

結構分立型太陽光電系統風洞 實驗研究

內政部建築研究所自行研究報告

中華民國 109 年 12 月

(本報告內容及建議，純屬研究小組意見，不代表本機關意見)

(科技部 GRB 編號)
PG10903-0116

結構分立型太陽光電系統風洞 實驗研究

研究人員：李鎮宏 副研究員兼主任

研究期程：中華民國 109 年 2 月至 109 年 12 月

內政部建築研究所自行研究報告
中華民國 109 年 12 月

(本報告內容及建議，純屬研究小組意見，不代表本機關意見)

目次

表次.....	III
圖次.....	V
摘要.....	VII
第一章 緒論.....	1
第一節 研究緣起.....	1
第二節 文獻回顧.....	2
第三節 預期成果.....	4
第二章 風洞實驗規劃.....	7
第一節 風場建置與量測.....	7
第二節 建立紊流積分尺度與頻譜內涵.....	11
第三節 風力係數計算.....	20
第三章 風力測試結果.....	23
第一節 縮尺地況.....	23
第二節 獨棟建物光電板支架基底風力.....	25
第三節 連棟建物光電板支架基底風力.....	36
第四節 測試結果彙整.....	45

第四章 結論與建議.....	49
附錄一 期中審查意見答復表.....	51
附錄二 期末審查意見答復表.....	53
參考書目	55

表 次

表 1-1 屋頂光電板相關研究(有退縮)	3
表 1-2 屋頂光電板相關研究(沿屋頂角落與四周設置,無退縮)	4
表 3-1 C 地況縮尺 1/50 風洞配置	23
表 3-2 獨棟型式一風力係數與平均風速	26
表 3-3 獨棟型式二風力係數與平均風速	30
表 3-4 連棟型式一風力係數與平均風速	37
表 3-5 連棟型式二風力係數與平均風速	40
表 3-6 最大平均風力係數試驗結果彙整表	46

圖次

圖 2-1 風速剖面、紊流強度及積分長度尺度示意圖	9
圖 2-2 紊流頻譜示意圖	11
圖 2-3 分析程式主體	13
圖 2-4 前端資料輸入平台	13
圖 2-5 風速歷時	14
圖 2-6 頻譜密度函數	14
圖 2-7 風力係數座標示意圖	16
圖 2-8 LabVIEW 風力監測系統-人機介面(輸入基本資料)	19
圖 2-9 LabVIEW 風力監測系統-人機介面(輸出風力歷時)	19
圖 2-10 LabVIEW 風力監測系統-人機介面(輸出風力係數)	20
圖 2-11 LabVIEW 風力監測系統-程式區	20
圖 2-12 獨棟建物模型與風洞配置	21
圖 2-13 聯棟建物模型與風洞配置	21
圖 3-1 平均風速剖面	24
圖 3-2 擾動風速剖面	24
圖 3-3 紊流積分長度尺度剖面	24
圖 3-4 紊流頻譜密度函數 (z 單位:mm)	25
圖 3-5 獨棟型式一試驗配置	27
圖 3-6 獨棟型式一各風向角下之平均風速	28
圖 3-7 獨棟型式一順風向風力係數	28
圖 3-8 獨棟型式一橫風向風力係數	28
圖 3-9 獨棟型式一升風向風力係數	29
圖 3-10 獨棟型式一風向角 120° 時之參考風速歷時	29

圖 3-11 獨棟型式二試驗配置	31
圖 3-12 獨棟型式二各風向角下之平均風速	31
圖 3-13 獨棟型式二順風向風力係數	32
圖 3-14 獨棟型式二橫風向風力係數	32
圖 3-15 獨棟型式二升風向風力係數	32
圖 3-16 獨棟型式二風向角 130° 時之參考風速歷時	33
圖 3-17 獨棟型式一與二之順風向平均風力係數比較	34
圖 3-18 獨棟型式一與二之順風向擾動風力係數比較	34
圖 3-19 獨棟型式一與二之橫風向平均風力係數比較	34
圖 3-20 獨棟型式一與二之橫風向擾動風力係數比較	35
圖 3-21 獨棟型式一與二之升風向平均風力係數比較	35
圖 3-22 獨棟型式一與二之升風向擾動風力係數比較	35
圖 3-23 連棟型式一試驗配置	38
圖 3-24 連棟型式一各風向角下之平均風速	38
圖 3-25 連棟型式一順風向風力係數	39
圖 3-26 連棟型式一橫風向風力係數	39
圖 3-27 連棟型式一升風向風力係數	39
圖 3-28 連棟型式一風向角 120° 時之參考風速歷時	40
圖 3-29 連棟型式二試驗配置	42
圖 3-30 連棟型式二各風向角下之平均風速	42
圖 3-31 連棟型式二順風向風力係數	42
圖 3-32 連棟型式二橫風向風力係數	43
圖 3-33 連棟型式二升風向風力係數	43
圖 3-34 連棟型式二風向角 120° 時之參考風速歷時	43
圖 3-35 連棟型式一與二之順風向平均風力係數比較	44

圖 3-36 連棟型式一與二之橫風向平均風力係數比較	44
圖 3-37 連棟型式一與二之升風向平均風力係數比較	45
圖 3-38 最大升風力係數之主要風向角示意圖	46
圖 3-39 型式一順風向平均風力係數比較	47
圖 3-40 型式一橫風向平均風力係數比較	47
圖 3-41 型式一升風向平均風力係數比較	47
圖 3-42 型式二順風向平均風力係數比較	48
圖 3-43 型式二橫風向平均風力係數比較	48
圖 3-44 型式二升風向平均風力係數比較	48

摘要

關鍵字：太陽光電板、結構分立、耐風測試

在「設置再生能源設施免請領雜項執照標準」第 5 條及第 6 條，於 107 年 5 月 10 日經濟部及內政部修正發佈，對於合法建築物屋頂，如有違章建築者，設置太陽光電時之適用類型；另其設置區域允許未超出建築物外牆中心線或其替代柱中心線外 1 公尺範圍，且無超過建築基地。本研究將針對結構分立之平屋頂單斜式棚架型太陽光電系統，進行風洞試驗，探討風力係數變化。

本次單斜屋頂結構分立型光電模組系統，實際目標建物高度約 18m，光電面板尺寸分為二類，一為最外圍在女兒牆內(型式一)，另一為女兒牆外伸 1m(型式二)；縮尺比例以文獻討論較多之 1/50 製作。建築量體分為二類：獨棟與連棟角隅，試驗配置係將模型底板與六力平衡儀連結鎖固，藉由柱與底板接合，傳達光電面板系統所受風力，並以擷取資料軟體取得整體光電系統歷時風力。

就實驗結果而言，在同為獨棟建物，光電板涵蓋區域較大時(型式二)，其基底順風向與橫風向平均風力係數與型式一差異不大，唯最大平均升風力係數較型式一增加 44%；在同處連棟角隅建物時，其基底風力係數變化現象與獨棟建築相似，唯最大平均升風力係數較型式一增加 58%。因建築量體配置不同時，無論是哪種型式下，在連棟角隅建物上之光電結構系統於各風向轉換下，其所受平均升風力係數皆有所增加。因此，在探討太陽光電結構系統基底風力係數時，應以連棟角隅是建築量體為研究主要對象，如僅考量獨棟建築上該系統之風力大小，將可能有所低估。

第一章 緒 論

第一節 研究緣起

對於測試大型建築或土木結構之邊界層流風洞試驗，其幾何縮尺比例約介於 $1/500 \sim 1/100$ ，然於探討像太陽光電面板之氣動力行為時，其尺寸太小而導致二個技術面的問題。其一在縮尺過小模型上所量得之風壓太小，其二測試模型可能置放於邊界層流較小處，導致風速的高度不確定性與實場情境不符，另外也可能造成光電板模型高比風洞內粗造元高度還小的情形。因此，於風洞試驗前解決上述問題顯得十分重要，方能確保後續所量得之風壓或風力分布與實境相符。由於平均風載較不易受尺寸效應的影響，而極值風載則易受到尺寸效應與風場頻譜內涵等二效應的影響。文獻[1]已指出對於較大尺度之光電模型可於已降低高頻紊流流場下，採用 3-s peck (三秒)預測極值風載。

在建築構件缺乏實尺度風載資料下，通常也不會加以驗證風洞模型數據之正確性，因此尺寸效應的影響仍未加以適當量化，然而，在邊界層流下之風速剖面梯度與紊流強度需與實際大氣特性一致，是非常顯而易見的；而仍待研究確認的是，因受限於風洞尺寸大小，而如何選取適當縮尺比例來消彌尺度效應的影響，則須考量分析另一參數，積分長度尺度。

在「設置再生能源設施免請領雜項執照標準」第 5 條及第 6 條，於

107 年 5 月 10 日經濟部及內政部修正發佈，對於合法建築物屋頂，如有違章建築者，設置太陽光電時之適用類型；另其設置區域允許未超出建築物外牆中心線或其替代柱中心線外 1 公尺範圍，且無超過建築基地。本研究將針對該標準中所提之設置區域，採結構分立棚架型光電系統(圖 1-1)進行風洞實驗與風力分析。

第二節文獻回顧

Lee [2]研究一方形柱體於不同紊流尺度下之平均風力，結果發現在模擬實際建物受風影響時，須考量風洞試驗時之紊流尺度(Turbulence scale)與結構尺度比例維持為一常數。另外，在較高紊流尺度下其拖曳力趨勢較低紊流尺度，維持一大段定值。Cook [3] 針對邊界層流風洞如何決定模型比例，提出了一個圖形化/解析過程，其主要考量紊流積分尺度 L_u 這參數，其與測試模型幾何比例相似性是非常重要的，由於 L_u 參數與 Z_0 地表粗糙長度(Roughness length)與 Z_d 零風面位移(Zero plane displacement height)為相依函數，因此邊界層流會有一特定的比例因子存在，所有模型線性比例皆須與該因子吻合，否則模擬之大氣邊界紊流特性將與因建物而產生的紊流特性不相符合，在這種情況下所得之風載與構件變形將不正確。在 1982 年 Holdo et al[4]也建議在低層建物風洞流場建立過程中，對該長度因子應加以確認是否具一致性。Laneville[5] 探討紊流尺度對二種不同大小之方形

柱體平均拖曳力之影響，發現當紊流尺度因子(L_u/D)大於 3 時對實驗結果將有所差異。當 L_u/D 為 20 時，對其平均風壓與平均拖曳力係數所造成的差異分別為 25%與 12%。

其他影響屋頂太陽光電板風力之因子(如風向、面板傾斜角度、位置與建築高度等)，經歸納相關已進行研究之太陽光電板風洞試驗如下表 1 與表 2，可發現(1) 臨界風向角多為 135^0 ，而且極值風壓係數多發生在來流風向角 $105-180^0$ 時。(2)只有在臨界風向上，面板傾斜角度對面板所受風力大小才有明顯的影響。(3) 隨著建築物高度增加，對前排面板的吸力反而變小，而後排面板所受吸力幾乎為定值。(4) 越接近屋頂四周所設置的面板，其淨風力係數越大。更詳細結果論述可於文獻[6]中查找。

表 1-1 屋頂光電板相關研究(有退縮)

專家	國家	比例	建物模型尺寸	光電板模型尺寸	來流角度
Radu et al. (1986)	羅馬尼亞	1:50	0.3×0.43×0.3	0.04×0.02	30
Radu and Axinte (1989)	羅馬尼亞	1:50	N/A	0.08×0.04	N/A
Wood et al. (2001)	澳洲	1:100	0.41×0.27×0.12	0.41×0.027	0
Ruscheweyh and Windhövel (2011)	德國	1:50	N/A	N/A	30
Saha et al. (2011)	日本	1:50	0.45×0.45×0.4	0.02×0.04	0,15,30,45

資料來源:文獻[7]

表 1-2 屋頂光電板相關研究(沿屋頂角落與四周設置，無退縮)

專家	國家	比例	建物模型尺寸	光電板模型尺寸	來流角度
Hosoya et al. (2001)	美國	1:50	0.182×0.274×0.08	0.0244×0.0244×0.0244	N/A
Bronkhorst et al. (2010)	德國	1:50	0.6×0.8×0.2	0.024×0.6	35
Erwin et al. (2011)	美國	全尺度	4.3×4.3×3.2	1.57×0.95×0.041	-45, -15, 0, 15, 45
Saha et al. (2011)	日本	1:50	0.45×0.45×0.4	0.02×0.04	0, 15, 30, 45

資料來源:文獻[7]

本所近幾年有關太陽能光電板之相關研究如下:

年度	案 名
108	太陽光電系統之耐風設計規範研擬 (委)
106	低層平屋頂建築剪切流生成對陣列式太陽能光電板風荷載影響研究 (協)
105	單片太陽能板支架結構風力分析研究 (自)
	建築物整合太陽能光電板外牆耐風設計研究 (協)
104	屋頂型太陽能光電板風阻形狀係數研究 (自)
	陽光屋頂耐風評估與設計準則 (協)

第三節 預期成果

本研究將採單斜構架式屋頂裝設太陽光電板系統，以 2 種不同涵蓋面積之光電面板縮尺風洞模型進行風力係數探討，可對下列研究主軸提出建議：

- 一、 本研究將針對結構分立之平屋頂單斜式棚架型太陽光電系統，針對獨棟與連棟式建築物屋頂設置二種不同面積大小之光電系統，進行風洞試驗，探討風力係數變化。
- 二、 針對「設置再生能源設施免請領雜項執照標準」中，該設置區域內結構分立棚架型光電系統進行風力係數量測及與建築物耐風設計規範中第 2.8 節與表 2.9 中開放式建築物之單斜屋頂風力係數相比對。

第二章 風洞實驗規劃

本章針對風場特性於大縮尺度下其特性是否合宜，需量測確定之特性參數包含哪些？建置數據量測分析程式來計算前揭各參數值，以及風洞試驗模型大小與配置規劃等加以說明。

第一節 風場建置與量測

研究中分別就風場之紊流特性(包括平均風速垂向剖面、紊流強度剖面、紊流頻譜和積分長度尺度)進行探討，其結果分述如下

(1) 平均風速剖面

時間平均(Time average)風速的定義為

$$\bar{U} = \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_1+T} u(t) dt \quad \text{式 2-1}$$

式中 $u(t)$ 為量測得之風速， t_1 為開始記錄資料的時間， T 為平均時間。一般的資料擷取系統大多設定為等時距取樣，若是以等時距的方式記錄變數，則平均值

$$\bar{U} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i(t_1 + i\Delta t) \quad \text{式 2-2}$$

式中 Δt 為取樣時距， T 為取樣時間(Sampling duration)， N 為資料的樣本數(Sampling number)， $f = 1/\Delta t$ 為取樣頻率(Sampling frequency)，頻率的因次為 $[1/T]$ ，以 Hz 表示，風速沿高度方向表示。如下示意圖 2-1(a):

(2) 紊流強度剖面

紊流速度的變化程度可以均方根(Root Mean Square, rms)速度表示：

$$\sigma_u = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [u(t_i) - \bar{U}]^2} \quad \text{式 2-3}$$

因為速度和均方根速度的因次相同，故亦可用無因次的相對紊流強度(Turbulence intensity, TI)如圖 2-1(b)，代表紊流速度變化的劇烈程度：

$$I_u = \frac{\sigma_u}{\bar{U}} \times 100\% \quad \text{式 2-4}$$

同樣的，垂直(Z 方向)的均方根速度與紊流強度為：

$$\sigma_w = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [w(t_i) - \bar{W}]^2} \quad \text{式 2-5}$$

$$I_w = \frac{\sigma_w}{\bar{W}} \times 100\% \quad \text{式 2-6}$$

(3) 積分長度尺度

紊流積分長度尺度(Integral length scale)為流場中渦漩的平均大小，可視為紊流之特徵長度。紊流積分長度尺度定義為積分時間尺度乘上平均風速

$$L_u = U \times T_L \quad \text{式 2-7}$$

式中 T_L 為積分時間尺度(Integral time scale)：

$$T_L = \int_0^{\infty} R(t)dt \quad \text{式 2-8}$$

將紊流流速的自相關函數 $R(t)$ (Auto-correlation function) 積分便可得到積分時間尺度。積分時間尺度代表紊流流速的特徵時間，如圖 2-1(c)。

