

台南市美術館碎形屋頂設計風力評估

蔡明樹^{1*} 陳正瑋² 陳建成³

^{1*}淡江大學風工程研究中心研究人員 祺昌工程科技有限公司副總經理

²淡江大學風工程研究中心研究人員 祺昌工程科技有限公司

³聯鋼營造工程股份有限公司

摘要

台南市立美術館以五角形碎形屋頂做為整體建築之外部遮陽結構。該屋頂由空間桁架支撐許多幾何造型相同的碎形單元而組成，碎形單元在三維空間中包含了許多開孔平板。本案以高頻力平衡儀做為主要之風力量測工具，再輔以表面風壓量測，做為計算局部風壓在整體屋頂上分配比例之依據。整體抗風系統風力量測之風洞試驗物理模擬，利用縮尺1/200之模型進行試驗，以較小的縮尺涵蓋較多的周圍鄰房變化，來合理反應逼近流場對碎形屋頂之影響。然而碎形單元複雜而微小之幾何變化，則因為縮尺不足而無法完全依實際形狀製作，此處即設計一個能在縮尺1/200條件下製作之簡化碎形單元來模擬整體抗風系統風力實驗之真實碎形單元，並以縮尺1/4之碎形單元模型，個別於風洞中量測此二者之平均風力差異，做為簡化碎形單元建構之縮尺1/200整體屋頂風洞試驗結果之修正依據。

本案藉由高頻力平衡儀個別量測縮尺1/200單一片屋頂之風力，其與整體屋頂於基底位置之「平均」風力比值，視為是整體屋頂關於其「平均」風力與「擾動」風力此二者在各單片屋頂之分配方式。另外利用表面風壓之量測技巧，於縮尺1/200碎形屋頂之內外側共設置100個風壓測點，量測屋頂表面大致之平均壓力分佈，做為其「垂直」方向整體風力於局部位置之分配比例。

本案結合不同縮尺模型並透過兩種風力量測手段，對幾何構造複雜之台南市美術館碎形屋頂，進行詳細之設計風載重評估，以提供結構工程師進行合理之結構設計。

關鍵字：碎形屋頂，設計風力，高頻力平衡儀

Keywords: fractal roof, design wind load, high frequency force balance

1. 前言

對於桁架結構之設計風載重分析，在進行縮尺風洞實驗以取得桁架之氣動力特徵時，一般多以裝設於結構基底之高頻力平衡儀取得整體風力係數、頻譜，並

利用平均風速剖面做為風力在結構高度上分配之依據。若對於桁架幾何形狀在空間上有明顯變化者，則多以桁架不同幾何形狀之區塊模型風力試驗，量取各區塊風力係數比值並配合風速剖面之變化，做為風力分配之依據(文獻2)。至於高層建築常用之風壓量測，則受限於桁架縮尺模型的桿件尺寸不足，不易裝設合理之風壓量測管線系統進行風力評估。

對於本案之三維桁架碎形屋頂而言(圖1)，由於其下方封閉式玻璃屋頂、美術館主體結構與碎形屋頂的間距僅有1.5公尺，由此量體形成之複雜氣流使得碎形屋頂之局部風力分布無法假設隨平均風力剖面而改變。另外，組成碎形屋頂的碎形單元因為幾何尺寸過小，難以在整體屋頂縮尺模型中正確的製作。這些問題將以簡化之縮尺模型配合傳統之高頻力平衡儀、表面風壓試驗加以評估。

