

植栽降低都市環境強風之 效果評估與設計原則研究

(期末報告)

內政部建築研究所協同研究報告

中華民國 108 年 12 月

(本報告內容及建議，純屬研究小組意見，不代表本機關意見)

植栽降低都市環境強風之 效果評估與設計原則研究

(期末報告)

研究主持人：陳建忠

協同主持人：方富民

研 究 員：鍾政洋

研 究 助 理：李冠儒
張人傑

研究期程：中華民國 108 年 3 月至 108 年 12 月

內政部建築研究所協同研究報告

中華民國 108 年 12 月

(本報告內容及建議，純屬研究小組意見，不代表本機關意見)

目次

圖次	III
表次	V
摘要	VII
第一章 緒論	1
第一節 研究動機.....	1
第二節 研究目的.....	3
第三節 典型分析方法比較	4
第四節 研究內容與程序.....	5
第二章 理論背景與相關研究	9
第一節 地表風場特性.....	9
第二節 氣流通過樹後的風場行為	12
第三節 相關研究.....	14
第四節 行人風場評估標準與方式	17
第三章 風洞試驗	23
第一節 實驗設施配置與設備	23
第二節 模型製作.....	27
第三節 試驗結果.....	32
第四章 數值模擬與排樹減風探討	37
第一節 數值方法.....	37
第二節 樹冠風力參數之探求	41
第三節 真實情況排樹減風效果之模擬與檢討	46
第五章 植栽減風與行人舒適度評估	63
第一節 植栽對建築物鄰近區域地面強風之減風 效果.....	63
第二節 植栽對建築區行人舒適度影響之評估	68

第六章 研究成果與檢討	75
第一節 研究成果.....	75
第二節 問題檢討與對策.....	77
第七章 結論與建議	79
第一節 結論.....	79
第二節 建議.....	80
附錄一 採購評選會議意見與回應	81
附錄二 期中報告審查意見與回應	85
附錄三 第一次專家座談會議意見與回應	91
參考文獻	95

圖次

圖 1-1 三個選定樹種典型照片圖	5
圖 1-2 研究流程圖	8
圖 2-1 不同地況下平均風速隨高度之變化示意圖	9
圖 2-2 方形實心物體情況瞬間渦度圖	12
圖 2-3 方形孔隙物體情況瞬間渦度圖	12
圖 2-4 方形實心物體情況平均風速變化圖	13
圖 2-5 方形孔隙物體情況平均風速變化圖	13
圖 3-1 建研所循環式大氣邊界層風洞性能	24
圖 3-2 熱線流速儀設置圖	25
圖 3-3 Cobra 探針照片圖	25
圖 3-4 移動機構照片圖	26
圖 3-5 台灣欒樹模型外觀	27
圖 3-6 樹形符號說明圖	28
圖 3-7 瓊崖海棠模型外觀	28
圖 3-8 阿勃勒模型外觀	29
圖 3-9 樹冠輪廓說明圖	30
圖 3-10 樹冠密度參考值對照圖	30
圖 3-11 試驗來流縱向風速剖面圖	32
圖 3-12 台灣欒樹樹後量測平均風速剖面 ($x/H=3$)	33
圖 3-13 台灣欒樹樹後量測平均風速剖面 ($x/H=4.5$)	33
圖 3-14 瓊崖海棠樹後量測平均風速剖面 ($x/H=2.5$)	34
圖 3-15 瓊崖海棠樹後量測平均風速剖面 ($x/H=4$)	34
圖 3-16 阿勃勒樹後量測平均風速剖面 ($x/H=2.5$)	35
圖 3-17 阿勃勒樹後量測平均風速剖面 ($x/H=4$)	35
圖 4-1 台灣欒樹計算網格圖	40
圖 4-2 台灣欒樹情況預測平均相對誤差之變化	41
圖 4-3 瓊崖海棠情況預測平均相對誤差之變化	42
圖 4-4 阿勃勒情況預測平均相對誤差之變化	42
圖 4-5 台灣欒樹樹後平均風速剖面模擬結果 ($x/H=3$)	43
圖 4-6 台灣欒樹樹後平均風速剖面模擬結果 ($x/H=4.5$)	43
圖 4-7 瓊崖海棠樹後平均風速剖面模擬結果 ($x/H=2.5$)	44

圖 4-8 瓊崖海棠樹後平均風速剖面模擬結果 ($x/H=4$)	44
圖 4-9 阿勃勒樹後平均風速剖面模擬結果 ($x/H=2.5$)	45
圖 4-10 阿勃勒樹後平均風速剖面模擬結果 ($x/H=4$)	45
圖 4-11 台灣欒樹排樹地面高 2 公尺處風速等值圖 ($H=6$ m)	47
圖 4-12 台灣欒樹排樹地面高 2 公尺處風速等值圖 ($H=9$ m)	48
圖 4-13 台灣欒樹排樹地面高 2 公尺處風速等值圖 ($H=12$ m)	49
圖 4-14 瓊崖海棠排樹地面高 2 公尺處風速等值圖 ($H=6$ m)	50
圖 4-15 瓊崖海棠排樹地面高 2 公尺處風速等值圖 ($H=9$ m)	51
圖 4-16 瓊崖海棠排樹地面高 2 公尺處風速等值圖 ($H=12$ m)	52
圖 4-17 阿勃勒排樹地面高 2 公尺處風速等值圖 ($H=6$ m)	53
圖 4-18 阿勃勒排樹地面高 2 公尺處風速等值圖 ($H=9$ m)	54
圖 4-19 阿勃勒排樹地面高 2 公尺處風速等值圖 ($H=12$ m)	55
圖 4-20 不同樹高台灣欒樹後斷面平均地面風速變化圖	56
圖 4-21 不同樹高瓊崖海棠樹後斷面平均地面風速變化圖	57
圖 4-22 不同樹高阿勃勒樹後斷面平均地面風速變化圖	58
圖 4-23 不同間距樹後斷面平均地面風速變化圖 ($H=6$ m).....	60
圖 4-24 不同間距樹後斷面平均地面風速變化圖 ($H=9$ m).....	61
圖 4-25 不同間距樹後斷面平均地面風速變化圖 ($H=12$ m).....	62
圖 5-1 風域中矩形斷面建築物簡圖	63
圖 5-2 無植栽情況矩形建築物地面 2m 高處風速等值圖	63
圖 5-3 矩形建築物上游配置排樹簡圖	64
圖 5-4 排樹植栽情況矩形建築物地面 2m 高處風速等值圖	64
圖 5-5 再增加植栽情況矩形建築物地面 2m 高處風速等值圖	65
圖 5-6 風域中雙方形斷面建築物簡圖	65
圖 5-7 無植栽情況雙方形建築物地面 2m 高處風速等值圖	66
圖 5-8 雙方形建築物上游配置排樹簡圖	66
圖 5-9 植栽情況矩形建築物地面 2m 高處風速等值圖	67
圖 5-10 再增加植栽情況矩形建築物地面 2m 高處風速等值圖	67
圖 5-11 方形建築物四周排樹配置簡圖	68
圖 5-12 典型風向情況方形建築物區內地地面風速等值圖	69
圖 5-13 植栽後典型風向情況方形建築物區內地地面風速等值圖 ...	70
圖 5-14 植栽前後建築物區行人風等級空間分佈比較圖	72

表次

表 1-1 近十年典型植栽防風相關會議	1
表 1-2 三個選定樹種特徵表	5
表 2-1 本國規範中大氣邊界層 α 與 δ 之建議值	10
表 2-2 大氣邊界層 α 、 δ 與 Z_0 之建議值	11
表 2-3 k- ϵ 紊流模型樹冠部份之源項	16
表 2-4 西安大略大學研究團隊建議的行人風評估標準	18
表 2-5 APPERLEY 與 VICKERY 建議的行人風評估標準	18
表 2-6 RWDI 建議的行人風評估標準	19
表 2-7 住宅區行人風評估標準	20
表 2-8 國際間其他建議之行人風評估標準	21
表 3-1 三個選定樹種模型尺寸表	29
表 5-1 台北市各風向之平時風速的韋伯機率參數	71
表 5-2 植栽前後建築物區行人風舒適度等級範圍比較表	73
表 6-1 具有與本研究典型樹種類似樹冠特性的台灣原生植物分類	78

摘 要

關鍵詞：景觀樹、防風效果、數值模擬、風洞試驗

一、研究緣起

建築區中栽種景觀樹及行道樹有助於景觀之調和兼具抗噪音的功效，對風場微氣候也有相當程度之影響，且在行人環境風場之改善上扮演著正面之角色。

當風吹襲樹木時，部份的氣流將穿過此等孔隙介質，故其挾帶的動量並未全然地受到阻擋。在評估都市建築中植栽對地面風速之影響時，傳統上多求諸於風洞試驗，除了需付出相對較高的成本、時間與人力外，亦有一些執行面的限制與技術面的困難待克服。另一方面，應用數值模擬的方法則不失為解析此類問題的另一研究方法，除了不具風洞試驗執行中的缺憾外，亦便於系統化的分析，以獲得完整之資料供風力設計之參考。於電腦軟硬體快速進步的現階段，應用數值模擬方法從事大區域的風環境模擬評估，在歐美與日本等先進國家已形成趨勢。然而，在執行數值模擬時，如何將樹的物理效應正確地反映在風場計算中則是關鍵。

在前期相關研究中，針對地面風通過植栽之數值模擬已有不錯之成果，但在群樹情況(如排樹)地面氣流之數值預測，則有待在模式上進一步的修正與精進。

二、研究方法及過程

本研究擬以過往相關單株植栽模擬研究之成果為基礎，首先針對風通過防風排樹的情況，經由風洞試驗量測資料之驗證，以建立足以準確模擬地面風場的數值模式，並擴展 CFD 在進行植栽防風效益分析的運用範疇。繼而，再藉都市建築典型配置情況地面風場之模擬，評估排樹的減風功能與效益，進而歸納出植栽減風設計的一般性原則，供爾後相關風力設計的重要參考。

本案研究內容規劃如後：

- (一)蒐集常見都市植栽規劃樹型，依據樹高、樹冠形態選擇 3 種常見樹種樹型進行研究。
- (二)在各種風向來流下，以風洞試驗量測不同植栽間距排樹後之風速場，作

為植栽樹木數值模式建置與模擬結果驗證之依據。

(三)針對都市建築常見配置之情況，系統化的進行風場模擬，進而探求植栽減風設計的一般性原則。

本研究預期目標為：

(一)建立風通過排樹後的數值模擬模式，以供日後都市環境微氣候數值模擬(CFD)之應用依據。

(二)量化排樹減風效果，歸納植栽減風設計原則，提供 3 種常見樹種樹型在不同間距排列狀況下之減風效益，俾供都市植栽防風之規劃設計參考。

三、重要發現

本研究重要發現如後：

- (1) 風通過排樹後，自下游約 0.8 倍樹高後之行人風速即有減少之現象，且於下游約 2 至 3 倍樹高處發生最大之減風效果，而此減風範圍可達下游十餘倍樹高的範圍。
- (2) 當排樹植栽間距之減小或樹高增加時，最大之減風效果可由約 10% 增加至 30%，而減風範圍甚至可延伸至 20 倍樹高的下游處。
- (3) 樹冠密度由大至小依序為台灣欒樹(%)、瓊崖海棠(75%)、阿勃勒(55%)。在緊鄰排樹後區域，三個樹種在樹後發生減風效果之差異相對地並不明顯。當排樹植栽間距減小或樹高增加時，其減風效果間之差異才漸顯著。
- (4) 研究中列舉了具有與本研究典型樹種類似樹冠特性的台灣原生植物(表 6-1)。在爾後相關的排樹植栽規劃時，可以參照表中選定之樹種，就分類歸屬找出相應減風效果之量化結果(圖 4-11 至圖 4-22)，以進行植栽減風之設計。
- (5) 針對風域中建築區塊的典型範例，以絕對評估法與相對評估法進行地面行人風減風效果之檢討顯示，適當之排樹植栽對區域內之行人風場都有相當之減風效果。此外，運用風速發生機率評估法的結果也顯示，排樹植栽對強風區域中行人舒適度亦有顯著之改善效果。

四、建議

建議一

辦理本研究成果之推廣說明會：立即可行建議

主辦單位：內政部建築研究所

協辦單位：社團法人中華民國風工程學會、中華民國全國建築師公會

為使本計畫之研究成果能立即為建築區植栽防風規劃與設計之應用，
可以辦理本研究成果之推廣說明會。

建議二

針對常見綠建築植栽樹種進行特性分類：中長期建議

主辦單位：農委會林務局、林業試驗所

協辦單位：社團法人中華民國風工程學會、中華民國全國建築師公會

研究中將「台灣原生植物圖鑑」中列舉之喬木，依據照片外觀進行樹冠密度了初步分類，以供排樹植栽減風設計規劃參酌之依據。建議辦理常見植栽樹種特性的相關研究，以確認本研究樹種分類之正確性。

第一章 緒 論

第一節 研究動機

建築區中栽種景觀樹及行道樹除了有助於景觀之調和外，對於區內風場微氣候也能有相當程度之影響，並在行人環境風場環境之改善上扮演著正面之角色。以台灣本島為例，沿海地帶的港區或工業區的開發(如台中港區、彰濱工業區)中，除了在上風處建構防風林或防風結構(防風牆、防風堤、防風柵、防風網等)外，於區內亦有排樹之設置，以期降低因冬季強烈季風吹襲而引起的行道風(pedestrian wind)問題。國內採用植栽進行建築區域防風或減風的案例愈漸普遍。研究初期盤點並整理國內近十年，各縣市都市發展局之都市開發審議會議及都市邊更計畫案，其相關議題詳表 1-1。

表 1-1 近十年典型植栽防風相關會議

民國(年)	相關開發案計畫書及都審會議
99	台北市南京東路三段地下捷運共構辦公大樓規劃案
100	宜蘭縣變更頭城都市計畫案
103	內政部擬定桃園國際機場園區及附近地區特定區計畫書
103	新北市都市計畫委員會第 44 次會議紀錄
104	台南市擬定北門都市計畫案
104	台北市都市更新審議會議紀錄第 223 次~235 次
105	台北市都市更新審議會議紀錄第 242 次~247 次
106	台北市都市更新審議會議紀錄第 263 次~279 次
106	台南市政府新吉工業區產業用地土地出售手冊
107	台北市都市更新審議會議紀錄第 310 次~325 次
107	台南市都市設計審議會議紀錄第 13 次~24 次
107	新竹縣第 482~505 次都市設計審議委員會會議紀錄
107	彰化縣變更大城都市計畫書
107	桃園市變更中壢平鎮都市擴大修訂計畫案
107	台中市變更大肚都市計畫主要計畫書
107	嘉義市美術館建築計畫案
108	台北市都市更新審議會議紀錄第 377 次~384 次
108	新北市都市計畫委員會第 97 次會議紀錄
108	新竹縣第 513~515 次都市設計審議委員會會議紀錄
108	台南市都市設計審議會議紀錄第 7 次~9 次

資料來源：本研究整理

其中典型者如 99 年台北市南京東路三段地下捷運共構辦公大樓規劃，在景觀植栽設計構想裡提到「植栽應能調節氣候、防風、遮蔭等效果」。103 年新北市都市計畫委員會第 44 次會議紀錄，擬定板橋都市計畫(埔墘地區垃圾處理廠用地)細部計畫案都市設計準則，在景觀植栽計畫中提到「考量現地自然環境，選擇具備防風特質之植栽種類」。有關 104 年台南市擬定北門都市計畫案，在都市設計準則的審議範圍及審議層級中述及「為避免冬季季風吹襲，影響計畫區內北側住宅區居住寧適，應挑選植種具防風功能樹種」。106 年新北市環境影響評估法規說明暨新北市環評作業，在推動綠色城市環評審議規範中述及「植栽樹穴設置應符合調節氣候、防風之本土樹種需求，並應定期維護且保持牢固」。106 年台南市新吉工業區廠商應遵守之環評承諾事項中亦包括「對於未來各分區綠化工作，需以自然生態立場為優先考慮，至於防風、防噪音等附加功能以及景觀美質亦應予以考量」。於 107 年彰化縣大城都市計畫變更案，在土地使用分區管制要點內提到「15 公尺以上計畫道路其兩側應植栽高度 2 公尺以上之喬木或防風樹種，其數量以平均每 6 至 8 公尺種植一棵為原則」。此外，107 年桃園市中壢平鎮都市擴大修訂計畫案中，在景觀計畫中亦敘明「植栽應注重於防風、遮陽及水土保持之功能」。107 年新竹縣第 506 次都市設計審議委員會會議紀錄，竹北市水瀧段 30 地號店鋪、集合住宅新建工程一案中委員提到「本案基地鄰兒 21 側綠帶設計單薄，恐冬季東北季風強烈，致行人無法駐足，建議加強綠帶設計並增加常綠型喬木，提供行人停留空間」。108 年臺南市都市設計審議委員會第 8 次會議紀錄中，「臺南市歸仁區武東段 92 等 1 筆地號集合住宅新建工程」都市設計審議案，委員提到「在風環境模擬中，是否加入植栽影響評估？」由此可知，在建築區內以植栽樹木進行防風或減風，在規劃與設計的階段已成為區域規劃考量中需重視的項目之一。然而，儘管過往區域規劃設計者深知植栽防風的重要性，但在景觀樹/行道樹設置的規劃上常因缺乏足夠的量化資料作為減風效果評估之依據，故設計時多未能準確掌握其成效。因此，將景觀樹/行道樹防風與減風的效果作系統化的探討，並歸納出具體的量化結果，以為爾後建築區景觀樹/行道樹設置規劃的重要參考，實為本研究的主要目標。

第二節 研究目的

本研究擬以過往相關單株植栽模擬研究之成果為基礎，首先針對風通過防風排樹的情況，經由風洞試驗量測資料之驗證，以建立足以準確模擬地面風場的數值模式，並擴展 CFD 在進行植栽防風效益分析的運用範疇。繼而，研究中將從事真實情況排樹後風場之模擬，評估相應地面的減風功能與效益，進而歸納出排樹植栽減風設計的一般性原則。

為了要瞭解在強風期間景觀樹/行道樹的設置對建築區域行人高度(距地面高 2 公尺高)內的減風效果，本研究針對國內常見之 3 種典型樹種樹型，以數值模擬(CFD)的方法進行系統化風場分析，據以量化在不同來風方向以及不同排樹間距下植栽排樹對地面之減風效果並歸納出減風設計原則，作為爾後建築區景觀樹/行道樹設置規劃的重要參考。

本案研究內容規劃如後：

- 1.蒐集常見都市植栽規劃樹型，依據樹高、樹冠形態選擇 3 種常見樹種樹型進行研究。
- 2.在各種風向來流下，以風洞試驗量測不同植栽間距排樹後之風速場，作為植栽樹木數值模式建置與模擬結果驗證之依據。
- 3.系統化的進行真實情況下排樹風場模擬，進而探求植栽減風設計的一般性原則。

研究之預期目標為：

- 1.建立風通過排樹後的數值模擬模式，以供日後都市環境微氣候數值模擬之運用依據。
- 2.量化排樹減風效果，歸納植栽減風設計原則，提供 3 種常見樹種樹型在不同間距排列狀況下之減風效益，俾為都市植栽防風之規劃設計參考。

第三節 典型分析方法比較

當風吹襲樹木時，部份的氣流將穿過此類孔隙介質(porous media)，故其挾帶的動量並未全然地受到阻擋。以流體力學的觀點來看，其相應的風場形態與風通過透式的防風柵或防風網類似。不過，柵與網或可視為幾乎無厚度，而樹木則具有三度空間的形狀，故在分析上的難度較高。

在風場分析階段，一般針對此類問題之風場評估多求諸於風洞試驗，除了需付出相對較高的成本、時間與人力外，亦會面臨風洞規模的與風場量測問題等限制。例如，在分析大區域的風場時，經縮尺後的樹木將過小而難以掌握其實質之存在程度。此外，在從事模型行道風場量測時除了需顧及局部風向以降低對風場之干擾程度外，風速探針亦將因過於靠近模型地面而難以執行有效的量測。相對地，考量風洞模型試驗在執行上面臨的限制與困難度，應用數值模擬的方法則不失為解析此類問題的另一研究工具，其優點不僅是可以更經濟地獲取更為完備之整場風力設計資料外，且不具前述在風洞試驗執行中的缺憾。然而，在執行數值模擬時，直接將樹的存在以極為細密的計算網格表現是不符合計算效率之經濟考量的。因此，如何將樹的物理效應適當地反映在風場計算中將是本研究的關鍵工作之一。

第四節 研究內容與程序

經參酌行政院農委會[1]、國立自然科學博物館[2]以及林務局林業試驗所[3]有關本國常見景觀樹/行道樹的資訊，並考慮樹種特徵的變異性，本研究選定了台灣欒樹、瓊崖海棠與阿勃勒等 3 個樹種作為探討的對象，其基本樹種特徵詳表 1-2[1-3, 8]。

表 1-2 三個選定樹種特徵表

樹種	台灣欒樹	瓊崖海棠	阿勃勒
原生種	○	○	×
成樹樹高(m)	15	20	15
成樹樹寬(m)	12	18	10
樹冠密度	80%	70%	55%
樹冠比	65%	55%	65%
5 年生長速度(m)	4.2	3.2	3.6

資料來源：[1-3, 8]

一、選定樹種基本特徵說明

三個樹種的典型外觀詳圖 1-1，相關基本特徵說明略述如後：

(a)台灣欒樹



(b)瓊崖海棠



(c)阿勃勒



圖 1-1 三個選定樹種典型照片圖

資料來源：[1-3]

(一) 台灣欒樹

台灣欒樹為台灣特有原生種，成樹的樹高可達 15 米，樹寬達 12 米，樹冠密度約 80%，樹冠比約 80%。本樹種常見於全島低海拔的闊葉林中，從北到南都有，在台灣最常被選擇為景觀樹、行道樹之用。

台灣欒樹屬於半落葉喬木(冬季期間落葉)，樹皮為灰褐色，葉片為二回羽狀複葉，形狀為前端尖之卵形，長約 60 公分，寬約 25 公分。

(二) 瓊崖海棠

瓊崖海棠為常綠喬木，也屬於台灣原生種，在台灣自北到南遍佈於低海拔的闊葉林中，其成樹的樹高可達 20 米，樹寬可達 18 米，樹冠密度約 70%，樹冠比約為 55%。本樹種為密葉樹木，質感粗，常用於公園及庭園之植栽，亦常作為近海岸防風林樹。瓊崖海棠的葉片為橢圓形狀，長約 15 公分，寬約 8 公分。

(三) 阿勃勒

阿勃勒並非台灣原生種，於 1645 年引進，在台灣普遍栽培公園及庭園。由於其枝葉較疏，可以與前述兩個樹種有所區隔，因此成為研究中 3 個選定典型樹種之一。阿勃勒為半落葉喬木，冬季落葉，成樹的樹高可達 15 米，樹寬可達 7 米，樹冠密度約 55%，樹冠比約 65%。葉柄為偶數羽狀複葉，小葉形狀為橢圓形，長約 14 公分，寬約 6 公分。

二、研究方法

在三個選定樹種相應減風效應的評估上，本研究採用風洞試驗與數值模擬兩個方法，以二者交互應用的方式進行風場分析。研究中首先進行風洞試驗以量測模型樹後的風速剖面以獲得風場模擬的比較驗證資料，繼而依據量測之結果決定出選定樹種的樹冠特性參數。待足以準確預測樹後風場的數值模式確立後，再針對真實情況下排樹之情況進行系統化的風場模擬，以獲得 3 個選定樹種從事減風效益之量化結果，並歸納出植栽減風設計的一般性原則。

(一) 風洞試驗

本部份的工作為樹後尾流區截面速度場量測，量測目標為樹體固定距離後垂直截面相應的風速剖面。模型樹係以台灣欒樹、瓊崖海棠與阿勃勒成樹

為基準製作而得，縮尺比例分別為 1/50、1/67 與 1/50，高度為 30 公分。

(二) 數值模擬

在風場模擬上本研究採用微可壓縮流的 CFD 方法 (weakly-compressible-flow method，簡稱 WCF 法[9])。在數值模擬中係將枝葉的部份視為透式的孔隙介質，而於枝葉的計算格網中賦以適當之源項以反映出其實質之物理效應。

三、研究程序與步驟

本計畫各階段之工作內容與步驟概述如後：(參見圖 1-2 研究流程)

(一) 資料收集與理論整析

- (1)台灣常見景觀樹/行道樹相關資訊與樹種特性資料的蒐集。
- (2)近期國內採用植栽進行建築區域防風或減風案例與結論的蒐集整理。

(二) 風洞試驗

- (1)製作 3 個選定樹種的模型樹。
- (2)針對單株樹情況，量測樹後 2 個斷面之風速剖面，作為數值結果比較驗證與樹冠風力參數率定之依據。

(三) 數值模擬

- (1)針對風洞試驗中的個案情況，平行地進行數值風場模擬，並藉由數值預測與風洞量測樹後斷面風速剖面之比較，尋求三個選定樹種相應的樹冠風力參數。
- (2)待數值模式確立後，進行 3 個選定樹種的排樹在不同樹高與間距比改變下真實情況的風場計算。

(四) 資料分析與整合

- (1)將所有個案的樹後風場模擬結果進行分析，系統化地檢討樹後地面風速的衰減情形，並量化其衰減趨勢。
- (2)評估排樹的減風功能與效益，進而歸納出植栽減風設計的一般性原則。

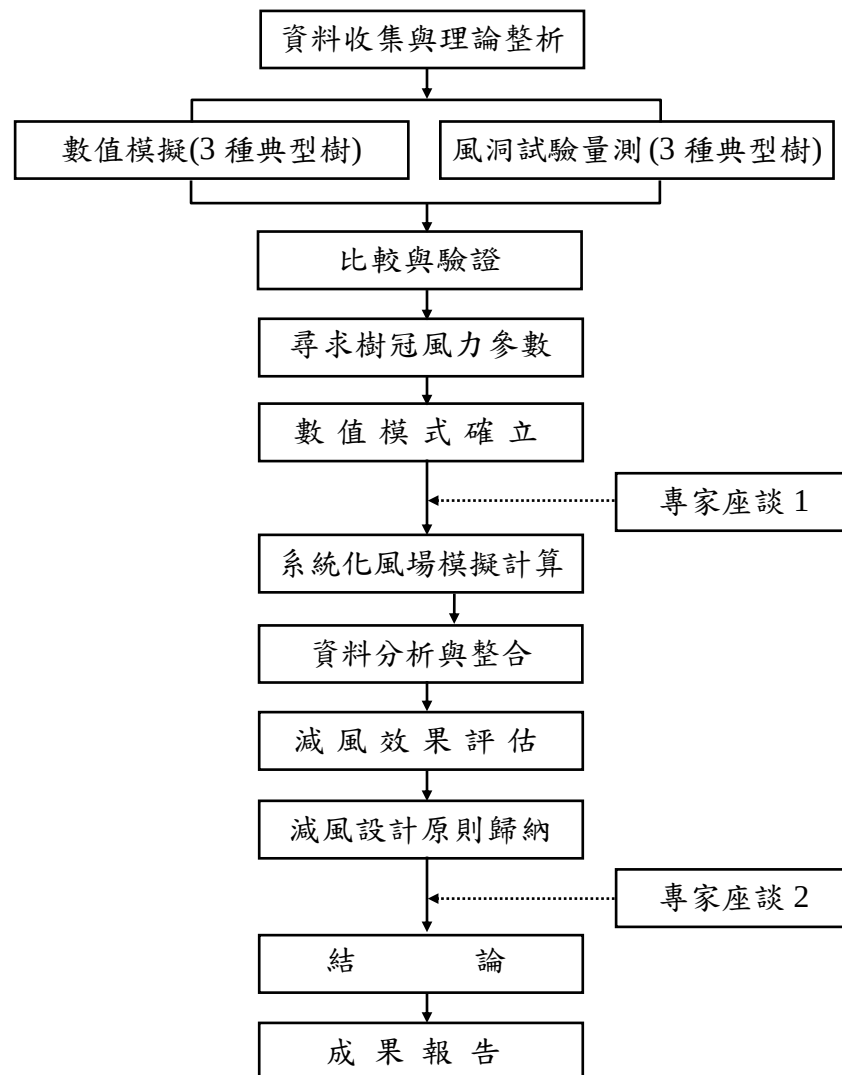


圖 1-2 研究流程圖

資料來源：本研究整理

第二章 理論背景與相關研究

第一節 地表風場特性

地表附近空氣的移動受到地面之起伏、建築物、林木作物分佈等磨擦作用的影響，使得平均風速隨高度而改變，形成了一個垂直分佈的剖面，愈接近地表風速愈慢，在地面風速為零(參見圖 2-1)。大氣風速剖面直接受到地表粗糙狀況之影響，而影響所及的範圍稱之為「大氣邊界層」，在邊界層頂部之風速通常稱之為梯度風速(gradient wind)。

