

陽光屋頂耐風評估與設計準則

內政部建築研究所協同研究報告

104年度

陽光屋頂耐風評估與設計準則

內政部建築研究所協同研究報告

中華民國 104 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)

計畫編號：10415B0006

陽光屋頂耐風評估與設計準則

研究主持人：鄭元良

協同主持人：陳若華

研究員：李信宏，范智光，郭建源，聶國昫

研究助理：周晉成，王家驊

內政部建築研究所協同研究報告

中華民國 104 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

目次	I
表次	V
圖次	VII
摘 要	XIII
ABSTRACT	XVII
第一章 緒 論	1
第一節 研究緣起與背景	1
一、研究緣起	1
二、研究背景	2
第二節 研究內容與方法	5
第三節 研究流程與進度規劃	10
第二章 文獻回顧	13
第一節 太陽光電板之氣動力特性	13
第二節 相關規範及管理辦法	14

第三章 太陽光電板氣動力特性實驗	21
第一節 流場規劃	21
第二節 實驗量測與模型規劃	22
第四章 研究成果與檢討	29
第一節 太陽光電板風載重	29
一、不同排數太陽光電板的影響	29
二、不同間距的影響	33
三、更多排數時不同位置的差異	36
四、邊緣距離的差異	37
五、屋頂坡度的影響	43
六、女兒牆的影響	45
七、太陽光電板下高度影響	45
第二節 結構分析成果	47
一、太陽光電板模組支撐架結構數值分析模型	47
二、結構分析計算成果	50
第三節 太陽能支撐架結構改善分析	70
第四節 規範與實驗值對支撐架結構分析比較	77

第五節 陽光屋頂之耐風設計準則研擬	83
第五章 結論與建議	85
第一節 結論	85
第二節 建議	87
附錄一、陽光屋頂之耐風設計準則	91
一、耐風設計考慮因素	91
二、研擬之設計準則	91
附錄二、評選委員發言單及廠商回應一覽表	95
附錄三、期中審查委員發言單及廠商回應一覽表	99
附錄四、專家座談委員發言單及廠商回應一覽表	107
附錄五、期末審查會委員發言單及廠商回應一覽表	111
參考書目	117

表次

表 1-1 太陽光電系統設置之型式及特點.....	3
表 1-2 研究進度規劃表	11
表 3-1 太陽光電板陣列排列方式	27
表 3-2 建築物屋頂型式	28
表 3-3 實驗項目統整表	28
表 A-1 評選委員發言單及廠商回應一覽表.....	95
表 A-2 期中審查委員發言單及廠商回應一覽表.....	99
表 A-3 專家座談委員發言單及廠商回應一覽表.....	107
表 A-4 期末審查會委員發言單及廠商回應一覽表.....	111

圖次

圖 1-1 計畫執行流程	10
圖 2-1 陣列陰影長度之計算圖例	19
圖 3-1 流場特性之垂直分佈，(a)平均風速剖面，(b)紊流強度剖面.....	21
圖 3-2 氣動力模型	23
圖 3-3 模型風攻角定義	23
圖 3-4 電子式壓力掃描模組	25
圖 3-5 壓力訊號處理系統	25
圖 4-1 平屋頂建築物，太陽光電板上所受整體平均淨風壓係數隨風攻角變化，(a)單排，(b)2 排，(c)3 排。	31
圖 4-2 平屋頂建築物，太陽光電板上所受整體擾動性淨風壓係數隨風攻角變化，(a)單排，(b)2 排，(c)3 排。	32
圖 4-3 平屋頂建築物，各排太陽光電板上所受整體平均淨風壓係數隨風攻角變化，(a)無間距，(b)1 單位間距，(c)2 單位間距，(d)3 單位間距。	34

- 圖 4-4 平屋頂建築物，各排太陽光電板上所受整體擾動性淨風壓係數隨風攻角變化，(a)無間距，(b)1 單位間距，(c)2 單位間距，(d)3 單位間距。35
- 圖 4-5 平屋頂建築物，七排太陽光電板時，第 1、4、7 排之整體淨風壓係數隨風攻角變化，(a)平均淨風壓係數，(b)擾動性淨風壓係數。36
- 圖 4-6 平屋頂建築物，三排太陽光電板與屋頂前緣不同距離時整體淨風壓係數隨風攻角變化，(a)與前緣切齊，(b)與前緣退縮 1 單位寬(c)與前緣退縮 2 單位寬。38
- 圖 4-7 平屋頂建築物，三排太陽光電板間距 1 單位寬與屋頂前緣不同距離時整體淨風壓係數隨風攻角變化，(a)與前緣退縮 1 單位寬(b)與前緣退縮 2 單位寬。39
- 圖 4-8 1:8 斜屋頂建築物，與屋頂前緣不同距離之 3 排太陽光電板整體淨風壓係數隨風攻角變化，(a)與前緣切齊，(b)與前緣退縮 1 單位寬，(c)與前緣退縮 2 單位寬。40
- 圖 4-9 1:4 斜屋頂建築物，與屋頂前緣不同距離之 3 排太陽光電板整體淨風壓係數隨風攻角變化，(a)與前緣切齊，(b)與前緣退縮 1 單位寬，(c)與前緣退縮 2 單位寬。41
- 圖 4-10 1:2 斜屋頂上與屋頂前緣不同距離之 3 排太陽光電板整

體淨風壓係數隨風攻角變化，(a)與前緣切齊，(b)與前緣退縮 1 單位寬，(c)與前緣退縮 2 單位寬。	42
圖 4-11 不同屋頂坡度，三排太陽光電板與屋頂前緣切齊時整體 淨風壓係數隨風攻角變化，(a)平屋頂，(b)坡度 1:8 屋頂，(c) 坡度 1:4 屋頂，(d)坡度 1:2 屋頂。	44
圖 4-12 平屋頂含女兒牆時，三排太陽光電板與屋頂前緣不同距 離時整體淨風壓係數隨風攻角變化，(a)與前緣切齊，(b)與前 緣退縮 1 單位寬，(c)與前緣退縮 2 單位寬。	46
圖 4-13 太陽光電板各部結構圖	47
圖 4-14 桿件名稱定義	48
圖 4-15 桿件編號分布，(a) (b)Column 桿件編號 R1:201-221; R2: 101-142，(c) Beam 桿件編號：501-600，(d) Girder 桿 件編號 301-354，(e) Truss 桿件編號 601-621。	49
圖 4-16 屋頂上太陽光電板編號與來流風向角定義。	50
圖 4-17 (a)前排柱桿件軸力極值圖，(b)後排柱桿件軸力極值圖	51
圖 4-18 橫梁桿件應力 (a)彎矩極值圖，(b)剪力極值圖	52
圖 4-19 斜梁桿件應力 (a)彎矩極值圖，(b)剪力極值圖	53
圖 4-20 斜撐桿件軸力極值圖	54

圖 4-21 柱桿件軸力，(a)前排柱桿件軸力極值圖，(b)後排柱桿件 軸力極值圖	55
圖 4-22 橫梁桿件內力，(a) 橫梁桿件彎矩極值圖，(b) 橫梁桿件 剪力極值圖	56
圖 4-23 斜梁桿件內力，(a)斜梁桿件彎矩極值圖，(b)斜梁桿件剪 力極值圖	57
圖 4-24 斜撐桿件軸力極值圖	58
圖 4-25 柱桿件軸力極值圖，(a) p1 前排柱桿件軸力極值圖，(b) p3 前排柱桿件軸力極值圖。	59
圖 4-26 柱桿件軸力極值圖，(a) p1 後排柱桿件軸力極值圖，(b) p3 後排柱桿件軸力極值圖。	60
圖 4-27 橫梁桿件內力極值圖，(a) p1 p1 橫梁桿件彎矩極值圖，(b) p3 橫梁桿件彎矩極值圖。	61
圖 4-28 橫梁桿件剪力極值圖(a) p1 橫梁桿件剪力極值圖，(b)p3 橫梁桿件剪力極值圖。	62
圖 4-29 橫梁桿件剪力極值圖(a) p1 橫梁桿件彎矩極值圖，(b)p3 橫梁桿件彎矩極值圖。	63
圖 4-30 斜梁桿件剪力極值圖(a) p1 斜梁桿件剪力極值圖，(b)p3 斜梁桿件剪力極值圖。	64

圖 4-31 斜撐桿件軸力極值圖(a) p1 斜梁桿件軸力極值圖，(b)p3 斜梁桿件軸力極值圖。	65
圖 4-32 柱桿件軸力，(a) 前排柱桿件軸力極值圖，(b)後排柱桿件軸力極值圖	66
圖 4-33 橫梁桿件內力，(a)橫梁桿件彎矩極值圖，(b)橫梁桿件剪力極值圖	67
圖 4-34 斜梁桿件內力，(a)斜梁桿件彎矩極值圖，(b)斜梁桿件剪力極值圖	68
圖 4-35 斜撐桿件軸力極值圖	69
圖 4-36 前排短柱與斜撐連接位置示意圖	70
圖 4-37 後排柱與斜撐連接位置示意圖	71
圖 4-38 後排長向斜撐連接位置示意圖	71
圖 4-39 不同風攻角作用下，後排柱桿件軸力極值圖，風攻角(a)30 度，(b)40 度，(c)50 度，(d)60 度。	73
圖 4-40 風攻角 30 度時，斜梁桿件之(a)彎矩極值圖，(b)剪力極值圖。	74
圖 4-41 不同風攻角作用下，斜撐桿件軸力極值圖，風攻角(a)30 度，(b)40 度，(c)50 度，(d)60 度。	76

圖 4-42 風攻角 40 度，前後排柱桿件軸力極值圖，(a)後排柱，(b)前排柱.....	78
圖 4-43 風攻角 40 度時，(a)原結構橫梁桿件彎矩極值圖，(b)改善後結構橫梁桿件彎矩極值圖.....	79
圖 4-44 風攻角 40 度時，(a)原結構橫梁桿件剪力極值圖，(b)改善後結構橫梁桿件剪力極值圖.....	80
圖 4-45 風攻角 40 度時，(a)原結構斜梁桿件彎矩極值圖，(b)改善後結構斜梁桿件彎矩極值圖.....	81
圖 4-46 風攻角 40 度時，(a)原結構斜梁桿件剪力極值圖，(b)改善後結構斜梁桿件剪力極值圖.....	82

摘要

關鍵詞：風荷載、太陽光電板、結構分析、風洞實驗

一、研究緣起

太陽光電科技產業為政府所大力鼓勵的重要發展路線，對於太陽光電系統的設置以及管理各級政府訂下鼓勵的政策。太陽光電系統的安裝大多位於建築物頂端或外殼及空曠區域等受風作用甚為強烈，太陽光電系統設施的設置與運轉即需對外在環境具備相當的耐受能力，台灣地區颱風等極端氣候作用頻繁，因此受風作用後，引發的荷載有必要加以評估。本計畫由氣動力實驗與結構分析等方向來探討風場對太陽光電板或陣列的風載重，涵蓋模型氣動力實驗、結構分析軟體的計算檢討與耐風性能優化設計建議等。

二、研究方法及過程

本計畫以氣動力實驗與結構分析等構面來探討風場對陽光屋頂風載重的影響，涵蓋低層建築物模型氣動力實驗、結構分析軟體的計算檢討與耐風性能優化設計建議等。

三、重要發現

本計畫就建築物屋頂安裝太陽光電系統進行一系列實驗，並進行支撐結構系統的內力分析，重要發現包括以下：

1. 建築物屋頂太陽光電板模組風荷載主要受到安裝位置及光電板陣列排列方式影響，在多排太陽光電板陣列的受風作用以接近建築物邊緣的第一排最為強烈，後排的光電板受到前排的遮擋，其受風力減少甚多。在小風攻角條件下，兩排光電板之間距不超過前排光電板高度四倍時遮蔽效應可達百分之五十以上。
2. 以低層建築物而言，屋頂面上建築物高度十分之一的周邊區域，受到分離剪

陽光屋頂耐風評估與設計準則

力流或角隅渦漩影響，安裝於此區域的太陽光電板將受到強烈負風壓作用，有掀翻的潛在危機，對光電板結構安全最為不利。

3. 不同屋頂坡度的建築物屋頂上安裝太陽光電模組時，光電板所受的風荷載相比較可見在小攻角的情形下，隨屋頂坡度的增加，負風壓作用更為強烈，顯示屋頂坡度越位陡峭時，架設其上的太陽光電板陣列所受負風壓作用將更為嚴重。
4. 女兒牆的存在使得光電板所受風荷載大幅減輕，將光電板陣列進行退縮時，光電板的風荷載僅微幅上升。本研究採用的退縮距離達女兒牆高度的四倍時，光電板的風荷載仍受到女兒牆的遮蔽保護而無強烈風荷載。
5. 經比較太陽能支撐架結構系統改善前後之數值分析成果，可發現一般業界所採用之支撐架結構系統，桿件幾何佈置過於簡單（靜不定度過低），無法充分導引、疏通過於集中之力流。此種結構型式容易產生桿件內力過大與應力集中之不良影響。經本研究改善方案分析所得結果可知，透過桿件接合採用焊接方式及支撐光電板的斜梁多增加斜撐桿件，將載重直接導引至支承端後，可有效降低桿件內力，減少局部桿件應力負荷。

四、主要建議事項

【建議一】

屋頂太陽光電模組受風振動反應實場量測：立即可行建議

主辦機關：中華民國風工程學會

協辦機關：內政部建築研究所

陽光屋頂的政策對於節能及永續利用有指標性的意義，台灣地區日照充足，太陽光電發電甚具價值，但台灣地區亦有颱風等極端氣候作用，光電板破壞除可能有強風破壞外，受風振動亦是重要議題，長期的振動雖不一定是大振幅的激烈反應，但長時期小振動對於材料有疲勞的

影響，可能造成光電板破損以致在強風作用時發生嚴重毀損破壞，有必組織研究團隊針對光電板受風振動反應進行實場量測，累積觀察資料。同時由各不同觀察對象之結構系統中了解，光電板受風振動現象的差異，有助於陽光屋頂的政策推動。

【建議二】

建物整合太陽光電模組風荷載研究：立即可行建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：中華民國風工程學會

建物整合的太陽光電系統具有更佳的设计發揮空間，可融入建築物设计中成為空間構成或圍束的元素之一，因其造型的多變性，往往無規範可供參考，但以台灣地區颱風或強烈季風作用下，建物整合太陽光電系統的風荷載應加以檢討，以減少風損。因此有必要進行統整常見的建物整合手法，並歸納出其中的重要參數或幾何比例關係，利用風洞實驗界定其風荷載，供設計師了解合適的造型選擇，並有助於永續建築設計的理念推動。

【建議三】

特殊造型屋頂太陽光電模組之風荷載數據庫：長期性建議

主辦機關：內政部營建署

協辦機關：中華民國風工程學會

本研究中採用的建築物造型為矩形構型，實際建築物屋頂造型各異，其他如曲面屋頂、多邊形屋頂等條件下，對於安裝其上的太陽光電模組風荷載有何影響，光電板架設方式是否有需要進行調整，如單純以

陽光屋頂耐風評估與設計準則

本研究之個案成果尚不足以解答此一問題，建議將曲面屋頂、多邊形屋頂及其包含的高寬比、深寬比、安裝區位、風向等影響條件綜合考量，結合氣動力實驗與結構計算，建立更多造型屋頂上合適的太陽光電模組風荷載預估模式或數據資料庫，以利建築設計之用。

ABSTRACT

Keywords: wind loadings, solar panels, structural analysis, wind tunnel tests.

I. Background

The solar energy industry is an important roadmap that strongly encouraged by our government. According to this policy lot of management and encourage rules also be defined by official governmental agencies. Since most of the solar panels are install on the flat roof top of buildings, outside shells of buildings or the open areas. Those area are also the strong wind or extreme weather acting area. So the wind resistance capacity will be an important consideration in the design stage. In this project the aerodynamic tests of solar panels models and structural analysis with the data collected by tests are conducted to explore the wind loadings on solar panels, and the other purposes will be tried to find out the optimization design comments for the industries usage in solar energy system.

II. Research methods and processes

In this study the aerodynamic tests of models in wind tunnel are adopted to collect the necessary data for structural analysis. Also the information about wind loadings on the solar panel will be retrieved from the results of wind tunnel tests, this will be helpful to set up the design comments on raising the wind resistance capacities of solar panels support system.

III. Preliminary Conclusions

According to the results of this project, a series of aerodynamic tests have been adopted, the aerodynamic characteristics of solar panel mounted on the roof top of buildings in the array type arrangements are found. Also the stresses of support system of solar panel array are analysis by the Midas software to check the stress distribution among the structure. The following conclusions are made.

1. The arrangement of solar panel array on roof top is very important due to the wind effects on them. For the case of multi-rows solar panel array, the upstream panel can give some protection onto the downstream panel due to the sheltering effects. In this study the sheltering effects may exist for the spacing among

- panels up to four times of panel height.
2. For low-rise buildings, the vortex effects will be strong in the surround belt at roof top. If the solar panel arrays are arranged in the region, the wind effects would be serious. It will make the panel in an extreme wind loadings situation. Generally, the width of this belt will be one to tenth of the height of building.
 3. For the different slope of roof, the wind effects also varied. In this study we found that the panel mounted on the steep roof will suffered more wind loadings on them.
 4. The effects of parapet will reduce the wind loadings on the panels in their efficient range. Basically, the sheltering effects of parapet may exist for the downstream range among panels up to four times of parapet height.
 5. According to the structure analysis calculation with the time-history of wind loadings on panels we found the commercial solar panel support system is too simple. In this kind of structure the stress cannot be distributed to all members efficiently, so some of the members may bear most of wind loadings. We change the truss member into welded member and add more members to enhance the gird. And the result of analysis shown, that the stress distribution will be more uniform and the peak values are reduce for 50% at least.

IV. Recommendations

For immediate strategies:

1. Surveying the micro-vibration level of real solar panel arrays. Comparing the level of vibration with variant support structure system and make some conclusion about reducing vibration level. Put survey and structural analysis all together to identify the factors which affect the vibration level, this may give some help to push the solar roof policy.
2. The wind loadings on the building integrated photovoltage (BIPV) devices. Due to the BIPV design concept is one of the main development routes on solar energy application in architecture industry. The designer need some reference manual or chart to help them choose the adoptive solar panel

shapes on the building shells in the design stage to avoid the extreme weather acting. So it is important to survey the most used shape or geometric factors of the BIPV system in Taiwan, and some aerodynamic tests are needed to explore the wind loadings level on them. The results might give some key contributions to the push of sustainable building policies.

For long-term strategies:

1. Creating the prediction model or data-base to estimate the suitable micro-vibration responses by wind loadings on the solar panel arrays mounted on variant type buildings roofs. In this study on the typical rectangular type roof is adopted. For the other type like the dome or curve roofs, the solar panel wind loadings will be an interested topic. By the series study of wind loadings on solar panel arrays mounted on variant type roof, a suitable prediction model or data base may be constructed. This will give valuable information to the architectures in the design stage of solar panel arrays system.

第一章 緒 論

第一節 研究緣起與背景

一、研究緣起

台灣天然資源匱乏，所需石油、煤炭及天然氣等主要石化能源等幾乎都依賴進口，未來能源政策，應以經濟與環保並存為優先，減少對石化能源依賴，並發展潔淨的再生能源，加上最近日本東北大地震所造成福島核能電廠嚴重受創所引發的核災重大危機，更加速各國發展再生能源決心。目前開發的再生能源主要以太陽能、風力、水力、生質及地熱等天然資源作為發電來源，台灣位於亞熱帶，日照豐富且時間長，2007年亦已晉升全球第四大太陽能電池生產國，故以太陽能發電最具開發潛力。有關太陽光電發電系統於設計與裝置應考量之因素與重點值得研討。綠色環保建築是目前建築產業發展重要方向，亦是本所目前結合智慧化綠建築的研究課題，太陽光電發電亦常應用於綠建築再生能源的取得來源，目前太陽光電設施(photovoltaics, PV)常架設於建築物屋頂，經濟部能源局稱之為「陽光屋頂」，而該位置可增加日照時間增長發電功率，惟該處為建築物相對風力作用較大處，故本身及其與建築物連結之結構考量是相當重要。綠建築是本所重要推廣業務項目，而經濟部正推行陽光屋頂百萬座計畫，其計畫中規劃於2030年推廣太陽光電發電系統設置容量達到8,700MW，目標建立我國太陽光電設置應用完善環境，積極推動太陽光電發電系統，並以推動策略採「逐步擴大、先屋頂後地面」而言，對於國內太陽光電能源永續發展趨勢，陽光屋頂的設置勢必會越來越多，故太陽能光電固定於建築物屋頂結構強度考量評估方式於建築規範修訂中顯得相當重要。

臺灣位處亞熱帶地區，每年會有颱風來襲，且於冬季東北季風強勁，其強度是產品設計上重要參考指標。過去，太陽光電能源系統與熱水器裝置在臺灣相當普及，關於太陽能熱水系統的風荷載已有部分研究成果，而陽光屋頂規劃之太陽光電板與太陽能熱水系統光電板不同之處在於其數量更為龐大、採陣列式排列、

陽光屋頂耐風評估與設計準則

光電板形狀單一且幾乎無其他附屬設備(如熱水桶)。研究顯示，太陽能熱水系統之熱水桶因其鈍體形狀對降低整體結構風荷載是有助益的，而太陽光電板相對於此其受風作用將更為強烈，因此有必要探討其所受風荷載，提供相關數據業界參考，及廠商在最低風力影響安裝位置選定進行評估判斷。

以今年(104 年)的蘇迪勒颱風為例，彰化縣芳苑鄉一處養鴨場在屋頂設置 1500 坪的太陽能板「種電」，「試車」發電啟用才 2 週，就遭「蘇迪勒」颱風無情摧毀，4500 塊太陽能板扭曲變形，甚至遭吹往 100 公尺外，損失三千萬元。颱風來襲時，鹿港測站則測到 9 級風，每秒風速 20.9 公尺，大城測站測到 6 級風，每秒風速 13.8 公尺。104 年 8 月 8 日凌晨，高約 10 公尺、養育 2 萬多隻鴨的鐵皮養鴨場，不耐強風狂襲，屋頂總重 83 公噸的太陽能板全毀，支架散落滿地(33)。依建築物耐風設計規範規定彰化芳苑地區設計風速取用 27.5m/sec，仍高於當日觀測值。顯示對於建築物屋頂架設太陽光電板，如未針對危險位置、配置間隔、遮蔽、支架結合方式等諸多因素加以考量，強風作用下，極可能發生破壞。

二、研究背景

經濟部正推行陽光屋頂百萬座計畫規劃於 2030 年推廣太陽光電發電系統設置容量達到 8,700MW，目標建立我國太陽光電設置應用完善環境，積極推動太陽光電發電系統。推動策略採「逐步擴大、先屋頂後地面」，以穩健成長、負責任的態度來帶領國內太陽光電能源永續發展。依經濟部能源局推動「陽光屋頂百萬座」計畫，2012 年規劃設置目標為 100MW，2013 年原訂目標 130MW 因國內太陽光電安裝需求旺盛，設置目標上調至 175MW，2014 年設置目標提升至 210MW，以鼓勵屋頂型太陽光電系統為主，預定 2015 年完成 847MW，2020 年達到 2,120MW 的太陽光電發電系統設置，2030 年臺灣太陽光電發電設置容量目標 8,700MW，以建立國內設置實績，達成產業、環境等多重效益。其計畫中規劃於 2030 年推廣太陽光電發電系統設置容量達到 8,700MW，目標建立我國太陽光電設置應用完善環境，積極推動太陽光電發電系統，並以推動策略採「逐步擴大、先屋頂後地面」而言，對於國內太陽光電能源永續發展趨勢，陽光屋頂的設置勢必會越來越多，故太陽光電固定於建築物屋頂結構強度考量

評估方式於建築規範修訂中顯得相當重要。

「陽光屋頂百萬座」現階段政府以鼓勵屋頂型太陽光電系統為主，並以躉購費率及其他具體推動政策，配套措施如下：

- 1.簡化整體設置流程，放寬免競標資格
- 2.結合地方政府與鄉（鎮、市）、區公所合力推展
- 3.推動陽光社區設置

為加速再生能源開發、打造綠色能源經濟，經濟部能源局成立「陽光屋頂百萬座」推動專案辦公室，主要為整合相關資源，針對設置障礙提供專業協助，提供國內業者、縣市政府、承裝者完整解決方案，以加速推廣設置成效。推動之配套措施包含簡化整體設置流程，放寬免競標資格、結合地方政府與鄉（鎮、市）、區公所合力推展、推動陽光社區專案計畫等。

依據經濟部 2014「能源與產業政策白皮書」，2014 目前我國太陽光電產業已建構完整產業供應鏈，上中下游相關廠商數目家數逾 250 家，整體就業人數逾 2.2 萬人，2013 年總產值達新臺幣 1,572 億元，2013 年太陽電池生產量逾 7GWp，為全球第 2 大製造國。2012 年政府開始執行陽光屋頂百萬座政策，推動國內太陽光電普及化設置，並推動擴大海外市場行動計畫，協助國內廠商尋找市場，2013 年國內太陽電池製造廠商由虧轉盈，整體產值較 2012 年成長 18.9%。

太陽光電開發利用，是一項符合我國自然條件，同時又能配合我國產業基礎的再生能源應用項目，有利於我國達成二氧化碳減量目標，並增加自主能源的供應與穩定。未來透過「陽光屋頂百萬座」的推動，將提升國內市場需求，提供系統廠商建置太陽光電系統之實績與經驗，帶動我國產業發展新契機。

表 1-1 太陽光電系統設置之型式及特點

型式	特點
----	----

地面設置型 (Ground Mounted PV)	施工便利、受風壓低，缺點為土地取得不易。
屋頂型 (Roof Top PV)	可充分利用空間，裝置容量受限。
Building Integrated PV (BIPV) 及Construction Integrated PV (CIPV)	可整合建築物空間利用、結構安全性及建築美學之外觀功能設計。有效利用建築物的表面發電，兼具建築物的外表包覆建材之功能，以太陽電池模組來代替屋瓦、牆面、窗戶及採光設施之建材使用，可避免系統設置二次施工，造型美觀但發電效益較低、建置成本高。

資料來源：台電新能源開發處2009

太陽光發電系統之各種組成設備包括太陽電池模組(PV Module)構成之太陽電池陣列(PV Array)、直流接線箱(DC Junction Box)、直/交流電力轉換器(DC/AC Inverter，亦稱電力調節器)、交流配電盤(AC Power Panel)等。太陽光電系統依設置的方式一般可區分為地面設置型、屋頂型、BIPV 及 CIPV 等型式，其特點說明如表 1-1。

在台灣，太陽光電系統支撐架之設計需考慮的項目非常多，台灣係屬亞熱帶海島型氣候，因此在設計太陽光電板的支撐架時，對台灣腐蝕環境必需加一重視與了解(台電新能源開發處 2009)，台灣鹽害腐蝕嚴重區大多在西海岸，充滿氯離子；雨水酸鹼度值西岸較為嚴重；海岸區雨水較少，但山區為重；只有內陸情況較好；而台灣腐蝕環境概況分析如下：

- (1).台灣的腐蝕形態，深受海洋環境及濕度的影響，北部潮濕，腐蝕指標較南部為高。
- (2).台灣可居住環境的腐蝕指標皆在中度腐蝕以上，顯示全島因工業污染所造成的酸雨效果非常嚴重，尤其是西部平原。
- (3).腐蝕指標嚴重區域為觀音工業區及陽明山、台中港、麥寮及離島等地區。

(4).風砂大的地區有嚴重沖蝕的不利影響。

(5).台灣全島平地之平均溫度溫暖偏高。

目前陽光屋頂之太陽光電板常見架設方式包括平貼於屋頂面、作為建築物附屬雨庇或遮陽構造物及採剛性構架支撐架高於屋頂面等作法；其中平貼於屋頂面之太陽光電板受限於屋頂坡度與走向，但其所受風壓與屋頂表面披覆物可一體考量，如價高設置則亦應另行考慮其氣動力特性與風荷載。而作為建築物附屬雨庇或遮陽構造物時，則可引用規範中相關傾斜屋頂之規定進行其風荷載的評估；太陽光電板採剛性構架支撐架高於屋頂面時，可提供較具彈性的角度調整，由於架高的關係，氣動力行為較為複雜，其版面所受風荷載成為支撐結構設計的重要考量，包括結構桿件內力及節點結合強度需求等，本案將進行深入的探討。平貼於建築物外殼之光電板之風荷載受到版與建築物間距影響，亦可進一步探討。

第二節 研究內容與方法

本計畫將由氣動力實驗與結構分析等構面來探討風場對太陽能光電系統風載重的影響，涵蓋低層建築物模型氣動力實驗、結構分析軟體的計算檢討與耐風性能優化設計建議等，規劃之研究內容包括：

1. **國內外相關研究文獻與規範探討：**蒐集與彙整太陽能光電系統結構系統、設計標準與設計風載重相關之文獻，供評估模式建立及實驗品質管控，包括
 - (1) 目前已有安裝之案例分析，探討其分布方式、支架系統、幾何條件決定因素、安裝考量條件等。
 - (2) 多片式太陽能光電陣列排列原則，包括間距、角度、建物整合考量等。
 - (3) 國內外相關設計準則或規範資料蒐集。
 - (4) 光電板材料性能及支架系統材料性能資料蒐集。
 - (5) 國內太陽光電板受颱風破壞情形與結構性能檢討。
 - (6) 整理國內陽光屋頂類建築物所使用太陽能光電設施結構系統資料蒐集與檢討，並作為實驗設計之基礎。

2. 流場模擬：

- (1) 本研究將利用本所風洞實驗室現有大氣邊界層流場，初步選取地況 C 的流場條件，作為來流條件。
- (2) 流場量測將利用本所的二維熱膜探針(Hot film probe)配合移動機構加以量測，觀測記錄流場的剖面資料。
- (3) 模型安裝後，風洞實驗斷面的阻塞比控制於 8% 以下。

3. 建築物與太陽能光電設施之氣動力模型：

- (1) 本研究將結合業界實務案例製作屋頂面上不同排列方式的太陽光電板氣動力模型，進行風洞實驗。由於平貼於屋頂面或單獨以光電板作為屋頂、雨庇等構造者，可由相關設計規範以屋頂面表面風壓或傾斜屋頂板設計，因此太陽光電板以架高型式安裝於平屋頂為主要的對象，建築物模型以簡單矩形量體規劃，屋頂面積需可安裝三排以上太陽光電板，模型屋頂邊緣並設計可增設女兒牆。
- (2) 配合風洞實驗之大氣邊界層流場縮尺製作等比例的模型，太陽光電板模型將甚小，表面風壓孔將適度減量配合，但仍需以能表現不同區域的風壓差異變化為目標。
- (3) 氣動力模型以壓克力薄板加工製作，表面均布風壓孔，透過管線系統與電子式壓力量測系統連接，進行同步壓力量測。
- (4) 具備管線系統的氣動力模型可安裝於屋頂不同位置，其餘太陽光電板模型則共同排列，形成實際配置方式，利用變化安裝位置、排列數量、間距比等條件，探討所受之氣動力載重。
- (5) 氣動力模型安裝於風洞試驗段之旋轉平台，具備調整角度機構，模擬不同方向來流風場變化。

4. 氣動力實驗量測：藉由變化不同之來流條件，取具代表性之陽光屋頂建築物造型為典型建築物，並製作模型進行氣動力實驗量測，取得模型表面之風壓分佈資料進行相關數據分析，其計算分析方法包含：

- (1) 文獻探討與氣動力模型風洞實驗，彙整太陽光電板受風載重資料。
- (2) 不同屋頂形式，如女兒牆等設施，太陽光電板所受風壓與局部尖峰風壓資料計算。
- (3) 透過氣動力模型風洞實驗實際檢視減低太陽光電板風載重的安裝策略或增加小型配件以降低風載重的可能性。

- (4) 由實驗量測所得之建築物表面風壓資料首先將計算其表面風壓均值、擾動值、尖峰因子(peak factor)、擾動風壓頻譜(spectrum)、機率密度函數(PDF)的識別及頻率特性等，以完整掌握表面風壓分佈情形。氣動力係數定義如下所示：

$$\text{平均風壓係數 } C_p = \frac{\bar{P}}{\frac{1}{2}\rho U^2} \quad (1)$$

$$\text{擾動性風壓係數 } C_p' = \frac{\sqrt{\overline{P'^2}}}{\frac{1}{2}\rho U^2} \quad (2)$$

其中 \bar{P} 為風壓時序列資料的平均值， $\overline{P'}$ 為風壓時序列資料的擾動值， ρ 為空氣密度， U 為參考風速，參考壓力取用來流邊界層高度以上自由流之背景壓力，並於電子式壓力掃描系統中直接扣除。

- (5) 利用氣動力模型表面風壓，採有效貢獻面積加權積分方式，將瞬時載重分配至各連接之承結構系統的節點，供結構分析之用。
- (6) 氣動力模型實驗目的為取得各種不同安裝排列及位置條件下的板面風壓載重，支撐結構部分以結構分析軟體進行分析計算。

5. 太陽光電板支撐結構受風作用之內力分析：

- (1) 利用正交模態解析法分解擾動風壓場，探討太陽光電板主要風壓模態。
- (2) 利用研究案量測所得之光電板表面風壓資料，搭配本案蒐集所得之常用支撐結構系統布局，以結構分析軟體(Midas)進行結構分析計算，了解各桿件受風作用下之內力分布，作為與本案研究對象分析成果的對比。
- (3) 為配合結構分析軟體的分析計算與檢討，本研究將氣動力實驗所得之淨風壓時序列資料，透過貢獻面積加權積分的方式，計算太陽光電板支承點上的風載重時序列資料，搭配太陽光電板支撐結構設計，分析動態載重對於結構桿件內應力的影響。
- (4) 以結構安全的角度而言，內力不宜過度集中於少數的桿件，以提升材料使用效率，直接以靜載重的分析可觀察內力分布的基本狀況，但考慮紊流擾動影響，瞬間可能出現甚大的桿件內力，亦可能造成桿件挫曲或接頭的破壞，因此須採用氣動力實驗所獲得的風載重資料進行歷時分析，以觀察內力的變化過程。

- (5) 首先以常見的簡單剛性構架為支撐結構系統，定義為基本型式，檢討現行常用之結構桿件布局耐風性能。
- (6) 變化不同的外加斜撐桿件於框架之中，透過結構分析軟體了解對整體內力分配的影響。
- (7) 由於載中資料包括紊流場中版面渦流作用產生的氣動力擾動，透過時序資料的分析計算，可更精確的表現在受到極端氣候條件下，支撐結構系統所受的載重狀況，復經比較不同桿件布局對於結構系統內力分布之影響，將可有效的獲得較佳桿件布局策略。

6. 版面風壓模態的評估：

本研究將建立版面之風壓模式，在正交模態分析法以 R_{ij} 代表由風洞實驗模型表面風壓孔量測所得風壓時域訊號 $p_i(x, t)$ 的交相關張量(correlation tensor)，定義作：

$$R_{ij} = \overline{p_i(x, t)p_j(x', \tau)} \quad (3)$$

其中 x' 表空間間距， τ 代表時間稽延，如將 R_{ij} 分解成特徵值與特徵向量的組合，因此有

$$\int R_{ij}(x, x', t, \tau)\Phi_j(x', \tau)dx'd\tau = \lambda\Phi_i(x, t) \quad (4)$$

其中 λ 為相對應的特徵值， Φ 為特徵模態，因特徵模態為正交的，所以

$$R_{ij}(x, x', t, \tau) = \sum_n \lambda_n |\Phi_i^n(x, t)|^2 \quad (5)$$

本研究中對於時域風壓訊號均採用同步訊號，計算其交相關張量時並未考慮含有時間稽延條件下的變化，因此分析時 τ 為 0。

建物表面受風力與局部風壓資料間存在空間相關性影響，因此由表面風壓量測結果，配合空間相關性的考慮，界定結構系統之載重亦為重要的技術，有必要加以探討。

7. 推估架構式太陽光電板在典型屋頂形式及市面上常用的支撐結構系統下，所受風載重的等值靜載重資料：

- (1) 由本研究所獲得的版面風載重資料，配合結構分析軟體計算分析的綜合檢討，了解本研究中所採用陽光屋頂之光電板排列方式、支撐結構

設計方式等條件與受風載重的關係，建議支架承受風剪應力概略估算方式。

- (2) 透過結構分析與風壓分布的檢討，探討嵌入式與架構式太陽光電板在建物整合時，安裝方式與所受風載重的比較。
- (3) 風洞實驗所得之風載重條件，檢討市面上常用的支撐結構系統的優缺點，並做成改進建議。
- (4) 透過支撐結構系統的結構安全檢討，就進行建物整合時所需的條件或規劃設計原則進行歸納。

