

行政院國家科學委員會專題研究計畫 期中進度報告

(子計畫七)：雪山隧道通風系統三維火災煙流場數值模式建構(1/3)

計畫類別：整合型計畫

計畫編號：NSC94-2745-M-034-007-URD

執行期間：94年08月01日至95年07月31日

執行單位：中國文化大學機械工程學系

計畫主持人：張鴻明

計畫參與人員：何偉誌,李秀娟,張立中,徐士行

報告類型：精簡報告

報告附件：出席國際會議研究心得報告及發表論文

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 95 年 5 月 30 日

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫 成果報告
 期中進度報告

結合高效能電腦與遙測建置研究型環境監測預報整合系統-(子計畫

七)：雪山隧道通風系統三維火災煙流場數值模式建構(1/3)

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC 94-2745-M-034-007-URD

執行期間：2005年8月1日至2006年7月31日

計畫主持人：張鴻明

共同主持人：

計畫參與人員：何偉誌(中國文化大學材料科學與奈米科技研究所)
李秀娟(台灣大學應用力學研究所)
張立中(中國文化大學材料科學與奈米科技研究所)
徐士行(中國文化大學機械工程學系)

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)： 精簡報告 完整報告

本成果報告包括以下應繳交之附件：

- 赴國外出差或研習心得報告一份
- 赴大陸地區出差或研習心得報告一份
- 出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份
- 國際合作研究計畫國外研究報告書一份

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究計畫、
列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢

涉及專利或其他智慧財產權， 一年 二年後可公開查詢

執行單位：中國文化大學

中華民國 95 年 5 月 30 日

摘要

本年度本子計畫研究完成了以數部個人電腦串接和分散式平行運算設定，以支應目前研究所需能量。今年研究以通風中繼站和通風站模式之氣流分析為對象，主要探討軸流風機機房消音器和豎井導流翼力學影響效應為主。相關模式已完成網格化，計算案例已不斷增加，從中將可歸納出更準確之空氣磨擦阻力關係式，和研發消音器和豎井導流翼之簡易力學等效數值模式，作為建構雪山隧道通風全系統之三維動態氣流與火災煙流場數值模式之備用方案。未來全系統數值模式將以隧道管理單位平常對系統氣流場之實際監測數據來進行基本驗證，亦將作為往後從事一系列與該隧道通風衛生、安全、防災、和救災相關課題研究的基礎。所得計算結果若能透過虛擬實境系統展示，則在隧道防災與救災教育上必可發揮很大效益。

關鍵詞: 雪山隧道、通風、火災煙流、數值模擬。

Abstract

Currently, a small-scale grid computing system has been set up in laboratory to provide the need of distributed parallel computation for sophisticated cases. Effort has been focused on implanting the guide vanes and dampers in the numerical models of air-interchange stations and ventilation stations. The aerodynamic effects of these complicated mechanical devices are going to be summarized based on results of various simulation cases. The simplified equivalent models of these devices are going to be created and serve as alternatives for the model of entire ventilation system. The numerical flow model will firstly be validated with the collected data under daily traffic conditions, and it may ultimately provide important data for future concerns such as tunnel sanitation, tunnel safety, smoke extraction, and rescue procedures. If the numerical results may be represented graphically in the virtual reality system, it will provide a tangible understanding for different fire situations.

Keywords: Hsuehshan Tunnel, Ventilation, Smoke flow, Numerical simulation.

前言

雪山隧道經歷十多年艱辛開挖終於貫通。該隧道系統東西長達 12.9 公里乃世界少數特長隧道之一，其西端緊臨 400 萬居民的大台北地區，而東端連接怡人景色，尖峰時刻之交通量將相當可觀。可以想見，雪山隧道完工通車後，在各種可能狀況下，其通風應變能力將是另一項考驗。公路隧道內通風災害主要來自汽車廢氣、煙塵、化學毒氣洩漏、以及火災濃煙。其中汽車廢氣中的二氧化氮(NO_2)和碳氫化合物可能瞬間誘發某些用路人氣喘病[1]，而用路人若長期吸入廢氣中的 C_6H_6 , C_4H_6 , C_2H_4 , 和 C_3H_6 等碳氫化合物，則可能誘發基因疾病[2]。隧道內煙塵濃度則與能見度息息相關，影響行車安全甚鉅。然而對用路人威脅最大的莫過於化學毒氣和火災濃煙。隧道通風系統的兩大任務即是(1)平時在於降低廢氣與煙塵濃度以維持良好空氣品質和良好視線。(2)火災與化學氣體洩漏時則主要在於抑制、導引、和排除濃煙或化學氣體。

一般而言，由於隧道將多變的天氣狀況(例如:濃霧、大雨、結冰、和刺眼陽光)屏除在外，而且隧道內之速限較低(一般約 80km/h)，車輛駕駛警覺性較高。因而在隧道內發生意外事故的機率大體而言，遠低於隧道外者。即便如此，據統計自 1990 年到 1999 年間，在德國最繁忙的公路隧道(Elbe Tunnel)內，平均每個月就發生一次火災[3]。目前台灣交通建設仍不斷進行，這在多山和環保意識抬頭的今天，為免干擾生態，隧道數目難免逐期成長，長隧道也會漸多。未來中橫和南橫快速道路中更不乏長隧道的建造，屆時 1033km 國道上之隧道總長將達 172.8km 佔 16.73%。可想見在未來隧道將與我們日常生活更加密切。而隨著高科技與工業的發展，有毒易燃化學物質的載運也愈頻繁。長隧道又比較會成為被恐怖攻擊的目標。隧道內一但發生火災，即使是小火災也可能產生足夠傷害用路人的濃煙量。通常濃煙會在很短時間即充滿整個隧道斷面使能見度降至 1m 以下[3]。再加上起火現場可及性低，濃煙量大，熱輻射強，隧道火災的救援與滅火工作的困難度其實蠻高。因而，新隧道系統之設計與運轉主要的安全考量問題即是隧道火災。

至今雪山隧道是環島高速公路網建設中的一項最艱鉅工程。其通風系統是由專業公司設計，是世界第一座採用分離雙孔隧道分段換氣之縱流式通風設計，其功能自有一定可靠度，惟由於該通風系統採新設計，在實際運作經驗上，尚無前例可參考[4]。而一般新型機具於實際運作後，潛藏問題通常會陸續浮現。雪山隧道通風系統恐怕很難例外。由於隧道安全與眾多國人息息相關，我們自己要對其通風系統維持平時良好空氣品質的能力以及在火災發生時該通風系統控制煙流和輔助救援工作的能耐有深入認識。

本子計畫將以三年為期逐步建構雪山隧道全系統三維空間數位模型以便進行該系統三維動態氣流場與火災煙流之研究，屬於總計畫之環境與安全分系統內，此分系統各子計畫共同就環境安全相關的數個議題進行研究。對此龐大系統內之三維動態氣流與火災煙流場進行數值模擬的最大限制是電腦系統的效能。本校即將建置完成高效能電腦並逐年發展網格計算系統擴增其效能，以帶動本校一系列相關研究。屆時本子計畫之研究，將可逐步建

構雪山隧道通風全系統之三維動態氣流與火災煙流場數值模式。本子計畫與全尺度大氣監測與預測分系統中的三個子計畫所用學理與方法相似性大，各別研究經驗可以互相交流或引用。而若能雪山隧道附近山脈地形之數位模型，再配合附近大氣環流資料，我們則又可分析隧道平常廢氣排放與火災濃煙排放後在附近環境中的飄散情形。所有子計畫之研究成果皆將對營造安全生活環境有所貢獻。

