

## 台灣地區強風作用時之大氣邊界層特性

鄭啟明<sup>1\*</sup> 羅元隆<sup>2</sup> 蔡明樹<sup>3</sup> 林金賢<sup>4</sup> 王軍翰<sup>5</sup> 黃國峰<sup>6</sup>

<sup>1\*</sup>淡江大學土木工程系教授

<sup>2</sup>淡江大學土木工程系助理教授

<sup>3</sup>淡江大學土木工程系兼任副教授

<sup>4</sup>淡江大學風工程研究中心兼任研究員

<sup>5</sup>淡江大學風工程研究中心兼任助理研究員

<sup>6</sup>淡江大學風工程研究中心助理研究員

### 摘要

本文透過實場量測與風洞模擬探討台灣地區不同地況在強風作用時之近地表風場特性，建立本土的自然風場數據做為未來風力規範的修訂依據。本文之實場量測使用超音波風速計作定點風速量測，以光達進行風場遙測。在符合耐風設計規範定義的地況中，分別在颱風與東北季風季節，進行平均風速剖面與紊流參數特性的實場量測。本研究以實場量測監測結果為依據，製作實場監測位址之縮尺模型，執行風洞模擬實驗，由風洞試驗得到不同地況的紊流特性。本研究除了得到在都市、鄉鎮及平坦地況的平均風速剖面與紊流特性資料之外，透過颱風與季風量測資料的比對，得知颱風與季風對於平均風速剖面的影響並不明確，颱風的紊流強度則略為大於季風，我國規範定義之紊流強度則過於保守。

**關鍵字:** 大氣邊界層，實場量測，風洞模擬，風速剖面，紊流特性。

**Keywords:** Atmospheric Boundary Layer, Field Monitoring, Wind Tunnel Simulation, Wind Speed Profile, Turbulence.

### 1. 前言

風力規範對於建築物設計風力有重要影響的參數可分為三大類：設計風速及風場特性，風壓係數，陣風反應因子。其中影響最為重要，且具有本土特性的是設計風速及風場特性。所謂風場特性則是包括了在不同地況條件下，平均風速在高度上的分佈以及紊流特性。由於臺灣缺乏相關資料，風力規範中所描述的風場特性是依據 ASCE-7 的相關規定修訂而成。臺灣的設計風速主要受到颱風的影響，加以地狹人稠的社會發展型

態，直接採用美國的風場特性，未必能夠正確的反應本土的風場特性。

由於自然風場特性研究需要對高空的風場進行實場監測，設備需求較高，資料獲取不易，因此相關的實場資料在國際間都並不多見。若回顧過去國內外實場監測案例，1960年代 A.G. Davenport 根據在澳洲所做的實場量測資料構建紊流頻譜 Davenport Spectrum (Davenport, 1965)。該頻譜可說是對於近代風工程有最大影響的風速頻譜模式，在 1990 年代之前曾被多數國家風力規範所引用。近年來美、日、香港等地均有多位學者從事大規模的自然風場與大型結構受風反應的實場監測計畫。Kowk (Kwok, 2004) 與 Xu (Xu and Chen, 2004) 的研究團隊分別在香港進行自然風場與高樓反應之實場監測；Kijewsk 等人(Kijewsk, et al., 2003) 則對美國芝加哥地區的多棟高樓進行風場與受風反應之實場監測；在日本則有多組研究團隊 (Kato, et al., 1992；Amano, et al., 1999；Miyata, et al., 2002) 採用不同的監測儀器量測自然風場特性，特別是颱風資料，其結果深具參考價值。臺灣則是曾有張景鐘(Jang and Lee, 1999)、蕭葆義(Shiau, 2000)、鄭啟明等人(Cheng, et al., 2007；鄭，2009；鄭與羅，2009)曾進行定點之風速剖面與紊流特性的量測。

定點風速量測最常使用風杯式風速風向計或超音波風速風向計。風杯式風速風向計雖然頻率響應較差，較不利於大氣紊流的量測，但也具有經濟與不易損壞的優點。超音波風速風向計則具有良好的頻率響應，適於量測大氣紊流特性，近年來國內外自然風場監測多數均使用超音波風速風向計。採用定點量測的優點在於量測儀器性能優異，量測訊號品質穩定，缺點則在於難尋適當的量測位址。定點風速量測常見設於高樓屋頂或是通訊用的鐵塔之上。高樓屋頂的風速計很難完全排除建築物的干擾，干擾影響尤以紊流特性最為嚴重。高聳桁架鐵塔裝設風速計雖然可以大幅降低構造物的干擾，然而適於裝設風速計鐵塔的所在位址，未必具有地況上的代表性。在沒有合適高聳鐵塔可供裝設風速計的情況下，採用風速遙測儀器成了大氣邊界層量測的必要方法。

常見之可攜式風速遙測儀器包含氣象雷達、無線電探空儀(radiosonde)、聲波雷達(SODAR, Sonic Detection And Ranging measurement system) 與可攜式之都卜勒光波雷達監測系統，一般簡稱 Lidar ( Light Detection And Ranging measurement system) 等三類。上述三者之中，氣象雷達擁有最深厚的觀測範圍與觀測彈性。然而，建築耐風設計所需的風場特性以近地表的風場為主，氣象雷達並非特別擅長此範圍之觀測。無線電探空儀是將含有量測壓力、濕度、風速、風向感測器的無線電探空儀發射器裝設於裝設於氣象專用的氣球之下。隨著氣球向上運動，探空儀發射之電波傳回地面的電腦存取風速及風向資料。若是由飛行器直接在大氣層中投放，使用降落傘搭載的無線電探空儀稱為投落送(dropsonde)。無線電探空儀在隨氣球上升或隨降落傘下降的過程中，會隨著風速作水準向的移動，無法提供同一位置的風速剖面特性。此外，每一次投送無線電探空儀只能量測高度上的單筆資料，對於具有高度隨機特性的紊流大氣邊界層而言，很難取得具有工程可信度的統計資料。聲波雷達是一種低空遙測風速、風向和紊流的量測儀器。利用向大氣發射短促的聲脈衝，聲波隨平均風的移動會產生都卜勒頻移，從而得到風速。應用聲波雷達時的缺點有二：首先是觀測時發出的聲波極可能被視為惱人的噪音而無法在附近有居民的環境中進行長期進行觀測；其次是強風挾帶的雨滴對於聲波雷達的訊號

會造成嚴重的干擾，換言之並不適用於臺灣地區常見的颱風氣象。Lidar 是一種低空遙測風速、風向和紊流的量測儀器。Lidar 將雷射光往天空投射之後，透過接收被大氣中的氣膠 (aerosol) 散射回來的能量，經由都卜勒頻移效應計算上方各高度層的風場資訊。Lidar 的優點包括：量測範圍適用於建築耐風設計所需之近地表邊界層、量測時對於周邊居民的影響以及受到週邊環境的干擾較小、以及具有最佳的可移動性。可能的缺點為：量測所使用之低能量雷射光容易在大氣含有深厚水氣時的觀測效果較差。

本研究首先以實場監測了解台灣地區在強風作用下的自然風場特性。實場監測可分為兩個部分，第一部分是採用超音波風速計 (ultrasonic anemometer) 定點量測大氣邊界層特性。由於超音波風速計定點量測受限於安裝儀器的鐵塔位址，第二部分採用 Lidar 作為監測的主要設備，進行自然風場中近地表邊界層特性之風速剖面量測。以下本文分別說明不同風速風向計的基本性能，資料分析方法，所選擇測點的地況條件，在季風與颱風條件下進行自然風場實場監測的結果。

然而，無論採用何種儀器執行自然風場實場量測時均面臨各種因素造成的數據不穩定性以及儀器之物理侷限性，無法得到完整的大氣邊界層特性。因此在本研究的第二階段，以實場監測結果為依據，在淡江大學風洞實驗室，根據所選定實場量測區域之周邊與上游地況所製作之縮尺模型，模擬紊流邊界層。經過風洞實驗資料與實場監測之平均風速剖面資料比較之後，可得到完整的紊流邊界層特性，進而與現行規範比較其差異。

## 2. 大氣紊流邊界層之超音波風速計實場量測

本文共在三個位址以超音波風速計 (ultrasonic anemometer) 量測大氣紊流特性。所使用風速計為 Gill Instrument 生產之 Windsonic，輸出風向及風速訊號，量測風速範圍 0~60m/s，量測角度範圍 0~360 度，二維風速計頻率響應 4Hz，三維風速計頻率響應 20Hz。三個測站的地況環境、儀器設置與監測結果分述於後。

