

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

防風設施防風效果及環境風場之數值與實驗研究 (2/2)

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC91-2313-B-002-317-

執行期間：91年08月01日至92年07月31日

執行單位：國立臺灣大學生物環境系統工程學系暨研究所

計畫主持人：張倉榮

計畫參與人員：林亭儀、鍾莛歆

報告類型：完整報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 92 年 10 月 30 日

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

防風設施防風效果及環境風場之數值與實驗研究(2/2)

Numerical and Experimental Investigations on Shelter Effectiveness
and Wind Flow near Windbreaks (2/2)

計畫編號：NSC 91-2313-B-002-317

執行期限：91年8月1日至92年7月31日

主持人：張倉榮助理教授 台灣大學生物環境系統工程學系

計畫參與人員：林亭儀、鍾莛歆 台灣大學生物環境系統工程學系

一、摘要

本研究為二年期研究計畫，自90年度執行到92年度為止，進行防風設施防風效果與環境風場的數值模擬與風洞試驗。第一年度(90年)計畫的主要目的為建立一套計算防風設施環境風場的CFD數值模式，並以此模式進行數值境況模擬，以期能了解防風設施在不同幾何形狀、水平剖面透風度、垂直剖面透風度、氣象因素及周遭環境地形等條件下之減風效果，並探討最佳減風效果與風之相對關係。本研究選擇大尺度漩渦模擬(LES)代表防風設施的亂流狀況，並將之納入控制方程式-納維-斯托克方程式中。研究中為使模擬結果更能接近於實際防風設施氣流流動狀況，採用邊界閉合座標法，將移動之不規則物理平面轉換成規則之計算平面，以利數值計算。模式採非交錯格網分布，即流速及壓力在同一格點上，以有限差分法將納維-斯托克方程式離散後以顯式法解之，求解過程中乃採每一格點之質量守恒之差值，作為該點壓力之修正參數，直至整個流場均滿足質量守恒。本研究第二年度之主要目的則為進行風洞試驗方法瞭解防風設施環境風場。此風洞為一低風速、開放、吸入式之中型邊界層風洞，以實際量測資料進行模式調整與驗證，並探討第一年的數值模擬所得到的各種不同幾何形狀、水平剖面透風度、垂直剖面透風度等條件下之減風效果，並進行最佳減風效果與風之相對關係研究。

本數值及風洞試驗成果顯示，九種幾何形狀的減風係數之差異性皆在10%以內，故防風設施的幾何形狀對減風效果並無顯著影

響。水平與垂直剖面透風度則對減風效果有重大影響，而防風設施透風度以40%為最佳設計。因此，未來只要將透風度控制在40%左右，防風設施幾何形狀的設計上可有更大的自由度，搭配當地的自然景觀，達成工程生態化的目標。

關鍵詞：防風設施、減風效果、環境流場、計算流體動力學、風洞試驗。

Abstract

The study is a NSC two-year project (2001-2003) entitled "Numerical and experimental investigations on shelter effectiveness and wind flow near windbreaks". The main objective of this study is to numerically as well as experimentally investigate the shelter effectiveness and wind flows near windbreaks. A combination of numerical scenario simulations and wind tunnel experiments of windbreak flows, considering the effects of the geometric shape, porosity of horizontal profile, porosity of vertical profile, meteorological conditions, and surrounding terrain on shelter effectiveness, has been conducted. In the first year, a two-dimensional dynamic windbreak model is developed. The Large Eddy Simulation (LES) is selected as the turbulence model in the study, which is incorporated in the governing equations:

Navier-Stokes equations. A series of numerical scenario simulations of windbreak flows are conducted so that the effects of the geometric shape, porosity of horizontal profile, porosity of vertical profile, meteorological conditions, and surrounding terrain on shelter effectiveness can be obtained. To simulate windbreak flows more accurately, the boundary-fitted coordinate is employed in the study to fit the irregular greenhouse boundary by transforming the complex physical domain onto the simple numerical domain. The up-winding finite difference method with explicit scheme is used to solve the Navier-Stokes equations. In the second year, an experimental procedure for a medium size boundary layer wind tunnel is also carried out. The wind tunnel results are used to demonstrate the mechanism of wind reduction of windbreaks and to verify the first-year numerical results.

