

高層建築物柔性氣彈模型風洞試驗研究

內政部建築研究所委託研究報告

106 年度



# 高層建築物柔性氣彈模型風洞 試驗研究

內政部建築研究所委託研究報告

中華民國 106 年 12 月

(本報告內容及建議，純屬研究小組意見，不代表本機關意見)



(科技部 GRB 編號)

PG10601-0662

# 高層建築物柔性氣彈模型風洞 試驗研究

受委託者：財團法人成大研究發展基金會

研究主持人：方中

協同主持人：朱世禹

研究助理：陳敬函、粘浩

研究期程：中華民國 106 年 1 月至 106 年 12 月

研究經費：新臺幣 130 萬元

## 內政部建築研究所委託研究報告

中華民國 106 年 12 月

(本報告內容及建議，純屬研究小組意見，不代表本機關意見)



## 目次

表次	III
圖次	V
摘要	IX
第一章 緒論	1
第一節 研究緣起與背景	1
第二節 研究目的與方法	1
第三節 研究步驟流程與進度說明	3
第二章 資料蒐集與文獻回顧	7
第一節 高樓縮尺模型風洞實驗相關研究	7
第二節 高樓縮尺模型振動台實驗相關研究	13
第三節 應用振動反應進行動態參數識別相關研究	15
第三章 高樓柔性氣彈與剛性模型之風洞實驗分析與探討	17
第一節 高樓柔性氣彈風洞模型之相似律分析	17
第二節 高樓受風力作用時之規範基本探討	20
第三節 高樓剛性模型風洞實驗分析與探討	30
第四節 高樓柔性氣彈模型風洞實驗分析與探討	37
第四章 高樓柔性氣彈與剛性風洞模型振動台試驗	45
第一節 實驗設備與配置	45
第二節 實驗及操作說明	50
第三節 柔性與剛性風洞模型參數識別分析與探討	57
第五章 結論與建議	63

第一節 結論	63
第二節 建議	65
附錄一 專家學者座談意見回應	69
附錄二 期中審查意見暨回覆	75
附錄三 期末審查意見暨回覆	79
參考書目	85



## 表次

表 1-1 工作規劃甘特圖與進度概述	6
表 2-1 模型阻尼比與結構特性	12
表 3-1 柔性建築物設計風壓 $p$ 及設計風力 $F$	20
表 3-2 地況相關參數	22
表 3-3 地況 A 相關參數	23
表 3-4 風力規範地況	24
表 3-5 六力平衡儀量測範圍表	31
表 3-6 不同風攻角下模型受力結果	35
表 3-7 不同風攻角下模型受力之風力係數	35
表 3-8 不同風速下模型受力結果	40
表 3-9 不同風速下模型受力之風力係數	41
表 4-1 電磁式震動機台規格表	45
表 4-2 震動控制系統 VCS-102 規格表	46
表 4-3 加速規規格表	47
表 4-4 輸入輸出驗證表	50
表 4-5 頻率 10Hz 正弦試驗驗證對照表	50
表 4-6 頻率 30Hz 正弦試驗驗證對照表	50

表 4-7 頻率 50Hz 正弦試驗驗證對照表 . . . . . 51

表 4-8 剛性模型試驗各頻率正弦試驗輸出位移對照表 . . 58

表 4-9 柔性模型試驗各頻率正弦試驗輸出位移對照表 . . 61

## 圖次

圖 1-1 研究步驟與流程	5
圖 2-1 柱體受風速 $U$ 受力及氣動力阻尼之情形	9
圖 2-2 BL9 地況人工粗糙物擺設圖	11
圖 2-3 BL3 地況人工粗糙物擺設圖	11
圖 2-4 ERA 和 OKID 識別流程圖	16
圖 3-1 渦流逸散現象示意圖	19
圖 3-2 建築物設計風力計算陣風反應因子計算	25
圖 3-3 建築物設計風力計算橫風力計算圖	28
圖 3-4 風洞系統簡圖	30
圖 3-5 熱線流速儀安裝圖	31
圖 3-6 六力平衡儀安裝於風洞之轉盤基座圖	32
圖 3-7 機箱與量測系統圖	32
圖 3-8 訊號擷取系統圖	33
圖 3-9 實驗配置圖-由來流風處拍攝	33
圖 3-10 實驗配置圖-面向來流風處拍攝	34
圖 3-11 不同風攻角下模型受力關係圖	36
圖 3-12 雷射位移計量測模型頂端位移圖	37

圖 3-13	加速規	38
圖 3-14	實驗配置圖(面向來流風向)	39
圖 3-15	雷射位移計編號	39
圖 3-16	不同風速下柔性模型受力關係圖	42
圖 3-17	各種風力係數於不同風速時之比較關係圖	44
圖 4-1	電磁式振動機台及水平床體	45
圖 4-2	振動控制系統	46
圖 4-3	振動台加速規	47
圖 4-4	控制電腦	48
圖 4-5	雷射位移計	48
圖 4-6	低頻加速規	49
圖 4-7	高頻加速規	49
圖 4-8	擷取系統	49
圖 4-9	10Hz 正弦試驗資料整理圖	51
圖 4-10	30Hz 正弦試驗資料整理圖	51
圖 4-11	50Hz 正弦試驗資料整理圖	52
圖 4-12	風洞剛性模型	53
圖 4-13	剛性模型振動台實驗配置圖	54

圖 4-14 柔性模型加速規轉接示意圖 ····· 55

圖 4-15 柔性模型振動台實驗配置圖 ····· 56

圖 4-16 剛性模型頻率轉換函數圖 ····· 59

圖 4-17 柔性模型頻率轉換函數圖 ····· 62

(本頁空白)

## 摘要

關鍵詞：柔性模型、氣彈、風洞試驗、振動台試驗、系統識別

### 一、研究緣起

有關特殊高層建築之風力研究，目前多以風洞模型試驗為主。常見的風洞試驗項目包括：1. 建築主要抗風系統所承受之整體風力試驗。2. 局部構件及外部被覆物所受之局部風壓試驗。3. 結構空氣彈力試驗。4. 環境風場舒適性評估。綜觀現有一般高層建築相關氣彈力研究中，柔性氣彈模型(flexible aeroelastic model)最能真確反映真實建築之動態行為，然而為了節省試驗之人力、經費與時間，常以簡化之剛性氣動模型(rigid aerodynamic model)進行試驗，而簡化之試驗成果是否亦適用於高層建築，仍需進一步研究與比對。肇因於柔性氣彈模型製作上，如何適當呈現高層建築完整之振態行為，尚有困難必須克服，但國外已有相關文獻案例執行柔性氣彈模型風洞試驗，本研究擬針對一般高層建築之風洞試驗模型製作與行為精進進行研究與試驗，根據建築物耐風設計規範及建築物耐震設計規範，進行近似矩形高樓剛性與柔性模型設計與風力評估，採用振動平台進行近似矩形高樓建築剛性與柔性風洞試驗模型之動態行為測試，進一步應用系統參數識別技術，針對試驗模型之動態參數與振態行為進行識別，作為風洞流場中相關相似性要求的基準。於臨界風速下進行剛性與柔性建築模型風洞試驗，量測基底風力與最高居室側向加速度，加以探討氣彈效應影響。同時結合振動台試驗與建築風洞試驗，並交互比對藉以提升結構風載重試驗能力。

### 二、研究方法及過程

本研究擬利用不同變形材料，製作近似矩形的縮尺高層建築物剛性與柔性模型，進行剛性與柔性氣彈模型之風洞模型試驗分析，同時以此矩形高樓縮尺模型進行振動台測試，分析其動態參數與振態行為，以識別出結構特性。並在考慮風洞試驗所需要注意的縮尺相似性問題，如雷諾數(Reynolds number)、福祿數(Froude number)、尤拉數(Euler

number)、史特赫數(Strouhal number)等相關係數下；也將做振動台實驗時必須滿足與原型結構之物理、幾何、邊界條件相似之縮尺相似性問題，如以結構動力問題中的各基本物理量：長度( $l$ )、剛度( $E$ )、密度( $\rho$ )、加速度( $a$ )表示的相似係數一併考慮在內。

在風洞試驗方面，擬以平坦開闊地形中，三維方形截面之獨立柱體為基準問題，分別針對氣動力與氣彈力兩種情況，除了細部探討風域中方柱形狀建築物之受風效應與動態反應外，並建立足以正確描述相應動力特性之數值計算模式，以供相關風力分析之用。在振動台試驗方面，必須先考慮到動態試驗縮尺模型之相似係數(縮尺模型物理量 / 原型結構物理量)，也就是試體原高層建築結構與縮尺後模型，關鍵的比例關係，來設計風洞試驗模型。

### 三、重要發現

本研究針對一般高層建築之風洞試驗剛性與柔性模型製作與行為精進進行研究與試驗，採用振動平台進行高層建築風洞剛性與柔性試驗模型之動態行為測試，進一步應用系統參數識別技術，針對剛性與柔性試驗模型之動態參數與振態行為進行識別。同時進行剛性與柔性氣彈模型之風洞試驗，以評估模型之適用性。本研究所得之結論如下：

- (1) 針對建築風洞試驗柔性氣彈模型之分析與製作，本研究採用鋼材與飛機木，配合碳纖維絞索，成功製作具有柔性變形行為之風洞模型，並對其動態行為進行分析與試驗測試。
- (2) 利用風洞實驗室，完成高寬比( $H/D$ )為 7 之三維方形斷面柱體之剛性與柔性氣彈模型之風洞試驗。由風洞實驗結果，可知在達到渦散共振風速時，柔性試體之振動反應加劇，阻力與昇力驟升，紊流強度亦由原先保持在 0.5% 以下的狀態，在共振現象出現時升至 3.37%。
- (3) 針對建築風洞試驗柔性氣彈模型之擾動值而言，在未發生共振效應的狀態下，擾動力值、擾動扭力值均極小，亦即在實驗過程中並未出現大量偏離平均值的情形，但在共振現象發生時，擾動值有增加的現象。
- (4) 本次研究中可以觀察到當共振效應發生時，柔性模型的風力係數出現較大變化，



此現象在不發生共振效應之剛性氣動模型實驗難以觀察到。以平均昇力係數為例，柔性氣彈模型共振反應最大時，其平均昇力係數約為 0.18，而剛性氣動模型之昇力係數約為 0.00063，後者幾無出現橫風向受力情形，柔性模型可以表現剛性模型不具備的共振反應，且其差異顯著。

- (5) 本研究以高頻振動台給定風洞剛性模型試體及柔性氣彈模型基底振動，藉此激發試體之頻率內涵來識別剛性模型與柔性模型結構參數，用以和風洞試驗值進行比較。傳統壓克力製作之剛性模型共振頻率約為 25Hz，而柔性模型之共振頻率落在約 14.5Hz 附近；對照柔性模型風洞試驗結果，柔性模型水平向共振頻率約為 12Hz。

#### 四、主要建議事項

##### 建議一

增加柔性氣彈模型製作與振動試驗測試相關研究課題：立即可行建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：財團法人成大研究發展基金會、國立成功大學土木系、國立成功大學航空太空科技研究中心、財團法人國家實驗研究院國家地震工程研究中心、中華民國結構工程技師公會全國聯合會、中華民國全國建築師公會、社團法人中華民國風工程學會

柔性氣彈模型製作目前尚有材料調整、外觀封包技術提升、模型參數與規畫設計目標值調校等關鍵技術需要突破。建議未來內政部建築研究所應持續支持柔性氣彈模型製作與振動試驗相關研究，例如：非對稱柔性氣彈模型之風洞試驗、應用柔性氣彈模型進行高樓建築外型最佳化之風洞試驗、超高層建築物承受扭轉大氣邊界層風速引致的氣彈現象。

並與建築師公會及結構工程技師公會合作，探討結構分析軟體針對結構物承受颱風衝擊引起的氣彈效應、現有高樓建築舒適度效能調查與量測分析研究、現有高樓建築應用振動控制裝置進行舒適度效能提升之風洞試驗等課題，以精進服務能力與層次。

## 建議二

增加應用數值模擬分析建築氣彈互制行為相關研究課題：中長期建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：財團法人成大研究發展基金會、國立成功大學土木系、國立成功大學航空太空科技研究中心、中華民國結構工程技師公會全國聯合會、社團法人中華民國風工程學會

高層建築之氣彈互制行為十分複雜，建議未來持續以不同地況、不同形狀逐步進行柔性氣彈模型之風洞試驗，以精進對高層建築氣彈行為之掌握。

在計算機軟/硬體大幅進步的現今，應用計算流體動力學之方法進行與風洞試驗配套之探討為必要之趨勢。目前國際上此方面的研究發展日新月異，也是風工程的一個重要發展方向。建議未來內政部建築研究所應持續推動計算流體動力模擬之相關研究課題，以推估各種實際規劃需求下之設計風力，並提供建築物耐風設計規範之修訂參考。

## 建議三

推動高層建築健康監測與風洞試驗驗證相關研究課題：中長期建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：財團法人成大研究發展基金會、國立成功大學土木系、中華民國結構工程技師公會全國聯合會、中華民國全國建築師公會、社團法人中華民國風工程學會

一般於高樓建築之外觀設計除了滿足業主開發的需求、建築物的美觀與住戶的舒適，為了降低渦散現象造成之顫振效應，均應進行整體外形之風洞試驗。如於設計階段忽略此一效應之影響，往往於興建完成後會有舒適度無法滿足規範要求的處境。

為使柔性氣彈模型製作更貼近實際需求及掌握其於風洞中的動態行為，建議未來內政部建築研究所可與建築師公會及結構工程技師公會合作，推廣高層建築健康監測計畫。鼓勵高層建築於設計階段即進行風力監測計畫，配合建議二之數值模擬分析能力提升，同時進行標的高層建築之縮尺柔性模型風洞試驗，以進行數值模擬、風洞試驗與真實量測比對之研究流程，以精進高層建築規劃、設計與長期維護等階段之能力與技術。

#### 建議四

增加複合型災害模擬與設計能力提升之複合試驗技術國際合作計畫：中長期建議

主辦機關：內政部建築研究所、財團法人成大研究發展基金會、國立成功大學土木工程

協辦機關：社團法人中華民國風工程學會

高層建築受颱風之振動反應，對於住戶舒適度滿足有極大之考驗。而世界目前對於風、火、地震等複合型災害，已逐步以複合試驗(Hybrid Testing)技術來加以整合，以全面提升及檢視複合型災害時之房屋結構設計規範要求。

目前加拿大 Carleton University(地震、風雨實驗室)、University of Ottawa(地震、風洞材料實驗室)以及 National Research Council 所屬之 National Fire Laboratory(防火實驗室)，亦有與內政部建築研究所類似之複合型災害實驗園區之硬體。建議未來內政部建築研究所可推動與加拿大進行國際合作，採用複合試驗技術來加以整合。

## **Abstract**

Keywords: Aeroelasticity, Flexible model, Shaking table test, System identification, Wind-tunnel test

Wind loads on high-structures are investigated essentially by using wind-tunnel tests. Although in wind-tunnel tests flexible aeroelastic models can better reflect the dynamic characteristics of structures, conventional rigid aeroelastic models are used for simplicity, of which the experimental results cannot be extended appropriately for actual high structures. On the other hand, using flexible aeroelastic models to capture complete vibration modes of actual high structures still need to be advanced, for the complete similarity between actual high structures and the corresponding flexible aeroelastic models needs to be appropriately established. The proposed study is concentrated on the development of representative flexible aeroelastic models in wind-tunnel tests for high structures. The shaking table will be used, with the system identification technique, to evaluate the dynamic characteristics and vibration modes of the established flexible aeroelastic models. In parallel, wind-tunnel tests will also be conducted for the flexible models. Comparing the outcomes of the wind-tunnel tests and shaking table leads to the appropriateness of the established flexible models. The complete similarity between actual structures and the corresponding flexible aeroelastic models should be achieved as close as possible.

## 第一章 緒論

### 第一節 研究緣起與背景

作用於建築主要抗風系統上的風力可分為順風向、橫風向與扭轉向風力，各個風向的風力又可區分為平均風力與擾動風力。順風向風力主要是由風場中的逼近流所造成，可以透過條狀定理(strip theorem)以及準穩態定理(quasi-steady theorem)得到合理的評估。建築設計上重要的橫風向擾動風力主要來自流體通過建築物時，發生的三維流體分離(separation)與渦散現象(vortex shedding)在順風面與側風面所造成的週期性作用力。當建築物的高寬比與柔度都很大時，有可能在設計風速之內發生結構共振現象，而造成過大的振動反應。然而此一現象，與建築物幾何造型有密切關係，目前並無妥善的分析模式可供解析。對於一般幾何造型規則的建築物而言，扭轉向風力的影響小於順風向及橫風向風力。由於扭轉向風力也是源自流體分離，故亦無分析模式，必須依賴風洞物理模型實驗。

目前國內建築物耐風設計規範及解說中的各項風力與風壓，大多根據單棟、規則造型建築物的風洞試驗數據，且未考慮可能出現的空氣彈力現象。建築物之幾何形狀特殊(明顯異於規則矩型柱體)者，或其橫風向與扭轉向周期接近者，或是建築物受到鄰近特殊地形、地物(鄰近大型建築物、山谷、山坡或峭壁等)影響者，或是經檢核可能發生渦散共振、鎖定或其他空氣動力不穩定現象者，得採行風洞試驗測算其設計風力。凡施行風洞試驗之建築物，其設計風力以風洞試驗結果為準。

風洞試驗所測得之主要抗風系統設計風力與建築被覆物之設計風壓，包括標的建築物本身的空氣動力特性以及周圍建築物的遮蔽效應，一般多小於規範計算值。由於周圍建築物的遮蔽效應日後可能出現變化，因此在引用風洞試驗數據時應考慮這項不定因素。除非能夠確認風洞試驗時周圍建築物並無明顯遮蔽效應，否則引用風洞試驗之設計風壓風力時，以不低於規範計算值的 80% 為宜。

### 第二節 研究目的與方法

一般而言，建築設計規劃時應當列入考慮的風力影響包括下列四項：(1)建築主要結構系統所承受之整體風力，(2)局部構件及外部被覆物所受之局部風壓，(3)建築風

擺所造成之舒適性問題，(4)環境微氣候—鄰近地表之風場環境。適用於土木工程相關實驗所需要的風洞以環境風洞為主，由於需求不同，與航太工程所常見的次音速與超音速風洞有若干基本功能上的差異。最主要的差別即在於應用於土木工程的風洞需要足夠長度的試驗段，來發展實驗所需要的紊流邊界層。並模擬大氣邊界層的垂直風速分佈。風洞的斷面尺寸亦須足夠大，以包括目標物以及周邊建築物的局部區域模型。另外，環境風洞亦需要可以製造不同方向的試驗風。以下是一般建築物較常見的風洞試驗項目：

(一) 建築主要抗風系統所承受之整體風力試驗：1980 年代初期，Davenport & Tschanz 等人發展出高頻力平衡儀(high frequency force balance)，此後很快的形成各風洞實驗室量測結構物所受整體風力的標準程序。試驗的方法是將剛性的建築縮尺模型安置在一個高自然頻率之五分量力平衡儀上，量測建築模型基底彎矩及剪力。倘若高層建築的基本振態為線性，則剛性模型的基底彎矩與廣義座標之風力成一常數比例。將試驗量測所得之基底彎矩做成頻譜密度函數並予以適當的振態修正之後，即為廣義座標風力頻譜，再據以計算等值靜態設計風載重及舒適性評估。另一種建築主要抗風系統整體風力的試驗量測方法是經由對表面風壓的積分過程取得整體風力。動態風力需根據同步量測之風壓數據，或採用合理可信的方法測算而得。

(二) 局部構件及外部被覆物所受之局部風壓試驗：表面風壓試驗是一種空氣動力試驗，受測試建築模型僅需遵守幾何縮尺，無須考慮其結構動力特性。一般風壓模型多由壓克力製成，在模型表面開設足夠的風壓量測孔，透過管線連接至壓力轉換器量測表面風壓。進行風壓實驗時，應適度考量風向的影響，將量測所得資料，利用統計方法，算得各風壓孔之極值風壓。將極值風壓配合該地區之設計風速，換算可得各點設計風壓。

(三) 結構空氣彈力試驗：大多數的高層建築並沒有明顯的空氣彈力效應，無論是設計風載重，或是風擺的舒適性評估，都可以根據前述之高頻力平衡儀試驗數據計算而得。只有極少數的超高建築，或是根據計算結果顯示可能出現過大振幅的情況下，才需考慮採取進一步的結構空氣彈力模型試驗。進行結構空氣彈力試驗時，需適當考量建築結構的動力特性(質量、勁度、阻尼等)，以真實反映結構與空氣的互制作用。

(四) 環境風場舒適性評估：隨著經濟的發展高樓的設計除了居住以及商業的基本功能之外，生活與居住品質的重要性日益提昇。因此，興建一座建築除了需要考慮到風形成的結構安全性問題之外，影響地面行人舒適的微氣候變化等也應做適度的規劃與評估。由於一般都市地形、地況過於複雜以及流況之高度三維性，使得數值模擬在應用上有其極大的侷限性與困難度。因此以風洞物理模擬試驗，配合實場的氣象資料來作風場舒適性的評估，仍是目前較為可行及可信的方法。

### 第三節 研究步驟流程與進度說明

執行風洞試驗時，需妥善考慮縮尺模型(model)與原型(prototype)結構之間的相似(modeling similitude)，如此風洞縮尺實驗結果才能正確的應用於原型結構。設計高層建築風洞實驗時，需要滿足周圍風場的動力相似(dynamic similarity)以及結構空氣動力(或是結構空氣彈力)之模擬相似性。建築風工程探討的是建築物在強風作用下的結構反應，所需考量的風場屬於小範圍的中性邊界層流(neutral boundary layer flow)，以風洞進行縮尺模擬時，需要正確模擬下列幾項自然風場特性：

- (1) 逼近流在不同高度上的平均風速分布；
- (2) 逼近流在不同高度上的擾動風速（紊流強度）分布；
- (3) 逼近流擾動風速之頻率分布特性；
- (4) 標的建築物與鄰近建築物之模擬。