8. **提昇陽光屋頂結構系統耐風性能的設計策略：**

- (1) 本研究由結構受風荷載及結構反應檢討其耐風性能，嘗試做結構系統的調整，並重新進行受風作用下不同桿件布局內力的分析計算工作，可作為改進設計的參考
- (2) 本研究將比較現行法規與實驗分析結果的差異，以提升耐風性能的觀點，探討陽光屋頂結構系統桿件安排、光電板排列方式等設計建議，提出太陽光電板安裝位置考量準則於建築附屬建物相關規範增修建議。
- (3) 建立以包含光電板排列方式、角度、架高條件、屋頂坡度、風向角度等因素評估陽光屋頂所受風荷載之模式及設計建議。
- (4) 提出基於氣動力模型風洞實驗成果以減低風載重的安裝策略或增加小型配件降低風載重的建議，以減低國內太陽光電板受颱風破壞的經濟損失。

9. 以結構分析**軟體**進行結構分析計算，並推估其風致振動反應，分析計算之流程將可建立為類似案例計算之參考模式。

第三節 研究流程與進度規劃

本計畫依據計畫目標與實驗設備規劃執行之流程如圖 1-1 所示，進度規劃如表 1-2 所示。

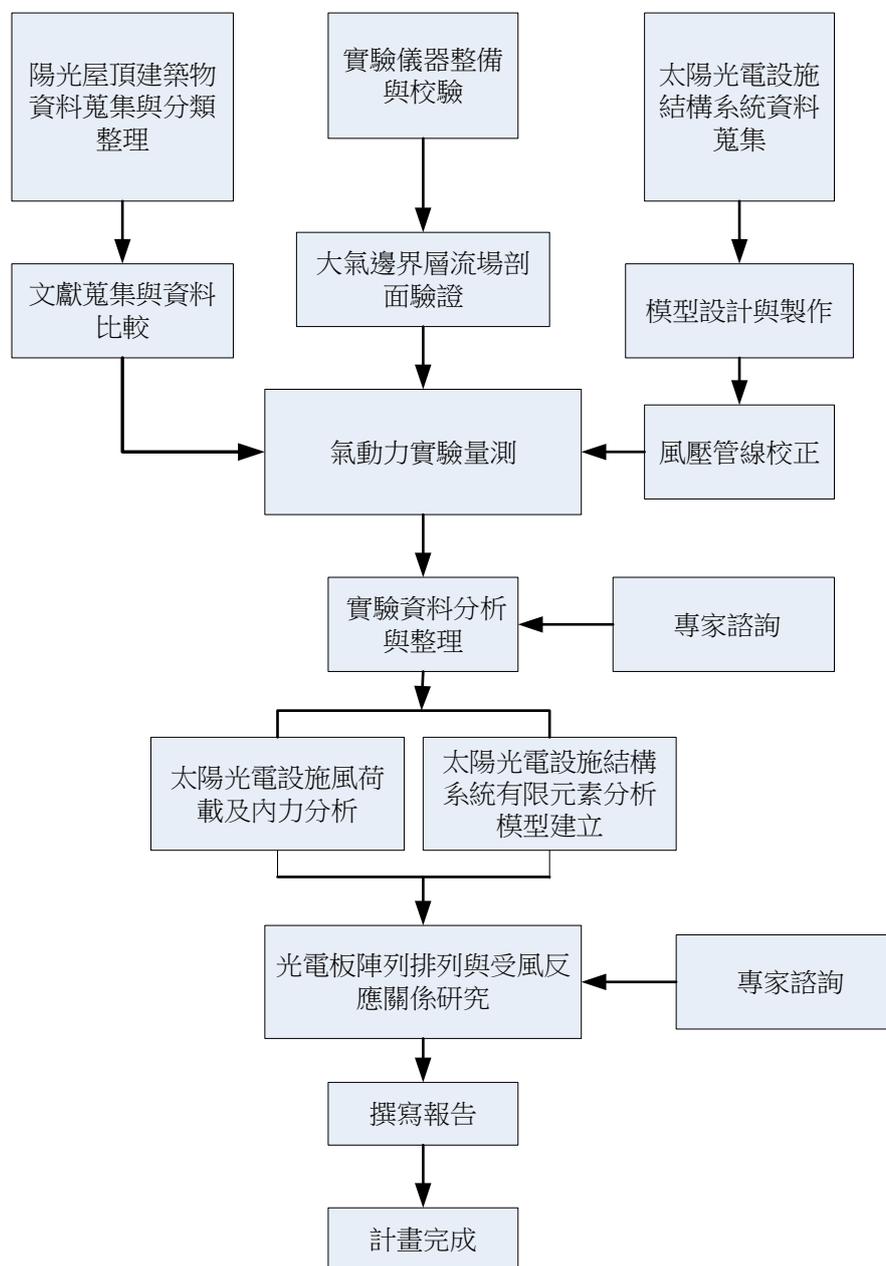


圖 1-1 計畫執行流程

資料來源：本研究繪製

表 1-2 研究進度規劃表

月 工作項目	第 1 月	第 2 月	第 3 月	第 4 月	第 5 月	第 6 月	第 7 月	第 8 月	第 9 月	第 10 月	第 11 月	備 註
結構資料蒐集	██████████											
文獻比較分析	██████████											
模型設計與製 作			██████████▼									▼：完成實驗驗證
儀器校正			██████████									
風洞實驗			██████████									
實驗資料分析				██████████								
期中報告						██████████▼						▼：完成期中報告
結構受風反應 分析					██████████							
結構設計檢討						██████████▼						▼：完成分析
專家座談		██████████				██████████				██████████		
期末報告										██████████		
預定進度 (累積數)	7%	13%	27%	37%	43%	57%	70%	83%	93%	99%	100%	
說明： 1 工作項目請視計畫性質及需要自行訂定，預定研究進度以粗線表示其起訖日期。 2 預定研究進度百分比一欄，係為配合追蹤考核作業所設計。請以每一小格粗組線為一分，統計求得本計畫之總分，再將各月份工作項目之累積得分(與之前各月加總)除以總分，即為各月份之預定進度。 3 科技計畫請註明查核點，作為每一季所預定完成工作項目之查核依據。												

第二章 文獻回顧

第一節 太陽光電板之氣動力特性

大型的太陽光電板陣列在國外有普遍的應用，其受到極端氣候侵襲時的耐受性能及相應設計考量，亦有許多學者進行研究。Aly(2013)研究架設於平地上之太陽光電板陣列氣動力特性，研究不同縮尺模型對於實驗精確度的影響，由於考慮風洞阻塞比，大氣邊界層流場採用部分模擬的作法，不同縮尺模型氣動力實驗結果顯示，以 Aly 實驗所用風洞斷面尺寸為 22m(長) x 2.4m(寬) x 1.55m(高)以 1 比 20 至 1 比 30 的模型較為合適，過小的模型對於壓力訊號的解析度不佳，且位於邊界層的近地底層亦與實況略有不符。同時 Aly 指出，模型縮尺主要影響的是擾動壓力與尖峰壓力，平均風壓係數對於模型縮尺較不敏感。

陳(2008)以大型懸挑屋蓋之體育場看台受風荷載研究，探討不同仰角與不同底部透空率對於懸挑屋蓋版的氣動力研究，由懸挑屋蓋版淨風壓的平均值、均方根擾動值及尖峰值等變化的趨勢觀察，氣動力作用較強烈的條件集中在風攻角為零度或接近零度的小攻角時，此條件下對於結構系統產生的風載重亦較大。陳(2012a)以單片太陽光電板縮尺模型架高安裝於不同坡度之雙斜屋頂建築物屋頂上，利用高紊流強度之均勻紊流場在小型風洞進行實驗量測其所受之整體昇阻力係數，研究結果顯示，斜屋頂的坡度會影響越過屋頂氣流的特性甚為明顯，因此不同坡度對於架設於其上的太陽光電板等附屬設施其受風力作用，影響甚鉅。陳(2012b)以單片太陽光電板縮尺模型架高安裝於平屋頂建築物模型屋頂上，利用地況 C 流場風洞實驗量測安裝於不同位置其所受之氣動力作用，探討太陽光電板表面風壓分佈受到不同安裝位置與不同水平風攻角的影響，風攻角 45 度附近，不論太陽光電板置放於屋頂前中後三個區域，均有較極端的出現，對於結構系統而言，屬較危險的配置。

陣列式太陽光電板數量為單排或多排，每排由多片太陽光電板連續排列。

如 Chung 等人(2008, 2011)研究單片太陽能熱水器集熱板氣動力特性，發現在版面上端產生迴流區以及兩側形成角渦流並產生三維交互作用。Miller and Zimmerman (1981)和 Franklin(1983)主要研究陣列式太陽光電板安裝於地面上之風載重，Tieleman 等人(1980)首先進行單排太陽光電板安裝於屋頂進行風洞試驗，Guerts and van Bentum (2006)進一步吹試多排陣列太陽光電板。前人研究分析太陽光電板表面壓力得知，太陽光電板安裝於屋頂時，由於建築物與太陽光電板外型以及太陽光電板安裝數量及排數皆會影響渦流產生機制，因此周圍氣動力特性與流場結構是非常複雜。Bienkiewicz 和 Sun(1992)指出，考量風向角效應時，角渦流易在建築物向風角落處產生，Kopp 等人(2012)指出在風向角 40 度~50 度為最危險風向角條件，進一步分析不同風向角條件下，太陽光電板上、下版面壓力分佈，由結果可得知太陽光電板安裝位置、片與片間距、前後排之間保留空間等設計細節有重大影響。Banks(2013)研究角隅渦流對架設於平屋頂面上太陽光電板陣列之尖峰風荷載研究指出，角隅渦流對於整體昇力有明顯的影響，而陣列排列方向如與角隅渦流迴捲方向近似或排列位置位於再接觸區域，均對尖峰風荷載產生明顯的改變。Pratt and Kopp (2013)研究平屋頂面上架設太陽光電板陣列後風速剖面的影響指出，屋頂面上設置太陽光電板陣列後，屋頂表面雷諾應力有下降的趨勢，而影響太陽光電板上整體昇力峰值的重要因素為建築物分離剪力流與其再接觸現象的綜合表現。

第二節 相關規範及管理辦法

依據「再生能源發展條例」第三條，明訂「再生能源：指太陽能、生質能、地熱能、海洋能、風力、非抽蓄式水力、國內一般廢棄物與一般事業廢棄物等直接利用或經處理所產生之能源，或其他經中央主管機關認定可永續利用之能源」，且「經中央主管機關認定之再生能源發電設備，應適用本條例有關併聯、躉購之規定」，太陽光電產生的電能受到再生能源法規的規約與鼓勵。

太陽光電板如安裝於建築物屋頂為求得足夠的發電容量，其量體通常要較太陽能熱水系統為大，而太陽光電板的氣動力行為較為接近斜平版的氣動力行為，應用於建築設計中近似開放式建築物的單斜屋頂版；ASCE7-10 規範對於

開放式建築物單斜平板屋頂版的主抗風結系統設計所使用的設計風力採用淨風壓(Net pressures)的概念加以表達。淨風壓係數表達的是上表面風壓係數與下表面風壓係數相減的共同作用結果，亦隱含對於相關性的考量於其中。

我國建築物耐風設計規範及解說(2015 版)對於開放式建築物單斜屋頂亦以淨風壓觀念定義其所受之風力係數，由於架高式太陽光電板的受風作用形式通常較接近此種類型，建議可參考規範定義計算其風荷載。

國內推行陽光屋頂政策，針對陽光屋頂等設施有相關法規加以規範，依據「國內陽光屋頂管理條例」定義太陽光電發電設備包括增設太陽能發電系統所需之光電板(含太陽電池及固定腳架)、蓄電池、電力調解器、配電(線)箱體及其他管線容器等設備。

太陽光電發電設備依內政部營建署 92 年 4 月 22 日台內營字第 0920085758 號及 96 年 11 月 6 日營署建管字第 0962918506 號函規定如下：

架設於建築物之屋頂：a. 高度超過一點五公尺者：應申請雜項執照。b. 高度一點五公尺以下者：免辦申請許可，但有關結構安全部份應由依法登記開業之建築師或土木技師或結構技師簽證負責，並函送該管直轄市、縣(市)政府備查。

架設於建築物之空地：應申請雜項執照。

架設於建築物之外牆：應依建築相關法規檢討。

營建署制定「設置再生能源設施免請領雜項執照標準」(2014)規定免申請雜項執照的條件如下：

第四條 設置於建築物屋頂之太陽能熱水系統產品，其高度為二公尺以下者，得免依建築法規定申請雜項執照。

第五條 設置太陽光電發電設備，符合下列條件之一者，得免依建築法規定申請雜項執照：

陽光屋頂耐風評估與設計準則

- 一、設置於建築物屋頂或露臺，其高度自屋頂面或露臺面起算三公尺以下。
- 二、設置於屋頂突出物，其高度自屋頂突出物面起算一點五公尺以下。
- 三、設置於非都市土地使用管制規則所定之再生能源發電設施容許使用項目及許可使用細目之用地，其設置面積未超過六百六十平方公尺，並符合該管制規則有關建蔽率及容積率之規定，其高度為三公尺以下。

太陽光電發電設備設置於屋頂、露臺或屋頂突出物，不得超出該設置區域。

在地方縣市政府方面，各地方縣市政府響應再生能源開發及陽光屋頂等政策，多亦訂定管理及鼓勵辦法。以高雄市為例，依據高雄市綠建築自治條例中之規定各類建築物分類共計有五類，其中第一至第四類建築物分屬不同類型的新建建築物，第五類建築物則為領有使用執照之既有建築物。依該自治條例規定第一至第四類建築物均要求「建築物屋頂應設置隔熱層及太陽光電發電設施或屋頂綠化設施」。其中對第一、二、四類建築物以裝置容量為要求依據，第三類建築物工廠類之新建建築物則以設施之設置面積為要求依據。所謂太陽光電發電設施設置面積，指太陽光電發電設施之投影面積；所稱屋頂層可設置太陽光電發電設施面積，指屋頂層總面積扣除屋頂突出物、雜項工作物、屋頂綠化設施及屋頂透空框架投影等面積後所占之面積。

摘錄「高雄市建築物設置太陽光電設施辦法」中相關條文如下：

- 第三條 本辦法所稱太陽光電設施，指設置於建築物屋頂、屋頂突出物、露臺及外牆面之太陽光電板、支架（含欄杆）、維修設施及轉換太陽光能為電能之必要設施。
- 第四條 太陽光電設施應依建築法規定申請雜項執照，於領得雜項執照後，應依再生能源發電設備設置管理辦法申請同意備案。但符合設置再生能源設施免請領雜項執照標準規定者，得免請領雜項執照。
- 第五條 太陽光電設施設置於建築物屋頂及屋頂突出物，符合下列各款情形者，得免計入屋頂突出物面積及建築物高度：
 - 一、從屋頂面起算高度在四點五公尺以下或從屋頂突出物面起算高度在

三公尺以下。

二、太陽光電板水平投影面積占太陽光電設施水平投影面積百分之七十以上。

第六條 太陽光電設施設置於建築物露臺，符合下列各款情形者，得免計入樓地板面積：

一、從露臺起算高度在三點六公尺以下。

二、太陽光電板水平投影面積占太陽光電設施水平投影面積百分之七十以上。

關於太陽光電模組的力學性能，依據國際電工委員會(International Electro-technical Commission, IEC)定義之 IEC 62782 Ed. 1.0-Dynamic mechanical load testing for photovoltaic (PV) modules，規定太陽光電模組相關力學強度測試方式與內容，我國經濟部能源局於工研院量測中心成立「太陽光電國際驗證實驗室」，目前已最新完成「動態機械負荷測試系統」，可模擬強烈颱風對太陽光電模組之動態風壓影響，且已取得全國認證基金會(TAF)認證，提供國內廠商測試服務。

「動態機械負荷測試系統」可實際模擬重壓力與風壓對太陽光電模組造成的影響，提供最大壓力 7000 Pa~10,000 Pa 之動態環境擬真風壓測試，評估其在強風振動與積雪重壓情況下之可靠度，此測試範圍遠高於國際電工委員會(IEC)62782 標準草案最大正負壓力 1000 Pa 之測試要求。此系統亦可融合國內建材規範，透過壓力與時間的程式設計來進行動態模擬測試，協助判斷建築整合型太陽光電模組(BIPV)產品是否符合抗風壓標準，確保其可靠度。

有關太陽光電板裝置角度與方位，由於台灣位於北回歸線上，北回歸線緯度為北緯 23.5 度。太陽由東方升起後，行進軌跡會在台灣南方，所以架設太陽光電板時，將板面朝南可獲得較高效益，尤以板面仰角設定在向南 19~23.5 度可獲得最大日照效益。裝置時亦需考量太陽光電板仰角與間隔等問題，惟若區域寬廣，直射輻射與漫射輻射的比率增加，將會使傾斜角與方位等影響因素減

少。依研究統計台灣地區 1990 ~1999 年的日射及氣溫平均資料，在日射方面，近十年平均日射量以台東地區最高，達 4.26 kW/m²-day，而最低的台北地區僅 2.61 kW/m²-day，相差 1.63 倍。一般而言，台灣地區日射量由北至南遞增。在氣溫方面，各地區日平均氣溫均以七月份最高，介於 28.8°C ~30.2°C 之間，差距並不大；以一月份為最低，介於 16.3°C ~21.4°C 之間。當日射量大時，其發電量（電壓×電流）越大，在日射量低時，除發電量降低外太陽電池模組發電轉換效率亦遞減。故以目前台灣的日射量，仍以台灣東南部裝置太陽光電發電系統投資報酬較佳(陳彥均 2011)。

在架設太陽光電板陣列的方式方面，依據行政院公共工程委會「太陽光電發電設施應用於公共建設參考手冊」(2011)建議，如架設於地面上可考慮設置維護車道於模組陣列間，其寬度建議為 3 公尺，如不設置維護車道則模組陣列間距與陣列傾斜角度、無遮陰時段的考量有關，且主要受當地緯度、太陽位置影響。其他如架設於屋頂部位仍建議採用前後排方式設置，模組陣列之陰影長度即為最小之模組陣列間距。有關陣列陰影長度之計算如利用電腦軟體模擬，尚可加計周邊建物或地物之影響，考慮較為周全。單純考慮模組陣列產生的陰影長度可利用下列公式計算：

$$\text{陣列高度 } H = L \times \sin(\beta) + t \times \cos(\beta) \quad (6)$$

$$\text{陰影長度 } L_s = (H / \tan(\delta_s)) \times \cos(\alpha_s - \phi) \quad (7)$$

其中 β 為陣列傾斜角度， δ_s 為太陽高度角， L 為模組斜面長度， H 為陣列高度， α_s 為太陽方位角(正南為 0 度、向東為正、向西為負)， t 為模組厚度，如模組陣列非面向正南設置，則模組設置方位與正南方之夾角為 ϕ (正南為 0 度、向東為正、向西為負)。因此知道設置地點任意日期、任意時間的太陽高度角與方位角即可計算當時的陣列陰影長度。

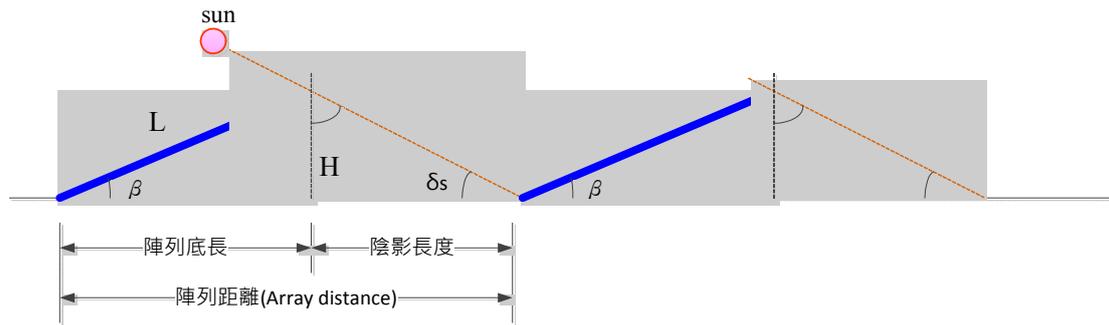


圖 2-1 陣列陰影長度之計算圖例

資料來源：本研究整理

太陽光電板模組架設方式及具多樣性，近年發展與建物整合(BIPV)的設置方式。BIPV 係以建築設計手法將具有建材功能之太陽光電板與建築物結合，使系統元件不單只有發電功能，也是建築外殼的一部分，更可進而替代既有建材，降低初置之相關成本，若結合遮陽處理、採光照明等設計手法，亦可增加建築節能之效益(陳彥均 2011)。本計畫討論以太陽光電板受風作用特性為主，因此以傳統陣列式架設於屋頂的太陽光電板受作用為對象。

第三章 太陽光電板氣動力特性實驗

第一節 流場規劃

本研究利用內政部建築研究所台南風洞實驗室進行建築物氣動力模型實驗研究，風洞設施為一封閉式的循環風洞，具有兩種測試斷面(第一測試區 $4\text{ m} \times 2.6\text{ m}$ 、第二測試區 $6\text{ m} \times 2.6\text{ m}$)，本研究利用內政部建築研究所台南風洞實驗室進行實驗，採用第一試驗段進行，試驗段長 26.5 m ，風洞可提供最大風速為 25 m/s 。氣動力模型置於試驗段旋轉台的中央，可用數控旋轉台旋轉模型，表現不同風向角的效果。

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)，以產生近似鄉村地形之大氣邊界層來流。本研究以 C 地況流場為來流條件，配合邊界層元件所產生平均流速剖面指數律分佈之 α 值為 0.16 ，而在距地 10 cm 處之紊流強度 (turbulence intensity) 約為 12% ，流場之平均風速剖面及紊流強度如圖 3-1 所示。邊界層特徵之除以平均風速剖面指數律公式之指數加以辨識，邊界層厚度的縮尺 $1:200$ 亦為設計模型及地形所需的技和縮尺條件。

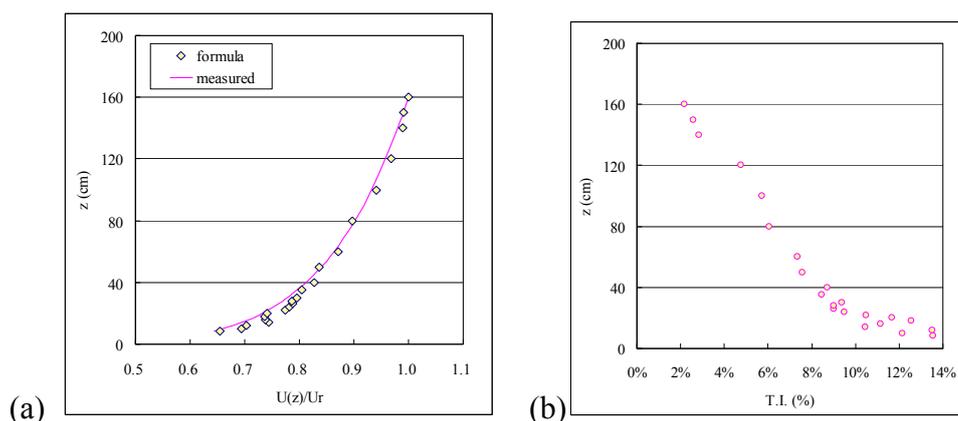


圖 3-1 流場特性之垂直分佈，(a)平均風速剖面，(b)紊流強度剖面

資料來源：本研究整理

第二節 實驗量測與模型規劃

本計畫研究重點為太陽光電板風載重，利用模型安裝於風洞測試段探討不同風向角因起的表面風壓變化。採用剛性(rigid)構造物模型設計，變化不同幾何形狀的模型與風向角，氣動力實驗研究成果並與文獻資料相驗證。規劃進行的建築模型設計包括不同高寬比的建築物三組。

氣動力實驗設置與內容規劃包括：

1. 建築物屋頂太陽光電板模型系列實驗：採用不同排列方式的太陽光電板。
2. 流場規劃：氣動力實驗所用之流場採用本所台南歸仁風雨風洞實驗室現有之鄉村地況大氣邊界層流場，以模擬之邊界層厚度及規範中地況 C 之邊界層厚度比例為實驗之幾何縮尺，取用 1/200。
3. 氣動力模型設計：氣動力模型包括建築物與太陽光電板兩部分，建築物模型以 5mm 厚之壓克力板黏合，模型尺寸為寬 60cm、高 20cm、深 40cm，建築物模型表面未設風壓孔。太陽光電板模型利用 3mm 壓克力板製作，模型尺寸為 30 cm x2cm，版之兩面相對應位置均佈設壓力孔，搭配壓力管線系統，量測風壓變化。

屋頂面上一半面積為開放開口，各太陽光電板模型可鋪排在屋頂面上，為表現間距比的變化則採用不同尺寸的壓克力板條穿插其間，可變化不同的太陽光電板間距，本研究在太陽光電板間距變化方面包括 0、2cm、4cm 及 6cm 等，在太陽光電板數量方面包括有 1、2、3 排等變化。

模型安置於風洞試驗段之中央圓盤，該圓盤可利用馬達驅動改變模型面對來流的座向，模擬不同風攻角的影響。



圖 3-2 氣動力模型

資料來源：本研究拍攝

4. 實驗控制參數：氣動力實驗研究主要探討不同風向角及太陽光電板排列方式對板面風壓影響，因此實驗參數控制以風向角及排列數量、排列間距、排列方向等為主。

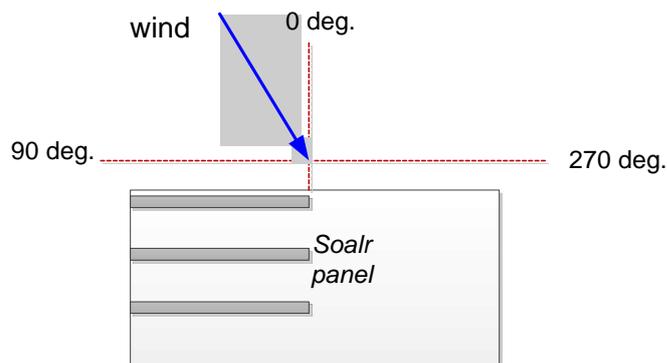


圖 3-3 模型風攻角定義

資料來源：本研究繪製

5. 由實驗量測所得之板面風壓資料首先將計算其表面風壓均值、擾動值等，以完整掌握表面風壓分佈情形。氣動力係數定義如下所示：

$$\text{平均風壓係數 } C_p = \frac{\bar{P}}{\frac{1}{2}\rho U^2} \quad (8)$$

$$\text{擾動性風壓係數 } C'_p = \frac{\sqrt{P'^2}}{\frac{1}{2}\rho U^2} \quad (9)$$

其中 P 為風壓時序列資料， \bar{p} 為平均壓力， $\sqrt{p'^2}$ 為擾動性風壓的均方根值， ρ 為空氣密度， U 為平均風速。

6. 淨風壓係數定義

考慮太陽光電板受風作用來自板的兩面風壓差，因此實驗成果分析將迎風面的風壓與背風面的風壓，所得時間序列資料中作相減的運算，由於模型設計時即已考慮到淨風壓計算的需求，版面布的風壓孔位置在兩面均相同，因此可計算得各風壓孔位的淨風壓係數。

$$\text{淨風壓係數 } C_{Pn}(t) = C_{Pup}(t) - C_{Plower}(t) \quad (10)$$

其中 C_{Pup} 為零攻角時迎風面風壓係數， C_{Plower} 為零攻角時背風面風壓係數，採時序列資料作及時相減運算，後續可計算淨風壓係數之平均值與擾動值。淨風壓係數表達的是板所受到的風荷載，以指向版面向為壓力的正，因此如果迎風面與背風面均同受相同的正壓力，則其整體淨風壓將為零，如果迎風面受到指向離版面的壓力，亦即為負壓力，而此同時背風面如受到指向版面的正風壓，兩者聯合作用以(3)式計算之，則得甚低的負值，對於太陽光電板而言，代表掀翻板面的作用力，不利於結構安全。

為比較不同來流條件下的太陽光電板風荷載，將採用面積分計算方式，將板面上各風壓孔之瞬時淨風壓係數以其代表的貢獻面積為權重加權計算太陽光電板整體所受淨風壓係數。

$$C_{Pnet} = (\sum C_{P_n} \times A_i) / A_{total} \quad (11)$$

其中 A_i 為各風壓孔的貢獻面積， A_{total} 為該片光電板的總面積。

7. 氣動力模型製作

本研究建築物氣動力模型利用壓克力板製作，各光電板氣動力模型之上下版面各均布風壓孔 30 個，因此一片光電板氣動力模型布設有 60 個風壓孔，風壓孔以細管線製作之壓力傳感管線系統(tubing system)與量測儀器相接，管線材質為 PVC 因此具備良好的可撓性，不致影響風壓信號傳送，模型實驗控制風壓孔數量在 200 個以下，利用本所實驗室現有的電子式壓力掃描器量測模型屋頂上下面同步的風壓資料。氣動力模型實驗量測時，透過旋轉工作平台，表現不同風向角對模型風壓變化之效果。



圖 3-4 電子式壓力掃描模組

資料來源：本研究拍攝



圖 3-5 壓力訊號處理系統

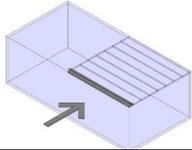
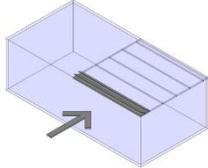
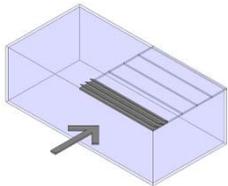
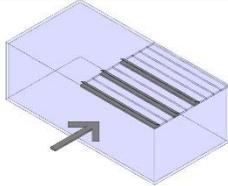
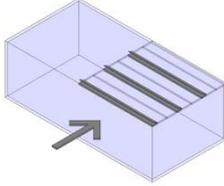
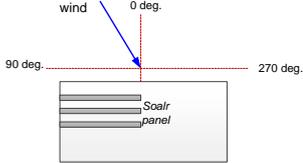
資料來源：本研究拍攝

壓力量測管線系統為內徑 1mm、長度 25cm 的管線，實驗前經具白噪音(white noise)特性之擾動壓力信號進行率定，驗證無扭曲頻率可達 35Hz 以上。管線系統連接至電子式壓力掃描模組上的壓力輸入埠，電子式壓力掃描器以 64 個量測孔為一模組，壓力量測模組安置於模型內部，模型規劃以鄰近 64 個孔位規劃為同一壓力模組，分別接入電子式壓力掃描器。表面風壓量測使用之壓力掃描器(ZOC33/64 PX 如圖 3-4)，該系統每個單一模組有 64 個壓力輸入管(pneumatic inputs)，對應 64 個壓電式壓力感應器，每一壓力感應器皆可單獨校正。藉由管線連接至模型量測點以量測壓力。各模組接連接至壓力訊號處理系統(RAD BASE 3200 如圖 3-5)，此系統可支援類比數位之轉換，最高可支援 8 個模組，其解析度達 16bits，最大採樣頻率為 500Hz，傳輸介面為 USB，具備網路控制及傳輸功能。本研究之採樣頻率為 256Hz，每次實驗採樣 120 秒，擷取之資料轉換完成之後藉由此系統傳至個人電腦供儲存及分析之用。

8. 氣動力模型實驗方案

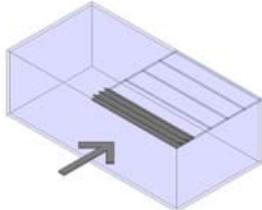
氣動力實驗以探討各種不同太陽光電板排列方式產生的風荷載為主，因此本研究規劃的實驗太陽光電板不同數量及排列方式如表 3-1 所示。採用的建築物模型有平屋頂及雙斜屋頂兩類，建築物模型長寬高均相同但變化屋頂坡度，如表 3-2 所式。本研究中共進行的實驗項目，如表 3-3 所式。

表 3-1 太陽光電板陣列排列方式

編號	配置說明	示意圖	備註
1	單片太陽光電板		
2	兩片太陽光電板		前後太陽光電板均緊密排列無間隙。
3	三片太陽光電板		前後太陽光電板均緊密排列無間隙。
4	三片太陽光電板 變化前後間距		間距變化包括 0~3 倍板寬。
5	七片太陽光電板 前後緊密排列		實驗記錄第一、四、七片太陽光電板資料。
6	三片太陽光電板 變化前後間距及 與屋頂前緣距離		間距變化包括 0~2 倍板寬

資料來源：本研究整理

表 3-2 建築物屋頂型式

屋頂型式	屋頂坡度	示意圖
平屋頂	0	
雙斜屋頂	1:8	
雙斜屋頂	1:4	
雙斜屋頂	1:2	

資料來源：本研究整理

表 3-3 實驗項目統整表

屋頂型式	屋頂坡度	片數變化	變化片與片之間距	變化與屋頂前緣距離	女兒牆	備註
平屋頂	0	◎	◎	◎	◎	
雙斜屋頂	1:8		◎	◎		
雙斜屋頂	1:4		◎	◎		
雙斜屋頂	1:2		◎	◎		

◎表有進行測試

資料來源：本研究整理

第四章 研究成果與檢討

第一節 太陽光電板風載重

太陽光電板在不同配置條件下的氣動力行為，本研究採用板所受的整體淨風壓係數為代表，分別探討其平均值與擾動值的變化，據以觀察包括排列間距、風攻角、排列位置等因素的影響。

一、不同排數太陽光電板的影響

以平屋頂建築物氣動力模型採用 1~3 排的光電板依序排列方式，分別進行氣動力實驗，由實驗量測結果計算光電板上所受整體平均淨風壓係數與擾動性淨風壓係數隨風攻角的變化分別如圖 4-1 及圖 4-2 所示。

由圖 4-1(a)可見單排光電板的情形下，光電板位於建築物來流零攻角時的最前緣，本研究以較高端朝向來流，因此光電板受風作用明顯，隨風攻角的增加，平均淨風壓係數負值越低，表示此時光電板受到較大的掀翻板面的外力作用，隨風攻角增加至 90 度時，風向與光電板平行，風壓係數接近零。風攻角大於 90 度後，光電板逐漸改為以較低端面向來流來流直接作用於光電板，正向風壓產生正壓力係數，背風面處於低速迴流區，亦接近正壓狀態，因此整體平均淨風壓係數為正或接近零。風攻角大於 180 度之後，光電板處於建築物屋頂之下游區，缺乏直接作用的來流，因此淨風壓係數均在零附近。單排的光電板其受風作用明顯，較易觀察到風攻角變化及相映光電板位於屋頂流場位置的影響。由圖 4-1(b)可見 2 排光電板的情形下，風攻角為零時，前排所受平均淨風壓係數與單排相同，後排光電板平均淨風壓係數則接近 0，受到前排遮蔽作用非常明顯，後排幾乎不受風荷載。風攻角增加時後排平均淨風壓係數有略低的負值，而風攻角大於 90 度之後，後排逐漸成為上游區，因此風荷載上升，但此時光電板低端面向來流，淨風壓值為正。風攻角大於 180 度之後，均處於下游區因此平均淨風壓係數大致接近 0 值，風攻角到 300 度之後，前排光電板接近上游區，平均淨風壓係數有略低的負值。3 排光電板的情形下由圖 4-1(c)可見，風攻角為零時，前排所受平均淨風壓係數與單排相同，後排光電板平均淨風壓係數則接

