

防風柵透風間隙配置對防風功效之研究

黃隆明⁽¹⁾ 楊清華⁽²⁾

摘要

本研究的目的是以數值方法，模擬防風柵透風間隙變化之鄰近流場，以探討防風柵之防風功效。研究中以四組透風率為 30% 之防風柵從事風洞實驗，進而對數值模式參數加以驗證、比較、探討與分析。風場計算係採用微可壓縮流配合大渦模擬及有限體積法，以模擬防風柵之鄰近紊流流場。綜合研究所得結果如下：1. 防風柵間隙均勻配置時，間隙大者較間隙小者更具防風功效，其保護指數 (P.I.) 達 $24.83H^2$ 。2. 防風柵間隙不均勻配置時，若間隙之配置從底部至頂部逐漸加密，可獲得較佳之防風功效，保護指數達 $27.13H^2$ 。3. 防風柵間隙最佳化之配置，由底部 $0.5H$ 範圍內將透風率固定為 30%，而頂部 $0.5H$ 範圍內透風率設定為零，保護指數高達 $30.91H^2$ ，其防風功效較間隙均勻配置提高約 38%。

(**關鍵詞**：防風柵、透風間隙、大渦模擬)

Study on the Effect of Wind Reduction by the Ventilation Interval of Windbreak Fence

Long-Ming Huang

Associate Professor, Department of Soil and Water Conservation,
National Chung Hsing University, Taichung, Taiwan, R.O.C.

Ching-hua YANG

Graduate Student, Department of Soil and Water Conservation,
National Chung Hsing University, Taichung, Taiwan, R.O.C.

ABSTRACT

The purpose of this study was to explore the effect of ventilation interval change by numerical method, which simulated the flow field around windbreak fence. The wind tunnel experiments by four windbreak fences with 30% penetration were performed to verify, compare and analyze the parameters of numerical model. Additionally, the computational code used is based on a weakly-compressible-flow method, together with a large-eddy-simulation and finite volume method technique is applied to account for the turbulence effect in the flow.

The results of this study were as follows:

1. When the ventilation interval of the windbreak fence is distributed evenly, the larger interval leads to a better wind reduction effect than that of the smaller interval. It has a P.I. (protect index) of

(1) 國立中興大學水土保持學系副教授

(2) 國立中興大學水土保持學系碩士

24.83H².

2. When the ventilation interval of the windbreak fence is not distributed evenly, if its' intervals are arranged by the density gradually from bottom to top, it can obtain better results of wind reduction efficiency. It has a PI of 27.13H².
3. Disposed and engaged in optimization analysis of the preceding paragraph, we can get a better design, its' ventilation rate is 30% to get the interval bar and dispose best for the bottom 0.5H range, and zero ventilation rates in the top 0.5H range. It has a PI of 30.91H², and wind reduction efficiency is better than the general even interval disposed by about 38%.

(**Keywords:** Windbreak fence, Ventilation interval, Large eddy simulation)

前言

台灣屬於海島地形，位於大陸與海洋交接地帶，為典型之海洋性氣候，由於四面環海，海岸線長達 1139 公里（劉衍淮，1958）；夏季時吹西南風，平均風速約為 3 m/s，除遭颱風侵襲外，風速不至於對沿海地區造成災害；然而在每年的十月到翌年三月間，東北季風盛行，沿海風速經常高達 20m/s（王玉懷等，1995），強風挾帶著飛砂及鹽霧，使得濱海地區環境更形惡劣，林木與作物難以成活，百姓生活更加艱困。因此，如果沒有適宜的防風保護設施，此種惡劣環境將難以獲得改善。

台灣在日據時期即開始在沿海地區建造防風林以減少風害損失。光復以後，政府一方面繼續營造防風林，另一方面更積極加強構築防風設施，以防止強風、飄鹽及飛砂的危險。目前海岸常見的防風設施有防風牆、防風堤、防風柵及防風網等，屬於半永久性或永久性構造物，其優點為工期短、收效迅速、維護容易，若作為防風林的先驅設施時，可以提供立即性的防風效果以保護林木成長。前人研究成果顯示，防風與防鹽效果以防風柵及防風網較佳（真木太一，1982）、（邱啓芳，1987）、（黃隆明，1989）、（王浩中，1996）；而防風牆及防風堤之防風功效則較差（谷 信輝，1952）、（三原義秋等，1952）、（黃隆明，1997）。

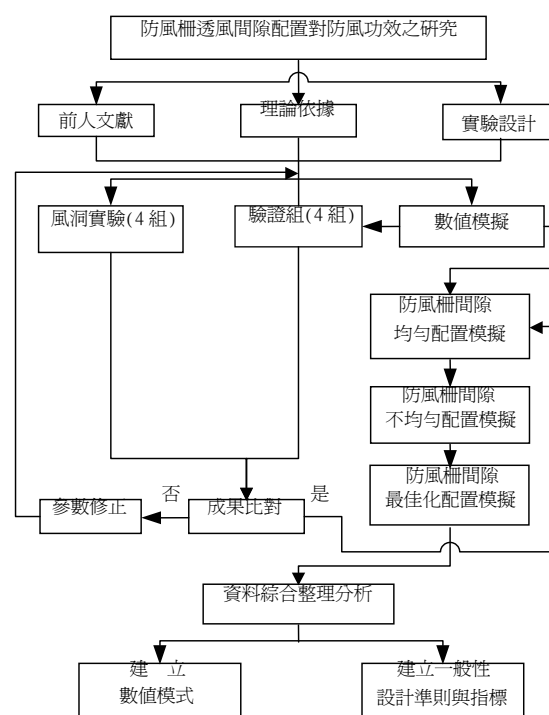


圖 1. 研究架構

Figure 1. Research scheme.

由於前人相關研究中對於防風柵透風間隙配置之探討十分缺乏，往往造成在規劃設計時無所依循。有鑑於此，如何積極研發改良更優質的防風柵設施，並建立一般性設計準則與指標，實為當務之急。為此，本研究擬採用風洞實驗與數值模擬兩種方法，從事防風柵透風間隙對防風功效影響之探討，其中包括防風柵均勻間隙配置模擬，目的在於

比較相同透風率下，不同間隙寬度對防風功效之影響；以及防風柵不均勻間隙配置模擬，目的在於探討間隙配置由密漸疏及由疏漸密對防風功效之影響，其後並對所得結果進行最佳化模擬，以獲致防風柵間隙最佳的設計方式，以有效提昇防風柵之防風功效。研究之架構如圖 1 所示。

材料與方法

一、數值模擬

本研究中之流場數值模擬採用微可壓縮流的方法 (Weakly compressible flow method, 簡稱 WCF) (Song & Yuan, 1988), 並推展至黏性流場預測之模式, 以模擬防風柵相應之二維、非恆定 (Unsteady) 紊流流場。