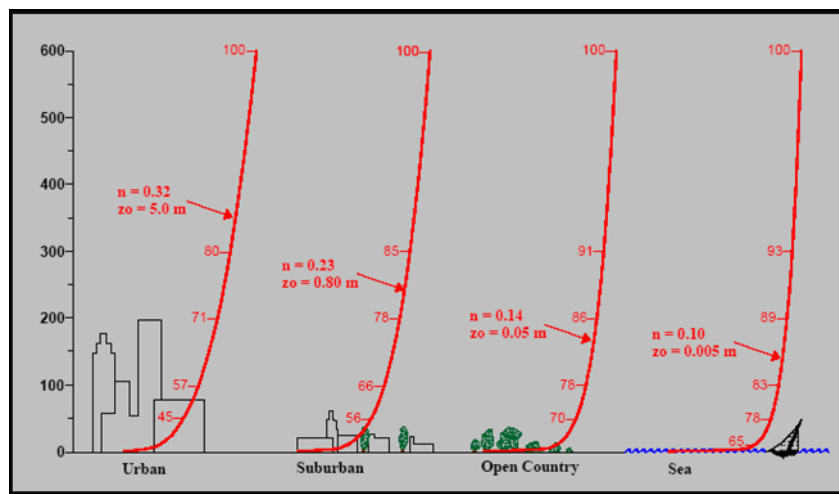


圖 2-1 不同地況下平均風速隨高度之變化示意圖

資料來源：本研究整理

一般風工程應用所涉及的問題大都發生在較強的風勢時，位於近地表以上數百公尺高度的大氣邊界層內。在強風的情況下，大氣紊流作用遠超過熱對流作用。由於氣流中紊流引致之混合趨向於形成中性層差，故本研究針對大氣邊界層之討論係於中性層差之大氣邊界層範圍內。

風速隨距地面高度增加而遞增，與地況種類有關。在風速的變化上方面，一般常引用指數律(power law)和對數律(logarithmic law)來描述大氣邊界層中的平均風速剖面：

一、指數律(power law)

大氣邊界層中水平向平均風速隨著高度的變化，以指數律表示為：

$$\frac{U(z)}{U_{\delta}} = \left(\frac{z}{\delta} \right)^{\alpha} \quad (2-1)$$

其中， U 為水平向之平均風速； z 為地表上之高度； U_{δ} 為梯度風速； δ 為大氣邊界層厚度； α 為大氣邊界層指數。在現行工程應用中假設 α 為定值之指數律適用於梯度高度 (δ) 內，而大氣邊界層厚度 (δ) 僅為指數 α 之函數。

現行本國「建築物耐風設計規範及解說」[4]中將地況分成如後三類：

- (1)地況 A：大城市市中心區，至少有 50%之建築物高度大於 20 公尺者。建築物迎風向之前方至少 800 公尺或建築物高度 10 倍的範圍(兩者取大值)屬此種條件下。
- (2)地況 B：大城市市郊、小市鎮或有許多像民舍高度(10~20 公尺)，或較民舍為高之障礙物分布其間之地區者。建築物迎風向之前方至少 500 公尺或建築物高度 10 倍的範圍(兩者取大值)，係屬此種條件。
- (3) 地況 C：平坦開闊之地面或草原或海岸或湖岸地區，其零星座落之障礙物高度小於 10 公尺者。

其中，各地況相應之大氣邊界層厚度(δ)與大氣邊界層指數(α)建議值如表 2-1 所示。

表 2-1 本國規範中大氣邊界層 α 與 δ 之建議值

地況	α	δ (m)
A	0.32	500
B	0.25	400
C	0.15	300

資料來源：[4]

二、對數律(logarithmic law)

愈接近地表處，其風速的擾動性愈高，解析描述也就愈加困難。在地表層(或稱之為常應力層)其剪應力值(τ_u)與地表面之剪應力值(τ_0)極為接近，且其

橫風向之風速分量極小。微氣象學研究的結果建議，在地表其平均風速剖面可以後式表示：

$$U(z) = \frac{1}{\kappa} u_* \ln \left(\frac{z}{Z_0} \right) \quad (2-2)$$

其中， $\kappa(0.4)$ 為 Von Karman 常數； u_* 為剪力速度(friction velocity)； z 為距地面高度； Z_0 為地表粗糙高度(roughness height)。式(2-2)即為通稱之對數律。實場量測結果指出，在強風之情況下，對數律之適用範圍可達數百公尺之高度。有關在不同地表情況下，前述討論之大氣邊界層各參數的建議值詳見表 2-2。

表 2-2 大氣邊界層 α 、 δ 與 Z_0 之建議值 (單位：m)

出處	Coastal Area			Open Terrain			Suburban Terrain		
	α	δ	Z_0	α	δ	Z_0	α	δ	Z_0
Davenport	—	—	—	0.16	275	—	0.28	400	—
ANSI	0.1	215	—	0.14	275	—	0.22	370	—
Cook, N. J	—	—	0.003-0.01	—	—	0.03-0.1	—	—	0.3
ESDU	—	—	—	—	—	0.02-0.1	0.26	—	0.2-0.6

資料來源：本研究整理

第二節 氣流通過樹後的風場行為

從流體力學的觀點來看，當氣流流經一個無孔隙的鈍體(bluff body)時，由於受到鈍體的檔而在下游處形成了一個弱風的遮蔽區，此即所謂的尾流(wake)區。一般而言，尾流區的寬度可為鈍體橫向寬的數倍，其縱向幅員甚至可延伸至鈍體橫向寬十幾倍以上的長度。

以均勻來流經過一個方形實心物體的情況為例，圖 2-2 顯示一個典型的瞬時流場。當氣流通過物體時部份的來流因受到阻檔而轉向，朝物體的兩邊側通過，並因為受到強烈大負壓力梯度的作用，於物體的兩個前緣發生分流(separation)。物體上下兩側的分流線續向下游延伸造成了鈍物體後方渦流(vortex)的產生。在物體上方與下方順時針與逆時針的渦流繼於物體後發生捲曲、交互影響而形成了尾流。當方形物體具有孔隙時，部份的氣流可以穿過物體並破壞了物體後方渦流的結構性(參見圖 2-3)，使得物體後渦流捲曲、交互影響的程度變弱。尾流區的寬度相對地較窄，但在縱向則有變長的趨勢。

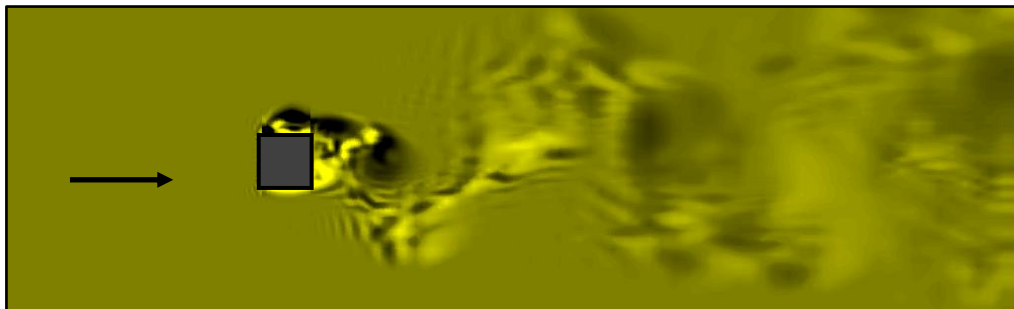


圖 2-2 方形實心物體情況瞬間渦度圖

資料來源：本研究整理

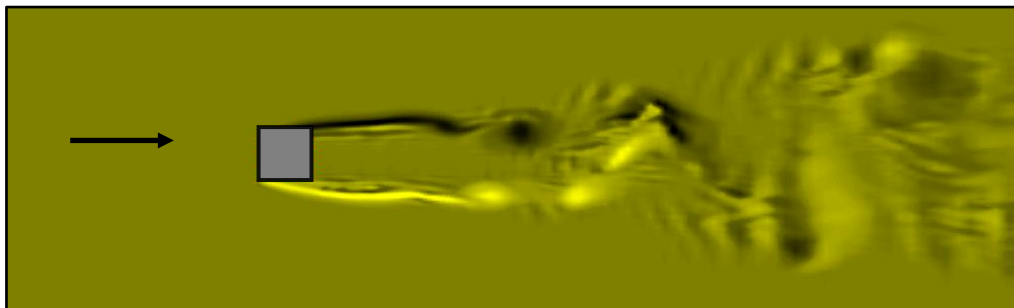


圖 2-3 方形孔隙物體情況瞬間渦度圖

資料來源：本研究整理

圖 2-4 與 2-5 顯示兩個情況下相應的平均風速等值圖。當物體為不可穿透之實心體時(圖 2-4)，其後方的尾流區中存在一個相對低速的分流囊(separation bubble)，而後之風速則沿著下游的方向自低速逐漸增加。另一方面，若物體因有孔隙而可以允許氣流穿透時(圖 2-5)，尾流(遮蔽)區的寬度變窄，且朝下游方向拉長。值得一提的是，在緊鄰物體後的區域中因有氣流穿過，與實心物體情況相比，其風速明顯偏高。

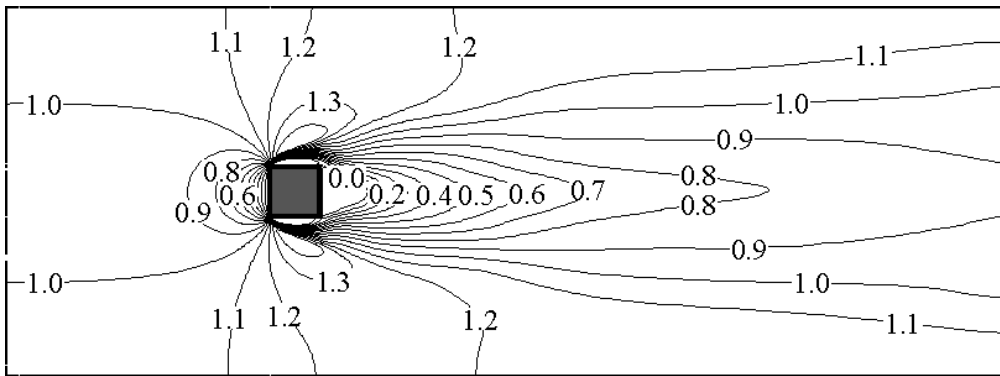


圖 2-4 方形實心物體情況平均風速變化圖

資料來源：本研究整理

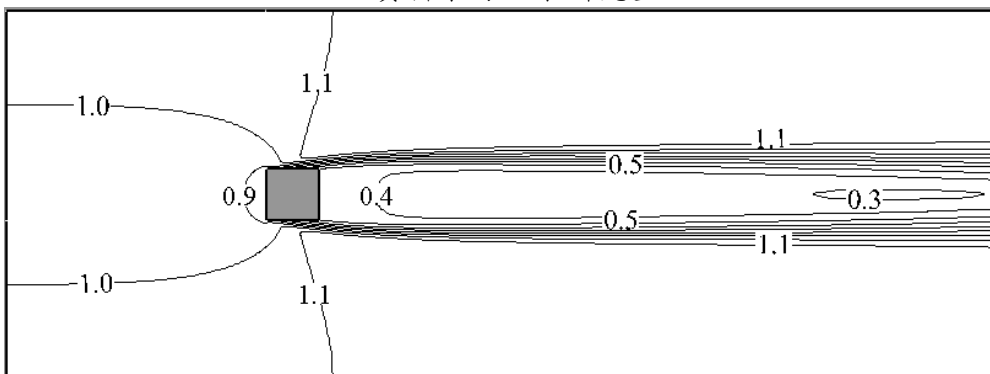


圖 2-5 方形孔隙物體情況平均風速變化圖

資料來源：本研究整理

第三節 相關研究

有關風流經樹的探討大多見於大氣與林務研究方面，主要關注於大區域群樹(森林)地形之微氣候與延散(dispersion)特性。基於群樹之分布特性，可將三維的流場問題轉換為二維甚至一維的巨觀問題，因而大幅地簡化了分析流場的複雜度。典型的研究如 Finnigan[10]述及，樹林區域的地面風場可大致區分為自地面起算 2 至 3 倍林木高度間之植被次層(canopy sublayer)與植被次層上方的表面次層(surface sublayer)。Raupach 等[11]經現地觀測植被次層的紊流特性後認為，植被次層中的流場應屬具混合層流(mixing layer flow)而非邊界層流(boundary layer flow)之形態。其他經由現地觀測資料而提出森林地區風速剖面之建議公式者如 Mihailovic 等[12]；經由風洞試驗而提出風速剖面之建議公式者如 Raupach 等[13]。此外，Massman[14]針對葉面積指數(leaf area index；LAI)作試驗分析，得到植被中 LAI 指標與風速剖面、地表剪應力、粗糙長度和零風面位移的關係。Novak 等[15]研究中指出，當同一區域存在的樹木數量改變時會造成森林中風場和紊流的變化，且由大尺度的渦流控制。Boldes 等[16]以試驗檢視不同孔隙率單層與雙層植物後方的紊流流場，結果發現遮蔽物後方產生混合層，而尾流區因受到大尺度渦流之作用而引致間歇性 bleed flow 的發生。Flesch 與 Wilson[17、18]以風洞試驗評估樹木之受風特性，並探討樹林對下游提供之保護區域大小及減風效果。國內方面，方德偉[5]亦應用風洞實驗提出透過樹林風速剖面之迴歸公式，並藉樹木疏密度和排列方式的改變檢視不同下風距離相應之平均風速和紊流參數，以瞭解其對森林中的尾流及森林之上混合層流的影響。

至於有關典型的數值模擬研究方面，Wilson 與 Flesch[19]採用二維數值模式探討通過森林之速度剖面變化，並與 Raynor[20]所量得之現場觀測結果比對後得到不錯的吻合度。Su 等[21]應用大渦流模擬 (large eddy simulation，LES)方法針對中性分層流(neutrally stratified flow)通過森林進行風場預測，且獲得了與現場觀測結果相若之結果。Patton 與 Davis[22]亦藉大渦模擬方法之預測結果檢視森林區域之大氣中化學物質之延散情形。Watanabe[23]針對水平與垂直皆為均勻分佈之樹林，以三維大渦模擬探討樹林上方之紊流結構。

Yue 等[24, 25]也應用大渦流模擬的方法針對樹冠情況之風場預測。Yamaguchi 等[26]利用移動式測風塔量測單棵松樹下游不同位置之平均風速以及紊流動能，據以界定阻力係數與疏密度之關係，並納入數值模式後對實驗的結果進行驗證。Shaw 與 Schumann[27]應用大渦流模擬數值方法模擬二維及三維大氣邊界層通過具有樹林複雜地況之風場。模擬中將隨著不同高度而改變之阻力係數以源項(source term)的方式納入動量方程式中，藉以反映出非均勻樹林群之物理效應。在運用 $k-\varepsilon$ 紊流模式(turbulence kinetic energy-dissipation turbulence model)之模擬計算例子中，將樹冠部份以源項納入控制方程式的概念亦見於 Yamada[28]、Uno 等[29]、Svensson 與 Haggkvist[30]、Green[31]、Hiraoka[32]、Liu 等[33]、Sládek 等[34]以及 Mochida 等[35]的模擬研究裡(參見表 2-3)。近期，Fang 等[36, 37]也延伸了同樣的概念，運用大渦流模擬數值方法準確地模擬出單株與雙株針/闊葉樹後之風場。本研究沿用同樣的概念進行樹之風場模擬，相關樹冠源項處理之觀點與方式詳第四章第一節中所述。

表 2-3 k-ε紊流模型樹冠部份之源項

	F_i	F_k	F_ε
Hiraoka[32] $C_{pe1} = 0.8 - 1.2$	$-C_{Da} u_i \left \frac{\mathbf{u}}{V} \right $	$u_i F_i$	$\frac{\varepsilon}{k} C_{pe1} a k^{3/2}$
Yamada[28]: $C_{pe1} = 1.0$			
Uno 等[29]: $C_{pe1} = 1.5$	$-C_{Da} u_i \left \frac{\mathbf{u}}{V} \right $	$u_i F_i$	$\frac{\varepsilon}{k} C_{pe1} F_k$
Svensson 與 Häggkvist[30]: $C_{pe1} = 1.95$			
Green[31]: $C_{pe1} = C_{pe2} = 1.5$	$-C_{Da} u_i \left \frac{\mathbf{u}}{V} \right $	$u_i F_i - 4C_D a \left \frac{\mathbf{u}}{V} \right $	$\frac{\varepsilon}{k} \left[C_{pe1} u_i F_i - C_{pe2} C_D a \left \frac{\mathbf{u}}{V} \right \right]$
Liu 等[33]: $C_{pe1} = 1.5, C_{pe2} = 0.6$			

資料來源：本研究整理

第四節 行人風場評估標準與方式

一、考慮因素

在行人高度的範圍內，評估風場舒適或安全程度時應考慮：人體受風的感受、強風發生的機率、陣風風速及評估地區的使用特性。

(一)人體受風感受

人體受風感受具有主觀性，因人的性別、年齡和身體的狀況而異。例如，Hunt 等[38]在風洞進行人體受風舒適性試驗結果顯示，在風速小於 6m/s 時，行人的活動會受到影響；當風速超過 15m/s 時，一般人行走會發生困難；當風速超過 20m/s 時，行走甚至會發生危險。

(二)強風發生機率

行人風場中當高風速發生的機率高時，行人感覺干擾的程度增強。然而，強風發生機率高於何等值視為頻繁亦具主觀性。典型者，依據 Penwarden[39]現場調查的結果，當強風發生機率大於 10%時，行人會感到困擾，而當強風出現機率超過 20%時，行人會要求對風場提出改善。

(三)陣風風速

自然風常具有時變性，風速劇烈的變動也會影響人體受風吹襲時的感受，甚至引起不舒服的感覺。通常可將陣風風速($\tilde{U}$)定義為：

$$\tilde{U} = \bar{U} + G \sigma_u \quad (2-1)$$

其中， $\bar{U}$ 為水平方向之平均風速， G 為陣風因子(一般介於 1.0~3.5 之間)。 σ_u 為紊流的擾動(均方根速度)。當擾動速度增大時，氣流的時變程度愈劇烈，行人覺得不舒服的感覺會較為嚴重。

(四)評估地區的使用特性

行人於室外所從事活動的形式，也可能會影響到人體的受風感受。一般而言，人在步行時可以忍受較強的風速，但在坐定休息時則較不喜歡有強風出現。

二、典型的評估標準

加拿大西安大略大學(University of Western Ontario)的風工程研究團隊將活動分類為長時間停留、短時間停留、慢步行走與快步行走等四種活動形式，並建議了相應行人風舒適度之評估標準(參見表 2-4)。類似之評估標準亦見於表 2-5。

表 2-4 西安大略大學研究團隊建議的行人風評估標準

活動形式	適用區域	可容忍風速	相對舒適度	
			不舒適	危險
長時間停留	室外餐廳	5.0 m/s	7.0 m/s	20 m/s
短時間停留	公園、廣場	7.0 m/s	9.5 m/s	20 m/s
慢步行走	公園	9.5 m/s	12.5 m/s	20 m/s
快步行走	人行道	12.5 m/s	16.0 m/s	20 m/s
發生頻率		小於 1 次/週	小於 1 次/月	小於 1 次/年

資料來源：本研究整理

表 2-5 Apperley 與 Vickery 建議的行人風評估標準

分類	區域	風速極限	發生頻率
1	廣場、公園	6 m/sec	1000 小時/年以下
2	人行步道、行人區	12 m/sec	50 小時/年以下
3	上述所有區域	20 m/sec	5 小時/年以下
4	上述所有區域	25 m/sec	1 小時/年以下

資料來源：[40]

在加拿大 RWDI 公司建議的評估標準中(參見表 2-6)，乃將舒適度分為坐定(長時間停留)、站立(短時間停留)、行走及不舒適等四個等級：

- (1) 坐定：若陣風風速小於 4.7m/s 的發生機率大於 80%，則坐定時可感受舒適的風場環境，可長時間停留本區，作為露天咖啡座或室外休憩

處。

- (2) 站立：當陣風風速介於 4.7~6.9m/s 的發生機率大於 80%時，可吹動頭髮或寬鬆的衣服。此等風速若發生於大樓進出口處、公車站或短暫停留的區域時並不會造成行人太大的困擾。
- (3) 行走：當陣風風速介於 6.9~8.9m/s 的發生機率大於 80%，可造成地面揚塵或紙片飛舞。由於行進間的行人較能接受稍大的風速，故此風速範圍在行人道、廣場或公園等行人活動區仍可被接受。
- (4) 不舒適：指陣風風速大於 8.9m/s(約為五級風)的發生機率大於 20%時，令逆風行走的行人感受到阻力，舉傘亦有困難，對行人的活動是有妨礙的並造成不舒適的感覺。

此外，若陣風風速達十級風的發生機率大於 3 次/年時，則更可能會危害到行人的安全。一般而言，若某一風速範圍的發生機率大於 80%，則對相應行人活動(坐定、站立、行走)的風環境是可以接受的；反之，若發生機率低於 80%，則其舒適性等級並不符合相應區域的實際用途，有需要考慮修改建築物之設計、改善風場環境或更改使用目的。

表 2-6 RWDI 建議的行人風評估標準

	等 級	陣風風速	發生機率底線
舒 適 性	坐 定	$\leq 4.7 \text{ m/s}$	80%
	站 立	$\leq 6.9 \text{ m/s}$	80%
	行 走	$\leq 8.9 \text{ m/s}$	80%
	不 舒 適	$> 8.9 \text{ m/s}$	20%
安 全 性	有 影 響	$> 24.4 \text{ m/s}$	$> 3 \text{ 次/年}$
	無 影 響	$< 24.4 \text{ m/s}$	$\leq 3 \text{ 次/年}$

資料來源：本研究整理

丁育群與朱佳仁[6]建議國內環境風場的標準可依據都市使用分區，而有不同的標準。以住宅區為例，因其為一般民眾居住休息的地方，可容許的強

風發生機率應較低。其他如學校、公園、露天座椅、公車站、醫院、療養院及幼兒遊戲設施等有老弱殘障人士常出沒處等風害敏感地區，可容許的強風發生機率亦應較低。其他如商業區為上班、購物之處，發生強風的機率則可以稍微放寬。至於國內住商混合使用的區域，環境風場的標準應採用住宅區之標準(參見表 2-7)。

表 2-7 住宅區行人風評估標準

分類	等 級	陣風風速極限	發生頻率	機率
1	宜 人	> 8 m/sec	< 每月 180 小時	< 25%
2	擾 人	> 11 m/sec	> 每月 50 小時	> 7%
3	危 險	> 25 m/sec	> 每年 3 小時	< 0.03%

資料來源：[6]

- (1) 宜人：若陣風風速大於 8 m/s 的發生機率低於 20%，對行人屬舒適的風場環境，該區域可作為停留等待區或室外休憩處。
- (2) 擾人：當陣風風速大於 11 m/s 的發生機率高於 5%，此等風速可使大樹搖晃、電線呼呼有聲、舉傘困難。若發生於大樓四周行人出沒處，則可令行人感覺困擾。
- (3) 危險：陣風風速大於 25 m/s 時會造成行人被陣風吹倒，路樹、木造建築物可能會被吹壞。若其發生機率大於每年 3 次(3 小時)，則定義為危險等級。

另一方面，表 2-8 顯示國際間先進國家針對行人環境風場所建議的評估標準，主要是以蒲福風力等級為基礎並加以修正而訂出的。

三、評估方式

在從事建築物周遭行人風場的分析與評估時，常可依據風洞實驗或數值模擬預測的結果來評估建築物的行人風場。依據所引用之評估基準，可以採用的評估方式計有絕對評估法、相對評估法和風速發生機率評估法：

表 2-8 國際間其他建議之行人風評估標準

評估標準	使用目的	風速	範圍 (m/s)	發生機率底限
Lawson 與 Penwarden (1975)	長時間停留	$\bar{U}$	3.4	<4.0%
	站 立	$\bar{U}$	5.5	<4.0%
	行 走	$\bar{U}$	8.0	<4.0%
	不舒適	$\bar{U}$	13.9	>2.0%
Isyumov 與 Davenport (1975)	長時間停留	$\bar{U}$	>3.6	<1.5%
	短時間停留	$\bar{U}$	>5.3	<1.5%
	行 走	$\bar{U}$	>9.8	<1.5%
	危 險	$\bar{U}$	>15.1	>0.02%
Hunt 等 (1976)	長時間停留	$\bar{U} + 3U_{rms}$	> 6	<10%
	公園、廣場	$\bar{U} + 3U_{rms}$	>9	<10%
	不舒適	$\bar{U}$	>9	>1%
Melbourne (1978)	長時間停留	$\bar{U} + 3.5U_{rms}$	>10	<0.075
	短時間停留	$\bar{U} + 3.5U_{rms}$	>13	<0.075
	行 走	$\bar{U} + 3.5U_{rms}$	>16	<0.075
	危 險	$\bar{U} + 3.5U_{rms}$	>23	>0.075
Boston (1981)	舒 適	$\bar{U} + 1.5U_{rms}$	>13.9	<1.0%
	不舒適	$\bar{U} + 1.5U_{rms}$	>13.9	>1.0%
Murakami 等 (1986)	露天餐廳	$\bar{U} + 2.5U_{rms}$	>10	<10%
	公 園	$\bar{U} + 2.5U_{rms}$	>10	<22%
	人行道	$\bar{U} + 2.5U_{rms}$	>10	<35%
	危 險	$\bar{U} + 2.5U_{rms}$	>20	>1.5%
San Francisco (1989)	坐 定	$\bar{U} + 2.7U_{rms}$	>3.1	<10%
	行 走	$\bar{U} + 2.7U_{rms}$	>4.9	<10%
	危 險	$\bar{U}$	>12	>0.011%

資料來源：[6]

(一)絕對評估法

本方法主要是依據人體對於舒適、不舒適及危險等不同感受所對應之風速值與建築物周遭之風速進行比較，藉以判斷行人封場是否合於標準。一般

而言，當風速 $V < 3\text{m/s}$ 時，風場是十分宜人的；當風速 $V > 5\text{m/s}$ 時，會令人覺得有些不舒服；當風速 $V > 10\text{m/s}$ 時，會令人覺得非常不舒適；當風速 $V > 15\text{m/s}$ ，步行會感到困難；當風速 $V > 20\text{m/s}$ ，則可能會危及到行人的安全。但由於人體受強風影響的敏感度與性別、年齡、身體狀況和所進行的活動有關，故難以訂出廣泛適用於不同情況的評估標準。

(二)相對評估法

本法乃計算建築物周遭的風速與一個基準風速之比值，再以此比值來判斷風速變動的情形及行人風場受建築物影響的程度。而依據目的不同，所採用之基準風速如建築物興建前之風速、建築物氣象站的平均風速、相應地況大氣邊界層高度的平均風速、建築物頂的風速等。

除了前述以平均風速的風速比作為評估的對象外，另可計算在不同風向下建築物周遭區域之陣風風速與平均風速的比值，據判斷各測點位置風況受建築物影響的程度。

(三)風速發生機率評估法

本評估法將風洞模型試驗或數值模擬預測得之地面風場結果配合基地之風速、風向資料以計算高於某設定強風發生機率，據以判定各位置的行人舒適度。若以韋伯機率(Weibull distribution)函數來描述個風向之平時風速發生機率，則可以下式計出算第 i 個風向情況風速的累積機率函數：

$$P_i(\geq U) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{U}{U_i}\right)^{a_i}\right] \quad (2-2)$$

其中， a_i 為機率函數之形狀參數， U_i 為尺度參數，下標 i 代表風向。據此，風速超過 U 值的總發生機率為

$$P(\geq U) = \sum_{i=1}^{16} p_i \left\{ 1 - \exp\left[-\left(\frac{U}{U_i}\right)^{a_i}\right] \right\} \quad (2-3)$$

其中， p_i 為各風向的發生機率。現地風速、風向的機率參數 a_i 、 U_i 、 p_i 可由附近氣象站長期觀測資料統計求得。

較之於前述的兩種評估方法，由於本評估法在考慮行人風場的基本特性上相對地較為完備，故更能反應實際行人風場受影響的程度，在目前環境風

場評估中常被使用。

第三章 風洞試驗

針對台灣欒樹、瓊崖海棠與阿勃勒 3 種典型樹種，研究中首先以風洞試驗針對模型樹後垂直斷面進行風速剖面的量測，其結果除了提供數值預測風場比較之佐證資料外，並可據以決定出選定樹種的樹冠特性參數。

第一節 實驗設施配置與設備

本研究風洞試驗係於內政部建築研究所風洞實驗室進行，風洞本體為一個垂直向的封閉迴路系統，總長度為 77.9 公尺，最大寬度為 9.12 公尺，最大高度為 15.9 公尺。風洞本體具有兩個測試區段，第一測試區中配置有兩個旋轉盤，第一座旋轉盤直徑 1 公尺，設置於距測試區入口處 3 公尺處，供一般流體力學研究用；第二座旋轉盤直徑 2.6 公尺，置於可移動之軌道上，定位於距測試區入口端約 25.5 公尺或 31.5 公尺處，並以機械控制使其做旋轉及上下運動，以進行建築物受風力作用的空氣動力學研究及污染擴散試驗為主。第二測試區則配置一座旋轉盤，位於風洞本體整流段出口 15m 處，轉盤直徑為 2.6 m，主要用途以橋梁測試為主。

研究中之試驗乃於第一測試段之第一旋轉盤進行。本測試段長 36.5 公尺、寬 4 公尺、高 2.6 公尺，最大風速為 30 公尺/秒。風洞頂部為可調式上蓋板，以維持測試段縱向壓力梯度為零之環境，並將阻塞比降至最低。實驗室相應性能參數與配置圖如圖 3-1 所示。

