

建築工程風洞試驗技術與報告評定機制研究

內政部建築研究所協同研究報告(一一〇)

建築工程風洞試驗技術與 報告評定機制研究

內政部建築研究所協同研究報告

中華民國110年12月

計畫編號：11015B0007-2

建築工程風洞試驗技術與 報告評定機制研究

研 究 主 持 人：陳建忠

協 同 主 持 人：鍾光民

研 究 員：鍾政洋、林元智、郭建源、蔡宜中

研 究 助 理：傅仲麟、周晉成

研 究 期 程：中華民國 110 年 3 月至 110 年 12 月

研 究 經 費：新臺幣玖拾玖萬柒仟伍佰元

內政部建築研究所資料協同研究報告

中華民國110年12月

目次

目次.....	I
表次.....	III
圖次.....	V
摘要.....	1
第一章 緒論.....	5
第一節 研究緣起與背景	5
第二節 研究內容與方法	6
第二章 理論背景與相關研究.....	9
第一節 各國規範建議採用風洞試驗之條件	9
第二節 風洞試驗之原則性要求與相關研究	16
第三章 風洞實驗.....	35
第一節 實驗設施與設備	35
第二節 試驗規劃	41
第三節 試驗結果	43
第四章 風洞試驗報告評定機制.....	83
第一節 風洞試驗報告評定方式	83
第二節 風洞試驗報告評定之法源討論	86
第五章 研究成果與討論.....	91
第一節 研究成果	91
第二節 問題檢討與對策	92
第六章 結論與建議.....	95

第一節 結論	95
第二節 建議	96
參考書目	99
附錄一 採購評選意見與回應	103
附錄二 風洞試驗之技術原則草案	107
附錄三 CAARC 建築之結構特性資料	133
附錄四 CAARC 建築之表面風壓點位資料	137
附錄五 期中審查意見與回應	139
附錄六 期末審查意見與回應	143
附錄七 第一次專家座談會意見與回應	147
附錄八 第二次專家座談會意見與回應	151
附錄九 建築工程風洞試驗報告綜合評定表	155
附錄十 建築工程風洞試驗報告內容範例	157
附錄十一 耐風設計規範修訂研擬內容	169

表次

表 3.1 CAARC 建築之基本結構參數.....	41
表 3.2 地況種類	48
表 3.3 地況相關參數	48
表 3.4 試驗縮尺對照表	48
表 3.5 各風向之風速、發生機率與韋伯函數之參數值	50
表 3.6 本案採用之舒適性評估準則	51
表 3.7 實驗室 A 之載重組合結果	71
表 3.8 實驗室 B 之載重組合結果.....	72
表 3.9 兩實驗室載重組合結果之差異	72
表 3.10 兩實驗室載重組合最高居室尖峰加速度結果	79
表 3.11 CAARC 建築縮尺動力特性.....	81
表 3.12 CAARC 建築之基本結構參數.....	82

圖次

圖 1.1 研究流程圖	7
圖 3.1 內政部建築研究所環境風洞	36
圖 3.2 淡江大學大氣邊界層風洞 3D 示意圖	37
圖 3.3 DENTEC 熱線測速儀主機與一維熱線探針.....	37
圖 3.4 TSI 熱線測速儀主機與熱線探針	38
圖 3.5 Scanivalve 壓力掃描系統(ZOC 33)	39
圖 3.6 六分力平衡儀	40
圖 3.7 地表風速計	40
圖 3.8 周遭地景選定位址	41
圖 3.9 風洞地況實際擺設狀況(ABRI)	44
圖 3.10 風洞地況實際擺設狀況(WERC)	44
圖 3.11 平均風速剖面量測結果.....	45
圖 3.12 擾動風速剖面量測結果	45
圖 3.13 製作範圍之建築基地與周圍建物數值地形圖	45
圖 3.14 主建築與周圍建物量體模型(ABRI)	46
圖 3.15 風洞試驗架設照片(ABRI)	46
圖 3.16 主建築與周圍建物量體模型(WERC)	47
圖 3.17 風洞試驗架設照片(WERC)	47
圖 3.18 地表風速計安裝分佈圖	52

圖 3.19 Isyumov and Davenport 標準各點位舒適度判定結果-舊建物狀況	52
圖 3.20 Isyumov and Davenport 標準各點位舒適度判定結果-新建物狀況-無植栽	53
圖 3.21 Isyumov and Davenport 標準各點位舒適度判定結果-新建物狀況-含植栽	53
圖 3.22 Hunt et al.標準各點位舒適度判定結果-舊建物狀況	54
圖 3.23 Hunt et al.標準各點位舒適度判定結果-新建物狀況-無植栽	55
圖 3.24 Hunt et al.標準各點位舒適度判定結果-新建物狀況-含植栽	55
圖 3.25 Isyumov and Davenport 標準各點位之門檻風速機率	56
圖 3.26 Hunt et al.標準各點位之門檻風速機率	56
圖 3.27 Isyumov and Davenport 標準門檻風速機率比對圖	57
圖 3.28 Hunt et al.標準門檻風速機率比對圖	58
圖 3.29 四正對風向角各點位平均壓力比較圖	59
圖 3.30 四正對風向角各點位擾動壓力比較圖	60
圖 3.31 全點位平均壓力比較圖	61
圖 3.32 全點位擾動壓力比較圖	61
圖 3.33 風壓係數之平均差值	61
圖 3.34 兩實驗室極值風壓係數比較圖	63
圖 3.35 實驗室 B 極值風壓係數比較圖(不同方式估算)	63
圖 3.36 兩實驗室設計風壓比較圖(正值)	65

圖 3.37 兩實驗室設計風壓比較圖(負值).....	65
圖 3.38 建築受力座標示意圖	66
圖 3.39 高頻力平衡儀(HFBB)風力係數比對結果	67
圖 3.40 高頻壓力積分(HFPI)風力係數比對結果	68
圖 3.41 x、y 方向風力組合示意圖	69
圖 3.42 四象限載重組合示意圖	69
圖 3.43 主抗風系統設計風力載重組合比較圖(X1).....	73
圖 3.44 主抗風系統設計風力載重組合比較圖(X2).....	73
圖 3.45 主抗風系統設計風力載重組合比較圖(Y1).....	74
圖 3.46 主抗風系統設計風力載重組合比較圖(Y2).....	74
圖 3.47 主抗風系統設計風力載重組合比較圖(R1).....	75
圖 3.48 主抗風系統設計風力載重組合比較圖(R2).....	75
圖 3.49 主抗風系統設計風力載重組合比較圖(R3).....	76
圖 3.50 主抗風系統設計風力載重組合比較圖(R4).....	76
圖 3.51 主抗風系統設計風力載重組合比較圖(T1X)	77
圖 3.52 主抗風系統設計風力載重組合比較圖(T1Y)	77
圖 3.53 主抗風系統設計風力載重組合比較圖(T2X)	78
圖 3.54 主抗風系統設計風力載重組合比較圖(T2Y)	78
圖 3.55 剛性氣彈試驗量測架構示意圖	82

摘要

關鍵詞：耐風設計規範、風洞試驗技術準則、建築檢測風洞試驗

一、研究緣起

目前國內在評估建築物或結構物受風力作用下之表面壓力分佈、載重與動態反應時，可參照建築物耐風設計規範與解說內容進行相關計算，其適用於外型較為規則方正之一般建築。當待評估建築超過 100 公尺或風力效應明顯時，建議採風洞試驗方式進行評估，其可提供該建築物較準確之建築表面風壓、分層載重與結構動態反應，但一重要前提是該試驗之規劃過程、試驗方式與數據處理方法應需由風工程領域之專業人員，以學理依據為基礎進行分析。目前國內能進行建築風洞試驗之單位稀少，結構設計單位偶因時間、價格或其他因素選擇國外試驗單位進行風洞試驗，其試驗報告不一定完整呈現其試驗設置及數據分析方法之理論依據，導致設計需求與試驗結果出現落差，造成設計單位對於試驗報告結果之採用產生疑義。目前國內之建築物耐風設計規範與解說已對風洞試驗之適用範圍、主要項目、應遵守之模擬要求與報告引用內容初步說明，但對於結構設計單位、建築設計單位與需要進行風洞試驗之相關領域，其不一定具備風工程或耐風設計之基礎理論知識，對於試驗過程、分析方式與數據呈現等，皆無法判斷其是否適用於該建築結構主要抗風系統或披覆物之設計需求。因此，本研究擬提出風洞試驗所需之基礎技術原則與提出試驗報告評定機制之架構。

二、研究方法及過程

研究將包含以下內容：

1. 蒐集包含各國風工程規範或其他有關風洞試驗相關之文獻，探討並建立適用之風洞試驗技術原則。
2. 本研究將依照建立之風洞試驗技術原則進行常見之風洞檢測試驗，並提供報告書作為示範例，以供未來相關領域使用參考。

3. 透過專家座談會與研究內容說明會，討論或收集相關建議，完善本案提出之風洞試驗技術原則，並提出試驗報告評定機制之架構。

三、重要發現

一、由規範整理結果可知，各國規範內之相關受力或位移反應計算式之適用範圍有限，包含外型之受力分析結果皆由大量風洞試驗資料整理進行分析而成，而試驗多數針對規則外型且周遭無干擾之狀況下進行，因此，若建築外型在基於試驗結果所建立之尺寸形狀以外，則不適用於規範計算。相同地，規範計算亦不適用於評估周邊干擾或地形變化之效應，若需了解前述狀況之建築受風力資訊，則建議進行風洞試驗。若建築為風敏感類型，如高層建築、大跨度屋頂結構、大跨度懸吊式橋樑等，其可能發生渦致振動或氣彈不穩定狀況者，建議諮詢專家意見與進行風洞試驗評估。其判斷方式多以建築物之高度、高寬比、深寬比、約化風速以及低模態之自然頻率決定。各國規範無提及風洞試驗細節，多數以應遵守基本模擬要求，如需滿足模擬相似律、正確模擬縮尺風場、建立周遭近場地景資料等，僅在美國 ASCE 7 與加拿大 NBCC 規範中則提及進行縮尺模型風洞試驗應參考 ASCE 49-12 進行。

二、在符合本案草擬之風洞試驗之技術原則草案之基本條件下，將兩實驗室之試驗數據進行比對。整體而言，在風環境評估、表面風壓與結構風載重試驗之數據趨勢基本上為一致，僅風環境試驗之風速機率值略有差異，另在表面壓力分佈與結構風載重組合之結果皆有不錯之吻合度，僅於頂層居室加速度略有差異。由試驗比對結果可視為兩實驗室在經風工程學理假設條件下，在不同縮尺狀況、不同試驗場地以及不同分析方式，在各方面仍可得平均差異約在 10% 以內之試驗結果，以複雜風場在不同實驗室進行不同縮尺之試驗條件下，實屬可接受之差異。

三、提出兩種評定執行方式進行討論，若要從法規面執行，需由主管機關訂定明確法條以供依循，牽涉到之層面較廣，需要較長時間評估推動執行，

需較審慎考量後進行。或可從本所實驗室或國內風工程學術團體自行成立評定小組方式，應較易於執行，且觸及率應隨時間與案件數量增加，若業界出現共識報告需經過評定，則可加強推動法規修訂之能量。

四、主要建議事項

根據本案研究發現，本研究針對建築工程風洞試驗技術與報告評定機制之研究，提出下列具體建議。

立即可行之建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：社團法人中華民國風工程學會

在各國規範整理內容中皆發現，並無強制執行風洞試驗之說明，而是以建議或者應採取其他專家協助等方式說明，目前國內之規範主要以建築物之高度超過 100 公尺，或風力效應明顯時，建議進行風洞試驗。建議於往後規範修訂內容時可將風力效應明顯之狀況納入，給定較明確之適用狀況，以供相關使用單位參考，如將規範內提及之高寬比與約化風速判斷式納入，增加判斷依據。

長期性建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：社團法人中華民國風工程學會

在報告評定方式部分，建議由本所風雨風洞實驗室成立報告評定小組為始，邀請風工程相關領域之學者、工程人員以及風工程學會參與評定過程，增加風工程專業人員參與對推廣消息亦有助益。本案之訊息可函送相關環境評估審查單位、結構外部審查單位或地方政府機關，讓實際會接觸試驗報告之相關單位得知資訊，並接收訊息反饋，了解實際作業之問題點，以利後續推動法規化制定。實際執行面應由結構外審與環境評估審議會成員開始，

若在審議內中需要使用風洞試驗之結果，則應納入風工程領域之專家對試驗報告進行審視，由於目前並無風力技師職務，以現今狀況以風工程學會派員參加應為適宜之做法。業界若對於報告使用應經過第三方審視或評定存在共識，則對於推動法規化才有足夠能量進行。

第一章 緒 論

第一節 研究緣起與背景

一、研究背景

目前國內在評估建築物或結構物受風力作用下之表面壓力分佈、載重與動態反應時，可參照建築物耐風設計規範與解說內容進行相關計算，其適用於外型較為規則方正之一般建築。當待評估建築超過 100 公尺或風力效應明顯時，建議採風洞試驗方式進行評估，其可提供該建築物較準確之建築表面風壓、分層載重與結構動態反應，但一重要前提是該試驗之規劃過程、試驗方式與數據處理方法應需由風工程領域之專業人員，以學理依據為基礎進行分析。目前國內能進行建築風洞試驗之單位稀少，結構設計單位偶因時間、價格或其他因素選擇國外試驗單位進行風洞試驗，其試驗報告不一定完整呈現其試驗設置及數據分析方法之理論依據，導致設計需求與試驗結果出現落差，造成設計單位對於試驗報告結果之採用產生疑義。目前國內之建築物耐風設計規範與解說已對風洞試驗之適用範圍、主要項目、應遵守之模擬要求與報告引用內容初步說明，但對於結構設計單位、建築設計單位與需要進行風洞試驗之相關領域，其不一定具備風工程或耐風設計之基礎理論知識，對於試驗過程、分析方式與數據呈現等，皆無法判斷其是否適用於該建築結構主要抗風系統或披覆物之設計需求。因此，本研究擬提出風洞試驗所需之基礎技術原則與提出試驗報告評定機制之架構。

二、研究目的

由於建築結構物之檢測案件形式差異甚大，若要規定出風洞試驗檢測之明確規定並不適當，目前在國內與國際間亦無試驗細項規定，取而代之的是最低限度之試驗要求。近數十年間，各國研究單位經由整理了大量風洞試驗研究之試驗參數、資料分析與產出結果差異，提出不同版本之風洞試驗建議

要求，本研究將參照國內外相關研究，提出適用於本國之風洞試驗建議要求與相關說明，並提供示範例，除供國內外相關研究或檢測單位參考外，亦提供建築結構設計單位作為風洞試驗報告書應具有之基本內容參考。

第二節 研究內容與方法

本研究擬由蒐集與研讀文獻為始，整理相關試驗技術與要求，依據國內設計單位常用之試驗項目建立符合我國之檢測試驗技術原則。技術原則應包含來流風場模擬條件、行人環境舒適度評估、建築物主要風力抵抗系統之設計風力評估、局部構材及外部被覆物之設計風壓評估與建築空氣彈力振動評估。在各試驗中所包含之試驗模型製作、量測參數、採用設備與分析方法等皆將建議出最低要求原則。研究將依照分項技術原則進行風洞試驗，並建立各試驗之示範例。於研究過程中，將各項試驗之建議事項彙整提出風洞試驗技術原則草案，並規劃研擬風洞試驗報告之評定機制。

由於國外相關文獻已由大量實驗資料整理出建議遵守之試驗要求，採以研讀不同國家提出之建議為較經濟快速之方式，但也需視國內之試驗能量極限，將其中適用本國之建議取出，有條件放寬無法達成之項目。在試驗數據方面，由於數據分析與相關統計方式仍有許多學者在不斷研究精進中，在各項風洞試驗之技術原則中，不宜強制規定其方式，而改以建議需進行分析之項目，與目前建議採用(不強制)之計算與統計方式。試驗報告呈現部分則以建議各項報告應包含之資料，如行人環境舒適度試驗應包含各量測位置之舒適度等級，而建築表面風壓試驗應包含各取壓位置之風壓係數、內風壓與設計風壓等資料，建築物主要風力抵抗系統之設計風力應包含各風向之風力係數等基本試驗資料，確保設計單位取得之試驗報告包含最基本之需求數據。

由於風洞試驗項目可能因設計單位需求增加，本案並無法完全涵蓋縮需之試驗項目，但仍可以檢視其過程中是否依照建議之技術原則進行，判斷試驗規劃之合理性。在現實的風洞試驗檢測業務中，可能發生設計單位由於經費、時間緊迫或其他考量，導致僅進行特定項目之量測與分析，可能產生報告

內呈現資料與本案建議事項不符之狀況，在該狀況下若要使用其試驗數據，建議需經諮詢風工程領域之專家學者後為宜。在報告評定機制部分，目前國內尚無機構可對風洞試驗結果進行評定，而評定之基準與項目亦尚待確認，本案將召開專家座談會，邀請學界與業界之學者參與，以期在本案中初步規劃出評定機制之架構。本案亦將藉由舉辦說明會之方式，將研究結果傳達給建築設計相關領域，接收回饋意見改進評定機制與架構。

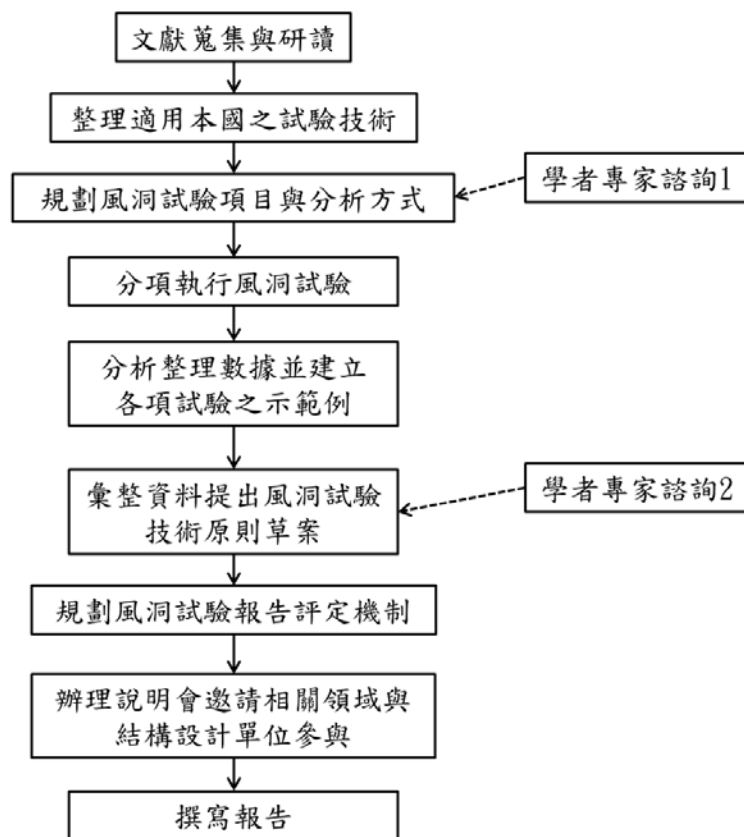


圖 1.1 研究流程圖

(資料來源：本研究整理)

第二章 理論背景與相關研究

第一節 各國規範建議採用風洞試驗之條件

各國在風工程發展過程中，常以規劃長期研究計劃方式建立資料庫，加上學術界之研究成果，經系統化之分析、選定來流參數與結構物參數後，各自將風力設計納入頒布之載重規範中，如美國 ASCE 7-10(2010)、ASCE 7-16(2016)、日本 AIJ-RLB 2015(2019)、歐洲 EN 1991-1-4:2005(2010)、加拿大 NBCC(2015)、紐澳 AN/NZS 1170.2:2011(2016)、中國建築結構荷載規範(2012)、國際標準規範 ISO 4354(2009)與本國耐風設計規範與解說(2015)。上述規範內容多數為以計算方式求得該建築物或結構體之風壓與風力，其計算背景包含許多假設，如來流風場為平衡之紊流大氣邊界層、不考慮周遭建築環境之影響、建築體之形狀較為方正、屋頂形式規則、建築剛性較高等。若當建築物不適用規範計算時則會建議採風洞試驗方式進行評估，但多數規範尚無規定其施行細則，除個案例差異大、所需要的試驗項目不同等因素，無法明確定義；此外，在行人環境舒適度、空氣汙染擴散與風能評估選址等問題亦無法以規範方式進行評估，以下簡介各國規範提及建議進行風洞試驗之條件說明。

2.1.1. 美國 ASCE 7-10、7-16

ASCE 7-10 與後續修訂版本 7-16 內容相似，內容皆提及當建築物滿足下列其一條件，應進行風洞試驗確認可能對風載重造成之影響：

1. 建築物承受橫向風荷載、渦散不穩定、產生風馳或顫振現象。
2. 建築物所處位置受到上游障礙物之尾流產生抖振或渠道效應影響。
3. 該建築物之外型非規範內現有或無其他相關文獻提供數據協助風載重效應評估。

2.1.2. 日本 AIJ-RLB(2015)

1. 當考慮周圍地形或建築物所造成遮蔽效應對風載重之影響時，應確認未來地景可能的變化，並透過適當的風洞試驗、計算流體力學或其他合適的驗證方法調查此遮蔽效應。
2. 當建築物可能產生明顯渦致振動或氣彈不穩定現象時應考量進行適當的風洞試驗、計算流體力學或其他合適方法評估，其主要參數為建築之高寬比與約化風速，判斷式如下：

(a) 矩形斷面建築物

$$\frac{H}{\sqrt{BD}} \geq 4, \text{ and } \left(\frac{U_H}{f_L \sqrt{BD}} \geq 0.83 U_{Lcr}^* \text{ or } \frac{U_H}{f_T \sqrt{BD}} \geq 0.83 U_{Tcr}^* \right)$$

其中， H 、 B 與 D 分別為建築高、深與寬； U_H 為對應建築高度之設計風速； f_L 與 f_T 分別為橫風向與扭轉向第一模態之自然振動頻率； U_{Lcr}^* 與 U_{Tcr}^* 分別為橫風向與扭轉向發生氣彈不穩定之臨界約化風速。

(b) 圓形斷面建築物

$$\frac{H}{D_m} \geq 7, \text{ and } \frac{U_H}{f_L D_m} \geq 3.5$$

其中 $D_m = 2/3 H$ 。

3. 需評估地形變化對於平均風速與紊流強度分佈之影響時。
4. 對於大跨度輕質量或低勁度之屋頂，若滿足下列判斷式，可能產生氣動不穩定現象，需進行風洞試驗或其他方式評估。

$$\frac{m}{\rho L} < 3$$

$$\frac{U_H}{f_{R1} L} > 0.7$$

$$I_H < 0.15$$

其中 m 與 ρ 分別為單位面積之質量與空氣密度； L 為屋頂跨距； f_{R1} 為第一非對稱振動模態之頻率； I_H 為屋頂高之紊流強度。

5. 若需評估包含各方向性之風速機率之壓力極值時，需要進行風洞試驗獲取所有風向之壓力資料進行分析。

2.1.3. 歐洲 EN 1991-1-4:2005

1. 使用適當的結構模型和相應之風場模擬，透過風洞試驗與經過適當驗證的數值方法可用於評估風載重和振動反應資訊。
2. 若為細長之建築物($H/D \geq 4$)或煙囪($H/D \geq 6.5$)，且呈排列或為群樓組成，則應考慮處於周遭建築尾流區內之抖振效應。在兩建築物或煙囪之間的距離大於上游建築物或煙囪橫風尺寸的 25 倍以上，或下游建築物或煙囪之第一模態自然頻率高於 1Hz 者，則尾流之抖振效應可忽略不計，反之，則建議進行風洞試驗或經風工程專家釋疑。

2.1.4. 加拿大 NBCC(2015)

1. 對建築物及其組件的規定風載重計算應使用靜態、動態或風洞程序確定；對於非動態敏感建築物的設計，應使用靜態、動態或風洞程序確定指定的風載重；對於動態敏感建築物的設計，應使用動態或風洞程序確定來確定其風載重。
2. 對於可能受到鄰近建築物之尾流抖振或通道效應影響，或極動態敏感之建築物設計，應採用風洞試驗程序評估其風載重。
3. 對於表面披覆物和次結構構件之設計，應採用靜態或風洞程序來確定其風載重。
4. 建築物風載重之縮尺模型風洞試驗應參照 ASCE/SEI 49 “Wind Tunnel Testing for Buildings and Other Structures” 進行。

2.1.5. 澳洲/紐西蘭 AS/NZS 1170.2:2011

1. 在規範中提及，對於本規範標準未涵蓋的幾何形狀，例如非一般屋頂幾何形狀或支撐系統、大型屋頂或位於高層建築基地之裙樓屋頂，需要進一步的建議評估或進行風洞測試。
2. 在評估動態反應因子時，對於
 - (a) 第一模態自然頻率小於 0.2 Hz、其高度大於 200 公尺之建築物或其在前三種振動模態分析中出現明顯耦合時，應進行風洞試驗。
 - (b) 自然頻率小於 1 Hz 之兩側或多側支撐的屋頂，其動態反應係數未在本標準中提供，應進行風洞試驗或特殊研究進行評估。
3. 若在懸臂屋頂之六倍高度內有一個類似高度的看台屋頂，則其亦應進行風洞試驗評估其動態反應因子。
4. 在風敏感建築物之加速度評估中，若由於其他建築物的干擾使其處於高紊流之狀況下，應採取保守的方法評估振動加速度。如果經驗公式顯示可能出現較高的加速度，則設計單位應進行更詳細的分析或進行縮尺模型風洞研究評估。

2.1.6. 中國建築結構荷載規範

1. 由於風載重計算所採用之風力係數涉及固體與流體相互作用的流體動力學問題，對於不規則形狀的固體尤為複雜，實際操作上無法給出理論結果，一般均應由試驗確定。鑒於原型實測的方法對於結構設計並不現實，目前只能根據相似性原理，在紊流邊界層風洞內對擬建之建築物模型進行測試。當房屋和結構物形狀與本規範內表之外型不同時，須由風洞試驗獲得風力係數。另對於重要建築或外型複雜之結構物，其受風反應資料亦應由風洞試驗獲得。
2. 在順風向風致振動和其風振係數內容提及，當建築高度大於 30 m 且高寬比大於 1.5 的房屋，以及自振周期大於 0.25 s 的各種結構物，應

考慮風壓擾動對結構產生順風向振動反應之影響，順風向風致振動應按照結構隨機振動理論進行分析。對於風敏感的或跨度大於 36 m 之柔性屋頂結構，應考慮風壓擾動對結構產生風致振動之反應。屋頂結構的風致振動反應，宜依據風洞試驗結果按隨機振動理論計算確定。

3. 在橫風向風致振動部分提及，當建築截面深寬比大於 2 時，分流將在側面發生再接觸現象，並造成橫風向風力變化較劇烈，在約化風速大於 10 或高寬比大於 8 時，可能發生不利且難以精準估算之氣彈力現象，建議進行專門之風洞試驗研究評估其效應。
4. 在扭轉向風致振動部分提及，風致扭矩與橫風向風力具有較強之相關性，當建築之 $H/\sqrt{BD} > 6$ 或 $T_{T1}U_H/\sqrt{BD} > 10$ 時 (T_{T1} 為扭轉向第一模態之週期)，兩者之耦合作用容易發生不穩定之氣彈現象。符合上述情況的高層建築，建議執行風洞試驗深入研究。

2.1.7. 國際標準組織 ISO 4354

1. 風敏感之結構物，包括柔性、細長、很高或質量很輕，以及興建於複雜周圍環境中的結構物，由於氣彈效應明顯，其動態反應容易產生低估現象。此外，特殊幾何形狀之結構物在受風影響後，其結構反應通常也難以預期。在這些情況下，建議由風工程領域之專家進行補充研究，研究方式通常採風洞試驗進行，透過風洞測試，可建立整體結構載重和外部壓力分佈之詳細資訊。
2. 在地形較複雜之位址時，常採用風洞試驗或數值模擬計算方式，進行評估地形因子係數。
3. 若為矩形截面之細長建築物，且滿足以下兩個條件，則需要對其渦致振動和氣彈不穩定性進行特殊評估，例如諮詢專家意見與進行風洞試驗：

$$\frac{H}{\sqrt{BD}} \geq 4 \text{ and } U_{hcr} \leq 1.5U_{site,m}$$

其中， H 、 B 與 D 分別為建築高、深與寬； U_{hcr} 與 $U_{site,m}$ 分別為發生橫風向或扭轉向氣彈不穩定之臨界風速與該場址之平均風速。

4. 若為大跨度橋梁，且滿足下列條件，則需要對其渦致振動和氣彈不穩定性進行特殊評估，例如諮詢專家意見與進行風洞試驗：

$$U_{hcr} \leq 1.5U_{site,m}$$

5. 在側風反應部分，本規範提供風場為都市狀況，建築寬深比範圍由 0.2 至 5，高寬比($H/\sqrt{BD}$)範圍 3 至 6 之估算方式。當建築物外型尺寸超過上述範圍或處於開闊地況時，建議進行風洞試驗獲得更合適之結果。
6. 在扭轉反應部分與側風反應相同，規範提供都市地況，建築寬深比範圍由 0.2 至 5，高寬比($H/\sqrt{BD}$)範圍 3 至 6 之估算方式，且當 $U_T^* \leq 10$ 才適用(U_T^* 為基於扭轉頻率之約化風速)。當建築物外型尺寸超過上述範圍或處於開闊地況時，建議進行風洞試驗獲得更合適之結果。

2.1.8. 本國建築物耐風設計規範與解說

1. 在規範中提及，風壓係數與風力係數可由風洞試驗求得，本規範所用之 C_p 與 C_f 主要參考美國 ASCE 7 規範，同時亦參考澳洲 SAA 規範，及加拿大 NBCC 規範等。
2. 在橫風向風力內容中，當建築物同時滿足 $H/\sqrt{BD} \geq 4$ 以及 $U_H/f_L\sqrt{BD} \geq 8.3$ 時，應進一步檢核避免在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與空氣動力不穩定現象，必要時應進行風洞試驗。
3. 建築物最高居室樓層角隅之振動尖峰加速度值，應計及順風向振動、橫風向振動及扭轉振動所產生者，可分別計算，再依合宜的方法求得

總加速度，亦可採用風洞試驗結果。

4. 另在第五章提及，建築物之耐風設計，依本規範無法提供所需之主要抗風系統設計風力或是外部被覆物之設計風壓風力資料時，得以風洞試驗作為耐風設計之依據。當建築物之高度超過 100 公尺，或風力效應明顯時，建議進行風洞試驗。凡施行風洞試驗之建築物，其設計風力、設計風壓與舒適性評估得以風洞試驗結果為準。風洞試驗之項目宜包括提供主要風力抵抗系統之設計風壓及局部構件及外部被覆物之局部設計風壓。此外，亦宜包括半年回歸期風速下屋頂加速度尖峰值及建築物對其附近風場環境造成之影響。

綜上所述，各國規範內在執行風洞試驗之條件可綜合整理為以下 3 點：

1. 規範內之相關受力或位移反應計算式之適用範圍有限，其包含外型之受力分析結果皆由大量風洞試驗資料整理進行分析而成，而試驗多數針對規則外型且周遭無干擾之狀況下進行，因此，若建築外型在基於試驗結果所建立之尺寸形狀以外，則不適用於規範計算。相同地，規範計算亦不適用於評估周邊干擾或地形變化之效應。若需了解前述狀況之建築受風力資訊，則建議進行風洞試驗。
2. 若建築為風敏感類型，如高層建築、大跨度屋頂結構、大跨度懸吊式橋樑等，其可能發生渦致振動或氣彈不穩定狀況者，建議諮詢專家意見與進行風洞試驗評估。其判斷方式多以建築物之高度、高寬比、深寬比、約化風速以及低模態之自然頻率決定。
3. 在上述各國規範，並無提及風洞試驗細節，多數以應遵守基本模擬要求，如需滿足模擬相似律、正確模擬縮尺風場、建立周遭近場地景資料等，僅在美國 ASCE 7 與加拿大 NBCC 規範中則提及進行縮尺模型風洞試驗應參考 ASCE 49-12 進行。

第二節 風洞試驗之原則性要求與相關研究

若當建築物不適用規範計算時則會建議採風洞試驗方式進行評估，但多數規範尚無規定其施行細則，除了個案例差異大、所需要的試驗項目不同等因素，無法明確定義；此外，在行人環境舒適度、空氣汙染擴散與風能評估選址等問題亦無法以規範方式進行評估。因此，在實行風洞試驗時明訂試驗建議之技術原則，可保證試驗結果滿足設計單位所需之最低限度要求，相關研究對於大氣紊流邊界層之各種試驗項目技術可參考 Reinhold 編(1982)，針對高層建築試驗之測試需求如 CTBUH(2013)提供之技術指南，著重於低矮建築風載部分如 Tieleman 等(1998)，原則性說明者如 Duthinh 與 Simiu(2011)，以及 Cermak 等(1999)說明風洞試驗研究在各種量測項目之評估方式，皆為一般原則性要求。另目前對於建築與結構物之風洞試驗要求相關規範包含美國 ASCE 49-12(2012)標準與紐澳 AWES QAM-1(2019)品質要求手冊，其中即以定義風洞試驗要求方式，建議進行試驗時須遵循之項目，下列對本案建議提出之試驗項目要求進行分項說明。

2.2.1. 總則部份

1. 風場模擬相關資訊：

現階段可產生符合設計需求資訊之方式為大氣紊流邊界層風洞試驗，其需滿足基本模擬方法之條件，且應與風況無關。目前計算流體力學尚未具備足夠精度預測建築之表面擾動與極值壓力，但可做為流場流況之物性檢視，或用於研究平均環境風速分佈。大氣紊流邊界層風洞之各種實驗項目技術可參考 Reinhold (1982) 之風洞試驗應用。Aynsley 等 (1977)、Holmes (2015)、Simiu 和 Yeo (2019)以及 Cermak (1975)等所出版的教科書籍也提供了有關風洞和縮尺模擬技術的資訊。

定常大氣紊流邊界層流況之風洞試驗需滿足其基本特徵之縮尺模擬，除包含該地特性之迫近流場(approaching flow)，亦須考量受周遭地貌

影響之近場流況(near-field flow)。建築物之耐風設計可由強風事件對其造成之建築受風載重、風壓和加速度舒適度標準進行評估。在強風狀況下，由於熱浮力效應不顯著，可將迫近流場視為中性穩定(neutrally stable)。通常在模擬大氣紊流邊界層時，該邊界層風洞一般具有較大截面(高寬為2公尺或以上)與較長的試驗長度(10~30公尺)的共同特徵，以供流場發展。

對於模擬中性穩定之大氣紊流邊界層至少應考量下列項目：

- (a) 平均風速剖面
- (b) 紊流強度剖面
- (c) 紊流積分長度尺度
- (d) 風頻譜能量分佈
- (e) 流場保持零壓力梯度

完整與部分邊界層模擬中，一般會使用包含三角擾流板、阻牆、格柵和地表粗糙元素作為被動元件產生平均風速剖面 and 紊流特性。相關原理與技術可參考文獻 Reinhold (1982)、Melbourne (1977)、Cook (1978)、Holmes and Osonphasop (1983)、Barlow et al. (1999) 與 Cermak and Cochran (1992) 之內容。

迫近流場一般以平衡之紊流邊界層模擬，其流場特徵可參照建築物耐風設計規範與解說內容 2.3 節之分類方式決定該處地況條件。

近場流況將受到相鄰物理特徵(包含建築物、結構物或明顯的地形變化)影響，因此必須將其作為局部風場模擬的一部分。一般在研究建築處周遭至少 300 公尺半徑內的所有主要結構與地形特徵均應以正確的比例縮尺建模。於特定上游風向，若存在將明顯影響下游風場之條件，如大尺度建築物或超高層建築等，可經專家評估是否延伸特定風向之上游建模範圍，以評估其對研究建物之影響。

2. 縮尺相關特性：

長度縮尺：

應考量風洞試驗場地條件進行選取適當之長度縮尺，決定長度縮尺後，風洞試驗中所有幾何尺寸皆以該縮尺比例進行製作，並依此縮尺建立相應之大氣紊流邊界層流場，並滿足下列比例：

$$\lambda_L = \frac{(z_0)_m}{(z_0)_p} = \frac{({}^xL_u)_m}{({}^xL_u)_p}$$

其中 z_0 與 xL_u 分別為地表粗糙長度與主流向紊流積分尺度，下標 m 與 p 分別代表模型與實體。於實際模擬試驗時，紊流積分尺度模擬可能會受限於風洞斷面失真而，無法完全滿足符合縮尺設定，但文獻指出在 2 或 3 倍之範圍內不會顯著影響測量結果(Surry(1982))。

風速縮尺：

風洞試驗之平均風速，應盡量提高測量儀器(例如壓力傳感器，力平衡儀和風速計)之靈敏度。基本上風速縮尺比例越大(即風速越高)有益於提升試驗量測精度，但同時需考量儀器與模型之安全試驗風速。風速縮尺之定義為：

$$\lambda_V = \frac{(V_{ref})_m}{(V_{ref})_p}$$

其中 V_{ref} 為相對於實尺寸參考高度之平均風速。在風速縮尺決定後，時間與頻率尺度可由風速縮尺與幾何縮尺決定，而試驗中所代表之實場量測時間與頻率即可採以下縮尺進行換算。

$$\lambda_T = \frac{\lambda_L}{\lambda_V}$$

$$\lambda_F = \frac{1}{\lambda_T}$$

3. 其他相關試驗要求：

阻塞比：

應盡量降低近場模擬的投影面積和風洞橫截面積之比值，減少對阻塞修正的要求。可採用我國耐風設計規範與解說之內容，阻塞比建議小於 8%。此外，研究建築模型不宜超過風洞高度的一半，橫向位置建議設於風洞旋轉盤中心處，若無法設置於轉盤正中處，則應盡量放置於風洞半寬內。如 Reinhold(1982)所述，雖可以對總體平均阻力進行阻塞修正，但目前尚未釐清應如何對高度紊流流場中之局部壓力擾動進行阻塞修正。因此建議盡量減少阻塞比以避免產生縱向壓力梯度。

最小雷諾數要求：

具銳緣建築物之最小雷諾數可參考耐風設計規範與解說中提及之 10^4 ，或保守取 AWES-QAM 之建議值 5×10^4 。若目標建築物處於被大範圍建築屏蔽的情況，則應在其沒有屏蔽之狀況下可達到最小雷諾數。當大於此最小雷諾數後，鈍體周圍的流動通常對雷諾數不敏感；低於此值，則自由流中的紊流以及建築物本身產生的紊流在高頻方面將較為不足，並對壓力擾動和尖峰值產生影響。對於具有圓形橫截面或具有大半徑圓弧邊角的建築物，分離點一般與雷諾數相關，在光滑且曲度均勻的圓形橫截面尤其如此，在此狀況下，對該橫截面之雷諾數應大於 8×10^5 (Cheung 和 Melbourne, 1983; Macdonald 等, 1988, Eddy, 2004)。若建築物的轉角為圓角或曲面，但其具較大粗糙度的情況下(例如存在外露圍柱、外露結構、深陽台或大型遮陽棚)，可放寬此雷諾數要求，但應參考文獻研究說明(例如 Basu, 1983)。另有相關研究指出，在相同風速下可透過改變表面粗糙度條件，模擬相應更高雷諾數之平均阻力係數(Szechenyi, 1975；Holmes 和 Burton 2016)，但這種試驗技術尚未被證明可以準確模擬側風反應(Eddy, 2004)。