近 0，受到前排遮蔽作用非常明顯，後排幾乎不受風荷載。風攻角的增加亦未造成後 2 排光電板不利結構安全的負風壓作用。

由圖 4-2(a)可見單排光電板的情形下，光電板位於建築物來流零攻角時的最前緣，隨風攻角增加擾動性淨風壓係數在風攻角 45 度附近達到最高，建築物屋頂角隅渦流作用甚為明顯，風攻角 45 度附近容易產生較大的渦流作用，而單排光電板情形下，靠近角隅側的光電板受到強烈渦流影響，但靠近屋頂中央區則相對較低，因此光電板整體擾動風壓係數偏高。比較圖 4-2(b)與圖 4-2(c)可見隨光電板數量的增加，擾動性淨風壓係數漸趨減少，2 排光電板時在風攻角 45 度附近仍出現最高的擾動性淨風壓係數，但 3 排光電板時個不同風攻角的擾動性淨風壓係數均偏低。

顯示多排的光電板在不同風攻角作用下，甚易形成遮蔽的效果，因此不論是平均值或擾動值均有減緩風荷載的作用；而首排的光電板在風攻角 0 度附近時，受到來流直接的作用，特別是光電板高端朝向來流時，光電板有被掀翻的潛在不利情形。

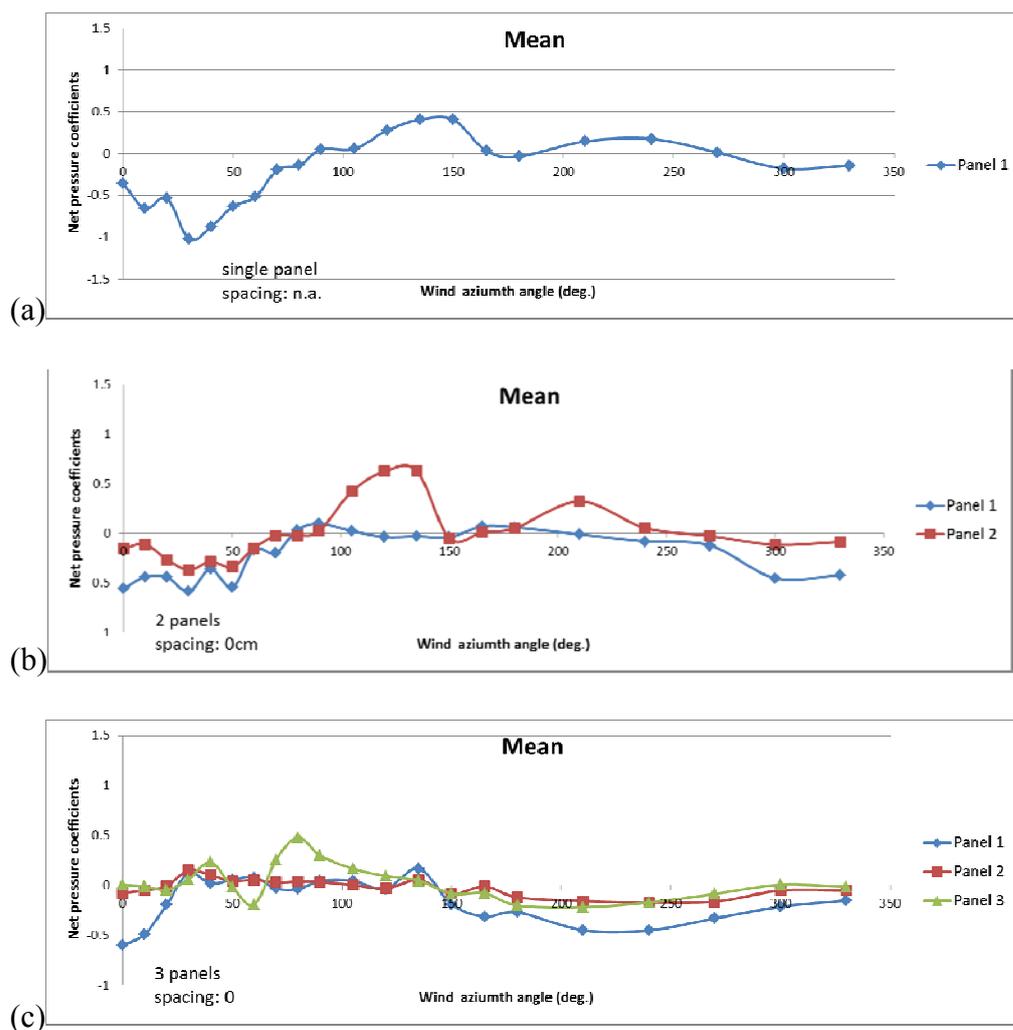


圖 4-1 平屋頂建築物，太陽光電板上所受整體平均淨風壓係數隨風攻角變化，(a)單排，(b)2 排，(c)3 排。

資料來源：本研究整理

陽光屋頂耐風評估與設計準則

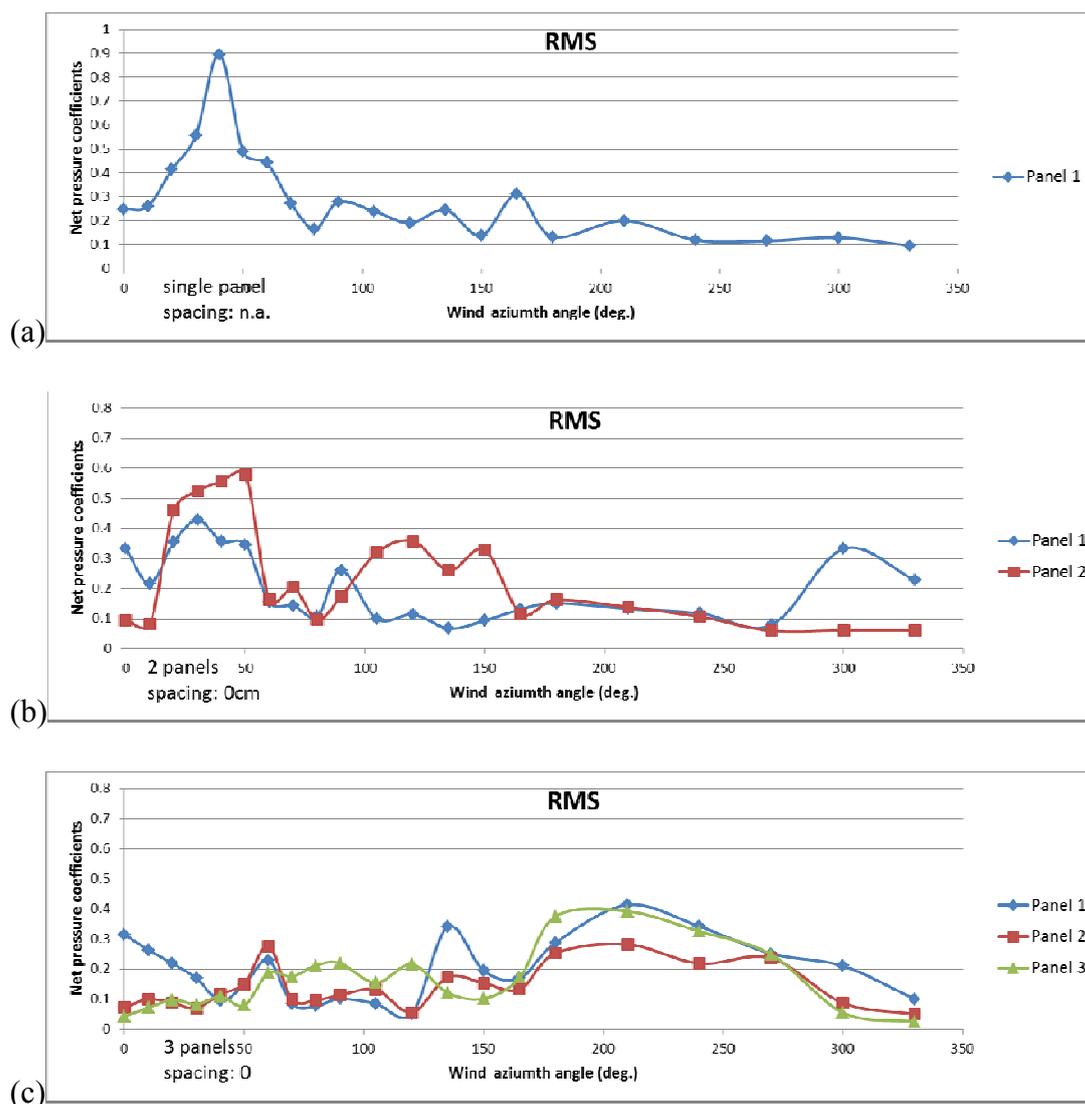


圖 4-2 平屋頂建築物，太陽光電板上所受整體擾動性淨風壓係數隨風攻角變化，(a)單排，(b)2排，(c)3排。

資料來源：本研究整理

二、不同間距的影響

由前文可知前後排的緊密排列常有助於減緩風荷載，本研究將氣動力模型採用三排的太陽光電板依序排列方式，以平屋頂建築模型，分別進行在不同條件下的氣動力實驗，由實驗量測結果計算光電板上所受整體平均淨風壓係數與擾動性淨風壓係數隨風攻角的變化分別如圖 4-3 及圖 4-4 所示，間距的變化是以光電板高為單位，本研究氣動力模型板高為 2cm，因此以 2cm 為單位做排與排之間距離的調整。

圖 4-3(a)為 3 排無間距緊密排列，直接取用前次實驗成果，圖 4-3(b)為排間距 1 單位排列，可見基本上第一排光電板的平均淨風壓係數變化改變不多，第二、三排光電板則係數值正負變化幅度增加，此變化趨勢隨間距的增加而加劇，如圖 4-3(d)所示，在小風攻角時，三排光電的平均淨風壓係數變化均相似，仍以第一排光電板的負風壓係數最低，隨風攻角的增加各自變化略有不同，而風攻角大於 180 度後，第三排光電板的風壓係數負值更低，負風壓作用較為強烈。

圖 4-4 為 3 排光電板的擾動性淨風壓係數變化，類似的變化是，間距的增加第二、三排光電板係數值變化趨勢隨間距的增加近似第一排的變化情形。第一排光電板的擾動性淨風壓係數在風攻角 45 度附近達到最大，特別是間距的增加，使得在此風攻角作用下的第一排光電板擾動性淨風壓係數達到最高，與前段文中對於單排光電板擾動性淨風壓係數變化趨勢及量級一致。第二、三排光電板係數值變化趨勢隨間距的增加，在風攻角 45 度的附近，亦見出現最大擾動值的情形。

陽光屋頂耐風評估與設計準則

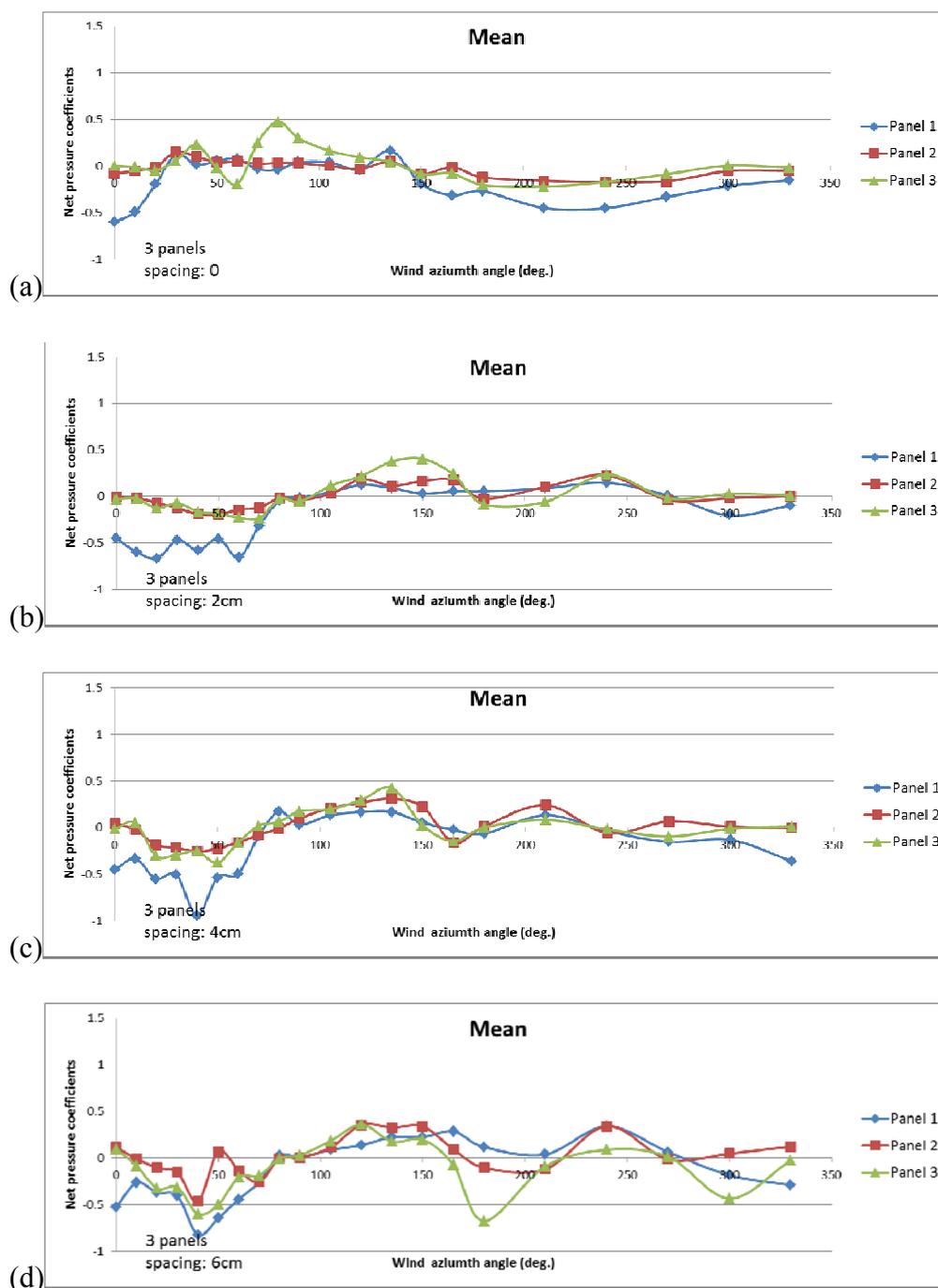


圖 4-3 平屋頂建築物，各排太陽光電板上所受整體平均淨風壓係數隨風攻角變化，(a)無間距，(b)1 單位間距，(c)2 單位間距，(d)3 單位間距。

資料來源：本研究整理

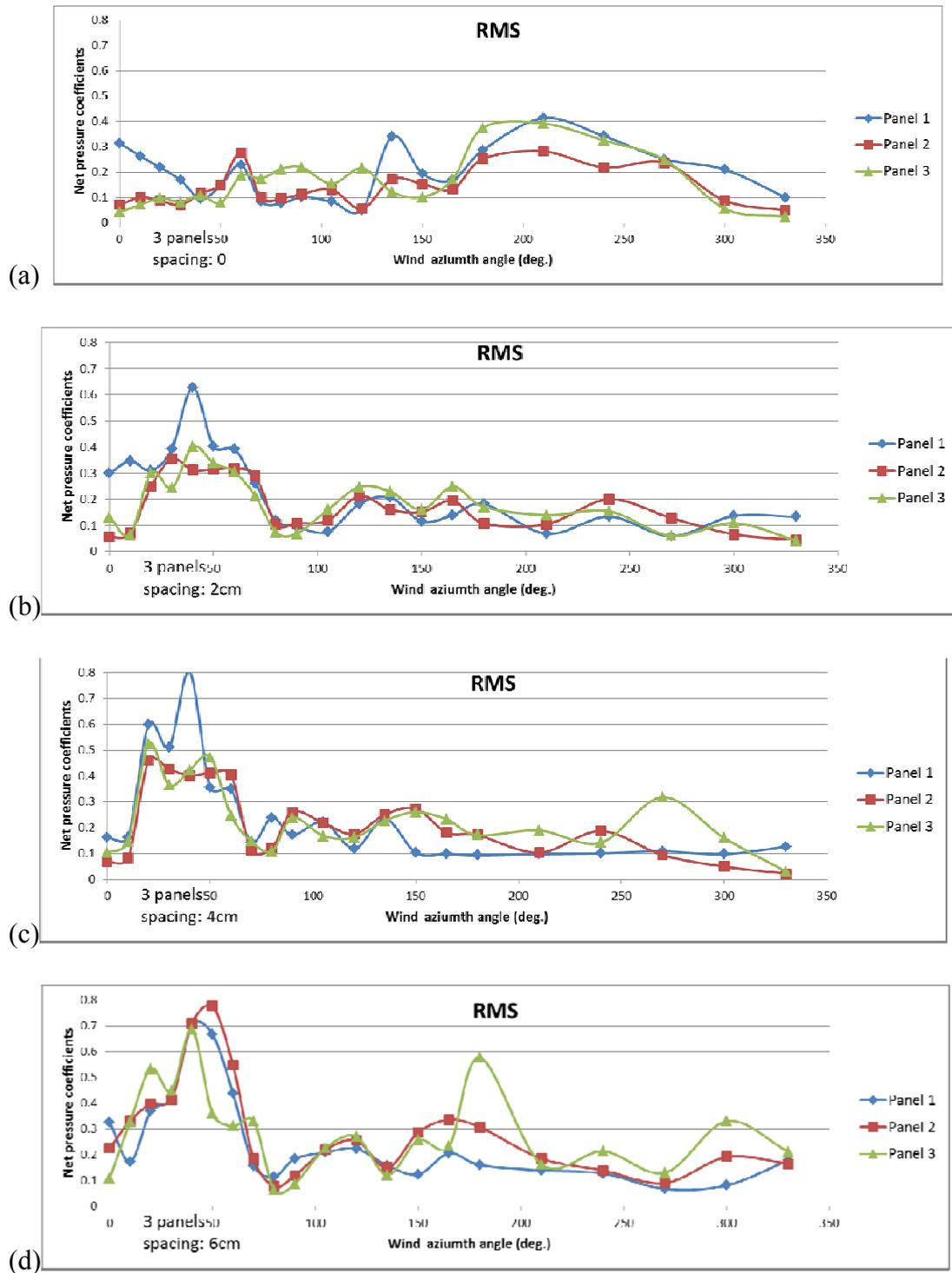


圖 4-4 平屋頂建築物，各排太陽光電板上所受整體擾動性淨風壓係數隨風攻角變化，(a)無間距，(b)1 單位間距，(c)2 單位間距，(d)3 單位間距。

資料來源：本研究整理

三、更多排數時不同位置的差異

前段氣動力實驗主要探討不同間距的影響，因此僅布設三排光電板氣動力模型進行實驗量測，為了解在光電板排數更多的條件下，氣動力特性的變化，因此採緊密無間距條件，採用平屋頂建築模型，於屋頂面上布設 7 排光電板，風攻角零度時由上游向下游各排光電板依序對齊排列，其中第 1、4、7 排光電板為安裝有風壓管線的氣動力模型，其餘僅為光電板壓克力模型而無風壓孔，量測結果如圖 4-5 所示。由圖 4-5(a)可見第 1 排光電板在風攻角小於 45 度時，受到最低的負風壓作用，較為不利，其餘第 4、7 排光電板在各風攻角作用下平均淨風壓係數均接近零值。擾動性淨風壓係數的變化亦同，均以第 1 排光電板的變化最為劇烈。

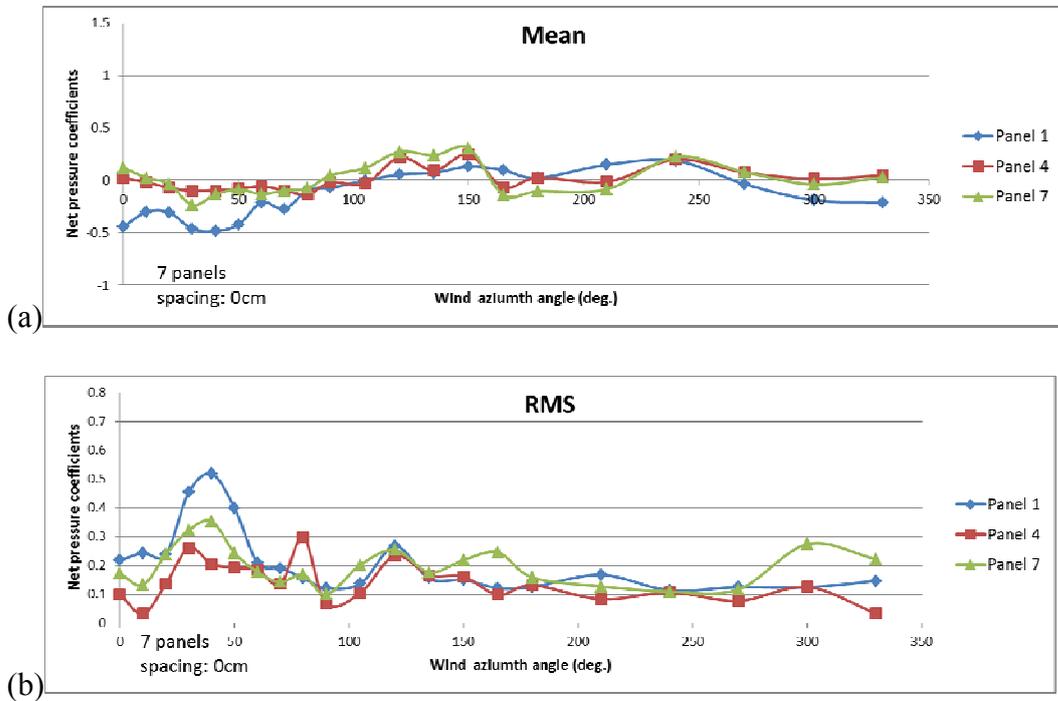


圖 4-5 平屋頂建築物，七排太陽光電板時，第 1、4、7 排之整體淨風壓係數隨風攻角變化，(a)平均淨風壓係數，(b)擾動性淨風壓係數。

資料來源：本研究整理

四、邊緣距離的差異

由前述實驗結果可知位於平屋頂上的太陽光電板陣列所受風荷載，主要為第一排受到的風荷載最大，特別是負風壓的存在，使得太陽光電板存在被風力作用掀起的潛在危機，對於風荷載安全的判斷，亦以負風壓作用強烈的條件作為標準。前文實驗中安排的太陽光電板陣列均由風攻角零度時屋頂上游邊緣次第展開佈設，因此在小攻角作用時，屋頂前緣有強烈的分離剪力流形成，第一排受到最強烈的負風壓作用，本研究將太陽光電板陣列模型以來流零攻角時方向為準，向下游區域做小幅度的挪移，以太陽光電板模型寬(2cm)為單位比較挪移後所受風荷載的變化。

平屋頂建築物，三排太陽光電板與屋頂前緣不同距離時光電板整體淨風壓係數隨風攻角變化如圖 4-6 所示，在緊貼前緣的情況下，第一排光電板於風攻角零度時有最強的負風壓作用，而相同條件時第二、三排光電板則所受風壓作用趨於零，顯示後排受到前排遮蔽而偏安全。圖 4-6(a)顯示風攻角 210~250 度之間第一排光電板亦有甚強的負風壓作用，此時第一排光電板主要受到斜交來流對屋頂角隅產生的渦流影響，受到負風壓作用。圖 4-6(b)及(c)顯示太陽光電板陣列向下游區挪移後的風荷載情形，明顯的可以看到，風攻角零度時第一排太陽光電板所受到強烈負風壓作用的情形幾乎消失，挪移的距離分別為一倍與二倍單位寬，在本模型尺寸，此挪移的單位寬度亦為建築物牆面高度的十分之一，由文獻(何 2007)可知，低層建築物屋頂面所受到的風壓分布由於拱門形渦漩的影響，主導風壓分布的重要因子為建築物高度。因此可知在屋頂面上，屬於建築物高度十分之一的周邊區域，受到分離剪力流或角隅渦漩影響，安裝於此區域的太陽光電板將受到強烈負風壓作用，有掀翻的潛在危機，對光電板結構安全最為不利。調整光電板陣列排與排之間間距，增加為一倍的光電板寬度，整體太陽光電板陣列則仍向零攻角時的下游區挪移的距離分別為一倍與二倍單位寬(光電板寬度)，氣動力實驗結果如圖 4-7 所示。由圖 4-7 可見不論挪移一倍或二倍單位寬，第一排太陽光電板所受的負風壓作用均有明顯減輕。由於增加光電板排與排之間距，使得各排間的遮蔽效應下降，因此圖中的第二、三排光電板所受到的風壓作用，不論是正風壓或負風壓作用均呈現微幅的增大，

陽光屋頂耐風評估與設計準則

特別是第三排風荷載上升的情形略為明顯，顯示遮蔽效應在大於一倍的光電板寬度之後即迅速下降，相同的變化趨勢與圖 4-3 中亦可觀察到。

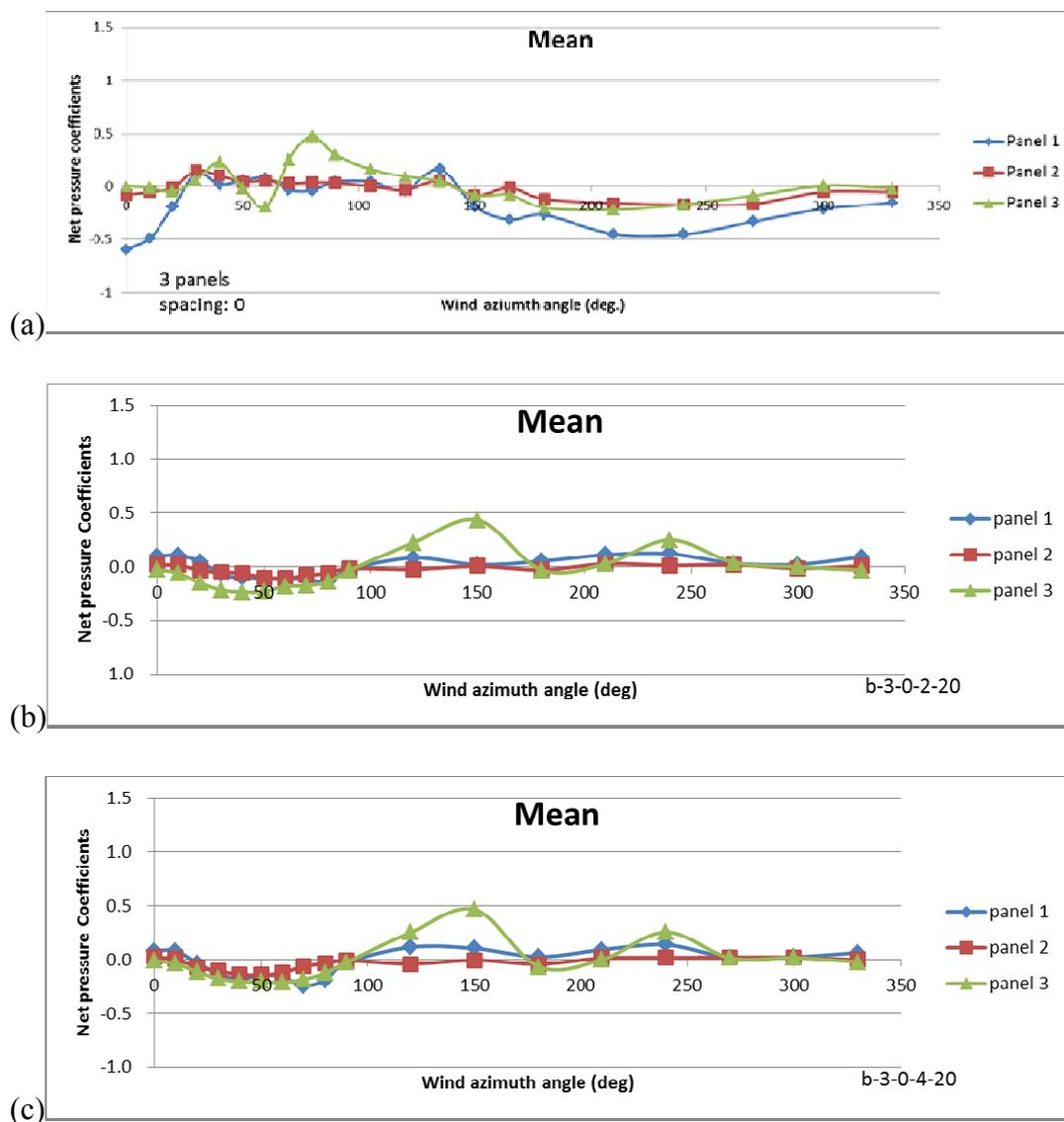


圖 4-6 平屋頂建築物，三排太陽光電板與屋頂前緣不同距離時整體淨風壓係數隨風攻角變化，(a)與前緣切齊，(b)與前緣退縮 1 單位寬 (c)與前緣退縮 2 單位寬。

資料來源：本研究整理

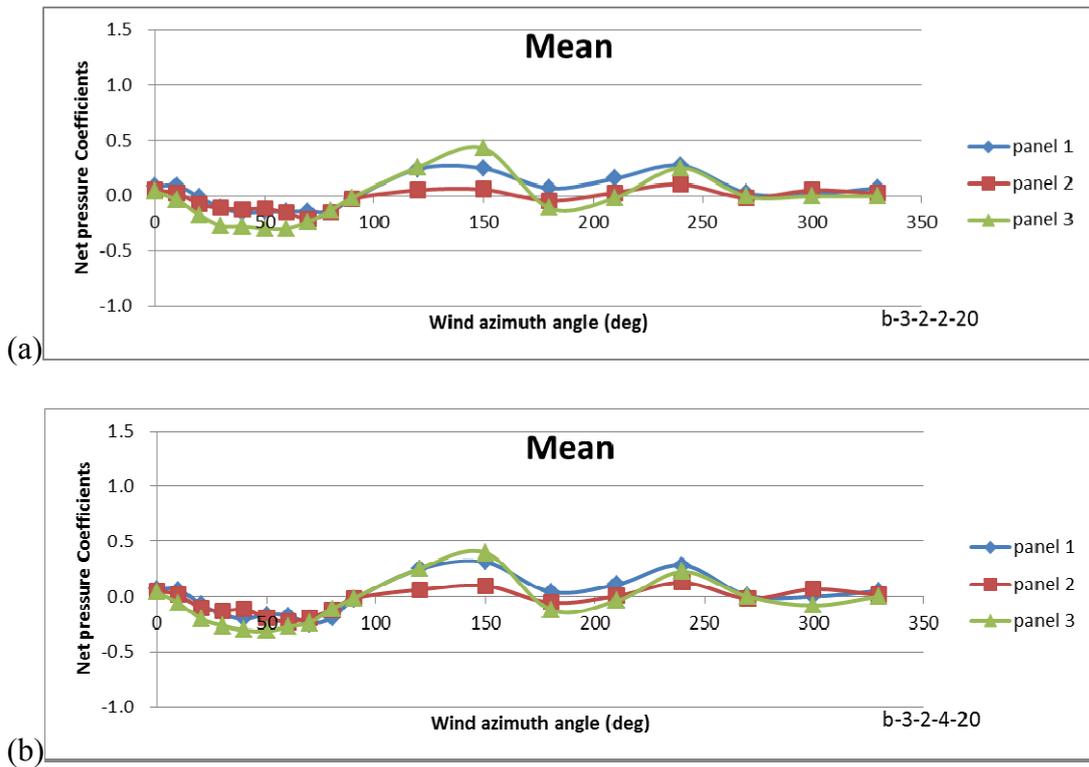


圖 4-7 平屋頂建築物，三排太陽光電板間距 1 單位寬與屋頂前緣不同距離時整體淨風壓係數隨風攻角變化，(a)與前緣退縮 1 單位寬(b)與前緣退縮 2 單位寬。

資料來源：本研究整理

建築物屋頂如採用斜屋頂設計，屋頂表面風壓的變化有明顯的改變(何 2007)，因此本研究採取三種不同坡度的雙斜屋頂，於其上架設太陽光電陣列進行氣動力實驗，檢討其所受的風荷載。圖 4-8 為屋頂坡度 1:8 的雙斜屋頂建築物上與屋頂前緣不同距離之三排太陽光電板整體淨風壓係數隨風攻角變化，由圖 4-8(a)顯示，與前緣貼齊的第一排太陽光電板在小攻角風力作用下受到強烈的負風壓作用，隨著風攻角增加到 45 度以後即迅速減輕，但風攻角大於 180 度後，來流主要來自建築物背面，此時第一排太陽光電板雖處於下游區，但位在邊緣地帶，仍受到強烈的負風壓作用。因此第一排太陽光電板在與屋頂前緣貼齊的條件下，其結構安全最為不利。由圖 4-8(b)及(c)顯示，將太陽光電板陣列往後挪移，不論是移動一個單位或二個單位均使得太陽光電板所受到的風荷載有明顯趨緩的效果，此現象與平屋頂類似模型實驗結果是類似的。

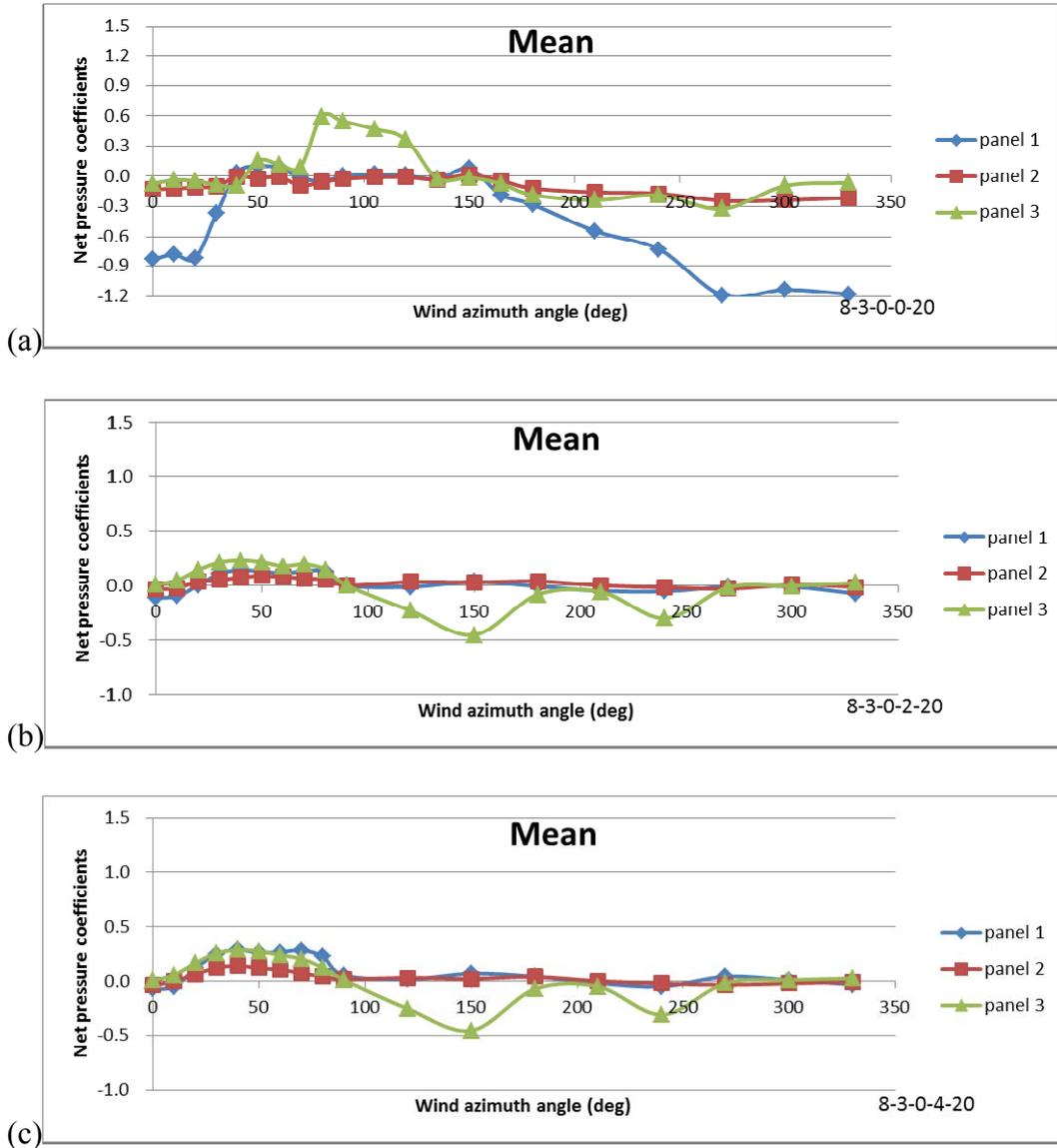


圖 4-8 1:8 斜屋頂建築物，與屋頂前緣不同距離之 3 排太陽光電板整體淨風壓係數隨風攻角變化，(a)與前緣切齊，(b)與前緣退縮 1 單位寬，(c)與前緣退縮 2 單位寬。