研究目的

雪山隧道通車後，將面臨通風、防火、及防災問題的考驗。其通風系統管道網之氣流形態與通風能耐受噴流風機推力、軸流風機推力、消音器和導流翼構造、及防煙門啟閉所影響，決定著系統對不同狀況之應變能力。其中，改進空氣品質的系統操作模式可待系統通車後以現場實測而得，但是由於雪山隧道乃以全新系統，不可能在其中進行全尺度火災實驗與實測。要了解雪山隧道通風系統因應火災煙流的能耐，數值模擬應是首選。

建構雪山隧道全系統三維空間數位模型以便進行該系統三維動態氣流場與火災煙流之研究乃本計畫之最終目標。由於現場無法進行各式火災實驗，以至於火災發生時，現有預擬之風機操控模式，事實上所能發揮的效果無法以實驗驗證，此時三維數值模擬顯的特別重要，而且似乎是唯一可通的辦法。另外，由於所模擬火災的情境很難表達，我們將試著把模擬的結果結合虛擬實境技術以便提供用路人最好的隧道安全教育素材。

文獻探討

國內外學術界與業界一直就持續有不少隧道通風或火災煙流研究。其中有關通風與火災煙流的研究概況如下：在方法上有縮小尺寸模型實驗[5, 6]和數值模式分析[7, 8, 9]，在主題上則有探討紊流模式效應[10, 11]、各樣因素(例如：主孔道斷面形狀、斷面大小、坡度、火源發熱率等)對隧道內臨界風速(critical velocity)的影響效應[6]。另外，也有以模型實驗探討排煙問題[12]。惟見諸文獻者皆著重基本理論與現象的研究，這些研究之流場空間範圍不大，皆以火源附近局部區域為主，且隧道型式以單孔方形斷面者為主，未見有針對整體通風系統進行研究者。就雪山隧道通風系統而言，除了 Berner, Day, 和 Turi 等人[4, 13, 14]曾於 1991-1994 年發表其設計概念與理論外，國外針對該隧道的研究幾乎沒有或未見諸文獻。相關研究皆屬國人所為，已發表的有與開挖技術相關，特別是湧水問題的研究，也有與其通風諸問題相關的研究，惟這類成果皆屬先期探尋性研究[15, 16]。文獻[15]之研究主要著重在以一維模式為基礎，用以探討系統中各段管道之通風或溫度分佈狀況，其中各段管道內氣流並不相連動，各管道進氣口流量乃依設計值給定。文獻[16]的研究則主要探討建立可模擬該隧道各通風管道相連通情況下的一維模式的方法，其所建構的模式在定性上可以描述各管道內氣流的連動關係，證明了其建構方法在技術上的可行性。惟其模式中所引用之各通風管道間之匯流與分流區之各個損耗係數乃暫時採用一般機械流體管路者。但事實上由於雪山隧道通風管道之構造有其獨特性。其間各項損耗係數必然與普通流體管路者有所不同。文獻[17, 18, 19, 20]曾以套裝計算流體力軟體對雪山隧道各式管道匯流區流場、通

風中繼站、氣交換站等局部系統進行流場之模擬分析。研究中以數值模式探討在這些局部系統中風機作動模式對其間氣流型態的影響效應，並由結果歸納各個匯流與分流區之損耗係數通式，以作為建立雪山隧道之一維通風模式之用。此一作法至今對穩態流場尚屬恰當，但對風機切換作動模式間之氣流形態的動態變化則尚不成熟。此部分流場動態行為的正確顯現有賴我們建構其全系統三維動態數值模式來達成，以提高分析結果之可靠度。

研究方法

探討隧道氣流動態特性的最根本方法是現場實測，亦即預先規劃各式風機作動模式，等系統完工後一一進行測試、和數據之擷取、分析、與歸納。測試工作效率取決於事前的規劃工作，而規劃工作的評估則可借助於數值模擬來進行。另外，在較大規模火源下，火源對氣流型態會有不可忽視的影響效應。此時，光靠系統對平時一般狀況的測試資料是不夠的。最好能對系統在各式火災狀況下進行實驗測試，但實際上不可行。若以縮小模型實驗為之則存在著經費、模型與原型內流場之動力相似性、和實驗場地難覓(雪山隧道拱頂高約 6.5m，長約 12900m 相當細長，即使縮小成 1/10，此模型也仍有 1.29 公里)等等顧慮。

由以上分析可知，想要深入了解雪山隧道整體通風系統因應各式火災的能耐，數值模擬方法應是首選。此法可以讓我們依理推算估計。當然，以數值方法分析雪山隧道整體通風系統之氣流場亦非毫無限制，其中最大的顧慮是電腦系統的效能。本校高效能電腦系統即將建置完成以帶動本校一系列相關研究。本計畫以建構雪山隧道整體通風系統之三維動態氣流場為目標。讓國人擁有此一隧道通風系統之數值模式以作為往後一系列衛生、安全、防災、及救災相關問題的研究基礎。

建構雪山隧道全系統三維空間數位模型以便進行該系統三維動態氣流場與火災煙流之研究乃本計畫之最終目標。過程中我們由通風中繼站和通風站等主要次系統之數位模型建構與其氣流場分析為基礎，讓我們更加了解這些次系統之空氣動力特性和機械通風能耐，並探討設置其中之消音器與導流翼的力學特性。並歸納摩擦損耗係數廣泛關係式以做為發展建構全系統之一維通風模式，讓我們可以很方便分析整體系統中之氣流和煙流大體行為。然而，當火災發生其中時，由於此時火災現場附近特別危險，且其流場結構則屬三維動態類型，並受全系統各處通風機具與車行運動所牽動。由於全系統相當龐大，火災突然發生時各處機具、人員、車輛的的行動皆會影響煙流，該如何因應多變狀況以操控系統提供火源附近正確之風速與風向，實屬不易。這些又無法經由實驗實測而得。因此，透過三維流場模式之建構才能對發生在不同地方各類火災的行為加以大量探討分析，或檢視現有各套救災策略與風機操控模式所可能產生的情境。其中，火災情境分析之結果將藉虛擬實境系統來展示，讓無法實驗的雪山隧道火災煙流場情境能生動展現，作為大眾和隧道管理人員教育訓練之用。

龐大隧道系統火災煙流場狀況充滿變化，其全面分析則要三維數值模式。建構其數值模式主要工作有兩件:建構通風管道系統內部空間之數位模型和擬定煙流場之數理模式。概述如下:

1. 建構通風管道系統內部空間之數位模型

通風管道系統內部空間之數位模型將依設計圖建構。所建構之數位模型將包含車行主孔道斷面、中繼站或通風站的擴挖孔道斷面、各通風管道斷面與管道接合方式、軸流風機機房消音器和導流翼之形狀、尺寸、間隔、與角度等主要形狀特徵與尺寸。而各軸流與噴流風機推力則擬以將各風機所在空間設定成“動量源”的方式近似之。

2. 擬定煙流場之數理模式。

隧道內氣流與煙流行為儘管因狀況而有不同，然其卻都互古不變地遵循著某些物理定律。因此，只要依循這些相關的物理定律，我們大體可以估算或模擬預測在各種火災狀況下之煙流發展情形。由於隧道空間尺寸頗大，其中氣流大多屬於紊流。此時熱質傳相關定律即可概略將火災煙流之發展情形勾勒出來。在本計畫的研究中，流場之紊流傳播特性擬以紊流模式(例如 $k-\varepsilon$ 紊流模式)來計算，其三維暫態流場之數值模式將由 8 個統禦方程式構成，其分別要求煙流場除了必須遵守質量守恆外、煙濃度(以 CO_2 代表)、三個速度分量、熱能、紊性動能 k 、與紊性動能消散率 ε 等物理量的消長與傳播亦皆有其各別遵守之特定法則。這 8 個統禦方程式可歸納成下列通式：

$$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} \phi) = \nabla \cdot (\Gamma \nabla \phi) + S_{\phi} \quad (1)$$