The report demonstrates the results of this two-year project. The results include CFD numerical model establishment, model verification with reliable measured data, setup of wind tunnel experiments, and the effects of the geometric shape, porosity of horizontal profile, porosity of vertical profile, meteorological conditions, and surrounding terrain on shelter effectiveness. The 40% porosity shelter gives the most effective wind reduction effect. The results of the numerical scenario simulations and wind tunnel experiments can provide the essential information of the best-designed windbreaks from the viewpoint of ecology.

Keywords: Windbreaks, Shelter Efficiency, Wind Flows, Computational Fluid Dynamics, Wind Tunnel Experiment.

二、前言

台灣地區地處西太平洋颱風帶，夏秋兩季常有颱風過境，冬季則有強勁東北季風肆虐，風災頻仍，對人民生命財產、建築設施及農作物等造成巨大的破壞。防風設施的建立為保障人民生命財產安全的重要方法之一，尤其是沿海及鄉村地區，因環境遮蔽效應較小，環境風場十分旺盛，防風設施更為重要。防風設施的防風效果是設施設計時最基本的考量因素之一，它對設施內外環境之動量與能量的交換有著決定性的影響。設計完善的防風設施能改善微氣候環境，使得農業建築設施得到適當的保護，並可增加農作物的產量與品質。因此，若能以數值模擬與風洞試驗並進之方式瞭解整個防風設施之環境風場，則可設計出更合宜的防風設施。

防風設施對地表風場的影響有遮蔽、過濾、導引等效果，其作用則視防風設施的高度、長度、幾何形狀、透風度(水平、垂直剖面)、風速、風向、周遭環境之地形等因素有關。一般而言，防風設施的防風範圍可以防風設施高度的若干倍表示之，而防風設施長度又可與幾何形狀與水平剖面透風度一併考量。因此，防風效果與設施的幾何形狀(geometric shape)、水平剖面透風度(porosity of horizontal profile)、垂直剖面透風度(porosity of vertical profile)、風速(wind speed)、風向(wind direction)、周遭環境之地形(surrounding terrain)等條件有密切關係。

在給訂一個風速、周遭環境之地形條件及風向與防風設施呈九十度，如圖1所示，當風吹過防風設施之時，部份氣流會由設施上方與兩側加速地繞過，造成流線聚集，使得原先之氣流被後來加速吹進的氣流所取代，形成取代氣流區(displacement zone)。而在設施的背風面(leeward side)，由於受到設施的阻擋造成流場分離，故形成流速減慢但流場紊亂的尾流區(wake zone)，其範圍可到達設施下游約十至十五倍設施高度處。因尾流區的壓力會低於大氣壓力，故穿越過設施上方的加速氣流會受到尾流區負壓力的吸引，而在設施下游約三至六倍設施高度處觸及地面，形成一個氣流迴轉的渦漩區(cavity

zone)。另外，取代氣流區與防風設施前面所圍成的區域，因部份氣流沿設施表面向下切，亦形成一渦旋區。基本上，防風設施後方之尾流區屬於減風區，其防風效果的優劣可由減風係數來判定

$$U_r(z) = \frac{\Delta \bar{u}}{U_0} \quad (1)$$

其中， $\Delta \bar{u}$ 為高度 z 處，無防風設施與有防風設施之平均風速差值， U_0 為入風處之平均風速。減風係數愈大，則防風的效果愈好，代表防風設施愈有效率。此外，防風效果之評估亦因不同的評估目標，可由亂流動能及地表剪應力來判定。亂流動能代表風場的帶動能量，其值愈大，表示流速愈不穩定，防風效果會差；地表剪應力則代表沖蝕能力，地表剪應力愈大，土壤風蝕現象會愈強。

