

風力規範之標準地況分類與紊流邊界層特性研究

鄭啟明* 羅元隆**

關鍵字：平均風速剖面，實場監測，地況分類，非定常性分析

摘要

我國建築物耐風設計規範中，風場特性為參考 ASCE-7 相關規定所訂定。然而我國設計風速主要受颱風影響，與美國大陸型氣候不盡相同。ASCE-7 地況分類標準未必能正確地反應本土的地況分類及風場特性，須進一步探討耐風設計規範中標準地況的分類標準以及應用自然風場之實場監測以驗證之。本研究透過文獻回顧、國內外風力規範之整理及風洞模擬，對於自然風場的地況分類標準提出修正建議。此外本文在淡水濱海地區建立邊界層特性的實場監測站，取得颱風與東北季風的實測數據並提出颱風實測數據的分析方法與包括平均風速垂直分佈剖面、紊流特性、陣風因子等重要風場特性，可供未來風力規範修正之參考。

Investigations on the Terrain Classification and Characteristics of Atmospheric Turbulent Boundary Layer

Chii-Ming Cheng* Yuan-Lung Lo**

KEYWORDS: Wind Profile, Field Measurement, Terrain Classification, Non-stationary Analysis

ABSTRACT

This paper investigates the terrain classification and the wind characteristics of the strong wind defined in the building wind code. Since the nature of complex terrain and city types in Taiwan are quite different from those in US, the terrain classification in the current building wind code may be different from ASCE7-02. Therefore, it is most urgent that these distinct local characteristics are accurately reflected in the building wind code. Based on the literature review and comparative study on several national wind codes, a set of classification standards for the terrain categories is proposed. The data analysis procedure for the random in-situ data is also introduced. Results from the field measurement indicate that the mean velocity gradient obtained from the field is higher than expected and the absolute mean wind speed cast only minor effect on the turbulence. Based on the in-situ data, a set of turbulence parameters and empirical Harris-Karman type spectra are recommended.

*淡江大學土木系教授(通訊作者 Email: cmcheng@mail.tku.edu.tw)

Professor, Department of Civil Engineering, Tamkang University, Taiwan

**淡江大學風工程研究中心研究助理

Research Assistant, Wind Engineering Research Center, Tamkang University, Taiwan

一、前言

內政部建築研究所所頒行的「建築物耐風設計規範及解說」中,對於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(風力)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。基本設計風速是根據各地氣象站的資料經統計分析後訂定,除應檢討統計模式的合宜性之外,並應隨著氣象數據的增添而定期修訂。風場特性則包括了不同地況的風速分佈以及紊流特性。由於缺乏實測資料,我國規範的風場特性是參考 ASCE-7 的相關規定(ASCE, 2000)所訂定。

台灣是一個島嶼,領土多山丘而少平原,人口密度高,都市、鄉鎮與郊區的發展情況與美國迥異,地況類別採用美國的分類方式,確有值得探討之處。規範中的設計風速主要受到颱風的影響,與美國大陸型氣候也不盡相同,直接採用美國的地況分類以及風場特性,未必能正確的反應本土的地況以及風場特性。因此,建立相關的實場監測數據做為未來風力規範的修訂依據,實是當務之急。一般而言,由於實場監測的設備需求較高,數據採集不易,風工程的實場數據在國際間都難得罕見。

1960 年代 A.G. Davenport 在澳洲所做的實場量測數據構建紊流頻譜 Davenport Spectrum。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 年代前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。Kwok (2004)與 Xu (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; Kijewski 與 Kareem (Kijewski, 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, 1992; Amano, 1999; Miyata, 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。國內近年來則僅有張景鐘(Jang and Lee, 1999)、蕭葆義(Shiau, 2000)等學者曾經做過規模較小的自然風場量測。

本文研究內容可分為兩大項,分別是地況分類標準之訂定與自然風場特性之實場監測。有關自然風場的地況分類標準,係以文獻回顧以及國外風力規範之整理作為主要的研究方法。本文參考美國、日本、紐澳、加拿大以及 ISO 的相關規定,並參酌台灣的地況以及鄉鎮發展特性,對於自然風場的地況分類標準提出建議,作為日後修訂規範之參考。各國規範中對於自然風場地況的參數定義及分類標準有所不同,源於各國有其區域性地況特徵及其鄉鎮發展之特性。有鑑於此,本文定義出屬於本國之風場特性及分類標準,有益於國內工程師於設計時可簡便無誤地使用規範中所列之公式。自然風場特性之實場監測主要可分為兩部分,第一部份描述實場監測時的數據分析方法。在進行風速資料分析之前,本文使用了 EMD(Empirical mode decomposition)法確保風速資料的定常性(stationarity),以免影響分析結果失真。第二部分則詳細說明實場風速數據的分析結果,資料的分析結果,包括平均風速垂直分佈剖面、紊流強度、紊流尺度、紊流頻譜等重要風場特性,可供未來風力規範修正之參考。

二、自然風場地況分類標準

2-1 我國現況

建築物的耐風設計首先需要依據地況分類標準,判別該建物位址所屬之地況,藉由分類得到該地況的各項特性參數,諸如平均風速、紊流強度及紊流尺度剖面等,再依據各項參數值即可利用規

範中之公式，求得該建物之設計風載重。因此，地況分類標準必須能夠正確的反應實際的地況。我國地況種類依建築物所在位置及其附近地表特性而定。內政部於 96 年 1 月 1 日所公布的「建築物耐風設計規範及解說」(營建雜誌社，2006)將地況分成以下三類：

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)係屬此種條件下，才可使用地況 A。平均風速垂直分佈指數律指數值為 $\alpha=0.32$ 。

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)係屬此種條件下，方可使用地況 B。平均風速垂直分佈指數律指數值為 $\alpha=0.25$ 。

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。平均風速垂直分佈指數律指數值為 $\alpha=0.15$ 。

若附近地況為介於地況 A 與地況 B 間或地況 B 與地況 C 間之過渡地況，原則上應採用會產生較大風力之地況。依據以上的分類，我們可以依規範公式計算出屬於各地況的平均風速垂直分布、紊流強度及紊流尺度。

2-2 各國風力規範規定

各國規範對於地況分類之種類與定義雖然有文字相近的闡述，卻依各規範公式而有不同的風場特性參數值。以下列出地況分類種類與定義，詳細內容可參考文獻所列之規範。

(1)美國規範(American Society of Civil Engineers, 2002)，美國規範將地況種類分成以下三類：

(A)地況 B：有多數緊密空間，障礙物大小就如同家庭住宅或更大。且本地況應限制為該建築物迎風向之前方至少有 1500 呎或 10 倍建物高度之範圍亦為此種地況方可使用之。平均風速垂直分佈指數律指數值為 $\alpha=0.25$ 。

(B)地況 C：開闊地形、草原。有著分散的障礙物(介於 30ft (9.1m) 以下)。平均風速垂直分佈指數律指數值為 $\alpha=0.25$ 。

(C)地況 D：開闊地形或者沒有障礙物以及水平面。本地況延伸至少為由海岸線向內延伸 1500 呎或 10 倍建物高度之距離。平均風速垂直分佈指數律指數值為 $\alpha=0.11$ 。

