

高層建築耐風設計風力頻譜與風載重 之修訂研究

內政部建築研究所委託研究報告

中華民國 96 年 12 月

(國科會 GRB 編號)

PG9602-0203

(本部計畫編號)

096301070000G1019

高層建築耐風設計風力頻譜與風載重 之修訂研究

受委託者：社團法人中華民國風工程學會

研究主持人：鄭啟明

協同主持人：吳重成

研究助理：楊承翰

內政部建築研究所委託研究報告

中華民國 96 年 12 月

目次

| | |
|------------------------|-----|
| 目次..... | I |
| 表次..... | III |
| 圖次..... | V |
| 摘要..... | VII |
| 第一章 緒論..... | 01 |
| 第一節 研究緣起與背景..... | 01 |
| 第二節 研究內容與方法..... | 03 |
| 第三節 報告內容簡述..... | 07 |
| 第二章 文獻回顧..... | 09 |
| 第一節 相關規範..... | 09 |
| 第二節 高層建築風洞實驗..... | 20 |
| 第三節 順風向設計風力..... | 21 |
| 第三章 等值設計風載重計算模式..... | 33 |
| 第一節 順風向設計風力..... | 33 |
| 第二節 橫風向及扭轉向設計風力..... | 43 |
| 第四章 最高居室樓層側向加速度..... | 49 |
| 第一節 相關文獻..... | 50 |
| 第二節 簡易修正公式..... | 53 |
| 第三節 日本建築學會之居住性能評估..... | 55 |
| 第五章 高層建築設計風力之風洞試驗..... | 59 |
| 第一節 逼近流場..... | 60 |
| 第二節 風壓模型..... | 61 |
| 第三節 實驗設備及訊號處理..... | 64 |

| | |
|--------------------------------|-----|
| 第四節 實驗結果..... | 69 |
| 第六章 應用案例..... | 81 |
| 第一節 風洞實驗相關數據..... | 81 |
| 第二節 不同分析方式之設計風載重比較..... | 87 |
| 第三節 最高樓層側向振動尖峰加速度..... | 98 |
| 第七章 風力規範中風力計算式條文之初擬..... | 101 |
| 第一節 設計風力計算式條文之初擬..... | 101 |
| 第二節 建築物最高居室樓層側向加速度計算條文之初擬..... | 105 |
| 第八章 結論與建議..... | 107 |
| 第一節 結論..... | 107 |
| 第二節 建議..... | 109 |
| 附錄一 期中會議紀錄暨回覆..... | 113 |
| 附錄二 期末會議紀錄暨回覆..... | 123 |
| 附錄三 專家座談會議紀錄暨回覆..... | 135 |
| 參考書目..... | 139 |

表次

| | | |
|-------|-------------------------------------|----|
| 表 5-1 | 高寬比 3 及 6 地況 A 不同深寬比模型之風力係數. | 70 |
| 表 5-2 | 高寬比 3 及 6 地況 B 不同深寬比模型之風力係數. | 70 |
| 表 5-3 | 高寬比 3 及 6 地況 C 不同深寬比模型之風力係數. | 70 |
| 表 6-1 | 高寬比 3、6 模型在不同邊界層順風向平均風力 係數..... | 82 |
| 表 6-2 | 高寬比 3、6 模型在不同邊界層之順風向相關函數 係數..... | 83 |
| 表 6-3 | 二種案例(高寬比 3、6)之相關參數..... | 87 |
| 表 6-4 | 高寬比 3、6 案例在不同邊界層之最高樓層尖峰加 速度..... | 98 |

圖次

| | | |
|--------|--|----|
| 圖 1-1 | 研究步驟..... | 6 |
| 圖 3-1 | 紊流場作用下之 30 層大樓順風向風載重..... | 34 |
| 圖 3-2 | 平均拖曳力係數 CD 與擾動拖曳力係數 CD' 在高度上之分佈..... | 35 |
| 圖 4-1 | 風所造成水平振動之性能評估曲線..... | 55 |
| 圖 5-1 | 逼近流場平均風速與紊流強度剖面..... | 60 |
| 圖 5-2 | 風壓模型幾何尺寸、風壓孔佈設位置及實驗配置..... | 62 |
| 圖 5-3 | 淡江大學一號邊界層風洞實驗室..... | 64 |
| 圖 5-4 | IFA-300 智慧型風速儀、探針及校正儀..... | 65 |
| 圖 5-5 | 壓力量測系統..... | 66 |
| 圖 5-6 | 壓力訊號處理系統(RADBASE3200)..... | 67 |
| 圖 5-7 | 64 頻道壓力感應器模組..... | 67 |
| 圖 5-8 | 地況 A 不同模型之風力係數..... | 71 |
| 圖 5-9 | 地況 B 不同模型之風力係數..... | 71 |
| 圖 5-10 | 地況 C 不同模型之風力係數..... | 72 |
| 圖 5-11 | 高寬比 3 地況 A 不同深寬比模型之風力頻譜..... | 75 |
| 圖 5-12 | 高寬比 6 地況 A 不同深寬比模型之風力頻譜..... | 75 |
| 圖 5-13 | 高寬比 3 地況 B 不同深寬比模型之風力頻譜..... | 76 |
| 圖 5-14 | 高寬比 6 地況 B 不同深寬比模型之風力頻譜..... | 76 |
| 圖 5-15 | 高寬比 3 地況 C 不同深寬比模型之風力頻譜..... | 77 |
| 圖 5-16 | 高寬比 6 地況 C 不同深寬比模型之風力頻譜..... | 77 |
| 圖 5-17 | 不同風洞試驗模型之風力係數誤差值..... | 80 |
| 圖 6-1 | 相關性函數(高寬比 3、地況 A)..... | 84 |

| | | |
|--------|--------------------------------------|----|
| 圖 6-2 | 相關性函數 (高寬比 6、地況 A) | 84 |
| 圖 6-3 | 相關性函數 (高寬比 3、地況 B) | 85 |
| 圖 6-4 | 相關性函數 (高寬比 6、地況 B) | 85 |
| 圖 6-5 | 相關性函數 (高寬比 3、地況 C) | 86 |
| 圖 6-6 | 相關性函數 (高寬比 6、地況 C) | 86 |
| 圖 6-7 | 地況 A 高寬比 3 案例之順風向設計風載重 | 89 |
| 圖 6-8 | 地況 A 高寬比 6 案例之順風向設計風載重 | 89 |
| 圖 6-9 | 地況 B 高寬比 3 案例之順風向設計風載重 | 90 |
| 圖 6-10 | 地況 B 高寬比 6 案例之順風向設計風載重 | 90 |
| 圖 6-11 | 地況 C 高寬比 3 案例之順風向設計風載重 | 91 |
| 圖 6-12 | 地況 C 高寬比 6 案例之順風向設計風載重 | 91 |
| 圖 6-13 | 高寬比 3 案例之橫風向設計風載重 (a、b、c 代表地況 A、B、C) | 95 |
| 圖 6-14 | 高寬比 6 案例之橫風向設計風載重 (a、b、c 代表地況 A、B、C) | 95 |
| 圖 6-15 | 高寬比 3 案例之扭轉向設計風載重 (a、b、c 代表地況 A、B、C) | 97 |
| 圖 6-16 | 高寬比 6 案例之扭轉向設計風載重 (a、b、c 代表地況 A、B、C) | 97 |
| 圖 6-17 | 高寬比 3 案例之最高樓層尖峰加速度 | 99 |
| 圖 6-18 | 高寬比 6 案例之最高樓層尖峰加速度 | 99 |

摘要

關鍵詞:高層建築，設計風力，風力規範，風洞試驗，風力頻譜

一、研究緣起

高層建築所承受的風載重，可分為順風向、橫風向及扭轉向三組同時作用的風力。順風向風力是由風速壓與逼近流的紊流特性所決定，其學理較為明確，各國規範有相近的規定。橫風向及扭轉向風力形成之因素，則源自於渦散分離及紊流尾跡等現象，產生橫向不平衡風壓及不對稱風壓所造成，因為其學理較為複雜，各國風力規範尚無一致之規定。我國現行之風力規範「建築物耐風設計規範及解說」係參考美國規範 ASCE 7-02 與日本規範 AIJ-96 所訂定，然而這些風工程先進國家之風力規範均隨風工程科技發展而持續研擬修訂中，我國亦當如此。

二、研究方法及過程

本計畫根據風工程界近年來之研究成果，針對高層建築順風向設計風力之計算模式提出修正方案，使其能更正確的反應柔性建築結構的動力特性；對於高層建築橫風向與扭轉向之設計風力頻譜，則採用先進的量測方法，選取具代表性之建築外型及國內現行風力規範之標三種準地況，透過縮尺模型表面風壓風洞實驗建立本土之風力風壓數據資料庫，做為未來國內規範修正之依據。此外，亦針對最高居室樓層側向振動尖峰加速度提出一簡易修正式，以補強現行規範不足之處。本文高層建築表面風壓之風洞試驗，選取模型斷面深寬比 1/1、1/2、1/3、2/1、3/1 且高寬比為 3 及 6 之五種矩形柱體為標的，以現行規範定義之地況 A、B、C 為逼近流場，進行建築物表面風壓之物理模擬風洞試驗。

三、重要發現

計畫案以兩棟方形斷面（長 30m×寬 30m×高 90m 及長 30m×寬 30m×高 180m）之建築物為例，分別以本文推導公式、風洞試驗分析及國內現行規範，計算在地況 A、B、C 流場作用之設計風載重及最高居室樓層側向尖峰加速度。分析結果顯示，本文計算式能有效反應風洞試驗之分析結果，國內現行風力規範與風洞試驗二者間之設計風載重則有較大之差別。振動加速度方面，本文推導式則明顯低於現行規範之計算值。

本計劃之主要研究成果有下列二項，其一為風洞實驗所量測之相關試驗數據，可建立包含本土特性之建築物風力風壓資料庫；其二為本文建構之設計風力及振動加速度計算式，可做為未來修正國內風力規範相關條文之參考。

四、主要建議事項

由於進行風力規範條文研擬過程中，有關風洞試驗資料之取得、實驗數據迴歸經驗式之歸納整理、以及複雜公式之整合簡化，這些工作相當繁複龐雜，遠超過本計劃所能負荷之外。這些研究項目之發展需要後續多年之努力方得以完成，本文僅在此提出初步之計算修正式，並可做為爾後研究之基本雛形。至於最高居室樓層容許之尖峰側向加速度值，若要進行本國國民相關舒適度測試，以建立適合於台灣人民之容許尖峰側向加速度上限，是需要投入大量人力物力，在多年期之計劃支持下方能合理評估。

根據目前這些研究現況以及審查委員之寶貴意見，對於風力規範後續之相關研究與改進，本文提出下列建議：

建議一

增加風洞試驗之典型建築物形式：立即可行建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：行政院其他相關部會

本研究所執行之風洞試驗限於經費及時間之故，並未完全涵蓋目前風力

規範規定之建築物幾何外型。建議增加風洞試驗之典型建築物形式，包括增加高寬比 4、5 之模型，以及深寬比 1/5、1/4、4/1、5/1 之模型，使能完整包含目前規範適用之範圍。

建議二

風洞實驗數據之歸納整理：立即可行建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：行政院其他相關部會

風洞試驗結果須經過詳細之檢核與整理，方能成為規範條文之一部分。惟該工作需研究人員長期持續的投入，方有一定之成果。建議持續進行風洞實驗數據之歸納整理，尋找出各相關參數簡易且準確之經驗式。

建議三

風力計算修正式之整合：立即可行建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：行政院其他相關部會

本研究初擬之風力計算修正式，著重於提高分析之準確度，因而存在著較為繁複之形式。對於工程實務而言，該種複雜形式之風力計算式尚不足以成為規範之可用條文。建議持續針對風力計算之修正式進行整合，降低其型態之複雜性以得一實用化之形式。

建議四

訂定振動加速度舒適性標準：立即可行建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：行政院其他相關部會

國內目前並無足夠之本土化人體振動加速度舒適性資料，現行風力規範

中有關數據是整理國外相關文獻而產生。建議執行振動加速度舒適性標準之人體實驗與探討，建構本土化之數據庫，進而提出相關規範之修正條文。

建議五

建立本土化之風力規範：中長期建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：行政院其他相關部會

風力規範之內容需要與時俱進，在確保結構安全之前提下，以更加經濟準確之方式設計結構抗風系統及其他受風影響之構造物。建議透過後續逐年之計畫支持，能使國內風力規範擺脫參考國外規範造成之限制，建立符合台灣人文自然環境特性之本土化風力規範，並達國際上風工程先進國家之水準。

ABSTRACT

Key Words: Tall Building, Design Wind Load, Building Wind Code, Wind Tunnel Test, Wind Force Spectra

1. Background

The wind loading acting on a tall building can be divided into three components: alongwind, acrosswind and torsional wind loads. Building's alongwind load is induced by the mean wind speed pressure and the turbulence characteristics of the incident flow. It is commonly acknowledged that analytical model based on quasi-steady theorem and strip theory can adequately predict the alongwind loading; as hence it was adopted by many building wind codes. The acrosswind and torsional wind loads are mainly induced by the wake flow. The mechanisms are complex and can not be adequately modeled by analytical or semi-empirical models; consequently the wind loads provisions are diversified among various wind codes. Taiwan's building wind code was constructed heavily referencing to ASCE7-02 and AIJ-96. It should be noted that the building wind codes in US and Japan are under continuously reviewing and revising. Taiwan building wind code should also keep pace with the progress of wind engineering.

2. Methodology

In the current building wind code, the Gust Response Factor used in the alongwind design wind load is fixed value calculated based on the building natural frequency and turbulence characteristics. However, for a flexible tall building, the dynamic resonant part of the response plays a significant role in the design wind load. The spatial distribution of the resonant part loading is different from the mean wind load and background part wind load. As for the acrosswind

and torsional wind loads, the AIJ design wind load spectra are adopted without any modification. Therefore, this research investigates the appropriateness of the currently alongwind design wind load practice for a flexible tall building, and construct an alternative and better precision procedure. This project also carried out a series of wind tunnel testing to measure the tall buildings' wind loads in turbulent boundary layers designated by building wind code. State of art instrumentation and data reduction procedure were used, which produces more detail and better accuracy wind loads than the AIJ data. These wind tunnel data are not only vital to the developing new design wind load procedure in this project, they are also important in the sense of establish Taiwan own wind load database for future wind code revision. The current building wind code exits some deficit in the procedure for lateral acceleration; this project proposed an alternative procedure for lateral acceleration.

3. Results

In the 11 months time table, this project carried out systematic analytical and experimental investigation on wind load provisions in building wind code. Several research goals were accomplished, there are:

- (1) Assessment of the dynamic characteristics of a flexible tall building on its design wind load.
- (2) Proposed a new alongwind design wind load procedure.
- (3) Acquiring significant wind tunnel testing data on the acrosswind and torsional wind load spectra.
- (4) Revision of the current procedure for the building lateral acceleration.
- (5) Based on the aforementioned studies, recommendations are proposed for future building wind code revisions.

4. Recommendations for future works

Following issues needs to be further investigated to improve the current building

wind code, there are:

- (1) Increasing the wind tunnel data on building wind loads to cover the necessary range of building wind resistant design;
- (2) Deriving the empirical models for the wind tunnel data;
- (3) Simplification of the proposing wind load models;
- (4) Collecting local data on human perception on motion in order to revise the motion comfort criteria.

第一章 緒論

第一節 研究緣起與背景

台灣位處強風盛行地區，因此建築物在進行結構分析之風力部分占有相當重要之地位。對於大跨度屋頂結構以及高層建築而言，風力甚至會超過地震力，而成為結構設計時的主要環境活載重。耐風設計規範中，對設計風力有重要影響的參數有三類：(1)設計風速及風場特性、(2)風壓或風力係數、及(3)陣風反應因子。內政部於民國 95 年 9 月 22 日頒布、96 年 1 月 1 日正式實施之「建築物耐風設計規範及解說」(參考書目 21)中，對於作用在建築物之風壓/風力係數及分布，係參照外國規範制定。為使未來國內規範之制定具自主性，並反應國內特有建築型態與環境，應建立及補充相關資料庫俾使規範更為完善。

高層建築風載重，可分為順風向、橫風向及扭轉向三組風力。順風向風力是由風速壓與逼近流的紊流特性所決定，其學理較為明確，各國規範相關條文亦有相近的規定。橫風向及扭轉向風力，則源自渦散分離及紊流尾跡等現象，產生橫向不平衡及不對稱風壓所造成，其學理相對而言較為複雜，目前各國風力規範尚無一致之規定。我國之風力規範係參考 ASCE 7-02 與 AIJ-96 所訂定，然而，美國、日本風力規範均隨風工程科技發展而持續研擬修訂中，我國亦當如此。

對於柔性的高層建築而言，結構動力特性的共振效應對於設計風載重影響很大，然而內政部 96 年實施之「建築物耐風設計規範及解說」在計算設計順風向風力的高度分配時，對於柔性結構的動力特性的考量仍有不足之處。我國規範的橫風向與扭轉向風力則是引用日本

AIJ (1996)的相關規定研擬而成。橫風向與扭轉向之設計風力頻譜，也應採用先進的量測方法，經由具代表性建築模型及標準地況之風洞實驗，建立自有的資料庫，做為未來規範修正之依據。此外，現行規範中振動舒適性評估的計算式，仍有若干不足之處，亦應補強。

第二節 研究內容與方法

本計畫針對順風向設計風力之計算模式提出修正方案，使其更正確的反應柔性建築結構的動力特性；橫風向與扭轉向之設計風力頻譜，採用先進的量測方法，經由具代表性建築模型及標準地況之風洞實驗，建立自有的資料庫，做為未來規範修正之依據。此外，現行規範中振動舒適性評估的計算式，仍有若干缺失之處，亦應補強。

一、高層建築的順風向設計風力

國內規範對於高層建築的順風向設計風力，採用等值靜態風載重 (equivalent static wind load, ESWL) 來表示。根據風工程近來之研究成果，對於順風向設計風載重之分析提出兩方面之修正：

1. 選擇以彎矩為基礎之陣風載重因子 (moment-based gust loading factor, MGLF) 取代傳統之位移陣風載重因子 (displacement based gust loading factor, DGLF) (參考書目 10)。

2. 等值靜態風載重之共振部份，在高度上之分佈方式類似於慣性力之分佈。

修正陣風載重因子之定義以及改變風載重共振部份在空間上之分配方式，可說是等值靜態風載重分析法之流程中，有關結構動力分析程序上之一大進步，而這也是影響風載重精確度的重要因素。

另外，目前常見之順風向設計風載重分析模式，主要根據是以準穩定及條狀理論 (quasi-steady and strip theories) 同時做為迎風面與背風面動態風載重之計算依據。然而風洞試驗結果顯示，因為背風面風壓之成因來自於尾跡 (wake flow) 的影響，有別於迎風面所受逼近流的影響，準穩定定理及條狀理論無法使用於背風面的風力。

因此，本計畫針對風載重之特性進行風洞實驗分析，分別對於迎風面與背風面之風載重個別提出適合的計算模式，以組合出較佳之順

風向等值靜態風載重。如此求得的順風向設計風力，應當能夠充份的反應高層建築實際承受的風力，以及柔性結構所特有的共振效應。

二、高層建築之橫風向、扭轉向設計風力

美國的風力規範 ASCE7-02(參考書目 1) 中的高層建築設計風力是以順風向設計風力為主，日本與澳洲風力規範則包含了渦散分離現象所引發的橫風向及扭轉向設計風力(參考書目 2、3)。我國的「建築物耐風設計規範及解說」，是引用日本 AIJ (1996)對於橫風向與扭轉向風力之規定，研擬而成。日本與澳洲風力規範所使用的風力頻譜都是由高頻力平衡儀(high frequency force balance)實驗量測所得。近十年來，電子式風壓掃瞄系統已逐漸成為風洞實驗室的標準配備，經由同步風壓量測可得到更完整的風力資料。本計畫選擇具有代表性之建築幾何形狀製作風壓模型，並在符合風力規範所定義的標準地況之紊流邊界層流場中，進行風壓模型風洞實驗。風洞實驗所得的風壓資料除了可以做為建構設計風力計算模式的依據之外，並且可以建立自有的風力頻譜資料庫，做為未來國內風力規範修正之依據。

三、評估居住者舒適性的水平向振動計算式

內政部「建築物耐風設計規範及解說」中，側向加速度計算是以設計風力所對應的側向位移為基礎，調整為對應半年迴歸期的風速，計算而得。由於評估居住舒適度是以半年迴歸期的風速為基準，與設計風力所依據的 50 年迴歸期風速有明顯的差異，直接調整設計風速所得的結果可能會有相當的誤差。本計畫針對順風向、橫風向與扭轉向所造成的側向加速度，提出無需輸入風力進行結構分析以求取位移反應的簡易計算式。

由上，本計劃之研究方法及過程包括下列數項（圖 1-1）：

1. 國內外風力規範有關高層建築設計風力之彙整，與相關風洞試驗資料之蒐集；
2. 發展高層建築等值設計風載重之計算模式；
3. 高層建築等值設計風載重之風洞試驗；
4. 評估高層建築最高居室樓層側向加速度之計算式；
5. 應用案例

本計畫的研究內容是建築耐風設計規範中的重要項目，過去我國由於缺少此類的風力規範應用研究，致使在制訂規範時只能參考先進國家的規範條文。即便國情不同致使規範的重點項目有異：如美國的風力規範係以低層建築為主，而我國則以高層及大跨建築為耐風設計重點；日本與我國的標準地況定義不盡相同；現行風力規範中的風力計算式與風力頻譜均完全採用美日相關規定而無法做適切的修正。完全依賴國外規範的另一項重要缺點是，我國風力規範的內容落後先進國家 3~5 年以上，無法及時反應風工程科技的發展現況。內政部建築研究所自 95 年度開始推動風工程科技專案，最重要的成果是藉由類似本案的風力規範研究，建立起我國社會中對於耐風設計具有特殊敏感性建築結構的風力計算模式，建構基本幾何造型建築物在標準地況中的風壓與風力資料庫。如是，未來修訂建築風力規範時，才能夠適度的參酌國外規範，考量本土建築與風場特性，訂定合理準確的建築耐風設計規範。

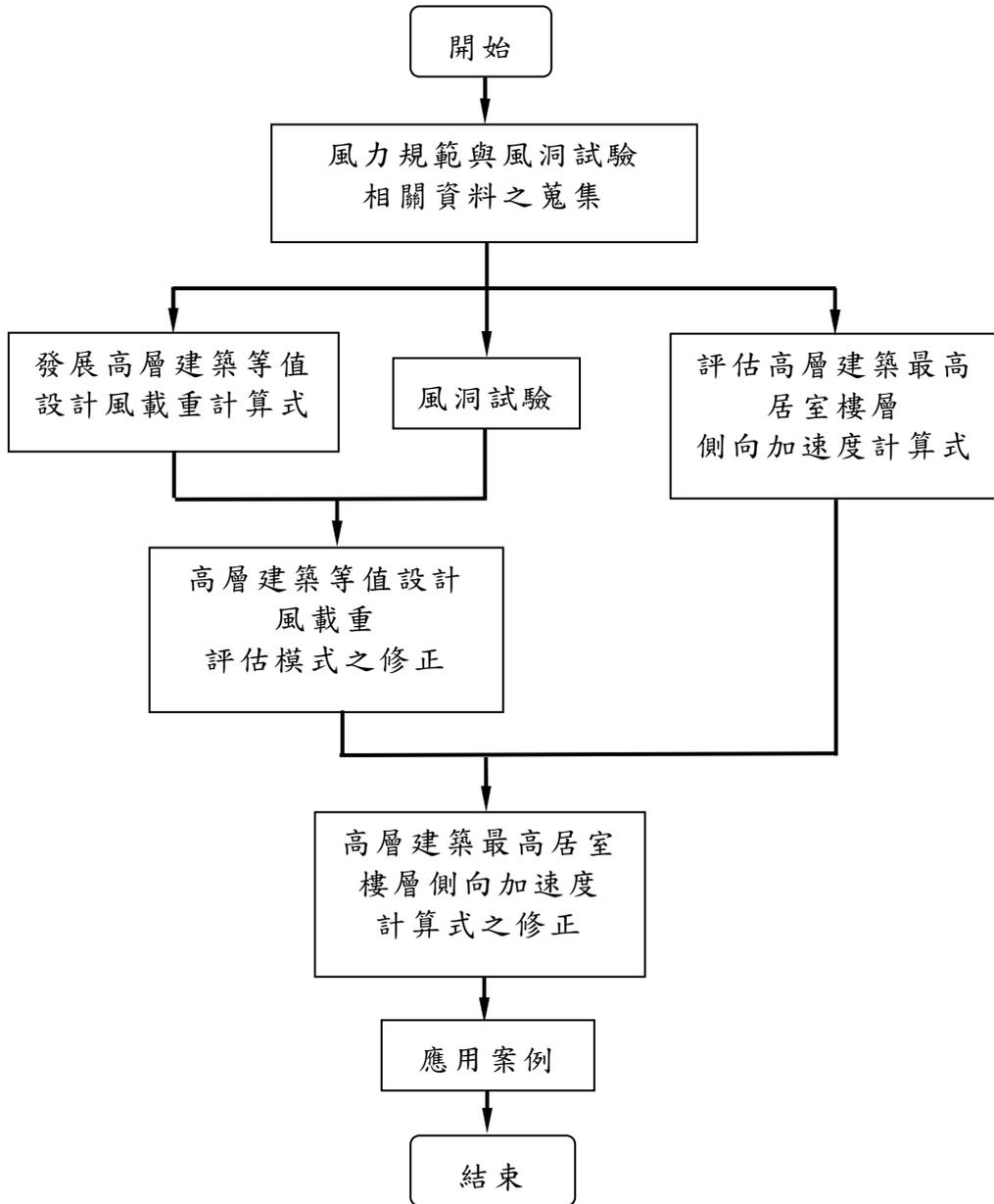


圖 1-1 研究步驟
(資料來源：本研究整理)

第三節 報告內容簡述

本報告根據所列研究內容及方法，針對研究所得結果作以下各章節之探討，所探討內容逐次說明如下：

- 第一章 緒論：對整份報告做一整體性概述；
- 第二章 文獻回顧：探討相關規範及學者於類似議題之研究成果；
- 第三章 等值設計風載重計算模式：詳細分析順風向設計風載重之推導過程，以及橫風向、扭轉向風載重計算式之初步模式；
- 第四章 最高居室樓層側向加速度計算式：列舉常見規範與相關學者之研究成果，並提出加速度之計算修正式；
- 第五章 高層建築設計風力之風洞試驗：介紹實驗內容及實驗結果；
- 第六章 應用案例：選取 2 棟建築物在 3 種地況作用下，以本文推導公式、國內現行規範與風洞試驗結果進行比較；
- 第七章 風力規範中風力計算式條文之初擬：根據前面章節之成果，初步研擬風力計算式之修正條文；
- 第八章 結論與建議：整合本計劃之研究成果，並據以提出相關建議。

第二章 文獻回顧

第一節 相關規範

該部分包括國內外風力規範有關高層建築設計風力之彙整，與相關風洞試驗資料之蒐集。經由研究各風工程先進國家風力規範之內容，包括規範制定之精神、緣由、特殊限制及理論等等，並進行相互間之比較與分析，有助於對國內規範相關規定之擷長補短，以符合國際風工程界對風力規範之發展趨勢。

國際間值得研究之風力規範大致包括：美國 ASCE(參考書目 1)、日本 AIJ(參考書目 2)、澳洲、紐西蘭 AS/NZS(參考書目 3)、加拿大 NBC(參考書目 4)、英國 BS(參考書目 5)等等。因為順風向風力之成因有適用之理論基礎加以描述，各國之相關規定大同小異。橫風向及扭轉向風力則由於形成之原因相當複雜，各國規範對於其計算方法仍有相當大之差異。目前日本與澳洲規範已將渦散現象導致之橫風向與扭轉向風力計算式明列於條文之中，國內現行規範即是修改日本規範相關條文而訂定。

各國風力規範中計算順風向設計風力的流程相當近似，分別計算風速壓、陣風反應因子、風壓係數及受力面積後，各層樓的等值風力載重即為前述四項參數的乘積。在風速壓部分，規範中通常將迎風面風壓與背風面風壓分開計算。在結構物各層樓上，迎風面風壓各國規範均令風壓隨高度而改變，但背風面風速壓的規定則有所差異。國內「建築物耐風設計規範及解說」(參考書目 21)、ANSI 及 AS/NZS 規範均採用建築物高度之背風壓作為任意高度上的背風壓。AIJ 則採用與迎風面相同的風速壓模式，定義背風壓的高度變化。迎風面的速度壓與風速剖面息息相關，除 AS/NZS 外，各國風

力規範均採用指數律，但指數值與邊界層厚度則不盡相同。

各國規範中差距最大且不確定者，應屬陣風反應因子。陣風反應因子為最大反應與平均反應的比值。對於高層建築來而言，當其高寬比大於 5，基本振態頻率小於 1Hz 時，受強風作用會產生結構動力效應，因此陣風反應因子通常包含了流場與結構特性的參數在內。在「建築物耐風設計規範及解說」、ANSI 中，依結構動力特性將封閉式建築物區分為一般建築物與柔性建築物。對於一般建築物計算等值風力載重方式與柔性建築物相似，陣風反應因子計算略為簡化。

橫風向與扭轉向設計風力部分，日本與澳洲規範皆透過風洞實驗結果迴歸所得之風力頻譜經驗式進行計算。由於實驗之限制，其規定皆限制風行進方向垂直於建築物之正面，且建築物處於受風之最壞狀況。日本規範 (AIJ 1996) 橫風向風力條文之頻譜適用範圍為高寬比介於 3.0~6.0、深寬比介於 0.2~5.0 之間。

由於日本規範橫風向風力頻譜經驗公式只有一種，並不考慮地況之差異，且日本規範之地況定義與國內規範之定義亦有所差距。因此，本研究對於國內規範橫風向風力條文之修訂，以風力頻譜經驗公式之修訂為主：包括以該規範之標準地況為逼近流場之形成條件，並以同步量測之風壓實驗做為頻譜取得之方式，期能得到更準確且合乎國內建築環境之風力條文。

下列章節參考鄭、吳、陳、張等人(參考書目 19、20)及各國規範，詳列其他國家相關之風力規範條文，包括美國 ASCE 7-02(參考書目 1)、日本 AIJ 96(參考書目 2)及澳洲/紐西蘭 AS/NZS 1170.2:2002(參考書目 3)。而國內規範順風向相關公式引自 ASCE7-02，橫風向相關公式引自 AIJ96，在此不重複描述。

1. 美國 ANSI/ASCE 7-02 之順風向風力公式(參考書目 1)

$$W_f(z) = q(z)C_w GA + q(h)C_l GA \quad (2-1)$$

其中， $W_f(z)$ ：地面以上 z 處高度之順風向風力； $q(z)$ ：地面以上 z 處之風速壓； C_w ：迎風面風力係數； C_l ：背風面風力係數； G ：陣風反應因子； A ：地面以上 z 處之有效受風面積； h ：平均建築物屋頂高度。

各項參數計算如下：

平均風速剖面

$$\bar{V}_z = \bar{b} \left(\frac{\bar{Z}}{33} \right)^{\bar{\alpha}} \times V \times \left(\frac{88}{60} \right) \quad (2-1)$$

其中， \bar{V}_z 為 \bar{Z} 高度處每小時平均風速(ft/sec)； V 代表平坦地況 10 公尺高之 3 秒陣風平均風速(mile/hour)； \bar{Z} 代表等值高度 ($= \max(0.6h, Z_{\min})$)； $\bar{\alpha}$ 代表指數值； \bar{b} 內含不同地況之轉換之係數以及 3 秒陣風轉小時平均風速之係數

紊流強度

$$T(z) = I_z = c \left(\frac{33}{\bar{Z}} \right)^{1/6} \quad (2-3)$$

其中， \bar{Z} 為等值高度($= \max(0.6h, Z_{\min})$)，單位為英尺； c 為紊流強度因子。

紊流積分尺度

$$L_z = l \left(\frac{\bar{Z}}{33} \right)^{\bar{\epsilon}} \quad (2-4)$$

其中， l 為長度尺度係數，單位為英尺 ft； $\bar{\epsilon}$ 為紊流積分尺度之指數值。

頻譜因子

$$R_n = \frac{7.47N_1}{(1+10.3N_1)^{5/3}} \quad (2-5)$$

其中， $N_1 = nL_{\bar{z}}/\bar{V}_{\bar{z}}$ ：約化頻率； \bar{z} ：等值高度，單位為英尺；

$L_{\bar{z}} = l(\bar{z}/33)^{\bar{\epsilon}}$ ，紊流積分尺度單位亦為英尺； $\bar{V}_{\bar{z}}$ ：在等值高度 \bar{z} 上之地況風速。

陣風因子

分為剛性建物 ($n_1 \geq 1.0\text{Hz}$) 及柔性建物 ($n_1 < 1.0\text{Hz}$) 兩種情況：

剛性建物 ($n_1 \geq 1.0\text{Hz}$)，陣風因子僅考慮背景部分

$$G = 0.925 \left(\frac{1+1.7g_Q I_{\bar{z}} Q}{1+1.7g_V I_{\bar{z}}} \right) \quad (2-6)$$

$$Q = \sqrt{\frac{1}{1+0.63 \left(\frac{B+h}{L_{\bar{z}}} \right)^{0.63}}} \quad (2-7)$$

