟據下列理由。因CO₂的產量大，佔汽油燃燒產物裡較高的比例。又因其較穩定，不易與其它物體產生化學作用，故能漂散較遠。又因許多其它物品燃燒，所生的CO₂也是主要產物。又因其分子量及擴散係數也接近空氣。以上種種，皆支持我們用CO₂來代表濃煙的可靠性。

所以，本文所得之濃煙漂散特性事實上是CO₂的漂散特性。但結果也因應能代表濃煙在隧道中漂散的行為。

濃煙漂散特性與逃生孔距之訂定

第八章裏所討論之濃煙漂散特性事實上是本研究所得最重要的結果。我們發現濃煙漂散的遠度是一定值，且與通風速度量一線性的關係。此關係整理於(8.5)及(8.6)二式中，或由圖8.38及8.39亦可得之。我們根據安全的概念，即無回流及濃煙不能降落路面的兩個要件，定出一個通風的安全區(見圖8.40)。此安全區涵蓋不同火源發熱率，大致而言，通風速度 $\approx 3.5\text{m/s}$ 是高發熱率火源的安全通風速度。對低發熱率火源而言，安全通風速度可能降低至 $\approx 1.5\text{m/s}$ 左右。詳細數值由圖8.40可得。

根據此安全的通風風速，我們可依(8.5)及(8.6)式得知相關的濃煙漂散速度。由此也能訂出最短之逃生孔距離之值。而此值之計算又與許多狀況相同，如人員奔跑的速度，人員與濃煙之起始距離(即前視距離)，和火源發熱率大小等。這些因素的變化對逃生孔距之值的影響整理於表8.1中。由此表可發現下列逃生孔距設置的要點。1.人員奔跑的速度若能高於濃煙漂散速度，則逃生孔距大小與人員安全無關。因

人畢竟能逃離濃煙的追逐。以最大火源為 100MW 來看。濃煙漂散速度 $\approx 5.19\text{m/s}$ (因而通風速度 $\approx 4\text{m/s}$ 是在安全區內), 故只要有大於此值之奔跑速度即可; 2. 但許多人員可能無法以此速度奔跑, 此時前視距離就很重要。大致而言, 若奔跑速度為 2m/s , 則前視距離需有 200 公尺以上才能有機會在坪林隧道中適時地躲入逃生孔中。若奔跑速度增為 4m/s , 則前視距離可縮短至 100 公尺之內。

前述逃生孔距是以濃煙漂散前緣而訂。若以距路面 2 公尺高之濃煙位置來訂孔距, 其結果示於表 8.2 中。而此濃煙之漂散速度與通風速度之間的關係則示於圖 8.41, 或可由 (8.8) 式代表之。此式的特色是與火源發熱率 Q 無關。可能因為火源發熱率愈大, 濃煙雖然往下游漂散較快, 但也浮力較大。而距路面較遠。二者恰好相互抵消而使 2 公尺高之濃煙位置之變化與 H 無關。

若以 (8.8) 式來訂逃生孔距, 其值就比用 (8.6) 及 (8.7) 式所訂者大; 見表 8.2。但因濃煙之漂散應以紊流方式擴散, 故“距路面 2 公尺之濃煙”很難有一清楚的介面。在沒有實驗數據前且為安全起見, 我們仍建議以濃煙前緣之位置作設計孔距之參考。

然而, 如 8.6 節所討論者, 此處之分析乃假設人員在濃煙下游的情況下所需之最小逃生孔距。此與實際狀況頗有出入。因人員在濃煙下游會隨車遠離火源, 在上游者因通風在安全範圍內而無迴流發生之可能。故逃生孔距訂為 350 公尺應是一合理設計。

有效的排煙策略

除上節所提排煙的風場的計算外, 其策略亦決定災害範圍大小的重要因素。大體而言, 在火災現象採用吸氣或吹氣並不會造成濃煙漂散速度的任何不同。而豎井排氣法則應是有效的排煙策略。但本文所算之例與實際豎井附近之風道結構有相當的出入, 故所得結果應只能提供定性之參考。實際之 V_1 與 V_2 值應以實際幾何形狀輸入計算程式中, 用各種不同火源加以分析而得之。求出一節當於 (8.5) 式或 (8.6) 式的關係式, 以資為設計及操控人員所用才為有效之途。至於其它排煙策略應以個案分析之, 以求分析之準確及可靠。

斜坡之考慮

由第十章的結果知。濃煙漂散速度受斜坡之影響不大。以國內坪林隧道之坡度是 1.25% 而言, 其影響程度實可忽略之。

未來研究方向

本研究針對隧道內火災所引發之濃煙的漂散行為作一有系統的深入研究, 且發現重要結果, 即濃煙的漂散是以定速前進。我們也訂出一關係式能提供設計人員作為逃生孔之設計準則, 或提供操控人員控制通風速度的參考。其準確性雖仍有待實驗數據的驗證, 且真正的參數值也會因個案不同而變。但以目前的分析內容而言, 此結果應能某種程度適用於目前的設計中。

以上結果能用於整體隧道中, 但在有斷面變化之處, 如豎井及氣交換站附近, 隧道口附近等, 皆應以三維的細部計算來分析整個排煙的效果! 另外, 停留車輛對排煙所造成的阻礙, 噴流風扇驅動隧道斷面風場的細部分佈, 火場附近之細部流場... 等

等，皆可能影響整體排煙的效果。另外，本文皆以縱流式通風為對象作排煙分析。若是橫流式通風，其排煙的方式及效果皆完全不同。這些應作更進一步的研究。