(一) 理論分析

數值模擬方法之控制方程式包括可壓縮流之連續方程式以及動量方程式, 用以描述模擬區域內粘性流場的特性, 其相關推演如下:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla \mathbf{V} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{V} \quad (2)$$

式中 ρ 、 \mathbf{V} 、 p 、 t 及 ν 分別代表流體密度、速度向量、壓力、時間及運動粘滯度。在 Barotropic 的假定下, 連續方程式可近似為:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho c^2 \mathbf{V}) = 0 \quad (3)$$

式中 c 為音速, 含馬赫數量級平方之誤差。同樣的, 在馬赫數量級之誤差下 (Song & Yuan, 1988), 動量方程式可近似為:

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{V} \mathbf{V}) = -\nabla \left(\frac{p}{\rho} \right) + \nu \nabla^2 \mathbf{V} \quad (4)$$

在從事空間平均處理後, 物理量以指標

符號 (Index notation) 表示之方程式為:

$$\frac{\partial \bar{p}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho c^2 \bar{u}_j) = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial (\bar{p}/\rho)}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ -\overline{u'_i u'_j} - \overline{u'_i u'_j} - \overline{u'_i u'_j} - (\overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j) + \nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right\} \quad (6)$$

經由採用雷諾平均 (Reynolds' averaging) 的假設, 方程式(6)可轉化為:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial (\bar{p}^*/\rho)}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ -(\overline{u'_i u'_j} - \frac{1}{3} \overline{u'_i u'_j} \delta_{ij}) + \nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right\} \quad (7)$$

式中 δ_{ij} 為 Kronecker delta function

$$\bar{p}^* = \bar{p} + \frac{\rho}{3} \overline{u'_i u'_i}$$

根據渦流粘滯性之假設 (Eddy-viscosity hypothesis), 次網格紊流剪應力項可表示為:

$$-(\overline{u'_i u'_j} - \frac{1}{3} \overline{u'_i u'_j} \delta_{ij}) = \nu_t S_{ij} \quad (8)$$

式中

$$S_{ij} = \left(\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) \quad (9)$$

方程式 (7) 可重寫為:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial (\bar{p}^*/\rho)}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\tau_{ij}}{\rho} \right) \quad (10)$$

式中 τ_{ij} 是粘性剪應力及次網格紊流剪應力之和, 而次網格紊流擴散係數於方程式(8)中, 係依據 Smagorinsky (1963) 建議之型式:

$$\nu_t = (C_s \Delta)^2 \left(\frac{S_{ij}^2}{2} \right)^{1/2} \quad (11)$$

Δ 為計算網格的特徵長度, C_s 為 Smagorinsky 常數。

至此, 方程式(5)及(10), 可以保守型式表示:

$$\frac{\partial G_i}{\partial t} + \nabla \cdot F_i = 0 \quad i = 1, 2, 3 \quad (12)$$

式中純量 G_i 及向量 F_i 可定義成下面的矩陣型式：

$$G = \begin{bmatrix} p \\ u \\ v \end{bmatrix}, \quad F = \begin{bmatrix} \rho c^2 u & \rho c^2 v \\ u^2 + \frac{p^* - \tau_{xx}}{\rho} & \frac{uv - \tau_{yx}}{\rho} \\ \frac{uv - \tau_{xy}}{\rho} & v^2 + \frac{p^* - \tau_{yy}}{\rho} \end{bmatrix} \quad (13)$$

計算過程中，在一特定控制體積 ∇ (Control volume) 內，經由體積積分可得：

$$\int_{\nabla} \frac{\partial G}{\partial t} d\nabla + \int_{\nabla} \nabla \cdot \bar{F} d\nabla = 0 \quad (14)$$

由散度定理可得

$$\frac{\partial G_m}{\partial t} = -\frac{1}{\nabla} \int_s \tilde{n} \cdot \bar{F} ds \quad (15)$$

其中 G_m 為控制體積內之平均值(相對於 ∇ 之幾何中心)； \tilde{n} 為控制體積表面 S 法向量。在某一起始流況下，方程式(15)可用以計算在某一時段 Δt 內 G_m 之時變值，並進一步獲得 G_m 在下一時間之新值。

計算程式中採用 MacCormack (1969) 之預測步-校正步 (Predictor-corrector scheme) 的顯式方法，以提高時變模擬之精確度。同時，為了確保結果之收斂性， Δt 須受限於 Courant-Friedrichs-Lewy (1967) 條件規範。

$$\Delta t = C_c \cdot \min \left[\frac{\nabla}{|\bar{V} \cdot s\tilde{n}| + c|s\tilde{n}|} \right] \quad (16)$$

C_c 為 Courant number (本文中為 0.238)。

(二) 模擬設計及模擬個案

在進行數值模擬時，將流場之相關參數設定與風洞實驗相同，參考風速(U_{ref})為 10.6

m/s (於 $x=3.5m$, $y=8.5H$ 處量測)；雷諾數 ($Re=U_{ref} H/\nu$) 為 4.1×10^4 ，其中模型高度 H 為 6 cm， ν 為 1.5×10^{-5} ；相對邊界層厚度 (δ/H) 為 8.33，來流的指數 n 值為 0.112。

本研究的模擬流程如圖 1 所示，總模擬個案總計 20 組，主要分成驗證模擬、防風柵間隙均勻分布與不均勻分布模擬及最佳化模擬四個部份，詳述如下：

1. 驗證模擬：共計 4 組，包含空流場、防風牆、透風率 30% 之防風柵 (間隙比 $b/H=0.0875$, b 為柵板寬度) 及下疏 (30%) 上密 (0%) 之防風柵等，分別將模擬結果與風洞實驗相互比較驗證，以確定模式之可行性。
2. 防風柵間隙均勻分布模擬：共計 3 組，包含四塊、八塊及十六塊柵板數配置，其透風率為 30%，間隙比 (b/H) 分別為 0.175、0.0875 及 0.04375，如圖 2 所示。
3. 防風柵間隙不均勻分布模擬：共計 4 組，包含防風牆、柵間隙均勻分布 $b/H=0.04375$ (簡稱均勻型)、總透風率為 30% 其柵間隙分佈下密上疏 (簡稱密疏型) 及下疏上密 (簡稱疏密型) 等，如圖 3 所示。
4. 防風柵間隙最佳化模擬：共計 12 組，目的在於簡化設計以便於施工；首先經由網格設計配置，獲得柵網透風率 30% 的分界點，其中透風率 10% 約佔柵高 55%，而透風率 20% 約佔柵高 45%；而後再進行模擬配置，將 12 組模擬個案分為 A、B、C 及 D 四種配置，其配置方式如下：
 - (1) A 型配置：以防風柵高 0.55H 處為分界點，將柵分為上、下兩個部分；A-1 型係上下透風率分別為 20% 及 10%；A-2 型係上下透風率分別為 20% 及 0%；A-3 型係上下透風率分別為 30% 及 0%。
 - (2) B 型配置：以防風柵高 0.45H 處為分界

