

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

高速公路隧道通風分析與實測(3/3)

Experiments and Analyses of Tunnel Ventilation

計劃編號：NSC 89-2212-E-002-123

執行期間：89年8月1日至90年7月31日

主持人：陳發林 國立台灣大學應用力學研就所

摘要

本研究群旨在發展一套多功能的公路長隧道通風系統分析程式。研究群架構分成四大部分，分別是系統分析，隧道內細部分析，隧道內外流場之整合分析，及特殊狀況之通風模式等。計畫計於三年完成。計畫完成時，不但能提供國內隧道工程單位一套多功能的軟體分析程式，更能為國內在研究隧道通風的領域中，培養出一批高等研究人力。

Abstract

This project is to develop a versatile multifunctional computer for the road tunnel ventilation system, which especially is designed for the Ping-Ling tunnel located in the Bei-I freeway connecting Taipei and I-Lan. As finished, the outcome will be a versatile multifunctional computer program which can be easily used by engineers in both government and consulting companies, which will promote the capability of the ventilation design of the local researchers as well as hatch a group of investigators who are good at the research and design of tunnel ventilation.

一、緒論

在六年國建計劃中的東西向高速公路，如北宜、中橫、南橫等，都有10公里以上之長隧道興建。而興建隧道除土木工程技術外，通風技術亦是決定隧道使用之安全與舒

適之重要因素之一。通風技術隨隧道的種類，長度，使用對象，及座落地區等不同而有所變化。如公路隧道與鐵路隧道之通風的考量完全不同。高速鐵路隧道又與地鐵捷運系統之考量迥然而異。在山區與在平地之隧道，其通風性質與當地地理及氣候環境又有密切的關係等等。因種類繁多且因素複雜，本研究群目前暫以規劃公路長隧道之通風技術為主。

公路長隧道通風技術之研究目前以歐美及日本地區發展最為先進。但隨機械電子等科技之長足進步，許多通風的技術及觀念也一直在變。另外，以往公路長隧道多建立於寒帶山區。若將現有技術應用於興建於亞熱帶山區（如台灣）及熱帶山區之長隧道將會產生一些未預期的問題。其它一些因特殊地理環境的因素所生之特有問題，譬如隧道通過地熱山區，如何有效排放地熱之硫氣及溫。又如長隧道之系統結構及孔道斷面等設計也日新月異等，在在影響整體通風的安排。

除以上這些隨技術及觀念更新而產生的新問題外，還有許多存在已久且有待解決的問題：如隧道火災所引起之濃煙排散及相關逃生系統的設置，如電力系統失效時，自然通風取代機械通風的可行性，如尖峰時段塞車時之通風模式，如炎暑之濕熱對通風設計之影響等，皆與通風系統之設計有直接關係。以上諸類問題，都提供足夠的空間讓我們來投入研究人力與物力。

以方法而言，研究隧道通風可分為數值分析模型實驗與實地量測三種。實地量測目前在國內仍有困難。因現有的隧道長度皆不夠，且交通量大，很難空出一段時間來作實地量測所需之工程。但於公元 2000 年北宜公路通車後，有數座長隧道將完工使用。屆時，實地量測之工作即可也應該展開作業。數值分析的結果有助於一些技術及知識的資料庫的建立，為未來作實地量測提供足夠及正確的資訊。另外，模型實驗能某種程度地輔助數值分析結果之準確性的確認。但因許多動力參數無法像幾何尺寸一樣適當縮減，其效果仍有待評估。這三方面的工作應分階段有系統地進行。在第一階段中，應以數值分析為主，以建立所有的分析能力及必備的知技術等。第二階段應以實際應用前階段所發展之分析能力於工程設計中為主要目標，必要時應輔以適當的模型實驗，以確認分析結果應用於實際設計的可靠性。最後階段則應進行實量測，再輔以前二階段所得之知識技術，使整體技術能確實地落實生根。而目前的規劃以第一階段為主，故只討論數值分析上的研究內容。

在分析方面，昔日隧道通風的分析皆以簡化的一維理論模式為主。其結果對整體通風量的估算還能合乎工程設計上的需求。但隧道長度逐漸增加，隧道結構系統愈趨複雜，如通風豎井之建立，氣交換站之建立，靜電集塵設備之風道設立，橫流式通風之天花板氣孔之設計等等，皆需三維風場模擬才能得知設計本身對通風之影響，故全面性分析能力之建立是必然的趨勢。