在 ASCE 7-98 中原本地況 A 之定義為：至少 50%建物高度超過 70 呎的大都會中心。且本地況應限制為該建築物迎風向之前方至少有半英里或 10 倍建物高度之範圍屬於此種地況方可使用之。然地況 A 在 ASCE 7-02 即予以去除，若建築物經判斷有屬地況 A 之虞，則應進行風洞試驗。

(2)日本規範(AIJ Recommendations for Loads on Buildings, 1996)，日本規範將地況分為五類：

(A)地況 I：開闊地形或者沒有障礙物以及水平面，例如港灣。平均風速垂直分佈指數律指數值為 $\alpha=0.10$ 。

(B)地況 II：開闊地形。少許的障礙物、草原或冰原，農村或機場為代表。平均風速垂直分佈指數律指數值為 $\alpha=0.15$ 。

(C)地況 III：郊區、樹林繁茂區或有少許建築物(高度約為 4 到 9 層)。郊區住宅、工業區

及林地為代表。平均風速垂直分佈指數律指數值為 $\alpha=0.20$ 。

(D)地況 IV：城市、有建築物（高度約為 4 到 9 層），例如中度發展城市。平均風速垂直分佈指數律指數值為 $\alpha=0.27$ 。

(E)地況 V：城市、非常集中之高層建物（超過 10 層樓高），例如東京或大阪。平均風速垂直分佈指數律指數值為 $\alpha=0.35$ 。

(3)紐澳規範(Standard Australia, 2002)，澳洲規範將地況分為四類：

(A)地況 1：開闊地形有著少許或沒有障礙物以及水平面，例如雪地、草原及沙漠。經擬合之平均風速垂直分佈指數律指數值約為 $\alpha=0.11$ 。

(B)地況 2：開闊地形、草原。有著分散的障礙物介於 1.5m 至 10m 之間，例如機場、農場等。經擬合之平均風速垂直分佈指數律指數值約為 $\alpha=0.14$ 。

(C)地況 3：有多數緊密空間障礙物大小，類似家庭住宅。（高度約為 3m 至 5m）、林地鄉村、小城鎮、森林等。經擬合之平均風速垂直分佈指數律指數值約為 $\alpha=0.22$ 。

(D)地況 4：高度介於 10m 到 30m 間高樓建築，緊密的是中心或是發展完全之工業綜合區。經擬合之平均風速垂直分佈指數律指數值約為 $\alpha=0.30$ 。

(4)加拿大規範(National Research Council of Canada, 1990)，加拿大規範將地況分為三類：

(A)地況 A：開闊地形有著少許建築物、樹木或障礙物以及水平面。平均風速垂直分佈剖面指數律指數為 $\alpha=0.14$ 。

(B)地況 B：郊區、鄉鎮地形，包含樹林或小型城市。平均風速垂直分佈剖面指數律指數為 $\alpha=0.25$ 。

(C)地況 C：有緊密高樓建築的大城市中心處，50%以上的建築都超過 4 樓。平均風速垂直分佈剖面指數律指數為 $\alpha=0.36$ 。

(5)ISO 6897-1984，ISO 規範(International Standard Organization, 1984)將地況分為四類：

(A)地況 1：開闊海平面地形。平均風速垂直分佈指數律指數值為 $\alpha=0.11$ 。

(B)地況 2：開闊平坦地形。平均風速垂直分佈指數律指數值為 $\alpha=0.14$ 。

(C)地況 3：郊區，林間。平均風速垂直分佈指數律指數值為 $\alpha=0.22$ 。

(D)地況 4：都市中心。平均風速垂直分佈指數律指數值為 $\alpha=0.31$ 。

2-3 自然風場地況分類之相關研究與建議

地表附近空氣之移動受地面之起伏、建築物、林木分布等之摩擦作用影響，使平均風速形成一垂直分佈剖面（以下簡稱風速剖面），愈接近地面則風速愈小。風速剖面直接受地表粗糙狀況影響，粗糙程度愈大，紊流愈強。一般多以粗糙長度(roughness length)描述地表粗糙程度，可作為地況分類之指標。一則由於文獻中之粗糙參數資料多半屬於國外特有的地況特徵，未必符合台灣地況分類；再則由於目前國內外學者專家在描述風場特性之風速剖面時，多半採用指數律(power law)而非對數律(logarithmic law)，粗糙長度參數僅為提供參考的參數值，對於結構設計者而言，並無實際工程意義。

我國因為過去少有風工程的實場監測，缺乏對台灣各類地況風場的相關數據，因而沒有屬於自己的自然風場地況分類標準以及所對應的風場特性。故本文在考慮本國自然風場地況分類標準時，

首先整合上述規範及研究文獻，考慮以與台灣地況相近之日本規範為基礎，輔以其他各國規範以及部分風洞實驗數據，提出相關建議。在考慮自然風場地況分類標準時，並不考慮建物周遭的特殊地形，如山丘、山脊等的影響，在風力規範中另有地形因子修正特殊地形對於風速的影響。

2-3-1 地況 A 定義與平均風速垂直分佈指數律的修正建議

本文對 60、70、80 年代台北市地況的自然風場進行風洞模擬研究。風洞實驗模擬台北市仁愛路、信義路一帶不同年代的地況建物分佈，自然發展而成的風速剖面，如圖 1 所示。研究結果顯示，風速剖面具有隨著年代增加而指數值增加的趨勢。圖 1(c)為仁愛路、信義路一帶，以 80 年代的建築物情況為模擬依據，所得的平均風速垂直分佈，其指數值為 0.32。該地段已屬於台北市區內建物平均高度較高且分佈最為緊密地段之一。綜觀台灣所屬都市地形中，以台北市的建築物分佈最為緊密且樓層數最多。顯示該項實驗所得之指數已屬於台灣都市地形風速剖面指數之上限，因此建議風力規範中地況 A 的指數值略微向下修正。參考日本規範地況 IV 及紐澳規範地況 4 的定義，該兩地區建物分布情形較符合台灣都市地況，而其擬合之風速剖面指數分別為 0.27 與 0.30，故建議將地況 A 所屬指數值向下修正為 0.30。其相對於 100 公尺處的設計風速差異在 5% 以內，對於實際工程應用上並不會造成太大的改變，但於定義內容應更可符合本國特徵。