點，將柵分為上、下兩個部分；B-1 型係上下透風率分別為 10%及 20%；B-2 型係上下透風率分別為 0%及 20%；B-3 型係上下透風率分別為 0%及 30%。

(3) C 型配置：以防風柵高 0.5H 處為分界點，將柵分為上、下兩個部分；C-1 型係上下透風率分別為 20%及 10%；C-2 型係上下透風率分別為 20%及 0%；C-3 型係上下透風率分別為 30%及 0%。

(4) D 型配置：以防風柵高 0.5H 處為分界點，將柵分為上、下兩個部分；D-1 型係上下透風率分別為 10%及 20%；D-2 型係上下透風率分別為 0%及 20%；D-3 型係上下透風率分別為 0%及 30%。

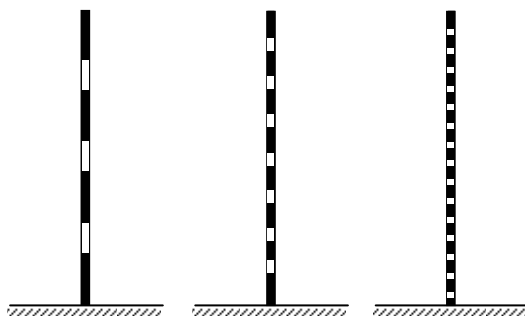


圖 2. 防風柵間隙均勻分布示意圖
Figure 2. The ventilation interval of the windbreak fence distributed evenly.

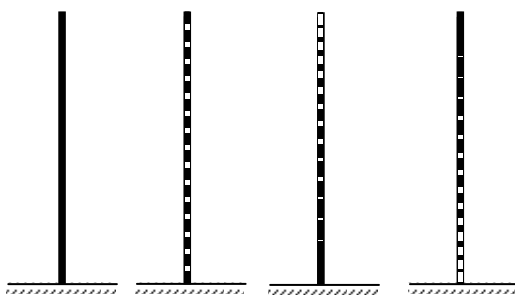


圖 3. 防風柵間隙不均勻分布示意圖
Figure 3. The ventilation interval of the windbreak fence not distributed evenly.

(三) 計算區域及網格大小

在從事數值模擬時，計算區域及網格大小須審慎選定，在流場性質變化大的區域選用較細密的網格；反之，則宜選用較大尺度的網格，如此方能在不影響數值精確性之前提下提昇計算效率。本研究之網格設計，採用正交網格，而為了與模型試驗結果驗證，計算區域的高度與上游面採十倍防風柵高 (H)，而下游面則取三十倍防風柵高，計算區域及網格系統，如圖 4 所示。

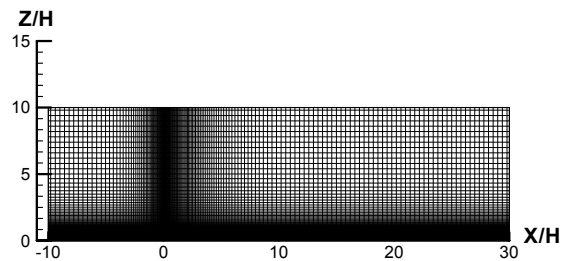


圖 4. 計算區域及網格
Figure 4. The calculated area and mesh.

(四) 邊界條件

本研究中之邊界狀況可分為不可穿透及可穿透兩種型式，其中防風柵板及地面屬於前者，而計算區域之入流、出流及上邊界屬於後者。數值計算中皆用鏡射點 (Phantom point 或 Image point) 之方法，以反映出邊界之正確流力特性。

在速度方面，入流之速度係將上游計算區外鏡射點之速度，以冪級數 (Power law) 邊界層流之分佈給定；而出流及上邊界則係分別依速度沿主流向 (X) 及垂直方向 (Z) 之變化梯度為零之假設給定圖，如圖 5 所示。

在壓力方面，根據 WCF 中特徵線方法 (Method of characteristics) 之推論，入流及上邊界鏡射點之壓力，皆取與鄰近計算區內部相應點壓力之等值；而出流之壓力則取其平均壓力為零，以定出整個計算區內之參考壓力 (Fang, 1989)。

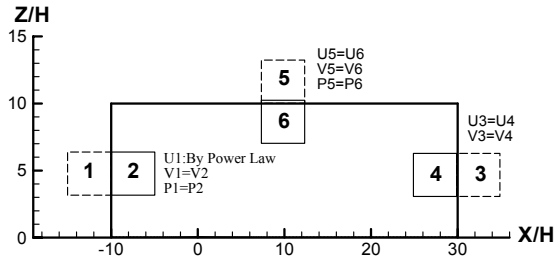


圖 5. 數值計算可穿透邊界條件
 Figure 5. Numerical calculation of penetrable boundary conditions.

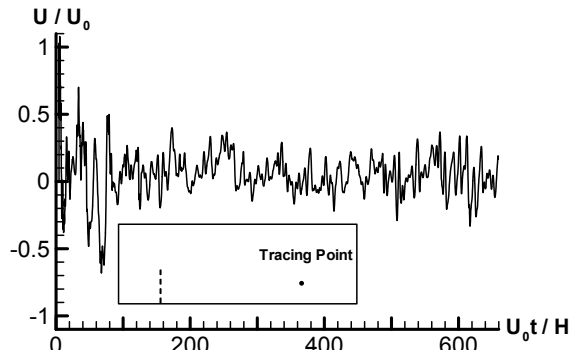


圖 7. 流場計算典型之無因次速度歷時圖
 Figure 7. Variations of typical dimensionless velocity in flow field.

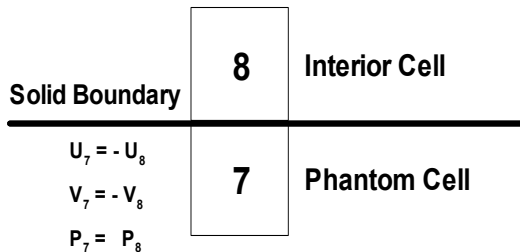


圖 6. 數值計算不可穿透邊界條件
 Figure 6. Numerical calculation of impenetrable boundary conditions.