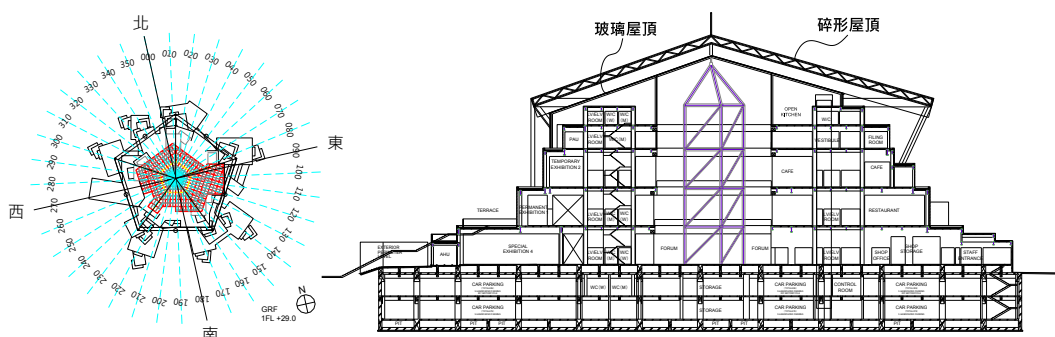


圖1 碎形屋頂及玻璃屋頂之平剖面圖示意圖

2. 風洞實驗內容

本文物理模擬縮尺實驗所使用之風洞設備為淡江大學第二號邊界層風洞，該風洞屬於吸入、開放型，風洞實驗段長18.0 m，斷面寬3.2 m、高2.0 m。

2.1 逼近流場特性

本案位於台南市，台南地方法院北側，其周圍大部份屬於4~5層樓之低矮平房，參照國內風力規範，其周圍地況以B地況進行模擬。

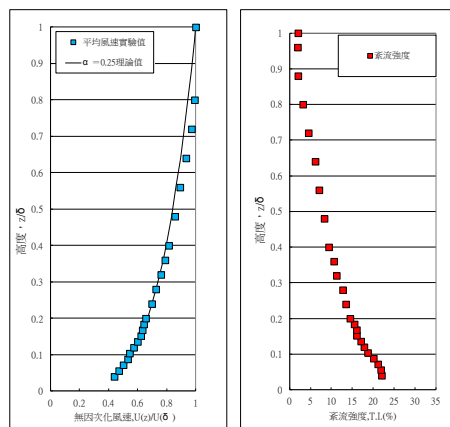


圖2 大氣邊界層紊流強度(左圖)及平均風速剖面(右圖)

圖2分別顯示在風洞之試驗段內，不同高度順風方向之平均流速及紊流強度

隨高度變化之剖面曲線，試驗縮尺為 1/200。根據風速剖面圖所計算 α 值為 0.25，符合規範 B 地況之流場性質。

2.2 局部構件風力實驗之碎形單元模擬

五角形碎形屋頂由空間桁架支撐許多幾何造型相同的碎形單元而組成，碎形單元在三維空間中包含了許多開孔平板 (圖 3)。

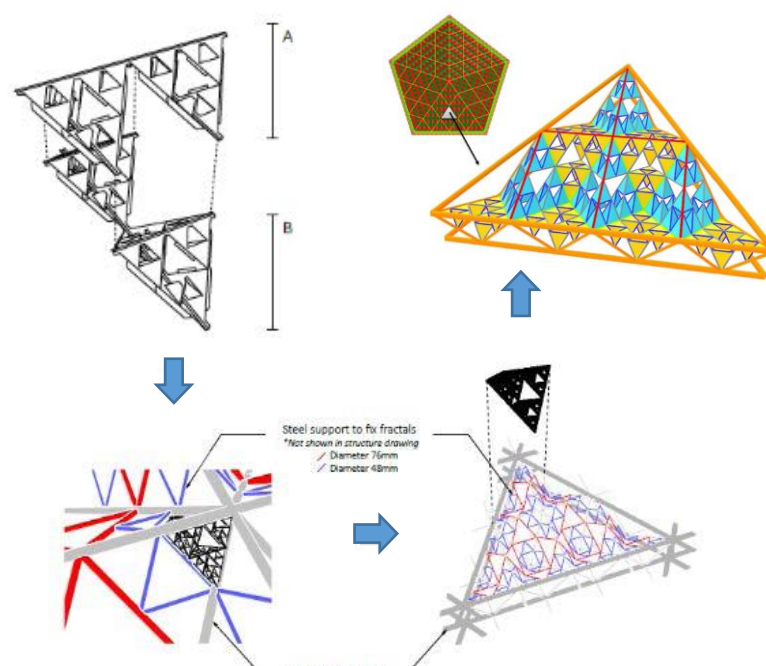


圖 3 碎形單元之組成及與空間桁架之關係

局部構件以一個碎形單元為單位，需量測其所受風力以用於碎形單元與空間桁架之間的連接材設計。由於該屋頂是由這些變化複雜的小碎形單元組成，過小的幾何變化在本案全區整體模型(縮尺 1/200)中，不但難以準確模擬，也無法以風壓實驗量測其表面壓力變化。因此改以大比例尺模型(縮尺 1/4)模擬單一碎形單元，於逼近流場設定為平滑流場之條件下，以高頻力平衡儀進行風洞試驗(圖 4)。