其中等號左邊第 1 項代表物理量 ϕ (每單位空氣質量所具有之質量、煙濃度、動量之三個分量、熱能、紊性動能 k 、與紊性動能消散率 ε) 在流場中某處隨時間之增長率，左邊第二項所代表的是物理量 ϕ 之移流通量梯度，等號右邊第 1 項所代表的是 ϕ 之擴散通量梯度，末項則是該物理量 ϕ 於每單位體積空間中之淨生成率。此方程式代表在動態煙流流場中，某物理量 ϕ 在任何地方每單位體積中的生成率加上在該處經由擴散與移流之淨傳入率應等於該物理量 ϕ 在當處每單位體積內的增加率。簡言之，各物理量皆得遵守守恆定律。有了這些統禦方程式後，我們尚須以邊界條件來定義隧道空間形狀與範圍、設定通風系統各出入口流環境空氣之溫度與壓力(豎井頂端大氣之溫度與氣壓一般應比車行主孔道兩端環境者低)、噴流風機之啟閉狀況和推力大小、火源位置、火源強度、與火源持續時間等等。而對於動態情況發展過程的模擬則尚須給與該流場明確之起始狀況。如此即構成簡易之火災煙流場數值模式。該模式之求解，則擬經由目前發展得相當成熟且普遍的流場模擬套裝軟體(CFX)來完成，該軟體所引用的方程式解法為有限體積法(finite volume method)。

雪山隧道通風系統相當龐大。即使在不包含逃生孔道的情形下，其空間數位模型的完整建構已將相當耗時，過程中也會有技術難題需要克服(例如：蒐集補充通風系統各處正確形狀與尺寸、設定與調整出恰當的網格分佈、蒐集通風機具設備規格，蒐集機具運轉條件、與隧道車流狀況等等)。因此，在本計畫之研究過程中，其數位空間模型的完整性將分階段逐步增加，主要分成隧道通風系統主體空間架構模型與通風管道關鍵性機械組件(消音器和導流翼)細部模型的建構。消音器和導流翼除會了以實體尺寸建構外，亦將嘗試探討以簡化力學等效數值模式取代的可能性，以減少整體流場數值模式對電腦系統計算能量的需求。所建構之數值模式將逐步用以探討一系列氣流調節與控制相關之問題並先與實測數據比較驗證，然後才用以針對一些火災煙流假設情況進行數值分析，以了解煙流之發展情形和探討風機和導流翼作動模式的影響效應。今年主要工作為雪山隧道軸流風機機房消音器與豎井導流翼之效應與簡化模式探討，詳述如下：

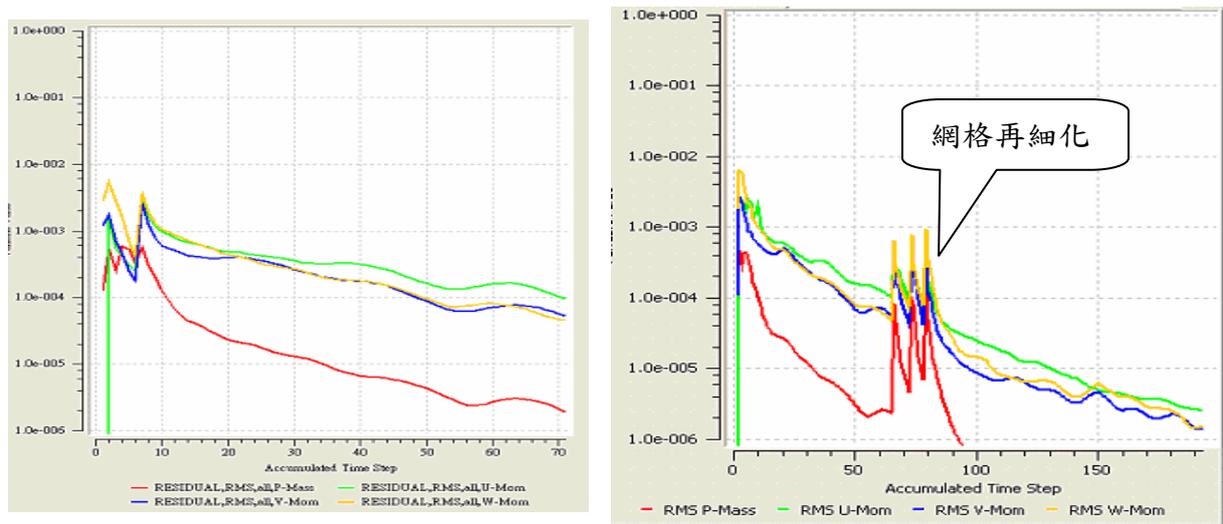
雪山隧道通風系統重要特徵尺寸介於 13 公里(隧道長度)到數公分(導流翼厚度)。文獻[19]研究顯示，以個人電腦系統為基礎的研究所建構之通風中繼站和氣交換站等局部系統數位模式的經驗顯示，這些局部系統之空間數位模型可以包含車行主孔道斷面、中繼站或通風站之擴挖段、機房內部、各通風管道斷面、和車行主孔道-機房、機房-通風管道、通風管道-豎井、及通風管道-車行主孔道間接合處之較小幾何特徵和尺寸，讓氣流因形狀與形狀變化所產生的磨擦損耗能夠被計算在內。惟礙於個人電腦極限，一直未能將那對氣流行為具有關鍵影響力的軸流風機機房消音器和導流翼納入數值模式之中。雪山隧道整體通風系統之三維流場數值模式建構工作的成敗與是否可以將 6 組導流翼和 12 組消音器納入其中很有關係。

因此，本子計畫第一年首要工作在於將導流翼納入通風中繼站和通風站等局部系統數位模式之中。由比較包含與不包含消音器和導流翼的通風中繼站和通風站等局部系統數值模式計算所得氣流型態的不同來了解這些消音器和導流翼在此系統中的空氣動力特性。另外，可以想見的是，於模式中納入這些消音器和導流翼，流場數值模式中的有限體積元素數量將擴增不少，這對小範圍的局部系統或許還可接受。但於總長約 30 公里(兩車行主孔道、六支豎井、及通風管道)之整體系統模式內要納入這些小而複雜的裝置，對電腦系統是蠻高的挑戰。是以在很高期盼之外，本子計畫必須另備一些取代方案。由於消音器和導流翼之空氣動力特性不外乎對來流施加正向阻力與側向推力來讓氣流產生偏轉。此兩效應除了可以於數值模式中藉這些裝置幾何條件的設定來產生，我們尚可嘗試捨棄這些裝置幾何尺寸設定而將其所在區域以均勻分佈之動量源來取代，如此將可大大減少流場數值模式中的有限體積元素數量。至於動量源之適當大小與方向則因情況而異，我們必須使用這兩種模式分別對可能情況進行仔細計算比較分析。這些分析工作將以通風中繼站和通風站等局部系統數位模式為對象，在小型網格運算系統(Grid computing system)上進行。由結果分析比較流場網格密度分佈差異與歸納消音器和導流翼之等效動量源強度與方向。則當進一步建構雪山隧道整體通風系統模式時，在消音器和導流翼的建構上，我們將有另一簡化等效模式可資選擇，大大提高本子計畫達成最後目標的可能性。

此外，重點工作亦將包含依據含有消音器和導流翼的通風中繼站和通風站等局部系統穩態流場數值模式計算所得結果歸納出各管道氣流匯流與分流之磨擦損耗係數廣泛關係式。以此一新的磨擦損耗係數廣泛關係式取代全系統氣流一維模式中的舊廣泛關係式，使一維模式新增消音器和導流翼效應。