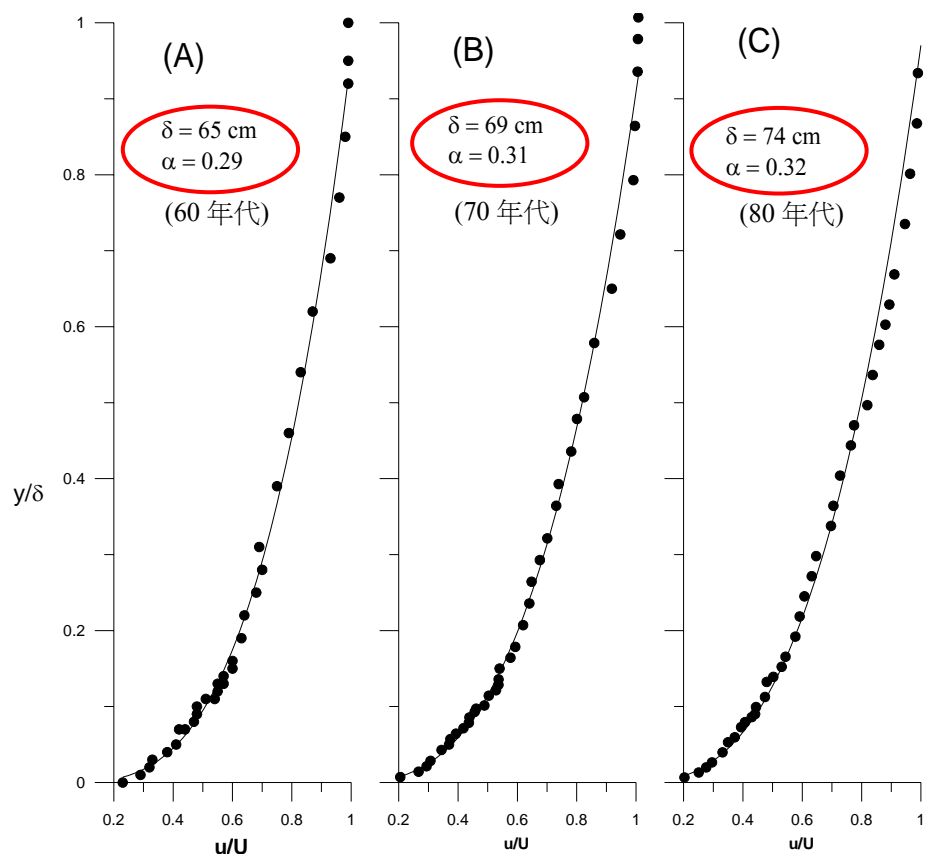


圖 1 60、70、80 年代台北市氣象站周圍半徑約 400 公尺之風速剖面

自然風場的地況分類標準中，除了建築物及地上物的高度與分布密度之外，另一項重要的參數是上游的發展長度。在自然界空氣流動通過地表某類型的粗糙物，需要相當的長度才能發展出代表該地況完整邊界層流場。一般而言，完整邊界層流的發展長度在五公里以上，以台灣的都市鄉鎮特色而言，很難出現一片長達五公里具有相近城鎮風貌的區域。大部分的地方所發展的邊界層流都是混合了兩種地況以上的流場。由文獻(Simiu and Scanlan, 1996)可知當風通過一種新的地況時，新生邊界層的高度與地況的距離存在下列的關係：

$$h(x) = 0.28Z_0\left(\frac{x}{Z_0}\right)^{0.8} \quad (1)$$

式中 $h(x)$ 為部分邊界層的高度； x 為新地況的長度； Z_0 為該地況的粗糙長度。由文獻(Simiu, 1996)及紐澳規範(AS/NZS 1170.2, 2002)，可知對應我國地況 A 的 Z_0 約為 2.0(m)；對應我國地況 B 的 Z_0 約為 0.8-1.0(m) (取 1.0m)。代入式(1)後可得部分邊界層高度與發展長度關係式：

$$\text{地況 A} \quad x = 4.1h(x)^{1.25} \quad (2)$$

$$\text{地況 B} \quad x = 4.9h(x)^{1.25} \quad (3)$$

我國高層建築的實務應用上，高度超過 100 公尺者，多數以風洞試驗結果作為耐風設計的依據。因此風力規範中部分邊界層的發展高度以不超過 100 公尺為宜。以樓高 100 公尺為例，對應至地況 A 與地況 B 的發展長度分別是 1300 公尺與 1600 公尺。此範圍遠超過目前規範中地況 A (800 公尺)、地況 B (500 公尺) 的規定。由於部分邊界層高度必須和樓高的倍數相結合，因此，最小發展長度宜適度縮小，本計畫建議如下：

地況 A：「建築物上游 1000 公尺或建築物高度 13 倍的距離 (二者取較大值)。」

地況 B：「建築物上游 1000 公尺或建築物高度 16 倍的距離 (二者取較大值)。」

在描述地況分類標準方面，由「建築物風力規範之研究」就仁愛路與信義路地區的地形圖與空照圖推估得知：「台北市在民國 80 年時，建築物低於五層樓佔所有建築物 68%，6 層樓至 10 層樓佔 22%，11 至 15 層樓佔 9%，16 層樓以上約佔 1%。」。以台北市的現況而言，除了緊鄰主要街道的房舍多為 10 層左右的建築之外，大多區域地況仍以 5~6 樓居多，且未來大幅更動的機會不大。針對規範中對地況 A 的定義，本計畫參考日本及紐澳規範的描述概念，提出修正建議。為了避免建築設計者過度使用地況 A 而導致設計風速不夠保守，進行修正為：「普遍為 6 到 10 樓之建築物緊密分佈的都市區或者發展完全的綜合工業區。建築物迎風向之前方至少 1000 公尺或建築物高度 13 倍的範圍(兩者取大值)係屬此種條件下，方可使用地況 A」。希望修正後的地況分類標準除了符合現況之外，能夠給予國內工程師較佳的判斷分類依據。

2-3-2 地況 B 定義與平均風速垂直分佈指數律的修正建議

我國的地況 B 與其他各國的鄉鎮地況比較，風速剖面的指數 0.25 偏屬較高，可能造成設計風速偏低的現象。由於缺乏實驗數據佐證，目前不宜貿然提出修正，建議國內學者加強相關的風洞試

驗，做為未來修正的依據。

在描述地況分類標準方面，參考日本規範地況 III 及地況 IV，且配合各國規範對鄉鎮郊區的描述，以樓層層數及分佈緊密程度作為區分，進行下列的修正：「郊區鄉鎮地形。具有 5~10 公尺緊密分佈的樹林等天然障礙物，或者多數為 2 樓到 5 樓，均勻分佈的中小型建築物；例如中度開發的鄉鎮，大都市周邊郊區，林地或者小型工業區均屬此類。建築物迎風向之前方至少 1000 公尺或建築物高度 16 倍的範圍(兩者取大值)係屬此種條件下，方可使用地況 B」。

2-3-3 地況 C 定義與平均風速垂直分佈指數律的修正建議

根據「建築物耐風設計規範及解說」中地況 C 的描述。在風速剖面修正建議方面，我國的地況 C 與其他各國的開闊地況比較，風速剖面的指數 0.15 大體相當，無須修正。其餘各國規範多將湖岸與海岸地區列為另一種地況， $\alpha=0.10\sim 0.11$ 。然而台灣地區受颱風影響，ASCE7-02 規定：受颶風影響地區之濱海地況不得使用 D 地況($\alpha=0.10$)。且本計畫實場監測之初步數據顯示：颶風時，海岸地區的風速剖面高於現行規範的 $\alpha=0.15$ 。未來亦應加強相關的實場監測，做為規範修正的依據。