資料來源：本研究整理

關於其他不同屋頂坡度的建築物實驗結果，如圖 4-9 及圖 4-10 所示。圖 4-9 為屋頂坡度 1:4 斜屋頂建築物，與屋頂前緣不同距離之三排緊密排列太陽光電板整體淨風壓係數隨風攻角變化，圖中可明顯觀察到，與前緣切齊的佈設條件，對於第一排太陽光電板所受風荷載極為不利，小攻角條件時，不論來流偏左或

偏右均造成強烈的負風壓作用，相較之下第二、三排太陽光電板其風荷載則減輕甚多。由圖 4-9(c)亦可觀察到，第三排光電板其所受的負風壓作用在小攻角條件時，隨整體陣列推縮幅度的增加而呈現小幅度轉強的情形，由屋頂為雙斜屋頂形式，因此中央有屋脊隆起，隨整體陣列推縮量增加，最後一排光電板亦更接近中央屋脊區，氣流在屋脊線上有加速越過屋脊及渦流形成的現象，接近此區的光電板其風荷載亦轉強。

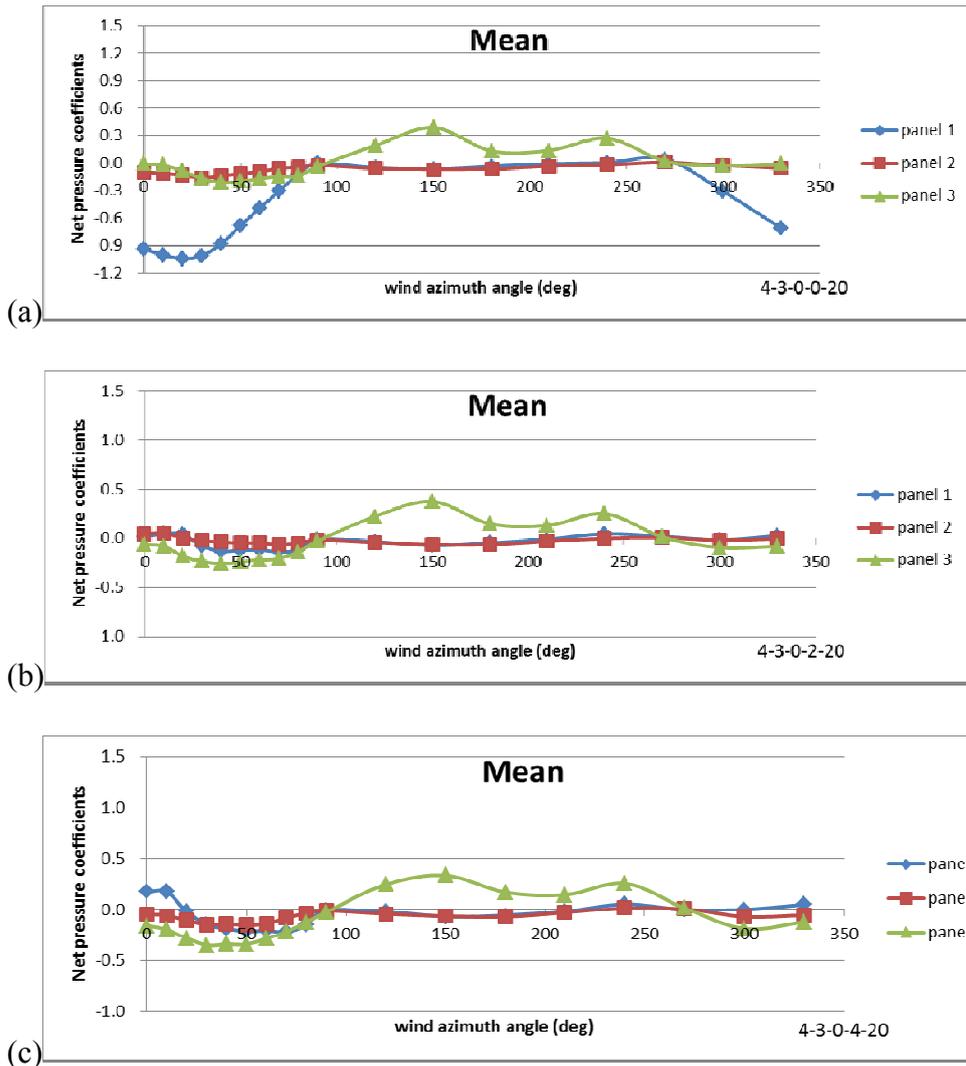


圖 4-9 1:4 斜屋頂建築物，與屋頂前緣不同距離之 3 排太陽光電板整體淨風壓係數隨風攻角變化，(a)與前緣切齊，(b)與前緣退縮 1 單位寬，(c)與前緣退縮 2 單位寬。

資料來源：本研究整理

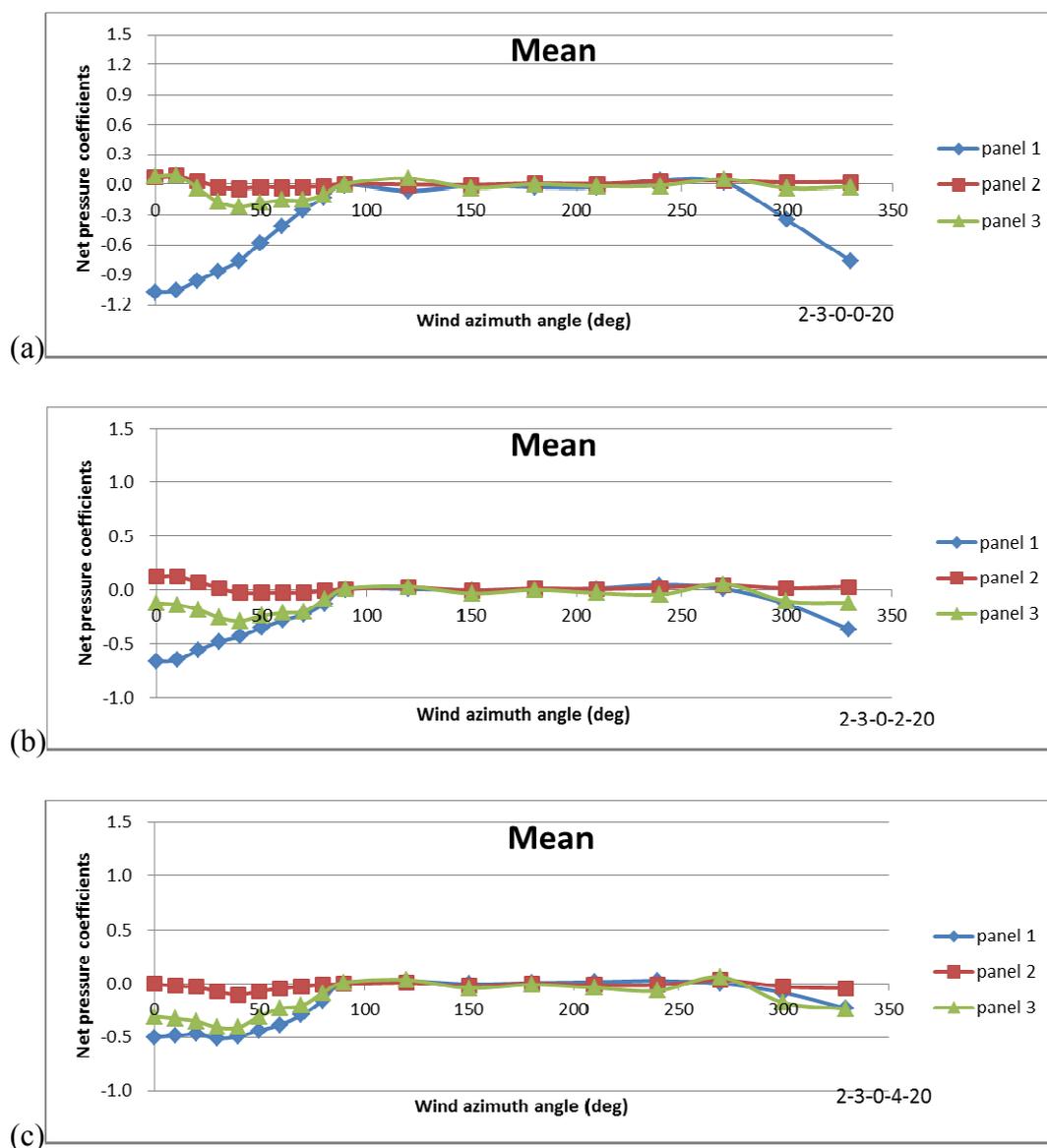


圖 4-10 1:2 斜屋頂上與屋頂前緣不同距離之 3 排太陽光電板整體淨風壓係數隨風攻角變化，(a)與前緣切齊，(b)與前緣退縮 1 單位寬，(c)與前緣退縮 2 單位寬。

資料來源：本研究整理

將屋頂坡度提高為 1:2 時，與屋頂前緣不同距離之 3 排太陽光電板整體淨風壓係數隨風攻角變化，如圖 4-10 所示，基本上仍以第一排太陽光電板在與前緣切齊的布置下，小攻角條件時，不論來流偏左或偏右均造成強烈的負風壓作用，第二、三排光電板則受到遮蔽作用風荷載較為輕微。但與圖 4-9 比較則明

顯可見，第一排及第三排光電板所受負風壓作用在退縮邊緣距離後，仍有高於前述屋頂坡度條件的情形。就第一排光電板而言，退縮兩個板寬單位的距離，其負風壓作用仍強，第三排光電板隨整體光電板陣列退縮的增加，反而接近高起的中央屋脊線，由於越過屋脊線氣流的加速現象比 1:4 坡度屋頂更為強烈，因此第三排光電板所受負風壓更為強烈。

五、屋頂坡度的影響

由前述可知不同屋頂坡度的建築物其上架設的太陽光電板陣列所受風荷載有很大的差異，整理本研究不同屋頂坡度模型太陽光電板氣動力實驗結果，取用與屋頂邊緣切齊的情形為例，整理其整體平均淨風壓係數如圖 4-11 所示。由於與屋頂邊緣切齊的布置方式屬於對光電板所受風荷載不利的條件，圖 4-11 可明顯呈現出屋頂坡度的影響，圖中可見在小攻角的情形下，隨屋頂坡度的增加，負風壓作用更為強烈，顯示屋頂坡度越位陡峭時，架設其上的太陽光電板陣列所受負風壓作用將更為嚴重。

風攻角增加到 180 度附近時，來流來自建築物背面，在平屋頂及屋頂坡度 1:8 兩者則使得太陽光電板受到負風壓的作用，但對於屋頂坡度 1:4 及 1:2 兩者則未出現負風壓的狀況。顯示屋頂坡度大的建築物，其屋脊較為高聳，對於背風面下游區域的附屬構造物形成遮蔽的效果，特別是光電板高度通常是以 30 度左右的仰角架設，與招牌廣告物等直立甚至會高出屋脊高度狀況不同，較高聳的屋脊可發揮遮蔽的效果，顯然屋頂坡度越高其對背風區設施風荷載的遮蔽效果越明顯。

比較第一排光電板在受迎風作用時強烈的負壓荷載，其幅度遠超過背風時的遮蔽影響幅度，因此整體而言，在較為陡峭的屋頂架設太陽光電板陣列，對於光電板支架結構系統仍屬不利。

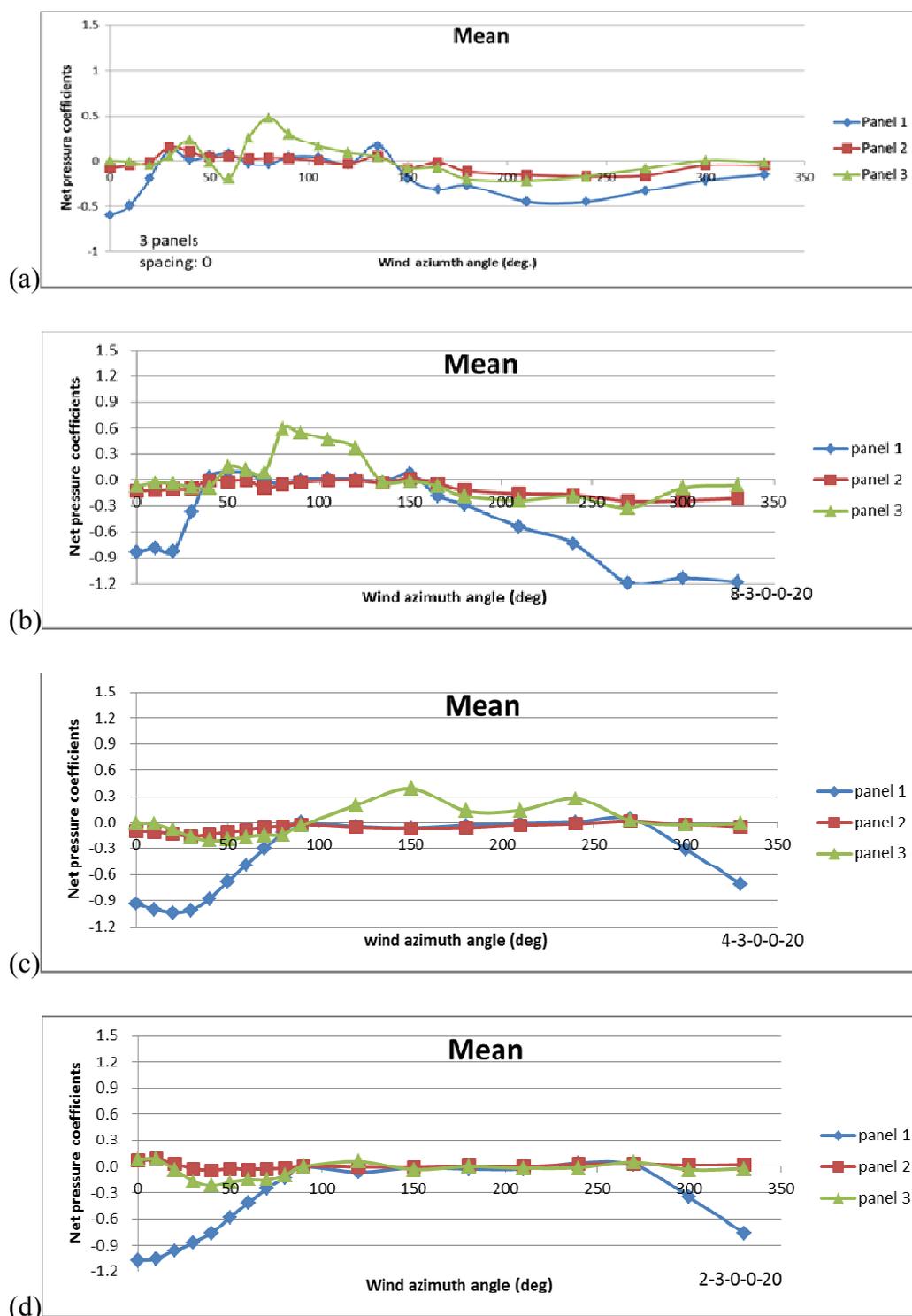


圖 4-11 不同屋頂坡度，三排太陽光電板與屋頂前緣切齊時整體淨風壓係數隨風攻角變化，(a)平屋頂，(b)坡度 1:8 屋頂，(c)坡度 1:4 屋頂，(d)坡度 1:2 屋頂。

資料來源：本研究整理

六、女兒牆的影響

太陽光電板所受風荷載受到遮蔽現象的影響甚鉅，如板之上游區有其他光電板遮蔽，將使太陽光電板其風荷載大幅減輕，本研究同時探討平屋頂上安裝女兒牆對太陽光電板陣列的影響，將平屋頂模型之屋頂區域周邊裝設與光電板仰起高度相同的女兒牆，整個屋頂區外圍均裝設女兒牆，屋頂上三排密集排列的光電板分別以不同退縮條件進行實驗，量測得不同風攻角及退縮條件下的三排密集排列光電板風荷載如圖 4-12 所示。

由圖中可見女兒牆的存在使得光電板所受風荷載大幅減輕，將光電板陣列進行退縮時，光電板的風荷載僅微幅上升。本研究採用的退縮距離達女兒牆高度的四倍時，光電板的風荷載仍受到女兒牆的遮蔽保護而無強烈風荷載。比較前文中無女兒牆的條件下，接近屋頂邊緣區域，光電板受到強烈的負風壓作用，因此不建議在屋頂邊緣約為建築物高度十分之一的帶狀區域中架設太陽光電板，以避免光電板掀翻的危險。但如增加女兒牆設施，光電板所受風荷載將大幅減輕，因此在屋頂架設太陽光電陣列時，如有可能設置女兒牆，將有助於大幅減少光電板的風損。

七、太陽光電板下高度影響

由實驗資料可見，造成太陽光電板不利的風荷載來自板上面的負壓結合板下面的正壓，板上面負壓來自分離渦流作用，板下面正壓則與光電板低端與屋頂面接觸，使板下氣流運動受阻，致使正壓梯度提高。因此增加支撐柱高度適度提高光電板下方空隙，可使板下氣流流通更為順暢，將有助於減低板下正壓梯度及整體風荷載。

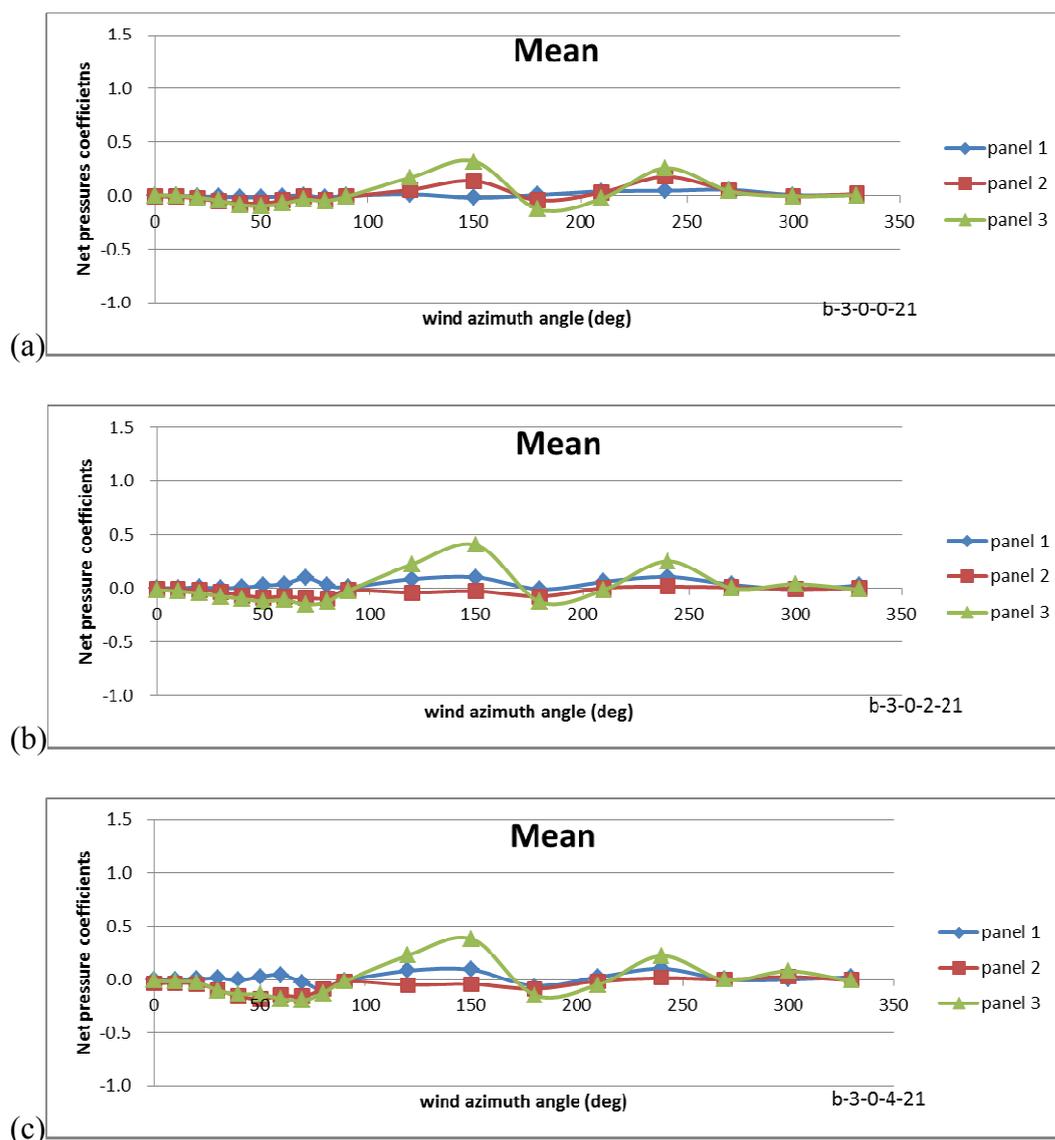


圖 4-12 平屋頂含女兒牆時，三排太陽光電板與屋頂前緣不同距離時整體淨風壓係數隨風攻角變化，(a)與前緣切齊，(b)與前緣退縮 1 單位寬，(c)與前緣退縮 2 單位寬。

資料來源：本研究整理

第二節 結構分析成果

一、太陽光電板模組支撐架結構數值分析模型

為能實際了解在強風作用下，太陽光電板模組支撐架桿件內力的變化情形，本研究以氣動力實驗所得之版面淨風壓歷時資料轉化為支撐節點載重歷時資料，利用 Midas 軟體進行結構受風作用下的分析計算。支撐架結構以本研究蒐集之實際使用支撐架結構建模，如圖 4-13 所示，根據業界常用 C 型冷作輕型鋼斷面結構型式建立太陽光電板支撐架結構系統分析模型，其中柱 (Column)、斜撐 (Truss) 與斜梁 (Girder) 桿件端部均設定為樞接型式 (無法傳遞彎矩)。橫梁 (Beam) 與斜梁 (Girder) 連接設定亦為樞接型式 (無法傳遞彎矩)，但橫梁、斜梁元素間仍視為一體桿件。

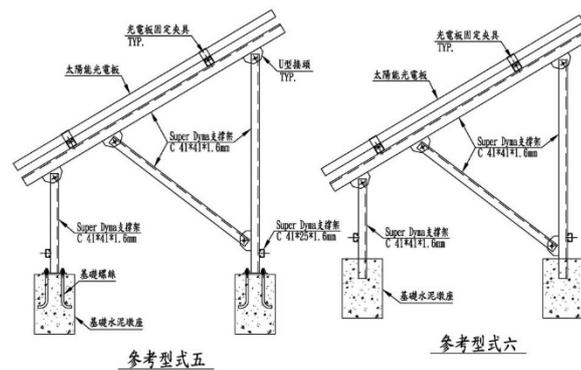


圖 4-13 太陽光電板各部結構圖

資料來源：本研究整理

由於支承固接於結構體，因此後排柱未設置橫向斜撐桿件。依據圖說資料，

陽光屋頂耐風評估與設計準則

桿件斷面採用 C41×41×1.6mm 輕型鋼斷面型式。各桿件之名稱定義如圖 4-14 所示，光電板採用氣動力實驗所用之模型尺寸配合實驗縮尺加以放大，各桿件之編號如圖 4-15 所示。

分析計算採用的來流風向角定義與氣動力實驗一致，如圖 4-16 所示，結構分析計算針對 0、30、60、90 度風攻角之風洞實驗時序列數據，將其轉換為符合實場設計風速 (42.5 m/sec) 之歷時風壓資料，轉換為屋頂風速(實驗參考風速)建立各節點上風荷載時序列資料，並加載於 MIDAS 軟體所建立之數值模型進行結構動力歷時分析。

由前文中氣動力實驗成果可知，三排太陽光電板陣列型式，均以第一排的氣動力作用最為明顯，特別是與屋頂前緣切齊的情況下最強烈，因此針對此一較為臨界的載重狀況，採用不同屋頂坡度條件下取得的實驗資料進行計算。

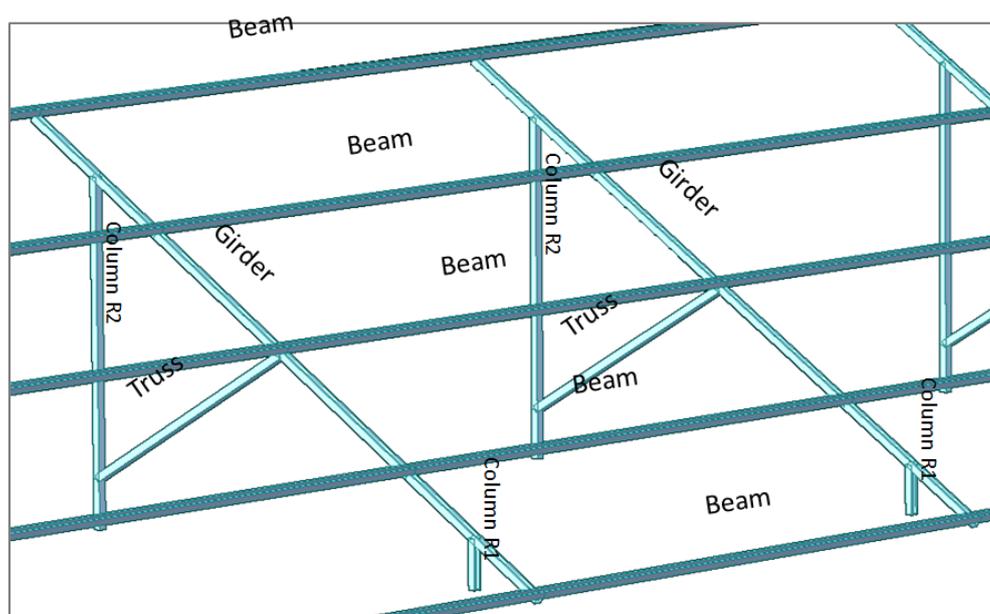


圖 4-14 桿件名稱定義

資料來源：本研究整理

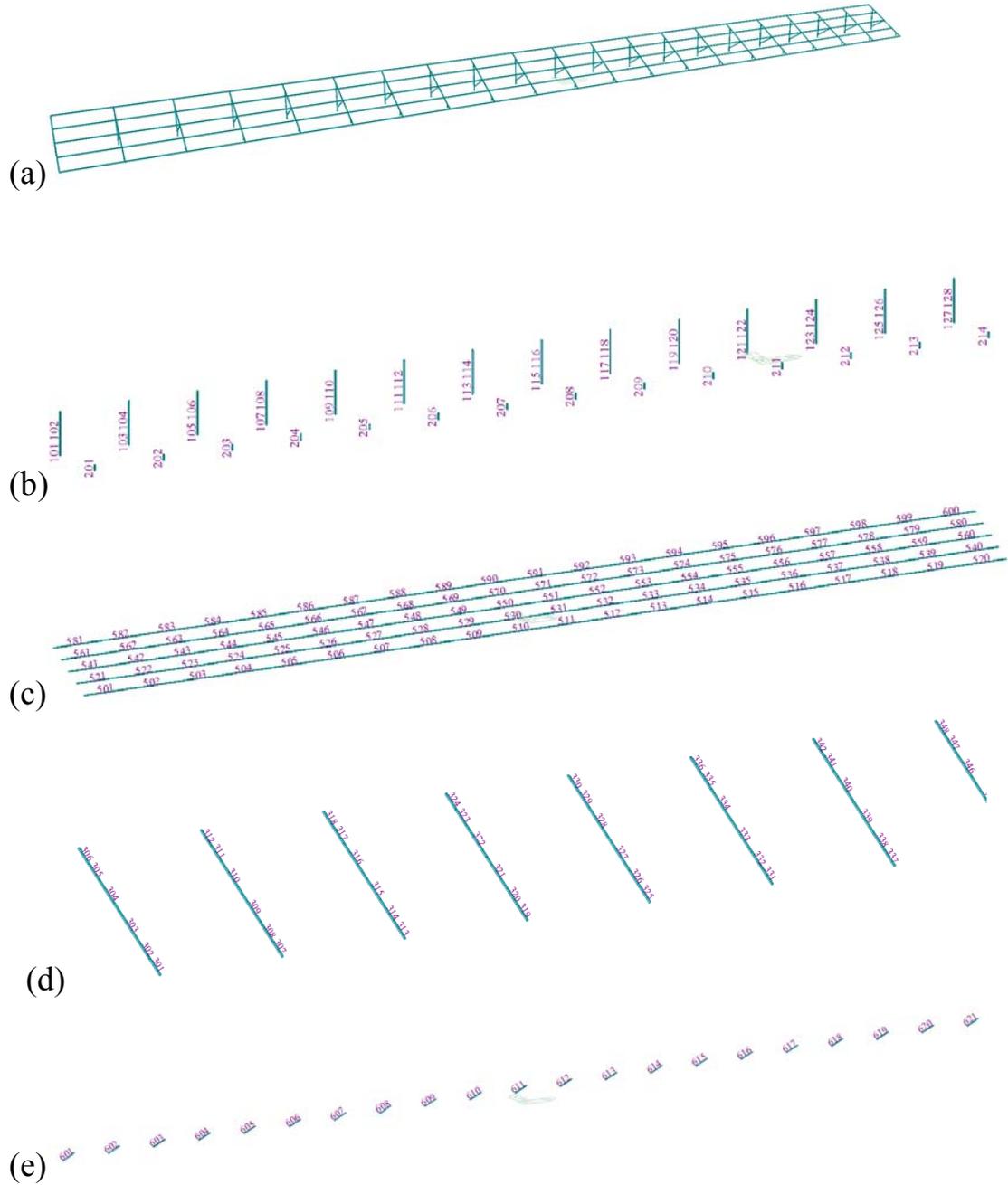


圖 4-15 桿件編號分布，(a) (b)Column 桿件編號 R1：201-221；R2：101-142，(c) Beam 桿件邊號：501-600，(d) Girder 桿件編號 301-354，(e) Truss 桿件編號 601-621。

資料來源：本研究整理

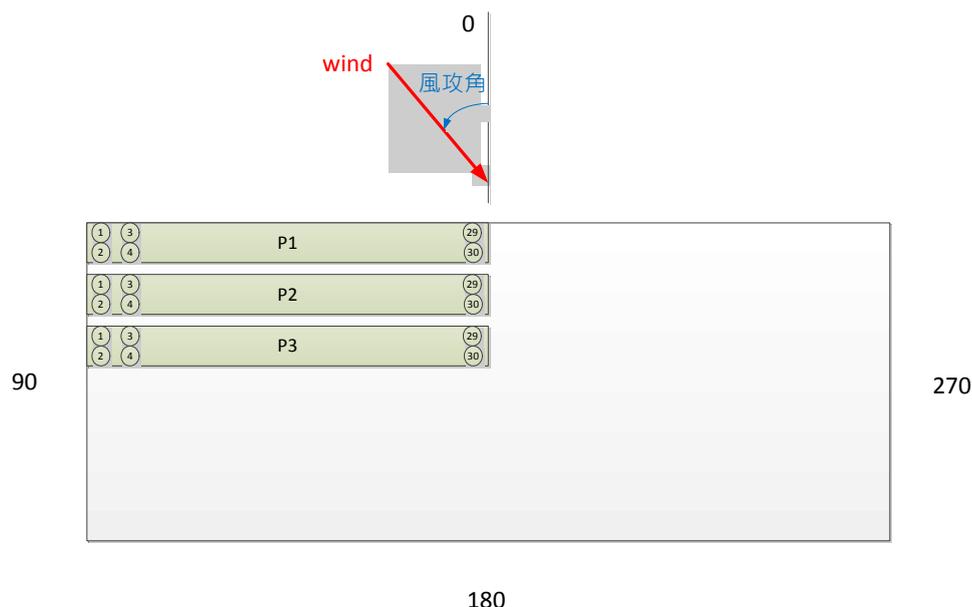


圖 4-16 屋頂上太陽光電板編號與來流風向角定義。

資料來源：本研究繪製

二、結構分析計算成果

1. 平屋頂上之太陽光電板支撐結構內力

由於光電板位於建築物來流零攻角時的最前緣，本研究以較高端朝向來流，因此光電板受風翻掀力量作用明顯。如圖 4-17 所示，當風攻角為 0 度時，柱軸力大致呈現左右對稱分佈形式。隨著風攻角的增加，位於屋頂側緣光電板受到強烈渦流影響，因此左側角隅柱桿件軸力隨風攻角由 0 度增加至 30、40、50 及 60 度時，軸拉力（負值）明顯增加，遠高於右側柱。當風攻角增加至 90 度時，風向與光電板平行，風壓係數接近零，因此柱軸力正負極值仍呈現較為對稱的型式分佈。此時，右側（下游）桿件因擾動風壓較大以致軸力值略高於左側（上游）桿件。為能有助於區分正負值，圖中實線代表正值，虛線代表負值，後續同類型圖面亦採同區分原則。

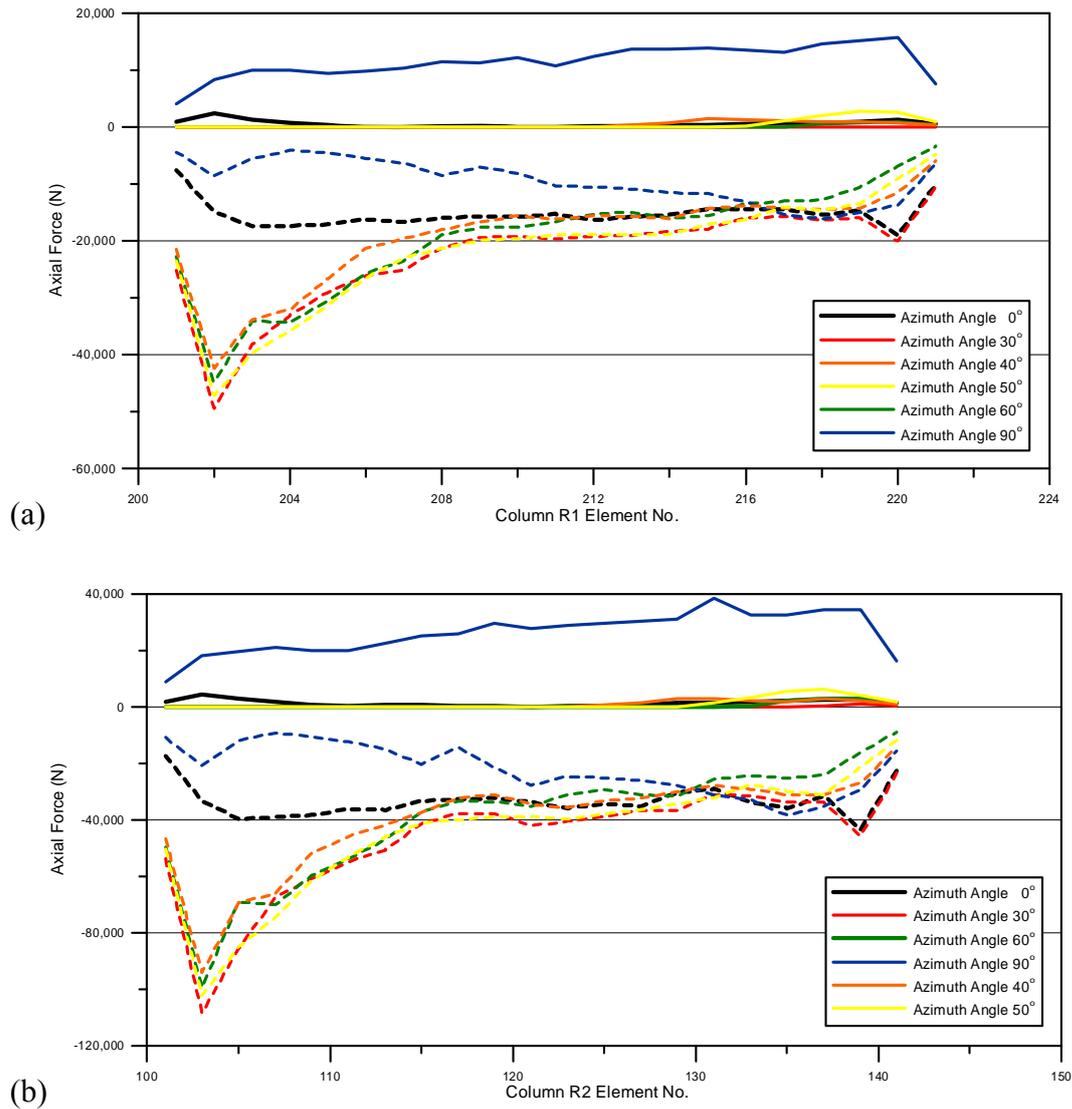


圖 4-17 (a)前排柱桿件軸力極值圖，(b)後排柱桿件軸力極值圖

資料來源：本研究整理

風攻角為 0 度時，橫梁桿件彎矩與剪力仍保持左右大致對稱的分佈形式，如圖 4-18 所示。當風攻角增加至 30、40、50 及 60 度時，受到角隅渦流的影響，屋頂左側邊緣擾動風壓增大，屋頂左側橫梁桿件的彎矩與剪力值明顯高於右側。風攻角為 90 度時，同樣因右側（下游）擾動風壓之影響，橫梁剪力與彎矩值均略高於左側（上游）桿件。