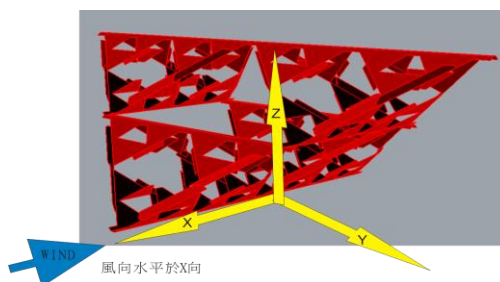
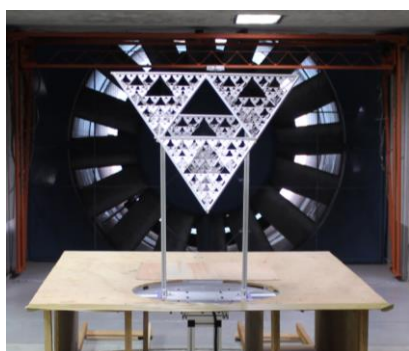


圖 4 縮尺 1/4 真實碎形單元風洞實驗 圖 5 真實碎形單元之來風方向及座標定義
在來風角度部分，碎形單元以縱向軸(X 軸)為中心(圖 5)，左右對稱，因此水平旋轉角(Z 軸為軸心)以 10 度為一間隔，進行 0 度~180 度共 19 個角度之實驗。

考慮氣流在屋頂流動時之可能風攻角，以屋頂傾斜面為零度(Y軸為旋轉軸心)，執行-20度、-10度、0度、+10度、+20度共五種風攻角之風力量測。

2.3 整體抗風系統風力量測

五角形碎形屋頂並非如一般高層建築以大型連續平面為主體，無法以表面風壓的壓力量測方式準確量測整體風力之變化。本案此處以高頻力平衡儀(High Frequency Force Balance, HFFB)做為主要之風力量測工具，再輔以表面風壓量測，做為計算局部風壓在整體屋頂上分配比例之依據。整體抗風系統風力量測之風洞試驗縮尺為1/200，以較小的縮尺涵蓋較多的周圍鄰房變化，來合理反應逼近流場對碎形屋頂之影響。

2.3.1. 簡化碎形單元模擬

以縮尺1/200的整體屋頂模型進行風洞試驗，雖然可以有足夠大的地形模擬範圍來反應主建築物周圍鄰房對流場之作用，但是影響設計風力的碎形單元複雜而微小之幾何變化，則因為縮尺不足而無法完全依實際形狀製作。此處即設計一個能在縮尺1/200條件下製作之「簡化」碎形單元來模擬整體抗風系統風力實驗之真實碎形單元。這二種碎形單元建構之整體屋頂所反應的風力必定有所差異，本文即以縮尺1/4之碎形單元模型，個別於風洞中量測「真實」與「簡化」碎形單元此二者之平均風力差異，做為簡化碎形單元建構之縮尺1/200整體屋頂風洞試驗結果之修正依據。(圖6)。

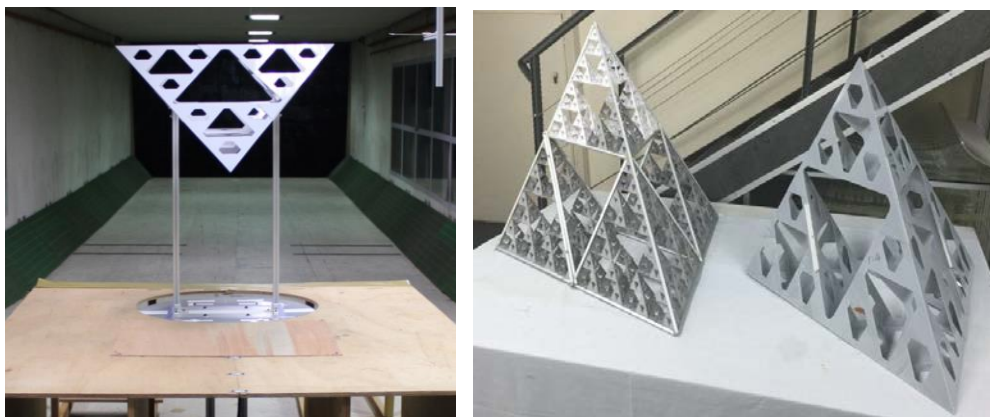


圖6 簡化碎形單元風洞試驗(左圖)以及與真實碎形單元之比較(右圖)