### 2.1 測站地況環境與儀器設置

超音波風速計量測大氣紊流邊界層的主要測站設於新北市淡水區中央電臺的微波鐵塔。該塔所在位置北方、西方及南方距離數百公尺即為河岸與海岸線，北北東至東南方向是陸地，在距離 1km 範圍內之地形並沒明顯的高度變化，在更遠距離以外則有著 40~50m 高度變化，半徑 1km 周圍內有一些平均樓層高為 6~7 樓之住宅大樓及 2~4m 高度之樹木，此地況大體上介於 B 地況 (郊區鄉鎮地況) 與 C 地況 (開闊地況) 之間。微波塔原來高度為 100m，2005-2010 年間在 20、40、60、80、100 公尺處分別安裝超音波風速計，其中 100 公尺處為三維風速計，其餘高度處安裝二維風速計。2010 年之後，微波塔拆除上部 40 公尺，僅餘 60 公尺，在 20、40、60 公尺處安裝二維風速計。

第二測站設於臺北市仁愛路中華電信北區分公司的微波電塔，距離 Lidar 測站 A 淡江大學城區部相當近，因此與光達的量測有相互搭配的功能。該測點周圍大都是 4~6 層的公寓式建築，東邊 3 公里左右是信義區，有大量的高層建築。東北向 2.5 公里左右是松山區，高層建築較少。東北東向來風時，接近風力規範所定義之 A 地況 (都市地況)。

二維超音波風速計安裝高度距地面 90 公尺。第三測站設於臺北市信義路四段中華電信大安大樓屋頂鐵塔。大安大樓位於臺北市信義路，距離信義區的高層建築群相當近。東北來風時，測站上游地況分類屬於地況 A(都市地況)。本研究在圓形鐵塔上安裝兩顆風速計，分別位於東北方及西南方，距地面高度 102 公尺。

## 2.2 大氣紊流量測與數據分析

超音波風速計量測所得之瞬時風速可寫成下式，為平均風速與擾動風速之和。

$$U(z,t) = \bar{U}(z) + u(z,t) + v(z,t) + w(z,t) \quad (4)$$

其中  $U(z,t)$ ：瞬時風速向量； $\bar{U}(z)$ ：平均風速向量； $u(z,t)$  為順風向擾動風速向量； $v(z,t)$  為橫風向擾動風速向量； $w(z,t)$  為垂直向擾動風速向量。在計算由實場監測所得之數據時，首先計算該段記錄時間（十分鐘）的平均風向，根據此平均風向，將瞬時風速分解為  $u$ 、 $v$  二方向。其次計算記錄時間長度的  $u$  方向平均風速（十分鐘平均風速）， $v$  方向的平均風速應接近於零。以瞬時風速減去平均風速值即為擾動風速值。如此，每筆十分鐘資料可得一組風速垂直分布。

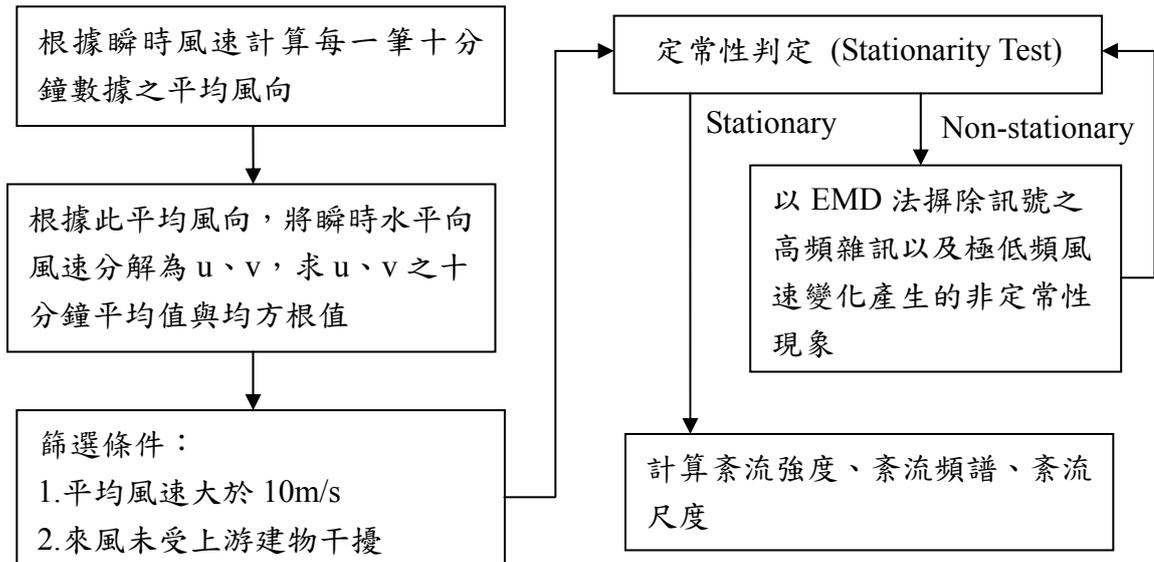


圖 1: 超音波風速計紊流特性實場監測資料分析流程

EMD(Empirical mode decomposition)為一求取訊號各個模態之方法。一組隨機訊號可以分解為若干個具有不同頻率特性的模態，而 EMD 即為擷取出此隨機訊號內隱模態函數的過程。經由模擬訊號極值包絡線，摒除訊號低頻之平均值曲線，過濾極低頻的風速變化產生的非定常性現象。Xu(2004)使用此方法，針對實場監測所求的數據，先行定常性判斷，而後使用 EMD 過濾訊號中所含非定常性之內隱模態，再依據傳統頻率域分析方法，進行紊流風場數據分析。

### 2.3 平均風速剖面

為確定所分析的風速資料具有相同的平均風速及紊流特性，採用風向角變化在 45 度以內的資料作為同一組分析比較。如圖 2 所示為颱風記錄中風向角介於 30°~60°(即東北東方向)的每小時平均風速剖面圖中分別顯示風速強度範圍  $U_{20}<10\text{m/s}$ ， $10\text{m/s}<U_{20}<17\text{m/s}$ ， $U_{20}>17\text{m/s}$  的平均風速剖面，並根據最小平方法擬合指數律曲線。由於風速梯度為未知項，故以 100 公尺高度為指標無因次化其他高程資料。圖中得知低風速、中風速、高風速範圍所擬合的指數值分別為 0.27，0.25，0.24；顯示在低風速範圍時具有較高風速梯度的趨勢。圖中位於各高度的橫桿符號代表為一個標準差的誤差值。實場監測結果顯示中央電台測站之風場具有較預期為高的風速剖面指數值。此現象可能是由於上游 2.5 至 5 公里處有數十公尺的地勢起伏所造成。