在描述地況分類標準方面，參考各國規範針對開闊地況的定義皆有不同，考量國情不同，地況地物亦不同建議修改地況 C 定義如下：「開闊地形；具有不超過 10 公尺的屋舍、樹木或其他障礙物鬆散地分佈，例如農村或海岸地區。」。海岸線所屬地況，因受到強風時海平面粗糙度改變的影響，是否屬於地況 C，應設法取得更多實場監測資料。

2-3-4 本文針對地況定義與平均風速垂直分佈指數律的修正建議綜述

根據本文對於各類地況定義及指數律指數值修正的描述，將地況 A、B、C 的修正依規範格式條列如下：

地況 A：普遍為 6 到 10 樓之建築物緊密分佈的都市區或者發展完全的綜合工業區。建築物迎風向之前方至少 1000 公尺或建築物高度 13 倍的範圍(兩者取大值)係屬此種條件下，方可使用地況 A。平均風速垂直分佈指數律指數值為 $\alpha=0.30$ 。

地況 B：郊區鄉鎮地形。具有 5~10 公尺緊密分佈的樹林等天然障礙物，或者多數為 2 樓到 5 樓，均勻分佈的中小型建築物；例如中度開發的鄉鎮，大都市周邊郊區，林地或者小型工業區均屬此類。建築物迎風向之前方至少 1000 公尺或建築物高度 16 倍的範圍(兩者取大值)係屬此種條件下，方可使用地況 B。平均風速垂直分佈指數律指數值為 $\alpha=0.25$ 。

地況 C：開闊地形；具有不超過 10 公尺的屋舍、樹木或其他障礙物鬆散地分佈，例如農村或海岸地區。平均風速垂直分佈指數律指數值為 $\alpha=0.15$ 。

若附近地況為介於地況 A 與地況 B 間或地況 B 與地況 C 間之過渡地況，原則上應採用會產生較大風力之地況。依據以上的分類，我們可以依規範公式計算出屬於各地況的平均風速垂直分佈、紊流強度及紊流尺度。

三、邊界層特性實場監測計畫與數據分析方法

3-1 實場監測計畫

一個完整的自然風場監測計畫除考量地況有象徵性外，其次須選用適宜的儀器設備，配合數據儲存、傳輸、分析系統，方可進行長期之實場監測並取得正確的成果。本文使用的實場監測系統為 2005 年淡江大學風工程研究中心(WERC-TKU)於淡水中央電台微波鐵塔建置的自然風場特性監測設備，位於海邊及鄉鎮郊區，如圖 2。在電台的西方，北方及南方有數百公尺的河岸與海岸線，東方距離 400~500m 處有著 40~50m 高度變化，半徑 1km 周圍有著住宅大樓及 2~4m 高度之樹木。因此將此地況初步判定為介於 B 地況(郊區鄉鎮地況)與 C 地況(開闊地況)之間之地況。鐵塔上設置五個不同高度的風速計，即可得到該地區的平均風速垂直分佈。與規範中所列之地況分類可進行比對，驗證該地的地況分類歸屬。



圖 2 淡水中央電台位置圖

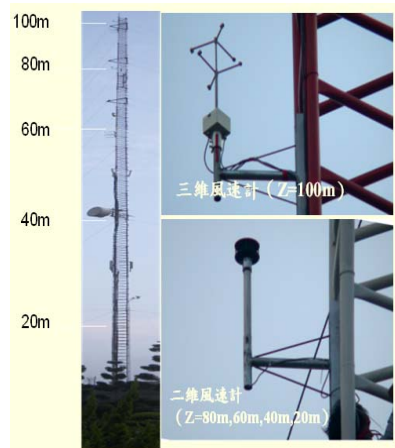


圖 3 風速計架設示意圖

3-2 數據採樣

淡水中央電台微波鐵塔所採用之風速計為四組二維超音波風速計及一組三維超音速風速計，依據 20、40、60、80、100 公尺不同高程裝設，如圖 3。風速為一能量集中在低頻區域且頗為寬頻的分布，二維風速計的頻率響應為 4Hz，三維風速計的頻率響應為 20Hz，應可充分顯示風速之能量特性分布。每十分鐘風速歷時存成一小段作為數據分析的基礎，每一小時的風速歷時視為一筆，除非人為因素，每筆之間數據擷取並不間斷。故在颱風來臨時，可獲得完整的颱風風速風向變化歷時。並由透過網際網路傳送至遠端伺服器存取，進行後續的數據分析。本研究共取得 134 組每小時颱風歷時資料以及 20 組每小時東北季風歷時資料，如表 1 所示。為研究該地區風速剖面特性，將所得資料依據定常性判斷評估後，經由 EMD 法調整過濾，可將所有颱風紀錄依強度分為 (1) $U_{20} < 10 \text{ m/s}$; (2) $10 \text{ m/s} < U_{20} < 17 \text{ m/s}$; (3) $U_{20} > 17 \text{ m/s}$ 。而所有季風歷時紀錄則均屬於低風速。對颱風記錄而言，共有 104 組記錄屬於低強度，20 組記錄為中強度，10 組為高強度紀錄。

表 1 實場監測風速記錄統計表

颱風	日期	20 公尺高程平均風速(m/s)	風向角	每小時記錄資料量(筆)
海棠	2005/07/16	8~14	東北東,東南東	24
瑪莎	2005/08/03	6~8	西南西	24
泰莉	2005/08/30	7~13	東北東,東南東	24
龍王	2005/09/30	9~17	東北東,東南東	24
碧利斯	2006/07/12	7~9	西南西	20
凱美	2006/07/23	6~8	西南西	18
季風	2005/12/--	5~7	東北東	20

3-3 平均風速與擾動風速的計算

一般而言，瞬時風速可寫成下式，為平均風速與擾動風速之和。

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

其中 $\vec{U}(z,t)$ ：瞬時風速向量； $\vec{U}(z)$ ：平均風速向量； $\vec{u}(z,t)$ 為順風向擾動風速向量； $\vec{v}(z,t)$ 為橫風向擾動風速向量； $\vec{w}(z,t)$ 為垂直向擾動風速向量。在計算由實場監測所得之數據時，首先計算該小段記錄時間（十分鐘）的平均風向，根據此平均風向，將瞬時水平向風速分解為 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佈。

3-4 數據定常性評估

由於風場特性以及結構的受風動態反應都是基於紊流為定常性隨機數列(stationary random process)為前提，因此本文針對實場量測所得之風速隨機歷時資料進行數據定常性的評估。若數據經由評估後屬於定常性(stationary)則可依傳統頻率域分析方法，將時間歷時經由 FFT 後轉換為頻率域做頻譜分析，探討風速頻譜之特性。本文採用 Reverse arrangement distribution (Bendat and Piersol, 1986) 作為判別數據定常性與否之依據，其程序簡單闡述于后。

將樣本的時間歷時記錄分成 N 等分區間，每個區間歷時均視為獨立。計算出每個區間平方和值（或是個別區間的平均值，變異數）。以計算各個區間平方和值為例，將計算出來的值依向量排列，如 $\overline{x_1^2}, \overline{x_2^2}, \overline{x_3^2}, \dots, \overline{x_N^2}$ ，接著檢驗以上這一連串的樣本平方和值是否有潛在的趨勢或變異。方式如下：