不可穿透邊界之給定係根據不可滑動條件 (No-slip condition)，將鏡射點之速度取為鄰近內部點之相反值，如圖 6 所示，使得平均位置 (邊界) 之速度為零；而該處之壓力，係選取對邊界法線方向之變化梯度為零的假設給定。

(五) 起始條件

當計算開始時流場內為靜止零流狀態，由於上游之邊界條件驟變，使得流場內造成一強大之壓力波 (Pressure wave)，此壓力波在有限的計算區內會來回移動。由於探討之狀況屬黏性流況，此壓力波將會因擴散 (Diffusion) 效應而隨時間消滅。圖 7 顯示計算中防風柵下游 3H 與柵高 0.5H 交會處典型之無因次速度歷時結果。

二、風洞實驗

為了驗證數值模擬的準確性，研究中以四組風洞實驗之實測值和數值結果加以比較、分析。相關之實驗設備及方法，如下所述：

(一) 實驗設備

1. 次音速風洞：本實驗在國立中興大學水土保持學系位於霧峰北溝農業試驗場的風洞實驗室中完成，整套裝置係根據 Rae and Pope (1984) 的設計理念，配合實際需求規劃建造而成。整體結構如圖 9 所示，包括整流段、收縮段、測試段、擴散段及動力段，總長度為 21.4 公尺，風速之變化範圍為 0 至 40m/s，經由數位變頻器控制，可連續調整。
2. 三軸移動平台：由步進馬達和台車所構成的三軸移動平台，經由電腦程式控制驅動器帶動步進馬達，即可從事 X、Y、Z 三方向移動與定位的自動量測系統。
3. 皮托管 (Pitot tube)：實驗中流場的平均速度係由皮托管來量測，由於實驗中截取的資料皆以電壓為主，因此必須將皮托管所測得的動靜壓差以下式轉換為風速：

$$U = \sqrt{2g(\rho_r - \rho)R / \rho} \quad (17)$$

式中 U：風速 (m/s)

R：壓力差 (mm) (可由微壓計讀取其讀數)

ρ_f ：微壓計液體密度 (kg/m^3)

ρ ：空氣流體的密度 (kg/m^3)

g ：重力加速度 (m/s^2)

在 15°C 的狀況下，(17) 式可簡化為

$$U = 3.997\sqrt{R} \quad (18)$$

4. 熱線 (Hot wire) 量測系統：使用美國 TSI 公司生產之 X 型熱線探針 (1241-T1.5) 及 IFA-300 恆溫式熱線風速計從事實驗，將熱線探針電壓值的變化，透過 Analog/Digital 訊號轉換及資料採集系統，再經由電腦進行紊流量測、記錄及分析。

5. 壓力轉換器：本裝置為 Validyne model DP103-14 薄膜式壓力轉換器，其功用係藉由皮托管動靜壓差所造成的薄膜應變，而將電壓值輸出，再經由率定即可求得不同電壓值下的風速狀況。

6. 資料擷取系統：本實驗使用美國 Microstar laboratories 公司所生產的 DAPL 資料擷取系統 (Data acquisition system, DAS)。此系統可同時處理 16 個頻道的訊號，經由此系統將原本由壓力轉換器所輸出的類比 (Analog) 訊號換轉換成數位 (Digital) 訊號，並傳送至個人電腦加以收集。

(二) 實驗方法

1. 迫近流場之規劃：為了模擬大氣紊流邊界層的環境，因而參考前人相關研究 (Armitt et al., 1968) (Counihan, 1970, 1973) (Standen, 1972) (Cermak, 1974)，在風洞測試段前緣設置渦流產生器及粗糙元素，以期在有限區域中建立理想的邊界層厚度。茲將空流場之實測資料，經由迴歸分析後，所得到之迫近流場風速剖面，以指數律型態表示

$$\frac{U}{U_{ref}} = 0.999 \left(\frac{Z}{Z_{ref}} \right)^{0.112} \quad (r = 0.9884^{**}) \quad (19)$$

式中 $U_{ref} = 10.60 \text{ m/s}$ ，係於風洞進口端下游 3.5m、高度 51cm 處，所測得之參考速度，

**表示達到 1% 顯著水準，迫近流場之風速剖面如圖 8 所示。(19) 式中指數 α 值為 0.112，依據 Simiu (1986) 之研究，本實驗所模擬之地況介於平坦開闊之地面或草原至無障礙物之海岸地區，分散之障礙物高度小於 9m。

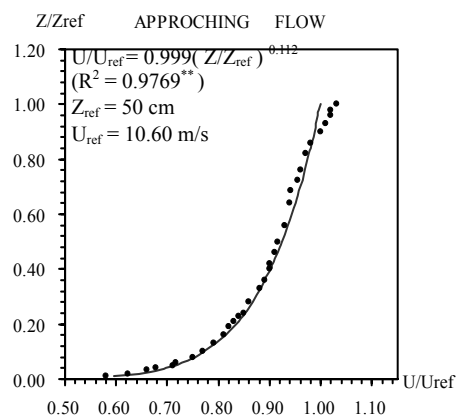


圖 8. 迫近流場之平均風速剖面圖

Figure 8. The mean velocity profile of approaching flow.

2. 風洞實驗之雷諾數：由於大氣邊界層的雷諾數高達 10^7 以上，因此要求風洞內的雷諾數與實際情況相同幾無可能。根據 Cermak (1981) 與 Snyder (1972) 實驗結果顯示，當雷諾數超過臨界值 10^4 時，紊流結構不受雷諾數大小的影響。本實驗之自由流風速為 10.60 m/s ，若以邊界層厚度 50 公分代表特徵長度時，當室溫於 25°C 的狀況下，計算所得之流體雷諾數為 3.4×10^5 ，高於臨界值；而改以模型高 6 cm 定為特徵長度時，計算所得之流體雷諾數為 4.1×10^4 ，亦高於臨界值，故可滿足雷諾數相似性之要求。

3. 模型之設計：實驗所用之模型共計三組，分別為防風牆、透風率 30% 之防風柵 (間隙比 $b/H = 0.0875$) 及下疏 (30%) 上密 (0%) 之防風柵等，係採用高 6 cm，厚 0.2 cm，寬 59.5 cm 之壓克力板黏合而成。

4. 風速採樣點之設計：流場量測時，風速採樣點之位置於主流向 (X 向)，防風柵模型

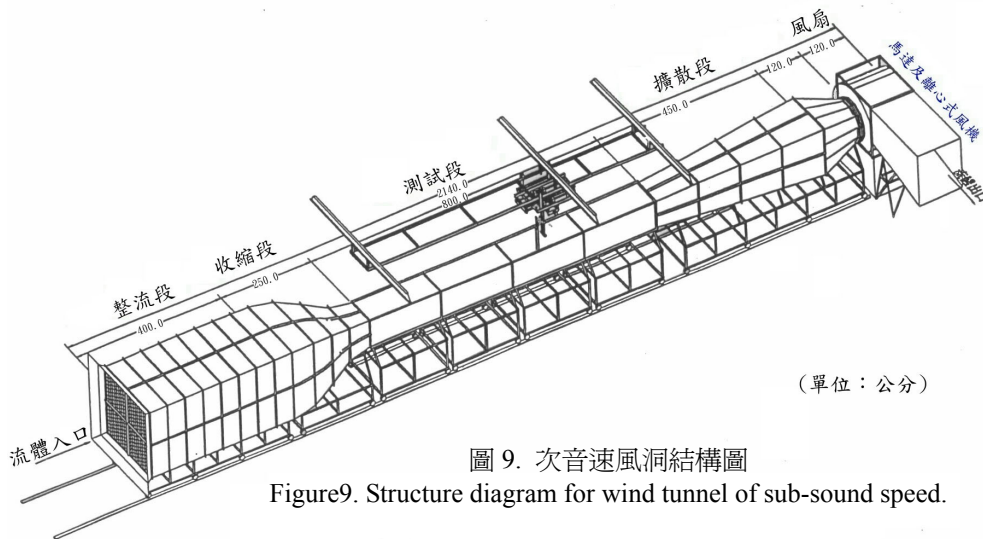


圖 9. 次音速風洞結構圖
 Figure 9. Structure diagram for wind tunnel of sub-sound speed.