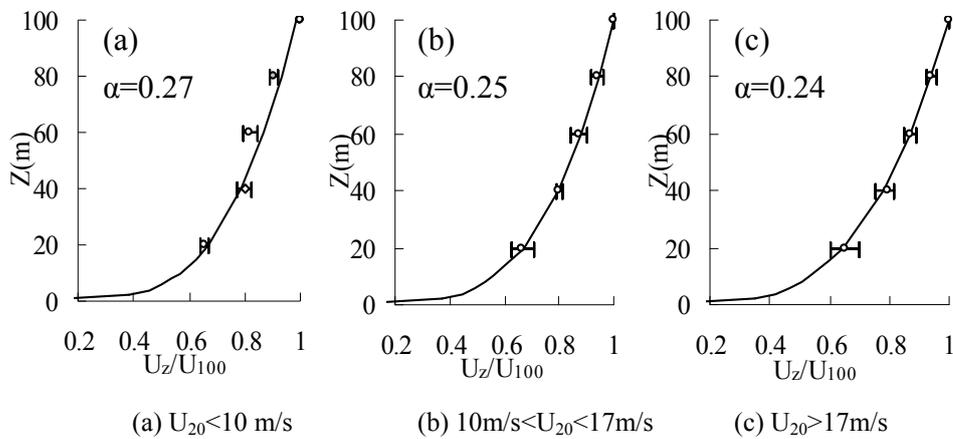


圖 2: 不同強度颱風之平均風速剖面圖

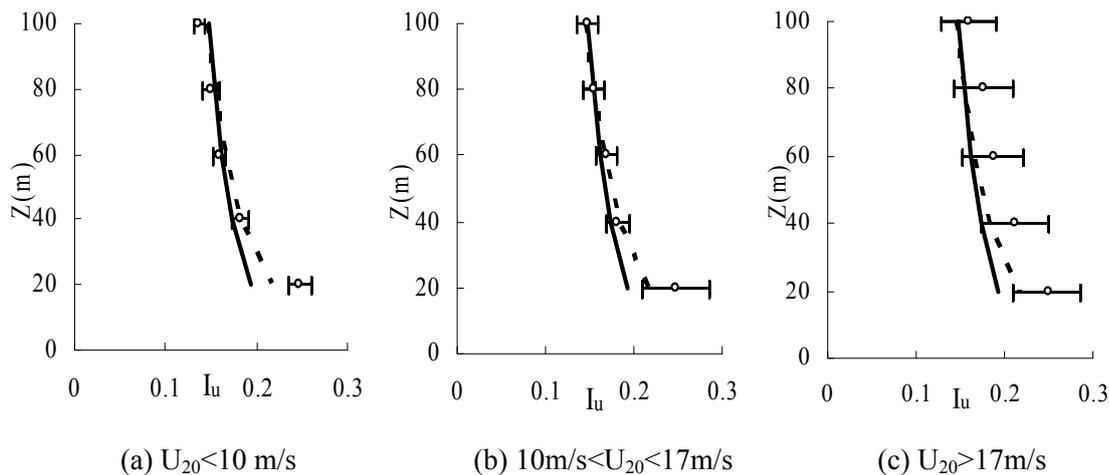


圖 3: 不同風速強度颱風下的紊流強度剖面

(○ : Typhoon — : ASCE-7-02 (C) --- : AIJ-96(III))

季風平均風速多數屬於低風速範圍，本文選取風向角為東北向，風速範圍在  $U_{20} < 10 \text{m/s}$  的與颱風與季風風速資料進行比較，二者平均風速剖面之指數擬合值均為 0.27，顯示季風與低強度風速颱風的平均風速剖面並無差異。

## 2.4 紊流特性

經由 EMD 處理過後的擾動風速歷時均針對風向角判斷分解為順風向、橫風向及垂直向進行頻譜分析。每組頻譜計算均以一小時長度為基準，十分鐘為一快速傅立葉轉換的區段長度形成六區段平均而求其能量頻譜。所求得之頻譜與 von Karman 提出的風速頻譜進行比對有相當好的近似。其中 Karman 順風向擾動風速頻譜與其垂直向空間相關函數(spatial coherence)公式可以列出如下：

$$\frac{fS_u(f)}{\sigma_u^2} = \frac{4 \frac{L_u}{U} f}{\left[1 + c_u \left(\frac{L_u}{U} f\right)^2\right]^{\frac{5}{6}}} \quad (1)$$

$$Coh(f) = \exp\left(-\frac{C_z \Delta z}{1/2(U_{z1} + U_{z2})}\right) \quad (2)$$

其中  $f$  為頻率， $\sigma_u^2$  是順風向紊流強度變異數， $L_u$  是順風向積分尺度長度， $\bar{U}$  為平均風速， $c_u$  是頻譜參數， $C_z$  為垂直向相關係數。

圖 3 與表 1 所列為颱風與季風期間在不同風速範圍內所量測而得之紊流強度。颱風期間依據風速範圍  $U_{20} < 10 \text{ m/s}$ ， $10 \text{ m/s} < U_{20} < 17 \text{ m/s}$ ， $U_{20} > 17 \text{ m/s}$  可得知 60 公尺高程處的紊流強度分別為 0.19，0.169，0.16。100 公尺高程處的紊流強度則分別為 0.155，0.150，0.137。易言之，分析結果顯示隨著風速強度上升時，紊流強度有些微下降的趨勢。

表1: 颱風與季風縱向紊流強度之比較 (longitudinal turbulence intensity,  $I_u$ )

高程	Z=20m	40m	60m	80m	100m
U <sub>20</sub> >17	0.248(0.06)	0.183(0.07)	0.160(0.02)	0.151(0.03)	0.137(0.04)
颱風 10<U <sub>20</sub> <17	0.247(0.13)	0.181(0.07)	0.169(0.08)	0.151(0.10)	0.150(0.08)
U <sub>20</sub> <10	0.250(0.14)	0.210(0.17)	0.190(0.15)	0.173(0.18)	0.155(0.17)
季風 U <sub>20</sub> <10	0.235(0.10)	0.173(0.08)	0.155(0.06)	0.143(0.09)	0.139(0.13)

Note: ENE wind (30°~60°)

圖 4 中顯示順風向積分尺度長度擾動的情況較平均風速與紊流強度為大，且隨著高度增加或風速增加，尺度長度隨之增加。表 2 指出順風向積分尺度長度隨著平均風速增加而增加，然而橫風向與垂直向則約略維持不變。較高風速範圍時，橫風向積分尺度大約是順風向的一半，而垂直向則更小。另外在季風記錄中所求得的順風向、橫風向、垂直向積分尺度長度均小於颱風者。表中亦列出公式中常數最佳擬合結果：其中順風向部分， $c_u$  顯示隨著平均風速增加常數值有遞減的趨勢。圖 5 顯示實場監測所量得之數據與 Karman 所提出的經驗公式相當吻合。

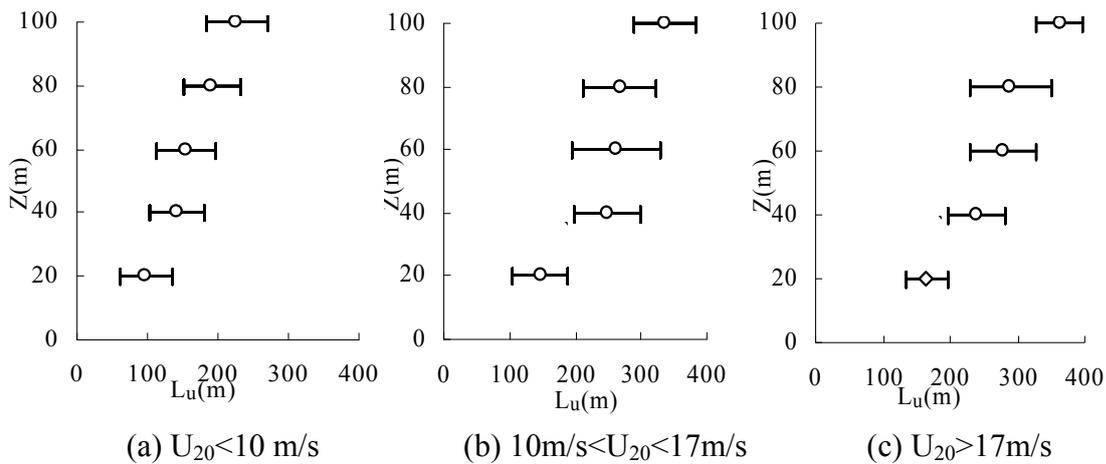


圖 4: 不同風速強度下的順風向積分尺度長度  $L_u$

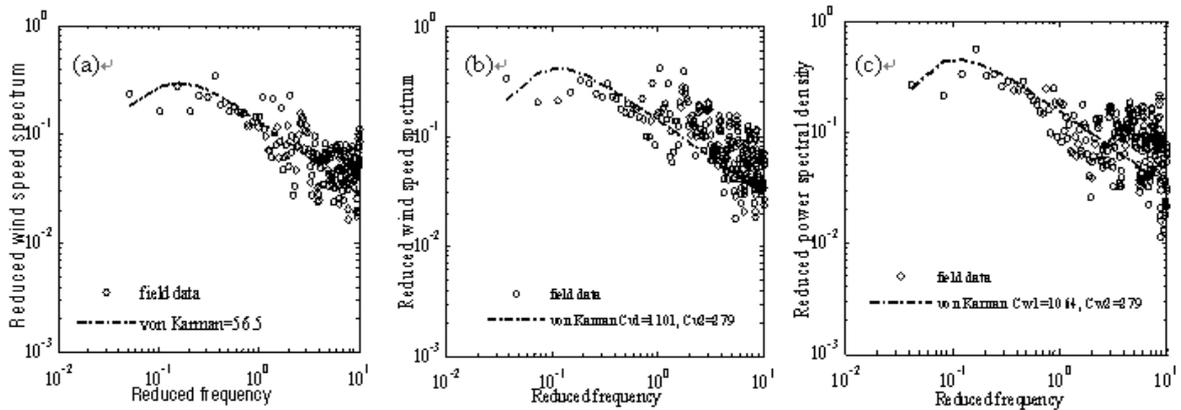


圖 5: 紊流頻譜：(a)順風向；(b)橫風向；(c)垂直向

經上述資料的分析結果與現象觀察，當颱風風速趨於強度時，根據 100 公尺高程處的三維風速計量測而得的 30 組風速介於 16~27m/s 者進行數據分析後，可得出如表 3 所列頻譜公式參數建議值代表現地自然風場特性。