有關於防風設施之實驗研究，包括室外實地量測及室內風洞試驗。在室外實地量測部份，由於室外之風速、風向變化極大，很難歸納出定量的結果，目前大多為定性分析的結果。此外在室內風洞試驗，絕大多數學者是以風洞試驗的方式探討與風向呈九十度之矩形防風設施後方尾流之流場特性及減風效果，如Shiau (1998, 2000)，Lee and Kim (1999)，Packwood (2000)，朱等(2000)。

近十多年來，隨著電腦科技的日新月異，個人電腦計算效率與品質均大幅增加，使得以計算流體動力學 (computational fluid dynamics, CFD) 進行防風設施環境風場數值模擬之可能性大大地增加，如 Wilson(1985, 1987a, 1987b) Wang and Takle (1995a, 1995b, 1997) Fang and Wang (1997) Patton and Shaw (1998)及 Packwood (2000)等均進行二維的防風設施環境風場數值模擬。使用CFD模擬防風設施之防風效果較以風洞試驗的方式為便宜、簡便，在CFD模式與實驗數據驗證成功後，即可依不同防風設施幾何形狀、透風度(水平剖面、垂直剖面)、氣象條件(風速、風向)、周遭環境之地形等進行數值境況模擬(numerical scenario simulation)。但其缺點為數值模式須求解納維-史托克方程式(Navier-Stokes equations)，此方程式之求解程序十分複雜，為符合數值精度，其資料量往往十分龐大，需有良好的電腦計算環境配

合。另外，模式中並須考量防風設施中亂流之流況，而選擇一個符合流況的亂流模式。上述之CFD數值模擬文獻，除Fang and Wang (1997)及Patton and Shaw (1998)採目前較先進之LES亂流模式研究防風設施環境風場外，其餘文獻皆採用傳統的 k - 亂流模式。因此，現階段防風設施防風研究，以防風效果動態模擬為目的，進行LES亂流模式之研究與發展，探討幾何形狀、透風度、氣象條件及周遭環境之地形等因素，目前尚無文獻探討。

本研究以二年為期，分別進行防風設施防風效果與環境風場的數值模擬與風洞試驗，其主要目的有二，一是要在第一年度建立一套計算防風設施環境風場的 CFD 數值模式，並以此模式進行數值境況模擬，以期能了解防風設施在不同幾何形狀、水平剖面透風度、垂直剖面透風度、氣象因素(風速、風向)及周遭環境地形等條件下之減風效果，並探討最佳減風效果與風之相對關係。本研究選擇大尺度漩渦模擬(large eddy simulation, LES)代表防風設施的亂流狀況，並將之納入控制方程式 - 納維-史托克方程式中。本研究為使模擬結果更能接近於實際防風設施氣流流動狀況，採用邊界閉合座標法(boundary - fitted coordinate)，將移動之不規則物理平面轉換成規則之計算平面，以利數值計算。模式採非交錯格網分布，即流速及壓力在同一格點上，以有限差分法(finite difference method)將納維-史托克方程式離散後以顯式法(explicit scheme)解之，求解過程中乃採每一格點之質量守恒之差值，作為該點壓力之修正參數，直至整個流場均滿足質量守恒。

三、研究方法

當風吹過防風設施之時，會遭受阻力而使流速變慢，此時風的動量(momentum)會受到損失。本研究考慮紊流況在吹過防風設施時所受之阻力，可由下式表示(Wilson, 1985)

$$F = -C_d AUu \quad (2)$$

其中， C_d ：防風設施阻力係數(dynamic drag

coefficient) , 可由現地試驗得之(Mayhead, 1973; Hoerner, 1965; Seginer, 1975) ; A : 防風設施阻風密度(obstacle area density) ; U : 防風設施入風處之平均流速。另外, 由於防風設施阻力亦跟設施水平距離有關, 故亦可以總阻力因子 k_r (total resistance coefficient of windbreak)來表示(Wilson, 1985) :

$$k_r = \int_0^\infty C_D A dx \quad (3)$$

若防風設施側向流況變化甚小, 並考慮紊流況, 則垂直平面二維之連續方程式可由(7)、(8)及(11)三式簡化而得 :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \nabla^2 u - C_D A U u \quad (5)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \nabla^2 w - g - C_D A U w \quad (6)$$