其中， $I_{\bar{z}}$ ： \bar{z} 處之紊流強度； Q 為背景部分因子， B ：垂直於來風方向之建築物水平尺度； $L_{\bar{z}}$ ： \bar{z} 高度處紊流之積分長度尺度。

柔性建物 ($n_1 < 1.0\text{Hz}$)，陣風因子為背景部分擾動極值加上共振部分擾動極值。

$$G_f = 0.925 \left(\frac{1 + 1.7 I_{\bar{z}} \sqrt{g_Q^2 Q^2 + g_R^2 R^2}}{1 + 1.7 g_v I_{\bar{z}}} \right) \quad (2-8)$$

背景部分之尖峰因子與總擾動部分之尖峰因子

$$g_Q = g_v = 3.4$$

共振部分之尖峰因子(peak factor)， g_R

$$g_R = \sqrt{2 \ln(3600 n_1)} + \frac{0.577}{\sqrt{2 \ln(3600 n_1)}} \quad (2-9)$$

共振因子， R

$$R = \sqrt{\frac{1}{\beta} R_n R_h R_B (0.53 + 0.47 R_L)} \quad (2-10)$$

R_n 為風力頻譜因子， R_h ， R_B ， R_L 為建築物空間相關性之修正因子。下式之下標 l 可為 h 、 B 、 L 之一：

$$R_l = \frac{1}{\eta} - \frac{1}{2\eta^2} (1 - e^{-2\eta}) \quad \text{for } \eta > 0 \quad (R_l = 1 \quad \text{for } \eta = 0) \quad (2-11)$$

$$R_l = R_h \quad \text{for } \eta = 4.6 n_1 h / \bar{V}_{\bar{z}} ; \quad R_l = R_B \quad \text{for } \eta = 4.6 n_1 B / \bar{V}_{\bar{z}} ;$$

$$R_l = R_L \quad \text{for } \eta = 15.4 n_1 L / \bar{V}_{\bar{z}} 。$$

其中， L =平行於來風方向之結構水平尺寸(ft)(=建築物深度)； n_1 =

建築物自然頻率； β =阻尼比。

2. 日本 AIJ 1996 之順風向風力公式(參考書目 2)

$$W_f = q_H C_f G_f A \quad (2-12)$$

其中： W_f ：順風向設計風載重； q_H ：參考高度 H 處之設計風速壓；H：參考高度，一般使用建築物的平均屋頂高度為代表； C_f ：風力係數； G_f ：陣風反應因子； A ：z 處高度之投影面積。

各項參數計算如下：

平均風速剖面

$$U(Z) = U_0 \times 1.7 \times \left(\frac{Z}{Z_G} \right)^\alpha \quad (2-13)$$

其中， U_0 為平坦地況 10 公尺高之十分鐘平均風速； α 為指數值， Z_G 為梯度高度。

紊流強度

$$I_H = 0.1 \left(\frac{Z}{Z_G} \right)^{-\alpha-0.05} \quad (2-14)$$

長度尺度

$$L_H = 100 \left(\frac{H}{30} \right)^{0.5} \quad (2-15)$$

其中， L_H ：長度尺度，單位為公尺；H：參考高度。

頻譜因子：

$$F = \frac{4(n_0 L_H / U_H)}{(1 + 71(n_0 L_H / U_H)^2)^{5/6}} \quad (2-16)$$

主要依尋 Von Karman(1948) 頻譜而來； n_0 ：順風向振動之結構自然頻率； U_H ：設計風速； H ：參考高度。

陣風因子(Gust effect factor)

Detailed Procedure I (適用於剛性建物)

$$G_f = 1 + 4\gamma_f \sqrt{B_f} \quad (2-17)$$

Detailed Procedure II (適用於柔性建物)

$$G_f = 1 + g_f \gamma_f \sqrt{B_f + R_f} \quad (2-18)$$

其中，紊流因子， γ_f

$$\gamma_f = \frac{3 + 3\alpha}{2 + \alpha} I_H$$

其中， I_H ： H 高度處之紊流強度。

背景因子， B_f

$$B_f = 1 - \frac{1}{\left\{1 + 5.1 \left(L_H / \sqrt{HB}\right)^{1.3} (H/B)^k\right\}^{1/3}} \quad (2-19)$$

$$k = \begin{array}{ll} 0.33 & \text{for } H \geq B \\ -0.33 & \text{for } H < B \end{array}$$

H ：建築物參考高度； B ：建築物投影寬度。

尖峰因子(peak factor) , g_f

$$g_f = \sqrt{2\ln(600v_f) + 1.2} \quad (2-30)$$

等級超越因子(level crossing factor) , v_f

$$v_f = n_o \sqrt{\frac{R_f}{B_f + R_f}}$$

共振因子 , R_f

$$R_f = \frac{\pi}{4\eta_f} S_f F \quad (2-31)$$

η_f : 結構順風向振動第一振態阻尼比。

風力頻譜因子 , F

$$F = \frac{4(n_o L_H / U_H)}{\{1 + 71(n_o L_H / U_H)^2\}^{5/6}} \quad (2-32)$$

尺寸折減因子 , S_f

$$S_f = \frac{0.84}{\{1 + 2.1(n_o H / U_H)\} \{1 + 2.1(n_o B / U_H)\}} \quad (2-33)$$

3. 澳洲/紐西蘭 AS/NZS 1170.2:2002(參考書目 3)

3.1 順風向設計風力

$$F = \sum (p_z A_z) \quad (2-34)$$

其中， p_z ：高度 z 處之設計風壓； A_z ：高度 z 處之受風面積。

各項參數計算如下：

設計風速壓

$$p = (0.5\rho_{air})[V_{des,\theta}]^2 C_{fig} C_{dyn} \quad (2-35)$$

其中， ρ_{air} ：空氣密度，一般取用 1.2kg/m^3 ； V_{des} ：建築物正交設計風速； C_{fig} ：氣動力外型因子； C_{dyn} ：動力反應因子。

高層建築及高塔之順風向動力反應因子

$$C_{dyn} = \frac{1 + 2I_h \left[g_V^2 B_S + \frac{H_S g_R^2 S E_t}{\zeta} \right]^{0.5}}{(1 + 2g_V I_h)} \quad (2-36)$$

其中， s ：風力作用高度； h ：平均屋頂高度； I_h ：紊流強度； g_V ：尖峰因子，此處取 3.7； B_S ：背景反應因子； H_S ：高度因子， $H_S = 1 + (s/h)^2$ ； g_R ：共振反應因子， $g_R = \sqrt{2 \log_e(600n_c)}$ ； S ：形狀折減因子； E_t ：紊流頻譜值乘以 $(\pi/4)$ ； ζ ：結構阻尼比。

3.2 高層建築及高塔之橫風向動力反應因子

靜載重風力

$$w_{eq}(z) = 0.5\rho_{air}[V_{des,\theta}]^2 d C_{fig} C_{dyn} \quad (2-37)$$

$$(C_{fig} C_{dyn}) = 1.5 g_R \left(\frac{b}{d} \right) \frac{K_m}{(1 + g_V I_h)^2} \left(\frac{z}{h} \right)^k \sqrt{\frac{\pi C_{fs}}{\zeta}} \quad (2-38)$$

其中， K_m ：橫風向加速度之模態修正因子； C_{fs} ：以線性模態一般化之橫風向風力頻譜係數， C_{fs} 係數主要以(2-40)式之 V_n 值加以計算； b ：垂直於風向之建築物寬度； d ：平行於風向之建築物深度。

橫風向傾倒彎矩

$$M_e = 0.5 g_R b \left[\frac{0.5 \rho_{air} [V_{des,\theta}]^2}{(1 + g_V I_h)^2} \right] h^2 \left(\frac{3}{k+2} \right) K_m \sqrt{\frac{\pi C_{fs}}{\zeta}} \quad (2-39)$$

k ：結構基本振態之指數， $\phi(z) = (z/h)^k$ 。

橫風向風力頻譜係數

$$V_n = \frac{V_{des,\theta}}{n_c b (1 + g_V I_h)} \quad (2-40)$$

n_c ：橫風向振動之自然頻率。

3.3 煙囪及圓斷面構件之橫風向動力反應因子

靜載重風力

$$w_{eq}(z) = m(z) (2\pi n_1)^2 y_{\max} \Phi_1(z) \quad (2-41)$$

其中， $m(z)$ ：隨高度 z 變化之單位高度平均質量； n_1 ：第一模態之自然頻率(Hz)； $\Phi_1(z)$ ：第一模態。

各項參數計算如下：

橫風向頂點位移

$$y_{\max} = K b_i / S_C \quad (2-42)$$

其中， K ：最大頂點位移因子，圓斷面時取 0.5； b_t ：頂部三分之一部份之平均寬度； S_C ：Scruton number，

$S_C = 4\pi n_t \zeta l (\rho_{air} b^2)$ ； m_t ：建築物質量； ζ ：結構阻尼比。

第二節 高層建築風洞實驗

橫風向風力頻譜量測方式一般分為高頻力平衡儀法及表面風壓量測法二大類。前者以五分量高頻力平衡儀量取建築物之基底彎矩反應。在假設結構第一振態為線性之條件下，可將基底彎矩頻譜視為第一振態之廣義座標風力頻譜。因為該方法之實驗成本及所需時間相當有限，成為大多數結構風力頻譜量測之主要工具。後者是藉由模型表面開設之大量風壓孔來即時同步量取表面壓力之變化，再換算為所需之風力頻譜等資料。由於紀錄了建築物表面壓力之分佈，該方法較高頻力平衡儀法更能掌握建築物之風力特性，同時也可以處理非線性振態之廣義座標風力計算問題。自 1970 年代學術界即開始對風力頻譜進行量測，至近年來如 1990 年 Kareem (參考書目 6) 在邊界層指數律指數 $\alpha=0.16$ 、 0.35 之開闊、都市地形，以力平衡儀法量測深寬比 $1/3$ 、 $1/2$ 、 $2/3$ 、 $1/1$ 、 $3/2$ 、 $2/1$ 、 $3/1$ 之模型風力頻譜，並在 2003 年 (參考書目 12) 將相關資料整合為一互動式資料庫；2002 年 Liang 等人 (參考書目 11) 在 $\alpha=0.20$ 之流場，以力平衡儀法量測深寬比 $1/1$ 、 $2/1$ 、 $3/1$ 、 $4/1$ ，高度 0.4m 及 0.8m 之模型橫風向風力頻譜，並歸納出經驗公式；2004 年 Gu 等人 (參考書目 14) 亦針對矩型斷面深寬比 $1/3$ 、 $1/2$ 、 $2/3$ 、 $3/2$ 、 $2/1$ 、 $3/1$ 之建築物，高寬比 4、5、6、7、8、9，在 $\alpha=0.12$ 、 0.16 、 0.22 、 0.30 之地形，以力平衡儀法量測風力頻譜相關資料，並歸納出經驗公式。2003 年淡江大學風工程研究中心王及鄭等人 (參考書目 13) 亦整合多年之研究成果，將 30 餘種不同幾何斷面模型在 $\alpha=0.15$ 、 0.32 之地形下，以力平衡儀法量測之風力頻譜等資料整合為一專家系統。

第三節 順風向設計風力

國內規範對於高層建築的順風向設計風力，採用等值靜態風載重 (equivalent static wind load, ESWL) 來表示。陣風歷時的時間變異特性以及結構動力的影響，是以陣風反應因子 (gust response factor) 涵蓋之。由於此種形式之順風向設計風載重是由風速壓、陣風反應因子與風壓係數之乘積而得，因此在高度上之分配情形同樣近似於速度壓之分布。大多數國外現行之風力規範也是使用類似之表示法來描述順風向設計風載重。所謂陣風反應因子是用於求取結構設計風載重，因此，本建議書將以陣風載重因子 (gust loading factor) 取代之。根據風工程近來之研究成果，對於順風向設計風載重之分析提出兩方面之修正：

1. 選擇以彎矩為基礎之陣風載重因子 (moment-based gust loading factor, MGLF) 取代傳統之位移陣風載重因子 (displacement based gust loading factor, DGLF) (參考書目 10, Zhou and Kareem 2001)。由於基底彎矩近似正比於高層建築的基本振態一般化載重 (generalized loading of first mode)，如是，陣風載重因子的計算基礎便由高層建築的位移轉換為建築結構的彈性內力 (internal elastic force)。根據 MGLF 計算所得的陣風載重因子應當能更適切的代表動態設計載重。
2. 等值靜態風載重之共振部份，在高度上之分佈方式類似於慣性力之分佈。

對前者而言，雖然近來之研究結果顯示 MGLF 較 DGLF 更為準確，但是對於規則外型的高層建築，此二者之風載重計算結果相差有限。於後者，共振載重在高度上分配方式之修正則對設計風載重有明顯之影響，尤其是以共振反應為靜態風載重主要來源之柔性高層建築

而言，更形重要。修正陣風載重因子之定義以及改變風載重共振部份在空間上之分配方式，可說是等值靜態風載重分析法之流程中，有關結構動力分析程序上之一大進步，而這也是影響風載重精確度的重要因素。

目前常見之順風向設計風載重分析模式，主要根據是以準穩定及條狀理論（quasi-steady and strip theories）同時做為迎風面與背風面動態風載重之計算依據。所謂準穩定理論是指一個鈍狀物體的順風向風力頻譜正比於逼近流的紊流頻譜；條狀理論則是指規則斷面建築物任一高度的風力，可用一個定值的風力係數配合該處的速度壓求得。然而風洞試驗結果顯示，準穩定定理及條狀理論僅適用於迎風面而無法使用於背風面的風力。這是因為背風面風力與風壓之成因來自於尾跡（wake flow）的影響，有別於迎風面所受逼近流的影響。本計畫擬針對風載重之特性進行風洞實驗分析，分別對於迎風面與背風面之風載重個別提出適合的計算模式，以組合出較佳之順風向等值靜態風載重。

以下詳列不同之順風向設計風載重分析模式。

1. 位移陣風反應因子(Displacement Based Gust Loading Factor, DGLF)（參考書目 15, 18）

靜態位移反應部分

$$\bar{Y}(z) = \frac{\int_0^H \bar{P}(z)\varphi(z)dz}{(2\pi f_1)2m^*} \varphi(z) \quad (2-43)$$

其中，

$\bar{P}(z)$ ：平均風力； $\bar{P}(z) = 0.5\rho C_D W \bar{U}_H^2$ ； C_D ：拖曳力係數； W ：

建築物寬度； \bar{U}_H ：建築物高度 H 處之平均風速； ρ 為空氣密度； $\varphi(z)$ 為結構振態； $\varphi(z) = \left(\frac{z}{H}\right)^\beta$ ； m^* 為廣義質量； f_1 ：結構自然頻率。

$$\begin{aligned} m^* &= \int_0^H m(z)\varphi^2(z)dz \\ &= \int_0^H m_0\left(\frac{z}{H}\right)^{2\beta} dz \\ &= \frac{1}{(2\beta+1)}m_0H \end{aligned}$$

$m(z)$ ：高度 z 處之結構質量，此處假設為常數 m_0 。

$$\bar{Y}(z) = \frac{0.5\rho C_D W \bar{U}_H^2}{(2\pi f_1)^2 m_0} \frac{(2\beta+1)}{(2\alpha+\beta+1)} \left(\frac{z}{H}\right)^\beta \quad (2-44)$$

動態位移反應部分

背景部分以及共振部分分開考慮。

共振反應部分：

$$\hat{Y}_R = g_{YR} \sigma_{YR}(z) \quad (2-45)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{YR} &= \frac{\varphi(z)}{(2\pi f_1)^2 m^*} \left[\frac{\pi f_1 S_F(f_1)}{4\eta} \right]^{\frac{1}{2}} \\ &= \left(\frac{z}{H}\right)^\beta \frac{1}{(2\pi f_1)^2 m^*} \left[\chi(\beta, f_1) \frac{\pi f_1 S_u^*(f_1)}{4\eta} \right]^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (2-46)$$

其中， f_1 ：結構自然頻率； $S_F(f)$ ：廣義風力頻譜； $S_u^*(f)$ ：風速頻譜； χ ：氣動力阻抗函數(Aerodynamic admittance function)。

χ 計算如下：

$$\chi(\beta, f) = \left(\frac{\rho C_D W H \bar{U}_H}{(1 + \alpha + \beta)^2} \right)^2 |J_x(f)|^2 |J_z(\alpha, \beta, f)|^2 \quad (2-47)$$

$|J_x(f)|^2$ 為寬度上空間相關性修正函數：

$$|J_x(f)|^2 = \frac{1}{W^2} \int_0^w \int_0^w R_x(x_1, x_2, f) dx_1 dx_2$$

$|J_z(f)|^2$ 為高度上空間相關性修正函數：

$$|J_z(\alpha, \beta, f)|^2 = \frac{(1 + \alpha + \beta)^2}{H^2} \int_0^w \int_0^w \left(\frac{z_1}{H}\right)^{\alpha+\beta} \left(\frac{z_2}{H}\right)^{\alpha+\beta} R_x(z_1, z_2, f) dz_1 dz_2$$

R_x 、 R_z ：水平方向 x 及垂直方向 z 之壓力相關函數。

可得共振部分的 DGLF

$$G_{YR} = \frac{\hat{Y}(z)}{\bar{Y}(z)} = 2g_u I_H \frac{2\alpha + \beta + 1}{\alpha + \beta + 1} \sqrt{|J_x(f)|^2 |J_z(\alpha, 1, f)|^2 \frac{\pi f_1 S_u^*(f_1)}{4\eta}} \quad (2-48)$$

背景反應部分

$$\hat{Y}_B = g_{YB} \sigma_{YB}(z)$$

$$\begin{aligned}
\sigma_{YB} &= \frac{\varphi(z)}{(2\pi f_1)^2 m^*} \left[\int_0^\infty S_F(f) df \right]^{\frac{1}{2}} \\
&= \left(\frac{z}{H} \right)^\beta \frac{1}{(2\pi f_1)^2 m^*} \left[\int_0^\infty \chi(\beta, f) S_u(f) df \right]^{\frac{1}{2}} \\
\sigma_{YB} &= \left(\frac{z}{H} \right)^\beta \frac{1}{(2\pi f_1)^2 m^*} \frac{\rho C_D W H I_H \bar{U}_H^2}{\alpha + \beta + 1} \left[\int_0^\infty |J_x(f)|^2 |J_z(\alpha, \beta, f)|^2 S_u^*(f) df \right]^{\frac{1}{2}}
\end{aligned} \tag{2-49}$$

可得背景部分的 DGLF

$$G_{YB} = \frac{\hat{Y}(z)}{\bar{Y}(z)} = 2g_B I_H \frac{2\alpha + \beta + 1}{\alpha + \beta + 1} \sqrt{\int_0^\infty |J_x(f)|^2 |J_z(\alpha, \beta, f)|^2 S_u^*(f) df} \tag{2-50}$$

2. 彎矩陣風反應因子 (Moment Based Gust Loading Factor, MGLF)

(參考書目 10, 18)

靜態彎矩反應部分

基底彎矩可表為：

$$\bar{M} = \int_0^H \bar{P}(z) z dz = \int_0^H 0.5 \rho C_D W \bar{U}^2(z) z dz = 0.5 \rho C_D W \bar{U}_H^2 \int_0^H \left(\frac{z}{H} \right)^{2\alpha} z dz$$

$$\bar{M} = \frac{0.5 \rho C_D W \bar{U}_H^2}{H^{2\alpha}} \int_0^H z^{2\alpha+1} dz = 0.5 \rho C_D W \bar{U}_H^2 H^2 \frac{1}{2+2\alpha} \tag{2-51}$$

動態彎矩反應部分

背景部分以及共振部分分開考慮。

共振部分，依(2-46)、(2-47)式：

$$\sigma_{YR} = \left(\frac{z}{H}\right)^\beta \frac{1}{(2\pi f_1)^2 m^*} \frac{\rho C_D W H I_H \bar{U}_H^2}{\alpha + \beta + 1} \left[|J_x(f)|^2 |J_z(\alpha, \beta, f)|^2 \frac{\pi f_1 S_u^*(f_1)}{4\eta} \right]^{\frac{1}{2}}$$

上式經整理：

$$\sigma_{YR}(z) = \left(\frac{z}{H}\right)^\beta \frac{\rho C_D W \bar{U}_H^2}{(2\pi f_1)^2 m_0} \frac{(2\beta + 1)}{(1 + \alpha + \beta)} \left[|J_x(f)|^2 |J_z(\alpha, \beta, f)|^2 \frac{\pi f_1 S_u(f_1)}{4\eta} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\hat{P}_R(z) = (2\pi f_1)^2 m(z) Y_R(z)$$

$$= \left(\frac{z}{H}\right)^\beta g_R \rho C_D W \bar{U}_H^2 I_H \frac{1}{(1 + \alpha + \beta)} \left[|J_x(f)|^2 |J_z(\alpha, \beta, f)|^2 \frac{\pi f_1 S_u^*(f_1)}{4\eta} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\hat{M}_R = \int_0^H P_R(z) z dz$$

$$= (g_R \rho C_D W \bar{U}_H^2 I_H H^2) \frac{(1 + 2\beta)(2 + 2\beta)}{(1 + \alpha + \beta)[(2 + 2\beta) - \lambda(1 + 2\beta)]} \quad (2-52)$$

$$\cdot \frac{[(3 + \beta) - \lambda(2 + \beta)]}{(3 + \beta)(2 + \beta)} \times \sqrt{|J_x(f_1)|^2 |J_z(\alpha, 1, f_1)|^2 \cdot \frac{\pi f_1}{4\eta} \cdot S_u^*(f_1)}$$

可得 MGLF 之共振部分

$$G_{MR} = \frac{\hat{M}_R}{M}$$

$$G_{MR} = 2 g_R I_H \frac{(1 + 2\beta)(2 + 2\beta)(2 + 2\alpha)}{(1 + \alpha + \beta)[(2 + 2\beta) - \lambda(1 + 2\beta)]} \quad (2-53)$$

$$\cdot \frac{[(3 + \beta) - \lambda(2 + \beta)]}{(3 + \beta)(2 + \beta)} \times \sqrt{|J_x(f_1)|^2 |J_z(\alpha, \beta, f_1)|^2 \cdot \frac{\pi f_1}{4\eta} \cdot S_u^*(f_1)}$$

背景部分：

$$\hat{M}_B = g_B \sqrt{\int_0^\infty \int_0^H \int_0^H \int_0^W \int_0^W (\rho C_D W \bar{U}_H)^2 \left(\frac{z_1}{H}\right)^\alpha \left(\frac{z_2}{H}\right)^\alpha R_z(f) R_x(f) S_u(f) z_1 z_2 dx_1 dx_2 dz_1 dz_2 df}$$

$$\hat{M}_B = g_B \frac{I_H \rho C_D W \bar{U}_H^2 H^2}{2 + \alpha} \sqrt{\int_0^\infty S_u^*(f) |J_x(f)|^2 |J_z(\alpha, \beta, f)|^2 df}$$

可得 MGLF 之背景部分

$$G_{MB} = \frac{\hat{M}_B}{M} = 2g_B I_H \frac{2 + 2\alpha}{2 + \alpha} \sqrt{\int_0^\infty S_u^*(f) |J_x(f)|^2 |J_z(\alpha, \beta, f)|^2 df} \quad (2-54)$$

3. Solari 順風向反應模式 (參考書目 7,8,17,18)

廣義擾動風力頻譜

$$S_F(n) = [\rho B H C_D \bar{V}(h) \sigma_v(h) K_b]^2 S_{veq}^*(n) \chi(n, \tau) \quad (2-55)$$

其中， ρ ：空氣密度； B ：結構物寬度； H ：結構物高度； h ：結構物等值高度； C_D ：拖曳力係數； $\bar{V}(h)$ ： h 高度處之平均風速； $\sigma_v(h)$ ： h 高度處之縱向擾動風速均方根值； $S_{veq}^*(n)$ ：約化等值風速頻譜； $\chi(n, \tau)$ ：氣動力阻抗函數，與氣象儀器反應時間有關； K_b ：與結構模式有關之參數。

對於垂直結構而言， K_b 計算如下：

$$K_b = \frac{1}{H V(h) \sigma_v(z)} \int_0^H V(z) \sigma_v(z) \phi(z) dz$$

$\phi(z)$ ：結構振態。

$S_{veq}^*(n)$ 計算如下：

$$S_{veq}^* = \frac{S_v(h, n)}{\sigma_v^2(h)} R[0.4 \frac{n C_x B}{\bar{V}(h)}] \frac{1}{C_D^2} \left\{ C_w^2 + 2 C_w C_l R[0.4 \frac{n C_y D}{\bar{V}(h)}] + C_l^2 \right\} R[0.4 \frac{n C_z H}{\bar{V}(h)}] \quad (2-56)$$

其中， $S_v(h, n)$ ：縱向擾動風速頻譜； $R[0.4 \frac{nC_x B}{\bar{V}(h)}]$ 、 $R[0.4 \frac{nC_y D}{\bar{V}(h)}]$ 、

$R[0.4 \frac{nC_z H}{\bar{V}(h)}]$ ：分別為寬度上，深度上以及高度上的空間相

關性修正函數；B、D、H：結構寬度、深度、高度； C_w 、

C_l ：分別為迎風面之正風壓以及背風面之負風壓平均風力

係數，此處皆以正值表示， $C_D = C_w + C_l$ 為拖曳力係數，其

建議值為 $C_w = 0.8$ ， $C_l = 0.5$ ， $C_D = 0.8 + 0.5 = 1.3$ ； C_x ， C_z 為

對數衰減係數； C_y 為迎風面以及背風面風壓之交相關係

數，其建議值為 $C_x = C_z = 11.5$ ， $C_y = 15.4$ 。

將該值帶入上式中並整理可得：

$$\begin{aligned} S_{veq}^* &= \frac{S_v(h, n)}{\sigma_v^2(h)} R[4.6 \frac{nB}{\bar{V}(h)}] \frac{1}{1.69} \left\{ 0.64 + 0.8R[15.4 \frac{nD}{\bar{V}(h)}] + 0.09 \right\} R[4.6 \frac{nH}{\bar{V}(h)}] \\ &= \frac{S_v(h, n)}{\sigma_v^2(h)} R[4.6 \frac{nB}{\bar{V}(h)}] R[4.6 \frac{nH}{\bar{V}(h)}] \left\{ 0.53 + 0.47R[15.4 \frac{nD}{\bar{V}(h)}] \right\} \end{aligned} \quad (2-57)$$

共振部分：

考慮與結構共振頻率所對應到的外力頻譜值得到近似公式：

$$\sigma_{P_{in,R}^*}^2 = \frac{\pi n_1}{4\eta} S_F(n_1) \quad (2-58)$$

$$\sigma_{P_{in,R}^*}^2 = \frac{\pi n_1}{4\eta} [\rho B H C_D \bar{V}(h) \sigma_v(h) K_b]^2 \left\{ \frac{S_v(h, n)}{\sigma_v^2(h)} R_H R_B (0.53 + 0.47R_D) \right\} \chi(n, \tau) \quad (2-59)$$

n_1 ：結構順風向振動之自然頻率； $S_F(n)$ ：廣義風力頻譜；

將共振部分以慣性力分佈方式分配：

$$\begin{aligned}
 \sigma_{P_i,R} &= \frac{m_0 \phi(z)}{M^*} \sigma_{P_i^*,R} \\
 &= \left[\frac{\rho_{st} BD \Delta z}{\int_0^H \rho_{st} BD \left(\frac{z}{H} \right)^{2\beta} dz} \right] \sigma_{P_i^*,R} \\
 &= \left[\left(\frac{2\beta+1}{H} \right) \left(\frac{z}{H} \right)^\beta \Delta z \right] \sigma_{P_i^*,R}
 \end{aligned} \tag{2-60}$$

其中， M^* ：廣義質量； m_0 ：結構單位高度質量，此處設為常數；

ρ_{st} ：結構密度。

整理後可得：

$$\begin{aligned}
 \sigma_{p_{m,R}}(z) &= \left[\rho B H C_D \bar{V}(h) \sigma_v(h) K_b \right] \sqrt{\frac{\pi n_1}{4\eta} S_{veq}^* \chi(n_1, \tau)} \\
 &= \left[\left(\frac{2\beta+1}{H} \right) \left(\frac{z}{H} \right)^\beta \Delta z \right] \left[\rho B H C_D \bar{V}(h) \sigma_v(h) K_b \right] \sqrt{\frac{\pi n_1}{4\eta} S_{veq}^* \chi(n_1, \tau)}
 \end{aligned} \tag{2-61}$$

Solari 整理 K_b 之 Close form 如下

$$K_b = \frac{1.647^\alpha}{1 + \alpha + \beta} \tag{2-62}$$

$\chi(n, \tau)$ 為氣動力阻抗函數，保守而言取其值為 1

$$\begin{aligned}\sigma_{P_{in,R}}(z) &= \left[\left(\frac{2\beta+1}{H} \right) \left(\frac{z}{H} \right)^\beta \Delta z \right] \left[\rho B H C_D \bar{V}^2(h) I_H \left(\frac{1.647^\alpha}{1+\alpha+\beta} \right) \right] \sqrt{\frac{\pi n_1}{4\eta} S_{veq}^*} \\ &= \left[1.647^\alpha \left(\frac{2\beta+1}{1+\alpha+\beta} \right) \left(\frac{z}{H} \right)^\beta \right] \left[1.25 B \Delta z C_D \bar{V}^2(h) I_H \right] \sqrt{\frac{\pi n_1}{4\eta} S_{veq}^*}\end{aligned}\quad (2-63)$$

$$\text{令 } R = \sqrt{\frac{n_1}{\eta} S_{veq}^*}$$

$$\sigma_{P_{in,R}}(z) = \left[1.647^\alpha \left(\frac{2\beta+1}{1+\alpha+\beta} \right) \left(\frac{z}{H} \right)^\beta \right] \left[1.25 B \Delta z C_D \bar{V}^2(h) I_H \right] \sqrt{\frac{\pi}{4} R^2}\quad (2-64)$$

背景部分

背景部分考慮轉換函數近似於 1.0 段與外力頻譜的乘積，其動力效應並不顯著。其風力分配應與風速壓相同，因此以基底剪力作為分配依據。

$$\begin{aligned}\sigma_{P_i,B} &= \frac{\bar{P}_i}{\sum_i \bar{P}_i} \sigma_{P_i^*,B} \\ &= \left[\frac{0.5 \rho C_D B \Delta z \bar{U}^2(z)}{\int_0^H 0.5 \rho C_D B \bar{U}^2(z) dz} \right] \sigma_{P_i^*,B} \\ &= \left[\left(\frac{2\alpha+1}{H} \right) \left(\frac{z}{H} \right)^{2\alpha} \Delta z \right] \sigma_{P_i^*,B}\end{aligned}\quad (2-65)$$

其中， \bar{P}_i ；i 樓層之平均風力；

$$\sigma_{P_{in,B}}^2 = \int_0^\infty S_F(n) dn \quad (2-66)$$

$$\sigma_{P_{in,B}}^2 = \int_0^\infty \left[\rho B H C_D \bar{V}(h) \sigma_v(h) K_b \right]^2 S_{veq}^*(n) \chi(n; \tau) dn \quad (2-67)$$

整理積分部分如下

$$\begin{aligned}
 Q^2 &= \int_0^\infty S_{veq}^*(n) \chi(n; \tau) dn = \frac{1}{1 + 0.145 \left[\frac{C_x B}{L_v(H)} + \frac{C_z H}{L_v(H)} \right]^{0.63}} \\
 &= \frac{1}{1 + 0.145 \left[\frac{C_x B}{L_v(H)} + \frac{C_z H}{L_v(H)} \right]^{0.63}} = \frac{1}{1 + 0.68 \left[\frac{B + H}{L_v(H)} \right]^{0.63}}
 \end{aligned} \tag{2-68}$$

$$\sigma_{p_{in,B}^*}^2 = \left[\rho B H C_D \bar{V}(h) \sigma_v(h) K_b \right]^2 Q \tag{2-69}$$

$$\sigma_{p_{in,B}} = \left[\left(\frac{2\alpha + 1}{H} \right) \left(\frac{z}{H} \right)^{2\alpha} \Delta z \right] \sigma_{p_{in,B}^*} \tag{2-70}$$

$$\sigma_{p_{in,B}} = \left[1.647^\alpha \left(\frac{2\alpha + 1}{1 + \alpha + \beta} \right) \left(\frac{z}{H} \right)^{2\alpha} \right] \left[1.25 B \Delta z C_D \bar{V}^2(h) I_H \right] \sqrt{Q^2} \tag{2-71}$$

第三章 等值設計風載重計算模式

高層建築等值靜態風載重評估模式區分為順風向、橫風向及扭轉向三個方向，其中順風向風力是由風速壓與逼近流的紊流特性所決定，根據現有理論配合少數風洞實驗數據即可有效預測。橫風向及扭轉向風力發生之原因，則源自渦散分離及紊流尾跡等現象所產生之橫向不平衡風壓及不對稱風壓。因為發生機制複雜，這兩種風力形式目前沒有簡易有效之理論能加以模擬。一般而言，較簡單可行之方式是針對特定幾何形狀之建築物進行風洞試驗，量取其橫風向及扭轉向風力頻譜進行迴歸分析以得一經驗公式，也因此其適用性亦受到風洞試驗模型幾何形狀之限制。本計畫擬在符合現行風力規範所定義的標準地況流場中進行風洞實驗，根據實驗結果推導順風向風力之理論公式。理論公式將以流場特性為參數，可適用於未來可能之流場修正。至於橫風向及扭轉向設計風力則直接採用風洞試驗結果。研究成果之計算式將儘量適合於產業界之應用，以簡明易懂為方向。