表2: 颱風與季風在不同平均風速之紊流尺度及頻譜參數，z=100m

		$L_u$	$L_v$	$L_w$	$c_u$	$C_z$
	$U_{20}>17$	364(0.18)	185(0.30)	47(0.30)	56(0.28)	10.6
颱風	$10<U_{20}<17$	336(0.14)	175(0.31)	44(0.20)	57(0.24)	9.8
	$U_{20}<10$	217(0.28)	173(0.30)	41(0.24)	73(0.17)	10.0
季風	$U_{20}<10$	165(0.24)	93(0.31)	27(0.18)	67(0.13)	10.9

( ) : 變異係數，風速單位：m/s，積分尺度長度單位：m

表3: 颱風期間高風速縱向紊流頻譜參數建議值

高度(m)	$U_z$ (m/s)	$L_u$ (m)	$L_v$ (m)	$L_w$ (m)	$c_u$	$C_z$
100	16-27	350(0.15)	180(0.30)	46(0.26)	56.5(0.25)	10.2

### 3. Lidar 之性能與資料分析

Lidar 使用大氣中的氣膠做為標的物，藉由測量空氣中氣膠的移動獲得所需之風場資料。為了獲得風場資料，光達一般採用 VAD 法 (Velocity-Azimuth Display) 來進行風速量測與計算，意即每筆觀測 Lidar 將會沿著固定角度進行一次 360 度之掃描。

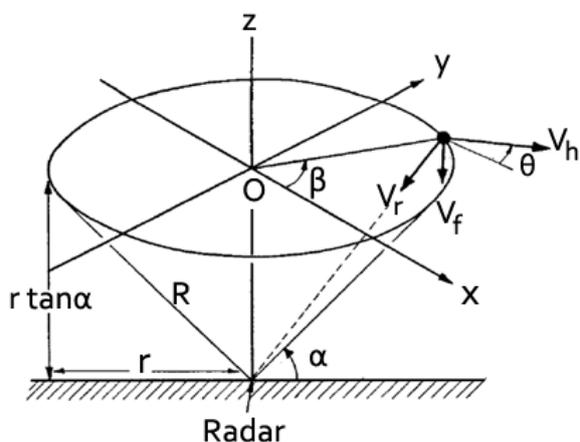


圖 6: VAD 示意圖

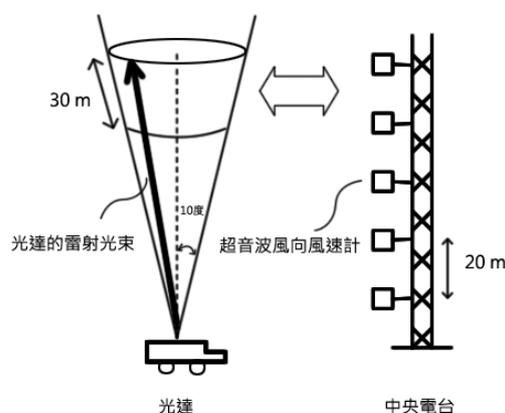


圖 7: Lidar 資料驗證示意圖

圖 6 為 VAD 法的示意圖 (Browning and Wexler, 1968)。地面中心點為 Lidar 的所在位置。東西方向為 X 軸、南北向為 Y 軸、垂直軸為 Z 軸； $\alpha$  為發射雷射光時，與地面間的仰角； $\beta$  為雷射光方向與東方間的方位角； $V_r$  為觀測時所測得之徑向風速、 $V_h$  為觀測點的平均水準風向、 $V_f$  為觀測點的垂直方向速度； $R$  為 Lidar 距離觀測點的直線距離、 $r$  為 Lidar 距觀測點的水準距離。

由於 Lidar 利用單一仰角、單一波束之雷射光進行觀測，因此每筆資料等同於每筆雷射光波束的觀測結果。每筆波束依其儀器設定，可按距離遠近細分為數十個間距，間距的大小即為距離解析度，也就是最小的量測單位。每個量測單位均能獲得徑向風速度與訊噪比 (SNR, Signal-Noise Ratio) 等。Lidar 觀測之原始資料為觀測之徑向風場資訊，利用 VAD 法將徑向風場轉換為水準風場。

本文使用日本三菱公司生產的 LR-08FSIII 型 Lidar，其波長為 1.5 至 1.6 微米( $\mu\text{m}$ )；脈衝寬度為 200 奈秒 (ns)；觀測風場之高度從 30 至 600 公尺，距離解析度 30 公尺，故每次徑向觀測值將被分為 19 個觀測區間。最短 18 秒能完成一次圓錐形掃描策略；每 1 秒能輸出一筆觀測資料；可觀測之最大徑向風為 30m/s；理論最大可測水準風速為 173m/s。由於 VAD 方法是以雷射光源能完成一次圓錐形掃描所得的資料為分析基礎，換言之，風速的採樣間隔為 18 秒。因此，本文所得的風速資料僅可用于自然風場的平均風速特性，無法探討大氣紊流特性。

#### 4. Lidar 風速量測結果與超音波風速計之比對

為了驗證 Lidar 量測結果經由 VAD 方法分析所得之風速與風向，本文以淡水中央電臺微波接收塔上離地 20、40、60、80、100 公尺處所設二維超音波風速計的風速風向量測為基準，進行比對驗證。超音波風速計在安裝之前經過淡江大學風洞實驗室之率定。驗證流程如圖 7 所示，以 80 度的仰角向天空發射雷射光，透過空氣中隨風移動的氣膠散射，取得中央電臺地址 30、60、90 公尺之風速剖面，與中央電臺鐵塔二相近區間的風向風速計數據進行比對。

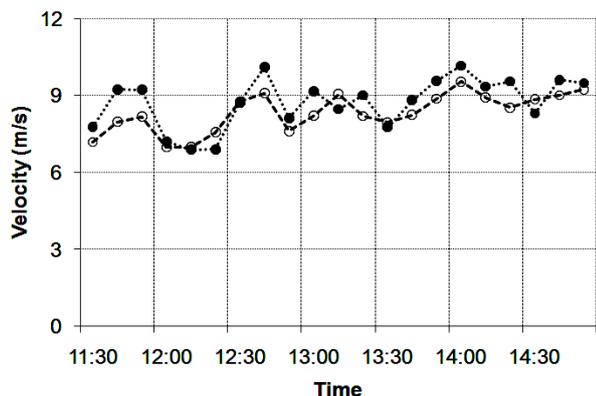


圖 8: 60 公尺處光 Lidar 與超音波風速計之十分鐘平均風速比對

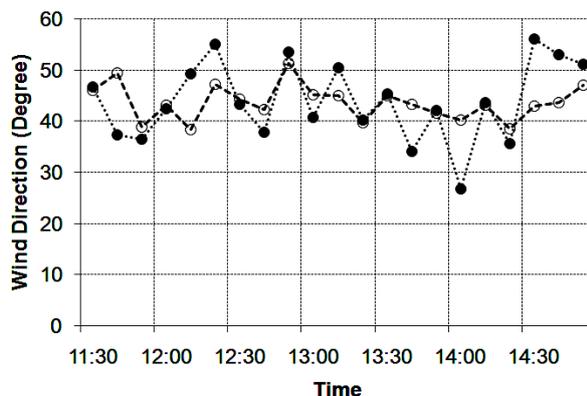


圖 9: 60 公尺處光 Lidar 與超音波風速計之十分鐘平均風向比對

圖 8 為 Lidar 與超音波風速計的 10 分鐘平均風速比較，Lidar 資料變異性較大，但

兩者擁有良好的一致性，誤差值低於每秒 1 公尺。圖 9 為 Lidar 與超音波風速計 10 分鐘平均風向逐時的比對圖，Lidar 與超音波風速計之誤差約在 10 度以內，風向變化之趨勢相當一致。經過與中央電臺五個高度層的超音波風速計比對結果，可知 Lidar 在十分鐘平均風向上的誤差約為 10 度左右，雖然短時間之數值變動較為敏感，但二者在風向變化的趨勢上有著良好的一致性。風速方面，在環境風速接近 8m/s 或更大時，Lidar 與超音波風向風速計的差異約為 10%，然而在風速在 5m/s 以下時，Lidar 的風速量測誤差就會過大。