通風技術分析的內容繁多，但大部規劃後，仍可將主要的研究項目依研究的本質及使用對象的區別分為如下之項目。首先應是建立一套整體的通風系統分析軟體，對隧道內的空氣污染物，溫濕度等作一總體的模擬分析。再來就是建立一套細部結構之風場分析軟體，即針對豎井附近，氣交換站附近，或其它隧道附屬設備等與主隧道形狀有異的通風道的風場分析，如此才能增進整體系統分析的精確性。另外，車輛行進間所造成之

活塞效應將影響通風的模式，尤其在單向通車與雙向通車的隧道中更是如此。又如一些特殊狀況，如隧道火災之發生，隧道內交通阻塞，或機械通風完全停止時等所需配合之通風模式皆決定隧道使用時之安全性問題，絕對不能忽視之。另外，隧道所經地區之特殊地形、地理、及天候等對通風模式所造成之影響；如在中橫高速公路將出現的隧道群，隧道之出口與另一隧道之入口間隔是一山谷時，山風對通風模式將造成莫大的影響；又如南橫高速公路中某些隧道會經過地熱區，其所生之硫化氣體及高溫不只造成施工的困難，對完工後之通車安全亦造成威脅，故其影響不可不察。

以上皆以數值分析為主，必要時模型實驗的數據可能對數值分析結果有助。數值分析結果將以氣流的速度，空氣污染物及溫度為指標，來判定通風的可行性，舒適性，甚或安全性。另外，以目前通風模式受工程界採用的情況，大致可分為(1)縱流式通風，(2)橫流式通風，及(3)混合式通風等三種。前面所列之研究項目應根據實際設計所採用之通風模式逐一探討。

此研究群第一階段具體的目標將以發展一套包括軟硬體之整合系統，來提供工程研究單位一套易於使用的完整分析設備。使國內之工程研究單位擁有能與歐、美、日本媲美之隧道通風分析的工具。軟、硬體整合的結果希望能讓使用單位人員不需經冗長的專業訓練即能使用此套整合性的分析設備。使國內隧道工程的通風技術能擠入世界前端，在國際上有聲譽及競爭力。

二、單孔單向隧道通風系統之理論模式

本節將以討論隧道內風速之理論模式為主，其主要包含統御方程式與解法兩部份。茲分別敘述如下：

1. 統禦方程式

福德隧道之橫斷面實為半橢圓形。然而，依據流體力學實驗歸納得知：流體在不同橫斷面之管道內流動時，只要該管道橫斷面之長寬比(aspect ratio)介於 4.0 到 0.25 之間

時，我們可將其視為直徑 $D_h = 4A_t / P_w$ ，長度 L 之圓形橫斷面管來估算空氣流動時與隧道壁之摩擦力（或摩擦因子 f）。其中， A_t 乃隧道內空氣流通之橫斷面面積， P_w 則是其濕周長。因此，我們在建構福德隧道之通風系統理論模式時，將把該隧道視為一圓管來處理。

建立福德隧道通風系統理論模式時，所可考慮到會影響隧道內風速的因素主要有：隧道入口摩擦損耗，隧道內部指示標誌、護欄、和燈架等突出物，風機推力，隧道兩端壓差，空氣與隧道壁摩擦，車流狀況等。隧道內空氣在上述諸因素共同作用之下將產生流動速度 V。在隧道內空氣流動接近不可壓縮的條件下，我們可依據牛頓第二運動定律列出上述各因素所產生的作用力與隧道內風速間的關係如下：

$$\sum_{i=1}^8 F_i = \rho A_t L \frac{dV}{dt} \quad (\text{暫態}) \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^8 F_i = 0 \quad (\text{穩態}) \quad (2)$$

其中

$$F_1(\text{車輛推力}) = N_s \frac{\rho}{2} \cdot C_d \cdot (U_s - V)^2 \cdot A_{v_s} \cdot Flu_s \\ + N_l \frac{\rho}{2} \cdot C_d \cdot (U_l - V)^2 \cdot A_{v_l} \cdot Flu_l \\ Flu = \begin{cases} 1 & U > V \\ -1 & U < V \end{cases} \quad (3)$$