結果與討論

本年度本計畫在硬體上已完成個人電腦分散式平行計算系統之架設，提升運算能力，使得計算案例之網格得以再細化(圖 1)，提升計算精確度。在模式上則完成於通風中繼站機房入口加入消音器之數位幾何模型和於通風站兩豎井下方與通風管相接處設從重瓣圓弧型導流翼之數位幾何模型，並完成網格化。目前次系統的流場案例皆已進入分散式平行運算階段。現有計算系統可以應付分析這些流場所需。而本校高效能電腦系統即將建置完成，未來雪山隧道全系統流場之數值模式即可在新系統上進行建構與分析。



(a)受限於單一個人電腦運算能量，網格無法細化 (b) 多部個人電腦串接可突破運算瓶頸

圖 1: 單一電腦與多部電腦串接平行運算效能比較

本年度分散式平行計算系統之架設完成，使通風中繼站之分析案例可以包含機房入口消音器阻力效應，也使通風站之分析案例可以包含導流翼等複雜小機件之效應。茲簡述如下：

1. 通風中繼站消音器阻力效應

為了降低風機噪音對用路人的干擾，軸流風機機房入口設有消音器(圖 2)，這些消音器應會增加氣流阻力，降低系統通風能力。研究將先後分別分析未設消音器和設有消音器之氣流場，從結果比較中顯明消音器之阻力效應。

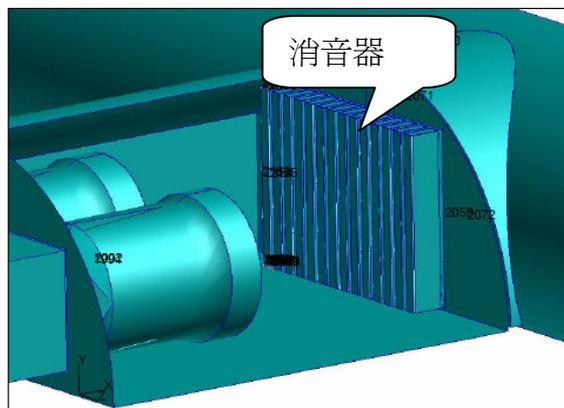


圖 2: 設於軸流風機機房入口之消音器

通風中繼站軸流風機機房入口若未設消音器，其特徵斷面間之磨擦損耗係數廣泛關係式如下：

$$K_{3-15} = 9.1617 \left(\frac{Q_{15}}{Q_3} \right)^2 - 1.7091 \left(\frac{Q_{15}}{Q_3} \right) + 0.8588 \quad (2)$$

$$K_{3-4} = 0.3007 \left(\frac{Q_{15}}{Q_3} \right)^2 - 0.3764 \left(\frac{Q_{15}}{Q_3} \right) + 0.1409 \quad (3)$$

$$K_{4-6} = -2.9765 \left(\frac{Q_5}{Q_6} \right)^2 - 0.182 \left(\frac{Q_5}{Q_6} \right) + 0.2818 \quad (4)$$

$$K_{5-6} = 5.4709 \left(\frac{Q_5}{Q_6} \right)^2 + 1.7227 \left(\frac{Q_5}{Q_6} \right) - 0.7145 \quad (5)$$

其中 K 之下標兩數字代表該磨擦損耗係數乃圖 3 上數字所示斷面間之磨擦損耗係數， Q_i 代表 i 斷面之氣流量。

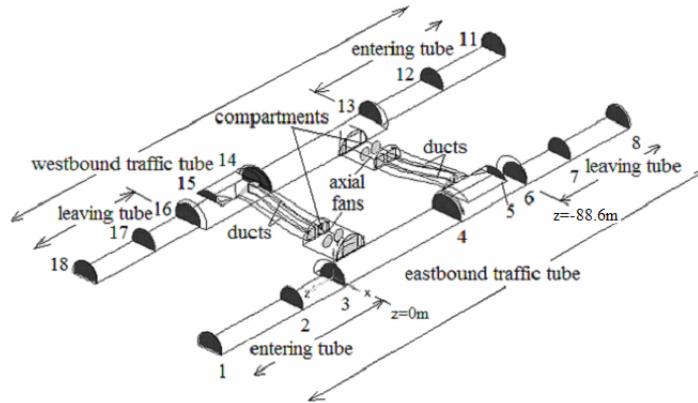


圖 3: 通風中繼站之特徵斷面

當通風中繼站兩軸流風機機房入口中，其中一個設有消音器另一個不設消音器，在邊界條件相同和風機推力相同下，此時其流線如下圖所示：

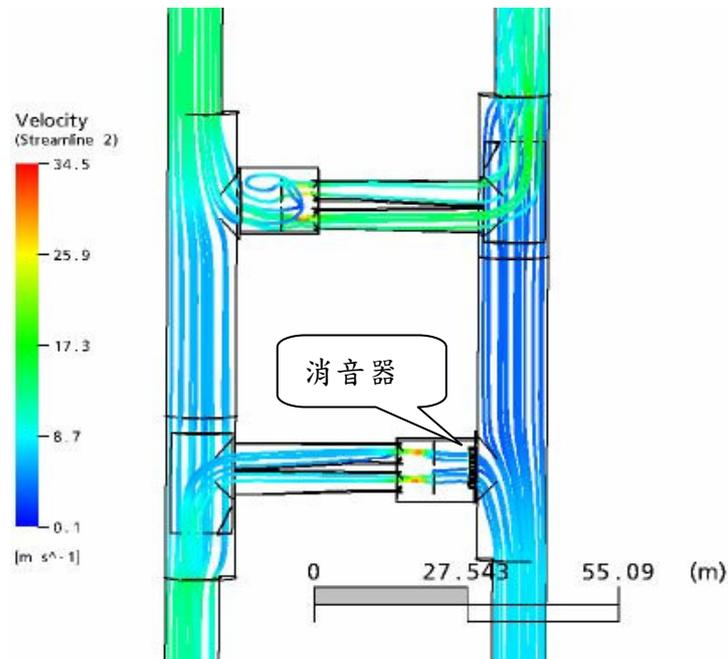


圖 4: 消音器對氣流形態與通風量的影響效應

上圖顯示機房入口未設消音器時，氣流進入機房兩風機的情況有很大的不同，流速流量也不同。於入口設有消音器的機房，流線將從車行孔道以幾乎轉直角方式，平行直接流入風機之中，氣流在機房內較平順不打轉，此時兩風機的吸入量比較接近。比較設消音器與沒設消音器之氣流互換量可知，未設消音器之氣交換量比較大，這足以顯示消音器對氣流的阻力是相當顯著的。如果我們在模擬時設定風機升壓值分別為 0Pa、50 Pa、250Pa、450Pa、650 Pa、及 900Pa，此時由這些案例所歸納得到的摩擦損耗係數 K_{3-15} 如下圖所示，比較可知設有消音器之該摩擦損耗係數比未設消音器者大很多。