(高度 H) 之中央算起，在其上游面 $X/H = -4$ 、 -2 及下游面 $X/H = 0.1$ 、 1 、 2 、 3 、 6 、 9 、 12 、 15 、 18 、 21 、 25 、 30 處，共設置 14 個量測剖面；而於每個剖面之垂直方向，從底部至 7.5 倍柵高，則共設置 36 個量測點。

結果與討論

本研究首先以三組模型及一組空流場從事風洞實驗，驗證數值模式之可行性。而後以三組數值研究個案，探討防風柵間隙均勻配置對防風功效之影響；接著再探討防風柵間隙不均勻配置對防風功效之影響，並與防風牆、防風柵之數值模擬結果加以比較；最後則是從事防風柵間隙最佳化配置之探討，以獲得防風柵間隙配置之設計準則與指標。

一、模式驗證

本研究驗證所用之數值模式其環境參數設定與風洞實驗相同，包括雷諾數、邊界層厚度比、指數率(Power law)之指數等。模式中使用次網格紊流模型來模擬小尺度之渦流，經由不同的 C_s 值 (Smagorinsky 常數) 測試比較後，獲得 C_s 等於 0.238 時，所得之資料與風洞實驗值最為吻合。將風洞實驗與數值模擬之相對風速剖面相互比較，四組個案之驗證結果大致相同，茲將其中疏密型防風柵之比較，以圖 10 表示，由圖

10 得知，二者結果相當接近，證實數值模式之準確性及可行性。

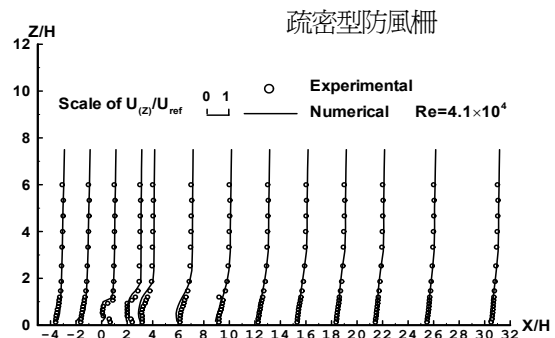


圖 10. 風洞實驗與數值計算之風速剖面比較
 Figure 10. Profile comparison of wind speed between wind tunnel experiment and numerical simulation.

二、間隙均勻配置對防風功效之探討

(一) 保護指數之比較

將計算所得之結果加以彙整，繪成速度等值圖，如圖 11 所示。由圖 11 中得知，三種不同間隙配置之研究個案，其風速的分布並不相同，為能更進一步比較彼此間的差異，因此依據 Van et al. (1964) 的方法，將圖 11 量化成保護指數(Protection index, P.I.)作為防風效果的指標，其定義如下：「防風柵背面風某等速線下所涵蓋之面積」，並將結果列於表 1 中，由表 1 得知，八塊柵板及十六塊柵板之配

置，在低風速區域 0.1 及 0.3 等速線下的減風效果最為理想；而四塊柵板數之配置，則在較高風速區域 0.5 等速線下的保護指數最大；因此，若保護的對象，著重於低風速區，建議採用較多柵板數的防風柵作為保護設施，而對低風速區域並不特別需求時，則建議採用較少柵板數的配置來增加保護範圍。

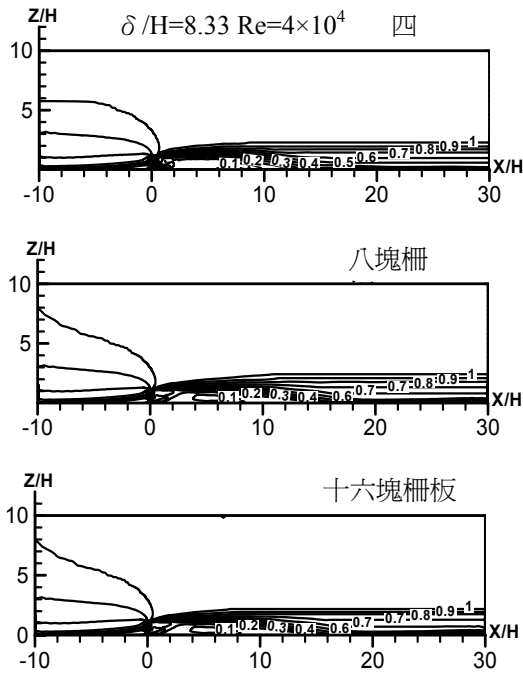


圖 11. 防風柵不同柵板數均勻配置速度等值圖
Figure 11. Equivalent-velocity diagrams of the windbreak fence distributed evenly with different bars.

為能進一步瞭解，柵板間隙大小對保護指數之影響，因而再對各組間隙後方 0.5 等速線以上之強風區面積進行量化，結果在四塊、八塊及十六塊柵板數分別獲得其值為 $0.4955 H^2$ 、 $0.1010 H^2$ 及 $0.0523 H^2$ ，由此可知間隙較大時，其後方強風區域明顯較大，此現象將是影響整個流場分布及迴流區向後推移之關鍵因子。

(二) 流場之比較

將資料描繪成流線圖，如圖 12 所示，由圖 12 中得知，不同柵板數配置之防風柵，其迴流區形狀皆屬於扁長形；柵板數愈多，對於穿透其間

表 1. 防風柵不同柵板數均勻配置之保護指數
Table 1. P.I. of the windbreak fence disposed evenly with different bars.