正確模擬高層建築之空氣彈力特性時，則需滿足下列參數在模型與原型間的相似：

- (1) 慣性力比： $\frac{\rho_s}{\rho_a} = \frac{\text{結構慣性力}}{\text{流體慣性力}}$ ；
- (2) 彈性力比： $\frac{E}{\rho U^2} = \frac{\text{結構彈性力}}{\text{流體慣性力}}$ ；
- (3) 阻尼比： $\xi = \text{結構振動之能量耗損率}$ ；
- (4) 雷諾數： $R_e = \frac{\rho U D}{\mu} = \frac{\text{流體慣性力}}{\text{流體黏滯力}}$ ；
- (5) 風場與高層建築應有相同之模型幾何縮尺。

此外，結構主要振態之頻率比以及振態函數都是重要的模擬參數。對於大多數的高層建築，空氣彈力現象並不顯著，結構空氣動力模型試驗便能提供足夠的抗風設計相關資料，此時前述有關結構動力相關的模擬相似律便可忽略。

風洞中的自然風場的模擬可區分為遠場與近場模擬等兩項。遠場模擬的是逼近紊流邊界層的特性。風洞試驗常以錐形擾流板、粗糙元素、阻牆等邊界層元素的組合，模擬各種具不同紊流強度與風速分布的大氣邊界層流場。所謂近場模擬指的是標的建築物與鄰近建築物之模擬，藉由近場模擬可以得到標的建物鄰近的地形與建物對於周圍風場的影響。一般而言，建築物對於下游的影響範圍，大約是尾跡寬度的 6~8 倍。因此合宜的模擬範圍是以基地主建築物為中心，半徑大於鄰近高度超過 60 公尺之建築物最大寬度的 8 倍，或者 300 公尺之較大者。在此半徑內之鄰近建築物全依縮尺比例製成模型置於風洞試驗段之轉盤上。

風洞試驗時，使用之建築物及鄰近地貌、地物模型過大時，會造成風洞內流場明顯的加速現象，進而造成實驗量測的誤差，稱之為阻隔效應(blockage effect)。因此，當風洞試驗使用之建築物及鄰近地貌、地物模型超過風洞斷面積的 8%時，應採取合理的方法修正阻隔效應，使量測試驗段之縱向壓力維持為一定值。風洞模擬使用縮尺模型，一般多在經過適當縮尺的較低風速來進行試驗，縮尺模型試驗的雷諾數通常比實體結構物小 2~3 個量級( $10^2\sim 10^3$ )。進行風洞試驗時應使得縮尺模型與原型之間具有雷諾數相似性(Similarity of Reynolds' Number)。一般而言，對於紊流邊界場的模擬，適當的風洞雷諾數為  $10^5$  以上；具有銳角的建築物縮尺模型，適當的雷諾數為  $10^4$  以上；具有曲面的建築物則需採取適當的方式考量雷諾數的影響。

風洞試驗時建築物受到鄰近地形地物的影響，正向來風未必是最不利狀況，應考慮不同風向的影響。根據各風向試驗的數據，以合宜的方法組成數個對結構最不利的風力載重。本研究之進行步驟流程如圖 1-1 所示，其對應之工作規劃甘特圖與進度概述如表 1-1。目前除了已針對蒐集之文獻資料加以研讀整理，同時也於 2017 年 6 月 1 日，舉辦了第一次專家學者座談會，邀集國內專家學者及產官學界先進，與貴所長官和同仁進行研討，與會長官與專家學者提供本計畫在高層建築物柔性氣彈模型振動台試驗，及高層建築物柔性氣彈模型規畫設計等方向許多寶貴意見，研究團隊將於實驗時積極採納。



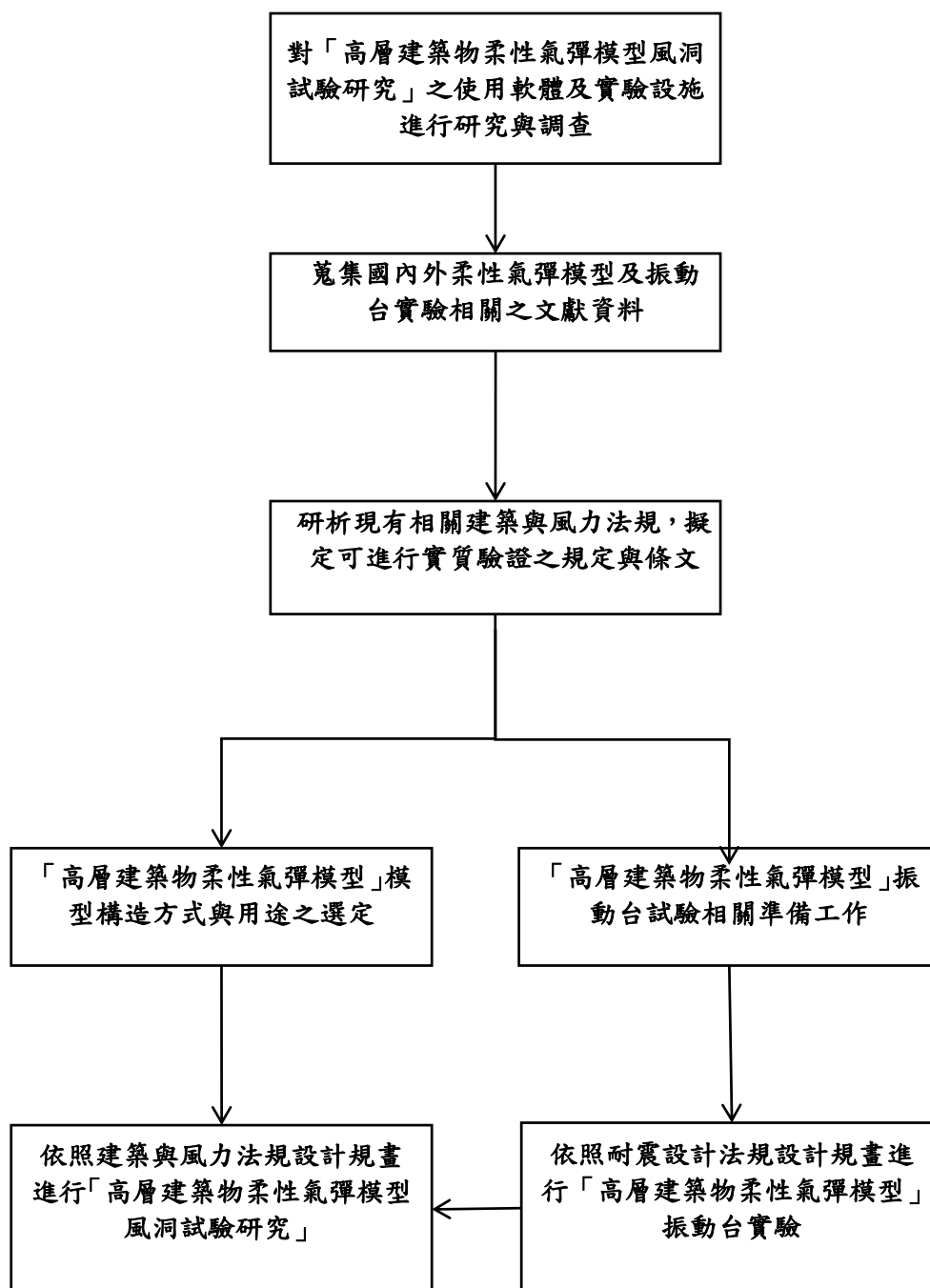


圖 1-1 研究步驟與流程

資料來源:本研究整理

表 1-1 工作規劃甘特圖

月次 工作項目	第 1 個 月	第 2 個 月	第 3 個 月	第 4 個 月	第 5 個 月	第 6 個 月	第 7 個 月	第 8 個 月	第 9 個 月	第 10 個 月	第 11 個 月	第 12 個 月	備 註
蒐集國內外高樓剛性與柔性模型風洞試驗相關文獻資料	●	●	●	●	●	●	●						
蒐集國內外國內外高樓剛性與柔性模型振動台試驗相關文獻資料	●	●	●	●	●	●	●						
建築風洞試驗剛性與柔性氣彈模型之分析與製作	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●			
振動台試驗相關人員訓練	●	●	●										
建築風洞試驗相關人員訓練	●	●	●										
期中報告撰寫				●	●								
剛性與柔性模型振動台試驗系統識別				●	●	●	●	●	●	●			
剛性與柔性模建築風洞試驗型								●	●	●			
結案報告撰寫											●	●	
預定進度 (累積數)	12 %	20 %	28 %	40 %	52 %	60 %	68 %	76 %	84 %	92 %	96 %	100 %	
	<p>說明：1 工作項目請視計畫性質及需要自行訂定，預定研究進度以粗線表示其起訖日期。</p> <p>2 預定研究進度百分比一欄，係為配合追蹤考核作業所設計。請以每 1 小格粗組線為 1 分，統計求得本計畫之總分，再將各月份工作項目之累積得分(與之前各月加總)除以總分，即為各月份之預定進度。</p> <p>3 科技計畫請註明查核點，作為每 1 季所預定完成工作項目之查核依據。</p>												

資料來源:本研究整理

## 第二章 資料蒐集與文獻回顧

### 第一節 高樓縮尺模型風洞實驗相關研究

探究高層建築物受風之動力行為時，因風力而產生之渦散現象以及其伴隨而至的氣彈力現象為吾人所關心者，下就前開述及現象與理論介紹並整理相關文獻。

#### 2.1.1 渦散作用(Vortex Shedding)

流體流經物體表面時，由於流體其黏性效應，會於物體表面形成一極薄之邊界層(boundary layer)。流體之邊界層流經物體表面後方時會出現分離(separation)之現象，並在物體後方形形成尾流(wake)。此乃係因物體表面之摩擦力所致，邊界層隨流過的表面距離增加而變厚，物體表面摩擦力會使流體速度趨緩，靠近物體表面處出現逆壓梯度(adverse pressure gradient)。當近物體表面處之流體動量不足以克服此逆壓梯度，亦即慣性力無法克服黏性力之效應時，物體表面之流體速度可能降至零或出現逆流區域(reverse-flow region)，致使邊界層分離。是以物體後方形成一尾流區，流體在此區間打轉，致生交替出現的渦流。當渦流離開物體表面時，會使物體受到一個週期性振盪的側向力【1】。而此週期性振盪的側向力的頻率即為尾流區渦流的渦散頻率，一般將渦散頻率描述於無因次化的史托荷數(Strouhal number  $St$ ，定義如下式)中，此數值於描述結構物受風力之行為橫風反應上扮演重要角色【2】。

$$St = \frac{f_s D}{U} \quad (2-1)$$

其中  $f_s$  為渦散頻率， $D$  為結構物之特徵長度， $U$  為風速。

#### 2.1.2 鎖定現象(Lock-in)

若前述之渦散頻率和結構體之振動頻率相接近至一定程度時，渦散作用與結構體振動發生了共振的現象。此時渦散頻率不隨風速變化而變化，轉而與結構物之振動頻率有同步現象，亦即渦散頻率如同鎖定在結構物之共振頻

率上，如此將造成共振現象的持續與放大。一般建築物多在大氣邊界層中，高層建築物所受之風力隨高度變化風速亦隨之改變，是以不同高度渦散頻率亦不相同。惟鎖定現象發生時，使結構物某段高度各點之渦散頻率均被鎖定在結構之共振頻率範圍中，在各點之反應相關性增加的情況下，造成結構物的振動反應加劇，形成不穩定的氣動現象。

### 2.1.3 氣動力阻尼(Aerodynamic Damping)

對於一單位長度上橫風向荷載可以下式描述：

$$F = F_t + F_v + F_m \quad (2-2)$$

其中  $F_t$  是由空氣紊流所產生的淨陣風荷載， $F_v$  是渦散作用產生的風荷載， $F_m$  是動力風荷載。而  $F_m$  中，包含一個與結構振動加速度成比的慣性荷載以及與結構速度成比例的氣動阻尼：

$$F_m = -h_a \ddot{\zeta}_{\text{def}} - c_a \dot{\zeta}_{\text{def}} \quad (2-3)$$

其中  $\zeta_{\text{def}}$ 、 $\dot{\zeta}_{\text{def}}$ 、 $\ddot{\zeta}_{\text{def}}$  分別表示橫風所造成的位移、速度、加速度， $h_a$  為空氣附加質量， $c_a$  為氣動阻尼常數。 $h_a$  相對於結構質量幾可忽略，當  $c_a$  為負值時， $c_a \dot{\zeta}_{\text{def}}$  會減小結構振動上的有效阻尼【3】。在求算氣動力阻尼上，可以由實驗方法，藉由位移反應估計整體阻尼比及結構阻尼比，二者之差值即為氣動力阻尼比【2】。

### 2.1.4 馳振現象(Galloping)

馳振主要是由負氣動力阻尼所引起的與風向垂直的結構振動。結構受風力而產生動力行為時，會因為運動而使得風向、風速相對結構運動而產生變化。在圖 2-1 中，若結構沿著與風向垂直的方向向上振動，相對於結構來說，所受風速為風速  $U$  與結構速度  $\dot{\zeta}_{\text{def}}$  之向量和，如此可能造成  $F_{s,1} > F_{s,2}$ ，相當於負氣動力阻尼【3】。馳振現象是否發生可以由靜態下量測之阻力係數  $C_D$  與昇力係數  $C_L$  以判定之。根據 Den Hartog 提出的判斷標準：

$$\left( \frac{dC_L}{d\alpha} + C_D \right) \Big|_{\alpha=0} < 0 \quad (2-4)$$

其中  $C_D$ 、 $C_L$  分別為阻力係數與昇力係數， $\alpha$  為風攻角。當渦散作用之共振風速  $U_{cr}$  與馳振發生速度  $V_0$  相近時，兩者會互相結合； $U_{cr} < V_0$  渦散現象會在  $U_{cr}$  時先出現，並在達到  $V_0$  時出現馳振現象；若  $U_{cr} > V_0$ ，馳振現象會被抑制，直到達到  $U_{cr}$  時才一起出現。

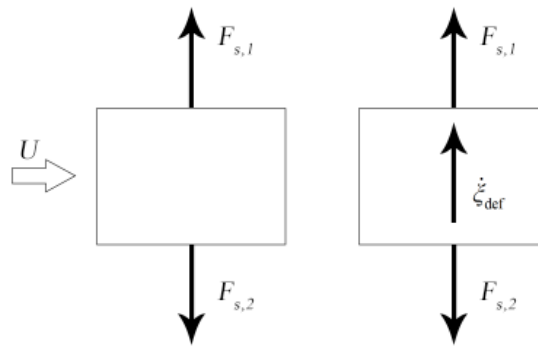


圖 2-1 柱體受風速  $U$  受力及氣動力阻尼之情形

資料來源：【3】

### 2.1.5 史庫頓數(Scruton number)

史庫頓數係用以考慮建築結構物質量與阻尼共同影響位移反應時之重要參數【4】，亦可視為結構物質量與空氣質量之比【1】，當史庫頓數越大，結構物越不易受空氣所施加之外力而振動，相反地，若史庫頓數小，則較易晃動。

$$Scr = \frac{m^*}{\int_0^H \varphi^2(y) dy} \frac{\xi}{\rho_{air} D^2} \quad (2-5)$$

其中  $m^*$  為一般化質量， $\rho_{air}$  為空氣密度， $\xi$  為結構組尼比， $\varphi(y)$  為結構振態， $D$  為結構特徵長度。

### 2.1.6 建研所研究回顧

2005 年葉祥海，方富民等人【5】使用位於台南市歸仁區成功大學歸仁校區內之內政部建築研究所風洞設施，以一個高寬比為 7 之方形截面建築模型(10 cm 寬×10 cm 長×70 cm 高)，其內裝為輕型鋁合金架外框鎖以輕薄之鋁合金片製作，使得模型本身呈現剛性強、不易變形的線性振態，底部設有螺栓孔以便固定在模型基座上，在都市與鄉村兩種風況下，以風洞試驗量測剛性氣彈力模型的動態反應。另一方面，數值模擬方法中將描述非恆定紊流流場與結構動力行為的兩組控制方程式以交替的方式進行解析計算模式之預測其實驗結果並將之與風洞試驗之數據作比對與驗證，以確立數值模式之可用性。

在風洞模型試驗部分，本研究的來流風況擬於分別代表平坦市郊及大型都會中心兩種地形的大氣邊界層形式之來流風場中進行實驗量測，目標邊界層平均風速剖面以指數律表示之指數分別約為 0.27(鄉村地況)及 0.35(都市地況)，邊界層厚度約為 1.2 米。建物的模型採用的方柱模型將內裝輕型鋁合金構架外框鎖上輕薄鋁合金片製作，底部設有螺栓孔以利固定。量測風攻角時是以旋轉實驗基座的方式變化風攻角，由於方柱在水平縱向(X 向)及橫向(Y 向)均為對稱，風攻角變化擬針對小攻角的範圍( $0^\circ$  至  $15^\circ$ )，計有  $0^\circ$ 、 $5^\circ$ 、 $10^\circ$  與  $15^\circ$  等情況。模型的系統阻尼比將調整控制，以史庫頓數(Scruton number; Scr)作為區分結構行為的依據，擬針對蔡明樹等人【6】中關於高層建築氣彈力實驗所界定的三種不同程度的阻尼條件進行量測，相應的史庫頓數範圍可劃分為三個區間分別進行探討：Cheng 等【7】以高寬比為 5 與 7 的方柱於不同大氣邊界層流場進行氣彈力風洞實驗，結果顯示於開闊地風場中，當 Scr 小於 2.18 時，兩種高寬比之方柱皆出現渦散現象與急流現象合併發生的狀況，負值氣動力阻尼於臨界風速之後便維持在最低值；當 Scr 介於 2.76 與 5.82 之間時，則僅出現渦散現象造成之鎖住現象，負值氣動力阻尼於臨界風速處有最小值；而當 Scr 大於 6.28 時，氣彈力不穩定現象消失，氣動力阻尼為正值。該研究並據此將史庫頓數之變化範圍，定出三種現象的區段劃分：(1)氣動穩定區(aerodynamic stable, )，(2)氣動不穩定區(aerodynamic unstable, )，(3)氣動發散區(aerodynamic divergence, )。而當史庫頓數更小之狀況下，在達到共振風速後氣動力阻尼值即保持在最小值，此時馳振現象出現，結構進入

更大幅度的氣彈力現象。

最後在進行風洞試驗時，來流風速將由低風速開始逐次增加並跨越渦散共振風速，以量測所得之位移歷時資料，並以位移反應之擾動量作為比較的主要依據。風洞實驗詳細設置位置如圖 2-1、圖 2-2 所示。



圖 2-2 BL9 地況人工粗糙物擺設圖

資料來源：方富民等人【5】



圖 2-3 BL3 地況人工粗糙物擺設圖

資料來源：方富民等人【5】

數值模擬部分，為了要反映出風場與柱體運動間之互制(interaction)效應，數值方法中將描述非恆定紊流流場與結構動力行為的兩組控制方程式將以交替的方式進行解析。研究中的紊流風場計算係採用微可壓縮流

(weakly-compressible flow method 【8】方法，以模擬建築物鄰近區域之三維 (three-dimensional) 非恆定 (unsteady) 風場。數值模式中另應用大渦模擬 (large eddy simulation) 配合以次網格紊流模型 (subgrid-scale turbulence model)，以反映出真實風場中之紊流特性。動態反應的計算首先考慮到建築之瞬時外力 (風荷重) 乃由紊流風場計算中柱體表面壓力對表面積積分而得，並經剛體結構運動方程式之解析求得建築物在順向風與橫風向之瞬時動態反應。此結果 (振動速度、位移) 應併入紊流風場計算中之邊界條件中，以求取下一瞬間之風場結果。最後模擬個案與風洞試驗相同，其中動態位移結果將與試驗量測結果作比對驗證。驗證結果如下表 2-4 所示。

表 2-1 模型阻尼比與結構特性

水平縱向			水平橫向		
$f_n$ (Hz)	$\xi$ (%)	Scr	$f_n$ (Hz)	$\xi$ (%)	Scr
4.06	0.26	1.74	4.07	0.28	1.87
4.08	0.53	3.54	4.03	0.55	3.67
4.09	1.43	9.55	4.06	1.33	8.88
順風向轉動慣量 ( $\text{kg} - \text{m}^2$ )			橫風向轉動慣量 ( $\text{kg} - \text{m}^2$ )		
0.697			0.697		

資料來源：方富民等人【5】



## 第二節 高樓縮尺模型振動台實驗相關研究

對於振動平台實驗方面，由於振動台設備之動力容量有限，試體之規模亦隨之受限，在施力極限固定之前提下，振動台結構試驗試體通常製作成縮尺模型或局部構件，以減少試體質量俾求能加載至較高的加速度，為此縮尺模型必須滿足與原型結構之物理、幾何、邊界條件相似，對動態試驗而言更須滿足動力平衡方程式相似的要求。國內學者許茂雄教授等人【9】利用三分之一縮尺校舍模型進行振動台試驗，觀察 RC 學校建築在地震力作用下之結構動態行為與破壞模式；林沛暘等人【10】於國家地震研究中心，建置一系列標竿鋼結構縮尺模型試體，經由配置不同之構件與損壞位置及損壞情況，藉由振動台進行該系列試體受地震作用下之動態反應試驗，同時配合振動台上鋼結構縮尺模型試體之反應量測資料，應用於健康診斷及結構系統識別之研究，並進行損壞識別模組之程式建立及驗證。郭昌宏【11】利用一由剛性樓板與四根柱子所組成的鋼構架系統，利用推廣卡式過濾器進行其系統參數之識別。蔡忠憲【12】利用國家地震工程研究中心之標竿鋼構樓房模型(Benchmark G)振動台試驗量測資料，針對不同斜撐配置進行時變振形之分析與探討，得以了解樓層斜撐勁度變化、相對地面位移振形與層間變位角之關係。方璿堯【13】利用國家地震工程研究中心之標竿鋼構樓房模型(Benchmark G)振動台試驗量測資料，亦採用不同斜撐配置並利用 OKID/ERA 識別方法，識別系統參數變化之情形。游立辰等人【14】建立結構動力反應資料庫、結構基因特徵序列資料庫、以結構基因特徵序列建立分類資料庫、利用分類資料庫建立診斷系統，於國家地震工程研究中心設置八層樓之鋼結構實驗構架，利用鬆脫部分螺栓以模擬結構物發生之破壞損傷狀況，利用微震測量進行結構參數診斷及識別系統。