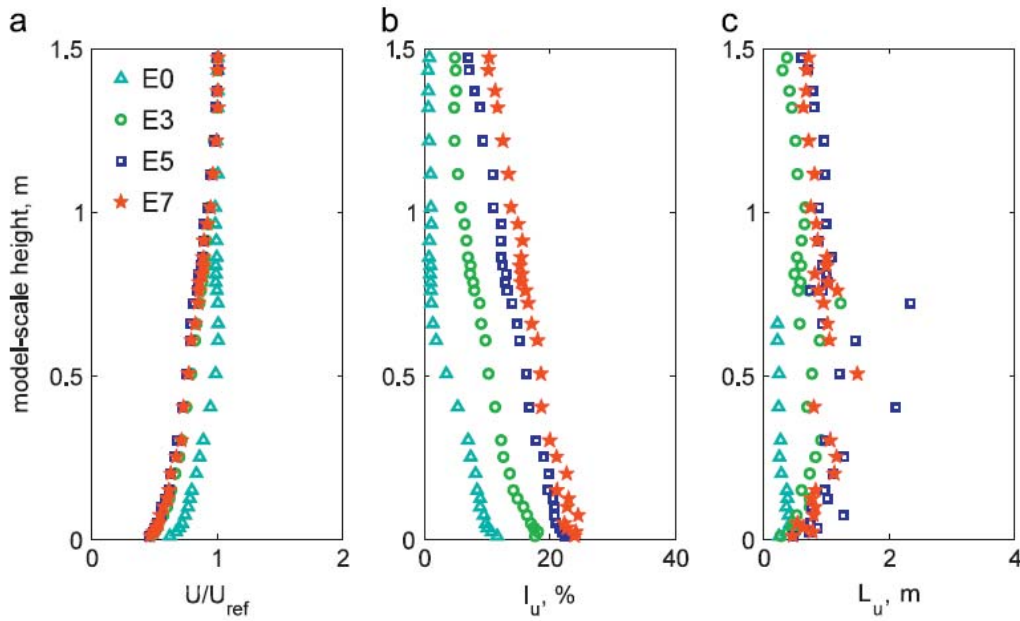


圖 2-1 風速剖面、紊流強度及積分長度尺度示意圖

資料來源:文獻[1]

(4) 紊流頻譜

利用傅立葉轉換(Fourier transform)可將流速由時間域轉換至頻率域：

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} u(t)e^{-i2\pi ft} dt \quad \text{式 2-9}$$

式中 t 為時間， f 為頻率。若流速為不對稱函數，則具有實部和虛

部

$$X(f) = X_R(f) + iX_i(f) \quad \text{式 2-10}$$

頻譜密度函數(Spectral density function)定義為：

$$S_u(f) = \frac{2\Delta t}{N} [X_R^2(f) + X_i^2(f)] \quad \text{式 2-11}$$

頻譜密度函數可顯示紊流流速在不同頻率上的變化情形，若紊流流速在某頻率上變化幅度愈劇烈，則其對應頻譜函數之值會愈大。若紊流流場中並無任何週期性的渦流，則流速的頻譜可以視為許多不同頻率的脈衝函數組合而成，並無單一頻率特別突出。

Von Karman (1948)所建議之縱向流速的紊流頻譜如下式：

$$\frac{fS_u(z, f)}{\sigma_u^2} = \frac{4\phi}{(1 + 70.8\phi^2)^{5/6}} \quad \text{式 2-12}$$

其無因次頻率 ϕ 的定義為 fL_x/U ， L_x 為縱向的積分長度尺度。

本研究將以風洞試驗之頻譜密度函數分析結果與 Von Karman 頻譜比對，以確保紊流動能非均勻分布於不同頻率、尺度之渦流中。

由風洞流場風速歷時資料分析頻譜密度函數 $S_u(f)$ ，研究中係採用 LabView 軟體建立分析程式，步驟如下：

1. 求取整筆數據之平均值與均方根 σ_x
2. 將風速歷時數具減去平均值，使其成為平均值為 0 的時間序列。
3. 利用快速傅立葉轉換(FFT)求取實部與虛部，再帶入公式 2-11 中，求取頻譜密度函數 $S_u(f)$ 。

4. 應用式 2-12 將頻率無因次化 $\phi = fL_x/U$ 及建立縱向紊流頻譜 $\frac{fS_u(z,f)}{\sigma_u^2}$ ，即可與 Von Karman 頻譜比對。

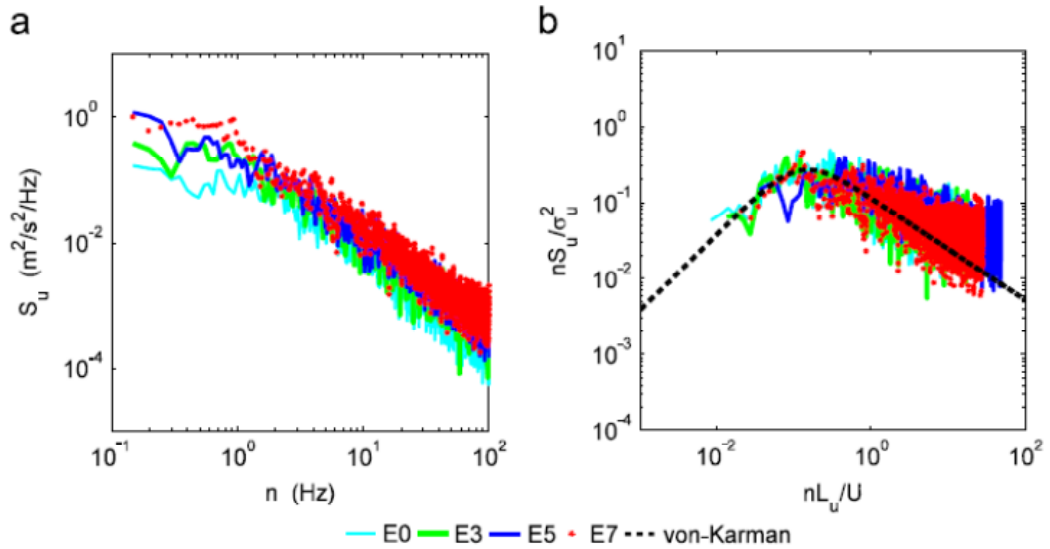


圖 2-2 紊流頻譜示意圖

資料來源:文獻[1]

第二節 建立紊流積分尺度與頻譜內涵

紊流可視為不同尺度的渦流所組成的，可由頻率的高低來表達不同尺度渦流的組成，理論上紊流的能量依頻率的不同，可依頻譜(Power Spectrum)來加以描述其特性，通常分為三個部分：低頻部分的含能渦流區(Energy containing eddies)、中頻部分的慣性次階區(Inertial subrange)與高頻部分的黏滯消能區(Viscous dissipation)。低頻大尺度的渦流所造成的流速變化比較大，而高頻小尺度的渦流所造成的風速變化較小。在中頻慣性次階範圍內，渦流不受流場邊界影響，僅與動能消散及渦流尺度相關，此時紊流速度頻譜與波數的 $5/3$ 次方成反比

關係。其中，Kolmogorof, A.N.提出適用於慣性次階的流速頻譜如下式 2-13。而 von Karman 則加上低頻部分的頻譜成為式 2-12，通常被用以作為評估風洞流場內頻率內涵是否合宜的指標。

$$\frac{fS_u(z, f)}{\sigma_u^2} = 0.26\phi^{-2/3} \quad \text{式 2-13}$$

風洞內風速隨著剖面高度而變化，積分尺度及頻譜內涵會有所不同，為加速實驗結果能立即展現及檢視試驗資料是否可用，遂利用 NI LabView 數據擷取及即時分析軟體，建立紊流積分尺度及頻譜內涵分析程式(如圖 2-3)，第一部份是應用單點風速歷時資料建立頻譜密度函數 S_u ，第二部分則計算該位置所對應之紊流積分尺度 L_u 。圖 2-4 為前端試驗資料輸入平台，包含試驗筆數、擷取頻率及輸入與輸出檔案名等。

為確認分析程式輸出結果之正確性，遂藉由今年協辦案「風洞實驗室不同縮尺流場之地況模擬研究」，所量測之縮尺比例 1/100 之風洞內某點風速歷時資料(如圖 2-5)，擷取頻率 1024Hz、資料筆數 131072，進行數據分析，其紊流積分尺度為 0.44m，頻譜密度函數 S_u (圖 2-6)皆與該協辦案分析成果相符合，顯示分析程式之合理性。

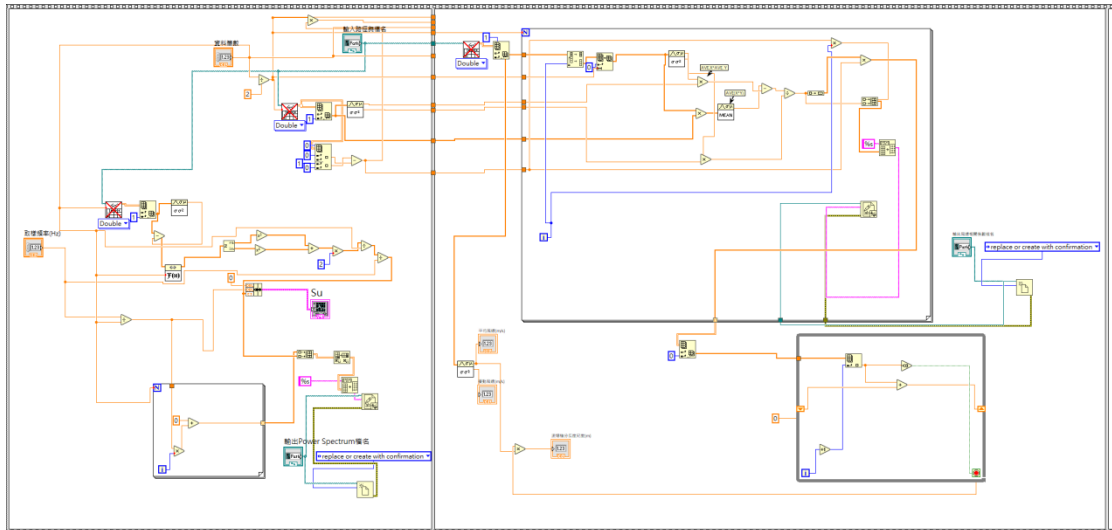


圖 2-3 分析程式主體

資料來源:本研究

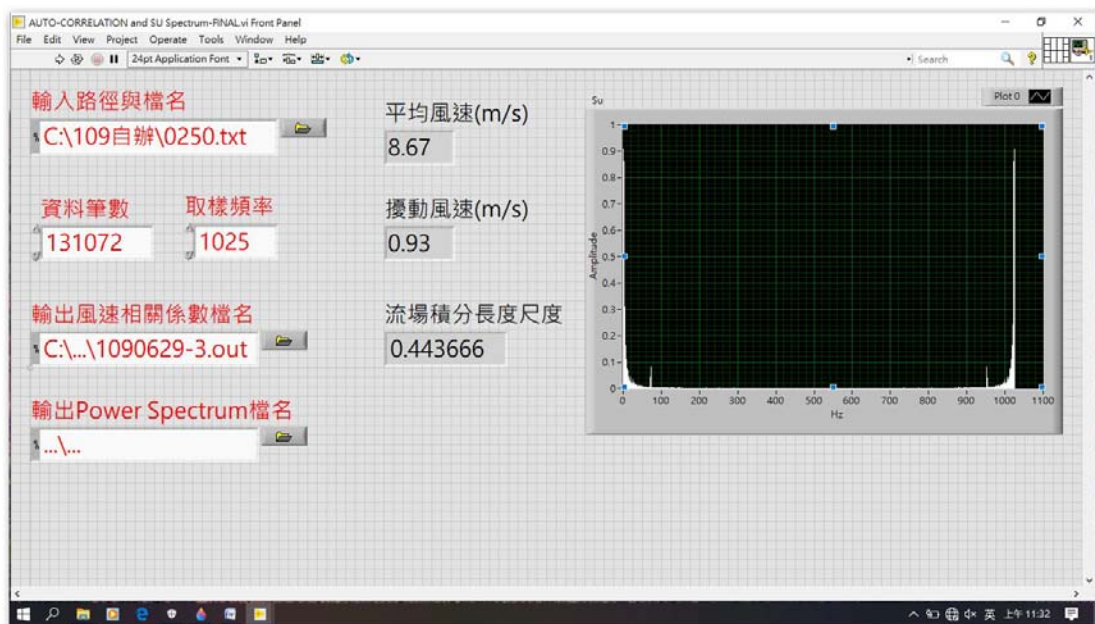


圖 2-4 前端資料輸入平台

資料來源:本研究

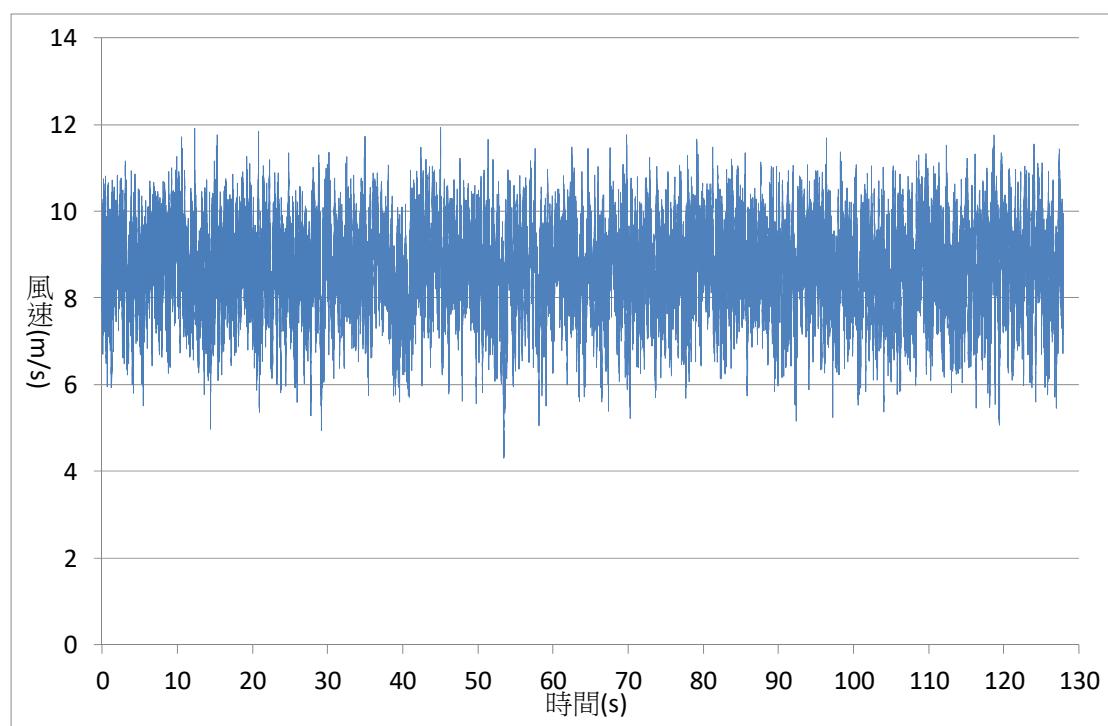


圖 2-5 風速歷時

資料來源:本研究

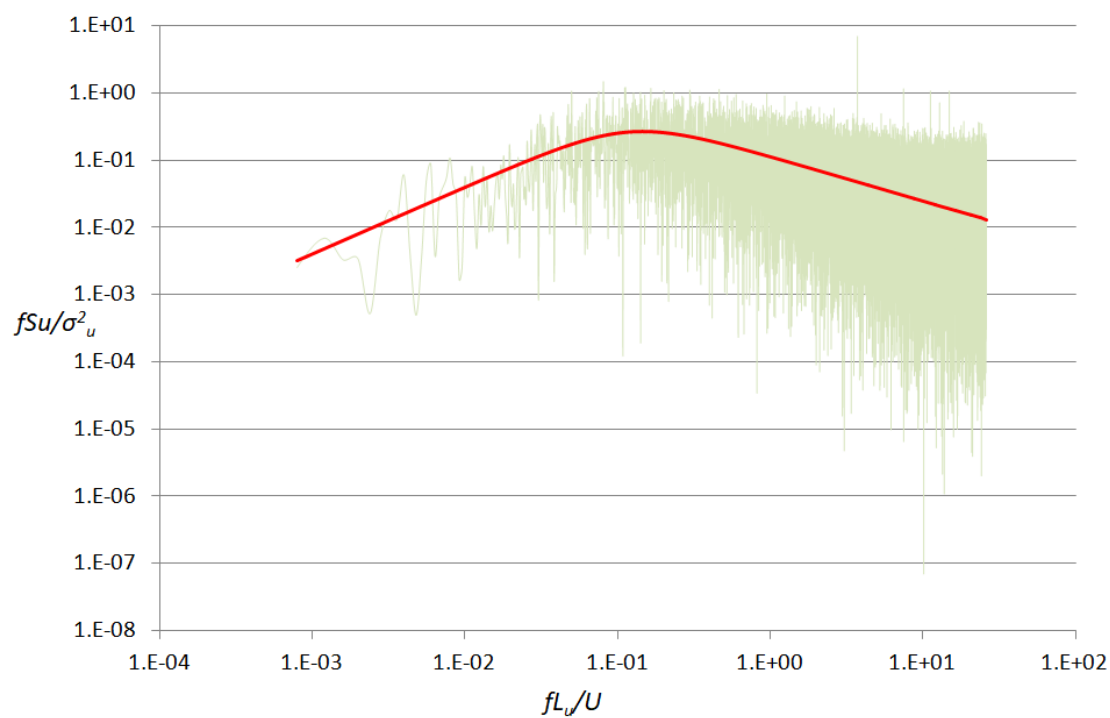


圖 2-6 頻譜密度函數

資料來源:本研究

第三節 風力係數計算

風力係數定義取自 ASCE 7-88 規範，開放式單斜屋頂之風力係數 C_f ，計算風力係數所用的面積為屋頂面的面積。由實驗所量測之結構基底風力，包括 x、y 方向之剪力、z 方向之升力等，將以下列方式進行無因次化，求得一個與實驗風速、建築物模型縮尺比例及流體密度無關之無因次風力係數。實際使用上則將真實建築物之相關外形數據、預期之設計風速大小，以及空氣密度代入風力係數公式內，即可得知該風速作用下之結構受力情形。平均風力係數定義如後：