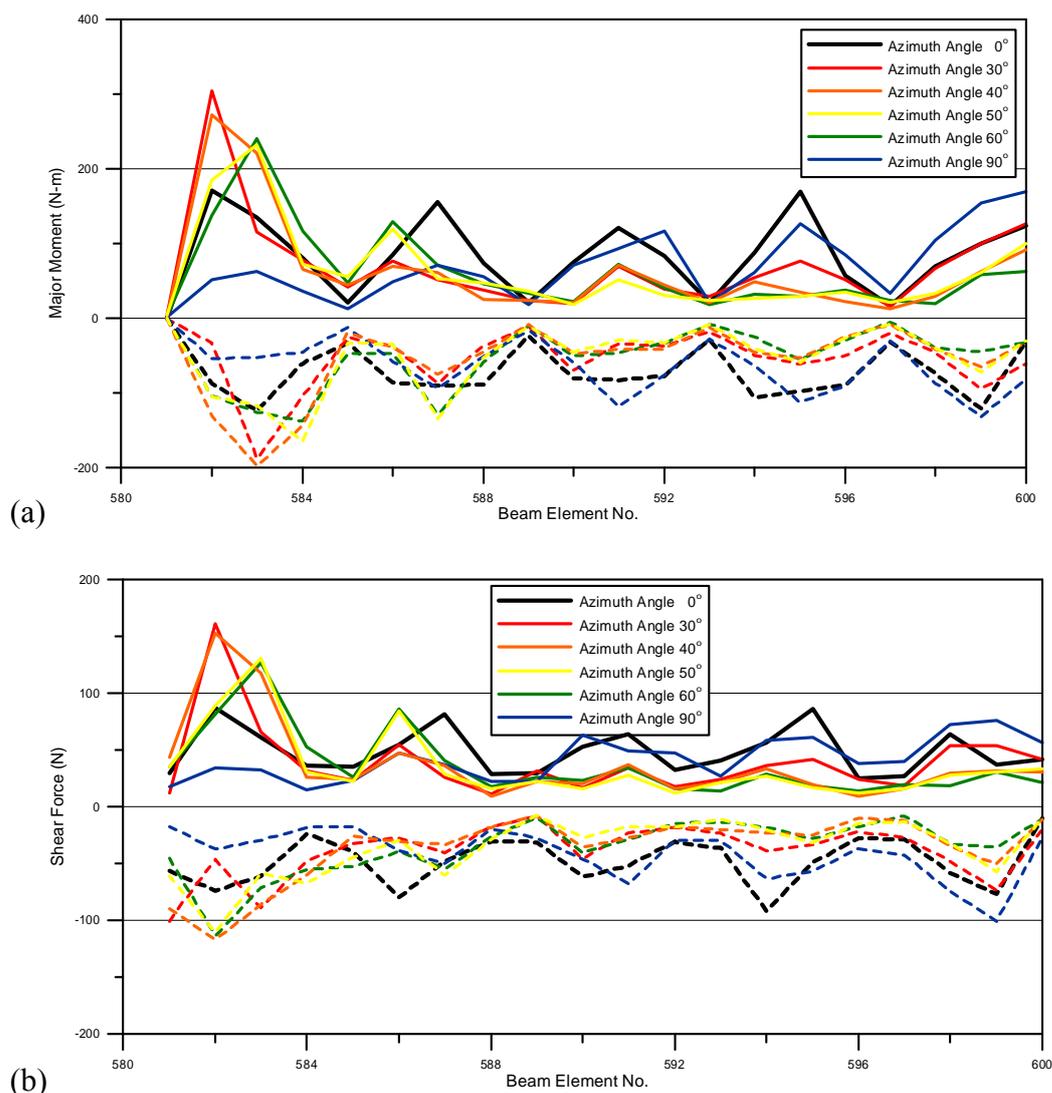


圖 4-18 橫梁桿件應力 (a)彎矩極值圖，(b)剪力極值圖

資料來源：本研究整理

斜梁桿件的彎矩與剪力反應趨勢大致與橫梁桿件相同。如圖 4-19 所示，當風攻角為 0 度時，大致呈現左右對稱的分佈形式。而風攻角轉為 30 至 60 度時，桿件彎矩與剪力反應均趨近一致達到最大極值，且屋頂左側邊緣斜梁之彎矩與剪力明顯高於右者。風攻角 90 度時，屋頂左側斜梁桿件之彎矩、剪力值則略低於右側斜梁。

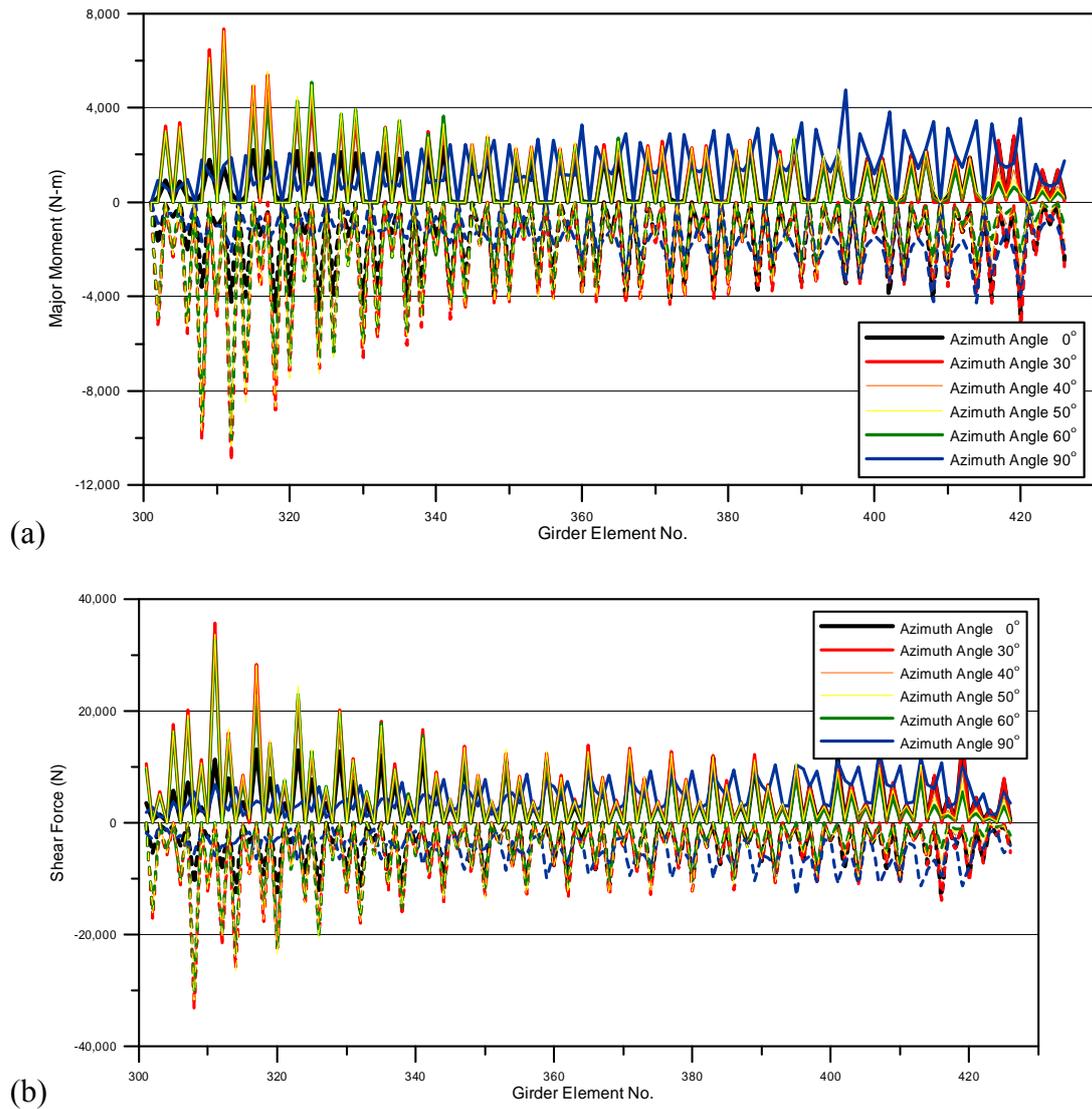


圖 4-19 斜梁桿件應力 (a)彎矩極值圖，(b)剪力極值圖

資料來源：本研究整理

斜撐桿件軸力趨勢基本與柱軸力相仿，如圖 4-20 所示，風攻角 0 度時，斜撐軸力大致呈左右對稱形式。風攻角轉為為 30 至 60 度時，屋頂左側斜撐桿件軸拉力明顯受到較大的擾動風壓所影響，軸拉力遠高於屋頂右側斜撐桿件。風攻角為 90 度時，上游斜撐軸力則略低於下游處斜撐桿件。

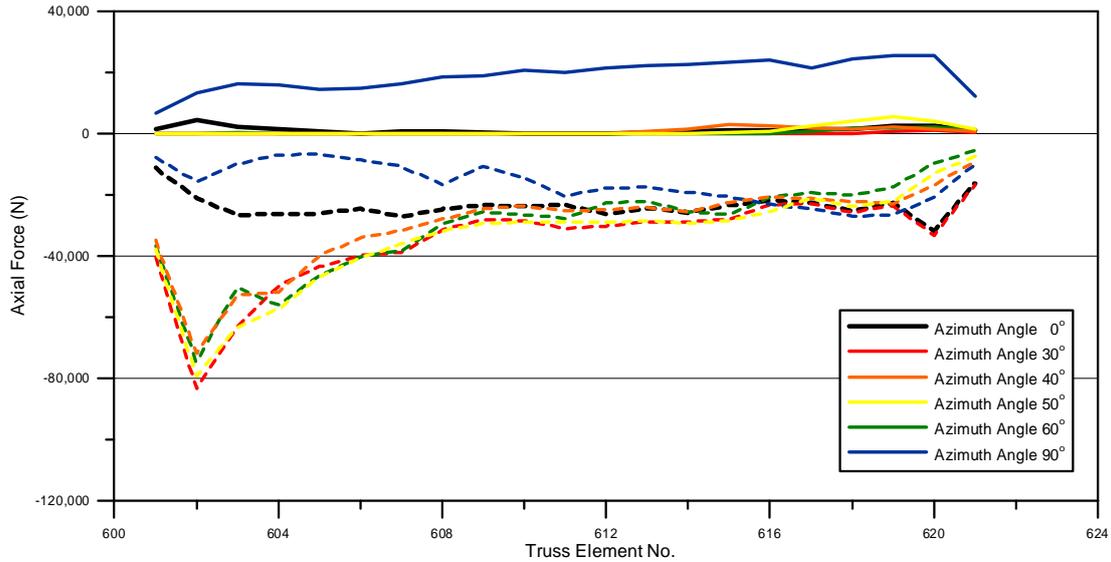


圖 4-20 斜撐桿件軸力極值圖

資料來源：本研究整理

2. 屋頂坡度 1:2 建築物屋頂上之太陽光電板支撐結構內力

斜率 1:2 屋頂針對 0、30、40、50、60、90 度攻角風洞實驗時序列數據，進行動力歷時分析，柱軸力分析成果如圖 4-21 所示，當風攻角為 0 度時，柱軸力大致呈現左右對稱分佈形式。隨著風攻角的增加，位於屋頂側緣光電板受到較強渦流影響，因此左側角隅柱桿件軸力隨風攻角由 0 度增加至 30 至 50 度時，軸拉力（負值）明顯高於右側柱，但最大桿件軸力仍與 0 度角中央區域桿件相當。當風攻角增加至 90 度時，風向與光電板平行，風壓係數接近零，右側（下游）桿件因擾動風壓較大以致軸力值略高於左側（上游）桿件。

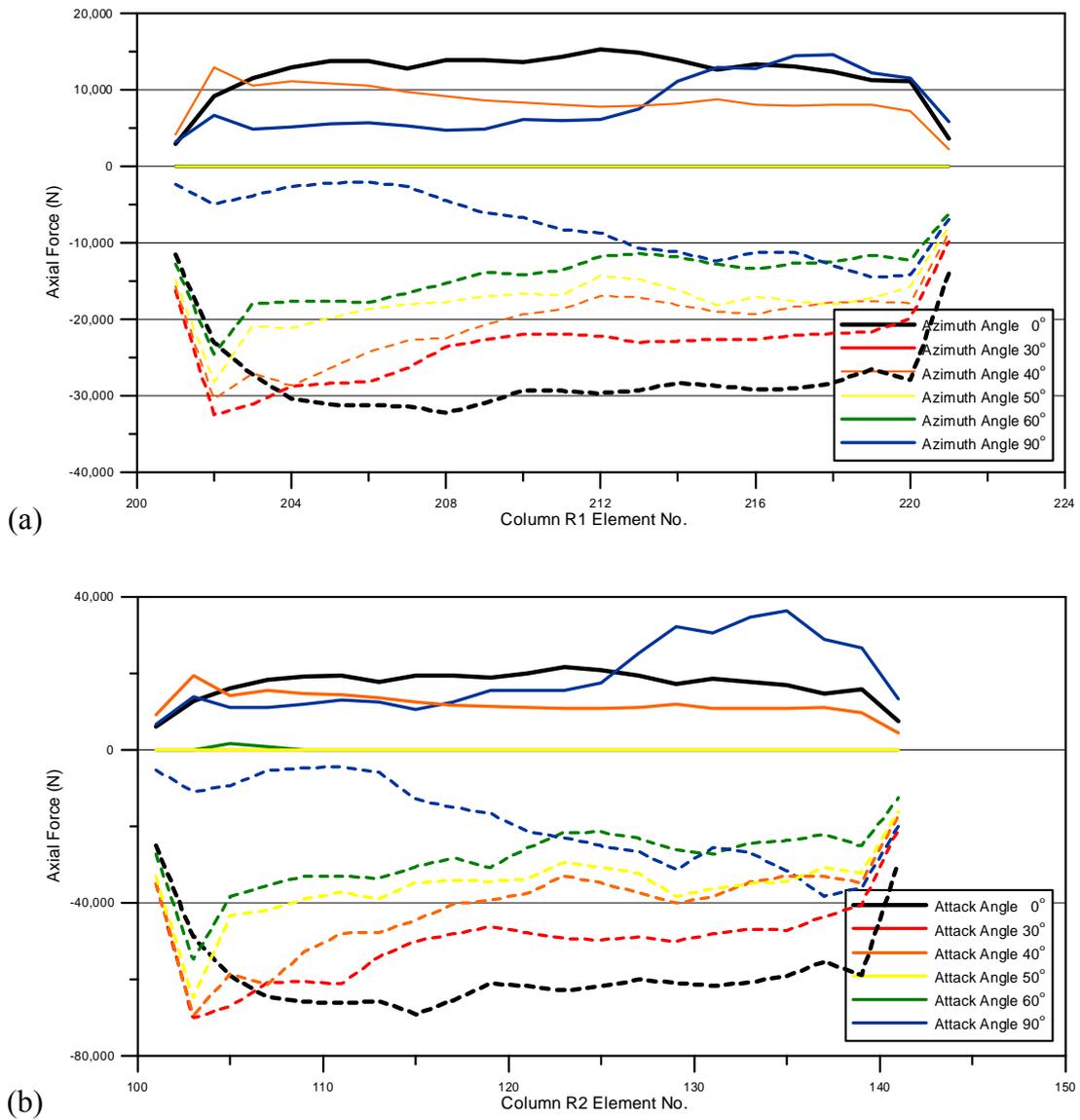


圖 4-21 柱桿件軸力，(a)前排柱桿件軸力極值圖，(b)後排柱桿件軸力極值圖

資料來源：本研究整理

風攻角為 0 度時，橫梁桿件彎矩與剪力大致保持著左右對稱的分佈形式，如圖 4-22 所示。當風攻角增加至 30 至 60 度時，屋頂左側邊緣擾動風壓增大，屋頂左側橫梁桿件的彎矩與剪力值明顯高於右側。風攻角達 90 度時，同樣因右側（下游）擾動風壓之影響，橫梁彎矩與剪力值均略高於左側（上游）桿件。

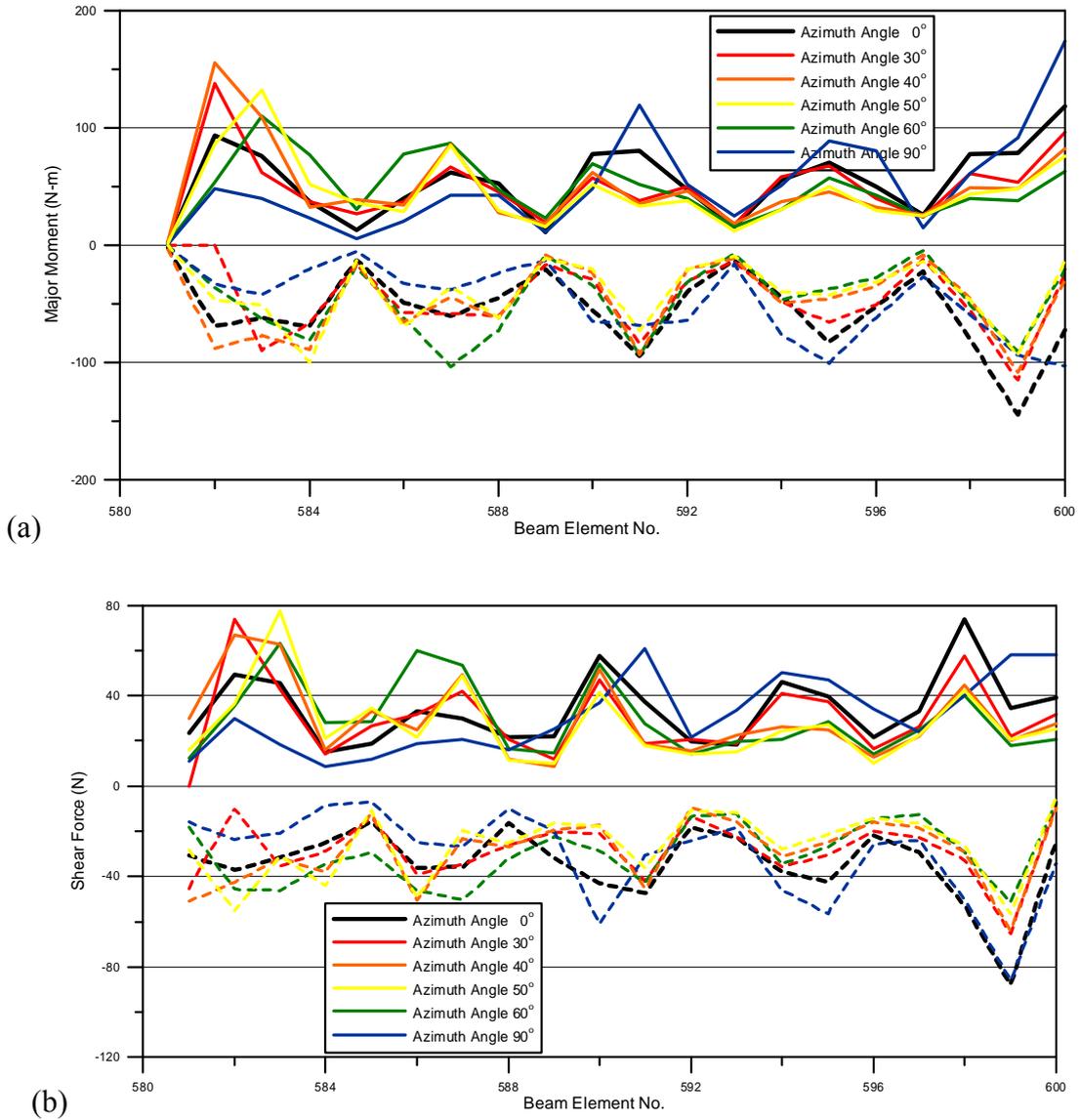


圖 4-22 橫梁桿件內力，(a) 橫梁桿件彎矩極值圖，(b) 橫梁桿件剪力極值圖

資料來源：本研究整理

斜梁桿件的彎矩與剪力反應趨勢大致與橫梁桿件相同，如圖 4-23 所示。亦即，當風攻角為 0 度時，大致呈現左右對稱的分佈形式。而風攻角轉為 30、40 度時，桿件彎矩與剪力反應均趨近一致達到最大極值，且屋頂左側邊緣斜梁之彎矩與剪力明顯高於右者，但均未超越 0 度角中央區域桿件。風攻角 90 度時，屋

頂左側斜梁桿件之彎矩、剪力值均低於右側斜梁（圖 4-23），且其極值與 0 度角中央區域桿件相當。

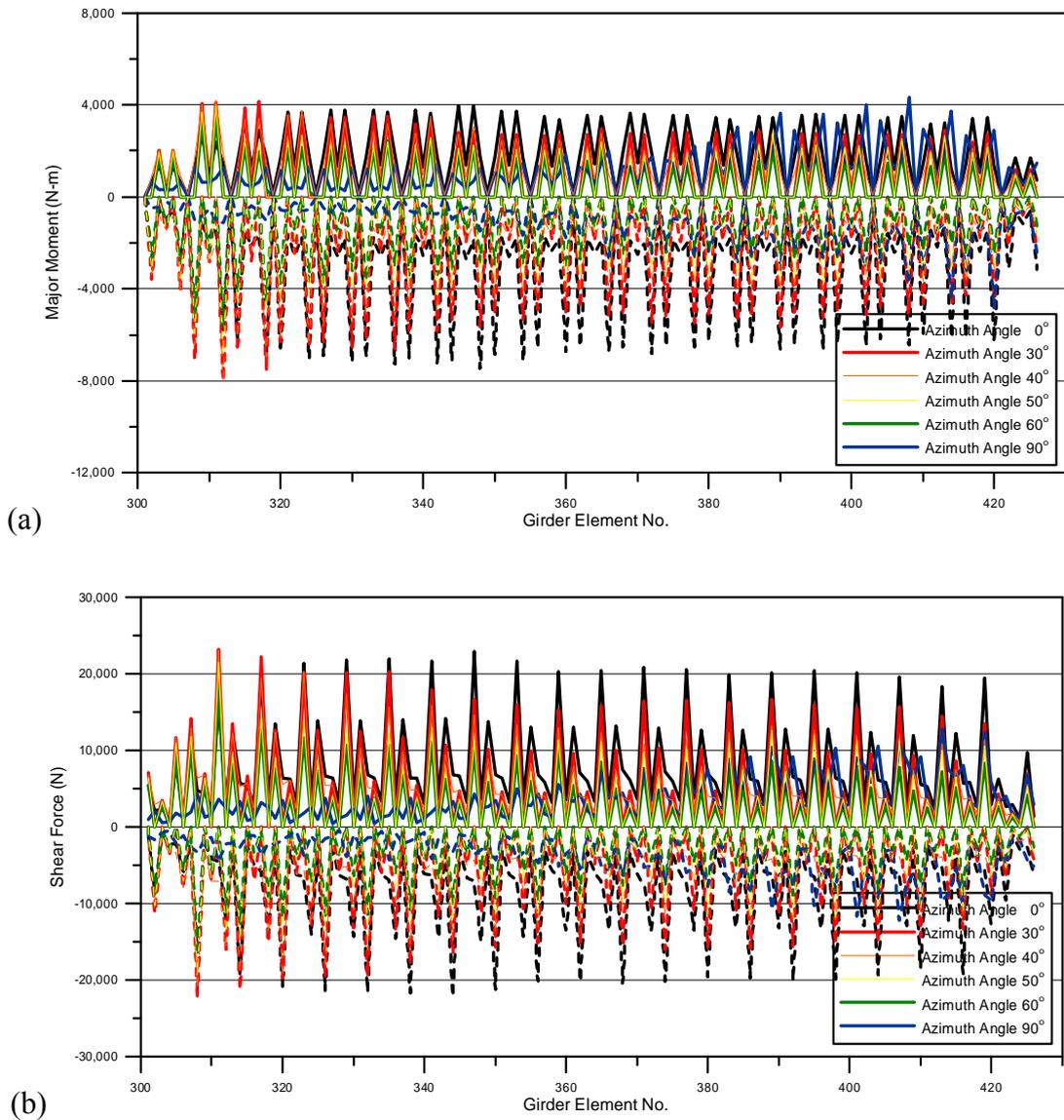


圖 4-23 斜梁桿件內力，(a)斜梁桿件彎矩極值圖，(b)斜梁桿件剪力極值圖

資料來源：本研究整理

斜撐桿件軸力趨勢基本與柱桿件軸力相仿，風攻角 0 度時，斜撐軸力亦呈左右對稱形式。風攻角轉為為 30 至 50 度時，屋頂左側斜撐桿件軸拉力明顯受到較

大的擾動風壓所影響，軸拉力高於屋頂右側斜撐桿件。風攻角為 90 度時，下游處斜撐桿件軸力則遠高於上游處桿件。

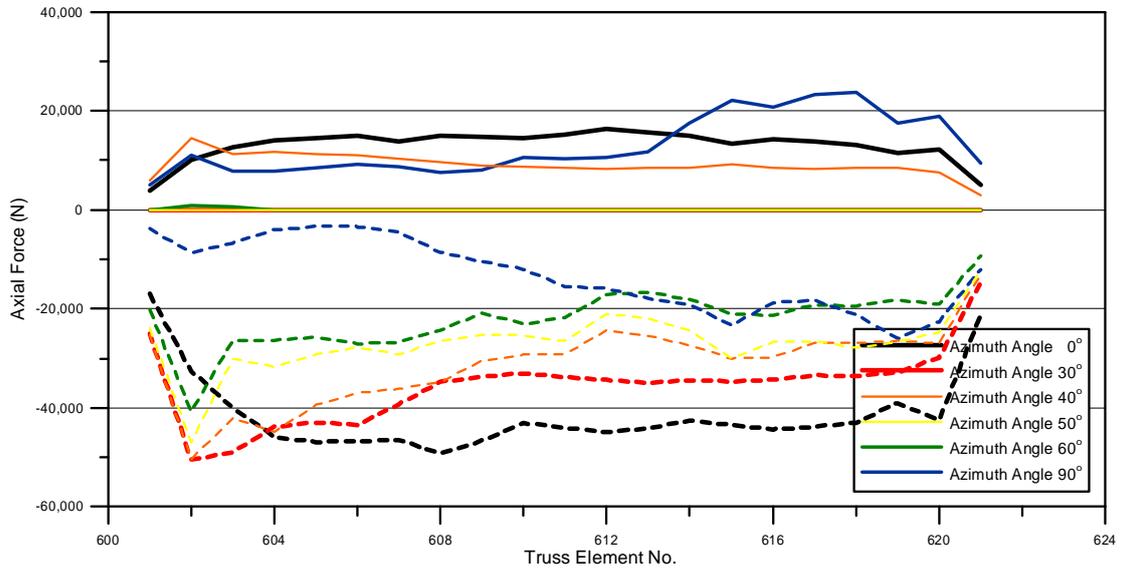


圖 4-24 斜撐桿件軸力極值圖

資料來源：本研究整理

3. 屋頂坡度 1:4 建築物屋頂上之太陽光電板支撐結構內力

斜率 1:4 屋頂，分別針對 0 至 90 度風攻角第一排光電板 (p1) 與 90 至 180 度第三排光電板 (p3) 建立 MIDAS 數值模型，並加載符合實場設計風速 (42.5 m/sec) 之歷時風壓資料進行結構動力歷時分析。分析成果敘述如下：

如同圖 4-25a、4-26a 所示，當風攻角為 0 度時，p1 柱軸力大致呈現左右對稱的分佈形式。攻角增至 10 度時 p1 兩側柱軸力仍屬對稱分佈。攻角增加至 20、30 度時，p1 左側柱桿件軸力則呈現略高於右側之態勢。

圖 4-25、4-26 顯示，當風攻角增加至 90 度時，風向與光電板平行，風壓係數趨近於零。此時，p1、p3 右側 (下游) 桿件仍因擾動風壓較大，以致軸力值略高於左側 (上游) 桿件。風攻角轉至 90 至 120 度時，p3 右側柱軸壓力逐漸大

於左側。當風攻角達到 150 度時，兩側柱桿件產生最大軸壓力，並呈現左右近乎對稱方式分佈。當風攻角轉至 180 度時，柱桿件之軸力仍大致呈現對稱分佈，但極大值較 150 度攻角時已下降許多。

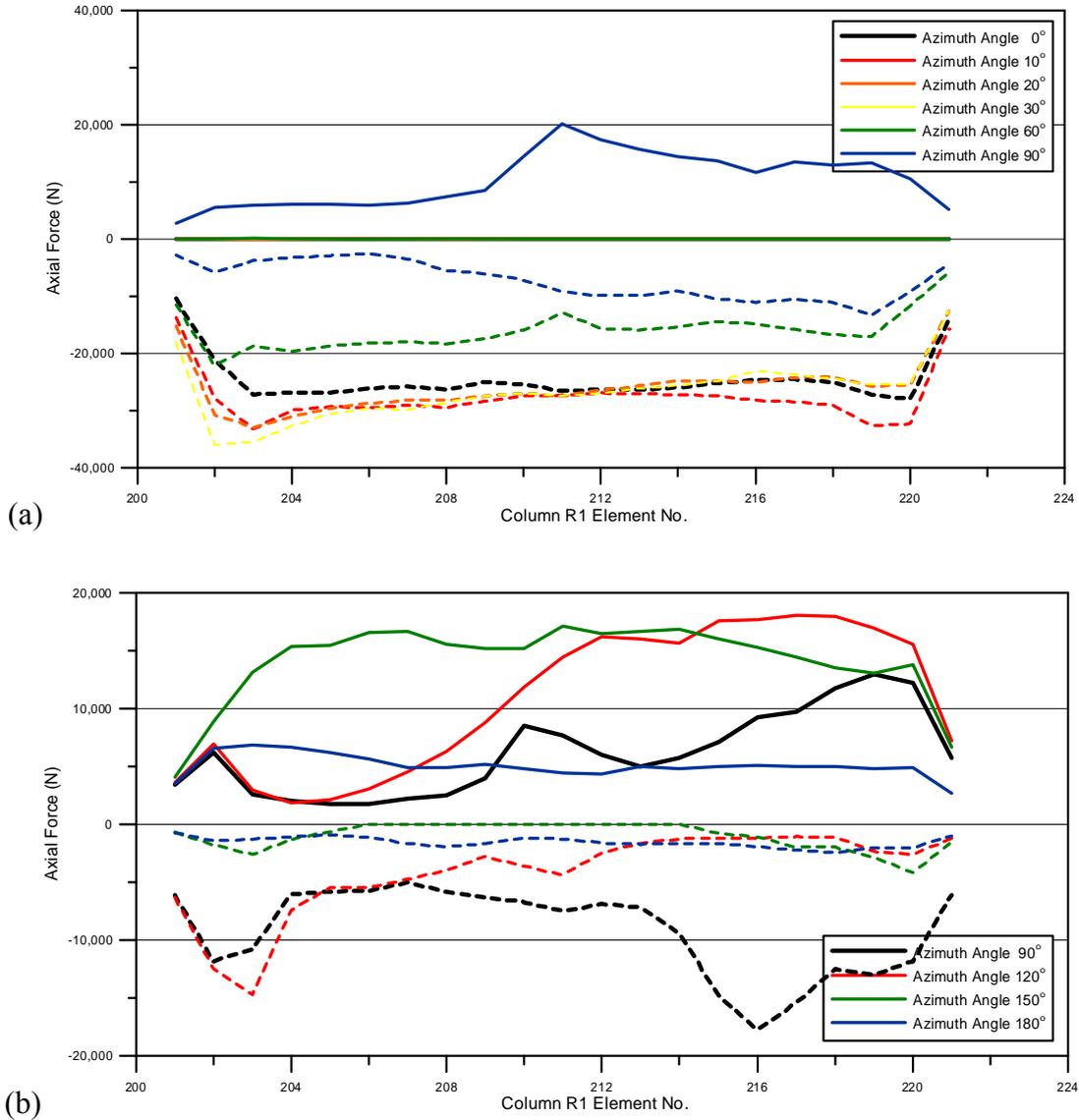


圖 4-25 柱桿件軸力極值圖，(a) p1 前排柱桿件軸力極值圖，(b) p3 前排柱桿件軸力極值圖。

資料來源：本研究整理

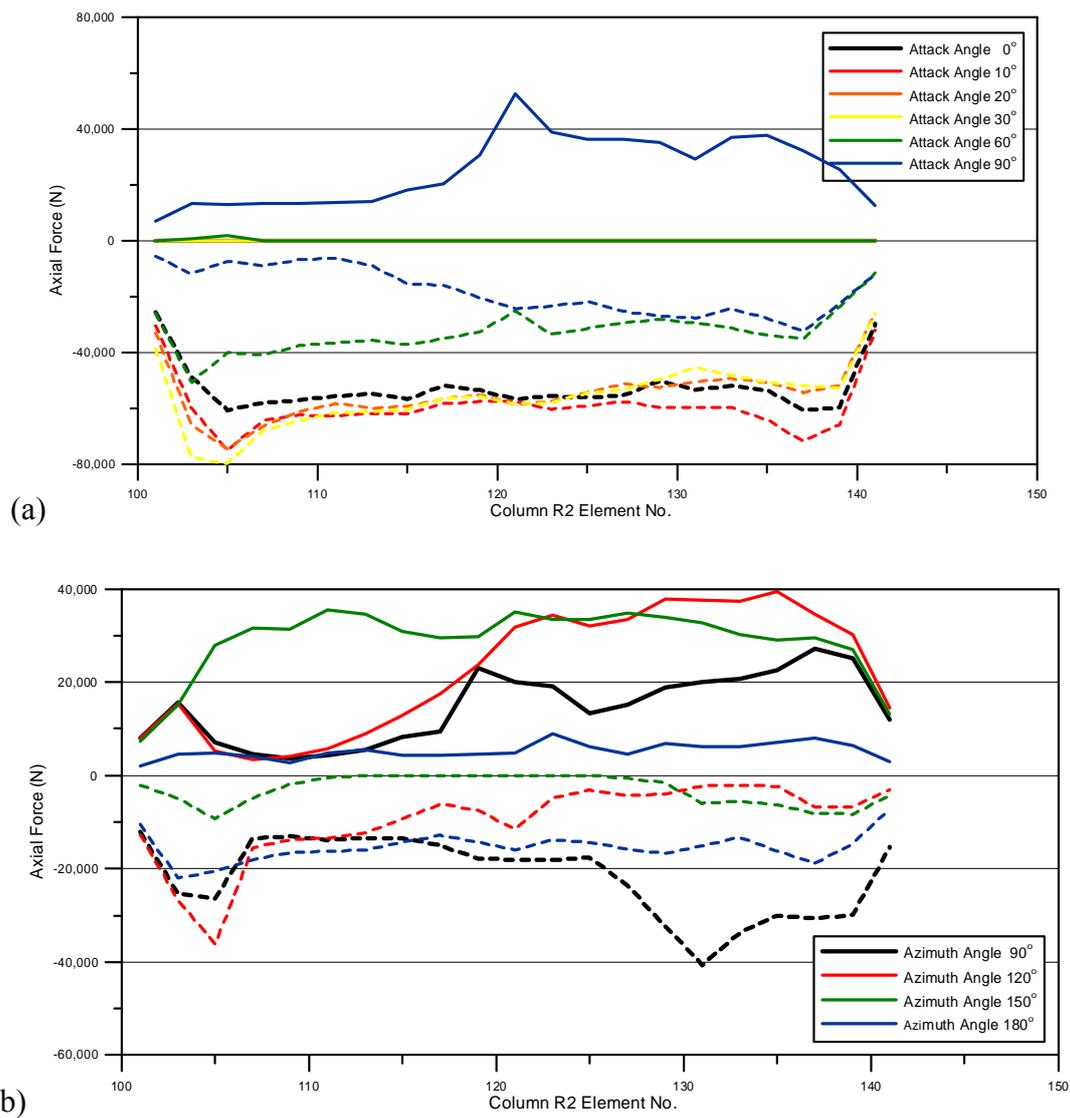


圖 4-26 柱桿件軸力極值圖，(a) p1 後排柱桿件軸力極值圖，(b) p3 後排柱桿件軸力極值圖。

資料來源：本研究整理

圖 4-27~4-28 顯示，風攻角為 0 至 180 度時，橫梁桿件彎矩與剪力均呈現右側桿件較大的分佈形式，p1 橫梁最大剪力與彎矩產生於 0 至 30 度風攻角。p3 橫梁最大剪力與彎矩則產生於 90 至 120 度風攻角。