一、循環式風洞性能

(一)、風洞尺寸

測試段長度	36.5 m
測試段寬度	4 m
收縮比	4.7:1

(二)、驅動系統

總功率	500 kW
風扇型式	直接傳動軸流式風扇
風速控制	變頻器控制馬達轉速

(三)、風速

最高風速	30 m/s
邊界層厚度	最高 200 cm
紊流強度	測試區處約 2 %

(四)、順風向壓力梯度 零梯度由可調式上蓋板調整

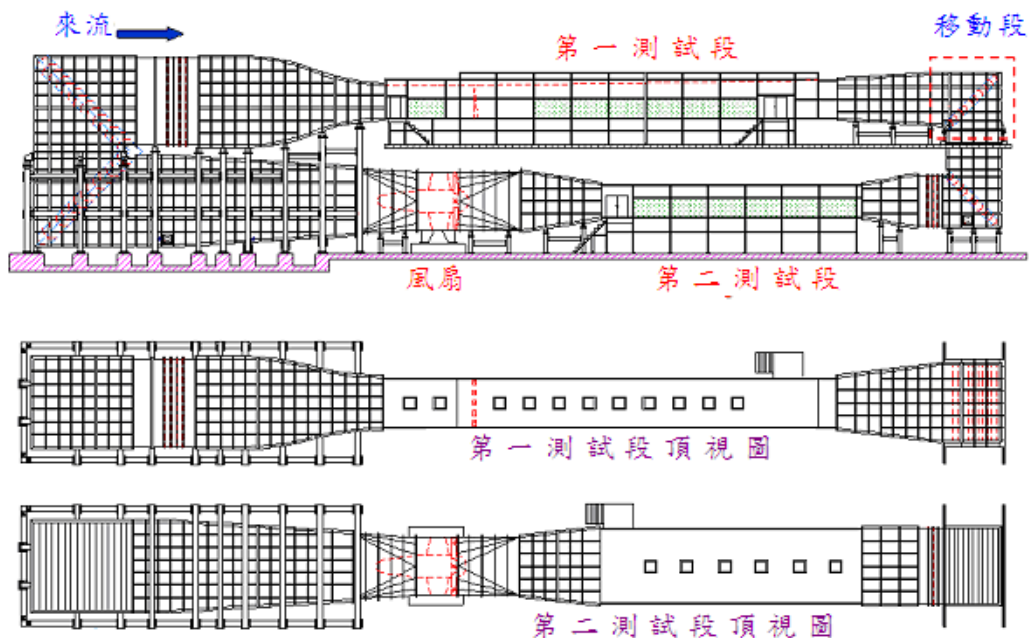


圖 3-1 建研所循環式大氣邊界層風洞性能

資料來源：內政部建築研究所

二、風速量測設備

(1) 熱線流速儀

研究中採用熱線流速儀(AIR VELOCITY Model 8465)進行來流風速之量測，位置設於模型樹樹幹側方遠處，以避免造成風場之干擾(參見圖 3-2)。每次試驗中風速量測之採樣頻率為 1000Hz，採樣時段為 64 秒。

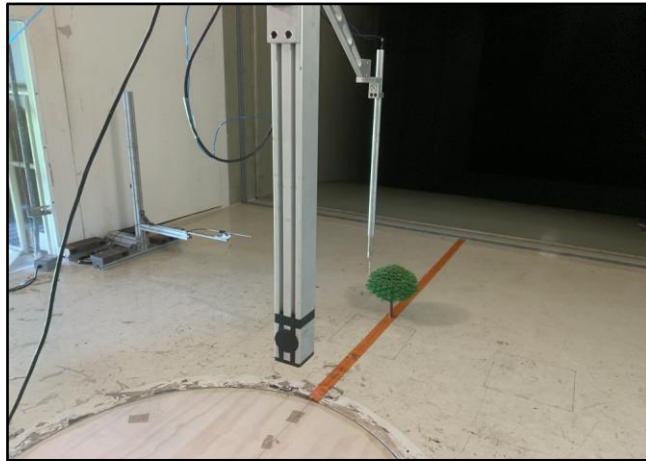


圖 3-2 熱線流速儀設置圖

資料來源：本研究整理

(2) Cobra 流速儀

試驗中模型樹下游斷面風速的量測係採用響尾蛇探針(TFI Cobra probe Series 100，參見圖 3-3)。Cobra 探針具有 3 個壓力孔，可以量測 3 個自由度的風速，其最高動態反應頻率為 2000 Hz，速度量測範圍為 2m/s 至 100m/s。基於壓力孔設計之限制，量測結果之有效性限於來流方向 $\pm 45^\circ$ 的範圍內。本風速量測之採樣頻率為 1000Hz，採樣時段為 64 秒。

在量測模型樹後之風速剖面時，Cobra 探針乃固定於一個移動機構(參見圖 3-4)，可經由電腦控制探針之水平(y)與垂直(z)位置。



圖 3-3 Cobra 探針照片圖

資料來源：本研究整理



圖 3-4 移動機構照片圖

資料來源：本研究整理

第二節 模型製作

風洞試驗中係針對台灣欒樹、瓊崖海棠與阿勃勒 3 個樹種在單株與排樹的情況下進行樹後斷面風速剖面的量測，其成果可以作為數值預測風場比較之依據外，也可以決定出數值模擬中樹種的樹冠特性參數。

研究中模型樹的製作乃以表 1-1 的數據為基準，並參酌行政院農委會[1]與國立自然科學博物館[2]的網站照片與實地觀察，將 3D 列印而得的樹幹、樹枝與樹葉組件組合而成。標定之模型樹具有以主幹為軸心的軸對稱形狀，且因製作的細緻而可以精確掌握各模型樹的外觀與樹體特性的一致程度。

一、模型樹外關與尺寸

圖 3-5 顯示台灣欒樹模型的標準外觀，其縮尺比例為 1:50。樹冠係由上下兩個弧面組合而成，依據圖 3-6 樹形之符號說明，模型樹高(H)為 30cm，樹冠寬(W)為 24cm，樹冠高(H_C)為 19.5cm，樹幹高(H_S)為 10.5cm，樹冠比(H_C/H)為 65%，其他相關尺寸詳見表 3-1。

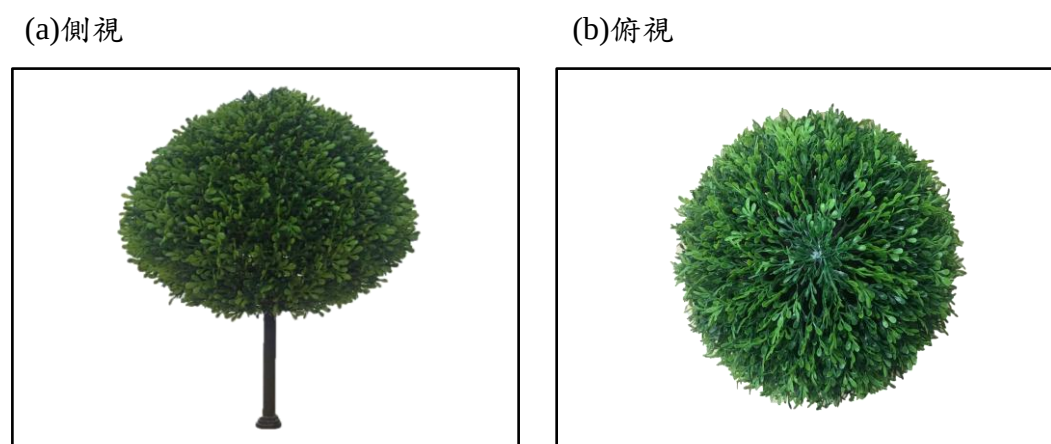


圖 3-5 台灣欒樹模型外觀

資料來源：本研究整理

圖 3-7 顯示瓊崖海棠模型的標準外觀，其縮尺比例為 1:67。樹冠近似於傘形，依據圖 3-6 樹形之符號說明，模型樹高(H)為 30cm，樹冠寬(W)為 27cm，樹冠高(H_C)為 16.5cm，樹幹高(H_S)為 13.5cm，樹冠比(H_C/H)為 55%，其他相關尺寸詳見表 3-1。

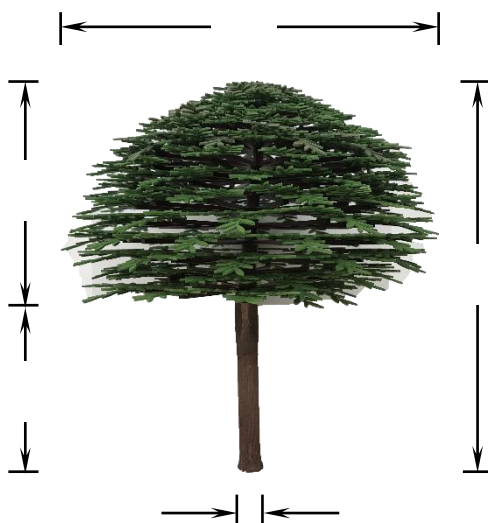


圖 3-6 樹形符號說明圖

資料來源：本研究整理

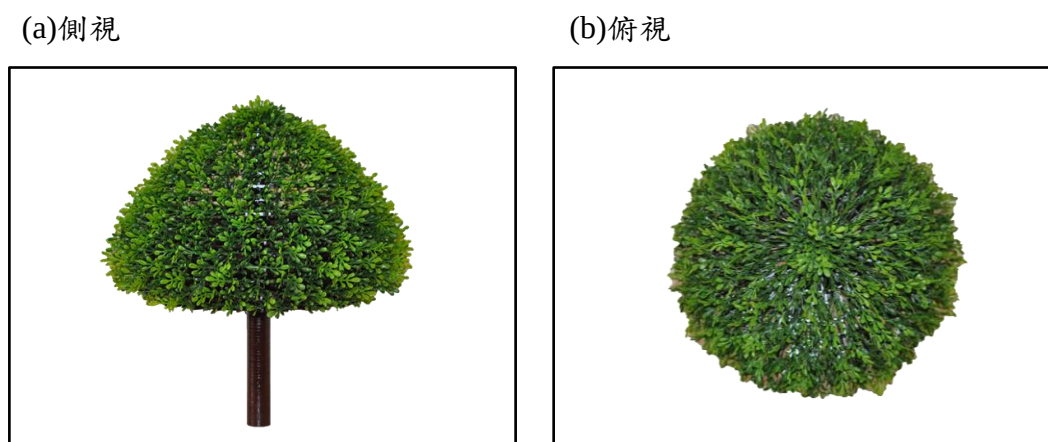


圖 3-7 瓊崖海棠模型外觀

資料來源：本研究整理

圖 3-8 顯示阿勃勒模型的標準外觀，其縮尺比例為 1:50。依據圖 3-6 樹形之符號說明，模型樹高(H)為 30cm，樹冠寬(W)為 20cm，樹冠高(H_C)為 19.5cm，樹幹高(H_S)為 10.5cm，樹冠比(H_C/H)為 65%，其他相關尺寸詳見表 3-1。

(a)側視



(b)俯視



圖 3-8 阿勃勒模型外觀

資料來源：本研究整理

表 3-1 三個樹種模型尺寸表 (單位：cm)

樹種	樹高 (H)	樹冠高 (H _C)	樹冠寬 (W)	樹幹高 (H _S)	樹幹直徑 (D _S)
台灣欒樹	30.0	19.5	24.0	10.5	1.0
瓊崖海棠	30.0	16.5	27.0	13.5	2.0
阿勃勒	30.0	19.5	20.0	10.5	1.2

資料來源：本研究整理

二、樹冠密度之檢核

樹冠是樹的冠、莖、枝、和樹葉的組合結構，依據美國農業部(USDA)提出的樹冠分類指引[8]，樹冠密度(crown density)是相應於阻擋光線穿透樹冠的百分比。在估計樹冠密度的方法上，USDA 建議由 7 至 8 個人在樹體四周環繞並進行觀察，在過程觀察者應選擇未壓實樹冠比的基礎上的點來建立樹冠的輪廓。樹冠的輪廓應包含分支尖端的正常預期樹冠部份，並排除表冠下方的樹葉(參見圖 3-9)。每一位觀察者在環視後，則依據指引提供之密度參考表(參見圖 3-10)估計樹冠之簇葉通視度(foliage transparency)或樹冠密度。當觀

察成員的評估結果相差超過 10% 的評級時，應檢討他們決定評級的原因並作必要之修正。再無進一步爭議的情況下，最後樹冠密度的相應值則是所有觀察者評級結果的平均值。

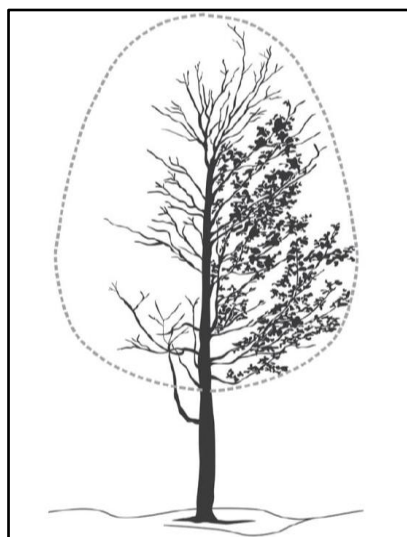


圖 3-9 樹冠輪廓說明圖

資料來源：[8]

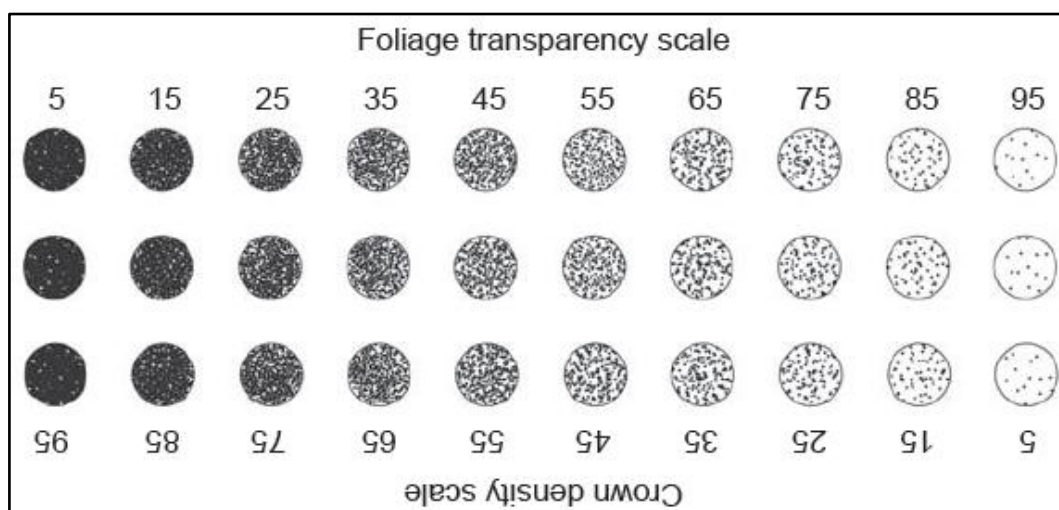


圖 3-10 樹冠密度參考值對照圖

資料來源：[8]

研究中針對 3 種模型樹，依據 USDA[8]的建議，由 8 個人進行模型樹樹冠密度的估計，並求得相應之平均值。由表 1-1 之整理結果得知，台灣欒樹、瓊崖海棠與阿勃勒相應之樹冠密度分別為 80%、70%與 55%。當樹冠密度之平均值與既定樹冠密度差異顯著時，則作模型樹之修改，直至相對差異低於 3%為止。

第三節 試驗結果

風洞試驗中係針對台灣欒樹、瓊崖海棠與阿勃勒 3 個樹種進行樹後斷面風速剖面的量測，其成果可以作為數值預測風場比較之依據外，也可以決定出數值模擬中樹種的樹冠特性參數。

試驗量測時典型的來流呈現低紊流強度之邊界層風速變化形態(參見圖 3-11)，邊界層厚度(δ)約為 6cm，在樹高(H)位置的來流風速(U_H)為 8.10m/s。

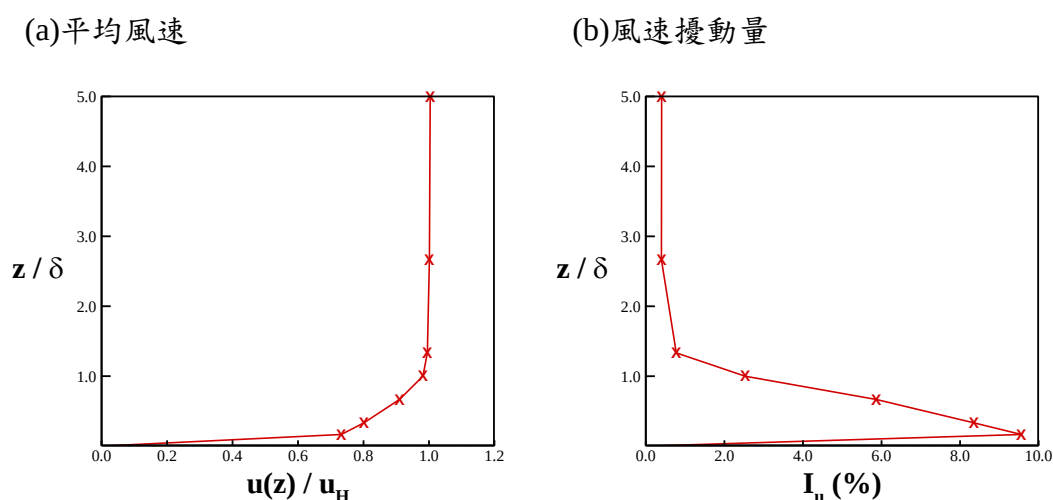


圖 3-11 試驗來流縱向風速剖面圖

資料來源：本研究整理

一、台灣欒樹情況

圖 3-12 與圖 3-13 顯示台灣欒樹樹後 3H 與 4.5H 後的無因次風速(u/u_H)剖面結果($H=30\text{cm}$, $u_H=8.10\text{ m/s}$)。由量測結果可見，因為樹的遮蔽，在下風處發生了近乎樹體形狀的減速區域，其風速剖面呈左右對稱的形態。經比較圖 3-12 與圖 3-13 後亦可見，愈往下游，尾流(wake)區域的幅員因擴散(diffusion)效應的作用而變大，但是風速也逐漸回復，使得減速的程度變弱。

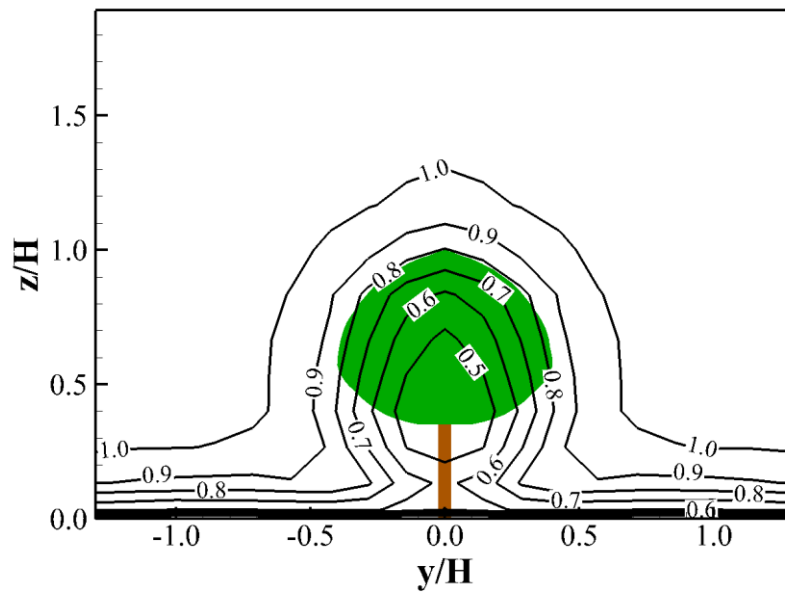


圖 3-12 台灣樂樹樹後量測平均風速剖面 ($x/H=3$)

資料來源：本研究整理

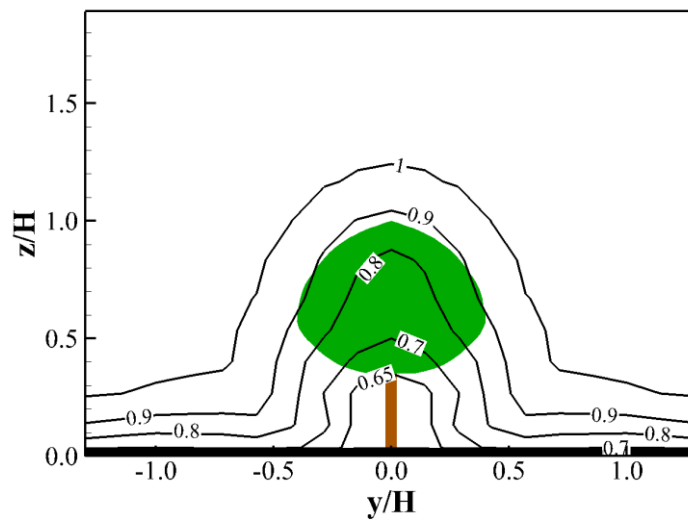


圖 3-13 台灣樂樹樹後量測平均風速剖面 ($x/H=4.5$)

資料來源：本研究整理

二、瓊崖海棠情況

圖 3-14 與圖 3-15 顯示瓊崖海棠樹後 2.5H 與 4H 後的無因次風速剖面結果。由於樹的遮蔽，同樣在下風處發生了近乎樹體形狀且呈左右對稱的減速

區域。也因為擴散(diffusion)效應的作用，相對低速速尾流區域的幅員朝著下游的方向擴大，但風速也逐漸的回復。

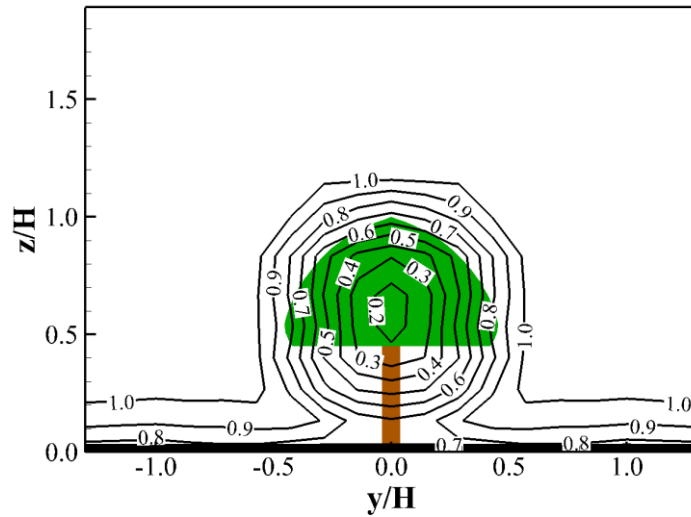


圖 3-14 瓊崖海棠樹後量測平均風速剖面 ($x/H=2.5$)

資料來源：本研究整理

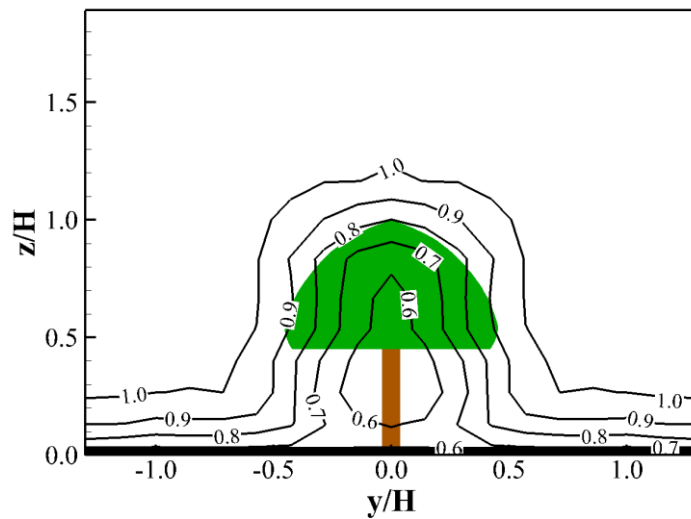


圖 3-15 瓊崖海棠樹後量測平均風速剖面 ($x/H=4$)

資料來源：本研究整理

三、阿勃勒情況

圖 3-16 與圖 3-17 顯示阿勃勒樹樹後 $2.5H$ 與 $4H$ 後的無因次風速(u/u_H)

剖面結果($H=30\text{cm}$, $u_H=8.10\text{ m/s}$)。與台灣欒樹(圖 3-12 與圖 3-13)以及瓊崖海棠(圖 3-14 與圖 3-15)的量測結果相較，由於阿勃勒的枝葉密度較低(55%)，遮蔽的程度較弱，在樹後近場尾流區(near-wake region)的剖面風速也呈現較低的情況。

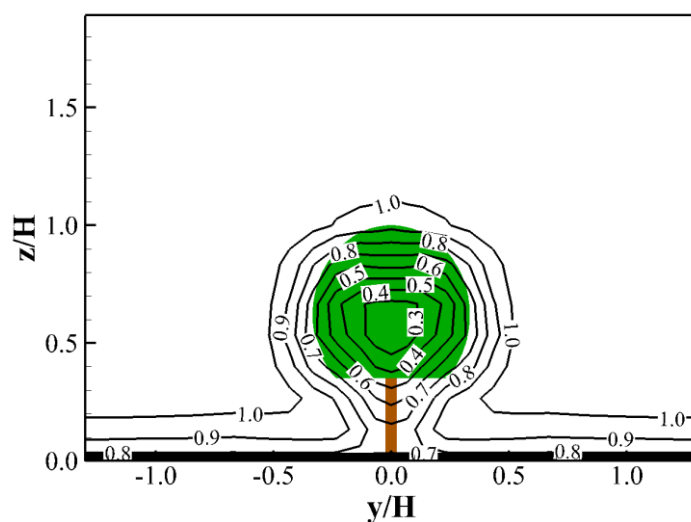


圖 3-16 阿勃勒樹後量測平均風速剖面 ($x/H=2.5$)

資料來源：本研究整理

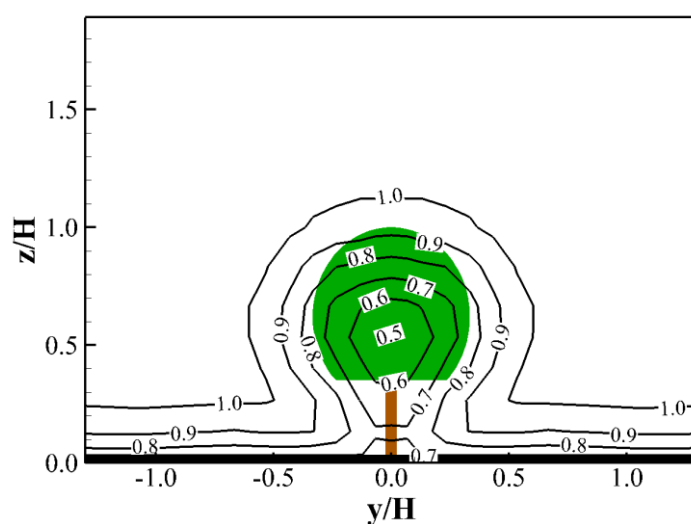


圖 3-17 阿勃勒樹後量測平均風速剖面 ($x/H=4$)

資料來源：本研究整理

第四章 數值模擬與排樹減風探討

數值模擬在本研究的工作包括兩個部份。第一階段的工作是以風洞模型試驗中樹後斷面風速剖面的量測結果為依據，藉由平行的風場計算與結果比對，以試誤法找出數值模擬中 3 種典型樹種的樹冠風力參數。第二階段的工作則是待風場預測數值模式確立後，再針對真實(無縮尺)情況，藉 3 種典型樹在排樹樹高與樹距之改變下，系統化地進行樹後的風場預測，繼而整合所有的風場風場結果評估排樹的減風功能與效益，進而歸納出植栽減風設計的一般性原則。

第一節 數值方法

風場之模擬係採用微可壓縮流(weakly-compressible-flow method [9]，WCF)的動力計算方法。本方法已成功地應用於針葉與闊葉單株與雙株的風場預測，具有不錯的預測能力[36, 37]。

一、紊流流場計算(不包括樹冠部份)

對黏滯性流(viscous flow)而言，其相應之連續及動量方程式分別為

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (4-1)$$

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla \vec{V} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \vec{V} \quad (4-2)$$

式中 ρ 、 $\vec{V}$ 、 p 與 t 分別代表流體密度、速度向量、壓力及時間，而 ν 為運動黏滯度(kinematic viscosity)。

在密度僅為壓力的函數的假設條件(即 barotropic 假定)下，對低馬赫數流(low-Mach-number flows)而言，空間平均形式紊流(turbulent flow)控制方程式可近似為如下之指標符號形式(「 $\bar{\quad}$ 」意指平均，「 $\prime$ 」表示擾動量， $u_i = \bar{u}_i + u_i'$ ， $p = \bar{p} + p'$ ， c 為音速)

$$\frac{\partial \bar{p}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho c^2 \bar{u}_j) = 0 \quad (4-3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \overline{u_i u_j}}{\partial x_j} &= \frac{\partial (p/\rho)}{\partial x_j} \\ &+ \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ -\overline{u'_i u'_j} - \overline{u'_i \overline{u'_j}} - \overline{\overline{u'_i} u'_j} - (\overline{u_i u_j} - \overline{u_i} \overline{u_j}) + \nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right\} \end{aligned} \quad (4-4)$$