其中, t : 為時間座標 ; x : 為橫向座標(水平方向) ; z : 為縱向座標(垂直方向) ; $\nu = \nu + \nu_{sgs}$: 有效紊流黏滯係數(effective turbulent viscosity coefficient) ; p : 壓力 ; $\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial z}$: 為沿 x 或 z 方向之偏微分運算子 ; u : 沿 x 方向之水平流速 ; w : 沿 z 方向之垂直接流速 ; g : 重力加速度 ; (4)、(5)及(6)式分別表示氣流之連續方程式 x 及 z 方向之運動方程式。

本研究為使模擬結果更接近於實際防風設施氣流場流動狀況, 採用邊界閉合座標法, 將防風設施通風所造成移動之不規則物理平面轉換成規則之數值計算平面, 以利計算工作之進行, 並可充分考量不同幾何形狀、透風度及氣象條件等境況下所造成之不同環境流場。此外, 為使氣流流動之邊界條件在自由液面格點上求解之時, 減少引用差值方法以增進計算精度, 故模式採非交錯格網分布, 即流速及壓力在同一格點上, 以有限差分法將控制方程式離散後以顯式法解之, 求解過程中乃採每一格點之質量守恒之

差值, 作為該點壓力之修正參數, 直至整個流場滿足質量守恒。

圖2為模擬防風設施防風效果之示意圖, 防風設施高 H 長 H , 水平模擬範圍自設施前 $30H$ 起, 至設施後 $80H$ 止, 垂直模擬範圍自地表起, 至 $12H$ 高止。氣流沿著左邊以指數律速度剖面形式進入防風設施, 在吹過防風設施後, 由右邊排出。圖3則為模擬防風設施防風效果所需之數值網格點配置, 我們將垂直模擬範圍以 $0.1H$ 為單元, 區分為121個網格點 ; 水平模擬範圍則分為兩種, 防風設施內以 $0.05H$ 為單元, 防風設施外以 $0.5H$ 為單元, 網格點數目共241點 本研究所需之總網格點佈置數目為29161點。

四、模式驗證

在CFD模式與實驗數據驗證成功, 此一前提下, 使用CFD模擬防風設施之防風效果較以風洞試驗的方式為便宜、簡便, 模式可依不同防風設施幾何形狀、透風度(水平剖面、垂直剖面)、氣象條件(風速、風向)、周遭環境之地形等進行數值境況模擬。因此, 為了確保CFD模式的準確可靠, 必須進行模式驗證 圖4為以圖2及圖3之防風設施配置與網格點, 並將水平剖面透風度設定為0%, 所計算而得的在 $Z=0.4H$ 高度時, 其減風係數對整個水平距離之關係圖。由圖4可知, 設施的背風面 $5H$ 距離左右, 減風效果最好, 其後至 $30H$ 處風速已逐漸恢復。另外, 圖中並將(Wilson, 1985)之風洞試驗資料繪入比較, 數值模擬結果與風洞試驗十分吻合。

五、模擬結果與討論

1. 防風設施環境風場(environmental airflow field)

圖 5 與圖 6 為在防風設施水平剖面透風度為 50% ($k_r=2.0$), 而高長比為 1:2.5 及 1:1 所模擬而得之流線圖(streamline plots)。由以上二圖可知, 當風吹過防風設施之時, 由於防風設施的阻擋, 部份氣流會由設施上方加速地繞過, 造成流線在上方聚集。而在設施的背風面, 由於受到設施的阻擋造成流場分

離，故形成流速減慢的尾流區。尾流區為一低壓區，故越過設施上方的加速氣流會受到尾流區負壓力的吸引，而在設施下游觸及地面，形成一個氣流迴轉的渦旋區。

2. 防風設施幾何形狀 (geometric shape)