N_s ， C_d ， U_s ， A_{v_s} 分別代表隧道內車輛數目、阻力係數、車速、和車輛前視面積。而下標 S 和 L 則分別表示小型車和大型車。

$$F_2(\text{風機推力}) = n_F \cdot \rho \cdot A_F \cdot V_F \cdot (V_F - V) \cdot K_j \cdot Fl_F \\ Fl_F = \begin{cases} 1 & V_F > V \\ -1 & V_F < V \end{cases} \quad (4)$$

n_F ， A_F ， V_F ， K_j 分別為風機運轉個數，出口斷面積，出口風速，和升壓係數

$$F_3(\text{隧道兩端壓差阻力}) = (P_t - P_e) A_t \quad (5)$$

$$F_4(\text{隧道壁摩擦阻力}) = -\frac{\rho}{2} \cdot f \cdot \frac{L}{D_h} \cdot A_t \cdot V^2 \cdot Fl_\tau \\ f = \frac{\tau_w}{\frac{1}{8} \rho V^2}, Fl_\tau = \begin{cases} 1 & V > 0 \\ -1 & V < 0 \end{cases} \quad (6)$$

τ_w ：隧道壁面摩擦剪應力

依據前人對諸多管內流場的實驗結果可

知：摩擦因子 f、雷諾數 $Re(\frac{\rho V D_h}{\mu})$ 、和壁面相對粗糙度 e/D_h 三者的關係可清楚以 Moody diagram 或下列經驗式表示(節錄自 Potter & Wiggert(1991))

$$f = \begin{cases} \frac{64\mu}{\rho V D_h}, & \frac{\rho V D_h}{\mu} < 2000 \\ 1.32 \left[\ln \left[\frac{e/D_h}{3.7} + 5.74197 \left(\frac{\mu}{\rho D_h V} \right)^{0.9} \right] \right]^{-2}, & 3000 < \frac{\rho V D_h}{\mu} < 3 \times 10^8 \\ 10^{-6} < e/D_h < 10^{-2} \end{cases} \quad (7)$$

$F_5(\text{隧道入口摩擦損耗}) =$

$$-K_{port} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot A_t \cdot V^2 \cdot Fl_{port} \\ Fl_{port} = Fl_\tau \quad (8)$$

$F_6(\text{隧道內突出物阻力}) =$

$$-\frac{\rho}{2} \cdot V^2 \cdot Cd_{pts} \cdot A_{pts} \cdot Fl_{pts} \\ Fl_{pts} = Fl_\tau \quad (9)$$

隧道進口和出口兩處靜壓值深受隧道附近大氣流動狀況的影響。大氣流動強弱與方向有時變化頗多，難以以一簡單式子表示清楚。大氣流動方向與隧道方向的相對關係大約可分為：大氣靜止、大氣流動方向與隧道內空氣流動方向相同、大氣流動方向與隧道內空氣流動方向相反、以及大氣流動方向與隧道內空氣流動方向相偏等。而事實上福德隧道附近大氣大部分處於靜止或微風狀況，在此我們將僅考慮大氣靜止的情況。

此時臨近隧道入口處的大氣由於隧道內空氣的牽引而以近乎勢流的樣式流入隧道中，然後由出口以雜亂的紊流形式流回到大氣中。依據暫態柏努力方程式，我們可列出隧道入口端的靜壓 P_t 如下：

$$P_t = P_\infty - \frac{1}{2} \rho V^2 - \rho \int_{s_{atm}}^{s_t} \frac{\partial v}{\partial s} ds \quad (10)$$

另外，由於隧道出口端空氣的動能將在流出隧道後經由摩擦而完全轉化成熱能。因此，隧道出口處的靜壓將與大氣壓 P_∞ 相同；亦即 $P_e = P_\infty$ 。此情況下(5)式可寫成

$$F_3 = -\frac{1}{2} \rho V^2 A_t - A_t \rho \int_{s_{atm}}^{s_t} \frac{\partial v}{\partial s} ds \quad (\text{暫態}) \quad (11)$$