在 11 月-2 月東北季風與颱風季節進行實場量測發現，十分鐘平均所得之風速剖面依然過於離散，不易估算邊界層特性，因此本文以一小時為單位評估實場風速剖面特性。首先將在各個監測位址每一次為時約 24-48 小時的季風或颱風風場監測定義為一個監測事件，計算各個監測事件之十分鐘平均風速。所有十分鐘平均風速以下列三個條件進行初步篩選：(i) 監測有效高度 大於 150 米，(ii) 60 米以上高度平均風速大於設定值，(iii) 高度 150 米範圍內，小於三個連續風速出現逆向梯度。一般而言 Lidar 的輸出風速在 120-180 米之間訊噪比(S/N)較佳，因此通過初步篩選之資料分別針對  $U_{120m}$ 、 $U_{150m}$ 、 $U_{180m}$  進行無因次化。計算每一監測事件各個高度風速之標準差後，剔除離散超過  $2\sigma$  者。檢視資料顯示，Lidar 在 30 米高度的第一個輸出風速通常偏低，與風速剖面模式離異較大。究其原因應當是 Lidar 的每個輸出值代表著 30 米高度範圍內風速的平均值，30 米高度的輸出風速較易受到鄰近建物的遮蔽干擾。因此本研究將位於都市及鄉鎮地況的 30 米高度風速剔除在後續資料分析之外。完成上述資料整理工作後，選用每小時監測資料中至少有三筆合格之十分鐘平均風速剖面，評估其邊界層高度。風速剖面指數律(power law)之  $\alpha$  值，則三筆無因次風速剖面中，選取擬合度最佳者，最後根據 120 米以下風速分佈計算粗糙長度， $z_0$ 。本文在評估  $z_0$  值時，都市與鄉鎮地況均以測站鄰近平均樓高的 70% 作為零平面高度(zero-plane displacement height)圖 10 為實場監測資料分析流程。

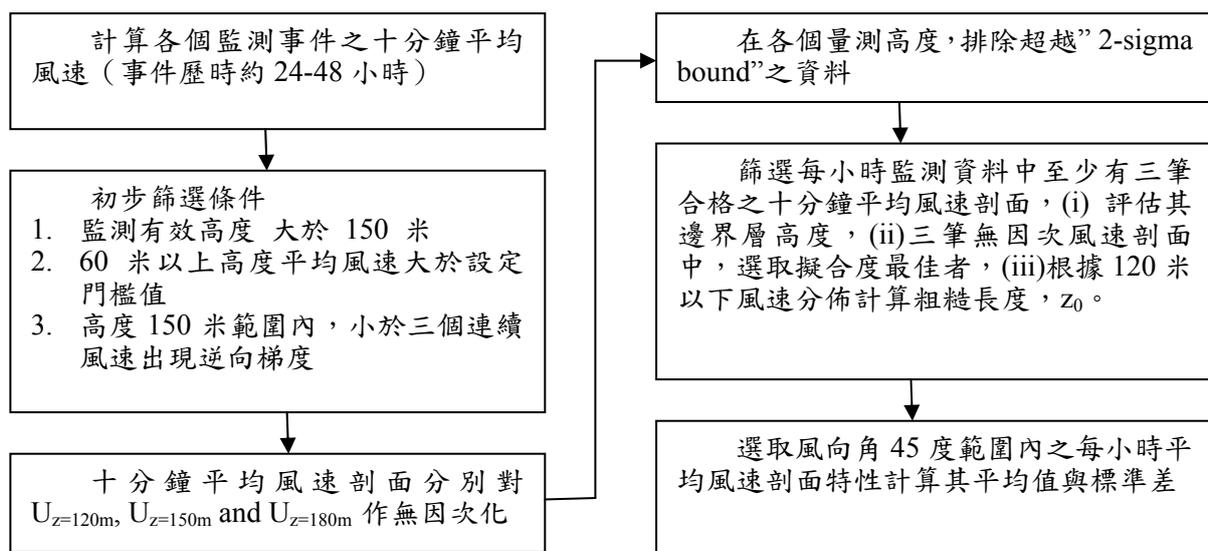


圖 10: Lidar 實場監測資料分析流程

### 5. Lidar 之實場量測

本文研究在三個不同的地況設置實場監測點。都市地況之測站（測點 A）設置在臺



(a) 都市地況測點 A 位置

北市金華街淡江大學臺北校園，如圖 11(a)。該測站位於臺北市市中心的偏西南方向，東北方為松山、信義區，是為臺北市高層建築較為密集的區域，測站周邊並無超高層建築，除了幾所學校之外一般建築皆有六層樓以上，屬於住商混合式的都市地區。鄉鎮地況之測站（測點 B）設置在宜蘭市（人口約 94,000），該測站除東面則有一棟購物商場以及少部份的住家大廈零星座落於校園之西北象限之外，鄰近建物以三至六樓高的透天

民宅為主，如圖 11(b)。開闊地況之測站（測點 C）設置在宜蘭縣壯圍鄉新南國小新南國小位於蘭陽溪北側，校園周圍均以農田為主，四周僅夾雜少數兩層樓之農舍建築，如圖 11(c)所示。



(b) 鄉鎮地況測點 B



(c) 開闊地況測點 C 位置

圖 11: 三種地況之實場測站位置圖（擷取自 Google Map）

表 4: Lidar 實場監測所得之平均風速剖面

測點	東北季風			颱風	
	A	B	C	B	C
梯度高度 (m)	>420	--	327(88)	>400	275(35)
指數, $\alpha$	0.28(0.05)	0.22(0.07)	0.15(0.04)	0.24(0.04)	0.11(0.02)
粗糙長度 $z_0$ (m)	0.75(0.49)	1.53(0.98)	0.50(0.50)	2.36(1.46)	0.08(0.09)

注：括弧內為標準差

分析季風資料時，三個測點均選用來風方向介於  $22.5^\circ$  至  $67.5^\circ$  的東北風向，A、B、C 三個測點的初步篩選的門檻風速分別設定為  $8\text{m/s}$ 、 $5\text{m/s}$  與  $7\text{m/s}$ 。位於都市地況，測點 A 的四次季風監測事件，總計 91 個小時的東北風向資料中，僅有 31 個小時的資料通過前述之篩選分析流程，可用於評估風速剖面特性。風速剖面指數律  $\alpha$  值之平均值與標準差分別為 0.28 與 0.05；粗糙長度  $z_0$  的平均值與標準差分別為  $0.75\text{m}$  與  $0.49\text{m}$ 。測點 A 大多數資料的邊界層高度均大於可觀測高度，本文僅能推論該測點之平均邊界層厚度在  $420\text{m}$  以上。

位於鄉鎮地況的測點 B 執行了的三次季風監測，在 18 個小時的東北風向資料中，有 16 個小時的資料通過篩選分析流程。風速剖面指數律  $\alpha$  值之平均值與標準差分別為 0.22 與 0.07；粗糙長度  $z_0$  的平均值與標準差分別為  $1.53\text{m}$  與  $0.98\text{m}$ 。檢視測點 B 的資料可知，在 16 個小時的有效資料中有 6 個小時的風剖面資料（其中五個連續小時）呈現類似暴風雨鋒面之風剖特性：風速在約  $120\text{m}$  至  $180\text{m}$  的較低高度達到最大值，而後隨著高度快速遞減。有 6 個小時的風剖面資料，其邊界層厚度大於介於  $240\text{m}$  至  $600\text{m}$  之可觀測高度。簡言之，該測點數據無法提供可靠之邊界層厚度評估。位於平坦開闊地況的測點 C 執行了的三次季風監測，在 25 個小時的東北風向資料中，有 10 個小時的資料通過篩選分析流程。風速剖面指數律  $\alpha$  值之平均值與標準差分別為 0.15 與 0.04；粗糙長度  $z_0$  的平均值與標準差分別為  $0.50\text{m}$  與  $0.50\text{m}$ ；邊界層厚度的平均值與標準差分別為  $327\text{m}$  與  $88\text{m}$ 。