模型製作精度：

測試之主建築物模型的總體尺寸(高度，平面形狀等)應精確至 2%或 2 公釐內。如果建築細節(例如陽台、突窗、遮陽板等)從立面延伸 1 公尺或以上時，則應將該細節表現於主建築模型上。在結構風載重、表面壓力與行人安全評估時不應考量植栽之影響，但若在進行行人舒適度評估時，則當地景觀(包含植栽)應以當前狀況或以設計完工之狀態建模，而舒適度評估應包含無植栽條件之影響。周圍建築量體模型製作尺寸之誤差應不高於整體尺寸 10%以上，而其不需包括外觀建築細節。

氣象數據：

對於測站位址、遮蔽效應和儀器響應影響，經過適當校正的風速數據(與風向，若存在的話)，用於舒適度設計案例，例如環境風研究和建築物加速度等，應使用不少於 10 年之觀測數據。對於建築耐風設計研究，如整體結構載重或表面壓力研究，應至少使用 20 年以上之觀測數據。在進行行人舒適度評估時可採當地氣象測站之資料進行分析，分析資料應包含平均風速與風向資訊，並經適當之機率分佈型式計算其風速分布狀況。而在進行建築耐風設計之結構載重與表面壓力試驗時，可採建築物耐風設計規範與解說內之各區域基本設計風速資料作為實場設計風速進行試驗，該資訊為對應 50 年回歸期之風速。另依建築物種類考量，可乘上用途係數得更高或更低回歸期之風速。

設計採用之風速與風向性：

於行人舒適度評估應考量該處平均風速於各風向之超越機率；而在風載重、風壓與建築加速度評估應考量該處極值風速之超越機率。若有足夠的可靠氣象數據資料，各風向之風速機率計算可以通過多種方式進行(如 Davenport, 1971 ; Melbourne, 1984 ; Holmes, 1990 ;

Apperley 和 Vickery, 1974 等)。在評估行人舒適度時應依考量各風向平均風速之機率分佈，再乘上試驗各風向測點所量得之風速，得出該測點位之風速發生機率後，進行舒適度判定。另一方面，由於國內主要遭受之強風事件為颱風，在颱風侵襲期間之風速與風向變化劇烈，且各場颱風事件差異甚鉅，而在風載重與風壓評估時應採極端值分析，同時考量其風速與風向之機率分佈在統計上可能產生較大之偏差(bias)，產生較不保守之狀況，因此在進行風載重與風壓評估時，可假設各風向機率皆相同，僅考慮極值風速之超越機率。或者，若需同時考量不同風向與風速之超越機率，可參考建築物耐風設計與解說之內容，採用可信的資料與統計方法分析，計算出不同風向的基本設計風速。其分析結果，應檢附申請書及統計分析報告書，向中央主管建築機關申請認可後，始得運用於建築物耐風設計。

2.2.2. 風環境評估部份

1. 一般性原則：

應提供足夠的訊息，以充分評估建築物開發區域周圍擬定之行人使用區域內之舒適度和安全性。除了研究單獨建築物周圍氣流之基本原理外，常見的風環境試驗為評估實際複雜環境下之行人舒適度，對於後者而言，使用邊界層風洞並滿足試驗基本遵循項目(請參閱第一章部分)是目前最被廣泛接受的方式。使用電腦計算流體力學(computational fluid dynamic, CFD)方式模擬流場之結果，在目前對於預測陣風風速與複雜環境流場之精確度仍與試驗存在差距(Cochran 和 Derickson, 2011)，但計算流體力學仍可作為輔助分析解釋流場狀況，相關模擬計算方式可參考 Franke 等人(2007)、Blocken(2015)與 AIJ(2007)等提出之相關建議指南。

風速測量位置與數量：

於開發區域的行人可及平面區域、相鄰行人通道或其他鄰近區域，風速測量位置的平均密度建議不低於每 200 平方公尺 1 個測點，以評估發展新建築對周邊風環境之影響。從行人安全的角度來看，風速測量位置應集中在通常已知會發生風環境問題之處，例如在建築體轉角附近、無明顯遮擋之迎風面近地區域、開放式拱廊或潛在可能形成風通道之區域中。在新建建築物周邊至少應進行風環境評估之區域範圍可參考 AWES(2014)之說明。

2. 試驗量測相關資訊：

環境風速的測量：

量測環境風速所採用之儀器，其響應特性應滿足行人舒適度評估之需求。在風環境研究中，常將氣象測站高程處之風速轉換為邊界層緣處對應之風速，因此建議試驗所測量風速值以適當位置(如同採邊界層緣處)參考風速之比例形式表示，便於後續配合氣象統計數據進行風速機率之舒適度判斷計算。風環境評估標準常以平均風速或陣風風速進行，兩者之風速測量可以使用熱線探針或熱膜探針進行，或者使用 Irwin 探針(Irwin, 1981)。在實際使用上，需注意熱線與熱膜探針在高紊流區之平均風速較易發生誤差(Bottea 等, 1992)；另一方面，Irwin 探針在高紊流區、明顯垂直流區以及局部平均風速小於 3 m/s 的區域中也容易出現誤差。另試驗中之參考風速應從風洞中不受近場建築物影響之位置獲得，一般狀況下常設定於邊界層緣處進行量測。

頻率響應：

量測陣風風速時，測量儀器之頻率響應在換算實場狀況下，從 0 Hz 到 0.15 Hz 內偏差不應超過 10%，而在此範圍內之線性相位偏差不應超過 10%。0.15 Hz 約略可解析相當於實場的 3 秒平均時間內之訊

號，這是常用於測量陣風風速之氣象風速計的近似響應特性。透過熱線、熱膜風速計或壓力測量技術可以輕鬆滿足此頻率要求，對於基於壓力測量技術的儀器，頻率響應取決於取壓孔位之幾何形狀、連接管線的尺寸(包括任何限流器等)、壓力傳感器之內含體積、膜片的柔韌性等或採用壓力掃描裝置之特性等。透過不同技術皆可以滿足所需的頻率響應(Holmes, 1995 年)，以及其相關數位修正方式(Halkyard 等人, 2010)。

試驗量測之風向數：

應至少進行 16 個風向試驗，每間隔 22.5 度量測一次。至少應進行 16 個風向試驗，但實際選擇的風向可考慮於該處位置風速對風向的敏感程度，以及現有氣象風速數據資料而定。國內氣象量測資料於 2001 以後，已在每 10 度風向角提供風速資訊，而國外報告大多也採取 36 個角度進行評估，若該處鄰近測站已有 36 風向 20 年之氣象資料，則建議採用。

3. 報告內容相關項目：

評估準則：

對當地風環境的評估應基於相關主管部門法規要求的標準，若規劃機構未指定標準，則檢測顧問或試驗方應提出適當的準則，其中評估準則內容應包含該地點之活動型態以及發生危險風速的機率。由於如周遭環境差異、建築形態規劃或座落地區盛行風況等各種因素，目前於國際上並沒有統一採用之標準，以下列出國際上常見使用的標準，研究或試驗單位可參考各研究建議之準則內容進行評估，常見標準和有關標準制定的其他背景資訊可參考下列文獻：Hunt 等(1976)、Isyumov 和 Davenport(1976)、Lawson 和 Penwarden(1976)、Penwarden 和 Wise(1975)、Melbourne(1978b)、Soligo 等(1998)、Janssen 等(2013)、Ratcliff 和 Peterka(1990)與 Koss(2006)。

報告應包含之內容：

應以簡化方式說明該開發建築對周遭風環境之影響評估。該報告應提供結果摘要，以表明該處擬議活動是否適合(例如，通道、戶外餐廳等)。

除測試結果外，報告亦應包括本手冊要求之相關內容，即：

- (a) 測試程序、模型製作、風洞和大氣紊流邊界層模擬的敘述。應包括測試件和周遭地景的風洞模型照片。
- (b) 該地氣象數據資料之分析方式與結果。
- (c) 包含標記量測點位之建築區域位置圖。
- (d) 測試的風向條件、試驗採樣時間和採樣頻率。
- (e) 需將各測點所有風向角之無因次平均風速、無因次擾動風速值以及選用評估準則判定風速之對應機率作為報告附件，以利於大樓興建後進行實場量測驗證的工作。
- (f) 植栽對風環境變化之影響，即有植栽與無植栽之比對，可檢查結果顯示當地植栽對風環境的敏感性。

最後，應描述研究中遭遇的任何異常細節(若存在)，可透過拍照或錄影方式記錄留存。

2.2.3. 表面風壓風洞試驗量測

1. 試驗量測相關資訊：

壓力測量位置的數量：

在測試建築物上，平均壓力取樣點密度應不少於每 120 平方公尺面積包含 1 個壓力測點，上述給定的測點密度為最小平均值，靠近邊壁和橫截面不連續處之局部密度應更高。對於較小的建築物和複雜

的形狀應適當提高採壓點之平均密度。對於大區域的低壓力梯度區域，則可以合理地降低平均壓力測點密度。

風向角的數量：

對於至少 36 個風向，應以 10° 的增量確定各個測量位置的設計壓力。36 個風向角的要求對於特殊研究可以有理由放寬，如該處盛行風向固定或該處環境造成特定風向等。但由於本國地理位置座落於颱風帶，常年皆有複數颱風生成並經過本國經濟活動範圍，當颱風侵襲時，視其行進路徑，在風向上會有很大的變化，因此若於本國評估建築物表面風壓時，建議仍進行 36 個風向之量測。為另對特定狹窄風向區間發生的流動現象研究亦可增加較細緻的風向角增量。

風壓係數和參考壓力：

風洞壓力測量值應以風壓係數形式表現，其參考壓值應取現場之靜壓值，並在適當處量測動壓，透過該動壓可以採計算方式換算出實場風壓。靜壓參考值可以從安裝在不受任何近場建築物影響之風洞低紊流區域中之皮托管靜壓孔中獲得。常用的方式也包含可以從專門設計用於在紊流條件下測量靜壓的探針，以及從風洞壁面上的壓力輸出獲得。但應研究風洞中可能出現的橫向或縱向靜壓力梯度，若流場中存在壓力梯度，則應參考前述方式進行適當的修正。動壓值亦可由皮托管量測獲得，但其不應位於縱向紊流超過 10% 的位置，否則可能會高估參考動壓。另動壓值亦可由風速計量測風速後，根據現場溫度對應之空氣密度計算出該處之動壓。

壓力量測儀器之頻率響應：

壓力測量儀器的振幅頻率響應，以量測記錄之振幅與給定正弦壓力施加之振幅比表示。在縮尺模型狀況下，在 0 Hz 到 $2U_h/B$ Hz 之頻率響應偏差應低於 10% (其中 U_h 為建築物頂部的平均風速， B 為建築物的特徵模型寬度)。當壓力信號之頻率響應開始偏離 10% 以上時，

在該頻率範圍之上應使用低通濾波處理超出頻率範圍的壓力信號。同時在上述頻率範圍內，相位響應之線性變化的偏差也不應超過10%。壓力測量系統的頻率響應取決於壓力管道系統的幾何形狀以及壓力傳感器特性相關，如傳感器內含體積與膜片的柔韌性。Holmes(1995) 已整理了多種方式可用來達到所需的頻率響應標準。另對於響應限制的要求也可經由多種方式確認，如 Durgin(1982)、Holmes(1984)、Irwin 和 Davies(1988)和 Letchford 等人(1992)之研究。

試驗取樣頻率：

用於數位處理之壓力訊號之最小採樣頻率應至少為信號內最大頻率之 2.5 倍，以最小化混疊(aliasing)發生，經實驗和測試結果證實，此採樣頻率已足以將尖峰值解析至可接受的精度。另若採取低通濾波方式處理數據，則其截斷頻率應小於採樣頻率的一半以防止數據混疊。

2. 數據分析部分：

尖峰外風壓係數：

尖峰外風壓係數應為對應實場狀況之強風事件(如颱風、東北季風等)長度的統計平均值(最大值或最小值)。可以使用多種方法來有效地確定平均外部壓力峰值，例如：穿越次數法(Melbourne, 1977b)、最大值和最小值的採樣法(Peterka, 1983)、不足暴風雨長度時間之極值分佈擬合(Mayne and Cook, 1979)。若在重複的相同實驗(數據具遍歷性)中取多個極端的平均值，則應使用不少於五個時間序列樣本。另由於此尖峰壓力為對應某時長內之結果，在分析上應定義該強風事件對應之時長，一般在進行風載重與設計風壓之評估時會取 1 小時或 10 分鐘之時長進行分析。

內風壓：

在建築物模型上測得的外部壓力應與在原型建築物中，根據孔隙率、牆壁和屋頂開口等狀況下之內風壓相結合。作用在建築之內部壓力取決於許多因素，包括建築結構中的孔隙、空調之出入開口、敞開的窗戶、可透式內牆之分佈和孔隙率或電梯井等中的熱浮力效應等。在風洞試驗之內風壓評估可採本國耐風設計規範與解說中之分類，即開放式建築無內風壓、部分封閉式建築內風壓係數採 ± 1.146 ，而在封閉式建築則為 ± 0.375 。

3. 報告應包含之內容：

試驗得出的設計外風壓應以簡化的方式提給帷幕或建築表面設計者。建築物的表面壓力試驗報告應以建築物平面或立面形式呈現試驗結果，並以等壓區域顯示設計壓力分佈。這些等壓區域的形狀可以是不規則的，即代表實際測得的壓力分佈；亦可以是矩形分布，以便於設計者選擇表面披覆物之設計與形式。通常應以 0.5 kPa 的間隔進行製圖，該區域內之壓力等於或大於區域內的預測壓力。若建築處在強風地區，亦可加大壓差間隔製圖，如採用 1.0 kPa 的間隔。區域壓力分佈應分別顯示正設計風壓和負設計風壓之結果，且其應為已包含內風壓之結果，而用於繪製壓力分佈區域圖之各測點設計風壓也應製成表格。

除結果外，報告還應包括下列相關的部分，即：

- (a) 測試程序、模型製作、風洞和大氣紊流邊界層模擬的敘述。另應包括含測試件和周遭地景的風洞模型照片。
- (b) 描述設計風速分析並考慮風壓係數方向性影響。
- (c) 各壓力測量位置圖，並標有壓力測點編號。
- (d) 測試風向，數據擷取時間和頻率響應。

(e) 對測得的外部風壓進行統計分析。

(f) 計算內風壓，以及將其結合到計算出的設計壓力之方法。

客戶可能需要以下附加信息，並且可讓數據便於使用：

(g) 以表格或列表形式完整列出每個風向的測量平均值，標準偏差，最小和最大壓力係數。

最後，應描述研究中遭遇的任何異常細節(若存在)，可透過拍照或錄影方式記錄留存。

周邊明。

2.2.4. 建築結構主抗風系統之風載重風洞試驗量測

1. 試驗資料相關資訊：

測試目標：

風洞試驗對高層建築的整體載重和響應應能夠準確確定設計基底傾倒彎矩、剪力、扭轉彎矩、等效靜載重分佈，以及預測風引起的結構變形和振動加速度。基底彎矩和剪力與結構強度設計相關，因此可以使用與極限狀態設計方法相關的長回歸期風速，或者採建築物使用年限的回歸期風速，其所得之結果應參照鋼構或 RC 設計規範所提供之載重係數計算。變形量和加速度通常與服務使用設計相關，可參考建築物耐風設計規範與解說內容。

建築結構特性：

結構工程師應提供風洞實驗室有關建築物結構動力特性的資訊，必須至少包括原型建築的前三個振動模態的模態形狀和自然頻率、質量和質量慣性矩分佈以及原型建築的阻尼特性。除阻尼外，上述資訊通常可從該結構的數值模型中獲得，對於非常高、細長或複雜形狀的建築物，可能需要考慮較高振動模態的影響。

測試方法：

應通過(a)高頻力平衡儀測試、(b)多頻道壓力量測、(c)剛性氣彈性模型測試或(d)完整氣彈性模型測試。使用氣動彈性測試時約化風速 (U_h/n_0B ，其中 U_h 為建築物高度的平均風速， n_0 為振動自然頻率， B 為建築物的特徵寬度)對於具銳緣之建築物應達到 8 以上；對於六邊形、八邊形或倒角的建築應為 6 以上，對於圓形或橢圓形的建築則為 4 以上。

模型製作：

測試建築物模型的總體尺寸，高度，平面形狀等，應精確到 2%或 2 公釐以內。尺寸大於 1 公尺或建築物寬度的 10%(以較小者為準)且距離任何角落小於建築物寬度 15%的建築細節也應建模。模型之縮尺比例應不小於 1：800，同時應滿足第第一章中規定的最小雷諾數的要求。

2. 風洞測試相關要求：

採樣頻率應至少是建築物縮尺自然頻率的 5 倍(針對柔性建築 $f < 1$ Hz)。應對至少 36 個風向進行測試，最小採樣週期應相當於實場時間 1 小時或 10 分鐘。無論採樣時間和採樣頻率為何，都需要確認可擷取足夠的數據樣本以在反應譜中提供足夠的解析。在研究關鍵的風向效應時可增加細部風向試驗。

以高頻力平衡儀方式測試之要求：

模型/力平衡儀頻率應至少比縮尺後的建築物所考量模態之自然頻率高 30%以上。將模型安裝在勁度非常高的力平衡儀上可測量模型的傾倒力矩。通常會採用很輕的模型並以剛性方式安裝，以使模型/力平衡儀系統具有很高的固有頻率(Tschanz 和 Davenport, 1983; Boggs, 1991)。高頻力平衡儀可直接測量風作用於模型上的力量，但是這些

力可能會因平衡儀和模型的結構特性而失真，因此將模型/力平衡儀頻率與縮尺模型頻率分開，可以最大程度地減少這種失真所帶來的誤差。

以電子式壓力掃描器進行測試之要求：

當使用壓力量測方式將表面壓力積分為作用在建築物上的總風力時，應遵守以下最低標準：

- a) 每 120 m^2 建築面積至少應分配一個壓力測點。
- b) 建築物至少五層樓應分配一層壓力測點量測風壓。
- c) 壓力測量儀器的振幅頻率響應，以記錄的振幅與施加的正弦壓力振幅之比表示，應顯示由 0 Hz 至 $(0.5U_h/B \text{ 或 } 2.5n_0 \text{ 取大者})$ Hz 的偏差不超過 10%。在此頻率範圍內，相位響應與線性變化的偏差也不應超過 10%。

使用電子式壓力掃描器同時測量壓力時，應確認任何一對壓力測點之間的相位差小於 30° 。在試驗上應避免取壓孔/管道/壓力傳感器系統的動態特性失真，並且必須為每個取壓孔分配適當的模態形狀和面積加權，以用於計算合成風載重(Halkyard 等，2010)。對於高層建築模型而言，以壓力量測方法的限制是很難將夠多的測壓管插入模型中以同時進行數據收集，尤其是對於複雜的立面外型，在量測上有物理性安裝的限制。但對較低的建築物，通常有足夠的空間容納足夠的管道，以準確地定義壓力分佈和屋頂變化造成之貢獻。相對於高頻力平衡儀試驗，採用壓力量測方式可較容易地評估非線性以及耦合模態形狀造成之效應。

以氣彈模型測試之要求：

對於各類型的氣彈模型結構特性，應將模態之間的頻率比模擬到 5% 以內的精度。若平移模態線型與線性模態差異在 20% 以內之情況下，可以使用剛性氣彈性模型進行模擬。對於更複雜的模態形狀，則應採用完整的多自由度氣動彈性模型。阻尼模擬可參考建築物耐風設計

規範與解說，在鋼筋混凝土與鋼構形式建築分別設定為 2%與 1%，另需注意兩平移與扭轉阻尼比例不應差距太大。應注意確保模型的廣義質量與原型建築物的質量之間具有相似性。如果旋轉中心與建築物的幾何中心不在同一位置上，則應從代表原型建築物旋轉中心的位置安裝建築物模型。在使用氣彈模型模擬之情況下，轉軸點的位置應使該模型在振動時之線性變化盡可能地與該振型形狀接近。

模態修正：

在進行剛性氣彈測試或高頻力平衡儀測試時，若模態形狀與線性形狀的偏差大於 10%，則應對模態形狀進行修正。在給定的振動模式下，應考慮不同轉軸向之間的耦合效應。有多種校正方法可對模態進行修正，例如 Holmes(1987)，Boggs 和 Peterka(1989)，Xu 和 Kwok(1993)，Holmes 等(2003)。

反應組合：

在設計中應考慮到在兩個正交方向上的風載重和反應以及扭轉力矩和反應之同時影響。直接風力和共振動態反應會在高層建築的迎風、側風向及扭轉力矩上產生等效載重，這些力會同時作用，不應視為單獨的載重狀況。如果在兩個正交方向上的平移頻率分的很開，則其反應在統計上之相關性也會很低。可採用 Holmes(2015)描述之在正交反應沒有耦合或相關的情況下，組合平移載荷效應的方法。

振動加速度評估：

應評估建築可服務性之加速度，以確保風致建築物振動所引起之不舒適性控制在適當的標準之內。關於風引起的振動問題可能是由於居住者在極端風災事件中被振動驚動，或由於頻繁感知到振動而煩惱(Denoon, 2000 年)。可接受的振動標準取決於結構的用途、其是否發生在強風中、居住者對感受到風致振動的可能反應以及風氣候和結構的動態特性等。本項評估可參考建築物耐風設計規範與解說，

對於居住用途之建築物，在半年回歸期風速下，側向尖峰加速度容許值為 0.05 m/s^2 ，若對於辦公大樓而言可略為提高。扭轉向之加速度應轉換為等效的平移加速度，並在考慮振動模態沿三個主軸的加速度間之相關程度，添加到組合加速度中。

等效的靜態負載分配：

由氣彈試驗或高頻力平衡儀研究所得之基底彎矩應以合理且一致的方式分佈在結構上。通常，高層建築上的風載重之平均值、背景(準穩態擾動)和共振分量所產生的等效靜風載重會隨著高度的不同而分佈(Holmes 和 Kasperski, 1996; Holmes, 2001)。背景載重分佈取決於載重作用的類型(如基底剪力或彎矩)及其在結構上的位置。但若共振分量比背景分量佔優勢，則組合擾動載重分佈可以近似為等效慣性載重(其為高度的函數)，後者與結構的模態形狀成比例。反之若背景反應占主導，則可以將背景基底彎矩作為等效靜風載重。

3. 報告應包含之內容：

對建築結構進行之風載重和振動的評估應以簡化方式提供，此外，應給出各向加速度標準偏差與角隅水平尖峰組合加速度，並與標準進行比較。該報告應提供結果摘要，標示整體設計基底彎矩剪力以及其設計用途相應之加速度。另外，應提供隨高程分佈之分層剪力與扭矩。報告至少應提供結構動態特性以及各風向受力/彎矩係數之平均值和背景擾動值。如果模態形狀與線性模態有明顯差異，則應討論其所採用之模態形狀校正因子。在討論建築物加速度時，應將角隅水平尖峰組合加速度與前述的加速度可接受性準則進行比較。

本案預計建立之風洞試驗報告評定機制，將先由上述整理歸納之資訊提出建築檢測風洞試驗之技術原則草案(附錄二)，並以此技術原則為基礎，提供進行試驗之單位最基本之試驗要求，以期保證試驗與分析數據之品質符合預

期。目前整理出之草案仍需經專家座談會議討論內容、格式以及適用範圍是否尚有可改進或需增減內容處，以及業界對本試驗要求之回饋反應後，於期末報告提出修改後之版本以供未來相關試驗參考使用。

第三章 風洞實驗

第一節 實驗設施與設備

本研究主要目標在於建立風洞試驗所需之基礎技術原則，以及後續可提出試驗報告評定機制之架構，因此本案內容除上述建立之技術原則，也將提供數種假定之建築風洞檢測報告作為示範例，這些報告示範例將具備符合風洞試驗基本技術原則之內容以供業界使用者參考。試驗將在內政部建築研究所之大氣邊界層風洞(ABRI)以及淡江大學風工程研究中心(WERC)之邊界層風洞中進行，以下簡介兩實驗室於研究中所使用之儀器設備。

3.1.1. 內政部建築研究所環境風洞

內政部建築研究所環境風洞本體為一垂直式的封閉迴路系統，總長度為 77.9 m，最大寬度為 9.12 m，最大高度為 15.9 m。風洞設施為一封閉式的循環風洞，具有兩測試區（第一測試區 4 m×2.6 m×36.5 m、第二測試區 6 m×2.6 m×21 m），另顧慮到未來如進行污染擴散試驗或煙霧視流試驗可能對風洞本體及工作氣體造成污染，原封閉迴路風洞可透過開啟二樓彎折處切換為開放形式。風洞本體具有兩個測試區段，第一測試區中配置有 2 個旋轉盤，第一座旋轉盤直徑 1 m，安置於距測試區入口處 3 m 處，從事一般流體力學研究；第二座旋轉盤直徑 2.6 m 至 3 m，置於可移動式軌道上，定位於距測試區入口端約 25.5 m 處，並以機械控制使其做旋轉及上下運動，將以建築物受風力作用的空氣動力學研究及污染擴散試驗為主。第二測試區則配置一座旋轉盤，其距離風洞本體整流段出口 15 m 處，轉盤直徑為 2.6 m，主要用途以橋梁測試為主。風扇型式為直接傳動軸流式風扇，直徑 4.75 m，整體長度包含風扇中心體、驅動馬達及尾錐，約 7.62 m。驅動馬達的最大馬力為 500 kW，最高轉速為 390 rpm。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。馬達控制藉由三相 3300 伏特變頻器來操控風扇驅動馬達的轉數以進行風速調整。風洞可提供最大風速為 30 m/s。試驗模型可

設置於試驗段旋轉台的中央，可用數控旋轉台旋轉模型，模擬不同風向角的效果。風洞中邊界層流場之模擬方式為在試驗段上游區域擺設錐形渦流產生器(spire)以及地表粗糙元素(roughness element)，透過不同尺寸錐形渦流產生器與不同密度粗糙元表現在不同條件地況之邊界層流場。

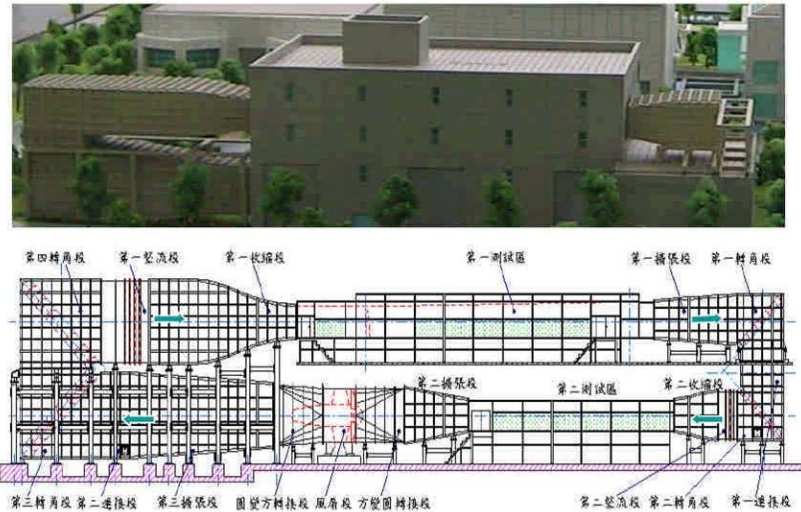


圖 3.1 內政部建築研究所環境風洞

(資料來源：本研究整理)

3.1.2. 淡江大學邊界層風洞

淡江大學之邊界層風洞設備屬於吸入、開放型，如圖 3.2 所示。風洞試驗段長 12 公尺、斷面寬 2.2 公尺、高 1.8 公尺。風洞頂板高度可調整，其最大調整高度為 0.3 公尺。動力段為離心式風扇(Centrifugal fan)，由具 250 匹馬力之直流無段變速馬達帶動。風速的調整可藉由控制風扇之轉速而不同，正常運轉下其流速範圍為 1.0 m/s 至 28 m/s。風洞進口段之收縮比為 3.6：1，進口段前方設有蜂巢管(Honeycore tube)及三層之阻尼網(Damping screen)，可降低風洞內自由流之紊流強度約為 0.5%~1.0%。

大氣邊界層風洞內部，入流處裝設擾流板，並在地板上鋪設粗糙元素，調整擾流板之尺寸及粗糙元素之大小及密度，即可產生所需要的大氣邊界層風速剖面及紊流剖面。風洞試驗段靠近動力段部分設有直徑 2 公尺之旋轉工作平台(圓盤，Turntable)。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觀測實驗的進行。

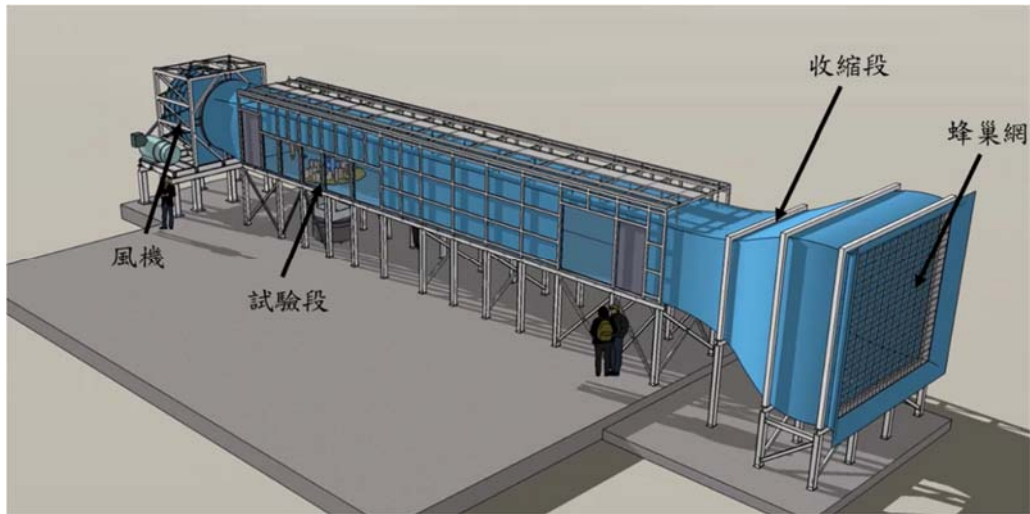


圖 3.2 淡江大學大氣邊界層風洞 3D 示意圖

(資料來源：本研究整理)

3.1.3. 熱線測速儀

本所之熱線測速系統為 DENTEC 熱線測速儀系統(圖 3.3)，其可量測流場速度歷時與紊流強度，首先將 55P11 single wire 安裝至三維移動機構，連接至 Streamline CTA 訊號放大器再連結至電腦。將熱線移動至地況模型前方量測流場風速與紊流強度，量測點為離地 10 mm 位置開始向上量測至邊界層緣，量測時之取樣頻率為 1024 Hz，採樣時段為 128 秒，總取樣數為 131072。



圖 3.3 DENTEC 熱線測速儀主機與一維熱線探針

(資料來源：本研究拍攝)

淡江大學風工程研究中心之風場量測亦採恆溫式流速儀(圖 3.4)進行，利用補償電路(compensating circuit)，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。有效風速， V_{eff} ($V_{eff} = V \cos \alpha$)， V 為來流風速， α 為來流與垂直於探測元軸線之夾角)為電橋電壓 E 之函數。基本率定中兩者之擬合曲線，可以多項式表示。



圖 3.4 TSI 熱線測速儀主機與熱線探針

(資料來源：本研究整理)

3.1.4. 壓力掃描系統

在壓力量測部分，本所與淡江大學皆採用 Scanivalve 多頻道電子式壓力掃描系統(圖 3.5)，透過壓力管線連接至掃描閥進行建築表面風壓與地表風速計之量測，一台 RAD base 主機可連接 8 組 ZOC 33 掃描閥，1 組 ZOC 33 由 64 個微型壓電式壓力感應器組成，各感應器皆具獨立之校正閥並可分別輸入校正值。壓力掃描模組由建築表面取壓孔與地表風速計感測壓力變化並轉換

為電壓輸出，經過數比/類位轉換模組後由網路連接方式傳輸至操作電腦顯示或儲存壓力資料進行分析。



圖 3.5 Scanivalve 壓力掃描系統(ZOC 33)

(資料來源：本研究整理)

3.1.5. 六分力平衡儀

本所與淡江大學之風力實驗皆採用日本 Nitta 株式會社之六軸向剪力彎矩感應儀(JR3 Universal Force-Moment Sensor System)，簡稱六力平衡儀，如圖 3.4，高頻力平衡儀裝設於縮尺模型底部，藉由儀器內部之應變計系統，量測模型整體所受風力情形，包括水平向剪力、彎矩及扭矩之平均風力與擾動風力。高頻力平衡儀連結所架設之風洞試驗縮尺模型，二者需要成為一個基本振動頻率較目標結構物縮尺頻率為高之系統，以使該系統所反應之結構故風力頻譜不被高頻力平衡儀-風洞模型系統所干擾。因此與高頻力平衡儀搭配之風洞模型，其製作須符合整體質量輕、勁度高之要求。

其主要功能將各軸之力與彎矩同時且連續以高精度品質輸出，並在訊號處理器上增置一數位訊號處理器，其可解決當訊號高速輸出時產生之軸間偏移與雜訊等問題，適用於多種電腦與作業系統，便可快速取得模型基底剪力彎矩之實驗結果。

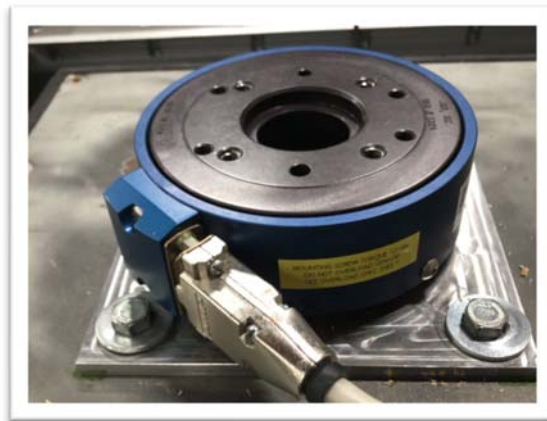


圖 3.6 六分力平衡儀

(資料來源：本研究拍攝)

3.1.6. 地表風速計

在環境風場量測部分，本所與淡江大學皆採用自製之地表風速計(Irwin probe)進行量測(圖 3.7)，其原理為氣流流經地表風速計時，藉由量測中間突起之鋼管與地表面處之壓力差值，可透過率定方式將壓力差轉換為風速資訊，並於後續分析使用。在實際使用時，應設定鋼管長度至縮尺後之行人高度，一般設定 150 至 180 公分之範圍。



圖 3.7 地表風速計

(資料來源：本研究拍攝)

第二節 試驗規劃

由於本研究試驗重點在建立檢測報告之示範例，一般進行檢測案試驗者通常為新建之大樓建築，且高度達 100 公尺以上，滿足我國規範建議執行風洞試驗之要求。本案選定 CAARC 建築作為主研究建築體，該假定建築在風工程研究中常作為標準研究建築物使用，也有相關建築受力與壓力之文獻可供參考，如 Melbourne(1980)、Tanaka 與 Lawen(1986)、Obasaju(1992)、Frison(2018)等研究，其基本尺寸如表 3.1 所示，其於詳細之結構資料列於附錄三。而在主建築周圍亦需考量地形之影響，本案取台北市某處之實際環境建製周遭地景，以模擬實際案場之近場流況影響，選定範圍約為 400 公尺，地況選定位址如圖 3.8 所示。

表 3.1 CAARC 建築之基本結構參數

	高度 H (m)	寬度 D (m)	深度 B (m)	第一模態頻率 n_0 (Hz)	平均密度 ρ (kg/m ³)	阻尼比 (%)
實際尺寸	182.88	45.72	30.48	0.286	200	1.0

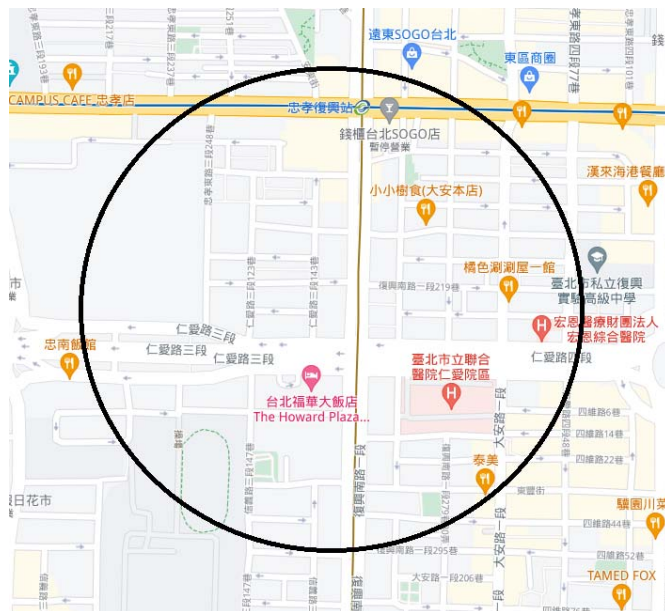


圖 3.8 周遭地景選定位址

(資料來源：本研究整理)

本案將規劃進行幾種較常見之建築檢測試驗項目，內容包含環境風場舒適度評估試驗、建築結構主抗風系統之風載重試驗、局部構件及外部被覆物所受之局部風壓試驗、以及結構氣彈力試驗，以下對各試驗分別簡述說明。

3.2.1. 環境風場舒適度評估試驗

在都市持續發展之狀況下，除了建築基本功能如居住、商業等用途外，環境品質之考量也日趨重要。在建築興建時，除了其結構安全性外，當此建築改變周遭地貌所產生之局部流況變化，進而影響地面之行人風環境變化，也需於都市規畫時進行適當評估。由於評估此類複雜流況需考量周遭近場地物之影響，以風洞試驗方式模擬為較直接且可較可信之方式，但由於電腦模擬技術以及硬體之發展迅速，未來亦可能可採以計算流體力學方式進行模擬，但在現階段仍以風洞試驗方式為主。

3.2.2. 局部構件及外部被覆物所受之局部風壓試驗

風壓量測為氣動力量測試驗，一般不需考慮其結構動力行為，但需遵守幾何縮尺製作相應尺寸之模型，並依相應之時間縮尺，設定滿足實驗要求之量測時長。風壓模型可由金屬、壓克力或 3D 列印方式製作，在欲測試之建築模型或構件表面安裝風壓量測孔，透過管線連接至壓力傳感器量測壓力值。進行風壓實驗時，應適度考量不同風向之影響，而量測所得資料應利用適當的統計方法，求得各風壓孔之極值風壓係數，而將該極值風壓係數配合該地區之設計風速，換算可得各點設計風壓。