上式所含之積分項即是引動入口端隧道外空氣加速進入隧道所須之慣性力。該項積

分值與緊臨隧道入口區域之流場結構有關。計算該積分項時我們可約略將該區流場視為是一個以隧道口為 sink 之勢流場而導出其算式如下：

$$\rho \int_{r_{atm}}^{s_i} \frac{\partial V}{\partial r} dr = \rho \frac{A_t}{\pi} \left(\sqrt{\frac{\pi}{A_t}} - \frac{1}{r_{atm}} \right) \frac{\pi}{2\pi - 2\theta_h} \frac{dV}{dt} \quad (12)$$

其中 r_{atm} ： ∞ 點與隧道口之距離

θ_h ：隧道入口端山坡之仰角

由於行駛於隧道內之車輛數目、速率、和車型皆隨時快速地變動著，其引致風速因而亦出現在平均值上下躍動之特徵，如圖 1 所示。該圖所記載的是於 1997/7/27 針對北二高福德隧道南下孔道內氣流進行監測所得之暫態引致風速的實際情形。建立可準確模擬計算該暫態風速之理論模式可說是我們建立一整套公路隧道通風模式的首要工作。而此項工作乃以(1)式為基礎。(1)式所代表的是一暫態動量方程式，其所包含之係數與變數頗多。因著各係數角色的不同，有的係數對風速之暫態變動量有影響，但有的卻只會對其平均值有影響，而且各係數之影響效應大小亦有所不同。理論模式是否可成功模擬隧道內之暫態風速則端看各係數值以及各項車流數據之量測是否準確。由此，我們可說建構某隧道理論通風模式的主要工作即在於依據一些可用的輔助資料或方法(例如：文獻資料、隧道實測數據、隧道模型實驗數據、或隧道細部流場計算)以釐訂這些係數之適當值。(1)式或(2)式所包含之各係數(f 、 C_d 、 C_d 、 C_d 、 C_d 、 K_{port} 、 K_j)與變數(N_{v_s} 、 N_{v_f} 、 U_s 、 U_t 、 A_{v_s} 、 A_{v_f} 、 n_F 、 V_F 、 A_{pts})對風速之影響效應有所不同。若我們在尋求這些係數的數值之前能先探求各係數與變數的可能相對重要性，將有助於我們掌握實測以及係數釐訂工作的重點與要領。

三、參考文獻

1. Costeris, Nico, 1991, "Impulse Fans," 7th International Symposium on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnel (ISAVVT7), pp.827-846
2. Ishida, M., Mori, T., Nishimori, S. and Fukuhara,M., 1995, "Optimal Computer Control of Kakuto Road Tunnel Ventilation System,"
3. Mizuno, Akisato,1991, "An Optimal Control with Disturbance Estimation for the Emergency Ventilation of a Longitudinally Ventilated Road Tunnel", Flucombe'91,Book No.100315-1991
4. Mizuno, A. and Ichikawa, A.,1991, "Possibility of controlling Longitudinal Air Flow Velocity in Emergency for a Transversely Ventilated Tunnel," Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, pp.349-364
5. Mizuno, A. and Ichikawa, A.,1992, "Controllability of Longitudinal Air Flow in Transversely Ventilated Tunnels with Multiple Ventilation Divisions," Safty in Road & Rail Tunnel Conference, Basel, Switzerland
6. Mizuno,A., Sasamoto,T. and Aoki,I., 1991, "The Emergency Control of Ventilation for the Trans-Tokyo Bay Tunnel," Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, pp.365-384
7. PIARC Committee on Road Tunnels,1995,"Technical Committee Report on Road Tunnels, " Permanent International Association of Road Congress (PIARC), XXth World Road Congress, Montreal.
8. Potter, M. C. and Wiggert, D.C., 1991, " Mechanics of Fluids", Prentice Hall.
9. 陳發林，張鴻明，高勝清，1997a，「隧道通風實測與理論分析之比較研究，附冊：公路隧道通風技術手冊」，交通部台灣區國道新建工程局，研究報告 096-2。
10. 陳發林，張鴻明，1997b，「隧道通風實測與理論分析之比較研究」，交通部台灣區國道新建工程局，研究報告 096-1。