從一連串觀察值 $\overline{x_1^2}, \overline{x_2^2}, \overline{x_3^2}, \dots, \overline{x_N^2}$ 定義出：

$$h_{ij} = 1 \quad \text{if} \quad \overline{x_i^2} > \overline{x_j^2}$$

$$h_{ij} = 0 \quad \text{otherwise} \quad (5)$$

以及

$$A_i = \sum_{j=i+1}^N h_{ij} \quad (6)$$

$$A = \sum_{i=1}^{N-1} A_i \quad (7)$$

若隨機數據具定常性，則 $A_{N,1-\alpha/2} < A \leq A_{N,\alpha/2}$ 。

若隨機數據為非定常性，則 $A \leq A_{N,1-\alpha/2}$ 或 $A > A_{N,\alpha/2}$ 。

其中， $A_{N,1-\alpha/2}$ 與 $A_{N,\alpha/2}$ 列於參考文獻附表， α 為統計學上的顯著水準。

根據此一判別數據定常性之方法，對實場量測數據進行判斷。在分割 N 等分區間時，需特別注意分割所造成之數據量不得過小。透過定常性檢定(reverse arrangement test)前，需先將資料長度最少區分為 10 段。本研究以每十分鐘歷時長度為一區段長度。為使分析正確，採用連續兩小時的紀錄進行定常性測試。若每小時資料與前後各一小時資料組合而分別通過定常性檢定為定常性者，則認定此一小時資料為定常性。若其中有一為非定常性，則否。在六個颱風歷時記錄資料中(134 組每小時記錄)約莫有 50~55%可以通過定常性測試。季風資料亦呈現類似的結果。所有資料經由定常性檢定後，屬於非定常性者，均透過 EMD 法過濾非定常性部分，調整再成定常性。俟所有資料均呈現定常性後，即可適用於紊流強度、紊流頻譜分析，探討實場監測地點的自然風場特性。

3-5 EMD 於非定常性數據之應用

EMD(Empirical mode decomposition)為一求取訊號各個模態之方法(Huang, 1998)。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(Intrinsic Mode Functions, IMF)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，進而過濾掉極低頻的風速變化產生的非定常性現象。Xu(2004)利用此一方法，針對實場監測所求的數據，先行進行定常性的判斷與否，接著考慮使用 EMD 來進行過濾訊號中含有非定常性的內隱模態，然後再依據傳統頻率域分析方法，進行一連串之分析比較。IMF 必須滿足下列兩條件：(i)在整組分析資料當中，其局部極值的個數與零交點(Zero Crossing)的個數必須相等或最多相差一個；(ii)由局部最大值(Local Maxima)所定義的包絡線(Envelope)與局部最小值(Local Minima)所定義的包絡線，在任何點的平均值必須為零。

EMD 法根據原始訊號的局部最大值與局部最小值，以三次曲線(Cubic Spline)構成上、下包絡線(upper & lower envelopes)。將上包絡線與下包絡線取算數平均得到 m_1 ，再由原始訊號 $f(t)$ 減去 m_1 得到第一個分量 h_1 ：

$$f(t) - m_1 = h_1 \quad (8)$$

若 h_1 滿足構成 IMF 的兩個條件，那麼 h_1 就是所求的第一個 IMF 分量，記為 c_1 。一般而言，必須經過幾次重複的篩過程(Shifting Process)，以滿足 IMF 的要求。分量 c_1 含有整個訊號最短週期的部分，也就是整個訊號最高頻的部分。將原始訊號 $f(t)$ 減去第一個 IMF 分量，得到剩餘的訊號表示為：

$$f(t) - c_1 = r_1 \tag{9}$$

剩餘訊號 r_1 仍然保有訊號中次高頻的部分，將它視為一組新的訊號，繼續重複上述的過程，如此重複的過程我們將其結果表示為：

$$r_1 - c_2 = r_2, r_2 - c_3 = r_3, \dots, r_{n-1} - c_n = r_n \tag{10}$$

由上兩式我們可以將原始訊號表示為：

$$f(t) = \sum_{i=1}^n c_i + r_n \tag{11}$$

當剩餘數據已無法再分解出另一 IMF 分量時，剩餘訊號 r_n 將成為一單調函數(Monotonic Function)或是一個趨勢性的定值。如是，原始訊號 $f(t)$ 分解成 n 個 IMF 分量與一個剩餘訊號 r_n 。數據處理可以藉由拿掉高頻的部分將雜訊影響訊號的部分濾除，或是如本文所做的藉由去除剩餘訊號 r_n 而使訊號回復定常特性，此即為經驗模態分析法。

如圖 4 所示為碧利斯颱風侵台時，於實場監測記錄所得的單筆一小時風速歷時。由歷時趨勢可看出該時段內成現出極度非線性現象。依上述定常性測試後確認為非定常性，並透過 EMD 法過濾調整可得圖 5。經由 EMD 可得出兩組訊號：(1)通過定常性測試的新歷時訊號；以及(2)代表該時段內造成非定常性的剩餘訊號。我們可由剩餘訊號瞭解颱風平均風速變化趨勢。並以新歷時訊號代替原來訊號進行頻譜分析。

本文所採用的數據分析流程如圖 6 所示，所有數據均以 EMD 法（或不需經 EMD 法）使其通過定常性檢定後方得進行頻譜分析。以去除剩餘訊號後進行檢定的方式，發現本研究數據均可通過定常性檢定。