基於雷諾平均的假設，(4-4)式成為

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \overline{u_i u_j}}{\partial x_j} = -\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\bar{p}^*}{\rho} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ -(\overline{u'_i u'_j} - \frac{1}{3} \overline{u'_i u'_j} \delta_{ij}) + \nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right\} \quad (4-5)$$

其中， δ_{ij} 為 Kronecker delta 函數， $p^* = p + \frac{\rho}{3} \overline{u'_i u'_j}$ 。

再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

$$-(\overline{u'_i u'_j} - \frac{1}{3} \overline{u'_i u'_j} \delta_{ij}) = \nu_t S_{ij}, \quad S_{ij} = \left(\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) \quad (4-6)$$

其中 ν_t 為紊流粘滯度(turbulence diffusivity)。而(4-5)式可重寫為

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \overline{u_i u_j}}{\partial x_j} = -\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\bar{p}^*}{\rho} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\tau_{ij}}{\rho} \right) \quad (4-7)$$

式中 τ_{ij} 乃片流粘性剪應力以及次網格紊流剪應力的和，而(4-6)式中的紊流擴散係數(ν_t)則依據 Germano 等[41]建議之動態次網格型式而得。(4-3)式及(4-7)式即為本數值模擬中流場解析之依據。

模擬中針對各計算網格採用 MacCormack[42]之顯隱格式，配合以 Crank-Nicolson 法[43]以進行時變紊流流場之模擬計算。

在數值邊界條件之處理上，對一個穩定邊界(stationary boundary)而言，計算中於鏡射點(phantom point)給定適當物理量的方式，以正確地反應邊界之特性。於速度方面，入流截面之平均速度以既定之分佈為基準。固體邊界(solid boundary; 如地面)以不可滑動(no-slip)與不可穿透(impermeable)之條件處理；

出流與其他可穿透邊界(不含枝葉網格部份)之鏡射點則以零梯度之物理特性給定之。在壓力方面，除將出流截面之平均壓力給為零值以定義出流場參考壓力外，其餘邊界之壓力給定均基於零梯度之物理特性。

二、樹冠中樹體效應之模擬

針對樹木的風場預測，採用直接模擬(direct simulation)，亦即將樹體以極為細密固體網格(grid)表徵的方式，以現今電腦能提供的計算能量而言，是不經濟且難以負荷的。此外，在實際的執行面上亦相當困難。現階段較為可行的是將枝葉的部份視為透式的孔隙介質，而將樹體之物理效應適當地反映在流場計算中。

因此，本研究的數值模擬中，乃將枝葉的部份視為透式的孔隙介質，而於枝葉的計算網格中賦以適當之源項以反映出其實質之物理效應。計算中樹之主幹仍視為固體，而在透式枝葉相應網格部份之動量方程式為[27]

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\bar{p}^*}{\rho} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\tau_{ij}}{\rho} \right) + (f_D)_i \quad (4-8)$$

$$\text{其中， } \mathbf{f_D} = \left[-C_D a u \left| \frac{\mathbf{u}}{V} \right|, -C_D a v \left| \frac{\mathbf{u}}{V} \right|, -C_D a w \left| \frac{\mathbf{u}}{V} \right| \right]^T \quad (4-9)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\bar{p}^*}{\rho} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\tau_{ij}}{\rho} \right) + (f_D)_i \quad (4-10)$$

而 C_D 為相應於樹冠之阻力係數； a 為單位體積中的葉面面積。

儘管理論上(4-9)式可以用以解析流體通過樹冠部份的風場，然基於 C_D 與 a 值在個別估算上的困難度，且考量在實際風力評估的便利性，將 C_D 與 a 值作合併的考量不失為一個有效的抉擇[36, 37]。因此，當樹冠枝葉分布為等向且均勻時，可將 C_D 與 a 合併而得

$$\mathbf{f_D} = \left[-C_{Da} u \left| \frac{\mathbf{u}}{V} \right|, -C_{Da} v \left| \frac{\mathbf{u}}{V} \right|, -C_{Da} w \left| \frac{\mathbf{u}}{V} \right| \right]^T \quad (4-11)$$

據此，樹冠的風力參數(C_{Da})則需藉由風洞試驗的結果率定而得。

三、風場模擬計算

以台灣欒樹單株情況的計算為例，計算區域在主流(x)向的長度為 $35H$ (樹高)；若以樹幹中心為座標原點，上游距離為 $5H$ ，下游距離為 $30H$ 。此外，計算區域在水平(y)與垂直(z)方向之高度分別為 $13.33H$ 與 $6.67H$ 。計算區域之外緣與樹皆保持足夠的距離以避免造成風場預測之誤差。

在數值計算網格的建構上，研究中針對樹體之模擬分成樹冠與樹幹兩個部分。其中，樹幹依模型外型進行格網建置建模(參見圖 4-1)，表面採非結構化網格均勻分布，最小網格大小為 0.01 m ，計算時視其表面為不可穿透(impermeable)且不可滑動(no-slip)之固體。另一方面，台灣欒樹的樹冠部分則依據樹之輪廓採用類似於蘑菇形的網格分佈，此區域在計算中需加入樹冠源項以模擬風通過樹冠之效應。風場計算中，樹部份與全計算域的網格數量為分別為 21,475 與 1,559,247 個。

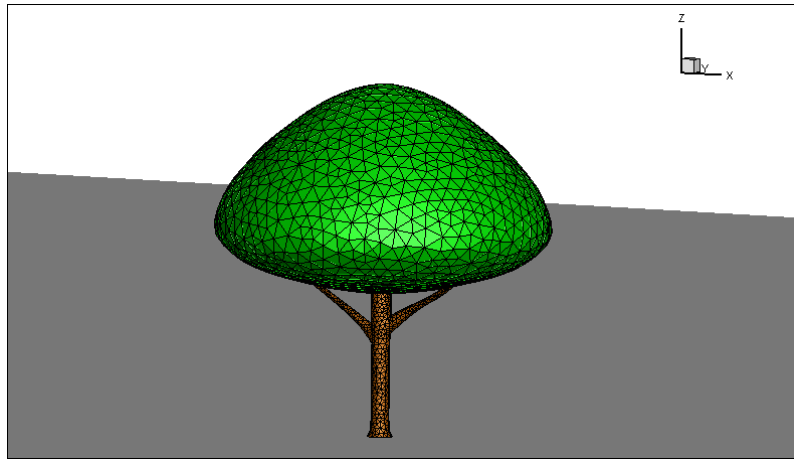


圖 4-1 台灣欒樹計算網格圖

資料來源：本研究整理

第二節 樹冠風力參數之探求

為了要尋求台灣欒樹、瓊崖海棠與阿勃勒相應的樹冠風力參數(C_{Da} 值)，研究中以風洞模型試驗中模型樹後斷面風速剖面的量測結果為基準，以試誤的方法設定不同的 C_{Da} 值，並藉由平行的風場模擬計算與試驗量測結果的比對，最後再由量測點試驗值與同位置模擬結果間相應於最小相對誤差的情況決定出相應樹冠風力參數的最佳化結果。

一、台灣欒樹情況

當假設樹冠風力參數具有等向(isotropic)與均勻(homogeneous)的特性時，圖 4-2 顯示台灣欒樹情況樹後兩個斷面風速剖面量測值與同位置模擬結果間正規化均方根誤差(normalized root mean square error; NRMSE)隨著 C_{Da} 的變化關係。在兼顧樹後 3H 與 4.5H 處風速剖面整體吻合度的考量下，台灣欒樹最佳之 C_{Da} 值為 750，相應之正規化均方根誤差或平均相對誤差與相關係數分別 4.2%與 0.964。

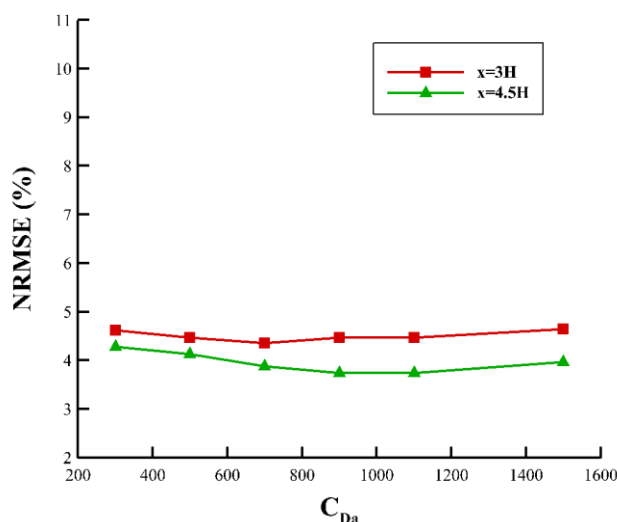


圖 4-2 台灣欒樹情況預測平均相對誤差之變化

資料來源：本研究整理

圖 4-3 與圖 4-4 分別顯示瓊崖海棠與阿勃勒的結果。瓊崖海棠最佳之 C_{Da} 值為 568，相應之正規化均方根誤差或平均相對誤差與相關係數分別 6.1% 與 0.943；阿勃勒最佳之 C_{Da} 值為 351，相應之正規化均方根誤差或平均相對誤差與相關係數分別 5.5% 與 0.966。

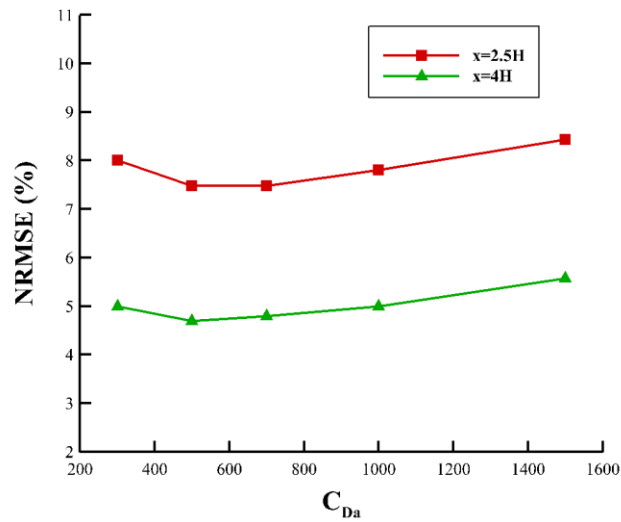


圖 4-3 瓊崖海棠情況預測平均相對誤差之變化

資料來源：本研究整理

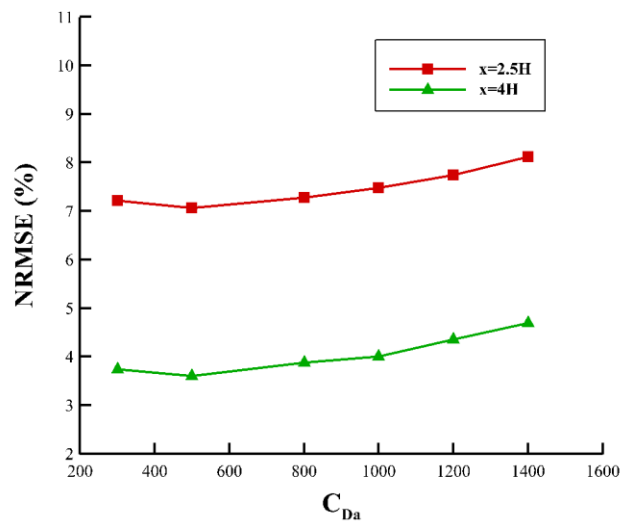


圖 4-4 阿勃勒情況預測平均相對誤差之變化

資料來源：本研究整理

當採用最佳化的樹冠風力參數(C_{Da} 值)時，圖 4-5 至圖 4-6、圖 4-7 至圖 4-8、圖 4-9 至圖 4-10 分別顯示相應於風洞模型試驗量測中台灣欒樹、瓊崖海棠與阿勃勒樹後風速剖面的模擬結果。與試驗結果比較(圖 3-12 至圖 3-17)，其相對誤差分別為 4.2%、6.1%與 5.5%。

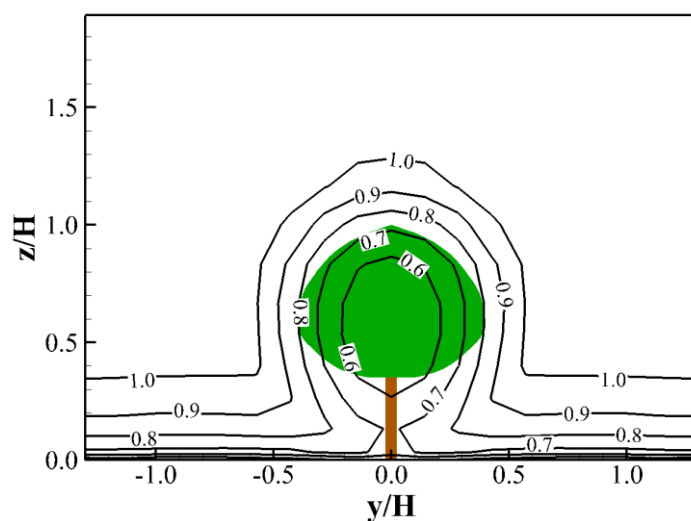


圖 4-5 台灣欒樹樹後平均風速剖面模擬結果 ($x/H=3$)

資料來源：本研究整理

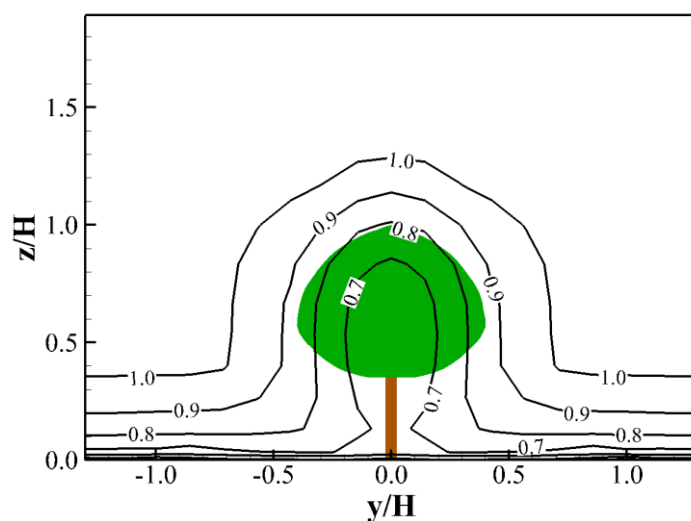


圖 4-6 台灣欒樹樹後平均風速剖面模擬結果 ($x/H=4.5$)

資料來源：本研究整理

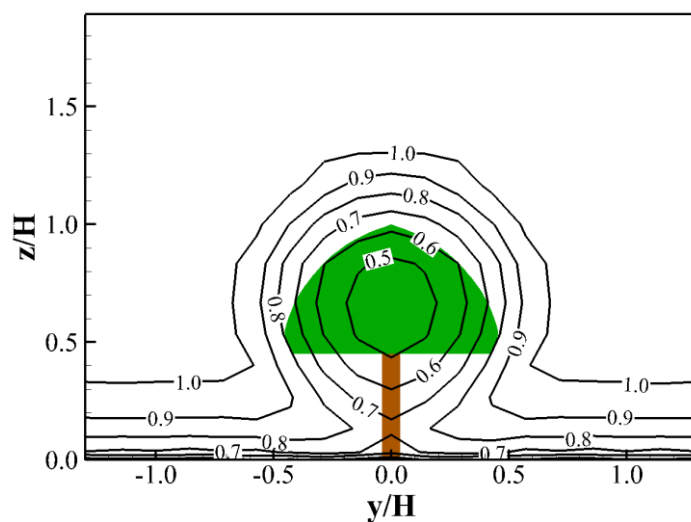


圖 4-7 瓊崖海棠樹後平均風速剖面模擬結果 ($x/H=2.5$)

資料來源：本研究整理

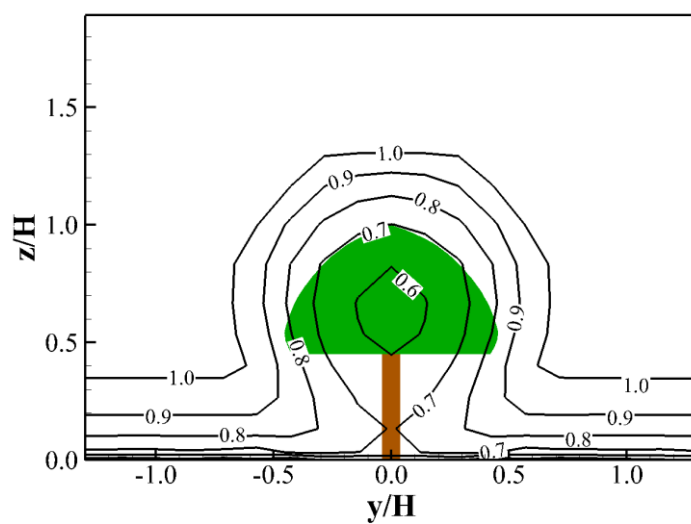


圖 4-8 瓊崖海棠樹後平均風速剖面模擬結果 ($x/H=4$)

資料來源：本研究整理

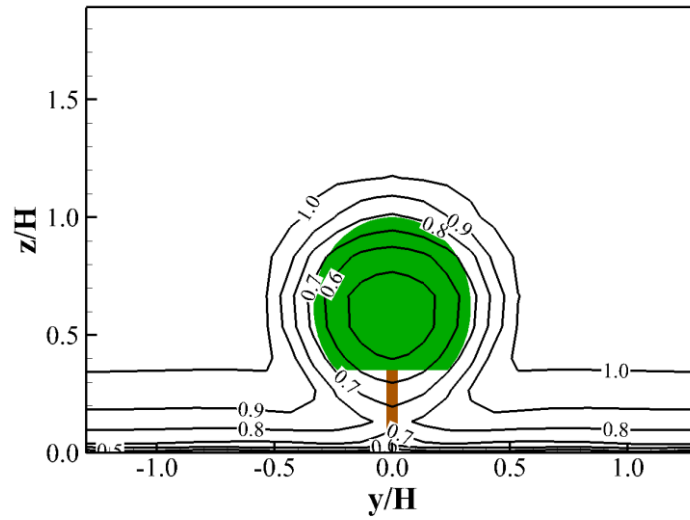


圖 4-9 阿勃勒樹後平均風速剖面模擬結果 ($x/H=2.5$)

資料來源：本研究整理

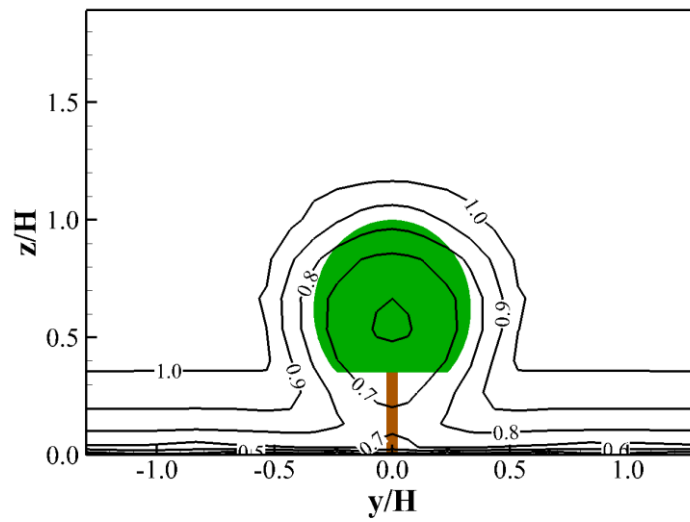


圖 4-10 阿勃勒樹後平均風速剖面模擬結果 ($x/H=4$)

資料來源：本研究整理

第三節 真實情況排樹減風效果之模擬與檢討

待獲得了台灣欒樹、瓊崖海棠與阿勃勒的最佳化樹冠風力參數(C_{Da} 值)後，研究中繼而針對實際(無縮尺)排樹的情況，以數值模擬的方法針進行風場預測與分析，以系統化檢討在不同樹幹與樹幹間距($S=1.2W$ 、 $1.5W$ 與 $1.8W$)以及不同樹高($H=6m$ 、 $9m$ 與 $12m$)的情況下排樹後地面 2 公尺高處風場的變化，據以檢討 3 個樹種、3 個樹間距與 3 個不同樹高對行人風場之影響。

在風場的數值模擬中，來風採用相應於鄉村的 C 地況情形，大氣邊界層指數律 α 值與邊界層厚度分別為 0.15 與 300m，並針對蒲福風力等級六級風的情況(距離地面 2 公尺高的風速為 8.64m/s)進行風場計算。

一、地面風場模擬結果

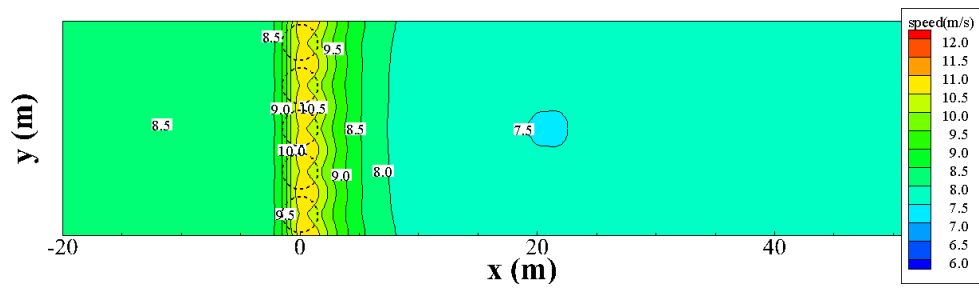
針對台灣欒樹的情況，圖 4-11 至圖 4-13 分別顯示在 3 個樹高、3 個樹間距情況下，距離地面 2 公尺高處的無因次風速等值圖。當樹高為 6m 時，由圖 4-11 之結果可見，在緊鄰樹後的近尾流區(near wake)中氣流因為受到擠壓而使得地面風速先行增加，直至樹後的遠尾流區(far wake)才開始發生減風的現象。樹間距愈大時，於遠尾流區地面風速減少之程度愈不明顯。此外，樹正後方受到樹冠之遮蔽故風速較低，樹與樹間空隙後方則有因氣流之擠壓而有局部加速的情形，導致樹後地面風速等值線呈現波浪形的走向，而此波浪形走向的程度隨著樹間距的增加而更形明顯。圖 4-11 至圖 4-13 也顯示，隨著樹高的增加，樹後地面風速沿著縱(x)向先增後減的變化程度更為顯著。

圖 4-14 至圖 4-16 以及圖 4-17 至圖 4-19 為相應於瓊崖海棠與阿勃勒的地面風場結果，圖中呈現地面風速的變化趨勢大致和台灣欒樹的情況類似。

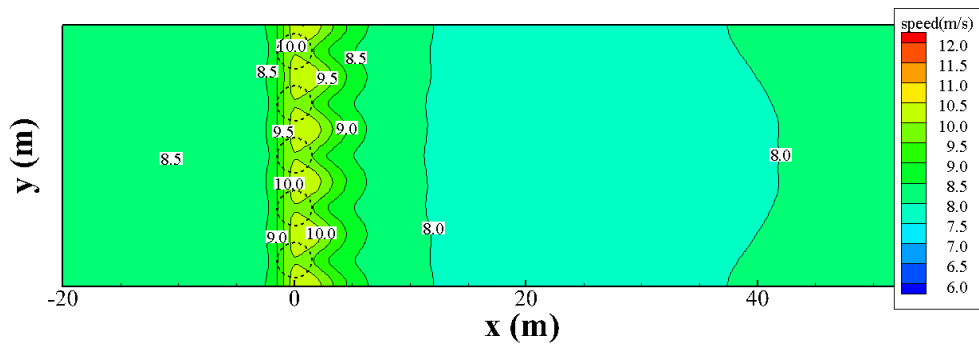
二、橫斷面平均地面風速的縱向變化趨勢

針對圖 4-11 至圖 4-19 的結果可以進一步地整合而獲得地面 2 公尺高橫斷面平均風速沿著縱(x)向的量化變化。圖 4-20 至圖 4-22 可見，當樹高為 6m 且樹間距為 1.8 倍樹寬(W)時，距地面 2 公尺高的來流風速(8.64 m/s)在排樹後發生減風效果的區域約在樹後 1 至 14 倍樹高的範圍內，而此減風範圍隨著間距比(S/W)的減小與樹高之增加則擴大至約 1 至 17 倍樹高的範圍。

(a) 間距比 $S/W=1.2$



(b) 間距比 $S/W=1.5$



(c) 間距比 $S/W=1.8$

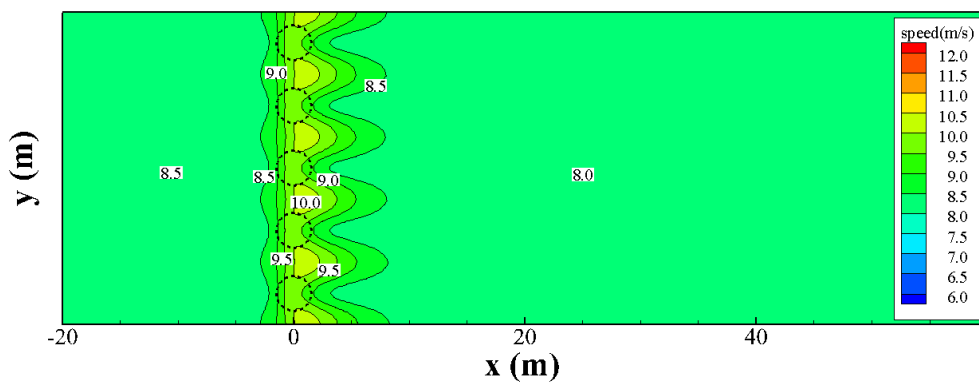
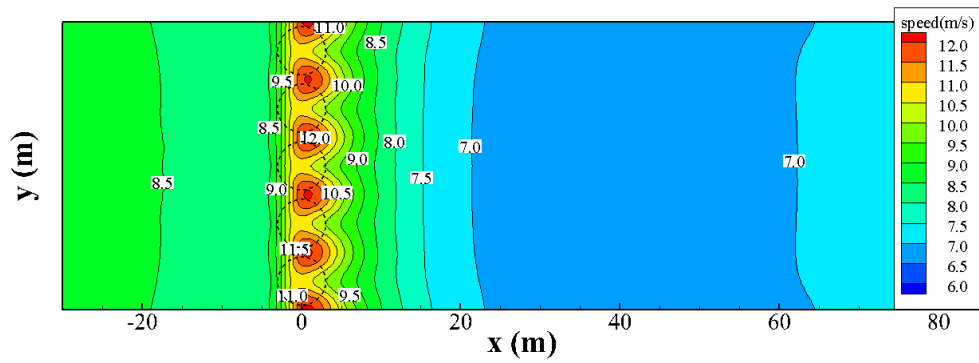


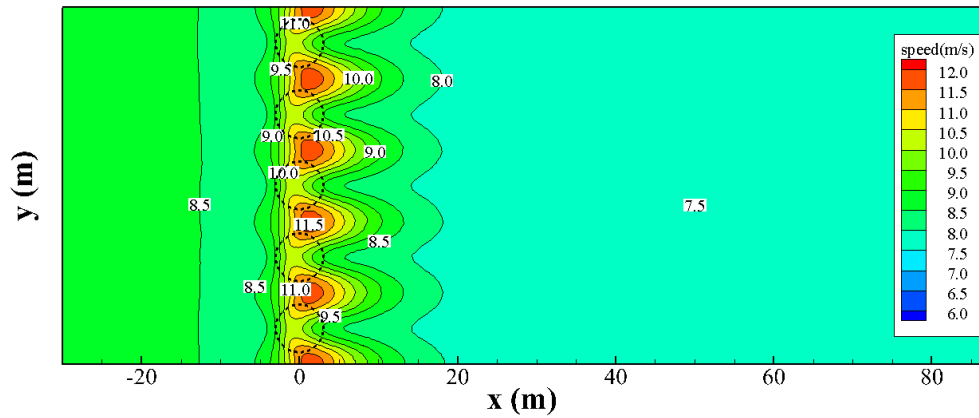
圖 4-11 台灣樂樹排樹地面高 2 公尺處風速等值圖 ($H=6m$)