第一節 順風向設計風力

目前常見之順風向設計風載重分析方式，主要根據下列假設：

- (1) 使用拖曳力係數為基礎進行分析，其在任意高度處之風載重使用之風速壓為該高度之風速壓；
- (2) 以準穩定定理及條狀理論（quasi-steady and strip theories）同時做為迎風面與背風面動態風載重之計算依據。

然而風洞試驗結果顯示，準穩定定理及條狀理論僅適用於迎風面而無法使用於背風面之分析。這是因為背風面動態風載重之成因來自

於尾跡 (wake flow) 之擾動，與迎風面所受風力之形式有所不同。本文將針對風載重之特性進行分析，分別對於迎風面與背風面之動態風載重個別提出適合的計算模式，以組合出較佳之等值靜態風載重。

根據鄭(參考書目 22、23)之研究，考慮一棟 30 層大樓，斷面近似正方形，紊流流場。圖 3-1 為風洞試驗結果，其中顯示平均風力與動態風力之背景部分 (均方根值乘以尖峰因子) 隨著建築物高度之增加而呈線性變化。

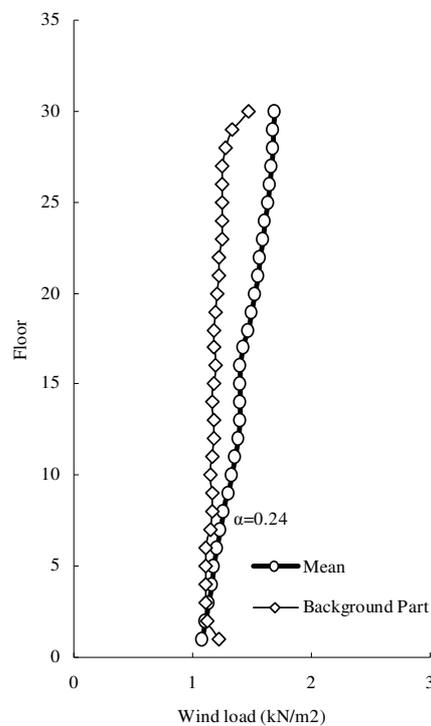


圖 3-1 紊流場作用下之 30 層大樓順風向風載重
(資料來源：參考書目 19)

這意味著等值靜態風載重之平均值與背景部分，在高度上之分佈方式不再近似於速度壓之形式。圖 3-2a、2b 為高寬比 5、6、7 之方柱，在開放地形下之風洞試驗結果，分別顯示局部位置之平均拖曳力係數 C_D 及擾動拖曳力係數 C'_D 在不同高度處之變化，參考風速採用建築物屋頂位置之風速 U_H 。圖中顯示順風向之擾動風力並不隨著高度增加

有明顯之改變。

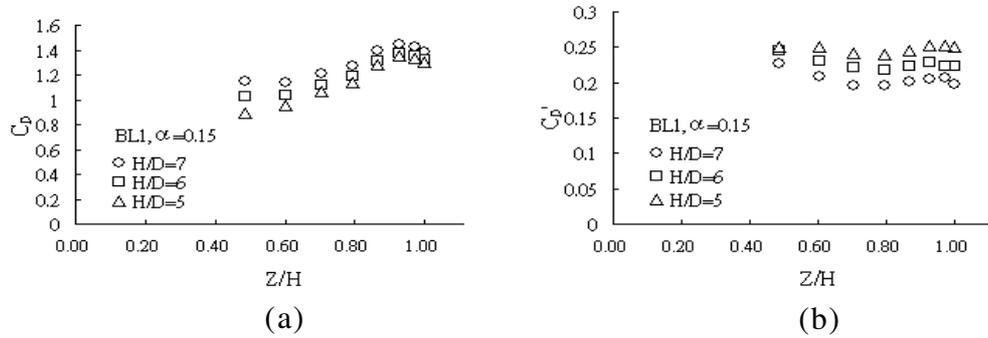


圖 3-2 平均拖曳力係數 C_D 與擾動拖曳力係數 C_D' 在高度上之分佈
(資料來源：參考書目 19)

因此本文使用下列之假設做為修正等值靜態風載重之基礎：

- (1) 假設迎風面平均風力與擾動風力之作用完全遵循準穩定定理及條狀理論；背風面風力則令其在高度上為均勻分佈。換言之，假設任意高度處之迎風面風力係數 (C_w) 相對於該高度之風速 $U(z)$ 為一定值；而任意高度位置之背風面風力係數 (C_l) 則是相對於建築物屋頂位置之風速 U_H 成為一定值。
- (2) 等值靜態設計風載重之擾動風力背景部份，其因為空間相關性造成之效應透過以基底剪力為依據的相關性折減因子予以修正。
- (3) 令等值靜態風載重有關擾動風力共振部份在空間上之分佈，與慣性力分布方式相同。
- (4) 建築物質量在垂直方向為均勻分布，同時令其基本振態形式為 $\phi(z) = (z/H)^\beta$ 。

為了避免與現行規範相關條文之形式有太大之差異，本研究仍使

用陣風反應因子法 (gust response factor approach) 做為順風向等值靜態風載重之基礎。

$$D(z) = \bar{F}_D(z) + g_D \sigma_D(z) = G(z) \bar{F}_D(z) \quad (3-1)$$

陣風反應因子：

$$G(z) = 1 + g_D \frac{\sigma_D(z)}{\bar{F}_D(z)}$$

其中， $D(z)$ ： z 高度處之順風向等值靜態風載重； $\bar{F}_D(z)$ ： z 高度處之等值靜態風載重平均值； $G(z)$ ： z 高度處之陣風反應因子； g_D ：尖峰因子； $\sigma_D(z)$ ： z 高度處之等值靜態風載重擾動值。 $\sigma_D(z)$ 分為兩部分，包括背景部份 $F_{D,B}(z)$ 及共振部分 $F_{D,R}(z)$ 。

基本分析方法如下：

平均風載重

考慮迎風面與背風面風壓產生原因之差異，因此將順風向風力係數 C_D 表示為迎風面風力係數 C_w 及背風面風力係數 C_l 之合。令 C_w 相對於局部位置之風速 $U(z)$ 為常數， C_l 相對於建築物屋頂位置之風速 U_H ，亦固定為常數。

$$\bar{F}_D(z) = \frac{1}{2} \rho U_H^2 W \left[\left(\frac{z}{H} \right)^{2\alpha} C_w + C_l \right] \quad (3-2)$$

其中， $\bar{F}_D(z)$ ：z 高度處之等值靜態風載重平均值； ρ ：空氣密度；
 W ：建築物寬度； α ：平均風速剖面指數率參數； C_w 、 C_l ：
 分別為迎風面之正風壓以及背風面之負風壓平均風力係
 數，此處皆以正值表示

擾動風載重之共振部份

順風向擾動風載重同樣區分為迎風面風載重及背風面風載重，任意時間 t 任意高度 z 之風載重可表示為：

$$F_D(z,t) = \sum_{j=1,0} F_{Dj}(z,t)$$

$$F_{D1}(z,t) = \rho U_H \left(\frac{z}{H} \right)^\alpha \int_0^W u_1(\vec{r},t) C_{p1}(\vec{r}) dx \quad (3-3)$$

$$F_{D0}(z,t) = \rho U_H \int_0^W u_0(\vec{r},t) C_{p0}(\vec{r}) dx$$

其中， $u_j(\vec{r},t)$ ：任意時間 t 於建築物第 j 面、任意位置 \vec{r} 之擾動風速； $C_{pj}(\vec{r})$ ：建築物第 j 面、任意位置 \vec{r} 之風壓係數； j ：於迎風面設為 1，背風面設為 0。

高層建築受風振動所激發之振態以第一振態為主，依據前述假設之振態 $\phi(z) = (z/H)^\beta$ ，可計算出順風向擾動風載重之第一振態廣義外力，再藉由頻譜分析技術推導出該擾動風載重之廣義外力形式。

廣義外力 $F_D^*(t)$ 為：

$$\begin{aligned}
 F_D^*(t) &= \int_0^H F_D(z,t)\phi(z)dz \\
 &= \rho U_H \int_0^H \int_0^W u_1(\bar{r},t)C_{p1}(\bar{r})\left(\frac{z}{H}\right)^{\alpha+\beta} dx dz + \rho U_H \int_0^H \int_0^W u_0(\bar{r},t)C_{p0}(\bar{r})\left(\frac{z}{H}\right)^{\beta} dx dz \quad (3-4)
 \end{aligned}$$

廣義外力頻譜可表示為：

$$S_D^*(f) = (\rho U_H^2 W H I_{\bar{z}})^2 S_u^*(f) \chi_R(f) \quad (3-5)$$

其中， $I_{\bar{z}}$ ：等效結構高度位置之逼近流場紊流強度； \bar{z} ：等效結構高度，本文設定為 0.6 倍結構高度； $S_u^*(f)$ ：正規化風速頻譜； $\chi_R(f)$ ：共振部份之氣動力阻抗函數（admittance function），表示如下：

$$\chi_R(f) = |J_x(f)| \left[C_W^2 |J_z^1(f)| + 2C_W C_l |J_z^2(f)| N(f) + C_l^2 |J_z^3(f)| \right] \quad (3-6)$$

$$\begin{aligned}
 |J_z^1(f)| &= \frac{1}{H^2} \int_0^H \int_0^H R_z(\Delta z, f) \left(\frac{z_1}{H}\right)^{\alpha+\beta} \left(\frac{z_2}{H}\right)^{\alpha+\beta} dz_1 dz_2 \\
 |J_z^2(f)| &= \frac{1}{H^2} \int_0^H \int_0^H R_z(\Delta z, f) \left(\frac{z_1}{H}\right)^{\alpha+\beta} \left(\frac{z_2}{H}\right)^{\beta} dz_1 dz_2 \\
 |J_z^3(f)| &= \frac{1}{H^2} \int_0^H \int_0^H R_z(\Delta z, f) \left(\frac{z_1}{H}\right)^{\beta} \left(\frac{z_2}{H}\right)^{\beta} dz_1 dz_2 \\
 |J_x(f)| &= \frac{1}{W^2} \int_0^W \int_0^W R_x(\Delta x, f) dx_1 dx_2
 \end{aligned} \quad (3-7)$$

其中， $R_z(\Delta z, f)$ 、 $R_x(\Delta x, f)$ ：z 軸與 x 軸之 coherence function； $N(f)$ ：背風面與迎風面之間的 coherence function（參考書目 7、8、10）。分列如下：

$$\begin{aligned}
N(f) &= \frac{1}{\eta} - \frac{1}{2\eta^2} (1 - e^{-2\eta}), \quad \eta = \frac{C_N f D}{U_{\frac{1}{2}H}} \\
R_z(\Delta z, f) &= \exp\left(-\frac{f C_z |z_1 - z_2|}{U_H}\right) \\
R_x(\Delta x, f) &= \exp\left(-\frac{f C_x |x_1 - x_2|}{U_H}\right)
\end{aligned} \tag{3-8}$$

其中， f 為頻率(Hz)， U_H 、 $U_{2H/3}$ 為建築物高度 H 及 $2H/3$ 處之平均風速， D 為特徵尺度， C_N 、 C_x 、 C_z 為相關函數無因次係數，Solari 等建議分別為 15.4、11.5、11.5。

分析過程中所使用之 coherence function 為 Zhou and Kareem (2001)、Solari (1993) (參考書目 7、8、10) 建議之公式。惟該相關性公式是依據逼近流場空間上之相關性推導而得，並未考慮鈍體氣動力現象諸如氣流分離及尾跡等對建築物表面壓力之影響。本研究即嘗試以風壓模型進行風洞試驗，藉由同步量測技術瞬間擷取模型表面壓力測點之風壓值，以計算壓力在空間上實際之相關性，並迴歸出簡單形式之經驗公式以符合工程使用之便利性。

得到擾動風載重之廣義外力頻譜後，即可根據隨機振動理論，透過 frequency response function $H(\omega)$ 計算擾動風載重共振部份之均方根值，並假設其在高度上之分配方式與慣性力相同而得到各樓層擾動風載重之共振值。因此任意高度處之風載重共振部份以下列形式表示：

$$\begin{aligned}
F_{D,R}(z) &= m(z) (2\pi f_0)^2 \phi(z) \sigma_R \\
&= (2\beta + 1) \frac{1}{H} \left(\frac{z}{H}\right)^\beta \left[\frac{\pi f_0 S_D^*(f_0)}{4\xi} \right]^{\frac{1}{2}} \\
&= (2\beta + 1) (\rho U_H^2 W I_z) \left(\frac{z}{H}\right)^\beta \left[\frac{\pi f_0 \chi_R(f_0) S_u^*(f_0)}{4\xi} \right]^{\frac{1}{2}}
\end{aligned} \tag{3-9}$$

擾動風載重之背景部份

建築物擾動風載重背景部份之計算近似於共振部分，惟其 $H(\omega)$ 值等於 1。以此方式計算之設計風載重為假設風力在空間上為完全相關之等值靜態風載重，因此若直接使用任意高度處之局部擾動風力，做為計算該位置擾動風載重背景部份之基礎，則需針對不同高度間之風力相關性進行修正。本文將以相關性折減因子來修正擾動風載重背景部份之數值。

建築物受風作用下之順風向基底剪力歷時可表示為：

$$\begin{aligned} Q(t) &= \int_0^H F_D(z, t) dz \\ &= \rho U_H \int_0^H \int_0^W u_1(\bar{r}, t) C_{p1}(\bar{r}) \left(\frac{z}{H}\right)^\alpha dx dz + \rho U_H \int_0^H \int_0^W u_0(\bar{r}, t) C_{p0}(\bar{r}) dx dz \end{aligned} \quad (3-10)$$

順風向基底剪力頻譜 $S_Q(f)$ 即為：

$$S_Q(f) = (\rho U_H^2 W H I_z)^2 S_u^*(f) \chi_B(f) \quad (3-11)$$

其中， $\chi_B(f)$ ：背景部份(基底剪力)之氣動力阻抗函數(admittance function)

$$\begin{aligned} \chi_B(f) &= |J_x(f)| \left[C_w^2 |\tilde{J}_z^1(f)| + 2C_w C_l |\tilde{J}_z^2(f)| N(f) + C_l^2 |\tilde{J}_z^3(f)| \right] \\ |\tilde{J}_z^1(f)| &= \frac{1}{H^2} \int_0^H \int_0^H R_z(\Delta z, f) \left(\frac{z_1}{H}\right)^\alpha \left(\frac{z_2}{H}\right)^\alpha dz_1 dz_2 \\ |\tilde{J}_z^2(f)| &= \frac{1}{H^2} \int_0^H \int_0^H R_z(\Delta z, f) \left(\frac{z_1}{H}\right)^\alpha dz_1 dz_2 \\ |\tilde{J}_z^3(f)| &= \frac{1}{H^2} \int_0^H \int_0^H R_z(\Delta z, f) dz_1 dz_2 \end{aligned} \quad (3-12)$$

此處提供之設計風載重為空間上完全相關之等值靜態風載重。因

此若直接使用任意高度 z 處之局部擾動風力，做為計算該位置擾動風載重背景部份之基礎，則需針對不同高度間之風力相關性進行修正。本文以相關性折減因子（correlation reduction factor） λ_Q 來修正擾動風載重背景部份之數值，定義如下：

$$\lambda_Q^2 = \frac{\int_0^\infty S_Q(f)df}{\int_0^\infty S_Q^*(f)df} \quad (3-13)$$

其中， $S_Q^*(f)$ 是假設空間相關性為完全相關所推導而得之基底剪力頻譜，亦即 $R_z(\Delta z, f) = 1$ ， $R_x(\Delta x, f) = 1$ ， $N(f) = 1$ 。

因此可導出下列關係：

$$|\tilde{J}_z^1(f)| = \frac{1}{(1+\alpha)^2}, \quad |\tilde{J}_z^2(f)| = \frac{1}{(1+\alpha)}, \quad |\tilde{J}_z^3(f)| = 1, \quad |\tilde{J}_x(f)| = 1$$

$$S_Q^*(f) = (\rho U_H^2 W H I_z)^2 \left[\frac{C_w^2}{(1+\alpha)^2} + \frac{2C_w C_l}{1+\alpha} + C_l^2 \right] S_u^*(f) \quad (3-14)$$

如此可得到迎風面與背風面之等值靜態風載重背景部份（擾動之均方根值），分別為：

$$F_{D1,B}(z) = \lambda_Q \rho U_H^2 \left(\frac{z}{H} \right)^\alpha W I_z C_w \quad (3-15)$$

$$F_{D0,B}(z) = \lambda_Q \rho U_H^2 W I_z C_l$$

故順風向之等值靜態風載重背景部份（擾動之均方根值）可表示成迎風面與背風面之合：

$$F_{D,B}(z) = \lambda_Q \rho U_H^2 W I_{\bar{z}} \left[\left(\frac{z}{H} \right)^\alpha C_w + C_l \right] \quad (3-16)$$

等值靜態風載重

根據前述之推導，任意高度 z 處之等值靜態風載重 $D(z)$ 可表示為：

$$D(z) = \bar{F}_D(z) + g_D \sigma_D(z) = G(z) \bar{F}_D(z) \quad (3-17)$$

$$\text{其中， } \sigma_D(z) = \sqrt{F_{D,B}^2(z) + F_{D,R}^2(z)}$$

陣風反應因子

$$G(z) = 1 + g_D \frac{\sigma_D(z)}{\bar{F}_D(z)}$$

$$\frac{\sigma_D(z)}{\bar{F}_D(z)} = 2I_{\bar{z}} \frac{\left\{ \lambda_Q^2 \left[\left(\frac{z}{H} \right)^\alpha C_w + C_l \right]^2 + \left[(2\beta + 1)^2 \left(\frac{z}{H} \right)^{2\beta} \frac{\pi f_0 \chi_R(f_0) S_u^*(f_0)}{4\xi} \right]^2 \right\}^{1/2}}{\left(\frac{z}{H} \right)^{2\alpha} C_w + C_l} \quad (3-18)$$

第二節 橫風向及扭轉向設計風力

橫風向及扭轉向風力是源自渦散分離及紊流尾跡等現象，產生橫向不平衡風壓及不對稱風壓所造成，其學理較為複雜，各國風力規範尚無一致之規定。國內現行「建築物耐風設計規範及解說」之橫風向及扭轉向設計風力是參考日本 AIJ 1996（參考書目 2）的相關規定研擬而成，其推導方式基本上是以矩形柱體在特定地況形成之逼近流場作用下，藉由縮尺模型之高頻力平衡儀風洞試驗量取橫風向及扭轉向風力頻譜，並迴歸出經驗公式。再配合頻譜分析及隨機振動理論計算相對應之設計風載重。由於 AIJ 使用之逼近流場與國內規範定義之標準地況有所差異，同時風工程理論與風洞實驗方法亦與時俱進，日益普遍之電子式風壓掃瞄系統可同步量測風壓而得到更完整的風力資料，因此本計劃提出下列 2 點做為橫風向及扭轉向等值靜態風載重評估模式之修正：

1. 風洞試驗：根據國內規範定義之標準地況，配合具代表性建築幾何形狀製作風壓模型，進行建築物表面風壓之同步量測，並計算橫風向及扭轉向之風力頻譜，詳細實驗設計請參閱風洞試驗一節。
2. 將擾動風力區分為共振部份與背景部份，前者在高度上之分配方式假設與慣性力相同。後者則根據風洞實驗觀察之結果，假設在高度上為均勻分配之形式。

A. 橫風向設計風載重

對於結構斷面在來風方向為對稱之建築物而言，理論上兩側之平均風力大小相同而方向相反，兩側風力相加之橫風向平均值即為零。

而本計劃推導之橫風向設計風載重是以矩形斷面為基本假設，因此平均設計風載重為零。

1. 擾動值之共振部份

$$F_{L,R}(z) = m(z)(2\pi f_0)^2 \phi(z) \sigma_L$$

$$= \frac{m(z)\phi(z)}{\int_0^H m(z)\phi^2(z)dz} \left[\frac{\pi f_0 S_{F_L}(f_0)}{4\xi} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3-19)$$

令結構振態 $\phi(z) = \left(\frac{z}{H}\right)^\beta$ ，結構質量在建築物高度上為均勻分布， $m(z) = m = \text{const.}$ 。

$$\text{因此 } \int_0^H m(z)\phi^2(z)dz = \frac{mH}{2\beta+1}$$

代入 3-19 式可得

$$F_{L,R}(z) = (2\beta+1) \frac{1}{H} \left(\frac{z}{H}\right)^\beta \left[\frac{\pi f_0 S_{F_L}(f_0)}{4\xi} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3-20)$$

其中， $F_{L,R}(z)$ ：高度 z 處之擾動值共振部份，L 指昇力，R 為共振； $m(z)$ ： z 高度處之建築物質量； f_0 ：建築物橫風向振動之自然頻率； $\phi(z)$ ：結構振態； σ_L ：廣義座標昇力共振部份之均方根值； H ：建築物總高度； ξ ：結構阻尼比； $S_{F_L}(f_0)$ ：在結構自然頻率處之橫風向廣義座標昇力頻譜值。

2. 擾動值之背景部份

$$F_{L,B}(z) = 0.5\rho U_H^2 \lambda_L C'_L(z) D \quad (3-21)$$

$$\lambda_L = \frac{|F'_{L_base}|}{\left| \int_0^H F'_L(z) dz \right|} \quad (3-22)$$

其中， U_H ：建築物高度之平均風速； $C'_L(z)$ ：高度 z 處未考慮空間相關性之擾動昇力係數； $F'_L(z)$ ：高度 z 處未考慮空間相關性之擾動昇力； F'_{L_base} ：考慮空間相關性之基底擾動昇力； λ_L ：擾動昇力係數之空間相關性修正因子； D ：特徵尺度，此處為建築物深度。

3. 橫風向設計風載重

合併上述擾動值之共振及背景部份，可得到任一高度 z 處之橫風向設計風載重 $W_L(z)$ 為：

$$W_L(z) = g_L \sqrt{F_{L,B}^2(z) + F_{L,R}^2(z)} \quad (3-23)$$

$$F_{L,B}(z) = 0.5 \rho U_H^2 \lambda_L C'_L(z) D$$

$$F_{L,R}(z) = (2\beta + 1) \frac{1}{H} \left(\frac{z}{H} \right)^\beta \left[\frac{\pi f_0 S_{F_L}(f_0)}{4\xi} \right]^{\frac{1}{2}}$$

g_L ：橫風向振動之尖峰因子(peak factor)

B. 扭轉向設計風載重

對於結構斷面在來風方向為對稱之建築物而言，理論上迎風面與背風面以及兩側面之平均扭力大小相同而方向相反，四面相加之扭矩平均值即為零。而本計劃推導之扭轉向設計風載重是以矩形斷面為基本假設，因此平均設計風載重為零。

風載重推導原理與橫風向一致。

1. 擾動值之共振部份

$$\begin{aligned}
 F_{T,R}(z) &= I_m(z)(2\pi f_0)^2 \phi(z) \sigma_T \\
 &= \frac{I_m(z)\phi(z)}{\int_0^H I_m(z)\phi^2(z)dz} \left[\frac{\pi f_0 S_{F_T}(f_0)}{4\xi} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3-24)
 \end{aligned}$$

令結構振態 $\phi(z) = \left(\frac{z}{H}\right)^\beta$ ，結構質量在建築物高度上為均勻

分布， $I_m(z) = I_m = \text{const.}$ 。

$$\text{因此 } \int_0^H I_m(z)\phi^2(z)dz = \frac{I_m H}{2\beta+1}$$

代入 3-24 式可得

$$F_{T,R}(z) = (2\beta+1) \frac{1}{H} \left(\frac{z}{H}\right)^\beta \left[\frac{\pi f_0 S_{F_T}(f_0)}{4\xi} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3-25)$$

其中， $F_{T,R}(z)$ ：高度 z 處之擾動值共振部份， T 指扭力， R 為共振； $I_m(z)$ ： z 高度處之建築物質量慣性矩； f_0 ：建築物扭轉向振動之自然頻率； $\phi(z)$ ：結構振態； σ_T ：廣義座標扭力共振部份之均方根值； H ：建築物總高度； ξ ：結構阻尼比； $S_{F_T}(f_0)$ ：在結構自然頻率處之扭轉向廣義座標扭力頻譜值。

2. 擾動值之背景部份

$$F_{T,B}(z) = 0.5\rho U_H^2 \lambda_T C_T'(z) BD \quad (3-26)$$

$$\lambda_T = \frac{|F'_{T_base}|}{\left| \int_0^H F'_T(z) dz \right|} \quad (3-27)$$

其中， U_H ：建築物高度之平均風速； $C'_T(z)$ ：高度 z 處未考慮空間相關性之擾動扭力係數； $F'_T(z)$ ：高度 z 處未考慮空間相關性之擾動扭力； F'_{T_base} ：考慮空間相關性之基底擾動扭力； λ_T ：擾動扭力係數之空間相關性修正因子； B ：特徵尺度，此處為建築物寬度； D ：特徵尺度，此處為建築物深度。

3. 扭轉向設計風載重

合併上述擾動值之共振及背景部份，可得到任一高度 z 處之扭轉向設計風載重 $W_T(z)$ 為：

$$W_T(z) = g_T \sqrt{F_{T,B}^2(z) + F_{T,R}^2(z)} \quad (3-28)$$

$$F_{T,B}(z) = 0.5 \rho U_H^2 \lambda_T C'_T(z) B D$$

$$F_{T,R}(z) = (2\beta + 1) \frac{1}{H} \left(\frac{z}{H} \right)^\beta \left[\frac{\pi f_0 S_{F_T}(f_0)}{4\xi} \right]^{\frac{1}{2}}$$

g_T ：扭轉向振動之尖峰因子(peak factor)

第四章 最高居室樓層側向加速度

國內現行「建築物耐風設計規範及解說」僅針對順風向建築物最高居室樓層之尖峰側向加速度，提出了簡易計算式。至於橫風向與扭轉向所造成的側向加速度，則規定以可信的方法或風洞試驗計算之。另外於該部分之解說中則提及橫風向與扭轉向尖峰加速度，可由建築物加上橫風向風力或扭矩，於居室樓層所求得之橫風向位移與扭轉角分別乘以橫風向及扭轉向之自然頻率(rad/sec)之平方值而得。這些方式是以 50 年迴歸期設計風速造成之最大位移為基礎，透過風速之比值轉換為相對於半年迴歸期之尖峰側向加速度。對於許多高層建築，擾動風力的共振效應對於側向加速度的影響最大。然而相同結構頻率於 50 年與半年迴歸期所對應的風力頻譜值有所不同，相對應之設計風載重並非為該二迴歸期設計風速比值之平方倍。因此直接由 50 年迴歸期之結構位移推論半年迴歸期之尖峰側向加速度可能會有相當的誤差，本計畫對此現象進行探討並提出修正模式。

對於最高居室樓層容許之尖峰側向加速度，因為涉及人種、氣候及國情等等之不同，各國規範皆有所差異，然其研究及測試方法是值得參考。但若要進行本國國民相關舒適度測試，以建立適合於台灣人民之容許尖峰側向加速度上限，是需要投入大量人力物力，在多年期之計劃支持下方能合理評估。故本文此處列出日本建築學會於 2004 年出版的「建築振動舒適度評估準則」(Guidelines for the evaluation of habitability to building vibration) (參考書目 16) 中提出的居住性能評估基本概念，做為參考。

以下列舉國內規範及美國規範 ASCE7-02 (參考書目 1) 之尖峰側向加速度值計算方式，並提出本計畫研擬之簡易修正公式。

第一節 相關文獻

1. 內政部「建築物耐風設計規範及解說」（參考書目 21）

順風向振動引致建築物最高居室樓層之尖峰加速度 A_D （規範 4.1 式）：

$$A_D = \frac{1.128\bar{G} - 1}{1.128\bar{G}} \times \frac{D^*(2\pi f_n)^2}{(3.34)^2} \quad (4-1)$$

其中 D^* 為順風向設計風力作用下，經結構分析所得建築物最高居室樓層順風向之位移； f_n 為建築物順風向之自然頻率； \bar{G} 為建築物之陣風反應因子。

D^* 為順風向設計風力作用下，經結構分析所得建築物最高居室樓層順風向之位移， $D^*(2\pi f_n)^2$ 為建築物最高居室樓層順風向風力造成之側向加速度。50 年迴歸期與半年迴歸期的風速比值為 3.34，風力比值為 (3.34×3.34) ，故 $D^*(2\pi f_n)^2 / (3.34)^2$ 為半年迴歸期，對應於一小時平均風速之順風向設計風力（靜態與動態）造成之建築物最高居室樓層側向加速度。4-1 式則為半年迴歸期，對應於一小時平均風速之順風向動態風力造成之建築物最高居室樓層側向加速度。

另外，對於橫風向及扭轉向之尖峰加速度，可由建築物加上橫風向風力或扭矩，於最高居室樓層所求得之橫風向位移及扭轉角分別乘以 $4\pi^2 f_a^2$ 與 $4\pi^2 f_t^2$ 而得（ f_a 、 f_t 分別為橫風向及扭轉向振動之自然頻率）。

該規範對於容許最高居室樓層尖峰加速度上限，設定為半年迴歸期風速作用下為 $0.05 m/s^2$ 。

2. 美國規範 ASCE (參考書目 1)

順風向振動之擾動加速度均方根值 $\sigma_{\ddot{x}}(z)$:

$$\sigma_{\ddot{x}}(z) = 0.85 \frac{\rho B h C_{fx} \bar{V}_z^2}{m_1} I_z K R \phi(z) \quad (4-2)$$

其中， ρ ：空氣密度； $\phi(z) = (z/h)^\xi$ ：結構基本振態； C_{fx} ：順風向平均風力係數， $\doteq 1.3(L/B)$ 之函數； $m_1 = \int_0^h \mu(z) \phi^2(z) dz$ ； $\mu(z)$ ：單位高度質量； $K = (1.65)^\alpha / (\alpha + \xi + 1)$ ； α ：每小時平均風速之指數率指數； $\bar{V}_z = \hat{b}(\bar{z}/33)^\alpha V$ ，每小時平均風速； V ：參考高度處之地況 C 三秒鐘陣風風速； R ：共振反應因子。

4-2 式之推導，根據義大利學者 Solari (參考書目 7、8) 1993 年之分析可知，一般化內力反應之共振部分可寫為：

$$\begin{aligned} \sigma_R^2 &= \frac{\pi f_0}{4\beta} S_F(f_0) \\ &= \frac{\pi f_0}{4\beta} \left[\rho B h C_D \bar{V}(\bar{z}) \sigma_v(\bar{z}) K_b \right]^2 S_{veq}^*(f_0) \chi(f_0, \tau) \\ &= \frac{\pi f_0}{4\beta} \left[\rho B h C_D \bar{V}^2(\bar{z}) I_v(\bar{z}) \frac{1.66^\alpha}{1 + \alpha + \xi} \right]^2 S_{veq}^*(f_0) \chi(f, \tau) \\ &= \frac{\pi f_0}{4} \left[\rho B h C_D \bar{V}^2(\bar{z}) I_v(\bar{z}) \frac{1.66^\alpha}{1 + \alpha + \xi} \right]^2 \frac{1}{\beta} S_{veq}^*(f_0) \chi(f, \tau) \\ \sigma_R &= \left(\frac{\pi}{4} \right)^{1/2} \left[\rho B h C_D \bar{V}^2(\bar{z}) I_v(\bar{z}) \frac{1.66^\alpha}{1 + \alpha + \xi} \right] \sqrt{\frac{1}{\beta} f_0 S_{veq}^*(f_0) \chi(f, \tau)} \end{aligned} \quad (4-3)$$

其中， $R = \sqrt{\frac{1}{\beta} f_0 S_{veq}^*(f_0) \chi(f, \tau)}$ ，共振之陣風反應因子； $\left(\frac{\pi}{4}\right)^{1/2} = 0.886$

因此，建築物任意高度 z 處之擾動加速度均方根值 $\sigma_{\ddot{x}}(z)$ ：

$$\begin{aligned}\sigma_{\ddot{x}}(z) &= \frac{\sigma_R}{m_1} \phi(z) \\ &\cong \frac{0.85 \phi(z) \rho B h C_D \bar{V}^2(\bar{z})}{m_1} I_v(\bar{z}) K R\end{aligned}$$

第二節 簡易修正公式

該方法是以國內規範計算所得之等值靜態風載重進行頂層樓加速度推估的簡易公式。基本流程是先計算廣義擾動外力與廣義質量，此處假設廣義擾動外力為各樓層設計風載重與各樓層振態乘積之和，並令最高樓層處之基本振態值為 1.0。設計風載重是根據國內風力規範，在半年迴歸期風速作用下所計算而之值。根據前述方式所得之廣義外力與廣義質量，透過隨機振動理論即可求得頂樓振動尖峰加速度。因為擾動外力是採用規範計算之設計風載重，該值已包含尖峰因子在內，故計算結果為風力作用方向之振動尖峰加速度值。需注意的是，援用之等值靜態設計風載重之迴歸期是半年而非結構抗風系統使用之 50 年。