古昌宏等人【15】採用貝式診斷邏輯法，作為應用結合生物領域與資訊科技之先進技術，來開發結構物健康診斷系統，並利用國家地震工程研究中心振動台之八層樓縮尺鋼結構實驗做為測試樣本，製作出新一套機動型結構物健康診斷雛型機。吳瑞琳【16】利用國家地震工程研究中心之標竿鋼構樓房模型(Benchmark D)振動台試驗量測資料，驗證含有噪訊之情況下，正規化

相對位移振動振形、第一模態振形與損壞位置之間的相關性，接著利用國家地震工程研究中心之標竿鋼構樓房模型(Benchmark G)振動台試驗量測資料，驗證於立面不對稱結構下，以 NIDR 增量作為損壞指標之正確性。林億賢【17】利用國家地震工程研究中心之標竿鋼構樓房模型(Benchmark D)振動台試驗量測資料，利用改良型基因演算法、遞迴式改良型基因演算法方法，並透過該試驗量測輸入與輸出資料，識別系統參數變化之情形。駱政韋【18】根據國家地震工程研究中心之標竿鋼構樓房模型(Benchmark H)振動台試驗量測資料，利用改良型基因演算法、遞迴式改良型基因演算法方法，並透過該試驗量測輸入與輸出資料，識別系統參數變化之情形。吳坤鴻【19】利用國家地震工程研究中心之標竿鋼構樓房模型振動台試驗量測資料，並利用扭轉耦合建築結構層間損壞指標與偏心距計算公式，進行完整之敏感度分析，以識別系統參數變化之情形。謝政濤【20】針對非剪力平面建築結構，探討不同破壞模式下，利用等值剪力結構模型，求得各樓層層間損壞指標 SDI (story damage index)，以判定結構損壞位置，並以國家地震中心之三層樓及八層樓鋼結構構架之實驗資料進行損壞位置評估，以探討該方法於實際應用時之可行性。

而國外則有 Oliva【21】之三分之一縮尺，二層樓純柱梁構架單軸向振動台試驗。Bertero【22】之五分之一縮尺，七層樓含牆構架單軸振動台試驗。Bracci【23】之三分之一縮尺，三層樓純柱梁構架單向振動台試驗及日本核能工程協會 (NUPEC)【24】進行之足尺單片剪力牆單向振動台試驗。美國土木工程協會(ASCE)之結構健康診斷小組，亦曾經建立第一階段標竿鋼結構(Phase-I Benchmark)振動台實驗資料庫，以供學者測試使用【25】。並於 Journal of Engineering Mechanics 期刊中出版特刊，在此特刊中介紹了許多利用該資料庫於時間域進行識別之結果【26】。並利用實驗所得結果進行分析以了解識別方法是否可行(Bernal 和 Gunes【27】，Caicedo【28】，Lus【29】)。針對時變系統，時間域之遞迴最小平方法(recursive least -square estimation，簡稱 RLS)識別理論漸趨成熟，Chu 和 Lo【30】並已成功應用於一系列鋼結構標竿模型之振動臺量測資料之參數識別，以及臺東縣消防局大樓之損壞評估。

上述試驗皆是為了提供真實的結構動態反應，並有助於研究者分析與重塑結構物在地震作用下之行為，可提供振動台實驗與未來風洞實驗之相關研究課題規劃與研擬。

### 第三節 應用輸入與輸出反應進行動態參數識別相關研究

本研究擬針對一般高層建築之風洞試驗模型製作與行為精進進行研究與試驗，採用振動平台進行高層建築風洞試驗模型之動態行為測試，進一步應用系統參數識別技術，針對試驗模型之動態參數與振態行為進行識別，對於縮尺模型結構系統而言，一般均假設其仍應保持於彈性範圍，因此基於線性假設之時間域識別方法均可適用，但大部分的方法對自由度數過大的結構仍是難以處理，因此發展出最小實現法(Minimum Realization)應用於結構振態參數識別，Gilbert【31】與 Kalman【32】使用可控制性與可觀測性的實現理論。而後，Ho 與 Kalman【33】以脈衝反應函數確定狀態空間模式，並指出最小實現問題相當於馬可夫參數序列的問題。Zieger 和 McEwen【34】提出結合最小實現法與奇異值分解(Singular Value Decomposition)的方法，Kung【35】亦發展出另一種結合奇異值分解的方法。Juang 與 Pappa 提出時間域的特徵系統實現法 ERA【36】與 Recursive ERA【37】，發展振態參數識別及模型降階，將系統以最小階數實現。Phan 等人提出觀測器/卡曼濾波器識別法(Observer/Kalman Filter Identification, OKID)【38】，引入卡曼觀測器減少計算量，當無噪訊時，識別使系統 Deadbeat 之觀測器，當有噪訊時則識別最佳的觀測器。

最後 Juang 將其多年發表文章整理成冊【39】，以狀態空間法描述動態系統，且發展 OKID 搭配 ERA 之時間域識別技巧。本計畫預計將應用 Eigensystem Realization Algorithm (ERA) 和 Observer/Kalman Filter Identification (OKID) 搭配而成的 ERA/OKID【39】方法，利用輸入地震加速度與輸出反應之關係，來推算高層建築物柔性氣彈模型試體之模態參數。其中利用 OKID 可求得馬可夫參數  $Y_k$  (Markov parameters)，馬可夫參數包含系統的動態特性參數，且具有不因狀態座標轉換而改變之特性。ERA 的運算順

序為先利用已求得之馬可夫參數建立一個零階漢克 (Hankel) 矩陣  $H(0)$ ，再使用奇值分解法 (Singular Value Decomposition, SVD) 將  $H(0)$  分解，並分析其奇值以決定系統階數，然後利用一階漢克矩陣  $H(1)$  透特徵系統最小實現法 (Minimum Realization) 建立一最小階數的等值狀態系統矩陣  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$ 。由於量測資料識別所得之等值狀態方程式之系統矩陣的型式並非唯一，可以有多組型式，但其所包含的模態頻率、模態阻尼與模態振形等動態特性參數應相同，其流程概念如圖 2-4 所示。

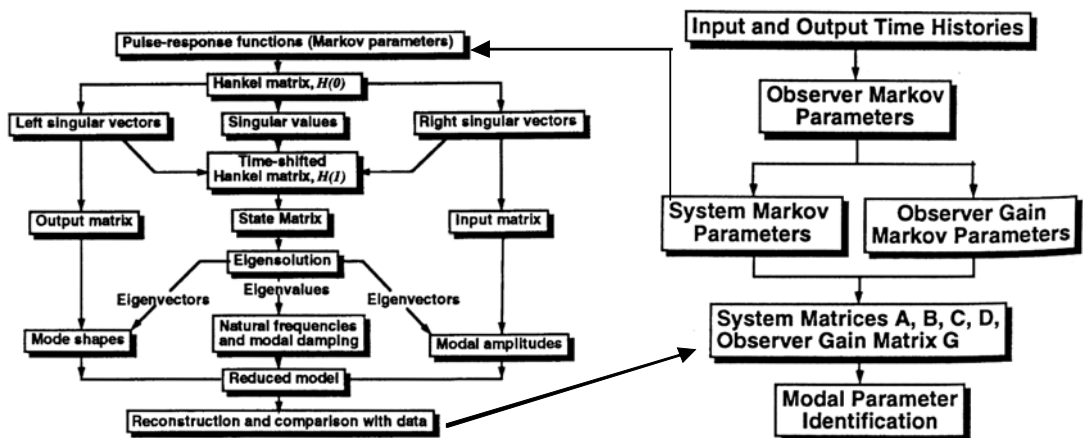


圖 2-4 ERA 和 OKID 識別流程圖

資料來源: Juang 等人【39】

同時進行柔性氣彈模型之風洞試驗，以評估模型之適用性。據以發展出高層建築受風互制行為以獲得未來分析風域中高層建築動態反應之分析模式，並利用風洞試驗與數值模擬各自之優勢，深入探討流場與結構相互影響之機制，提供工程人員設計相關建築時之參考。

## 第三章 高樓柔性氣彈與剛性風洞模型之分析與探討

### 第一節 高樓柔性氣彈風洞模型之相似律分析

#### 3.1.1 流場相似律

為了能在實驗室精準的模擬物體於流場中的行為與流體現象，流體力學實驗中所使用的模型(model)應與實場(prototype)符合一定的相似律。亦即，如果可以在描述一特定流體行為過程下所需要的無因次參數(例如雷諾數、普朗特數、史特赫數等)達到模型與實場相同，則模型即可準確地重現實場於流場中之行為過程。相似律一般可分為幾何相似性(Geometric similarity)、運動相似性(Kinematic similarity)、動力相似性(Dynamic similarity)，以下分述之。

#### 3.1.2 幾何相似性(Geometric similarity)

所謂幾何相似性，係指模型與實體在幾何外型上應達到形狀以及比例大小相似。此外，若實際流場中環境樣貌(例如地表地貌、相鄰地形等)可能造成流體流動上之影響，則在模型製作時亦應一併考慮，例如製作建築物模型時，尚需考慮實際建築物周遭街道、其他建築物、植栽、圍籬、建築物表面狀況等皆須按照縮尺比例製作。如此方可確保模擬風場之正確性。而幾何相似性又可分為：

##### (1) 模型與實體各方向上縮尺比例皆相同

$$L_r = \frac{L_m}{L_p} \quad (3-1)$$

其中  $L_r$  為模型縮尺比，下標 m、p 指模型(model)與實體(prototype)。

##### (2) 模型高與模擬流場邊界層厚度比等於實體高與實際流場邊界層厚度之比

$$\frac{H_m}{\delta_m} = \frac{H_p}{\delta_p} \quad (3-2)$$

其中  $H_m$ 、 $H_p$  分別指模型與實體之高度； $\delta_m$ 、 $\delta_p$  分別指模擬與實際流場之邊界層厚度。

##### (3) 模型高度與模擬地表粗糙長度比等於實體高與該地況地表粗糙長度之比

$$\frac{H_m}{z_{0_m}} = \frac{H_p}{z_{0_p}} \quad (3-3)$$

其中  $H_m$ 、 $H_p$  分別指模型與實體之高度， $z_0$  則是地表粗糙長度。此無因次參數稱為詹森數(Jensen number)。

#### (4) 模型高度與紊流積分長度尺度成一定比例

$$\frac{H_m}{L_{x_m}} = \frac{H_p}{L_{x_p}} \quad (3-4)$$

其中  $L_x$  為紊流的積分長度尺度(Integral length scale)，邊界層流中積分尺度約為  $0.3\delta$ 。

### 3.1.3 運動相似性(Kinematic similarity)

運動相似性係要求模擬流場中任意兩點之流速的比例需與實際流場中對應位置流速比例應相同。

#### (1) 速度比例

速度比例即是要求模擬流場與實際流場流速成一定比例。一般會以邊界層外之自由流風速  $U_\delta$  為參考風速。

$$\left[ \frac{U(z)}{U_\delta} \right]_p = \left[ \frac{U(z)}{U_\delta} \right]_m \quad (3-5)$$

#### (2) 黏性次層

當黏性流體流經物體時，在物體表面會產生一極薄之黏性次層(Viscous sublayer)，厚度約為

$$z = 11 \frac{\nu}{u_*} \quad (3-6)$$

其中  $u_*$  為剪力速度(定義為  $\sqrt{\tau/\rho}$ )， $\nu$  為流體之動黏度係數。在流體力學之試驗中，如果量測之高度小於黏性次層厚度，則所量得之流體流速會因流體黏滯性之影響而無法滿足紊流流場之相似性。

### 3.1.4 動力相似性(Dynamic similarity)

動力相似係要求模擬流場與實際流場中流體所受之力其比例為定值。欲達成動力相似的條件，即係模擬流場與實際流場之無因次參數需相同。

#### (1) 雷諾數(Reynolds number)

$$Re = \frac{\rho UL}{\mu} \quad (3-7)$$

其中  $\rho$  為流體密度， $U$  為流場特徵速度， $L$  為流場特徵長度， $\mu$  為動力黏滯係數。

雷諾數的物理意義係代表流體的慣性力與黏滯力效應之比例關係，若雷諾數小，則流體之黏滯力大於流體慣性力，流體流動趨於層流狀態；若雷諾數大，則流體之黏滯力小於流體慣性力，流體流動趨於紊流狀態。

## (2) 史托荷數(Strouhal number)

當流體流經二維鈍型物體時，在物體後方上下部分會以一定頻率交錯出現的渦流(上部順時針旋轉，下部逆時針旋轉，此稱為馮卡門渦列- von Kármán vortex street)，此兩側渦流往物體後方兩側形成渦流逸散現象(Vortex shedding)。渦流逸散現象會使得物體兩側壓力呈現週期性變化。

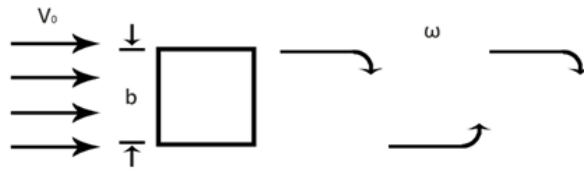


圖 3-1 渦流逸散現象示意圖

資料來源：本計畫人員繪製整理

$$St = \frac{f_s L}{U} \quad (3-8)$$

其中  $f_s$  為渦流逸散頻率， $U$  為流體流速， $L$  為特徵長度。

### 3.1.5 基本規畫方案

原始標的高層建築樓高 523m，基本振動頻率  $f_a = 0.12 \text{ Hz}$ ，為決定合理的模型大小與模型基本振動頻率(目標為模型高 1m 以下)，故以史托荷數(Strouhal Number)相似之方法，先訂定頻率相似係數，再以此反算長度相似係數，以找出模型高度及其他相似係數。故模型高度  $H$  為 0.7 m。進一步假設模型之高寬比為 7:1，選定方形建築模型的  $L$  及  $B$  均為 0.10 m，則高寬比為

$$\frac{H}{\sqrt{BL}} = \frac{0.7}{0.1} = 7 \quad (3-9)$$

標的建築物應進一步檢核，以期能在風洞試驗時於設計風速內發生渦散頻率與建築物自然頻率接近，而產生之共振及空氣不穩定現象。

## 第二節 高樓受風力作用時之規範基本探討

### 3.2.1 風力規範基本介紹

在我們建築物耐風設計規範第二章建築物設計風力之計算中，我們可以得到設計風力計算式規定如下：

封閉式、部分封閉式或開放式建築物或地上獨立結構物之主要風力抵抗系統所應承受之設計風壓、屋頂女兒牆設計風壓及設計風力，應依本節規定之公式計算，相關公式整理列於表 3-1。

表 3-1 柔性建築物設計風壓 p 及設計風力 F

		柔性建築物( $f_n < 1 \text{ Hz}$ )	
		封閉式或部分封閉式建築物	開放式建築物
主要風力抵抗系統	$p = qG_f C_p - q_i(GC_{pi})$ $q, q_i$ : 註 1。 $G_f$ : 見 2.7 節。 $C_p$ : 見 2.8 節。 $(GC_{pi})$ : 見 2.9 節。  屋頂女兒牆 $p_p = q_p(GC_{pm})$ $q_p$ : 女兒牆頂端風速壓。 $(GC_{pm})$ : 設計迎風面女兒牆，使用 1.8；設計背風面女兒牆，使用 -1.1。		$F = q(z_{Ac}) G C_f A_c$  $C_f$ : 見 2.8 節。  $A_c$ : 開放式建築物受風作用特徵面積。 $G$ : 見 2.7 節。  $z_{Ac_f}$ : $A_c$ 之形心高度。
	局部構件及外部被覆物	$p = q(GC_p) - q_i(GC_{pi})$ $q, q_i$ : 註 1。 $(GC_p)$ : 見 3.3 節。 $(GC_{pi})$ : 見 2.9 節。  屋頂女兒牆 $p = q_p[(GC_p) - (GC_{pi})]$ $q_p$ : 女兒牆頂端風速壓。	

資料來源：【40】

封閉式或部分封閉式普通建築物或地上獨立結構物之主要風力抵抗系統所應承受之設計風壓，依下式計算：

$$p = qGC_p - q_i(GC_{pi}) \tag{3-10}$$



式中對迎風面牆，外風速壓  $q$  採  $q(z)$ ；對背風面牆、側牆與屋頂，外風速壓  $q$  採  $q(h)$ ； $q(z)$  與  $q(h)$  依規範 2.6 節之規定計算。對封閉式建築物或內風壓取負值之部分封閉式建築物，內風速壓  $q_i$  採  $q(h)$ ；對內風壓取正值之部分封閉式建築物，內風速壓  $q_i$  可採  $q(z_{h_0})$  或  $q(h)$ ，其中， $z_{h_0}$  為會影響正值內風壓之最高開口高度。 $C_p$  為普通建築物之陣風反應因子，依規範 2.7 節之規定計算。 $C_p$  為外風壓係數，依規範 2.8 節之規定計算。 $(GC_{pi})$  為內風壓係數，依規範 2.9 節之規定計算。

封閉式或部分封閉式柔性建築物或地上獨立結構物之主要風力抵抗系統所應承受之設計風壓  $p$ ，依下式計算：

$$p = qG_f C_p - q_i(GC_{pi}) \quad (3-11)$$

式中， $G_f$  為柔性建築物之陣風反應因子，依規範 2.7 節之規定計算。

設計建築物主要風力抵抗系統時，屋頂女兒牆之設計風壓  $p_p$ ，依下式計算：

$$p_p = q_p(GC_{pn}) \quad (3-12)$$

式中， $q_p$  為屋頂女兒牆頂端之風速壓，依規範 2.6 節之規定計算； $(GC_{pn})$  為屋頂女兒牆淨風壓係數，迎風面女兒牆取 +1.8，背風面女兒牆取 -1.1。

開放式建築物或地上獨立結構物所應承受之設計風力  $F$ ，依下式計算：

$$F = q(z_{Ac}) GC_f A_c \quad (3-13)$$

式中， $C_f$  為風力係數，依規範 2.8 節之規定計算； $A_c$  為開放式建築物受風作用特徵面積； $q(z_{Ac})$  為面積  $A_c$  形心高度  $z_{Ac}$  處之風速壓。

同時滿足以下各條件：(1)高度 ( $h$ ) 小於 18 公尺、(2)  $h/\sqrt{BL} < 3$  且  $0.2 \leq L/B \leq 5$ 、(3) 近似矩形斷面、(4) 封閉式或部分封閉式剛性樓版建築物，可依規範中章 2.13 節(低矮建築物設計風力計算式)規定的方法計算主要風力抵抗系統所應承受之設計風力。

規範設計風力計算式，主要係參照美國 ASCE 7-02 之規定。其中，風速壓  $q$  係表示風速受阻而完全靜止時，作用在建築物表面上之風壓力。由於建築物並非無窮大，風可

從四面八方流過，因此作用在建築物表面上的風壓，應乘以風壓係數  $C_p$ 。上述之風壓係數並沒有計及動態行為，因此應考慮風壓係以平均風壓為中心，有忽大忽小的變化。此外，也應計及其對建築物的動態效應。上述兩種效應，以陣風反應因子表示之。

陣風反應因子乃考慮風速具有隨時間變動的特性，及其對建築物之影響。此因子將順風向造成的動態風壓轉換成等值風壓處理。

普通建築物之陣風反應因子可取 1.88，或依下式計算：

$$G = 1.927 \left( \frac{1 + 1.7g_Q I_z Q}{1 + 1.7g_V I_z} \right) \quad (3-14)$$

式中， $g_Q$  與  $g_V$  均可取 3.4；紊流強度  $I_z$  與背景反應  $Q$  分別依下式計算：

$$I_z = c(10/\bar{z})^{1/6} \quad (3-15)$$

$$Q_x = \sqrt{\frac{1}{1 + 0.63 \left( \frac{B+h}{L_z} \right)^{0.63}}} \quad (3-16)$$

式中， $\bar{z}$  為等效結構高度，其值為  $0.6h$ ，但不可小於  $z_{\min}$ ， $z_{\min}$  和  $c$  值列於表 3-2；

$L_z$  為為紊流積分尺度，由下式計算：

$$L_z = l(\bar{z}/10)^{\bar{\varepsilon}} \quad (3-17)$$

式中， $l$  和  $\bar{\varepsilon}$  之值列於表 3-2。

表 3-2 地況相關參數

地況	$\alpha$	$z_g$ (m)	$\bar{b}$	$c$	$l$ (m)	$\bar{\varepsilon}$	$z_{\min}$ (m)
A	0.32	500	0.45	0.45	55	0.5	18
B	0.25	400	0.62	0.30	98	0.33	9
C	0.15	300	0.94	0.20	152	0.20	4.5

資料來源：【40】

柔性建築物之陣風反應因子依下式決定：

$$G_f = 1.927 \left( \frac{1 + 1.7I_z \sqrt{g_Q^2 Q^2 + g_R^2 R^2}}{1 + 1.7g_V I_z} \right) \quad (3-18)$$

式中， $g_Q$  和  $g_V$  均可取 3.4， $g_R$  依下式計算：

$$g_R = \sqrt{2 \ln(3600 f_{nx})} + \frac{0.577}{\sqrt{2 \ln(3600 f_{nx})}} \quad (3-19)$$