目前的農業工程設計觀念，已漸漸朝向「工程生態化」的目標邁進，工程的設計須能融入當地的景觀，避免對環境造成衝擊，而鄉村與沿海等強風地區的防風設施設計亦不例外。因此，若研究成果證實幾何形狀對防風設施的防風效果並無太大差別，則未來在防風設施的設計上將有更大的自由度，以搭配當地的自然景觀，達成工程生態化的目標。反之，非流線型的防風設施，雖在環境景觀上較為單調，仍是工程設計上之最佳選擇。

本研究為能瞭解不同幾何形狀的防風設施之防風效果，考慮防風設施無透風性(水平剖面透風度為0%)，以矩形、三角形及半圓形(流線型)等三種幾何形狀來進行防風效果的探討，上述三種幾何形狀又各可細分為置中、前傾、後傾等三種組合方式。圖7為此九種不同幾何形狀的防風設施之示意圖，包括置中矩形(A1)、前傾矩形(A2)、後傾矩形(A3)、置中三角形(B1)、前傾三角形(B2)、後傾三角形(B3)、置中半圓形(C1)、前傾半圓形(C2)、後傾半圓形(C3)等形狀，其高度皆為H。本研究以此九種不同幾何形狀的防風設施輸入二維防風設施動態數值模式，藉以探討其防風效果，以瞭解幾何形狀對防風效果的重要性。圖8與圖9為此九種不同幾何形狀在水平剖面透風度為50% ($k_r=2.0$)，其水平高度 $z=0.5H$ 及 $z=3.0H$ 之防風效果模擬圖。由圖中可發現，此九種幾何形狀的減風係數之差異性皆在10%以內，因此幾何形狀對防風設施的防風效果並無太大差別。

另外，上列九種不同幾何形狀的防風設施，除矩形形狀有風洞試驗結果外，其餘幾何形狀目前並無風洞試驗結果。為補強研究成果，本研究第二年進行風洞試驗，針對置中矩形(A1)、前傾矩形(A2)及後傾矩形(A3)等三種不同幾何形狀防風設施，在水平剖面透風度皆為50%的控制條件下，量測其背風面不同距離處之減風係數。圖10與圖11為此

三種不同幾何形狀之減風係數在水平高度 $z=0.5H$ 及 $z=3.0H$ 隨背風面不同距離之變化關係，可知其減風差異性很小。由此圖可知，數值及風洞試驗成果皆顯示防風設施的幾何形狀對減風效果並無顯著影響。

3. 水平剖面透風度 (porosity of horizontal profile)

目前絕大多數有關防風設施之研究均探討不同水平剖面透風度對矩形防風設施的防風效果影響。其所獲致之普遍結論為，無論濃密或稀疏的防風設施，都能對通過的氣流產生阻力，因而減低風速。過於稀疏的防風設施，因降低的風速不夠，防風效果不佳；反之，過於濃密的防風設施，由於貫穿通過的氣流較少，雖能在背風面產生極低風速，但也因在背風面形成低壓區，而造成上方氣流急速下沖，反而使得防風範圍減小，防風效果變差。一般而言，矩形防風設施水平剖面透風度在30-50%之間，會有最佳的防風效果。然而對於不同幾何形狀的防風設施在不同水平剖面透風度之防風效果，目前尚未有文獻進行研究。

本研究為能瞭解不同幾何形狀的防風設施在不同水平剖面透風度之防風效果，仍以上述九種不同幾何形狀的防風設施為研究標的，再搭配10%、30%、50%、70%及99%等五種不同的水平剖面透風度，共四十五組境況來進行防風效果探討，以瞭解水平剖面透風度在各種幾何形狀之防風設施的防風效果。由於研究結果資料量過大，本報告僅將矩形防風設施之結果列出，如圖12所示。由圖中可知，當其水平剖面透風度在30-50%之間，可同時產生較佳的風速降低效果與防風範圍，故會有最佳的防風效果。

4. 周遭環境地形 (surrounding terrain)