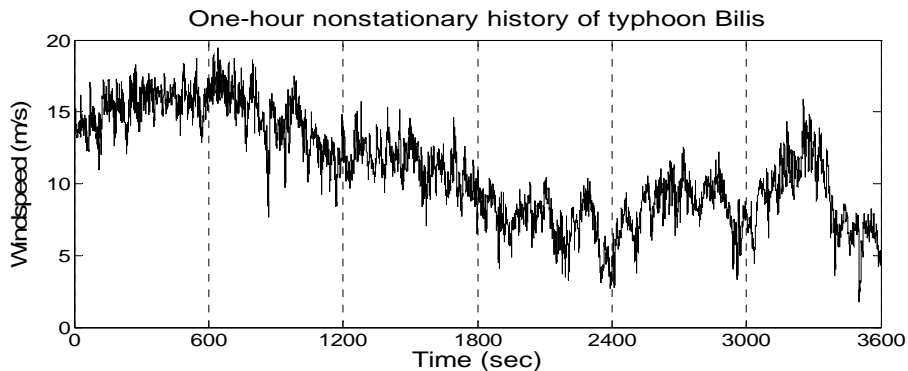


圖 4 碧利斯颱風單筆一小時風速歷時圖

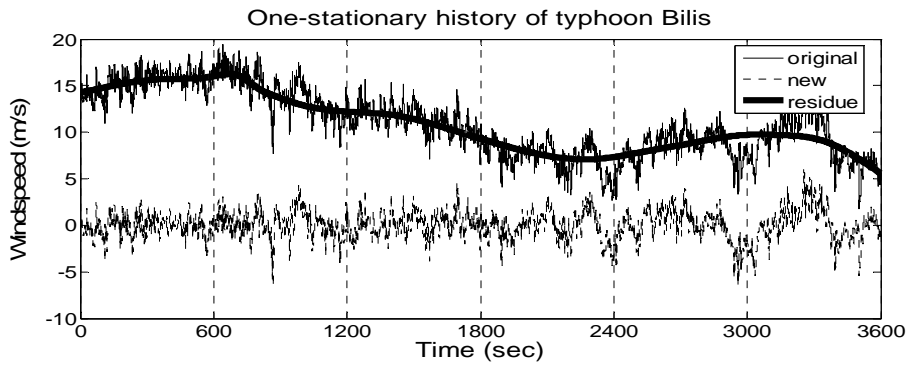


圖 5 圖 4 中歷時曲線經 EMD 過濾調整後之歷時圖

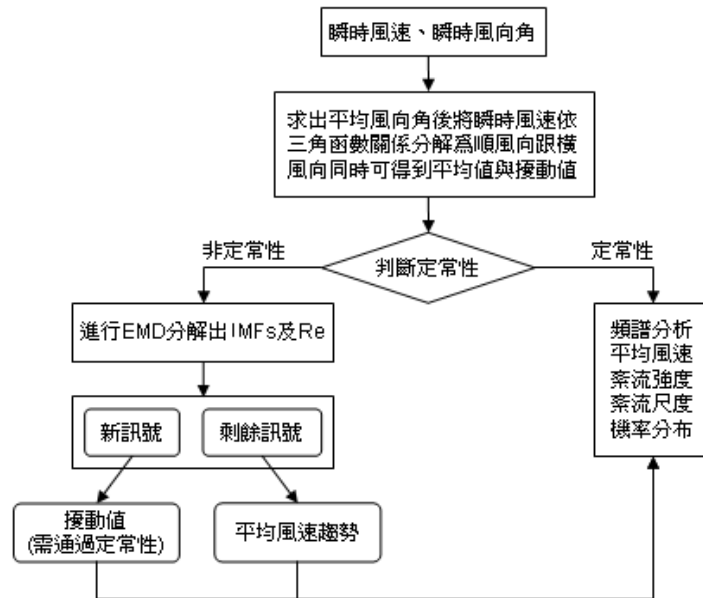


圖 6 數據分析流程

四、實場監測數據分析結果

4-1 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，本文採用風向角在相同 45 度角象限內的資料作為同一組分析比較。如圖 7 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。實場監測資料的結果指出根據規範判斷為介於 B 地況與 C 地況的現地具有較預期為高的指數值。

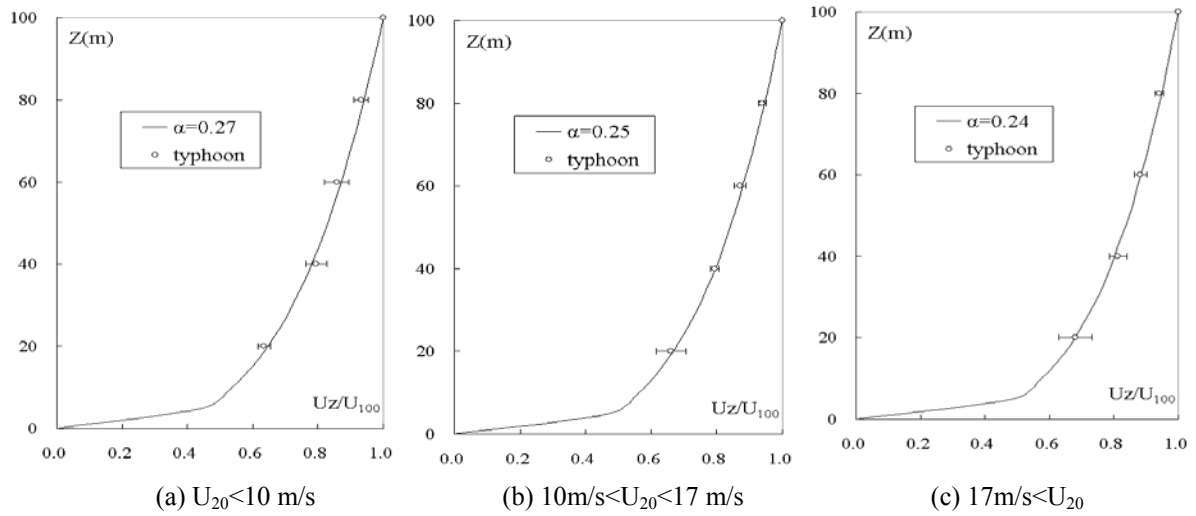


圖 7 不同強度風速平均風速剖面圖

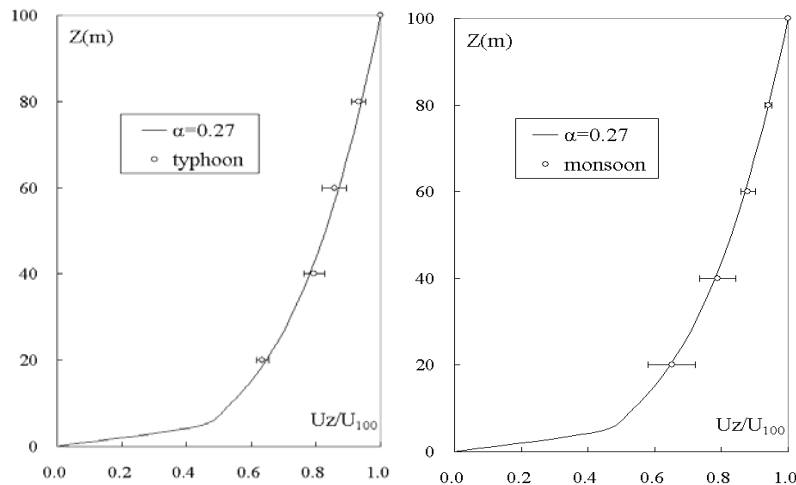


圖 8 颱風與季風的平均風速剖面($U_{20} < 10 \text{ m/s}$)

圖 8 所示為颱風與季風的平均風速剖面。由於季風資料均屬於低風速範圍的紀錄，風向角為東北向，與颱風記錄低風速範圍部分比較起來具有相似的结果，其指數值擬合亦為 0.27。初步分析季風資料與低強度風速颱風資料的结果沒有太大的差異。

4-2 紊流特性探討

圖 9、10 與表 2 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(圖 9)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。另由圖 10 顯示，颱風所造成的紊流強

度略大於季風，紊流強度的變異性亦較季風高。此外，圖 9 與圖 10 顯示實場量測的紊流強度與我國風力規範的地況 C (平坦開闊地形, $\alpha=0.15$) 或日本規範的地況 III (郊區, $\alpha=0.20$) 相當接近。