本案整體碎形屋頂之風洞試驗模型，即是以簡化之碎形單元所組合而成，以同時滿足縮尺1/200的模擬範圍與製作可行性之需求，模型以3D列印製作(圖7)。風洞試驗之量測方式以正北為零度風向角，每10度風向角做一組量測，共量取36個風向。風力是藉由高頻力平衡儀量測，可獲得屋頂整體X、Y向之水平風力歷時及Z向垂直風力歷時，從而計算出平均風力及擾動風力，做為設計載重分析之依據。

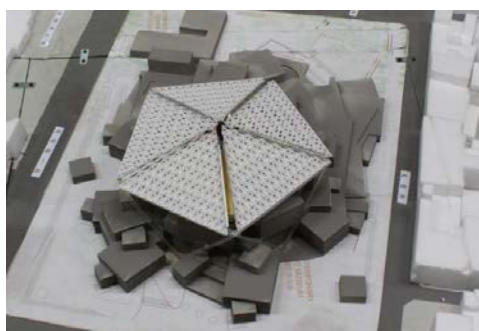


圖 7 整體屋頂高頻力平衡儀(HFFB)風洞試驗

2.3.2. 整體屋頂風力分配

a. 單片屋頂風力分配比例

由於碎形屋頂之五角形並非在同一平面上，而是分為五片各以向下水平傾斜 18.73 度相組合，因此每一片屋頂之氣動力行為可假設與其他片屋頂有較佳之獨立性。

本案把縮尺 1/200 的五角形屋頂依屋頂主梁位置拆分成五片，藉由高頻力平衡儀各別量測單一片屋頂(整體屋頂之 1/5 片)之風力(圖 8)。

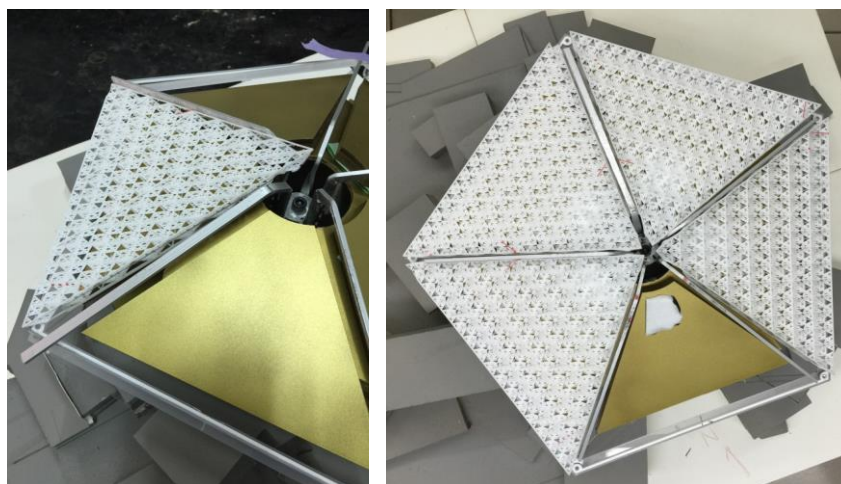


圖 8 單片碎形屋頂風力量測(左圖為量測標地，與右圖其餘四片不相碰觸)在同一方向角，採取單一片屋頂(整體屋頂之 1/5 片)與整體屋頂於基底位置

之「平均」風力比值，視為是整體屋頂關於其「平均」風力與「擾動」風力此二者在各單片屋頂之分配方式。

b. 局部區域風力分配比例

前述所量測之單片屋頂分配比例，僅為特定風向角下，單片屋頂佔整體屋頂的比例，無法得到單片屋頂自身更詳細的局部區域風壓分布情形。本文利用表面風壓之量測技巧，於縮尺 1/200 碎形屋頂之內外側共設置 100 個風壓測點(圖 9)，量測屋頂表面大致之平均壓力分佈，做為其「垂直」方向整體風力於局部位置之分配比例。