3.2.3. 建築結構主抗風系統之風載重試驗

建築主要抗風系統所承受之整體風力試驗在 1980 年代初期，由 Davenport & Tschanz 等人發展出高頻力平衡儀(high frequency forcebalance)之試驗方式後，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。試驗之基本原理是將剛性的建築縮尺模型架設於具有高自然頻率之力平衡儀上，量測該模型之基底剪力及彎矩。若此高層建築之基本振態接近線性，則量測到之基底彎矩會與廣義座標之風力成比例，另將量測基底彎矩計算出頻譜

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。另一種評估方式是採壓力量測方式進行，將建築表面之風壓積分後取得分層載重後，可將其乘上振態向量累加為各振態之歷時剪力、彎矩，並經轉換後得該振態之能量譜後，計算等值靜態設計風載重及舒適性評估。

3.2.4. 結構氣彈力試驗

一般的高層建築並不會產生明顯的空氣彈力效應，由前述之高頻力平衡儀風載重試驗方式，即可評估建築之風載重或是風致振動的舒適性評估。只有極少數的超高層建築，或是柔性很高，經計算評估顯示可能出現過大振幅的情況下，才需考慮進行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)，其試驗規畫過程應謹慎處理結構特性之縮尺比例，在來流風場與結構之特性皆正確地模擬之情況下，才能確保風洞試驗模型受風載下之運動狀況與實際建築物相符合。

第三節 試驗結果

目前假定案場選定如前節所述，該處位於台北市，根據「建築物耐風設計規範與解說」，本案風洞試驗模擬地況環境屬於B地況(表 3.2)，對應表 3.3 其 α 及 Z_g 值分別約為 0.25、400 公尺，因此在風洞測試段內建立此流場進行模擬(兩實驗室流場地況擺設如圖 3.9 與圖 3.10)，風場量測結果如圖 3.11 與圖 3.12 所示，由結果可知兩實驗室在不同縮尺條件下之無因次平均風場結果非常接近；另在擾動風場部分，雖在假想建築高度內略有差異，但仍在 ESDU 規範建議之範圍內。而在近場地況模擬部分，模型配合流場地況與風洞尺寸，兩實驗室分別使用 1/250 與 1/400 縮尺模型進行試驗(縮尺資訊參照表 3.4)，以主建築物為中心製作半徑 400 公尺周圍建築與地況模型，製作範圍如圖 3.13 所示。主建物採用木板或壓克力材料切割製作，60 層樓主建物換算縮尺高度分別為 73.15 與 45.72 公分。依照實際主建物基地周圍地況建物分佈、樓層高度、外型細節、街道等，製作縮尺比例量體模型，最後黏貼至地況底盤，完成

後將模型安裝於風洞測試段旋轉盤上進行吹試(圖 3.14 至 3.17)。



圖 3.9 風洞地況實際擺設狀況(ABRI)

(資料來源：本研究拍攝)



圖 3.10 風洞地況實際擺設狀況(WERC)

(資料來源：本研究拍攝)

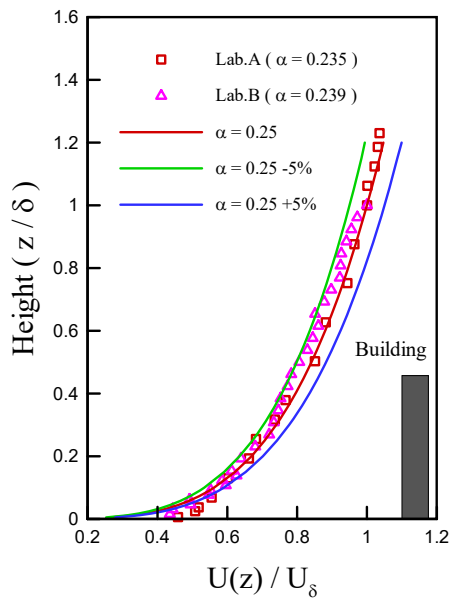


圖 3.11 平均風速剖面量測結果

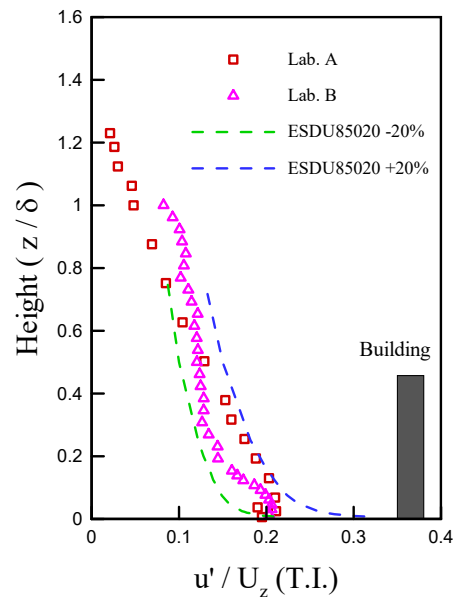


圖 3.12 擾動風速剖面量測結果

(資料來源：本研究整理)

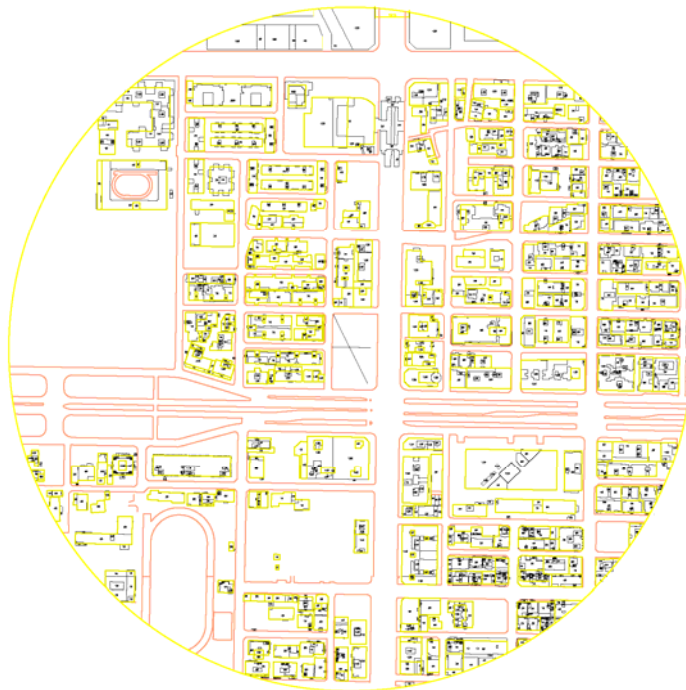


圖 3.13 製作範圍之建築基地與周圍建物數值地形圖

(資料來源：本研究整理)



圖 3.14 主建築與周圍建物量體模型(ABRI)

(資料來源：本研究拍攝)



圖 3.15 風洞試驗架設照片(ABRI)

(資料來源：本研究拍攝)



圖 3.16 主建築與周圍建物量體模型(WERC)

(資料來源：本研究拍攝)



圖 3.17 風洞試驗架設照片(WERC)

(資料來源：本研究拍攝)

表 3.2 地況種類

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

（資料來源：建築物耐風設計規範與解說）

表 3.3 地況相關參數

地況	α	$Z_g(m)$	b	c	l	ε	$Z_{min}(m)$
A	0.32	500	0.45	0.45	55	0.50	18.0
B	0.25	400	0.62	0.30	98	0.33	9.0
C	0.15	300	0.94	0.20	152	0.20	4.5

（資料來源：建築物耐風設計規範與解說）

表 3.4 試驗縮尺對照表

試驗場地	長度縮尺	風速縮尺	時間縮尺
ABRI	1/250	0.183	0.022
WERC	1/400	0.2	0.0125

（資料來源：本研究整理）

由於本案涉及兩實驗室之風洞試驗量測資料比對，而該資料亦為檢測評估結果之依據。一般而言，各實驗室之風洞條件存在許多不同處，雖於第二章內容已討論各項試驗要求，在兩實驗室之試驗皆滿足上述要求後應可達到某種精度，但兩者間不可能完全吻合，必定出現數據上之略為差異。為避免後續遭錯誤引用報告內容，以及未來業主由本案數據結果挑選可能產出較有利結果之實驗室進行試驗，本案於比對試驗資料內容時，皆採以實驗室 A(Lab. A)與實驗室 B(Lab. B)方式說明，不顯示各組數據由特定實驗室產生，以避免上述提及之狀況。

3.3.1. 環境風場舒適度評估試驗結果

目前行人環境風場評估一般是將風洞吹試量測值配合臨近基地氣象測站之氣象資料，並統計各測點不同風速下發生機率，最後依照舒適性評估準則得各測點風場環境評估結果。本案基地假定位處台北市，距離基地最近之氣象測站為台北測站，因此使用台北測站風速、風向資料進行分析。本案蒐集2000~2020 (應至少為 10 年)年台北測站逐時風速、風向資料進行統計。由於近年氣象局已提供已 10 度為增量之風向資料，因此在統計時，風速資料型式是以每 10° 為劃分 36 組風向角進行分析。在風向分析時，風速低於 0.3m/s 低風速資料不列入分析範圍，高風速所佔風速發生機率對一整年而言發生機率極低。

氣象統計資料一般可採韋伯(Weibull)機率密度函數來描述風速之分佈狀況，此函數中有兩個主要參數，分別為形狀參數及尺度參數，其表示為(3.1)式：

$$p(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (3.1)$$

其中 c 為尺度參數(Scale Parameter)，k 為形狀參數(Shape Parameter)，v 為風速，而韋伯函數之風速超越機率可表為(3.2)式：

$$p(> v) = e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (3.2)$$

其值配合各風向發生機率(A)將用於評估實場各風速發生機率，並評估行人環

境風場環境之舒適性，相關參數結果列於表 3.5。評估方式一般是將試驗所得之無因次等值風速(v_e)轉換為氣象站處之風速，並經累加各風向門檻風速(v_{thr})之發生機率，如下式計算：

$$p(v_e > v_{thr}) = \sum_i^n A_i e^{-\left(\frac{v_{thr} i}{c_i}\right)^{k_i}} \quad (3.3)$$

式中下標 i 為風向指標，經計算累加所有風向之發生機率後，可由評估準則之門檻風速與發生機率判定其舒適度。

表 3.5 各風向之風速、發生機率與韋伯函數之參數值

風向角 (度)	平均風速 (m/s)	發生機率 (%)	k	c	風向角 (度)	平均風速 (m/s)	發生機率 (%)	k	c
0	1.64	0.66	1.44	1.73	180	1.32	2.41	1.89	1.37
10	1.69	0.51	1.35	1.84	190	0.94	1.32	1.67	1
20	1.99	0.53	1.41	2.22	200	0.93	1.2	1.74	1.02
30	2.21	0.65	1.51	2.42	210	1.05	1.18	1.52	1.13
40	2.4	0.83	1.75	2.61	220	1.19	1.19	1.39	1.31
50	2.74	1.34	2.1	3.58	230	1.33	1.01	1.47	1.48
60	3.84	5.12	2.35	4	240	1.45	0.9	1.54	1.63
70	3.71	7.56	2.44	3.95	250	1.75	0.96	1.4	1.9
80	3.89	13.94	2.53	4.24	260	1.89	1.01	1.42	2.05
90	3.63	14.58	2.41	3.92	270	2.05	1.13	1.57	2.22
100	2.97	7.5	2.03	3.27	280	2.07	1.31	1.66	2.26
110	2.69	5.41	1.82	2.94	290	1.93	1.35	1.59	2.07
120	2.29	3.45	1.52	2.47	300	1.98	1.67	1.57	2.14
130	1.85	2.67	1.42	2	310	1.9	1.91	1.48	2.06
140	1.41	2.12	1.61	1.58	320	1.94	1.89	1.47	2.12
150	1.31	2.44	1.78	1.46	330	2.04	2.09	1.68	2.15
160	1.42	3.15	2.02	1.57	340	1.74	1.26	1.73	1.8
170	1.41	3.04	2.05	1.48	350	1.59	0.73	1.64	1.65

(資料來源：本研究整理)

本案分別採 Isyumov 與 Davenport 以及 Hunt 等人提出之兩種常見之準則進行判斷與比較。其中 Isyumov 與 Davenport 提出之準則僅採用平均風速進行判定，而 Hunt 等人提出之準則，採用等值風速進行判定，其為平均風速加上 3 倍之擾動風速，兩判定準則內容如表 3.6 所示。

表 3.6 本案採用之舒適性評估準則

評估標準	活動性質	門檻風速	範圍(m/s)	發生機率底限
Isyumov and Davenport	長時間停留	$\bar{U}$	>3.6	<1.5%
	短時間停留	$\bar{U}$	>5.3	<1.5%
	慢速行走	$\bar{U}$	>7.4	<1.5%
	快速行走	$\bar{U}$	>9.8	<1.5%
	危險	$\bar{U}$	>15.1	>0.02%
Hunt et al.	長時間停留	$\bar{U} + 3U_{rms}$	>6	<10%
	短時間停留	$\bar{U} + 3U_{rms}$	>9	<10%
	行走	$\bar{U} + 3U_{rms}$	>9	>10%
	不舒適	$\bar{U}$	>9	>1%

(資料來源：本研究整理)

本案於兩實驗室之地表風速計安裝位置統一如圖 3.18 所示，在建築預定處周圍、人群聚集區以及鄰近街道行人通行區域皆安裝風速計量測風速資訊。試驗時間皆取至換算至現場 1 小時之時長，所有點位量測之壓差經轉換為風速後，皆除以邊界層風速資料得無因次風速，並按照前述方式計算出所有測點之風速機率後，進行舒適度判定。圖 3.19 至圖 3.21 為採用 Isyumov and Davenport 標準之結果，由圖可發現兩實驗室在建築興建前後等三種條件之判定結果皆相近，大範圍區域之趨勢基本上一致，在興建前皆較偏低，興建後在建物周圍提高等級，另在加上植栽後略為改善。仔細檢視後，可發現實驗室 B 之判定結果等級在較高之建築周圍略有較高之趨勢，即實驗室 B 平均風速之

量測結果略高於實驗室 A。

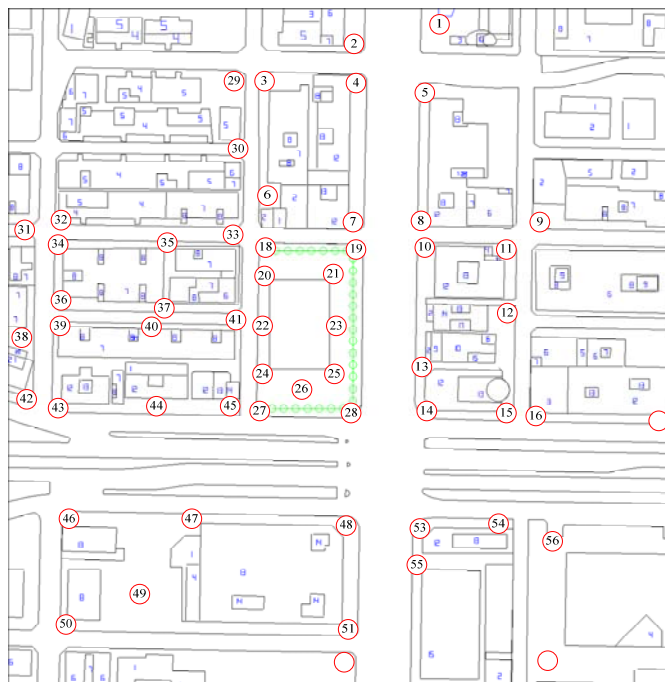
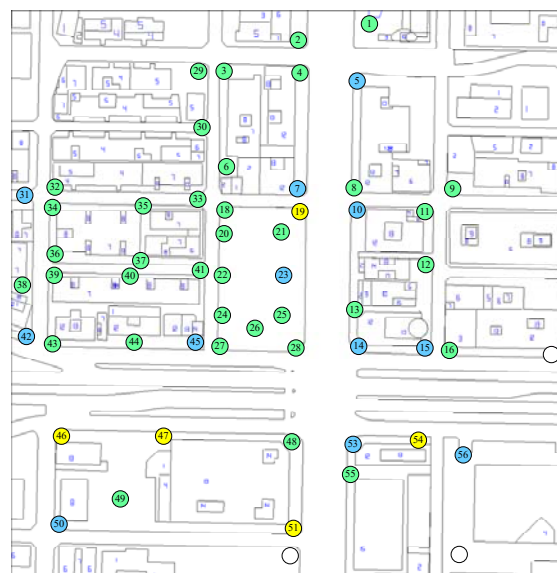


圖 3.18 地表風速計安裝分佈圖

(Lab. A)



(Lab. B)



● 長時間停留 ● 短時間停留 ● 慢速行走 ● 快速行走 ● 危險

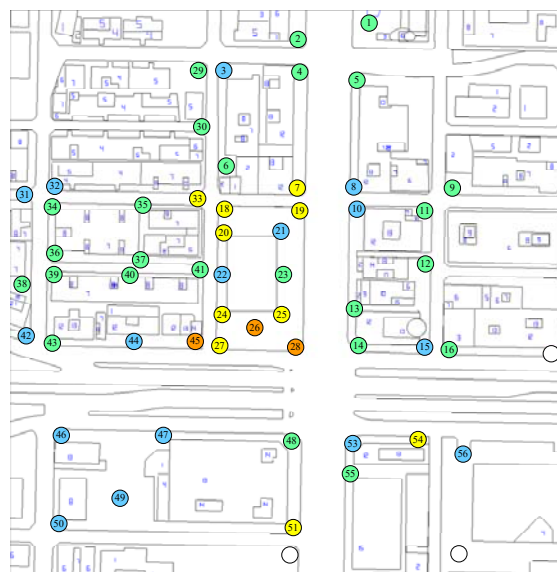
圖 3.19 Isyumov and Davenport 標準各點位舒適度判定結果-舊建物狀況

(資料來源：本研究繪製)

(Lab. A)



(Lab. B)



● 長時間停留 ● 短時間停留 ● 慢速行走 ● 快速行走 ● 危險

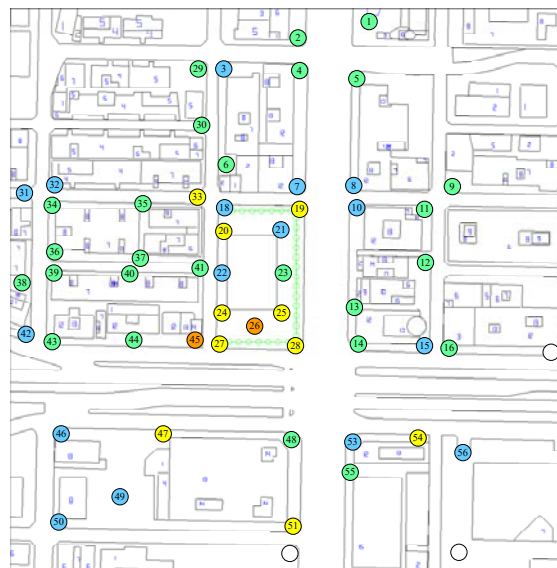
圖 3.20 Isyumov and Davenport 標準各點位舒適度判定結果-新建物狀況-無植栽

(資料來源：本研究繪製)

(Lab. A)



(Lab. B)



● 長時間停留 ● 短時間停留 ● 慢速行走 ● 快速行走 ● 危險

圖 3.21 Isyumov and Davenport 標準各點位舒適度判定結果-新建物狀況-含植栽

(資料來源：本研究繪製)

另在 Hunt 等人標準結果部分(圖 3.22 至圖 3.24)，兩實驗室之結果亦呈現類似的趨勢，在舊建物狀況皆較偏低，興建後在建物周圍區域等級提高，另在加上植栽後亦有略為改善。而在採用 Hunt 等人標準之等值風速，即平均值加上 3 倍擾動值，實驗室 A 的判定結果有較高之趨勢，在新建物周圍尤其明顯，比實驗室 B 更多點位出現行走等級之標準，由此結果可推論實驗室 A 之擾動風速值應略大於實驗室 B 之結果。由於判斷準則皆以風速機率決定，一旦機率高於門檻值，在判斷上即進入下一等級之舒適度，為確認判斷差異點位之風速機率是否落於門檻附近，將兩評估標準各點位之門檻風速機率輸出如圖 3.25 與圖 3.26。由圖 3.25 所示，在相同之平均風速下，兩實驗室大部分點位各風速機率結果接近，僅在部分點位實驗室 B 機率略高。而在加上擾動風速後(Hunt 等人標準)，相同等值風速下，實驗室 A 之機率較為偏高，在建築邊角風速變化大區域較明顯(假想建築周圍點位 18-28)。

(Lab. A)



(Lab. B)



● 長時間停留 ● 短時間停留 ● 行走 ● 不舒適

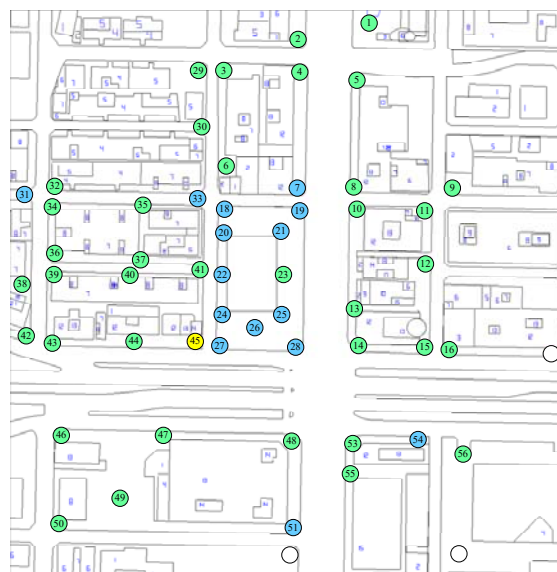
圖 3.22 Hunt et al.標準各點位舒適度判定結果-舊建物狀況

(資料來源：本研究繪製)

(Lab. A)



(Lab. B)



● 長時間停留 ● 短時間停留 ● 行走 ● 不舒適

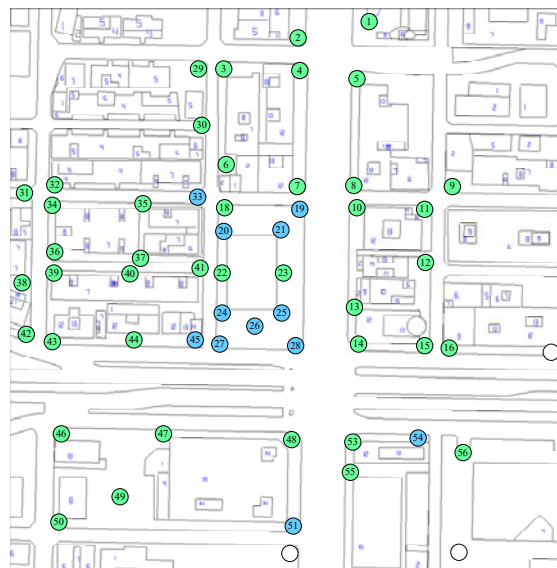
圖 3.23 Hunt et al.標準各點位舒適度判定結果-新建物狀況-無植栽

(資料來源：本研究繪製)

(Lab. A)



(Lab. B)



● 長時間停留 ● 短時間停留 ● 行走 ● 不舒適

圖 3.24 Hunt et al.標準各點位舒適度判定結果-新建物狀況-含植栽

(資料來源：本研究繪製)

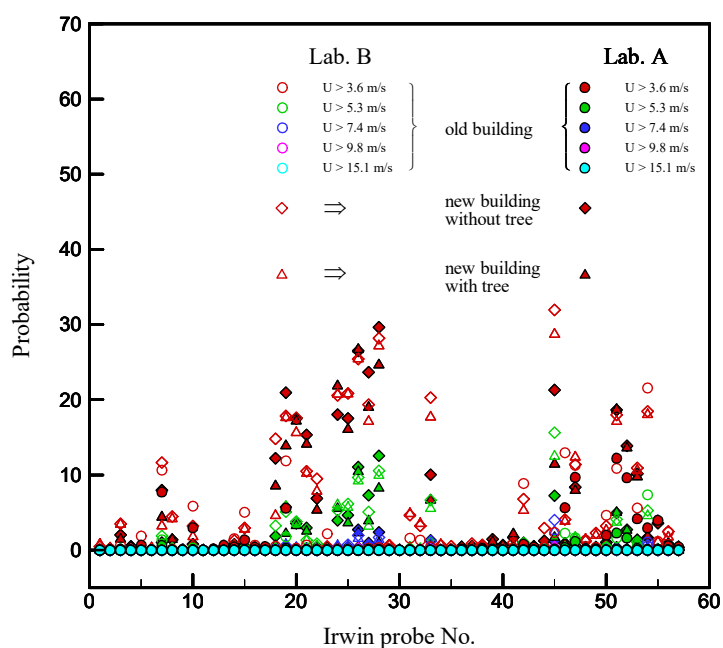


圖 3.25 Isyumov and Davenport 標準各點位之門檻風速機率

(資料來源：本研究繪製)

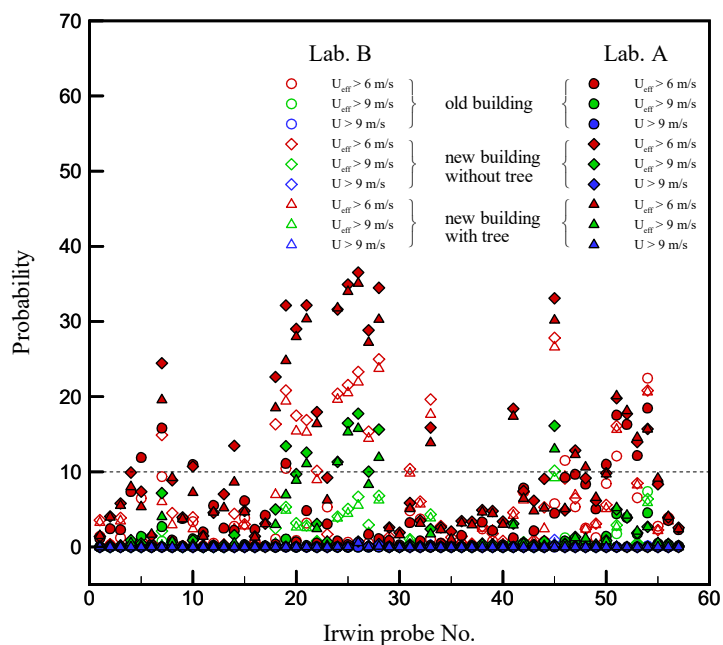


圖 3.26 Hunt et al.標準各點位之門檻風速機率

(資料來源：本研究繪製)

將實驗室 A 與實驗室 B 各點位之風速機率比對結果製圖如圖 3.27 與圖 3.28，若結果落於 45 度線之右側代表相同門檻風速下實驗室 B 所量測計算之

機率較高，反之若落在左側則為實驗室 A 之計算機率較高。在相同平均風速下(Isyumov and Davenport 標準)，兩實驗室大部分點位各風速機率結果接近，大部分趨勢略於 45 度線上，僅在部分點位實驗室 B 所得之機率略高。加上擾動風速後(Hunt 標準)，相同等值風速下，點位機率基本亦為相同趨勢，而實驗室 A 之機率較偏高。

由本案試驗準則比對結果可知，兩實驗室於環境風場量測所得之結果趨勢一致，但判斷結果稍有差別，若採以平均風速準則判斷則實驗室 B 可能得較為保守之結果；反之，若採等值陣風準則判斷則實驗室 A 可能得較為保守之判斷結果。由於造成差異成因眾多，目前尚無法完全釐清，但造成差異可能的原因除縮尺效應、周邊建築模型製作、風場剖面非完全相同等外，另一可能產生差異的原因為地表風速計是各實驗室自行設計製作之量測載具，尺寸、製作方式、管線尺寸長度與率定方式等差異皆可能對量測結果產生變化。若各實驗室至少採取兩種標準進行評估，並在各點位取其中最保守之判定結果，應可避免造成此類差異。

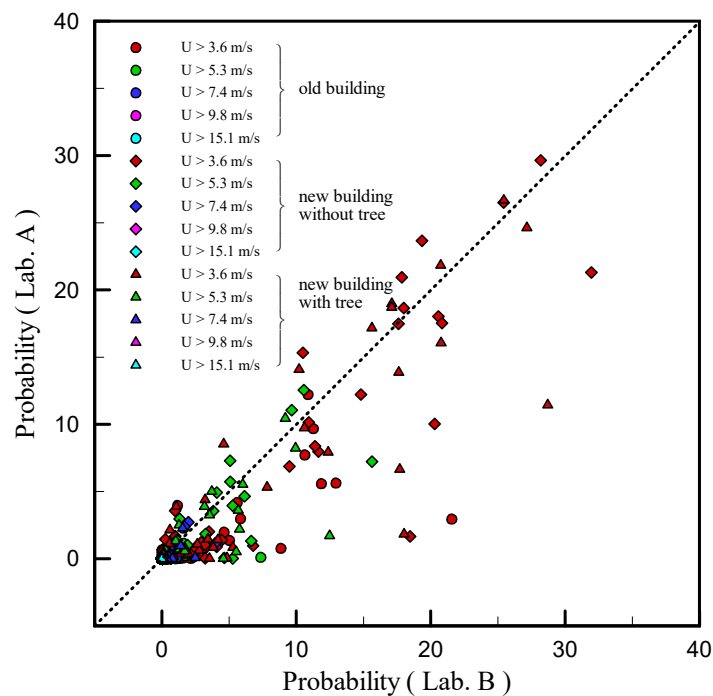


圖 3.27 Isyumov and Davenport 標準門檻風速機率比對圖

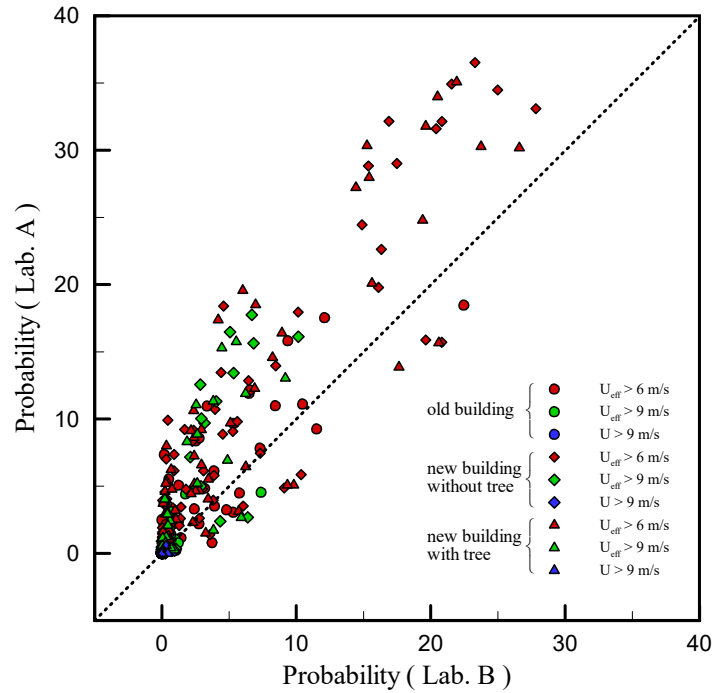


圖 3.28 Hunt et al.標準門檻風速機率比對圖

(資料來源：本研究繪製)

3.3.2. 局部構件及外部被覆物所受之局部風壓試驗結果

試驗量測風壓孔位佈置規劃如附錄四所示，於壓力管安裝時需與模型表面平貼，避免壓力管安裝凸起影響試驗結果。兩實驗室皆量測換算至實場兩小時之結果，量測以建築物正面面向來流風向為風向角 0 度，以 10 度為增量，共量測 36 組主模型之表面風壓力。試驗量測之壓力透過下二式計算後轉為平均與擾動壓力：

$$C_p = \frac{\sum(p_i - p_0)/N}{0.5\rho U^2} \quad (3.4)$$

$$C_p' = \frac{\sigma_p}{0.5\rho U^2} \quad (3.5)$$

其中 C_p 與 C_p' 分別為平均外風壓係數與擾動風壓係數； p_i 為量測壓力之時序序列資料； p_0 為背景參考壓； σ_p 為量測風壓之均方根值； U 為參考風速，本案取主模型頂處位置之風速； ρ 為空氣密度。

本案模型包含頂部共 384 點，在此列出典型四方向之結果，圖 3.29 與圖 3.30 為兩實驗室各點位平均與擾動壓力比較圖。由圖可知，雖然兩實驗室之縮尺比例不同，但在滿足第二章之原則性要求之狀況下，兩實驗室分別將量測壓力時序列資料，經無因次化後計算所得之平均壓力與擾動壓力結果相當接近，整體趨勢基本上相同，不過在較接近地面處之點位(90 以下點位)於擾動值略有差異，其成因初步判斷為近地面流場可能略為不同，由周遭環境如量體模型製作造成。

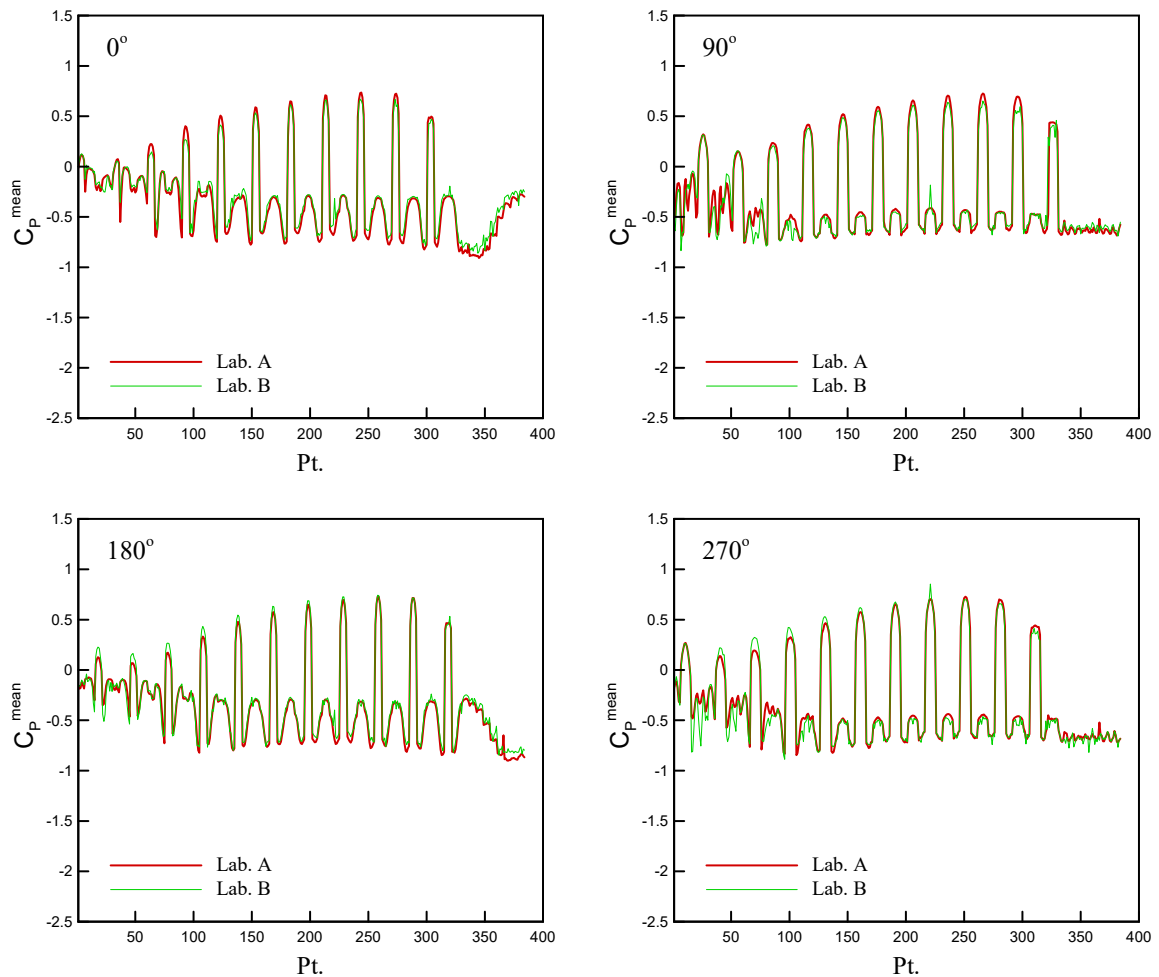


圖 3.29 四正對風向角各點位平均壓力比較圖

(資料來源：本研究繪製)

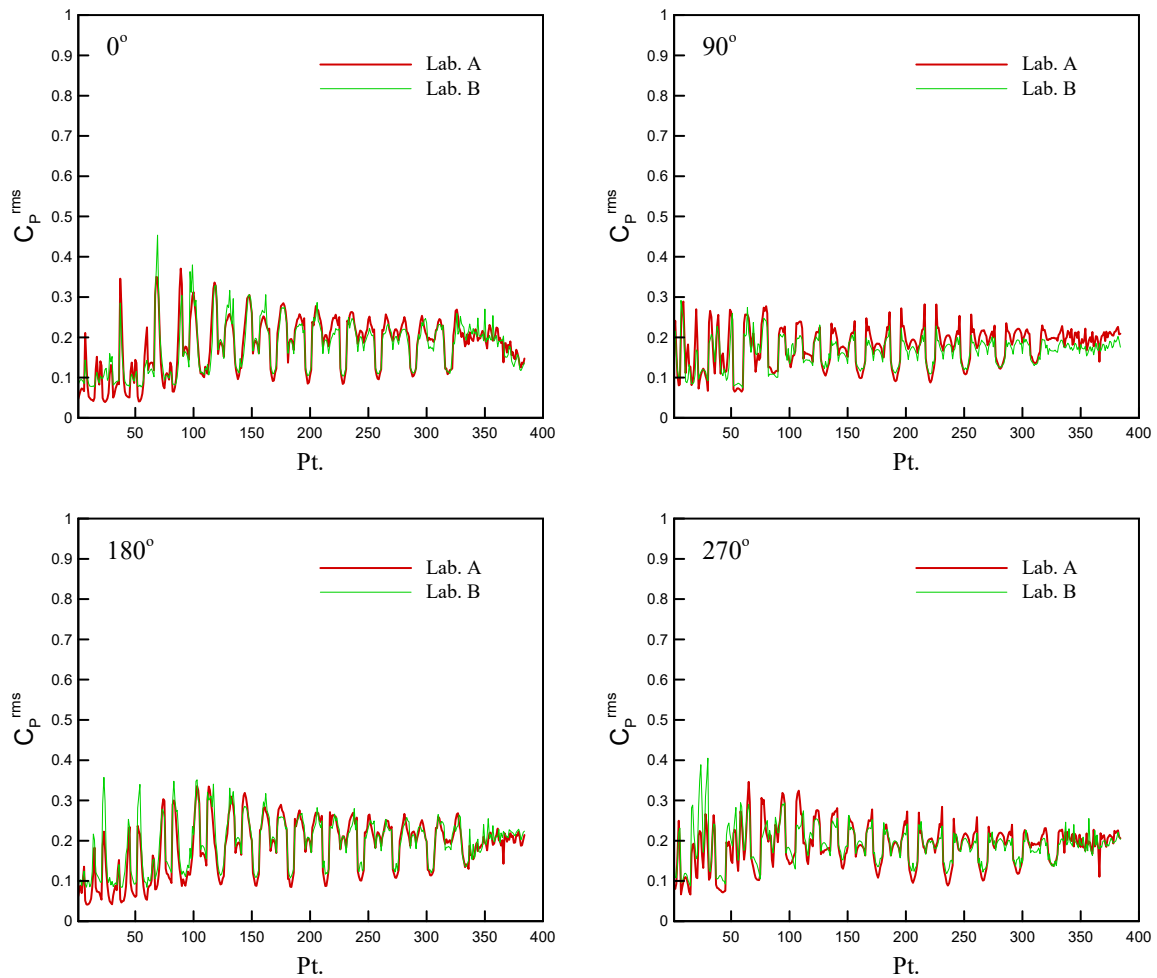


圖 3.30 四正對風向角各點位擾動壓力比較圖

(資料來源：本研究繪製)