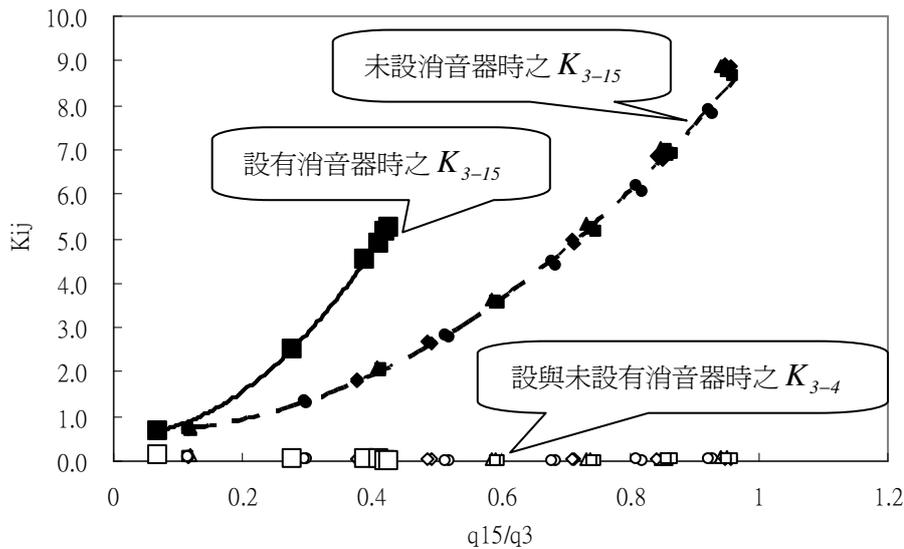


圖 5: 消音器對摩擦阻力係數 K_{3-15} 的影響效應

由此可見，要正確估算雪山隧道通風能耐，數值模式中必須考慮消音器的摩擦阻力，只是增加一組消音器的設置，必須增加大約 280 萬個元素，這增加了對電腦計算效能與容量的規格需求。因此，必須仰賴高效能電腦系統，或是研發消音器之力學等效模式，以簡化該處之數位模型。此即為下階段工作重點，以期最終能夠完成雪山隧道三維流場數值模式之建立。

1. 通風站導流翼效應

通風站由於包含進氣和排氣豎井而且其通風管道比通風中繼站者複雜，此複雜站體氣流場域網格化後的數量亦遠比通風中繼站者要大，這在個人電腦上模擬是一項挑戰。因此，研究之初並未考慮消音器和導流翼的設置，僅在排氣豎井下方設立直立平板型導流翼以免對向而來的兩股氣流相互撞擊，並可導引氣流向上進入排氣豎井。即便是如此簡單之數位模型其場域網格化之後的元素數量已達 400 萬，以個人電腦執行計算時都已近極限。本年度經以數部個人電腦串接完成分散式平行運算系統，方便相關算例得以順利進行。由多種任意邊界條件與風機推力之流場案例計算所歸納而得各分歧流與匯合流之摩擦損耗係數的廣泛關係式如下：

$$K_{1-2} = 0.8462 \left(\frac{Q_2}{Q_1} \right)^2 - 0.8829 \left(\frac{Q_2}{Q_1} \right) + 0.6295 \quad (6)$$

$$K_{1-3} = 0.3053 \left(\frac{Q_2}{Q_1} \right)^2 - 0.4102 \left(\frac{Q_2}{Q_1} \right) + 0.1493 \quad (7)$$

$$K_{8-5} \approx 0.65 \quad (8)$$

$$K_{8-12} \approx 0.65 \quad (9)$$

$$K_{10-6} = 0.6137 \left(\frac{Q_{11}}{Q_{10}} \right)^2 - 0.6443 \left(\frac{Q_{11}}{Q_{10}} \right) + 0.3975 \quad (10)$$

$$K_{10-11} = 0.5687 \left(\frac{Q_{11}}{Q_{10}} \right)^2 - 0.7635 \left(\frac{Q_{11}}{Q_{10}} \right) + 0.7882 \quad (11)$$

$$K_{2-7} = 32.258 \left(\frac{Q_2}{Q_7} \right)^2 - 28.292 \left(\frac{Q_2}{Q_7} \right) + 6.8407 \quad (12)$$

$$K_{11-7} = 39.771 \left(\frac{Q_2}{Q_7} \right)^2 - 33.937 \left(\frac{Q_2}{Q_7} \right) + 7.788 \quad (13)$$

$$K_{6-9} = -1.7414 \left(\frac{Q_5}{Q_9} \right)^2 - 0.5782 \left(\frac{Q_5}{Q_9} \right) + 0.3735 \quad (14)$$

$$K_{5-9} = 4.7696 \left(\frac{Q_5}{Q_9} \right)^2 + 2.0459 \left(\frac{Q_5}{Q_9} \right) - 0.5481 \quad (15)$$

$$K_{3-4} = -1.1202 \left(\frac{Q_{12}}{Q_4} \right)^2 - 1.0485 \left(\frac{Q_{12}}{Q_4} \right) + 0.4844 \quad (16)$$

$$K_{12-4} = 4.0134 \left(\frac{Q_{12}}{Q_4} \right)^2 + 2.3131 \left(\frac{Q_{12}}{Q_4} \right) - 0.633 \quad (17)$$

其中 K 之下標兩數字代表該磨擦損耗係數乃圖 6 上數字所示斷面間之磨擦損耗係數，

Q_i 代表 i 斷面之氣流量。

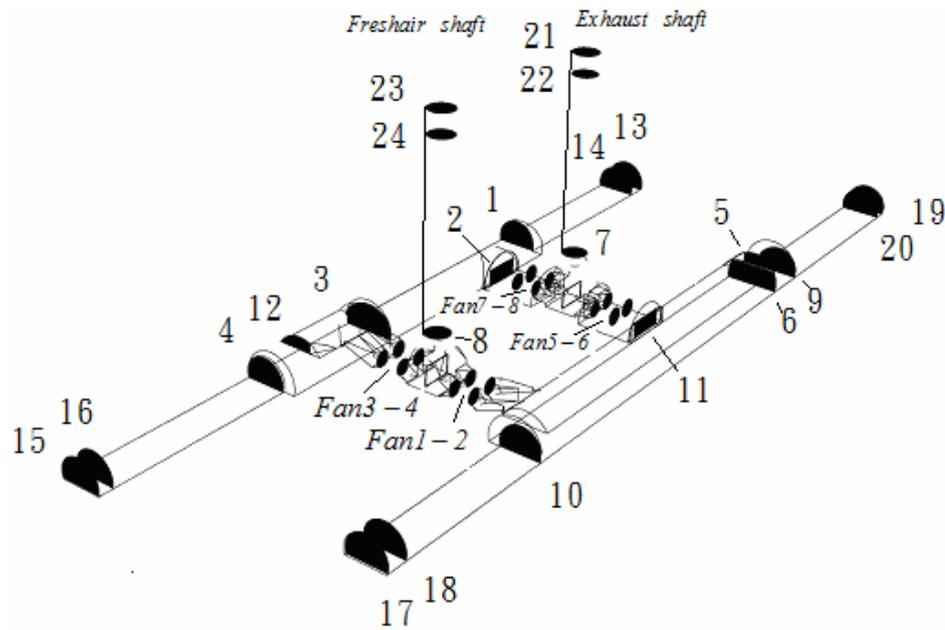


圖 6: 通風站之特徵斷面

為探討導流翼的效用，於是我們將軸流風機與排氣與進氣豎井間轉接處皆設置重瓣式圓弧形導流翼（如圖 7 所示），以便進行流場分析。這些複雜導流翼的設置使流場場域變得較複雜，網格化之後約多增加 90 萬元素。以此模式再度對不同的換氣率進行計算分析，結果發現進氣豎井下方設直立平板導流翼與重瓣圓弧導流翼在摩擦損耗上並沒有太大的差別，如圖 8 摩擦損耗係數 K_{8-5} 和 K_{8-12} 所示。但是在排氣豎井下方設置重瓣圓弧形導流翼對該處氣流摩擦損耗的下降是有些幫助的，如圖 9 摩擦損耗係數 K_{2-7} 和 K_{11-7} 所示。當左右兩邊氣流量比率由 0.5 增加到 0.7 時其摩擦阻力將會急速增加，這個現象在兩型導流翼皆然。這似乎告訴我們，排氣豎井最佳運作情況，應該是當其對東行與西行車行孔道進行等量抽換氣體的狀況。由圖 10(a)(b) 流線的比較則可發現重瓣圓弧形導流翼可以使由風機送過來的氣流相當平順進入豎井，這說明了為什麼摩擦損耗係數可以得到下降的原因。由於重瓣導流翼的設置會額外增加網格數量的需求，下一步我們仍要尋找其力學等效模式以備將來建構全系統模式所需。另外，軸流風機機房入口處亦將嘗試加入消音器，隨著本校高效能電腦的建置此部分的分析會更容易，屆時我們將可完成完整之通風站和通風中繼站等次系統之完整數位模型。