資料來源：本研究整理

(a) 間距比 $S/W=1.2$



(b) 間距比 $S/W=1.5$



(c) 間距比 $S/W=1.8$

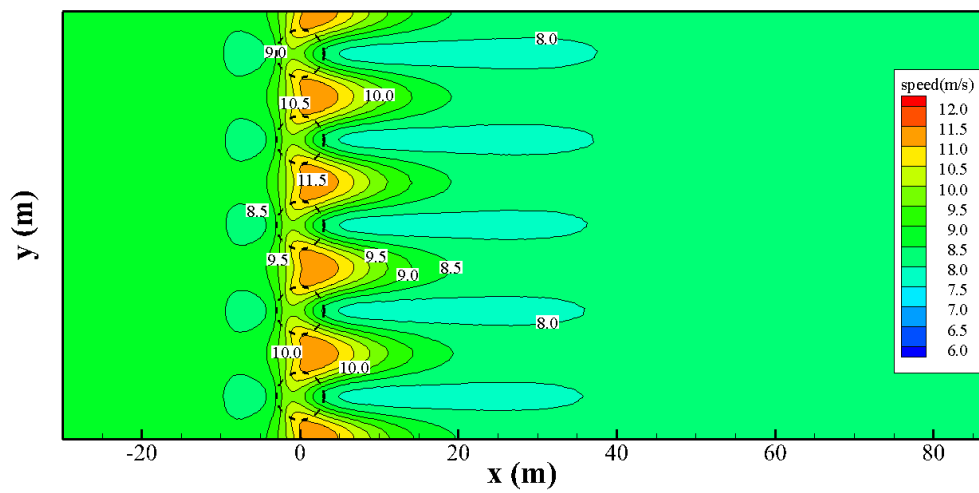
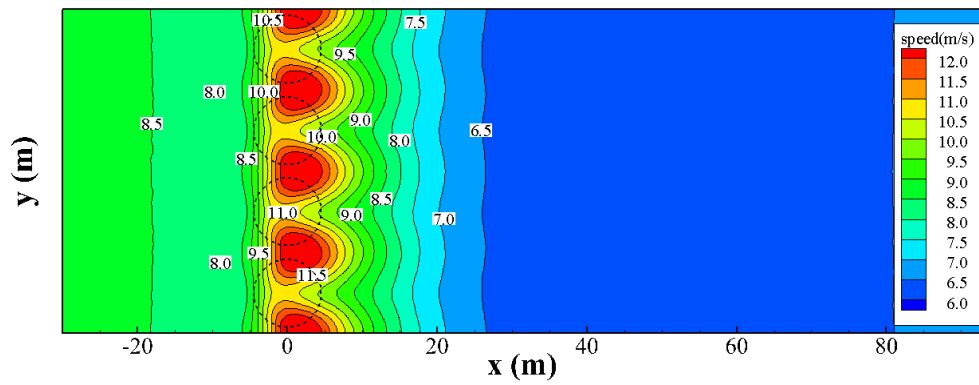


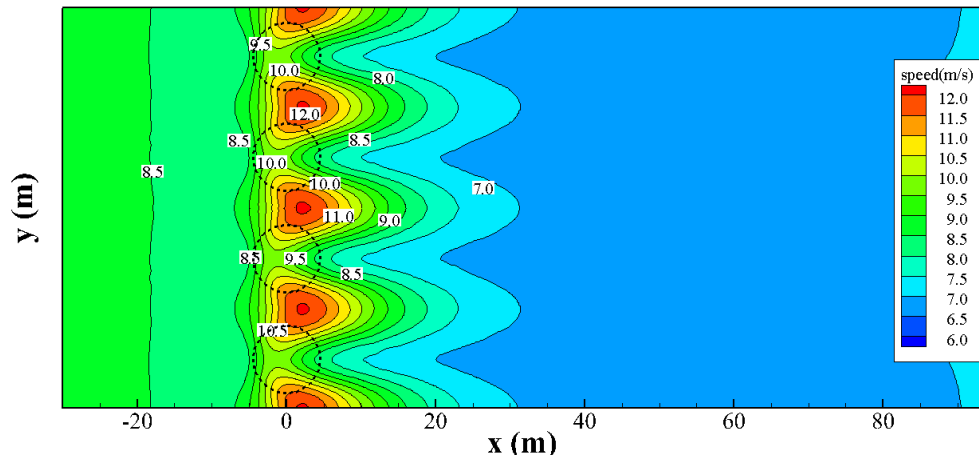
圖 4-12 台灣樂樹排樹地面高 2 公尺處風速等值圖 ($H=9m$)

資料來源：本研究整理

(a) 間距比 $S/W=1.2$



(b) 間距比 $S/W=1.5$



(c) 間距比 $S/W=1.8$

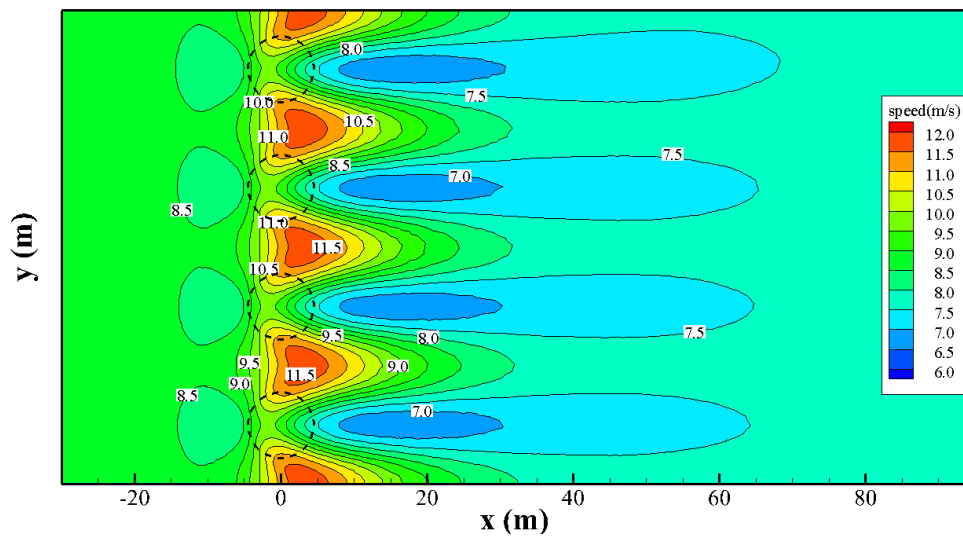
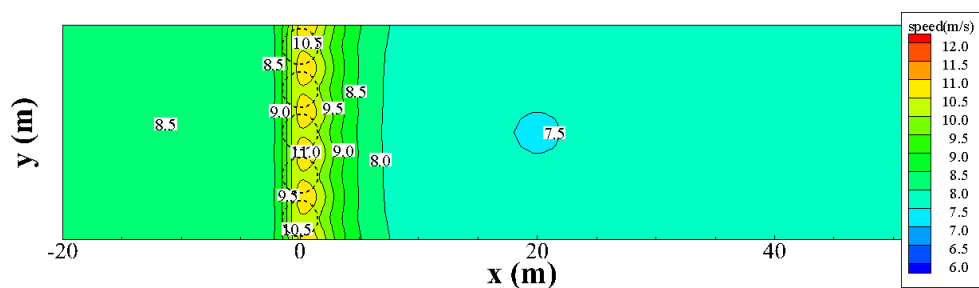


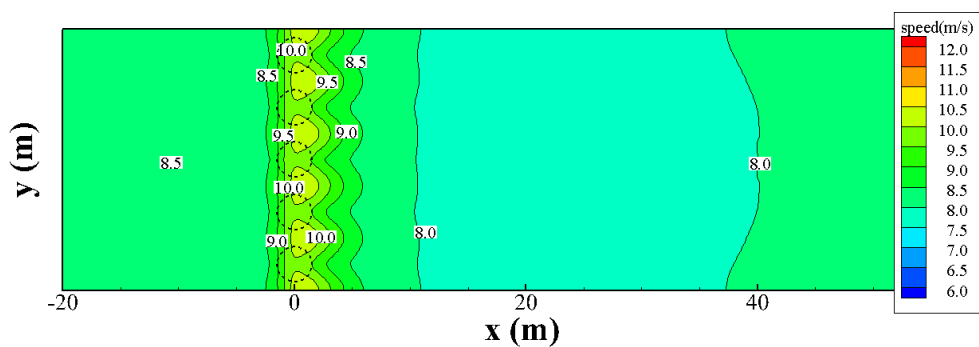
圖 4-13 台灣樂樹排樹地面高 2 公尺處風速等值圖 ($H=12m$)

資料來源：本研究整理

(a) 間距比 $S/W=1.2$



(b) 間距比 $S/W=1.5$



(c) 間距比 $S/W=1.8$

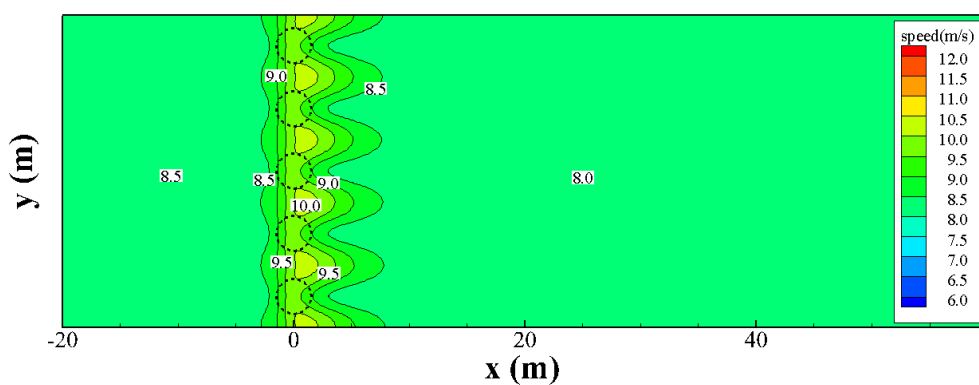
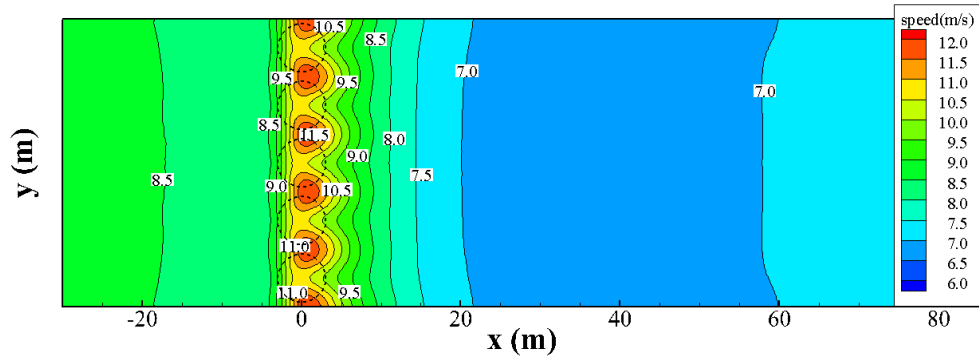


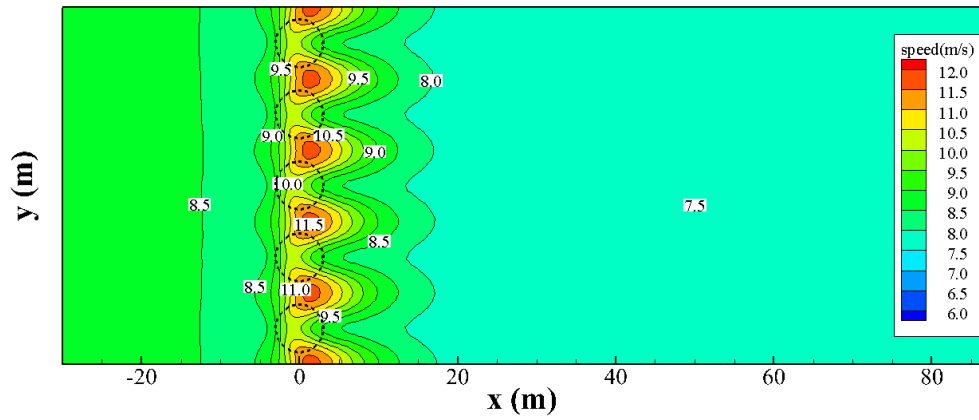
圖 4-14 瓊崖海棠排樹地面高 2 公尺處風速等值圖 ($H=6m$)

資料來源：本研究整理

(a) 間距比 $S/W=1.2$



(b) 間距比 $S/W=1.5$



(c) 間距比 $S/W=1.8$

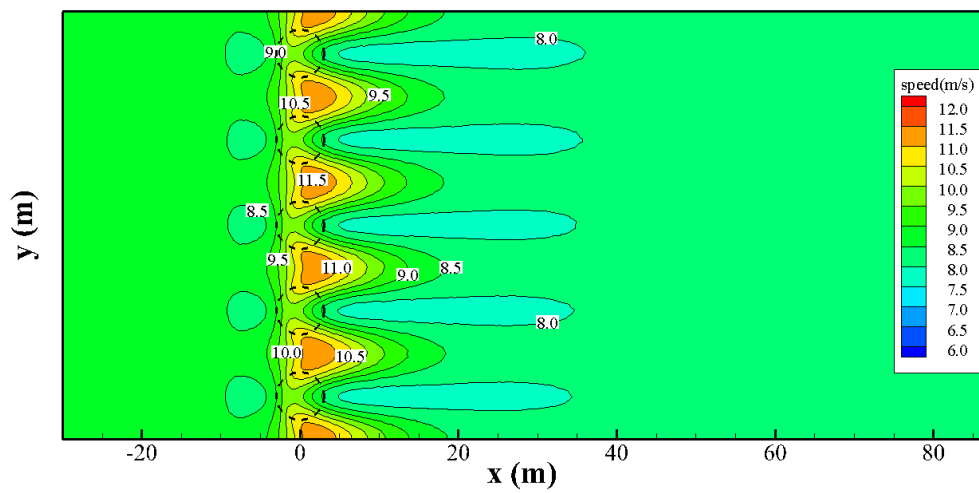
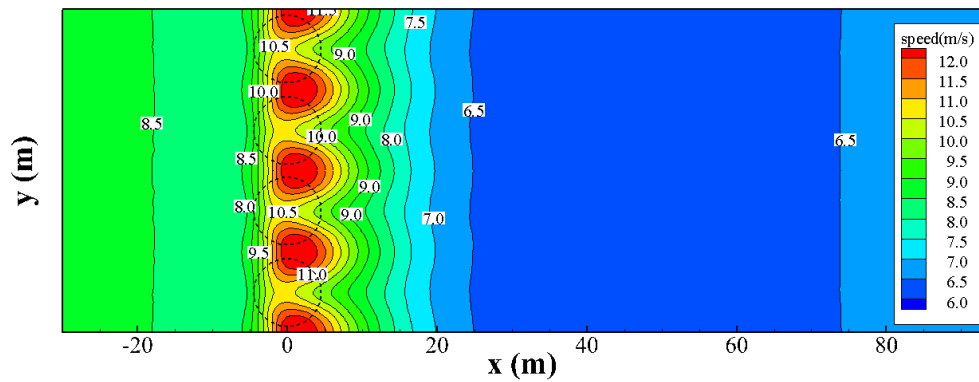


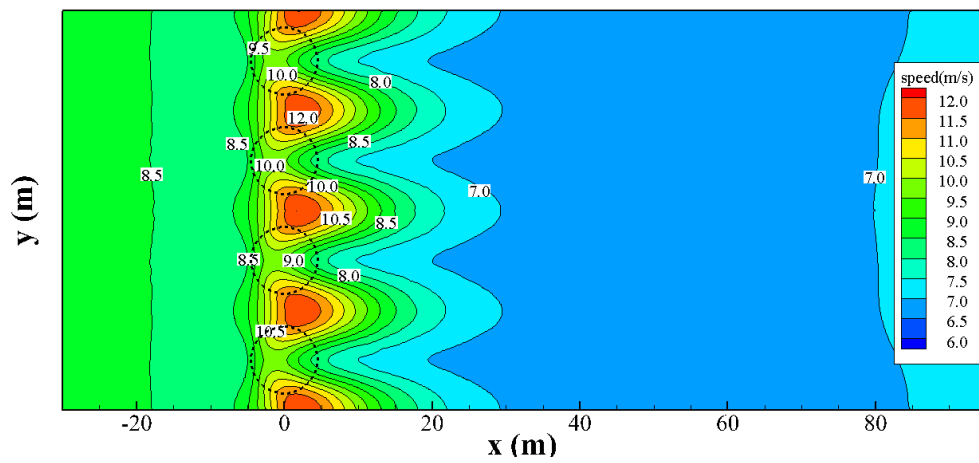
圖 4-15 瓊崖海棠排樹地面高 2 公尺處風速等值圖 ($H=9m$)

資料來源：本研究整理

(a) 間距比 $S/W=1.2$



(b) 間距比 $S/W=1.5$



(c) 間距比 $S/W=1.8$

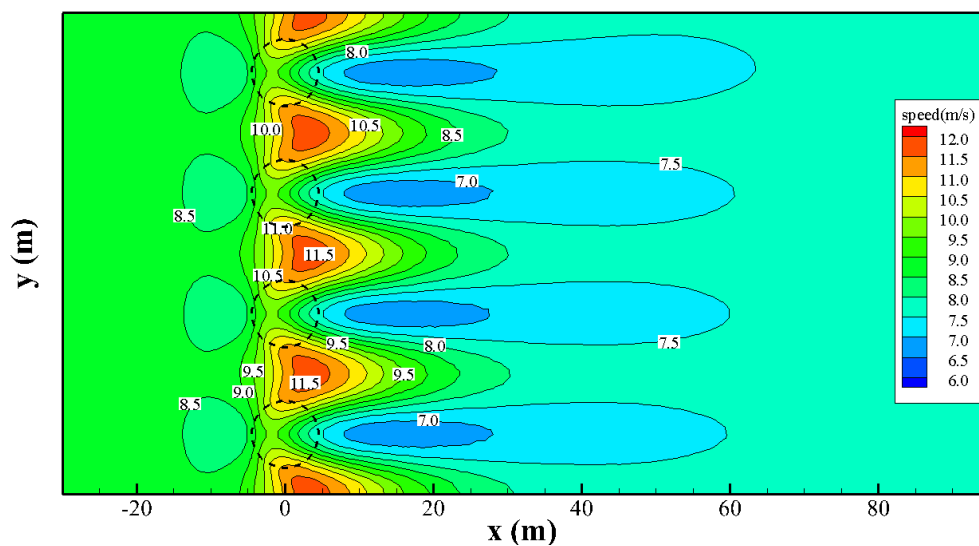
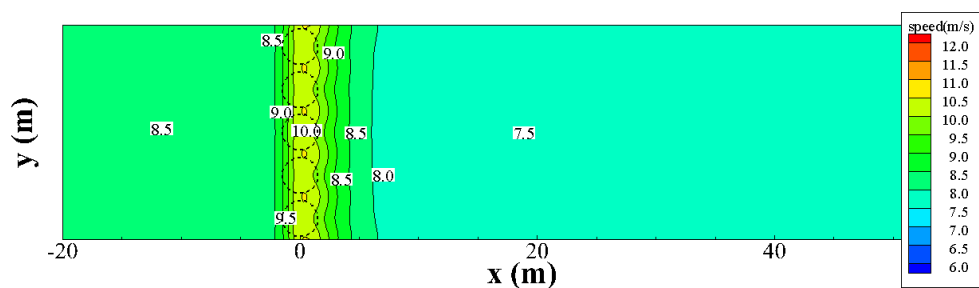


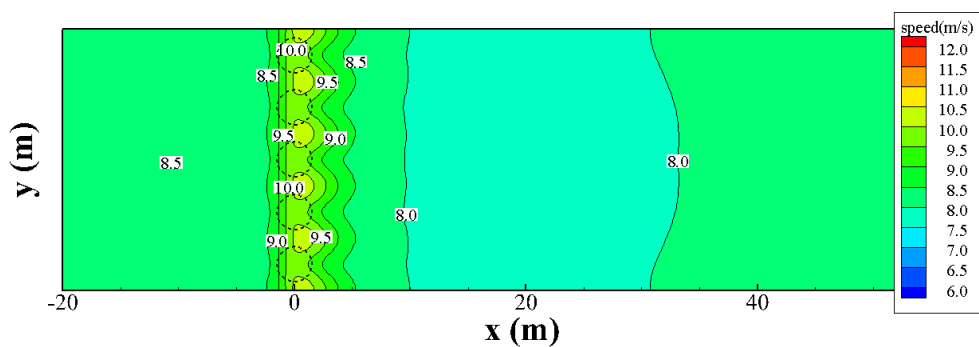
圖 4-16 瓊崖海棠排樹地面高 2 公尺處風速等值圖 ($H=12m$)

資料來源：本研究整理

(a) 間距比 $S/W=1.2$



(b) 間距比 $S/W=1.5$



(c) 間距比 $S/W=1.8$

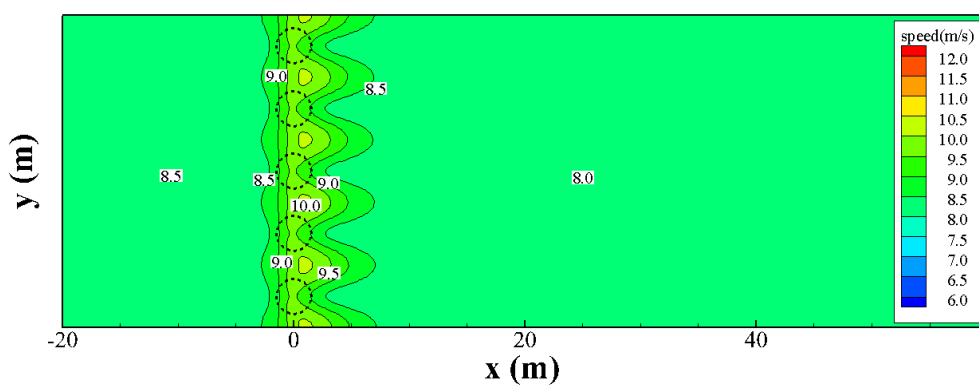
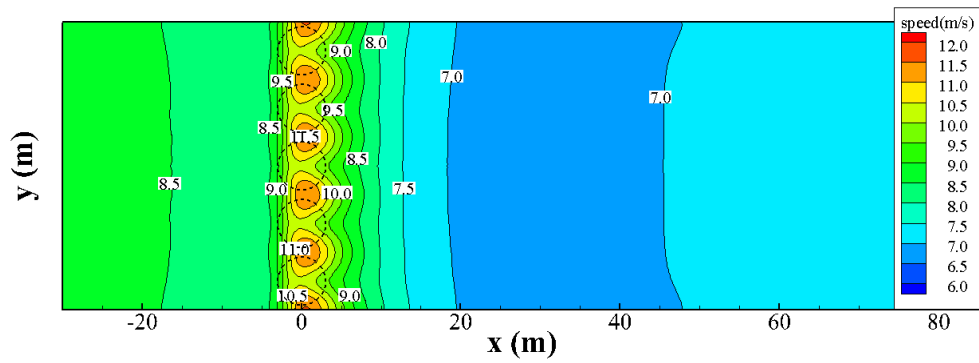


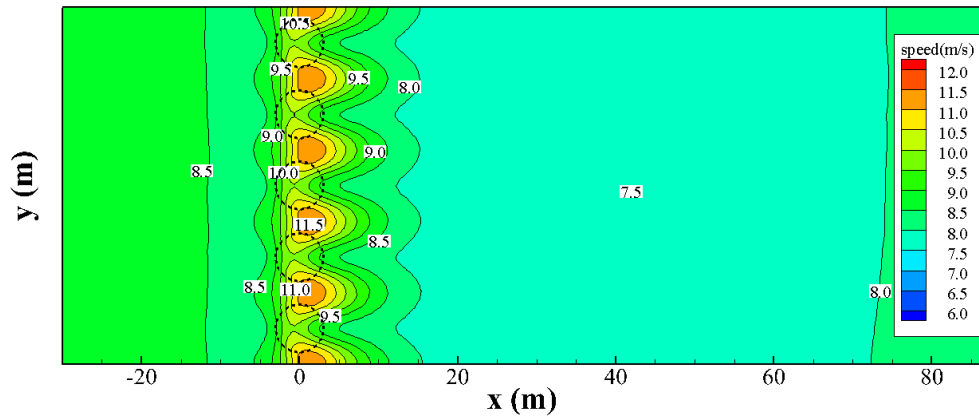
圖 4-17 阿勃勒排樹地面高 2 公尺處風速等值圖 ($H=6m$)

資料來源：本研究整理

(a) 間距比 $S/W=1.2$



(b) 間距比 $S/W=1.5$



(c) 間距比 $S/W=1.8$

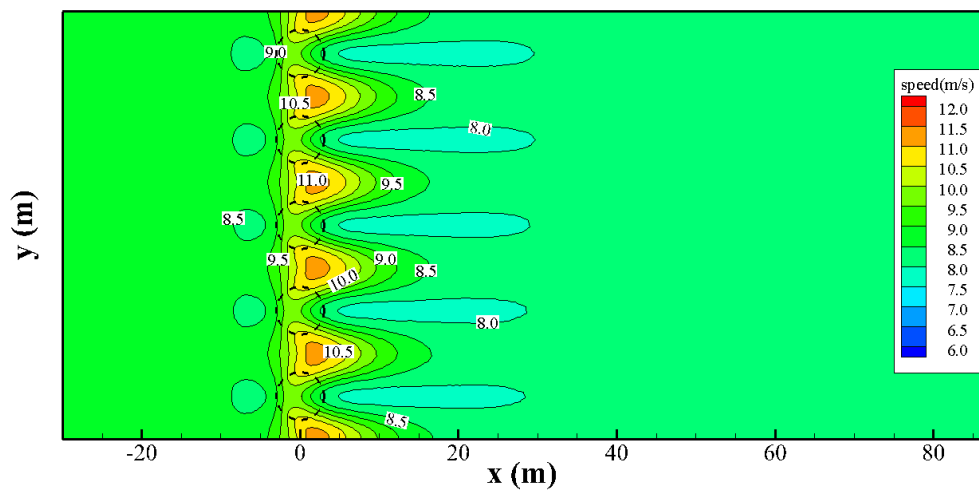
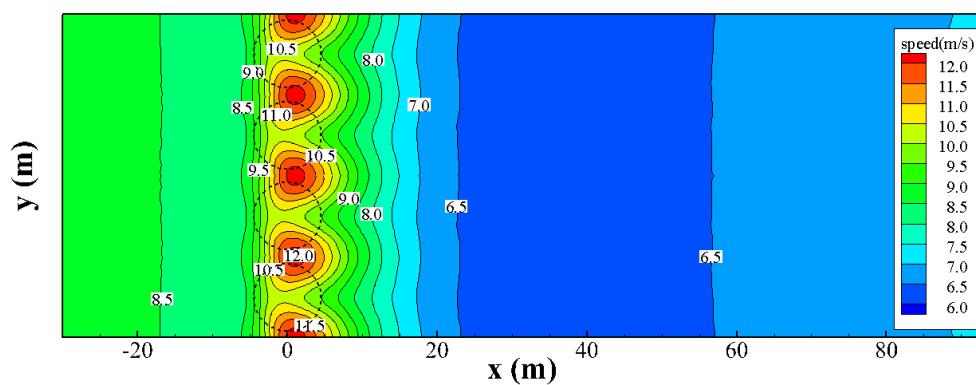


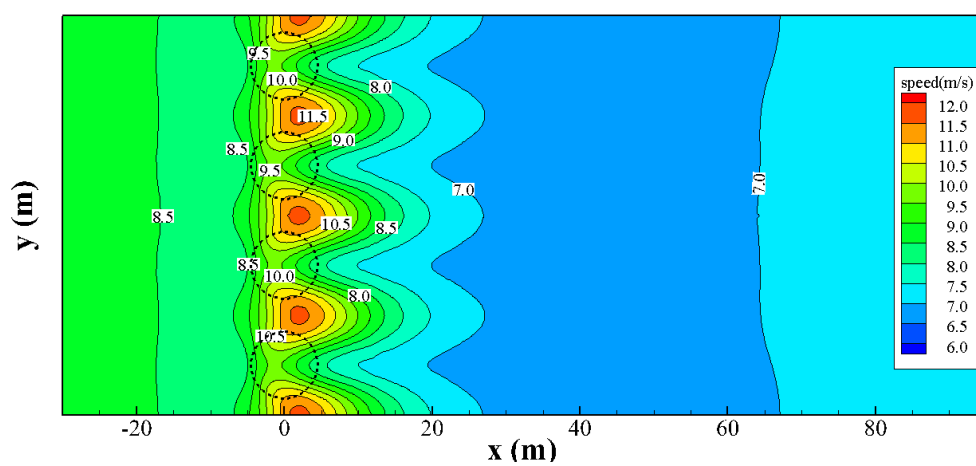
圖 4-18 阿勃勒排樹地面高 2 公尺處風速等值圖 ($H=9m$)

資料來源：本研究整理

(a) 間距比 $S/W=1.2$



(b) 間距比 $S/W=1.5$



(c) 間距比 $S/W=1.8$

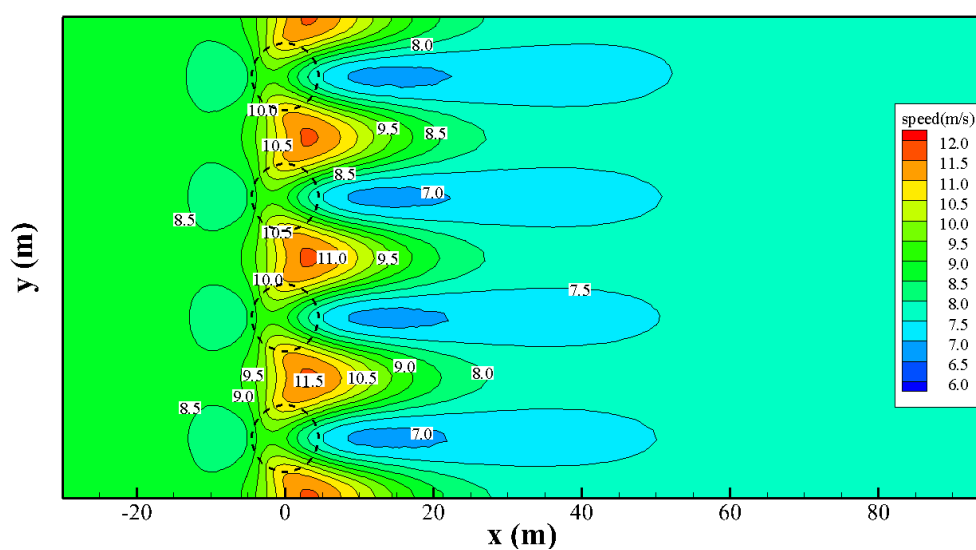
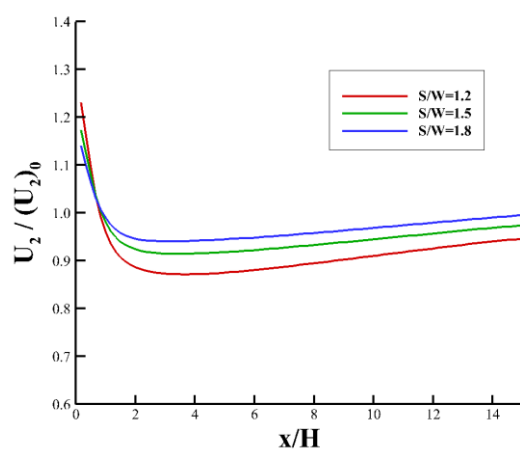