以連續系統表示，可寫為：

$$\begin{aligned}
 A_i(z) &= \left(\frac{\int_0^H f_i(z)\phi_i(z)dz}{\left(\int_0^H m_i(z)\phi_i^2(z)dz\right)\omega_i^2} \times \omega_i^2 \right) \times \phi_i(z) \\
 &= \frac{\int_0^H f_i(z)\phi_i(z)dz}{\int_0^H m_i(z)\phi_i^2(z)dz} \times \phi_i(z)
 \end{aligned} \tag{4-4}$$

其中， $A_i(z)$ ： z 處高度之樓層於 i 向振動之尖峰加速度； i ：振動方向，可分別為順風向、橫風向或扭轉向； H ：建築物高度； $f_i(z)$ ：高度 z 處於 i 向振動方向上，不含平均風力之半年迴歸期設計風力； $\phi_i(z)$ ： i 向振動之結構基本振態，令 $\phi_i(H)=1$ ； ω_i ： i 向振動之結構自然頻率(單位 rad/sec)， $\omega_i=2\pi f_i$ ； $m_i(z)$ ：高度 z 處 i 向振動之質量或質量慣性矩。

以離散系統表示，可寫為：

$$A_i(j) = \frac{\sum_{j=1}^k f_i(j)\phi_i(j)}{\sum_{j=1}^k m_i(j)\phi_i^2(j)} \times \phi_i(j) \quad (4-5)$$

其中， $A_i(j)$ ：第 j 樓層於 i 向振動之尖峰加速度； i ：振動方向，可分別為順風向、橫風向或扭轉向； $f_i(j)$ ：第 j 樓層於 i 向振動方向上，不含平均風力之半年迴歸期設計風力； $\phi_i(j)$ ： i 向振動之結構基本振態，令 $\phi_i(k)=1$ ； k ：樓層總數； ω_i ： i 向振動之結構自然頻率(單位 rad/sec)， $\omega_i = 2\pi f_i$ ； $m_i(j)$ ：第 j 樓層 i 向振動之質量或質量慣性矩。

由於加速度是來自於擾動外力，因此前述計算廣義擾動外力所用之順風向設計風載重需扣除平均風力的貢獻。如此計算出順風向、橫風向與扭轉向加速度後，即可依據現行規範之計算流程求得最高居室樓層角隅處之側向加速度。

本計畫之研究目標在於針對順風向、橫風向與扭轉向所造成的側向加速度，提出不需要經過完整結構程式分析求取位移反應的簡易計算式。至於規範所訂定之最高居室樓層尖峰側向加速度之上限 0.05 m/s^2 之合適性評估，需根據大量的本土實測資料方能做合理修訂，該項目已超出本計畫範疇，有待後續相關之研究計劃加以探討。本文僅提出日本建築學會於 2004 年公佈之居住性能評估報告，供各界參考。

第三節 日本建築學會之居住性能評估

日本建築學會於 2004 年出版的「建築振動舒適度評估準則」(Guidelines for the evaluation of habitability to building vibration) (參考書目 16) 中提出了下列居住性能評估的基本概念：

因風而產生之建築物的水平振動，影響居住性能的評估原則，不僅應考慮建築物的用途，設計者或建築者應參考以人對水平振動的知覺率為基礎所訂出的性能評估曲線，進行評估。具體的性能評估程序為：設定性能目標，計算出迴歸期一年的水平方向之最大振動加速度，根據建築物自然頻率，配合圖 4-1 的性能評估曲線進行之。

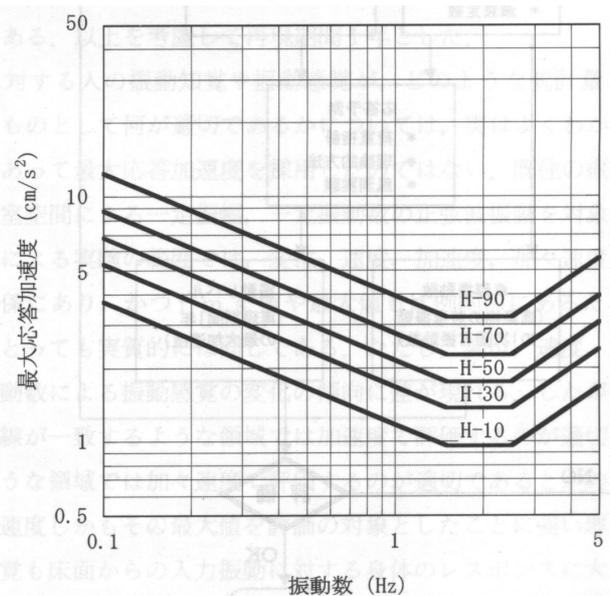


圖 4-1 風所造成水平振動之性能評估曲線

(資料來源：參考書目 16)

進行舒適度評估時，建築物的振動頻率範圍，應考慮包含從低樓層到高樓建築物之自然頻率，從 0.1Hz 到 5Hz。在建築物的功能性方面，評估準則針對以居住用途、辦公用途及其他用途的建築物風振提

出下列參考要點。

(1) 居住用途

一般對於居住空間的期望就是不希望感覺到振動。住宅建築的使用者與辦公大樓不同，居住者包含所有年齡層從老人到小孩，有時甚至有靜養的病人。且針對住宅建築進行振動的評估時，必須包含一整天不能限定時間。對於居住用建築，除了要考慮振動當時造成的心理不安因素外，還須要全面檢討振動可能引起的各種生活上的障礙。

(2) 辦公大樓

辦公大樓的情況與住宅不同，一般來說使用者的年齡構成及執勤時間等多少都被限定住。再來就是辦公大樓大多為中高層建築物，上班時間即使發生振動，對於振動極端脆弱的人可以往樓下移動休息。因此，一般來說針對振動的擔憂，不能不把居住用途考慮進去。

(3) 其他特定用途建築物

振動的性能評估對於「最基本的用途為醫院」的建築物必須考慮振動對於住院病患及對手術的影響。至於其他特定用途的建築物，如旅館及展望台等都因使用目的不同自然而然其對象之振動目標性能不同，對應用途之不同，適合個別應對。

振動評估原則上以迴歸期一年之最大反應加速度依據。以迴歸期一年作為評估基準的原因如下。當進行建築物的居住性能檢討時，必定需要評估與生活感覺緊密相關的振動，需要從比較一般日常的建築物的振動狀態來進行判斷。數年一次，或者數十年發生一次的大振動，不能當作常態來看待。相反的，迴歸期比較短的，如因季節所引起的各種不同的強風侵襲，其發生的頻率及強弱的程度是因四季的不同而變化，可能會有局部地區的特殊氣象現象。再來，一般日常的風之統計資料大多是以一年為單位進行統計，是很容易獲得的氣象資料。考慮以上的因素，故取用迴歸期為一年。

與其他加振動源比較時，因風產生的振動有持續比較長時間的特徵。持續時間對於人體感受振動反應的影響之相關研究數據結果並不一致。該文顯示：當振動超過 120 分鐘，有些受測試者時間累積愈長，負荷感覺漸漸變強；但是也有慢慢習慣振動而感覺變弱的案例。當測試感覺評估的種類不同其影響也不同：數據顯示出在 120 分鐘內對振動的感覺漸漸變弱的一方，對不舒服及振動的忍耐力較強；另一方面，暈眩症狀發生的頻率在 60 分鐘後慢慢增加，不過也有在其之後有減少傾向的報告。

圖 4-1 所顯示的 H-10、H-30、H-50、H-70、H-90 曲線分別代表在各種不同的振動條件下，受測試樣本中有 10%、30%、50%、70%、90% 的受測試者可明確感受到的振動幅度。倘若採用圖中的 H-30 曲線作為評估標準，相當於代表，標的建築物平均每年中會發生一次在評估的樓層（最高居室樓層）有 30% 以上的居住者會感受到振動的風擺現象。「建築振動舒適度評估準則」提出了以使用者明確感受百分比的振動評估曲線，然而卻不對個別建築物應採用何種百分比評估曲線提出建議值。準則作者認為個別建築物之風擺性能評估標準所適用的等級，基本上應由設計者做最終判斷。

第五章 高層建築設計風力之風洞試驗

本研究以風壓實驗量取順風向、橫風向及扭轉向等值靜態風載重評估模式所需之風力特性。於風洞物理模擬範圍內影響高層建築所受風力之因素，包括逼近流之風場特性及建築物幾何外形兩大項。

對於逼近流風場之選擇，考慮本計劃是針對國內現行風力規範之修正為標的，因此以規範定義之三類地況做為逼近流風場模擬之依據，以了解不同地況特性對於建築物所受風力之影響。

建築物幾何外形之選取，由於變數相當繁多，一般而言多選擇最為常見且易發生較大風力之斷面為標的。參考現行規範之橫風向、扭轉向風力設計條文，其適用範圍限制在建築物高寬比 3~6 之間、深寬比 0.2~5 之間的近似規則矩形柱體，也已涵蓋大部分常見之建築物外形。故本研究以國內規範限制之範圍為依據，製作不同高寬比、深寬比組合之壓克力模型，以風洞試驗進行建築物表面風壓之量測。

藉由同步量測風壓模型上每一個風壓測點之壓力變化，以頻譜分析技術計算出等值靜態風載重評估模式所需之風力、風壓特性：

- 順風向：平均及擾動風力係數、風力頻譜、水平及垂直向之壓力相關性及迎風面與背風面之壓力相關性；
- 橫風向：各風向之平均及擾動風力係數、風力頻譜。
- 扭轉向：各風向之平均及擾動風力係數、風力頻譜。

本計劃之風洞試驗是根據國內現行規範定義之地況並選取常見之高層建築幾何外型進行風洞試驗。在獲取順風向、橫風向與扭轉向之風力風壓特性，不僅可建立更準確之等值靜態風載重評估模式，同時亦結合國內規範有關地況與風力間之關係，有效反應出屬於國內建築環境之特性。

第一節 逼近流場

本計畫根據國內規範定義之地況，模擬出實驗使用之逼近流場特性。國內規範定義之地況為地況 A：大城市市中心區， $\alpha=0.32$ ， $z_g=500$ 公尺；地況 B：大城市市郊、小市鎮， $\alpha=0.25$ ， $z_g=400$ 公尺；地況 C：平坦開闊之地面或草原或海岸或湖岸地區， $\alpha=0.15$ ， $z_g=300$ 公尺。

利用錐形擾流板和配套之粗糙元及龍齒組合，在風洞之試驗段內建立一能與自然狀況相當之模擬大氣邊界層。利用熱膜探針風速儀在風洞之試驗段內，不同高度下所量測順風方向之平均流速及紊流強度。進行風洞實驗時為了能使縮尺模型的風速量測能適當地用於實際風場，所量測的各個物理量必須對一穩定的參考風速作無因次化，本實驗選取模型上游大氣邊界層高度 δ 的量測風速為參考風速。將各高度平均風速 U_i 除以邊界層高度平均風速 U_δ ，可得無因次化平均風速。圖 5-1 顯示在淡江大學一號邊界層風洞之試驗段內，不同高度順風方向之平均流速及紊流強度隨高度變化之剖面曲線。實驗室所建立之模擬邊界層厚度在轉盤處約 110~120cm。

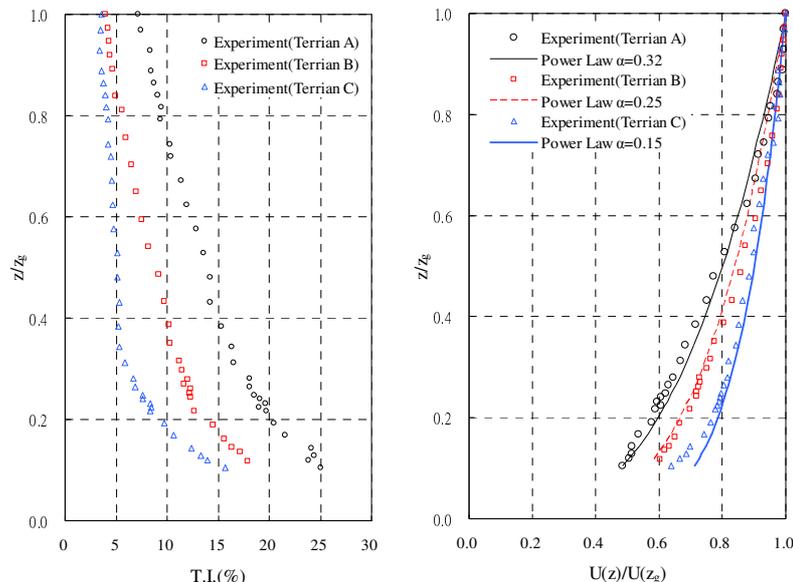


圖 5-1 逼近流場平均風速與紊流強度剖面
(資料來源：本研究整理)

第二節 風壓模型

風壓模型縮尺之大小，根據使用之風洞試驗段幾何尺寸、所模擬逼近流風場之邊界層厚度、模型占風洞試驗段之阻塞比以及實驗量測之方便性，選取約 1/300 之縮尺比例。

本計劃選取之建築物外形分別為：

高寬比：3、6，共 2 組；

深寬比：1/3、1/2、1/1、2/1、3/1，共 5 組。

其中高寬比之計算是以模型高度除以斷面積開根號之值作為代表，而深寬比 1/1 即為正方形斷面。這些外型共可組合出 $5 \times 2 = 10$ 種建築物幾何型式。

實際之模型製作如圖 5-2 所示，共有 3 座以透明壓克力製做之矩柱模型。其中模型 2 在垂直於模型表面的兩個風向角下，可代表兩組深寬比 1/2 及 2/1。同理，模型三可代表兩組高寬比 1/3 及 3/1。另外再藉由調整模型進入風洞試驗段之高度，來代表不同之高寬比。亦即當執行高寬比 3 之實驗時，模型進入風洞試驗段之高度為 30cm；高寬比 6 之實驗，模型進入風洞試驗段之高度為 60cm。

風壓試驗所使用模型之製作要求，重點在於能於其表面開設許多風壓孔，並可保持氣密狀態。同時仍需要有足夠之勁度以防止模型受風作用造成太大之振動，影響壓力量測之準確性，因此將會利用約 3mm~5mm 厚之壓克力透明平板來製作此風壓模型。縮尺模型用於量測作用的風力，並不模擬材料與結構反應，因此壓克力版厚度在於使建築模型成為一個剛性模型，不致產生振動效應即可。模型製作方式為在其表面開設直徑 1mm 風壓孔，並將模型內部淨空以裝設風壓管。最後將模型架設至風洞試驗段，並將風壓管連接至電子式壓力掃描器，並透過電腦對表面風壓進行量測。

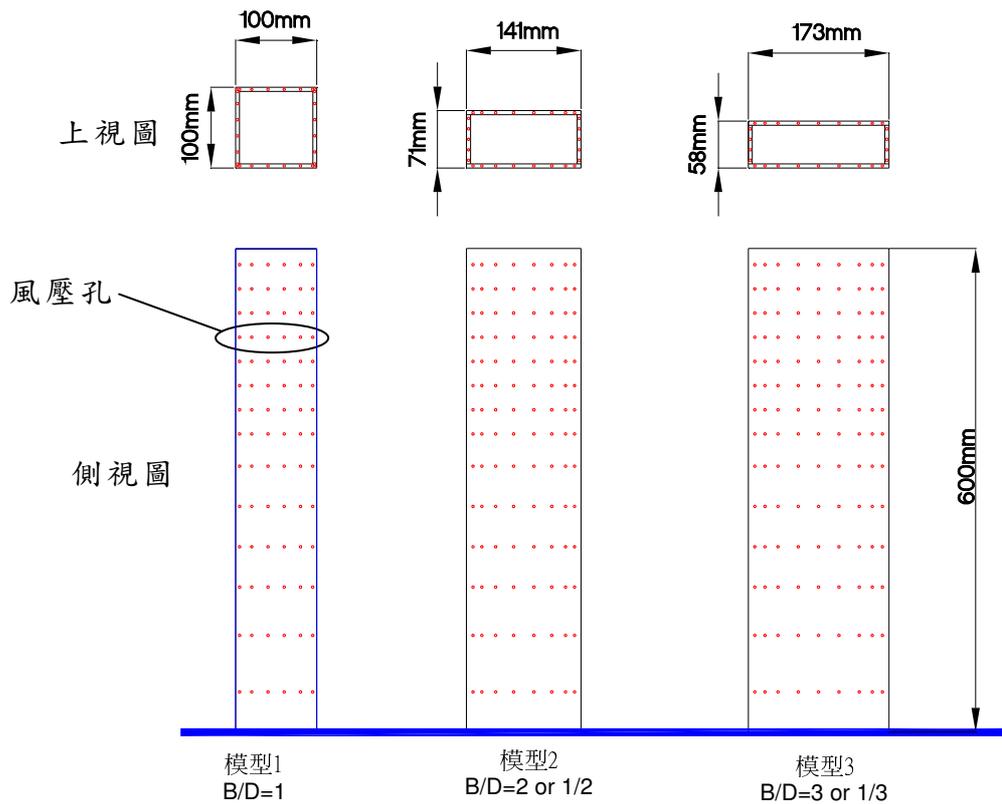


圖 5-2 風壓模型幾何尺寸、風壓孔佈設位置及實驗配置
(資料來源：本研究整理)

高寬比 6 之風壓模型風壓孔分布，於模型高度上分為 14 層，每層佈點環繞模型一圈約有 24~26 點；高寬比 3 之風壓模型風壓孔分布，於模型高度上分為 9 層，每層佈點環繞模型一圈亦約有 24~26 點。因此預計於每一高寬比 6 之風壓模型表面安裝約 350 個風壓孔，每一高寬比 3 之風壓模型表面安裝約 230 個風壓孔，以有效掌握順風向、橫風向及扭轉向之整體風力擾動以及空間上不同位置之壓力相關性。由於風壓孔最多可達 350 個左右，不僅實驗數據龐大，而且此類模型製作相當繁雜，因此在有限之時間及預算下，只能執行次數有限的風洞實驗。

本計劃之風洞試驗，根據上述 3 種地況及 10 種幾何外形之設定，每一種幾何外型之建築物皆需量測在 3 種地況下之風壓特性，因此共有 $10 \times 3 = 30$ 組風洞試驗。

第三節 實驗設備及訊號處理

A. 風洞：

本研究計畫使用之風洞設備為淡江大學風工程研究中心一號邊界層風洞，該風洞屬於吸入、開放型，如圖 5-3。風洞實驗段長 18.0 公尺，其斷面寬 2.0 公尺、高 1.5 公尺。軸流式風扇（axial fan）直徑為 1.8 公尺，由具 75 匹馬力之直流無段變速馬達帶動。風速可經由控制風扇之轉速而得到調整，正常運轉流速範圍為 1.0 m/s 至 15 m/s，最大風速可達 17m/s。風洞進口段之收縮比為 4:1，進口段設有蜂巢管及阻尼網（damping screen），風洞內自由流之紊流強度 0.5%~1.0%。

在風洞實驗段設有直徑 1.8 公尺之旋轉工作平台（turn table）。平台可經由電腦操控轉動，其數位式角度計之量測精度可達 $\pm 0.5^\circ$ 。旋轉台一側設有觀測室，可透過大型之強化玻璃窗對實驗進行觀測。

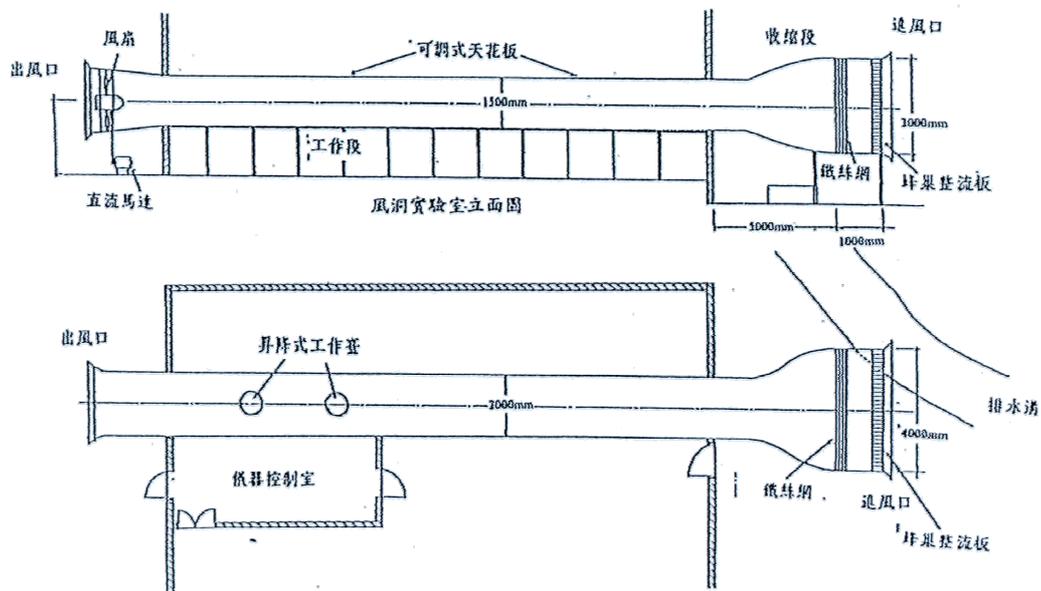


圖 5-3 淡江大學一號邊界層風洞實驗室

(資料來源：參考書目 24)

B.量測儀器：

1.風速量測

本研究風速測量所使用之儀器包括有：

- i.皮托管 (pitot-static tube) — 用於風洞內風速之監控；
- ii.熱風速儀 (thermal anemometer) — 用於對邊界層風速剖面及紊流特性之量測。此套 TSI 公司生產之熱風速儀量測系統包括有 IFA-300 智慧型風速儀(anemometer)、model 1210-20 一般用途熱膜探針(hot film probe)、model 1125 探針率定器(probe calibrator) (圖 5-4)。



圖 5-4 IFA-300 智慧型風速儀、探針及校正儀
(資料來源：本研究整理)

所謂熱風速儀是利用電流通過金屬導線時會使導線溫度升高，而當流體流經金屬表面時會帶走部分熱量之原理來量測流體之速度。其基本電路為惠斯頓電橋(Wheastone bridge)。當探針(probe)所在位置之電阻 R 值因溫度之改變而改變時，會使電橋失去平衡。探測元(sensor)之運作方式可採用恆電流式(constant current)及恆溫式(constant temperature)兩種。

本研究中心之恆溫式流速儀，利用補償電路，因應流速之變動，對流經探測元之電流做瞬間之改變來維持探測元之操作溫度固定不變(因而探測元之電阻亦不變)，使電橋保持平衡狀態。吾人可經由回饋電壓的變化來得知所要量測流場中流速之變化。熱膜探針之探頭，即所謂之探測元為一長 1.0mm 直徑 0.005mm 之石英棒(quartz rod)，上面覆以高純度之鉑金膜(platinum film)，其外，再覆以一層鋁質之保護薄膜。探針是採用 TSI Model 1125 探針率定器依照廠商所設定之標準程序進行率定。探針經過率定後可得到探針回饋電壓和風速間之切確關係。由風速儀所輸出之電子訊號經過類比/數位轉換器(A/D converter)由電腦系統讀取而後進行計算、分析及紀錄、存檔。測試時探針是架設在風洞內由電腦所控制之載具天車上，天車可在三個軸向上作獨立之移動。探測元之軸線呈水平且與逼近流之流向垂直。

2. 壓力量測

本研究計畫採用多頻道電子式風壓掃描器，用來同步擷取作用於建築物表面各點的瞬時風壓，經過適當的處理便可得到結構系統所受之平均風力、擾動風力以及外牆所受之局部風壓。本儀器為 Scanivalve 公司之產品(圖 5-5)，其元件包括：

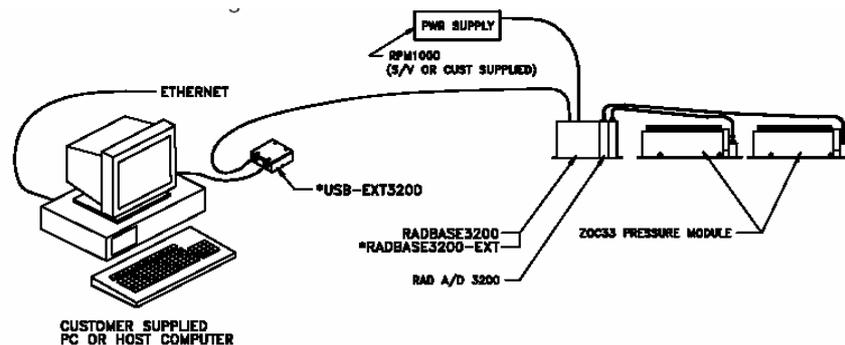


圖 5-5 壓力量測系統
(資料來源：參考書目 25)

(1) 壓力訊號處理系統(RADBASE3200, 圖 5-6)

- 最多可支援 8 組類比訊號轉換成數位訊號之轉換器(A/D MODULE)
- 最多可支援 8 組壓力感應模組, 共 512 個壓力量測點。
- 其類比訊號轉換成數位訊號(A/D convert)解析度達 16bit。
- 最大採樣速率可達 500Hz。
- 採 USB 介面傳輸, 具備網路控制與傳輸功能。

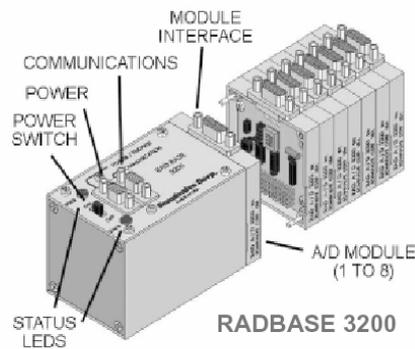
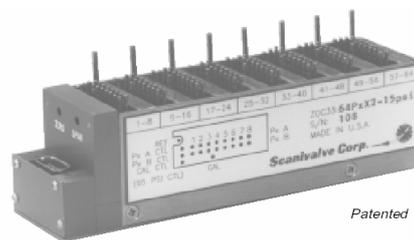


圖 5-6 壓力訊號處理系統(RADBASE3200)
(資料來源: 參考書目 25)

(2) 壓力感應器模組 (ZOC33, 圖 5-7)

- 壓力感應範圍為 $\pm 10\text{in H}_2\text{O}$
- 誤差範圍為 $\pm 0.2\%$



ZOC33/64Px
Pressure Scanner (shown)

圖 5-7 64 頻道壓力感應器模組
(資料來源: 參考書目 25)

實驗中將各個風壓孔之壓力訊號經 PVC 管傳遞至壓力感應器模組，其量得之訊號傳至訊號處理系統計算後所得壓力值傳回電腦。

C. 訊號處理：

當模型表面壓力經管線傳遞至壓力掃描器時，壓力訊號會受風壓管影響而扭曲，訊號中某些頻率會被放大或衰減。此時需將風壓管訊號受扭曲部分還原。訊號還原方式，一般會採用兩種方式，第一種是針對風壓管本身進行處理，例如在管中加裝細管或其他材料，利用物理方式將受扭曲訊號進行放大或衰減，以回復成原有訊號。第二種是求出原始訊號及扭曲訊號之關係，將所取得之扭曲訊號，利用此已知關係，透過數學方法還原成原始訊號。這個過程稱之為管線修正。而本試驗之管線修正，乃採取第二種方式進行修正。修正後之壓力數據再進行乘以各風壓量測點所在區塊之面積，可以得知每一瞬時表面各區塊之風力歷時反應並進行後續分析。

第四節 實驗結果

風洞實驗結果包含風力係數、風力頻譜與實驗誤差三部份。在風力係數部份，因為實驗模型皆為對稱斷面之矩形柱體，理論上平均升力係數與平均扭力係數為零，因此本小結不予討論。此處僅列出平均拖曳力係數、擾動拖曳力係數、擾動升力係數及擾動扭力係數四種風力係數。在風力頻譜部份，則列出順風向、橫風向及扭轉向之基底彎矩、基底扭矩頻譜，共三種風力頻譜。最後，實驗誤差方面，則是針對所有已完成之實驗設備及模型，進行拆除及重新設置後，再進行一次風洞試驗，據此計算同一模型在兩次實驗間造成之誤差。

A. 風力係數

如表 5-1~表 5-3 及圖 5-8~圖 5-10，分別在地況 A、B、C 流場作用下，不同高寬比、不同深寬比之風力係數。圖中橫軸為深寬比 (D/B)，縱軸分別為基底平均拖曳力係數 C_d 、基底擾動拖曳力係數 C_d' 、基底擾動升力係數 C_l' 、基底擾動扭力係數 C_t' 等風力係數，圓形符號為高寬比 3 之模型，三角形符號為高寬比 6 之模型。

風力係數之定義如下：

$$C_d = \frac{\bar{F}_d}{\frac{1}{2}\rho U_H^2 \sqrt{BDH}} \quad (5-1)$$

$$C_d' = \frac{\sigma_{F_d}}{\frac{1}{2}\rho U_H^2 \sqrt{BDH}} \quad (5-2)$$

$$C_l' = \frac{\sigma_{F_l}}{\frac{1}{2}\rho U_H^2 \sqrt{BDH}} \quad (5-3)$$

$$C_t' = \frac{\sigma_t}{\frac{1}{2}\rho U_H^2 BDH} \quad (5-4)$$

其中， \bar{F}_d ：模型順風向基底平均拖曳力； σ_{F_d} 、 σ_{F_t} 、 σ_t ：模型順風向、橫風向、扭轉向基底擾動拖曳力均方根值；B、D、H：模型特徵尺度，此處分別為模型迎風面寬度(垂直於順風向)、深度(垂直於橫風向)及模型高度； U_H 、 ρ ：模型高度之平均風速、空氣密度。

表 5-1 高寬比 3 及 6 地況 A 不同深寬比模型之風力係數

| D/B | C_d | | C_d' | | C_t' | | C_i' | |
|-----|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | $H/\sqrt{BD}=3$ | $H/\sqrt{BD}=6$ | $H/\sqrt{BD}=3$ | $H/\sqrt{BD}=6$ | $H/\sqrt{BD}=3$ | $H/\sqrt{BD}=6$ | $H/\sqrt{BD}=3$ | $H/\sqrt{BD}=6$ |
| 1/3 | 2.120 | 2.200 | 0.642 | 0.410 | 0.223 | 0.154 | 0.112 | 0.058 |
| 1/2 | 1.885 | 2.036 | 0.582 | 0.378 | 0.312 | 0.257 | 0.082 | 0.057 |
| 1/1 | 1.002 | 1.036 | 0.334 | 0.240 | 0.289 | 0.263 | 0.069 | 0.043 |
| 2/1 | 0.749 | 0.702 | 0.229 | 0.164 | 0.424 | 0.289 | 0.088 | 0.079 |
| 3/1 | 0.492 | 0.469 | 0.160 | 0.110 | 0.459 | 0.318 | 0.103 | 0.078 |

(資料來源：本研究整理)

表 5-2 高寬比 3 及 6 地況 B 不同深寬比模型之風力係數

| D/B | C_d | | C_d' | | C_t' | | C_i' | |
|-----|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | $H/\sqrt{BD}=3$ | $H/\sqrt{BD}=6$ | $H/\sqrt{BD}=3$ | $H/\sqrt{BD}=6$ | $H/\sqrt{BD}=3$ | $H/\sqrt{BD}=6$ | $H/\sqrt{BD}=3$ | $H/\sqrt{BD}=6$ |
| 1/3 | 2.233 | 2.363 | 0.459 | 0.294 | 0.167 | 0.104 | 0.086 | 0.039 |
| 1/2 | 1.788 | 1.919 | 0.391 | 0.260 | 0.255 | 0.180 | 0.059 | 0.039 |
| 1/1 | 1.098 | 1.255 | 0.258 | 0.198 | 0.282 | 0.315 | 0.056 | 0.033 |
| 2/1 | 0.682 | 0.751 | 0.149 | 0.119 | 0.237 | 0.246 | 0.076 | 0.067 |
| 3/1 | 0.521 | 0.538 | 0.114 | 0.080 | 0.282 | 0.214 | 0.069 | 0.073 |

(資料來源：本研究整理)

表 5-3 高寬比 3 及 6 地況 C 不同深寬比模型之風力係數

| D/B | C_d | | C_d' | | C_t' | | C_i' | |
|-----|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | $H/\sqrt{BD}=3$ | $H/\sqrt{BD}=6$ | $H/\sqrt{BD}=3$ | $H/\sqrt{BD}=6$ | $H/\sqrt{BD}=3$ | $H/\sqrt{BD}=6$ | $H/\sqrt{BD}=3$ | $H/\sqrt{BD}=6$ |
| 1/3 | 1.916 | 2.186 | 0.287 | 0.168 | 0.101 | 0.050 | 0.057 | 0.023 |
| 1/2 | 1.631 | 1.878 | 0.251 | 0.151 | 0.184 | 0.092 | 0.044 | 0.020 |
| 1/1 | 0.986 | 1.280 | 0.177 | 0.121 | 0.221 | 0.272 | 0.039 | 0.024 |
| 2/1 | 0.621 | 0.754 | 0.099 | 0.076 | 0.149 | 0.240 | 0.052 | 0.050 |
| 3/1 | 0.472 | 0.542 | 0.074 | 0.053 | 0.165 | 0.164 | 0.049 | 0.063 |

(資料來源：本研究整理)