$R$  為共振反應因子，其值依下式計算：

$$R = \sqrt{\frac{1}{\beta} R_n R_h R_B (0.53 + 0.47 R_L)} \quad (3-20)$$

$$R = \sqrt{\frac{1}{\beta} R_n R_h R_B (0.53 + 0.47 R_L)} \quad (3-21)$$

$$R_n = \frac{7.47 N_l}{(1 + 10.3 N_l)^{5/3}} \quad (3-22)$$

$$N_l = \frac{f_{nx} L_z}{\bar{V}_z} \quad (3-23)$$

$$R_j = \frac{1}{\eta} - \frac{1}{2\eta^2} (1 - e^{-2\eta}) \quad \text{for } \eta > 0 \quad (3-24a)$$

$$R_j = 1 \quad \text{for } \eta = 0 \quad (3-24b)$$

$\beta$  為結構阻尼比。規範中，下標  $j$  可為  $h$ 、 $B$  或  $L$ ；當  $R_j = R_h$  時， $\eta = 4.6 f_{nx} h / \bar{V}_z$ ；當  $R_j = R_B$  時， $\eta = 4.6 f_{nx} B / \bar{V}_z$ ；當  $R_j = R_L$  時， $\eta = 15.4 f_{nx} L / \bar{V}_z$ 。 $\bar{V}_z$  為高度  $z$  處每小時平均風速，依下式計算：

$$\bar{V}_z = \bar{b} \left( \frac{z}{10} \right)^\alpha V_{10}(C) \quad (3-25)$$

式中， $\bar{b}$  值列於表 3-2。

### 3.2.2 風力規範實例設計計算

以下我們以一棟用途係數為 1.00 的 523 公尺建築於 A 地況下之動態反應為範例。首先建築物基本資料如下：用途係數  $I = 1.00$ （規範 2.5 小節），結構物阻尼比  $\beta = 0.005$ ，建築物週期  $T_x = 8.333 \text{ s}$ ， $T_y = 8.333 \text{ s}$ 。

表 3-3 地況 A 相關參數

地況	$\alpha$	$z_g(m)$	$\bar{b}$	$c$	$l(m)$	$\bar{\varepsilon}$	$z_{\min}(m)$
A	0.32	500	0.45	0.45	55	0.5	18

資料來源：【40】

地況 A：大城市市中心區，至少有 50%之建築物高度大於 20 公尺者。建築物迎風向之前方至少 800 公尺或建築物高度 10 倍的範圍（兩者取大值）係屬此種條件下，才可使用地況 A。 $\alpha$ ：相對於 10 分鐘平均風速之垂直分布法則的指數（見表 3-3）， $z_g(m)$ ：梯度高度（見表 3-3）； $\bar{b}$ ：規範中式(2.19)所用之係數， $c$ ：規範中式(2.10)所用之係數， $l(m)$ ：規範中式(2.12)所用之係數，列於表 3-3， $\bar{\varepsilon}$ ：規範中式(2.12)所用之係數，列於表 3-3， $z_{\min}(m)$ ： $\bar{z}$ （等效結構高度；m）之下限，列於表 3-3

表 3-4 風力規範地況

地況	$\alpha$	$z_g(m)$	$\bar{b}$	$c$	$l(m)$	$\bar{\varepsilon}$	$z_{\min}(m)$
A	0.32	500	0.45	0.45	55	0.5	18
B	0.25	400	0.62	0.30	98	0.33	9
C	0.15	300	0.94	0.20	152	0.20	4.5

資料來源：【40】

建築高度  $h = 523\text{ m}$ ，高度 523 米處風速  $V_h = 96\text{ m/s}$ ，等效結構高度  $\bar{z} = 313.8\text{ m}$ ，10 公尺高處之風速  $V_{10}(C) = 27.50\text{ m/s}$ ，紊流積分尺度  $L_{\bar{z}} = 308.098$ ，紊流強度  $I_{\bar{z}} = 0.253$ ，離地面  $z = h$  公尺高之風速壓  $q(h) = 128.638\text{ kgf/m}^2$ ，在高度為  $\bar{z}$  處每小時平均風速  $\bar{V}_{\bar{z}} = 37.217\text{ m/s}$ 。

接下來進行以下計算以求得建築物之陣風反應因子、橫風力係數以及扭轉風力係數以檢核是否符合規範，計算細節如下：

陣風反應因子			
X向			
順風向自然頻率 f <sub>n</sub>	0.12		g <sub>Q</sub> 3.4
迎風面寬 B	74.71428571		g <sub>V</sub> 3.4
平行風向尺寸 L	74.71428571		g <sub>R</sub> 3.649422204
I <sub>zba</sub>	0.253378848		
L <sub>zba</sub>	308.0981986		<b>G f</b> 2.30736916
背景反應 Q			
Vba <sub>zba</sub>	37.21749029		
N1	0.993398092	R <sub>n</sub>	0.131729207
η <sub>h</sub>	7.756998062	R <sub>h</sub>	0.120606203
η <sub>B</sub>	1.10814258	R <sub>B</sub>	0.539625445
η <sub>L</sub>	3.709868638	R <sub>L</sub>	0.233244137
		R	1.047248381

(a) X 向

陣風反應因子			
Y向			
順風向自然頻率 f <sub>n</sub>	0.12		g <sub>Q</sub> 3.4
迎風面寬 B	74.71428571		g <sub>V</sub> 3.4
平行風向尺寸 L	74.71428571		g <sub>R</sub> 3.649422204
I <sub>zba</sub>	0.253378848		
L <sub>zba</sub>	308.0981986		<b>G f</b> 2.30736916
背景反應 Q			
Vba <sub>zba</sub>	37.21749029		
N1	0.993398092	R <sub>n</sub>	0.131729207
η <sub>h</sub>	7.756998062	R <sub>h</sub>	0.120606203
η <sub>B</sub>	1.10814258	R <sub>B</sub>	0.539625445
η <sub>L</sub>	3.709868638	R <sub>L</sub>	0.233244137
		R	1.047248381

(b) Y 向

圖 3-2 建築物設計風力計算陣風反應因子計算圖

資料來源：本計畫計算數據整理

這部分主要是為了算出陣風反應因子  $G_f$ ，可以由規範中(2.13)式求得：

$$G_f = 1.927 \left( \frac{1 + 1.7 I_z \sqrt{g_Q^2 Q^2 + g_R^2 R^2}}{1 + 1.7 g_V I_z} \right) \quad (3-26)$$

以 X 向各值為例，由此規範中(2.13)式可得知，要求  $G_f$  之前必須先知道  $I_z$ 、 $g_Q$ 、 $Q$ 、 $g_R$ 、 $R$ 、 $g_V$  的值，因此我們必須由上列基本資料加以計算得到

首先，我們可以由規範中(2.11)式求得  $Q_x$  值如下：

$$Q_x = \frac{1}{\sqrt{1 + 0.63 \left( \frac{B+h}{L_z} \right)^{0.63}}} \quad (3-27)$$

$$\text{代入已知可得：} Q_x = \frac{1}{\sqrt{1 + 0.63 \left( \frac{15.6 + 82.6}{209.35} \right)^{0.63}}} = 0.715$$

依據規範中(2.13)式中之  $g_Q$ 、 $g_V$  值可取 3.4，而  $g_R$  之計算可由規範中(2.14)式求得

$$g_R = \sqrt{2 \ln(3600 f_{nx})} + \frac{0.577}{\sqrt{2 \ln(3600 f_{nx})}} \quad (3-28)$$

$$\text{代入已知可得：} g_R = \sqrt{2 \ln(3600 \times 0.396)} + \frac{0.577}{\sqrt{2 \ln(3600 \times 0.396)}} = 3.649$$

$R$  為共振反應因子，其值可以規範中(2.15)式計算如下

$$R = \sqrt{\frac{1}{\beta} R_n R_h R_B (0.53 + 0.47 R_L)} \quad (3-29)$$

$$R = \sqrt{\frac{1}{\beta} R_n R_h R_B (0.53 + 0.47 R_L)} \quad (3-30)$$

$$R_n = \frac{7.47 N_l}{(1 + 10.3 N_l)^{5/3}} \quad (3-31)$$

$$N_l = \frac{f_{nx} L_z}{\bar{V}_z} \quad (3-32)$$

$$R_j = \frac{1}{\eta} - \frac{1}{2\eta^2} (1 - e^{-2\eta}) \quad \text{for } \eta > 0 \quad (3-33a)$$

$$R_j = 1 \quad \text{for } \eta = 0 \quad (3-33b)$$

依規範， $\beta$  為結構阻尼比，當  $R_j = R_h$  時， $\eta = 4.6 f_{nx} h / \bar{V}_z$ ；當  $R_j = R_B$  時， $\eta = 4.6 f_{nx} B / \bar{V}_z$ ；當  $R_j = R_L$  時， $\eta = 15.4 f_{nx} L / \bar{V}_z$ ，可得  $R_n = 0.132$ ， $R_h = 0.121$ ， $R_B = 0.540$ ， $R_L = 0.233$  代入，可得  $R = 0.331$ 。最後，依次將已知參數及基本資料代入規範中(2.13)式可得出我們所要的陣風反應因子  $G_f$ 。

由於紊流的緣故，風速並非定值，而係以其平均值為中心做時大時小的變化，此平均風速可視為一小時平均風速。因為建築物係振動體，故受此種風力作用而產生振動。因為動力效應，作用在建築物上的等值動態風壓大於平均風速所造成的靜態風壓。此二風壓的比值成為陣風反應因子，其數值大於 1.0。設計時如將靜態風壓成以此因子，則等於考慮了風的動態效應。

橫風向風力				
X向				
橫風向自然頻率 f <sub>a</sub>	0.12			
g <sub>L</sub>	3.649422204			
C <sub>L</sub>	0.1572			
L/B	1	L/B<3時略		
n <sub>1</sub>	0.090092546	n <sub>2</sub>		
beta <sub>1</sub>	0.280583942	bata <sub>2</sub>		
_k <sub>1</sub>	0.85	_k <sub>2</sub>		
n <sub>*</sub>	0.093392857			
		K1	0.21	
S <sub>L</sub> (n <sub>*</sub> )	1.108393644	K2	1	
R <sub>LR</sub>	0.870530332	K3	0	
A <sub>z</sub>	224.1428571	K(Z)	2.844512155	
q(h) 假設	128.638	=0.125(V <sup>2</sup> )=80	K <sub>zt</sub>	1
Z 離地高度	520		q(Z)	128.6383032
W <sub>Lz</sub>	652896.4997			

(a) X 向

橫風向風力				
Y向				
橫風向自然頻率 f <sub>a</sub>	0.12			
g <sub>L</sub>	3.649422204			
C <sub>L</sub>	0.1572			
L/B	1	L/B<3時略		
n <sub>1</sub>	0.090092546	n <sub>2</sub>		
beta <sub>1</sub>	0.280583942	bata <sub>2</sub>		
_k <sub>1</sub>	0.85	_k <sub>2</sub>		
n <sub>*</sub>	0.093392857			
		K1	0.21	
S <sub>L</sub> (n <sub>*</sub> )	1.108393644	K2	1	
R <sub>LR</sub>	0.870530332	K3	0	
A <sub>z</sub>	224.1428571	K(Z)	2.844512155	
q(h) 假設	128.638	=0.125(V <sup>2</sup> )=80	K <sub>zt</sub>	1
Z 離地高度	520		q(Z)	128.6383032
W <sub>Lz</sub>	652896.4997			

(b) Y 向

圖 3-3 建築物設計風力計算橫風力計算圖  
(資料來源：本計畫實驗數據整理)

這部分主要是為了算出離地面高度  $z$  處橫向風風力  $W_{Lz}$ ，而在此之前我們一樣要先算出  $C_L'$ 、 $A_z$ 、 $z$ 、 $g_L$ 、 $\beta$ 、 $R_{LR}$  並代入規範中(2.22)式。

$$W_{Lz} = 3q(h)C_L' A_z \frac{z}{h} g_L \sqrt{1 + \frac{1}{\beta} R_{LR}} \quad (3-34)$$

式中各值： $A_z$  為離地面高度  $z$  處迎風面面積， $g_L = \sqrt{2 \ln(3600 f_a)} + \frac{0.577}{\sqrt{2 \ln(3600 f_a)}}$ ，

$C_L' = 0.0082(L/B)^3 - 0.071(L/B)^2 + 0.22(L/B)$ ， $R_{LR}$  為橫風向共振因子，可依下式計算：

$R_{LR} = \frac{\pi S_L(n^*)}{4}$ ，其中， $S_L(n^*)$  為橫風向風力頻譜值：

$$S_L(n^*) = \sum_{j=1}^s \frac{4\bar{k}_j (1 + 0.6\beta_j) \beta_j}{\pi} \frac{\left(\frac{n^*}{n_j}\right)^2}{\left[1 - \left(\frac{n^*}{n_j}\right)^2\right]^2 + 4\beta_j^2 \left(\frac{n^*}{n_j}\right)^2}$$

$$n^* = \frac{f_a B}{V_h}$$

$$n_1 = \frac{0.12}{\left[1 + 0.38\left(\frac{L}{B}\right)^2\right]^{0.89}}, \quad n_2 = \frac{0.56}{\left(\frac{L}{B}\right)^{0.85}}$$

$$\beta_1 = \frac{\left(\frac{L}{B}\right)^4 + 2.3\left(\frac{L}{B}\right)^2}{2.4\left(\frac{L}{B}\right)^4 - 9.2\left(\frac{L}{B}\right)^3 + 18\left(\frac{L}{B}\right)^2 + 9.5\left(\frac{L}{B}\right) - 0.15} + \frac{0.12}{\left(\frac{L}{B}\right)}, \quad \beta_2 = 0.28\left(\frac{L}{B}\right)^{-0.34}$$

$$\bar{k}_1 = 0.85, \quad \bar{k}_2 = 0.02$$

規範規定當  $\frac{L}{B} < 3$  時， $S = 1$ ， $S$  是指我們在決定橫風向風力頻譜值  $S_L(n^*)$  所要只用的參數，也就是史特赫數(Strouhal Number)。可由規範(C2.15)式計算：

$$S = \frac{nB}{V} \quad (3-35)$$



由規範中(2.22)式中可依以上計算得離地面高度  $z$  處橫風向風力  $W_{Lz}$  為 652896.5kgf  
並以此規範值與實驗數據作為對照。

### 第三節 高樓剛性模型風洞實驗分析與探討

本次風洞實驗，係以高寬比(H/D)為 7 之三維方形斷面柱體模擬為高樓剛性模型進行氣動力試驗。在不同風攻角下，以恆定風速進行氣動力模型試驗，取得該方型斷面柱體因受恆定風所生之風力負載與扭力，由風力歷時資料以統計方式可算得不同風攻角下之風力係數，並進一步作為高樓柔性氣彈模型實驗之受力比對依據。

#### 3.3.1 實驗設備

##### (1) 風洞設備

本次高樓剛性模型風洞實驗於內政部建築研究所風洞實驗室進行，該風洞實驗室設於國立成功大學歸仁校區內。風洞本體為一垂直向的封閉迴路系統，總長度為 77.9 公尺，該風洞具有兩個測試區段，如圖 3-4。第一測試區斷面尺寸為長 36.5 公尺寬 4 公尺高 2.6 公尺，從事一般流體力學研究、建築物相關風工程研究、大氣擴散性研究，最大風速為每秒 30 公尺；第二測試區斷面尺寸為長 21 公尺寬 6 公尺高 2.6 公尺，從事橋梁測試研究以及建築物相關風工程研究。風洞之氣流產生係仰賴一直接傳動軸流式風扇，其直徑為 4.75 公尺，整體長度包含風扇中心體、驅動馬達及尾錐約 7.62 公尺。驅動馬達最大馬力為 500 千瓦，最高轉速為 390rpm。風扇主要功能係提供氣流起始動能，並補充氣流在風洞迴流中流動所產生之壓力損失。本風洞設備屬於循環式風洞，透過適當的實驗配置、地貌模擬等可以產生大氣邊界層風速流場。在來流風源處未擺設擾流元件下，可以產生紊流強度 0.5% 以下之均勻流場。

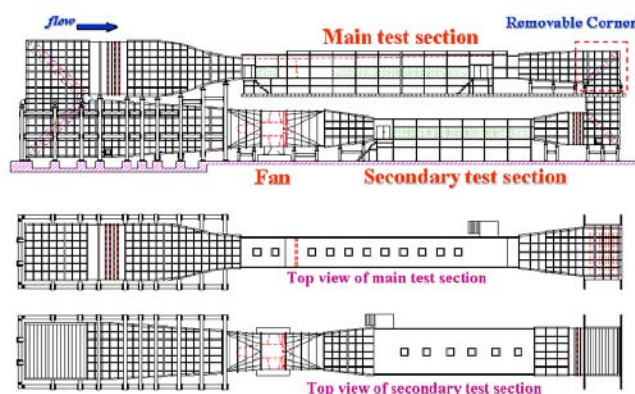


圖 3-4 風洞系統簡圖

資料來源:【2】

## (2)風速量測

實驗中風速的測定係由熱線流速儀(Thermal Anemometer / Hot-wire Anemometer)為測量儀器，其原理乃係利用電流加熱金屬探針，使之溫度上升，流體經過探針時，帶走熱量使溫度降低造成電阻，復由惠斯同電橋測量電阻改變，並換算為流速。本次實驗使用為 TSI 8465 熱線式風速計，安裝方式如圖 3-5 所示。本儀器量測範圍為每秒 0.127 至 50.8 公尺，精確度上，攝氏 18 到 28 度可能出現±2% 的誤差。



圖 3-5 熱線流速儀安裝  
資料來源：本計畫實驗拍攝

## (3)風力監測系統

風力的監測可藉由六力平衡儀(Six Forces Balance, SFB)來實現，如圖 3-6。其設置方式為將六力平衡儀至於模型下，直接量測受力歷時資料，將六力平衡儀之歷時資料擷取出來並加以分析，本實驗使用之六力平衡儀型號為 JR3 Multi-Axis Force-Torque Sensor 75E20A4 400N，其量測範圍如下表 3-4 所示。

表 3-5 六力平衡儀量測範圍表

工作溫度範圍(攝氏度)	-40 至 65
誤差範圍(各軸)	0.25%
$F_x$ 、 $F_y$	
標準測量範圍(單位：牛頓)	±400
$F_z$	
標準測量範圍(單位：牛頓)	±800
$M_x$ 、 $M_y$	
標準測量範圍(單位：牛頓·公尺)	±80
$M_z$	
標準測量範圍(單位：牛頓·公尺)	±80

資料來源：本計畫實驗數據整理



圖 3-6 六力平衡儀安裝於風洞之轉盤基座圖  
資料來源：本計畫實驗拍攝

#### (4) 資料擷取系統

實驗中儀器所量得之訊號為類比訊號，須經由資料擷取系統進一步轉換為數位訊號轉存入電腦方能進行進一步分析。本實驗之量測訊號係藉由 NI Compact DAQ -9172 搭配 NI 9215 量測系統，進行類比數位轉換，如圖 3-7。並搭配 Visual Basic 及 LabView 軟體進行控制、量測、訊號處理。



圖 3-7 機箱與量測系統  
資料來源：本計畫實驗拍攝



圖 3-8 訊號擷取系統  
資料來源：本計畫實驗拍攝

### 3.3.2 實驗配置

本次實驗於風洞設備之第一測試區進行，運轉風速控制於每秒 10 公尺，紊流強度大小低於 0.5%。實驗模型水平斷面為 0.1 公尺 0.1 公尺，模型高 0.7 公尺，高寬比(H/D=7)為，斷面阻塞比(blockage ration)為 0.67%。為創造一均勻流場，在來流風場規劃上盡量減少風洞中可能造成風速改變之配置。相關配置方式如下圖 3-9 及圖 3-10。

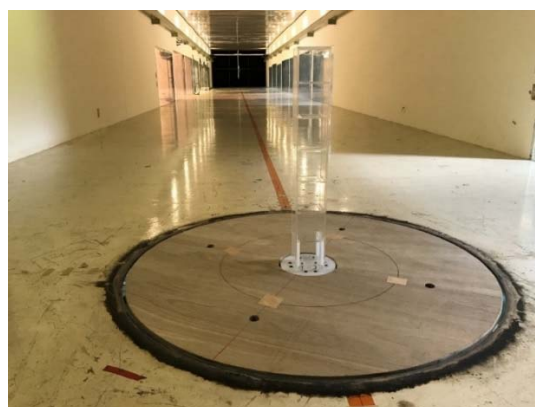


圖 3-9 實驗配置圖-由來流風處拍攝  
資料來源：本計畫實驗拍攝



圖 3-10 實驗配置圖-面向來流風處拍攝  
資料來源：本計畫實驗拍攝

### 3.3.3 高樓剛性模型風洞實驗結果探討

此高樓剛性模型氣動實驗係考慮一不受周圍地貌影響之三維方形斷面柱體，進行恆定風速(每秒 10 公尺)風洞實驗，量測建築物所受風力與扭力，並由實驗資料計算風力係數與扭力係數。各係數之定義如下所示：

平均昇力係數：

$$\overline{C_L} = \frac{\overline{F_L}}{0.5\rho U^2 HD} \quad (3-36)$$

擾動昇力係數：

$$C_L' = \frac{F_L'}{0.5\rho U^2 HD} \quad (3-37)$$

平均扭力係數：

$$\overline{C_M} = \frac{\overline{M}}{0.5\rho U^2 HD^2} \quad (3-38)$$

擾動扭力係數：

$$C_M' = \frac{M'}{0.5\rho U^2 HD^2} \quad (3-39)$$

其中  $\rho$  為空氣密度， $U$  為來流風速，單位為公尺每秒； $H$  為模型高，單位為公尺； $D$  為模型方型斷面邊長，單位為公尺； $\overline{F_L}$  為平均昇力，單位為牛頓； $\overline{M_D}$  為作用於順風向

之平均扭力，單位為牛頓·公尺； $M_D'$ 為作用於順風向之擾動扭力，單位為牛頓·公尺。前述風力係數均係將風壓分布進行了無因次化，此計算方式有助於實驗結果的報讀與判斷，蓋將風力無因次化，可用於判斷不同風速下之受力情形。在平均係數的計算上，乃是將各風力資料進行加總後平均；而擾動係數計算則是由風力資料之均方根值進行計算。擾動係數資料可以觀測到所受風力的變化傾向，例如，建築物可能受來自渦散現象之周期性外力而產生較大的擾動昇力，根據式(3-36)至(3-39)可以計算出如表 3-6 及表 3-7 之試驗結果。