$$C_{fx} = \frac{\bar{F}_x}{\frac{1}{2}\rho U^2 BD}$$

$$C_{fy} = \frac{\bar{F}_y}{\frac{1}{2}\rho U^2 BD}$$

$$C_{fz} = \frac{\bar{F}_z}{\frac{1}{2}\rho U^2 BD}$$

$$T_{rz} = \frac{\bar{T}_z}{\frac{1}{2}\rho U^2 BDH}$$

C_{fx} 、 C_{fy} ：x 方向、y 方向基底平均風力係數。

C_{fz} ：z 方向之上升風力係數。

T_{rz} ： $\bar{T}_z$ 作用產生之扭矩平均風力係數。

$\bar{F}_x$ 、 $\bar{F}_y$ ：模型 x、y 方向整體平均剪力。

$\bar{T}_z$ ：模型平均扭矩。

B、D：分別為光電板屋頂 x' 、 y 方向深度

H: 平均屋頂高度。

U、 ρ ：邊界層高度之平均風速、空氣密度。

本研究將六力平衡儀 SFB (SIX FORCES BALANCE) 置於模型下，直接量測受力歷時資料並加以分析，所完成的項目包含 1. 試驗基本資料輸入 2. 試驗前風力基準量測 3. 風力歷時數據量測 4. 平均風力計算 5. 局部座標風力值轉換至全域座標 6. 數據資料檔建立等 6 大項。模型安裝需於風力實驗前先行量測 1 次六力平衡儀所得基本受力大小，視為試驗基準值，於第一次風向角 0 度時(無風下)量測建立，將該基準數據定為局部常數，而後續不同風向角風力實驗，可讀取該常數(基準值)並扣除，於實驗中即可得知實際風力數據。由於風洞實驗中來流風向係固定，故全域座標系統以順風向為 X 向，橫風向為 Y 向。但就建築結構而言，其 X、Y 向通常以勁度強/弱軸來區別與風向無關，實驗時因需考慮不同風向之風力歷時，故將其安裝於旋轉盤上，此時將與來流方向產生一夾角；亦即六力平衡儀所量得之風力歷時與結構強/弱軸方向一致(設定為局部座標)，如需以來流風向角為主軸，來計算順風向及橫風向的風力大小，則六力平衡儀所量得數據需加以轉換至全域座標，該座標轉換過程已納入該分析系統中。

本次建立之監測系統程式區中共分為四大區塊，依序分別為 1. 基本

資料輸入 2.風力基準值建立 3.歷時與平均風力計算及數據檔輸出，
各區內容細節詳述如下：

一、基本資料輸入

程式區塊(Block Diagram) :輸入參數包含(圖 2-7)

1. 六力平衡儀校正後之輸出電壓與風力之轉換矩陣檔案名稱。
2. 連續取樣之採樣數與取樣頻率。
3. 風力數據資料輸出檔名與風向角。

二、風力基準值建立

此區塊程式執行分成風向角為0度與其他角度，當風向角為0度時，程式會執行在無風力情況下之受力基準量測，並設為局部參數；如為非0度角之風力量測，則直接以上開局部變數為基準。當基準風力程式一開始由 Icon[DAQ Assistant]擷取固定取樣時間間格(採樣數/取樣頻率)與總取樣數之六力平衡儀所量得電壓歷時資料，經矩陣運算求得歷時受力大小，並經平均後作為實驗前之基準值。在人機介面上則顯示風力試驗前基準值。

三、歷時與平均風力計算及數據檔輸出

此區塊為風力計算核心，內容包含：

1. 六力平衡儀輸出電壓擷取。
2. 電壓歷時資料，經矩陣運算求得歷時受力大小。
3. 上開風力歷時數據減去風力基準值，即為實際受力大小。

4. 於人機介面顯示歷時風力與平均風力大小。(圖 2-8)
5. 將局部座標風力值轉換為全域座標，即以來流方向為 X 向。(圖 2-9)
6. 建立局部座標與全域座標之風力歷時數據輸出檔。

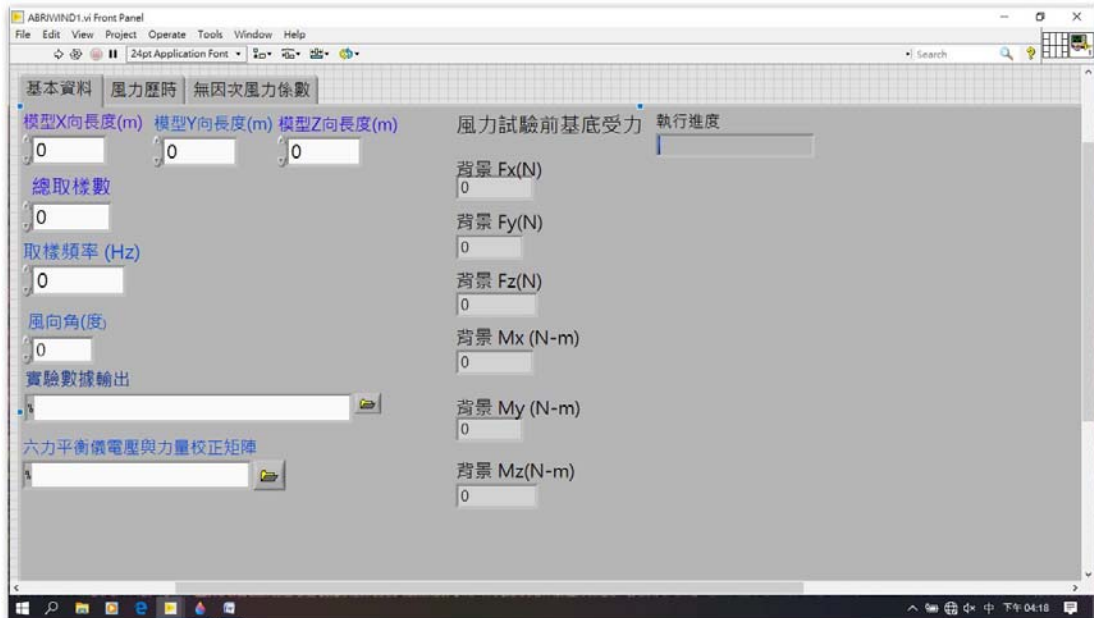


圖 2-7 LabVIEW 風力監測系統-人機介面(輸入基本資料)

資料來源：本研究

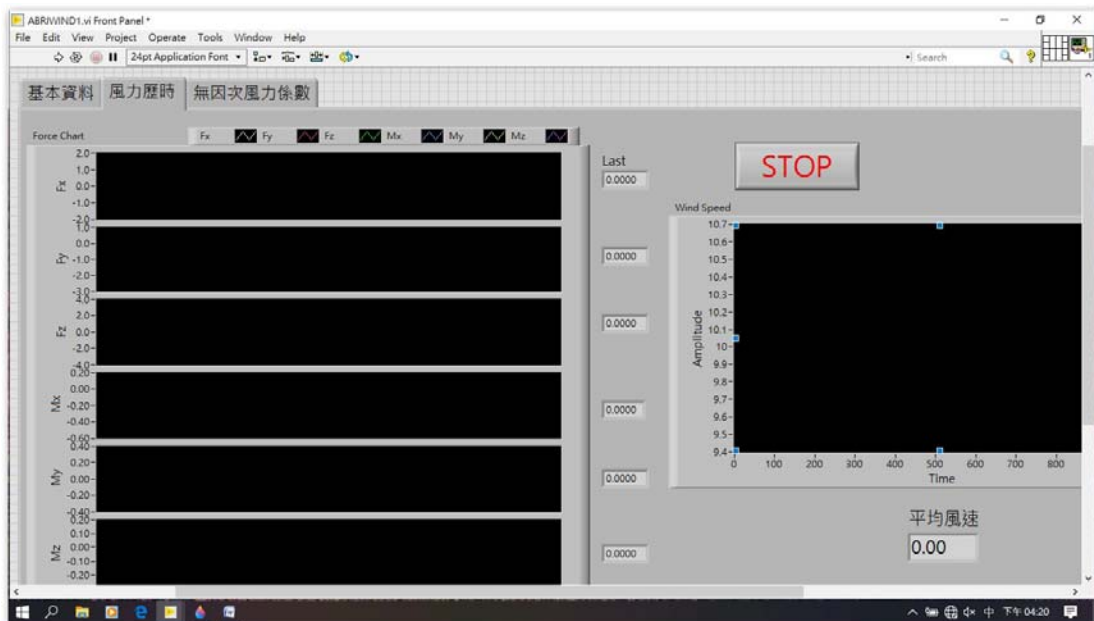


圖 2-8 LabVIEW 風力監測系統-人機介面(輸出風力歷時)

(資料來源：本研究)

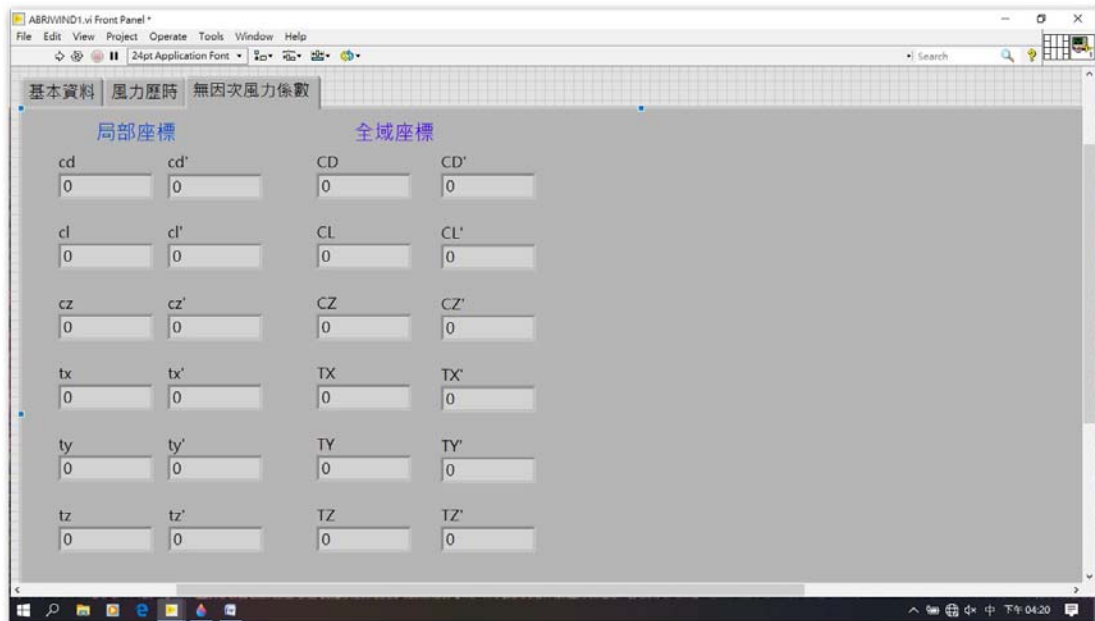


圖 2-9 LabVIEW 風力監測系統-人機介面(輸出風力係數)

資料來源：本研究

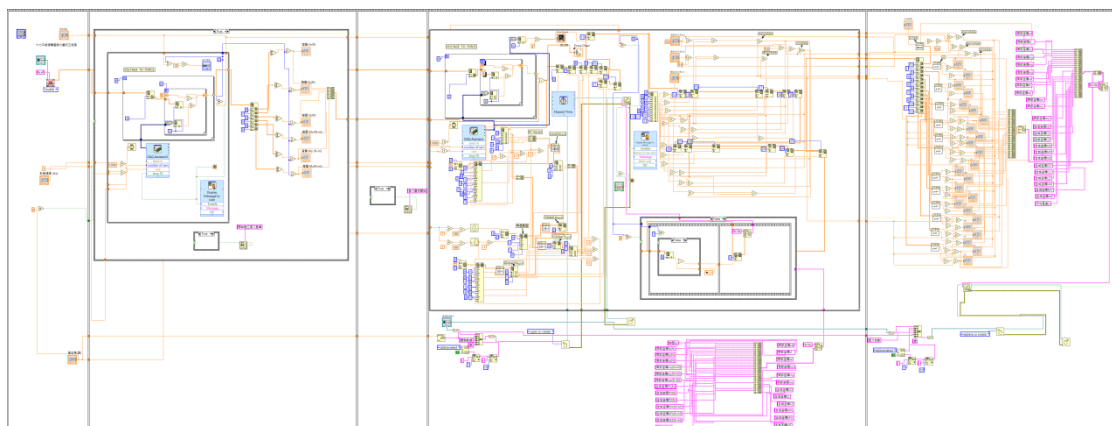


圖 2-10 LabVIEW 風力監測系統-程式區

資料來源：本研究

第四節 實驗模型設計

單斜屋頂結構分立型光電模組系統，為本次試驗主軸，實際目標建築物長寬高分別為 11、12 及 18m，光電板最高處離屋頂 4.5m，傾斜角

度約 15^0 ，光電面板尺寸分為二類，一為最外圍在女兒牆內，另一為女兒牆外伸 1m；縮尺比例以文獻討論較多之 1/50 製作(圖 2-11)，材質為壓克力板。試驗配置係將模型底板與六力平衡儀連結鎖固，藉由共計光電板下 12 支柱與底板接合，傳達光電面板系統所受風力；另在底板上增加一片阻隔板，避免在光電板下與屋頂樓地板間風的流動造成不存在的風力影響。而建築配置分成兩類，獨棟(圖 2-12)與連棟(圖 2-13)，藉以了解臨棟建物遮蔽效應是否顯著。

實驗過程風向角將以 10^0 為增量旋轉，以上一節所提分析軟體量測風力係數，因該數據係以六力平衡儀之 X、Y 軸為座標軸(局部座標)，再轉換為全域座標來流順風向與橫風向風力係數。

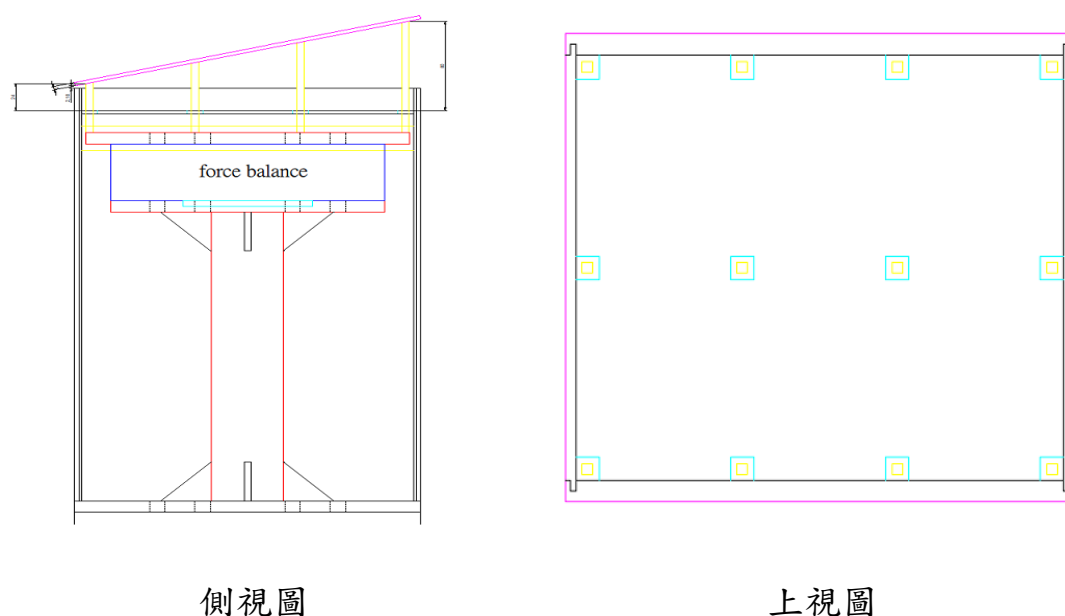


圖 2-11 模型設計

資料來源：本研究



圖 2-12 獨棟建物模型與風洞配置

資料來源：本研究



圖 2-13 連棟建物模型與風洞配置

資料來源：本研究

第三章 光電板支架基底風力測試

第一節 縮尺地況

本所今年度協同研究案「風洞實驗室不同縮尺流場之地況模擬研究」進行一系列小縮尺比例之風場建置包含 1/100 與 1/50 等，其中 1:50 之 C 地況與本研究案之需求相同，故地況特性，包含紊流產生器與粗造元之配置(表 3-1)，係以該案之研究產出為基礎，來進行後續風洞實驗。其中平均風速剖面與目標值誤差約為 2.5%(圖 3-1)；紊流強度於近地表處約為 20%(圖 3-2)，紊流積分尺度分布因渦流產生器尺寸增大亦明顯增加，約由 0.6 至 1m 範圍內，高於風洞半高後略隨高度上升而降低(圖 3-3)。另在紊流頻譜部分亦無異於前述狀況，除近地表處外，於所有量測剖面之頻譜分佈皆近似於 von karman spectrum 分佈(圖 3-4)。綜合上述各風場特性參數實驗結果，證明該小縮尺比例 1:50 之風場配置符合大氣流場特性要求。