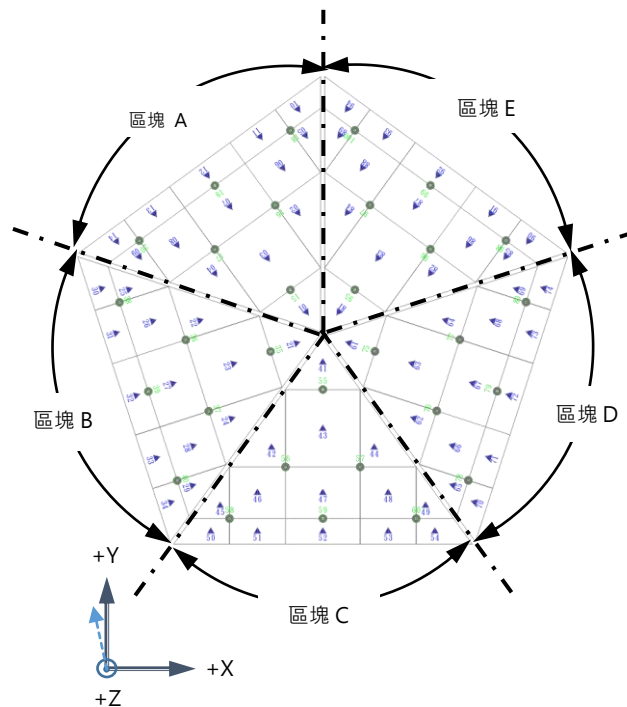


圖 9 碎形屋頂風壓孔分佈圖(標示圓點處)

因為碎形屋頂在三維空間中包含了許多不同方向之開孔平板，氣流在屋頂內外側之間的流動方式相當複雜。同時這些組成屋頂的平板相當破碎，沒有面積權重足夠顯著之平板做為風壓量測之代表性區域。因此此處之表面風壓量測結果，僅能大致代表氣流在整片碎形屋頂上流動時，於其宏觀上的傾斜面法線上(水平傾斜 18.73 度)所造成的壓力分配比例。由於屋頂傾斜度不大，該比例也就近似於垂直風力的分配比例。

另外，屋頂水平風力不僅部分來自於屋頂法線風壓的水平分量，更大部分可能來自組成屋頂的平板於垂直面上的複雜投影。因此屋頂局部位置的水平風力分配比例無法以前述表面風壓量測結果評估，而僅能以平均分布的方式處理。

3. 實驗結果

3.1 碎形單元風力實驗

碎形單元擬真模型與簡化模型在不同風向角、風攻角 0 度之平均風力係數如圖 10 所示，平均風力係數定義如下，不論風攻角如何改變， A_c 皆取用攻角零度時之碎形單元於水平面上之投影面積。

平均風力係數：

$$C_x = \frac{\bar{F}_x}{0.5\rho U^2 A_c} \quad C_y = \frac{\bar{F}_y}{0.5\rho U^2 A_c} \quad C_z = \frac{\bar{F}_z}{0.5\rho U^2 A_c} \quad (1)$$