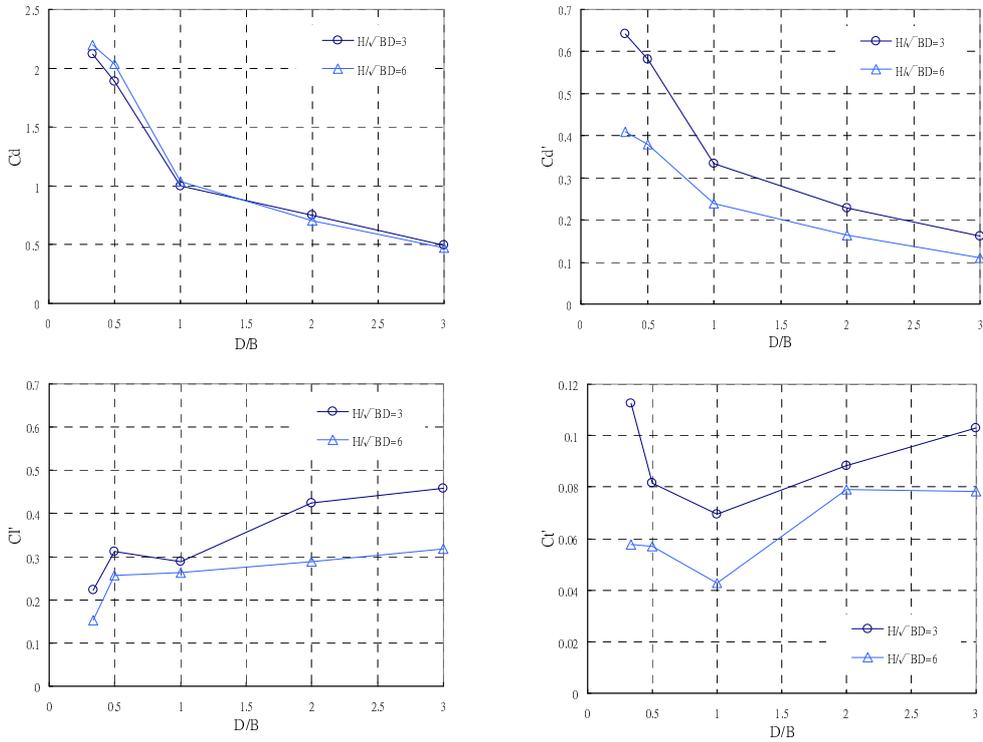


圖 5-8 地況 A 不同模型之風力係數 (資料來源：本研整理)

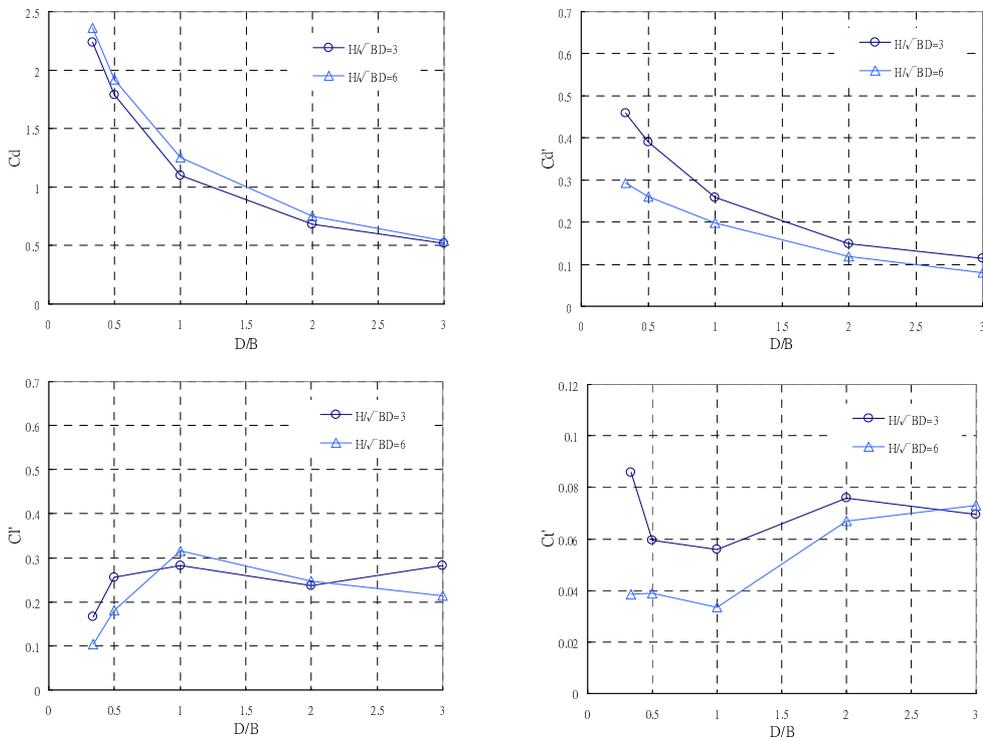


圖 5-9 地況 B 不同模型之風力係數 (資料來源：本研整理)

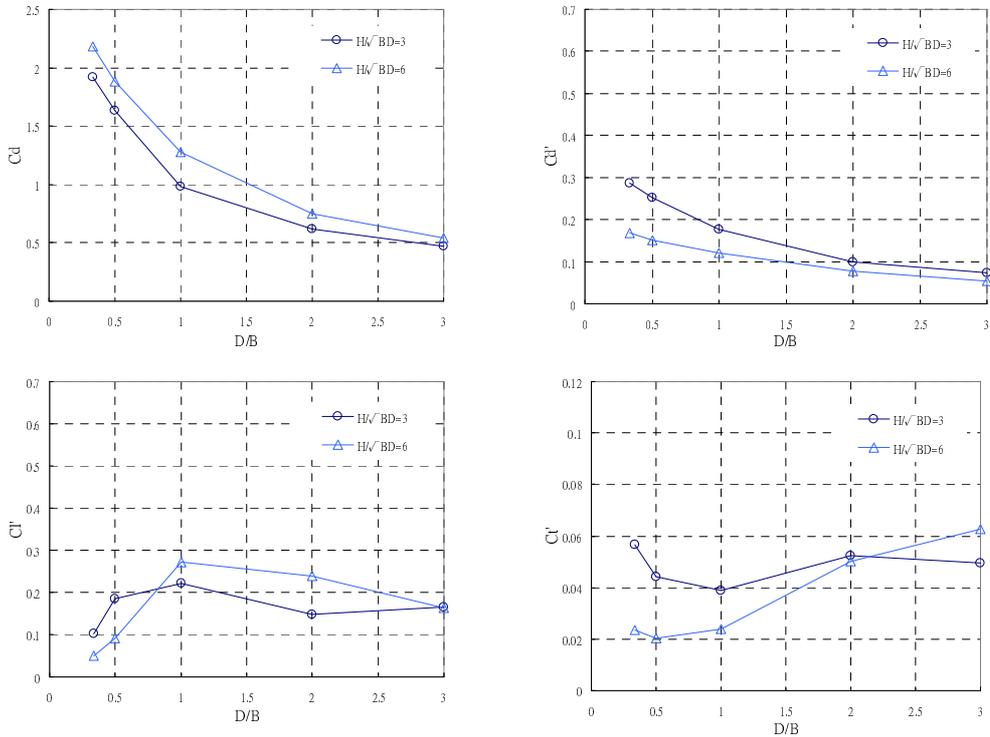


圖 5-10 地況 C 不同模型之風力係數 (資料來源：本研整理)

1. 順風向

影響本文風力係數之因子包括無因次化使用之特徵尺度及風力本身之大小。因為本計劃設計之不同深寬比(D/B)模型之斷面積皆固定為 $0.01 m^2$ ，因此文中使用模型斷面積之根號值做為特徵尺度亦相對固定。這代表著，對於不同深寬比斷面模型，影響其風力係數之因子只剩下風力本身之大小。針對順風向本身，拖曳力會隨著不同深寬比而有所變化：其一為深寬比小於 1，渦散較完整而尾跡之再接觸現象較不明顯，拖曳力較大；其二為深寬比愈小，在相同斷面積下，表示迎風面面積愈大，也就是受風面積愈大。因此如圖 5-8~5-10 所示，拖曳力係數 C_d 或 C_d' 值隨著深寬比降低而變大。同時， C_d 值在地況 C 較易受高寬比(H/\sqrt{BD})之影響，高寬比 6 之 C_d 值較高寬比 3 為高，在地況 A 則二者數值相當接近。擾動拖曳力係數 C_d' 值則明顯隨著逼近

流場之紊流強度而變，在高紊流之 A 地況之 C_d' 值最大而低紊流之 C 地況之 C_d' 值最小。而在相同之邊界層流場下，因為高寬比 3 之模型高度較低而浸沒於流場接近地面之較高紊流區域，其 C_d' 也較高寬比 6 之模型為高。

2. 橫風向

如同順風向單元一開始之描述，對於不同深寬比斷面模型，影響其風力係數之因子只剩下風力本身之大小。對橫風向而言，升力同樣會隨著不同深寬比而有所變化：當深寬比小於 1，渦散較完整而尾跡之再接觸現象較不明顯，升力較大；但是深寬比愈小，在相同斷面積下，表示側風面面積愈小，也就是受風面積愈小。因此深寬比之改變對於擾動升力係數 C_l' 之影響是相互交錯。在圖 5-8 地況 A，因為逼近流場之高紊流降低了渦散對於升力之影響， C_l' 值大致隨著深寬比增加而變大。而在圖 5-9 及圖 5-10 較低紊流之地況 B 與 C，則可發現隨著深寬比之改變，渦散與受風面積交互影響造成之擾動升力係數，大致上以斷面深寬比 1/1 之方柱為最大。

3. 扭轉向

建築物在扭轉向之扭矩與渦散分離及紊流尾跡所產生之不對稱風壓有關，且其風力作用面包含迎風面、背風面與側風面等四個面。如前二個單元所述，對於不同深寬比斷面之模型，影響扭矩擾動風力係數之因子只剩下風力本身之大小，因此深寬比改變對於 C_t' 之影響也同樣是相互交錯。由圖 5-8~圖 5-10 之實驗結果可知，大致上在不同紊流強度之地況下，高寬比 6 之模型在深寬比 3/1 有最大 C_t' ，高寬比 3 之模型則在深寬比 1/3 有最大 C_t' ，此二者在深寬比 1/1、1/2 附近之 C_t' 出現最小值。

B. 風力頻譜

如圖 5-11~5-16，分別在地況 A、B、C 流場作用下，不同高寬比、不同深寬比之基底風力頻譜。圖中橫軸為無因次化頻率，縱軸為無因次化頻譜，頻譜圖由上而下依序為順風向基底彎矩、橫風向基底彎矩及扭轉向基底扭矩。頻率及頻譜之無因次定義為：

無因次化頻率：

$$s = \frac{f\sqrt{BD}}{U_H} \quad (5-5)$$

順風向基底彎矩無因次化頻譜：

$$\tilde{S}_d(f) = \frac{S_d(f) \cdot f}{(0.5\rho U_H^2 \sqrt{BDH^2})^2} \quad (5-6)$$

橫風向基底彎矩無因次化頻譜：

$$\tilde{S}_l(f) = \frac{S_l(f) \cdot f}{(0.5\rho U_H^2 \sqrt{BDH^2})^2} \quad (5-7)$$

扭轉向基底扭矩無因次化頻譜：

$$\tilde{S}_t(f) = \frac{S_t(f) \cdot f}{(0.5\rho U_H^2 BDH)^2} \quad (5-8)$$

其中， f ：頻率(Hz)； $S_d(f)$ 、 $S_l(f)$ 、 $S_t(f)$ ：順風向基底彎矩、橫風向基底彎矩及扭轉向基底扭矩之風力頻譜； B 、 D 、 H ：模型特徵尺度，此處分別為模型迎風面寬度(垂直於順風向)、深度(垂直於橫風向)及模型高度； U_H 、 ρ ：模型高度之平均風速、空氣密度。

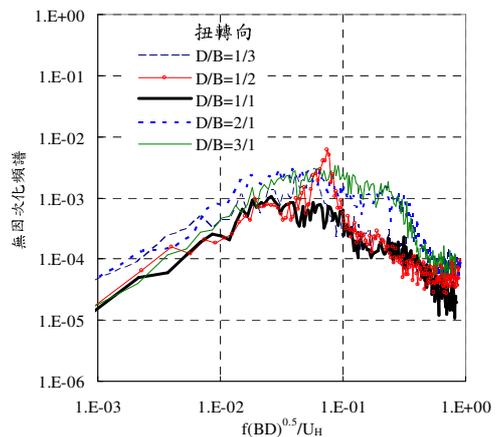
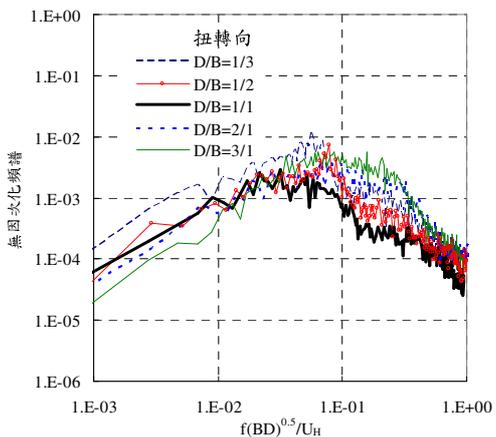
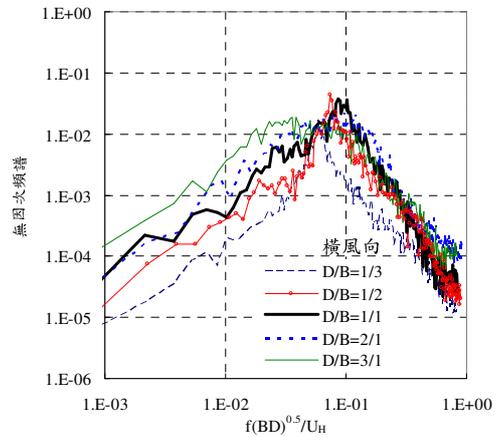
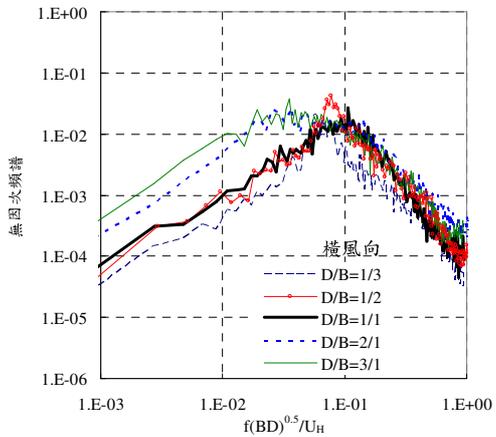
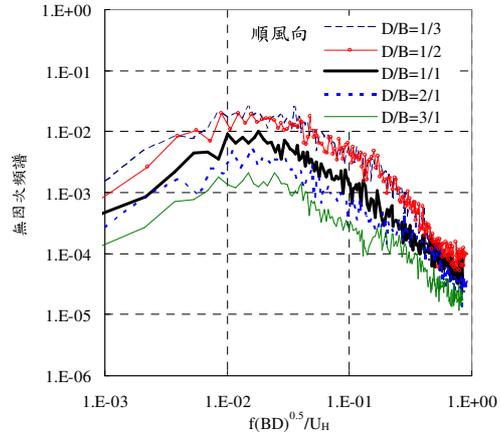
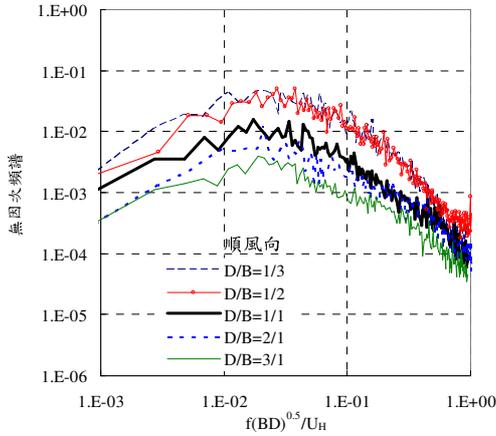


圖 5-11 高寬比 3 地況 A 不同深寬比模型之風力頻譜
(資料來源：本研究整理)

圖 5-12 高寬比 6 地況 A 不同深寬比模型之風力頻譜
(資料來源：本研究整理)

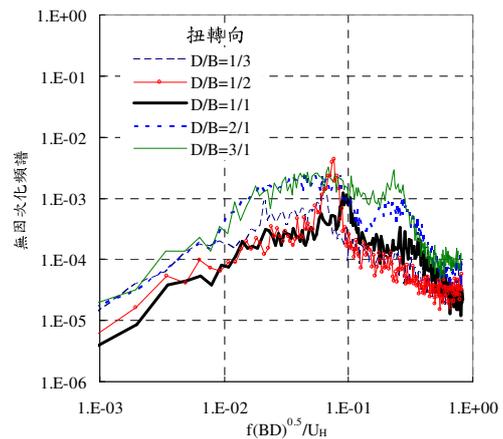
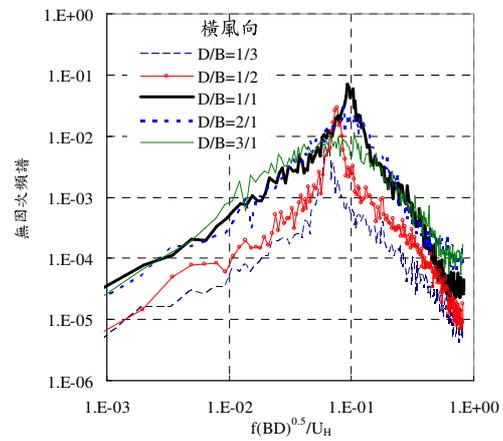
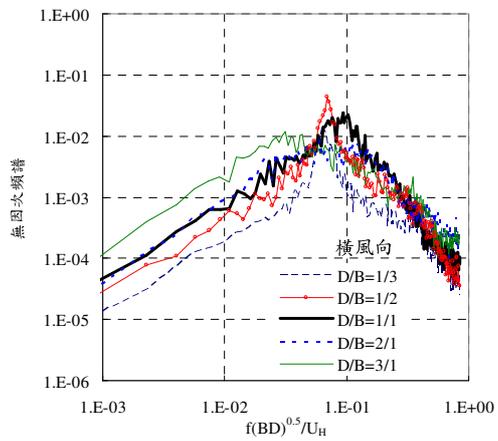
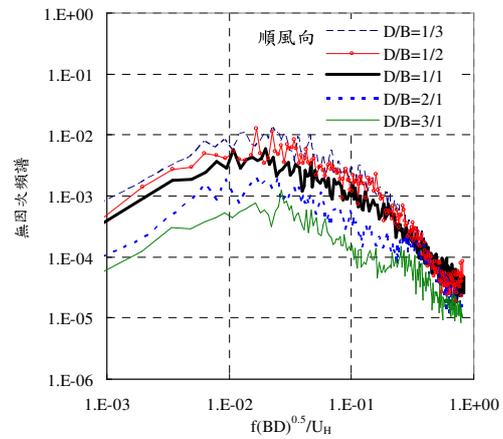
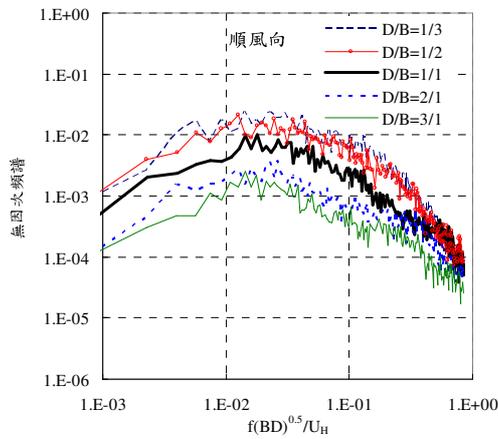


圖 5-13 高寬比 3 地況 B 不同深寬比模型之風力頻譜
(資料來源：本研究整理)

圖 5-14 高寬比 6 地況 B 不同深寬比模型之風力頻譜
(資料來源：本研究整理)

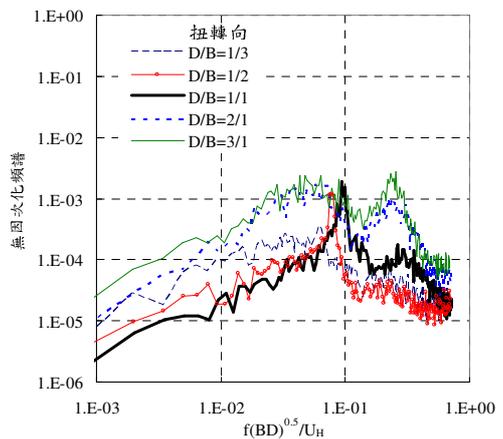
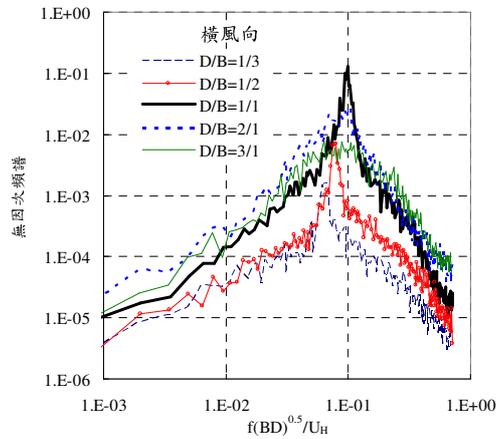
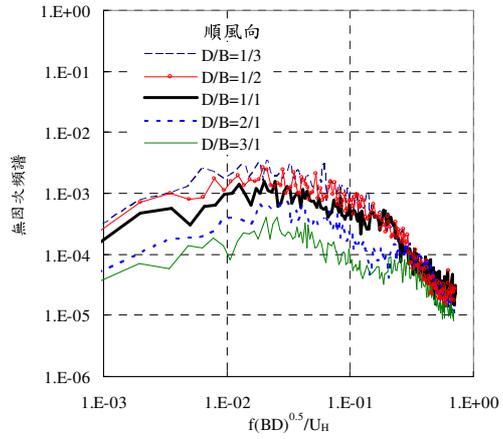
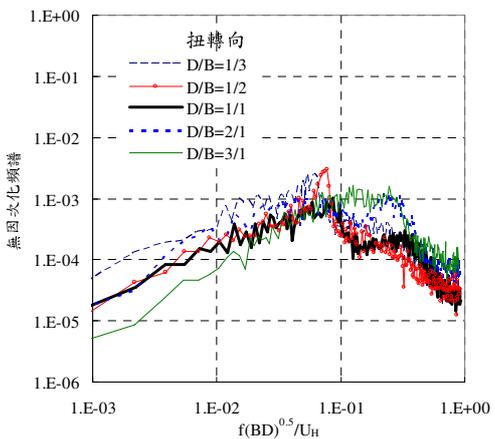
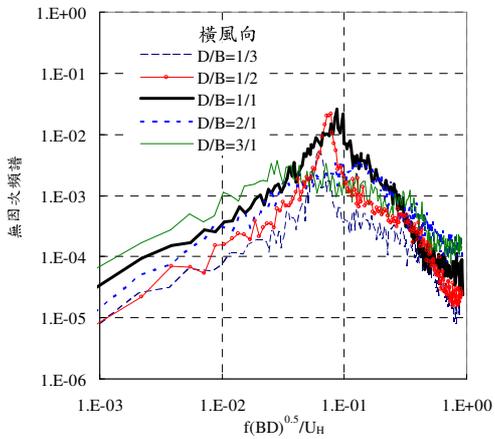
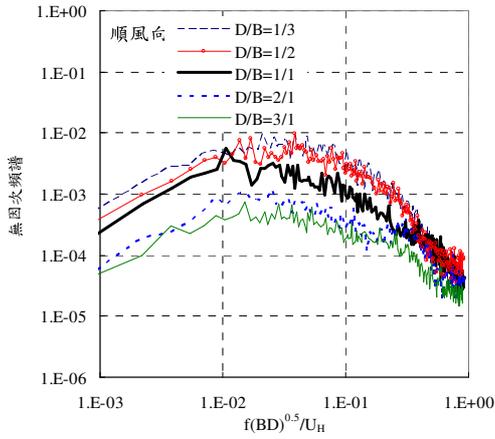


圖 5-15 高寬比 3 地況 C 不同深寬比模型之風力頻譜
(資料來源：本研究整理)

圖 5-16 高寬比 6 地況 C 不同深寬比模型之風力頻譜
(資料來源：本研究整理)

1. 順風向基底彎矩無因次化頻譜

順風向擾動風力主要受逼近流場紊流之影響，因此風力頻譜大小與流場紊流強度正相關。由圖可以發現，順風向風力頻譜大致反映出風速頻譜之寬頻形式，且其頻譜值以紊流強度最大之地況 A 為最高，紊流強度最小之地況 C 為最低。另外，高寬比 3 之模型因為其高度較低而浸沒於流場接近地面之較高紊流區域，因此其順風向風力頻譜值也較高寬比 6 之模型為高。

2. 橫風向基底彎矩無因次化頻譜

橫風向擾動風力主要受渦散分離及紊流尾跡之影響，而影響渦散之因素主要是逼近流之紊流強度及模型之深寬比。紊流強度愈低可使渦散更形完整且強度較高，而深寬比愈小則降低氣流分離後之再接觸現象，也有同樣之效果。由圖即可發現，同一流場下，深寬比小於等於 1 之模型因為沒有明顯之再接觸現象而有較窄頻之狀況，深寬比大於 1 之模型則由於明顯之再接觸現象而導致頻譜呈現較為寬頻之分布。另外，對於同一個深寬比模型而言，流場之紊流強度愈低則橫風向頻譜於渦散頻率上有愈明顯之窄頻尖峰值。例如高寬比 6、深寬比 1/1 之模型，與最高紊流強度之地況 A 相比，在最低紊流強度之地況 C 流場作用下，橫風向風力頻譜於渦散頻率上即有最明顯之窄頻尖峰值。

3. 扭轉向基底扭矩無因次化頻譜

扭轉向風力是源自渦散分離及紊流尾跡等現象，所產生之不對稱風壓所造成。因此其頻譜分布近似於橫風向風力頻譜，但頻寬分布則相對更形分散，僅深寬比 1/2 之模型在渦散頻率上有出現較為明顯窄頻之分布。

C. 實驗誤差

由於本文研究目的之一是將風洞實驗數據建構資料庫，提供未來風力規範修定參考之用，因此實驗數據之準確性相當重要。本文之實驗誤差，以同一模型在同一實驗條件下，兩次實驗之風力係數差值與兩次實驗之平均值二者之比值來表示個別實驗誤差，再計算所有個別誤差之平均值做為整體實驗誤差。以平均拖曳力係數為例：

$$e_d = \frac{\sum_{i=1}^n e_d(i)}{n} \quad (5-9)$$

$$e_d(i) = \frac{|C_d^1(i) - C_d^2(i)|}{|(C_d^1(i) + C_d^2(i))/2|} \quad (5-10)$$

其中， $e_d(i)$ ：第 i 種實驗條件下之平均拖曳力係數個別實驗誤差，下標 d 代表拖曳力； $C_d^1(i)$ 、 $C_d^2(i)$ ：第 i 種實驗條件下之第一次、第二次試驗之平均拖曳力係數，上標即為第一次或第二次試驗； n ：實驗條件之總數，以本計劃而言，實驗條件之總數 $n=30$ ，亦即 3 種地況 \times 2 種高寬比 \times 5 種深寬比斷面 = 30 種實驗條件。

本計劃目前針對二種高寬比 3 及 6、三種深寬比 1/1、1/3、3/1 以及三種地況 A、B、C 共 18 種實驗條件進行誤差分析之第二次風洞試驗，結果如圖 5-17，分述如下：

1. 基底平均拖曳力係數 C_d 之整體平均誤差為 0.070、最大個別誤差為 0.172；
2. 基底擾動拖曳力係數 C_d' 之整體平均誤差為 0.036、最大個別誤差為 0.064；
3. 基底擾動升力係數 C_l' 之整體平均誤差為 0.032、最大個別誤差

為 0.063 ；

4. 基底擾動扭力係數 C_t' 等風力係數之整體平均誤差為 0.046、最大個別誤差為 0.103。

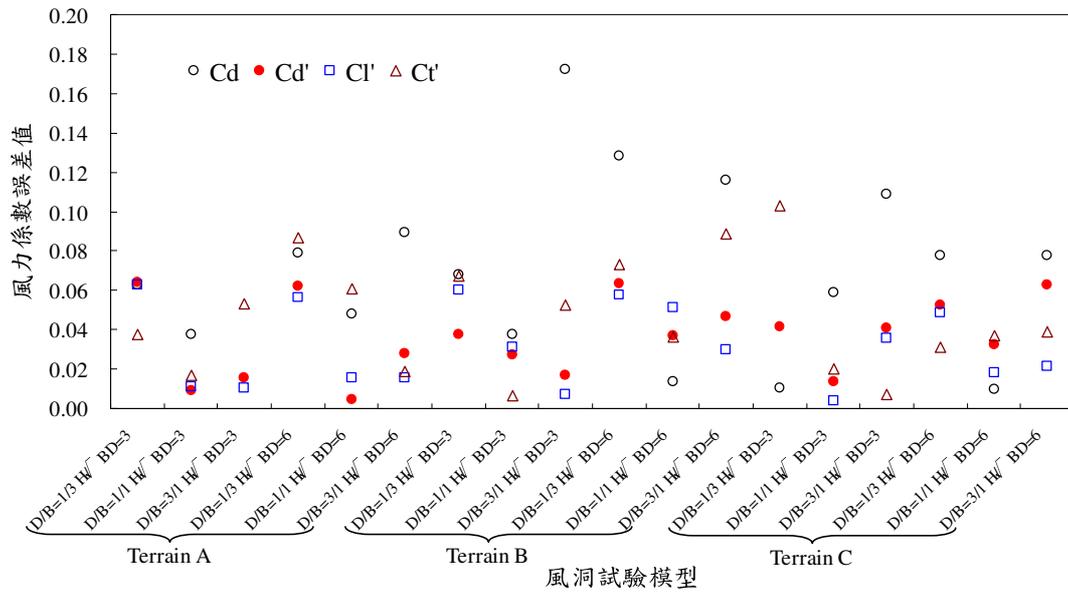


圖 5-17 不同風洞試驗模型之風力係數誤差值
(資料來源：本研究整理)

第六章 應用案例

本案挑選 2 棟不同高度之單純方形斷面建築物，利用國內現行「建築物耐風設計規範及解說」及本研究提出之修正式，計算順風向、橫風向與扭轉向之等值靜態風載重與最高樓層振動加速度，以了解條文修正前後之差異處。選取高寬比 3 及 6、高度分別為 90 公尺及 180 公尺之正方斷面高層建築，以地況 A、地況 B 與地況 C，進行上述之計算與比較。該建築物之結構參數則以一般性之結構假設之。

第一節 風洞實驗相關數據

本文以風洞試驗直接量測建築物之風壓風力特性，以修正參考書目 7、8(Solari 1993a,b)建議之風力相關函數經驗式。風洞試驗以高寬比 3 及 6 之方柱為標的，逼近流場為地況 A ($\alpha=0.32$)、B ($\alpha=0.25$)、C ($\alpha=0.15$) 三種，表面風壓採樣頻率為 200Hz。

A. 順風向平均風力係數

表 6-1 為風洞試驗所得之基底拖曳力平均風力係數，參考風速為屋頂高度之風速 U_H 。此處將 C_D 分解為 C_w 與 C_l ，其中 C_w 之參考風速為所計算建築物樓層處之風速 U_z ， C_l 之參考風速為 U_H 。因為 C_D 分解為 C_w 與 C_l 所使用之參考風速不同，故表中之 C_D 稍低於 C_w 與 C_l 之線性相加之結果。 C_D 以高寬比 6 ($H/\sqrt{BD}=6$) 於地況 C 有最大值 1.280， C_w 以高寬比 6 於地況 B 有最大值 0.910， C_l 以高寬比 6 於地況 C 有最大值 0.673。

表 6-1 高寬比 3、6 方柱模型在不同邊界層來流作用下之順風向平均風力係數

| 高寬比 H/\sqrt{BD} | 地況 風力係數 | A | B | C |
|----------------------|------------|-------|-------|-------|
| | | 3 | C_D | 1.002 |
| C_W | 0.862 | | 0.857 | 0.637 |
| C_l | 0.460 | | 0.511 | 0.486 |
| 6 | C_D | 1.036 | 1.255 | 1.280 |
| | C_W | 0.881 | 0.910 | 0.780 |
| | C_l | 0.489 | 0.639 | 0.673 |

註 1： C_D 、 C_l 之參考風速為 U_H ， C_W 之參考風速為 $U(z)$ 。

註 2：(資料來源：本研究整理)

B. 相關函數(coherence function)

對於高層建築而言，因為風速剖面及三維流場之效應，一般認為建築物 2/3 高度處之風壓資料具有相當之代表性。故本文之 $N(f)$ 、 $R_x(\Delta x, f)$ 即以模型 2/3 高度處之各風壓點拖曳力資料進行分析， $R_z(\Delta z, f)$ 則為不同高度與 2/3 高度處拖曳力之相關性。實驗結果如圖 6-1(a)~6-6(c)，橫軸為約化風速，縱軸為相關函數，點符號為風洞試驗結果，實線為 Solari(參考書目 7、8)建議公式，虛線為實驗回歸線。