表 3-1 C 地況縮尺 1/50 風洞配置

	渦流產生器 spire07						地表粗糙元素 rn01	
	高度 h (cm)	底寬 b _b (cm)	頂寬 b _t (cm)	間距 SPD (cm)	支數	距量測位 置 SP (h)	間距 D (cm)	鋪設範圍 RR (cm)
Case30	258	60	20	120	3	7.3	80	1600
bd2	90	90	40					

資料來源：文獻[8]

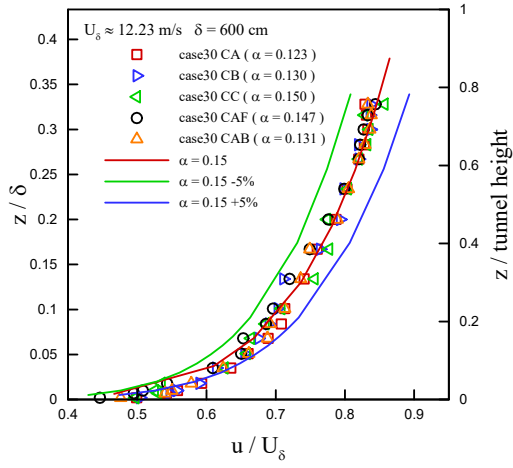


圖 3-1 平均風速剖面

資料來源：文獻[8]

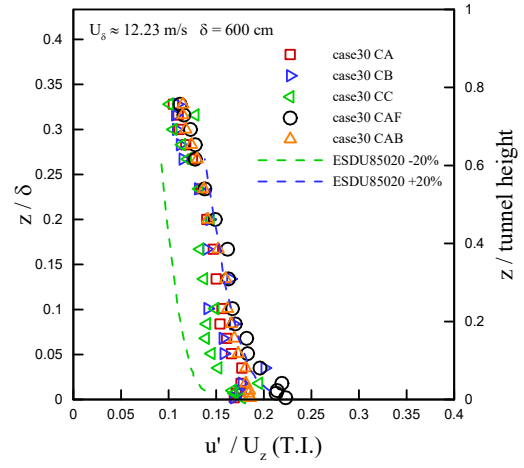


圖 3-2 擾動風速剖面

資料來源：文獻[8]

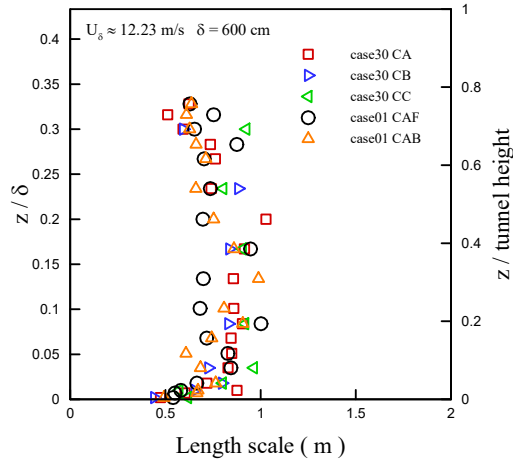
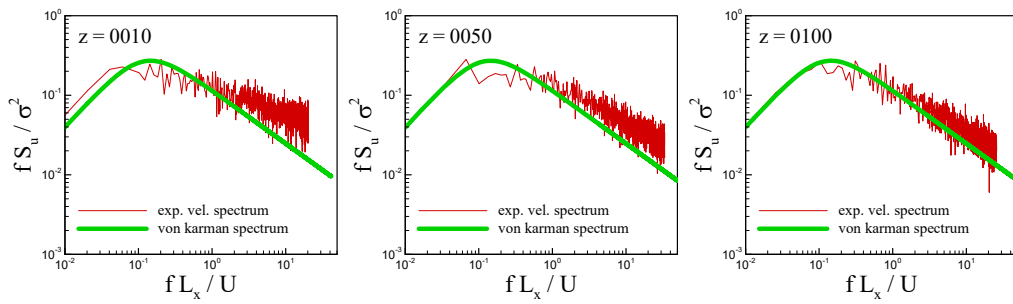
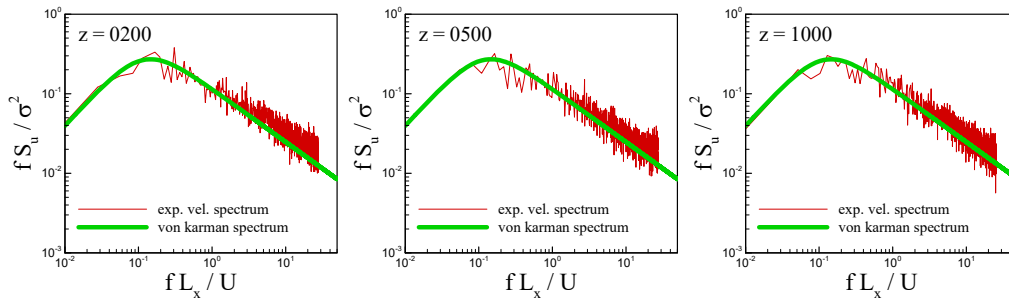


圖 3-3 紊流積分長度尺度剖面

資料來源：文獻[8]



圖 3-4 紊流頻譜密度函數 (z 單位: mm)

資料來源: 文獻[8]

第二節 獨棟建物光電板支架基底風力

地況 C 設置完成後，隨即將模型安裝固定於直徑 1.2M，厚 1” 的旋轉木盤上，並在承盤上安裝六力平衡儀，鎖固於圓柱支架上，接著將活動式單斜式光電板置入與六力平衡儀聯結一起（如圖 3-5）。而光電板設置區域分為型式一【建築物外牆中心】未超出建築物外牆中心與型式二【建築物外牆中心線外 1 公尺】等 2 種類型單斜光電板屋頂，傾斜角度為 15^0 。下面就分別以獨棟型式一與型式二之光電板支撐架基底風力係數量測結果加以分別敘述，試驗過程以 10^0 為旋轉增量，擷取頻率為 250Hz，擷取樣本為 15,000 點，參考風速係以熱線式風速計安裝於模型屋頂高度(38cm)處。計算風力係數所用之受風作用特徵面積為屋頂面積。

(1) 獨棟型式一【建築物外牆中心】(圖 3-5)

表 3-2 為光電板風洞測試過程中不同風向吹試下，屋頂太陽光

電板所受基底風力與平均之參考風速(圖 3-6)，由該表可之平均順風向風力係數(圖 3-7)與橫風向之風力係數(圖 3-8)與平均升風向風力係數(圖 3-9)對比之下，幾乎相差一個位階，因此光電板基底主要受風力係以升風力為主。在不同風向下以風向角為 120° 時平均升風力係數 1.07 為最大，參考風速歷時如圖 3-10，平均風速為 8.06m/s，該處紊流強度 I 為 7.9%。

表 3-2 獨棟型式一風力係數與平均風速

風向角	順風向 平均風 力係數	橫風向 平均風 力係數	升風向 平均風 力係數	順風向 擾動風 力係數	橫風向 擾動風 力係數	升風向 擾動風 力係數	風速平均 U(m/s)
0	-0.0163	-0.02587	0.144083	0.271385	0.226192	0.717004	8.096793
10	-0.0117	-0.05774	0.30225	0.236332	0.280127	0.771179	7.780472
20	0.01484	-0.09131	0.497913	0.175258	0.30614	0.767797	7.816389
30	0.05195	-0.11388	0.696573	0.106916	0.305534	0.727949	8.067592
40	0.1098	-0.14154	0.976839	0.061182	0.337461	0.788366	7.82475
50	0.15297	-0.13158	1.037242	0.0558	0.336548	0.780888	7.806022
60	0.17926	-0.09494	1.025115	0.10486	0.313195	0.741687	8.011918
70	0.19055	-0.06015	0.979604	0.160874	0.289376	0.728641	8.092986
80	0.20573	-0.02469	1.002964	0.224981	0.275964	0.776479	7.901205
90	0.20855	0.006715	0.985531	0.276391	0.23889	0.784536	7.880744
100	0.20763	0.039397	0.996551	0.324354	0.200553	0.789287	7.796905
110	0.20346	0.078169	1.058393	0.348333	0.148451	0.766644	7.884195
120	0.17745	0.10862	1.070861	0.352726	0.09442	0.727752	8.06619
130	0.13982	0.128785	0.959495	0.368433	0.051684	0.734878	8.051195
140	0.0845	0.135832	0.84846	0.37736	0.046032	0.740131	7.958755
150	0.02866	0.118224	0.660207	0.351841	0.085863	0.713518	8.063232
160	-0.0095	0.086364	0.43116	0.343009	0.135832	0.730412	7.878319
170	-0.0344	0.048341	0.225842	0.321813	0.189746	0.749308	7.795978
180	-0.0458	0.010443	0.093539	0.265585	0.221851	0.70741	8.013916
190	-0.0485	-0.01049	0.026564	0.228559	0.270926	0.740109	7.81712
200	-0.0387	-0.03406	-0.03415	0.168164	0.294989	0.725406	7.878194

210	-0.0193	-0.04027	-0.08339	0.107507	0.317074	0.728732	7.87389
220	-0.0082	-0.054	-0.08627	0.045259	0.319312	0.70977	7.933249
230	0.01046	-0.05548	-0.12234	0.040613	0.324571	0.727912	7.839844
240	0.02335	-0.04735	-0.11221	0.096542	0.310354	0.711451	8.004544
250	0.02989	-0.03777	-0.05997	0.161875	0.303447	0.738805	7.8219
260	0.02793	-0.02607	-0.02932	0.222914	0.279068	0.747819	7.784099
270	0.0241	-0.01511	0.008524	0.257474	0.226172	0.698332	7.9794
280	0.03326	-0.00757	0.00073	0.289987	0.179391	0.676958	8.05769
290	0.04354	0.007641	-0.0654	0.340526	0.142672	0.720036	7.841428
300	0.04597	0.022839	-0.08104	0.341586	0.085295	0.671611	8.084239
310	0.02956	0.032923	-0.09006	0.364004	0.039171	0.690588	7.972549
320	0.02053	0.039818	-0.06107	0.38783	0.036208	0.737725	7.709285
330	0.00479	0.034243	-0.00792	0.360725	0.082391	0.705802	7.905944
340	-0.0151	0.018304	0.066152	0.325232	0.127735	0.676296	8.018415
350	-0.028	0.002722	0.113738	0.296832	0.174268	0.678684	7.995287
360	-0.024	-0.01418	0.200028	0.263028	0.219753	0.69987	7.948726

資料來源：本研究



圖 3-5 獨棟型式一試驗配置

資料來源：本研究

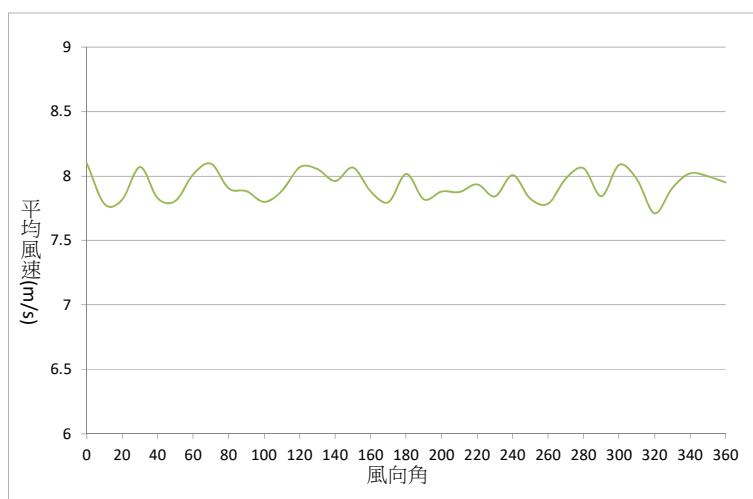


圖 3-6 獨棟型式一各風向角下之平均風速

資料來源：本研究

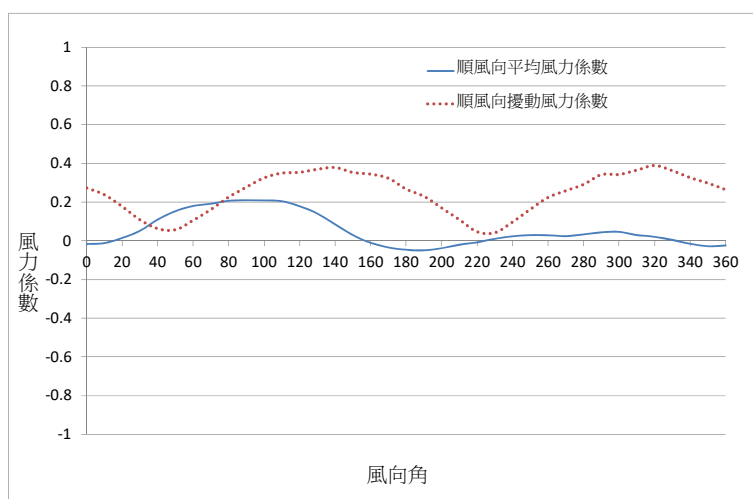


圖 3-7 獨棟型式一順風向風力係數

資料來源：本研究

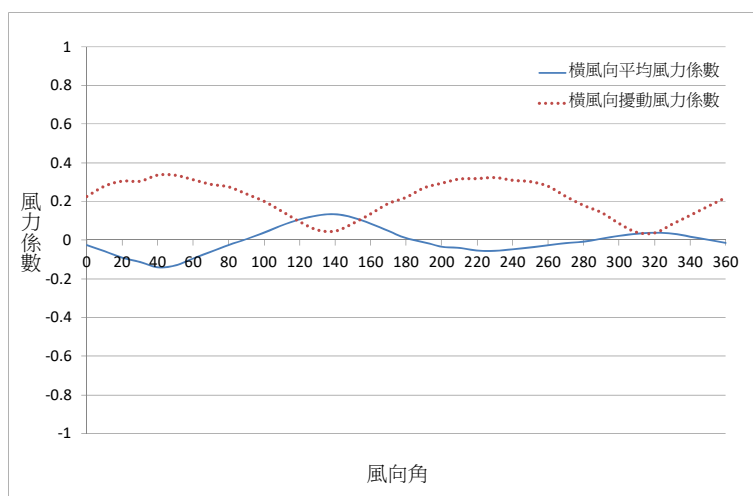


圖 3-8 獨棟型式一橫風向風力係數

資料來源：本研究

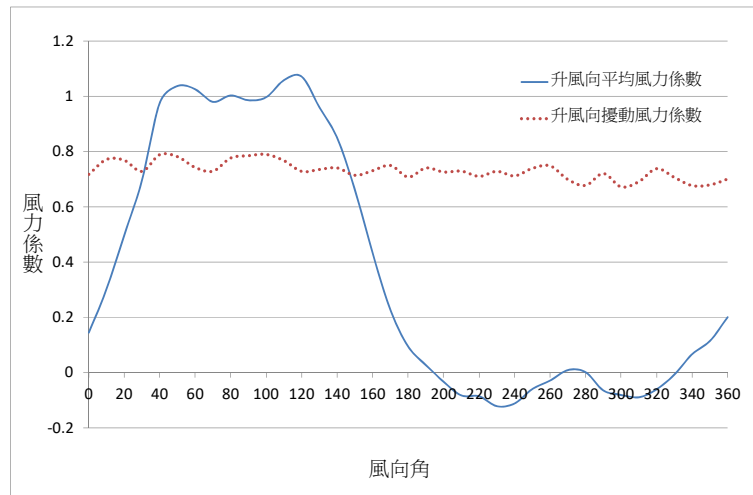


圖 3-9 獨棟型式一升風向風力係數

資料來源：本研究

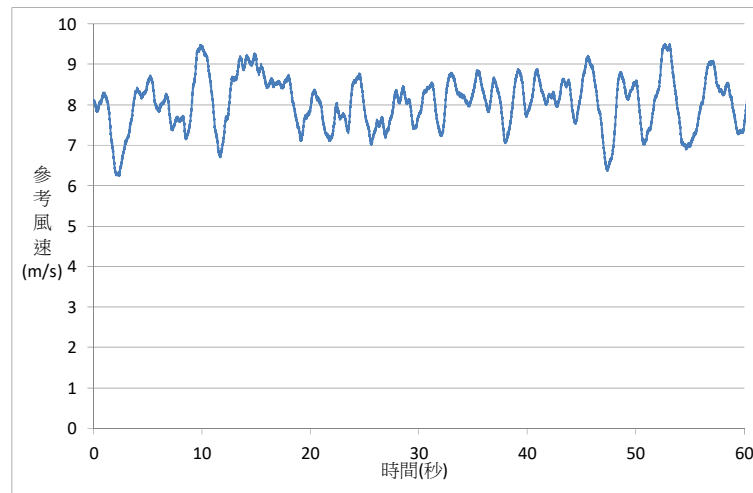


圖 3-10 獨棟型式一風向角 120° 時之參考風速歷時

資料來源：本研究

(2)獨棟型式二【建築物外牆中心線外 1 公尺】(圖 3-11)