相對風速值	防風柵柵板數		
	四塊	八塊	十六塊
0.1	9.01	9.44	9.75
0.3	15.09	15.67	14.92
0.5	24.83	22.97	22.38

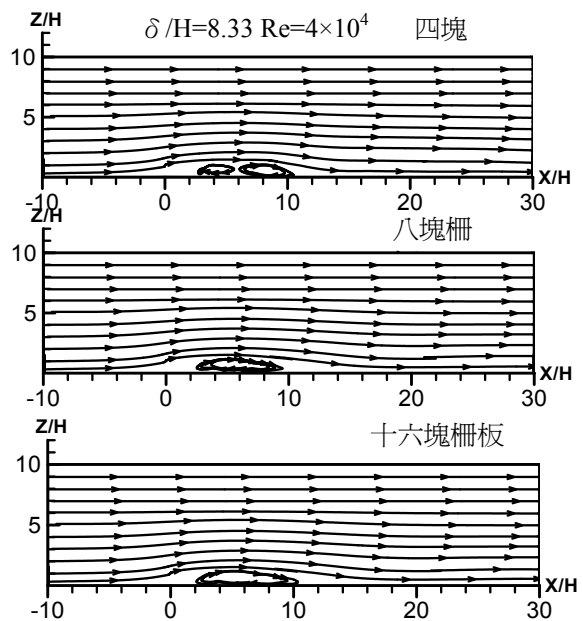


圖 12. 防風柵不同柵板數均勻配置流線分布圖
Figure 12. Instantaneous streamline diagrams of the windbreak fence distributed evenly with different bars.

的氣流產生壅塞的現象，使得較多的氣流越過防風柵，而形成較厚實的迴流區，其高度約為 $1.4H$ ；柵板數愈少，則穿透柵板間隙的氣流愈多，不但形成分離式的迴流區，而且形狀較為扁平，其高度約為 $1.05H$ 。由此可知射流將是影響防風柵迴流區分佈型態的重要因子，柵板數愈少，間隙比愈大，射流愈強，則迴流區愈扁平；柵板數愈多，間隙比愈小，射流愈弱，則迴流區愈厚實。

三、間隙不均勻配置對防風功效之探討

(一) 保護指數之比較

將計算所得之結果加以彙整，繪成速度等值圖，如圖 13 所示。由圖 13 中得知，疏密型配置之防風柵，其功效明顯優於其他配置方式，為能更進一步瞭解彼此間的差異，同樣將圖 13 量化成保護指數 (P.I.)，並將結果列於表 2 中。由表 2 得知，疏密型配置的防風柵，具有最大的保護指數，在 0.1、0.3 及 0.5 等速線下之保護指數，分別為 14.32、19.75 及 27.13，明顯高於其他組配置方式；而密疏型防風柵其防風功效遜於均勻型防風柵，由此可知此種配置方式並不理想；又不可透風式防風柵其防風功效最差，平均保護指數約為疏密型 60%。

表 2. 防風柵間隙不均勻配置之保護指數
Table 2. P.I. of the windbreak fence not disposed evenly with different types.

相對 風速值	防風柵型式			
	防風牆	均勻型	密疏型	疏密型
0.1	7.89	9.75	8.13	14.32
0.3	11.87	14.92	13.11	19.75
0.5	18.83	22.38	19.97	27.13

(二) 流場之比較

將資料描繪成流線圖，如圖 14 所示，由圖 14 中得知，防風柵間隙不均勻配置，對流場迴流區之形狀影響很大；在不透風式防風柵下游面形成一高而短的迴流區，高度約 1.4H，長度約 0H~5.74H；而在均勻型配置之防風柵，其迴流區高度與防風柵相同，但長度為防風柵之 1.5 倍，約 2.5H~11.13H，此係由於穿透防風柵間隙之氣流，將迴流區往下游推移，使得防風柵的迴流區較防風柵長。

又密疏型配置之防風柵，迴流區高度約 1.15H，係 4 組研究個案中最低者，長度約 0H~9.64H，為均勻型之 1.2 倍；而防風功效顯著之疏密型配置，其迴流區最為寬廣，高度約 1.5H，長度約 0H~15.46H，為防風柵之 2.7 倍，由於此種配置，其上部柵板較密，導致較多氣流越過柵頂，並形成一分離剪力層，又因其底部射

流效應之影響，氣流遞補充足，所以將迴流區向後推長及向上抬升，形成高而長的形狀，致使其保護效果最佳。

四、間隙最佳化配置對防風功效之探討

(一) 保護指數之比較

同樣將計算所得之結果加以彙整，描繪成速度等值圖，再將速度等值圖予以量化成保護指數 (P.I.)，並將結果列於表 3~4 中，以進一步瞭解彼此間的差異。由表 3~4 得知，在四種配置中，以 D 型配置之防風效果最佳，B 型次之，C 型第三，而 A 型最差；在 12 組研究個案中，又以 D-3 型配置其防風功效最為顯著，在 0.1、0.3 及 0.5 等速線下之保護指數分別為 14.49H、21.33H 及 30.91H，比間隙均勻配置 (十六塊柵板) 之防風柵，高出約 38%，此種配置可作為防風柵規劃設計之準則與指標。

表 3. A 及 B 型防風柵之保護指數

Table 3. P.I. of the A and B type windbreak fence.

相對 風速值	防風柵型式					
	A-1	A-2	A-3	B-1	B-2	B-3
0.1	7.44	4.77	3.68	7.78	9.24	12.39
0.3	13.05	9.06	8.12	13.83	14.26	20.66
0.5	21.85	19.85	19.02	21.55	23.77	28.37

(二) 流場之比較

將資料描繪成流線圖，如圖 15~16 所示，由圖 15~16 中得知，在 12 組研究個案中，D 型配置之迴流區最為寬廣，尤其 D-3 型更為顯著；A 型配置之迴流區，隨下部透風率減少而上部透風率增加，其迴流區範圍亦隨之縮減；C 型配置也有相同的趨勢，但較不明顯；而 B 型與 D 型配置之迴流區，則是隨下部透風率增加而上部透風率減少，其迴流區範圍隨之擴增，此趨勢 D 型又較 B 型明顯。

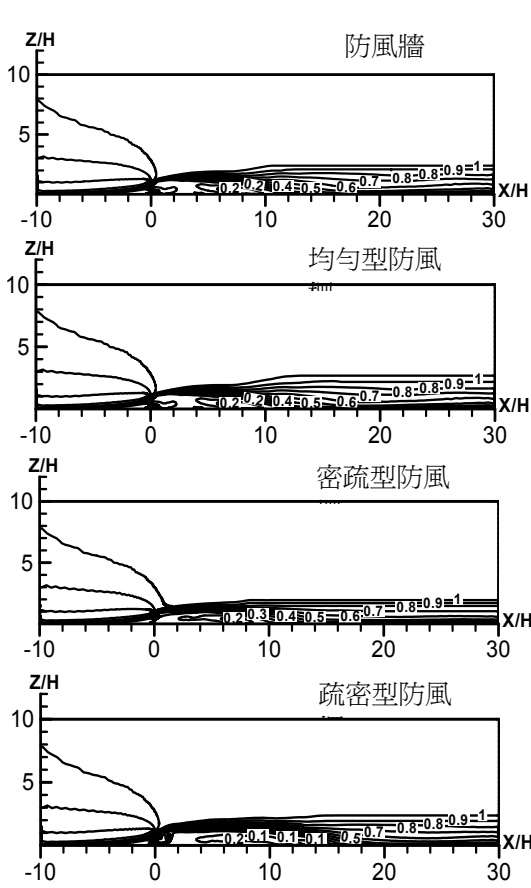


圖 13. 防風柵間隙不均勻配置之速度等值圖
Figure 13. Equivalent-velocity diagrams of the windbreak fence not distributed evenly with different types