另將兩實驗室所有點位之壓力值進行比對，如圖 3.31 與 3.32 所示，若點落在 45 度線右側為實驗室 B 偏高；反之若落於左側則為實驗室 A 結果偏高。由圖可知基本上兩實驗室之平均值結果非常吻合，整體擬合斜率為 0.98， R^2 值為 0.962；而擾動結果亦相當接近，僅部分點位略有差異，大部分點位皆落在 10% 以內，檢視資料後發現，差異值與風向角無明顯關聯，約為隨機分佈。擾動值之擬合斜率為 0.936， R^2 值為 0.84。相較於平均值結果，擾動值出現略大之差異，而表面壓力與幾何外型、雷諾數、來流風況等相關。由於兩實驗室製作模型精度皆達 2%，並都達到最低雷諾數要求，在平均風速剖面也有很好一致性。可能產生差異的成因是擾動風速剖面略有不同，由圖 3.12 可發現實

驗室 A 之擾動風速在建築範圍內略高於實驗室 B，但由於該剖面在接觸到主模型前皆已受到周遭地況之干擾，也難以評估實際建築處之風場改變對壓力影響的變化程度。

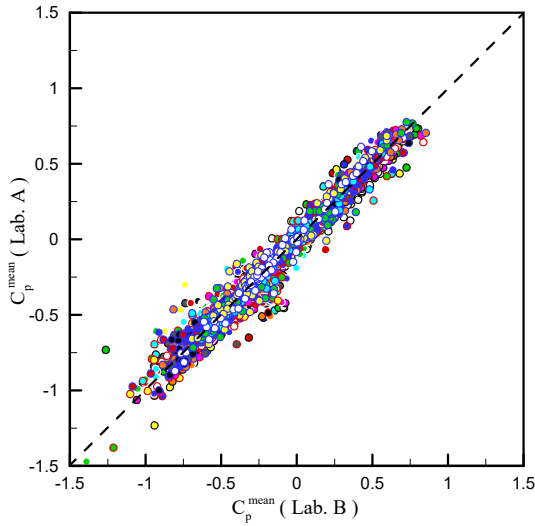


圖 3.31 全點位平均壓力比較圖

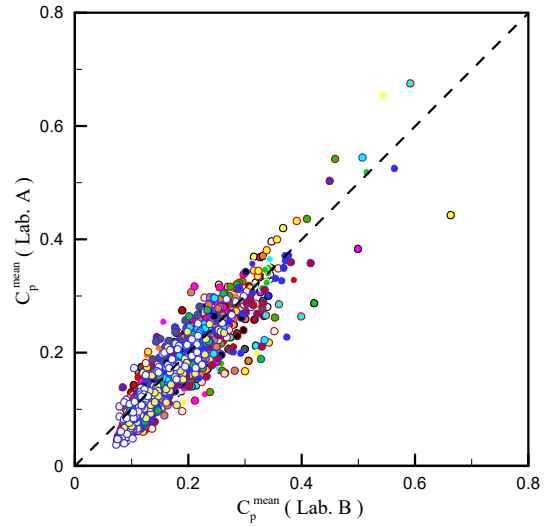


圖 3.32 全點位擾動壓力比較圖

(資料來源：本研究繪製)

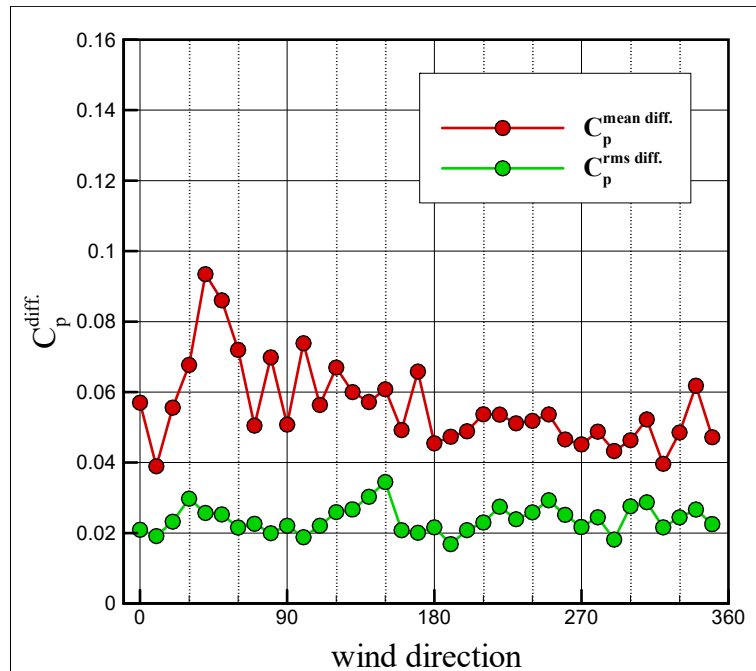


圖 3.33 風壓係數之平均差值

(資料來源：本研究繪製)

另將各風向角之所有點位之壓力係數平均差值繪製如圖 3.33，計算如下式：

$$C_p^{diff} = \sum ABS(C_{pi}^{Lab.A} - C_{pi}^{Lab.B}) / N \quad (3.6)$$

平均風壓係數之平均差最大約為 0.093，在整體平均壓力範圍約 3.7%，在擾動部分平均差最大值約為 0.033，為擾動壓力範圍之 6.6%。

風壓試驗之重點在於求取建築外牆或外表披覆物在特定回歸期風速內，可能遭受到之最大風壓，即設計風壓。一般常見的作法是將所有風向角，對各點位之壓力資訊進行極端值分析，並分別取出正負最大值。在進行極值風壓估計時，常採用甘保分佈進行擬合，如下式形式：

$$F(x; T) = \exp\{-\exp[-(x - U_T)/\alpha_T]\} \quad (3.7)$$

式中 $F(x; T)$ 為在 T 時內之累積機率密度函數， U_T 與 α_T 分別為 T 時內取出極值風壓之眾數(mode)與尺度因子(scale factor)。

在進行甘保分佈之數據擬合時，有多種方式可採用，包含最小二乘方法(least square method, LSM)、動差估計法(method of moment method, MOM)、最小距離法(Minimum-distance estimation, MDE)、最佳線性無偏差估算法(best linear unbiased estimation, BLUE)等方式，各實驗室採用之分析方式可能不同。由於使用不同回歸方式可能對數據結果產生影響，本案分析先統一採用最小二乘方法進行數據比對，後再用不同方法分析數據，檢視對極值風壓可能產生之差異。目前在評估極值所取常見之非超越機率為 78%，本案亦採此機率作為風壓極值估算，另本案極值風壓所對應之時長為 1 小時內發生之極值。

圖 3.34 為兩實驗室各點位極值風壓係數比較圖，兩實驗室皆採用 LSM 分析。在滿足第二章之原則性要求之狀況下，兩實驗室之極值壓力結果整體趨勢基本上相同，正風壓係數平均差距約為 7%；在負風壓部分則約為 12%，整體為實驗室 A 之結果略為偏大，如前所述，擾動風剖面略異可能導致產生差異。實驗室 B 另外採用 BLUE 方式進行分析，並與 LSM 法結果相比較(圖

3.35)。整體而言，採用 LSM 方法計算出之極值比 BLUE 方法計算出之值大約 8 至 10%，即採用 LSM 法評估極值可能得到較保守之結果。

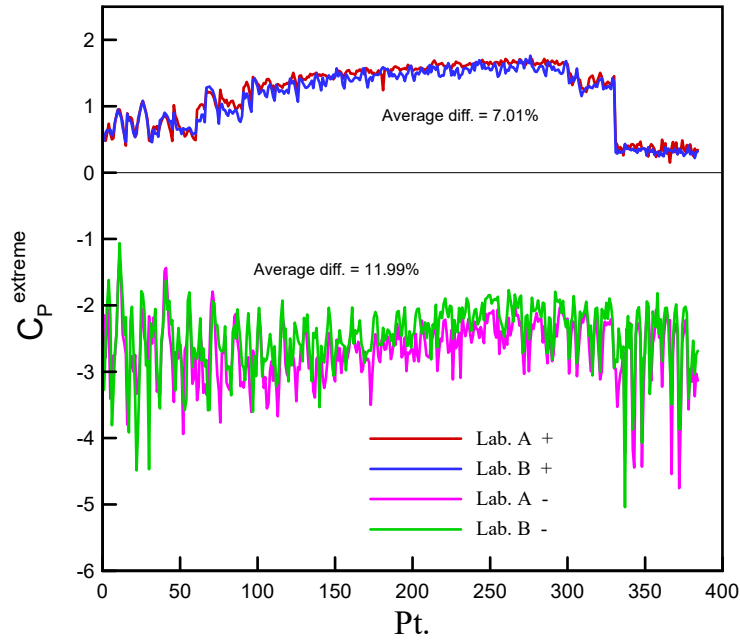


圖 3.34 兩實驗室極值風壓係數比較圖

(資料來源：本研究繪製)

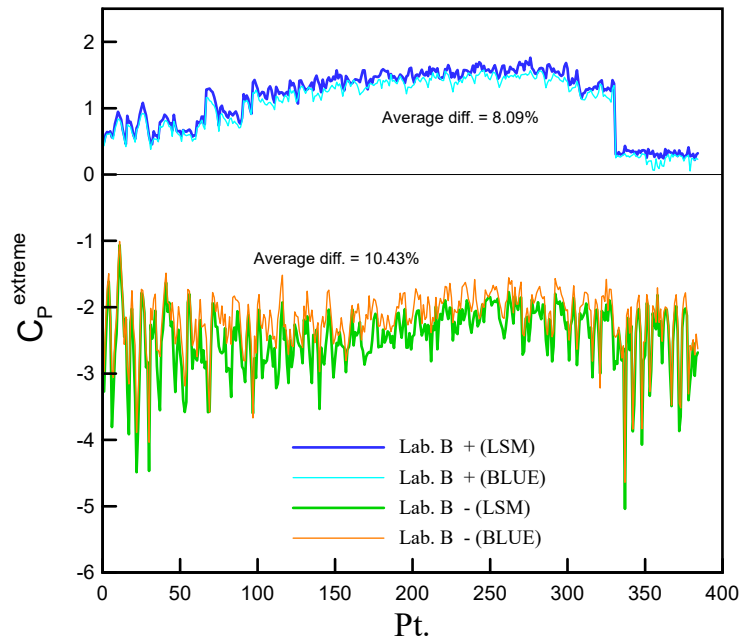


圖 3.35 實驗室 B 極值風壓係數比較圖(不同方式估算)

(資料來源：本研究繪製)

在計算設計風壓時，是將計算出之外風壓極值換算為實際風壓，本研究假想建築物座落於台北市，參照「建築物耐風設計規範與解說」之台北市設計風速為 42.5 m/s，由於其為 C 地況 10 分鐘之平均風速結果，參考高度為 10 m。而在實驗進行時所採用之參考風速為對應時長 1 小時之建築高風速，因此需先將設計風速進行轉換：

$$V_{182.88m,hr} = \left(V_{10C-design,10min} \times \frac{1.0}{1.06} \right) \times \left(\frac{300}{10} \right)^{0.15} \times \left(\frac{182.88}{400} \right)^{0.25}$$

$$= 54.913 \text{ m/s} \quad (3.8)$$

$$\text{風速壓 } Q = 0.5 \times 1.2 \times V_{182.88m,hr}^2 = 1809.285 \text{ Pa} \quad (3.9)$$

其中 1.0 為用途係數；1.06 為參考 Durst curve 之 10 分鐘平均風速與 1 小時平均風速之比值，乘上該係數將設計風速轉為 1 小時平均之結果；Q 為風速壓，將實驗所得之極值風壓乘上風速壓即為該處之最大風壓。

在內風壓部份，本案假想建物屬封閉式建築，採用「建築物耐風設計規範與解說」中封閉式建築之內風壓係數(GCpi)為±0.375，考慮正負壓和最大之狀況，則在受正壓時設定內風壓為負值；反之外風壓為負值，則內風壓設定為正，其參考風速壓與本案風壓計算之風速壓相同，皆取主建物最高處 182.88 m 之風速，其計算方式為：

$$\pm 0.375 \times 1809.285 = \pm 678.482 \text{ Pa} \quad (3.10)$$

將兩實驗室換算至實場之設計風壓製圖比對，如圖 3.36 與圖 3.37 所示。由圖形呈現可較清楚看出壓力分析結果在各面上之分佈，基本上設計風壓在各區域趨勢接近，雖實驗室 B 在建築上部之結果略小於實驗室 A，但一般在設計上常以樓層區分設計值，取各區段最大之設計風壓作為該區域之材料選定與設計依據，以設計風壓分布結果而言，各區段之設計風壓值約處同一範圍內，並不會造成明顯差異。

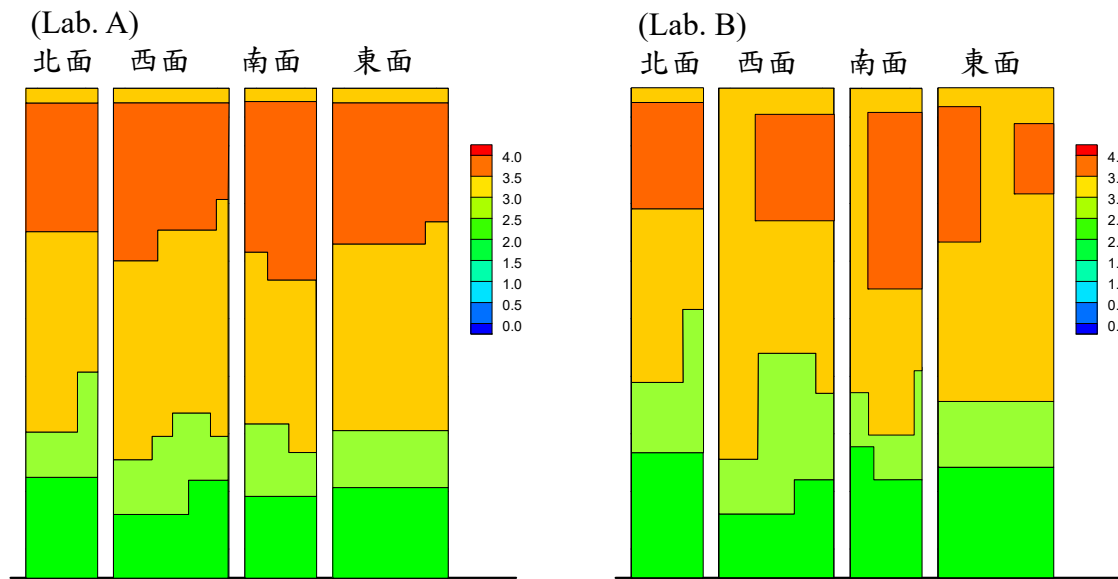


圖 3.36 兩實驗室設計風壓比較圖(正值)

單位：kPa (資料來源：本研究繪製)

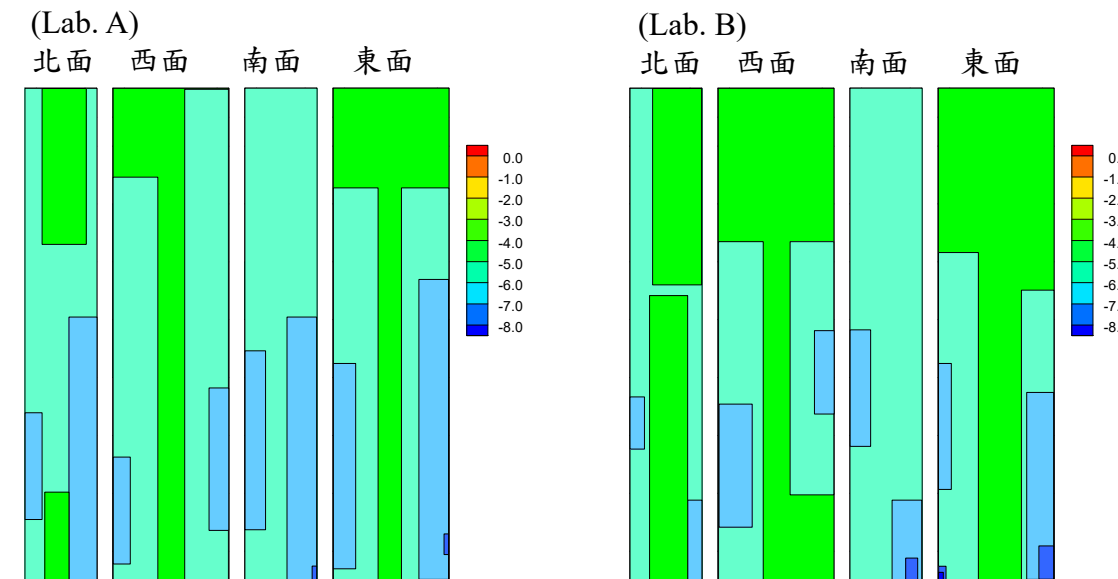


圖 3.37 兩實驗室設計風壓比較圖(負值)

單位：kPa (資料來源：本研究繪製)

3.3.3. 建築結構主抗風系統之風載重試驗結果

在風載重分析中，一般會檢視整體風力係數之結果，其可提供不同建物試驗比對之基準，並可快速檢視試驗結果之合理性，避免重大錯誤產生。本案分別於兩實驗室進行了高頻六力平衡儀試驗，由試驗結果可直接計算各項風力係數進行比對。X、Y 兩向平均風力係數(C_{Dx} 、 C_{Dy})和扭矩係數(C_M)係數之計算方式如下：

$$C_{Dx} = \frac{\overline{F_x}}{0.5\rho U^2 BH} \quad (3.11)$$

$$C_{Dy} = \frac{\overline{F_y}}{0.5\rho U^2 DH} \quad (3.12)$$

$$C_M = \frac{\overline{T_z}}{0.5\rho U^2 BDH} \quad (3.13)$$

其中 $\overline{F_x}$ 與 $\overline{F_y}$ 分別為 X 與 Y 向平均風力； $\overline{T_z}$ 為平均扭矩；U 為參考風速，本案取主建築頂處位置之風速； ρ 為空氣密度；B、D 與 H 分別為建築寬度(短邊)、建築深度(長邊)與高度。風力係數座標繪製如圖 3.38 所示。

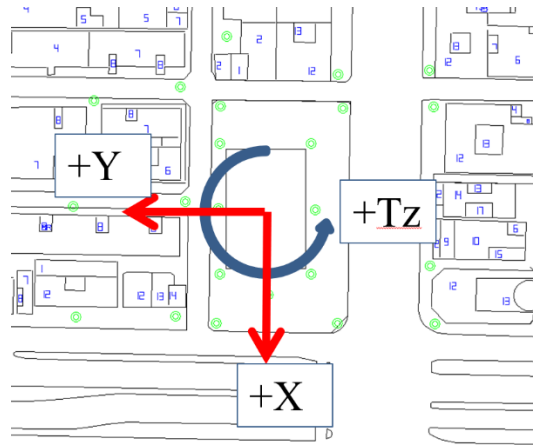


圖 3.38 建築受力座標示意圖

(資料來源：本研究繪製)

由於本案亦進行了高頻風壓量測試驗，將各點位之壓力對應面積積分後亦可得 $\overline{F_x}$ 、 $\overline{F_y}$ 與 $\overline{T_z}$ ，代入 3.10 至 3.12 亦可得各項風力係數，將試驗結果整理如圖 3.39 與 3.40 所示。模型 X 方向為正對北方，即風向角 0 度，試驗結果顯

示，X 向受力在風向角 30 度出現最大值，之後隨風向角增加而下降，並在 150 度出現最大負值，而在 90 度與 270 度周圍由於約略側向面對風場，平均值接近 0。在 Y 向由於其與 X 向差 90 度，受力相位亦差 90 度，另因該受力面較大，最大值亦略大於 X 向之最大值，出現在 90 度與 280 度。在扭轉向部分，由於建築幾何外型為矩形且對稱，扭矩每 90 度內即會發生正負向交替，約在風向角 60 度與 300 度發生最大值。

高頻力平衡儀實驗與高頻壓力積分實驗結果之趨勢並無太大差異，雖實驗室 B 之壓力積分結果隨風向角變化有抖動狀況，但整體趨勢與其他試驗結果皆吻合，兩實驗室之風力係數差異在受力方向上，力平衡儀試驗平均最大差異約為 0.057，而高頻積分結果平均最大差異約為 0.056。在扭轉向比對上，兩實驗室之高頻積分結果平均差異較小，僅為 0.006，而力平衡儀試驗差異則為 0.021。

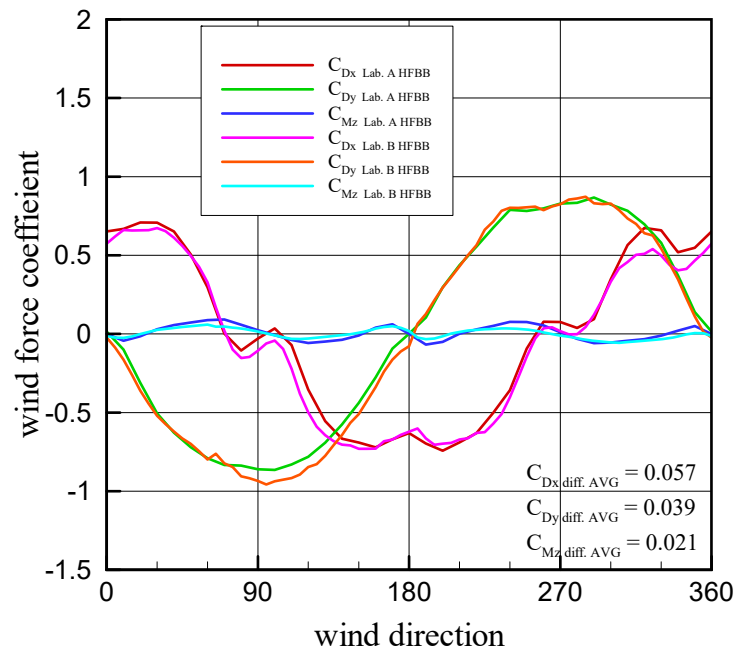


圖 3.39 高頻力平衡儀(HFBB)風力係數比對結果

(資料來源：本研究繪製)

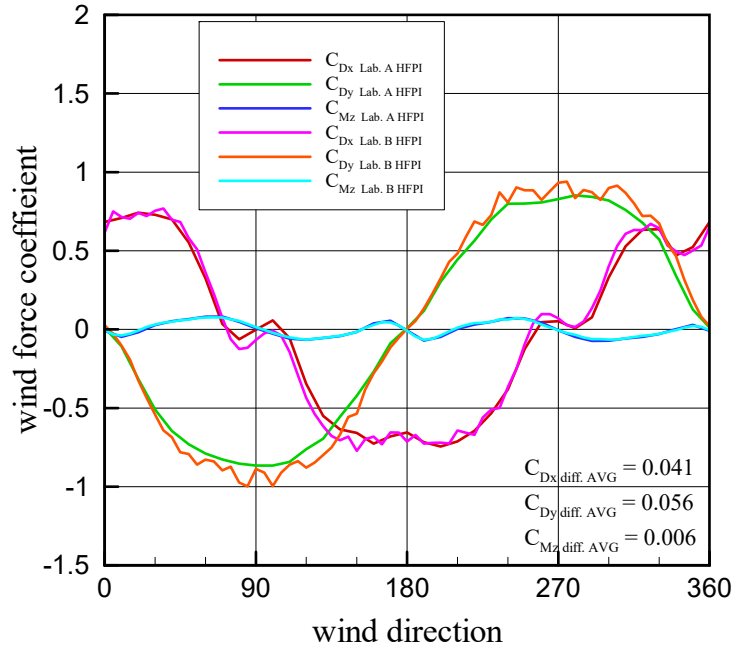


圖 3.40 高頻壓力積分(HFPI)風力係數比對結果

(資料來源：本研究繪製)

在載重組合部分，由於建築物所受之風力隨風向角而異，一般從事設計風力的風洞實驗時，會進行所有風向角之風力、風壓試驗，以取出最大之載重組合結果，本案建築物的設計風力與設計風壓皆由 36 組實驗中找出各載重型態之最大的風力組合。建築物在特定風向角的條件下之設計風載重為該風向的極值設計風力，其為風載重平均值與擾動值之組合。各樓層風載重的極值為：

$$F_{max,i} = \bar{F}_i + g\sigma_{F_{int,i}} \quad (3.14)$$

$$g = \sqrt{2 \ln(vT)} + \frac{0.5772}{\sqrt{2 \ln(vT)}} \quad (3.15)$$

其中 $F_{max,i}$ 為第 i 層之極值設計風載重； $\bar{F}_i$ 為第 i 層之平均風載重； g 為尖峰因子； $\sigma_{F_{int,i}} = \sqrt{B_i^2 + R_i^2}$ 為第 i 層之動態風載重均方根值，包含背景反應(B_i)，與共振反應(R_i)兩部分。而在計算平均風載重 $\bar{F}_i$ 與動態風載重之背景值 σ_{B_i} ，可採力平衡儀或風壓量測方式積分得歷時受力後計算。

由於建築物包含了順風向、橫風向及扭轉向之設計風力，在風力組合上，在順風向與橫風向為獨立事件，以及各方向之廣義力並非同時發生之假設下，求出兩方向向量組合之廣義力極大值，後經由慣性力方式分配到各樓層，即為各樓層之極大風力。簡言之，即為各方向風力之向量組合。

本案設計風力組合中 X 向與 Y 向風力，是根據 36 個風向角建築物之廣義外力乘以轉換函數後的極值廣義內力，配合下述之風工程理論所決定。各風向角的極值廣義內力由兩部分所組成：第一部分為平均值，第二部分為動態內力，是由尖峰因子與擾動均方根值相乘所得。兩者之間的組合可以為相加或相減，而求得極值風力，可下式表示之：

$$\hat{M} = \bar{M} \pm g_p \sigma_M \quad (3.16)$$

根據 Melbourne[43]的研究結果，假設 X 向與 Y 向之結構反應為高斯機率分佈，且兩個垂直方向風力的相關性可忽略不計，則 X 向 Y 向風力的組合圖形反應結果為橢圓形，如圖 3.41 所示。

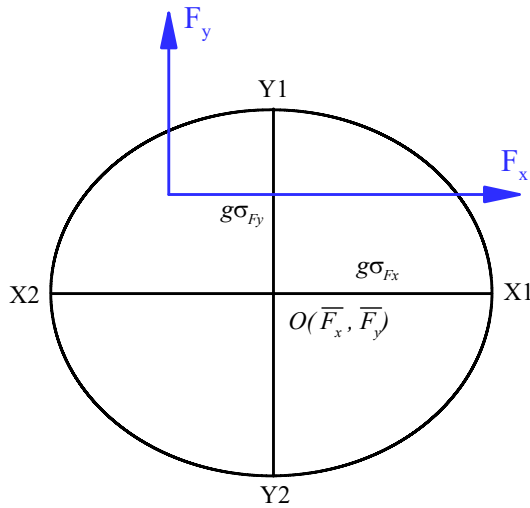


圖 3.41 x、y 方向風力組合示意圖

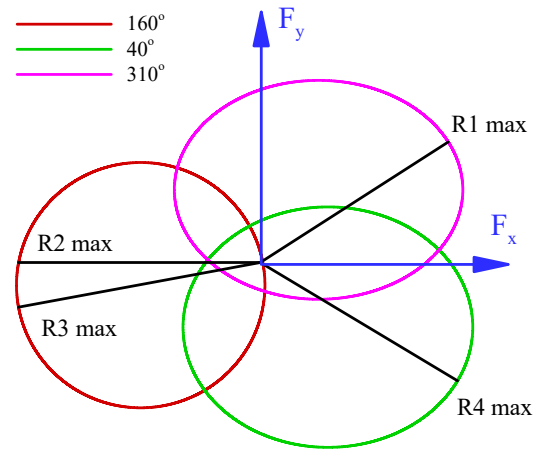


圖 3.42 四象限載重組合示意圖

(資料來源：本研究繪製)

此理論同樣適用於高層建築的設計風力風洞試驗，在 36 個風向角的 X 向、Y 向與扭轉向的量測數據中，首先以個別風向角的以 X、Y 向基底剪力為座

標軸，如圖 3.41 所示。圖中的 O 點代表該風向角 X 向、Y 向風力的平均值 ($\bar{F}_x$ 、 $\bar{F}_y$)，加上風力擾動後之正負極值，則可得到 X1、X2、Y1、Y2 四個座標平面上最大值，其分別代表 X 向及 Y 向基底剪力的最大及最小值。由這四點所構成之橢圓任一點代表在單一風向下，基底剪力的各種可能的載重組合。另由原點到橢圓上任意處之向量與座標軸之夾角，可表示出合力作用的方向 (圖 3.42)。由圖可知，在單一風向時便可能存在無限多種的載重型式，於實務上使用時，會取對於建築抗風系統影響最為嚴重的載重組合：

1. 橢圓圖中 X1、X2 分別代表當採用 X 向風力的極大或極小值時，Y 向風力採用平均值。若取 Y 向風力之極大或極小值時(Y1、Y2)，X 向使用風力之平均值。
2. 上述的四種載重組合雖然涵蓋了 X 向與 Y 向的最大風力，然而卻未包括 X 向與 Y 向的最大合力。因此，另需考慮的風力組合為橢圓圖中四個象限合力的最大值 R1、R2、R3、R4。

換言之，在單一個風向下應考慮 X1、X2、Y1、Y2、R1、R2、R3、R4 等 8 種風力載重組合。一般建築結構的扭轉向風力並非主要設計考量，因此扭轉向設計風載重逕直採用扭矩風載重的極值，也就是若在相同風攻角下，這 8 種載重型式有相同的扭矩。在單一個風攻角取 8 種載重型式，本案包含 36 個風攻角，共有 288 種載重型式。在所有風攻角載重組合中，分別選取 X1、X2、Y1、Y2、R1、R2、R3、R4 的最大值，即為該建築的設計風力組合。

若因建築物造型特殊，扭轉風力成為重要的設計考量因素時，若以前述的作法，將扭矩風載重的極值配合 8 種 X 向與 Y 向的風力組合，可能會過於保守。此時採用下列的風力組合形式(共 12 種)：

1. 採用 X1、X2、Y1、Y2、R1、R2、R3、R4 等八種 X 向與 Y 向風力組合時，使用該風向時的最大扭矩。
2. 選取 36 個風向角的絕對最大扭矩，配合 $\max(X1, X2)$ 與 $\max(Y1, Y2)$ 二種 X 向與 Y 向風力組合，分別為 T1X、T1Y 與 T2X、T2Y 四種載重組合。

本案參照「建築物耐風設計規範與解說」之台北市設計風速為 42.5 m/s，為 C 地況 10 分鐘之平均風速結果，用途係數採 1.0，在載重組合計算時同樣依前節風壓計算之方式，將風速轉為對應時長 1 小時之建築高風速，即 54.913 m/s。本案計算所引用之結構特性、尖峰因子與各樓層質量分佈情形詳見附錄三。由於假定建築物設定為鋼構造建築，其未包含阻尼器之結構阻尼比設定為 0.01。

將兩實驗室之 12 種載重組合結果整理如表 3.7 與表 3.8，並將兩者差值另列於表 3.9。由表可知兩實驗室計算出之載重組合數據具一致性，在發生最大載重之風向角與最大風載重皆相當接近，誤差多在 5% 以下。差異較明顯處為 X1、X2 之扭轉向載重與 T1Y、T2Y 之 Y 向載重，約有 20% 之差異，成因可能為在擾動風力估算上有些微差異造成，確切原因尚需進一步檢視資料後探討。其差值在進行結構極限設計檢核時可能略為造成差異，以本案例而言，實驗室 A 所得之載重結果略偏保守。

表 3.7 實驗室 A 之載重組合結果

載重組合形式	發生風向角	F _x (tonf)	F _y (tonf)	T _z (tonf-m)	合力 (tonf)
X1 : X _{peak} (+), Y _{mean} , T _{peak}	0	1724	16	-23864	1724
X2 : X _{peak} (-), Y _{mean} , T _{peak}	190	-1708	176	-21214	1717
Y1 : X _{mean} , Y _{peak} (+), T _{peak}	270	53	2978	-13212	2978
Y2 : X _{mean} , Y _{peak} (-), T _{peak}	100	58	-3007	-12092	3007
R1 : I resultant MAX, T _{peak}	270	117	2976	-13212	2979
R2 : II resultant MAX, T _{peak}	270	0	2977	-13212	2977
R3 : III resultant MAX, T _{peak}	100	0	-3005	-12092	3005
R4 : IV resultant MAX, T _{peak}	100	97	-3006	-12092	3008
T1X : T _{peak} (+), X _{peak} , Y _{mean}	180	-1623	11	25386	1624
T1Y : T _{peak} (+), X _{mean} , Y _{peak}	180	-660	2073	25386	2176
T2X : T _{peak} (-), X _{peak} , Y _{mean}	180	-1623	11	-26074	1624
T2Y : T _{peak} (-), X _{mean} , Y _{peak}	180	-660	2073	-26074	2176

(資料來源：本研究整理)

表 3.8 實驗室 B 之載重組合結果

載重組合形式	發生風向角	F _x (tonf)	F _y (tonf)	T _z (tonf-m)	合力 (tonf)
X1 : X _{peak} (+), Y _{mean} , T _{peak}	10	1659	-160	-20239	1666
X2 : X _{peak} (-), Y _{mean} , T _{peak}	180	-1749	4	-25319	1749
Y1 : X _{mean} , Y _{peak} (+), T _{peak}	270	71	2913	-12347	2914
Y2 : X _{mean} , Y _{peak} (-), T _{peak}	100	-8	-3071	-12054	3071
R1 : I resultant MAX, T _{peak}	270	338	2897	-12347	2917
R2 : II resultant MAX, T _{peak}	270	-12	2911	-12347	2911
R3 : III resultant MAX, T _{peak}	100	-79	-3070	-12054	3071
R4 : IV resultant MAX, T _{peak}	100	8	-3071	-12054	3071
T1X : T _{peak} (+), X _{peak} , Y _{mean}	180	-1749	4	24471	1749
T1Y : T _{peak} (+), X _{mean} , Y _{peak}	180	-719	1680	24471	1828
T2X : T _{peak} (-), X _{peak} , Y _{mean}	180	-1749	4	-25319	1749
T2Y : T _{peak} (-), X _{mean} , Y _{peak}	180	-719	1680	-25319	1828

表 3.9 兩實驗室載重組合結果之差異

載重組合形式	發生風向角	F _x	F _y	T _z	合力
X1 : X _{peak} (+), Y _{mean} , T _{peak}	10	3.95%	-1.10 *	17.91%	3.48%
X2 : X _{peak} (-), Y _{mean} , T _{peak}	10	-2.35%	38.67 *	-16.21%	-1.83%
Y1 : X _{mean} , Y _{peak} (+), T _{peak}	0	17.83 *	2.23%	7.01%	2.21%
Y2 : X _{mean} , Y _{peak} (-), T _{peak}	0	65.84 *	-2.09%	0.32%	-2.07%
R1 : I resultant MAX, T _{peak}	0	-61.5%	2.73%	7.01%	2.12%
R2 : II resultant MAX, T _{peak}	0	12.48 *	2.25%	7.01%	2.25%
R3 : III resultant MAX, T _{peak}	0	79.26 *	-2.10%	0.32%	-2.14%
R4 : IV resultant MAX, T _{peak}	0	88.80 *	-2.11%	0.32%	-2.06%
T1X : T _{peak} (+), X _{peak} , Y _{mean}	0	-7.16%	6.55 *	3.74%	-7.16%
T1Y : T _{peak} (+), X _{mean} , Y _{peak}	0	-8.20%	23.37%	3.74%	19.04%
T2X : T _{peak} (-), X _{peak} , Y _{mean}	0	-7.16%	6.55 *	2.98%	-7.16%
T2Y : T _{peak} (-), X _{mean} , Y _{peak}	0	-8.20%	23.37%	2.98%	19.04%

注：*表示因兩者數值接近 0，以差值表示。

(資料來源：本研究整理)

另將各載重組合之分層結果輸出如圖 3.43 至圖 3.54，除 X1、X2 之扭轉向載重與 T1Y、T2Y 之 Y 向載重略有差異外，在建築長邊正對風場(90 度與 270 度上下)之扭轉向載重分佈，於底部與頂部略有差異，但其差異應不至於影響整體結果，其餘分層載重之結果皆相當吻合。

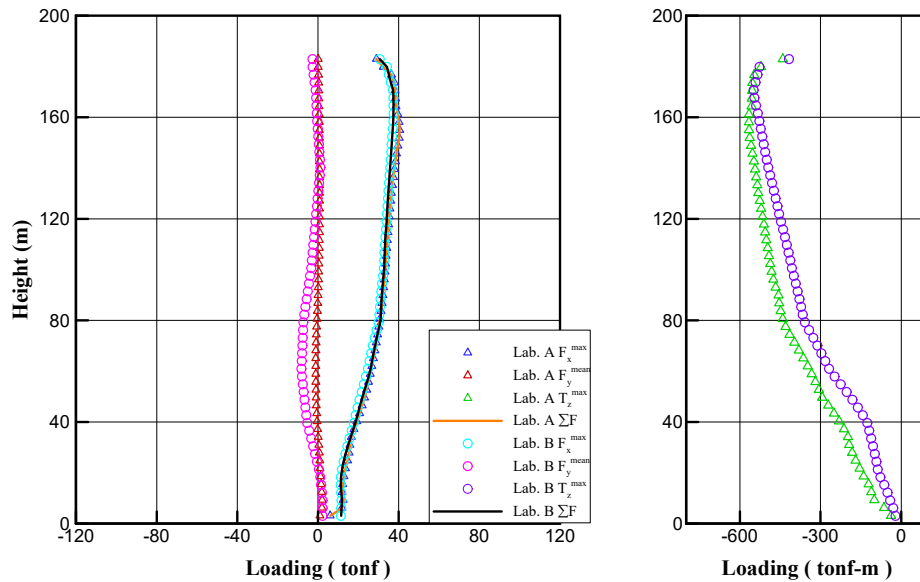


圖 3.43 主抗風系統設計風力載重組合比較圖(X1)