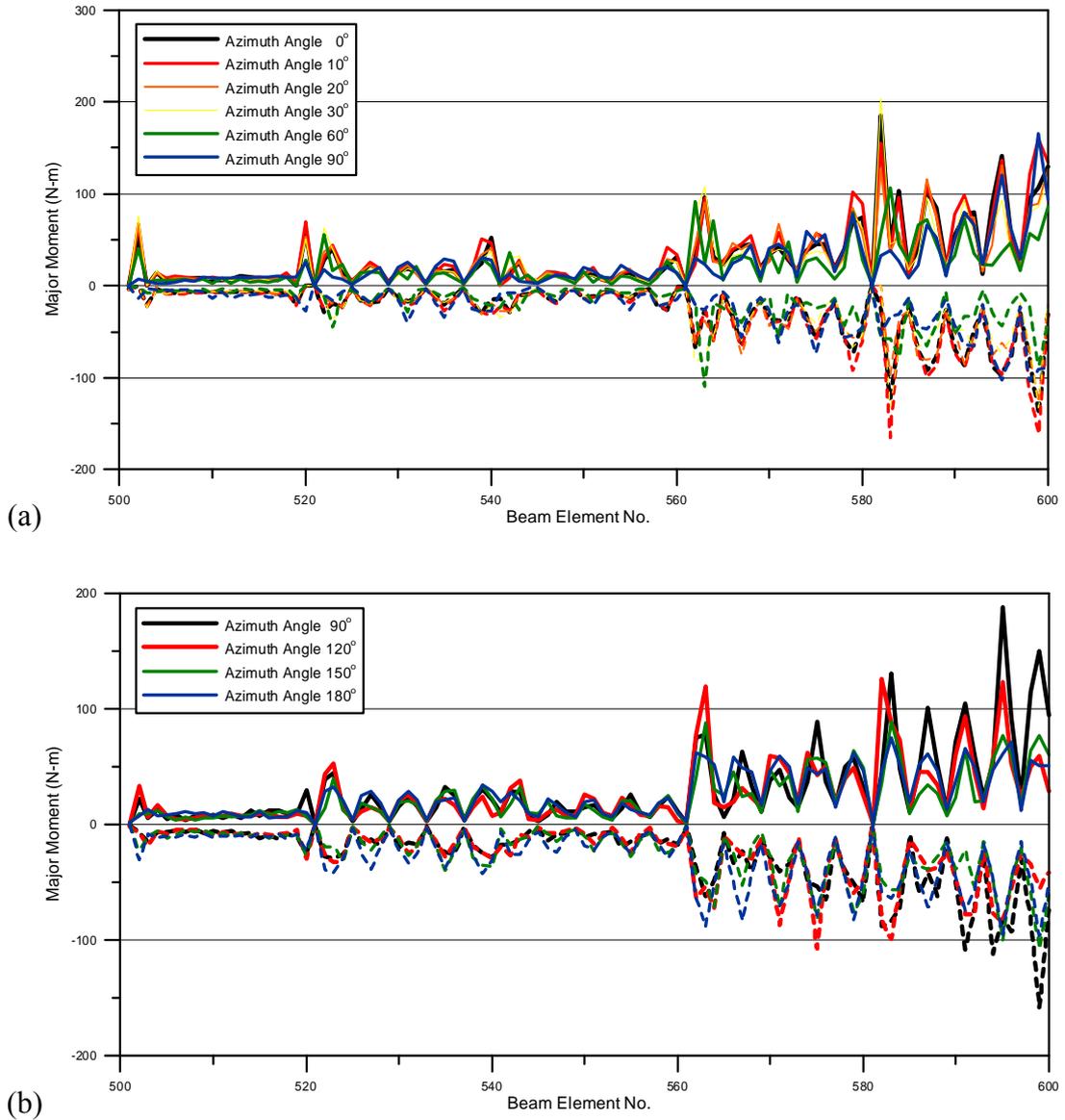


圖 4-27 橫梁桿件內力極值圖，(a) p1 p1 橫梁桿件彎矩極值圖，(b) p3 橫梁桿件彎矩極值圖。

資料來源：本研究整理

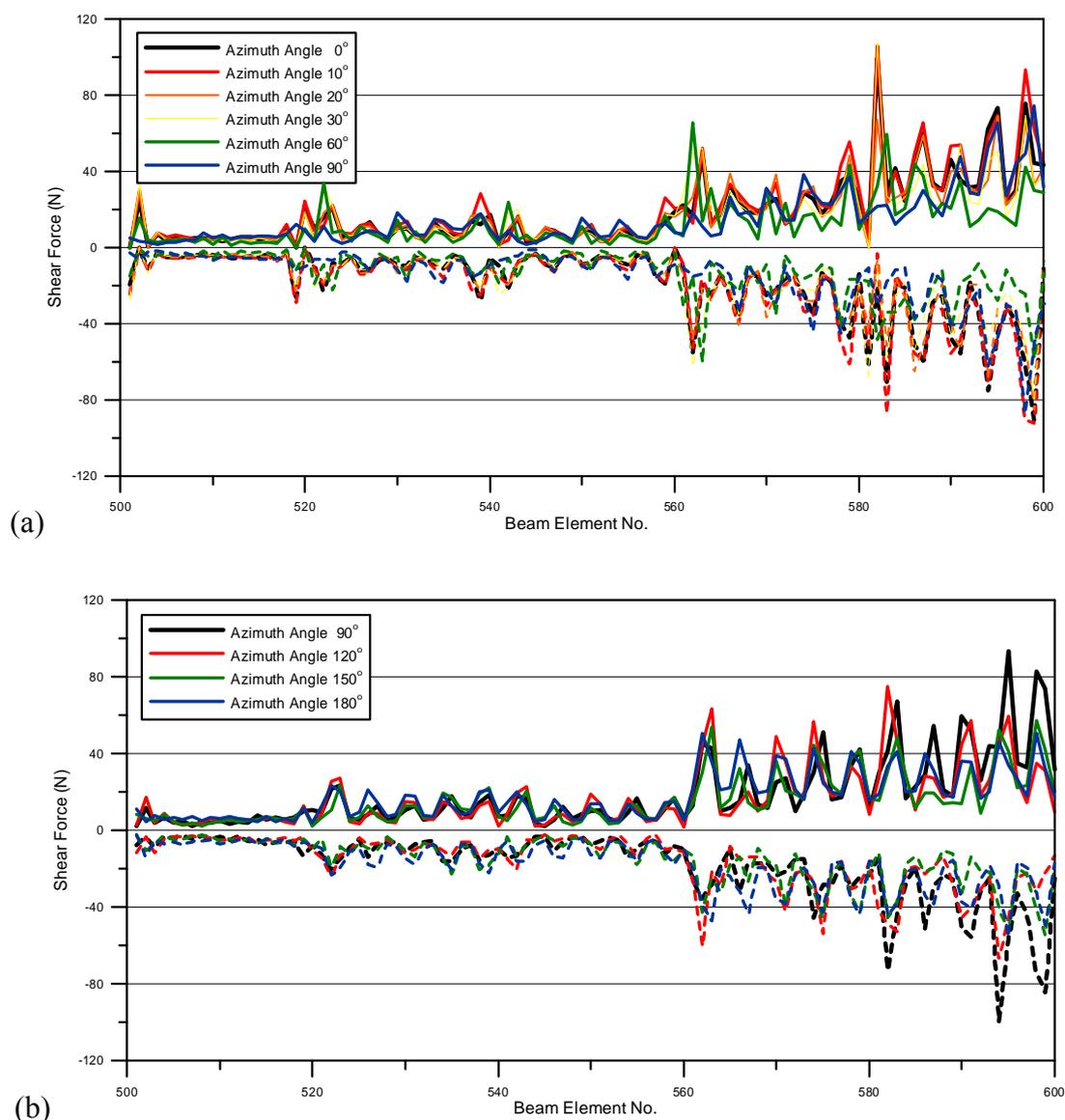


圖 4-28 橫梁桿件剪力極值圖(a) p1 橫梁桿件剪力極值圖，(b)p3 橫梁桿件剪力極值圖。

資料來源：本研究整理

p1 斜梁桿件的彎矩與剪力反應趨勢大致隨攻角轉變而呈現有所不同。當風攻角為 10 至 60 度時，p1 斜梁桿件彎矩與剪力大致呈現左右對稱的分佈形式。而風攻角轉為 90 度時，p1 右側斜梁桿件彎矩與剪力反應均略高於左側桿件（圖 4-29a、4-30a）。

p3 斜梁桿件在風攻角為 90 至 120 度時，其彎矩與剪力反應趨呈現右側略高於左側之態勢。當風攻角轉為 150 度時，p3 斜梁桿件彎矩與剪力反應呈現左右大致對稱的分佈形式。而當風攻角轉為 180 度時，p3 左側斜梁桿件彎矩與剪力反應則略高於右側桿件（圖 4-29b、4-30b）。

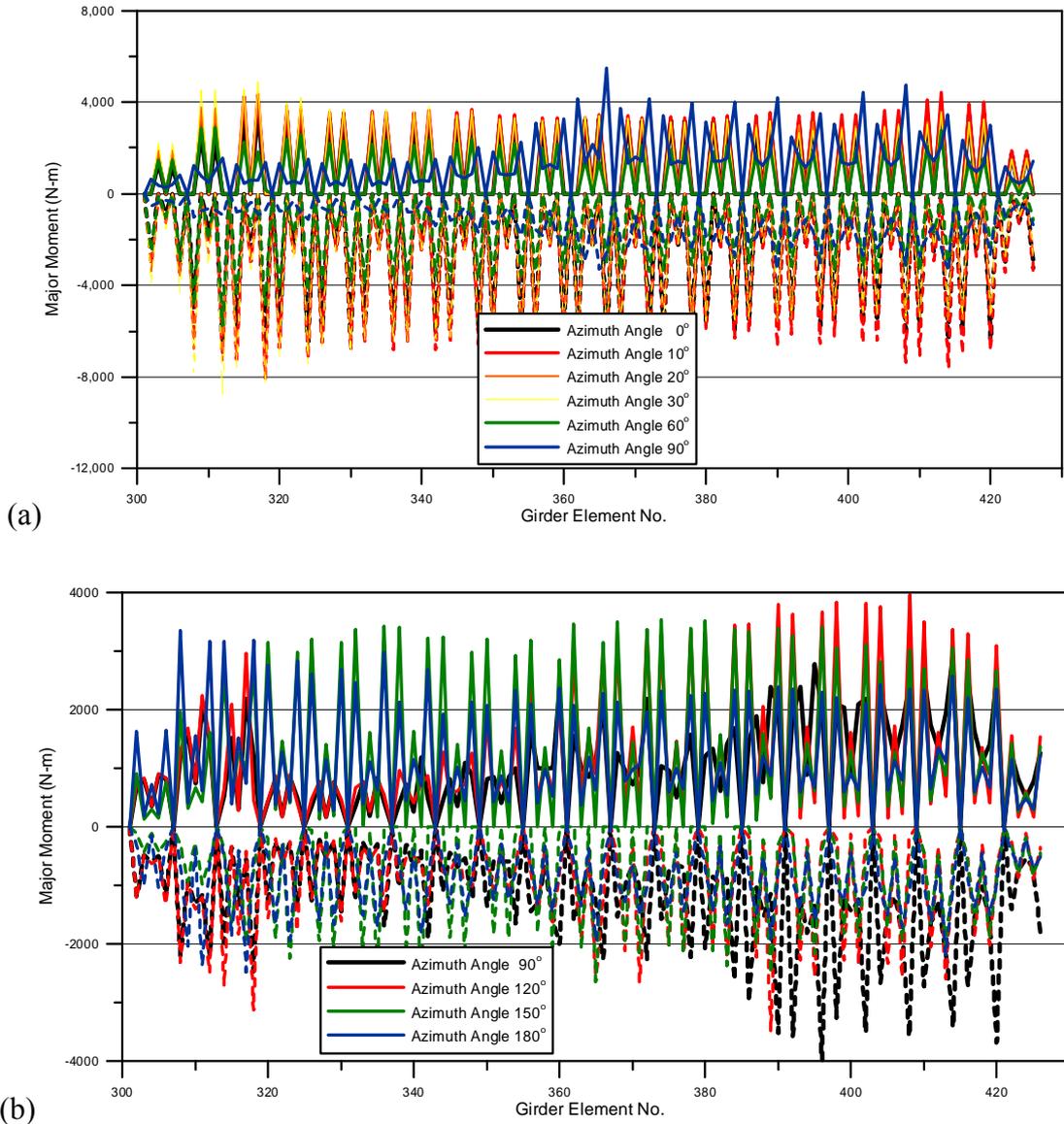
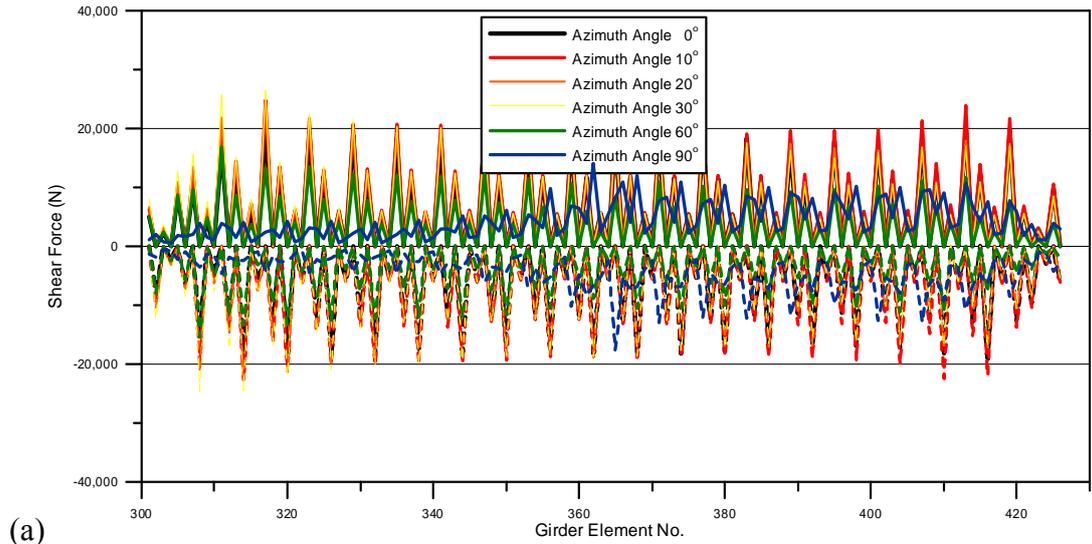
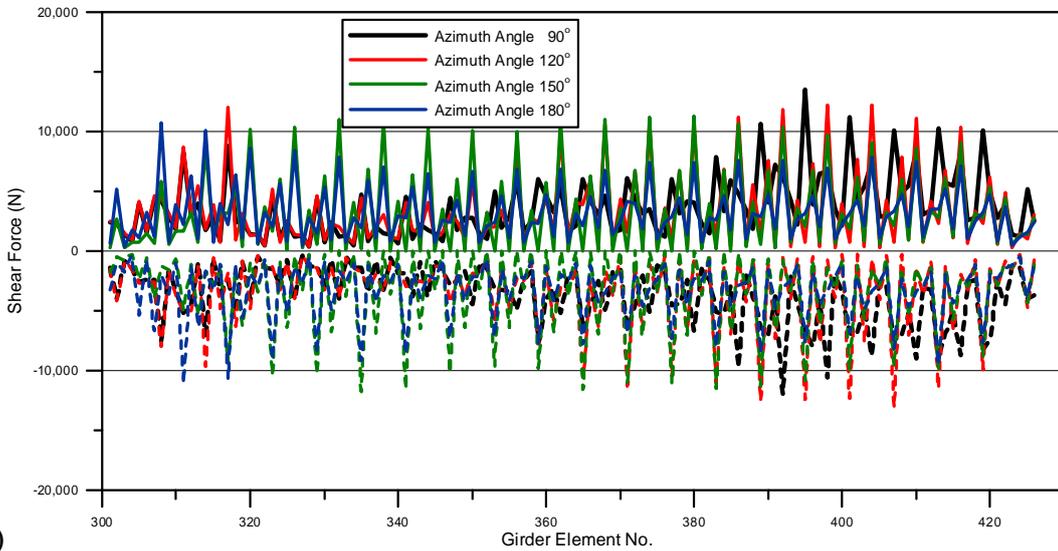


圖 4-29 橫梁桿件剪力極值圖(a) p1 橫梁桿件彎矩極值圖，(b)p3 橫梁桿件彎矩極值圖。

資料來源：本研究整理



(a)



(b)

圖 4-30 斜梁桿件剪力極值圖(a) p1 斜梁桿件剪力極值圖，(b)p3 斜梁桿件剪力極值圖。

資料來源：本研究整理

斜撐桿件軸力趨勢基本與柱軸力相仿，風攻角 0 至 60 度時，p1 斜撐軸力大致呈左右對稱形式。當風攻角轉為 90 度時，屋頂右側斜撐桿件軸拉力明顯受到較大的擾動風壓所影響，p1 及 p3 斜撐桿件軸拉力略高於屋頂左側之斜撐桿件。當風攻角轉為 120 度時，p3 左右兩側斜撐桿件軸力差距達到最大。之後當風攻

角達到 150 度時 p3 斜撐桿件軸拉力極值又呈現左右對稱的分佈型態。直到 180 風攻角時，p3 左側斜撐桿件軸力再度呈現略高於右側之態勢。

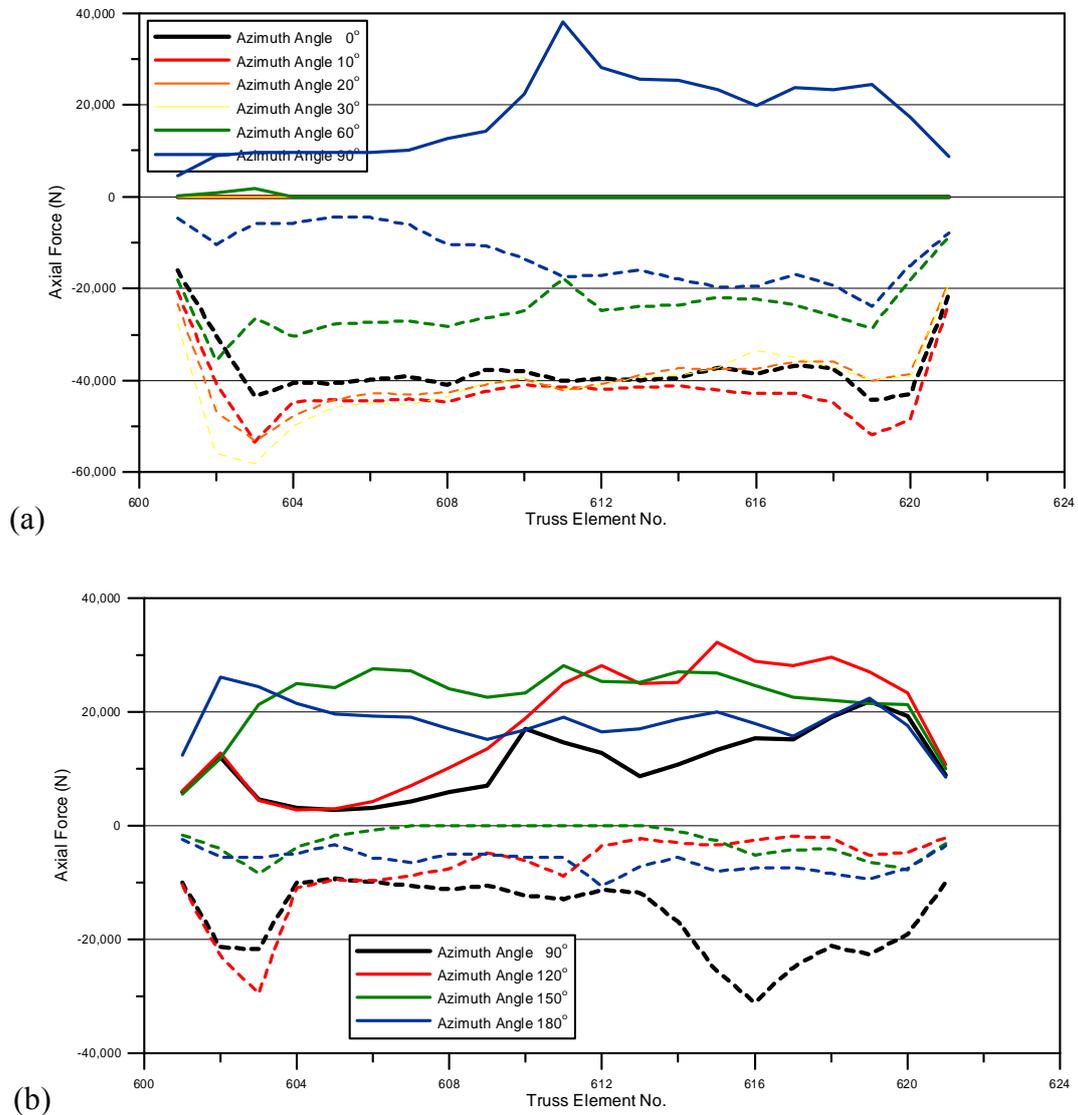


圖 4-31 斜撐桿件軸力極值圖(a) p1 斜梁桿件軸力極值圖，(b)p3 斜梁桿件軸力極值圖。

資料來源：本研究整理

4. 屋頂坡度 1:8 建築物屋頂上之太陽光電板支撐結構內力

屋頂坡度 1 : 8 之建築物，針對 0、10、20、30、60、90 度等攻角，進行第

一排光電板風洞實驗時序列數據動力歷時分析，所得分析成果敘述如下：

如圖 4-32 所示，當風攻角為 0 度時，柱軸拉力（負值）已呈現左側桿件略高於右側之趨勢。隨著風攻角的增加，位於屋頂側緣光電板受到較強渦流影響，因此左側角隅柱桿件軸力隨風攻角由 20 度增加至 30 度時，軸拉力明顯地高於右側柱。當風攻角增加至 90 度時，風向與光電板平行，風壓係數接近零，右側（下游）桿件同樣因擾動風壓較大因素，以致軸力值略高於左側（上游）桿件。

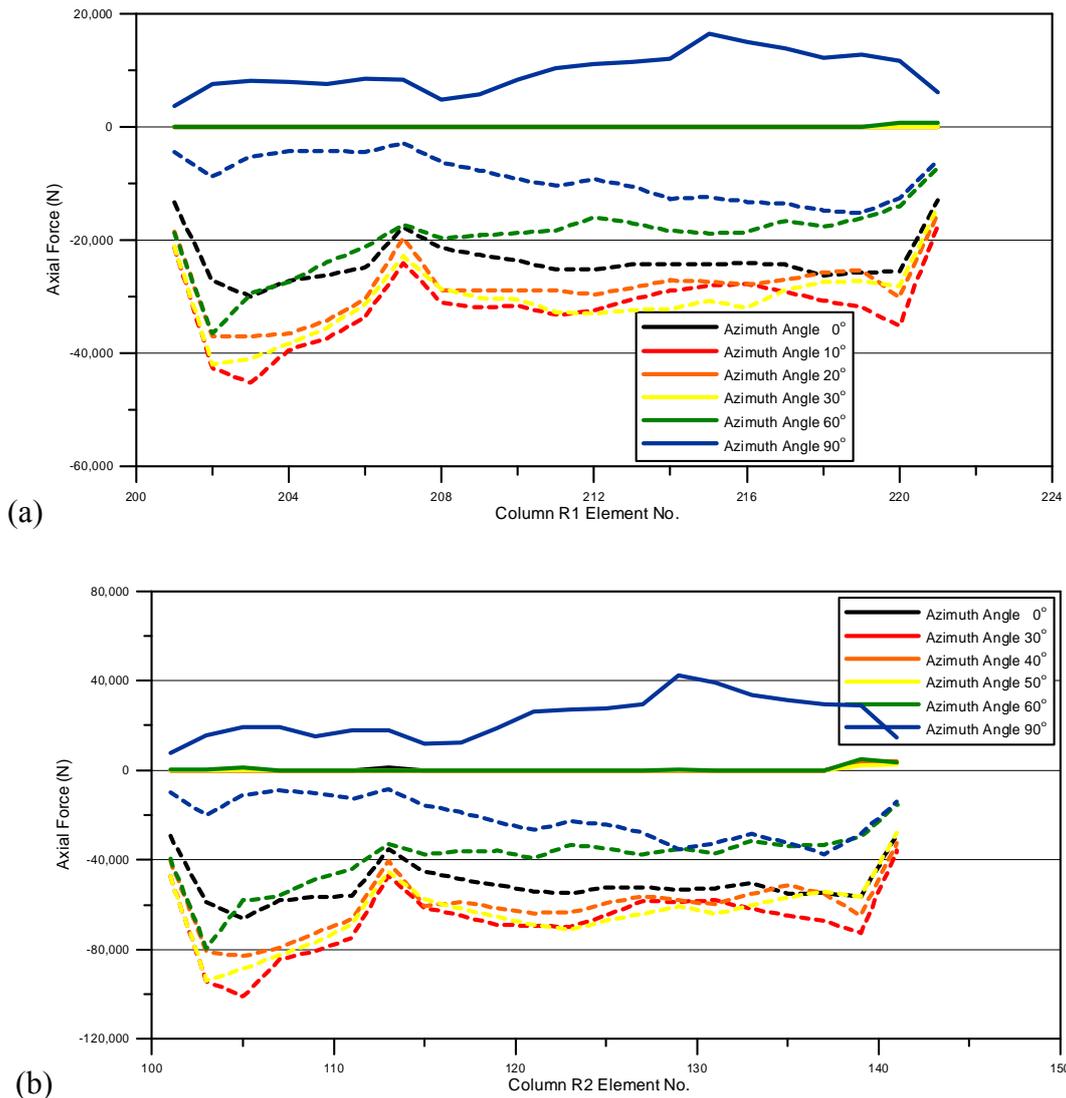


圖 4-32 柱桿件軸力，(a) 前排柱桿件軸力極值圖，(b) 後排柱桿件軸力極值圖

資料來源：本研究整理

橫梁桿件在 0 度攻角至 90 度攻角範圍內，大致保持著右側橫梁桿件彎矩與剪力均高於左側桿件之分佈態勢，如圖 4-33 所示。而橫梁桿件最大彎矩與剪力多出現在攻角 10 度至 60 度間。

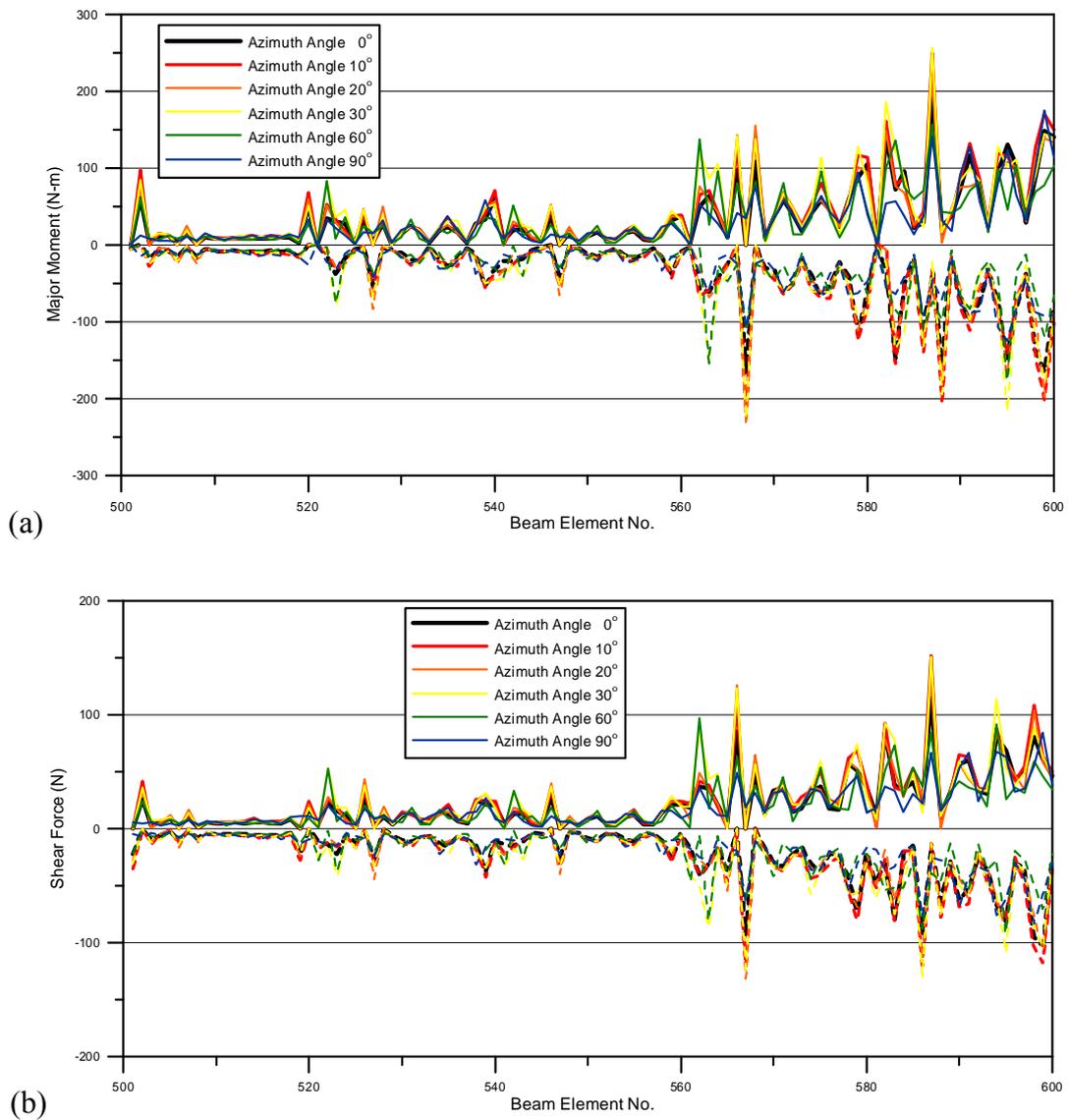


圖 4-33 橫梁桿件內力，(a)橫梁桿件彎矩極值圖，(b)橫梁桿件剪力極值圖

資料來源：本研究整理

斜梁桿件的彎矩與剪力反應趨勢在 90 攻角之前均呈現左側桿件高於右側桿件之分佈形式，圖 4-34 所示。當風攻角達到 90 度時，斜梁彎矩與剪力分佈反轉呈現右側桿件高於左側桿件之情形。

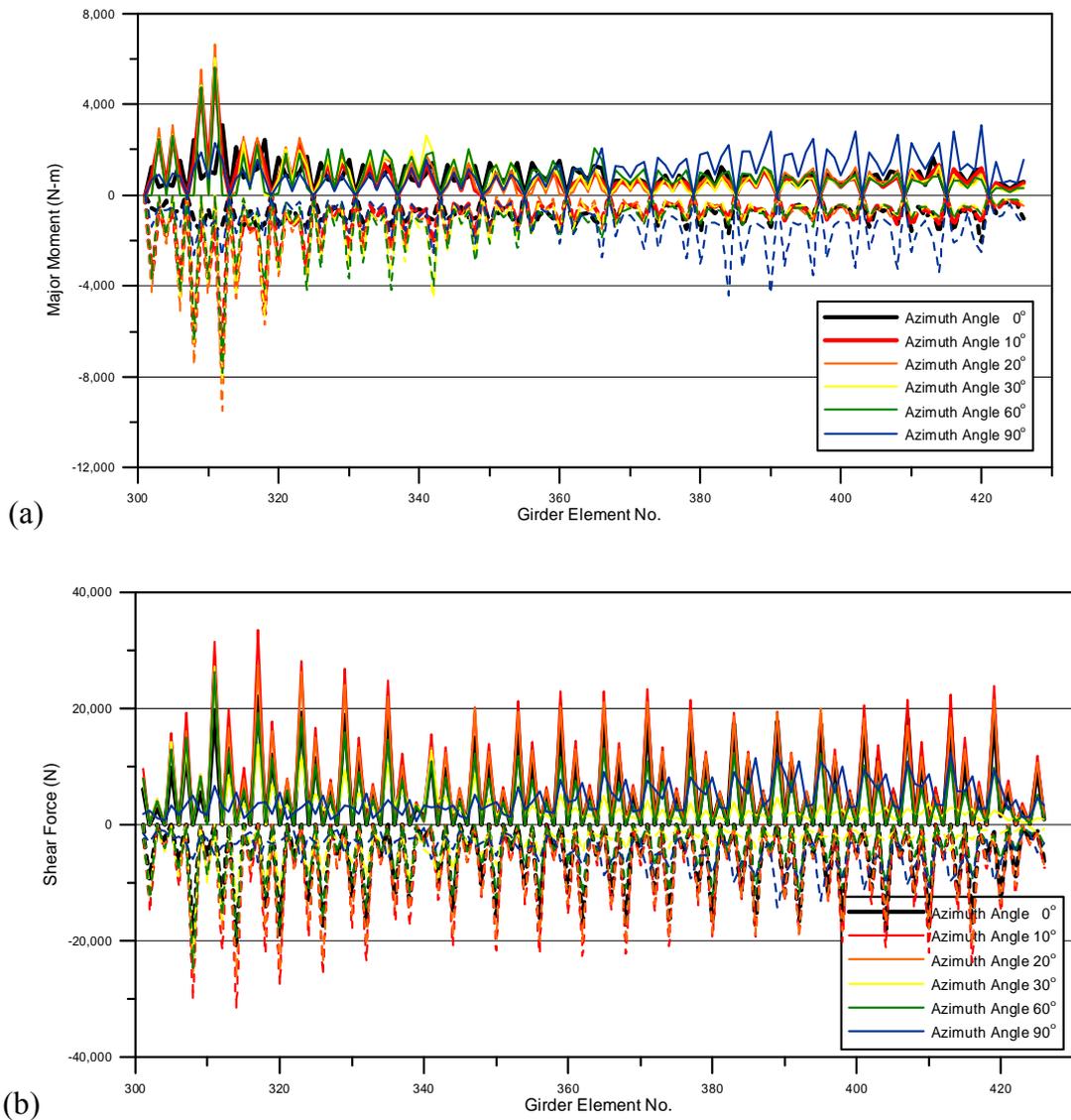


圖 4-34 斜梁桿件內力，(a)斜梁桿件彎矩極值圖，(b)斜梁桿件剪力極值圖

資料來源：本研究整理

斜撐桿件軸力趨勢同樣與柱桿件軸力相仿。風攻角 0 度時，斜撐軸拉力大致呈現左側桿件略高於右側之分佈形式。風攻角轉為為 10 至 30 度時，屋頂左側斜撐桿件軸拉力明顯受到較大的擾動風壓所影響，軸拉力明顯高於屋頂右側斜撐桿件。當風攻角轉為 90 度時，下游處的斜撐桿件軸力同樣則略高於上游之斜撐桿件，如圖 4-35 所示。