在監測計畫執行的三年期間，僅得到二次有效的颱風量測，一次發生於測點 B，平均風速介於  $15\text{-}20\text{m/s}$ ；另一次發生在測點 C，平均風速在  $20\text{m/s}$  以上；其餘的颱風監測風速偏低，多屬於週邊環流影響。測點 B 選取東南向（介於  $112.5^\circ$  至  $157.5^\circ$ ）的颱風資料進行分析；測點 C 則選用東北向（介於  $22.5^\circ$  至  $67.5^\circ$ ）的颱風數據；初步篩選的門檻風速均為  $15\text{m/s}$ 。測點 B 取得 9 筆一小時的有效資料評估風速剖面特性，其中三筆資料的邊界層厚度介於  $450\text{m}$  至  $540\text{m}$ ，其餘資料的邊界層厚度均大於可觀測高度（介於  $240\text{m}$  至  $510\text{m}$ ），平均邊界層厚度應大於  $400\text{m}$ 。風速剖面指數律  $\alpha$  值之平均值與標準差分別為 0.24 與 0.04；粗糙長度  $z_0$  的平均值與標準差分別為  $2.36\text{m}$  與  $1.46\text{m}$ 。測點 C 取得 6 筆一小時的有效資料評估風速剖面特性。風速剖面指數律  $\alpha$  值之平均值與標準差分別為 0.11 與 0.02；粗糙長度  $z_0$  的平均值與標準差分別為  $0.08\text{m}$  與  $0.09\text{m}$ ；邊界層厚度的平均值與標準差分別為  $275\text{m}$  與  $35\text{m}$ 。比較季風與颱風的資料可知二者的風剖面特性大致相近。測點 C 的季風與颱風資料風向相同，颱風的風剖面較季風略微均勻，邊界層厚度也略低。由於颱風觀測資料不足，上述比較不足以作為定論。

## 6. 風洞試驗

無論是 Lidar 或是中央電台鐵塔上 ultra-sonic 風速計都有量測高度的限制，為了瞭解完整大氣邊界層的特性，唯有借助風洞模擬實驗。本文所執行的自然風場風洞模擬試驗可分為兩個部分，第一部分是針對淡水中央電台鐵塔位址所做的縮尺模擬，第二部分則是針對 Lidar 實場量測的三個標準地況位址的縮尺模擬。

## 6.1 中央電台風場之風洞模擬

淡水中央電台風場的縮尺模擬又分為二個階段：第一階段是根據實場量測數據驗證風洞縮尺模型試驗的正確性；第二階段則是探討完整紊流邊界層的特性。圖 12 為風洞設置的 1/400 地形縮尺模型。地形模型除了以設置風速計的微波鐵塔為圓心，半徑 400 公尺範圍的地形地物之外，上游 5000 公尺的地物地貌也做了完整的模擬，上游 2.5-5 公里處鮮少建物，地形上有數十公尺的起伏。這部分的風場模擬在上游處沒有設置任何人為的錐形擾流板或地表粗糙元素等邊界層元件，完全藉由地形縮尺模型發展紊流邊界層。



圖 12. 淡水中央電台位址之地形縮尺模型

本文目的在於探討強風作用下的風場特性，因此擷取實場量測之較高風速數據( $U_{20} > 10$  m/s)統計結果與風洞模擬試驗進行比對驗證。圖 13 為對應實場高度 100 公尺以下，風洞與實場之平均風速、紊流強度以及紊流尺度之比較。圖中顯示，根據地形縮尺模型所得之平均風速及紊流強度剖面與實場量測結果相當吻合；唯有風洞所得之紊流尺度略低於實場數據。這個現象是由於風洞模擬由於試驗段入流口為均勻等速流的限制，無法產生大尺度的紊流所致。圖 14 的紊流頻譜比較即顯示：在低頻區，風洞模擬所得紊流頻譜明顯小於實場數據；然而當約化頻率大於 1.0， $fL_w/U > 1.0$ ，二者吻合度良好。

根據上述比較，驗證了風洞縮尺模型試驗的可信度之後，即可進行第二階段完整紊流邊界層特性的探討。中央電台鐵塔位址測得之邊界層梯度高度相當於實場之  $370\text{m} \pm 20\text{m}$ ，其值相當符合文獻中介於平坦與鄉鎮地況之邊界層高度。本文並根據平均速度剖面計算形狀因子(shape factor = displacement thickness / momentum thickness)，其值為 1.9，顯示測站位址之流場為完全發展之紊流邊界層(fully developed turbulent boundary layer)。本文進一步在鐵塔位址上游 50cm 處(實場上游 200m)，測得該處邊界層高度為

365m±20m，形狀因子為 1.8，亦顯示模擬流場僅有細微的變化。圖 15、圖 16(a), 16(b) 分別為鐵塔位址之平均速度剖面、縱向紊流強度剖面與縱向紊流尺度剖面。根據完整平均風速剖面擬合指數律所得之  $\alpha$  值為 0.23，略低於我國風力規範定義之鄉鎮地況風場。

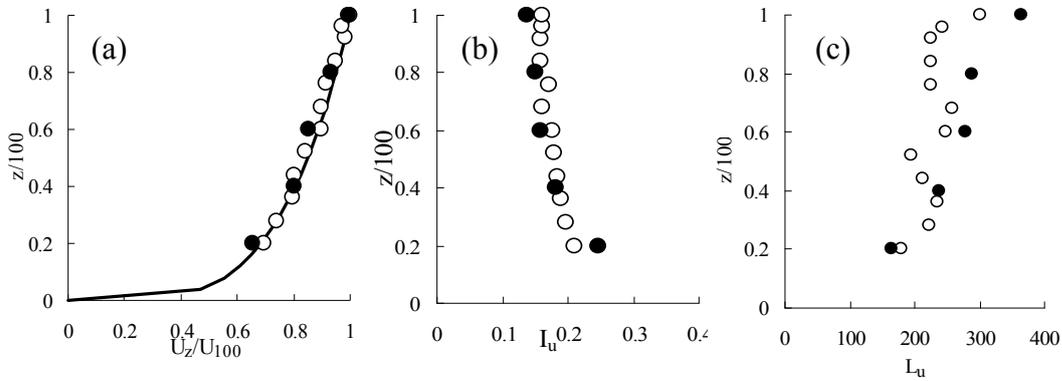


圖 13: 風洞模擬流場與實場監測之比較 (a)平均風速剖面，(b)紊流強度，(c)紊流尺度  
(○：風洞模擬，●：實場監測)

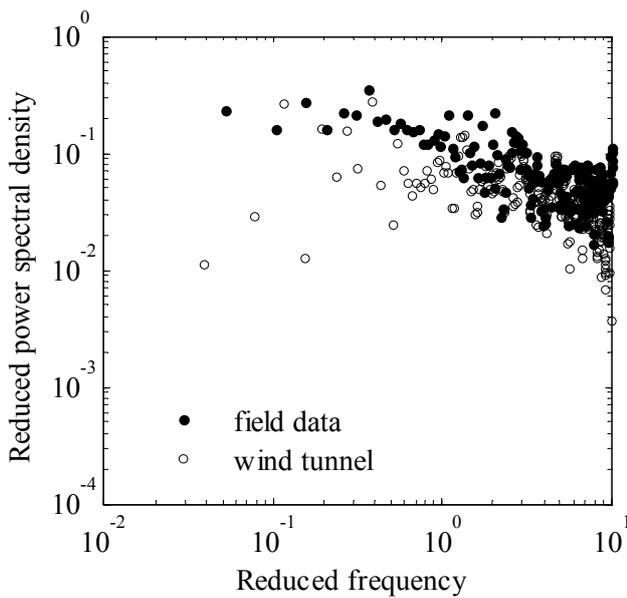


圖 14. 風洞縮尺模擬與實場量測紊流頻譜之比較

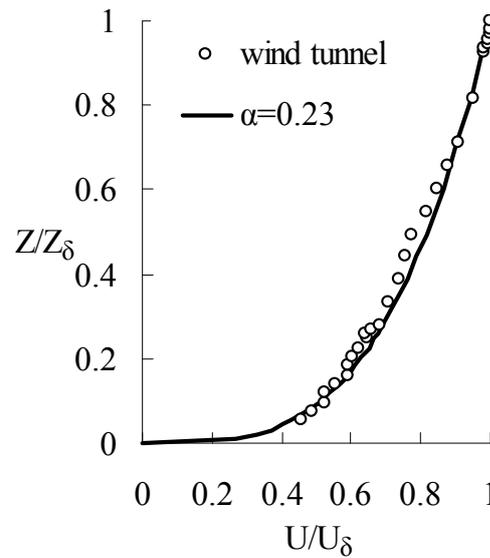


圖 15. 風洞縮尺模擬所得之平均風速剖面

圖 16(a)顯示縮尺模型產生的紊流強度在邊界層下半部份與美國 ASCE7-02 定義之平坦鄉村地況(地況 C)以及日本 AIJ-96 定義之地況 III (少許建築物高度約為 4 到 9 層之郊區住宅、工業區及林地， $\alpha=0.20$ 。)相當接近。ASCE7-02 定義鄉鎮地況(地況 B) 之紊流強度則明顯偏大保守。我國風力規範的風場特性採用 ASCE7-02 的相關規定，因此在紊流強度方面有過度保守之虞。圖 16(b)則顯示縮尺模型產生的紊流尺度在邊界層上半部份與 ASCE7-02 及 AIJ-96 的相關規定相當近似。