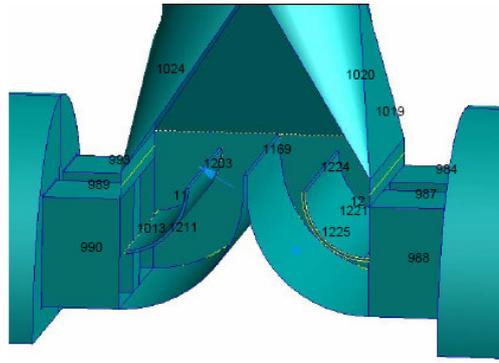


圖 7: 重瓣式圓弧形導流翼

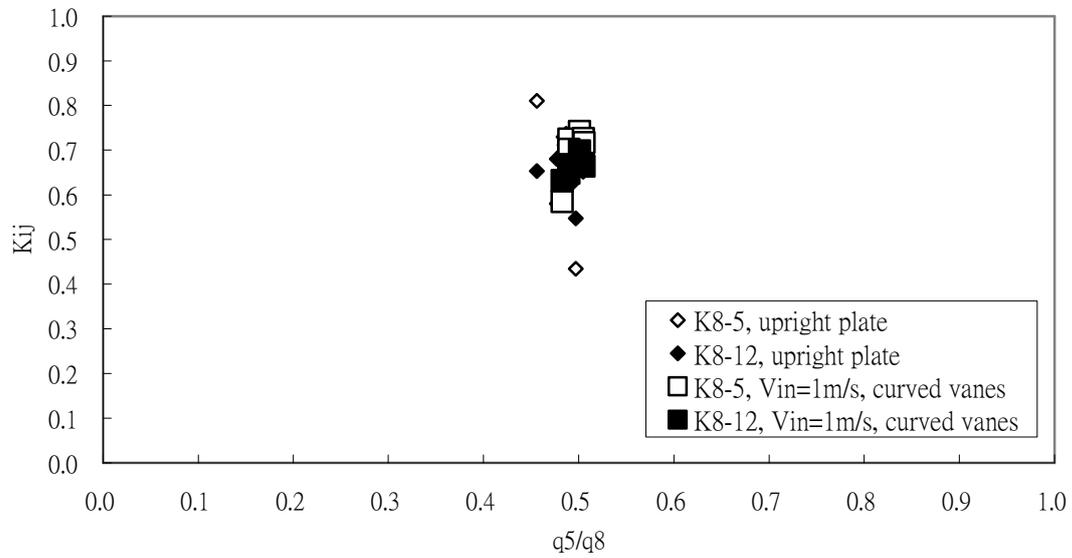


圖 8: 直立平板導流翼與重瓣圓弧導流翼對摩擦損耗係數 K_{8-5} 和 K_{8-12} 的影響效應。

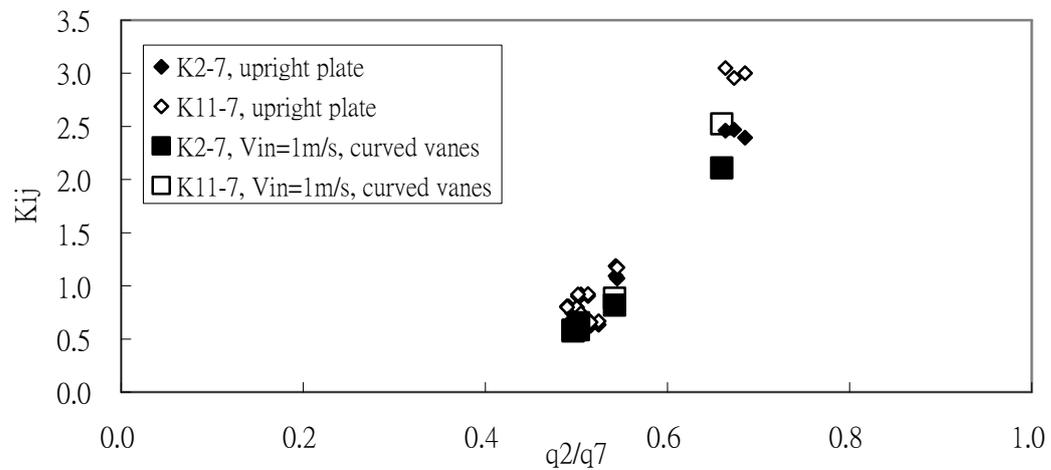


圖 9: 直立平板導流翼與重瓣圓弧導流翼對摩擦損耗係數 K_{2-7} 和 K_{11-7} 的影響效應。

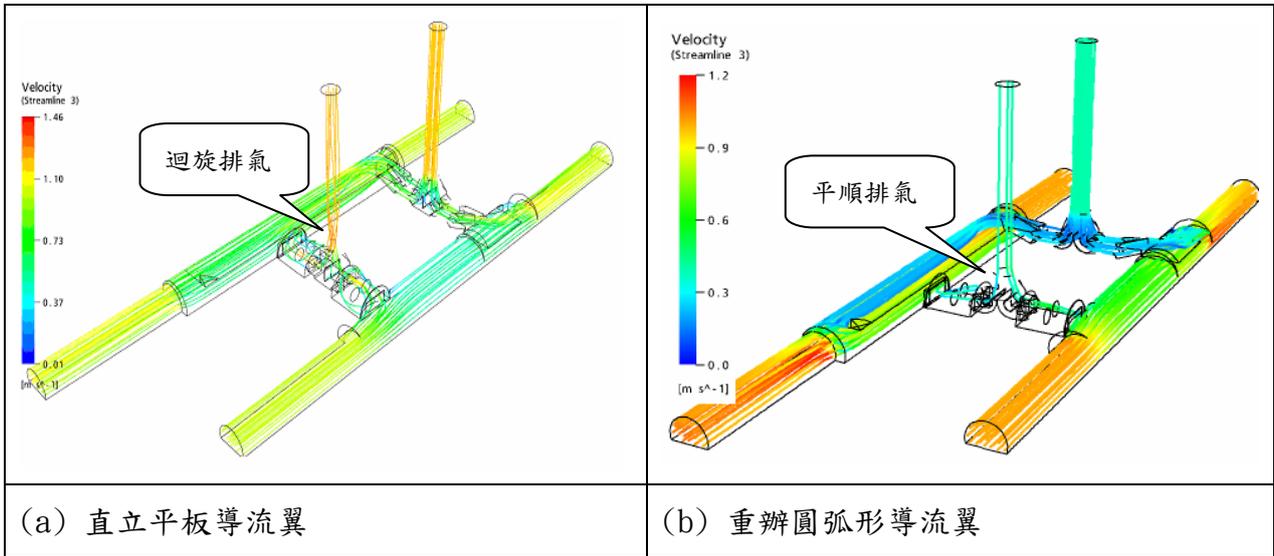


圖 10: 直立平板導流翼與重瓣圓弧形導流翼對排氣氣流形態的影響效應

3. 雪山隧道全系統之一維通風模式

以上述兩工作所得的磨擦損耗係數之廣泛關係式配合車行孔道數理模式完成全系統之一維通風模式之建構。並對東行和西行兩孔道分別在車流稀疏、順暢、堵塞情形下，進行軸流風機與噴流風機不同運作模式對隧道各區段之風速、壓力、廢氣濃度、和溫度之影響效應。例如：在假設所有風機停擺，在稀疏、順暢、和塞車下，東行和西行隧道沿線溫度分佈之預測情形如圖 11 所示。此時由於自然分段換氣量很小，因此兩管隧道內之溫度將呈線性升高。但若開啟軸流風機並改變軸流風機升壓值，使產生不同程度換氣，則各區段溫度可以大大下降，如圖 12 所示。