除了氣象條件以外，另一個影響風場環境的因素為周遭環境地形。不同的周遭環境地形會產生不同的地表粗糙度，因而導致不同的風速剖面。一般而言，大氣邊界層之平均風速剖面可以指數律(power law distribution)來表示，地表粗糙度較大的地形環境會產生較小的風速剖面，較大的邊界

層。本研究為能瞭解不同周遭環境地形所引致之不同的風速剖面對防風設施防風效果之影響，以都市、鄉村、海邊等三種不同環境地形為研究標的，探討周遭環境地形對矩形防風設施的防風效果。研究成果顯示，不同周遭環境地形對防風效果之影響 1% 以內，十分有限。

六、結論

1. 本研究以數值模擬結果比較風洞實驗資料，結果發現 LES 紊流模式具非等向性渦旋，模擬所得之結果與實驗值差距甚小。
2. 防風設施幾何形狀的改變對防風效果並無太大差別，故未來在防風設施的設計上將可搭配當地的自然景觀為主要目標，達成工程生態化的目地。
3. 以矩形防風設施而言，其水平剖面透風度在 30-50% 之間，會有最佳的防風效果。水平剖面透風度超過 50% 以上者，由於貫穿通過的氣流較少，雖能在背風面產生極低風速，但因上方氣流急速下沖，使得防風範圍減小，防風效果變差。

七、參考文獻

1. 朱佳仁、許皓昌、曾明性、林佑輔，2000，透風式防風牆防風效果之實驗研究，中國土木水利工程學刊。
2. Fang, F. M., and D. Y. Wang (1997). "On the Flow around a Vertical Porous Fence", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 67&68, 415-424.
3. Hoerner, S. F. (1965). *Fluid Dynamic Drag*, Hartford House.
4. Lee, S. J., and H. B. Kim (1999). "Laboratory Measurements of Velocity and Turbulence Field behind Porous Fences", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 80, 311-326.
5. Mayhead, G. J. (1973). "Some Drag Coefficients for British Forest Trees Derived from Wind Tunnel Studies", *Agricultural Meteorology*, 12, 123-130.
6. Oke, T. R. (1987). *Boundary Layer Climates*, 2nd Edition, Methuen Co. Ltd., London, UK.
7. Packwood, A. R. (2000). "Flow through Porous Fences in Thick Boundary Layers: Comparisons between Laboratory and Numerical Experiments", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 88, 75-90.
8. Patton, Edward G., and Roger H. Shaw (1998). "Large-Eddy Simulation of Windbreak Flow", *Boundary-Layer Meteorology*, 87, 275-306.
9. Seginer, I. (1975). "Atmospheric-Stability Effect on Windbreak Shelter and Drag", *Boundary-Layer Meteorology*, 8, 383-400.
10. Shiau, B. S. (1998). "Measurement of Turbulence Characteristics for the Flow past Porous Windscreen", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 74-76, 521-530.
11. Shiau, B. S. (2000). "Experimental Study of a Turbulent Boundary Layer Flow over a Windbreak of Semi-Circular Section", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 84, 247-256.
12. Wang, Hao, and Eugene S. Takle (1995a). "Boundary-Layer Flow and Turbulence near Porous Obstacles", *Boundary-Layer Meteorology*, 74, 73-88.
13. Wang, Hao, and Eugene S. Takle (1995b). "A Numerical Simulation of Boundary-Layer Flows near Shelterbelts", *Boundary-Layer Meteorology*, 75, 141-173.
14. Wang, Hao, and Eugene S. Takle (1997). "Momentum Budget and Shelter Mechanism of Boundary-Layer Flow near a Shelterbelt", *Boundary-Layer Meteorology*, 82, 417-435.
15. Wilson, J. D. (1985). "Numerical Studies of Flow through a Windbreak", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 21, 119-154.
16. Wilson, J. D. (1987a). "On the Choice of a Windbreak Porosity Profile", *Boundary-Layer Meteorology*, 38, 37-49.
17. Wilson, J. D. (1987b). "A Second-Order Closure Model for Flow through Vegetation", *Boundary-Layer Meteorology*, 42, 371-392.