表 3-3 為光電板風洞測試過程中不同風向吹試下，屋頂太陽光電板所受基底風力與平均之參考風速(圖 3-12)，由該表可之平均順風向風力係數(圖 3-13)與橫風向之風力係數(圖 3-14)與平均升風向風力係數(圖 3-15)對比之下，幾乎相差一個位階，因此光電

板基底主要受風力係以升風力為主。在不同風向下以風向角為 130° 時平均升風力係數 1.54 為最大，參考風速歷時如圖 3-16，平均風速為 7.8m/s，該處紊流強度 I 為 8.7%。

表 3-3 獨棟型式二風力係數與平均風速

風向角	順風向 平均風 力係數	橫風向 平均風 力係數	升風向 平均風 力係數	順風向 擾動風 力係數	橫風向 擾動風 力係數	升風向 擾動風 力係數	平均風速 U(m/s)
0	-0.0296	-0.0314	0.212017	0.293468	0.243819	0.784129	8.170025
10	-0.0236	-0.08199	0.461717	0.260576	0.306534	0.866408	7.831523
20	0.01541	-0.12887	0.788345	0.189727	0.327176	0.848918	7.939748
30	0.0755	-0.15495	1.079899	0.120907	0.338436	0.81804	8.042323
40	0.1348	-0.17823	1.297008	0.068798	0.349148	0.824992	8.012425
50	0.19758	-0.17468	1.46585	0.066901	0.363421	0.851229	7.917016
60	0.24418	-0.14063	1.515354	0.122013	0.344666	0.83978	7.962964
70	0.26129	-0.09891	1.400753	0.188002	0.326642	0.848437	7.936984
80	0.2564	-0.04667	1.320604	0.238528	0.287421	0.83187	8.046131
90	0.27775	-0.0104	1.349159	0.291967	0.253341	0.831815	7.94176
100	0.26641	0.030852	1.310577	0.322426	0.199058	0.802843	8.077115
110	0.2703	0.078701	1.429597	0.36624	0.156492	0.829176	7.937965
120	0.2516	0.121684	1.440352	0.384289	0.104988	0.808912	8.012945
130	0.22574	0.170342	1.544779	0.420815	0.06484	0.850955	7.77456
140	0.14606	0.165143	1.249118	0.392205	0.058163	0.799002	8.051702
150	0.08655	0.14961	0.981594	0.387689	0.096579	0.800979	7.96072
160	0.03276	0.11246	0.659418	0.356234	0.144124	0.779201	8.056227
170	-0.0084	0.064291	0.373581	0.336103	0.198962	0.796248	7.902153
180	-0.0266	0.017486	0.160927	0.287524	0.239068	0.769791	7.958196
190	-0.0242	-0.00111	0.052496	0.23242	0.273478	0.752558	7.987931
200	-0.022	-0.0228	0.012148	0.169281	0.292651	0.730202	8.072263
210	-0.011	-0.02965	-0.02006	0.109858	0.313806	0.734069	8.0423
220	0.00424	-0.03562	-0.06951	0.052445	0.32995	0.738559	8.005814
230	0.01932	-0.04207	-0.09045	0.046156	0.340879	0.766289	7.900551
240	0.02859	-0.03592	-0.09332	0.09815	0.314278	0.726872	8.096432
250	0.03786	-0.02304	-0.10869	0.166562	0.312106	0.76665	7.880866

260	0.03577	-0.0109	-0.06876	0.223394	0.281259	0.758349	7.950675
270	0.04075	-0.00329	-0.09305	0.278868	0.246216	0.764371	7.902753
280	0.03382	0.00853	-0.06968	0.308925	0.193239	0.735628	8.094139
290	0.03954	0.019327	-0.05994	0.355096	0.150349	0.756477	7.942901
300	0.03084	0.036352	-0.09821	0.357414	0.092317	0.717813	8.117922
310	0.01858	0.041129	-0.06448	0.36766	0.044158	0.713322	8.105491
320	0.00372	0.044021	-0.03095	0.390105	0.038678	0.750183	7.905498
330	-0.0179	0.036297	-0.0055	0.371456	0.086291	0.739461	8.019537
340	-0.0351	0.022703	0.054475	0.357152	0.139479	0.749842	7.959656
350	-0.0367	0.008667	0.115038	0.320999	0.187566	0.74228	8.020545
360	-0.0468	-0.01962	0.185777	0.283031	0.234137	0.761773	7.929943



圖 3-11 獨棟型式二試驗配置

資料來源：本研究

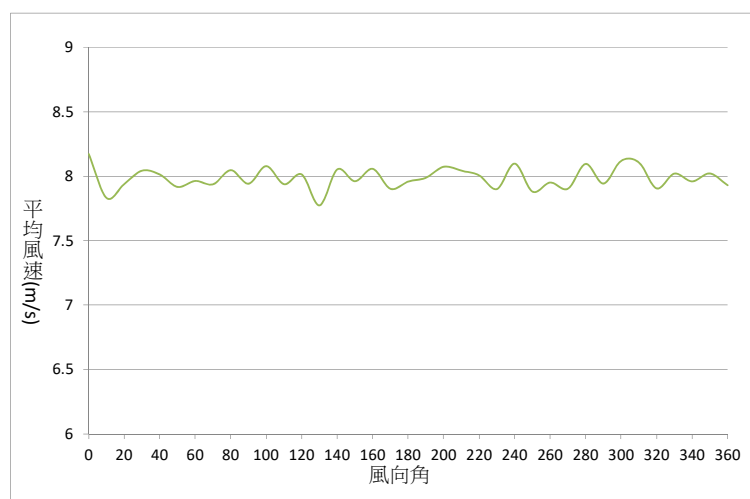


圖 3-12 獨棟型式二各風向角下之平均風速

資料來源：本研究

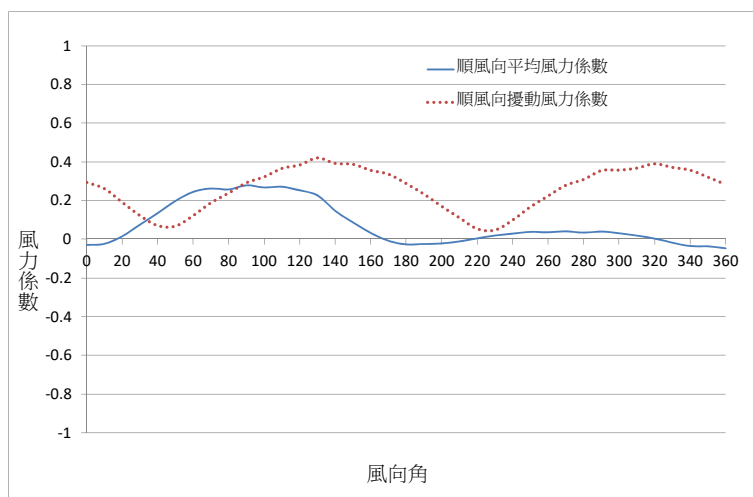


圖 3-13 獨棟型式二順風向風力係數

資料來源：本研究

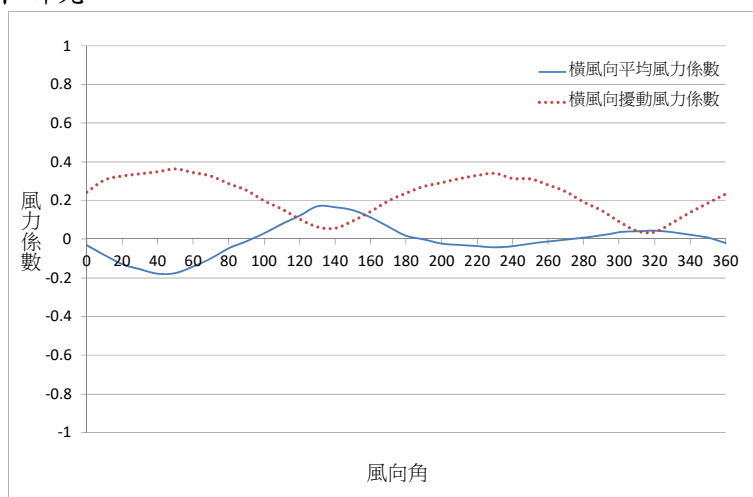


圖 3-14 獨棟型式二橫風向風力係數

資料來源：本研究

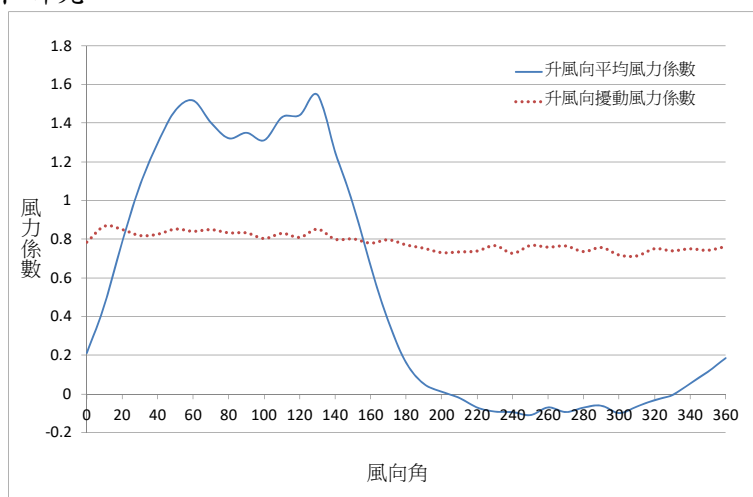


圖 3-15 獨棟型式二升風向風力係數

資料來源：本研究

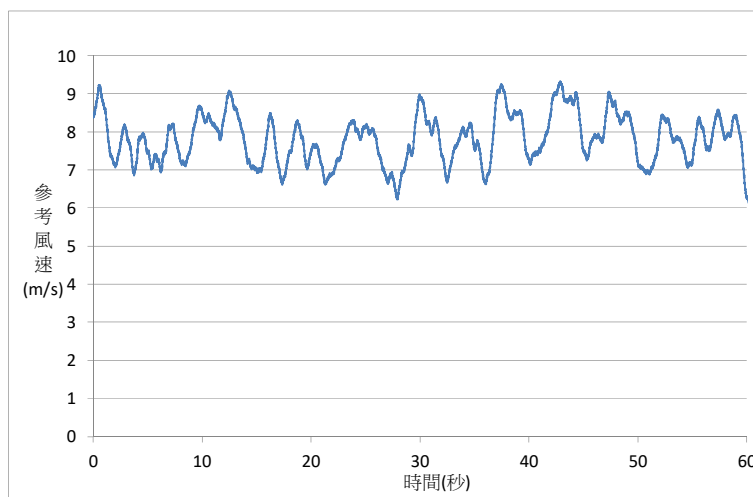


圖 3-16 獨棟型式二風向角 130° 時之參考風速歷時

資料來源：本研究

(3) 小結

比較型式一與型式二所受之風力係數可知，在順風向與橫風向之平均基底風力係數相差不大(圖 3-17 與 3-19)，唯獨升風向之平均基底風力係數相差較大(圖 3-21)，實驗結果型式二約較型式一大 44%。而在擾動風力係數部分，基本上基底順風向與橫風向之擾動風力係數(圖 3-18 與 3-20)，未因光電板型式不同而造成過大影響，惟在擾動升風向風力係數上(圖 3-22)，型式二較型式一大。