其中

C_x 、 C_y 、 C_z ：x 向、y 向及 z 向風力平均風力係數；

\bar{F}_x 、 \bar{F}_y 、 \bar{F}_z ：模型 x、y、z 方向整體平均風力；

A_c ：攻角零度時之碎形單元於水平面上之投影面積；

U 、 ρ ：碎形屋頂單元離地高度之平均風速及空氣密度。

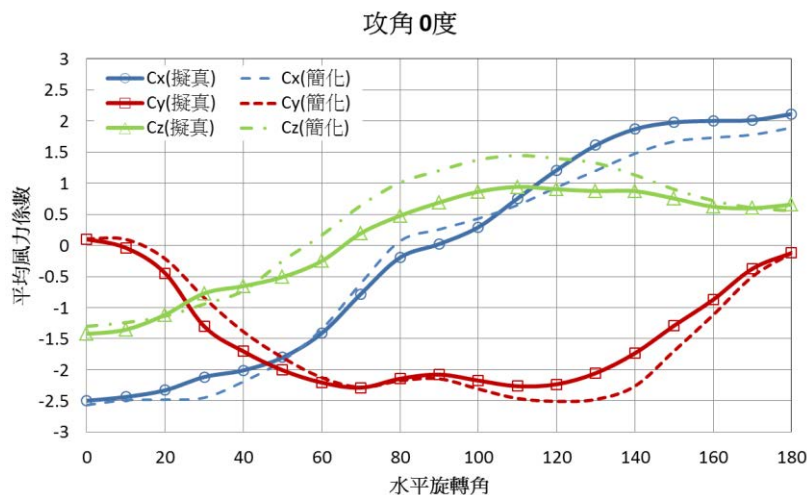


圖 10 碎形單元擬真模型與簡化模型在不同風向角、風攻角 0 度之平均風力係數

3.2 碎形屋頂風力實驗

碎形屋頂模型在不同風向角之平均風力係數、擾動風力係數，包括「整體」碎形屋頂同時量測之基底風力係數(圖 11)及五片「單片」碎形屋頂風力係數和(圖 12)之比較。由力平衡儀實驗所量測之碎形屋頂基底風力，風力係數定義如下， A 值取用碎形屋頂之真實面積而非投影面積。另外，為求方便比較實驗數字，整體碎形屋頂之風力係數與單片屋頂之風力係數，採取相同之特徵尺度 A 。

平均風力係數：

$$C_{fx} = \frac{\bar{F}_x}{0.5\rho U^2 A} \quad C_{fy} = \frac{\bar{F}_y}{0.5\rho U^2 A} \quad C_{fz} = \frac{\bar{F}_z}{0.5\rho U^2 A} \quad (2)$$

其中

C_{fx} 、 C_{fy} 、 C_{fz} ：x、y、z 向平均風力係數；
 \bar{F}_x 、 \bar{F}_y 、 \bar{F}_z ：模型 x、y、z 方向整體平均風力；
 A ：碎形屋頂實際面積(非投影面積)；
 U 、 ρ ：參考高度之平均風速、空氣密度；