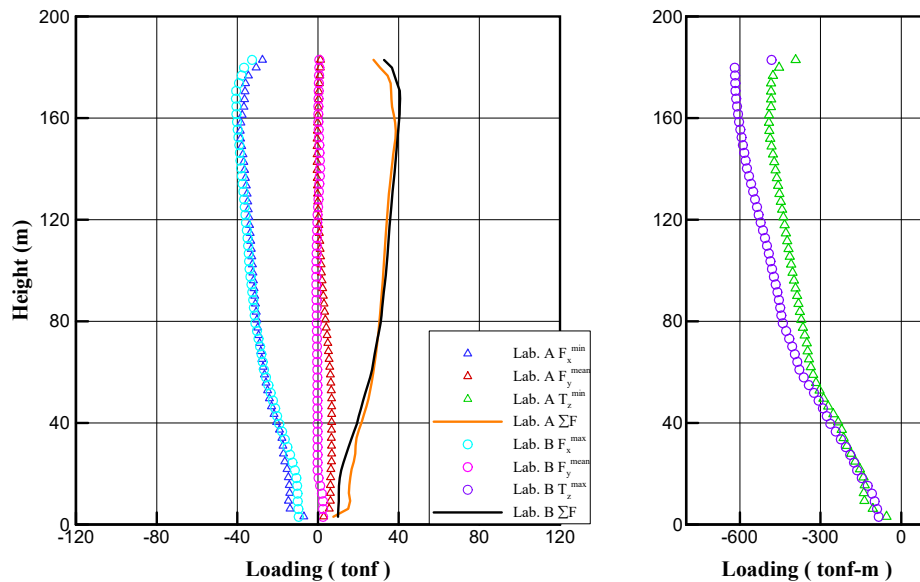


圖 3.44 主抗風系統設計風力載重組合比較圖(X2)

(資料來源：本研究繪製)

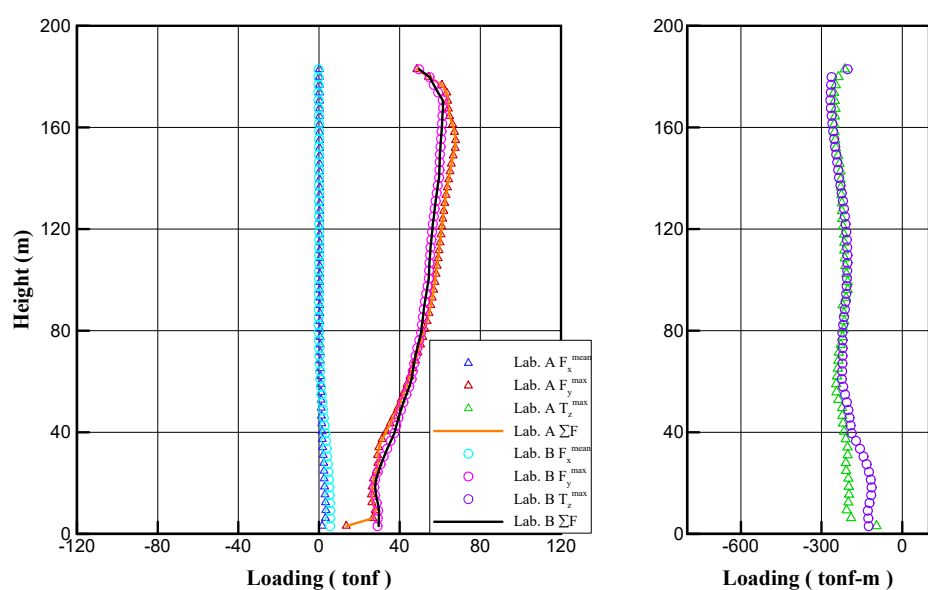


圖 3.45 主抗風系統設計風力載重組合比較圖(Y1)

(資料來源：本研究繪製)

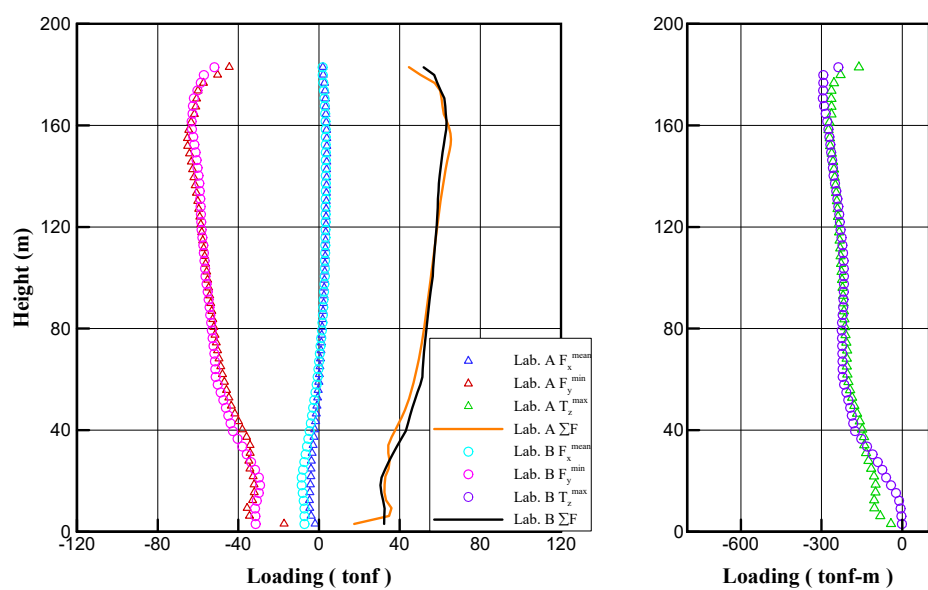


圖 3.46 主抗風系統設計風力載重組合比較圖(Y2)

(資料來源：本研究繪製)

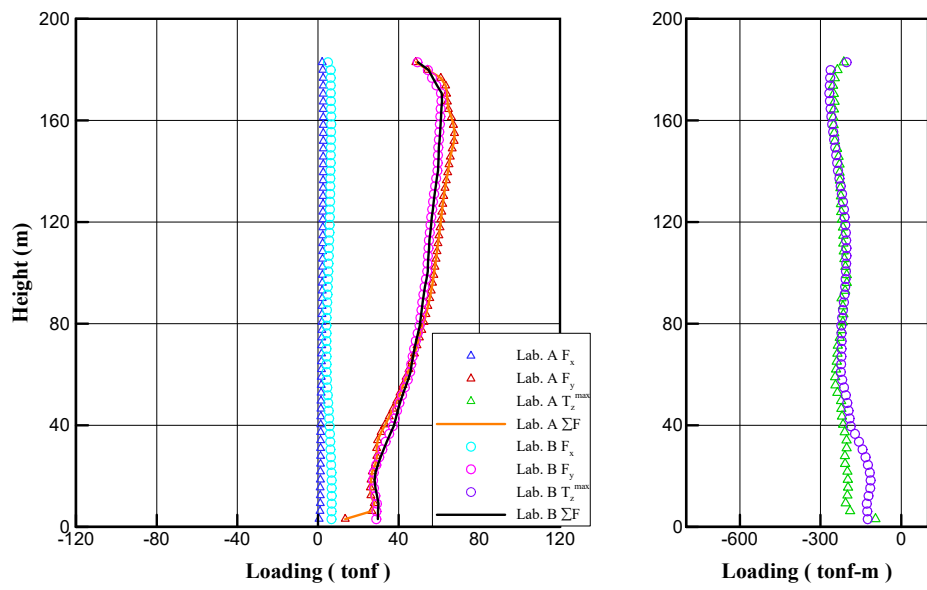


圖 3.47 主抗風系統設計風力載重組合比較圖(R1)

(資料來源：本研究繪製)

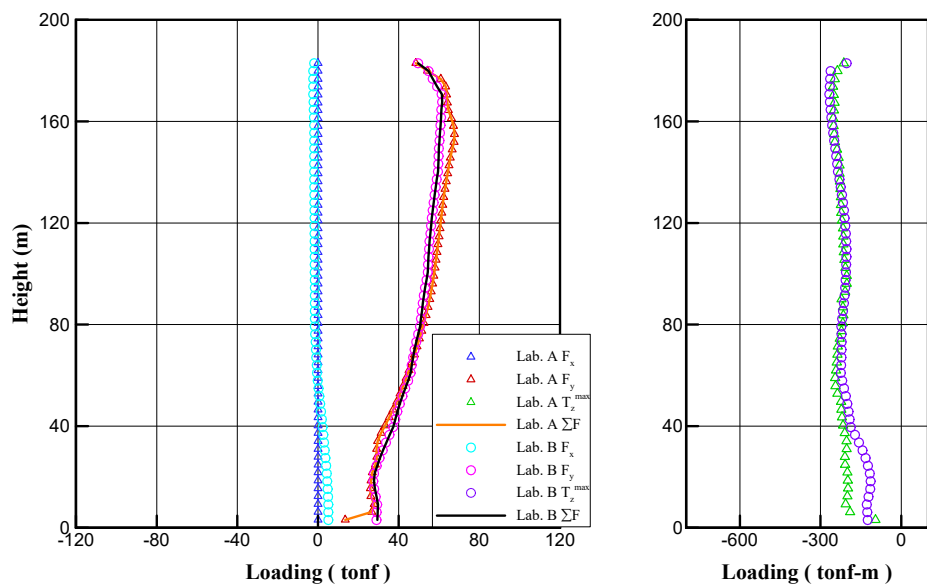


圖 3.48 主抗風系統設計風力載重組合比較圖(R2)

(資料來源：本研究繪製)

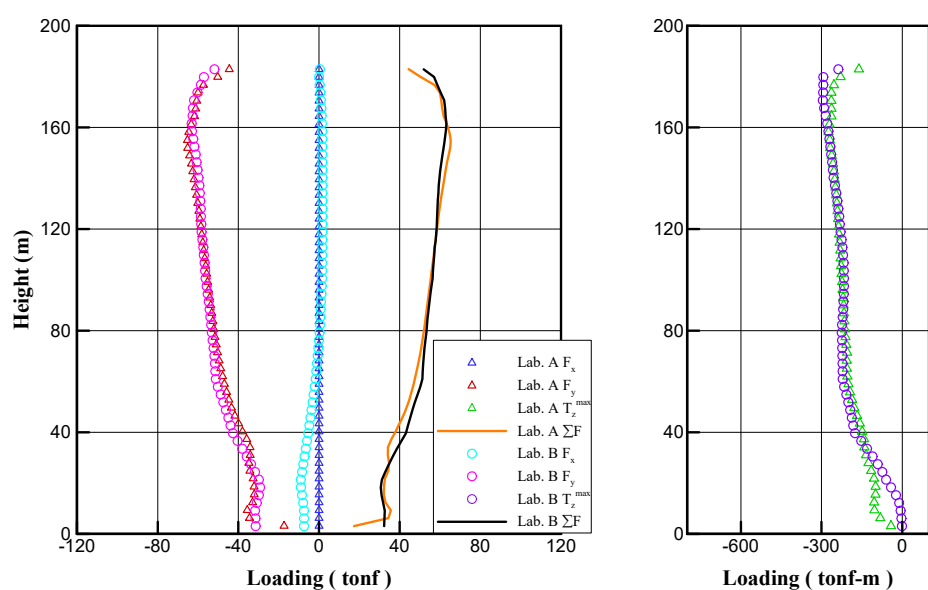


圖 3.49 主抗風系統設計風力載重組合比較圖(R3)

(資料來源：本研究繪製)

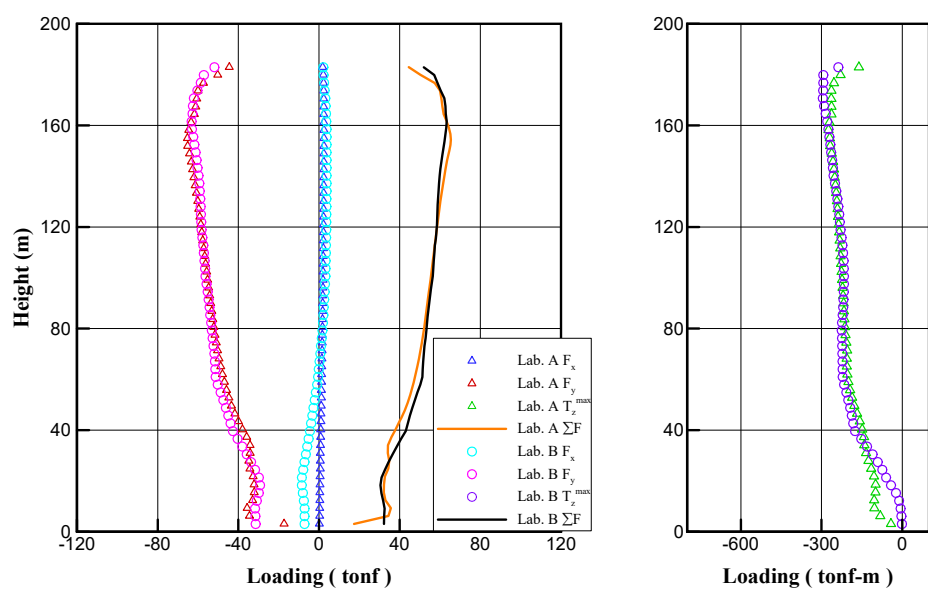


圖 3.50 主抗風系統設計風力載重組合比較圖(R4)

(資料來源：本研究繪製)

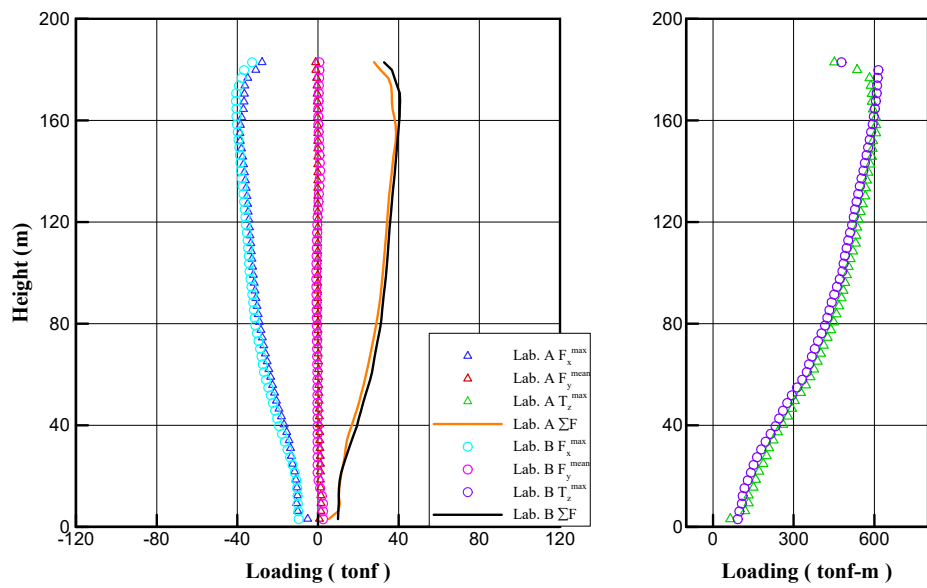


圖 3.51 主抗風系統設計風力載重組合比較圖(T1X)

(資料來源：本研究繪製)

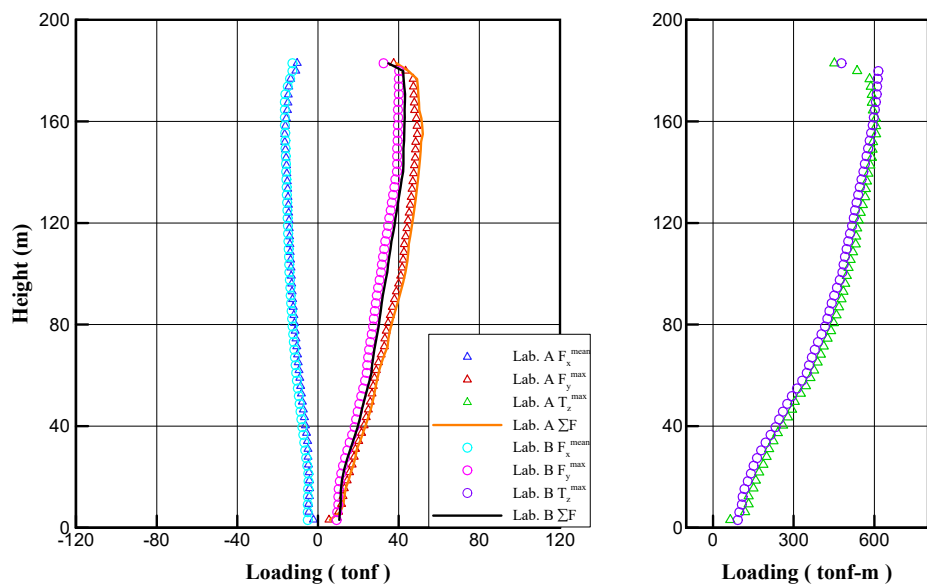


圖 3.52 主抗風系統設計風力載重組合比較圖(T1Y)

(資料來源：本研究繪製)

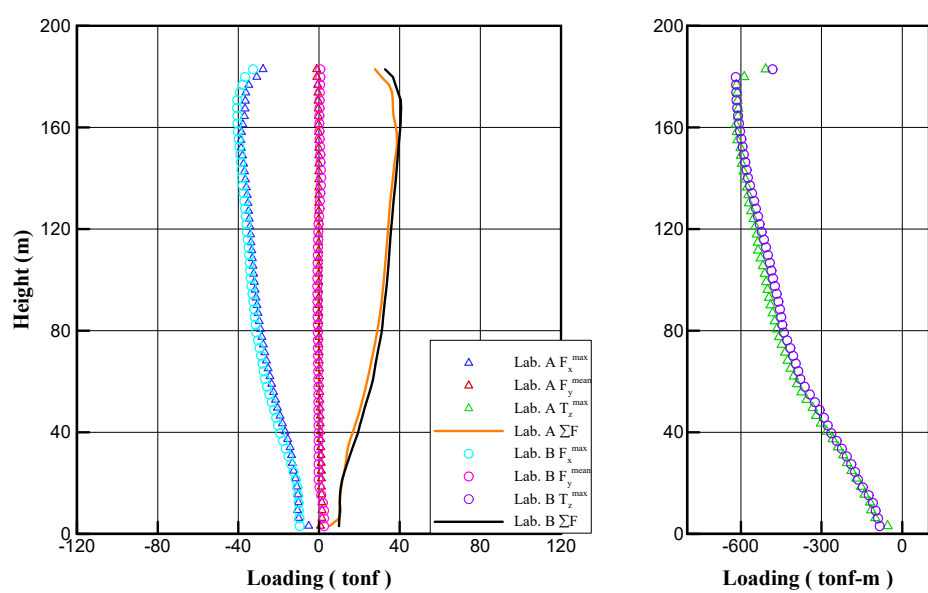


圖 3.53 主抗風系統設計風力載重組合比較圖(T2X)

(資料來源：本研究繪製)

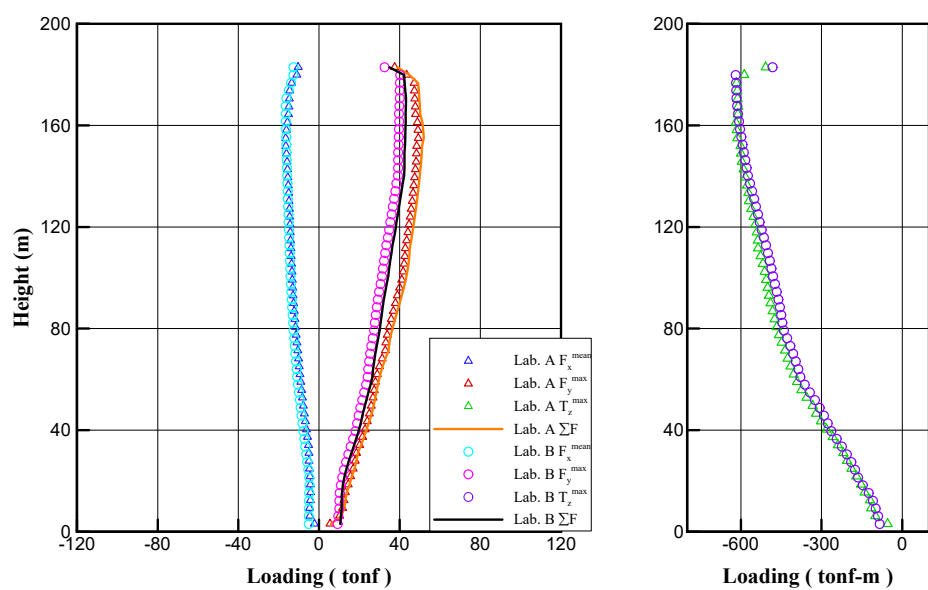


圖 3.54 主抗風系統設計風力載重組合比較圖(T2Y)

(資料來源：本研究繪製)

在最高居室樓層角隅之振動加速度尖峰值評估時，需同時計及順風向、橫風向與扭轉向振動所造成之加速度反應。本案以前述之載重組合結果，分別計算各載重組合之順風向、橫風向與扭轉向於勁度中心之加速度值，將結果乘上計算所使用之尖峰因子得各向之尖峰加速度，再將此尖峰加速度轉換至建築物角隅處，取得角隅位置之尖峰加速度。各載重組合之最大尖峰加速度結果如表 3.10 所示，在加速度部分略有差異，兩實驗室在 X 方向之結果接近，而實驗室 A 在 Y 方向計算出之加速度略高，成因可能為前段之載重組合結果中，T1Y 與 T2Y 之 Y 向載重略高造成。根據內政部「建築物耐風設計規範及解說」規定，建築物最高居室樓層角隅之振動加速度尖峰值不得超過 0.05m/s^2 ，此值適用於住宅，對辦公大樓而言，其值可略予提高，以本案之計算結果而言，都落於法規值內。

表 3.10 兩實驗室載重組合最高居室尖峰加速度結果

結構阻尼比	最高居室樓層尖峰加速度(m/s^2)		
	A_{xc}	A_{yc}	A
0.01			
Lab. A	0.0145	0.0127	0.0192
Lab. B	0.0144	0.0078	0.0164

注： A_{xc} ：最高居室樓層角隅位置之尖峰加速度水平 X 向分量(含扭轉向貢獻)

A_{yc} ：最高居室樓層角隅位置之尖峰加速度水平 Y 向分量(含扭轉向貢獻)

A：最高居室樓層角隅位置之尖峰加速度(考慮水平 X 向、Y 向及扭轉向合併之貢獻)

(資料來源：本研究整理)

3.3.4. 結構氣彈力試驗簡述

若建築物之柔性很高，欲採以氣彈試驗進行分析者，應審慎對其結構特性進行縮尺，由於實際應用案例稀少且模擬複雜，本案在此僅提供原則上之模擬條件以及應注意之項目以供參考。

一般對於細長之高層建築而言，其受風力影響所產生之運動狀態主要為順\橫風向之搖擺振動與整體結構扭轉運動，因此也需確保模型之搖擺振動與

扭轉運動相似於實際建築物。為了滿足上述目的，氣彈力模型風洞試驗除需滿足風場特性相似與結構外觀之幾何相似外，建築物之慣性力(inertia)、結構勁度(stiffness)與結構阻尼(damping)亦需相似於實際之結構。因此於模型製作時，決定長度縮尺(λ_L)後，其餘縮尺需透過滿足以下條件而得：

$$\text{密度比} \quad \frac{\rho_b}{\rho} = \frac{\text{inertia forces of building}}{\text{inertia forces of flow}} \quad (3.17)$$

$$\text{勁度特性} \quad \frac{E}{\rho V^2} = \frac{\text{elastic forces}}{\text{inertia forces of flow}} \quad (3.18)$$

$$\text{阻尼比} \quad \xi = \frac{\text{dissipative structural forces}}{\text{inertia forces of flow}} \quad (3.19)$$

其中 ρ_b 、 ρ 、 E 、 V 與 ξ 分別為結構物密度、空氣密度、彈性模數、流場速度與阻尼比。空氣密度於模型試驗與實際狀況時基本上應為一致，若為滿足密度比，則模型之密度需相等於實際結構密度(即密度縮尺 $\lambda_\rho = 1$)。而由密度與長度之組合，可得質量與質量慣性矩縮尺如下

$$\lambda_M = \frac{M_m}{M_p} = \frac{\rho_m}{\rho_p} \times \frac{L_m}{L_p} = \lambda_\rho \lambda_L^3 = \lambda_L^3 \quad \lambda_I = \frac{I_m}{I_p} = \lambda_L^5 \quad (3.20)$$

其中 M 、 L 、 I 分別表示結構質量、長度與質量慣性矩，下標 m 與 p 分別代表模型(model)與實際結構物(prototype)。在勁度特性部分，滿足其條件表徵於實際高層建築物為結構之振動頻率需成比例如下

$$\left(\frac{fD}{V} \right)_m = \left(\frac{fD}{V} \right)_p \quad (3.21)$$

因此，在決定模型與實際結構物之頻率比後，即，選定頻率縮尺為 λ_f ，則風速縮尺如下式表現

$$\lambda_v = \frac{f_m D_m}{f_p D_p} = \lambda_f \times \lambda_L = \frac{\lambda_L}{\lambda_T} \quad (3.22)$$

由於高層建築物之動態行為與重力效應無關，因此不須滿足福祿數相似，但模擬之風速範圍仍需達到鈍體高雷諾數之漸進不變之條件。至此，密度、質量、長度、風速、頻率與時間之縮尺皆已定義，由其縮尺組成可得結構之勁度縮尺為

$$\text{平移向勁度} \quad \lambda_K = \lambda_f^2 \times \lambda_M = \frac{\lambda_v^2 \lambda_M}{\lambda_L^2} = \frac{\lambda_v^2 \lambda_p \lambda_L^3}{\lambda_L^2} = \lambda_v^2 \lambda_L \quad (3.23)$$

$$\text{扭轉向勁度} \quad \lambda_{K_T} = \lambda_v^2 \lambda_L^3 \quad (3.24)$$

而在結構阻尼部分，製作上設計為 $\lambda_\xi = 1$ ，如此在前述之勁度、質量等縮尺條件下，能確保模型運動之能量消散狀況相似於實際建築物，以達正確模擬結構之動態反應。若依上述條件設計製作氣彈模型，若幾何縮尺為 1/250，考量合理之試驗風速範圍，將風速比設定為 6、密度比與阻尼比設定為 1，則本案 CAARC 建築縮尺動力特性如表 3.11 所示，相關之試驗物理量轉換可參考表 3.12 進行計算。

試驗量測之風速範圍應參考技術原則內容，試驗之約化風速應涵蓋達到 8 以上，在此案例實驗風速為 11.6 m/s。試驗架設參考圖 3.55 所示，原則上結構勁度由底部彈簧模擬，並在下方架設雷射位移計或於模型上放置加速度規量測動態反應，在該機構下方設置阻尼系統模擬結構阻尼，於試驗架設後應確認結構振動頻率與阻尼比是否符合需求。由於此類氣彈試驗可直接量測振動位移量或加速度值，應透過適當之結構計算方式求得基底之剪力或扭矩，後續分析則與六力平衡儀試驗量測方式相同。

表 3.11 CAARC 建築縮尺動力特性

	質量	第一模態頻率	試驗風速範圍
實體建築設定	50970 ton	0.286 Hz	6-70 m/s
縮尺模型設定	3.26 kg	11.92 Hz	1-11.6 m/s

(資料來源：本研究整理)

表 3.12 CAARC 建築之基本結構參數

物理特性	單位	縮尺參數	計算因子	縮尺比例
長度	M	λ_L	(選定)	n_L
風速	m/s	λ_U	(選定)	n_U
時間	S	λ_T	λ_L/λ_U	n_L/n_U
振動頻率	Hz	λ_f	$1/\lambda_T$	n_U/n_L
加速度	m/s ²	λ_a	λ_L/λ_T^2	n_U^2/n_L
密度	kg/m ³	λ_ρ	(選定)	1
質量	kg	λ_M	$\lambda_\rho \lambda_L^3$	n_L^3
質量(單位長度)	kg/m	λ_m	λ_M/λ_L	n_L^2
轉動慣量	kg-m ²	λ_{MMI}	$\lambda_M \cdot \lambda_L^2$	n_L^5
彎曲勁度(K_{bending})	kg/s ²	$\lambda_{k\text{-bending}}$	$\lambda_\rho \lambda_L^3/\lambda_T^2$	$n_L n_U^2$
扭轉勁度(K_{twist})	kg/s ² -m ²	$\lambda_{k\text{-twist}}$	$\lambda_\rho \lambda_L^5/\lambda_T^2$	$n_L^3 n_U^2$
阻尼比	-	λ_ξ	(選定)	1

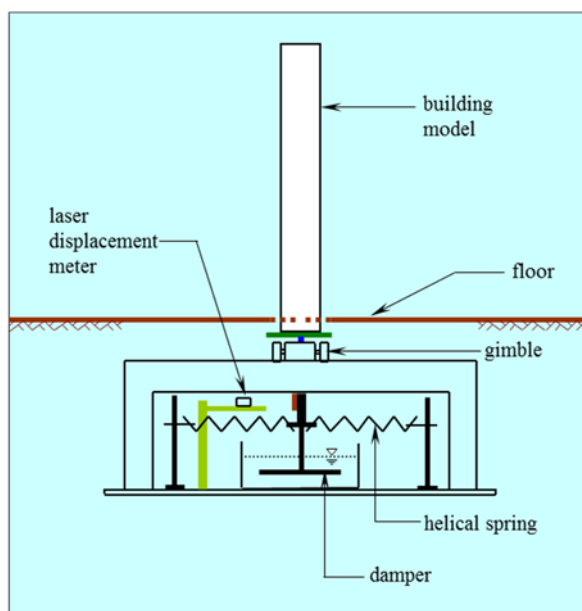


圖 3.55 剛性氣彈試驗量測架構示意圖

(資料來源：本研究繪製)

第四章 風洞試驗報告評定機制

在滿足前章節建議參照之風洞試驗技術原則條件下，由兩實驗室分別進行風洞試驗所產出之數據，經比對結果後具有一定程度之相似性，亦即在滿足本案建議之試驗技術原則條件下，具備風洞實驗技術之實驗室，並經專業人員操作並進行數據分析，應可產出同趨勢且數據量級類似之結果。本章節將初擬報告評定方式，以及討論該評定機制執行之法源依據。

第一節 風洞試驗報告評定方式

由於建築風洞試驗之過程複雜，由流場建置、周邊環境建置、量測主模型製作以及量測分析方式等，皆會對結果造成影響，因此對於報告評定機制，應採評定試驗設計、過程、分析方式以及呈現內容，而非評定報告之量測結果為宜。將第二章之內容簡化整理主要評估項目，如下敘述：

4.1.1. 總則內容

總則部分中包含風場模擬資訊、縮尺特性以及其他應遵守之基本試驗要求。於試驗報告中，應提供大氣紊流邊界層之統計資料，如平均、擾動風速剖面、積分長度尺度、頻譜能量分佈以及主流向是否保持零壓力梯度等風場資訊。由於來流風場條件將直接影響待測件之風壓分佈與風力，為基本滿足事項，一般而言，在平均風速剖面與擾動風速剖面應滿足對應地況條件。

進行風洞建築相關之風洞試驗皆為縮尺模型試驗，縮尺比例亦為試驗之重要確認事項，其將影響試驗數據轉換至現場資訊之比例。在試驗規劃時亦需考量縮尺時間之效應，以確保所擷取之試驗時間長度足夠進行數據分析，應在試驗前估算時間縮尺，以避免後續分析之數據量不足，無法反應真實時長之代表性。試驗量測時間越長當然數據越足夠，但仍需考量實驗室之試驗能量與執行之經濟性，在進行建築風洞檢測試驗時，建議至少取 1 小時之對應現場時間。由於時間縮尺係由長度縮尺與風速縮尺而定，在長度縮尺訂定

後，改變風速縮尺可得不同之時間縮尺，但需考量實尺寸風場之風速一般大於實驗室之風速 2 至 3 倍以上；再者，由於多數模型之強度不足，亦或量測儀器之承受能力有限，調整幅度有限，試驗之時間縮尺一般約為 40 至 100 左右。

在報告中應列出或說明其餘試驗要求之數據，包含阻塞比、試驗雷諾數、模型製作精度、採用之氣象資料以及採用之設計風速與評估風向，其中採用之數值可參考本風洞試驗技術原則內容或已發表至學術期刊之文獻內容，若不符合者應說明原因以及採取之修正方式。

4.1.2. 環境風場舒適度評估內容

在評估準則部分，由第三章試驗比對結果可發現，相同準則由於不同實驗室之量測儀器、縮尺比例、風場條件等因素，評估結果原則上趨勢一致，但計算之風速機率確實可能產生差異。由於各種評估準則皆由人體感受度進行調查，在發生機率上亦有不同觀點之決定，如一般狀況下，採 Melbourne 標準容易得到較嚴苛之結果；而採 Hunt 等人提出之標準則可能得較舒適之感受等級。在舒適度判定上並無法取得完全相同之結果，本案建議在選取舒適度評估準則時，應讓業主了解採用該標準可能產生之結果偏嚴苛或保守，經討論後審慎決定採用之標準。或採取另一較客觀之方式，即，取複數標準進行舒適度評估，並採用最保守之判定結果，預期可能發生最差舒適度之位置，使業主可進行檢討與規畫改善措施。

風環境評估報告內容應包含總則，試驗應依照使用條件與周邊行人區域設定量測之位置，另應說明建築基地之量測密度，以及量測時採用之試驗儀器及響應頻率等。另應明述測量點位之分佈、提供各點位之無因次風速資訊、建築興建前後之變化以及植栽對風環境判定之影響。

4.1.3. 局部構件及外部披覆物所受之局部風壓試驗內容

風壓量測試驗中，主要目的在於求出特定回歸期內，可能遭遇到之最大風壓力。而風壓分佈與量測之位置相關，因此檢測實驗室應審慎規畫量測點

位，原則上接近邊角轉折處應較密，而在大範圍低壓區域可降低量測密度。由於壓力量測需經無因次化之過程轉換至實尺寸之壓力，因此應注意量測參考壓力與動壓力之環境，避免量測誤差造成轉換之差異。另在壓力量測通常透過風壓測管，使用壓力掃描儀器擷取數據，因此需注意儀器之頻率響應以及壓力經過管線傳輸後之扭曲較正。

在數據分析方面，在評估風壓極值時可採用不同之極端值分析進行，如第二章所述之方式，另亦可採統計書籍提及之方式或採已發表至學術期刊等文獻資料方式進行數據分析。在分析得出各點位之風壓極值後，應考量建築型態(開放式、部分封閉式與封閉式)之內風壓以決定設計風壓值，相關內風壓係數可參照「建築物耐風設計規範及解說」之建議值。

在局部構件與外部披覆物所受之局部風壓試驗報告中應包含總則內容，試驗應說明表面風壓之量測點位，以及量測時採用之試驗儀器及響應頻率等資訊。另應包含極值風壓分析方式、設計風速壓、內風壓之計算，提供設計風壓係數與風壓值之表格，並將設計風壓值以等壓區域簡化為圖形表示等資訊。

4.1.4. 建築結構主抗風系統之風載重風洞試驗內容

建築結構主抗風系統之風載重試驗，其主要目的在於求出特定回歸期內可能遭遇到之最大風載重與對應之各樓層載重，提供結構技師計算該建築之設計強度是否通過檢核，另外可由計算出之載重資料評估半年回歸週期下風速之最高居室加速度值是否符合法規。載重可由力平衡儀與壓力積分方式獲得平均與背景反應資訊，共振反應則由時序資料配合結構模態等資料計算得之，將載重平均值加上乘上尖峰因子之擾動值，計算出所有風向之載重組合。

報告內應說明載重之測試方式，所採用儀器之資訊、採樣時間與採樣頻率。主建築物之結構特性資料，包含質量分佈與模態形狀等資訊應為報告附件做為參考資料。整體風力係數應以圖或表呈現，以供快速判斷建築物隨風向之受力趨勢。應以表格呈現最大主抗風系統設計風力載重組合之基底合力結果，而各載重組合之各樓層風載重數據結果，將由結構技師進行計算檢核，

數據資料表格應包含在報告內容內，建議另以圖形呈現以供快速判讀載重分佈狀況。依主結構類型阻尼比設定，其半年回歸期風速下之最高居室層加速度結果應與「建築物耐風設計規範及解說」之建議值 0.05 m/s^2 比對，另可輸出不同阻尼比之資料作為參考。

4.1.5. 綜合評定表

將上述內容整理為初版綜合評定表如附錄十，內容採是否達到本案提出之風洞試驗之技術原則草案內容之要求，並以勾選方式針對各項目進行評定。由於風洞試驗之技術原則草案之內容包含許多風工程專業知識，建議由風工程領域之學者、研究人員與檢測單位擔任執行評定之人員，亦或可採委託審查方式，交付國內專精風工程領域之學術研究團體，如社團法人中華民國風工程學會進行。評定內容除了該報告是否滿足風洞試驗之技術原則草案內容之要求外，若在審查時發現該草案內容範圍外之疑慮，其並可能對檢測案件產生安全性之重大影響者，亦可於評定表單內註明，並請檢測執行單位檢視回覆，釋清疑慮；亦或提早發現問題，增加欲興建結構之安全性。

第二節 風洞試驗報告評定之法源討論

4.2.1. 需執行風洞試驗之法規依據

現今國內建築需進行風洞實驗者，主要分為環境評估以及結構安全兩方面。環境評估主要為「開發行為應實施環境影響評估細目及範圍認定標準」中第 26 條內容：「**高樓建築，其高度一百二十公尺以上者，應實施環境影響評估**」。而環境影響評估則參照「開發行為環境影響評估作業準則」第 50 條內容：「**高樓建築之開發，應重視其品質與景觀之整體性，並預測及評估可能造成交通、停車或帷幕牆（含太陽能板）反光、室內停車場廢氣排放等之影響，以及高層結構體對周遭風場、日照、電波、空氣污染物擴散之干擾，並納入環境保護對策；必要時應進行相關之模擬分析或試驗**」。由上述條文，在高層建築物需進行環境影響評估時，一般會要求進行風洞試驗檢視新建築對風環境之影響。

另各地方政府依自治條例所訂定之法規，如台北市「臺北市綜合設計公共開放空間設置及管理維護要點」中第 7 條內容：「**建築高度超過六十公尺者，應做風洞效應評估，尤其側重超高層建築物所可能產生之微氣候及對公共開放空間使用之影響**」。以及新北市「板橋（江翠北側地區）都市設計審議原則」中第四項之風環境管制事項等，皆較明確提及應進行風洞試驗評估風環境狀況。