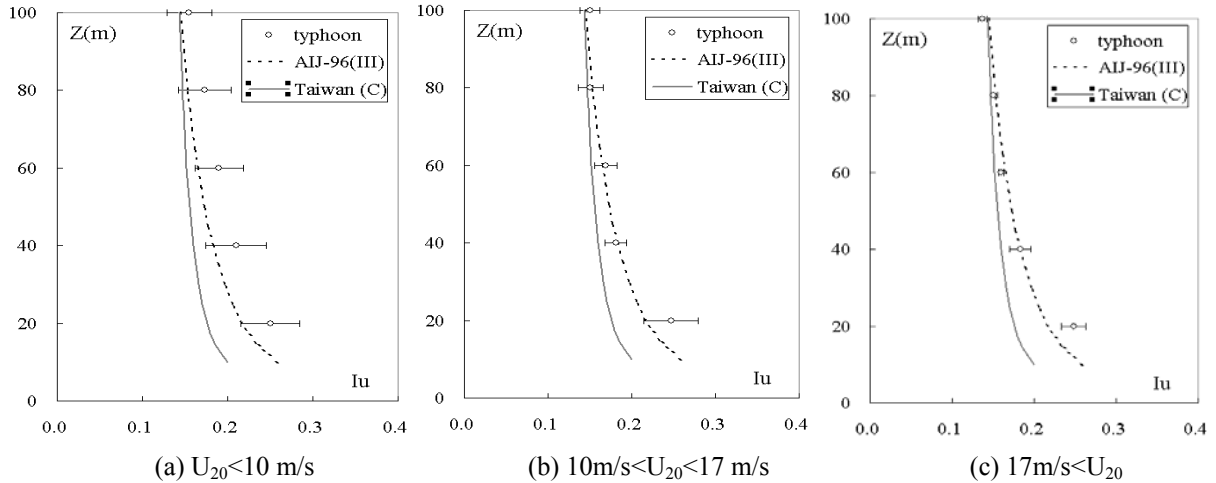


圖 9 不同風速強度下的紊流強度剖面

(○ : Typhoon ; — : 我國風力規範 (地況 C) ; --- : AIJ-96(地況 III))

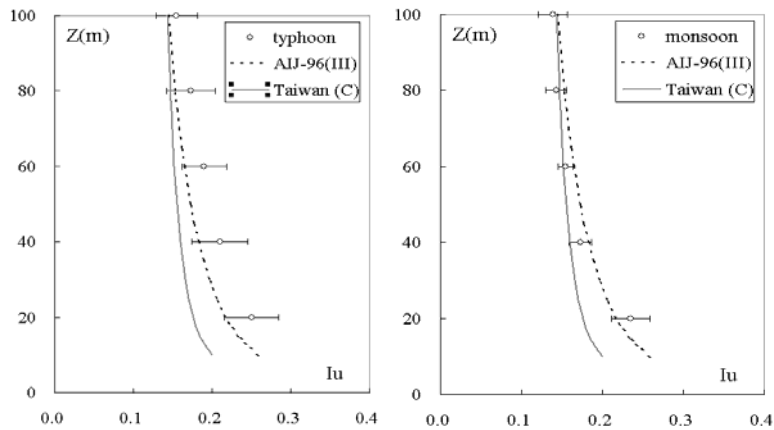


圖 10 颱風與季風的紊流強度剖面($U_{20} < 10$ m/s)

(○ : Typhoon ; — : 我國風力規範 (地況 C) ; --- : AIJ-96(地況 III))

表 2 不同高程之順風向紊流強度 (ENE wind ($30^\circ \sim 60^\circ$))

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

() : 變異係數

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相當吻合。其中 Karman 順風向擾動風速頻譜公式可以列出如下：

$$\frac{fS_u(f)}{\sigma_u^2} = \frac{4 \frac{L_u}{\bar{U}} f}{\left[1 + c_u \left(\frac{L_u}{\bar{U}} f\right)^2\right]^{\frac{5}{6}}} \quad (12)$$

其中 f 為頻率， σ_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 是待擬合之常數。假設在強風作用下紊流具有等向性，則橫風向與垂直向的紊流風速頻譜可表為下式 (Shiau, 2000)：

$$\frac{fS_{v,w}(f)}{\sigma_{v,w}^2} = \frac{4 \frac{L_{v,w}}{\bar{U}} f \left[1 + c_{v1,w1} \left(\frac{L_{v,w}}{\bar{U}} f\right)^2\right]}{\left[1 + c_{v2,w2} \left(\frac{L_{v,w}}{\bar{U}} f\right)^2\right]^{\frac{11}{6}}} \quad (13)$$

其中 $L_{v,w}$ 為橫風向或垂直向的積分尺度長度， $c_{v1,w1}$ 和 $c_{v2,w2}$ 為待擬合的常數。

圖 11 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。

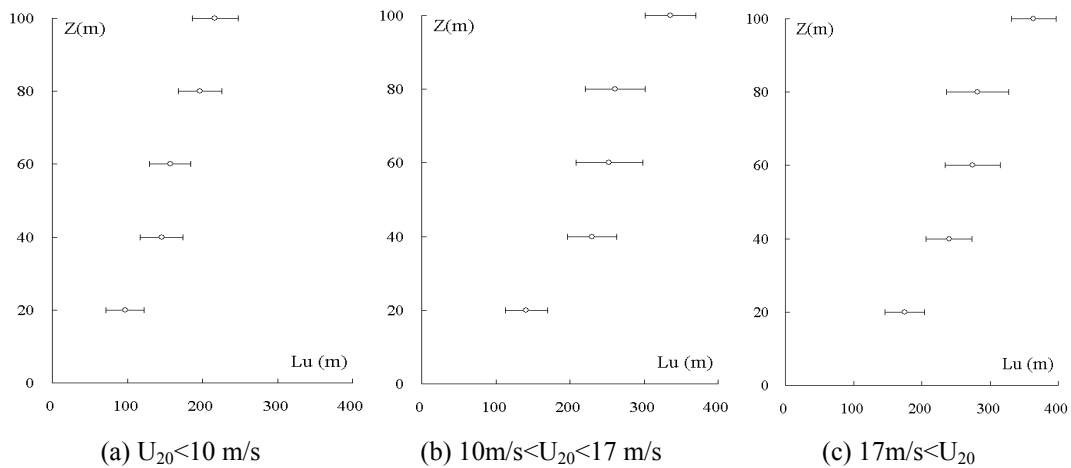


圖 11 不同風速強度下的順風向積分尺度長度 L_u

表 3 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。表中亦列出公式中擬合常數之期望值與變異係數：其中順風向部分， c_u 顯示隨著平均風速增加有遞減的趨勢，而且擬合擾動程度不小；

橫風向與垂直向則均較為穩定，不隨著風速改變而變動。圖 12 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。

表 3 100 公尺高程處紊流參數比較表, ENE wind (30°~60°)

	L_u	L_v	L_w	c_u	c_{v1}	c_{v2}	c_{w1}	c_{w2}	C_z
$U_{20}>17$	364(0.18)	185(0.30)	47(0.30)	56(0.28)	1101	279	1060	279	10.6
颱風 $10<U_{20}<17$	336(0.14)	175(0.31)	44(0.20)	57(0.24)	1101	279	1067	279	9.8
$U_{20}<10$	217(0.28)	173(0.30)	41(0.24)	73(0.17)	933	279	1056	280	10.0
季風 $U_{20}<10$	165(0.24)	93(0.31)	27(0.18)	67(0.13)	1086	279	952	281	10.9