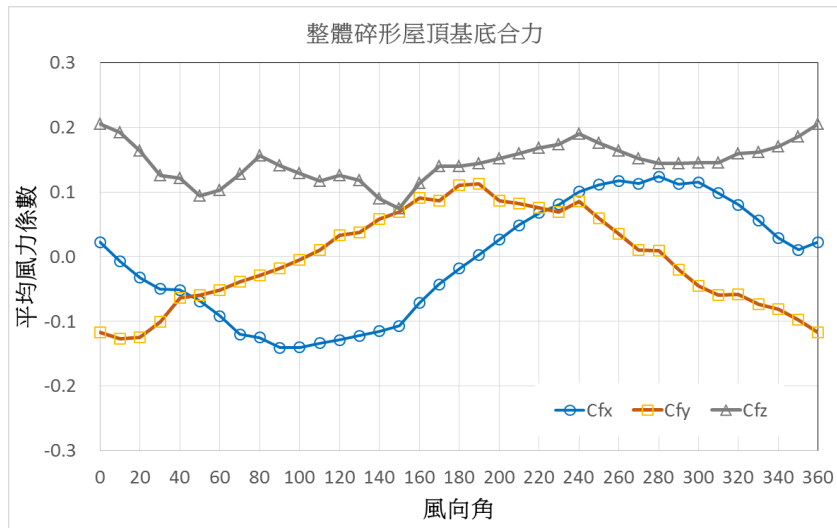


圖 11 整體碎形屋頂基底平均風力係數

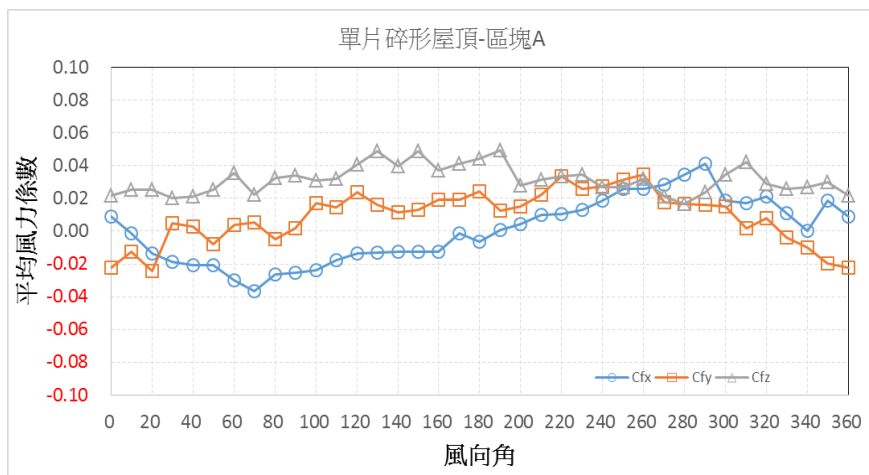


圖 12 單片碎形屋頂基底平均風力係數-區塊 A(孔位編號 1-14)

3.3 碎形屋頂局部區域風壓量測

由電子式風壓壓力掃描器於碎形屋頂所取得之風壓力資料，是做為屋頂局部位置風壓分布之參考。此處計算碎形屋頂內外側的風壓差而得到淨風壓，以無因次化的淨風壓係數表示，實驗結果如圖 13 所示。其表示式如下：

$$C_N = \frac{(\Delta P_1 - \Delta P_2)}{0.5\rho U^2}$$

(3)

C_N ：平均淨風壓係數；

U 、 ρ ：參考高度之平均風速、空氣密度；

ΔP_1 、 ΔP_2 ：碎形屋頂內外之平均風壓。

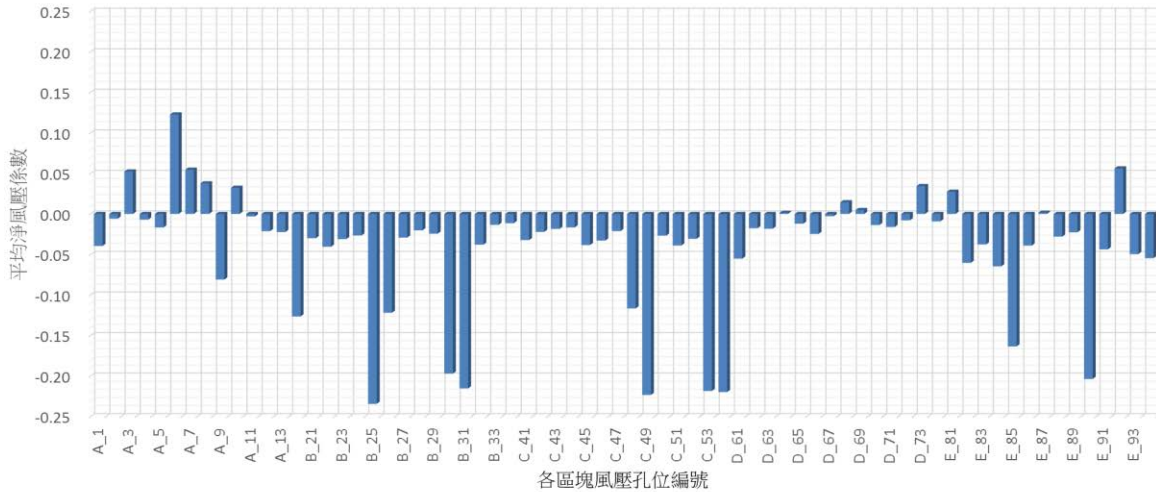


圖 13 碎形屋頂局部區域-平均淨風壓係數(風向角 0 度)

4. 設計載重

4.1 碎形屋頂抗風系統設計風載重

由於整體碎形屋頂及單片碎形屋頂是以簡化碎形單元進行模型製作，故需以擬真及簡化碎形單元之風力比值進行修正。選擇受風反應較顯著的風力係數峰值區域做為簡化碎形屋頂之修正依據。依實驗結果，簡化碎形屋頂之風力值，在 X 向、Y 向、Z 向之修正放大值為 2.17、2.18、2.39。