表 3-6 不同風攻角下模型受力結果

攻角	$\overline{F_L}$	$\overline{M_D}$	$F_L'$	$M_D'$	$U$
0	0.002639	0.002379	0.228174	0.069793	10.045500
15	2.625210	-1.034460	0.292100	0.110244	9.997414
30	0.637000	-0.258520	0.167562	0.071583	10.061710
45	-0.123900	0.020829	0.134706	0.064079	10.042860
60	-0.806650	0.278059	0.144337	0.063084	10.037800
75	-3.404920	1.262882	0.253248	0.094001	10.047640
90	-0.298320	0.054667	0.237172	0.072741	10.031240

資料來源：本計畫實驗數據整理

表 3-7 不同風攻角下模型受力之風力係數

攻角	$\overline{C_L}$	$\overline{C_{M_D}}$	$C_L'$	$C_{M_D}'$
0	0.000633	0.000815	0.054749	0.023923
15	0.635973	-0.358010	0.070763	0.038153
30	0.152383	-0.088330	0.040076	0.024458
45	-0.029740	0.007143	0.032339	0.021976
60	-0.193850	0.095458	0.034686	0.021657
75	-0.816640	0.432700	0.060739	0.032207
90	-0.071780	0.018792	0.057070	0.025005

資料來源：本計畫實驗數據整理

由剛性試體風洞實驗結果，可知建築物模型所受風力以及因風力作用於建築物模型所生之力矩，受風攻角影響較大。因在模型受風時，其阻力與昇力分別來自於模型柱體順風向前、後側，橫風向左、右側的壓力差。當空氣流經柱體時，會自柱體尖角處產生分離現象(separation)，並在物體後方形成一尾流(wake)區域，由於柱體後方尾流區中速

度較低，柱體前方迎風面速度較高，柱體迎風面與背風面(尾流區)將產生壓力差，故而生成阻力。柱體之昇力係來自於橫風向兩側之壓力差，當柱體受風係左右對稱狀態下(即0度、45度、90度)，橫風向兩側壓力差相等，尾流區方向指向於順風向，是以昇力為零(參考圖 3-11(a))。當柱體受風不對稱時，橫風向兩側出現壓力差，尾流區方向產生偏轉，故出現橫風方向的昇力(參考圖 3-11(a))。因平均扭力(x)乃是由昇力與橫風向外積而得，是以平均扭力(x)與平均昇力圖型有一致的趨勢，惟由於扭力之方向定義關係(本文係依照右手定則)，兩者間會相差一個負號。

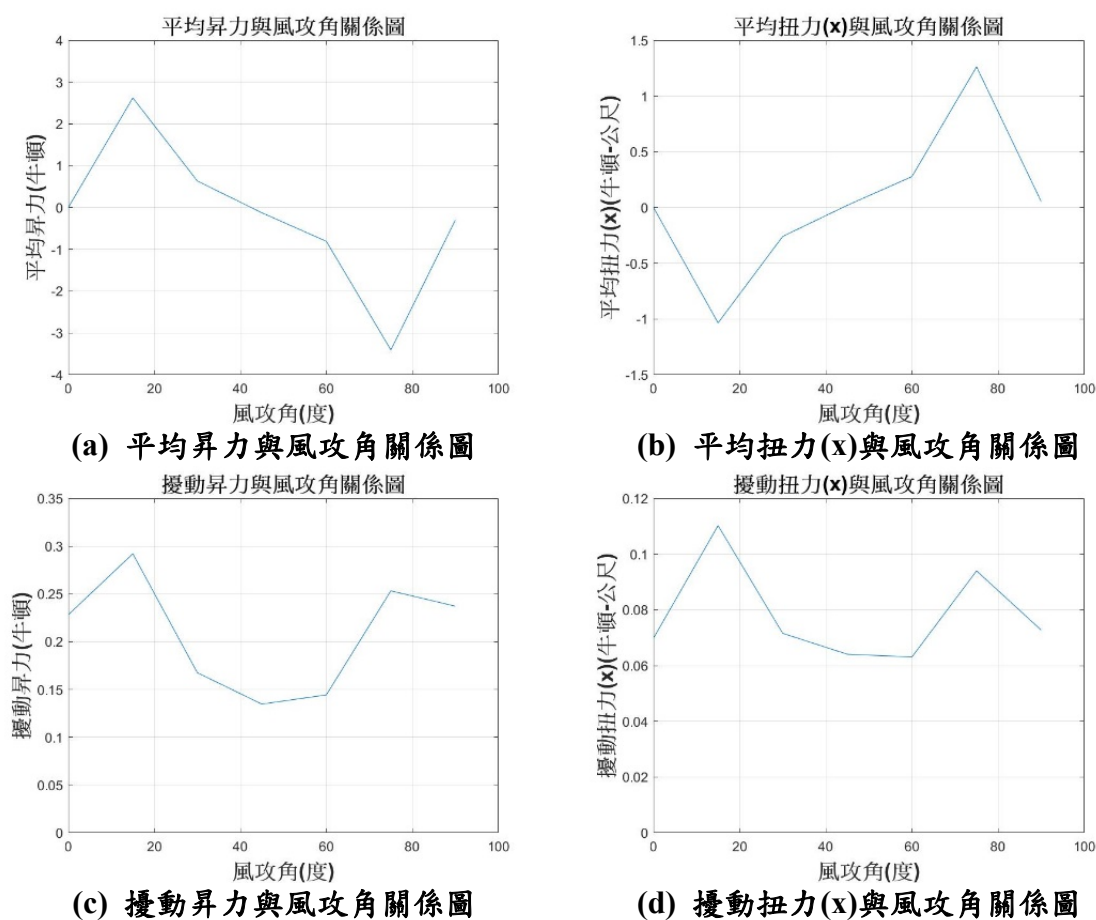


圖 3-11 不同風攻角下模型受力關係圖

資料來源：本計畫實驗數據整理



#### 第四節 高樓柔性氣彈模型風洞實驗分析與探討

高樓柔性氣彈模型風洞實驗，係以高寬比(H/D)為 7 之三維方形斷面柱體，模擬作為高樓柔性模型進行氣彈力試驗。在固定風攻角下，以不同風速進行氣彈力模型試驗。實驗中分別以六力平衡儀，量測該方型斷面柱體受均勻風場所生之風力負載與扭力，以雷射位移計監測氣彈力模型受風下頂端變位，模型內安裝加速規紀錄模型之動態行為，另外以熱線式風速計紀錄風洞設備內流場速度變化。由各項儀器設備歷時資料以統計方式可算得不同風速下之風力負載、風力係數、柔性模型變位，並進一步推算驗證高樓柔性模型之氣彈力效應。

##### 3.4.1 實驗設備

製作柔性氣彈力模型之主要目的即在於觀察試體受風時的氣彈力效應，是以監測方形斷面柱體在橫風向振動為本實驗重點。本實驗以雷射位移計架設於模型頂端(如圖 3-12)，紀錄模型頂端位移歷時資料。雷射位移計分別架設於橫風向兩側以及背風側，故可觀測側向位移及順風向位移。雷射位移計由雷射源以及雷射控制器兩個單元組成，其有效測量距離為 $300\text{mm} \pm 100\text{mm}$ 。為了能進一步紀錄方形斷面柱體樓層加速度變化，於模型內部頂端以及中間層各安裝 4 個加速規(如圖 3-13)，可分別監控順風向以及橫風向的加速度歷時資料，風洞實驗時之加速度歷時資料可作為振動台實驗之比對參照依據，加速規之有效量測範圍為 10 至 100Hz。



圖 3-12 雷射位移計量測模型頂端位移圖  
資料來源：本計畫實驗拍攝



圖 3-13 加速規  
資料來源：本計畫實驗拍攝

### 3.4.2 實驗配置

本次實驗於風洞設備之第一測試區進行，在固定風攻角為 0 度下，分別進行運轉風速每秒 2 公尺、每秒 4 公尺、每秒 6 公尺、每秒 7 公尺、每秒 8 公尺、每秒 9 公尺、每秒 10 公尺、每秒 10.4 公尺、每秒 10.5 公尺、每秒 11 公尺、每秒 11.1 公尺、每秒 12 公尺、每秒 12.5 公尺、每秒 13 公尺、每秒 14 公尺、每秒 15 公尺、每秒 16 公尺、每秒 17 公尺、每秒 18 公尺共 19 次實驗，掃描氣彈力效應發生時之共振風速。實驗模型水平斷面為 0.1 公尺 0.1 公尺，模型高 0.7 公尺，高寬比(H/D)為 7，斷面阻塞比(blockage ration)為 0.67%。為創造一均勻流場，在來流風場規劃上盡量減少風洞中可能造成風速改變之配置。雷射位移計分別架設於方形斷面柱橫風向兩側以及背風側距離模型 30 公分處。熱線式風速計架設於模型迎風面前方 30 公分處，探針平行於橫風向，距離模型 75 公分。為方便實驗結果之分析與討論，實驗試體配置如圖 3-14。本實驗將三個雷射位移計依順時鐘方向分別編號為 1、2、3(參考圖 3-15)，其中編號 2 為背風側。



圖 3-14 實驗配置圖(面向來流風向)

資料來源：本計畫實驗拍攝

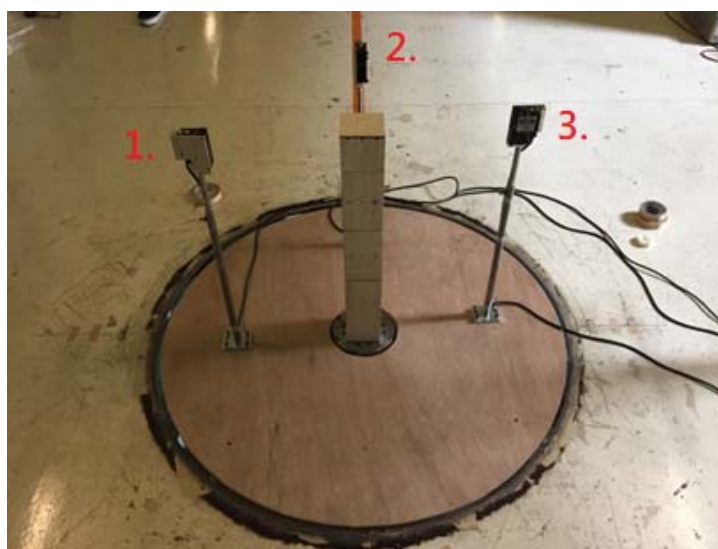


圖 3-15 雷射位移計編號

資料來源：本計畫實驗拍攝

### 3.4.3 高樓柔性模型風洞實驗結果探討

此高樓柔性模型氣彈實驗係考慮一不受周圍地貌影響之三維方形斷面柱體，進行不同風速下風洞實驗，量測建築物所受風力與扭力，並由實驗資料計算風力係數與扭力係數、紊流強度大小，另亦由雷射位移計量測柱體頂端位移歷時，由量得實驗數據進行處理後可探討此建築物模型之氣彈力效應。根據前述計算公式可以計算出如表 3-8 及表 3-9 之試驗結果。

表 3-8 不同風速下模型受力結果

風速(m/s)	平均昇力 (N)	平均扭力 (x)(N-m)	擾動昇力 (N)	擾動扭力 (x)(N-m)	紊流強度
2.025138	-0.00829	-0.01177	0.182905	0.032525	0.52%
3.952005	-0.04064	-0.02639	0.189184	0.035122	0.27%
6.077465	-0.09036	-0.05456	0.199361	0.052698	0.30%
6.979274	-0.11772	-0.07591	0.232525	0.078565	0.34%
8.001345	-0.15806	-0.10942	0.322045	0.134928	0.32%
9.101560	-0.19031	-0.13474	0.843194	0.416503	0.31%
9.998727	-0.22768	-0.16315	1.240146	0.618983	0.52%
10.38162	-0.8019	-0.58836	13.90298	7.061092	3.37%
11.07587	-0.39854	-0.34295	23.97687	12.13533	1.92%
11.13344	-0.54403	-0.36755	49.17108	24.55034	0.30%
12.06369	-0.35934	-0.27224	4.423371	2.252709	0.36%
12.57146	-0.35709	-0.27034	2.200892	1.121981	0.40%
13.12481	-0.38667	-0.29045	1.602235	0.817021	0.29%
14.12382	-0.4346	-0.31698	1.230534	0.626116	0.30%
15.05125	-0.49049	-0.35744	1.28269	0.652842	0.25%
15.98232	-0.55947	-0.3987	1.601462	0.813017	0.19%
16.92691	-0.6935	-0.47161	1.661753	0.846214	0.42%
17.96952	-0.7185	-0.48557	1.719227	0.874663	0.36%

資料來源：本計畫實驗數據整理

表 3-9 不同風速下模型受力之風力係數

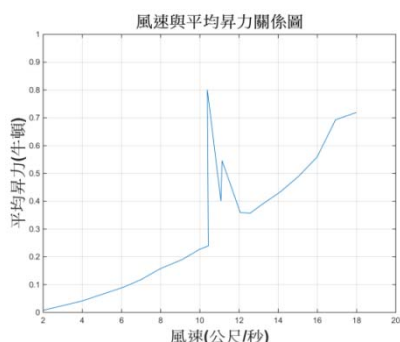
風速(m/s)	$\overline{C_L}$	$\overline{C_{M_D}}$	$C_L'$	$C_{M_D}'$
2.025138	0.048887	0.099276	1.079859	0.274318
3.952005	0.063021	0.058475	0.293291	0.077786
6.077465	0.059181	0.051079	0.130691	0.049352
6.979274	0.058447	0.053873	0.115584	0.055791
8.001345	0.05984	0.059186	0.121798	0.0729
9.101560	0.05565	0.056282	0.24646	0.173915
9.998727	0.055106	0.056425	0.300354	0.214161
10.38162	0.179891	0.188525	3.123401	2.266176
11.07587	0.079045	0.096959	4.732456	3.421744
11.13344	0.106661	0.102913	9.605086	6.850953
12.06369	0.059749	0.064659	0.735941	0.535422
12.57146	0.054735	0.059192	0.337192	0.245565
13.12481	0.054295	0.058283	0.225211	0.164059
14.12382	0.052751	0.054964	0.149362	0.108568
15.05125	0.052433	0.05457	0.137097	0.099682
15.98232	0.052977	0.053955	0.151805	0.110096
16.92691	0.058572	0.056899	0.14043	0.102159
17.96952	0.053896	0.052026	0.128917	0.093696

資料來源：本計畫實驗數據整理

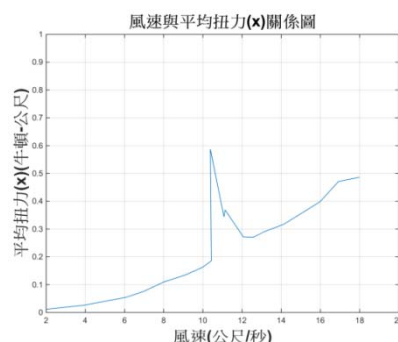
本研究針對柔性氣彈模型受風下之橫風向振動，以雷射位移計進行位移量測記錄，以六力平衡儀量測模型柱體之風力以及風力所生之扭力效應。另外，以風速計監控流場中風速變化，除可確定流場中風速符合實驗所設定外，亦可藉由風速變化歷時資料，透過統計方法，得到流場紊流強度變化。

由風洞實驗結果，可知在達到渦散共振風速時，柱體之振動反應加劇。表 3-8 及表 3-9 中，昇力、昇力係數(亦即橫風向力)隨風速之提升漸次增加，此乃係因風力上升，施加於流體上的風壓增加所致。一般而言，流場中若流體密度不變，錶壓與流體流速呈二次正相關，惟於風速達 10.38m/s、11.07m/s、11.13m/s 時昇力上升(參考圖 3-16(a))，此乃係因柱體後方渦旋頻率與模型柱體本身之振動頻率相近所產生的共振效應，致使模型之橫向位移發生放大現象。紊流強度亦由原先保持在 0.5% 以下的狀態，在共振現象出現時升至 3.37%(參考表 3-8 及圖 3-16(e))，此亦係由於柔性模型柱體在與渦旋共振下位移反應大，影響流場之穩定性。因扭力係由風力所致，是以扭力變化與力變化趨勢大致吻合。

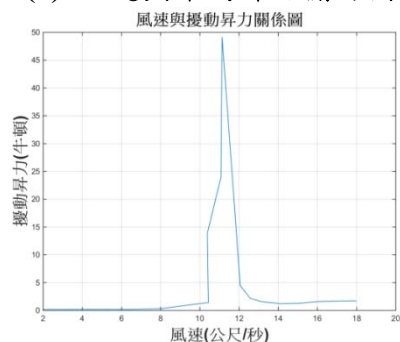
觀察風速與力、風速與扭力(參考圖 3-16(a)、圖 3-16(b))、風速與紊流強度等圖形(圖 3-16(e))，均可發現在接近共振風速發生時，對應的量測值會出現上升的現象，而在跨越共振風速後回復原本的上升趨勢，此共振效應主要係因渦散效應造成，橫風向位移位移顯著(可參考圖 3-16(a)之力值上升現象)。另外就擾動值而言，在未發生共振效應的狀態下，擾動力值(圖 3-16(c)、圖 3-16(d))、擾動扭力值均極小，亦即在實驗過程中並未出現大量偏離平均值的情形，但在共振現象發生時，擾動值有增加的現象。



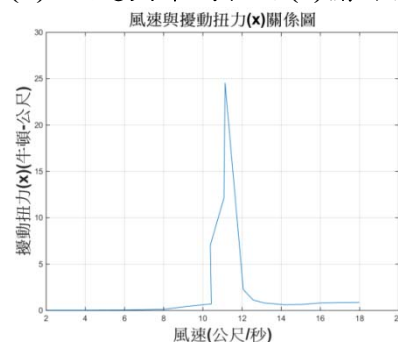
(a) 風速與平均昇力關係圖



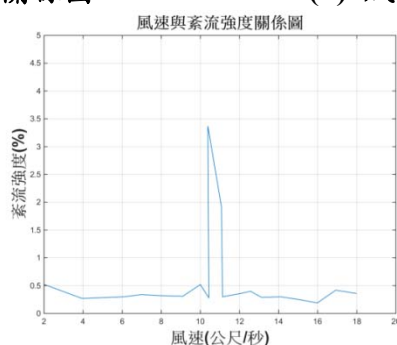
(b) 風速與平均扭力(x)關係圖



(c) 風速與擾動昇力關係圖



(d) 風速與擾動扭力(x)關係圖



(e) 風速與紊流強度關係圖

圖 3-16 不同風速下柔性模型受力關係圖

資料來源：本計畫實驗數據整理

而就雷射位移計之實驗計錄資料進行傅立葉轉換後，可以得到模型柱體振動之傅氏譜。根據各風速下三具雷射位移計之傅氏譜，在未達到共振風速以前，模型柱體之順風

向位移反應以及橫風向位移反應均不顯著，並未出現主要振動頻率。靠近共振風速時(約 9.10m/s)，橫風向位移加大，已出現主要振動頻率，惟此時順風向振動尚不顯著。在進入共振風速後，橫風向位移放大效應顯著，振動主要頻率約為 12Hz；而順風向位移亦振動頻率亦接近 12Hz，惟其效應不若橫向位移明顯。跨越共振風速後，模型振動反應減小，但仍維持在 12Hz 之頻率。由於在共振風速發生時渦散頻率與柱體振動頻率之比值接近 1，亦即兩者相近，若由史特赫數之定義計算，此狀態下模型史特赫數約為 0.12，此結果符合方型斷面柱體之實驗經驗結果。

將柔性氣彈模型實驗結果與剛性氣動模型，於 0 度攻角實驗結果進行比較(參考圖 3-17(a)至圖 3-17(d))，本次研究中可以觀察到當共振效應發生時，柔性模型的風力係數出現較大變化，此現象在不發生共振效應之剛性氣動模型實驗難以觀察到。以平均昇力係數為例，柔性氣彈模型共振反應最大時，其平均昇力係數約為 0.18，而剛性氣動模型之昇力係數約為 0.00063，後者幾無出現橫風向受力情形，柔性模型可以表現剛性模型不具備的共振反應，且其差異顯著。

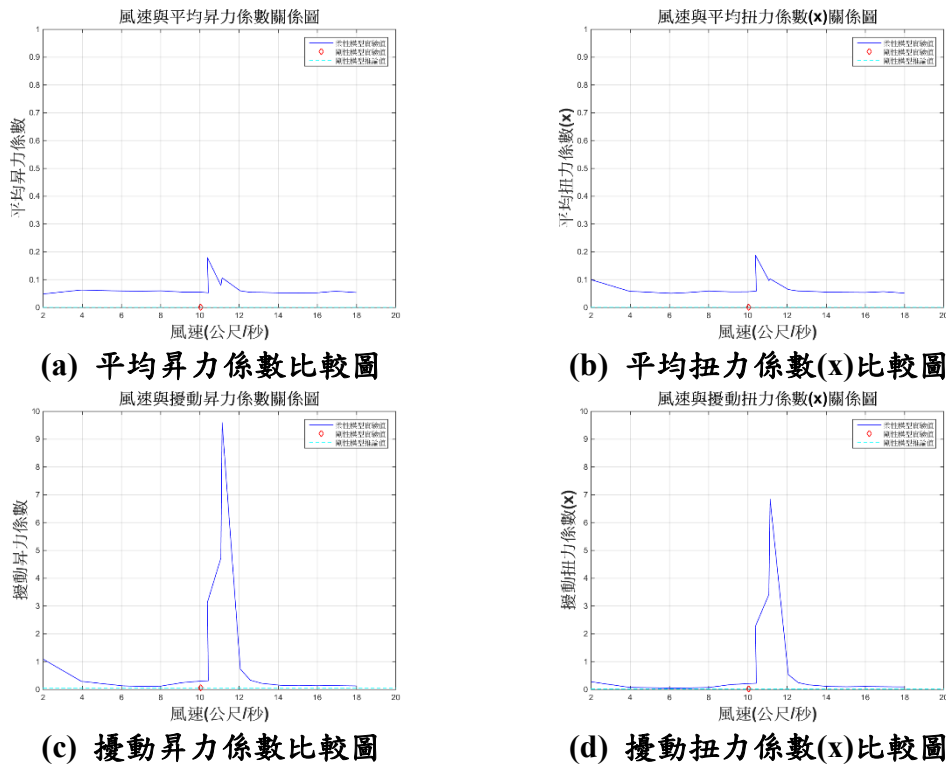


圖 3-17 各種風力係數於不同風速時之比較關係圖

資料來源：本計畫實驗數據整理

依據建築物耐風設計規範及解說計算本案例所受之橫風向平均昇力係數 $\overline{C_L}$ 可以(3-36)式計算結果如下：

$$\overline{C_L} = \frac{\overline{F_L}}{0.5\rho U^2 HD} = \frac{652896.5 \times 9.81}{0.5 \times 1.26 \times 96^2 \times 528 \times 74} = 0.0282 \quad (3-40)$$