() : 變異係數 (風速單位: m/s, 積分尺度長度單位: m)

由於風力規範中的紊流特性應以建築物的設計風速為基礎, 因此本文擷取實場 100 公尺高程處的三維風速計量測而得的 30 組較大風速資料 (介於 16~27m/s) 進行數據分析, 所得各項紊流頻譜參數列於表 4, 代表實場監測位址之自然風場特性, 可作為未來風力規範修訂之參考。

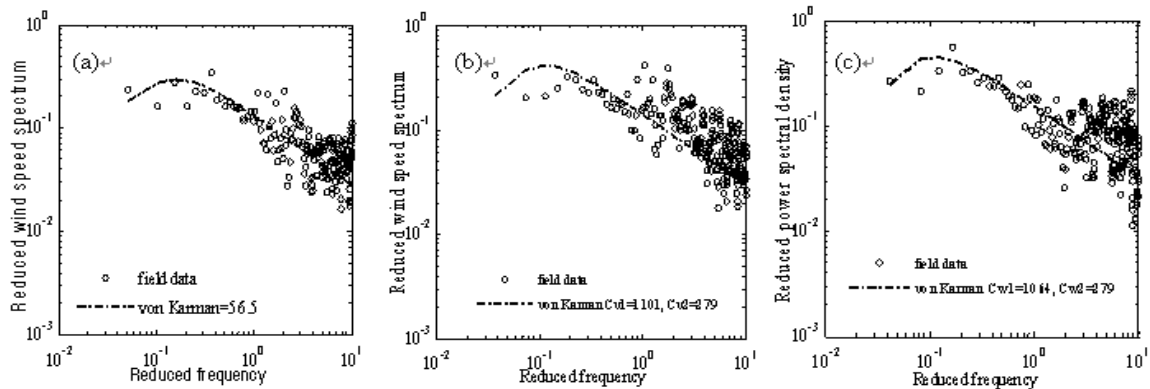


圖 12 紊流頻譜: (a)順風向; (b)橫風向; (c)垂直向

表 4 颱風期間高風速紊流參數建議值

高度(m)	U_z	L_u	L_v	L_w	c_u	c_{v1}	c_{v2}	c_{w1}	c_{w2}	C_z
100	16-27	350(0.15)	180(0.30)	46(0.26)	56.5(0.25)	1101	279	1064	279	10.2

() : 變異係數 (風速單位: m/s, 積分尺度長度單位: m, 30 組一小時記錄)

五、結論

本文根據國內外文獻建議台灣地區地況分類標準, 以地況相近之鄰國日本規範為基礎, 輔以其他國內外文獻, 根據台灣的都會、鄉鎮、田野地形特性, 提出一套符合我國本土特性的地況分類標

準。另外實場監測數據分析結果可觀察以下幾點現象：

- (1) 根據都市現況以及風洞試驗結果，提出地況 A（大城市中心區）平均風速剖面指數由現有的 $\alpha=0.32$ ，修正為 $\alpha=0.30$ 之修訂建議。
- (2) 參考各國風力規範以及相關文獻，並參酌我國實際都市、鄉鎮面貌，提出風力規範中有關標準地況定義之修正建議。
- (3) 本文詳述實場風速數據的完整分析流程，包括定常性分析以及去除實場數據中常見的非定常性風速變異。
- (4) 由實場監測數據可知：平均風速強度對風速剖面指數值有些許的影響，較高的風速導致較低的指數律指數值；紊流強度隨著風速增加而遞減，而順風向積分尺度長度則隨著風速增加而遞增。
- (5) 颱風與東北季風並無明顯的風速梯度上的差異，然而由實場數據分析結果可知：颱風時的紊流強度與積分尺度長度均較季風為高。
- (6) 研究結果顯示：Karman 風速頻譜公式與實場分析結果吻合度甚佳，本文並提出在強風作用下的各項紊流參數建議值，可做為未來風力規範修訂的參考。

誌謝

本研究承內政部建築研究所研究計畫 09530107000G1026 以及國科會研究計畫 NSC-93-2745-E-032-006-URD 補助部份研究經費，得以順利完成，特此誌謝。

參考文獻

- 營建雜誌社(2006)《建築物耐風設計規範及解說》。
- Architeturral Institute of Japan(1996) AIJ Recommendation for Loads on Buildings, English translation, AIJ.
- American Society of Civil Engineers(2002)Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, ASCE 7-02, A.S.C.E., New York.
- Standard Australia(2002) AS/NZS 1170.2 Supplement 1:2002 Structural design actions-wind actions-Commentary, Standard Australia/Standard New Zealand.
- Bendat, J.S., Piersol, A.G. (1986) Random data : analysis and measurement, Wiley-Interscience.
- Huang N.E., Shen Z., Long S.R., Wu M.C., Shih H.H., Zheng Q., Yen Y.C., Tung C.C., and Liu H.H.(1998)The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis, *Proceedings of Royal Society*, A454:903-995, London.
- International Standard Organization (1984) ISO6897-1984Guidelines for the evaluation of the response of occupants of fixed structures, especially buildings and offshore structures, to low-frequency horizontal

motion(0.063 to 1 Hz).

- Jang, J. J. and Lee, C. H.(1999) 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.
- Kijewski, T., Kwon, D.K. and Kareem, A.(2003) E-Technologies for Wind Effects on Structures, *Proceedings of the Eleventh International Conference on Wind Engineering*, Lubbock, USA.
- Kwok, K.C.S.(2004) Wind effects on tall buildings in typhoon prone urban environment, *Wind effects on Buildings and Urban Environment*, Proceedings of ISWE1: 131-141, Tokyo, Japan.
- Kato, N., Ohkuma, T., Kim, J.R., Marukawa, H., and Niihori, Y.(1992) Full scale measurements of wind velocity in two urban areas using an ultrasonic anemometer, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 41-44: 67-78.
- National Research Council of Canada(1990) Supplement to the National Building Code of Canada 1990.
- Shiau, B.S.(2000) Velocity Spectra and Turbulence Statistics at the Northeastern Coast of Taiwan under High-wind condition, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 88:139-151.
- Simiu, E., Scanlan, R.H.(1996) Wind effects on structures, Wiley-Interscience.
- Amano, T., Fukushima, H., Ohkuma, T., Kawaguchi, A., Goto S.(1999) The observation of typhoon winds in Okinawa by Doppler sodar, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 83: 11-20.
- Miyata, T., Yamada, H., Katsuchi, H., Kitagawa M.(2002) Full-scale measurement of Akashi-Kaikyo Bridge during typhoon, *Journal of Wind Engineering and Aerodynamics* 90: 1517-1527.
- Xu, Y.L., Chen, J.(2004) Turbulent wind characteristics in urban environment, *Wind effects on Buildings and Urban Environment*, *Proceedings of ISWE1*: 197-210, Tokyo, Japan.