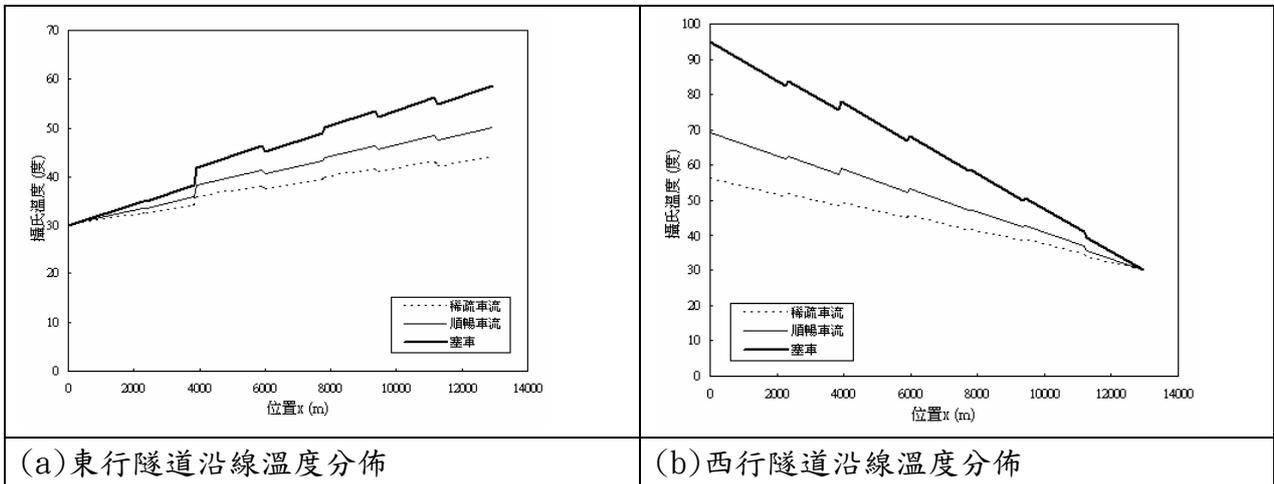
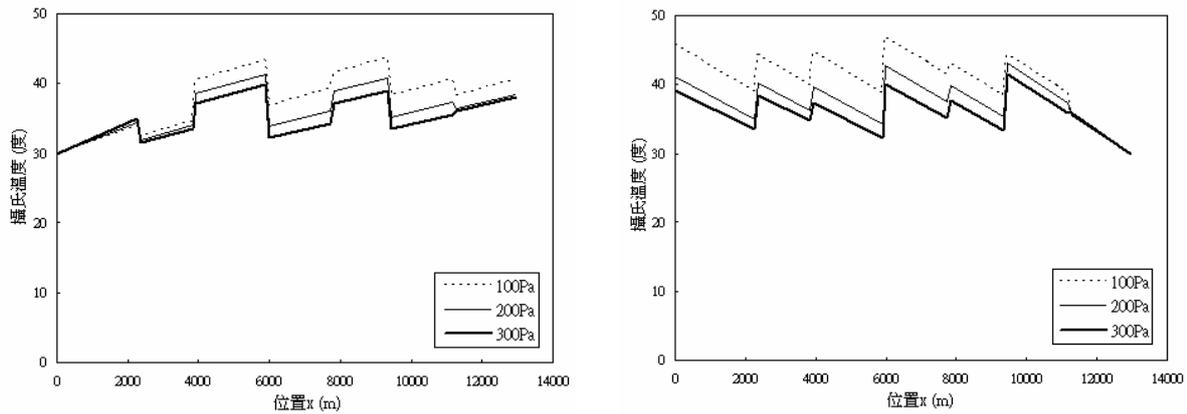


圖 11: 在稀疏、順暢、和塞車下，若未開啟任何風機，東行和西行隧道沿線溫度分佈之預測情形(假設夏季 7、8 月，隧道入口溫度為攝氏 30 度)



(a)東行隧道沿線溫度分佈

(b)西行隧道沿線溫度分佈

圖 12: 東行隧道與西行隧道皆為順暢車流, 未開啟噴流風機下, 改變軸流風機升壓值, 東行和西行隧道沿線溫度分布情形(假設夏季 7、8 月, 隧道入口溫度為攝氏 30 度)

結論與建議

本年度完成工作與所得主要結論如下:

1. 完成架設數部個人電腦分散式平行運算系統, 可以支應目前研究所需能量。
2. 通風中繼站軸流風機機房消音器之幾何數位模型已建構完成, 並已完成網格化。計算案例顯示消音器之風阻相當明顯, 估算系統通風能量時不可忽視。
3. 完成通風站機房入口未設消音器, 但在其兩豎井下方與軸流風機通風管相接處設單一直立式平板導流翼與重瓣圓弧型導流翼兩種數位幾何模型, 並完成網格化工作。計算案例顯示當進氣豎井分流率為 50%附近時, 進氣豎井下方與軸流風機通風管相接處分流磨擦損耗係數約為 0.65, 此值對兩型導流翼皆然。排氣豎井下方與軸流風機通風管相接處合流磨擦損耗係數則會因導流翼而不同, 重瓣圓弧型導流翼之磨擦損耗係數較小。另外, 當分流率偏離 50%時, 磨擦損耗係數值將迅速增加。
4. 流經上述各式氣流場之計算案例正累積中。將依這些案例分析探討軸流風機機房消音器和豎井導流翼力學影響效應。從中將可歸納出更準確之空氣磨擦阻力關係式, 和研發消音器和豎井導流翼之簡易力學等效數值模式, 作為建構雪山隧道通風全系統之三維動態氣流與火災煙流場數值模式之備用方案。

通風站機房入口設有消音器的模型以及通風站與通風中繼站相連的模型乃下階段建模工作, 其氣流場案例將主要在本校高校能電腦系統執行計算。未來數值模式將以隧道管理單位平常對系統氣流場之實際監測數據來進行基本驗證。而火災情境將以虛擬實境系統展示, 以便在隧道防災與救災教育上發揮最大效益。

參考文獻

1. Gunnar Barrefors, 1996, Air pollutants in road tunnels, The Science of the Total Environment, 189/190, pp.431-435.
2. Roberto Bellasio, 1997, Modelling traffic air pollution in road tunnels, Atmospheric