各圖之(a)為相關函數 $N(f)$ ，各圖之(b)為 x 軸向(水平向)風力相關函數 R_x ，各圖之(c)為 z 軸向(垂直向)相關函數 R_z 。圖之(a)的點符號為風洞試驗之模型 2/3 高度處(0.67H)迎風面與背風面之單位高度風力相關性；圖(b)的點符號為風洞試驗之模型 2/3 高度處(0.67H)，X 方向(水平向)上不同距離間之單壓力點拖曳力相關函數，符號說明之 0.4B 即表示相距 0.4 倍迎風面寬度；圖(c)的點符號為風洞試驗之模型 2/3 高度處(0.67H)，與 Z 方向(垂直向)上不同距離間之單位高度拖曳力相關函數，符號說明之 0.58H 即表示相距 0.58 倍建築物高度。

由於 Solari 建議公式及建議值 ($C_N=14.5, C_x=C_z=11.5$) 是根據風速頻譜進行推算風壓在空間上之相關性，無法有效反應建築物幾何外型對於風力風壓之影響。然其建議式之型態與實驗數據之趨勢接近，故本文仍使用相同建議式但調整相關參數，詳見表 6-2 及圖 6-1(a)~6-6(c) 之虛線所示。

表 6-2 高寬比 3、6 方柱模型在不同邊界層來流作用下之順風向相關函數係數

| 高寬比 H/\sqrt{BD} | 地況 相關 函數係數 | A | B | C |
|----------------------|------------------|-----|-------|-----|
| | | 3 | C_N | 20 |
| | C_x | 5 | 6 | 8 |
| | C_z | 5 | 5.5 | 6 |
| 6 | C_N | 25 | 35 | 50 |
| | C_x | 7 | 8 | 10 |
| | C_z | 5.5 | 6 | 6.5 |

(資料來源：本研究整理)

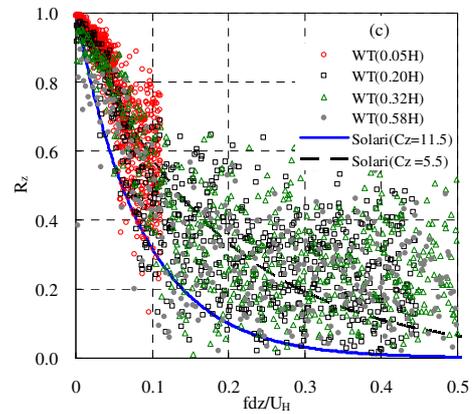
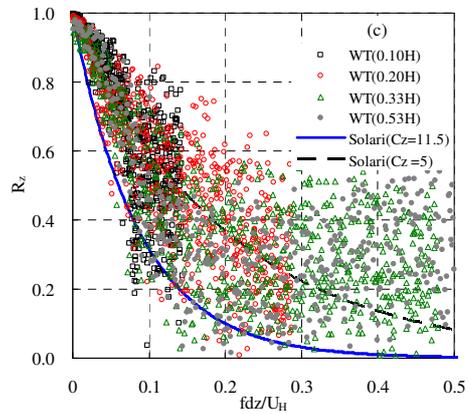
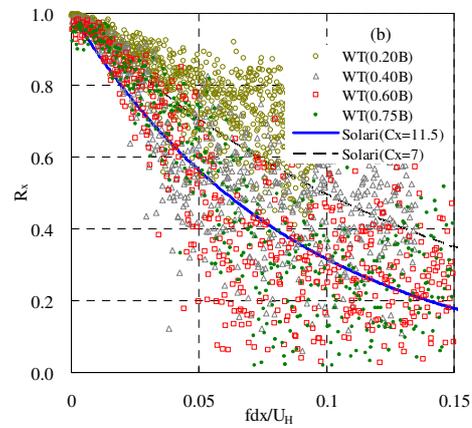
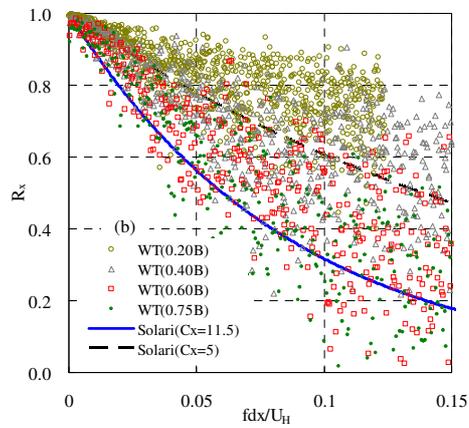
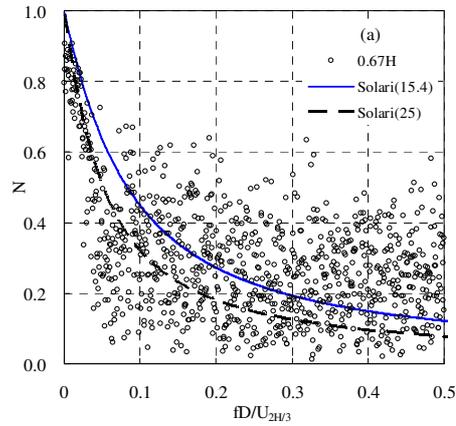
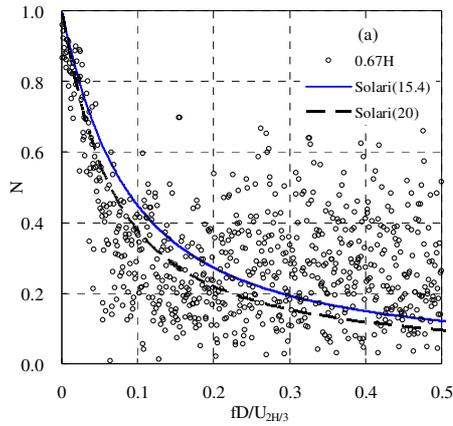


圖 6-1 相關性函數 (高寬比 3、地況 A)

(資料來源：本研究整理)

圖 6-2 相關性函數 (高寬比 6、地況 A)

(資料來源：本研究整理)

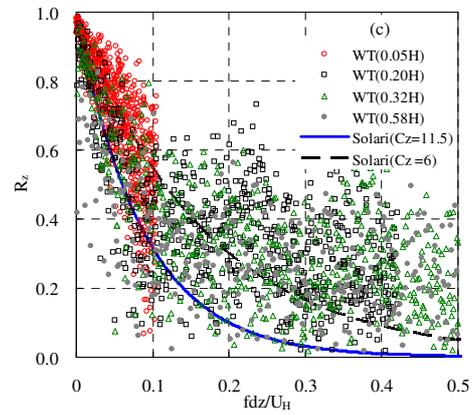
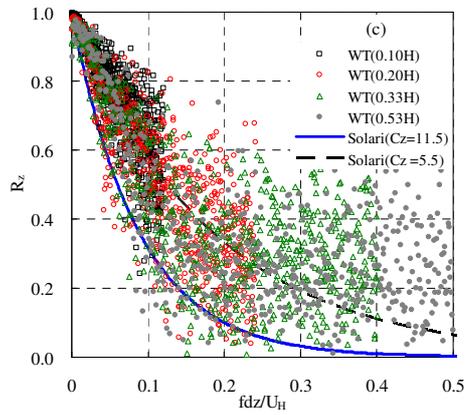
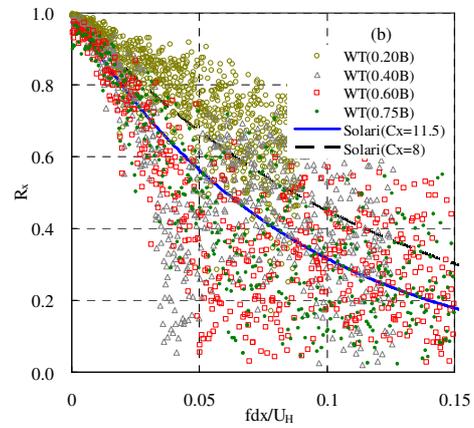
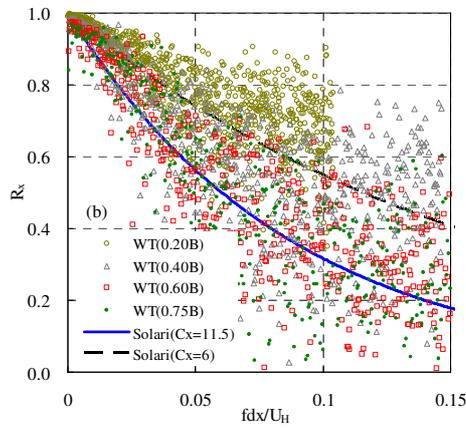
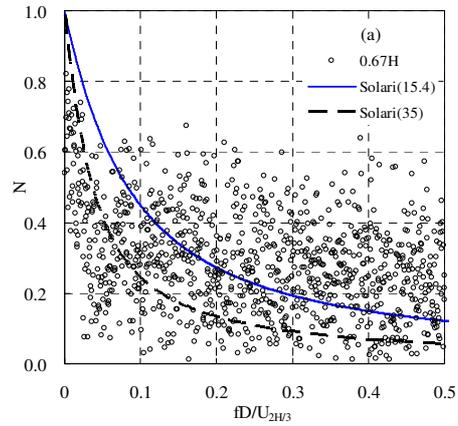
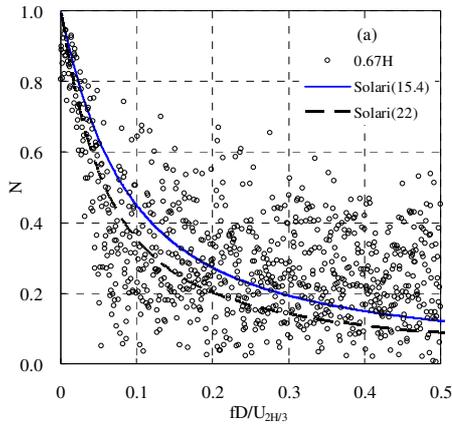


圖 6-3 相關性函數 (高寬比 3、地況 B)

(資料來源：本研究整理)

圖 6-4 相關性函數 (高寬比 6、地況 B)

(資料來源：本研究整理)

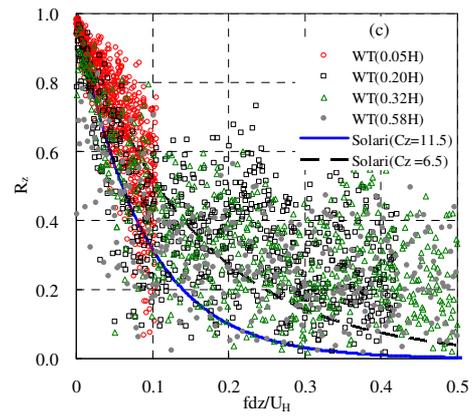
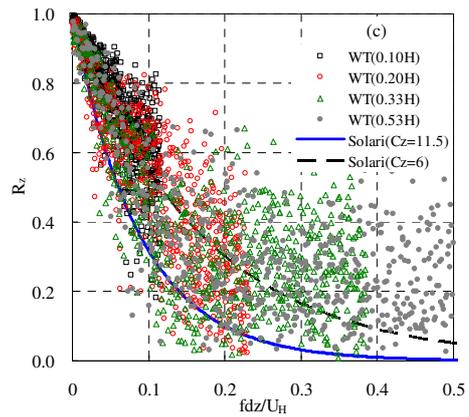
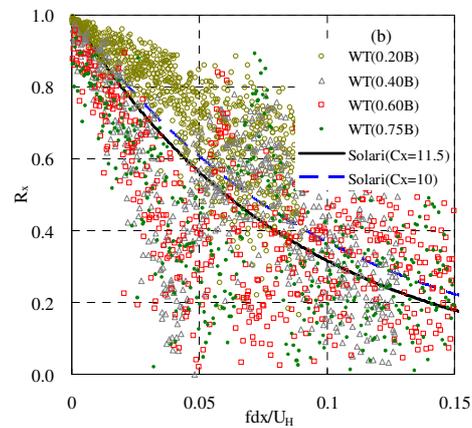
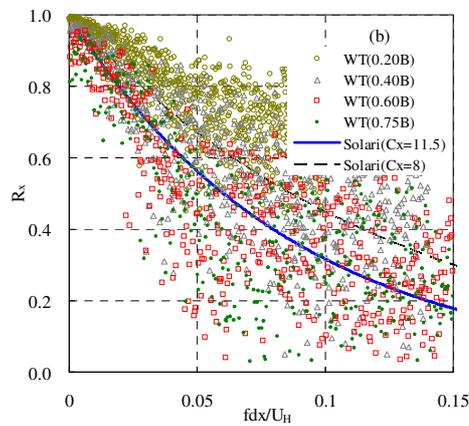
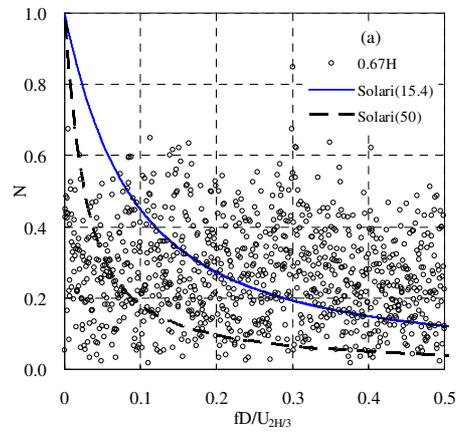
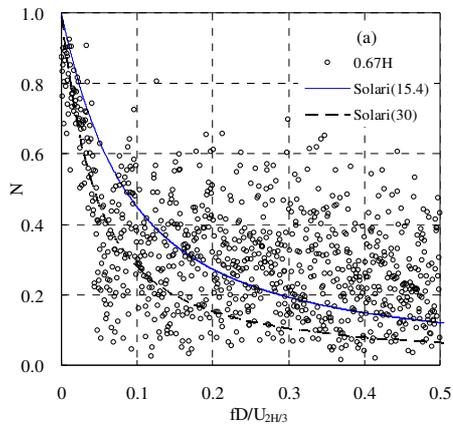


圖 6-5 相關性函數 (高寬比 3、地況 C)

(資料來源：本研究整理)

圖 6-6 相關性函數 (高寬比 6、地況 C)

(資料來源：本研究整理)

第二節 不同分析方式之設計風載重比較

該小節為下列三種計算方式之比較

1. 本文推導公式
2. 風洞試驗結果
3. 內政部「建築物耐風設計規及解說」

藉由二棟正方形斷面之建築物，進行不同計算模式設計風力之比較，分析所需之建築物幾何特性、動力特性及風場之相關資料等參數如表 6-3 所示。其中，C 地況下之離地 10 公尺設計風速 $U_{10}(C) = 32.5$ m/s，為十分鐘平均風速，計算設計風載重時將轉換為一小時平均風速。根據國內現行風力規範，十分鐘平均風速為一小時平均風速之 1.06 倍。比較案例所使用之地況為國內規範定義之地況 A($\alpha=0.32$)、B($\alpha=0.25$)、C($\alpha=0.15$)三種地況。

表 6-3 二種案例(高寬比 3、6 之方柱)之相關參數

| 案例 | 幾何特性 | | | | | 動力特性 | | | 風場資料 | |
|----------|----------|----------|----------|-------------|-----|------------------|-------------|----------------------------------|----------------------------------|-------------------|
| | 長 (m) | 寬 (m) | 高 (m) | 各樓層高 (m) | 樓層數 | 自然 頻率 (Hz) | 阻 尼 比 | 振態 | 質量 密度 (kg/m ³) | 設計 風速 (m/s) |
| 高寬比 3 | 30 | 30 | 90 | 3.6 | 25 | 0.400 | 1% | $\left(\frac{z}{H}\right)^{1.5}$ | 250 | 32.5 |
| 高寬比 6 | | | 180 | 4 | 45 | | | | | |

(資料來源：本研究整理)

本文推導順風向風載重公式之風速頻譜使用 von Karman/Harris 頻譜(參考書目 9)，其無因次化形式如下：

$$\frac{f \cdot S_u(f)}{\sigma_u^2} = \frac{4 \left(\frac{f \cdot l_u}{\bar{U}} \right)}{\left[1 + 70.8 \left(\frac{f \cdot l_u}{\bar{U}} \right)^2 \right]^{\frac{5}{6}}} \quad (6-1)$$

其中， $S_u(f)$ 為 u 向風速頻譜， f 為頻率(Hz)， σ_u 為 u 向擾動風速之均方根值(m/s)， l_u 為 u 向長度尺度(m)， \bar{U} 為 u 向平均風速(m/s)。

A. 順風向設計風載重

分析模式包括本研究案之推導模式、風洞試驗及國內規範。以風洞實驗計算設計風載重之基本原則與本文公式推導之理論一致，僅風力係數與風力頻譜是實際取自風洞試驗之結果。

分析結果如圖 6-7(a)~6-12(d)，橫軸為等值靜態風載重(ESWL)，以壓力單位 kN/m^2 表示，縱軸為離地高程。風洞試驗結果為圓形符號，風力規範計算結果為細實線，本文推導之公式依所採用之流場紊流強度分為兩類，粗實線為 present(1)，使用風洞試驗逼近流場之紊流強度，粗虛線為 present(2)，使用國內規範定義之紊流強度。此二種推導模式之相關參數皆使用前小節風洞試驗結果之風力係數及相關性函數。

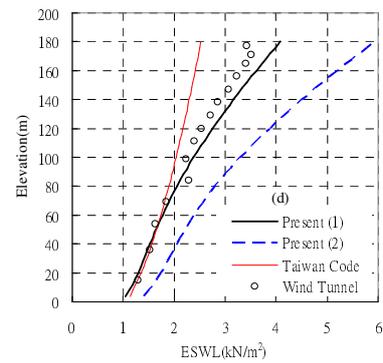
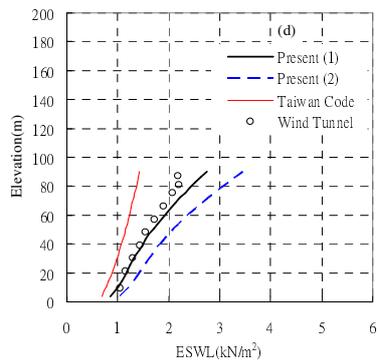
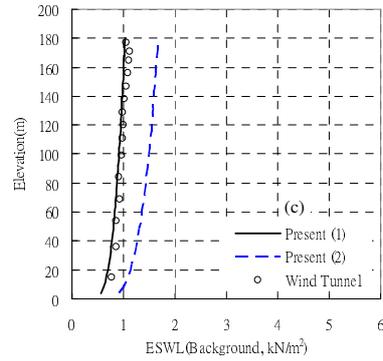
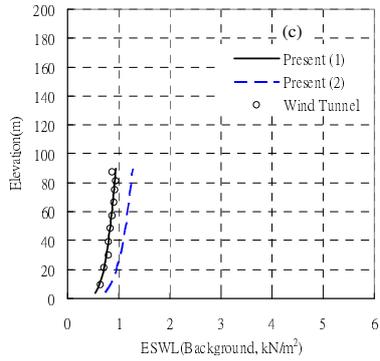
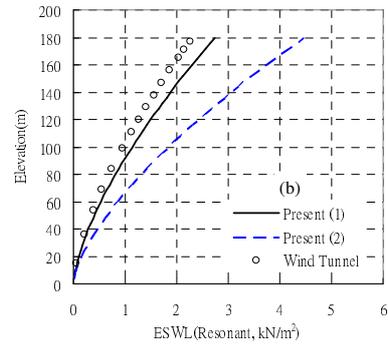
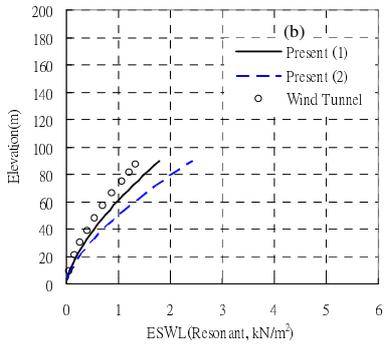
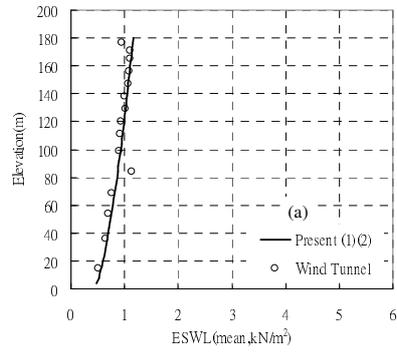
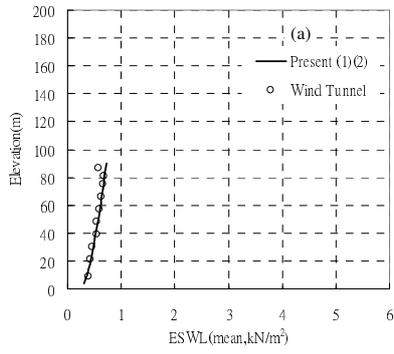


圖 6-7 地況 A 高寬比 3 案例
順風向設計風載重
(資料來源：本研究整理)

圖 6-8 地況 A 高寬比 6 案例
順風向設計風載重
(資料來源：本研究整理)

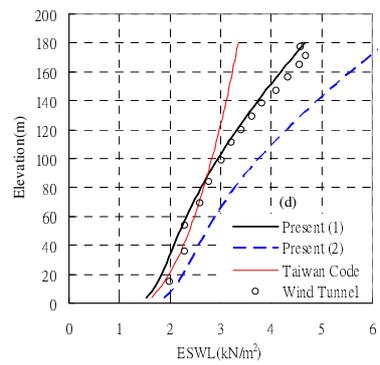
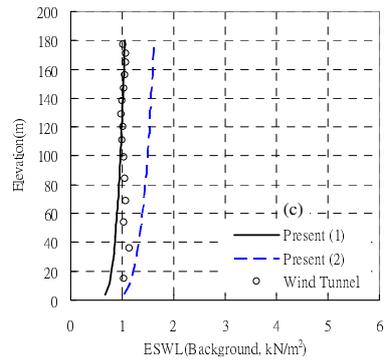
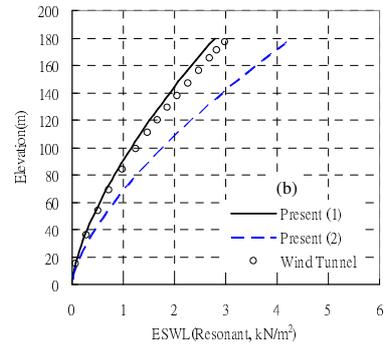
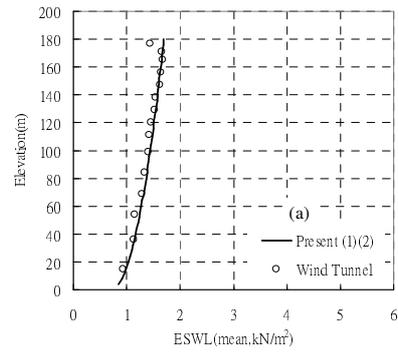
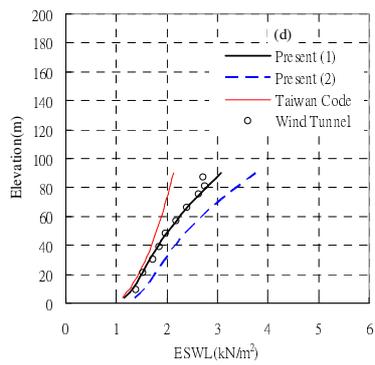
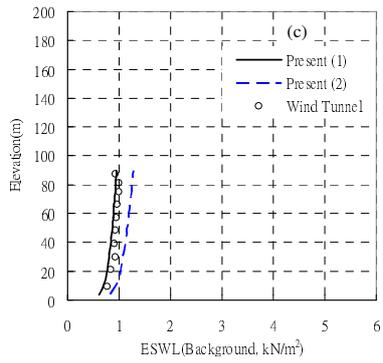
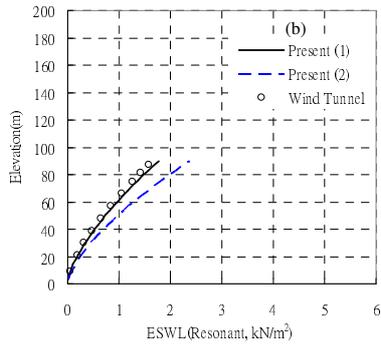
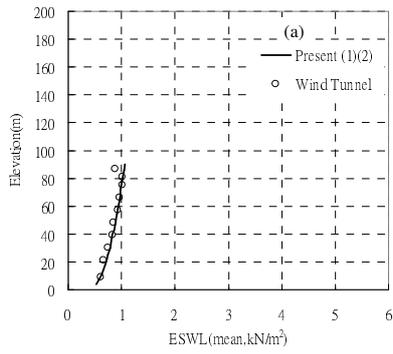


圖 6-9 地況 B 高寬比 3 案例
順風向設計風載重
(資料來源：本研究整理)

圖 6-10 地況 B 高寬比 6 案例
順風向設計風載重
(資料來源：本研究整理)

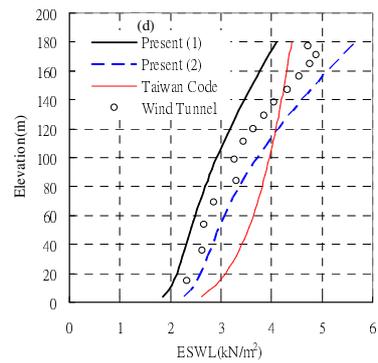
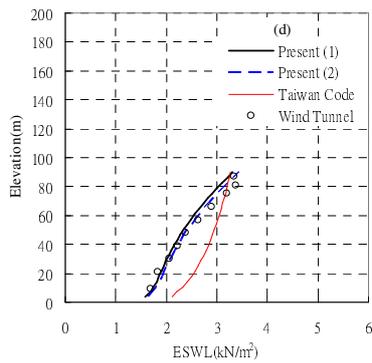
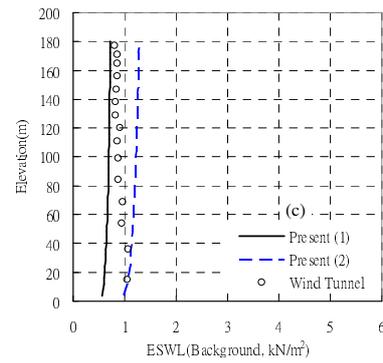
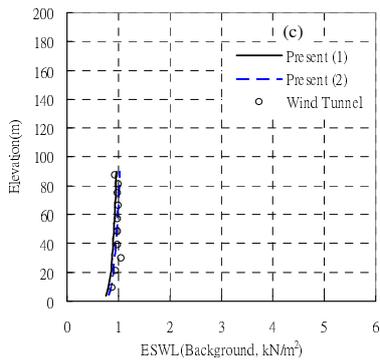
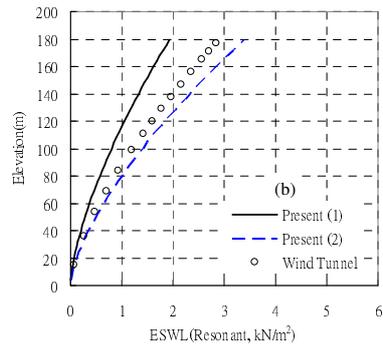
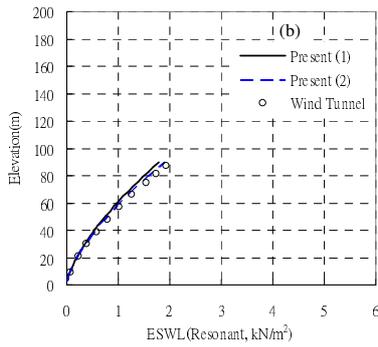
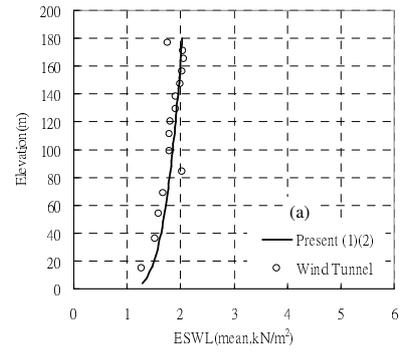
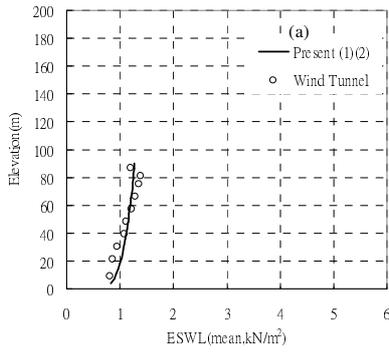


圖 6-11 地況 C 高寬比 3 案例
順風向設計風載重
(資料來源：本研究整理)

圖 6-12 地況 C 高寬比 6 案
例順風向設計風載重
(資料來源：本研究整理)

1. 平均風載重

圖 6-7(a)~6-12(d)之(a)為高寬比 3 及 6 之建築物在不同地況下之各樓層平均風載重。因為平均值之計算與紊流強度之選取無關，因此 present(1)與 present(2)有相同數值。由於本文推導公式選取與風洞實驗相同之風力係數，二者分析結果相當接近，代表該推導之形式能充分反應平均風載重之真實狀態。

2. 擾動風載重之共振部分

圖 6-7(a)~6-12(d)之(b)部分為擾動風載重之共振部分，其在高度上之分佈方式是假設依據慣性力分配，與結構基本振態相似。圖中顯示，選取風洞實驗逼近流場紊流強度之 present(1)與風洞試驗結果相當接近，在 A 地況稍大而 C 地況偏小，僅高寬比 6 之建築物在地況 C 有明顯偏低之狀況；使用國內規範流場紊流強度之 present(2)則相對較大，尤其以高寬比 6 之建築物更顯著，僅高寬比 3 之建築物於地況 C 流場作用下，其風載重與風洞試驗結果較接近。present(1) 與 present(2)之計算過程僅在紊流強度上之選取有所差別，根據目前國內規範定義之紊流強度所得之風力有偏大的傾向，其程度以地況 A 大於地況 B 大於地況 C，且隨著建築物愈高而愈加明顯。至於是否代表規範中之紊流強度過於保守，仍有待實場監測數據證實。

3. 擾動風載重之背景部分

圖 6-7(a)~6-12(d)之(c)為擾動風載重之背景部分。與共振部份之說明相同，present(1) 與 present(2)之計算過程僅在紊流強度之選取上有所差別，因此二者與風洞試驗結果相比，其趨勢與共振部份之情形是一致的。

4. 設計風載重

圖 6-7(a)~6-12(d)之(d)則是合併前述(a)~(c)部份分析結果之設計風載重，並與國內風力規範做一比較，圖中細實線即為風力規範之計算結果。

此處 present(1)與 present(2)是平均值與擾動值之合，因此與風洞試驗結果之比較趨勢不變。亦即，採用風洞試驗紊流強度之本文推導公式 present(1)，除了高寬比 6 之建築物在地況 C 之設計風載重明顯低於風洞試驗結果外，其他案例二者計算結果相當一致，表示本文推導公式能有效預測此二種案例形式之結構物順風向設計風載重。

在國內現行風力規範與風洞實驗比較之部份，由圖可發現：低樓層在地況 A 與地況 B 之流場作用下，二種分析方式之設計風載重較為接近，在地況 C 則規範計算結果明顯大於風洞實驗；高樓層依風力規範計算之設計風載重則在地況 A 與地況 B 低於風洞實驗，在地況 C 則規範計算結果接近於風洞實驗結果。因為該風力規範風載重計算是根據陣風載重因子法，故在高度上之分配近似於速度壓之分布。而風洞實驗或本文推導之公式，高樓層之風載重受擾動值之共振部分所主導，在高度上之分配與慣性力相似。因此國內現行風力規範與風洞試驗二者之設計風載重，在高樓層部分之分佈趨勢有明顯之差別。

B. 橫風向設計風載重

本文有關橫風向設計風載重之推導公式，與風洞試驗法所使用之計算方式是一致的，因此本小節討論對象為國內現行風力規範與本文推導公式(風洞實驗)之比較。理論上，對稱斷面結構之橫風向平均風力為零，故本文兩個方型斷面案例之平均風力直接設定為零而不予討

論，橫風向設計風載重即為擾動風載重之值。圖 6-13 及圖 6-14 分別為高寬比 3 案例及高寬比 6 案例在地況 A、B、C 作用下之橫風向設計風載重，橫軸為等值靜態風載重(ESWL)，以壓力單位 kN/m^2 表示，縱軸為離地高程。實線為國內規範之值，其他符號皆為本文推導公式之結果(與風洞實驗結果相同)。其中實心圓點為擾動風載重，可區分為三角形符號之背景部份(圖中括弧內之代號 B)及方形符號之共振部份(圖中括弧內之代號 R)。

1. 本文推導公式計算結果(風洞實驗)

各樓層擾動風力之背景部份隨著高度之增加僅略微變化，而共振部份則是根據慣性力進行分配方式，故呈現基本振態之形式。因此可以發現，擾動值之背景部分與共振部份合併後，低樓層之設計風載重受背景控制而高樓層則以共振部份主導。

2. 本文推導公式結果(風洞實驗)與國內風力規範之比較

由圖可知，對於高寬比 3 之案例，本文推導公式(風洞實驗)與國內規範有不錯之一致性，僅在低樓層處規範計算結果略低。這是因為風洞實驗擾動值之背景部份在高度上之變化約略為定值，在接近地面之低樓層處仍有一定之風載重，而規範之風載重則依基本振態(線性)分配，在低樓層處之風載重接近零。對於高寬比 6 之案例，本文推導公式(風洞實驗)與國內規範在地況 A 及 B 有不錯之一致性，但在地況 C 則規範結果明顯偏大。顯示國內規範對於高寬比 6 案例類型之建築物，橫風向設計風載重在地況 C 有明顯偏保守之現象。