由表 3-5 實驗結果，選擇零度攻角為 $\overline{C_L} = 0.000633$  小於規範值 0.0282，亦即在傳統剛性模型實驗架構下，建築物所受橫風力值推算方法算是保守。

另由表 3-9 比較柔性模型風洞實驗數據，觀察在零度攻角各風速下之平均昇力係數 $\overline{C_L}$ ，可以發現雖然在剛性模型風洞試驗時規範值還算保守，但當考慮到實際狀況而使用柔性模型時，在本次實驗的假設條件下，不論在何種風速下規範值都要比實驗數據之平均擾動係數要小，較為不保守。亦即，若以剛性模型實驗數值來做為規範依據可能造成推算之橫風力作用無法充分考慮真實狀態；而考慮真實結構物受風時所產生之層間位移，與考量流體與結構物互制之動態效應下，建立柔性模型似乎較能將真實建築物受風時狀態重現。惟其餘相似性之進一步探討，為逐步逼近真實行為之必要途徑，宜進一步詳細評估探討。



## 第四章 高樓柔性氣彈與剛性風洞模型振動台試驗

### 第一節 實驗設備與配置

#### 4.1.1 電磁式振動機台及水平滑床

本研究所使用之振動機台(如圖 4-1)，係利用電磁感應原理作為驅動振動機台之方式。振動機台中配有永久磁鐵以產生磁場，當輸入交流電至機台之線圈便可由電磁感應之電磁力使機台進行運動。性能方面詳表 4-1，本振動機台之最大載重為 10 公斤重，最大推力為 30kgF，最大加速度值為 20g(pk)，使用頻率範圍為 5Hz-5kHz。其使用頻率涵蓋低頻至高頻振動，除可測定柔性氣彈模型之自然振動頻率外，對於高度柔性結構所需考慮的高階振態亦有能力進行測試。

表 4-1 電磁式振動機台規格表

振動機本體重量	約 18 公斤
本體重量+側板+底座+水平滑床	約 130 公斤
振動機體積(含側板+底座)	約長 580 毫米 寬 450 毫米 高 560 毫米
最大推力	30 kgF
音圈質量	1500 公克
使用頻率範圍	5Hz-5kHz
最大載重	10 公斤
最大位移量	10 毫米 p-p
最大加速度值	20g (pk)

資料來源：本計畫實驗數據整理



圖 4-1 電磁式振動機台及水平床體

資料來源：本計畫人員拍攝

### 4.1.2 振動控制系統(VCS)

電磁式振動機台需由振動控制系統(Vibration Controller System, VCS)進行振動信號採集、時域濾波、閉迴路計算、驅動信號產生等工作，詳表 4-2。振動機之閉迴路系統由本控制系統之數位信號處理器(Digital Signal Processor, DSP)進行控制。而在系統與操作者之連結上，係以本控制系統專用之 Windows 應用軟體作為試驗參數設定、操作命令發送、信號及資料的顯示及儲存等工作。

表 4-2 震動控制系統 VCS-102 規格表

輸入	
通道數	2個同步輸入通道
量程	0.1V、1V、10V
耦合方式	電壓的AC差動、DC差動和ICP
電路特性	每通道獨立的類比和數位抗混疊濾波器
分辨率	24位模數轉換(ADC)
輸入阻抗	220 kΩ
動態範圍	120 dB
輸入方式	內置ICP恒流源、ICP加速度感測器均可直接接入
信噪比	大於 100 dB
輸出	
通道數	1通道
電路特性	獨立的類比和數位濾波器消除非線性失真和影像
分辨率	24位數模轉換(DAC)
電壓範圍	10V
動態範圍	大於110dB
幅值精度	0.05dB
輸出阻抗	30 kΩ

資料來源：本計畫實驗數據整理



圖 4-2 振動控制系統  
資料來源：本計畫人員拍攝

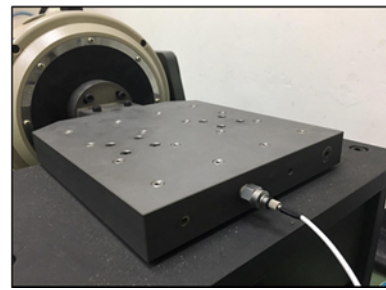
### 4.1.3 平台專用加速規(Accelerometer)

本設備所採用之加速度規為 Brüel & Kjær 4514-004，其相關性能如表 4-3 所示。其配置位置如圖 4-3 所示。

表 4-3 加速規規格表

<b>Dynamic Characteristics</b>	
Voltage Sensitivity (@160Hz)	50±10% mV/g
Measuring Range (±pk)	980m/s <sup>-2</sup>
Frequency Response	See typical amplitude response
Mounted Resonance Frequency	32kHz
Amplitude Response ±10% (typical)	1 to 10000Hz
Residual Noise	0.3mg
Transverse Sensitivity	<5%
<b>Electrical Characteristics</b>	
Output Impedance (typical)	50Ω
DC Output at room temperature	12±1V
Bias Voltage in specified temp. range	8 to 16V
Power Supply	2 to 20mA
Start-up Time	1s
Grounding	Insulated base
<b>Environmental Characteristics</b>	
Temperature Range	-51 to +121°C
Humidity	Hermetically sealed
Max. Operational Shock (peak)	5000g pk
Base Strain Sensitivity	0.003 Equiv.g/μ strain
Thermal Sensitivity	0.35 Equiv. %/°C
Thermal Shock Sensitivity	0.04g/°C

資料來源：本計畫實驗數據整理



(a) 加速規外觀

(b) 安裝位置

圖 4-3 振動台加速規

資料來源：本計畫人員拍攝

#### 4.1.4 控制電腦

本電腦系統如圖 4-4，安裝振動台控制系統之應用軟體。可依據實驗性質選擇不同的震動模式，再來透過軟體來進行參數設定、目標譜設定及計畫表設定等，用以操控震動台。



圖 4-4 控制電腦

資料來源：本計畫人員拍攝

#### 4.1.5 雷射位移計

本實驗所使用之位移計如圖 4-5，由於本實驗試體需考慮振動台面上質量對整體行為之互制關係，因此無法使用傳統接觸式位移計；須改以非接觸式雷射位移計作為量測儀器，利用雷射頭之雷射光打在物體表面，表面光源擴散後反射回來之光源進行感測，當物體移動時反射之角度不同，使反射光反射後之位置不同，藉此量測移動距離。



圖 4-5 雷射位移計

資料來源：本計畫人員拍攝

#### 4.1.5 試體量測加速規

風動試體訊號量測共使用兩種不同功能之加速規，分別為用以測量空台之低頻加速規(如圖 4-6)；另外，因為考慮減少質量與試體動態行為的互制效應，裝置於模型上之加速規需使用體積、質量都較微小的高頻加速規(如圖 4-7)。

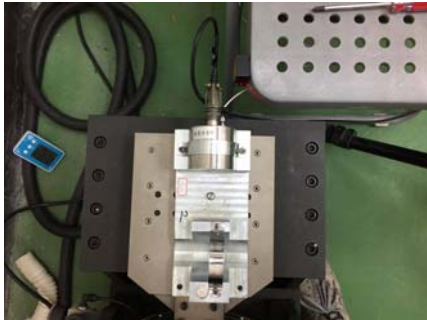


圖 4-6 低頻加速規



圖 4-7 高頻加速規

資料來源：本計畫人員拍攝

#### 4.1.6 擷取系統

訊號擷取部分，本研究使用之數位類比訊號轉換擷取卡為 NI PCI-6024E，屬於 National Instruments 公司所製造的數位類比訊號擷取卡。以及數位/類比訊號轉接盒為 BNC-2110，如圖 4-8 所示。



(a) PCI-6024E 訊號擷取卡



(b) BNC-2110 訊號轉接盒

圖 4-8 擷取系統

資料來源：本計畫人員拍攝

## 第二節 實驗及操作說明

### 4.2.1 正弦試驗訊號處理

本小節以正弦試驗呈現振動機台設備效能，透過在振動台上加裝其他感測器，可以回傳試驗資料，經處理後可得試驗結果，用以比對平台上設置之加速規精確與否，並且可以驗證振動台之效能是否達到預期之結果。初步以加速規量測在 10Hz、30Hz、50Hz 作動頻率時，回傳資料驗證輸出輸入值對照整理如下，表 4-4 為加速度訊號的驗證表，對於各個頻率範圍之對照表如表 4-5~表 4-7，各測試頻率之正弦試驗資料整理圖如圖 4-9~圖 4-11 所示。

表 4-4 輸入輸出驗證表

目標命令		目標命令峰值	
加速度	$a = g \cdot \sin(2\pi f \cdot t)$	加速度峰值	$a = g$
速度	$v = -\frac{g}{2\pi f} \cdot \cos(2\pi f \cdot t)$	速度峰值	$v = \frac{g}{2\pi f}$
位移	$u = -\frac{g}{(2\pi f)^2} \cdot \sin(2\pi f \cdot t)$	位移峰對峰值	$u = \frac{g}{(2\pi f)^2}$

資料來源：本計畫實驗數據整理

表 4-5 頻率 10Hz 正弦試驗驗證對照表

	目標譜加速度峰值	目標譜速度峰值	目標譜位移峰對峰值
命令	0.75 g	0.1170 m/s	3.72 mm
手算	0.75 g	0.1171 m/s	3.73 mm
加速規	0.78 g	0.1215 m/s	3.87 mm

資料來源：本計畫實驗數據整理

表 4-6 頻率 30Hz 正弦試驗驗證對照表

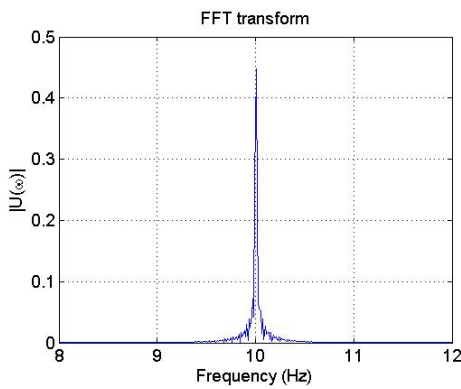
	目標譜加速度峰值	目標譜速度峰值	目標譜位移峰對峰值
命令	0.75 g	0.0390 m/s	0.41 mm
手算	0.75 g	0.0390 m/s	0.41 mm
加速規	0.75 g	0.0388 m/s	0.41 mm

資料來源：本計畫實驗數據整理

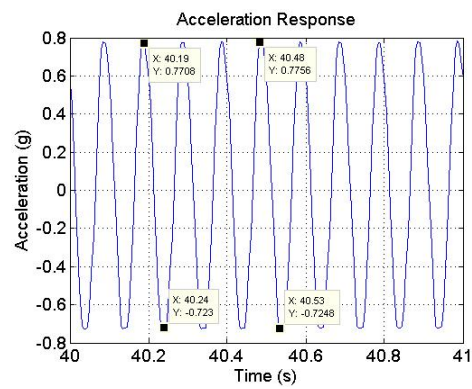
表 4-7 頻率 50Hz 正弦試驗驗證對照表

	目標譜加速度峰值	目標譜速度峰值	目標譜位移峰對峰值
命令	0.75 g	0.0234 m/s	0.15 mm
手算	0.75 g	0.0234 m/s	0.15 mm
加速規	0.78 g	0.0243 m/s	0.15 mm

資料來源：本計畫實驗數據整理



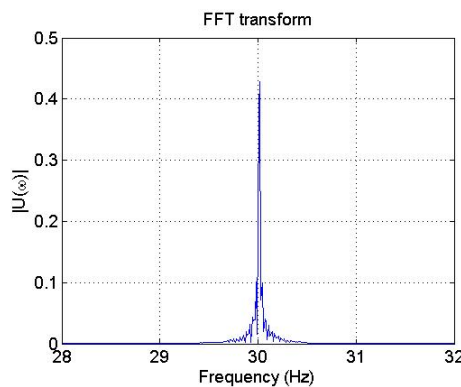
(a) 反應傅氏頻譜圖



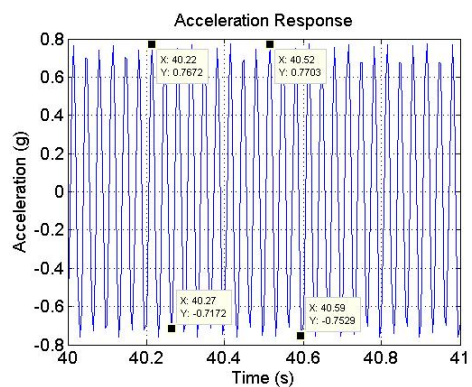
(b) 量測之加速度反應峰值

圖 4-9 10Hz 正弦試驗資料整理圖

資料來源：本計畫實驗數據整理



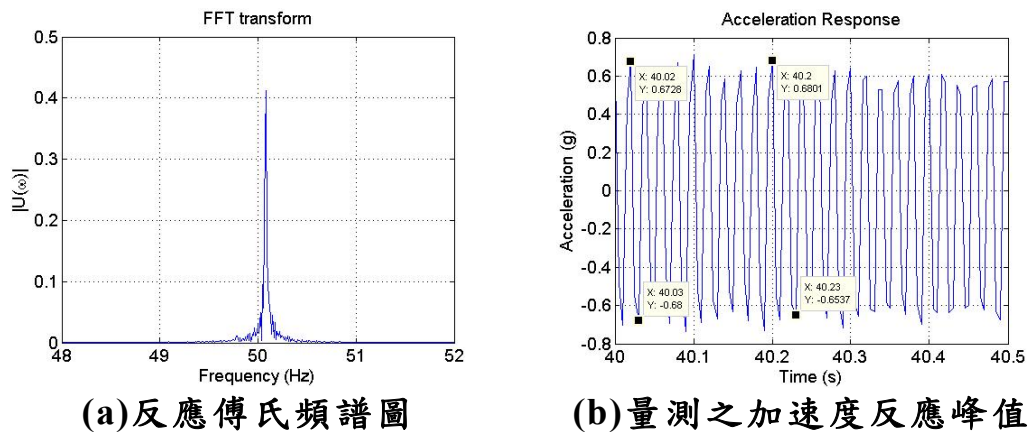
(a) 反應傅氏頻譜圖



(b) 量測之加速度反應峰值

圖 4-10 30Hz 正弦試驗資料整理圖

資料來源：本計畫實驗數據整理



(a)反應傅氏頻譜圖

(b)量測之加速度反應峰值

圖 4-11 50Hz 正弦試驗資料整理圖

資料來源：本計畫實驗數據整理

由上列三組單頻正弦試驗，驗證振動台之輸入命令可以得知振動台效能符合預期，於此頻率範圍內輸入輸出值與設定吻合。

#### 4.2.2 剛性模型正弦試驗

本研究以實驗室之高頻振動台給定風洞剛性模型試體(如圖 4-12)基底振動，藉此激發試體之頻率內涵來識別剛性模型結構參數，用以和風洞試驗值以及風洞柔性模型試驗值相比較。

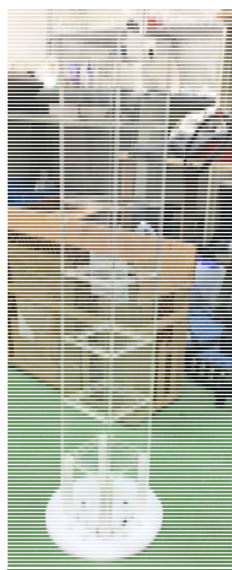


圖 4-12 風洞剛性模型

資料來源：本計畫人員拍攝

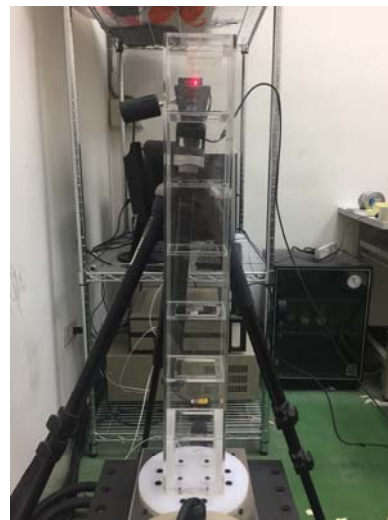


剛性模型為高度 70 公分且長寬皆 10 公分之七層樓模型，其結構主體組成皆以壓克力製作以使模型呈現剛性，整體試體重量約為 2118 公克，扣去底座半徑 9.5 公分之壓克力後，上方矩形結構淨重為 1783.45 公克。

相較於傳統振動台實驗，將試體置於油壓振動台上給定震波並藉由架設加速規、位移計量測系統反應；本實驗著重於將模型進行風洞試驗及振動台試驗之對照及擬合。由於兩種試驗之對象及欲達目標不同，普遍來說試體設計上也有所不同，造成將風洞縮尺之剛性模型進行實驗時，必須考量到由於模型必須視為剛體，振動台所要給定的震動必須不同於傳統低頻地震力輸入，而須以高頻振動才容易激發模型動態反應；且高頻振動台不若以往油壓式大振動台有較大推動力，因此需考慮載台上質量對振動台效能和對試體本身動態行為之影響。為此，實驗時量測儀器的使用選擇和架設方式也有所調整，例如：試體加速度量測部分，加速規須改以質量較輕、體積較小的高頻加速規，以求不影響模型整體質量和導致振動台載台上質量過重；位移量測部分，則是因為無法在模型上架設傳統接觸式位移計，也無法改變模型外觀將位移計量測端鎖於模型上，須改以非接觸式感測器量測，在考量了精確度和操作性後，選擇以雷射位移計作為本實驗位移量測儀器，架設示意圖如圖 4-13。



(a) 整體配置正視圖



(b) 整體配置側視圖



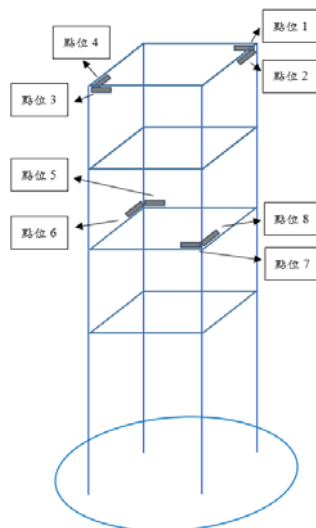
(c)雷射位移計頂層架設 (d) 雷射位移計底層架設

圖 4-13 剛性模型振動台實驗配置圖

資料來源：本計畫人員拍攝

### 4.2.3 柔性模型正弦試驗

柔性模型試驗部分，不同於剛性模型試驗，由於柔性模型之動態反應為本計畫主要研究方向，我們須更全面了解其受外力輸入後行為，於柔性模型內配置 8 組高頻加速規分別置於頂層及中間層以量測柔性模型之加速度反應，因此在模型安裝上須以轉接版開孔使 BNC 線路可以連接出模型與振動台檯面之轉接處，如圖 4-14 所示。雷射位移計部分則是與剛性模型實驗時配置相同(如圖 4-15)，於頂層及底層量測模型反應，由此便可得到底部震動輸入及頂層結構反應之相應關係，進而求得模型系統參數。



(a)模型內加速規配置圖



(b)模型下部圖

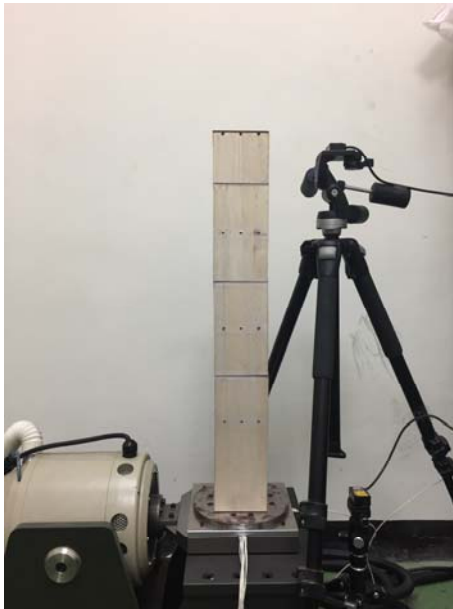


(c)模型底部圖

圖 4-14 柔性模型加速規轉接示意圖

資料來源：本計畫人員拍攝

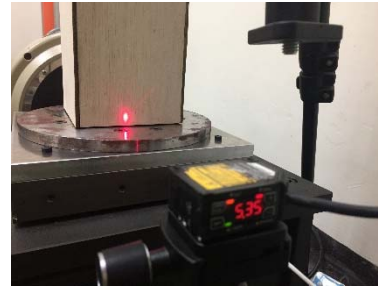
柔性模型為方便與傳統剛性模型比較，外觀與剛性模型相同為高度 70 公分且長寬 10 公分之矩形結構。試體整體重量約為 5500 公克，扣除下方圓形鐵板底座及鋁製轉接板後上部結構物淨重約為 2187.493 公克；模型內部分為四層各 17.5 公分且其質量皆集中於厚 3 公分之樓板框架上，各層樓以約 0.3 公分鐵製柱連接並以碳纖維線固定於各層對角補強，因考慮到重量縮尺問題，最後外部以飛機木固定於各樓層樓板處。