表 4. C 及 D 型防風柵之保護指數
Table 4. P.I. of the C and D type windbreak fence

相對 風速值	防風柵型式					
	C-1	C-2	C-3	D-1	D-2	D-3
0.1	8.81	8.77	8.56	9.25	9.93	14.49
0.3	14.33	13.63	13.63	14.59	15.06	21.33
0.5	21.92	22.28	20.96	21.64	24.06	30.91

結論與建議

本文是以數值方法為主，風洞實驗為輔，從事防風柵透風間隙配置對防風功效之研究，文中之討論係以平均流場為基礎，所獲致的結果可作為爾後一般性設計之準則與指標。茲將研究結果與建

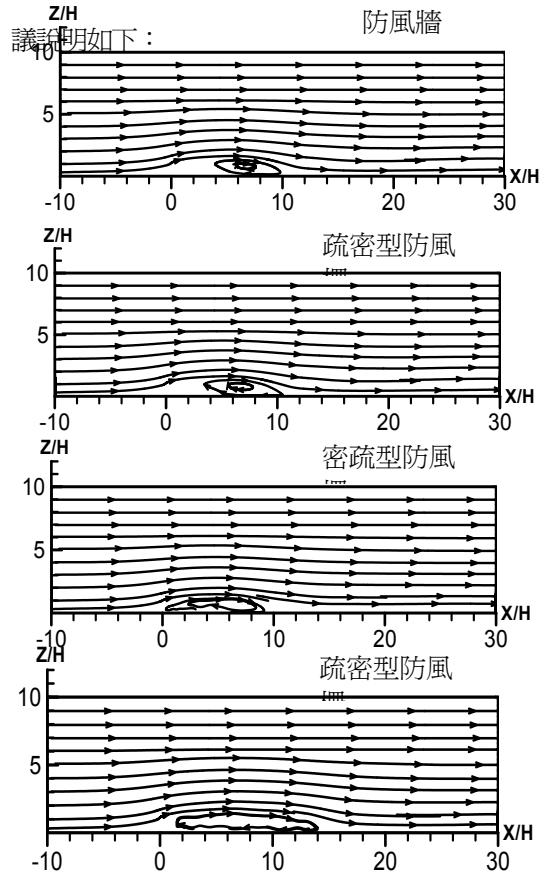


圖 14. 防風柵間隙不均勻配置之流線分布圖
Figure 14. Instantaneous streamline diagrams of the windbreak fence not distributed evenly with different types.

1. 防風柵間隙均勻配置時，間隙大者較間隙小者更具防風功效，其保護指數 (P.I.) 達 $24.83H^2$ 。
2. 防風柵間隙不均勻配置時，若間隙之配置從底部至頂部逐漸加密，可獲得較佳之防風功效，保護指數達 $27.13H^2$ 。
3. 防風柵間隙最佳化之配置，由底部 $0.5H$ 範圍內將透風率固定為 30%，而頂部 $0.5H$ 範圍內透風率設定為零，保護指數高達 $30.91H^2$ ，其防風功效較間隙均勻配置（十六塊柵板）之防風柵，提高約 38%，此種配置可作為防風柵規劃設計之準則與指標。
4. 本研究係以二維數值模式進行模擬，但在

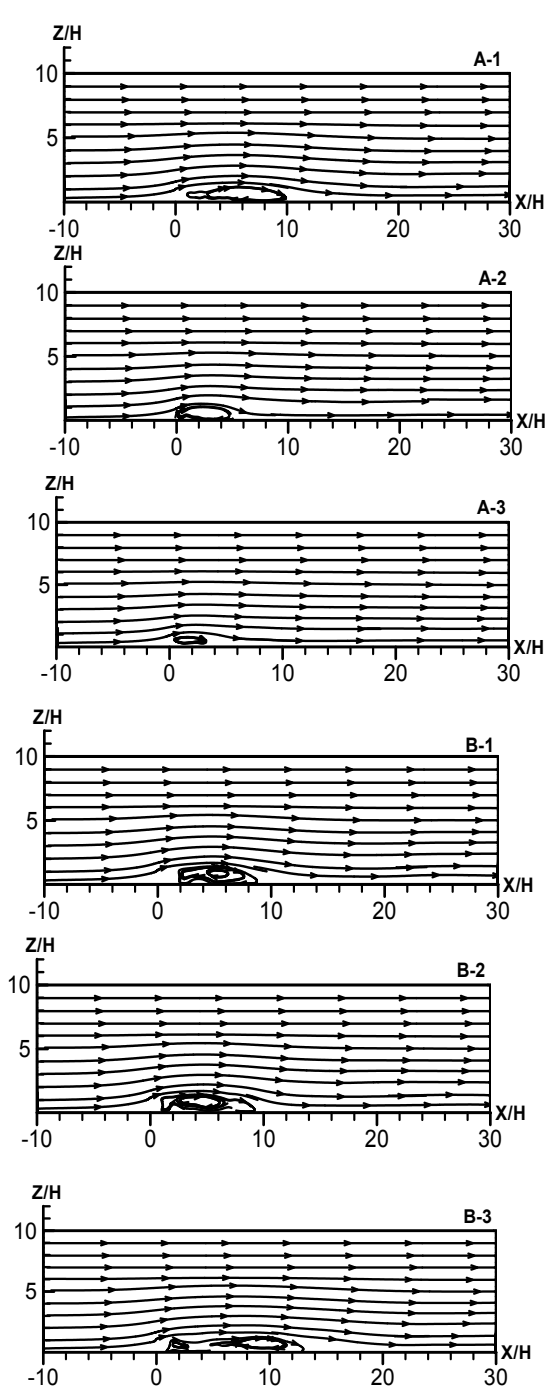


圖 15. A 及 B 型防風柵之流線分布圖
 Figure 15. Instantaneous streamline diagrams of the A and B type windbreak fence.