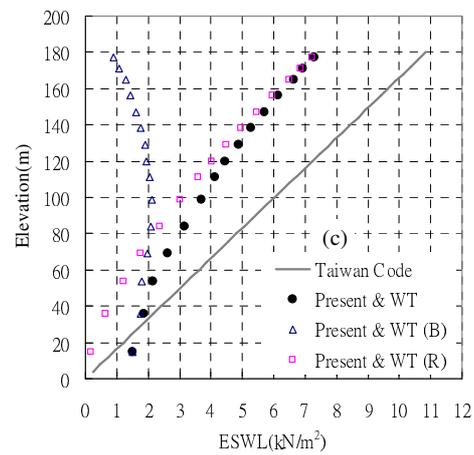
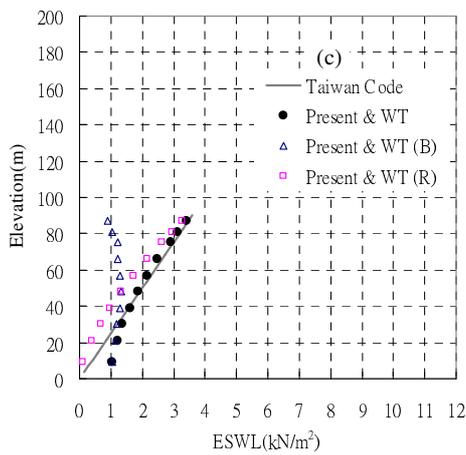
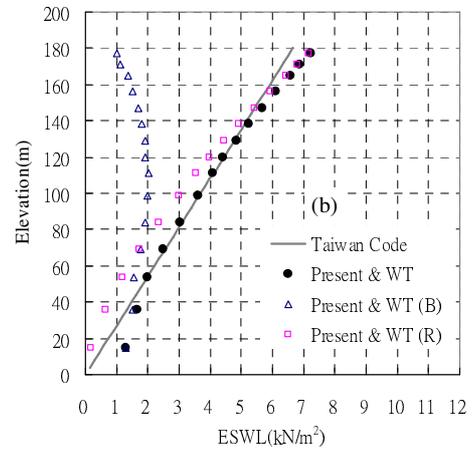
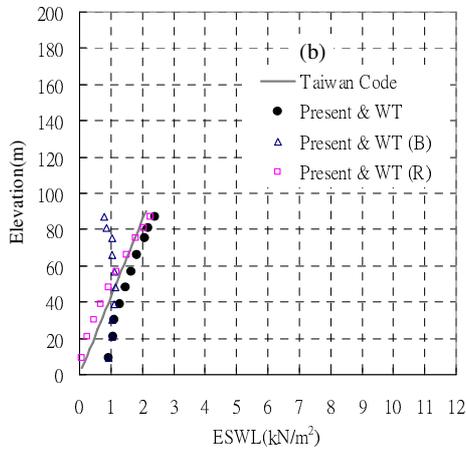
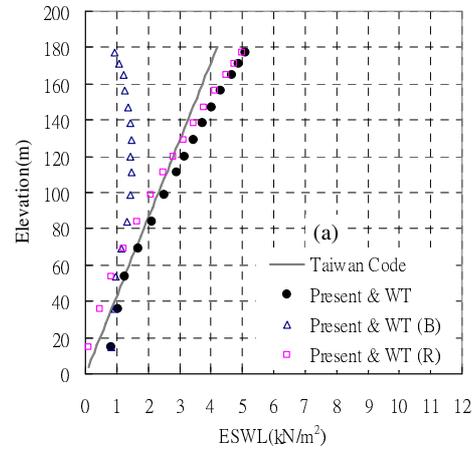
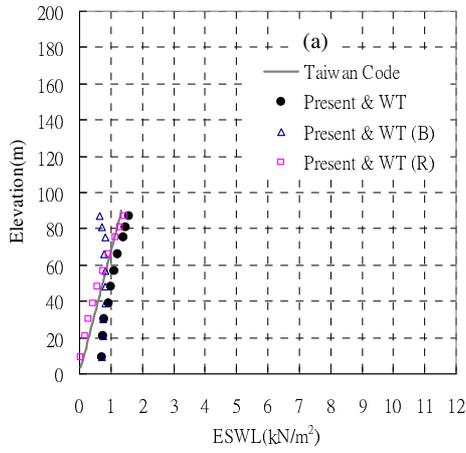


圖 6-13 高寬比 3 案例橫風向設計風載重 (a、b、c 代表地況 A、B、C)

(資料來源：本研究整理)

圖 6-14 高寬比 6 案例橫風向設計風載重 (a、b、c 代表地況 A、B、C)

(資料來源：本研究整理)

C. 扭轉向設計風載重

與橫風向風載重相同，本文有關扭轉向設計風載重之推導公式與風洞試驗法一致。同樣的，在理論上對稱斷面結構之扭轉向平均風力亦為零，故本文不予討論相關之平均風載重，扭轉向設計風載重即為擾動風載重之值。圖 6-15 及圖 6-16 分別為高寬比 3 案例及高寬比 6 案例在地況 A、B、C 作用下之扭轉向設計風載重，圖中符號定義與橫風向一致，橫軸為等值靜態風載重(ESWL)，以建築物單位高度之扭矩 kN-m/m 表示，縱軸為離地高程。

1. 本文推導公式計算結果(風洞實驗)

擾動值在高度上之分布情形與橫風向一致，因此低樓層之設計風載重受背景控制而高樓層則以共振部份主導。

2. 本文推導公式結果(風洞實驗)與國內風力規範之比較

由圖可知，對於高寬比 3 之案例，本文推導公式結果(風洞實驗)與國內規範在地況 C 有不錯之一致性，而在地況 A 及 B 則規範稍微偏低。對於高寬比 6 之案例，國內規範之計算值則明顯偏高，尤其在地況 C 更為顯著。顯示國內規範對於高寬比 6 案例類型之建築物，扭轉向設計風載重有明顯偏保守之現象，對於高寬比 3 案例類型之建築物，則稍微有不保守之現象。

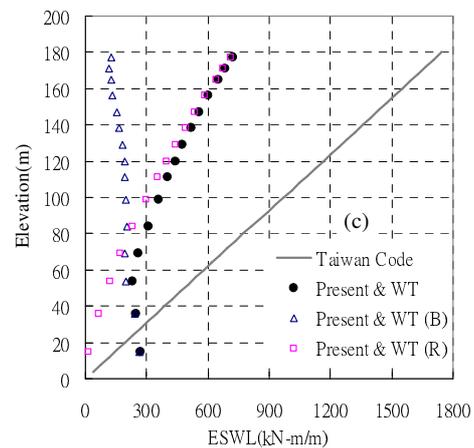
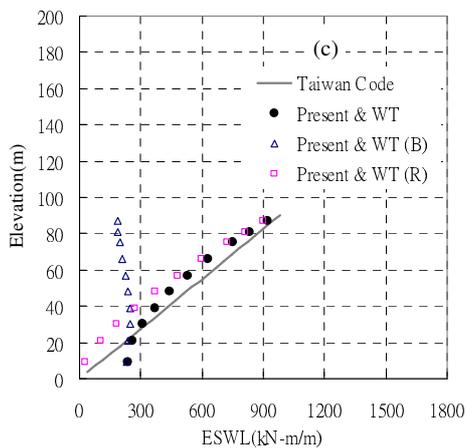
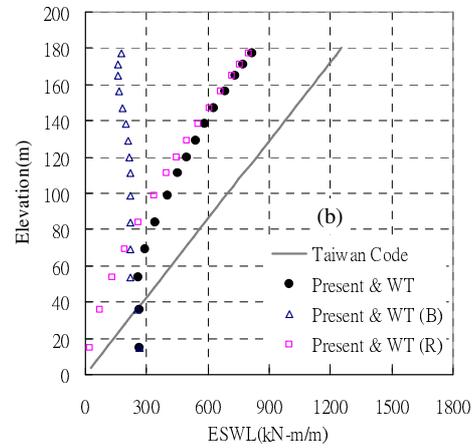
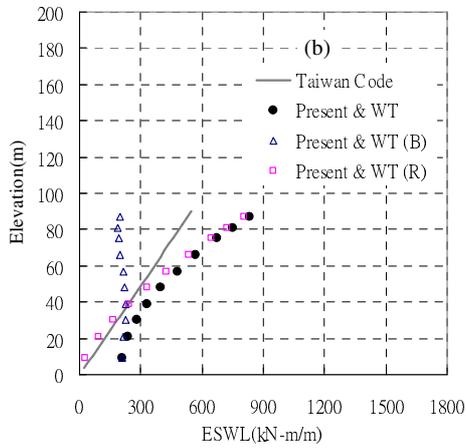
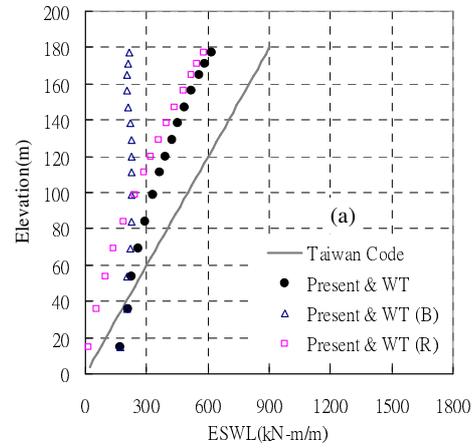
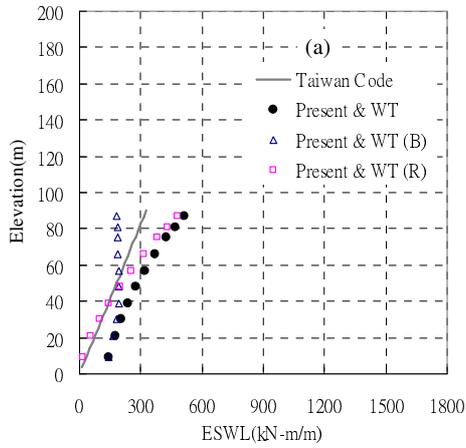


圖 6-15 高寬比 3 案例扭轉向設計風載重 (a、b、c 代表地況 A、B、C)

圖 6-16 高寬比 6 案例扭轉向設計風載重 (a、b、c 代表地況 A、B、C)

(資料來源：本研究整理)

(資料來源：本研究整理)

第三節 最高樓層側向振動尖峰加速度

振動加速度之比較分為勁度中心振動之順風向、橫風向、扭轉向三個分量，以及合併該三個分量計算出角隅位置之半年迴歸期振動加速度。如表 6-4 及圖 6-17~圖 6-18 所示，分別為高寬比 3 及高寬比 6 案例在地況 A、B、C 之加速度值，由上而下依序為勁度中心振動之順風向、橫風向、扭轉向及角隅位置之加速度。圖中方型符號為本文推導公式(4-4 式)之計算結果，圓形符號為依據國內現行風力規範之計算結果。橫軸為地況分類，縱軸為各方向之尖峰加速度，單位為 m/s^2 或 rad/s^2 。

表 6-4 高寬比 3、6 案例在不同邊界層之最高樓層尖峰加速度

| 高寬比(H/\sqrt{BD})=3 | | | | | | | | | | | | |
|------------------------|---------------|-------|-------|---------------|-------|-------|---------------|---------|---------|-------|-------|-------|
| 尖峰加速度 (m/s^2) | 勁度中心 順風向振動 | | | 勁度中心 橫風向振動 | | | 勁度中心 扭轉向振動 | | | 角隅振動 | | |
| | 地況 | A | B | C | A | B | C | A | B | C | A | B |
| Present (eq. 4-4) | 0.008 | 0.012 | 0.021 | 0.012 | 0.017 | 0.026 | 0.00047 | 0.00069 | 0.00107 | 0.021 | 0.031 | 0.049 |
| Taiwan Wind Code | 0.012 | 0.019 | 0.031 | 0.016 | 0.025 | 0.043 | 0.00087 | 0.00146 | 0.00260 | 0.034 | 0.055 | 0.096 |

| 高寬比(H/\sqrt{BD})=6 | | | | | | | | | | | | |
|------------------------|---------------|-------|-------|---------------|-------|-------|---------------|---------|---------|-------|-------|-------|
| 尖峰加速度 (m/s^2) | 勁度中心 順風向振動 | | | 勁度中心 橫風向振動 | | | 勁度中心 扭轉向振動 | | | 角隅振動 | | |
| | 地況 | A | B | C | A | B | C | A | B | C | A | B |
| Present (eq. 4-4) | 0.012 | 0.018 | 0.026 | 0.020 | 0.027 | 0.036 | 0.00064 | 0.00159 | 0.00218 | 0.033 | 0.058 | 0.080 |
| Taiwan Wind Code | 0.023 | 0.032 | 0.044 | 0.050 | 0.080 | 0.130 | 0.00240 | 0.00333 | 0.00464 | 0.096 | 0.142 | 0.216 |

(資料來源：本研究整理)

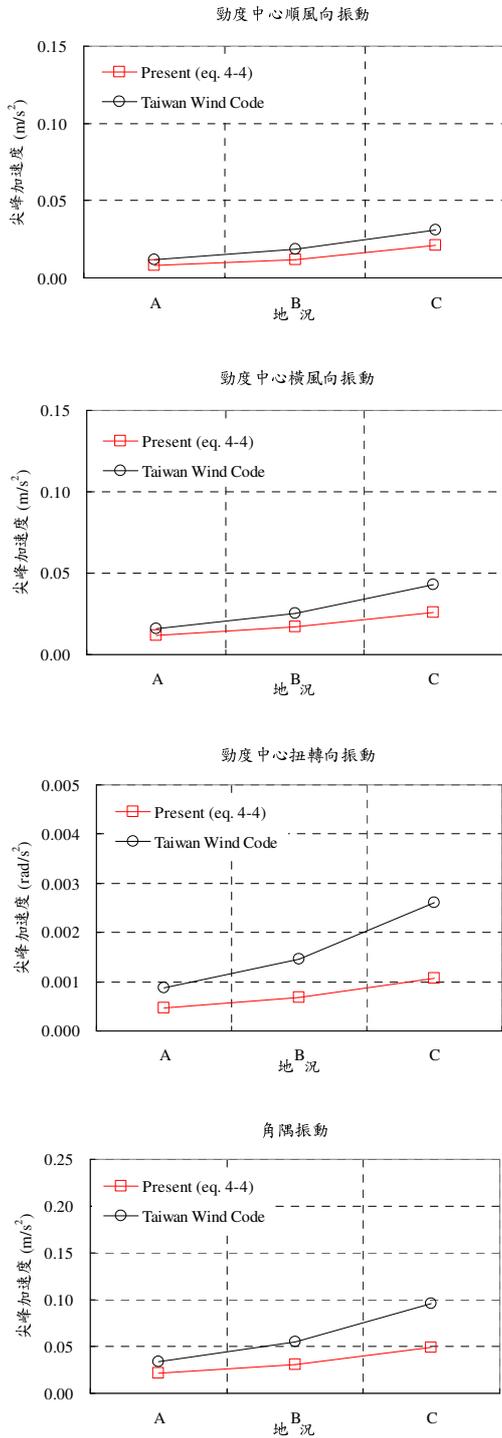


圖 6-17 高寬比 3 案例之最高樓層尖峰加速度
(資料來源：本研究整理)

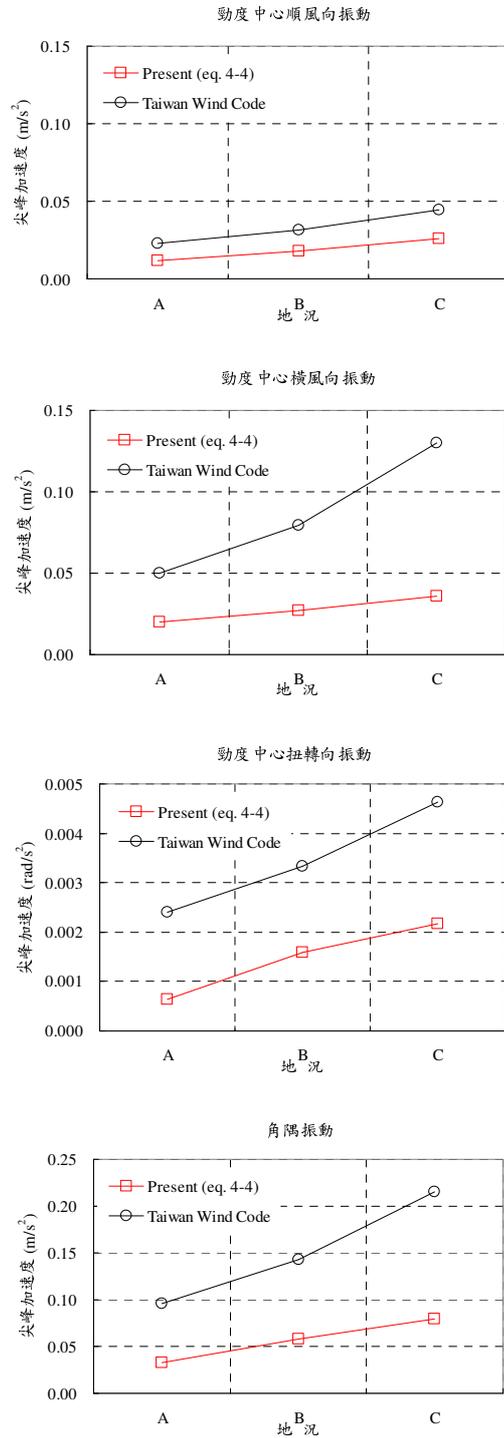


圖 6-18 高寬比 6 案例之最高樓層尖峰加速度
(資料來源：本研究整理)

以風力規範計算各振動方向（順風向、橫風向、扭轉向）加速度之程序，先將各樓層不含平均風力之各振動方向 50 年設計風載重，分別乘上各振動方向之振態而得各振動方向之廣義風力，並除以廣義勁度而得各方向之頂樓尖峰位移量。將該 50 年迴歸期風力對應之位移量，根據風力規範 4.4 節之規定，透過迴歸期 50 年與半年之風速比例 3.34，可計算出半年迴歸期風速之頂樓尖峰加速度。

由圖，高寬比 3 及 6 案例之各方向加速度以地況 C 有最大值，地況 B 次之，地況 A 最小，這應該是設計風速之差異所造成之結果。本文推導式(4-4 式)在兩個案例、不同地況之加速度值皆明顯小於現行國內規範計算之結果，尤其以橫風向振動及扭轉向振動為甚。這應該是規範計算過程中，半年迴歸期設計風載重對應之最高居室樓層位移，是直接以 50 年設計風載重施加於建築物，再除以 3.34 之平方換算而得，並未考慮在不同設計風速下所對應風力頻譜數值上之差異。

第七章 風力規範中風力計算式條文之初擬

本章節根據前述第三章~第五章之討論，進而提出高層建築設計風力與最高居室樓層側向加速度計算式之研擬條文。由於進行風力條文研擬過程中，有關風洞試驗資料之取得、實驗數據迴歸經驗式之歸納整理、以及複雜公式之整合簡化等，這些工作項目相當繁複龐雜，已遠超過本計劃所能負荷之外。這些研究項目之發展需要後續努力方得以完成，故在此提出之相關條文為一初步計算式，做為爾後研究之基本雛形。

第一節 設計風力計算式條文之初擬

根據近年來相關風工程技術之發展以及實際風洞試驗之結果，本計畫對於「建築物耐風設計規範及解說」包括順風向風力、橫風向風力及扭轉向風力在內的條文進行初步之探討與研擬。其中順風向風力之初擬條文是以具有剛性樓板之高層建築為對象，針對其中基本自然頻率小於 1Hz、動力效應明顯之柔性建築物，考慮結構振態對於設計風力之影響。故初擬之風力條文直接給定順風向風力之樓層合力，而非現行風力規範分別計算迎風面與背風面之設計風力。因此初擬之順風向風力條文與目前規範相關條文之型態有所差異，較適合使用於剛性樓板型態之高層建築風力計算。對於基本自然頻率大於 1Hz 之低矮建築物以及需要分別計算迎風面與背風面風力之結構，則建議使用目前規範之相關條文進行風力評估。至於本文初步提出的橫風向風力及扭轉向風力條文之形式，則與目前規範風力條文相似。

設計風力計算式之初擬條文詳述於下列框線之內：

A. 順風向風力

矩形斷面建築物 z 處高度順風向風力 $D(z)$ ，計算如下：

$$D(z) = G(z)\bar{F}_D(z) \quad (a)$$

z 高度處之平均風力 $\bar{F}_D(z)$ 依下式計算：

$$\bar{F}_D(z) = q(H)W \left[\left(\frac{z}{H} \right)^{2\alpha} C_w + C_l \right] \quad (b)$$

z 高度處之陣風反應因子 $G(z)$ 依下式計算：

$$G(z) = 1 + g_D 2I_{\bar{z}} \frac{\left\{ \lambda_Q^2 \left[\left(\frac{z}{H} \right)^\alpha C_w + C_l \right]^2 + \left[(2\beta + 1)^2 \left(\frac{z}{H} \right)^{2\beta} \frac{\pi f_n \chi_R(f_n) S_u^*(f_n)}{4\xi} \right]^2 \right\}^{1/2}}{\left(\frac{z}{H} \right)^{2\alpha} C_w + C_l} \quad (c)$$

其中，

$q(H)$ ：建築物高度 H 處之風速壓； W ：建築物寬度； α ：相較於 10 分鐘平均風速之垂直分布法則的指數； C_w 、 C_l ：分別為迎風面之正風壓以及背風面之負風壓平均風壓係數； g_D ：順風向振動之尖峰因子； β ：結構順風向基本振態指數 $\phi(z) = (z/H)^\beta$ ； f_n ：結構順風向基本振態頻率 (Hz)； $I_{\bar{z}}$ ：等效結構高度 \bar{z} 位置之逼近流場紊流強度； \bar{z} ：等效結構高度； $S_u^*(f_n)$ ：對應於結構順風向基本振態頻率之正規化風速頻譜值； $\chi_R(f_n)$ ：對應於結構順風向基本振態頻率之共振部份氣動力阻抗函數值； λ_Q ：相關性折減因子。

條文中之 C_w 、 C_l 、 λ_Q (詳 3-13 式)、 $\chi_R(f_n)$ (詳 3-6 式)、 $S_u^*(f_n)$ 等參數須依據更完整之風洞試驗資料及後續之分析，以求得簡易可靠之迴歸經驗式，做為最終之規範條文修正式。

B. 橫風向風力

2.10 橫風向之風力

矩形斷面建築物 z 處高度橫風向風力 $W_L(z)$ ，計算如下：

$$W_L(z) = g_L \sqrt{F_{L,B}^2(z) + F_{L,R}^2(z)} \quad (d)$$

z 處高度之擾動風力背景部份 $F_{L,B}(z)$ 依下式計算：

$$F_{L,B}(z) = q(H) \lambda_L C'_L(z) D \quad (e)$$

z 處高度之擾動風力共振部份 $F_{L,R}(z)$ 依下式計算：

$$F_{L,R}(z) = (2\beta + 1) \frac{1}{H} \left(\frac{z}{H} \right)^\beta \left[\frac{\pi f_a S_{F_L}(f_a)}{4\xi} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (f)$$

其中，

g_L ：橫風向振動之尖峰因子； $q(H)$ ：建築物高度 H 處之風速壓； λ_L ：擾動昇力係數 $C'_L(z)$ 之空間相關性修正因子； $C'_L(z)$ ：高度 z 處未考慮空間相關性之擾動昇力係數； D ：建築物深度； β ：結構橫風向基本振態指數 $\phi(z) = (z/H)^\beta$ ； H ：建築物總高度； f_a ：建築物橫風向振動之自然頻率； ξ ：結構阻尼比； $S_{F_L}(f_a)$ ：對應於結構橫風向基本振態頻率之橫風向廣義座標昇力頻譜值。

條文中之 λ_L (詳 3-22 式)、 $C'_L(z)$ 、 $S_{F_L}(f_a)$ 等參數須依據更完整之風洞試驗資料及後續之分析，以求得簡易可靠之迴歸經驗式，做為最終之規範條文修正式。

C. 扭轉向風力

2.11 作用在建築物上之扭矩

矩形斷面建築物 z 處高度扭轉向風力 $W_T(z)$ ，計算如下：

$$W_T(z) = g_T \sqrt{F_{T,B}^2(z) + F_{T,R}^2(z)} \quad (g)$$

z 處高度之擾動風力背景部份 $F_{T,B}(z)$ 依下式計算：

$$F_{T,B}(z) = q(H) \lambda_T C_T'(z) BD \quad (h)$$

z 處高度之擾動風力共振部份 $F_{T,R}(z)$ 依下式計算：

$$F_{T,R}(z) = (2\beta + 1) \frac{1}{H} \left(\frac{z}{H} \right)^\beta \left[\frac{\pi f_t S_{F_T}(f_t)}{4\xi} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (i)$$

其中，

g_T ：扭轉向振動之尖峰因子； $q(H)$ ：建築物高度 H 處之風速壓； λ_T ：擾動扭力係數 $C_T'(z)$ 之空間相關性修正因子； $C_T'(z)$ ：高度 z 處未考慮空間相關性之擾動扭力係數； D ：建築物深度； B ：建築物寬度； β ：結構扭轉向基本振態指數 $\phi(z) = (z/H)^\beta$ ； H ：建築物總高度； f_t ：建築物扭轉向振動之自然頻率； ξ ：結構阻尼比； $S_{F_T}(f_t)$ ：對應於結構扭轉向基本振態頻率之扭轉向廣義座標扭力頻譜值。

條文中之 λ_T (詳 3-27 式)、 $C_T'(z)$ 、 $S_{F_T}(f_t)$ 等參數須依據更完整之風洞試驗資料及後續之分析，以求得簡易可靠之迴歸經驗式，做為最終之規範條文修正式。

第二節 建築物最高居室樓層側向加速度計算條文之初擬

本小節尖峰加速度之計算式為個別振動方向（順風向、橫風向及扭轉向）加速度之評估，角隅位置之尖峰加速度仍依風力規範 4.4 節之規定。另外，最高居室樓層容許側向加速度值之檢討與擬定，已超過本計劃之工作範圍，不在本章節討論之列。

建築物最高居室樓層側向加速度之計算式初擬如下：

4.4 建築物最高居室樓層側向加速度之計算

建築物振動引致第 j 樓層尖峰加速度 $A_i(j)$ ，以下式計算：

$$A_i(j) = \frac{\sum_{j=1}^k f_i(j)\phi_i(j)}{\sum_{j=1}^k m_i(j)\phi_i^2(j)} \times \phi_i(j) \quad (j)$$

其中，

$A_i(j)$ ：第 j 樓層於 i 向振動之尖峰加速度； i ：振動方向，可分別為順風向、橫風向或扭轉向； $f_i(j)$ ：第 j 樓層於 i 向振動方向上，不含平均風力之半年迴歸期設計風力； $\phi_i(j)$ ： i 向振動之結構基本振態，令 $\phi_i(k)=1$ ； k ：樓層總數； ω_i ： i 向振動之結構自然頻率（單位 rad/sec）， $\omega_i = 2\pi f_i$ ； $m_i(j)$ ：第 j 樓層 i 向振動之質量或質量慣性矩。

第八章 結論與建議

第一節 結論

我國於民國 96 年 1 月 1 日實施之風力規範「建築物耐風設計規範及解說」，雖然至今未滿一年，但是規範條文訂定對於結構風力設計之影響廣泛而深遠，因此持續對於規範內容探討改進是相當重要之工作。國內風力規範主要參考美國 ASCE-7 與日本 AIJ-96 相關條文，這些風工程先進國家之風力規範均隨風工程科技發展而持續研擬修訂中，我國亦當如此。

高層建築所承受的風載重包括順風向、橫風向及扭轉向三組同時作用的風力。順風向風力其學理較為明確，藉由理論模式之推導，各國規範有相近的規定。橫風向及扭轉向風力則源自渦散分離及紊流尾跡等現象，因其學理較為複雜，各國風力規範尚無一致之規定。本計畫根據風工程界近年來之研究成果以及風洞試驗數據，對於順風向、橫風向及扭轉向風力及加速度計算式提出修正方式，並透過應用案例之分析，比較其與國內風力規範、風洞試驗結果間之差距。最後並提出對於「建築物耐風設計規範及解說」相關條文之初步修正。

1. 順風向設計風力：

考慮迎風面與背風面風力特性之差異以及擾動風力計算方式之進步，對於迎風面與背風面之風載重個別提出適合的計算模式，以組合出較佳之順風向設計風力計算式；

2. 橫風向與扭轉向風力：

因為橫風向與扭轉向風力形成原因之機制相當複雜，一般規範之做法是以風洞實驗直接量測典型建築物之風力頻譜，並進行

迴歸分析以找出經驗公式。本文亦採用相似之方法，利用先進的表面風壓同步量測技術，選取深寬比 1/1、1/2、1/3、2/1、3/1 且高寬比為 3 及 6 之五種矩形斷面柱體為標的，以現行規範定義之地況 A、B、C 為逼近流場，藉由風洞實驗建立本土化之風力風壓數據資料庫，做為未來規範修正之參考數據；

3. 最高居室樓層側向尖峰加速度：

利用隨機振動理論推導出不需透過結構分析程式計算之修正式，以補強現行規範不足之處。

4. 應用案例：

計畫案以兩棟方形斷面(長 30m×寬 30m×高 90m 及長 30m×寬 30m×高 180m)之建築物為例，分別以本文推導公式、風洞試驗分析及國內現行規範三種評估方式，計算在地況 A、B、C 流場作用之設計風載重及最高居室樓層側向尖峰加速度。分析結果顯示，國內現行風力規範與風洞試驗二者間之設計風載重有較大之差別，本文推導公式則能有效反應風洞試驗之分析結果，其成果應當能較現行風力規範更充份反應高層建築實際承受之風力，以及柔性結構所特有的共振效應。振動加速度方面，本文推導式則明顯低於現行規範之計算值。

5. 「建築物耐風設計規範及解說」修正條文初擬：

透過上述設計風力及加速度修正計算式之推導與驗證，本研究據以研擬完成現行「建築物耐風設計規範及解說」相關條文之初步修正，並可做為未來規範正式修正時之參考。

第二節 建議

由於進行風力規範條文研擬過程中，有關風洞試驗資料之取得、實驗數據迴歸經驗式之歸納整理、以及複雜公式之整合簡化，這些工作相當繁複龐雜，遠超過本計劃所能負荷之外。這些研究項目之發展需要後續多年之努力方得以完成，本文僅在此提出初步之計算修正式，並可做為爾後研究之基本雛形。至於最高居室樓層容許之尖峰側向加速度值，若要進行本國國民相關舒適度測試，以建立適合於台灣人民之容許尖峰側向加速度上限，是需要投入大量人力物力，在多年期之計劃支持下方能合理評估。

根據目前這些研究現況以及審查委員之寶貴意見，對於風力規範後續之相關研究與改進，本文提出下列建議：

建議一

增加風洞試驗之典型建築物形式：立即可行建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：行政院其他相關部會

本研究所執行之風洞試驗限於經費及時間之故，並未完全涵蓋目前風力規範規定之建築物幾何外型。建議增加風洞試驗之典型建築物形式，包括增加高寬比 4、5 之模型，以及深寬比 1/5、1/4、4/1、5/1 之模型，使能完整包含目前規範適用之範圍。

建議二

風洞實驗數據之歸納整理：立即可行建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：行政院其他相關部會

風洞試驗結果須經過詳細之檢核與整理，方能成為規範條文之一部分。惟該工作需研究人員長期持續的投入，方有一定之成果。建議持續進行風洞實驗數據之歸納整理，尋找出各相關參數簡易且準確之經驗式。

建議三

風力計算修正式之整合：立即可行建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：行政院其他相關部會

本研究初擬之風力計算修正式，著重於提高分析之準確度，因而存在著較為繁複之形式。對於工程實務而言，該種複雜形式之風力計算式尚不足以成為規範之可用條文。建議持續針對風力計算之修正式進行整合，降低其型態之複雜性以得一實用化之形式。

建議四

訂定振動加速度舒適性標準：立即可行建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：行政院其他相關部會

國內目前並無足夠之本土化人體振動加速度舒適性資料，現行風力規範中有關數據是整理國外相關文獻而產生。建議執行振動加速度舒適性標準之人體實驗與探討，建構本土化之數據庫，進而提出相關規範之修正條文。

建議五

建立本土化之風力規範：中長期建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：行政院其他相關部會

風力規範之內容需要與時俱進，在確保結構安全之前提下，以更加經濟準確之方式設計結構抗風系統及其他受風影響之構造物。建議透過後續逐年之計畫支持，能使國內風力規範擺脫參考國外規範造成之限制，建立符合台灣人文自然環境特性之本土化風力規範，並達國際上風工程先進國家之水準。

附錄一 期中會議紀錄暨回覆

1. 會議紀錄

內政部建築研究所

本所 96 年度委託研究計畫「高層建築耐風設計風力頻譜與風載重之修訂研究」、「低層建築耐風設計風載重之修訂研究」及「高性能鋼材應用於建築結構之研究」等三案期中審查會議紀錄