(a)整體配置正視圖



(b)整體配置側視圖



(c)雷射位移計頂層架設 (d)雷射位移計底層架設

圖 4-15 柔性模型振動台實驗配置圖

資料來源：本計畫人員拍攝

### 第三節 柔性與剛性風洞模型參數識別分析與探討

本研究以柔性氣彈模型模擬高層建築物的受風行為，因此除了需依結構物之外型、質量、阻尼及勁度特性考量模型外，在模型受風後行為需與傳統實驗之剛性模型進行比較，以瞭解兩者異同。

#### 4.3.1 剛性模型試驗參數識別與探討

剛性模型試驗是以輸入基底正弦波來激發模型動態反應，透過控制振動台輸出不同頻率之震波來量測每一筆反應資料。本研究使用單筆震波持續輸入而非使用掃頻輸入，因電磁式高頻振動台雖較傳統油壓式振動台更能輸出高頻振動，符合本研究實驗需求，但其原始設定為用以進行試體載重較輕之高頻振動實驗，而本次實驗須考慮模型重量置於載台後對其輸出性能之影響，若直接使用掃頻量測，當頻率不斷上升時隨之縮小的位移量可能導致量測訊號小於雜訊，致使擷取結果不精確。透過單頻震波輸入，量測時可以有較長時間觀察模型反應，並且透過密集多組的單頻實驗同樣可以達到掃頻的效果。

實驗控制命令部分為求實驗結果較清楚明瞭，主要以位移為控制命令，每組以在該固定頻率下振動台性能範圍內之最大位移為命令設定。由表 4-8 各頻率正弦試驗輸出位移對照表，第一欄為每組實驗頻率，第二欄為在各頻率下所給定振動台之控制命令，第三欄為實際實驗時加載模型後，振動台受模型質量影響下，振動台檯面量測之位移值。

表 4-8 剛性模型試驗各頻率正弦試驗輸出位移對照表

頻率 (Hz)	位移控制命令 (mm) (理論值)	實驗結果(mm)
5 Hz	±5 mm	+5.157 到 -5.878
7 Hz	±5 mm	+5.136 到 -5.166
9 Hz	±5 mm	+4.772 到 -5.091
10 Hz	±5 mm	+4.470 到 -4.857
11 Hz	±5 mm	+4.334 到 -5.093
12 Hz	±5 mm	+4.339 到 -4.596
13 Hz	±5 mm	+3.667 到 -4.7311
15 Hz	±4 mm	+2.586 到 -3.761
17 Hz	±4 mm	+2.112 到 -3.6498
19 Hz	±3 mm	+1.550 到 -2.503
20 Hz	±3 mm	+1.253 到 -2.458
21 Hz	±2.5 mm	+1.129 到 -1.996
23 Hz	±2 mm	+0.786 到 -1.363
25 Hz	±1 mm	+0.695 到 -0.623
27 Hz	±1 mm	+0.573 到 -0.549
30 Hz	±1 mm	+0.477 到 -0.402

資料來源：本計畫實驗數據整理

由以上整理數據，可以確立各輸入外力皆為控制命令所輸出之頻率，並且可由量測位移比較輸入的位移控制命令，其發出命令由於加載模型後效能下降之情況，瞭解振動台實際給予模型位移狀況。亦可由頂層及底層反應觀察反應是否放大，該剛性模型之頻率轉移函數如圖 4-16。

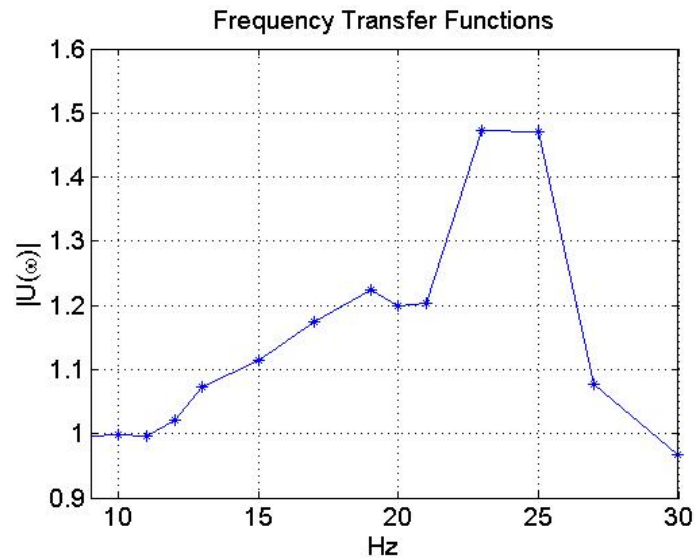


圖 4-16 剛性模型頻率轉換函數圖

資料來源：本計畫實驗數據整理

由圖 4-16 可得知剛性模型共振頻率約落在 25Hz，我們便可依據此結果與柔性模型試驗數之頻率轉移函數進行比較。值得注意的是根據前述當初高頻振動台並非用以量測本研究案例模型，因此需考慮載台上重量對振動台效能影響，且振動台底部並非固定於地面，而是以橡膠軟墊乘載機台，導致振動台在高頻振動時會與地面產生相對運動，而橡膠軟墊剛好提供類似隔震墊效果使至量測反應與實際命令於高頻時有明顯差距。

#### 4.3.2 柔性模型試驗參數識別與探討

在柔性模型實驗部分，由於需與前小節剛性模型做比較，雷射位移計架設位置亦同時量測頂樓及底樓位移量，因此本節以位移輸出結果呈現，以和剛性模型位移輸出結果相互對照，以探搞本研究柔性模型與傳統風洞實驗剛性模型動態行為之差異。柔性模型為模擬實際結構物變位方式而非像剛性模

型將結構物設為勁度極高之剛體，其勁度較小提供樓層間較大的相對位移，頂層位移反應較底層反應大且受其輸入外力頻率影響。實驗方式首先參照前述流程進行量測，但由於柔性模型不若剛性模型，頂層放大之位移將使模型位移量過大，因此需特別小心調整適當的位移控制命令。

#### 一、 首次實驗：

由於未考慮到模型進行振動台實驗時，並不是如同風洞實驗時持續給定模型外力於模型表面，而是由基底輸入震波，模型受來回劇烈晃動容易致使外部固定木板之膠帶鬆脫而使模型動態反應與原預期效果有所不同，可以觀察到膠帶鬆脫雖然不會造成模型壞損，但會改變模型動態反應，由位移反應觀察此組實驗輸出頻率並非達到共振情況下，在反應後段時依然明顯加大，這是由於膠帶鬆脫後模型各樓層可錯動束制變小，層間位移放大導致模型反應放大。

#### 二、 第二次實驗：

第二次實驗為求使反應不致過大而使膠帶脫落，特別注意在實驗規劃部分設定控制位移命令為 2mm，並將模型膠帶固定妥當進行實驗，以確保在非共振頻率下模型反應不該有放大或是任何異常狀況。但由於共振反應後，膠帶還是略有受損，造成即便過了共振頻率後，反應行為會因為上下層錯動而相互影響與原位移反應不同。

#### 三、 第三次實驗：

經過上兩次實驗以及數據處理經驗，我們可以大約預估共振頻率，並以此重新規畫實驗輸出頻率和控制命令使實驗量測結果較佳化，此次實驗規劃為使振動台輸出外力在頻率上升時不造成能量過大，將隨頻率變動控制位移命令，如此激發共振反應時也不使柔性模型層與層之間連結膠帶損傷，且可較有效率地在接近共振頻率範圍才將實驗筆數提升，除了可以節省花費時間外，還可以減少長期震動對模型連接膠帶位置的磨損，以求最佳實驗結果。實驗規劃如表 4-9。



表 4-9 柔性模型試驗各頻率正弦試驗輸出位移對照表

頻率(Hz)	位移控制命令(mm) (理論值)	實驗結果(mm)
7 Hz	±1 mm	+1.422 到 -1.849
8 Hz	±1 mm	+1.734 到 -1.879
9 Hz	±1 mm	+1.931 到 -2.024
10 Hz	±0.75 mm	+1.865 到 -1.846
11 Hz	±0.6 mm	+1.659 到 -1.759
12 Hz	±0.6 mm	+2.211 到 -2.671
13 Hz	±0.5 mm	+2.147 到 -3.029
13.5 Hz	±0.3 mm	+2.115 到 -2.817
13.7 Hz	±0.25 mm	+2.105 到 -2.778
13.8 Hz	±0.2 mm	+1.417 到 -1.415
13.9 Hz	±0.2 mm	+1.315 到 -1.272
14 Hz	±0.35 mm	+1.9 到 -3.422
14.5 Hz	±0.3 mm	+0.98 到 -0.924
15 Hz	±0.3 mm	+0.813 到 -0.798
16 Hz	±0.3 mm	+0.588 到 -0.633
17 Hz	±0.3 mm	+0.477 到 -0.597
18 Hz	±0.3 mm	+0.504 到 -0.472

資料來源：本計畫實驗數據整理

由以上實驗數據整理可以找到柔性模型之共振頻率，由於位移命令均比剛性試體試驗時小，所以，量測結果明顯受雜訊影響。但由於在頻率域分析取該頻率含量最大震幅相除求得轉換函數，如圖 4-17，而非於時間域分析以歷時反應中將最大反應相除，因此能避免高頻雜訊頻率內涵對反應之影響。在實驗中一些相對較高頻震波位移量量測結果中，為了使輸出能量不至於過大而將其控制位移量降低而導致量測到的位移量與雜訊影響量相近的資料，也可以由此使雜訊影響下降。亦即，本研究考慮頂層反應和底層反應在所量取之頻率內涵下，兩者之間的對應關係，上下層所架設之雷射位移計型號、接線配置相同，並經同樣擷取系統，以及類似之雜訊影響值，不至影響到系統反應頻率含量，由此方法可降低雜訊對結果之影響。

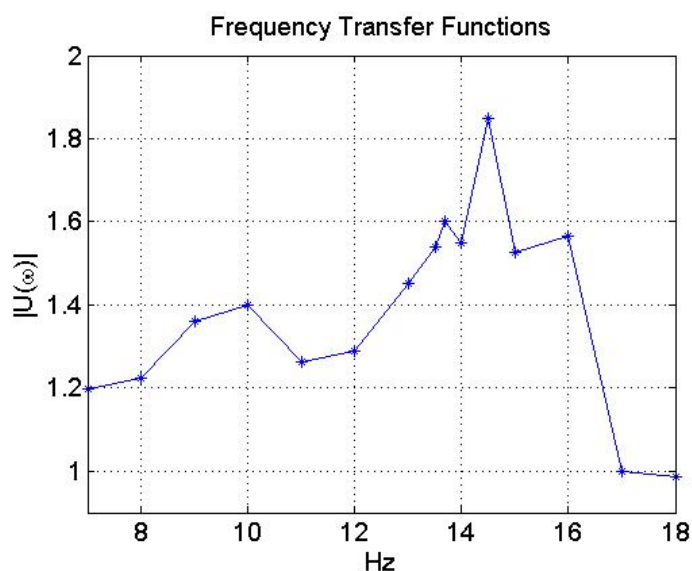


圖 4-17 柔性模型頻率轉換函數圖

資料來源：本計畫實驗數據整理

由圖 4-17 柔性模型轉換函數中，模型之共振頻率落在約 14.5Hz 至 15Hz 附近；對照柔性模型風洞試驗結果，柔性模型水平向共振頻率約為 12Hz。由於頻率轉換函數計算頻率之解析度，受選取資料點數與取樣時間影響，因此會有些許差距。

## 第五章 結論與建議

### 第一節 結論

本研究針對一般高層建築之風洞試驗模型製作與行為精進進行研究與試驗，採用振動平台進行高層建築風洞試驗模型之動態行為測試，進一步應用系統參數識別技術，針對試驗模型之動態參數與振態行為進行識別。同時進行剛性與柔性氣彈模型之風洞試驗，以評估模型之適用性。本研究所得之結論如下：

- (1) 針對建築風洞試驗柔性氣彈模型之分析與製作，本研究採用鋼材與飛機木，配合碳纖維絞索，成功製作具有柔性變形行為之風洞模型，並對其動態行為進行分析與試驗測試。
- (2) 利用風洞實驗室，完成高寬比(H/D)為 7 之三維方形斷面柱體之剛性與柔性氣彈模型之風洞試驗。由風洞實驗結果，可知在達到渦散共振風速時，柔性試體之振動反應加劇，昇力驟升，紊流強度亦由原先保持在 0.5% 以下的狀態，在共振現象升至 3.37%。
- (3) 針對建築風洞試驗柔性氣彈模型之擾動值而言，在未發生共振效應的狀態下，擾動力值、擾動扭力值均較小，亦即在實驗過程中並未出現大量偏離平均值的情形，但在共振現象發生時，擾動值有增加的現象。
- (4) 本次研究中可以觀察到當共振效應發生時，柔性模型的風力係數出現較大變化，此現象在不發生共振效應之剛性氣動模型實驗難以觀察到。以平均昇力係數為例，柔性氣彈模型共振反應最大時，其平均昇力係數約為 0.18，而剛性氣動模型之昇力係數約為 0.00063，後者幾無出現橫風向受力情形，柔性模型可以表現剛性模型不具備的共振反應，且其差異顯著。
- (5) 本研究以高頻振動台給定風洞剛性模型試體及柔性氣彈模型基底振動，藉此激發試體之頻率內涵來識別剛性模型與柔性模型結構參數，用以和風洞試驗值進行比較。傳統壓克力製作之剛性模型共振頻率約為

25Hz，而柔性模型之共振頻率落在約 14.5Hz 附近；對照柔性模型風洞試驗結果，柔性模型水平向共振頻率約為 12Hz。

## 第二節 建議

本研究建議事項分述如後：

### 建議一

增加柔性氣彈模型製作與振動試驗測試相關研究課題：立即可行建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：財團法人成大研究發展基金會、國立成功大學土木系、國立成功大學航空太空科技研究中心、財團法人國家實驗研究院國家地震工程研究中心、中華民國結構工程技師公會全國聯合會、中華民國全國建築師公會、社團法人中華民國風工程學會

柔性氣彈模型製作目前尚有材料調整、外觀封包技術提升、模型參數與規畫設計目標值調校等關鍵技術需要突破。建議未來內政部建築研究所應持續支持柔性氣彈模型製作與振動試驗相關研究，例如：非對稱柔性氣彈模型之風洞試驗、應用柔性氣彈模型進行高樓建築外型最佳化之風洞試驗、超高層建築物承受扭轉大氣邊界層風速引致的氣彈現象。

並與建築師公會及結構工程技師公會合作，探討結構分析軟體針對結構物承受颱風衝擊引起的氣彈效應、現有高樓建築舒適度效能調查與量測分析研究、現有高樓建築應用振動控制裝置進行舒適度效能提升之風洞試驗等課題，以精進服務能力與層次。

### 建議二

增加應用數值模擬分析建築氣彈互制行為相關研究課題：中長期建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：財團法人成大研究發展基金會、國立成功大學土木系、國立成功大學航空太空科技研究中心、中華民國結構工程技師公會全國聯合會、社團法人中華民國風工程學會

高層建築之氣彈互制行為十分複雜，建議未來持續以不同地況、不同形狀逐步進行柔性氣彈模型之風洞試驗，以精進對高層建築氣彈行為之掌握。

在計算機軟/硬體大幅進步的現今，應用計算流體動力學之方法進行與風洞

試驗配套之探討為必要之趨勢。目前國際上此方面的研究發展日新月異，也是風工程的一個重要發展方向。建議未來內政部建築研究所應持續推動計算流體動力模擬之相關研究課題，以推估各種實際規劃需求下之設計風力，並提供建築物耐風設計規範之修訂參考。

### 建議三

推動高層建築健康監測與風洞試驗驗證相關研究課題：中長期建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：財團法人成大研究發展基金會、國立成功大學土木系、中華民國結構工程技師公會全國聯合會、中華民國全國建築師公會、社團法人中華民國風工程學會

一般於高樓建築之外觀設計除了滿足業主開發的需求、建築物的美觀與住戶的舒適，為了降低渦散現象造成之顛振效應，均應進行整體外形之風洞試驗。如於設計階段忽略此一效應之影響，往往於興建完成後會有舒適度無法滿足規範要求的處境。

為使柔性氣彈模型製作更貼近實際需求及掌握其於風洞中的動態行為，建議未來內政部建築研究所可與建築師公會及結構工程技師公會合作，推廣高層建築健康監測計畫。鼓勵高層建築於設計階段即進行風力監測計畫，配合建議二之數值模擬分析能力提升，同時進行標的高層建築之縮尺柔性模型風洞試驗，以進行數值模擬、風洞試驗與真實量測比對之研究流程，以精進高層建築規劃、設計與長期維護等階段之能力與技術。

### 建議四

增加複合型災害模擬與設計能力提升之複合試驗技術國際合作計畫：中長期建議

主辦機關：內政部建築研究所、財團法人成大研究發展基金會、國立成功大學土木系

協辦機關：社團法人中華民國風工程學會

高層建築受颱風之振動反應，對於住戶舒適度滿足有極大之考驗。而世界

目前對於風、火、地震等複合型災害，已逐步以複合試驗(Hybrid Testing)技術來加以整合，以全面提升及檢視複合型災害時之房屋結構設計規範要求。

目前加拿大 Carleton University(地震、風雨實驗室)、University of Ottawa(地震、風洞材料實驗室)以及 National Research Council 所屬之 National Fire Laboratory(防火實驗室)，亦有與內政部建築研究所類似之複合型災害實驗園區之硬體。建議未來內政部建築研究所可推動與加拿大進行國際合作，採用複合試驗技術來加以整合。

(本頁空白)



附錄一 專家學者座談意見回應

第一次專家學者座談會

內政部建築研究所委託研究計畫案

「高層建築物柔性氣彈模型風洞試驗研究」

第 1 次專家學者座談會 簽到簿

時間：106 年 6 月 1 日（星期四）上午 10:30 時正	
地點：內政部建築研究所簡報室（新北市新店區北新路 3 段 200 號 13 樓）	
主席：方中教授 紀錄：陳敬函	
出席人員	簽到處
陳建忠組長	陳建忠
蔡宜中副研究員	蔡宜中
鍾立來副主任	鍾立來
方富民教授	方富民
林其璋特聘教授	林其璋
方中教授	方中
朱世禹副教授	朱世禹
相關人員	

委員	審查委員意見	廠商回應
國家地震中心 鍾立來副主任	1.此計畫相當有意義，對多重災害(風、地震、水)之防救很有幫助。	謝謝委員之肯定。
	2.建築物柔性氣彈方面，結構要多柔才會產生互制效應之作用？	一般來說，建築物都是屬於柔性的，但是在實驗模型部分有剛性、剛性氣彈和柔性氣彈之區別，此次研究目標就是在於如何設計柔性氣彈模型，使之可以呈現實際狀況的互制效應。
	3.原始之風力譜可涵蓋0.1Hz附近，縮尺後，風洞之風力譜是否仍可以涵蓋10Hz以上之模型頻率。	一般來說，建築物風洞實驗多採用剛性模型，風力譜應可涵蓋10Hz以上之模型頻率，而縮尺後雖然之模型頻率會放大進入較高頻，而目前實驗室之高頻振動台有足夠的效能對模型進行掃頻以識別模型參數。
中興大學 方富民教授	1.在模型試驗中維持與實場相同之雷諾數實有困難。	謝謝委員之建議，我們將針對此議題再作進一步的討論與修正。
	2.建築物質量比應是相似律中的重要因子之一，建議予以考量。	謝謝委員之建議，我們將針對此議題再作進一步的討論與分析。
	3.在本研究案中柔性氣彈模型是否考慮了在扭力向之效應。	本研究案將以建立能夠與數值模擬相比對之柔性模型為首要目標，因此採用長寬相等之正方柱體，如此在考慮動態效應時主要呈現的振態扭轉向效應較不明顯，暫不考慮
	4.建築物外型會影響渦散(vortex shedding)之產生，故幾何相似(geometric similitude)應維持。	本研究案將以建立能夠與數值模擬相比對之柔性模型為首要目標，因此採用長寬相等之規則矩形進行簡化。
中興大學	1.模型結構剛性大，如何	以往風洞實驗都是採用剛

<p>林其璋特聘教授</p>	<p>模擬真實結構受風作用的互制行為，宜考慮。</p>	<p>性模型或是剛性氣彈模型，而本研究將考慮模擬真實結構受風作用的互制行為之柔性氣彈模型。</p>
	<p>2. 建築結構受風作用具臨界方向，因此宜考慮結構水平雙向及扭轉的基本振動週期。</p>	<p>本案風洞實驗之實驗場為建研所風洞實驗室，可進行多角度風向之實驗，本案初步將採用長寬相等之規則矩形，如此在考慮動態效應時主要呈現的振態 X、Y 向相同，扭轉向效應應不明顯暫不考慮。</p>
	<p>3. 宜考量振動台試驗量測模型結構振動反應時感測器重量產生的影響。</p>	<p>由於風洞實驗縮尺模型本身很輕，不太可能採用傳統架設加速規或是電阻式位移計的方式來量測實驗反應，因此計劃使用雷射位移計為主要量測工具，不致影響到模型本身之行為。</p>
	<p>4. 建議採用變頻激振力進行測試，可減少測試次數。</p>	<p>感謝委員的建議，目前高頻振動台配備有變頻作動功能，能夠對實驗模型進行掃頻來識別系統參數。</p>
<p>建研所 陳建忠組長</p>	<p>1. 哪種建築物要做柔性模型，哪種作剛性模型試驗。</p>	<p>在建築物耐風設計規範中主要規定，當建築物滿足 <math>h/\sqrt{BL} \geq 4</math>、<math>V_h/f_a \sqrt{BL} &gt; 8.3</math> 時應進行風洞試驗。</p>
	<p>2. 柔性氣彈模型製作要適當呈現完整振態行為尚有困難，是有何困難？</p>	<p>柔性氣彈模型製作之困難處主要在於所製作之模型必須符合縮尺之相似律，以確保我們的模型符合原結構物動態效應，這其中包括我們所採用之材料、實驗場所之性能配備、縮尺尺度的設定皆有所影響。</p>
	<p>3. 目前國內外柔性氣彈模型風洞試驗的文獻與數據整理在哪裡？整理</p>	<p>目前國內外柔性氣彈模型風洞試驗的文獻與數據，將整理於期中報告之文獻回</p>