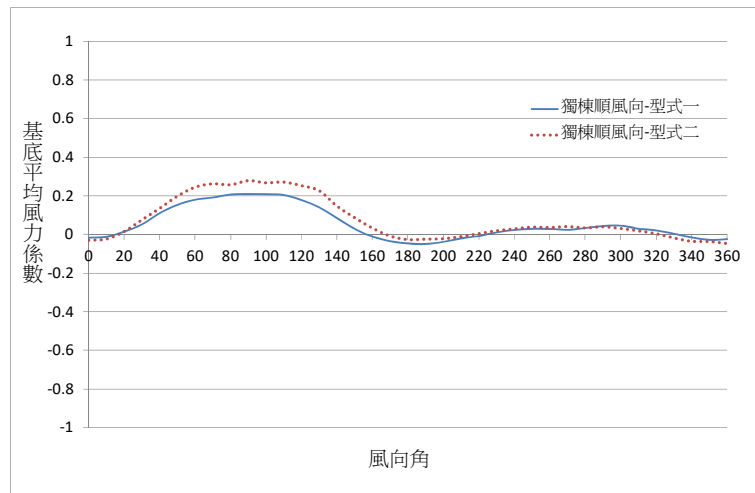


圖 3-17 獨棟型式一與二之順風向平均風力係數比較
資料來源：本研究

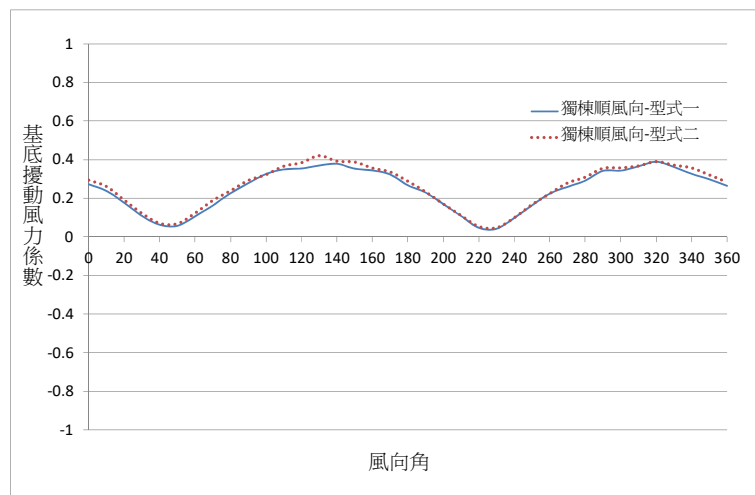


圖 3-18 獨棟型式一與二之順風向擾動風力係數比較
資料來源：本研究

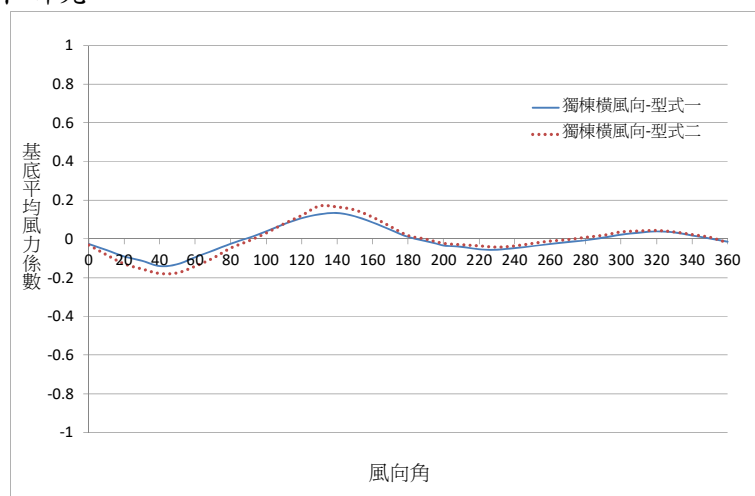


圖 3-19 獨棟型式一與二之橫風向平均風力係數比較
資料來源：本研究

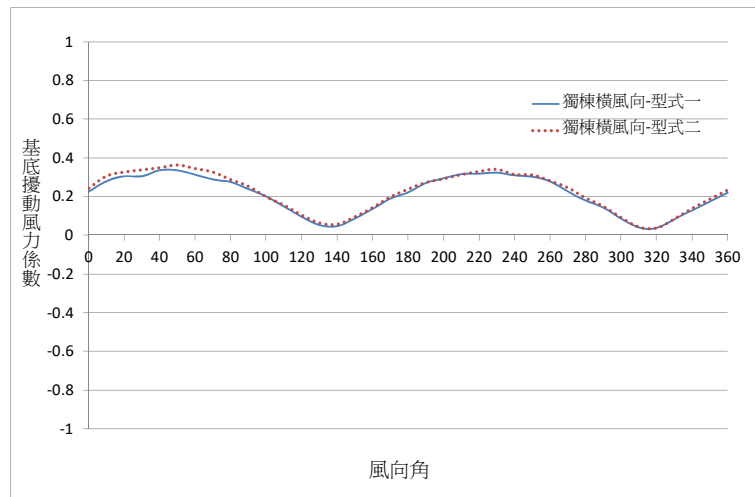


圖 3-20 獨棟型式一與二之橫風向擾動風力係數比較

資料來源：本研究

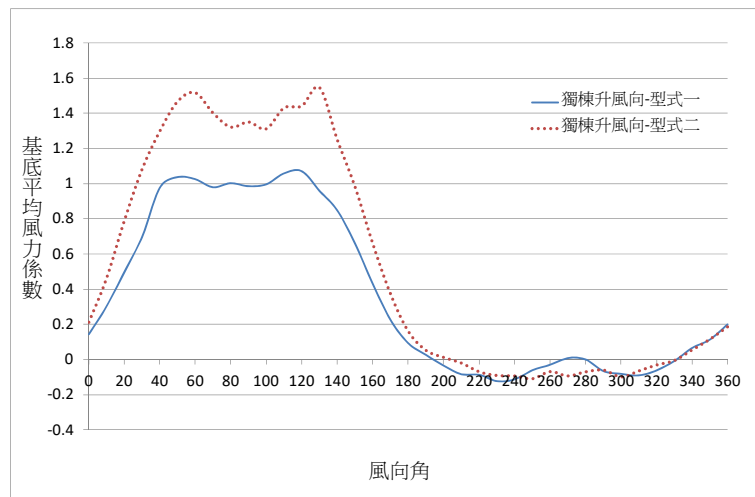


圖 3-21 獨棟型式一與二之升風向平均風力係數比較

資料來源：本研究

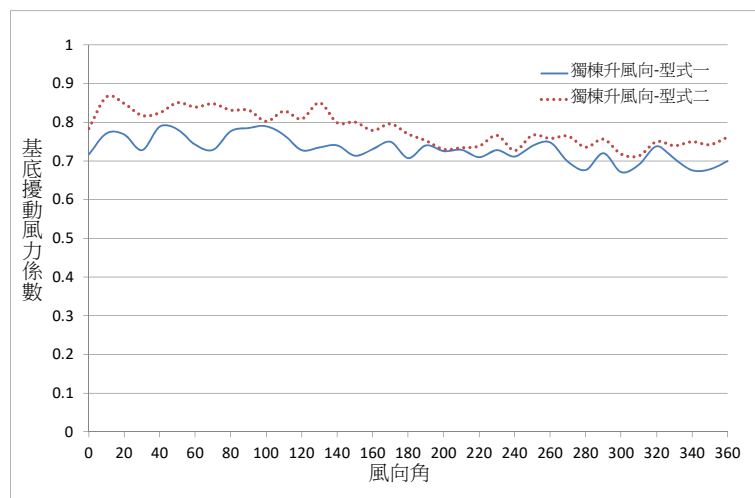


圖 3-22 獨棟型式一與二之升風向擾動風力係數比較

資料來源：本研究

第三節 連棟建物光電板支架基底風力

地況 C 設置完成後，隨即將模型安裝固定於直徑 1.2M，厚 1” 的旋轉木盤上，並在承盤上安裝六力平衡儀，鎖固於圓柱支架上，接著將活動式單斜式光電板置入與六力平衡儀聯結一起（如圖 3-23）。而光電板設置區域分為型式一【建築物外牆中心】未超出建築物外牆中心與型式二【建築物外牆中心線外 1 公尺】等 2 種類型單斜光電板屋頂，傾斜角度為 15° 。下面就分別以連棟型式一與型式二之光電板支撐架基底風力係數量測結果加以分別敘述，試驗過程以 10° 為旋轉增量，擷取頻率為 250Hz，擷取樣本為 15,000 點，參考風速係以熱線式風速計安裝於模型屋頂高度(38cm)處。計算風力係數所用之受風作用特徵面積為屋頂面積。

(2) 連棟型式一【建築物外牆中心】(圖 3-23)

表 3-4 為光電板風洞測試過程中不同風向吹試下，屋頂太陽光電板所受基底風力與平均之參考風速(圖 3-24)，由該表可知平均順風向風力係數(圖 3-25)與橫風向之風力係數(圖 3-26)，在和平平均升風向風力係數(圖 3-27)對比之下，幾乎相差一個位階，因此光電板基底主要受風力係以升風力為主。在不同風向下，其風向角與獨棟之結果一樣為 120° 時，平均升風力係數 1.13 為最大，略大於獨棟之升風力係數 1.07，參考風速歷時如圖

3-28，平均風速為 8.05 m/s，該處紊流強度 I 為 7.67%。

表 3-4 連棟型式一風力係數與平均風速

風向角	順風向 平均風 力係數	橫風向 平均風 力係數	升風向 平均風 力係數	順風向 擾動風 力係數	橫風向 擾動風 力係數	升風向 擾動風 力係數	平均風速 U(m/s)
0	-0.0017	0.015722	-0.04373	0.278464	0.294936	0.925795	8.096501
10	-0.0008	-0.03121	0.216712	0.224941	0.340298	0.929812	8.077904
20	0.01262	-0.06531	0.531929	0.165032	0.369015	0.912625	8.11856
30	0.03515	-0.06988	0.688652	0.108634	0.412567	0.938275	7.901948
40	0.04829	-0.07672	0.713021	0.043558	0.410872	0.910388	8.060134
50	0.07539	-0.05944	0.740984	0.035193	0.410396	0.909531	8.092655
60	0.09158	-0.03801	0.786681	0.095394	0.400191	0.915627	8.035316
70	0.11484	-0.03169	0.799063	0.160129	0.383621	0.927097	7.984869
80	0.12316	-0.00743	0.817289	0.217197	0.346742	0.931551	7.992816
90	0.12355	0.030228	0.909948	0.274556	0.307007	0.954012	7.918614
100	0.12013	0.0526	0.889785	0.303456	0.238851	0.902294	8.087716
110	0.11828	0.074727	0.988517	0.33395	0.177543	0.902173	8.030782
120	0.10657	0.101417	1.1325	0.357892	0.113816	0.910686	8.051671
130	0.07762	0.111336	1.088044	0.356967	0.049367	0.879782	8.167266
140	0.04972	0.118555	1.003184	0.364735	0.043087	0.894463	8.115709
150	0.01263	0.097542	0.890625	0.356784	0.101833	0.893063	8.093987
160	-0.0099	0.063161	0.679147	0.325973	0.162207	0.868472	8.203974
170	-0.0181	0.014113	0.529986	0.306483	0.228621	0.89366	8.001611
180	-0.0118	-0.03206	0.392836	0.264934	0.281618	0.886654	8.020402
190	-0.0056	-0.07031	0.299602	0.22026	0.332639	0.899095	7.917292
200	0.01219	-0.08729	0.243233	0.157126	0.352132	0.859488	8.105375
210	0.02891	-0.09421	0.197013	0.101514	0.385599	0.879595	7.985635
220	0.04285	-0.0915	0.169418	0.039924	0.384523	0.848701	8.076947
230	0.05953	-0.08367	0.149032	0.031839	0.402483	0.884822	7.966739
240	0.06803	-0.06526	0.161108	0.090343	0.383754	0.865495	8.024486
250	0.06734	-0.04337	0.239683	0.149496	0.36213	0.867963	8.030448
260	0.06861	-0.02307	0.338138	0.2058	0.331193	0.874334	8.009497
270	0.06576	-0.00461	0.384946	0.257952	0.290221	0.882976	7.944428
280	0.06268	0.009597	0.415978	0.295603	0.233383	0.871161	8.018159
290	0.05803	0.025697	0.420617	0.318663	0.168951	0.843196	8.087091

結構分立型太陽光電系統風洞實驗研究

300	0.06318	0.045289	0.410432	0.345635	0.108496	0.857651	8.020808
310	0.05586	0.072873	0.312984	0.355809	0.044228	0.855985	8.077024
320	0.05296	0.099896	0.257965	0.360225	0.033733	0.864911	8.039484
330	0.03586	0.114731	0.162882	0.342809	0.096162	0.845438	8.152693
340	0.01342	0.11653	0.134831	0.319679	0.157641	0.836414	8.157448
350	0.00023	0.124935	0.144511	0.307409	0.228234	0.887749	7.943469
360	-0.0173	0.081512	0.284261	0.248997	0.265336	0.836162	8.188166

資料來源：本研究

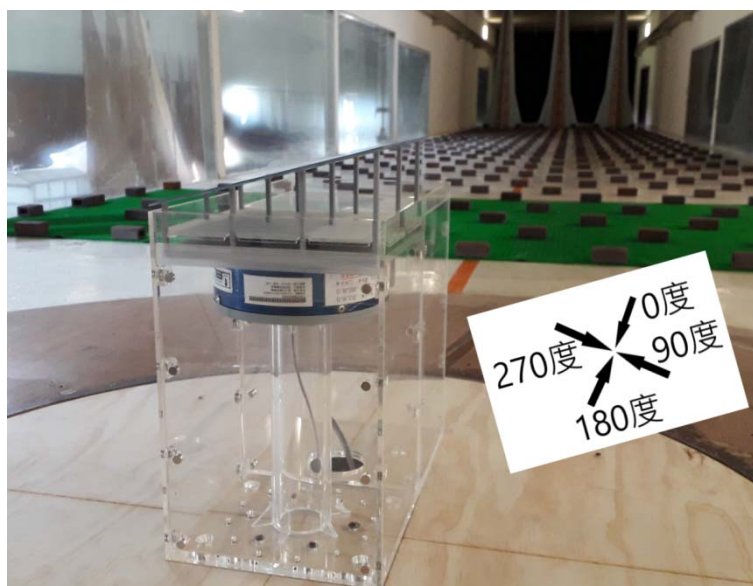


圖 3-23 連棟型式一試驗配置

資料來源：本研究

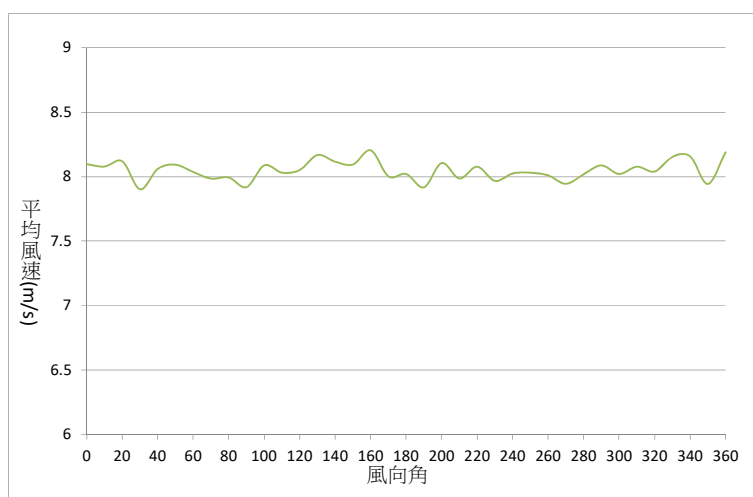


圖 3-24 連棟型式一各風向角下之平均風速

資料來源：本研究

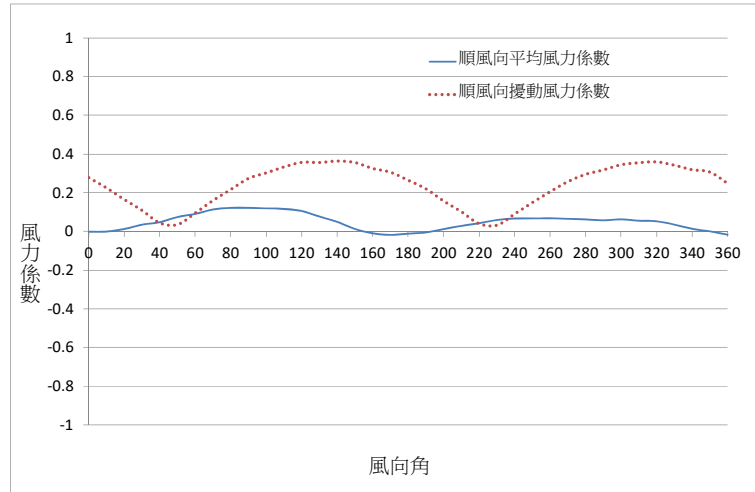


圖 3-25 連棟型式一順風向風力係數

資料來源：本研究

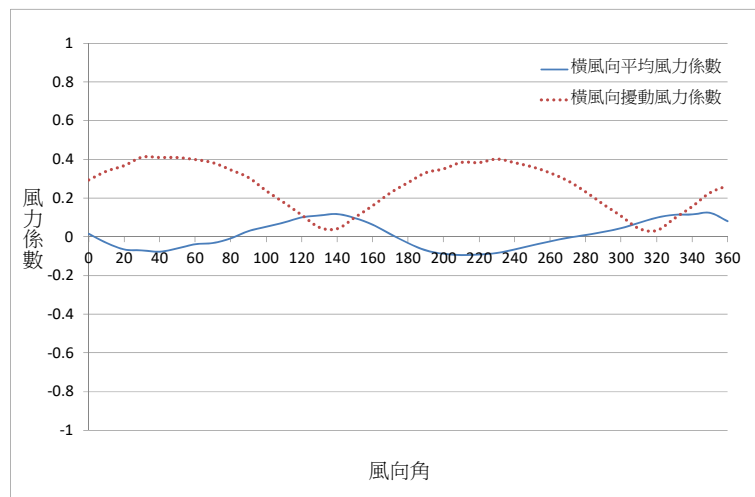


圖 3-26 連棟型式一橫風向風力係數

資料來源：本研究

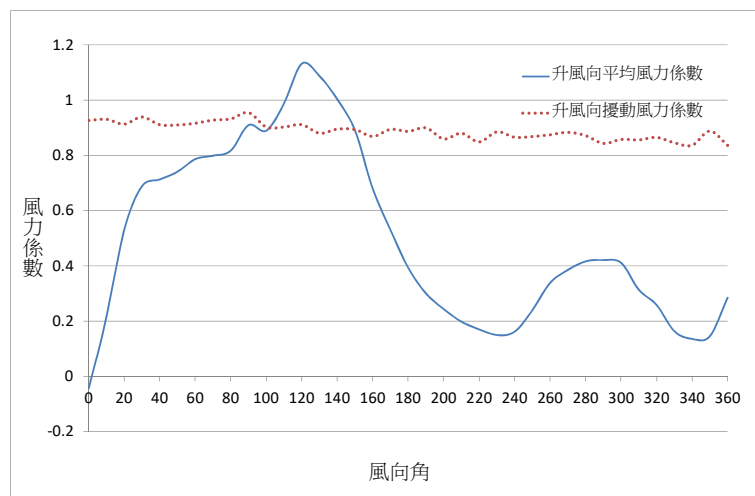


圖 3-27 連棟型式一升風向風力係數

資料來源：本研究

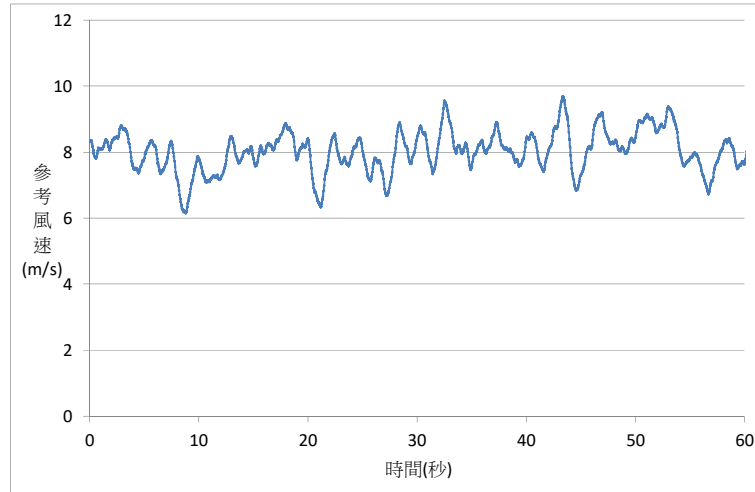


圖 3-28 連棟型式一風向角 120° 時之參考風速歷時

資料來源：本研究

(2)連棟型式二【建築物外牆中心線外 1 公尺】(圖 3-29)