- Environment, Vol. 31, No.10, pp.1539-1551.
3. Ing. Alfred Haack, Current Safety Issues in Traffic Tunnels, European Transport Infrastructure, pp.90-94.
 4. M. A. Berner and J. R. Day, 1991, A new concept for ventilating long twin-tube tunnels, Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, pp. 811-820.
 5. Yasushi Oka & Graham T. Atkinson, 1995, Control of smoke flow in tunnel fires, Fire Safety Journal, 25, 305-322.
 6. Y. Wu, M. Z. A. Bakar, Control of smoke flow in tunnel fires using longitudinal ventilation systems – a study of the critical velocity, Fire Safety Journal, 35(2000), 363-390.
 7. P. J. Woodburn & R. E. Britter, 1996, CFD Simulations of a Tunnel Fire-Part I, Fire Safety Journal 26, pp.35-62.
 8. W. K. Chow, 1998, On Smoke Control for Tunnels by Longitudinal Ventilation, Tunnelling and Underground Space Technology, 13, pp.271-275.
 9. Jojo S. M. Li and W. K. Chow, 2003, Numerical studies on performance evaluation of tunnel ventilation safety systems, Tunnelling and Underground Space Technology, 18, pp.435-452.
 10. F. Liu, J. X. Wen, 2002, The effect of turbulence modeling on the CFD simulation of buoyant diffusion flames, Fire Safety Journal, 37, 125-150.
 11. P. Z. Gao, S. L. Liu, W. K. Chow, N. K. Fong, 2004, Large eddy simulation for studying tunnel smoke ventilation, Tunnelling and Underground Space Technology, 19, pp.577-586.
 12. O. Vauquelin, O. Megret, 2002, Smoke extraction experiments in case of fire in a tunnel, Fire Safety Journal, 37, 525-533.
 13. M. A. Berner and J. R. Day, 1991, Alternative methods for ventilating long road tunnels, Tunnels & Tunnelling, pp. 47-48
 14. M. A. Berner, J. R. Day, and A. Turi, Air interchange ventilation and cooling of the Pinglin Tunnel in Taiwan.
 15. Falin Chen and Hong-Ming Jang, 2000, Temperature Rise in Ping-Lin Tunnel, Journal of the Chinese Society of Mechanical Engineers, Vol.21, No.4, pp.325-340.
 16. 張鴻明, 2000, 「坪林隧道通風系統模擬與分析(I)」, 行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告, 計畫編號: NSC 89-2212-E-034-002.
 17. 張鴻明, 2003, 「雪山隧道整體通風系統之氣流操控性能研究(1/3)」, 行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告, 計畫編號: NSC91-2212-E-034-002.
 18. 張鴻明, 2004, 「雪山隧道整體通風系統之氣流操控性能研究(2/3)」, 行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告, 計畫編號: NSC 92-2212-E-034-001.
 19. 張鴻明, 2005, 「雪山隧道整體通風系統之氣流操控性能研究(3/3)」, 行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告, 計畫編號: NSC 93-2212-E-034-001.
 20. Hong-Ming Jang and Kung-Yi Wei, 2005, Evaluation of the Air-interchange Performance of the Hsuehshan Tunnel Using Computational Fluid Dynamics, The Sixth Asia-Pacific Conference on Wind Engineering (APCWE-VI), Seoul, Korea, September 12-14, 2005.

計畫成果自評

目前已完成在通風中繼站機房入口不設消音器下(亦即系統原始最大通風能耐),對多種任意邊界條件與風機推力之流場案例進行計算。從中所歸納出各分歧流與匯合流磨擦損耗係數之廣泛關係式。這顯示雪山隧道特有的通風中繼站之氣流摩擦損耗係數,有一定的關係式可以表示且適用範圍很廣。此發現意味著全系統穩態與準穩態氣流場之一維模式之建構可行。因此,具有工程與學術意義,相關結果擬撰寫論文發表於國際期刊。

另已完成在通風站機房入口不設消音器,但在兩豎井下方與通風管相接處設一直立平板簡式導流翼下,進行多種任意邊界條件與風機推力之流場計算。從中歸納出各分歧流與匯合流磨擦損耗係數之廣泛關係式。其工程與學術意義同上,所得結果擬撰寫論文發表於國際學術研討會和期刊。

目前亦利用初步歸納未含消音器效應的阻力係數廣泛關係式建構一維模式並對東行和西行兩孔道分別在車流稀疏、順暢、堵塞情形下,進行軸流風機與噴流風機不同運作模式對隧道各區段之風速、壓力、廢氣濃度、和溫度之影響效應。初步證明了所擬訂之建構一維模式的方法可行,該模式的精確性只要於未來以實測數據修正即可。因此,相當具有工程參考意義,此部分亦可寫成論文發表,

本年度參與本計畫研究生學會著手進行個人電腦串接,和設定平行運算環境。本計畫已在增進人才資訊能力方面做出的基本的貢獻。所建置的系統讓我們能夠對通風中繼站與風通站進行包含消音器和導流翼等小型裝置之力學效應進行研究,這與原先的計畫完全吻合。目前含有實體尺寸消音器和導流翼的流場分析案例正逐漸增加當中,從中我們將可歸納其效應以做為進一步研發其力學等效數值模式的參考。由於等效數值模式將比實體尺寸模式對計算能量的需求更小。因此,消音器和導流翼之力學等效數值模式可以以現有系統完成之,

可供推廣之研發成果資料表

 可申請專利 可技術移轉

日期：95年5月30日

國科會補助計畫	計畫名稱：結合高效能電腦與遙測建置研究型環境監測預報整合系統-(子計畫七)：雪山隧道通風系統三維火災煙流場數值模式建構(1/3) 計畫主持人：張鴻明 計畫編號：NSC 94-2745-M-034-007-URD 學門領域：大氣科學
技術/創作名稱	雪山隧道通風中繼站與通風站之磨擦損耗係數通式 -未設消音器下之系統固有值
發明人/創作人	張鴻明
技術說明	<p>本報告所列之雪山隧道通風中繼站與通風站之各個磨擦損耗係數通式，乃依其三維紊流場數值模式對多種邊界條件與不同風機推力情況所分析計算歸納而得。其中氣流之場域乃依該兩站體內通風管道之設計構形與尺寸所建構，具有其特定意義。這些通式可以廣泛代表流經此兩類特定站體管道之平常通風氣流型態下的磨擦損耗量與損耗特性。這些式子再配合各段車行隧道之縱流式一維通風模式即可建構成雪山隧道整體通風系統一維模式。此一模式讓我們得藉以分析了解該隧道在一些實際可能發生狀況下的通風情況與該通風系統之操控性能和應變能耐。</p> <p>The loss coefficient relations written in this report are summarized from the numerical calculation of the flows in the Ventilation Station and the Air-interchange Station of Hsuehshan Tunnel for many practical cases. With these loss coefficient relations, a one-dimensional model for the entire ventilation system of the tunnel could be built and the intrinsic maximum ventilation capacity of the system may be revealed accordingly. Proper ways of operating the ventilation facilities for dealing with practical cases may be figured out with the assistance of the model.</p>
可利用之產業及可開發之產品	交通建設；隧道工程 雪山隧道整體通風系統一維數理模式
技術特點	本研究所提出之雪山隧道各項磨擦損耗係數通式乃依該隧道未設消音器下之全尺度數理模式就其通風系統的可能運作範圍進行計算後歸納所得。另外，由於通風流場之數理模式和計算方法已相當成熟，將其使用在雪山隧道通風系統的分析上相當恰當，其結果自有一定之可靠度。

<p>推廣及運用的價值</p>	<p>由於雪山隧道通風系統含有新的長隧道設計理念，該系統對氣流的操控能力是一個重要的課題。依本項技術建構之一維模式可用以進行如何操控風機以維持隧道空氣品質等相關重要課題的研究，而所產生之成果除了可增加隧道通風知識外，亦有助於提升國人使用該隧道的安全度。</p>
------------------------	--

- ※ 1. 每項研發成果請填寫一式二份，一份隨成果報告送繳本會，一份送 貴單位研發成果推廣單位（如技術移轉中心）。
- ※ 2. 本項研發成果若尚未申請專利，請勿揭露可申請專利之主要內容。
- ※ 3. 本表若不敷使用，請自行影印使用。