一、時間：96 年 7 月 27 日（星期五）下午 2 時 30 分

二、地點：本所簡報室

三、主持人：李主任秘書玉生 記錄：曹源暉、李台光

四、出席人員：（詳出席簽到單）

五、主席致詞：（略）

六、執行單位簡報：（略）

七、綜合討論：

（一）高層建築耐風設計風力頻譜與風載重之修訂研究

王技師亭復

1. 柔性結構的定義如何？其振動週期之界定又為何？是否可應用於隔震建築？
2. 風力頻譜特性如何落實於本地氣象局所收集之資料，例如每年發生之颱風及各區地況特性。

3. 風振動對於人體舒適度之關聯性，除屋頂加速度外，應與人體暴露在該加速度的時間有關，可參考 ISO 有關人體舒適度之標準，惟如何訂定暴露時間需予研討。

朱教授佳仁

1. 期中報告書含有許多公式和參數，其中有許多參數未定義，無法瞭解其意義，建議說明這些公式和參數的物理意義和重要性，而非僅只將數值代入公式進行運算。
2. 各公式應逐一檢查是否有誤繕情形，例如 P.20 最後一行及 P.21 公式(2-51)之" \bar{U}_H "是否應為" \bar{U}_H^2 "。
3. P.8 第一行「頻率小於 1 時」是否應為「頻率小於 1 Hz 時」。
4. 建議選取一項實驗重覆進行數次，並分析其誤差，以瞭解實驗數值的不確定範圍。
5. 有關建物背風面的風壓係數一般為負值，因此 P.22 倒數第二行之 C_l 應說明係取絕對值。

蔡教授益超

1. 目前順風向風力已考慮建築物的周期，但未考慮振態，如果將目前規範的動態風力部分，依振態分配至各樓層，是否可行？

2. 本案研究橫風向與扭轉向的頻譜，但應如何轉換求得各層的橫風向風力與扭矩(亦與振態有關)?
3. 目前規範求橫風向風力與扭矩有許多限制，使用時常常超過其範圍，希望本研究能考慮較廣的範圍。

中華民國土木技師公會全國聯合會 李技師天河

1. 建議增加收集由風力控制之高層建築設計案例及風洞實驗結果等相關資料，做為檢討或修訂現行規範之參考。
2. 建議針對期中報告部分文字敘述做釐清或必要之修改，例如：
 - (1) 第一節第一行「…在建築規範中…」，其建築規範係指何種規範應明確界定。
 - (2) 第一節第五行「…內政部於 96 年頒布之建築物耐風設計規範及解說…」，查該規範係於 95 年 9 月 22 日頒布，並自 96 年 1 月 1 日起施行，而非 96 年頒布，建議修正之。

中華民國結構技師公會全國聯合會 陳技師正平

1. 由於橫風向及扭轉向風力之理論尚未成熟，建議檢討是否有必要放入規範中。
2. 現行規範 2.10 及 2.11 節規定 $3 \leq \frac{h}{\sqrt{BL}} \leq 6$ 時需進行風洞實驗，依此條件，幾乎大多數建物均須進行風洞

實驗。

3. 理論研究可複雜化，但列入規範時，建議應歸納整合後，以最簡化之方式表達才是正確的做法。

中華民國結構技師公會全國聯合會 婁技師光銘

1. 實務應用上，若不符合規範中橫風向風力之套用條件時，應如何處理？是否必須做風洞實驗？
2. 若規定需進行風洞實驗，建議檢討國內實驗室是否有足夠能力與能量執行。

八、結論：

- (一) 本次三項委託研究計畫之期中簡報內容與執行進度，符合本所委託研究契約書之規定，期中簡報審查通過。
- (二) 與會機關團體代表及專家學者之建議事項，請研究團隊於後續研究中參酌辦理，並於期末報告中列表妥予回應。
- (三) 報告書格式須符合本部之規定；另外，研究成果應投稿至本所與建築學會合辦之建築學報，投稿文件於期末時一併提出。
- (四) 各計畫主持人請掌握執行進度，於合約期限內完成各計畫案。

九、散會：（下午 5 時）

2. 意見回覆

| 王技師 亭復 | |
|--|---|
| 審查意見 | 意見回覆 |
| <p>1. 柔性結構的定義如何？其振動週期之界定又為何？是否可應用於隔震建築？</p> <p>2. 風力頻譜特性如何落實於本地氣象局所收集之資料，例如每年發生之颱風及各區地況特性。</p> <p>3. 風振動對於人體舒適度之關聯性，除屋頂加速度外，應與人體暴露在該加速度的時間有關，可參考 ISO 有關人體舒適度之標準，惟如何訂定暴露時間需予研討。</p> | <p>1. 依據「建築物耐風設計規範及解說」定義，柔性建築物為基本自然頻率小於 1Hz 者。應可應用於隔震建築。</p> <p>2. 本計劃風洞試驗之風力頻譜已包含「建築物耐風設計規範及解說」定義之地況特性，而該規範基本上已考慮台灣地區之氣象特性。</p> <p>3. 同意。惟本土化人體舒適度標準之實驗與探討，需要多年期計畫支持，已超過本研究案所能涵蓋之範圍。</p> |

| 朱教授 佳仁 | |
|---|---|
| 審查意見 | 意見回覆 |
| <p>1. 期中報告書含有許多公式和參數，其中有許多參數未定義，無法瞭解其意義，建議說明這些公式和參數的物理意義和重要性，而非僅只將數值代入公式進行運算。</p> <p>2. 各公式應逐一檢查是否有誤繕</p> | <p>1. 遵照辦理。</p> <p>2. 遵照辦理。</p> <p>3. 是為「頻率小於 1 Hz 時」。</p> <p>4. 遵照辦理。實際做法詳見第五章第四節“實驗結果”。</p> <p>5. 遵照辦理。</p> |

| | |
|---|--|
| <p>情形，例如 P.20 最後一行及 P.21 公式 (2-51) 之 "\bar{U}_H" 是否應為 "\bar{U}_H^2"。</p> <p>3. P.8 第一行「頻率小於 1 時」是否應為「頻率小於 1 Hz 時」。</p> <p>4. 建議選取一項實驗重覆進行數次，並分析其誤差，以瞭解實驗數值的不確定範圍。</p> <p>5. 有關建物背風面的風壓係數一般為負值，因此 P.22 倒數第二行之 C_l 應說明係取絕對值。</p> | |
|---|--|

| 蔡教授 益超 | |
|---|---|
| 審查意見 | 意見回覆 |
| <p>1. 目前順風向風力已考慮建築物的周期，但未考慮振態，如果將目前規範的動態風力部分，依振態分配至各樓層，是否可行？</p> <p>2. 本案研究橫風向與扭轉向的頻譜，但應如何轉換求得各層的橫風向風力與扭矩(亦與振態有關)？</p> <p>3. 目前規範求橫風向風力與扭矩有許多限制，使用時常常超過其範圍，希望本研究能考慮較廣的範圍。</p> | <p>1. 審查者提出之方案有二點缺失：(i)現行順風向風力計算式中，並不特別考慮振態對於廣義風力之影響，對於高層建築而言恐不夠精確；(ii)動態反應可分為背景與共振兩部份，二者之空間分配方式不同，必須分開處理。</p> <p>2. 擾動值之共振部份依照慣性力分配至各樓層，背景部份依實驗結果可視為均勻分配，詳見第三章第二節。</p> <p>3. 規範之限制主要來自於氣動力</p> |

| | |
|--|---|
| | <p>不穩定現象之檢核以及該條文所參照之風洞實驗原始設定條件的範圍。前者氣動力不穩定現象可能對結構物造成不可預期之嚴重破壞，是必須極力避免。後者受限於風洞試驗結果之原始設定條件，若要考慮更廣之範圍，得進行更多之風洞實驗。該部分需要多年期計畫支持，遠非本案之工作範圍內可達成。</p> |
|--|---|

| 李技師 天河 | |
|---|---|
| 審查意見 | 意見回覆 |
| <p>1. 建議增加收集由風力控制之高層建築設計案例及風洞實驗結果等相關資料，做為檢討或修訂現行規範之參考。</p> <p>2. 建議針對期中報告部分文字敘述做釐清或必要之修改，例如：</p> <p>(1)第一節第一行「…在建築規範中…」，其建築規範係指何種規範應明確界定。</p> <p>(2)第一節第五行「…內政部於96 年頒布之建築物耐風設計規範及解說…」，查該規範係於95 年 9 月 22 日頒布，並自 96</p> | <p>1. 同意。惟一般建築物之完整結構資料及其風洞試驗報告難以取得，尤其風力控制之高層建築更為少數。相關案例之蒐集有相當之難度。</p> <p>2. 遵照辦理。</p> |

| | |
|--------------------------------------|--|
| <p>年 1 月 1 日起施行，而非 96 年頒布，建議修正之。</p> | |
|--------------------------------------|--|

| <p style="text-align: center;">陳技師 正平</p> | |
|---|--|
| <p style="text-align: center;">審查意見</p> | <p style="text-align: center;">意見回覆</p> |
| <ol style="list-style-type: none"> 1. 由於橫風向及扭轉向風力之理論尚未成熟，建議檢討是否有必要放入規範中。 2. 現行規範 2.10 及 2.11 節規定 $3 \leq h/\sqrt{BL} \leq 6$ 時需進行風洞實驗，依此條件，幾乎大多數建物均須進行風洞實驗。 3. 理論研究可複雜化，但列入規範時，建議應歸納整合後，以最簡化之方式表達才是正確的做法。 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 橫風向及扭轉向風力的存在不容置疑，惟其現象複雜不易以理論模式描述。規範中之橫風向及扭轉向風力，主要是以風洞試驗數據進行迴歸分析之結果，也因此使用上有一定之限制。 2. 該二小節為橫風向及扭轉向風力，同上所述，公式來源是以風洞試驗數據進行迴歸分析之結果。受限於原始實驗條件之有效範圍，規範條文須有一定之限制。不滿足限制條件並不代表不需要做風洞試驗，而應由設計者就其專業知識判斷。 3. 同意。 |

| 妻技師 光銘 | |
|---|--|
| 審查意見 | 意見回覆 |
| <p>1. 實務應用上，若不符合規範中橫風向風力之套用條件時，應如何處理？是否必須做風洞實驗？</p> <p>2. 若規定需進行風洞實驗，建議檢討國內實驗室是否有足夠能力與能量執行。</p> | <p>1. 對於氣動力不穩定現象，若有發生之可能性，當執行風洞試驗以進一步確認。對於非矩形柱體，則非目前規範之有效範圍，需以風洞試驗分析其橫風向風力。對於近似規則之矩形柱體，若 $h/\sqrt{BL} > 6$，因為超出規範之經驗式且為相當柔軟之結構，需小心以風洞實驗檢核氣動力不穩定現象及其風力。對於近似規則之矩形柱體，若僅 $h/\sqrt{BL} < 3$ 而超出規範範圍，因為此時橫風向風力大致上皆小於順風向風力，可忽略之。不滿足限制條件並不代表必需要做風洞試驗，而應由設計者就其專業知識判斷。</p> <p>2. 國內應已具備足夠之實驗能量，惟其詳細狀況建議由內政部建築研究所調查公佈之。</p> |

附錄二 期末會議紀錄暨回覆

1. 會議紀錄

內政部建築研究所

本所 96 年度委託研究計畫「高層建築耐風設計風力頻譜與風載重之修訂研究」、「低層建築耐風設計風載重之修訂研究」及「高性能鋼材應用於建築結構之研究」等三案期末審查會議紀錄

一、時間：96 年 11 月 16 日（星期五）下午 2 時 30 分

二、地點：本所簡報室

三、主持人：李主任秘書玉生(王組長榮進代) 記錄：曹源
暉、李台光

四、出席人員：（詳出席簽到單）

五、主席致詞：（略）

六、執行單位簡報：（略）

七、綜合討論：

（一）高層建築耐風設計風力頻譜與風載重之修訂研究

王技師亭復

1. 我國建築物耐風設計規範在今年元月始公布實施，本研究隨即建議修訂，原本計算方式已略嫌複雜，今建議以陣風載重因子取代陣風反應因子，雖曰合理，但第七章所列之(a)~(j)各式，均

出現繁複運算公式，以及動態分析中各振態之頻率及振態，除非有如耐震規範之規定，於規則性建築物予以簡化，否則實施起來會較困難。

1. 居室樓層側向加速度評估係採用半年回歸期風速作用，是否一併改用一年回歸期？其居室容許加速度值亦可修改增大，甚至可以 50 年回歸期為準，而增大居室容許加速度標準。
2. 按照 ISO 研究報告指出，在頻率 2Hz 以下，人體對水平振動舒適度及樓板加速度容許值與延時 (duration) 有關，且為均值，例如 2.5 小時為 17 gal、1 小時為 27 gal、25 分為 45 gal、15 分為 50 gal、1 分為 65 gal 等，本規範之半年回歸期為 5 gal，亦即換算 50 年回歸期為 50 gal，以上供研究參考。

朱教授佳仁

1. 報告書中有許多參數之翻譯及符號建議一致，例如：
 - (1)、P.9 中， \bar{z} 代表有效高度、等值高度，P.10 中，為等效結構，名稱不一致。
 - (2)、式(2.1)中之 \bar{V}_z 在 P.10 式(2.5)下面則用 \bar{U}_z 。
 - (3)、式(2.10)中使用 Rh，其下則用 RH，是否相同？
 - (4)、P.13 式(2.19)下面，H：參考高度為何？B 是否改為「建築物投影寬度」？

- (5)、式(2.46)及 P.21 之 σ_{yB} 的分母是否有誤？
- (6)、P.23 式(2.54)中之 $|J_z(\alpha, \beta, f)|$ 是否有平方？
- (7)、P.31 中 C_w 、 C_l 是否應為「風壓係數」而非「風力係數」？
- (8)、P.38 式(3.20)中「L 指昇力」，建議報告書中所有的「昇力」全部改為「側向力」。

2. 高層建築物是否可以有較明確之定義？

蔡教授益超

1. 目前規範中橫風向與扭轉向之風力計算式有許多限制，例如 $3 \leq \frac{h}{\sqrt{BL}} \leq 6$ ， $0.2 \leq L/B \leq 5$ ， $\frac{f_a \sqrt{BL}}{V_h} \leq 0.4$ ，請問本次研擬是否取消限制？
2. 屋頂加速度計算式(j)中不含平均風力，對橫風向及扭轉向振動皆只有擾動風力部分，但擾動分背景與共振部分，請問是否只考慮共振部分？
3. 橫風向風力與扭轉向風力之計算式中包含 $C_L'(z)$ 與 $C_T'(z)$ ，是否有其必要？會增加計算的繁雜度。

陳技師司斌

1. 研究內容對於高層柔性建築物順風向風力明顯與規範有所不同，模組之動力周期範圍是否可給予一定建議，俾使在此類建築物之風力計算(規範計算)外，另有較可行之結構設計修正。

中華民國建築師公會全國聯合會 陳建築師鵬欽

- 1.P.74 中 g_T 是否應為「扭轉向振動之尖峰因子」？
- 2.P.74 第三行扭轉向風力「 $W_L(z)$ 」是否應為「 $W_T(z)$ 」？
- 3.P.46 第七行，「振態為 1」建議改為「第一振態」。
- 4.P.3 中倒數第 6 行，不需要結構分析能否求取位移反應？
- 5.「建築物耐風設計規範」之風力規定，計算已很繁複，工程界較希望能有保守且易於分析之計算式，化繁為簡。

中華民國土木技師公會全國聯合會 李技師天河

- 1.建議將第七章有關「設計風力計算式(第一節)」及「建築物最高居室樓層側向加速度計算條文」等初擬之內容，與現行規範之內容做比較，並概述修訂建議之緣由。(建議考量以附錄呈現)
- 2.建議將第八章第二節有關「後續研究」之建議，將內容具體闡述，以供建研所後續委託之參考。

研究計畫執行單位回覆

中華民國風工程學會 鄭教授啟明

1. 在舒適度計算方式中，所謂不需要結構計算係指無需輸入風力進行結構分析，然而仍需藉由結構動力分析求得所需之振態頻率。至於計算式中之積分項係通用之表示法，對於 lump mass 模式則可轉化為

疊加式。

2. 針對簡化風力計算方面，要同時顧及簡單、合理且準確，確實有其困難度，國外規範之計算模式亦相當複雜，因此，未來在規範條文修正時，會盡量避免過度複雜化。
3. 現行規範中，有關橫風向及扭轉向風力計算式之限制條件，並非意味著不符合條件即需進行風洞實驗，未來將藉由更多實驗數據來擴充、修正其計算式與限制條件。
4. 在橫風向及扭轉向加速度計算過程中，確實存在著背景與共振部分，但是幾乎是由共振部分主導，因此，直接計算與單獨由共振部分求得，二者所得結果差不多。
5. 本研究中，在橫風向與扭轉向風力計算式中，之所以會用到 $C_L'(z)$ 與 $C_T'(z)$ ，係由於量測方式與過去不同所致，至於能否簡化為一個參數，仍需進一步整理與探討。
6. 有關高層建築之定義，事實上應定位成柔性建築，即動力效應顯著之建築結構，而不從高度去區分。

八、結論：

- (一) 綜合討論建議事項，請研究團隊參採辦理或妥予回應，納入最後之成果報告，並利用後續時程充實研究

內容；另有關成果報告格式，請研究團隊特別注意，務必依規定製作。

(二) 本次期末簡報審查原則通過，並請檢核委託研究計畫之契約需求，儘速完成成果報告書，辦理結案。

九、散會：（下午 5 時）

2. 意見回覆

| 王技師 亭復 | |
|--|---|
| 審查意見 | 意見回覆 |
| <p>1. 我國建築物耐風設計規範在今年元月始公布實施，本研究隨即建議修訂，原本計算方式已略嫌複雜，今建議以陣風載重因子取代陣風反應因子，雖曰合理，但第七章所列之(a)~(j)各式，均出現繁複運算公式，以及動態分析中各振態之頻率及振態，除非有如耐震規範之規定，於規則性建築物予以簡化，否則實施起來會較困難。</p> <p>2. 居室樓層側向加速度評估係採用半年回歸期風速作用，是否一併改用一年回歸期？其居室容許加速度值亦可修改增大，甚至可以50年回歸期為準，而增大居室容許加速度標準。</p> <p>3. 按照 ISO 研究報告指出，在頻率2Hz 以下，人體對水平振動舒適度及樓板加速度容許值與延時(duration)有關，且為均值，例如2.5 小時為 17 gal、1 小時為 27 gal、25 分為 45 gal、15 分為 50</p> | <p>1. 針對簡化風力計算方面，要同時顧及簡單、合理且準確，確實有其困難度，國外規範之計算模式亦相當複雜，因此，未來在規範條文修正時，會盡量避免過度複雜化。</p> <p>2. 居室樓層側向加速度之迴歸期設定已超出本案之研究範圍。一般而言，該類規範條文是評估日常生活中可能較常出現之振動加速度對人體之影響，因此該迴歸期是以較短天數內，居民是否會發生振動上之不舒適來進行評估。</p> <p>3. 該資料將做為未來研究之參考。</p> |

| | |
|--|--|
| gal、1 分為 65 gal 等，本規範之半年回歸期為 5 gal，亦即換算 50 年回歸期為 50 gal，以上供研究參考。 | |
|--|--|

| 朱教授 佳仁 | |
|---|---|
| 審查意見 | 意見回覆 |
| <p>1. 報告書中有許多參數之翻譯及符號建議一致，例如：</p> <p>(1) P.9 中，\bar{Z} 代表有效高度、等值高度，P.10 中，\bar{Z} 為等效結構，名稱不一致。</p> <p>(2) 式(2.1)中之 \bar{V}_Z 在 P.10 式(2.5)下面則用 \bar{U}_Z。</p> <p>(3) 式(2.10)中使用 R_h，其下則用 R_H，是否相同？</p> <p>(4) P.13 式(2.19)下面，H：參考高度為何？B 是否改為「建築物投影寬度」？</p> <p>(5) 式(2.46)及 P.21 之 σ_{yB} 的分母是否有誤？</p> <p>(6) P.23 式(2.54)中之 $J_z(\alpha, \beta, f)$ 是否有平方？</p> <p>(7) P.31 中 C_w、C_l 是否應為「風壓係數」而非「風力係數」？</p> | <p>1. (1)遵照辦理；</p> <p>(2)已修正為 \bar{V}_Z</p> <p>(3) R_H 是 R_h 之誤植；</p> <p>(4)於 AIJ96 文中，參考高度一般而言可定為建築物屋頂之平均高度。B 已改為「建築物投影寬度」</p> <p>(5)已修正；</p> <p>(6)已修正；</p> <p>(7) C_w、C_l 代表迎風面與背風面之風力係數；</p> <p>(8)下標 L 於國際風工程界之習慣用法為「昇力」，使用其他稱呼易造成混淆，因此本報告仍維持原有之作法。對於日後在規範修正條文上之名稱，則會參考規範相關名詞之定義及委員之寶貴意見，做適當之決定。</p> <p>2. 有關高層建築之定義，事實上應定位成柔性建築，即動力效應顯</p> |

| | |
|---|--|
| <p>(8) P.38 式(3.20)中「L指昇力」，建議報告書中所有的「昇力」全部改為「側向力」。</p> <p>2. 高層建築物是否可以有較明確之定義？</p> | <p>著之建築結構，而不從高度去區分。依目前國內風力規範之定義，自然頻率小於 1Hz 者屬於柔性建築物。</p> |
|---|--|

| 蔡教授 益超 | |
|--|---|
| 審查意見 | 意見回覆 |
| <p>1. 目前規範中橫風向與扭轉向之風力計算式有許多限制，例如 $3 \leq h/\sqrt{BL} \leq 6$，$0.2 \leq L/B \leq 5$，$f_a \sqrt{BL}/V_h \leq 0.4$，請問本次研擬是否取消限制？</p> <p>2. 屋頂加速度計算式(j)中不含平均風力，對橫風向及扭轉向振動皆只有擾動風力部分，但擾動分背景與共振部分，請問是否只考慮共振部分？</p> <p>3. 橫風向風力與扭轉向風力之計算式中包含 $C_L'(z)$與 $C_T'(z)$，是否有其必要？會增加計算的繁雜度。</p> | <p>1. 該限制是源自於原始風洞實驗條件之限制，而本研究計畫設定之實驗條件亦在該範圍內。擬於未來研究擴大實驗參數範圍，方能改變目前規範之限制條件。惟該限制條件已涵蓋多數高層建築之形式。</p> <p>2. 屋頂加速度計算式使用之風力已包含擾動風力之背景與共振部分，故計算所得之加速度同樣包含此二者。在橫風向及扭轉向加速度計算過程中，確實存在著背景與共振部分，但是幾乎是由共振部分主導，因此，直接計算與單獨由共振部分求得，二者所得結果差不多。</p> <p>3. 本研究中，在橫風向與扭轉向風力計算式中，之所以會用到 CL'</p> |

| | |
|--|---|
| | (z)與 $CT'(z)$ ，係由於量測方式與過去不同所致，至於能否簡化為一個參數，仍需進一步整理與探討。 |
|--|---|

| 陳技師 司斌 | |
|--|--|
| 審查意見 | 意見回覆 |
| 1. 研究內容對於高層柔性建築物順風向風力明顯與規範有所不同，模組之動力周期範圍是否可給予一定建議，俾使在此類建築物之風力計算(規範計算)外，另有較可行之結構設計修正。 | 1. 有關高層建築之定義，事實上應定位成柔性建築，即動力效應顯著之建築結構，而不從高度去區分。依目前國內風力規範之定義，自然頻率小於 1Hz 者屬於柔性建築物，大於 1Hz 者屬於普通建築物。 |

| 陳建築師 鵬欽 | |
|---|---|
| 審查意見 | 意見回覆 |
| 1. P.74 中 g_T 是否應為「扭轉向振動之尖峰因子」？ | 1. 已修正； |
| 2. P.74 第三行扭轉向風力「 $W_L(z)$ 」是否應為「 $W_T(z)$ 」？ | 2. 已修正； |
| 3. P.46 第七行，「振態為 1」建議改為「第一振態」。 | 3. 「振態為 1」是指建築物振態在最高樓層處之值為 1； |
| 4. P.3 中倒數第 6 行，不需要結構分析能否求取位移反應？ | 4. 在舒適度計算方式中，所謂不需要結構計算係指無需輸入風力進行結構分析，然而仍需藉由結構動力分析求得所需之振態頻率。 |
| 5. 「建築物耐風設計規範」之風力規定，計算已很繁複，工程界較 | 5. 針對簡化風力計算方面，要同時顧及簡單、合理且準確，確實有 |

| | |
|------------------------------|--|
| <p>希望能有保守且易於分析之計算式，化繁為簡。</p> | <p>其困難度，國外規範之計算模式亦相當複雜，因此，未來在規範條文修正時，會盡量避免過度複雜化。</p> |
|------------------------------|--|

| 李技師 天河 | |
|---|---|
| 審查意見 | 意見回覆 |
| <p>1. 建議將第七章有關「設計風力計算式(第一節)」及「建築物最高居室樓層側向加速度計算條文」等初擬之內容，與現行規範之內容做比較，並概述修訂建議之緣由。(建議考量以附錄呈現)</p> <p>2. 建議將第八章第二節有關「後續研究」之建議，將內容具體闡述，以供建研所後續委託之參考。</p> | <p>1. 現行法規與本案初擬條文，因為二者之基本分析方法有所差異，因此不易在條文上逐一比對。而建議修訂之緣由原已詳列於報告之第一章，故不再贅述。</p> <p>2. 遵照辦理。</p> |

附錄三 專家座談會議紀錄暨回覆

- 一、時 間：96 年 12 月 21 日（星期五）下午 3 時
- 二、地 點：淡江大學台北校園會議室 209 室
- 三、主持人：鄭教授啟明、吳教授重成
- 四、出席人員：台灣科技大學營建工程系陳教授瑞華、中興大學土木工程系方教授富民、淡江大學土木工程系王教授人牧、建國科技大學空間設計系陳教授若華、淡江大學土木工程系林教授堉溢、淡江大學水資源與環境工程系盧教授博堅、淡江大學土木工程系張教授正興
- 五、審查意見暨回覆

| 陳教授 瑞華 | |
|---|---|
| 審查意見 | 意見回覆 |
| <p>1. 研究案中有提到 2 個結果，第一個是規範中的 TI 值可能偏高，第二個是比較高樓層處規範所算出的風力比較不保守。建議訂立修正規範機制，藉由小組討論或是公開說明，能夠定期來部份修正規範，至少定期召開以便重新檢視，將大家不同層面的意見提出來討論編制。</p> | <p>1. 規範之修正是需要一個常設機構持續進行，以反應風工程界近年之研究與發展。希望未來該機制能在國內儘速建立完成，以協助發展出符合國內需求之規範。</p> |

| 方教授 富民 | |
|--|---|
| 審查意見 | 意見回覆 |
| 1. 矩形斷面模型風力係數與風力頻譜之無因次化方式，在選取特徵尺度時，因為斷面深度與寬度之不同而易造成誤會。這在資料庫之建立時，需仔細定義並反覆查核，尤其是整合不同之資料來源時，更須小心。 | 1. 在建立風力資料庫時，當會特別注意並定義清楚風力係數與風力頻譜之無因次化方式，以避免不必要之混淆。 |

| 王教授 人牧 | |
|---|---|
| 審查意見 | 意見回覆 |
| 1. 風力資料庫之建立，建議針對實驗誤差訂定一個較為客觀之標準，做為日後資料整合與更新之依據。 | 1. 若風力資料庫預計做為正式規範修訂之原始數據，對其資料當有一定之選取標準，此將在日後計畫中進行相關之研究。 |

| 陳教授 若華 | |
|---|--|
| 審查意見 | 意見回覆 |
| 1. 順風向風力初擬條文中包含數個計算繁複之參數，在手算過程中容易因此而發生錯誤。建議增加該參數可能使用範圍之相關圖表，讓使用者以查閱圖表方式取代冗長之計算。 | 1. 規範條文之複雜化與分析結果之準確性不易兼容並蓄，常見方式即是以查閱圖表方式取代繁複計算。本計劃之初擬條文仍有部份參數有待詳細討論，最終定案之條文則會配合圖表加以表示。 |

| 林教授 堉溢 | |
|---------------------------------------|--|
| 審查意見 | 意見回覆 |
| 1. 尖峰加速度初擬條文之計算式應該是單一振動方向之加速度，而且是尖峰值？ | 1. 該條文是結構單一振動方向之加速度尖峰值，角隅位置之加速度計算仍依照風力規範 4.4 節之條文計算。 |

| 盧教授 博堅 | |
|---|---|
| 審查意見 | 意見回覆 |
| 1. 目前風力規範之橫風向與扭轉向設計風載重條文使用限制包括 $f\sqrt{BL}/V_h \leq 0.4$ ，這應該是高頻力平衡儀風洞試驗之限制。則該計畫在使用表面風壓試驗為工具後，是否有較佳之頻率反應？ | 1. 使用風壓試驗量測風力頻譜是有比高頻力平衡儀法為佳之頻率表現，但目前本計畫尚未完成風力頻譜相關之迴歸工作，其可用頻率之範圍還未能確定。 |

| 張教授 正興 | |
|---|---|
| 審查意見 | 意見回覆 |
| 1. 風力頻譜之迴歸式直接影響風力載重計算之結果，迴歸過程要小心處理，尤其在一般建築物常使用之較高頻區域。 | 1. 風力頻譜之迴歸式預計會包含高寬比、深寬比及地況等因子等，相當複雜。在後續計畫中會仔細處理有關之迴歸工作。 |

參考書目

- [1] ASCE (2002). “Minimum design loads for buildings and other structures.” ASCE 7-02, Reston, Va., USA.
- [2] Architectural Institute of Japan. (1996) “Recommendations for loads on buildings.” , Japan.
- [3] Australian/New Zealand Standard, AS/NZS 1170.2:2002 (2002), Structural design actions Part 2 : Wind actions, Standards Australia.
- [4] National Research Council of Canada, (1990), Supplement to the National Building Code of Canada 1990.
- [5] British Standard (2002), Loading for Buildings-Part2: Code of Practice for Wind Loads.
- [6] Kareem, A. (1990) “Measurements of pressure and force fields on building models in simulated atmospheric flows.” Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 36, 589–599.
- [7] Solari, G. (1993a) “Gust buffeting I: peak wind velocity and equivalent pressure.” Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 110, 2, 365-382.
- [8] Solari, G. (1993b) “Gust buffeting II: dynamic alongwind response.” Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 110, 2, 383-398.
- [9] Holmes, J.D., (2001), Wind loading of structures, Spon Press.
- [10] Zhou, Y. and Kareem, A. (2001). “Gust loading factor: new model.” Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 127, No. 2, 168-175.
- [11] Shuguo Liang, Shengchun Liu, Q.S. Li, Liangliang Zhang, Ming Gu , (2002) ”Mathematical model of acrosswind dynamic loads on rectangular tall buildings”, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 90 1757–1770.
- [12] Yin Zhou, Tracy Kijewski, Ahsan Kareem, (2003) “Aerodynamic Loads on Tall Buildings: Interactive Database”, Journal of

- Structural Engineering, Vol. 129, No. 3.
- [13] Jenmu Wang, Chii-Ming Cheng, (2003) “Knowledge Mangement In A Wind Tunnel Laboratory: The WERC-TKU Knowledge Project.”, The International Wind Engineering Symposium, November 17-18, 2003, Tamsui, Taipei county, Taiwan.
- [14] M. Gu , Y. Quan, (2004) “Across-wind loads of typical tall buildings”, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 92 1147–1165
- [15] Davenport, A.G. 1967, “Gust loading factors”, Journal of Structural Division, Proceedings of ASCE, 93, 11–34.
- [16] “Guidelines for the evaluation of habitability to building vibration (建築振動舒適度評估準則)”, (2004), 日本建築學會.
- [17] Solari, G. (1988) “Equivalent wind spectrum technique : theory and application.” Journal of Structural Engineering, 114(6), 1303-1323.
- [18] 姜光晉, (2004)“高層建築設計風力修正模式之研究”,淡江大學碩士論文, Aug. 2004.
- [19] 鄭啟明, 吳重成, 陳若華, (2002)“建築物風力規範之研究”, 內政部建築研究所研究計畫成果報告.
- [20] 鄭啟明, 吳重成, 陳若華, 張正興 (2003)“建築物風力規範之修訂研究 (二)”, 內政部建築研究所委託研究報告.
- [21] 內政部營建署, (2006), 「建築物耐風設計規範及解說」, 營建雜誌社.
- [22] 鄭啟明, 蔡明樹, (2006)“高層建築順風向設計風載重之修正研究”, 中華民國第八屆結構工程研討會, Sep. 1-3, 2006.
- [23] 鄭啟明, 蔡明樹, (2007), “高層建築順風向設計風載重分析模式與風洞實驗之研究”九十六年電子計算機於土木水利工程應用研討會.

- [24] 蔡明樹, (1996)“高層建築氣彈力現象之風洞研究”, 淡江大學碩士論文, Jan. 1996.
- [25]“RAD3200 System Instruction and Service Manual”, Scanivalve Corp.

高層建築耐風設計風力頻譜與風載重之修訂研究

出版機關：內政部建築研究所

電話：(02) 89127890

地址：台北縣新店市北新路三段 200 號 13 樓

網址：<http://www.abri.gov.tw>

編者：鄭啟明、吳重成、楊承翰

出版年月：96 年 12 月

版(刷)次：初版

工本費：

GPN：

ISBN：978-986-01-2953-3