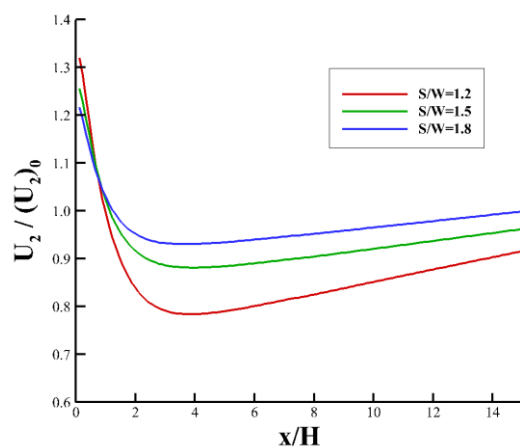
圖 4-19 阿勃勒排樹地面高 2 公尺處風速等值圖 ($H=12m$)

資料來源：本研究整理

(a) 樹高 $H=6\text{m}$



(b) 樹高 $H=9\text{m}$



(c) 樹高 $H=12\text{m}$

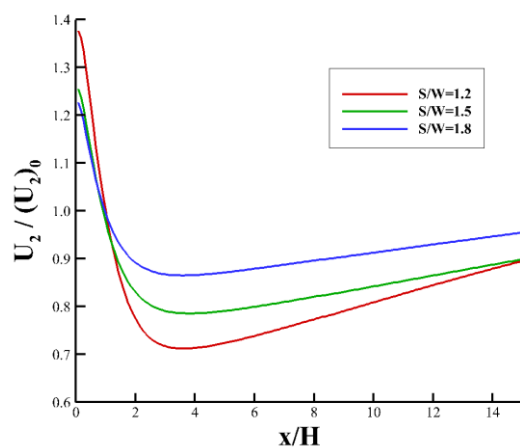
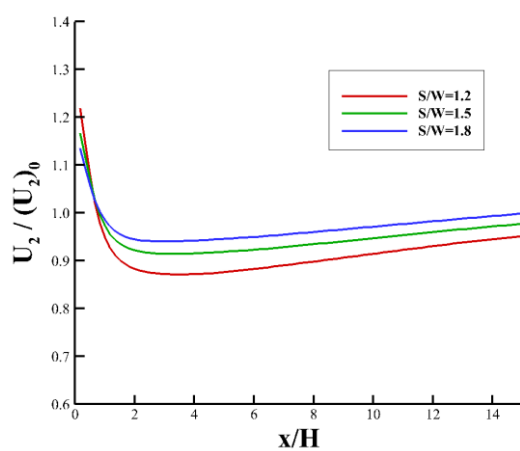


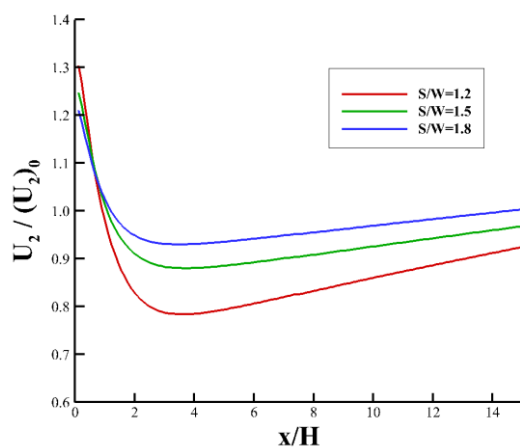
圖 4-20 不同樹高台灣欒樹後斷面平均地面風速變化圖

資料來源：本研究整理

(a) 樹高 $H=6\text{m}$



(b) 樹高 $H=9\text{m}$



(c) 樹高 $H=12\text{m}$

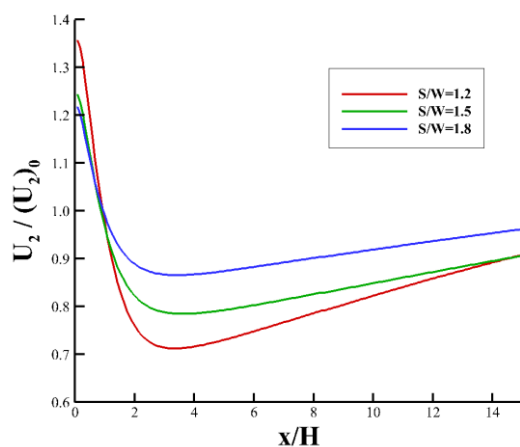
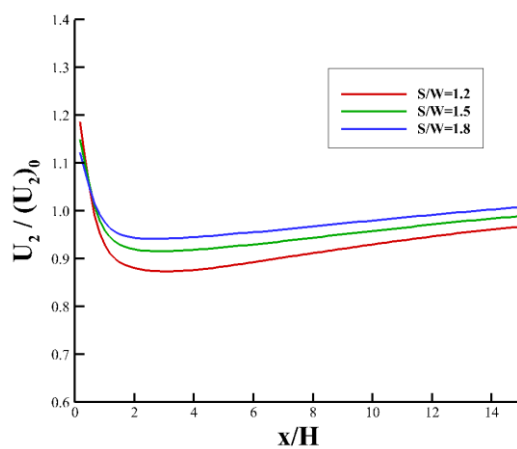


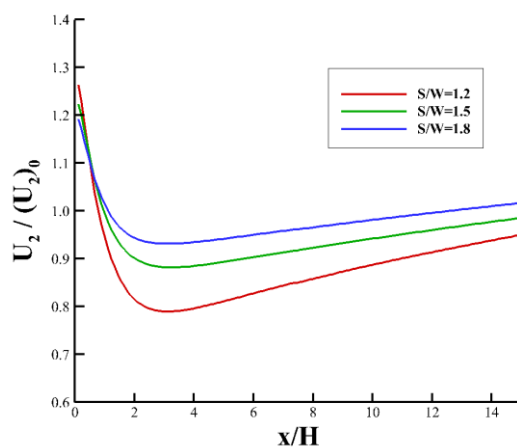
圖 4-21 不同樹高瓊崖海棠樹後斷面平均地面風速變化圖

資料來源：本研究整理

(a) 樹高 $H=6\text{m}$



(b) 樹高 $H=9\text{m}$



(c) 樹高 $H=12\text{m}$

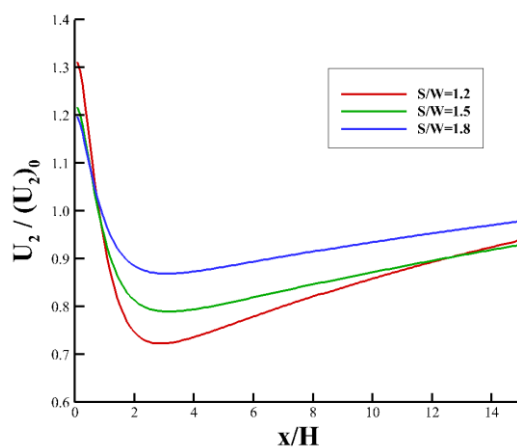


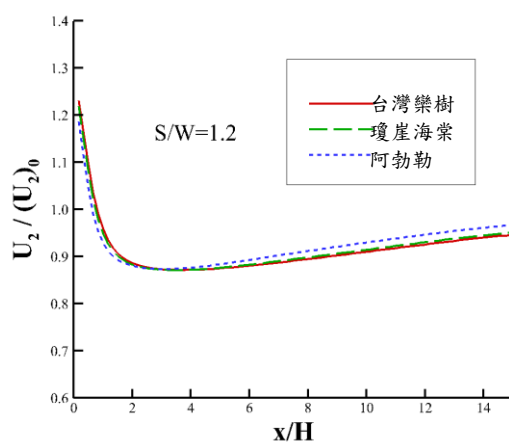
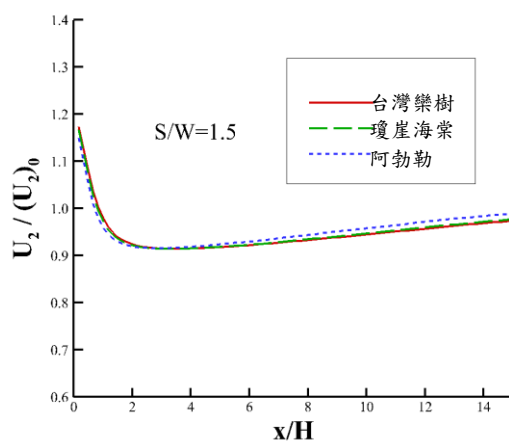
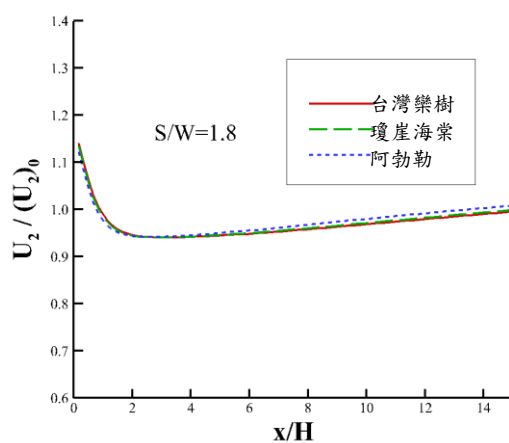
圖 4-22 不同樹高阿勃勒樹後斷面平均地面風速變化圖

資料來源：本研究整理

由圖 4-20 至圖 4-22 亦見，當排樹間距比減小或樹增高時，緊鄰樹因於樹之間氣流擠壓而產生加速的程度愈明顯。但自排樹下游約 $0.8H$ 後地面 2 公尺高風速的消滅程度愈強，且樹後減風的範圍愈長。

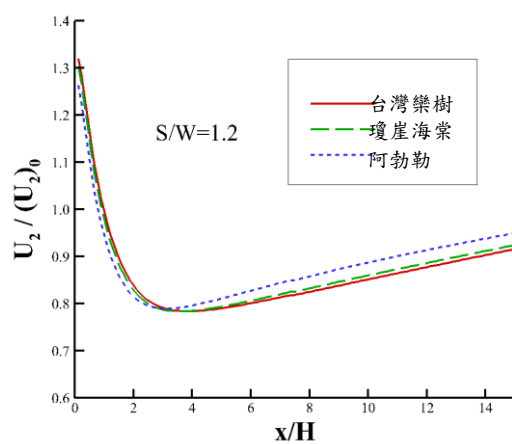
另一方面，圖 4-23 至圖 4-25 顯示，儘管台灣樂樹、瓊崖海棠與阿勃勒在樹冠密度(分別為 80%、70%與 55%)與樹冠形狀上並不相同，但在對樹後斷面平均地面風速變化之影響上並不顯著(此乃因為結果是經過橫斷面平均而得的緣故)。當樹高為 6m 時(圖 4-23)，隨著樹間距比的減少($S/W=1.8$ 至 1.2)，排樹後最大之減風效果更為明顯(最小地面斷面平均風速由 94%減至 88%)。而在樹高為 12m 的情況，排樹間距愈小，最大之減風效果甚至可以達到約 30%(圖 4-25a)。

綜合前述結果，若以橫斷面平均的結果作為排樹減風的設計基準，圖 4-20 至圖 4-22 可作為排樹植栽規劃設計的量化依據。若植栽規劃設計亦須考慮風場在橫風方向之波浪狀變化時，則應參酌圖 4-11 至圖 4-19 之量化結果。

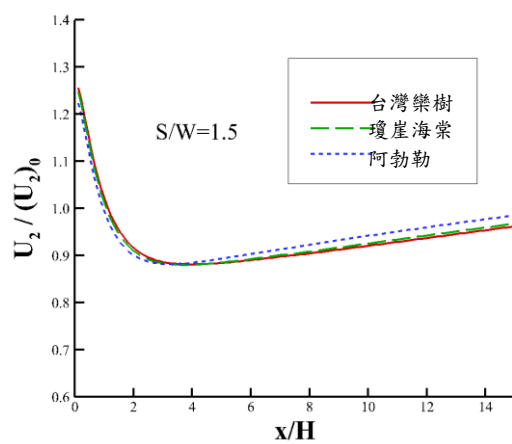
(a) 間距比 $S/W=1.2$ (b) 間距比 $S/W=1.5$ (c) 間距比 $S/W=1.8$ 圖 4-23 不同間距樹後斷面平均地面風速變化圖 ($H=6m$)

資料來源：本研究整理

(a) 間距比 $S/W=1.2$



(b) 間距比 $S/W=1.5$



(c) 間距比 $S/W=1.8$

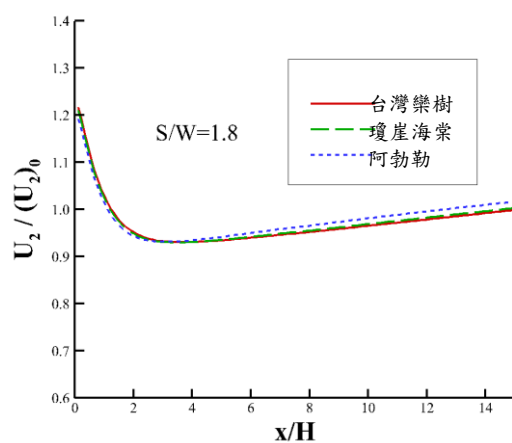
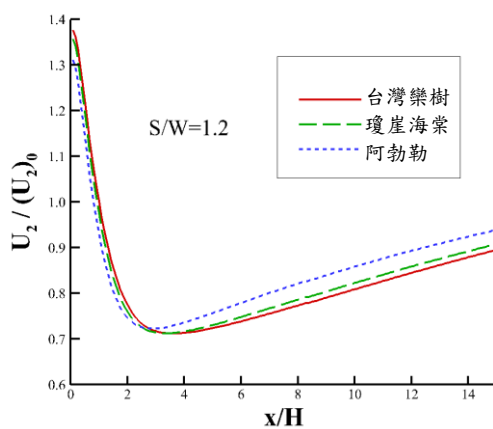


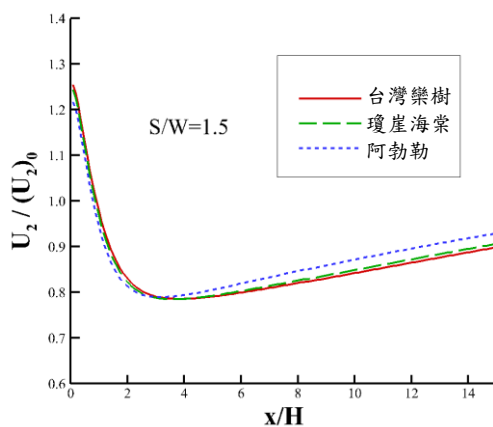
圖 4-24 不同間距樹後斷面平均地面風速變化圖 ($H=9m$)

資料來源：本研究整理

(a) 間距比 $S/W=1.2$



(b) 間距比 $S/W=1.5$



(c) 間距比 $S/W=1.8$

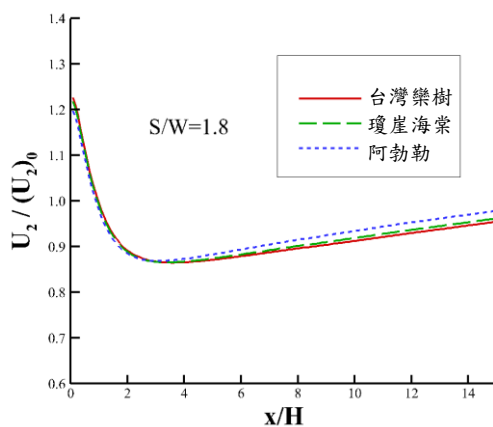


圖 4-25 不同間距樹後斷面平均地面風速變化圖 ($H=12m$)

資料來源：本研究整理

第五章 植栽減風與行人舒適度評估

第一節 植栽對建築物鄰近區域地面強風之減風效果

風域中因為建築物的存在，在部份區域中可能引致強風。因此，在局部強風地區以植栽的方式從事地面範圍的減風是可行的。以一個位於空曠、C地況地形中高度為 30m 之矩形斷面建築物為例(參見圖 5-1)，當六級風自左方朝右吹襲時，會於建築物的上下兩側發生高風速的情形。圖 5-2 顯示地面 2m 高處風速場的數值計算結果。

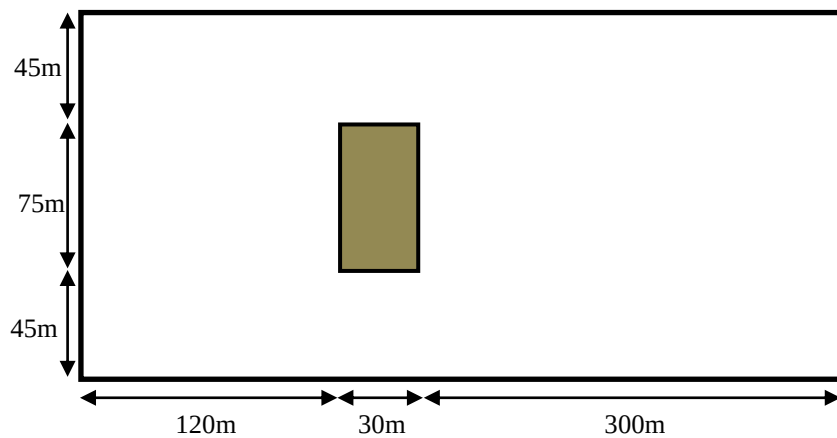


圖 5-1 風域中矩形斷面建築物簡圖

資料來源：本研究整理

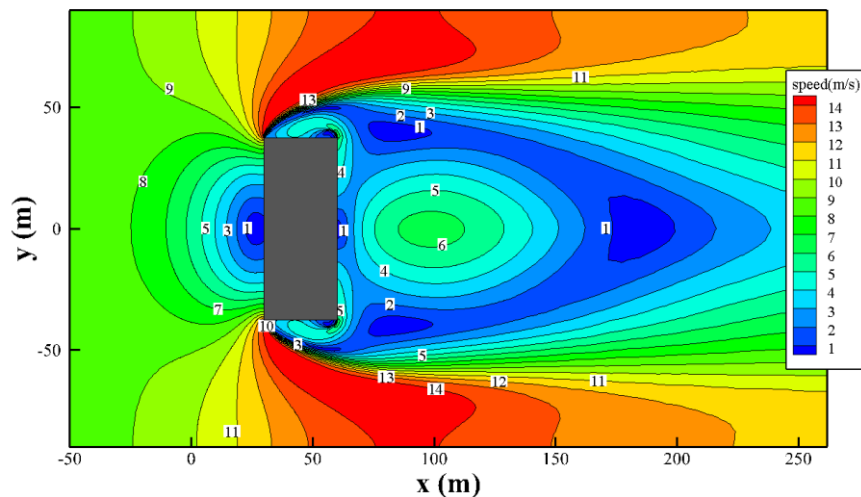


圖 5-2 無植栽情況矩形建築物地面 2m 高處風速等值圖

資料來源：本研究整理

若於矩形建築物上游 30m 前配置高度為 9m、間距為 1.2 倍樹寬(W)之台灣欒樹(參見圖 5-3)，地面 2m 高風速場的數值計算結果顯示(參見圖 5-4)建築物上下側的地面風速可以有效地減少。若再於建築物上下側之上游再各增加一列排樹，建築物角落之地面強風之降低則更為明顯(參見圖 5-5)。

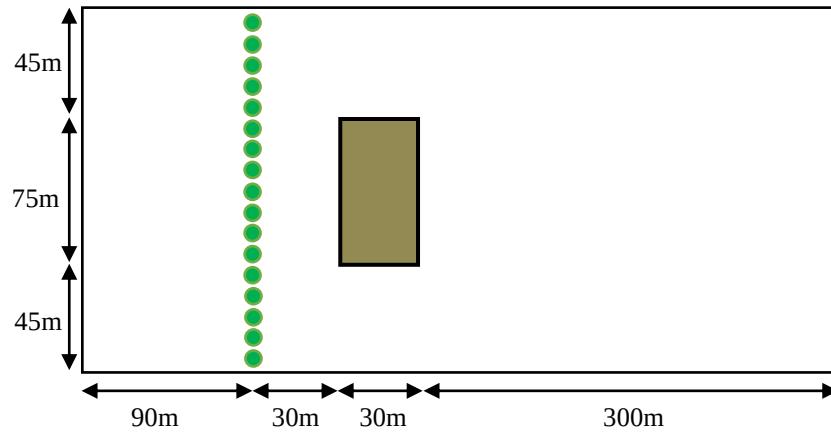


圖 5-3 矩形建築物上游配置排樹簡圖

資料來源：本研究整理

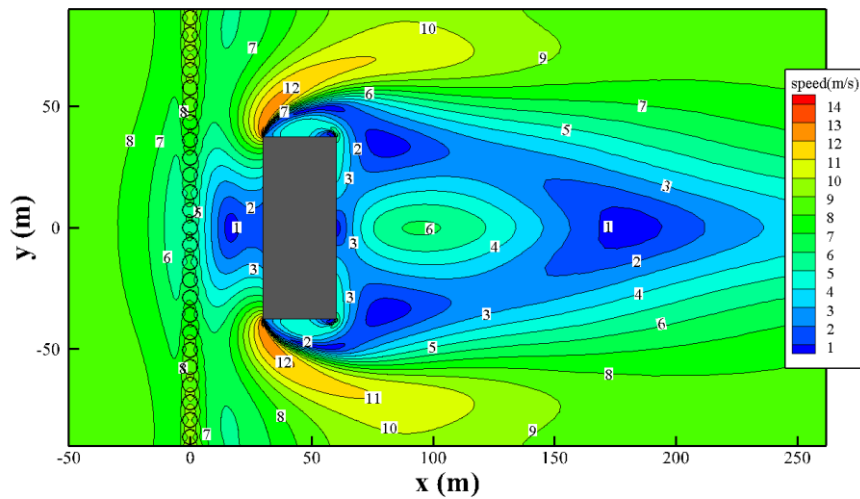


圖 5-4 排樹植栽情況矩形建築物地面 2m 高處風速等值圖

資料來源：本研究整理

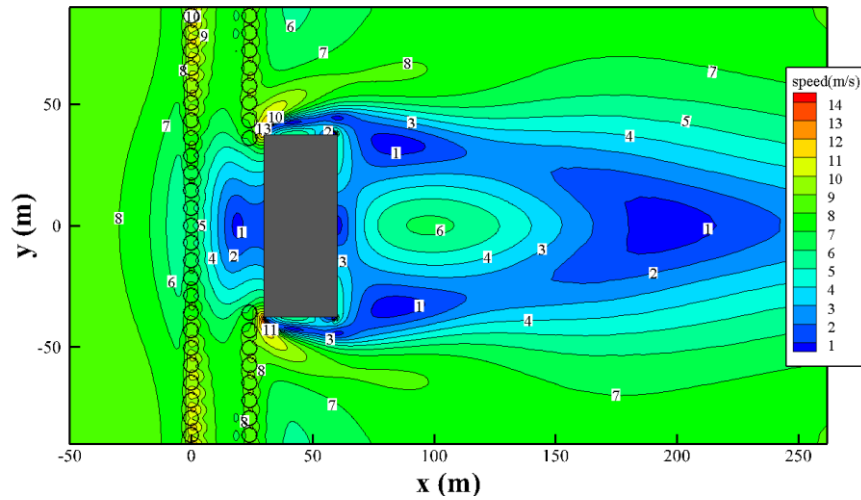


圖 5-5 再增加植栽情況矩形建築物地面 2m 高處風速等值圖

資料來源：本研究整理

另一個典型的情況，即以在空曠、C 地況地形中高度為 30m 之雙方形斷面建築物為例(參見圖 5-6)，當六級風自左方朝右吹襲時，不僅於建築物的上下兩側，甚至在兩棟建築物之間的地面範圍都會因為氣流的擠壓而產生高風速的情形(參見圖 5-7 數值計算之結果)。

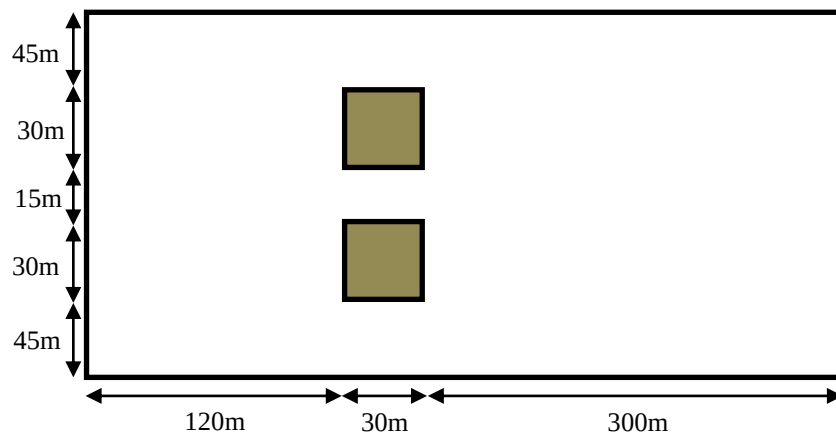


圖 5-6 風域中雙方形斷面建築物簡圖

資料來源：本研究整理

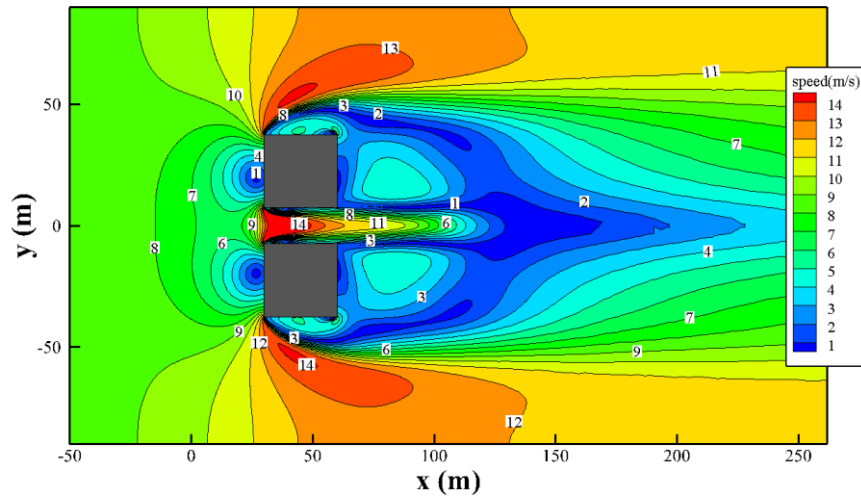


圖 5-7 無植栽情況雙方形建築物地面 2m 高處風速等值圖

資料來源：本研究整理

若同樣地在於建築物上游 30m 前植栽高度為 9m、間距為 1.2 倍樹寬(W)之台灣欒樹(參見圖 5-8)，數值計算結果顯示(參見圖 5-9)，建築物附地面近發生的高風速可以明顯地降低。若再於建築物上下側與兩棟建築物間之上游再各增加排樹植栽，則會獲得對地面強風更佳之減風效果 (參見圖 5-10)。