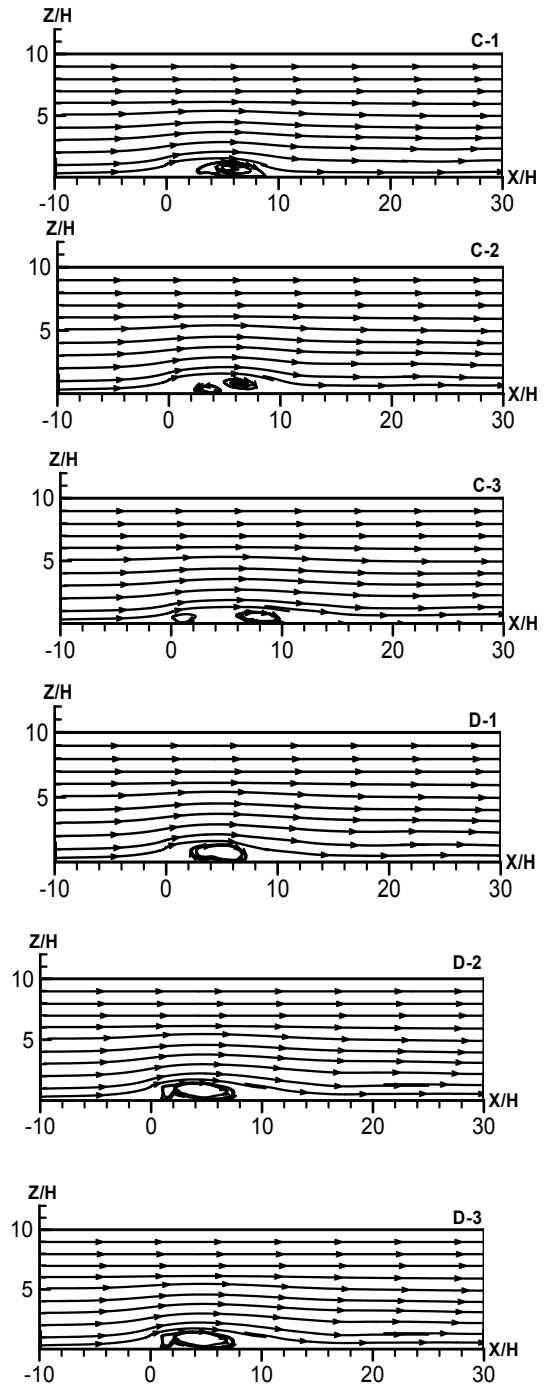


圖 16. C 及 D 型防風柵之流線分布圖
 Figure 16. Instantaneous streamline diagrams of the C and D type windbreak fence.

電腦速度日益增快下，建議可從事三維數值模擬，以期獲致更接近實際流場之數值資料。

5. 經由風洞及數值模擬證實，最佳化配置之防風柵可有效提高防風功效，然而尚缺實際應用之佐證，建議爾後能從事現地實驗，加以驗證。

參考文獻

1. 王玉懷、莊文斯（1995）「台灣附近海域風場之觀測及探討」，氣象學報，41(2)：81~90。
2. 王浩中（1996）「防風構造物防鹽功效之風洞試驗」，國立中興大學水土保持研究所碩士論文。
3. 邱啓芳（1987）「海岸防風林與防風牆之防風防鹽功效比較實驗」，國立中興大學水土保持研究所碩士論文。
4. 黃隆明（1989）「防風網型式對防風功效之研究」，國立中興大學水土保持學系碩士論文。
5. 黃隆明、江永哲（1989）「澎湖海岸防風構造物之探討(Ⅲ) 砗磲石防風牆對防風及防鹽功效之研究」，國立中興大學農林學報，38(1)：31-48。
6. 黃隆明（1997）「不透風式構造物之防風功效研究」，國立中興大學水土保持學系博士論文。
7. 劉衍淮（1958）「台灣氣團之性質」，氣象學報，7(4)：1~6。
8. 三原義秋、谷 信輝（1952）「防風牆 機能 關風 研究」，日本農業氣象，7(2)：7-8。
9. 谷 信輝（1952）「防風牆 機能 關風 研究，模型防風牆 風洞實驗(1)」，日本農業氣象，7(2)：15-17。
10. 谷 信輝（1952）「防風牆 機能 關風 研究，模型防風牆 風洞實驗(2)」，日本農業氣象，7(2)：56-58。
11. 真木太一（1982）「防風網關風 研究(5) 風洞實驗 連網 空氣力學的減風特性」，日本農業氣象，38(2)：161-170
12. Armitt, J. and Counihan, J. (1968) "The Simulation of the Atmospheric Environment," Atmospheric Environment, Vol. 2, pp.49-71.
13. Cermak, J. E. and Peterka, J. A. (1974) "Simulation of Atmospheric Flows in Short Wind Tunnel Test Sections," Center for Building Technology, IAT, National Bureau of Standard Was Hington, D. C., June.
14. Cermak, J. E. (1981) "Wind Tunnel Design for Physical Modeling of Atmospheric Boundary Layers," Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol. 107, No. EM3, pp. 623-642.
15. Counihan, J.(1970) "An Improved Method of Simulated Atmospheric Boundary Layer," Atmospheric Environment, Vol. 4, pp.159-275.
16. Counihan, J. (1973) "Simulation of an Adiabatic Urban Boundary Layer in a Wind Tunnel," Atmospheric Environment, Vol. 7, pp.673-689.
17. Courant, R., Friedrichs, K. O. and Lewy, H. (1967) "On the Partial Differential Equations of Mathematical Physics," IBM Journal, pp.215-234.
18. Fang, Fuh-Min (1989) "Flow Characteristics in Three-Dimensional Channel Contractions," Ph. D. Dissertation, University of Minnesota, USA.
19. MacCormak, R.W. (1969) "The Effect of Viscosity in Hyper-Velocity Impact Cratering," AIAA PAPER, NO.69-354.
20. Rae, W. H. J. and Pope, A. (1984) "Low Speed Wind Tunnel Testing," John Wiley and

- Sons, Inc.
21. Simiu, E. and R. H. Scanlan (1996) "Wind effect on structures," 3rd edition, John Wiley and Sons, Inc. New York, pp. 39-52.
22. Smagorinsky, J. (1963) "General Circulation Experiments with the Primitive Equations," Month Weather Review, Vol. 93, No. 99, pp.99-163.
23. Song, C.C.S. and M. Yuan (1988) "A Weakly-Compressible-Flow Model and Rapid Convergence Methods," Journal of Fluids Engineering, ASME Trans., pp.441~455.
24. Snyder, W. H. (1972) "Similarity Criteria for the Application of Fluid Models to the Study of Air Pollution Meteorology," Boundary Layer Meteorology, Vol. 3, pp.113-134.
25. Standen, N. M. (1972) "A Spire Array for Generating Thick Turbulent Shear Layers for Nature Wind Simulation in Wind Tunnels," Rep. LTRLA-94, National Aeronautical Establishment, Ottawa, Canada.
26. Van, E. J. Karschon, R. Razumova, L. A. and Roberts, G. W. (1964) "Windbreaks and Shelterbelts," W. M. O. Technical note 59, pp.5-21.
-

93 年 07 月 25 日 收稿

93 年 08 月 23 日 修改

93 年 09 月 05 日 接受