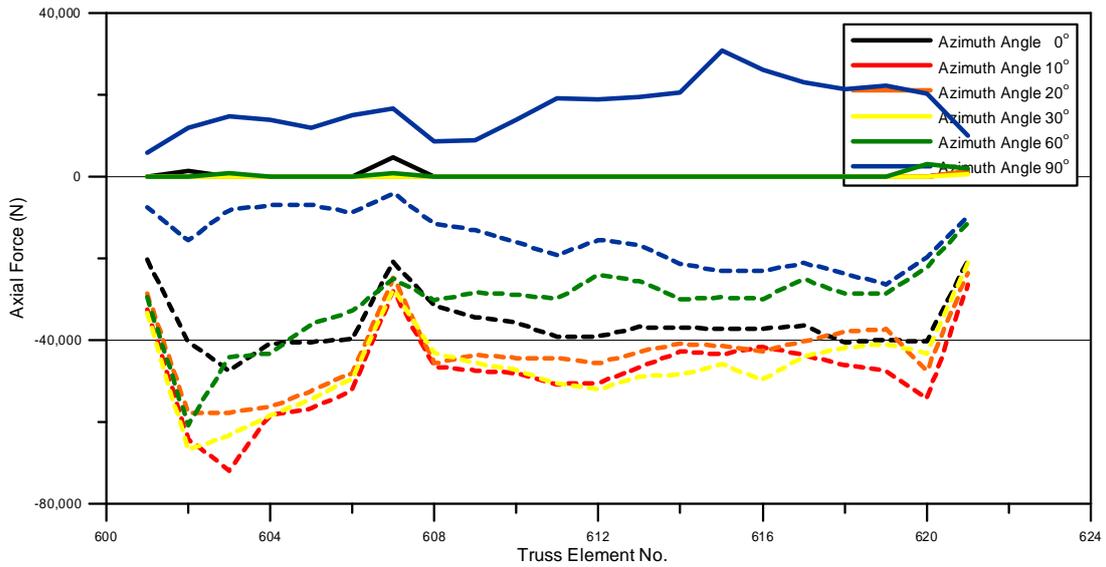


圖 4-35 斜撐桿件軸力極值圖

資料來源：本研究整理

第三節 太陽能支撐架結構改善分析

太陽能支撐架結構改善數值分析模型，乃根據業界常用 C 型冷作輕型鋼斷面結構型式加以改善，原結構示意圖如圖 4-15(a)所示。由於原支撐架結構桿件間連接方式多採用螺栓固鎖，因此桿件端部無法傳遞彎矩。建議使用銲接方式連結桿件，增加結構靜不定度並提高支撐架穩定性。

太陽能支撐架結構改善方式，首先將前排短柱後移至斜梁中央處，可增加斜梁中段支撐效果，並將中央橫梁負載之風力直接引導至短柱支承處，減少因力量傳遞而增加之桿件負荷，如圖 4-36 所示。另增加前排斜撐桿件並連接至第二排橫梁位置，可將第二排橫梁所承受之風載重直接導引至支承處，減少斜梁桿件內力。

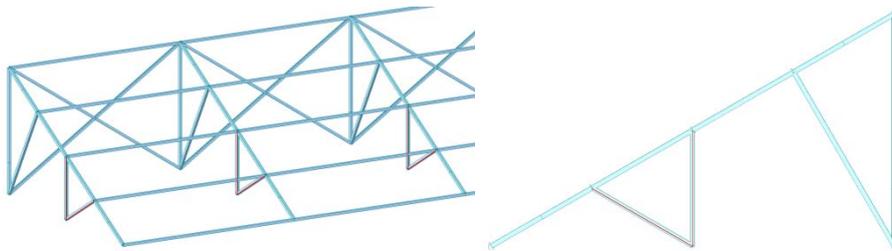


圖 4-36 前排短柱與斜撐連接位置示意圖

資料來源：本研究整理

原後排柱與斜撐位置均向後方移動，斜撐移至第四排橫梁位置下方，後排柱移至第五排橫梁位置下方。其目的同樣為引導橫梁內力至支承位置，並減少相鄰桿件內力傳遞，如圖 4-36 所示。增設後排長向斜撐，將直接分擔後排柱所分配得風力載重，並將其引導至後排支承，可有效降低後排柱桿件之軸力，如圖 4-37 所示。

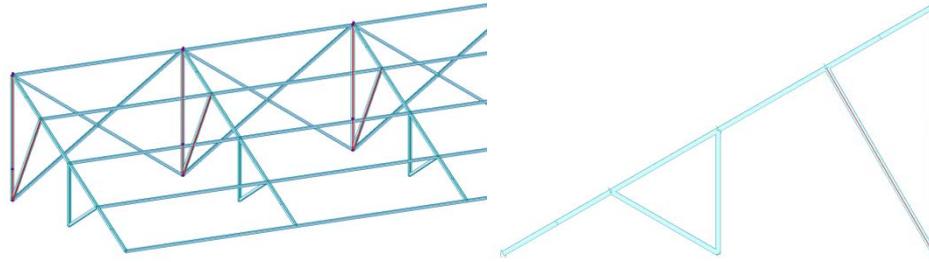


圖 4-37 後排柱與斜撐連接位置示意圖

資料來源：本研究整理

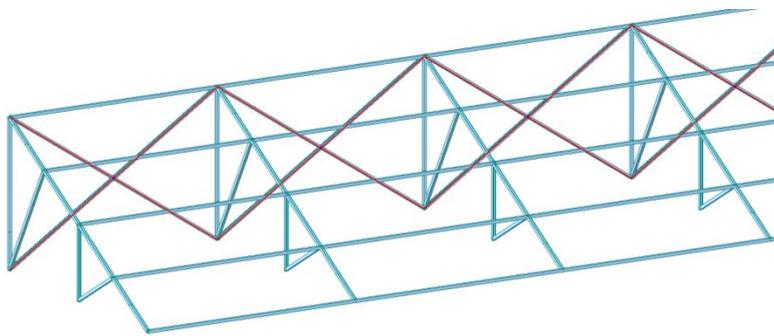


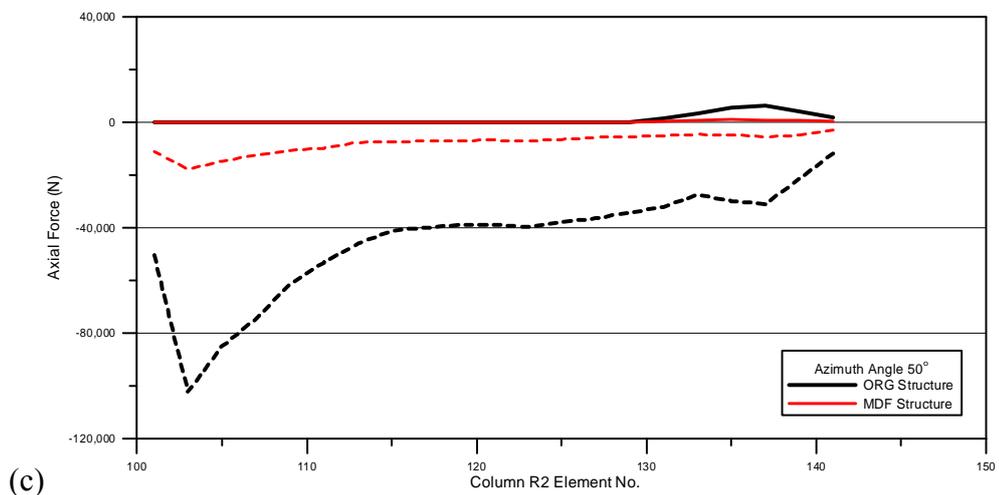
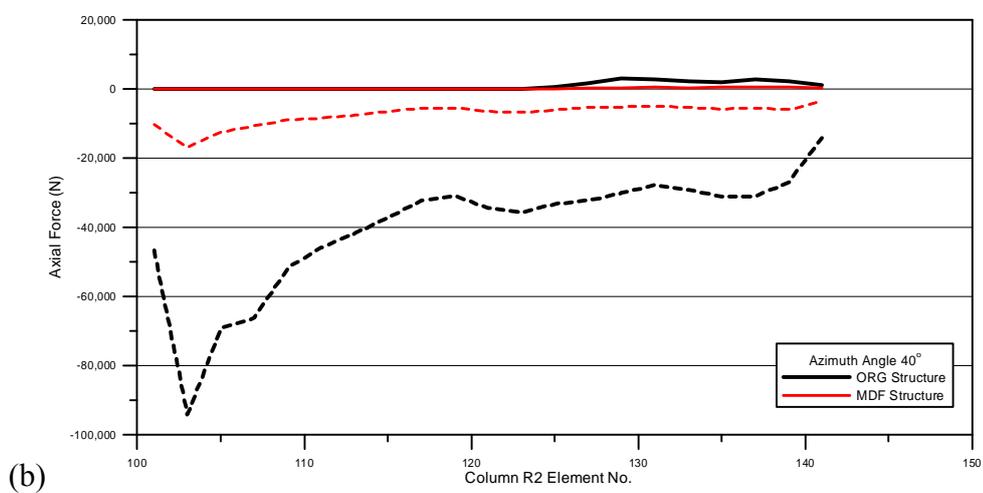
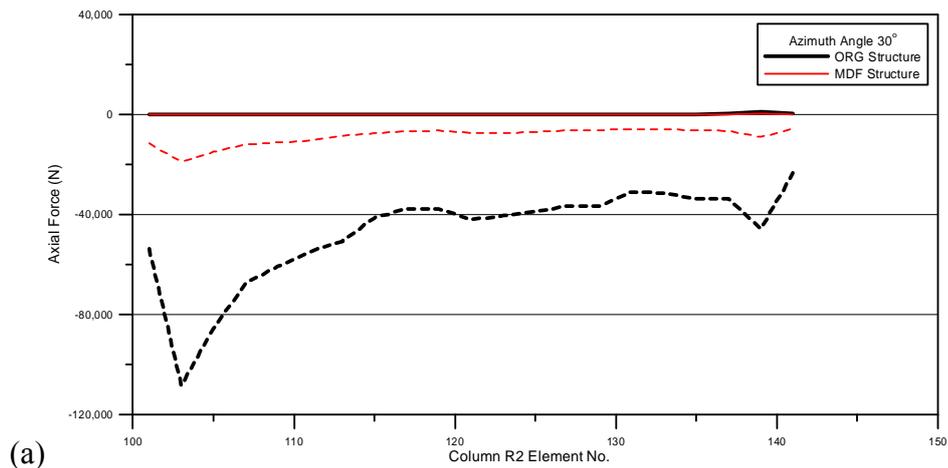
圖 4-38 後排長向斜撐連接位置示意圖

資料來源：本研究整理

結構分析案例以平屋頂密集配置光電板配合 30、40、50、60 度風攻角之風洞實驗數據，並將時序列風壓資料轉換為符合實場設計風速（42.5 m/sec）之歷時風壓資料，加載於 MIDAS 軟體所建立之數值模型進行結構動力歷時分析。分析成果詳述如下：

由於增加後排長向斜撐協助分攤、導引載重作用，改善後的結構後排柱桿件軸拉力（負值）明顯較原結構降低許多。而原本受到左側屋頂邊緣角隅渦流作用影響而產生應力集中的左側第二排柱，同樣因增設斜撐改善結構系統力量傳遞效應，應力集中現象已不如原結構般的明顯。

陽光屋頂耐風評估與設計準則



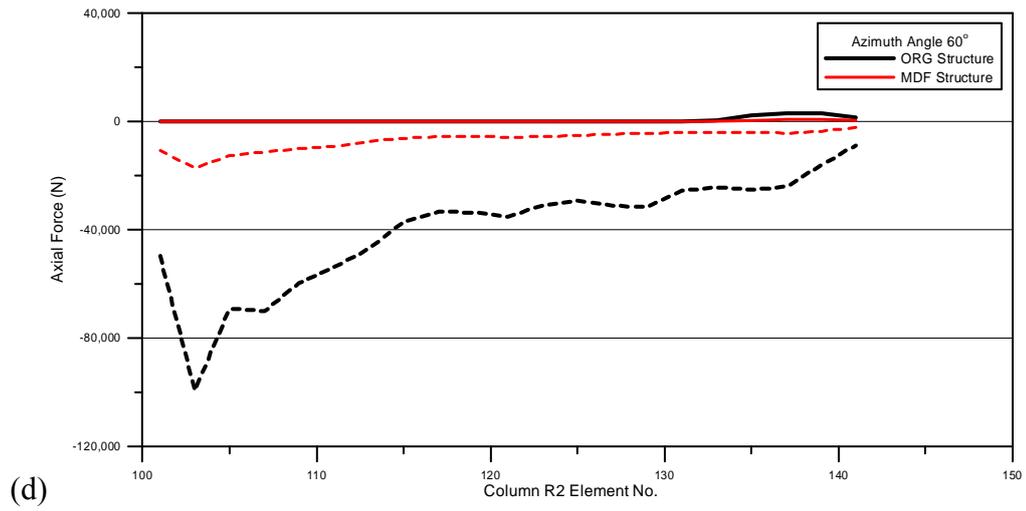


圖 4-39 不同風攻角作用下，後排柱桿件軸力極值圖，風攻角(a)30 度，(b)40 度，(c)50 度，(d)60 度。

資料來源：本研究整理

結構改善後載重多直接由斜撐及柱桿件傳遞至支承，故斜梁桿件之彎矩與剪力反應與原結構相比降已微乎其微，如圖 4-40 所示。

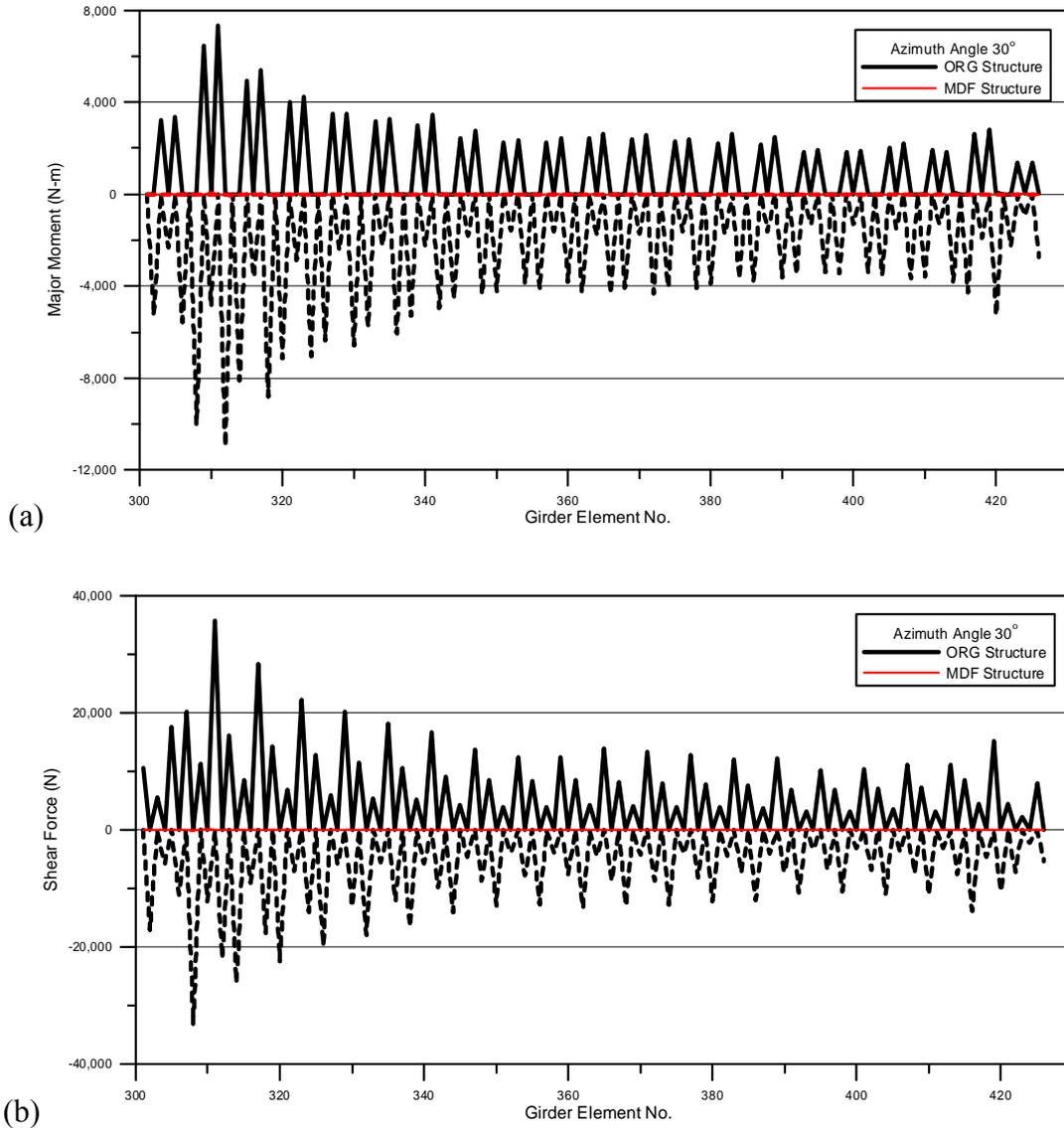
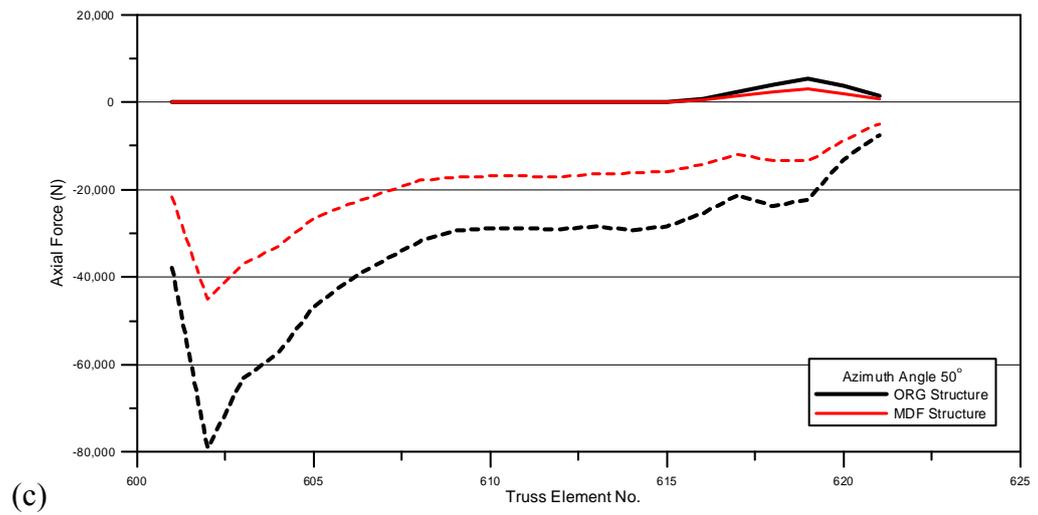
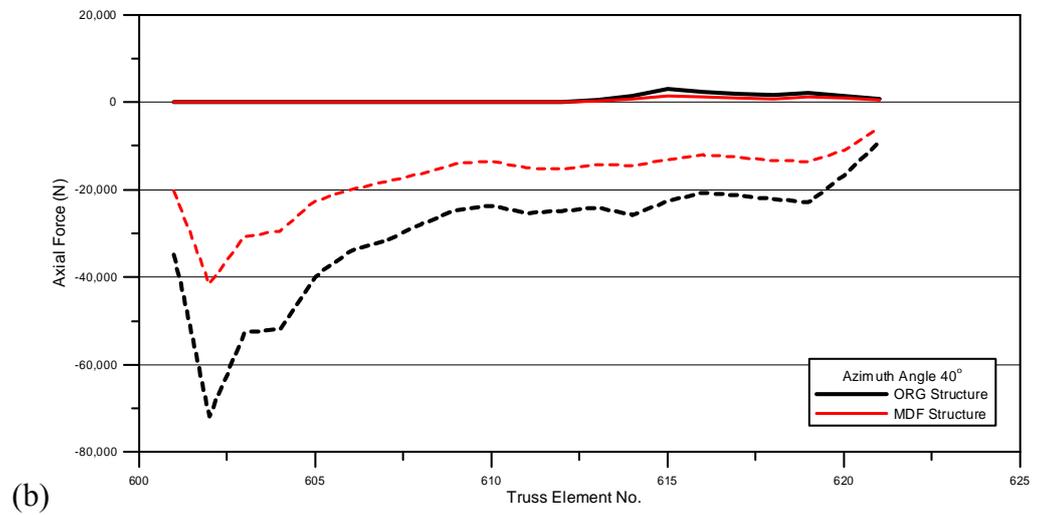
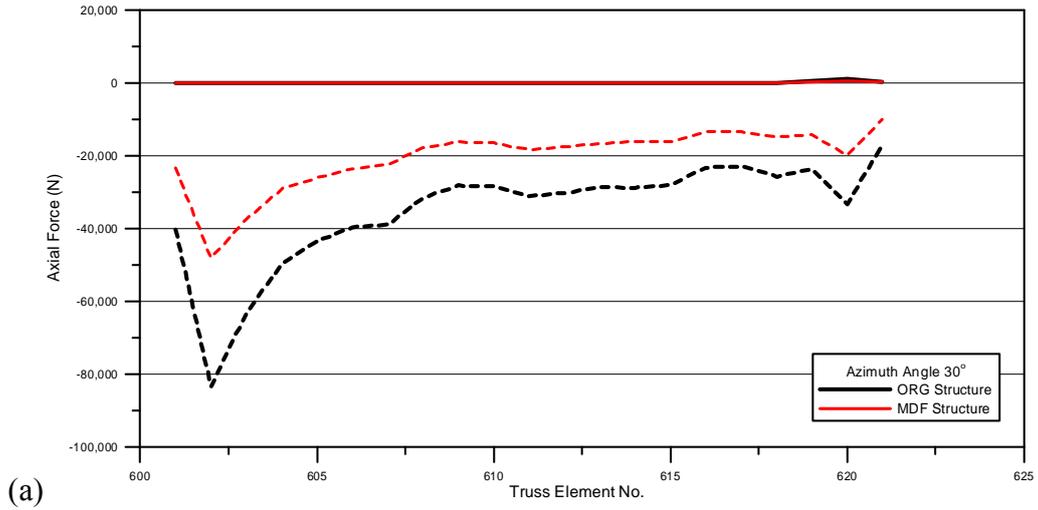


圖 4-40 風攻角 30 度時，斜梁桿件之(a)彎矩極值圖，(b)剪力極值圖。

資料來源：本研究整理

斜撐桿件軸力分佈趨勢基本與柱軸力相仿。由於原結構柱及斜撐桿件數量較少，無法均勻分配並直接傳遞至支承，以致許多桿件內力反應過大。結構系統改善後，由圖 4-41 可看出斜撐桿件內力已大幅降低，雖仍受角隅渦流影響，左側屋頂邊緣處之斜撐桿件軸力值仍相對較高，但軸力值已較原結構減少近四成。



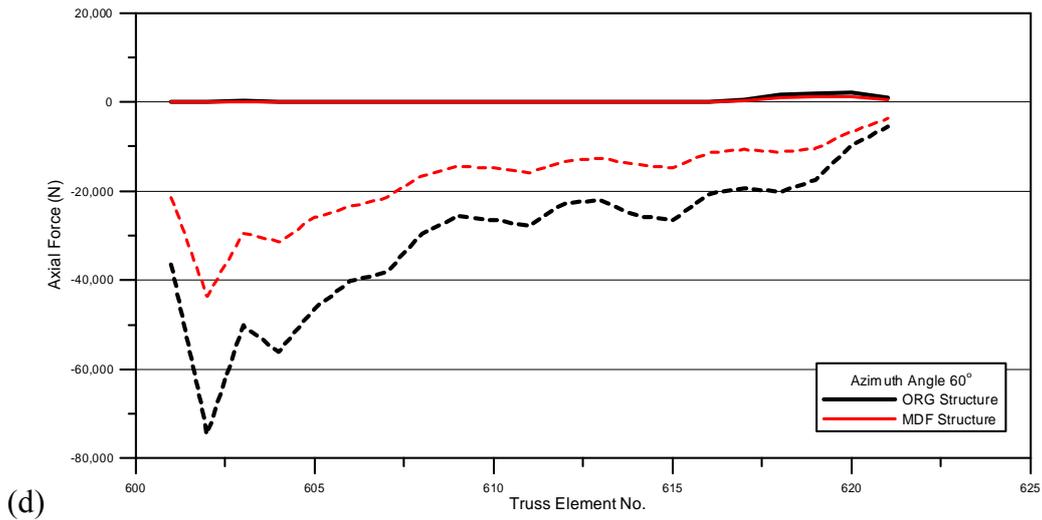


圖 4-41 不同風攻角作用下，斜撐桿件軸力極值圖，風攻角(a)30 度，(b)40 度，(c)50 度，(d)60 度。

資料來源：本研究整理

經比較太陽能支撐架結構系統改善前後之數值分析成果，可發現一般業界所採用之支撐架結構系統，桿件幾何佈置過於簡單（靜不定度過低），無法充分導引、疏通過於集中之力流。此種結構型式容易產生桿件內力過大與應力集中之不良影響。經本研究改善方案為多增加桿件將載重直接導引至支承，以有效降低桿件內力，減少局部桿件應力負荷。本研究之改善方案分析所得結果可知，支撐光電板的斜梁在多增加斜撐桿件，將載重直接導引至支承端後，可有效降低桿件內力，減少局部桿件應力負荷，本研究之計算案例中桿件應力(包括軸力、剪力、彎矩等)下降幅度均達 50%以上，同時大幅改善各桿件間應力分布不平均的現象。

第四節 規範與實驗值對支撐架結構分析比較

太陽能支撐架結構之風力載重，依照「建築物耐風設計規範」之「開放式建築物之斜屋頂局部構材及外部披覆物之設計風壓」進行計算分析。設計風壓計算如下：

$$p = q(h)GC_{pm} \quad (12)$$

其中風速壓計算公式定義如下：

$$q(h) = 0.06K(z)K_{zt}[IV_{10}(C)]^2 \quad (13)$$

由於太陽能支撐架中心高度距地面 41 公尺，且實驗以 C 地況流場為來流條件，故風速壓地況係數計算如下：

$$K(z) = 2.774(z/z_g)^{2 \times 0.15} = 2.774(41/300)^{2 \times 0.15} = 1.527 \quad (14)$$

再者，用途係數 I 取為 1.0，基本設計風速 $V_{10}(C)$ 取為 42.5 公尺，陣風反應因子 G 取為 1.88，靜風壓係數 C_{pn} 依我國建築物耐風設計規範之圖 3.3(a) 取為 -2.3。故太陽能光電板所承受之設計風壓，經計算為 -715.6 kgf/m^2 。

結構分析案例選擇平屋頂密集配置光電板配合實驗 40 度風攻角之風洞實驗數據，並將時序列風壓資料轉換為符合實場設計風速 (42.5 m/sec) 之歷時風壓資料，加載於 MIDAS 軟體所建立之數值模型進行結構動力歷時分析，並與採用「建築物耐風設計規範」設計風壓分析之成果比較。

由圖 4-42 柱軸力極值分析成果可發現，鄰近屋頂角隅邊緣處之柱桿件軸力由規範計算分析所得結果明顯低於由風洞實驗資料所進行歷時分析者，遠離屋頂邊緣處則顯示規範分析所得趨勢較為保守。橫梁桿件彎矩與剪力分析成果如圖 4-43、圖 4-44 所示，規範分析案例於大部分桿件均低於風洞實驗歷時分析所得者，顯示對此部分桿件規範件一直有低估的現象。斜梁桿件分析成果如圖 4-45 及圖 4-46 所示，大部分桿件於規範設計風壓加載所得之剪力與彎矩呈現較為保守之態勢，惟局部位置桿件彎矩與剪力峰值仍低於風洞實驗之分析成果。雖然大多數桿件依規範建議風壓值計算結果比實驗歷時資料分析結果更為保守，但