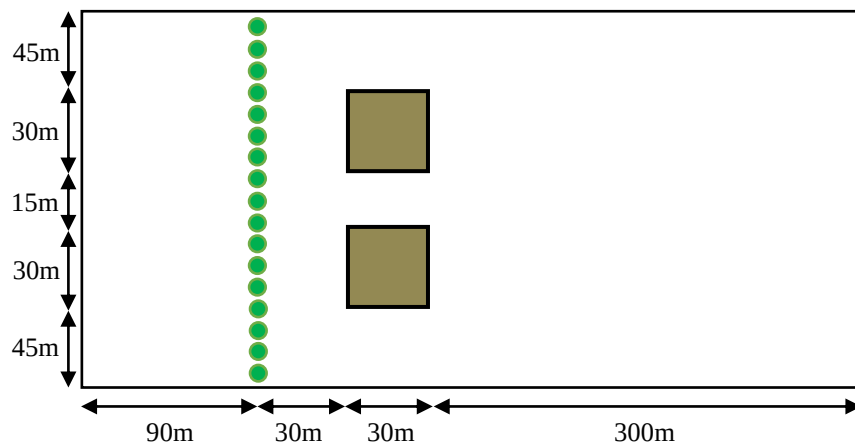


圖 5-8 雙方形建築物上游配置排樹簡圖

資料來源：本研究整理

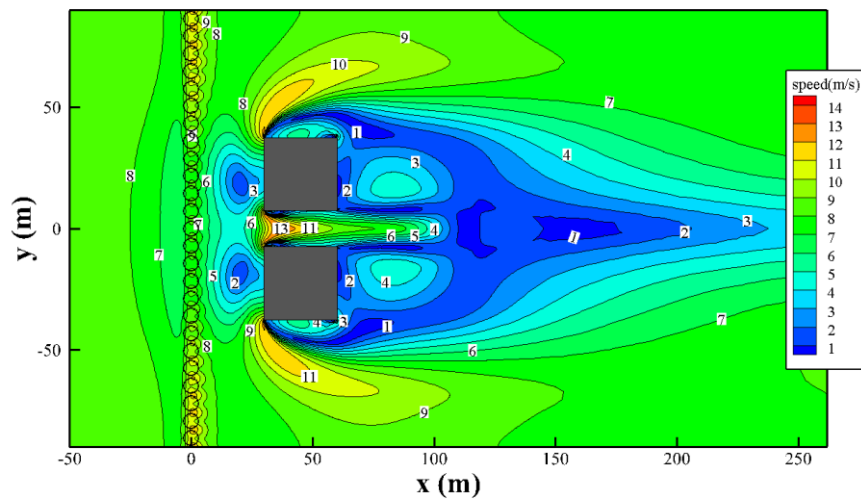


圖 5-9 排樹植栽情況雙方形建築物地面 2m 高處風速等值圖

資料來源：本研究整理

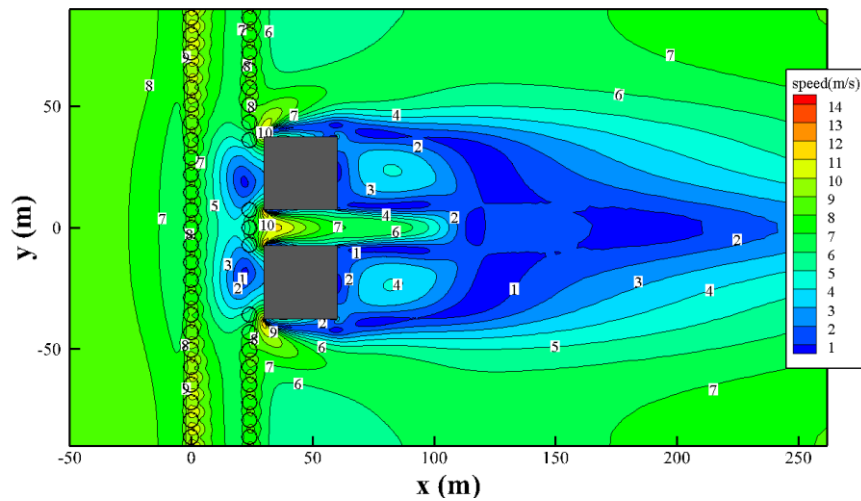


圖 5-10 再增加植栽情況雙方形建築物地面 2m 高處風速等值圖

資料來源：本研究整理

第二節 植栽對建築區行人舒適度影響之評估

本節以一個位於台北市的建築區塊為範例(參見圖 5-11)，針對排樹植栽的減風效果，先以絕對評估法進行地面行人風之檢討。接著，再採用風速發生機率評估法，根據現地(C 地況)16 個風向來風時相應之行人風況進行強風情況行人舒適度之評估。

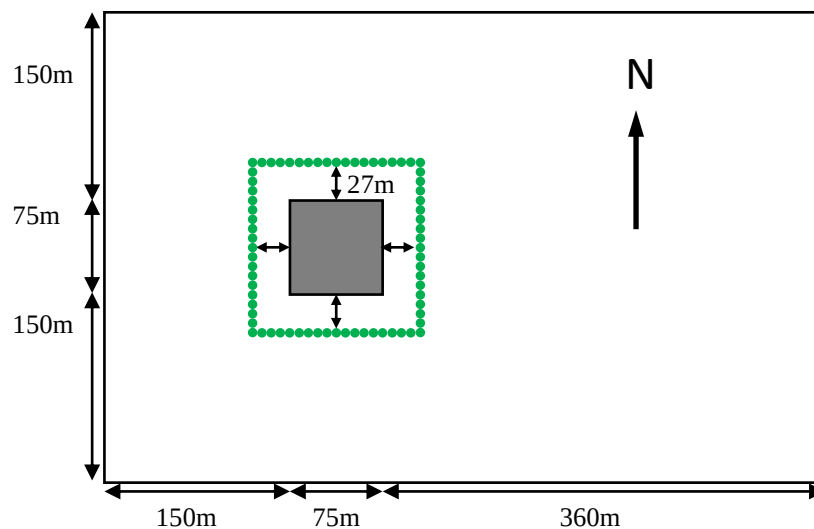


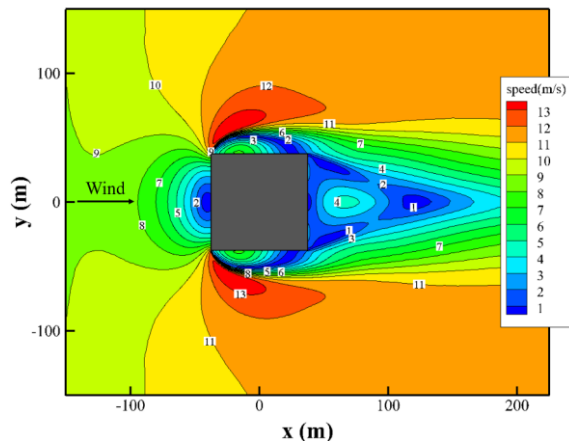
圖 5-11 方形建築物四周排樹配置簡圖

資料來源：本研究整理

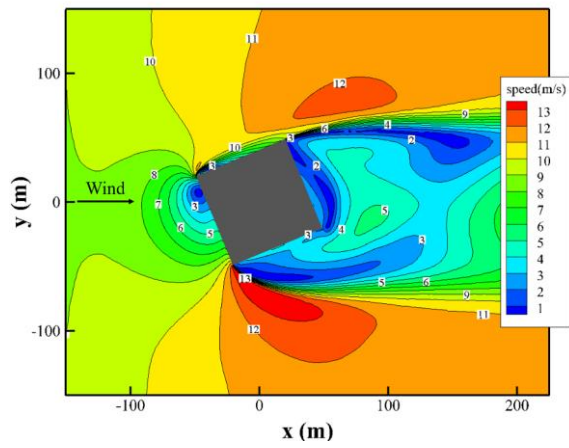
範例中的建築物長、寬與高度分別為 75m、75m 與 30m，係位於平坦、空曠的 C 地況地形中。當受到六級風吹襲時，圖 5-12 顯示典型風向建築物附近行人高度地面風速的變化。若於建築物四周距離 27m 處配置 9m 高、間距為 1.2 倍樹寬之台灣欒樹，其相應之地面風速變化的數值預測結果如圖 5-13 所示。

依據 1961 至 2000 年氣象局台北觀測站之各風向平時風速韋伯機率參數結果(表 5-1)，可以由 16 個風向相應之地面風速代入公式(2-3)中以獲得風速超過既定門檻值的總發生機率，進而評估相應行人舒適度的等級。

(a) 北風情況



(b) 北北東風情況



(c) 東北風情況

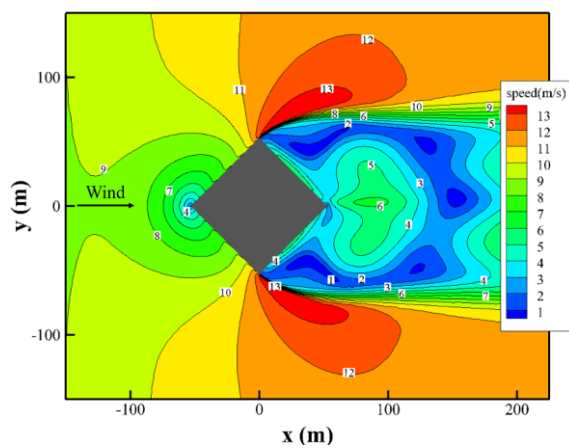
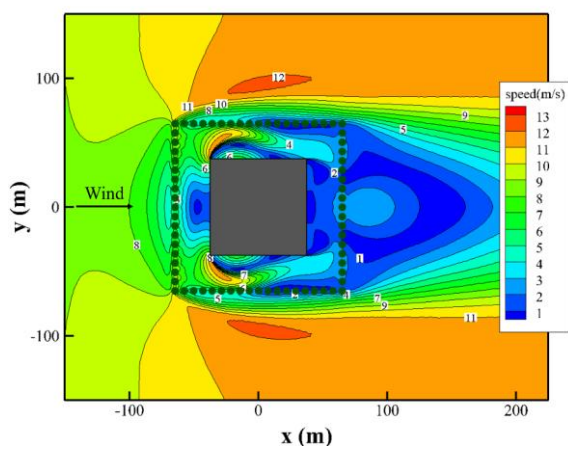


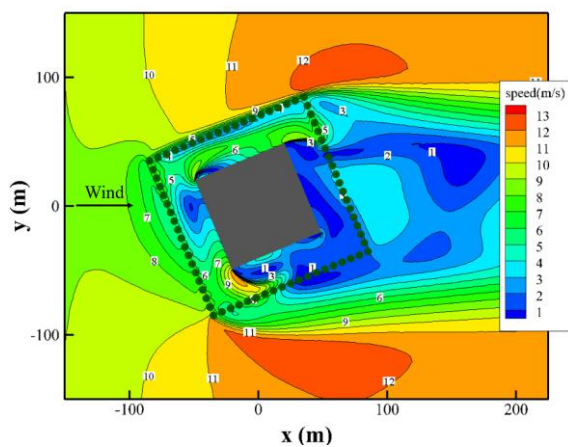
圖 5-12 典型風向情況方形建築物區內地風速等值圖

資料來源：本研究整理

(a) 北風情況



(b) 北北東風情況



(c) 東北風情況

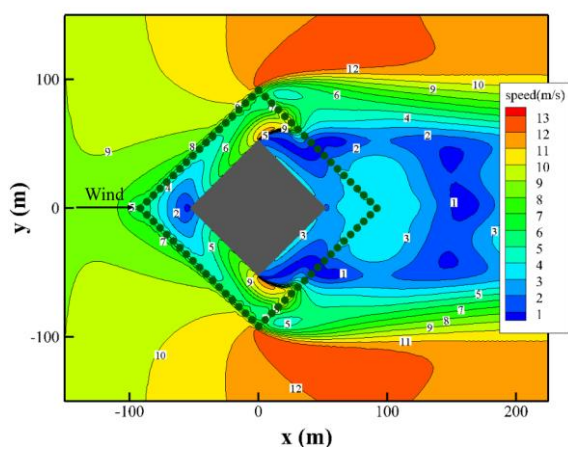


圖 5-13 植栽後典型風向情況方形建築物區內地地面風速等值圖

資料來源：本研究整理

表 5-1 台北市各風向之平時風速的韋伯機率參數

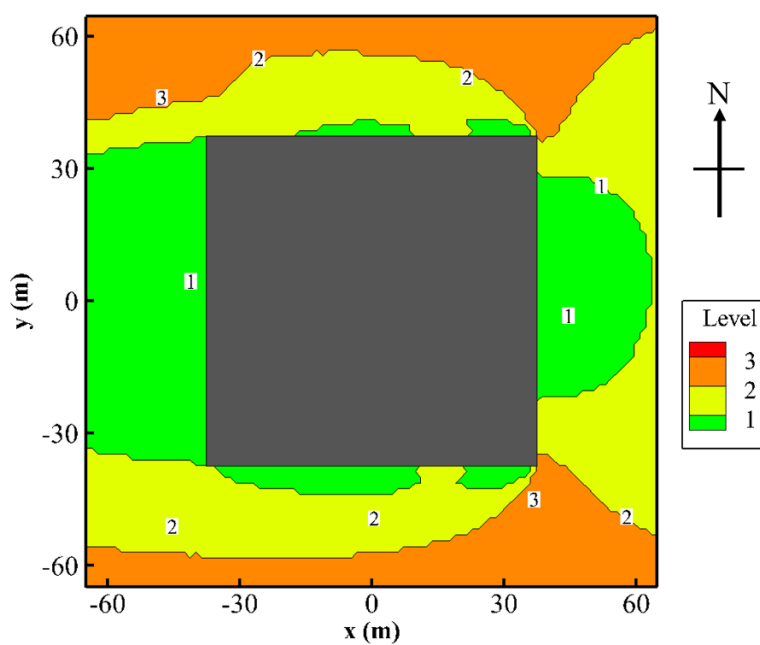
風向	發生機率 (%)	平均風速 (m/s)	a_i	b_i (m/s)
北北東	1.28	2.58	1.66	2.97
東北	2.64	3.35	1.87	3.97
東北東	18.73	4.39	2.51	5.10
東	23.25	4.17	2.40	4.99
東南東	12.05	3.62	1.97	4.29
東南	3.57	1.84	1.37	2.51
南南東	6.24	1.42	1.78	2.03
南	5.71	1.32	2.10	1.08
南南西	3.06	1.19	2.08	1.73
西南	2.93	1.43	1.57	2.03
西南西	3.13	2.32	1.55	2.90
西	3.92	2.56	1.54	2.97
西北西	3.46	2.47	1.82	2.94
西北	3.31	2.53	2.18	3.08
北北西	2.98	2.79	1.99	3.20
北	1.59	2.34	1.71	2.69
靜風	2.15	-	-	-

資料來源：[6]

若採用 Lawson 與 Penwarden 建議之行人風評估標準([44]，參見表 2-8)，圖 5-14 顯示建築物區塊植栽排樹前後行人風等級之空間分佈，其中等級 1 至 4 分別相應於「長時間停留」、「站立」、「行走」與「不舒適」的使用目的。由圖可見，於建築物四周進行排樹植栽可以顯著地降低地面的行人風。表 5-2 亦顯示植栽前後相應的量化結果，其中在排樹圍繞的方形(129m×129m)區域中植栽前後等級 1 的相應面積比例自 30.3%大幅增加至 69.1%，顯見排樹植栽對建築物鄰近區域行人舒適度改善的成效卓著。換言之，考量當地的氣象統計資料(包括各風向發生機率與平均風速)，若此方形區域須作因強風而引起之行人不舒適度評估，而當植栽排樹後，令人們長時間停留最佳舒適度(第 1 等級)的面積占整個方形區域的比例自植栽前的 30.3%大幅增加至 69.1%，這是因為相應於次佳舒適度第 2(站立)與第 3(行走)等級面積比顯著減小的緣故。因此，經由風速發生機率評估法的應用可以明確地表現出排樹的減風功

效。

(a) 植栽前



(b) 植栽後

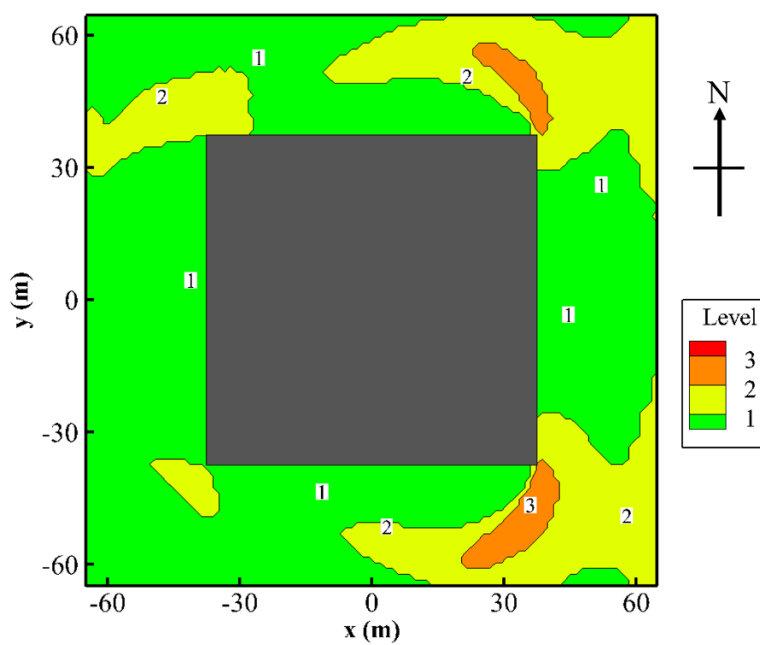


圖 5-14 植栽前後建築物區行人風等級空間分佈比較圖

資料來源：本研究整理

表 5-2 植栽前後建築物區行人風等級空間範圍比較表

舒適度等級	使用目的	風速範圍	植栽前 面積百分比	植栽後 面積百分比	相對變化
1	長時間停留	3.4 m/s	30.3%	69.1%	+128%
2	站立	5.5 m/s	36.5%	28.4%	- 22%
3	行走	8.0 m/s	33.2%	2.5%	- 92%
4	不舒適	13.9 m/s	0	0	-

資料來源：本研究整理

第六章 研究成果與檢討

第一節 研究成果

茲將本研究完成之成果逐項分述如後：

一、資料收集方面

1. 近期國內採用植栽進行建築區域防風或減風案例與結論的蒐集整理。
2. 台灣常見景觀樹/行道樹相關資訊與樹種特性資料的蒐集。
3. 國內外樹風場的相關現場監測與數值模擬研究之蒐集與整理。尤其在樹值模式中樹冠特性的處理上匯集了近期相關研究的先進方法，以作為本研究風場模擬預測之重要參考。

二、風洞試驗方面

1. 完成台灣欒樹、瓊崖海棠與阿勃勒模型樹的製作，並自製作過程中獲得相當的經驗，可作為爾後相關模型製作之借鏡。
2. 針對3種典型樹種從事了樹後截面的風速剖面量測，以作為數值預測結果比對驗證之依據，亦是探求樹冠風力參數的基準。

三、數值模擬方面

1. 以風洞試驗量測結果為依據，完成3種典型樹種樹冠風力參數的探求。
2. 確立了3種典型樹種風場模擬預測的數值計算模式。
3. 系統化探討實際風域中樹種、樹高、樹間距對排樹後行人風場與減風效果之影響並提出量化結果，作為植栽減風設計的一般性原則與都市植栽防風規劃之參考。

四、植栽減風與行人舒適度評估方面

1. 針對風域中矩形斷面建築物與雙方形斷面建築物兩個範例，參酌前述獲得的排樹植栽原則，以絕對評估法展示在六級強風吹襲時排樹植栽對建築物鄰近行人風產生的之減風效果。
2. 以一個建築區塊為範例，針對排樹植栽的減風效果，除了以絕對評估法進行地面行人風之減風效果檢討外，再採用風速發生機率評估法，配合以現

地氣象站資料，根據現地 16 個風向來風時相應之行人風況完成強風情況行人舒適度之評估。

第二節 問題檢討與對策

一、模型樹製作

本研究在模型樹的製作上除了參考行政院農委會[1]與國立自然科學博物館[2]的網站照片外，另經多次與實地觀察與就教中興大學在植物與森林領域之學者專家，在研究團隊密集的討論後始決定出3個典型樹種的標準外形。此外，為了要真確地反應出樹冠的特徵，研究中採用3D列印的方式精密地製作出樹幹、樹枝與樹葉等組件進而組合完成。由於模型樹的造型具一致性，有利於試驗結果重覆性的掌握。此外，為確定模型樹樹冠密度符合需求，研究團隊依據USDA[8]的建議，由7至8個人進行模型樹樹冠密度的估計，並求得相應之平均值。當樹冠密度之平均值與既定樹冠密度差異顯著時，則作模型樹之修改，直至相對差異低於3%為止。

研究中在製作台灣欒樹模型的過程中已獲得了相當的經驗與技術，可以作為爾後類似工作之參考。

二、數值模擬所需之電腦能量與計算速度

研究中的數值工作涉及大量之電腦運算，需要足夠之電腦硬體支援。除了計算個案之數量多外，在模式發展測試階段更需顧及電腦之運算速度，以加速計畫進度之推動。

本計畫中之數值模擬主要著眼於在個人電腦之運算，以提昇模式在應用上之普遍性並方便大量數值資料之分析。然而，一個典型之三維風場計算在使用工作站級個人電腦就需要約7個工作天方能得到結果，確實造成了執行上的困擾。為了要克服此問題，研究中另於之數值模擬乃於工作站級個人電腦中加置了一個通用計算圖形處理器，配合以相對之平行處理，以有效地增進數值運算的效能並減少所花費的時間。

三、成果適用範圍的擴展

本研究在排樹減風的量化結果上乃依據台灣欒樹、瓊崖海棠與阿勃勒的樹冠特性經過風洞模型試驗與數值模擬而獲得。然而，為擴展這些成果的適用範圍，研究中參酌了本所出版「應用於綠建築設計之台灣原生植物圖鑑」

[7]中列舉的喬木，再依據圖象以 USDA[8]建議的方法進行樹冠密度之判定。基於樹冠密度與研究中 3 個典型樹種的類似程度，表 6-1 列舉了具有與本研究典型樹種類似樹冠特性的台灣原生植物。在爾後相關的排樹植栽規劃時，可以參照表中選定之樹種，就分類歸屬找出相應減風效果之量化結果(圖 4-11 至圖 4-22)，以進行植栽減風之設計。

表 6-1 具有與本研究典型樹種類似樹冠特性的台灣原生植物分類

台灣樂樹類	瓊崖海棠類	阿勃勒類
樹冠密度>80%	樹冠密度 60%~80%	樹冠密度<60%
● 皮孫木 ● 樟樹 ● 港口木荷 ● 大頭茶 ● 榕樹 ● 楊梅 ● 福木 ● 毛柿 ● 水黃皮 ● 大葉山欖 ● 銀葉樹 ● 鐵冬青 ● 青楓 ● 黃連木 ● 台灣樹蘭 ● 厚皮香 ● 穗花棋盤腳	● 烏心石 ● 蘭嶼烏心石 ● 番龍眼 ● 繖楊 ● 相思樹 ● 蓮葉桐 ● 梧桐 ● 茄苳 ● 楓香 ● 無患子 ● 欖仁樹 ● 台灣赤楠 ● 九芎 ● 黃槿 ● 欖李	● 山菜豆 ● 棟樹 ● 榔榆 ● 光臘樹 ● 檳樹 ● 雀榕 ● 魚木 ● 台灣山芙蓉 ● 台灣五葉松 ● 蒲葵

資料來源：本研究整理

第七章 結論與建議

第一節 結論

本研究以過往相關單株植栽模擬研究之成果為基礎，針對國內常見之 3 種典型樹種—台灣欒樹、瓊崖海棠與阿勃勒，首先針對風通過防風排樹的情況，經由風洞試驗量測資料之驗證，以建立足以準確模擬地面風場的數值模式。繼而，研究中從事了真實情況排樹後風場之模擬，評估相應地面的減風功能與效益，進而歸納出排樹植栽減風設計的一般性原則。獲得的結論計有如後四項：

- 一、風通過排樹後，自下游約 0.8 倍樹高後之行人風速即有減少之現象，且於下游約 2 至 3 倍樹高處發生最大之減風效果，而此減風範圍可達下游十餘倍樹高的範圍。
- 二、當排樹植栽間距之減小或樹高增加時，最大之減風效果可由約 10% 增加至 30%，而減風範圍甚至可延伸至 20 倍樹高的下游處。
- 三、樹冠密度由大至小依序為台灣欒樹(80%)、瓊崖海棠(75%)、阿勃勒(55%)。在緊鄰排樹後區域，三個樹種在樹後發生減風效果之差異相對地並不明顯。當排樹植栽間距減小或樹高增加時，其減風效果間之差異才漸顯著。
- 四、表 6-1 列舉了具有與本研究典型樹種類似樹冠特性的台灣原生植物。在爾後相關的排樹植栽規劃時，可以參照表中選定之樹種，就分類歸屬找出相應減風效果之量化結果(圖 4-11 至圖 4-22)，以進行植栽減風之設計。
- 五、針對風域中建築區塊的典型範例，以絕對評估法與相對評估法進行地面行人風減風效果之檢討顯示，適當之排樹植栽對區域內之行人風場都有相當之減風效果。此外，運用風速發生機率評估法的結果也顯示，排樹植栽對強風區域中行人舒適度亦有顯著之改善效果。

第二節 建議

建議一

辦理本研究成果之推廣說明會：立即可行建議

主辦單位：內政部建築研究所

協辦單位：社團法人中華民國風工程學會、中華民國全國建築師公會

為使本計畫之研究成果能立即為建築區植栽防風規劃與設計之應用，
可以辦理本研究成果之推廣說明會。

建議二

針對常見綠建築植栽樹種進行特性分類：中長期建議

主辦單位：農委會林務局、林業試驗所

協辦單位：社團法人中華民國風工程學會、中華民國全國建築師公會

研究中將「台灣原生植物圖鑑」中列舉之喬木，依據照片外觀進行樹冠密度了初步分類，以供排樹植栽減風設計規劃參酌之依據。建議辦理常見植栽樹種特性的相關研究，以確認本研究樹種分類之正確性。

附錄一 採購評選會議意見與回應

採購評選會議委員意見回應

項次	評選意見	研究團隊回應
1	台灣區域屬於多颱風、多地震地帶，所有研究案之設計方案建議考量前述因素之影響。	本研究係針對颱風與季風引致之強風情況進行地面行人風況之探討。由於地震對並本案無直接關聯，故並未納入考量。
2	道路行道樹之植栽請考量道路之寬度與植栽樹枝高度、樹種等之關係。	為了要獲得植栽行道/景觀排樹減風設計的一般性原則，3 個選定探討的樹種各具其特徵(如樹高、樹冠形狀與尺寸、樹冠比、樹冠密度等)，其樹後減風的效果各異，故需在研究中予以考慮。此外，道路寬度之影響應不明顯，研究中暫不考慮。
3	本研究案對景觀設計具有實質意義，惟研究資料之完整性很重要。譬如植栽雖減緩了正面風勢，但其造成其他區域風陰等影響必須帶到。	誠如委員所述，當風吹至排樹時多會在樹冠邊緣處造成局部加速，但位於樹冠上方較為快速的氣流會因阻擋而朝上轉折，故在下風處近地面(行人活動)區域產生相當程度的減風效果。研究中將運用數值模擬的方法獲得排樹前後地面風速變化的詳細資料以供行人風場減風效益具體量化的評估。
4	研究報告必須提起風向確認其重要性，否則資料引用效果有限。	來風風向之改變對排樹後減風之效果確實具有影響，研究中將針對此因素進行系統化之探討。
5	樹種可依都市設計案、都市計畫規劃。尤其新竹風大，了解一下什麼樹種為宜。	依委員意見，將再進行相關資料之收集，並針對選定之探討樹種作進一步的調整。
6	哪個都市的植栽或種景觀樹是有抗強風需要?	以新竹市為例，在秋冬季時常因季風而造成地面強風。又如台中市鄰近大度山的都市範圍中，也常因地形變化使得東北季風產生加速，產

		生局部區域地面之強風。於颱風發生期間，地面強風之發生則更為普遍。在都市重劃區開發規劃時，行道/景觀樹適當的植栽除了可以調和地貌外，對區域內行人風場舒適性的改善也會有具體之效益。
7	需抗強風的是海邊，但樹種多為木麻黃，可再找其他抗風樹種?	依委員意見，將再進行相關資料之收集，並針對選定之探討樹種作進一步的調整。
8	所用模型只發展到兩棵樹，其他樹叢怎麼辦?	協同主持人曾針對風通過單/雙株植樹的風場模擬從事研究，並有兩篇國際期刊的學術成績，然在實際工程應用上則有待更進一步的努力。在排樹的情況中，樹與樹的間距以及來風風向對下游風場的分析則期於本研究中再作細究，以供區域規劃時植栽減風分析之重要參考。
9	樹一直長，又有四季變化(有葉無葉)，如何選擇適合的樹型樹種(難道要頻繁修剪?)，其效果如何?研究價值所在?	誠如委員所述，隨著樹的成長與季節的改變等因素，樹的高度、外形、樹冠密度會有所改變。研究中擬針對成樹作為研究之基礎，以檢討其減風效益。在規劃階段從事地面強風評估時，本研究預期獲得之量化成果，當可作為減風分析的重要參考。
10	盤點全國五年內各都市設計審議會會議有關抗風之議題及辦法。	依委員意見，將再進行相關資料之收集，並針對選定之探討樹種作進一步的調整。
11	本研究探討都市強風之風速範圍為何?請說明。	在實際進行減風評估時，規劃者可就現地之氣象資料與地況，依據本國現行風力規範先行獲得排樹前的來風風速剖面，再根據研究成果中獲得之減風量化指標，依比例關係推求排樹後實際發生的風速分佈，據以評估行人高度範圍內是否

		會發生不適強風的情形。
12	都市範圍內因有建築物影響，穩定流場情形不多，如何應用本研究成果?請說明。	排樹前因鄰近建築或地物之影響確有可能造成不穩定的來風風況。本研究將沿用本國現行風力規範建議的準穩定(quasi-steady)分析概念進行探討，其結果應已具實際應用價值。