	與數據情形如何？	顧部分，主要分為風洞實驗部份以及振動台實驗部分，兩部分都有國內及國外研究整理。
	4.目前柔性模型是用什麼材料來製作	目前初步規劃柔性模型是以碳纖維柱或鋁柱為中軸，另以數個自由度之壓克力樓層為模型。
	5.基底風力是規範設計之要求，將來柔性氣彈之影響為何？	基底風力是建築物耐風設計規範設計的檢核要求之一，柔性氣彈模型可以更真實呈現實際狀況的互制效應。
	6.何不以本國如 101 大樓等建物來研究，我們所也完成其施工紀錄的報告。	感謝委員的建議，團隊將與該棟大樓的業主聯繫接洽是否可行。
	7.初步討論所提滿足建築物耐風設計規範及解說有關橫風向風力之規定，其定義為何？	
	8.教育訓練對象是誰，價值與意義何在？	感謝貴所的支持，本案風洞及振動台教育訓練對象主要是研究生，以長期培養為目標，期盼未來能有長期之計畫支援，針對相關議題進一步的評估與分析。
建研所 蔡宜中副研究員	1.建研所的風洞實驗室是可以做建築及強梁風洞試驗的。目前本研究室鎖定高層建築物，在PPT第9頁及第21頁放的照片都是風洞吊橋試驗的模型，因目前本研究案是鎖定高層建築物，故應放入高層建築物風洞試驗的照片較妥。	謝謝委員之建議，研究團隊將遵照辦理。

	<p>2.剛性及柔性氣彈模型希望能夠盡早進場進行測試，因為畢竟之前沒有做過，可能在進行中會有一些問題點，要留下一些餘裕時間做修正。</p>	<p>謝謝委員之建議，研究團隊將遵照辦理。</p>
--	---	---------------------------

(本頁空白)

## 附錄二 期中審查意見暨回覆

106.07.11

委員	審查委員意見	廠商回應
王教授人牧	1. 規範在本研究所扮演之角色在報告中請詳加說明。	本研究案為高層建築物在風洞實驗時，採行柔性氣彈模型的效果評估。本年研究重點為柔性氣彈模型的製作與相關的技術發展。長程發展為比對柔性氣彈模型與剛性氣彈模型在風洞實驗下的差異性。待確認後，可針對高層建築物進行風洞實驗的規範提出修改建議。
	2. 本案目前規劃之 2 個模型方案縮尺比例大，所衍生的風洞試驗相對問題應加注意。	本研究案的柔性氣彈模型的縮尺規劃，已考慮雷諾數與史特赫數相似。史庫頓數相似性將依資料收集狀況也進行評估。
	3. 風洞試驗量測方法在報告中並不明確，量測、分析項目與評估目標應明確。	風洞實驗時的量測目標、方法與技術，會在下次報告時提出。
方教授富民	1. 本研究主要工作在建立高層建築物風洞試驗氣彈力模型之技術與方法，對國內風洞模型試驗能力之提升卓有貢獻。	感謝委員的建議，將遵照修正。為簡化實驗之進行，本案的柔性氣彈模型斷面考慮為矩形，並採 0 度風攻角。未來會納入扭轉與橫風向之互制效應。
	2. 史庫頓數在物理上之意義除結構物與空氣之質量比外，亦包括了比之效應。(第 9 頁倒數第 9 行)	
	3. 建築物扭轉向之振動反應對角隅處速度深具影響，故常與	

	<p>橫風向之考慮具同等之重要性。(第 45 頁倒數第 11-12 行)</p>	
	<p>4. 建議增述本研究之目標建築物，以釐清原型(prototype)與模型(model)間之相應關係。</p>	<p>本案的研究標的物為國外某高層建築物，基本模態資料將於期末進行說明。國內高樓的相關資料，目前正努力取得中。</p>
胡總監銘煌	<p>1. 高層建築物柔性氣彈行為很重要，目前風洞試驗只採剛性，規範並未要求柔性，其差異如何？本研究是否可重點說明。</p>	<p>柔性氣彈模型與慣用之剛性模型於風洞試驗之行為比較，為本研究之探討重點，將根據實際風洞實驗結果進行說明。</p>
	<p>2. 依過去超高層設計之實務需求，柔性氣彈性行為，與(質量+勁度)及建物之週期或頻率有關。日本規範即有規定，超高層建物單位體積重量小的，需校核共振問題，並納入規範內。</p>	<p>委員提及的日本規範關於氣彈模型的要求，團隊會嘗試蒐集，並併入本案的柔性氣彈模型製作考量。</p>
許建築師坤榮	<p>1. 本研究為結合實驗及數值模擬之研究，宜說明未來實務應用之關連。未來實際應用上的可能情況。</p>	<p>本研究將先以完成柔性氣彈模型之製作與風洞實驗為主要目標。關於數值模擬工作，未來將進行規劃。待完成後，可比對實驗數據，進一步明瞭高層建築物在風力作用下引起的共振現象。</p>
	<p>2. 建議以國內某典型建築案例(如：101)來研究。</p>	<p>目前本研究案以國外某高層建築物為標的。國內高樓的相關資料，目前正努力取得中。</p>
陳技師正平	<p>1. 柔性氣彈模型可使風洞試驗成果更精進一步，惟先期建議</p>	<p>考量到柔性氣彈模型須於風洞實驗產生共振現象，為簡化試體之製作，模型剖面</p>



	<p>以規則外型，以免影響試驗結果。</p>	<p>考慮為矩形斷面。</p>
	<p>2. 圓形容易引起共振，建議以圓形優先。</p>	<p>感謝委員的建議，圓形斷面模型會列入下階段模型製作考慮。</p>
<p>林研究員克強</p>	<p>1. 縮尺柔性模型是否只考慮雷諾數與史特赫樹相似即可？若是，是否有使用上的限制條件？</p>	<p>目前柔性氣彈模型的外型規劃設計已考慮雷諾數與史特赫數相似。史庫頓數相似性將依資料收集狀況也進行評估。</p>
	<p>2. 請說明柔性模型如何驗證其正確性，基準為何？且驗證項目預期為何？</p>	<p>此部分正在規劃中。模型完成後的實驗結果，可以用以預測高層建築物在風力作用下引起的共振現象。柔性氣彈模型的動力特性，將藉由振動台實驗協助驗證。</p>

(本頁空白)

### 附錄三 期末審查意見暨回覆

106.10.30

委員	審查委員意見	廠商回應
中華民國結構工程技師公會全國聯合會(陳技師正平)	1. 柔性氣彈模型可提高準確度，使用單位之立場樂觀其成。	感謝委員意見，本案後續如獲建研所繼續支持，研究團隊將持續努力完成計畫內容。
方教授富民	1. 本研究獲得之成果符合預期目標。	感謝委員的肯定。
	2. 本研究主要是建立柔性結構氣彈力模型之製作程序與方法，除了提升內政部建築研究所風洞實驗室高層建築物風力試驗分析的技術層面外，也擴展了爾後本實驗室建築物風力試驗的研究範疇。	感謝委員意見，本案後續如獲建研所繼續支持，研究團隊將持續努力完成計畫內容。
	3. 為再增進研究成果之貢獻度，建議詳細敘明執行過程的各階段考量與步驟，以利未來相關風洞試驗之應用。亦即，如何以一個已知幾何與動力特性實體標的建築物為對象，依據相似律進行縮尺模型之規劃，以及進而完成模型之製作與動力特性檢核之文字或案例解說。	遵照辦理。
	4. 圖 3-11、圖 3-16、圖 3-17、表 3-7、表	遵照辦理。

	3-8 應以無因次之形式表現方屬合理。	
	5. 本研究應加註柔性氣彈力模型之阻尼比。	遵照辦理。
	6. 本研究中標的建築物和模型的密度為何？是否一致？	感謝委員意見，本研究已達成柔性結構氣彈力模型之製作及振動特性試驗，後續如獲建研所繼續支持，研究團隊將進一步納入考慮。
邱教授英浩	1. 國外相關的文獻是否有完整的收錄整理？	國外相關文獻已完整收錄整理。
	2. 模型製作的方法是否會影響實驗結果？是否補充模型的細節？	遵照辦理。
	3. 後續有哪些研究要進行才可使此方法更加成熟？	本案後續如獲建研所繼續支持，研究團隊將持續努力完成計畫建議之未來研究方向。
周教授榮華	1. 有關文字部分，請分以下 3 點修正： (1)文中符號宜定義清楚，圖宜放大，座標宜清楚(2)同一方程式勿用兩個編號；(3)文獻引用要正確。	感謝委員意見，遵照辦理。
	2. 有關內容部分，請分以下 6 點修正： (1)實驗要有誤差之評估；(2)結論宜避免加劇、驟升，宜量化比較；(3)紊流強度由 0.5% 升至 3.37% 宜確認是由紊流造成的，或是	感謝委員意見，遵照辦理。

	<p>flow unsteadiness 造成，量測位置在何處；(4) 柔性模型會受模型材料與構型之影響；(5)sine sweep vs random sweep 的差異，宜解釋；(6)scale up 會碰到的問題，請說明。</p>	
胡總監銘煌	<p>1. 現行建築物耐風設計規範對最高居室加速度之規定中，因風洞試驗並未規範採用柔性模型，實務上常有符合規範之鋼構造高層住宅大樓，雖建築審查通過，在颱風時仍被不少使用者詬病，因變形量大產生不舒服的現象。因此，若能將研究成果參考先進國家規範，儘量調整本項規範規定，當能造福國人。</p>	<p>感謝委員意見，本案後續如獲建研所繼續支持，研究團隊將持續努力完成計畫內容。</p>
	<p>2. 建議將文中提到的現有高樓舒適度效能調查與量測分析研究，及高樓建築物應用振動控制裝置進行舒適度效能提升之調查研究，期望能儘早進行。</p>	<p>感謝委員意見，本案後續如獲建研所繼續支持，研究團隊將持續努力完成計畫內容。</p>
莊技師忠鵬	<p>1. 模型柱體在某些風速下會產生共振，此現象對建築物之影響為何？</p>	<p>本研究之目的即在探討並測試風速與共振之關聯，並採用柔性結構氣彈力模型進行風洞試驗以評估對建築物之影響。</p>

	2. 目前之研究在實務上的應用似乎尚嫌不足，建議有更進一步之研究，以應用在實務上。	感謝委員意見，本案後續如獲建研所繼續支持，研究團隊將持續進一步朝實務應用方向努力。
游教授顯德	1. 此研究能在短期間內，做出如此成果，非常佩服。但僅完成部分成果，宜延續研究。	感謝委員的肯定。本案後續如獲建研所繼續支持，研究團隊將持續努力完成計畫內容。
	2. 如予延續，則宜選用不同材料、不同形狀、不同表面材質、不同地形予以多方面探討。	感謝委員的建議。本案後續如獲建研所繼續支持，研究團隊將納入計畫內容。
	3. 由實驗得知共振影響甚大，且柔性氣彈模型與剛性氣動模型亦有差異，模型之大小差異影響亦大。實際狀況與實驗結果有差異，如何因應，宜予探討。	感謝委員的建議。本案後續如獲建研所繼續支持，研究團隊將納入計畫內容探討。
	4. 實驗用之各種專有名詞，宜予說明，如擾動阻力，擾動昇力、風攻角...等。	感謝委員意見，遵照辦理。
陳組長建忠	1. 預期成果有關風力評估、校驗項目與流程、及交互此對振動台風洞試驗之載重試驗能力，均未見於章節。本研究室是如何陳述，宜補充。	感謝委員意見，遵照辦理。

	<p>2. 第三章第二節風力規範探討未見結果，所代入之風力規範實例設計計算，此案例是合理或不合理，要改善研究的是甚麼？</p>	<p>感謝委員意見，遵照辦理。</p>
	<p>3. 高樓試體本案與假設性模型對要求算頻率似無關連，如台北 101 大樓不必取得詳細資料即可計算。而本案運用 523m 高國外建築，對本國風工程恐難有助益，宜選用高度合宜之建築物估算之。</p>	<p>感謝委員的建議。本案後續如獲建研所繼續支持，研究團隊將納入計畫內容探討。</p>
	<p>4. 有關各項研究結論似只講一半，只陳述現象，但對與風力規範的幫助或成果要用在何處、可用在何處，似無說明，宜再補充。</p>	<p>感謝委員的建議。本案後續如獲建研所繼續支持，研究團隊將納入計畫內容探討，以獲得足夠實驗資料，協助評估對現行規範之修正與建議。</p>
	<p>5. 建議事項有些是重複，而且多無談及合作是用何種方式合作，請具體建議，以免空談。</p>	<p>感謝委員的建議。本案後續如獲建研所繼續支持，研究團隊將具體落實建議之合作事項。</p>

蔡研究員宜中	<p>1. 本研究報告進行風洞試驗之柔性氣彈模型係以鋼材與飛機木，配合碳纖維絞索製作;其材料是如何選定，三者組成的圖面亦未在文中標示出來，無法使人瞭解是如何製作的。</p>	<p>感謝委員意見，遵照辦理。</p>
	<p>2. 本研究後續請按部頒格式完成成果報告，相關圖示及文字錯誤疏漏處也建請一併修正。</p>	<p>感謝委員意見，遵照辦理。</p>



## 參考書目

- 【1】 朱佳仁，「風工程概論」，台北：科技圖書股份有限公司出版，(2006)。
- 【2】 黎益肇，劉文欽，「高層建築剛性氣彈試驗之應用與發展」，內政部建築研究所自行研究報告，計畫編號：097301070000G2014，(2008)。
- 【3】 薛素鐸，李雄彥譯，「結構風荷載作用」，北京：中國建築工業出版社，(2006)。Claes Dyrbye, Svend OLE Hansen (1997), "Wind Loads on Structures", Chichester, United Kingdom: John Wiley and Sons Ltd.
- 【4】 林建宏，方富民，「建築物氣彈力反應數值模式建構與風洞試驗研究」，內政部建築研究所協同研究報告，計畫編號：10062B001，(2011)。
- 【5】 葉祥海，方富民，「高層建築氣彈力模型風洞試驗與數值模擬研究」，內政部建築研究所委託研究報告，計畫編號：094301070000G3020，(2005)。
- 【6】 蔡明樹。高層建築氣彈力現象之風洞研究。淡江大學土木工程研究所碩士論文，民國 85 年 7 月。
- 【7】 Cheng, C.M., Lu, P.C. and Tsai, M.S. (2002), "Acrosswind aerodynamic damping of isolated square shaped buildings," Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 90, pp. 1743-1756.
- 【8】 Song, C.C.S. and Yuan, M., "A Weakly Compressible Flow Model and Rapid Convergence Method," Journal of Fluids Engineering, Vol. 110(4), pp. 441-455, 1998.
- 【9】 許茂雄；廖文義；杜怡萱；許士昱。「三分之一縮尺二層樓 RC 校舍模型振動台試驗」，國家地震工程研究中心成果報告，(2002)。
- 【10】 林沛暘、羅俊雄、游信源、吳記宏，「標竿鋼構樓房振動台試驗」，國家地震工程研究中心，報告編號：NCREE-06-020，(2006)。
- 【11】 郭昌宏，「多自由度結構系統的參數識別」，國立台灣大學土木工程研究所，碩士論文，1987 年。
- 【12】 蔡忠憲，「應用結構時變振形趨勢進行快速損壞評估之研究」，國立成功大學土木工程研究所，碩士論文，(2009)。
- 【13】 方璿堯，「應用 OKID/ERA 識別方法校正結構反應預估圖之流程建立」，國立成功大學土木工程研究所，碩士論文，(2010)。

- 【14】游立辰、林子剛，「生物特徵識別技術於結構健康診斷之應用」，國家地震工程研究中心，報告編號：NCREE-10-005，(2010)。
- 【15】古昌宏、林子剛、張國鎮，「機動式健康診斷系統之可行性研究」，國家地震工程研究中心，報告編號：NCREE-10-021，(2010)。
- 【16】吳瑞琳，「正規化位移振形於快速震損評估之研究」，國立成功大學土木工程研究所，碩士論文，(2011)。
- 【17】林億賢，「標竿結構體 D 支系統識別與損壞評估」，朝陽科技大學營建工程所，碩士論文，(2011)。
- 【18】駱正章，「標竿結構體 H 支系統識別與損壞評估」，朝陽科技大學營建工程所，碩士論文，(2011)。
- 【19】吳坤鴻，「不規則建築結構層間損壞指標之應用」，國立中興大學土木工程研究所，碩士論文，(2011)。
- 【20】謝政浩，「柔性建築結構之損壞位置判別」，國立中興大學土木工程研究所，碩士論文，(2012)。
- 【21】Oliva, M. G., “Shaking Table Testing of a Reinforced Concrete Frame with Biaxial Response” , Earthquake Engineering Reseach Center, University of California, Berkeley, EERC-80/28, Oct. (1980).
- 【22】Bertero, V. V., Aktan, A. E., Charney, F. A. and Sause, R., “U.S.-Japan Cooperative Earthquake Research Program : Earthquake Simulation Tests and Associated Studies of a 1/5-scale Model of a 7-story Reinforced Concrete Test Structure” , Earthquake Engineering Reseach Center, University of California, Berkeley, EERC-84/05, Jun. (1984).
- 【23】Bracci, J. M., Reinhorn, A. M. and Mander, J. B., “Seismic Resistance of Reinforced Concrete Frame Structures Designed Only for Gravity Loads: Part I - Design and Properties of a One-third Scale Model Structure” , Technical Report NCEER-92-0027, Dec. (1992).
- 【24】NUPEC, “Specification Report of Seismic Shear Wall ISP on NUPEC’ s Seismic Ultimate Dynamic Response Test” , NU-SSWISP-D008, Aug. (1994) and NU-SSWISP-D009, Sep. (1994).
- 【25】Johnson EA, Lam HF, Kafatygiotis LS, Beck JL. Phase I IASC-ASCE structural health monitoring benchmark problem using simulated data. Journal of Engineering Mechanics (ASCE); 130(1):3-15. (2004)

- 【26】 Bernal D, Beck J. Preface to the special issue on Phase I of the IASC-ASCE structural health monitoring benchmark. *Journal of Engineering Mechanics (ASCE)*; 130(1):1-2. (2004)
- 【27】 Bernal D, Gunes B. Flexibility based approach for damage characterization: a benchmark application. *Journal of Engineering Mechanics (ASCE)*; 130(1), 61-70. (2004)
- 【28】 Caicedo JM, Dkye SJ, Johnson EA. Natural excitation technique and eigensystem realization algorithm for Phase I of the IASC-ASCE benchmark problem: simulated data. *Journal of Engineering Mechanics (ASCE)*; 130(1):49-60. (2004)
- 【29】 Lus H, Betti R, Yu J, Angelis MD. Investigation of a system identification methodology in the context of the ASCE benchmark problem. *Journal of Engineering Mechanics (ASCE)*; 130(1):71-84. (2004)
- 【30】 S.Y. Chu and S.C. Lo, Application of the On-Line Recursive Least-Squares Method to Perform Structural Damage Assessment, *Structural Control and Health Monitoring*, 18(3), 241-264. (2011)
- 【31】 Gilbert EG. Controllability and Observability in Multivariable Control Systems. *SIAM Journal on Control* 1(2): 128-151. (1963).
- 【32】 Kalman RE. Mathematical Description of Linear Dynamical Systems. *SIAM Journal on Control* 1(2): 152-192. (1963).
- 【33】 Ho, BL, Kalman RE. Effective Construction of Linear State Variable Models from Input/Output Data. *Proceedings of the 3rd Annual Allerton Conference on Circuit and System Theory*, pp.449-459. (1965).
- 【34】 Zeiger HP, McEwan AJ. Approximate Linear Realization of Given Dimension Via Ho's Algorithm. *IEEE Transactions Automatic Control* AC-19(2): 153. (1974).
- 【35】 Kung S. A New Identification and Model Reduction Algorithm Via Singular Value Decomposition. *12th Asilomar Conference on Circuits, Systems and Computers*, Pacific Grove, California; pp.705-714. (1978).
- 【36】 Juang JN, Pappa RS. An Eigensystem Realization Algorithm for Modal Parameter Identification and Model Reduction. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*; 8(5): 620-627. (1985).
- 【37】 Juang JN. Mathematical Correlation of Modal Parameter Identification Methods via System Realization Theory. *International Journal of Analytical and Experimental*

Modal Analysis; 2(1): 1-18. (1987).

- 【38】 Phan M, Horta LG, Juang JN, Longman RW. Improvement of Observer/Kalman Filter Identification (OKID) by Residual Whitening. *Journal of Vibration and Acoustics*; 117(2): 232-239. (1995).
- 【39】 Juang JN. *Applied system identification*. Prentice Hall, Englewood Cliffs: N.J., (1994).
- 【40】 內政部，「建築物耐風設計規及解說」，中華民國內政部，(2014)
- 【41】 Takanashi K. (1993), “Development of on-line test and its roles in structural engineering study”，擬動態實驗研究講習會，台灣。
- 【42】 Nakashima M. (1992), “Extensions of hybrid structural testing”，擬動態實驗研究講習會，台灣。
- 【43】 Wald, F., Simões da Silva, L., Moore, D. B., Lennon, T., Chladná, M., Santiago, A., Beneš, M., Borges, L., “Experimental Behaviour of a Steel Structure under Natural Fire,” *Fire Safety Journal*, Vol. 41, Issue 7, pp. 509-522
- 【44】 VCS-102 振動控制系統使用手冊。金頓科技股份有限公司。
- 【45】 Brüel & Kjær 4514-004 Product Data. Brüel & Kjær.

**高層建築物柔性氣彈模型風洞試驗研究**

出版機關：內政部建築研究所

電話：(02) 89127890

地址：新北市新店區北新路3段200號13樓

網址：<http://www.abri.gov.tw>

編者：方中、朱世禹、陳敬函、粘浩

出版年月：106年12月

版次：第1版

ISBN：978-986-05-4228-8





ISBN: 978-986-05-4228-8 (平装)