而在結構安全部分，由「建築法」第 34 條內容：「**直轄市、縣（市）（局）主管建築機關審查或鑑定建築物工程圖樣及說明書，應就規定項目為之，其餘項目由建築師或建築師及專業工業技師依本法規定簽證負責。對於特殊結構或設備之建築物並得委託或指定具有該項學識及經驗之專家或機關、團體為之；其委託或指定之審查或鑑定費用由起造人負擔**」。各地方政府再以此法條訂定各地方之「特殊結構委託審查原則」，除定義特殊結構物外，亦規定經核定之審查單位。另在「建築技術規則構造編」中之耐風設計章節第 42 條提及「**1.建築物之耐風設計，依規範無法提供所需設計資料者，得進行風洞試驗。2.進行風洞試驗者，其設計風力、設計風壓及舒適性評估得以風洞試驗結果設計之。3.風洞試驗之主要項目、應遵守之模擬要求及設計時風洞試驗報告之引用，應依規範規定**」。意即在「建築物耐風設計規範與解說」中無法提供設計風壓與設計風載重之結構物，如高度超過 100 公尺之建築或風力效應明顯時建議進行風洞試驗，以取得較準確之風載重資訊。

在上述兩狀況下，業主委託檢測實驗室進行風洞試驗後，其流程分別是進入都市環境評估審議與進行建築結構外部審查，意即業主一般在取得風洞試驗報告後，即視為接受報告內容並交付審查。雖就本案之試驗比對結果可知，國內進行風洞檢測之實驗室應皆具備完整分析能力，於兩實驗室進行之試驗結果亦無顯著差異。但若為國外實驗室進行之試驗結果，由於目前尚欠缺對其風洞試驗報告審查之機制，如此則較難控制品質，因此，可採建立試驗報告之審查機制以維持並確保試驗品質符合要求。

4.2.2. 建立風洞試驗報告評定機制之法規依據

目前並無法源提及風洞試驗報告書需經審查評定後方具有使用效力，而風洞試驗之過程繁瑣，並需大量理論背景支持進行，才可得可靠與正確的結果，若試驗由非風工程專業領域人員執行，則可能產生錯誤估算風載重與風壓極值。倘若高估風載重與風壓極值，可能導致需進行不必要之結構補強，選擇過於保守之材料等，使建築成本增加。但若為低估壓力與載重，則其所造成最嚴重後果可能為建築振動高於預期，即建築物之使用性降低，造成使用者感到不舒適，甚至對結構系統造成預期外之疲勞損壞；而設計風壓偏低則可能導致選擇表面披覆物材料之強度不足，於設計年限間產生預期外之破壞，並產生非必要性之財損。

參考國內目前類似狀況之試驗機構或性能評定者有「建築新技術新工法新設備及新材料」之性能規格評定與性能試驗機構，其背景為當新技術、新工法、新設備及新材料無法適用現有「建築技術規則」內容，或尚無本規則及中華民國國家標準適用者，為其提供一種較彈性方式，但需經向中央主管建築機關指定之評定專業機構申請辦理，而負責進行評定之機構亦需依照評定專業機構申請要點辦理。

目前在「建築物耐風設計規範與解說」提及風洞試驗之適用範圍、主要項目、應遵守之模擬要求以及報告數據之引用，並無提及如何評定相關事項，而於其他前述法規亦僅提及應進行風洞試驗的條件，實務上亦無判斷標準。針對風洞試驗報告評定之法源依據，本案在此提出兩方式進行討論。

1. 由主管機關發佈建築工程風洞試驗機構之申請要點，採取認證實驗室能力方式進行，由具備建築檢測風洞試驗能力之實驗室提出申請，經主管機關邀請相關領域之學者與工程人員組成評選會，經審核後登錄為認證建築工程風洞實驗室後，後續該實驗室於認證有效年限內所產出之試驗報告可加註為認證實驗室產出，可參照本案附錄內容進行報告自評，為風洞試驗報告之品質提供基本品質保障。而未經認證之實驗室或國外實驗室所產出之試驗報告，則應經過主管機關所組成之審查小組人員檢視符合評定要求後，

加註本報告書已經過審查小組審查評定。但於各項結構外部審查與環境評估審議亦無明訂試驗報告需經評定審查後方可使用，若要具強制性則需於各地方政府之相關法規條例中提及，牽涉到的層面與範圍很廣，可能較難於短時間內完成。

2. 由本所風雨風洞實驗室或國內風工程學術團體成立報告評定小組，提供建築工程風洞試驗檢測報告評定業務，評定委員可邀請風工程相關領域之學者、研究人員以及風工程學會組成。此方法雖無法理與強制性，但應可維持建築工程風洞試驗報告之內容品質，尤其是採用國外風洞試驗報告者，對其應包含之內容資訊有最低限度之要求。採用此方式於初期應較易於執行，且隨時間與案件數量增加，可擴散經過評定之報告觸及率，當業界普遍認為建築檢測之風洞試驗報告應經評定後，將有助於未來在法規面之更動。

仍需說明本案建築工程風洞試驗之報告評定旨在評定試驗規劃、條件、量測儀器能量、分析方式與報告內容應包含之項目結果，並非對檢測數據進行判定。原則上僅能提供該試驗報告之規劃、執行與分析符合風工程學理進行，應可信任其分析結果。

第五章 研究成果與討論

第一節 研究成果

目前本研究已整理各國規範對於建議執行風洞試驗之條件以及蒐集相關試驗條件之文獻，提出風洞試驗之技術原則草案，在試驗部分完成常見之檢測試驗，在報告評定機制亦進行討論。針對本研究完成之成果，茲逐項分述如後：

一、資料蒐集方面

1. 蒐集國內外風力相關規範，並對於內容提及建議執行風洞試驗之條件進行歸納整理，原則上多以建築高寬比、複雜地形以及是否受到干擾效應決定是否應進行風洞試驗評估。
2. 蒐集整理相關試驗文獻，由各項試驗方式與內容，訂定出風洞試驗之技術原則草案。

二、風洞試驗方面

1. 建立假定建築之結構特性、周遭地況與來流風場等條件，於內政部建築研究所與淡江大學風工程研究中心兩風洞，分別完成執行 3 種最常見之檢測試驗方式，即環境風場舒適度評估、局部構件及外部被覆物所受之局部風壓試驗以及建築結構主抗風系統之風載重試驗，並進行比對分析。
2. 環境風場舒適度評估結果發現，原則上兩實驗室之判定結果趨勢一致，但由於平均風速與擾動風速結果略有差異，在不同評估標準所得之結果可能不盡相同。
3. 在風壓試驗中，各點位各風向角之平均與擾動值結果基本上具備相似性，在符合建築風洞試驗技術原則之條件下應不至造成明顯差異。而

在極值風壓之結果方面，兩實驗室各點位之平均差異約為 7%-12%，另在採取不同方式進行風壓極值分析時可能產生 10%左右之差異。

4. 結構主抗風系統之風載重試驗在兩實驗室之結果相當接近，在最大載重部分誤差約為 3.5%左右；在分層載重分布部分則於低樓層略有差異，但影響應不明顯。在加速度部分於水平 Y 向出現較大變化，但兩者結果皆符合法規訂定值。

三、報告評定機制方面

1. 整理出評定內容，包含總則、環境風場舒適度評估內容、局部構件及外部被覆物所受之局部風壓試驗以及建築結構主抗風系統之風載重試驗。評定項目以表格勾選方式進行，報告內容評定應由風工程領域人員進行以確保正確性。
2. 討論進行風洞試驗執行之法規依據以及建立試驗報告審查機制之法規依據，說明目前於建築檢測風洞試驗報告並無規定需經核可後尚可採用，以及提出若欲推行報告評定可採用之方式。

第二節 問題檢討與對策

研究中發現，各國之規範內容多數未明確規定風洞試驗之要求項目，但目前對於試驗要求內容僅 AWES 之品質要求內容較為詳細，本案將參考其架構建議出適用於本國實驗室能力之建議內容。但由於試驗分析方式與儀器能量皆持續發展，本案提出之風洞試驗技術原則亦應適當隨時檢視內容與更新資訊，以隨先進研究技術持續進步。

在試驗要求部份，目前國外文獻建議之儀器要求在某些情況下會超過一般研究室能達到的試驗能量，如壓力量測頻率在高風速下隨風速線性增加，將超過目前儀器能力，在此情況下應在試驗內容中說明未能達到試驗技術原則之原因，以避免遇到類似狀況時問題無法收斂。

於兩實驗室之風環境結果比對發現，兩者評估結果趨勢一致，但於計算風速機率時略為產生差異。由於各準則使用之陣風尺度不一，而人體感受度亦不為定值，在發生機率上可能有不同觀點之決定，在舒適度判定上並無法取得完全相同之結果。為了避免僅取單一準則判定造成較不保守之結果，建議在選取舒適度評估準則時，採取較客觀之方式，即取複數標準進行舒適度評估，並採用最保守之判定結果，預期可能發生最差舒適度之位置，使業主可進行檢討與規畫改善措施。

在風洞試驗報告評定部分，由於目前缺乏法源依據，若要建立適用法條需修改各地方政府提及風洞試驗之內容，涉及層面很廣，且各地方政府對於該法條之重要性認定應有出入，短時間可能難以執行。若採由本所成立之報告評定小組方式，雖無法源依據、無強制力，但較具執行彈性，對不熟悉建築檢測風洞試驗之業者，或對試驗內容有疑慮者，可提供另一管道採用符合學理之方式評定試驗報告之合理性。另此項評定機制亦可做為實驗室業務，對實驗室穩定運作有一定幫助。

第六章 結論與建議

第一節 結論

本研究整理各國規範與文獻，並比對其進行試驗之條件；由文獻資料草擬風洞試驗之技術原則草案；試驗部份已在兩實驗室完成執行國內常見之風環境評估、表面風壓與結構風載重試驗，並進行數據比對；另於報告評定機制與法規面進行討論，結論計有如後 3 項：

一、由規範整理結果可知，各國規範內之相關受力或位移反應計算式之適用範圍有限，包含外型之受力分析結果皆由大量風洞試驗資料整理進行分析而成，而試驗多數針對規則外型且周遭無干擾之狀況下進行，因此，若建築外型在基於試驗結果所建立之尺寸形狀以外，則不適用於規範計算。相同地，規範計算亦不適用於評估周邊干擾或地形變化之效應，若需了解前述狀況之建築受風力資訊，則建議進行風洞試驗。若建築為風敏感類型，如高層建築、大跨度屋頂結構、大跨度懸吊式橋樑等，其可能發生渦致振動或氣彈不穩定狀況者，建議諮詢專家意見與進行風洞試驗評估。其判斷方式多以建築物之高度、高寬比、深寬比、約化風速以及低模態之自然頻率決定。各國規範無提及風洞試驗細節，多數以應遵守基本模擬要求，如需滿足模擬相似律、正確模擬縮尺風場、建立周遭近場地景資料等，僅在美國 ASCE 7 與加拿大 NBCC 規範中則提及進行縮尺模型風洞試驗應參考 ASCE 49-12 進行。

二、在符合本案草擬之風洞試驗之技術原則草案之基本條件下，將兩實驗室之試驗數據進行比對。整體而言，在風環境評估、表面風壓與結構風載重試驗之數據趨勢基本上為一致，僅風環境試驗之風速機率值略有差異，另在表面壓力分佈與結構風載重組合之結果皆有不錯之吻合度，僅於頂層居室加速度略有差異。由試驗比對結果可視為兩實驗室在經風工程學理假設條件下，在不同縮尺狀況、不同試驗場地以及不同分析方式，在各

方面仍可得平均差異約在 10%以內之試驗結果，以複雜風場在不同實驗室進行不同縮尺之試驗條件下，實屬可接受之差異。

三、提出兩種評定執行方式進行討論，若要從法規面執行，需由主管機關訂定明確法條以供依循，牽涉到之層面較廣，需要較長時間評估推動執行，需較審慎考量後進行。或可從本所實驗室或國內風工程學術團體自行成立評定小組方式，應較易於執行，且觸及率應隨時間與案件數量增加，若業界出現共識報告需經過評定，則可加強推動法規修訂之能量。

第二節 建議

根據本案研究發現，本研究針對建築工程風洞試驗技術與報告評定機制之研究，提出下列具體建議。以下分別從立即可行的建議、及長期性建議加以列舉。

立即可行之建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：社團法人中華民國風工程學會

在各國規範整理內容中皆發現，並無強制執行風洞試驗之說明，而是以建議或者應採取其他專家協助等方式說明，目前國內之規範主要以建築物之高度超過 100 公尺，或風力效應明顯時，建議進行風洞試驗。建議於往後規範修訂內容時可將風力效應明顯之狀況納入，給定較明確之適用狀況，以供相關使用單位參考，如將規範內提及之高寬比與約化風速判斷式納入，增加判斷依據等，以及報告引用是否加註應經過第三方單位審視等內容，相關之規範建議修訂內容整理如附錄十一。

長期性建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：社團法人中華民國風工程學會

在報告評定方式部分，建議由本所風雨風洞實驗室成立報告評定小組為始，邀請風工程相關領域之學者、工程人員以及風工程學會參與評定過程，增加風工程專業人員參與對推廣消息亦有助益。本案之訊息可函送相關環境評估審查單位、結構外部審查單位或地方政府機關，讓實際會接觸試驗報告之相關單位得知資訊，並接收訊息反饋，了解實際作業之問題點，以利後續推動法規化制定。實際執行面應由結構外審與環境評估審議會議包含之成員開始，若在審議內中需要使用風洞試驗之結果，則應納入風工程領域之專家對試驗報告進行審視，由於目前並無風力技師職務，以現今狀況以風工程學會派員參加應為適宜之做法。業界若對於報告使用應經過第三方審視或評定存在共識，則對於推動法規化才有足夠能量進行。

參考書目

1. ASCE, Wind tunnel studies of buildings and structures, ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No.67, ASCE, 1999.
2. ASCE, Wind tunnel testing for buildings and other structures, ASCE/SEI 49-12, 2012.
3. ASCE, Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures, ASCE/SEI 7-16, 2016.
4. ISO (2009). ISO 4354 Wind actions on structures.
5. Australian/New Zealand Standard(2016). Structural design actions Part 2: Wind action, AN/NZS 1170.2:2011.
6. AWES, Australasian Wind Engineering Society Guidelines for Pedestrian Wind Effects Criteria, 2014.
7. AIJ(2015). AIJ recommendations for loads on buildings, Architectural Institute of Japan.
8. N.R.C.(2015). National Building Code of Canada, 2015, National Research Council Canada.
9. EUROPEAN STANDARD (2010). "Eurocode 1: Actions on structures."
10. 中國建築科學研究院 (2012). GB 50009-2012 建築結構荷載規範
11. 「建築物耐風設計規範及解說」，營建雜誌社編印，內政部建築研究所，2006。
12. T. Reinhold (ed). Wind tunnel modeling for civil engineering applications. Cambridge University Press, 1982.
13. R.M. Aynsley, W.H. Melbourne, and B.J. Vickery. Architectural Aerodynamics. Applied Science Publishers, 1977.
14. J.D. Holmes, Wind loading of structures, 3rd Edition, CRC Press, Boca Raton USA, 2015.
15. J.E. Cermak, Application of fluid mechanics to wind engineering - A Freeman Scholar lecture, Journal of Fluids Engineering, ASCE, Vol.97, pp.9-38, 1975.
16. Council on Tall Buildings and Urban Habitat, Wind Engineering Working Group, Wind Tunnel Testing of High-Rise Buildings, CTBUH Technical Guidelines, 2013.
17. J.E. Cermak, and L.S. Cochran. Physical Modelling of the Atmospheric Surface Layer. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.41-44, pp.935-946, 1992.

18. W.H. Melbourne, Development of Natural Wind Models at Monash University, Proceedings 6th Australasian Hydraulics and Fluid Mechanics Conference, Adelaide, December, pp.190-194, 1977.
19. N.J. Cook, Wind-tunnel simulation of the adiabatic atmospheric boundary-layer, Journal of Industrial Aerodynamics, Vol.3, pp.157-176, 1978.
20. J.D. Holmes, and C. Osonphasop, Flow behind two-dimensional barriers on a roughened ground plane, and applications for atmospheric boundary-layer modelling, Proceedings 8th Australasian Fluid Mechanics Conference, Newcastle, December 1983, pp.11B.13-16, 1983.
21. J.B. Barlow, W.H. Rae, and A. Pope, Low-wind speed wind tunnel testing. John Wiley & Sons, 1999.
22. J.E. Cermak, and L.S. Cochran. Physical Modelling of the Atmospheric Surface Layer. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.41-44, pp.935-946, 1992.
23. D. Surry, Consequences of distortions in the flow including mismatching scales and intensities of turbulence, In Wind Tunnel Modeling for civil Engineering applications. Cambridge University Press, 1982.
24. J.C.K. Cheung, and W.H. Melbourne, Turbulence effects on some aerodynamic parameters of a circular cylinder at supercritical Reynolds Numbers, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.14, pp.399-410, 1983.
25. P.A. Macdonald, K.C.S. Kwok, and J.D. Holmes, Wind loads on circular storage bins, silos and tanks: 1. Point pressure measurements on isolated structures, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.31, pp.165-188, 1988.
26. M. J. Eaddy, Lift Forces on Smooth and Rough Circular Cylinders in Low and High Turbulence flows, PhD Thesis, Department of Mechanical Engineering, Monash University, Clayton, Australia, 2004.
27. R.I Basu, Across-wind response of slender structures of circular cross-section to atmospheric turbulence, Ph.D. Dissertation, University of Western Ontario, London, Canada, 1983.
28. E. Szechenyi, Supercritical Reynolds Number simulation for two-dimensional flow over circular cylinders, Journal of Fluid Mechanics, Vol.70, pp.529-542, 1975.
29. J.D. Holmes, and D. Burton, Drag coefficients for rough circular cylinders revisited, 8th International Colloquium on Bluff Body aerodynamics and Applications, Boston, Massachusetts, USA, June 7-11, 2016.
30. A.G. Davenport, On the statistical prediction of structural performance in the

- wind environment, ASCE National Structural Engineering Meeting, Baltimore, 1971.
31. W.H. Melbourne, Designing for directionality, Workshop on Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Highett, Victoria, 1984.
 32. J.D. Holmes, Directional effects on extreme wind loads, Civil Engineering Transactions, Institution of Engineers, Australia, Vol.CE 32, pp.45-50, 1990.
 33. L.W. Apperley, and B.J. Vickery, The prediction and evaluation of the ground level wind environment, Proceedings 5th Australasian Fluid Mechanics Conference, Christchurch, New Zealand, 1974.
 34. L. Cochran, and R. Derickson, A physical modeler's view of Computational Wind Engineering, Journal of Industrial Aerodynamics, Vol.99, pp.139-153, 2011.
 35. J. Franke, A. Hellsten, H. Schlunzen, and B. Carissimo, Best practice guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment, COST Action 732, Quality assurance and improvement of microscale meteorological models, 2007.
 36. Architectural Institute of Japan, 2007. Guidebook for Practical Applications of CFD to Pedestrian Wind Environment around Buildings. Architectural Institute of Japan.
 37. H.P.A.H. Irwin, A simple omni-directional sensor for wind tunnel studies of pedestrian level winds, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.7, pp.219-239, 1981.
 38. J.D. Holmes, Methods of fluctuating pressure measurement in wind engineering, State-of-the-Art Volume on Wind Engineering, Wiley Eastern Ltd. New Delhi, 1995.
 39. F.H. Durgin, Instrumentation requirements for measuring aerodynamic pressures and forces on buildings and structures, In Wind Tunnel Modeling for Civil Engineering Applications, Cambridge University Press, 1982.
 40. J.D. Holmes, Effect of frequency response on peak pressure measurements, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.17, pp.1-9, 1984.
 41. Irwin, P. A. (1988). "Pressure model techniques for cladding loads." Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 29(1-3): 69-78.
 42. C.W. Letchford, P. Sandri, M.L. Levitan, and K.C. Mehta, Frequency response requirements for fluctuating wind pressure measurements, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.40, pp.263-276, 1992.
 43. W.H. Melbourne, Probability distributions associated with the wind loading of structures, Civil Engineering Transactions, Institution of Engineers Australia, Vol.CE19, pp.58-67, 1977b.

44. J.A. Peterka. Selection of local peak pressure coefficients for wind tunnel studies of buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 13, pp 477-488, 1983.
45. J.R. Mayne, and N.J. Cook, Acquisition, analysis and application of wind loading data, *Proceedings 5th International Conference on Wind Engineering*, Fort Collins, Pergamon Press, 1979.
46. D. Banks, T.K. Guha, and Fewless Y.J., A hybrid method of generating realistic full-scale time series of wind loads from large-scale wind tunnel studies: Application to solar arrays, *14th International Conference on Wind Engineering*, Porto Alegre, Brazil, 2015.
47. A. Steckley, Motion-induced wind forces on chimneys and tall buildings, Ph.D. thesis, University of Western Ontario, Canada, 1989
48. J.D. Holmes, Mode shape corrections for dynamic response to wind, *Engineering Structures*, Vol.9, pp.210-212, 1987.
49. D.W. Boggs, and J.A Peterka, Aerodynamic model tests of tall buildings, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol.115, pp.618-635, 1989.
50. Y.L. Xu, and K.C.S. Kwok, Mode shape corrections for wind tunnel tests of tall buildings, *Engineering Structures*, Vol.15, pp.387-392, 1993.
51. J.D. Holmes, A.W. Rofail, and L.J. Aurelius, High frequency base balance methodologies for tall buildings with torsional and coupled resonant modes, *Proceedings of 11th International Conference on Wind Engineering*, Lubbock, Texas, June 2003.
52. R.O. Denoon, Designing for serviceability accelerations in tall buildings, Ph.D. thesis, The University of Queensland, 2000.

附錄一 採購評選意見與回應

採購評選會議委員意見回應

項次	評選委員意見	回覆
1	協同主持人、研究員、研究助理等個人資料如現職、學經歷等附入服務建議書，以利評選。	感謝委員建議。
2	建議邀請執業之結構技師、混凝土委員會與鋼結構有關的專家參與了解產業需求。	感謝委員建議，將於後續會議邀請相關轉加參與。
3	人事經費比例超過 50% 是否符合審計相關規定？試驗耗材費共計 150,000 元，如何規劃細節？試驗之目的與目標為何？	本研究案為協同研究案，各項編列預算為所內經費審查會議後核定，我方研究人力經費亦為所內編列。在材料費部分主要為模型製作費用，試驗將進行常見之檢測業務試驗提供示範例。
4	計畫主題為建築工程風洞試驗技術與報告評定機制研究，工作團隊學經歷完整，應具有執行本計畫之能力。	感謝委員肯定。
5	服務建議書針對研究目標及工作項目解說部份值得肯定，但對研究內容、文獻回顧、預期成果及創意回饋項目著墨較少，請於後續報告補充說明。	委員建議事項將於後續相關簡報與報告書內中補足改善。
6	本計畫主題是建立風洞試驗	委員建議事項將於後續相關

	報告之試驗技術、試驗數據分析方法及報告認定機制，但服務建議書對此三項並未做詳細說明，請於後續研究報告補充示範例與說明。	簡報與報告書內中補足改善。
7	本計畫應蒐集國內外文獻及分析既有規範或標準之缺失，並提供改善對策，並針對相關對策提出範例分析其可行性。	委員建議事項將於後續相關簡報與報告書內中補足改善。
8	本研究提供風洞試驗報告技術及試驗報告評定機制後是否舉辦公聽會以進行技術推廣？	將於研究期程內舉辦說明會進行資訊分享與接收業界之相關建議。
9	本案對提升國內風工程的實用價值具有重要意義，值得肯定。	感謝委員肯定。
10	計畫中將建立示範例，如何確定其具備代表性？本計畫建立的報告評定機制通過專家座談採納意見，是否有取捨的策略？本計畫擬建立風洞試驗技術原則及試驗遵循項目，該如何評定其可信度與實務價值？	由於目前耐風設計規範內僅列出風洞試驗之原則性規定，本案預期藉由規定更細部化試驗條件，由待測主模型與周遭量體模型之設計建議，試驗量測建議之取樣頻率、採樣數量與分析方式等試驗條件，以及各種建築工程風洞檢測試驗報告應包含之呈現內容等規定，提升風工程試驗報告品質，以供結構技師、建築師等設計單位參考使用。本研究案將採上述所提及之試驗條件與各試驗報告應包含之內容，設計與進行各項試驗，並整理建立為示範例。

11	國內外相關規範(如中國大陸)如何進行?	研究中將蒐集整理各國規範等資料，了解各國對於風洞試驗要求之狀況。
12	請檢討評估符合及不符合評定品質的報告書對結構影響之敏感度，以前若採用了不好的報告作為建築物結構設計，也未見有什麼問題。	遵照辦理，一般若採極限結構強度設計時，基本上皆相當保守，若試驗結果並非嚴重低估風力造成之載重，應不至於發生嚴重災害，但仍希望在進行風洞試驗評估時，可以正確估算受力。
13	請加重預期成果之具體產出，並先收集整理各種評定認可制度，並建構程序。請思考建研所合作之營運模式。	遵照辦理。
14	請問本研究預計評定機制所設定之試驗標的及對應之試驗方法為何?還是計畫目標再做通案性之規定?	為一般性風洞試驗要求，該試驗要求將於本案例中草擬建議，以原則上應達到之試驗能力為主，而非硬性規定試驗流程與細節。
15	本研究提出試驗報告之評定機制，未來如何與國內既有制度或對象之需求相連結?	目前國內並無相關評定機制，未來可依本案例提供之試驗要求基準，由所內召集相關領域之學者專家討論訂定。

附錄二 風洞試驗之技術原則草案

前言

本風洞試驗之技術原則旨在為從事建築行業的專業人士提供有關建築和結構風洞測試和替代研究的指引。本手冊應幫助用戶正確了解風洞測試並確保滿足基本測試要求。每個部分的開頭框列段落是風洞測試的最低技術原則要求，後續的段落提供了相關說明資訊，使用戶能夠了解要求的基礎並評估是否足以滿足特定項目的最低要求。

範圍

本技術原則手冊規定了在模擬邊界層中對建築物和結構進行風洞測試的最低要求。雖然主要用於台灣，但要求和相關說明應適用於國際上一般風洞試驗條件狀況。本手冊之測試技術基本上適用建築型態為一般建築物、高層建築與低矮廠房，不包括特殊結構(例如大跨度懸吊式橋樑)，但在第一章部分中之一般原則仍適用於這些情況。本手冊也不包含在熱邊界層、非完全發展的邊界層或特殊的高度瞬態流中的測試方式與條件。本技術原則草案內容可搭配建築工程風洞試驗報告綜合評定表使用，檢視對應項目於報告內呈現之內容是否符合要求，其僅針對是否符合項目要求，不對報告內提供之數據進行討論。

第一章 總則

一、方法論：風洞試驗結果應提供適用各種風況(不包含龍捲風)之設計資訊

說明：

現階段可產生符合設計需求資訊之方式為大氣紊流邊界層風洞試驗，其需滿足基本模擬方法之條件，且應與風況無關。目前計算流體力學尚未具備足夠精度預測建築之表面擾動與極值壓力，但可做為流場流況之物性檢視，或用於研究平均環境風速分佈。

大氣紊流邊界層風洞之各種實驗項目技術可參考 Reinhold (1982)之風洞試驗應用。Aynsley 等 (1977)、Holmes (2015)、Simiu 和 Yeo (2019)以及 Cermak (1975)等所出版的教科書籍也提供了有關風洞和縮尺模擬技術的資訊。此外，美國土木工程師協會(1999, ASCE 49-12, ASCE 7-16)和高層建築和都市人居委員會(2013)也出版了建築物和結構風洞測試技術指南可供參考。

二、大氣紊流邊界層模擬：應在風洞中充分模擬相應處風場特徵之大氣紊流邊界層

說明：

定常大氣紊流邊界層流況之風洞試驗需滿足其基本特徵之縮尺模擬，除包含該地特性之迫近流場(approach flow)，亦須考量受周遭地貌影響之近場流況(near-field flow)。建築物之耐風設計可由強風事件對其造成之建築受風載重、風壓和加速度舒適度標準進行評估。在強風狀況下，由於熱浮力效應不顯著，可將迫近流場視為中性穩定(neutrally stable)。而對於模擬具有高時變特性之雷暴下衝氣流(thunderstorm downburst)，需要較為特殊之風洞設備製造風速剖面，如由複數風扇驅動之風洞設備或如西安大略大學風工程、風能與風環境研究機構(WindEEE RI)之六邊形風洞，但由於仍在開發適當的流場模擬方式階段，目前可進行相關試驗之單位較為稀少，因此若需考量雷暴下衝氣流之強風，目前仍採與強風或熱

帶氣旋相同之特徵進行模擬。

通常在模擬大氣紊流邊界層時，該邊界層風洞一般具有較大截面(高寬為 2 公尺或以上)與較長的試驗長度(10 ~ 30 公尺)的共同特徵，以供流場發展。

三、迫近流場：對於模擬中性穩定之大氣紊流邊界層至少應考量下列項目

- (a) 平均風速剖面
- (b) 紊流強度剖面
- (c) 紊流積分長度尺度
- (d) 風頻譜能量分佈
- (e) 流場保持零壓力梯度

說明：

(a)、(b)項模擬建議落於目標值之 $\pm 10\%$ 以內；(c)積分尺度模擬建議落於縮尺後長度之 3 倍內；(d)主流向風頻譜能量分佈應符合常見之風速頻譜型式，建議檢視試驗之參考高程或模型半高處等典型位置之風速頻譜。若該紊流邊界層流場係由紊流產生設備(如三角擾流板、阻牆、格柵和地表粗糙元素等)被動產生者且經足夠長度發展而成，則其風頻譜應具自然產生之風場特性；但若流場採主動控制方式產生者，則應注意其風頻譜之能量分佈狀況。模擬之風速剖面應以圖形呈現，另應註明該迫近流場風速模擬相對於現場之時長(建議取相應現場之 10 分鐘或 1 小時之資料)，並列出試驗量測參數與計算方式。

若在風洞中模擬全尺寸之大氣紊流邊界層，一般可滿足上述各項條件，但其亦代表試驗是在較小長度縮尺比例下進行，因此試體之幾何尺寸也會較小。當試驗主體為低矮建築或較小尺寸之結構物，可適度使用較大之縮尺比例進行試驗，但對局部邊界層模擬時，建議至少在 100 公尺或其建築 3 倍高內之風場特性滿足設定地況條件並具備大氣表層(atmospheric surface layer)特性(Cermak 和 Cochran, 1992)。而在此較小縮尺條件下，亦需考量阻塞比造成之效應(參考第七項說明)。

完整與部分邊界層模擬中，一般會使用包含三角擾流板、阻牆、格柵和地表粗糙元素作為被動元件產生平均風速剖面 and 紊流特性。相關原理與技術可參考文獻 Reinhold (1982)、Melbourne (1977)、Cook (1978)、Holmes and Osonphasop (1983)、Barlow et al. (1999)與 Cermak and Cochran (1992)之內容。

迫近流場一般以平衡之紊流邊界層模擬，其流場特徵之決定可參照建築物耐風設計規範與解說內容 2.3 節之分類方式決定該處地況條件。零縱向壓力梯度可透過調節風洞頂板高度、分離側壁、開槽或通風方式達成。若無法避免壓力梯度出現，則應以適當之阻塞修正方式進行數據處理。

四、近場流況：近場流況將受到相鄰物理特徵(包含建築物、結構物或明顯的地形變化)影響，因此必須將其作為局部風場模擬的一部分。

說明：

一般在研究建築處周遭至少 300 公尺半徑內的所有主要結構與地形特徵均應以正確的比例縮尺建模，周遭環境模型製作尺寸之誤差不應超過 10%。

於特定上游風向，若存在將明顯影響下游風場之條件，如大尺度建築物或超高層建築等，可經專家評估是否延伸特定風向之上游建模範圍，以評估其對研究建物之影響。

模型細節的精度可隨著距研究建物的距離而降低，待測建築物模型以及周圍建築物精度要求之細節可參考第九項說明。此外，應考慮在建造中與已批准的新建築，依結構設計評估需求，如相鄰之建築群或座落於同一建築基地內之前後期建物，可能需對主建築物進行複數環境配置之風洞試驗。若欲瞭解建築物本身受風特性，亦可進行單獨建築模型試驗，其可獲得無周遭環境干擾之風載重與風壓結果，供初期評估或在優化建築氣動力設計時提供基本比對資訊。

五、長度縮尺：應考量風洞試驗場地條件進行選取適當之長度縮尺，決定長度

縮尺後，風洞試驗中所有幾何尺寸皆以該縮尺比例進行製作，並依此縮尺建立相應之大氣紊流邊界層流場，並滿足下列比例：

$$\lambda_L = \frac{(z_0)_m}{(z_0)_p} = \frac{(^xL_u)_m}{(^xL_u)_p}$$

其中 z_0 與 xL_u 分別為地表粗糙長度與主流向紊流積分尺度，下標 m 與 p 分別代表模型與實體。

說明：

於實際模擬試驗時，紊流積分尺度模擬可能會失真，無法完全符合縮尺設定，但文獻指出在 2 或 3 倍之範圍內不會顯著影響測量結果(Surry(1982))。

六、風速縮尺：風洞試驗之平均風速，應盡量提高測量儀器(例如壓力傳感器，力平衡儀和風速計)之靈敏度。基本上風速縮尺比例越大(即風速越高)有益於提升試驗量測精度，但同時需考量儀器與模型之安全試驗風速。另該試驗平均風速應至少滿足最低雷諾數需求(參考第八項)。風速縮尺之定義為：

$$\lambda_V = \frac{(V_{ref})_m}{(V_{ref})_p}$$

其中 V_{ref} 為相對於實尺寸參考高度之平均風速。

說明：

在風速縮尺決定後，時間與頻率尺度可由風速縮尺與幾何縮尺決定，而試驗中所代表之實場量測時間與頻率即可採以下縮尺進行換算。

$$\lambda_T = \frac{\lambda_L}{\lambda_V}$$

$$\lambda_F = \frac{1}{\lambda_T}$$

七、阻塞比：應盡量降低流場內建築模型之投影面積，盡可能地減少對阻塞修正的要求。此外，研究建築模型不宜超過風洞高度的一半，橫向位置建議設於風洞旋轉盤中心處，若無法設置於轉盤正中處，則應盡量放置於風洞半寬內。

說明：

可參考耐風設計規範與解說中提及，阻塞比小於 8%。如 Reinhold(1982)所述，雖可以對總體平均力進行阻塞修正，但目前尚未釐清應如何對高度紊流流場中之局部壓力擾動進行阻塞修正。因此建議盡量減少阻塞比或採用第三項中所述之相關風洞試驗技術，以避免產生縱向壓力梯度。如果採用了第三項提及之技術修正，則可以使用高於上述建議的阻塞率。由於風洞近壁的約束作用會導致近壁處流動模式失真，因此，將測試模型盡可能地放置於風洞轉盤中心處，可有效避免該處流場失真所造成之壓力量測誤差。

八、最小雷諾數要求：測試應基於最小建築物寬度和模型頂部高的平均風速等於或大於最小雷諾數進行。若目標建築物處於被大範圍建築屏蔽的情況，則應在其沒有屏蔽之狀況下可達到最小雷諾數。

說明：

具銳緣建築物之最小雷諾數可參考耐風設計規範與解說中提及之 10^4 ，或保守取 AWES-QAM 之建議值 5×10^4 。當大於此最小雷諾數後，鈍體周圍的流動通常對雷諾數不敏感；低於此值，則自由流中的紊流以及建築物本身產生的紊流在高頻方面將較為不足，並對壓力擾動和尖峰值產生影響。對於具有圓形橫截面或具有大半徑圓弧邊角的建築物，分離點一般與雷諾數相關，在光滑且曲度均勻的圓形橫截面尤其如此，在此狀況下，對該橫截面之雷諾數應大於 8×10^5 (Cheung 和 Melbourne, 1983; Macdonald 等, 1988, Eaddy, 2004)。若建築物的轉角為圓角或曲面，但其具較大粗糙度的情況下(例如存在外露圍柱、外露結構、深陽台或

大型遮陽棚)，可放寬此雷諾數要求，但應參考文獻研究說明(例如 Basu, 1983)。另有相關研究指出，在相同風速下可透過改變表面粗糙度條件，模擬相應更高雷諾數之平均阻力係數(Szechenyi, 1975；Holmes 和 Burton 2016)，但這種試驗技術尚未被證明可以準確模擬側風反應(Eaddy, 2004)。

九、模型製作精度：測試之主建築物模型的總體尺寸(高度，平面形狀等)應精確至 2%或 2 公釐內。如果建築細節(例如陽台、突窗、遮陽板等)從立面延伸 1 公尺或以上時，則應將該細節表現於主建築模型上。

在結構風載重、表面壓力與行人安全評估時不應考量植栽之影響，但若在進行行人舒適度評估時，則當地景觀(包含植栽)應以當前狀況或以設計完工之狀態建模，而舒適度評估應包含無植栽條件之影響。

周圍建築量體模型製作尺寸之誤差應不高於整體尺寸 10%以上，而其不需包括外觀建築細節。

說明：

主建築表面之粗糙細節可能會影響流體之分離與再接觸發生位置，於製作上應特別注意邊角之製作狀況。

植栽縮尺模擬是為了確保該處之流量與實際狀況相等，一般為了滿足雷諾數要求，可能採透過修改縮尺後之植栽尺寸方式進行，但其在視覺上易造成比原設計植栽來的稀疏，實際進行試驗時可透過無植栽測試來測試該植栽存在之影響程度。在風載重、表面壓力研究或行人安全性試驗中不應考慮植栽模擬，因為不能保證實際狀況下植栽的持久性，且一般在強風事件中，植栽可能會發生落葉或倒塌等狀況。

緊鄰研究建物之周圍建築物應保持其原始外觀形狀進行製作，但不需包含表

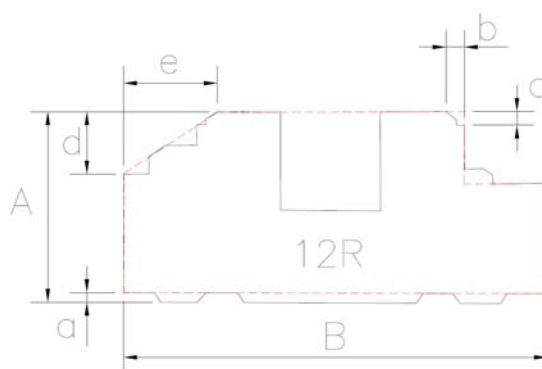
面細節，而各建築物間之相對位置應依照該處圖面資訊進行配置；由於距離主研究建築較遠的建築物對其影響較小，可以透過近似的塊狀形狀進行簡化製作。一般向各地政府機關購買之數值地形圖或建築圖之資訊應包含各棟建築物之投影外型與樓層數，在製作周遭建築量體模型時可對其適當簡化。原則上，若建築立面之突起或凹陷變化低於其對應方向總長之 10% 以下，可將其簡化以直線製作。當變化大於 10% 以上，可考慮分區處理，採該處最接近之近似線條進行簡化，同樣地可省略該處變化低於對應方向總長之 10% 以下之區域。若變化型式為非邊角處之大區域凹陷，且其非緊鄰研究建物者，可採將凹陷處補平方式處理。屋突部分一般可略，但若該周邊建築緊鄰研究建物則建議製作屋突，以模擬其對研究建築表面壓力變化之影響。