參考文獻

附錄二 期中報告審查意見與回應

審查意見 (依發問順序)	回 覆
一、楊宏宇委員：	
1.未來針對植栽排列方式可納入模擬參數考量，探討排列方式變化對於降低強風之影響。	如同委員之建議，本研究將針對排樹在不同間距之情況下探討強風下樹後地面風的衰減情況，進而獲得三個典型樹種植栽減風之量化結果，以作為爾後減風設計的重要參考。
2.不同的環境場合或高程，適合不同的植物（針葉林或闊葉林），其所產生的尾流效應是不同的，建議可模擬真實環境植栽及周圍建築物產生環境風場的改變進行探討。	依委員之建議，爾後將考慮針對地區因素，根據現地氣象資料，探討不同排樹植栽對建築物環境風場之影響，進而從事行人不舒適度的評估。
3.模式參數可再增加環境因子及植栽分佈考慮不同區域的降低強風效果，供相關單位參考。	本研究擬針對植栽對建築區行人環境風場之影響進行探討，以獲得植栽減風之設計通則。研究中將以若干選定的情境作為評估的例子，再考量地區氣象條件下從事行人不舒適度的評估。
二、黃健瑋委員：	
1.植栽防風降低都市環境風場的影響，對於都市建築於規劃設計實有助益。	感謝委員對本研究案預期目標之肯定。
2.試驗過程可組合多種不同植栽與建築環境條件，評估不同模式下植栽減風效益之差別，未來更可建立資料庫供各界參考使用。	本研究當參酌委員之建議，藉排樹減風之量化結果，歸納出 3 種常見樹種植栽減風設計原則，以提昇本研究之實用價值。
三、江逸章委員：	

1.本所過往已針對高層或超高層建築之高樓風場進行過系列研究，可參考前期研究成果調整假設條件及實驗設計。	依委員之建議，本研究中有關實際減風設計個案探討中的來風情況將選定 C 地況，相應大氣邊界層之厚度為 300 公尺。
2.在假設樹種選擇上或許可以結合綠建築評估指標，引用生物多樣性指標內所建議之樹種。	如委員之建議，本研究參酌行政院農委會、國立自然科學博物館以及林務局林業試驗所有關本國常見景觀樹/行道樹的資訊，並考慮樹種特徵的變異性，選定了台灣欒樹、瓊崖海棠與阿勃勒等 3 個樹種作為探討的對象。
四、鄭啟明委員：	
1.本計畫研究內容與研究方法均有完善的規劃，研究從過去的單株樹木擴展為排樹，更具有工程實務價值。	感謝委員對本研究案之肯定。
2.報告書第 36 頁提及樹冠風力參數(水平向)為 22.5 m^{-1} ，對參數單位的物理意義為何？請說明。	樹冠風力參數是表徵樹冠枝葉對風阻擋效果的一個量化指標。本參數是樹冠體的阻力係數(無單位)與單位體積中樹葉面積的乘積(單位為長度之倒數)，因此在採用在公制時單位為 m^{-1} 。
3.數值模擬與風洞試驗之間的相互驗證相當完整，但兩者間是採定性比較，建議採用某種定量指標(相關係數)。	依委員之建議，爾後在數值模擬與風洞試驗風速剖面之比對上將採用正規化均方差(NRMSE)之數化指標，針對相同空間位置之結果進行客觀的比較與驗證。
五、羅元隆委員	
1.期中報告書中有少許錯別字需修正：第 VIII 頁倒數第 3 行參「樹」應修正為「數」；第 5 頁倒數第 2 行「候」尾流區應修正為「後」。	敬謝委員的指正並進行修改。
2.圖 4-2、圖 4-3 與試驗結果圖 3-8、	由於在風洞試驗風速剖面量測上的

圖 3-9 相比，似乎沒有隨著 X/H 增加而在模型根部有尾流區變寬的趨勢。且圖 4-2 及圖 4-3 尾流形狀與樹冠形狀不符，請解釋。	空間解析度不如數值模擬，以內插方式獲得之風速等值圖則會產生不同之視覺效果。在而後圖形的呈現上將根據同等空間點進行風速等值圖之繪製，以降低其間之視覺差異。
六、陳俊芳委員	
1. 此案之適用範圍可能包括：基地內、基地外街道、室外公共空間或建築物易發生強風位置等，建議更明確界定，俾提高於實務面上之應用。	本研究擬針對都會中如新開發或重劃區基地內樹木植栽之減風設計，就 3 種常見樹種樹型在不同間距排列狀況下之減風效益，俾為都市植栽防風之規劃設計參考。
2. 數值模擬時探討對象為健康成樹，故建議探討樹木植栽槽(樹穴)之設置原則。	樹木植栽槽(樹穴)之設置對植栽樹的穩固確實重要，然本研究旨在探討樹木對地面強風之減風效果，故非屬本研究之主要目標。
3. 台灣欒樹成樹高約 15 公尺，惟模擬時採 $S/H = 1.5$，間距達 22.5 公尺，與都會區一般基地之植栽間距多不逾 4~8 公尺，兩者有所落差，是否會影響實際應用成效？	S 為樹主幹間距，當 $S/H = 1.5$ 時，扣除樹冠寬度 12 公尺後樹冠邊緣間距實為 10 公尺。由於本情況僅用於與數值模擬風速剖面比對之用，並無涉及實際應用。在後續實際風場的探討上將參酌委員的提醒，將植栽間距限制在 4~8 公尺之內。
七、盧文德委員：	
1. 是否有進行實樹測試與模型樹的結果進行比對？	由於在實際情況下之來風難以有效地掌控，在從事此等實場量測有其執行上的困難。因此，本研究採用風洞試驗，依據模型量測結果作為數值模式驗證之依據。
2. 實樹測試之困難為何？現行栽培技術已有長足改善，如果能與實樹試驗比較，對此案研究將有幫助。	通常在實際情況下，來風之特性不易有效地掌控，尤其是風速的大小與恆定性皆難以維持在理想的狀況。較之於風洞試驗，其結果具有頗高之不確定性。

3.報告書中摘要之四初步建議第 3 行，樹冠參「樹」應修正為「數」；第 5 頁倒數第 2 行，排樹「候」尾流應修正為「後」。	敬謝委員的指正並進行修改。
七、陳建忠組長：	
1.所述植栽在都審或各縣市主管機關過往之相關審議紀錄，請逐項整理盤點，以便了解其價值、必要性、作業分析方式、成本及人力等相關面向。	依組長之建議，再進行相關審議會會議結果之收集，並增錄於期末報告中。
2.行道樹之功用為何？似乎並非著重於防風。	建築區中栽種景觀樹及行道樹除了有助於景觀之調和外，對於區內風場微氣候也能有相當程度之影響，並在行人環境風場環境之改善上扮演著正面之角色。研究中收集了國內近十年各縣市都市發展局之都市開發審議會會議及都市邊更計畫案，在建築區內以植栽樹木進行防風或減風，在規劃與設計的階段已成為區域規劃考量中需重視的項目之一
3.阿勃勒模型樹型似乎與實物差異甚大。總體而言植栽可以減風的效果是多少，是否要投入建設費用。	將再行檢討阿勃勒模型樹，並重新進行風洞試驗與樹冠風力特性參數之模擬與率定。
4.本研究的重要性及價值性為何？尚未召開工作會議，建請調整。	本研究因初期在風洞使用排程上稍有延宕，故擬待試驗資料整合分析後再召開工作會議。(後已於 7/29 完舉行了第一次工作會議。)
5.本案研究範圍為都市尺度行道樹或建築基地植栽，請明確界定。	本研究擬針對都會中如新開發或重劃區基地內樹木植栽之減風設計，就 3 種常見樹種樹型在不同間距排列狀況下之減風效益，俾為都市植栽防風之規劃設計參考。

八、王安強副所長：	
1. 本案在單株樹及排樹之研究成果具有學術價值。實務面上，因模擬都市建築及風場有一定之困難度，所內過往進行過廣告招牌及雨遮等都市內構造物受風之相關研究，是否能作為本案研究之參考？	所內過往在如招牌及雨遮等附屬建物受風之相關研究上成果豐碩。異於前述之研究對象，樹對風而言是可穿透的，故其相應風的流動與行為並不相同。依主席之建議，研究中將參酌這些過往研究之推行步驟，從事系統化受風情況的分析。

參考文獻

附錄三 期末報告審查意見與回應

審查意見 (依發問順序)	回 覆
一、陳俊芳委員：	
1. 報告書 P.35 之圖 3-16、3-17 之 x/H 值與內文不符 P.45 之圖 4-10。	感謝指教，將立即修正。
2. 建議本報告結論能再提供定量描述，以利後續設計者參採應用及推廣。	依委員意見，於第七章結論中加強定量之描述。
二、黃朝揚委員：	
1. 建議未來可考慮陣列式的減風影響。	有關陣列排樹之減風效應確實是另一個重要的研究議題，期盼未來能獲支持，繼續從事此延伸研究。
三、盧文德委員：	
1. 本計畫係以樹冠密度為參考，期待將來若有擴大研究時，能以不同樹型如錐形、球形、傘型等。	除了樹冠大小與密度外，樹冠的形狀確實也會影響樹後的地面風場，希望爾後能繼續針對不同典型樹形的排樹進行進一步的減風探討。
四、楊宏宇委員：	
1. 來風通過排樹的數值模擬模式，除探討植栽高度造成之流場剖面變化外，可再探討其排列方式及間隙擾流作用所產生風場的變化(剖面)對建築物的影響。	有關陣列排樹之對建築物鄰近地區減風效果之探討，於第五章中針對典型建築物區塊，以絕對評估法、相對評估法與風速發生機率評估法進行排樹對樹後減風效果以及區域在強風情況行人舒適度之評估，並增加風場的變化與影響。
2. 不同植栽因生長高度、植物生長溫度及茂密程度與形狀差異，皆對排樹減風效果有顯著性影響，未來在實際應用在都市植栽防風	誠如委員所述，本研究之成果可供都市植栽防風規劃之用。其中針對樹種、樹高以及樹間距對樹後地面風速衰減之量化結果(圖 4-20 至圖 4-25)可直接作為排樹減風設計之重

時可納入參考及使用。	要參考。
五、潘振宇委員：	
1. 本案針對常人高度位置之植栽減風功能進行研究，很有實際運用效益。但現行設計規劃在後期才會考慮景觀及減風等原因進行植栽，並未與整體的設計整合，設計者亦無明確可參照標準。	感謝委員對本案的肯定，期盼研究成果在相關行道樹實務規劃設計上有更多的參考價值。
2. 建議能提供在大樓、建築及大規模開發等築規劃初期時，可運用量化的植栽設計參考，以利於需導入設計過程。	在實際工程規劃設計過程中，委員之建議確實能增益將研究成果付諸實際應用之成效。
2. 除本案所挑選樹種外，沿海強風地區是否可提供建議的的適合物種？	在沿海地區排樹的樹種更應考量其耐鹽之能力。以木麻黃為例，由於在帶鹽份的環境中具有較強之生長能力，故常被採用。
六、張景鐘委員：	
1. 本計畫成果對都市環境風場改善與未來都市建築規劃設計有實質的助益，可以提供相關單位參考。	感謝委員對本研究之肯定。
2. 表 1-2 資料來源與參考文獻，請再檢核。	感謝指教，針對第 5 頁中表 1-2 參考文獻編號予以修正。
3. 樹種特徵值，建議可以實際案例統計對照。	依委員建議，增列表 6-1，以供排樹防風規劃者參酌。
七、吳毓庭委員：	
1. 建議增列如後兩篇論文於研究報告中： (1) Large-eddy simulation of plant canopy flows using plant-scale representation (2) Turbulent kinetic energy budgets in a model canopy: comparisons between LES and wind-tunnel	依委員建議，於第二章與參考文獻中增補此兩篇文章之引用。

experiments.	
八、鍾光民委員：	
1. P.39, 樹冠的風力參數 C_{Da} 之物理意義，請說明。	樹冠的風力參數(C_{Da})是表徵樹枝/葉對來風阻擋或遮蔽程度的一個指標。在風場數值模擬中，本指標係置於動量方程式中，為阻力係數與單位體積之葉片面積之組合。
2. 針對 3 種樹種，依本計畫研究成果，何種情境可達到最佳之效益，於結論中可綜合整理一下。	減風之最佳效益應視現地區域範圍與大小、成本、植栽樹種等實際因素而定。但若僅自減風的觀點，研究中建議應採樹冠密度較高、樹冠面積較大且樹間距較小的組合。
九、陳建忠組長	
1. 請參照本人歷次會議發言，就目前執行方向與結果再行檢討分析。	遵照辦理；尤其針對模型樹製作、減風成果實用性與適用範圍擴展等，於第三至七章中增補內容。
2. 所做的三種樹種，請由樹形、葉密度、整理所吻合的，讓使用本案研究者更能掌握及延伸使用。	依組長建議，增列表 6-1，以供排樹防風規劃者參酌。
3. 第 2 章第 4 節宜於後面加以引申擴充或統整成一使用表為本案探討基準，以表述植栽設置前後之實際減風效益。	依組長建議，於第五章第二節中針對一處位於台北地區的建築區塊，根據現地 16 個風向來風時相應之行人風況，運用風速發生機率評估法完成強風下行人舒適度之評估。
十、王安強副所長	
1. 報告書第 73 頁表 5-2 內容請加以說明。	依主席建議，於第七章中增加表 5-2 之文字說明。
2. 本案植栽之風洞試驗與數值模擬，在學術研究上為一領先創新技術，建議與景觀界討論後續應用性議題或實際應用方法。	業於 11 月 11 日召開之第二次專家座談會中邀請台灣大學森林系林法勤教授針對本案後續應用性議題與實際應用方法作充分之交流。

附錄四 第一次專家座談會議意見與回應

協同研究案

「植栽降低都市環境強風之效果評估與設計原則研究」

第一次專家座談會議 簽到單

時間：108 年 8 月 27 日(星期二) 上午 9:30

地點：內政部建築研究所 討論室(一)

主持人：陳組長建忠

中興大學 水土保持系

黃隆明教授

中華大學 建築與都市計畫系

林文欽教授

中華科技大學 建築系

李宗霖教授

台灣科技大學 建築科技中心

黎益肇教授

傳家都更開發股份有限公司

黃彥清建築師

中興大學 土木工程系：

內政部建築研究所：

審查意見 (依發問順序)	回 覆
黃彥清建築師：	
1.目前對於防風樹種沒有一定的規範，可以將防風指標納入植栽的系統分類。	將委員建議納入考量。
2.都市建築過於分區規劃，可藉由本研究給予建築師初步的評估。	本意見實為本研究主要目標之一。
李宗霖教授：	
1.請說明選擇樹種是否為常綠喬木或落葉喬木等。	台灣欒樹與阿勃勒為半常綠喬木，瓊崖海棠為常綠喬木。
2.目前研究試驗以單株為主，但行道樹多為排樹，預期未來研究可以排樹為主。	將遵照委員之建議進行後續之探討與評估分析。
3.未來研究是否將季風性質納入考量。	本研究乃針對 C 地況，以相應之地面風速剖面為來風條件從事排樹樹後減風效果之分析。
4.希望研究團隊未來可提供初步的舒適性評估。	研究中將收集強風下舒適度的建議指標，作為爾後本研究量化結果之參考。
黃隆明教授：	
1.建議將 5 級風調為 6 級風，以符合蒲福風級表所定義之強風。	將遵照委員之建議進行後續之探討與評估分析。
2.目前三種樹種皆為闊葉樹種，是否在後續研究考慮選用其他葉形之樹種，例如：木麻黃、小葉欖仁...等。	爾後之後續研究可以考慮選用其他葉形之樹種。
林教授：	

1.本研究目前以樹形來分析減風效果，是否以該樹的面積與穿透性來研究其減風效果。	對單株樹而言，樹的形狀、大小與樹冠之穿透性是影響樹後減風效果的主要因子。對排樹而言，樹與樹的間隔也屬重要。本研究乃循此觀點，逐步進行這些影響因之對行人風場中地面風速的減風效果進行探討。
黎益肇教授：	
1.是否以樹冠密度來對減風效果做直接的分析，未來可透過相對應的樹冠密度來引用相同的率定參數至不同的樹種進行 CFD 模擬，並建置資料庫。	委員的建議與本研究進行的方向一致。研究中 3 個選定樹種相應之樹冠枝葉密度分別為 80%(台灣欒樹)70%(瓊崖海棠)與 55%(阿勃勒)，藉由風洞試驗中的樹後風速剖面率定而得之樹冠特性參數可以供未來相關 CFD 模擬之重要參考與依據。

附錄四 第一次專家座談會議意見與回應

附錄五 第二次專家座談會議意見與回應

協同研究案

「植栽降低都市環境強風之效果評估與設計原則研究」

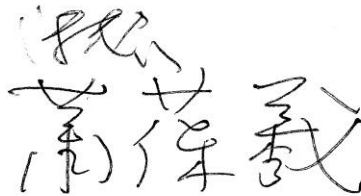
第二次專家座談會議 簽到單

時間：108 年 11 月 11 日(星期一) 上午 10:00

地點：內政部建築研究所 討論室(一)

主持人：陳組長建忠

海洋大學 河海工程系
蕭葆義教授



淡江大學 土木工程系
羅元隆教授



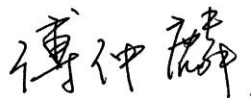
中華科技大學 建築系
李宗霖教授



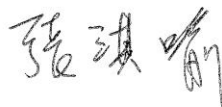
台灣大學 森林環境暨資源學系
林法勤教授



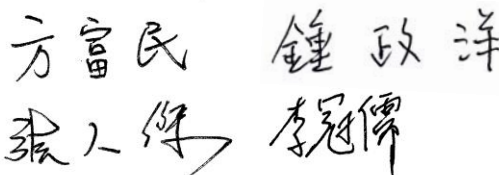
祺昌工程科技有限公司
傅仲麟博士



內政部建築研究所：



中興大學 土木工程系：



審查意見 (依發問順序)	回 覆
蕭葆義教授：	
1.時間與經費有限，有無可能針對 3 個樹種風力資料的應用程度再作擴展？	依委員建議，增列表 6-1，以供排樹防風規劃者參酌。
2.以 3D 列印致作之樹模型是否耗費相當之成本？	研究中為了要精確掌握各模型樹的外觀與樹體特性的一致程度，乃以 3D 列印而得的樹幹、樹枝與樹葉組件組合而成。本方法製作細緻，但也花費了相當的經費。
李宗霖教授：	
1.排樹植栽減風效應的量化結果宜於結論中再予具體敘述，以呈現本研究成果之實用價值。	依照委員之建議，於期末報告中進行增補。
2.在都會區中的樹大多低於 10m，研究中分別討論樹高為 6m、9m 與 12m 的情況有什麼考慮？	誠如委員所述，在都市中的生長環境不如鄉野，此外也會被修剪，不常發現過高樹木之情形。研究中考慮植栽會成長因素對樹後減風效果之影響，對 3m 至 12m 間樹高之量化結果可以內插的方法獲得，以供減風規劃之用。
林法勤教授：	
1.台北市於颱風期間常發生路樹傾倒的問題，在考量上是以 12 級風為基準，與本案行人道風舒適度考慮的 6 級季風並不相同，但在理論概念與探討方法上卻是相近的。未來在從事樹倒與行道風舒適度問題的樹木力學(森林)與風工程(土木)的專家學者可以加強彼此間的	隨著解決問題目標的不同，考慮的因素與觀點確會隨之改變。對從事樹木力學研究者針對樹倒之考慮而言，與評估行道風舒適度的風工程問題是有所差異的。由於兩個領域所採用的研究方法相近，彼此間的交流與互動定能促進雙贏的達成，期盼爾後能加強彼此間之合作。

交流與互動。	
2.樹木力學的風力分析中需要的是樹冠的阻力係數(C_D 值)。能否直接將(幼)樹置於風洞中直接量取？	將原型樹置於風洞中直接量取樹的阻力係數是可以作得到的。不過，必須要注意量測風力所用的儀器可用範圍以免造成設備毀損。此外，實體樹受到風吹襲時通常會發生明顯的變形與擺動，在技術與分析上都需要審慎評估。
羅元隆教授：	
1.有關三個不同樹種在地面風速斷面平均之縱向變化上並無明顯差異的結果，此與斷面平均之採用有關，應於文字中加強說明。	依照委員之建議，於期末報告中進行增補。
2.減風效果主要與樹冠形狀、枝葉密度與樹高有關，但三者都會隨著時間而改變，在分析的考慮上確實不容易。	團隊在研究過程中曾面臨同樣的問題。在分析的觀點上，乃以成樹的樹冠形狀與枝葉密度為準，而在不同樹高時樹冠尺寸隨之等比例改變。
傅仲麟博士：	
1.應針對台灣常見之行道樹種，依本案三個選定樹種之樹冠特性予以整理分類，當可增益本案成果之參考性與貢獻度。	依委員建議，增列表 6-1，以供排樹防風規劃者參酌。
2.在估算樹木的風力時，若已知來風風速和樹木的垂直投影面積，則僅需要樹木的阻力係數(C_D)即可求得。	委員的觀點正確，然而 C_D 值深受樹的枝葉密度與立體形狀影響，要獲得一個可供風力估算的可靠數據仍有待努力。

附錄五 第二次專家座談會議意見與回應

參考文獻

1. 行政院農委會，常見行道樹及景觀木，<https://kmweb.coa.gov.tw/subject/lp.asp?CtNode=5598&CtUnit=3327&BaseDSD=7&mp=1&nowPage=1&pagesize=20>。
2. 科博館，10 種臺灣地區常見行道樹種，http://web2.nmns.edu.tw/botany/most/most8_01.php。
3. 鄧書麟、何坤益、陳財輝、王志斌、高銘發，台灣西海岸防風林造林策略與樹種之選介，台灣林業，九十四年二月號，第 62-67 頁。。
4. 「建築物耐風設計規範及解說」，2015，內政部。
5. 方偉德(2004)，大氣與森林之間紊流流場之風洞實驗，國立中央大學土木工程研究所碩士論文。
6. 丁育群、朱佳仁(2000)，高層建築物風場環境評估準則研擬，內政部建築研究所研究計畫報告，A40160。
7. 「應用於綠建築設計之台灣原生植物圖鑑」，2010，內政部建築研究所。
8. Schomaker, M.E., Zarnoch, S.J., Bechtold, W.A., Latelle, D. J., Burkman, W.G. and Cox, S.M. (2007), "Crown-condition classification: A Guide to data collection and Aanalysis," United States Department of Agriculture Forest Service, Southern Research Station General, Technical Report SRS-102.
9. Song, C. and Yuan, M. (1988), "A weakly compressible flow model and rapid convergence method," Journal of Fluids Engineering, ASME, Vol. 110, No. 4, pp.441-455.
10. Finnigan, J. (2000), "Turbulence in plant canopies," Annual Review Fluid Mechanics, Vol. 32, pp. 519-571.
11. Raupach, M.R., Antonia, R. A. and Rajagopalan, S. (1991), "Rough-wall turbulent boundary layers," Applied Mechanics Review, Vol. 44, pp. 1-25.
12. Mihailovic, D.T., Lalic, B. Rajkovic, B. and Arsenic, I. (1999), "A

- roughness sublayer wind profile above non-uniform surface,”
Boundary-Layer Meteorology, Vol. 93, No. 3, pp. 425–451.
13. Raupach, M.R., Coppin, P.A. and Legg, B.J. (1986), “Experiments on scalar dispersion within a model plant canopy. Part I: The turbulence structure,” Boundary-Layer Meteorol, Vol. 35, pp. 21-52.
 14. Massman, W. (1987), “A comparative study of some mathematical models of the mean wind structure and aerodynamic drag of plant canopies,” Boundary-Layer Meteorology, Vol. 40, pp. 179-197.
 15. Novak, M.D., Warland J.S., Orchaansky, A.L., Ketler, R. and Green, R. (2000), “Wind tunnel and field measurements of turbulent flow in forests. Part I: Uniformly thinned stands,” Boundary-Layer Meteorology, Vol. 95, pp. 457-495.
 16. Boldes, U., Colman, J. and Maranon D.L.J. (2001), “Field study of the flow behind single and double row herbaceous windbreaks,” Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 89, pp. 665-687.
 17. Flesch, T. K. and Wilson, J.D. (1999), “Wind and remnant tree sway in forest cutblocks. I. Measured winds in experimental cutblocks,” Agricultural and Forest Meteorology, Vol. 93, pp. 229-242.
 18. Flesch, T. K. and Wilson, J. D. (1999), “Wind and remnant tree sway in forest cutblocks. II. Relating measured tree sway to wind statistics,” Agricultural and Forest Meteorology, Vol. 93, pp. 243-258.
 19. Wilson, J. D. and Flesch, T. K. (1999), “Wind and remnant tree sway in forest cutblocks. III. A windflow model to diagnose spatial variation,” Agricultural and Forest Meteorology, Vol. 93, pp. 243-258.
 20. Raynor, G.S. (1971), “Wind and temperature structure in a coniferous forest and a contiguous field,” Forest Science, Vol. 17, pp. 351-363.
 21. Su, H.B., Shaw, R.H., U, K.T.P., Moeng, C.H. and Sullivan, P.P. (1998), “Turbulent statistics of neutrally stratified flow within and above a sparse

- forest from large-eddy simulation and field observations,” *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 88, pp. 363-397.
22. Patton, E.G. and Davis, K.J. (2001), “Decaying scalars emitted by a forest canopy: A numerical study,” *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 100, pp. 91-129.
23. Watanabe, T. (2004), “Large eddy simulation of coherent turbulence structures associated with scalar ramps over plant canopies,” *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 112, pp. 307-341.
24. Yue, W., Parlange, M.B., Meneveau, C., Zhu, W. and Katz, J. (2007), “Large-eddy simulation of plant canopy flows using plant-scale representation,” *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 124, pp. 183-203.
25. Yue, W., Meneveau, C., Parlange, M.B., Zhu, W., Kang, H.S. and Katz, J. (2007), “Turbulent kinetic energy budgets in a model canopy: comparisons between LES and wind-tunnel experiments ,” *Environmental Fluid Mechanics*, Vol. 8, pp. 73-95.
26. Yamaguchi, A., Enoki, K. and Ishihara, T. (2009), “A generalized canopy model for the wind prediction in the forest and the urban area” *The 7th Asia-Pacific Conference on Wind Engineering*, T2-A5, Taipei, Taiwan.
27. Shaw, R. H., and Schumann, U. (1992), “Large-eddy simulation of turbulent flow above and within a forest.” *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 61, pp. 47–64.
28. Yamada, T.(1982), “A numerical model study of turbulent airflow in and above a forest canopy”, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, Vol. 61 (1), pp. 439–454.
29. Uno, I., Ueda, H. and Wakamatsu, S.(1989), “Numerical modeling of the nocturnal urban boundary layer”, *Boundary Layer Meteorology*, Vol. 49, pp. 77–98.
30. Svensson, U. and Haggkvist, K.(1990), “A two-equation turbulence model

- for canopy flows”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 35, pp. 201–211..
31. Green, S.R. (1992), “Modelling turbulent air flow in a stand of widely-spaced trees”, *PHOENICS. Journal of Computational Fluid Dynamics Application*, Vol. 5, pp. 294–312.
 32. Hiraoka, H.(1993), “Modelling of turbulent flows within plant/urban canopies”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 46/47, pp. 173–182.
 33. Liu, J., Chen, J.M., Black, T.A. and Novak, M. D. (1996), “E-e modelling of turbulent airflow downwind of a model forest edge”, *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 77, pp. 21–44.
 34. Sládek, I., Bodnár, T. and Kozel, K. (2007), “On a numerical study of atmospheric 2D and 3D-flows over a complex topography with forest including pollution dispersion,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamic*, Vol. 95, pp. 1424-1444.
 35. Mochida, A., Tabata, A., Iwata, T. and Yoshino, H. (2008), “Examining tree canopy models for CFD prediction of wind environment at pedestrian level”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamic*, Vol. 96, pp. 1667-1677.
 36. Fang, F.M., Liang, T.C., Chung, C.Y. and Li, Y.C. (2015), “On the simulation of flow around discrete coniferous trees,” *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, Vol. 38, No. 5, pp. 665-674.
 37. Fang, F.M., Li, Y.C. and Chung, C.Y. (2016), “Numerical simulation of flow around broad-leaf trees,” *Journal of Applied Science and Engineering*, Vol. 19(4), pp. 429-438.
 38. Hunt, J.C.R., Poulton, E.C. and Mumford, J.C. (1976), “The effects of wind on people: new criteria based on wind tunnel experiments”, *Building Environment*, Vol. 11, pp.15-38.

39. Penwarden, A.D. (1973), "Acceptable wind speeds in towns", *Building Science*, Vol. 8, pp.259-267.
40. Apperley, L.W. and Vickery, B.J. (1974), "The prediction and evaluation of the ground level wind environment," *Proceedings of the Fifth Australian Conference on Hydraulics and Fluid Mechanics*, Christchurch, New Zealand.
41. Germano, U., Piomelli, P. and Cabot, W.H. (1991), "A dynamic subgrid-scale eddy viscosity model," *Physics of Fluids*, Vol. A(3), pp. 1760-1765.
42. MacCormack, R. (1969), "The effect of viscosity in hyper-velocity impact cratering," *AIAA paper No. 69-354*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Washington D.C.
43. Crank, J. and Nicolson, P. (1947), "A practical method for numerical evaluation of solutions of partial differential equations of the heat conduction type," *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, Vol. 43, pp. 50–64.
44. Lawson T.V. and Penwarden A.D. (1975), "The effects of wind on people in the vicinity of buildings," *Proceedings 4th International Conference on Wind Effects on Buildings and Structures*, Cambridge University Press, Heathrow, pp. 605–622.

植栽降低都市環境強風之效果評估與設計原則研究

植栽降低都市環境強風之效果評估與設計原則研究

出版機關：內政部建築研究所

電話：(02) 89127890

地址：新北市新店區北新路3段200號13樓

網址：<http://www.abri.gov.tw>

編者：陳建忠、方富民、鍾政洋、張人傑、李冠儒

出版年月：108年12月

版次：第1版

ISBN：978-986-5448-40-0