表 3-5 為光電板風洞測試過程中不同風向吹試下，屋頂太陽光電板所受基底風力與平均之參考風速(圖 3-30)，由該表可之平均順風向風力係數(圖 3-31)與橫風向之風力係數(圖 3-32)與平均升風向風力係數(圖 3-33)對比之下，幾乎相差一個位階，因此光電板基底主要受風力係以升風力為主。在不同風向下以風向角為 120° 時平均升風力係數 1.78 為最大，參考風速歷時如圖 3-34，平均風速為 7.96m/s，該處紊流強度 I 為 7.75%。

表 3-5 連棟型式二風力係數與平均風速

風向角	順風向 平均風 力係數	橫風向 平均風 力係數	升風向 平均風 力係數	順風向 擾動風 力係數	橫風向 擾動風 力係數	升風向 擾動風 力係數	平均風速 U(m/s)
0	-0.0044	-0.01433	0.016352	0.288516	0.299609	0.943609	7.437211
10	-0.0065	-0.09748	0.440419	0.245872	0.362362	0.999565	7.285115

第三章 光電板支架基底風力測試

20	0.02694	-0.14264	0.847543	0.189629	0.399975	0.991844	7.304086
30	0.07225	-0.17	1.152671	0.112975	0.36861	0.849541	7.902726
40	0.11873	-0.17205	1.31979	0.072093	0.401604	0.892479	7.664576
50	0.15262	-0.1487	1.325881	0.066168	0.386531	0.868763	7.851363
60	0.18147	-0.11159	1.370381	0.104048	0.37625	0.866656	7.87445
70	0.20733	-0.06907	1.448452	0.15753	0.351754	0.876203	7.893612
80	0.21906	-0.03224	1.414293	0.201669	0.316068	0.862212	7.951479
90	0.22713	0.012949	1.445397	0.248926	0.280546	0.881076	7.901788
100	0.23289	0.054366	1.464498	0.281215	0.228782	0.860033	7.985983
110	0.22772	0.107008	1.574207	0.307185	0.178117	0.858277	8.027357
120	0.23503	0.168416	1.78131	0.332155	0.12721	0.86248	7.956321
130	0.18974	0.212531	1.778045	0.350879	0.081777	0.878088	7.866726
140	0.13281	0.228563	1.612875	0.359806	0.07573	0.894957	7.786186
150	0.06276	0.192572	1.238403	0.318981	0.103782	0.801515	8.148942
160	0.01384	0.152723	0.965702	0.298658	0.153759	0.794762	8.151442
170	-0.0203	0.10975	0.710444	0.279938	0.208659	0.812636	8.00705
180	-0.0348	0.066034	0.487972	0.241083	0.253445	0.784881	8.040914
190	-0.0413	0.037417	0.401224	0.21092	0.31056	0.831902	7.831004
200	-0.0412	0.007897	0.314423	0.152601	0.325588	0.790144	8.048117
210	-0.035	-0.01526	0.261438	0.103828	0.356453	0.810537	7.978256
220	-0.0249	-0.02692	0.227383	0.058564	0.380004	0.831791	7.864059
230	-0.0171	-0.03037	0.223413	0.052121	0.377913	0.825615	7.908943
240	-0.0106	-0.03008	0.277792	0.093876	0.378198	0.845251	7.808329
250	-0.0148	-0.01261	0.309299	0.145864	0.346884	0.823615	7.866423
260	-0.0226	-0.00508	0.377296	0.201379	0.324037	0.846826	7.776279
270	-0.0352	-0.00285	0.417775	0.231626	0.261986	0.786502	8.052008
280	-0.0458	-0.00953	0.50067	0.270034	0.217424	0.78811	8.048743
290	-0.0503	-0.01639	0.548743	0.310769	0.171854	0.817311	7.905377
300	-0.0399	-0.01919	0.516765	0.336958	0.118939	0.830728	7.834622
310	-0.0245	-0.00348	0.405929	0.341102	0.06566	0.81241	7.858175
320	-0.0129	0.012972	0.27736	0.333673	0.055232	0.795145	7.967147
330	-0.017	0.02887	0.16703	0.336825	0.103679	0.823146	7.812945
340	-0.0132	0.031718	0.100771	0.298481	0.151174	0.770989	8.078014
350	-0.0172	0.022354	0.119567	0.28638	0.213117	0.815377	7.950299
360	-0.0181	-0.01417	0.324376	0.238243	0.248591	0.781624	8.12667

資料來源：本研究

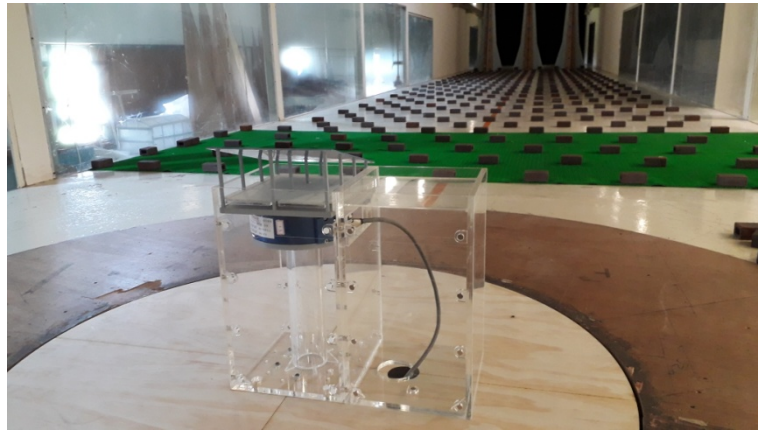


圖 3-29 連棟型式二試驗配置

資料來源：本研究

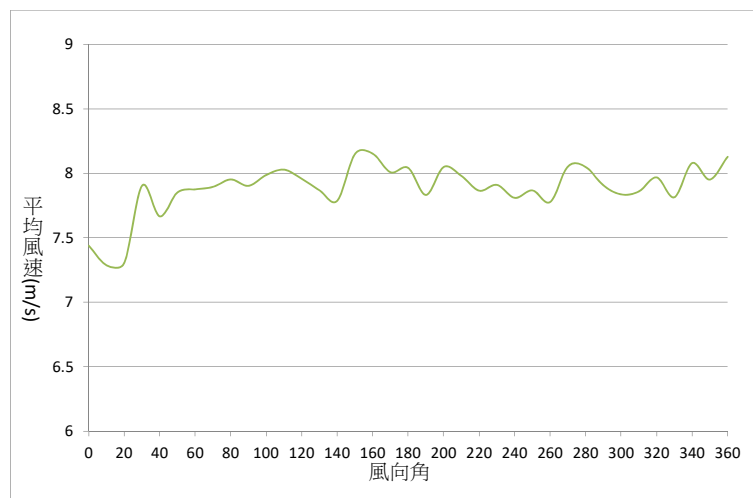


圖 3-30 連棟型式二各風向角下之平均風速

資料來源：本研究

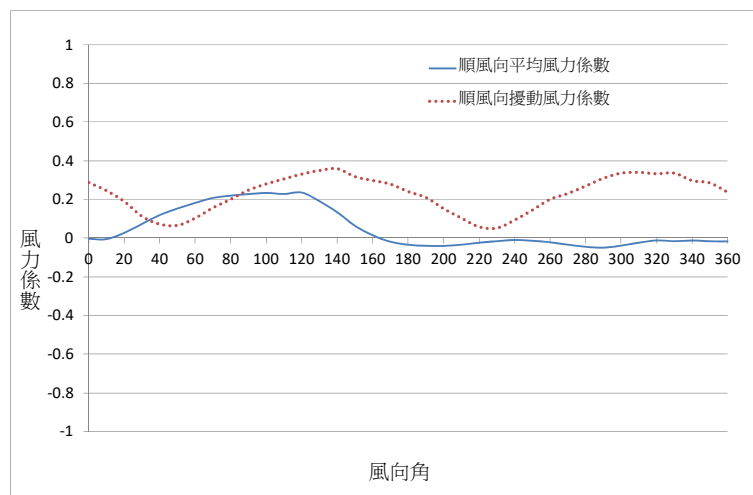


圖 3-31 連棟型式二順風向風力係數

資料來源：本研究

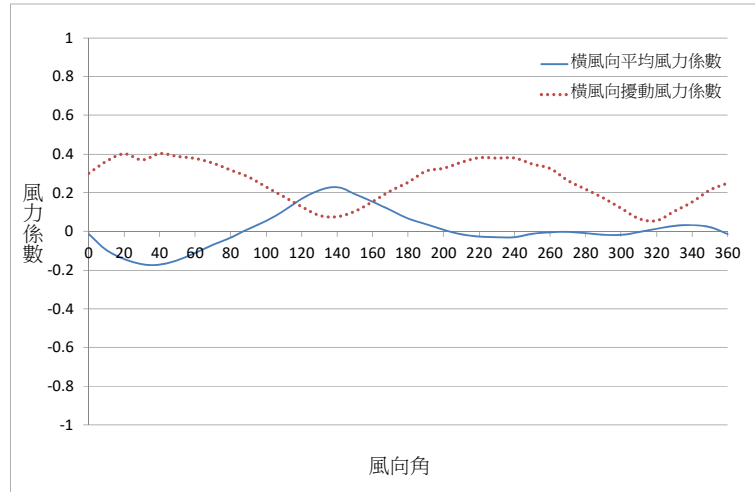


圖 3-32 連棟型式二橫風向風力係數

資料來源：本研究

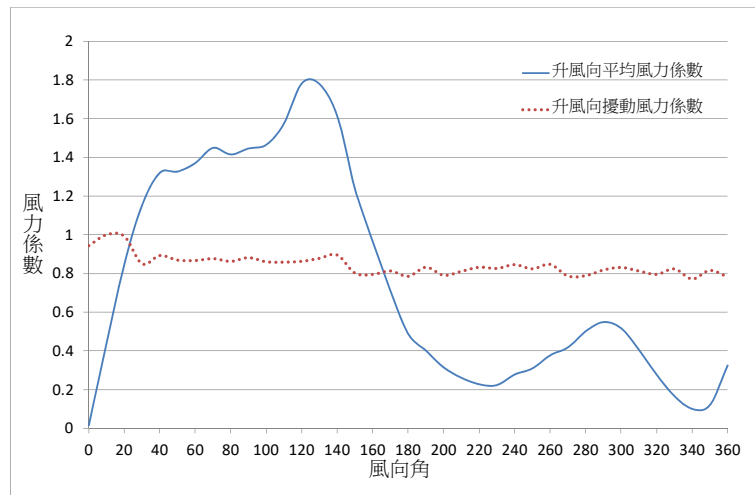


圖 3-33 連棟型式二升風向風力係數

資料來源：本研究

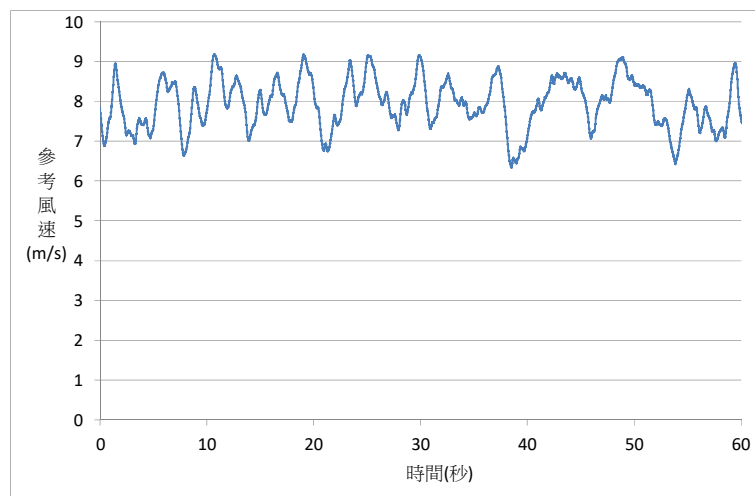


圖 3-34 連棟型式二風向角 120° 時之參考風速歷時

資料來源：本研究

(3)小結

比較型式一與型式二所受之風力係數可知，在順風向與橫風向之平均基底風力係數相差不大(圖 3-35 與 3-36)，唯獨升風向之平均基底風力係數相差較大(圖 3-37)，實驗結果型式二約較型式一大 58%。

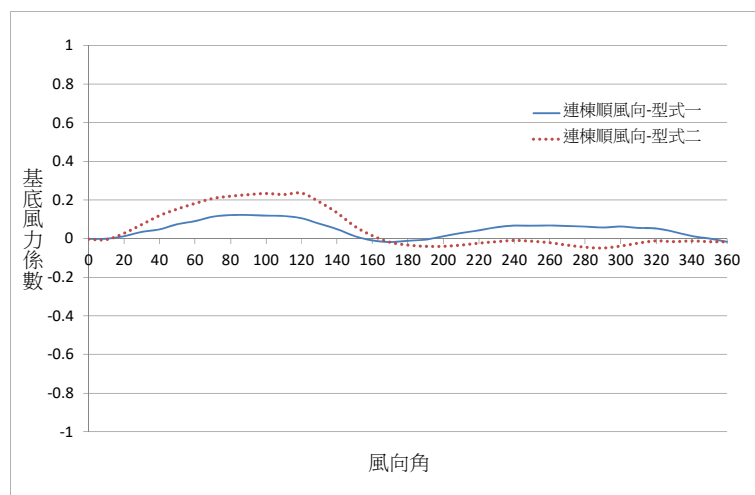


圖 3-35 連棟型式一與二之順風向平均風力係數比較

資料來源：本研究

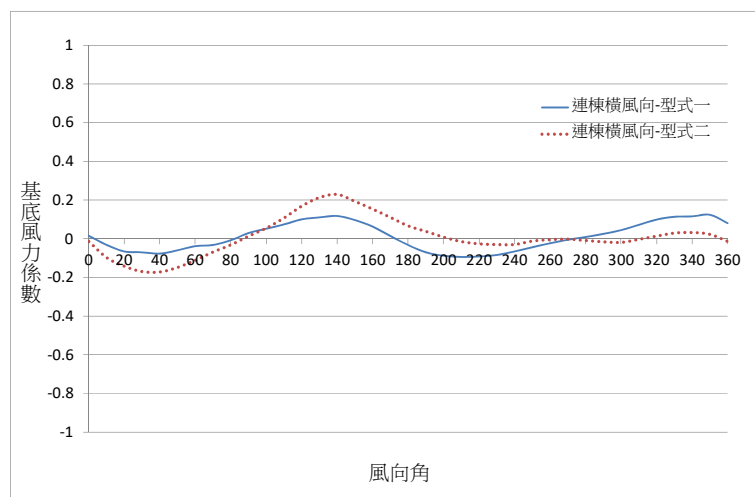


圖 3-36 連棟型式一與二之橫風向平均風力係數比較

資料來源：本研究

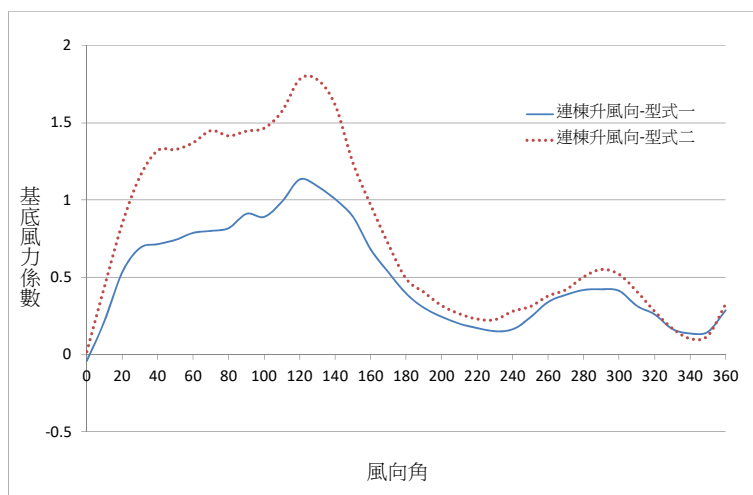


圖 3-37 連棟型式一與二之升風向平均風力係數比較

資料來源：本研究

第四節 測試結果彙整

本研究以長、寬、高為 11、12 及 18m 的建築物為測試標的原型，於其屋頂搭設單斜式結構分立型光電板系統，最高處距屋頂 4.5m，傾斜角度為 15° 。試驗參數分為 2 類，一為建築量體，二為光電板涵蓋區域。建築量體分為獨棟與連棟，光電板涵蓋區域分為二種，型式一為建築物外牆中心線上，型式二為建築物外牆中心線外延伸 1 公尺。風洞試驗配置係以 C 地況，縮尺比例為 1/50，以六力平衡儀量測單斜式光電板結構系統基底所受風力歷時為主，進行不同風向下光電結構系統所受之基底順風向、橫風向與升風向風力係數，彙整如表 3-6。