整體碎形屋頂之基底風力再配合單片屋頂之基底風力相比較，即可求得每一單片屋頂之基底風力。該基底風力若直接施加於屋頂結構上，則過於簡略而無法反映屋頂局部位置之風力變化。因此再藉由碎形屋頂內外側之平均風壓量測結果，可得到較詳細之屋頂風力分布。然而該方法僅能合理反映 Z 向垂直風力之分布，因此對於屋頂 X、Y 向水平風力分布情形，仍以平均分配為主。

建築物在特定風向角條件下的設計風載重為該風向的極值設計風力，是風載重平均值與擾動值的組合。各結構節點風載重的極值為 $F_{\max,i} = \bar{F}_i \pm g\sigma_{F_{\text{int},i}}$ ，其中 $F_{\max,i}$ 為第 i 節點之極值設計風載重； \bar{F}_i 為第 i 節點之平均風載重；g 為尖峰因子 (peak factor)； $\sigma_{F_{\text{int},i}}$ 為第 i 節點之動態風載重均方根值，包含背景及共振兩部分。對於結構頻率高於 1Hz 者，屬於普通建築物，結構共振反應佔設計載重之權重不顯著，可忽略其效應。本案整體碎形屋頂於 X 向、Y 向、Z 向之第一振態頻率分別為 1.69Hz、1.69Hz、2.27Hz。

假設五片等腰三角形單片屋頂上之相同位置桿件，結構強度會採取相同之設計。因此載重組合之挑選方式，並不區分正負 X 軸、正負 Y 軸之差異。本計畫根據每個風向角建築物之基底合力進行設計風力的組合，共採取下列 4 種形態：

Case 1：以 F_X 、 F_Y 合力極大值為主，配合 F_Z 極大值(方向向上)；

Case 2：以 F_Z 極大值(方向向上)為主，配合 F_X 、 F_Y 合力極大值；

Case 3：以 F_Z 極小值(方向向下)為主，配合 F_X 、 F_Y 合力極大值；

Case 4： F_X 、 F_Y 、 F_Z 合力極大值。

4.2 碎形單元抗風系統設計風載重

此處之碎形單元設計風載重，是做為連接碎形單元與周圍桁架構材之設計風力，以碎形單元之整體平均風力係數來挑選四種載重組合之形式： X_{max} 、 Y_{max} 、 Z_{max} 、 R_{max} ，分別代表碎形單元於不同水平旋轉角、不同風攻角中，個別於 X 、 Y 、 Z 三個方向以及合力有最大之平均風力係數。例如，以 Z_{max} 而言，挑選出所有風洞試驗數據在 Z 向出現最大平均風力係數之特定案例，而該案例之 C_z 搭配此時之 C_x 、 C_y 即為 Z_{max} 之載種組合。

該表所列之平均風力係數 C_x 、 C_y 、 C_z 已調整為對應於風力規範(文獻 1)之 C_f ，進行載重計算時，設計風力 F 需以規範 2.4 式計算：

$$F = q(z_{Ac})GC_fA_c \quad (4)$$

A_c 為攻角零度時之碎形單元水平面投影面積； $q(z_{Ac})$ 為面積 A_c 形心高度 z_{Ac} 處之風速壓； G 普通建築物之陣風反應因子

分析結果顯示， C_x 最大為 2.36、 C_y 最大為 2.92、 C_z 最大為 1.63。

5. 結論

本案以簡化模型的方式進行複雜桁架的縮尺模型製作及風洞試驗，並以單一碎形單元風力試驗進行簡化模型與真實結構間之修正；透過拆解整體碎形屋頂結構成單一節塊屋頂，以及利用表面風壓試驗獲取屋頂各位置之淨風壓分布，做為風力分配之依據。藉由這些實驗設計及其分析結果，吾等可組合出更為準確的風載重形式，提供工程師進行更為合理而經濟之結構設計。

感謝聯鋼營造工程股份有限公司委託本單位進行此案之風載重評估，讓國內風工程界有機會對於碎形屋頂之氣動力行為做進一步之認識。

6. 參考文獻

- [1] 內政部營建署，建築物耐風設計規範及解說，2014 年 12 月 3 日修訂。
- [2] Celio F. Carril Jr., Nicholas Isyumov, Reyolando M.L.R.F. Brasil, "Experimental study of the wind forces on rectangular latticed communication towers with antennas", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2003, Vol.91, pp.1007-1022.