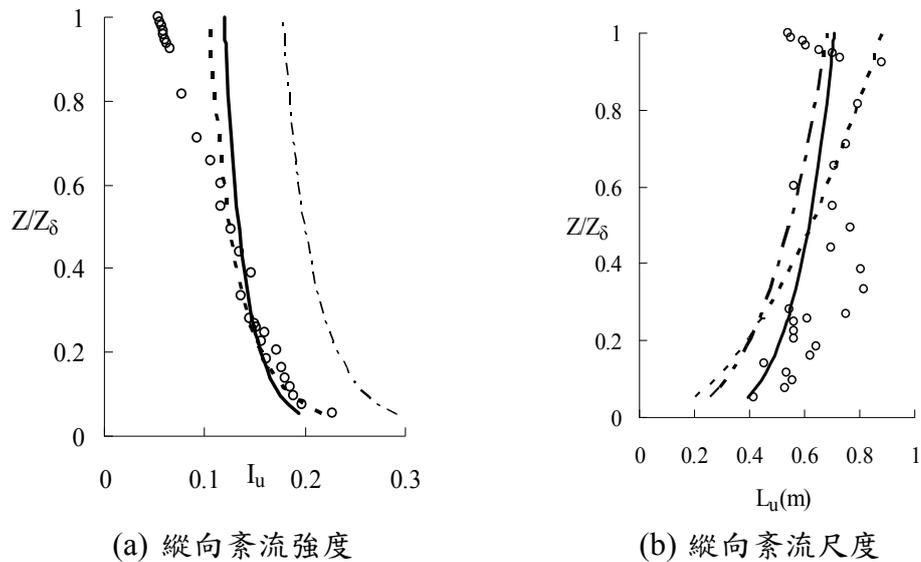


圖 16. 風洞縮尺模擬所得之紊流強度與紊流尺度剖面

○: wind tunnel, — : ASCE7-02(C), - · - : ASCE-7-02(B), - - - : AIJ-96(III)



(a) 都市地況(測點 A)



(b) 鄉鎮地況(測點 B)



(c) 開闊地況(測點 C)

圖 17: 風洞縮尺模擬之地況示意圖。

## 6.2 Lidar 測站風場之風洞模擬

本文針對 Lidar 實場監測三個測站的風場進行風洞縮尺模擬。風洞試驗第一階段透過比較平均風速剖面，先決定風洞縮尺模擬各元件之合宜性，再作完整的紊流場量測，以補足實場 Lidar 數據之不足。本文以設於都市地況之測點 A 為例，說明風洞模擬之過程。根據 Lidar 的量測顯示，實場監測資料的主要風向是東北風，因此風洞縮尺模擬的上游發展段方向設定為東北向。由於實場監測資料顯示該測點的邊階層高度應在 420m

以上，因此風洞縮尺採用 1/500，上游完全模擬的地況則長達 6.75 km，如圖 17(a)所示。圖 17(b)與 17(c)分別是測點 B 與測點 C 的 1/400 風洞縮尺模擬之上游地況，模擬長度為 5.4 km。量測結果顯示：無論何種地況，僅使用縮尺模型的上游地況所能發展的邊界層厚度均低於實場量測，平均風速剖面亦未盡理想。必須在發展段最上游處加上適當擾流板，方能得到令人滿意的平均風速剖面。其原因為：當上游實際地況無大範圍之地勢高低起伏時，本文所使用之風洞試驗段長度不足，必須依賴擾流板產生大尺度渦流，使邊界層內流場具有適當的混合能力，方能在試驗段範圍內發展穩定的邊界層流。三個測點的紊流特性便是在地況縮尺模型搭配上試誤所得之上游擾流版環境下的量測所得。

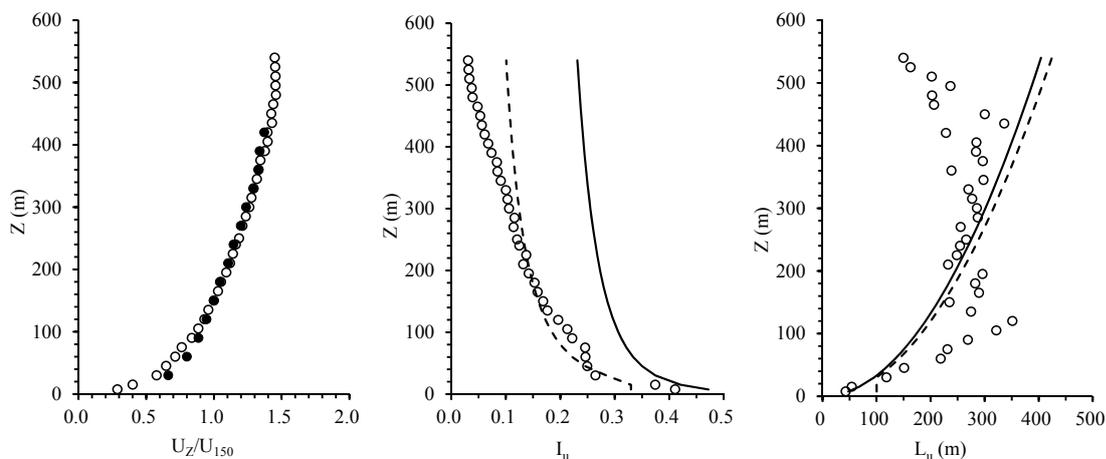


圖 18: 都市地況中測點 A 之平均風速、紊流強度與紊流尺度。

(○：wind tunnel；●：field data；—：ASCE7(A)；--：AIJ(IV))

圖 18(a), 19(a), 20(a) 是三種地況的風洞縮尺模擬與實場監測平均風速剖面之比較。圖 18(b), 19(b), 20(b)與圖 18(c), 19(c), 20(c)則分別是風洞縮尺模擬所得之紊流強度及紊流尺度與風力規範建議值之比較。圖 18(b)顯示都市地況縮尺類比之紊流強度明顯低於早期版本 ASCE7 對於地況 A (大都市中心) 之建議值。然而與 AIJ 所建議地況 IV (有許多 4-9 層樓建築之都市) 紊流強度相較，在 250m 以下相當吻合，AIJ 建議值在更高處則偏於保守。圖 18(c)則顯示 ASCE7 與 AIJ 對於紊流尺度的建議值相近，縮尺模擬在 150m 以下與其近似，二種規範在高處均偏向過度保守。圖 19(b)顯示鄉鎮地況縮尺類比之紊流強度明顯低於 ASCE7-02 對於地況 B (都市郊區與鄉鎮) 之建議值。與 AIJ 所建議地況 III (有少量 4-9 層樓建築之郊區) 紊流強度相較在 50m 以下相當吻合，更高處 AIJ 建議值偏於保守。圖 19(c)則顯示縮尺模擬所得之紊流尺度在 50m 以下與 AIJ 的建議值相近，AIJ 與 ASCE7-02 二種規範在高處均偏向過度保守。圖 20(b)、20(c)則顯示縮尺模擬所得之紊流強度與紊流尺度均小於 ASCE7 與 AIJ 之建議值。

根據中央電台測站的實場紊流數據以及後續的風洞模擬研究可知：紊流強度隨著平均風速增高而略微降低。雖然本文未能取得強風作用下的紊流數據，採用本文表 1 中強風條件下的紊流強度作為耐風設計依據應屬保守。中央電台測站的風洞模擬則顯示；根據地況縮尺模型模擬所得近地表 100m 內之紊流強度與實場風速在 10m/s 以上者(多為颶

風數據)相當吻合。無論中央電台測站或是 Lidar 測站的風洞模擬結果均顯示我國耐風設計規範(ASCE7)中所定義之紊流強度過於保守，未來可參考本文與 AIJ 相關建議值修訂之。