表 3-6 最大平均風力係數試驗結果彙整表

最大平均風力係數	獨棟				連棟			
	順風向	橫風向	升風向	風向角	順風向	橫風向	升風向	風向角
型式一	0.18	0.11	1.07	120 ⁰	0.11	0.10	1.13	120 ⁰
型式二	0.23	0.17	1.54	130 ⁰	0.24	0.17	1.78	120 ⁰

資料來源：本研究



圖 3-38 最大升風力係數之主要風向角示意圖

資料來源：本研究

實驗結果顯示對於獨棟與連棟不同建築量體下之平均風力係數影響，於橫風向與順風向風力係數之影響不大(圖 3-39、3-40、3-42、3-43)，而在升風向風力係數上，於風向角 180⁰以後，因為連棟建物遮蔽效應影響，致下壓力減少上升力變大(圖 3-41 與 3-44)。

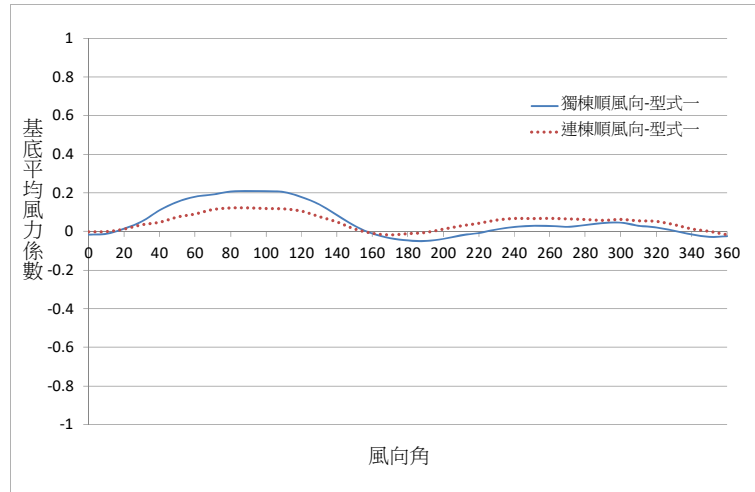


圖 3-39 型式一順風向平均風力係數比較

資料來源：本研究

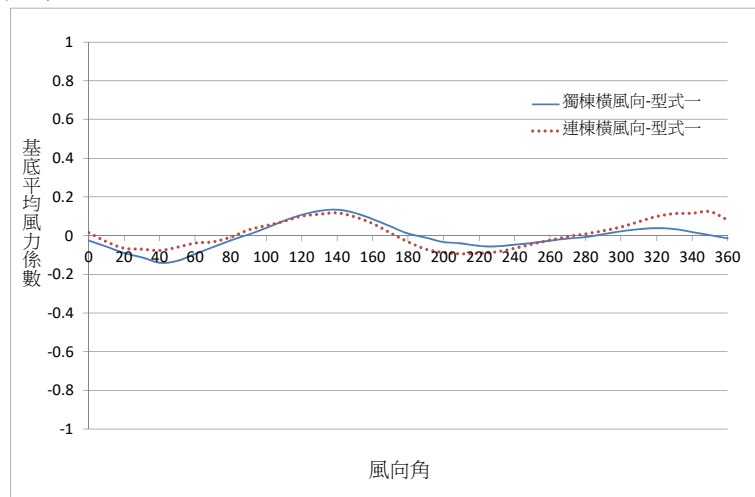


圖 3-40 型式一橫風向平均風力係數比較

資料來源：本研究

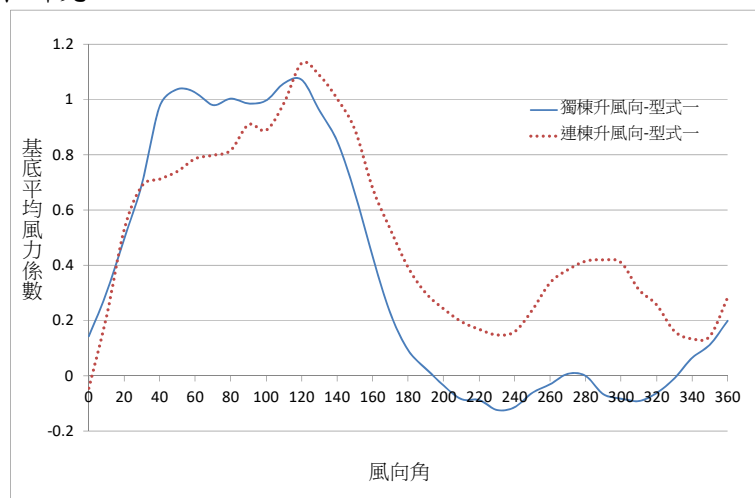


圖 3-41 型式一升風向平均風力係數比較

資料來源：本研究

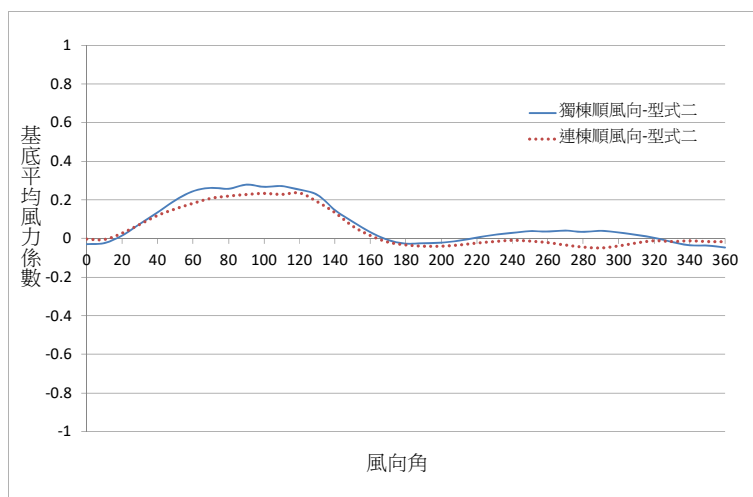


圖 3-42 型式二順風向平均風力係數比較

資料來源：本研究

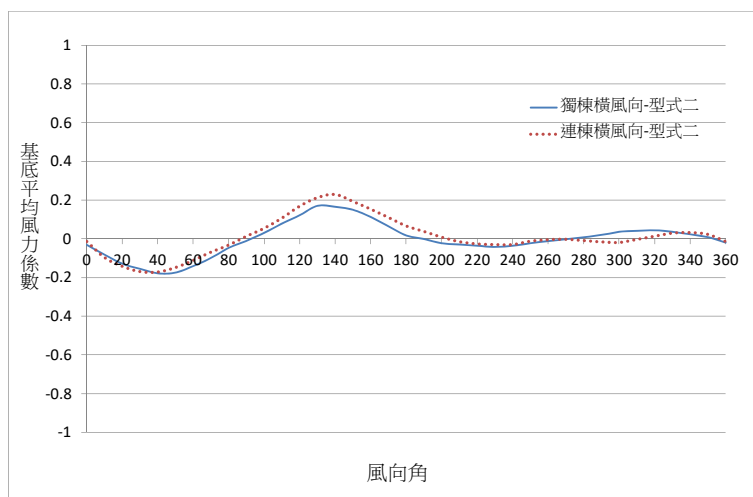


圖 3-43 型式二橫風向平均風力係數比較

資料來源：本研究

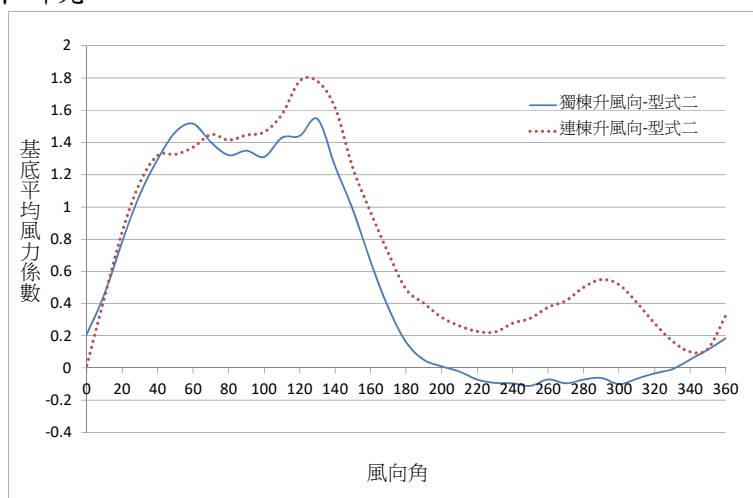


圖 3-44 型式二升風向平均風力係數比較

資料來源：本研究

第四章 結論與建議

第一節 結論

本研究針對架設於樓高 18m，長、寬為 11m 與 12m 的建築屋頂單斜結構分立式太陽光電板，光電板最高處離屋頂 4.5m，傾角 15° ，探討二不同參數：分別為屋頂涵蓋範圍及建築量體配置，進行基底風力係數風洞試驗量測分析比較。風洞試驗係以 C 地況、縮尺比例 1/50 進行，採裝設於太陽光電支撐架底之六力平衡儀量測風力歷時，並以樓高處所量風速為參考風速，進行無因制化之風力係數分析後，發現如下結果：

1. 在同為獨棟建物，光電板涵蓋區域較大時(型式二)，其基底順風向與橫風向平均風力係數與型式一差異不大，唯最大平均升風力係數較型式一增加 44%，風向角介於 120° ~ 130° ；在風向角 180° 以後之平均升風力係數，型式一與二兩者間之差異已不甚明顯。
2. 在同處連棟建物時，其基底風力係數變化現象與獨棟建築相似，唯最大平均升風力係數較型式一增加 58%，風向角於 120° ；而在風向角 180° 以後之平均升風力係數，因建築量體變大，自迎風面而來沿著建築外牆而上升之風量增加，型式二又延伸出外牆，所延攬之升風力亦有所增加。

3. 因建築量體配置不同時，無論是型式一(外牆中心線內)或型式二(外牆中心線外 1m)，在連棟角隅建物上之光電結構系統於各風向侵襲下，其所受平均升風力係數皆有所增加。因此，在探討太陽光電結構系統基底風力係數時，應以連棟角隅是建築量體為研究主要對象，如僅考量獨棟建築上該系統之風力大小，將可能有所低估。

第二節 建議

建議一

不同建築量體與形狀下風力係數影響：中長期建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：內政部建築研究所

連棟建築與獨棟建築其平均升風力係數因建築體表面(含女兒牆)的面積及形狀(含傾斜角)皆有不同，光電結構系統其基底風力大小亦有所不同，建議納入未來研究方向。

建議二

太陽光電系統檢測認證能量建置：中長期建議

主辦機關：經濟部標準檢驗局

協辦機關：經濟部能源局

結合風洞縮尺實驗與實尺寸光電板結構系統耐風檢測，納入推動太陽光電系統第三方檢測驗證項目內，對於國內推動太陽光電系統建置，應可確保系統長期運轉可靠度。

附錄一 期中審查意見答復表

審查意見	辦理情形
本研究對政府擴大太陽光電再生能源計畫有很大幫助	感謝指教
已完成規劃進度，符合預期成果	感謝指教
本研究針對結構分立之平屋頂單斜式棚架型太陽光電系統，以風洞模型試驗進行風力量測，並就「設置再生能源設施免請領雜項執照標準」與「建築物耐風設計規範」建議之風力係數進行比對分析，深具實用價值，並符合本國現階段工程評估設計之急需。	感謝指教
很多建築物設置太陽光電系統之情況可能非獨棟建築，也許可以考慮連棟建築物設置PV系統的影響	後續實驗將依委員建議，採獨棟與連棟方式進行。
建議目標建築物高度除18m外，可否考慮較高到如40m高度的情形	因本案研究對象係以建築物耐風設計規範之低矮建物為目標，故採樓高 18m。
比例尺的製作僅有1/50來模擬，應考慮在實際狀況下，如何消弭尺度效應（參數設定很重要）為主要研究對象	本所 109 年度協同研究「風洞實驗室不同縮尺流場之地況模擬研究」，便針對委員意見來消弭 1/50 縮尺風洞實驗之疑慮，本研究則不贅述。
採用1/50縮尺，風洞如何建構紊流場，可以考慮部分模擬或均勻紊流下進行試驗	答覆同上述
採用Force Balance量測得到整體風力，如何反應至局部扣件的設計	六力平衡儀量測結果係以整體光電支架基底風力為量測對象，尚無法直接反應至局部構件之風力設計。
光電系統最高處建議修改為法規上限4.5m，傾斜角度上亦可參考現況加以變化	參考委員建議，於後續研究中針對高度加以微調
建議納入地面型光電系統風力係數研究	本案後續實驗模型仍以屋頂型為主，暫不納入地面型光電系統

研究進度未呈現，內容第三章、第四章尚未寫作，執行進度恐需加速完成	本案目前完成試驗規劃設計與前置分析程式撰寫，惟風洞實驗流場縮尺邊界層流適用性仍待確認，因此仍未進行實質測試與結果呈現。目前模型將於下星期製作完成，預計於二星期後執行實驗，應可如期於期末報告中呈述相關成果
內容請依研究論文格式辦理，加強文獻回顧與實驗分析內容之探討	委員所提文中有圖形不明或須加以補述之處，將於期末報告中一併修正

附錄二 期末審查意見答復表

審查意見	辦理情形
本計畫針對結構分立平屋頂單斜式棚架型太陽光電系統，以風洞試驗提供系統之風力係數，其成果可立即作為相關設計之參考，頗具實用價值。	感謝指教
本研究已充分達成其研究目標，建議將此研究成果納入相關的法規。	感謝指教
實驗縮尺地況採另一研究案之配置（C地況 1/50） case 30，請補充說明和繪製示意圖。	相關試驗配置、圖表編排及模型尺寸或來流風向等將於成果報告中加以納入或修正。
本實驗採樓高18m是否是最佳選擇？與實際建築體的高度稍嫌較低，可否爾後有調整空間。	因本案研究對象係以建築物耐風設計規範之低矮建築物為目標，故採樓高 18m。
本研究採C地況縮尺比例1/50進行太陽光電支撐架風力係數分析，與1/250或1/100有風力係數何區別？	經檢視文獻資料發現，不同縮尺比例之光電板模型風洞實驗結果，其造成平均風力係數影響差異不大，惟擾動風力係數受模型尺度影響甚鉅。當縮尺後模型過小，將造成擾動風力或風壓係數較實際者大。因此，本案採用文獻中常見之縮尺比例 1/50 為主要研究模型尺度。
連棟建築與獨棟建築其平均升風力係數因建築體表面（含女兒牆）的面積及形狀（含傾斜角）皆有不同，光電結構系統其基底風力大小亦有所不同，可否列入未來研究方向。	本案可同時進行光電面板風壓與基底風力量測，惟時程有限無法一併納入即時風壓、不同傾斜角或女兒牆型式等，於後續研究可考量納入。
建議未來可投入連棟透天厝每棟皆有設置太陽光電及地面型多陣列（排）棚架型系統之研究。	於結論建議中增納委員意見，作為後續步研究建議
本研究發現當光電板外伸女兒牆1m時，	於成果報告中補述可能造

其基底最大平均與擾動升力係數會較光電板未外伸情形增加，有可能增加原屋頂面之防水層或結構破壞，可提供技師設計參考。	成原屋頂面之防水層或結構破壞，設計時須多加考慮。
建議本研究對風力係數之研究成果，除了展示風向角 120° 之最大值外，亦可呈現其他風向角之成果。另建議補充太陽光電系統架設方法之說明。	針對不同來流角度所造成之風力係數大小影響，於期末報告中僅呈現最大值的成果。其他風向角度所造成的影響，除既有圖表呈現外，亦將於成果報告中加以詳細文字陳述。

參考書目

1. Aly, M.A. and Girma B ,2013. Aerodynamic of ground-mounted solar panels: Test model scale effects. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 123, 250-260.
2. Lee, B.E.,1975.Some effects of turbulence scale on the mean forces on a bluff body. Journal ofIndustrialAerodynamics1,361–370
3. Cook, N.J.,1977. Determination of the model scale factor in wind tunnel simulations of the adiabatic atmospheric boundary layer. Journal of Industrial Aerody namics 2,311–321.
4. Holdo, A.E.,Houghton,E.L.,Bhinder,F.S.,1982.Some effects due to variations in turbulence integral length scales on the pressure distribution on wind-tunnel models of low-rise buildings. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics10,103–115.
5. Laneville, A.,1990.Turbulence and blockage effects on two dimensional rectangular cylinders. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 33,11–20.
6. Xypnitou,E.,2012.Wind Loads on Solar Panel Systems Attached to Building Roofs (M.Sc. thesis). Concordia University, Montreal, QC, Canada.
7. Ted S., Ioannis Z., Eleni X., 2014. Local and over all wind pressure and force coefficients for solar panels. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 125,195–206.
8. 內政部建築研究所協同研究案「風洞實驗室不同縮尺流場之地況模擬研究」期末報告，109 年 10 月。