簡例說明

$a < 0.1A$ 、 $c < 0.1A$ 、 $b < 0.1B$ ：下立面與右上角可採直線段與直角形狀簡化。

$d > 0.1A$ 、 $e > 0.1B$ ：左上角可以近似形狀簡化製作。

若該建築非緊鄰主研究建築，則中央凹陷處可補平處理。



十、氣象數據：對於測站位址、遮蔽效應和儀器響應影響，經過適當校正的風速數據(與風向，若存在的話)，用於舒適度設計案例，例如環境風研究和建築物加速度等，應使用不少於 10 年之觀測數據。對於建築耐風設計研究，如整體結構載重或表面壓力研究，應至少使用 20 年以上之觀測數據。

說明：

在進行行人舒適度評估時可採當地氣象測站之資料進行分析，分析資料應包含平均風速與風向資訊，並經適當之機率分佈型式計算其風速分布狀況。而在進行建築耐風設計之結構載重與表面壓力試驗時，可採建築物耐風設計規範與解說內之各區域基本設計風速資料作為實場設計風速進行試驗，該資訊為對應 50 年回歸期之風速。另依建築物種類考量，可乘上用途係數得更高或更低回歸期之風速。

十一、風速與風向性：於行人舒適度評估應考量該處平均風速於各風向之超越機率；而在風載重、風壓與建築加速度評估應考量該處極值風速之超越機率。

說明：

根據足夠的氣象數據資料，各風向之風速機率計算可以通過多種方式進行(如 Davenport, 1971; Melbourne, 1984; Holmes, 1990; Apperley 和 Vickery, 1974 等)。在評估行人舒適度時應依考量各風向平均風速之機率分佈，再乘上試驗各風向測點所量得之風速，得出該測點位之風速發生機率後，進行舒適度判定，相關細則可參考第二章內容。另一方面，由於國內主要遭受之強風事件為颱風，在颱風侵襲期間之風速與風向變化劇烈，且各場颱風事件差異甚鉅，而在風載重與風壓評估時應採極端值分析，同時考量其風速與風向之機率分佈在統計上可能產生較大之偏差(bias)，產生較不保守之狀況，因此在進行風載重與風壓評估時，僅考慮極值風速之超越機率。或者，若需同時考量不同風向與風速之超越機率，可參考建築物耐風設計與解說之內容，採用可信的資料與統計方法分析，計算出不同風向的基本設計風速。其分析結果，應檢附申請書及統計分析報告書，向中央主管建築機關申請認可後，始得運用於建築物耐風設計。

十二、數據保留：風工程實驗室應保留風洞測試報告(含儀器校正數據)至少六年。

說明：

風洞測試報告之數據將提交給結構設計單位參考，而其所設計之建築物或結構物將由各地地方政府單位(如都市發展局等)視相關法規條文規定，決定是否需委託外部專業單位進行結構審查。風洞試驗報告一般會作為外部審查之附件參考，除設計單位取得之試驗報告書外，各風工程實驗室也應保存測試報告至少六年(參考 TAF 之保存時間)，以供後續可能發生之複審亦或發生災損時之責任歸屬調查。

第二章 風環境評估研究

一、一般性原則：應提供足夠的訊息，以充分評估建築物開發區域周圍擬定之行人使用區域內之舒適度和安全性。

說明：

除了研究單獨建築物周圍氣流之基本原理外，常見的風環境試驗為評估實際複雜環境下之行人舒適度，對於後者而言，使用邊界層風洞並滿足試驗基本遵循項目(請參閱第一章部分)是目前最被廣泛接受的方式。使用電腦計算流體力學(computational fluid dynamic, CFD)方式模擬流場之結果，在目前對於預測陣風風速與複雜環境流場之精確度仍與試驗存在差距(Cochran 和 Derickson, 2011 年)，但計算流體力學仍可作為輔助分析解釋流場狀況。相關模擬計算方式可參考 Franke 等人(2007)、Blocken(2015)與 AIJ(2007)等提出之相關建議指南，若欲採計算流體力學方式模擬風環境狀況，應由具備風工程背景知識之專業人員或研究單位進行，並亦需滿足本手冊之對應基本要求。

二、風速測量位置數：於開發區域的行人可及平面區域、相鄰行人通道或其他鄰近區域，風速測量位置的平均密度應不低於每 200 平方公尺 1 個測點，以評估發展新建築對周邊風環境之影響。

說明：

從行人安全的角度來看，風速測量位置應集中在通常已知會發生風環境問題之處，例如在建築體轉角附近、無明顯遮擋之迎風面近地區域、開放式拱廊或潛在可能形成風通道之區域中。除上述提及之區域外，為了評估人體活動之舒適度，預定設立與既存之特定活動空間(例如室外座位、游泳池或餐廳等)亦應適當規劃測量點位。在新建建築物周邊至少應進行風環境評估之區域範圍可參考 AWES(2014)之說明。另，若該處包含較大區域的開放空間(如公園、學校等)，則可以適度地放寬測量位置密度。

三、環境風速的測量：量測環境風速所採用之儀器，其響應特性應滿足行人舒適度評估之需求。在風環境研究中，常將氣象測站高程處之風速轉換為邊界層緣處對應之風速，因此建議試驗所測量風速值以適當位置(如同採邊界層緣處)參考風速之比例形式表示，便於後續配合氣象統計數據進行風速機率之舒適度判斷計算。

說明：

風環境評估標準常以平均風速或陣風風速進行，兩者之風速測量可以使用熱線探針或熱膜探針進行，或者使用 Irwin 探針(Irwin, 1981)。在實際使用上，需注意熱線與熱膜探針在高紊流區之平均風速較易發生誤差(Bottema 等, 1992)；另一方面，Irwin 探針在高紊流區、明顯垂直流區以及局部平均風速小於 3 m/s 的區域中也容易出現誤差。另試驗中之參考風速應從風洞中不受近場建築物影響之位置獲得，一般狀況下常設定於邊界層緣處進行量測。

除了直接以儀器量測風場方式外，目前也有實驗室開發其他評估風環境的技術，如透過數位攝影方式記錄鋪面材料之侵蝕狀況，並率定出其與風速強弱之關係，當與氣候數據結合時，此方式亦可生成該區域行人舒適度分佈之圖像。

四、頻率響應：量測陣風風速時，測量儀器之頻率響應在換算實場狀況下，對應人體感受之頻率範圍，並在此範圍內之線性相位偏差不應超過 10%。

說明：

一般而言，0.15 Hz 約略可解析相當於實場的 3 秒平均時間內之訊號，這是常用於測量陣風風速之氣象風速計的近似響應特性。透過熱線、熱膜風速計或壓力測量技術可以輕鬆滿足此頻率要求，對於基於壓力測量技術的儀器，頻率響應取決於取壓孔位之幾何形狀、連接管線的尺寸(包括任何限流器等)、壓力傳感器之內含體積、膜片的柔韌性等或採用壓力掃描裝置之特性等。透過不同技術皆可以滿足所需的頻率響應(Holmes, 1995 年)，以及其相關數位修正方式(Halkyard 等

人，2010)。

五、風向數：應至少進行 16 個風向試驗，每間隔 22.5 度量測一次。

說明：

至少應進行 16 個風向試驗，但實際選擇的風向可考慮於該處位置風速對風向的敏感程度，以及現有氣象風速數據資料而定。

六、評估準則：對當地風環境的評估應基於相關主管部門法規要求的標準，若規劃機構未指定標準，則檢測顧問或試驗方應提出適當的準則，其中評估準則內容應包含該地點之活動型態以及發生危險風速的機率。

說明：

由於如周遭環境差異、建築形態規劃或座落地區盛行風況等各種因素，目前於國際上並沒有統一採用之標準，以下列出國際上常見使用的標準，研究或試驗單位可參考各研究建議之準則內容進行評估，常見標準和有關標準制定的其他背景信息可參考下列文獻：Hunt 等(1976)、Isyumov 和 Davenport(1976)、Lawson 和 Penwarden(1976)、Penwarden 和 Wise(1975)、Melbourne(1978b)、Soligo 等(1998)、Janssen 等(2013)、Ratcliff 和 Peterka(1990)與 Koss(2006)。溫度和濕度也可能影響不同風速下對於行人舒適度的感受，本手冊內容並不包含溫溼度變化之考量。

七、報告：應以簡化方式說明該開發建築對周遭風環境之影響評估。

說明：

該報告應提供結果摘要，以表明該處擬議活動是否適合(例如，通道、戶外餐廳等)。

除測試結果外，報告亦應包括本手冊要求之相關內容，即：

- (a) 測試程序、模型製作、風洞和大氣紊流邊界層模擬的敘述。
- (b) 該地氣象數據資料之分析方式與結果。
- (c) 包含標記量測點位之建築區域位置圖。
- (d) 測試的風向條件、試驗採樣時間和採樣頻率。
- (e) 需將每一測點所有風向角之無因次平均風速、無因次擾動風速值以及選用評估準則判定風速之對應機率作為報告附件，以利於大樓興建後進行實場量測驗證的工作。
- (f) 植栽對風環境變化之影響，即有植栽與無植栽之比對，可檢查結果顯示當地植栽對風環境的敏感性。

最後，應描述研究中遭遇的任何異常細節(若存在)，可透過拍照或錄影方式記錄留存。

第三章 表面風壓風洞試驗量測

一、壓力測量位置的數量：在測試建築物上，平均壓力取樣點密度應不少於每 120 平方公尺面積包含 1 個壓力測點。

說明：

給定的測點密度是最小平均值。靠近邊壁和橫截面不連續處之局部密度應更高。對於較小的建築物和複雜的形狀應適當提高採壓點之平均密度。在某些特殊情況下，如當壓力量測管線無法隱藏而暴露於外時，可能對該處流動模式產生影響，此時可進行不同壓力孔位配置之風洞測試，透過比對不同配置位置之結果以改善試驗解析。對於大區域的低壓力梯度區域，則可以合理地降低平均壓力測點密度。

二、風向角的數量：對於至少 36 個風向，應以 10° 的增量確定各個測量位置的設計壓力。

說明：

36 個風向角的要求對於特殊研究可以有理由放寬，如該處盛行風向固定或該處環境造成特定風向等。但由於本國地理位置座落於颱風帶，常年皆有複數颱風生成並經過本國經濟活動範圍，當颱風侵襲時，視其行進路徑，在風向上會有很大的變化，因此若於本國評估建築物表面風壓時，建議仍進行 36 個風向之量測。為另對特定狹窄風向區間發生的流動現象研究亦可增加較細緻的風向角增量。

三、風壓係數和參考壓力：風洞壓力測量值應以風壓係數形式表現，其參考壓力應取現場之靜壓值，並在適當處量測動壓，透過該動壓可以採計算方式換算出實場風壓。

說明：

靜壓參考值可以從安裝在不受任何近場建築物影響之風洞低紊流區域中之皮托管靜壓孔中獲得。常用的方式也包含可以從專門設計用於在紊流條件下測量靜壓的探針，以及從風洞壁面上的壓力輸出獲得。但應研究風洞中可能出現的橫向或縱向靜壓力梯度，若流場中存在壓力梯度，則應參考第一章第三項方式進行適當的修正。

動壓值亦可由皮托管量測獲得，但其不應位於縱向紊流超過 10% 的位置，否則可能會高估參考動壓。另動壓值亦可由風速計量測風速後，根據現場溫度對應之空氣密度計算出該處之動壓。

四、頻率響應：應檢查儀器的頻率響應，當壓力信號之頻率響應開始偏離時，在該頻率範圍之上應使用低通濾波處理超出頻率範圍的壓力信號。

說明：

壓力測量儀器的振幅頻率響應，以量測記錄之振幅與給定正弦壓力施加之振幅比表示。建議在縮尺模型狀況下，在 0 Hz 到 $2U_h/B$ Hz 之頻率響應偏差應低於 10% (其中 U_h 為建築物頂部的平均風速， B 為建築物的特徵模型寬度)。當壓力信號之頻率響應開始偏離 10% 以上時，在該頻率範圍之上應使用低通濾波處理超出頻率範圍的壓力信號。同時在上述頻率範圍內，相位響應之線性變化的偏差也不應超過 10%。

壓力測量系統的頻率響應取決於壓力管道系統的幾何形狀以及壓力傳感器特性相關，如傳感器內含體積與膜片的柔韌性。Holmes(1995)已整理了多種方式可用來達到所需的頻率響應標準。另對於響應限制的要求也可經由多種方式確認，如 Durgin(1982)、Holmes(1984)、Irwin 和 Davies(1988)和 Letchford 等人(1992)之研究。

五、試驗取樣頻率：用於數位處理之壓力訊號之最小採樣頻率應至少為信號內最大頻率之 2.5 倍，以最小化混疊(aliasing)發生。另若採取低通濾波方式處理數據，則其截斷頻率應小於採樣頻率的一半以防止數據混疊。

說明：

經實驗和測試結果證實，試驗採樣頻率為壓力訊信號最高頻率之 2.5 倍，已足以將尖峰值解析至可接受的精度。可以通過類比或數位方式對訊號進行適當的低通濾波以去除儀器本身產生之雜訊或環境中之電磁干擾訊號。

六、尖峰外風壓係數：尖峰外風壓係數應為對應實場狀況之強風事件(如颱風、東北季風等)長度的統計平均值(最大值或最小值)。

說明：

可以使用多種方法來有效地確定平均外部壓力峰值，例如：穿越次數法(Melbourne, 1977b)、最大值和最小值的採樣法(Peterka, 1983)、不足暴風雨長度時間之極值分佈擬合(Mayne and Cook, 1979)。若在重複的相同實驗(數據具遍歷性)中取多個極端的平均值，則應使用不少於五個時間序列樣本。另由於此尖峰壓力為對應某時長內之結果，在分析上應定義該強風事件對應之時長，一般在進行風載重與設計風壓之評估時會取 1 小時或 10 分鐘之時長進行分析。

對於以較大的縮尺比例(如大於 1/50)模型進行風洞測試，由於無法在風洞中對風頻譜密度進行完整模擬，因此應使用其他測試與分析技術來估算尖峰響應，此類的部分紊流模擬技術在 Banks 等人(2015)之研究中有相關描述。

七、內風壓：在建築物模型上測得的外部壓力應與在原型建築物中，根據孔隙率、牆壁和屋頂開口等狀況下之內風壓壓相結合。

說明：

作用在建築之內部壓力取決於許多因素，包括建築結構中的孔隙、空調之出入開口、敞開的窗戶、可透式內牆之分佈和孔隙率或電梯井等中的熱浮力效應等。在建築模型中量測所有效應造成之內部壓力是不可行的，一般而言，應對內部壓力係數進行保守估計。如在暴風雨期間有可能在建築物帷幕結構中出現開口(例如，由於意外損壞引起的開口)，則應基於此類開口出現的可能性來保守地估計內部壓力。在風洞試驗之內風壓評估可採本國耐風設計規範與解說中之分類，即開放式建築無內風壓、部分封閉式建築內風壓係數採 ± 1.146 ，而在封閉式建築則為 ± 0.375 。

八、報告：試驗得出的設計外風壓應以簡化的方式提給帷幕或建築表面設計者。

建築物的表面壓力試驗報告應以建築物平面或立面形式呈現試驗結果，並以等壓區域顯示設計壓力分佈。這些等壓區域的形狀可以是不規則的，即代表實際測得的壓力分佈；亦可以是矩形分布，以便於設計者選擇表面披覆物之設計與形式。通常應以 0.5 kPa 的間隔進行製圖，該區域內之壓力等於或大於區域內的預測壓力。若建築處在強風地區，亦可加大壓差間隔製圖，如採用 1.0 kPa 的間隔。區域壓力分佈應分別顯示正設計風壓和負設計風壓之結果，且其應為已包含內風壓之結果，而用於繪製壓力分佈區域圖之各測點設計風壓也應製成表格。

除結果外，報告還應包括與本手冊要求有關的部分，即：

- (a) 測試程序、模型製作、風洞和大氣紊流邊界層模擬的敘述。另應包括含測試件和周遭地景的風洞模型照片。
- (b) 描述設計風速分析並考慮風壓係數方向性影響。
- (c) 各壓力測量位置圖，並標有壓力測點編號。
- (d) 測試風向，數據擷取時間和頻率響應。
- (e) 對測得的外部風壓進行統計分析。
- (f) 計算內風壓，以及將其結合到計算出的設計壓力之方法。

客戶可能需要以下附加信息，並且可讓數據便於使用：

(g) 以表格或列表形式完整列出每個風向的測量平均值，標準偏差，最小和最大壓力係數。

最後，應描述研究中遭遇的任何異常細節(若存在)，可透過拍照或錄影方式記錄留存。

第四章 風載重和動態反應風洞試驗量測

一、測試目標：風洞試驗對高層建築的整體載重和響應應能夠準確確定設計基底傾倒彎矩、剪力、扭轉彎矩、等效靜載重分佈，以及預測風引起的結構變形和振動加速度。

說明：

基底彎矩和剪力與結構強度設計相關，因此可以使用與極限狀態設計方法相關的長回歸期風速，或者採建築物使用年限的回歸期風速，其所得之結果，應參照鋼構或 RC 設計規範所提供之載重係數計算。變形量和加速度通常與服務使用設計相關，可參考建築物耐風設計規範與解說內容。

二、建築結構特性：結構工程師應提供風洞實驗室有關建築物結構動力特性的資訊，必須至少包括原型建築的前三個振動模態的模態形狀和自然頻率、質量和質量慣性矩分佈以及原型建築的阻尼特性。

說明：

除阻尼外，上述資訊通常可從該結構的數值模型中獲得，對於非常高、細長或複雜形狀的建築物，可能需要考慮較高振動模態的影響。可以從規範建議值或參考類似結構的實尺寸測量來估計阻尼(例如 Tamura 等，2000)。

三、測試方法：應通過(a)高頻力平衡儀測試、(b)多頻道壓力量測、(c)剛性氣彈性模型測試、或(d)完整氣彈性模型測試。使用氣動彈性測試時約化風速(U_h/n_0B ，其中 U_h 是建築物高度的平均風速， n_0 是振動自然頻率， B 是建築物的特徵寬度)對於具銳緣之建築物應達到 8 以上；對於六邊形、八邊形或倒角的建築應為 6 以上，對於圓形或橢圓形的建築則為 4 以上。

說明：

完整氣彈模型並不常見，僅在高階模態可能對結構響應做出重大貢獻的情況下使用。在大多數情況下，不需要使用氣彈模型，可以使用剛性模型測試(力平衡或進行同時壓力測量技術)來獲取風力頻譜，透過機械導納函數來獲得響應譜(Holmes, 2015)。但是，在氣動阻尼顯著或其接近結構阻尼的情況下，採用受力量測則不合適，高層建築中的高氣動阻尼可能發生在低紊流的環境中，或建築處於臨界約化風速的 80%以上時，在臨界約化風速時這些簡單外型的建築通常會出現明顯的氣動阻尼現象(Steckley, 1989)。

四、模型製作：測試建築物模型的總體尺寸，高度，平面形狀等，應精確到 2 %或 2 公釐以內。尺寸大於 1 公尺或建築物寬度的 10%(以較小者為準)且距離任何角落小於建築物寬度 15%的建築細節也應建模。模型之縮尺比例應不小於 1：800，同時應滿足第一章中規定的最小雷諾數的要求。

說明：

建築表面粗糙度對於控制流體的分離和再接觸很重要，因此應特別注意邊緣狀況。但在經過物理縮尺後限制了建築細節的製作，在實際建模時無法將所有小細節合併到建築模型中，模型細部製作建議之下限為應表現截面尺寸大於 1m 的特徵。

五、測試要求：採樣頻率應至少是建築物縮尺自然頻率的 5 倍(針對柔性建築 $f < 1 \text{ Hz}$)。應對至少 36 個風向進行測試，最小採樣週期應相當於實場時間 1 小時或 10 分鐘。

說明：

無論採樣時間和採樣頻率為何，都需要確認可擷取足夠的數據樣本以在反應譜中提供足夠的解析。在研究關鍵的風向效應時可增加細部風向試驗。

五、A 高頻力平衡儀測試：模型/力平衡儀頻率應至少比縮尺後的建築物所考量模態之自然頻率大 30% 以上。

說明：

將模型安裝在勁度非常高的力平衡儀上可測量模型的傾倒力矩。通常，必須使用非常輕的模型並採用剛性安裝方法，以使模型/力平衡儀系統具有很高的固有頻率。(Tschanz 和 Davenport, 1983; Boggs, 1991)。高頻力平衡儀可直接測量空氣作用於模型上的力量，但是這些力可能會因平衡儀和模型的結構特性而失真，因此將模型/力平衡儀頻率與縮尺模型頻率分開，可以最大程度地減少這種失真所帶來的誤差。

五、B 電子式壓力掃描器測試：當使用壓力量測方式，將表面壓力積分為作用在建築物上的總風力時，應遵守以下最低標準：

a) 每 120 m² 建築面積至少應分配一個壓力測點。

b) 建築物至少五層樓應分配一層壓力測點量測風壓。

c) 壓力測量儀器的振幅頻率響應，以記錄的振幅與施加的正弦壓力振幅之比表示，應顯示由 0 Hz 至 $(0.5U_h/B$ 或 $2.5n_0$ 取大者) Hz 的偏差不超過 10%。在此頻率範圍內，相位響應與線性變化的偏差也不應超過 10 %

使用電子式壓力掃描器同時測量壓力時，應確認任何一對壓力測點之間的相位差小於 30°。

說明：

在試驗上應避免取壓孔/管道/壓力傳感器系統的動態特性失真(Halkyard 等, 2010)，並且必須為每個取壓孔分配適當的模態形狀和面積加權，以用於計算合成風載重。對於高層建築模型而言，以壓力量測方法的限制是很難將夠多的測壓管插入模型中以同時進行數據收集，尤其是對於複雜的立面外型，在量測上有物

理性安裝的限制。但是，對於較低的建築物，通常有足夠的空間容納足夠的管道，以準確地定義壓力分佈和屋頂變化造成之貢獻(對於大跨度而矮的建築物可能很重要)。相對於高頻力平衡儀試驗，採用壓力量測方式可較容易地評估非線性以及耦合模態形狀造成之效應。

五、C 氣彈模型測試：對於各類型的氣彈模型結構特性，應將模態之間的頻率比模擬到 5% 以內的精度。若平移模態線型與線性模態差異在 20% 以內之情況下，可以使用剛性氣彈性模型進行模擬。對於更複雜的模態形狀，則應採用完整的多自由度氣動彈性模型。阻尼模擬可參考建築物耐風設計規範與解說，在鋼筋混凝土與鋼構形式建築分別設定為 2% 與 1%，另需注意兩平移與扭轉阻尼比例不應差距太大。

說明：

如果使用氣動彈性模型技術，應盡可能接近地模擬原型建築物的動態行為。這包括在兩個平移模態下由於相似的自然頻率而導致原型中的耦合效應發生時，其氣彈模型也會產生類似的自然頻率。

應注意確保模型的廣義質量與原型建築物的質量之間具有相似性。

如果旋轉中心與建築物的幾何中心不在同一位置上，則應從代表原型建築物旋轉中心的位置安裝建築物模型。

若模擬線性平移之振動模態可以透過(a)具基礎轉軸之剛性模型或(b)將剛性模型安裝於單點結構梁上進行。

在使用氣彈模型模擬之情況下，轉軸點的位置應使該模型在振動時之線性變化盡可能地與該振型形狀接近。

六、模態修正：在進行剛性氣彈測試或高頻力平衡儀測試時，若模態形狀與線性形狀的偏差大於 10%，則應對模態形狀進行修正。在給定的振動模式下，應

考慮不同轉軸向之間的耦合效應。

說明：

有多種校正方法可對模態進行修正，例如 Holmes(1987)，Boggs 和 Peterka(1989)，Xu 和 Kwok(1993)，Holmes 等(2003)。在同時採電子式壓力掃描測量技術時，可以將結構上每個高度處量測到的壓力，以振形與面積作為權重積分出各振態之基底剪力進行後續分析。

七、反應組合：在設計中應考慮到在兩個正交方向上的風載重和反應以及扭轉力矩和反應之同時影響。

說明：

直接風力和共振動態反應會在高層建築的迎風、側風向及扭轉力矩上產生等效載重，這些力會同時作用，不應視為單獨的載重狀況。如果在兩個正交方向上的平移頻率分的很開，則其反應在統計上之相關性也會很低。可才用 Holmes(2015) 描述之在正交反應沒有耦合或相關的情況下，組合平移載荷效應的方法。

如果可保持原型結構上各個頻率之間之正確比例關係，則全氣彈模型測試具有再現正交模式之間任何耦合的能力。使用剛性風洞模型並採用同步壓力測量技術，在未來將漸漸地可配合適當的結構工程設計軟體評估耦合效應，而在高頻平衡試驗，則無法重現動態耦合之效果。但是一般而言，建築物的頻率通常與結構工程師在設計階段所估計的不同，且耦合效應通常會透過正交模態間之能量傳遞而減輕共振之動態反應，且此現象在風洞試驗模型中很難準確地模擬。

八、振動加速度評估：應評估建築可服務性之加速度，以確保風致建築物振動所引起之不舒適性控制在適當的標準之內。

說明：

關於風引起的振動投訴可能是由於居住者在極端風災事件中被振動驚動，或由於頻繁感知到振動而煩惱(Denoon，2000 年)。可接受的振動標準取決於結構的

用途、其是否發生在強風中、居住者對感受到風致振動的可能反應以及風氣候和結構的動態特性等。國際常用的準則是 ISO6897-1984, ISO10137:2007。本項評估可參考建築物耐風設計規範與解說，對於居住用途之建築物，在半年回歸期風速下，側向尖峰加速度容許值為 0.05 m/s^2 ，若對於辦公大樓而言可略為提高。扭轉向之加速度應轉換為等效的平移加速度，並在考慮振動模態沿三個主軸的加速度間之相關程度，添加到組合加速度中。

九、等效的靜態負載分配：由氣彈試驗或高頻力平衡儀研究所得之基底彎矩應以合理且一致的方式分佈在結構上。

說明：

通常，高層建築上的風載重之平均值、背景(準穩態擾動)和共振分量所產生的等效靜風載重會隨著高度的不同而分佈(Holmes 和 Kasperski, 1996; Holmes, 2001)。背景載重分佈取決於載重作用的類型(如基底剪力或彎矩)及其在結構上的位置。但若共振分量比背景分量佔優勢，則組合擾動載重分佈可以近似為等效慣性載重(其為高度的函數)，後者與結構的模態形狀成比例。反之若背景反應占主導，則可以將背景基底彎矩作為等效靜風載重。

平均載重分佈與順風面、背風面之平均壓力係數隨高度的分佈相關(最大受力風向)，而動態分量的高度分佈則基於從旋轉軸點到頂高的線性變化(需依建築寬度變化的影響調整)或由慣性矩分佈。重要的是要確保假定的載重分佈產生的平均彎矩和擾動基底彎矩的值等於在風洞試驗中測得的值。在各風向將壓力測試的平均壓力積分載重與平均高頻力平衡儀量測載重或氣彈測試結果進行比較，對實驗室而言是一種有用的試驗品質保證比對方法。

十、報告：對建築結構進行之風載重和振動的評估應以簡化方式提供，此外，應給出各向加速度標準偏差與角隅水平尖峰組合加速度，並與標準進行比較。

說明：

該報告應提供結果摘要，標示整體設計基底彎矩剪力以及其設計用途相應之加速度。另外，應提供隨高程分佈之分層剪力與扭矩。報告至少應提供結構動態特性以及各風向受力/彎矩係數之平均值和背景擾動值。

如果模態形狀與線性模態有明顯差異，則應討論其所採用之模態形狀校正因子。在討論建築物加速度時，應將角隅水平尖峰組合加速度與前述的加速度可接受性準則進行比較。

附錄三 CAARC 建築之結構特性資料

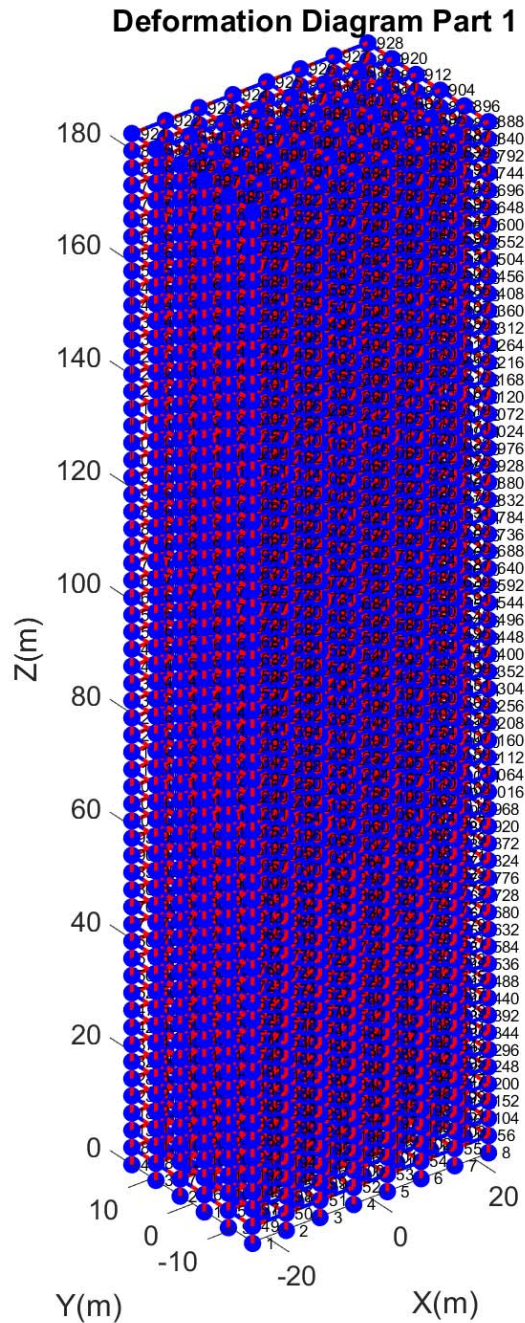


圖 C1 CARRC 數值結構模型與座標定義

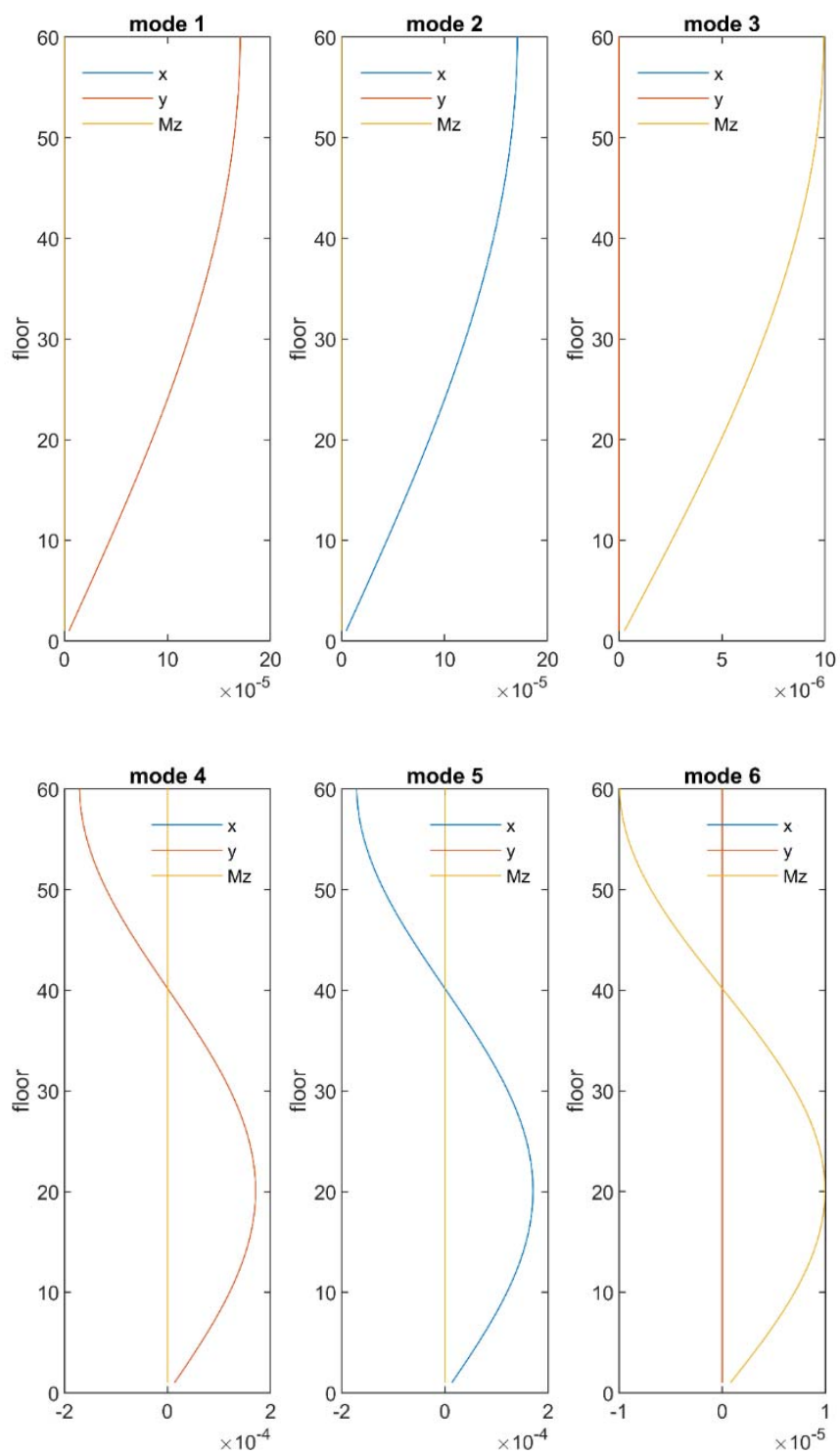


圖 C2 CARRC 數值結構模型 3 方向前 2 階模態形狀

表 C1 CARRC 數值結構模型 3 方向前 2 階模態頻率

MODE NUMBER	FREQUENCY (CYCLES/TIME)
1	0.286
2	0.350
3	0.376
4	0.858
5	1.050
6	1.127

附錄四 CAARC 建築之表面風壓點位資料

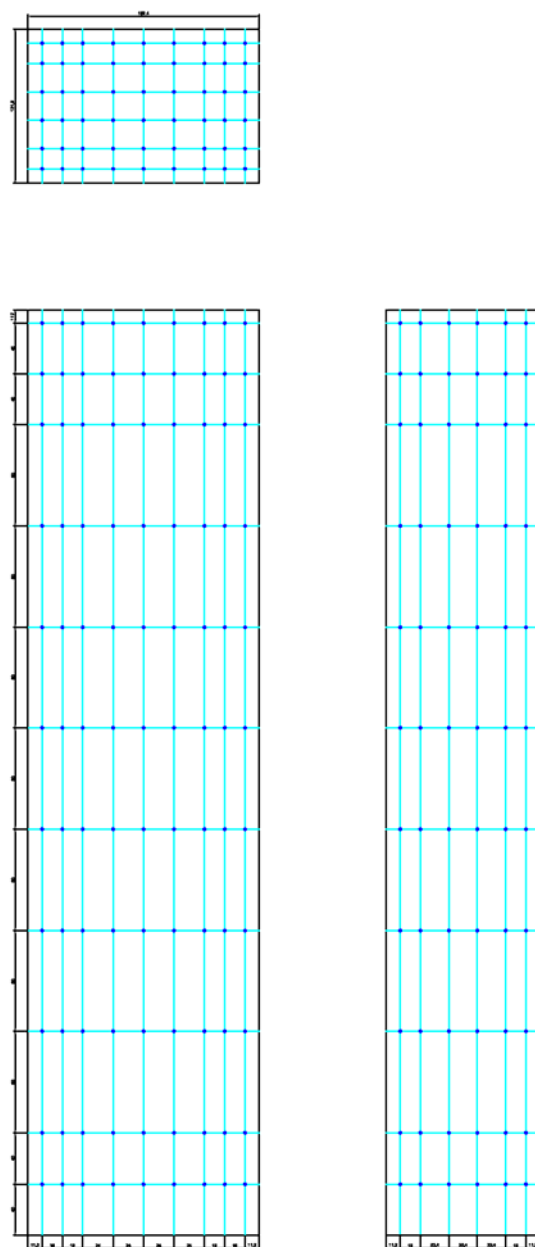


圖 D1 CARRC building 模型點位分佈

附錄五 期中審查意見與回應

期中審查會議委員意見回應

審查委員意見 (依發言順序)	研究團隊回應
一、建築師公會陳澤修委員	
1. 國內風洞實驗室對於儀器設備的調教、模型製作及檢測方式都應建立 SOP，讓受測結果趨於一致，避免不同實驗室有過多偏差之結果。	本案希望可藉由草擬試驗原則要求，降低不同實驗室試驗結果之差異性。
二、林怡均委員	
1. 風洞試驗報告應著重於客觀量測數據，不加入主觀判斷。	可由草擬之試驗原則要求降低人為判斷內容。
三、紀志旻委員	
1. 報告書內容應對評定機制與架構定義清楚。	將於期末報告內整合。
2. 期中成果目前看起來是規範風洞試驗的輸入及輸出，那最終成果是否會提到如何規範風洞實驗室管理以確保各實驗室報告結果近似？	目前規劃由風洞試驗技術原則內容統整列表建立綜合評定事項，在依照內容執行之試驗應具備基本品質。
四、劉國隆委員	

1. 淡江與建研所兩個風洞測試場域是否會有不同結果?本案是很好測試比較。	在滿足試驗技術原則之前提應不至於產生明顯差異。
2. 風洞實驗室試驗內容如建立是非常好的方向，希望能夠建立完成。	感謝委員肯定。
五、陳郁潔委員	
1. 風洞試驗規範可以讓風洞報告結果有一定的品質標準，也可以鼓勵有能力的單位加入試驗室行列，畢竟這個市場還大有可為。	感謝委員肯定。
2. 報告中提到引入專家意見來評定風洞試驗報告品質，那規範應該要就專家給定一個明確定義或位階。	基本上應為風工程領域之學者與研究人員，應由執行評定之單位明確定義。
3. 既然規定了試體的要求，希望加入建築物特殊造型測試規定，例如雙層帷幕、透空帷幕、玻璃欄杆等。以免測試結果沒有規範定義造成爭議。	在法規尚未訂定前，特殊造型之建築帷幕仍需進行個案討論，國內外仍有許多研究正在進行中，可繼續追蹤研擬。
4. ASCE 基本風速已經調整，國內耐風設計基本風速如何與國際接軌。	ASCE 新調整後之設計風速與我國之基本設計風速方式有異，但其最終計算結果與為調整前應差異不大。
六、張景中委員	
1. 建議以表列或圖示來條列陳	目前規劃由風洞試驗技術原則