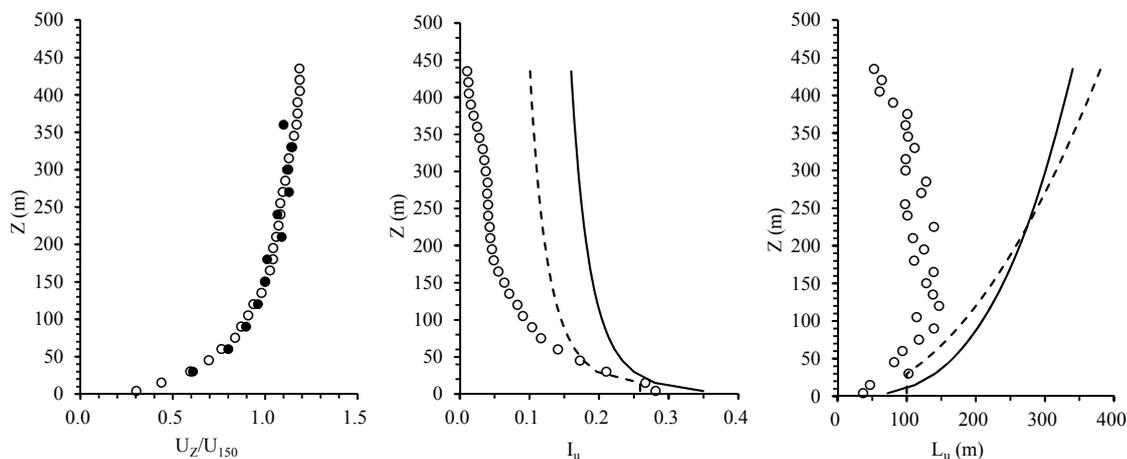


圖 19：鄉鎮地況中測點 B 之平均風速、紊流強度與紊流尺度。  
(○：wind tunnel；●：field data；—：ASCE7(B)；--：AIJ(III))

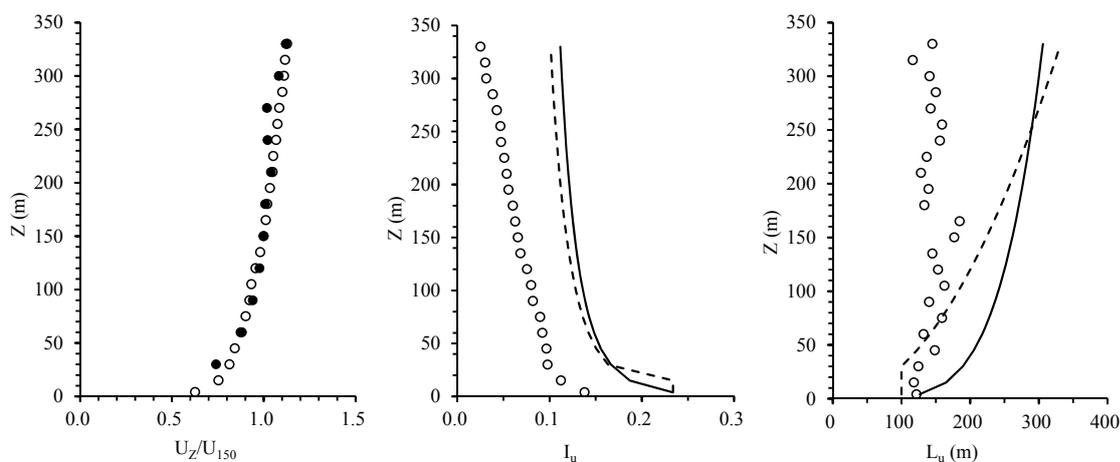


圖 20：開闊地況中測點 C 之平均風速、紊流強度與紊流尺度。  
(○：wind tunnel；●：field data；—：ASCE7(C)；--：AIJ(II))

## 7. 結論

本研究使用超音波風速計與光達在包含都會區、鄉鎮區以及農村等不同地況的多個測點位址，在季風與颱風條件下進行自然風場實場監測。其次，以實場監測結果為依據，在風洞實驗室根據所選定之實場量測區域之實際地形地物所製作之縮尺模型，模擬探討紊流邊界層之特性。研究結果歸納如下：

- (1) 本文藉由淡水中央電臺高塔上所設置之超音波風向風速計，進行 Lidar 的驗證工作。Lidar 與超音波風速計在十分鐘平均風向有良好的一致性。風速方面根據校驗的量測結果發現當環境風速接近或大於 10m/s 時，Lidar 與超音波風向風速計量測誤差在 10% 以內，低風速的相對誤差較大。

- (2) 淡水中央電臺高塔設置超音波風向風速計的量測顯示，在相同風速條件下，颱風與季風形成的風場在風速梯度上並無差異，颱風的紊流強度與紊流尺度則略大於季風。
- (3) 淡水中央電臺高塔設置超音波風向風速計的量測顯示，平均風速對於速度梯度有輕微的影響，高風速時風速剖面指數律之  $\alpha$  值略微降低。紊流強度隨著平均風增加而略微下降，縱向紊流尺度則隨著風速增大，紊流頻譜與 Empirical Karman 模式相當吻合。
- (4) 本文使用 Lidar 在都會區、鄉鎮區以及農村等三個不同地況之測點，分別在季風與颱風時進行實場監測，並評估風速剖面特性。在季風條件下，都會區、鄉鎮地況與平坦地況風速剖面指數律之  $\alpha$  值分別為 0.28、0.22、0.15。
- (5) 本文製作淡水中央電台測點周邊之地況縮尺模型，模擬紊流邊界層。在實場高度 100 公尺以下，風洞與實場之平均風速、紊流強度相當吻合。紊流頻譜比較則顯示：在低頻區，風洞模擬之紊流頻譜明顯小於實場數據；然而當約化頻率大於 1.0， $fL_u/U > 1.0$ ，二者吻合度良好。
- (6) 本文根據 Lidar 各測點之實際地形地物所製作縮尺模型，模擬紊流邊界層。經過縮尺模擬與實場監測之平均風速剖面資料比較之後，得到三個具代表性地況的紊流特性。
- (7) 中央電台測站或是 Lidar 測站的風洞模擬與規範比較結果均顯示我國耐風設計規範 (ASCE7) 中所定義之紊流強度過於保守，未來可參考本文與 AIJ 相關建議值修訂之。

## 8. 參考文獻

- [1] 鄭啟明，標準地況自然風場實場監測與特性分析，內政部建築研究所研究報告，2009。
- [2] 鄭啟明、羅元隆，“風力規範之標準地況分類與紊流邊界層特性研究”，「建築學報」，2009 年，第 68 期，103-120 頁。
- [3] Amano, T., H. Fukushima, T. Ohkuma, A. Kawaguchi and S. Goto, “The observation of typhoon winds in Okinawa by Doppler sodar”, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, Vol. 83: 11-20, 1999.
- [4] ASCE. Minimum design loads for buildings and other structures. ASCE 7-02, Reston, VA, USA, 2002.
- [5] Browning, K. A. and R. Wexler, “The determination of Kinematic properties of a wind field using Doppler radar”, *J. Appl. Meteor.*, Vol. 7: 105-113, 1968.
- [6] Cheng, C. M., J. C. Wu, J. Wang, Y. Y. Lin and C. H. Chang, “Wind Characteristics of Typhoon and Monsoon”, *Proceedings of 12th International Conference on Wind Engineering*: 711-718, Cairn./Australia, 2007.
- [7] Davenport, A. G., “The relationship of wind structure to wind loading”, *Proceedings of the Symposium on Wind Effects on Buildings and Structures*, Vol. 1: 53-102, National Physical Laboratory, HMSO, Teddington, London, UK, 1965.
- [8] Jang, J. J. and C. H. Lee, “Analysis of Wind Speed Power Spectrum of Taiwan Area”, *Journal of*

- the Chinese Institute of Civil and Hydraulic Engineering*, Vol. 11, No.1: 33-44, 1999.
- [9] Kato, N., T. Ohkuma, J. R. Kim, H. Marukawa and Y. Niihori, "Full scale measurements of wind velocity in two urban areas using an ultrasonic anemometer", *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, Vol. 41-44: 67-78, 1992.
- [10] Kijewski, T., D. K. Kwon and A. Kareem, "E-Technologies for Wind Effects on Structures", *Proceedings of the Eleventh International Conference on Wind Engineering*, Lubbock, USA, 2003.
- [11] Kwok, K. C. S., "Wind effects on tall buildings in typhoon prone urban environment", *Wind effects on Buildings and Urban Environment, Proceedings of ISWEI*: 131-141, Tokyo/Japan, 2004.
- [12] Miyata, T., H. Yamada, H. Katsuchi and M. Kitagawa, "Full-scale measurement of Akashi-Kaikyo Bridge during typhoon", *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, Vol. 90, No. 12: 1517-1527, 2002.
- [13] Shiau, B. S., "Velocity Spectra and Turbulence Statistics at the Northeastern Coast of Taiwan under High-wind condition", *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, Vol. 88: 139-151, 2000.
- [14] Xu, Y. L. and J. Chen, "Turbulent wind characteristics in urban environment", *Wind effects on Buildings and Urban Environment, Proceedings of ISWEI*: 197-210, Tokyo/Japan, 2004.