述 4 項檢測試驗要求。	內容統整列表建立綜合評定事項，在依照內容執行之試驗應具備基本品質。
2. 計畫預計以 AWES 之試驗要求內容為參考架構，建議以附錄提供一份 AWES 報告書範本，提供參考依據。	遵照辦理，本案將於期末報告收錄試驗報告書範本以供參考。
3. 各國規範中需進行風洞試驗之條件，為風力效應明顯之狀況，宜具體化，何謂風力效應明顯之明確適用情況	感謝委員意見，將於期末報告內討論。
七、蕭葆義委員	
1. 風洞試驗之技術原則草案內容中列出之數據尚未學術定案，建議移至說明區，提供參酌，而在條文中使用較中性或範圍之數據。	遵照辦理，將於期末報告修正。
八、王安強副所長	
1. 本案請歸納出判斷何種條件之建築物，基於安全必要性之考量，設計上應做(或建議)做風洞試驗報告評定書，例如判斷多少高度，造型複雜等條件？	遵照辦理，將於期末報告討論。
2. 至於報告評定機制之落實，請具體建議納入建築法規之相關規定為何？	遵照辦理，將於期末報告討論。

附錄六 期末審查意見與回應

期末審查會議委員意見回應

審查委員意見 (依發言順序)	研究團隊回應
一、劉國隆委員	
1. 風洞試驗是非場好的測試工具，如研究單位所言，因為模型製造等因子影響，可再為後續研究探討如何運用到各種類型之建築型態其風力的承受狀況分析。	感謝委員肯定。
二、蕭蓀義委員	
1. 預期成果已完成。	感謝委員肯定。
2. 附錄八，P144 氣象資料，一般採 16 風向已足夠，145 提及風環境研究已 10 度為增量進行，實際應用上 16 風向角已足夠，建議修改。	感謝委員建議，將於結案報告內修改。
三、楊宏宇委員	
1. P47 提及風速低於 0.3m/s 不列入分析，建議統一。	由於考量氣象量測儀器之精準度，以及低風速下之風向判定誤差較大，將分析資料訂為 0.3m/s。
2. P55 針對圖 3.27 與 28 量測	由於各實驗室之試驗儀器並非

產生差異，可能因各實驗室風速計不同產生，可否採同設備進行量測？	完全相同，為討論可能發生之狀況，目前仍以各實驗室所具備之試驗儀器進行，委員提及之試驗條件也許可作為未來比對條件參考。
3. P57 有關近地處壓力分佈差異未於文中說明，請補正。	感謝委員建議，該處差異可能為周遭模型影響造成，將於結案報告內修改。
4. P92 環境風場量測精確與否除縮尺效應，周邊模型環境及風場剖面，最重要的是使用風速計一致性很重要。	感謝委員建議，將於結案報告內增加說明。
四、林怡均委員	
1. 本案提供基本參數的測試方法與程序。	感謝委員肯定。
2. 是否能夠準備執行一些推廣的案例試行，以決定未來執行的方式是否納入法源，以及報告內容的參數細節。	感謝委員建議，如本案內容所述，將先以非強制方式由建研所風洞實驗室或風工程學會進行相關討論後續執行內容，先以推廣試驗報告評訂方式進行。
五、婁光銘委員	
1. 風洞試驗報告評定小組建議法制化，以利推動。	感謝委員肯定。
2. 評定小組之組成架構建議補充。	感謝委員建議，目前國內尚無風力技師職務，對於進行風工程研究者多為風工程學會之學者與先進，本案建議將風工程學會列為評定小組成員應可滿足要求。

3. 評定細項建議有明確標準。	目前即為本案提供之風洞試驗之技術原則草案為主，後續執行可採此草案為基礎進行。
4. 可能於試驗事前審查？	由於建築審查時程、案件規劃、結構設計等問題，目前國內較無事前審查之要求，但若能在試驗前做初步審查為最佳建議。
六、陳建忠組長	
1. 檢視符合本研究試驗報告，以供未來安全地圖參考。	感謝委員建議，本案之試驗要求亦可提供業主對於以往進行之試驗報告進行判讀，然試驗報告之內容隨著相關研究演進略有變化，但仍應滿足基本學理需求，如風場條件與分析方式等內容。
2. 請邀請各環評、都審，要求風洞試驗報告，以維持未來品質。	感謝委員建議，後續推廣試驗報告評定機制可由建研所或風工程學會為始，在相關審查會提出要求，擴散資訊形成共識。

附錄七 第一次專家座談會意見與回應

第一次專家座談會議委員意見與回應

審查委員意見 (依發言順序)	研究團隊回應
一、蔡東和委員	
1. 若為非氣密性帷幕應如何評估其表面風壓力？	目前沒有統一評估方式，一般用透過率折減方式評估，或採另案測試處理。
二、方富民委員	
1. 建立建築風洞基本要求與訂定限制，對於報告未來願景，以及是否可納入規範或做為附件參考。	感謝委員意見，將於期末報告內討論。
2. 試驗技術原則應定時檢視，隨研究或需求更新內容。	感謝委員意見，本案草擬之技術原則內容的確應定期審視學界相關之研究，若有可精進之處，理當進行修正。
3. 評定機制由何單位決定？	感謝委員意見，評定機制與法源位階將於期末報告中討論。
4. 若引用到明確數字，應十分謹慎，或列出強烈參考依據。	感謝委員意見，將於期末報告修正。

三、陳若華委員	
1. 研究案內容合理，值得肯定。	感謝委員肯定。
2. 評定的位階為何？未來將為風力規範附件？建議於技術原則要求前言說明。	評定機制與法源位階將於期末報告中討論，並於後續版本增加說明。
3. 建議專有名詞統整說明。	感謝委員意見，將於後續版本修正。
4. 量化評定或值化評定？如果明確提及數字應具強而有力之文獻出處支持。	感謝委員意見，將於期末報告修正。
四、羅元隆委員	
1. 建議列出風洞試驗測試項目對應至技術規則之項目。	本案預計將於期末報告以表列方式對應實驗項目制定評定項目。
2. 評定機制應於下次專家座談會討論內政部建築研究所在評定機制之定位，以及風工程學會能協助的部分為何？使此原則要求與評定機制在使用上部會產生疑慮。	感謝委員意見，評定機制與法源位階將於期末報告中討論，並於後續版本增加說明。
五、郭建源委員	
1. 環境風場之評估準則建議採複數準則進行評估。	感謝委員意見，將在試驗比對後於期末報告進行討論。
2. 技術原則內容應考量國內風	聲壓擾動於各實驗室之差異很

洞實驗室實際會執行之事項，如是否需進行聲壓擾動討論？	大，與風洞本身與風機設計相關，在此列出為參考項目，可檢視實驗室之壓力量測品質。
六、李鎮宏主任	
1. 風環境準則是否可列出參考？	感謝委員意見，將於後續版本內討論增加資料。
2. 試驗報告保存年限是否參考TAF方式以6年為限？	感謝委員意見，將於後續版本修正。
3. 評定後之報告是否有其他效力？	目前一般環評審查對於報告並無評定機制，都是直接使用試驗報告結果。本案之評定為針對試驗設計、過程與分析結果進行，即經過評定後應具滿足學理之結果，但仍需法源訂立其位階後尚可確定效力。
七、陳建忠組長	
1. 本評定機制為實驗室報告品管，於國內外品質是否一致？	本案內容可用於檢視國外實驗室之報告，由於各國實驗室出產之報告格式與資料皆有差異，若參照本案將提出之評定事項表，至少可規範其內容滿足國內審查使用。
2. 應評估國內進行風洞試驗之案件數量。	遵照辦理。
3. 引用不佳之風洞試驗報告，對於建築是否產生影響？	倘若高估風載重與風壓極值，可能導致需進行不必要之結構補強，使建築成本增加。但若低估壓力與載重，最嚴重後果可能為

	建築振動高於預期，造成使用者感到不舒適，甚至對結構系統造成預期外之疲勞損壞；而設計風壓偏低則可能導致選擇表面披覆物材料之強度不足，於設計年限間產生預期外之破壞，並產生非必要性之財損。
--	---

附錄八 第二次專家座談會意見與回應

第二次專家座談會議委員意見與回應

審查委員意見 (依發言順序)	研究團隊回應
一、方富民委員	
1. 兩實驗室分別在不同條件下進行試驗所得之結果的確略有差異，但在滿足試驗假設條件下該差異應可控制在可接受之範圍。未來若有新進領域之試驗團隊，其亦可參考本案之試驗建議，滿足試驗應考量之項目與報告應包含之內容。	感謝委員建議，本案即希望訂出試驗參考之草案內容，供後續參考應用。
2. 團隊應思考評定機制之法源建立與該如何推廣與執行。	如本案內容所述，將先以非強制方式由建研所風洞實驗室或風工程學會進行相關討論後續執行內容，先以推廣試驗報告評訂方式進行。
二、陳若華委員	
1. 本案提出之試驗原則與要求應可提高國內未來商業案試驗檢測之可信度。評定表格亦可提供該試驗內容與報告基礎依循。	感謝委員肯定。

2. 目前尚無報告評定機構，由國內風工程學會應可作為公正第三方，對報告進行評定或釋疑。	感謝委員建議，本案後續亦將與風工程學會討論評訂內容與執行方式，期提供國內業者可正確理解報告內容與數據使用。
三、張育銘委員	
1. 本案雖訂出評定表格，但由於內容專業，仍應交由專業領域之學者或團體進行。	如本案內容所述，將先以非強制方式由建研所風洞實驗室或風工程學會進行相關討論後續執行內容，先以推廣試驗報告評訂方式進行。
2. 部分於國外進行之試驗結果顯示其計算出之設計風力或風壓較低，業者基於經濟性考量可能會選擇國外實驗室進行。若於國內實驗室進行並滿足本案所提之試驗要求與內容，則其可靠度是否高於國外試驗結果？	在建築檢測試驗中，除試驗條件設計外，分析方式亦可能影響最終提供之數據結果，如若於設計風速評估考量方向折減係數，則於分析計算設計風壓與風力時會產生平方倍之折減，對於結構設計結果產生較明顯差異。本案所提供之風洞試驗要求，僅能說明在滿足該試驗條件之狀況下，其試驗結果可視為具備學理背景基礎，如前所述，基本試驗結果如風壓係數、風力係數應不至於差異明顯，而在計算實尺寸風壓與風力所乘上之設計風速影響可能較為顯著，該試驗報告應說明其設計風速如何決定等資訊，以供為評定查驗之依據。
3. 若有明確法源依據對於業界執行會較有幫助。	感謝委員建議，本案後續亦將與建研所繼續討論法源依據問題，期於未來提供國內業者參考使用。

四、楊培堅委員	
1. 目前於國內耐風設計規範中提及 100 公尺以上與風力效應明顯之建築建議進行風洞試驗，未來是否考慮採用更明確的條件以增加強制力？以及可考慮在規範中述明該試驗報告應經過評定或認可始得採用，可更明確讓使用者認知該資訊。	本案將提供建議增修之文字內容，以供未來規範修訂參考，後續交由規範修訂小組討論後決定是否增加明確進行風洞試驗之條件。
2. 國內目前在加速度評估上皆採用半年回歸期風速進行評估，是否可增加其他回歸期風速之建議結果？	本案內容尚依照現行版本之耐風設計規範與解說內容討論，此加速度對應風速回歸期問題，目前風工程學會內部已在進行資料蒐集與討論，亦會於未來版本之耐風規範中說明。
3. 風洞試驗之回饋若可降低結構整體風載重或加速度，對於設計者可能提高進行風洞試驗意願。	國內外較大型之建案的確有此種試驗數據回饋機制，但其前提為風洞試驗團隊應包含於建案規畫中，在設計過程中重複進行風洞試驗量測與結構修改驗證，尚可達到此要求，此需國內設計單位對於風洞試驗結果反饋機制之認知提升，在編列風洞試驗經費與結構設計中尋求平衡。
五、鄭啟明委員	
1. 本案兩試驗之試驗數據比對差異應為可接受之結果，由評定表格之內容亦可快速檢視試驗設計與試驗結果是否	感謝委員肯定。

合理。	
2. 執行試驗報告評定機制不容易，應由建研所(政府單位)與風工程學會(學術單位)合作推動才較有可能執行。	本案先擬定出可能執行之方式，後續可由建研所或風工程學會成立評定單位與機制，先將此構想實際執行，並蒐集回饋意見修正內容，待報告評定形成共識後，可提供未來實際推動法規化之基礎。
3. 風洞試驗報告若經第三方風工程專業單位檢視，可快速排除較明顯之問題，對於業者使用數據也較有保障。	感謝委員意見。
六、李鎮宏主任	
1. 部分數據差異如加速度資料，若降低有效位數表示則其差異已不明顯。	感謝委員意見，本案內容為了將試驗結果數據進行較細部之檢視，採用較高之有效位數以利數據比對。
2. 國外不同實驗室之數據結果差異可能 20 至 30%以上，以本案兩實驗室內容比對之結果差異約為 10%，數據已很吻合。	感謝委員肯定。
3. 耐風設計法規面修改較易推動，建議將柔性建議改為較強字眼。近年本所研究案較與規範相關者，後續將納入規範修訂之內容。	本案將提供建議增修之文字內容，以供未來規範修訂參考。

附錄九 建築工程風洞試驗報告綜合評定表

主項	次項	包含細項	是否符合要求
總則內容	流場資訊	風速剖面	☐ 是 ☐ 否
		積分尺度	☐ 是 ☐ 否
		能譜分佈	☐ 是 ☐ 否
		零壓力梯度	☐ 是 ☐ 否
	縮尺資訊	長度縮尺	☐ 是 ☐ 否
		風速縮尺	☐ 是 ☐ 否
		時間縮尺	☐ 是 ☐ 否
	相關要求	阻塞比	☐ 是 ☐ 否
		雷諾數	☐ 是 ☐ 否
		模型製作精度	☐ 是 ☐ 否
環境風場舒適度 評估試驗	報告內容	測試程序、模型製作、風洞和大氣紊流邊界層模擬的敘述	☐ 是 ☐ 否
		量測點位分佈	☐ 是 ☐ 否
		該地氣象數據資料之分析方式與結果	☐ 是 ☐ 否
		評估風向	☐ 是 ☐ 否
		量測儀器資訊、採樣時間與採樣頻率	☐ 是 ☐ 否
		各點無因次風速資訊及風速機率特性	☐ 是 ☐ 否
		舒適度評估結果，建築興建前後之變化以及植栽對風環境判定之影響	☐ 是 ☐ 否
局部構件及外部 被覆物所受之局 部風壓試驗	報告內容	量測點位分佈	☐ 是 ☐ 否
		設計風速	☐ 是 ☐ 否
		評估風向	☐ 是 ☐ 否
		量測儀器資訊、採樣時間與採樣頻率	☐ 是 ☐ 否
		極值風壓分析	☐ 是 ☐ 否
		風速壓與內風壓	☐ 是 ☐ 否
		各點位極值風壓係數與風壓值	☐ 是 ☐ 否
		設計風壓分佈圖	☐ 是 ☐ 否

建築工程風洞試驗技術與報告評定機制研究

建築結構主抗風系統之風載重風洞試驗	報告內容	設計風速	☐ 是 ☐ 否
		評估風向	☐ 是 ☐ 否
		採用量測方式與載重計算說明	☐ 是 ☐ 否
		量測儀器資訊、採樣時間與採樣頻率	☐ 是 ☐ 否
		結構特性資料	☐ 是 ☐ 否
		風力係數結果	☐ 是 ☐ 否
		設計風力之載重組合結果	☐ 是 ☐ 否
		各樓層設計風力結果	☐ 是 ☐ 否
		最高居室加速度結果	☐ 是 ☐ 否

評定結果：

評定人員：

註：評定表內之項目，細部內容應參照建築檢測風洞試驗之技術原則草案內容進行，評定事項應就報告內容分項進行，評定人員應為風工程領域之學者或研究人員。

附錄十 建築工程風洞試驗報告內容範例

110 年內政部建築研究所協同研究案

「建築工程風洞試驗技術與報告評定機制研究」

風洞試驗報告內容建議範例

委託單位：內政部建築研究所

執行單位：XXXXXXXXXXXXXXXXXX

中華民國 XXX 年 X 月 X 日

1. 摘要

簡述本案風洞試驗工作目的、流程與參數：包含基地位址、新建物樓層數與高度、流場條件(地況)，試驗風向角範圍、風向角增量與試驗數量、試驗相關參數、模型縮尺、分析方式、風場舒適度重點結果、風壓重點結果、載重重點結果等。

2. 氣象資料與分析

說明氣象分析方式與結果，可以表列呈現結果。

表例 各風向之風速、發生機率與韋伯函數之參數值

風向角 (度)	平均風速 (m/s)	發生機率 (%)	k	c	風向角 (度)	平均風速 (m/s)	發生機率 (%)	k	c
0	1.64	0.66	1.44	1.73	80	3.89	13.94	2.53	4.24
10	1.69	0.51	1.35	1.84	90	3.63	14.58	2.41	3.92
20	1.99	0.53	1.41	2.22	100	2.97	7.5	2.03	3.27
30	2.21	0.65	1.51	2.42	110	2.69	5.41	1.82	2.94
40	2.4	0.83	1.75	2.61	120	2.29	3.45	1.52	2.47
50	2.74	1.34	2.1	3.58	130	1.85	2.67	1.42	2
60	3.84	5.12	2.35	4	140	1.41	2.12	1.61	1.58
70	3.71	7.56	2.44	3.95	150	1.31	2.44	1.78	1.46

3. 風洞實驗內容

敘述本案風洞試驗流程與試驗目的。

3.1 新建物與地況模型製作

敘述本案模型製作縮尺，模型製作精度，以及周邊地景製做範圍。新建物模型依照不同風洞試驗項目製做相應符合試驗目的之模型。

3.2 實驗設備

3.2.1 風洞

本案使用之風洞種類型式、測試段尺寸、流場品質(例如:平均剖面、紊流強度等)以及本案模型阻塞比。

3.2.2 相關儀器設備

說明本案使用之儀器設備，例如：地表風速計、風速計、壓力掃描閥、六力平衡儀等。

3.3 流場特性

敘述本案風洞試驗模擬地況種類、流場縮尺。繪製流場平均速度與紊流強度剖面量測結果圖。

3.4 風環境評估研究

敘述行人環境風場試驗流程，包含數據取樣時間與頻率、時間縮尺、換算實場時間、雷諾數、設計風速。試驗風向角範圍、風向角增量與試驗數量(例如:試驗風向角 0 度至 360 度，以 22.5 度為增量，共執行了 16 組)。

地表風速計測點安裝位置建議需滿足下列要點：

1. 新建物出入口、露臺、迎風面、背風面、側面、角隅區等容易產生高風速區域。
2. 建物周圍街道、巷弄、廣場等行人活動區域。
3. 預計設立與既存特定活動空間，如室外座位、游泳池或露天餐廳等區域。

3.5 表面風壓風洞試驗

敘述表面披覆物風壓試驗流程，包含數據取樣時間與頻率、時間縮尺、換算實場時間、雷諾數。試驗風向角範圍、風向角增量與試驗數量(例如:試驗風向角 0 度至 360 度，以 10 度為增量，共執行了 36 組)、設計風速、風速壓與內風壓。

說明新建物表面風壓測點分佈狀況，設置密度等資料。

3.5 風載重和動態反應風洞試驗

敘述風載重和動態反應風洞試驗流程，包含數據取樣時間與頻率、時間縮尺、換算實場時間、雷諾數。試驗風向角範圍、風向角增量與試驗數量(例如:試驗風向角 0 度至 360 度，以 10 度為增量，共執行了 36 組)、設計風速以及定義各載重方向。新建物結構動力特性資訊，建議列出至少包括原型建築的前三個振動模態的模態形狀和自然頻率、質量和質量慣性矩分佈以及原型建築的阻尼特性。

4. 試驗結果

4.1 風環境評估研究

敘述與比較大樓興建前、大樓興建(無植栽配置)與大樓興建(有植栽配置)風速結果以及行人舒適度之差異。提供無新建物、新建物(無植栽配置)、新建物(有植栽配置)各風向角無因次化風速(表例 H.1)、行人風場評估標準(表例 H.2)、風速評估機率結果(表例 H.3)、行人風場舒適性評估表(表例 H.4)以及測點分佈圖(圖 H.1)與行人風場舒適性評估圖(圖 H.2)方便審查單位審閱。

4.2 表面風壓風洞試驗

敘述試驗結果，列出各測點風壓係數與設計風壓值(表例 H.5)，並繪製新建物設計風壓圖(附錄圖 H.2)。

4.3 風載重和動態反應風洞試驗

敘述試驗結果，列出各樓層、各風向 F_x 、 F_y 與 F_t 載重值(表例 H.6)、分析 12 組載重組合(表例 H.7)以及頂層居住層加速度(附錄表 H.8)。

5. 結論與建議

簡述各項風洞試驗之結果，確認是否符合本案使用目的，以及提供改善措施建議。

表例 H.1 舊建物風向角 $0^{\circ} \sim 22.5^{\circ}$ 無因次化風速

風向角	0°			22.5°		
編號	無因次化 平均風速	無因次化 擾動風速	無因次化 陣風風速	無因次化 平均風速	無因次化 擾動風速	無因次化 陣風風速
1	0.10	0.11	0.42	0.08	0.11	0.43
2	0.13	0.13	0.53	0.11	0.12	0.48
3	0.21	0.14	0.64	0.18	0.14	0.60
4	0.08	0.13	0.47	0.08	0.12	0.43
5	0.15	0.11	0.48	0.16	0.12	0.52
6	0.13	0.10	0.43	0.15	0.10	0.45
7	0.16	0.10	0.47	0.16	0.10	0.48
8	0.11	0.10	0.41	0.10	0.09	0.37
9	0.09	0.09	0.37	0.11	0.09	0.40
10	0.13	0.11	0.46	0.17	0.11	0.50

表例 H.2 採用之評估標準

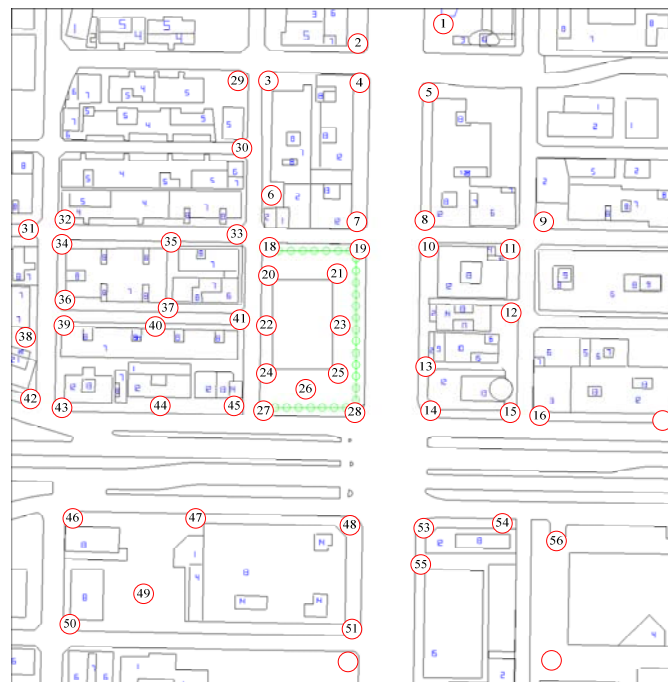
評估標準	活動性質	門檻風速	範圍(m/s)	發生機率底限
Hunt et al.	長時間停留	$\bar{U} + 3U_{rms}$	>6	<10%
	短時間停留	$\bar{U} + 3U_{rms}$	>9	<10%
	行走	$\bar{U} + 3U_{rms}$	>9	>10%
	不舒適	$\bar{U}$	>9	>1%

表例 H.3 風速評估機率結果

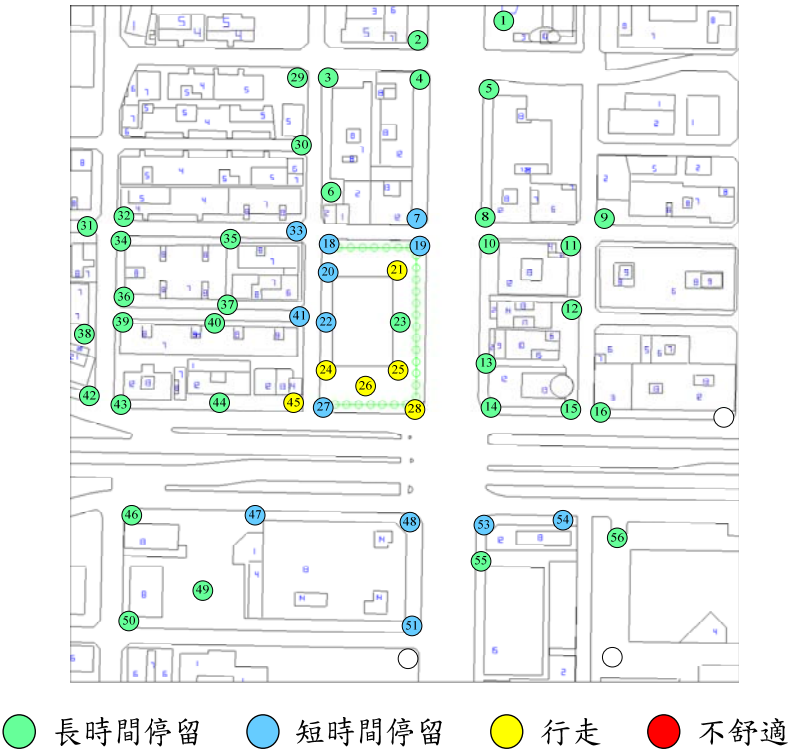
測點	累積發生機率 (興建前)			累積發生機率 (興建後-無植栽)			累積發生機率 (興建後-有植栽)		
	$U_{eff} > 6 \text{ m/s}$	$U_{eff} > 9 \text{ m/s}$	$U > 9 \text{ m/s}$	$U_{eff} > 6 \text{ m/s}$	$U_{eff} > 9 \text{ m/s}$	$U > 9 \text{ m/s}$	$U_{eff} > 6 \text{ m/s}$	$U_{eff} > 9 \text{ m/s}$	$U > 9 \text{ m/s}$
1	1.42	0.01	0.00	3.57	0.06	0.00	3.26	0.06	0.00
2	0.30	0.00	0.00	0.36	0.00	0.00	0.34	0.00	0.00
3	1.22	0.01	0.00	3.88	0.07	0.00	3.46	0.05	0.00
4	0.18	0.00	0.00	0.44	0.01	0.00	0.34	0.01	0.00
5	6.48	0.29	0.00	0.91	0.00	0.00	0.37	0.00	0.00
11	0.12	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00
12	0.51	0.00	0.00	0.23	0.00	0.00	0.24	0.00	0.00
13	0.00	0.00	0.00	0.32	0.00	0.00	0.29	0.00	0.00
14	2.76	0.09	0.00	4.41	0.12	0.00	2.39	0.06	0.00
15	3.87	0.09	0.00	3.02	0.07	0.00	2.78	0.04	0.00
21	3.18	0.04	0.00	16.89	2.86	0.01	15.26	2.55	0.01
22	0.38	0.01	0.00	10.14	0.80	0.00	8.93	0.61	0.00
23	5.32	0.20	0.00	1.69	0.18	0.00	0.69	0.01	0.00
24	0.35	0.01	0.00	20.40	4.04	0.03	19.63	3.82	0.05
25	0.63	0.00	0.00	21.55	5.07	0.10	20.51	4.46	0.05

表例 H.4 行人風場舒適性評估結果

測點	興建前	興建後- 無植栽	興建後- 有植栽	測點	興建前	興建後- 無植栽	興建後- 有植栽
1	長時間坐站	長時間坐站	長時間坐站	11	長時間坐站	長時間坐站	長時間坐站
2	長時間坐站	長時間坐站	長時間坐站	12	長時間坐站	長時間坐站	長時間坐站
3	長時間坐站	長時間坐站	長時間坐站	13	長時間坐站	長時間坐站	長時間坐站
4	長時間坐站	長時間坐站	長時間坐站	14	長時間坐站	短時間坐站	長時間坐站
5	短時間坐站	長時間坐站	長時間坐站	15	長時間坐站	長時間坐站	長時間坐站
6	長時間坐站	長時間坐站	長時間坐站	16	長時間坐站	長時間坐站	長時間坐站
7	短時間坐站	短時間坐站	短時間坐站	17	長時間坐站	長時間坐站	長時間坐站
8	長時間坐站	長時間坐站	長時間坐站	18	長時間坐站	短時間坐站	短時間坐站
9	長時間坐站	長時間坐站	長時間坐站	19	短時間坐站	行走	短時間坐站
10	短時間坐站	短時間坐站	長時間坐站	20	長時間坐站	短時間坐站	短時間坐站



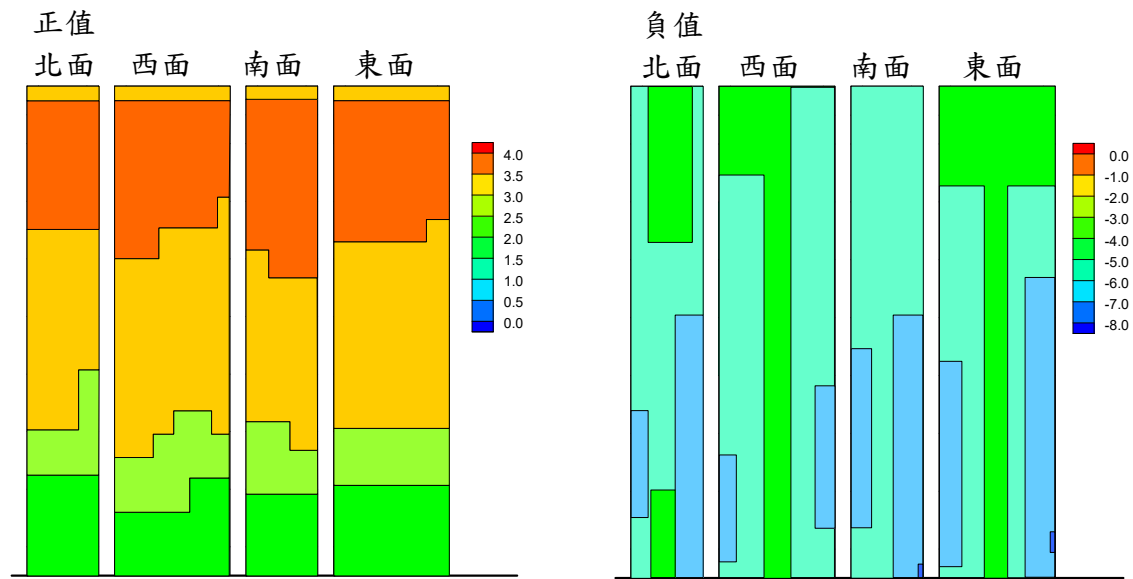
圖例 H.1 地表風速計安裝分佈圖



圖例 H.2 行人風場舒適性評估

表例 H.5 各測點風壓係數與設計風壓值

測點編號	最大風壓係數 -正壓	風向角	設計風壓 -正壓	最大風壓係數- 負壓	風向角	設計風壓 -負壓
1	0.94	280	1.91	-1.05	20	-2.14
2	0.99	330	1.58	-1.22	220	-2.15
3	0.89	30	1.78	-1.35	220	-3.39
4	0.97	30	1.81	-1.46	220	-2.25
5	0.93	140	1.99	-1.41	120	-1.18
6	0.88	140	1.47	-1.45	30	-1.27



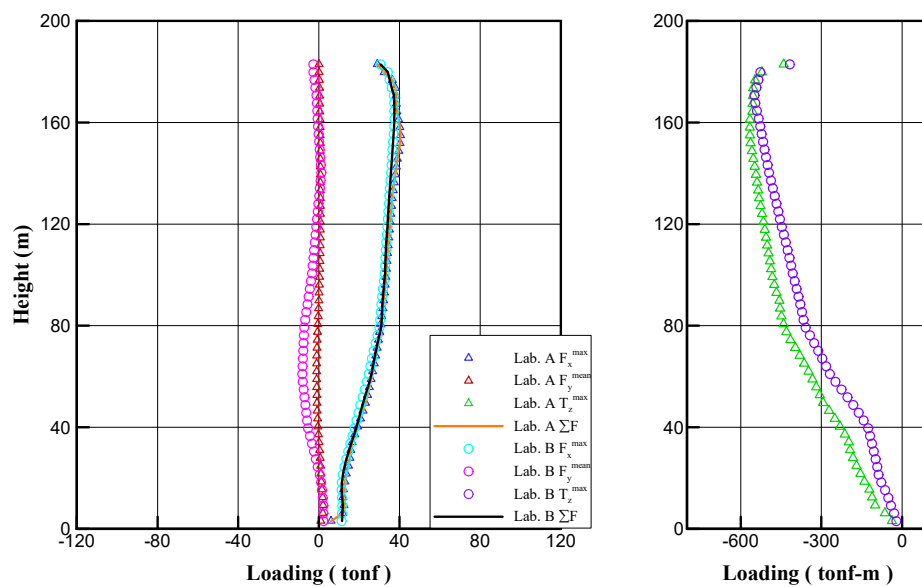
圖例 H.3 設計風壓圖 (單位：kPa)

表例 H.6 X1 載重組合各樓層風載重

高程	X1-Fx (tonf)	X1-Fy (tonf)	X1-Tz (tonf-m)
182.9	28.967	0.064	-440.084
179.8	32.490	0.064	-559.131
176.7	35.677	0.156	-564.613
173.6	40.683	0.395	-580.572
170.5	44.355	0.542	-588.418
167.4	43.251	0.587	-576.145
164.3	40.131	0.577	-566.341
161.2	39.202	0.618	-553.848
158.1	39.229	0.639	-557.285
155.0	39.257	0.659	-560.700
151.9	39.285	0.679	-564.580

表例 H.7 載重組合結果

載重組合形式	F _x (tonf)	F _y (tonf)	T _z (tonf-m)	合力 (tonf)
X1	1724	16	-23864	1724
X2	-1708	176	-21214	1717
Y1	53	2978	-13212	2978
Y2	58	-3007	-12092	3007
R1	117	2976	-13212	2979
R2	0	2977	-13212	2977
R3	0	-3005	-12092	3005
R4	97	-3006	-12092	3008
T1X	-1623	11	25386	1624
T1Y	-660	2073	25386	2176
T2X	-1623	11	-26074	1624
T2Y	-660	2073	-26074	2176



圖例 H4 主抗風系統設計風力載重組合圖(X1)

表例 H.8 載重組合最高居室尖峰加速度結果

	最高居室樓層尖峰加速度(m/s ²)		
結構阻尼比	A _{xc}	A _{yc}	A
0.01	0.0145	0.0127	0.0192

附錄十一 耐風設計規範修訂研擬內容

我國規範內容在第五章為風洞試驗，內容概述建議進行風洞試驗之狀況、試驗項目、模擬要求與報告引用時應注意之項目。本案建議之風洞試驗技術原則可做為規範內容之延伸，對規範內提及之項目做進一步解釋，並包含試驗量測儀器之要求。本案針對現行規範內容與風洞試驗相關部分提出幾項建議修增之內容，供未來規範修訂參考。

原條文
5.1 適用範圍 建築物之耐風設計，依本規範無法提供所需之主要抗風系統設計風力或是外部被覆物之設計風壓風力資料時，得以風洞試驗作為耐風設計之依據。<u>當建築物之高度超過 100 公尺，或風力效應明顯時，建議進行風洞試驗。</u> 凡施行風洞試驗之建築物，其設計風力、設計風壓與舒適性評估得以風洞試驗結果為準。
修訂討論
底線文字為現行規範內建議進行風洞試驗之依據，多數建築師與結構技師原則上皆依照高度 100 公尺作為判定是否進行風洞試驗，而後句「風力效應明顯」並未說明判斷方式。對於建築物是否容易產生氣動不穩定性確實難以斷下結論，但若參考國內規範提及之內容，<u>矩形斷面建築當高寬比大於 4 以上，約化風速大於 8.3 後，應檢核避免在設計風速內發生橫風向共振與空氣動力不穩定性現象，必要時應進行風洞試驗。</u>由於一般建築師或結構技師並非風工程背景之人員，該如何檢核是否會發生空氣動力不穩定現象一般難以達成，且即便發生共振現象，其亦與結構本身之動力特性相關，在低阻尼結構將產生很明顯之振動放大，而高阻尼之建築其振幅放大

狀況則較不明顯。

建議於解說內容中，在阻尼比與結構自然頻率設定範圍內(需進一步討論較可能產生氣動不穩定之參數範圍)，增加建築矩形與圓型斷面外型高寬比與約化風速之判斷式，可讓使用者有更明確之判定依據。

原條文

5.3 風洞試驗應遵守之模擬要求

採用風洞試驗測算建築物設計風力及風力效應時，應遵守下列風洞試驗模擬要求：

1. 風洞試驗之設計應依照試驗項目性質，合宜的遵守建築結構與流場的各項模型縮尺。
2. 風洞試驗應適當模擬建築物位址所在之大氣邊界層流特性，包括邊界層高度、平均風速剖面以及紊流強度、紊流尺度等大氣紊流特性。
3. 風洞試驗時，對於建築物可能造成影響的鄰近地貌、地物，應作適當的模擬。
4. 風洞試驗時，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。
5. 風洞試驗時應妥善考慮雷諾數效應。
6. 風洞試驗時應考慮不同風向的影響，並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。

修訂討論

5.3 之解說內容已初步說明試驗基本模擬要求，而本案之風洞試驗技術原則則更詳細的說明應滿足之條件，後續期望建研所或風工程學會可針對該技術原則之內容召開會議進一步討論與修訂內容，最終出版為一本適用本

國建築風洞試驗之參考書籍。若存在明確之參考文件，即可在本條文解說內註明，試驗之技術原則可參考此文件內容進行，而該參考文件之內容修訂則可隨規範修訂時進行內容更新，以因應試驗量測技術之演進。

原條文

5.4 設計時風洞試驗報告之引用

根據風洞試驗計算主要風力抵抗系統之設計風力與局構件之設計風壓時，應依據 2.5 節之規定，採用 50 年或 100 年回歸期之設計風速；計算屋頂尖峰加速度時，應採用半年回歸期之設計風速。風洞試驗時應考慮不同風向的影響，計算風力時，除了規範另有規定，不得使用具有方向性的設計風速。

建築物的設計風力應考慮數種最嚴重的風向，設計風力組合應同時包括各層的二水平主軸方向風力以及扭矩。局部構件之設計風壓應採用風洞試驗在各風向下測算所得的最大極值風壓。舒適性評估則以半年回歸期風速為基準，檢核屋頂加速度。

修訂討論

由於此條文提及報告引用內容，若在本條文內加註該風洞試驗報告內容應經過專業第三方評定或檢視後方可使用，則可直接產生強制力。由於目前國內尚未建立評定機制與法源，冒然更改茲事體大，應待各方對報告評定存在共識後尚可進行，但先階段應可先於解說中增修內容。

建議於解說中提及，進行風洞試驗後，試驗報告使用者若對風洞試驗報告內容不熟悉、無法判定與解讀、或對報告內容有疑慮者，可送第三方專業單位進行評定或釋疑後，方可引用內容。

建築工程風洞試驗技術與報告評定機制研究

出版機關：內政部建築研究所

電話：(02) 89127890

地址：新北市新店區北新路3段200號13樓

網址：<http://www.abri.gov.tw>

編者：陳建忠、鍾光民、鍾政洋、傅仲麟、周晉成、林元智、

郭建源、蔡宜中

出版年月：110年12月

版次：第1版

ISBN：978-986-5456-69-6