陽光屋頂耐風評估與設計準則

仍在部分區域如接近屋頂角隅附近有不保守的情形出現，因此藉由風洞實驗進行結構安全的檢核應屬必須。

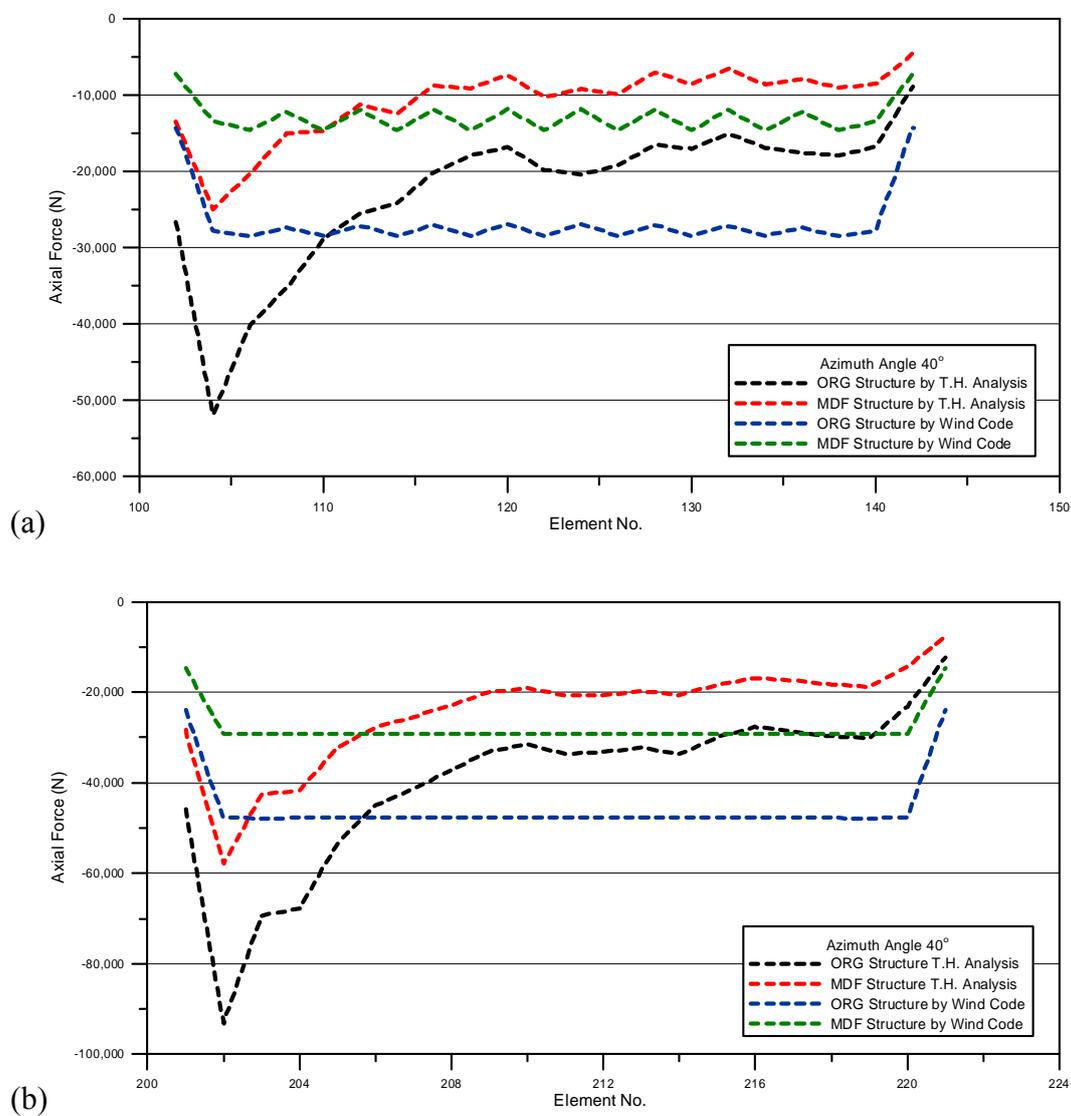


圖 4-42 風攻角 40 度，前後排柱桿件軸力極值圖，(a)後排柱，(b)前排柱

資料來源：本研究整理

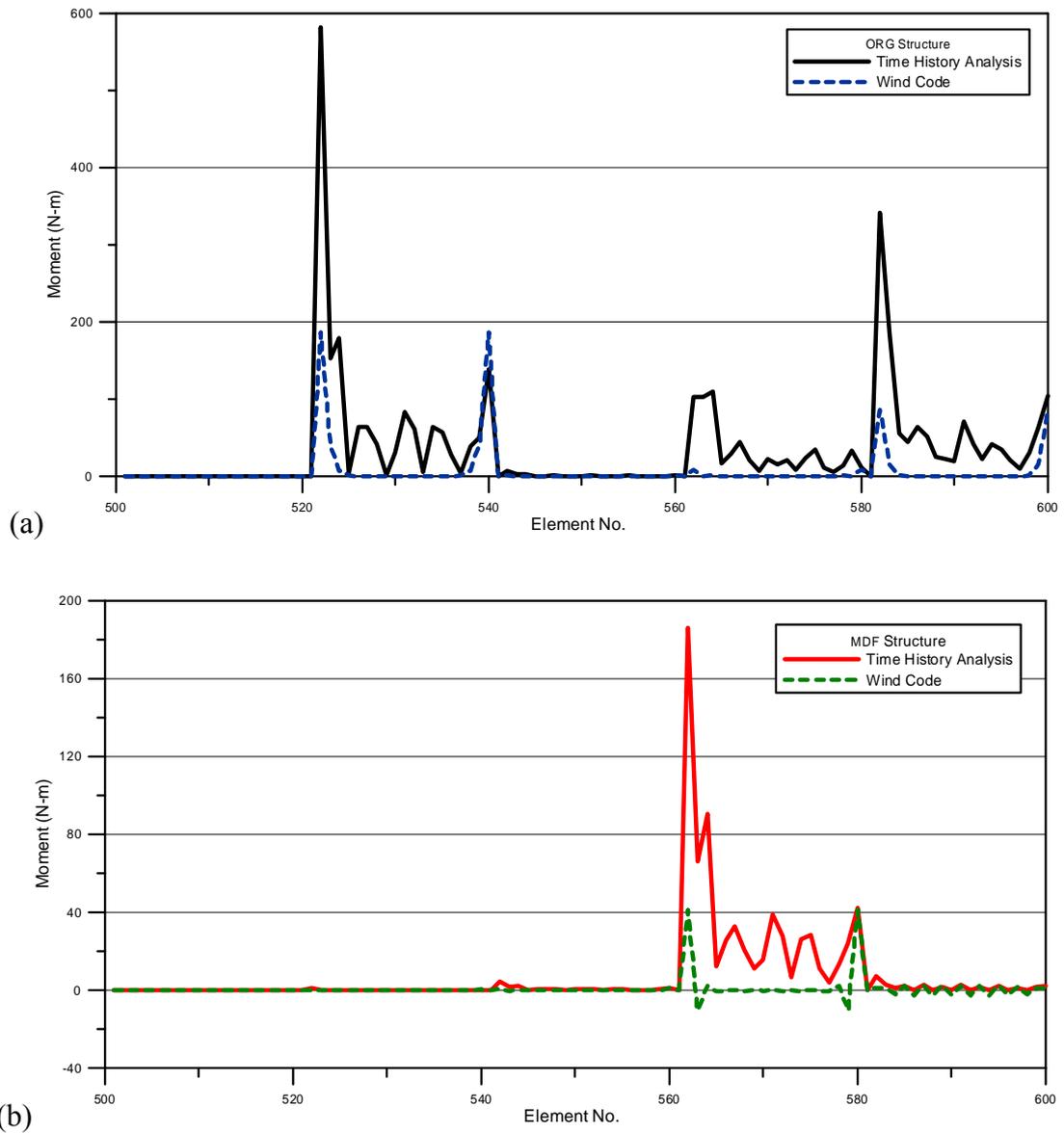


圖 4-43 風攻角 40 度時，(a)原結構橫梁桿件彎矩極值圖，(b)改善後結構橫梁桿件彎矩極值圖

資料來源：本研究整理

陽光屋頂耐風評估與設計準則

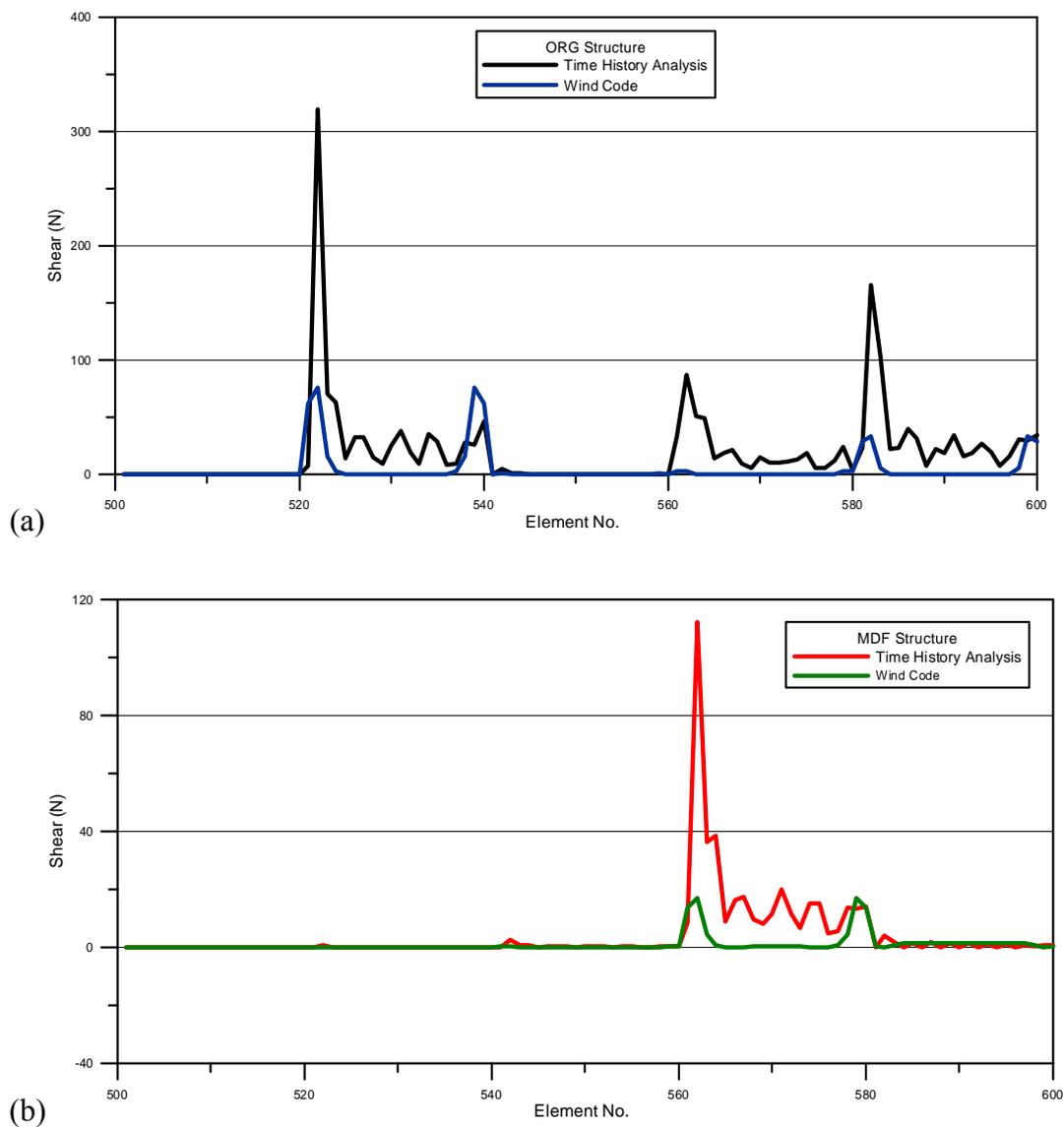


圖 4-44 風攻角 40 度時，(a)原結構橫梁桿件剪力極值圖，(b)改善後結構橫梁桿件剪力極值圖

資料來源：本研究整理

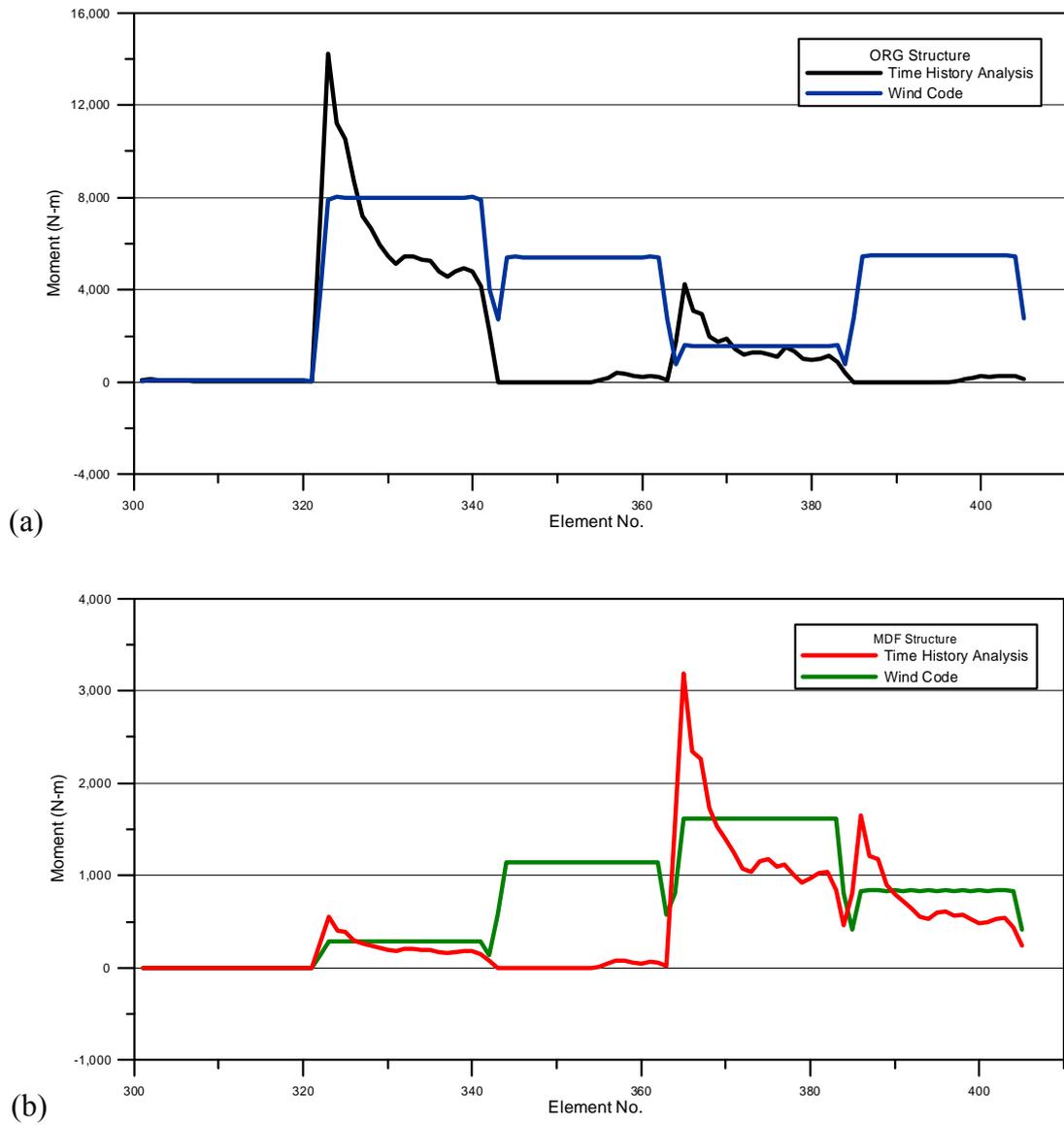


圖 4-45 風攻角 40 度時，(a)原結構斜梁桿件彎矩極值圖，(b)改善後結構斜梁桿件彎矩極值圖

資料來源：本研究整理

陽光屋頂耐風評估與設計準則

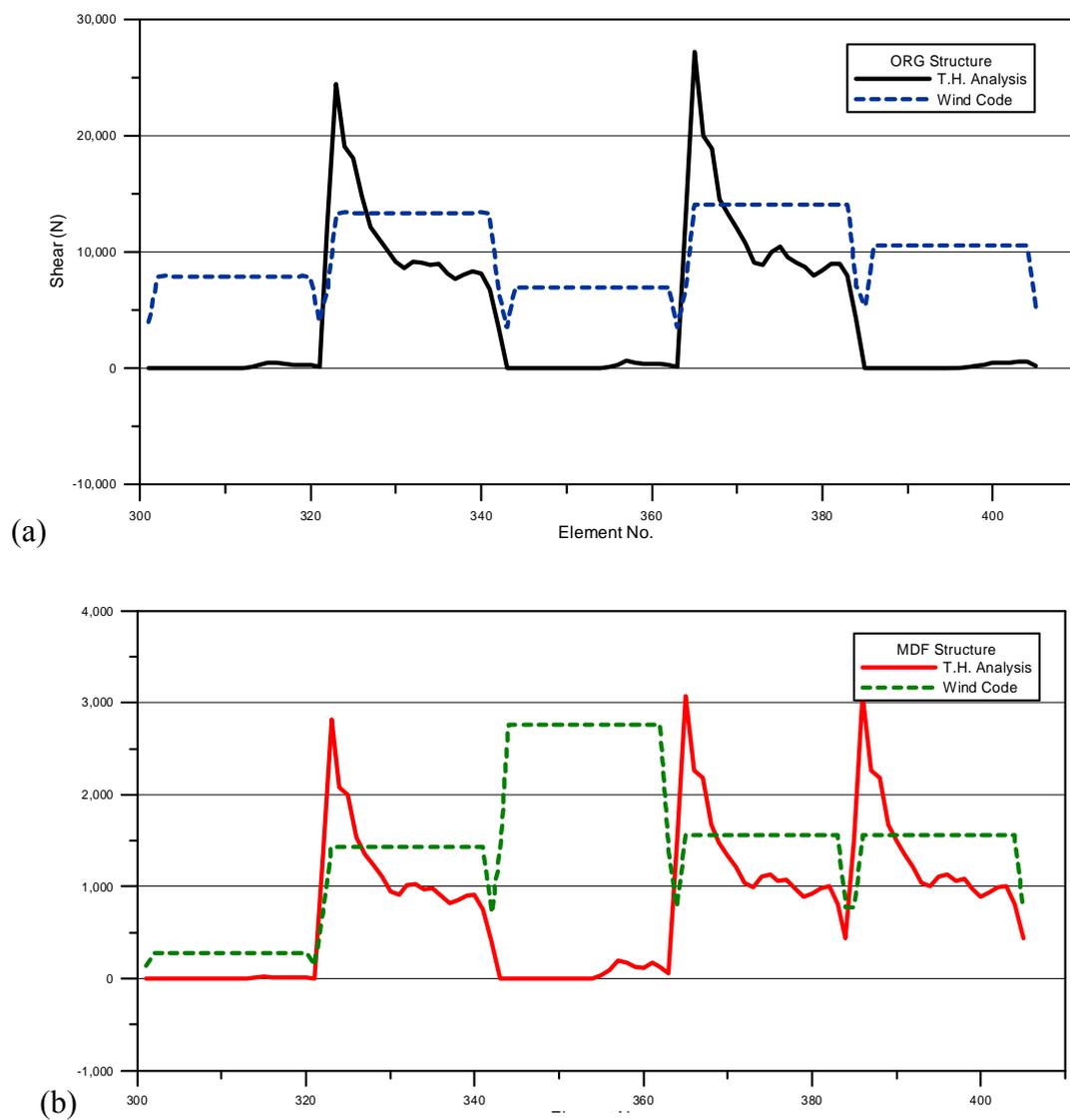


圖 4-46 風攻角 40 度時，(a)原結構斜梁桿件剪力極值圖，(b)改善後結構斜梁桿件剪力極值圖

資料來源：本研究整理

第五節 陽光屋頂之耐風設計準則研擬

由文獻資料蒐集已了解對於陽光屋頂的管理及政府鼓勵態度，而提升結構系統的耐風性能將有助於系統的推廣，因此本研究依所蒐集到的資料、實驗成果及結構分析成果進行耐風設計準則的研擬。由模型實驗可知，太陽光電板在建築物安裝位置，氣動力特性有如很大的差異，不同配置條件的風壓分布，須進行之實驗量甚多，考慮實際運用上的典型條件，篩選並歸納特性作為設計準則擬定之參考。另一方面考慮台灣地區的氣候特性，結構桿件的耐候耐蝕性能需特別加強，避免長時間使用後的鏽蝕或疲勞破壞，關於支撐結構耐蝕性能亦參考工業技術研究院(2009)關於安裝太陽光電系統之建議。彙整其他建築物附屬設施設計準則，請參閱附錄一。

第五章 結論與建議

第一節 結論

太陽光電科技產業為政府所大力鼓勵的重要發展路線，對於太陽光電系統的設置以及管理各級政府訂下鼓勵的政策。太陽光電系統的安裝大多位於建築物頂端或外殼及空曠區域等受風作用甚為強烈，太陽光電系統設施的設置與運轉即需對外在環境具備相當的耐受能力，台灣地區颱風等極端氣候作用頻繁，因此受風作用後，引發的荷載有必要加以評估。本計畫由氣動力實驗與結構分析等方向來探討風場對太陽光電板或陣列的風載重，涵蓋模型氣動力實驗、結構分析軟體的計算檢討與耐風性能優化設計建議等。

1. 國內推行陽光屋頂政策，針對陽光屋頂等設施有相關法規加以規範，本研究彙整包括「國內陽光屋頂管理條例」、營建署「設置再生能源設施免請領雜項執照標準」及各地方縣市政府響應再生能源開發及陽光屋頂等政策管理及鼓勵辦法。為鼓勵安裝，對於安裝於建築物屋頂上之太陽光電模組，給予放寬雜照申請標準的作法。
2. 由建築物屋頂安裝太陽光電系統進行一系列實驗，研究結果顯示風荷載主要受到安裝位置及光電板陣列排列方式影響，在多排太陽光電板陣列的受風作用以接近建築物邊緣的第一排最為強烈，後排的光電板受到前排的遮擋，其受風力減少甚多。由平屋頂上太陽光電板模組氣動力實驗成果可見，在小風攻角條件下，兩排光電板之間距不超過前排光電板高度四倍時遮蔽效應可達百分之五十以上。
3. 太陽光電板陣列向下游區挪移後的風荷載情形，本研究中顯示，挪移的距離為建築物牆面高度的十分之一以上時，即使光電板高端面向來流，第一排太陽光電板所受到強烈負風壓作用的情形幾乎消失，由於低層建築物屋頂面所受到的風壓分布由於拱門形渦漩的影響，主導風壓分布的重要因子為建築物

高度。因此可知在低層建築物屋頂面上，屬於建築物高度十分之一的周邊區域，受到分離剪力流或角隅渦流影響，安裝於此區域的太陽光電板將受到強烈負風壓作用，有掀翻的潛在危機，對光電板結構安全最為不利。另一方面，建築物屋頂面之角隅渦流是影響光電板擾動性風力的重要因素，設置位置應以能避開角隅渦流作用區為首要選擇。

4. 不同屋頂坡度的建築物屋頂上安裝太陽光電模組，光電板所受的風荷載相比較可見在小攻角的情形下，隨屋頂坡度的增加，負風壓作用更為強烈，顯示屋頂坡度越位陡峭時，架設其上的太陽光電板陣列所受負風壓作用將更為嚴重。雖然屋頂坡度大的建築物，其屋脊較為高聳，對於背風面下游區域的附屬構造物形成遮蔽的效果，但比較第一排光電板在受迎風作用時強烈的負壓荷載，其幅度遠超過背風時的遮蔽影響幅度，因此整體而言，在較為陡峭的屋頂架設太陽光電板陣列，對於光電板面所受風壓及光電板支架結構系統內力仍屬不利。
5. 女兒牆的存在使得光電板所受風荷載大幅減輕，將光電板陣列進行退縮時，光電板的風荷載僅微幅上升。本研究採用的退縮距離達女兒牆高度的四倍時，光電板的風荷載仍受到女兒牆的遮蔽保護而無強烈風荷載。無女兒牆的條件下，不建議在屋頂邊緣約為建築物高度十分之一的帶狀區域中架設太陽光電板，以避免光電板掀翻的危險。但如增加女兒牆設施，將有助於大幅減少光電板的風損。
6. 本研究依所蒐集到的資料、實驗成果及結構分析成果進行耐風設計準則的研擬。由模型實驗可知，太陽光電板在建築物安裝位置，氣動力特性有如很大的差異，不同配置條件的風壓分布，須進行之實驗量甚多，考慮實際運用上的典型條件，篩選並歸納特性作為設計準則擬定之參考。同時亦考慮台灣地區的氣候特性，結構桿件的耐候耐蝕性能需特別加強，避免長時間使用後的鏽蝕或疲勞破壞。以及在建築物屋頂面安裝太陽光電模組其基座及錨定方式均須加以注意，並避免破壞屋頂防水層。
7. 經比較太陽能支撐架結構系統改善前後之數值分析成果，可發現一般業界所

採用之支撐架結構系統，桿件幾何佈置過於簡單（靜不定度過低），無法充分導引、疏通過於集中之力流。此種結構型式容易產生桿件內力過大與應力集中之不良影響。同時，原支撐架結構桿件間連接方式多採用螺栓固鎖，因此桿件端部無法傳遞彎矩。經本研究改善方案採用支撐光電板的斜梁在多增加斜撐桿件，並使用鉸接方式連結桿件，增加結構靜不定度並提高支撐架穩定性等方式。經結構分析結果，由於將載重直接導引至支承端後，可有效降低桿件內力，減少局部桿件應力負荷，本研究之計算案例中桿件應力(包括軸力、剪力、彎矩等)下降幅度均達 50%以上，同時大幅改善各桿件間應力分布不均的現象。

8. 建議建築業與太陽光電板業相互合作，使太陽光電板設計準則研擬更完善。如尺寸規格標準化，以利建築設計預埋錨定固定基座，以免日後施工破壞屋頂防水層。

第二節 建議

本計畫利用氣動力實驗取得量化的風荷載分布情形，後續工作包括持續太陽光電板陣列氣動力特性探討，進行有關建物整合方式架設的太陽光電板其風荷在的差異、屋頂設置女兒牆對太陽光電板風荷載影響、屋頂面平貼式光電板風載重評估、屋頂面大型雨庇造型光電板風載重評估等項目，期能建置更完整的受風作用資料。結合風荷載分布情形將進行結構系統的荷載分析，以實驗資料作為外力載重，選擇一般常用的支架系統，進行支架結構計算分析，了解不同配置情形對於結構桿件內力的變化與影響，同時將考慮於分析中調整桿件布局或增加斜撐等方式，觀察對於結構強化的效果，有助於提升結構耐風性能。依據本計畫整理之資料，將以提升耐風性能為方向研擬應用於陽光屋頂類結構物的設計準則。

【建議一】

建物整合之太陽光電模組耐風性能檢討：立即可行建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：中華民國風工程學會

太陽光電板的安裝採用建物整合方式進行，以減少對於建築外觀的影響，甚至減輕支架結構成本，已是目前國內太陽光電發展的重要趨勢，但台灣地區有颱風等極端氣候作用，光電板在強風作用下破壞是重要議題。建物整合的安裝方式是否使太陽光電板更易受到安裝位置、懸伸角度或長度等因素影響，不利於光電板的耐風性能，可能造成光電板破損以致在強風作用時發生嚴重毀損破壞，有必組織研究團隊針對建物整合的光電板進行檢討，由常見的建物整合裝設方式，觀察光電板受風荷載的差異，有助於永續建築的政策推動。

【建議二】

屋頂太陽光電模組受風振動反應實場量測：立即可行建議

主辦機關：中華民國風工程學會

協辦機關：內政部建築研究所

陽光屋頂的政策對於節能及永續利用有指標性的意義，台灣地區日照充足，太陽光電發電甚具價值，但台灣地區亦有颱風等極端氣候作用，光電板破壞除可能有強風破壞外，受風振動亦是重要議題，長期的振動雖不一定是大振動的激烈反應，但長時期小振動對於材料有疲勞的影響，可能造成光電板破損以致在強風作用時發生嚴重毀損破壞，有必組織研究團隊針對光電板受風振動反應進行實場量測，累積觀察資料。同時由各不同觀察對象之結構系統中了解，光電板受風振動現象的差異，有助於陽光屋頂的政策推動。

【建議三】

特殊造型屋頂太陽光電模組之風荷載數據庫：長期性建議

主辦機關：內政部營建署

協辦機關：內政部建築研究所

本研究中採用的建築物造型為矩形構型，實際建築物屋頂造型各異，其他如曲面屋頂、多邊形屋頂等條件下，對於安裝其上的太陽光電模組風荷載有何影響，光電板架設方式是否需要進行調整，如單純以本研究之個案成果尚不足以解答此一問題，建議將曲面屋頂、多邊形屋頂及其包含的高寬比、深寬比、安裝區位、風向等影響條件綜合考量，結合氣動力實驗與結構計算，建立更多造型屋頂上合適的太陽光電模組風荷載預估模式或數據資料庫，以利建築設計之用。

附錄一、陽光屋頂之耐風設計準則

一、耐風設計考慮因素

1. 太陽光電板受風作用後，表面風壓主要受到分離剪力流的渦散作用為主，因此表面風壓分布情形與渦流再接觸現象有密切關係，形成擾動性風壓主要作用區域，就光電板受力情形需加以考慮。
2. 支承結構系統的桿件內力受到風壓擾動影響，如單純利用平均風壓資料以靜載重進行結構分析，出現的內力分布與實際出現在結構趕建的內力有甚大的差異，原因是風壓分布於光電板上具有甚強的時變性，特別是太陽光電板受風力作用甚為不對稱，因此支承系統受風作用後，桿件內力分布極不均勻，少數桿件接頭出現甚高的局部集中應力，可能對於結構安全不利。
3. 由氣動力實驗中，不同安裝位置產生光電板面風壓差異可知，太陽光電板不宜安裝在屋頂角隅位置，且應避免安裝過於接近邊緣。
4. 要提升太陽光電板的耐風作用強度，可將太陽光電板適度墊高，促進氣流亦可由版下大量通過，有助於減少版下所形成的風壓回昇現象。
5. 紊流擾動作用下，結構體所承受的載重幾乎均非對稱型式，且如僅用靜載重分析，所得之桿件內力未能反映可能出現的最大載種狀況。
6. 基座與支撐結構柱腳連接強度，應有承受設計風速下所產生拉拔力搭配建築耐風設計規範給定之陣風因子推估所得風荷載的能力。

二、研擬之設計準則

依據本計畫之研究成果，初擬陽光屋頂之耐風設計準則如下：

(一)總則

- 1.1 為積極推廣應用太陽光電發電技術，確保太陽光電系統安全可靠、性能穩定，提升建築太陽光電系統耐風性能，特制訂本準則。
- 1.2 建築太陽光電系統應包括：光電板(含太陽電池及固定腳架)、蓄電池、

陽光屋頂耐風評估與設計準則

電力調解器、配電(線)箱體及其他管線容器等設備。

- 1.3 建築太陽光電系統耐風性能除可依本準則進行查驗及規劃支撐系統，太陽光電模組應符合國家檢驗標準(CNS)中關於安全確認及撞擊損壞能力測試等標準之規定。

(二)支撐結構系統設計與安裝

- 2.1 結構系統應能承受各種不同風向角作用下產生之風荷載，並保持材料內應力小於材料容許設計強度。
- 2.2 結構系統設計須能達到分散外力載重與均勻分配內力的目的。
- 2.3 為提升結構系統整體耐風性能可採用方式包括：
 - 2.3.1 增加底座的斜撐桿件。
 - 2.3.2 增加太陽光電板高側支柱的斜撐。
 - 2.3.3 對太陽光電板邊框中點加強支撐或增設斜撐桿件。
 - 2.3.4 其他形成強化環繞結構體框架之設計。
 - 2.3.5 於太陽光電板下方加裝擋風板，以不超過高度的 1/4 為原則，但仍應保持支架下方的透風性能。
- 2.4 為提升太陽光電系統之耐風性能，在環境條件許可下，宜將太陽光電板作墊高設計，以利下方渦流通過，減少風載重。
- 2.5 架高之太陽光電系統可利用大型鋼骨基座安裝於屋頂斜面上。
- 2.6 屋頂安裝位置：
 - 2.6.1 太陽光電系統安裝於平屋頂面上時，以安裝於具備女兒牆圍護環境下為佳。為確保光電板受到充足陽光照射，女兒牆高度不應超過光電板高度之高度過多，必要時可以太陽高度角與方位角計算其

陰影是否影響光電板版面陽光。

2.6.2 如無女兒牆保護，應避免安裝於屋頂邊緣週區及角隅區域，對於低層建築物之建築屋頂邊緣週區為建築高度的十分之一帶寬環繞屋頂面區域，角隅區為相同帶寬之轉角處。具有斜屋頂條件者，應避免以跨於屋脊上之安裝位置。

2.6.3 屋頂坡度高於一比二者，對於安裝於其上之太陽光電系統所受風荷載較高，應提高桿件斷面或其他加強支撐結構系統勁度之補強措施。

2.6.4 太陽光電系統安裝於屋頂上時，為能提昇錨定效能，以能預作安裝基座，並預埋固定件為佳。支撐結構直接以螺栓等元件錨定於屋頂面時，應避免破壞屋頂防水層。

2.7 多片式安裝：如太陽光電板採多片式並排排列設計，則以兩端版面受風作用最高，應特別加以防護。

2.8 太陽光電板與支架結合：太陽光電板應以螺絲加墊片的方式與支架系統緊密接合，螺絲孔為應至少包括四個角落及長邊的中點。太陽光電板與支撐架之結合應避免採用槽鋼夾持或嵌入方式結合。

(三)安全性能檢驗

3.1 系統與建築結合的安全措施檢驗

3.1.1 錨固承載力檢驗

1 承載力的檢驗

(1)太陽光電系統傳遞予建築主體結構的風荷載和作用力，應不影響建築主體結構或結構構件的安全。

(2)太陽光電系統的連接件與主體結構的錨固，應能完全抵抗風力對光電板

陽光屋頂耐風評估與設計準則

模組的拉拔及推壓作用。

(3) 太陽光電板的支承不應安裝在輕質填充牆上。

2 太陽光電系統與建築主體結構採用後加錨栓連接時，應符合下列規定：

(1) 碳鋼錨栓應作防腐處理。

(2) 建議每個連接節點的錨栓數不應少於 2 個。

3.1.2 支架強度檢驗

1. 支撐架材質一般可採用熱浸鍍鋅處理的鋼材、鋁合金或不銹鋼等。

2. 支架應符合設計要求，支架應無破損及變形。金屬支撐架於現場施工時應避免再鑽孔、焊接或切割。

3. 防蝕措施應以二道防蝕之觀念進行規劃，腐蝕消耗為表面的第二道防線，並可重新維護處理。

3.1.3 耐蝕性能檢驗

1. 塗層的厚度應符合設計要求，鋼支架表面的防腐塗層應光滑平整，無流掛、起皺、露底等缺陷。

2. 表面處理如為熱浸鍍鋅其鍍鋅量應有 500g/m^2 以上，在重工業區或海岸地區需有 550g/m^2 以上，郊區則應有 400g/m^2 以上。

3. 鋁合金之陽極處理膜厚度應有 $7\mu\text{m}$ 以上，並建議再外加一層 $7\mu\text{m}$ 以上之壓克力透明漆。

附錄二、評選委員發言單及廠商回應一覽表

內政部建築研究所 104 年度建築先進技術創新開發與推廣應用計畫協同研究計畫(二)第 2 案「陽光屋頂耐風評估與設計準則」

表 A-1 評選委員發言單及廠商回應一覽表

委員	審查委員意見	廠商回應
陳召集人建忠	<ol style="list-style-type: none"> 1. 本案是進行「評估與設計準則」，並未見其樣稿或內容展現作業能力，宜於進行研究期初，先與主辦單位洽知。並請說明，設計準則是什麼，評估準別是什麼？是誰來設計？(可能是建築師、技師)誰來評估？(可能是政府團隊或 PCM 公司)。準則宜檢視擬定供出版準則，以滿足招標需求說明 2. 陽光屋頂計畫書內容為何？多少數量、產值？目前已完成的屋頂在哪裡？本案價值、比率多少？有否找過經濟部主辦主管人員討論？ 3. 陽光屋頂是否需要申辦雜項執照？依建築法建築師或技師都在負責設 	<ol style="list-style-type: none"> 1.遵照辦理，承接本案後將與主辦單位洽商，了解所需之範疇與內容，以確保計畫目標符合需求。研究成果將針對建築物規劃設計者提供兼顧效能與耐風性能之太陽光電板安裝與布設方式，對於結構設計者提供考量太陽能光電系統風荷載方式及結構支撐系桿件布局或支承設計方式。 2.配合本計畫研究立場，將蒐集及徵詢推動單位(如經濟部主管單位)有關陽光屋頂之計畫資料與成果，以了解國內現況。 3.配合計畫研究內容，蒐集國內目前推動現況，以瞭解國內建築管理制度在此區塊之執行現況及法規。

	計，如此由誰評估?還是應該為一種審查，或是許可指導。	
宋委員厚民	<ol style="list-style-type: none"> 1. 主辦機關對本計畫之預期成果及效益，明確羅列了許多項目，研究團隊宜逐條納入作業項目，並提交成果。 2. 協同研究人員地區分散，如何彙集成果。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 依據主辦機關對本計畫之預期成果及效益條列項目，進行研究計畫工作，並據以建立工作項目。 2. 本案風洞實驗部分於本所台南風雨風洞實驗室進行，由本案研究人員周博士於台南執行，成果分析與結構系統的探討由計畫協同主持人統合全體研究團隊進行並匯集成果，本團隊執行模式已有數年經驗，可密切配合計畫進行。
黃委員然	<ol style="list-style-type: none"> 1. 太陽能發電裝置設計係依受光面積而決定其排列方式，請說明耐風評估是否需在既有條件下進行。 2. 請說明陽光屋頂的耐風性能，是否為後設安裝的耐風性能或是屋頂結構耐風性能？ 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 本研究期能對太陽光電板陣列規劃設計者在耐風性能上有所助益，實際太陽能光電布設必須以發電效率最高為首要考慮，因此研究計畫針對常用的布設方式或既有條件進行實驗規劃，分析所得的風荷載將可提供選擇安裝間距、位置及防護措施考量之所需。 2. 本研究計畫先期資料蒐集陽光屋頂形式包括平貼於屋頂面、作為建築物附屬雨庇或遮陽構造物、採剛性構架支撐架高於屋頂面等方式，前兩項可配合現行建築物耐風設計規範進行風荷載估算，第三項則構型特殊未能在規範中呈現，本研究擬聚焦於此類架高式太陽能光電系統之風荷載進行研究，因此應為所安裝系統的耐風性能研究。屋頂整體結構耐風性能範圍較大，屬建築物整體結

		構性能，應非屬本研究範疇。
楊委員仲家	<ol style="list-style-type: none"> 1. 建議考量太陽光電板排列之最佳效能。 2. 請規劃配合風洞實驗室之作業時程。 3. 請考量強風下，以附屬建物改善屋頂耐風之方式。 	<ol style="list-style-type: none"> 1.遵照辦理，由本研究針對不同排列方式及位置之氣動力實驗成果，將可作較佳的排列方式建議。 2.遵照辦理，本案經由實驗案例數量的檢討後，將配合本所風洞實驗室管理作業，排定各階段進場實驗時間。 3.本研究在結構系統耐風性能分析時將採用規範所建議之設計風速及大氣邊界層紊流特性作為邊界條件，進行結構時序列分析計算，確保太陽能光電系統的耐風性能可承受台灣地區極端氣候作用。另一方面，以太陽能光電系統建構陽光屋頂後對於屋頂結構耐風性能的影響，可利用板下風壓與原始屋頂風壓分布做初步比較，了解此類附屬設施安裝後對於屋頂風荷載的影響。
李委員鎮宏	<ol style="list-style-type: none"> 1. 在屋頂含女兒牆之太陽光電板有無架高? 2. 依 Aly(2013)的文獻中提及比較適合之模式尺度約 1/20~1/30，本案採用哪種比例? 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 屋頂含女兒牆之太陽光電板實驗模型將作架高方式進行，以符合現況。 2.本案採用地況 C 之大氣邊界層流場作為來流條件，此流場幾何縮尺為 1:200，研究將優先以此縮尺進行，以符合流廠條件，模型製作務求精準，確保量測品質。
陳委員玠佑	<ol style="list-style-type: none"> 1. 實驗模型的縮尺比例為何?如何與實際情形貼近?風速的條件?請補充說明。 2. 預期目標中，多與現地 	<ol style="list-style-type: none"> 1.本案採用地況 C 之大氣邊界層流場作為來流條件，此流場幾何縮尺為 1:200，研究將優先以此縮尺進行，以符合流廠條件，模型製作務求精準，確保量測品質。實

	<p>增修有關，未來如何具體實現？</p> <p>3. 實驗的模型應先選定，並說明，未來進行實是斜屋頂或是矩形樓層及太陽光電板的形式...等等。</p>	<p>驗風速必須顧及雷諾相似性，已能滿足雷諾數達氣動力行為穩定及相似為選用原則。為能表現極端氣候作用，實驗資料均經無因次化處理，結構分析時以設計風速進行計算，以貼近台灣地區極端氣候條件及符合建築物耐風設計規範要求。</p> <p>2. 透過氣動力實驗成果，檢討現行結構系統之耐風性能，對於現地支架之結構桿件安裝與布局反映在結構受風之時序列分析成果中，對其優缺點進行比較。</p> <p>3. 服務建議書中以簡單矩形塊體表現建築物，太陽光電板模型將以壓克力板製作並安裝風壓管線系統於其中，模型參考實際案例尺寸進行縮尺製作，屋頂面將以平屋頂、女兒牆等實際出現最多的狀況為主，屋頂坡度將配合實驗進行氣動力行為表現加以考量。</p>
--	--	--

附錄三、期中審查委員發言單及廠商回應一覽表

本所 104 年度協同研究「都市地區風環境流通效應影響評估分析研究」及「陽光屋頂耐風評估與設計準則」等 2 案期中審查會議

一、時間：104 年 7 月 29 日（星期三）下午 2 時 30 分

二、地點：本所簡報室（新北市新店區北新路 3 段 200 號 13 樓）

三、主持人：何所長明錦

記錄：劉文欽、李信宏

表 A-2 期中審查委員發言單及廠商回應一覽表

委員	審查委員意見	廠商回應
陳教授 瑞華	<ol style="list-style-type: none"> 1. 屋頂光電板所受荷重與屋頂形式、風向、光電板(位置、離地高、傾角)及排列方式有關，建議針對常見情況提出其荷重之估計方式。 2. 是否涵蓋低層與高層建築？ 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 本計畫針對屋頂光電板所受荷重與屋頂形式、風向、光電板(位置、離地高、傾角)及排列方式等造成之風荷載進行探討。 2. 配合氣動力實驗期程，本年度研究之建築物以中低層高度的建築物為主，高層建築物架設太陽光電板陣列未包含於本年度研究範圍。
朱教授 佳仁	<ol style="list-style-type: none"> 3. 建築物屋頂設置太陽能光電版可減少二氧化碳排放，值得推廣，故需要瞭解其風荷載 4. 強風吹襲時，太陽能板大多是因為瞬間陣風或渦流所造成之極值風壓(peak pressure)而損壞，應說明如何由上下表面各點的極值風 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 感謝指導。 2. 本研究採用的光電板氣動力模型雙面均設風壓管線，採用同位置瞬時資料相減方式求得該點位的淨風壓時序列資料，除計算其平均值與擾動值外，並

	<p>壓計算太陽能板的總靜荷載</p> <p>5. 壓力管線過長可能會影響擾動風壓之準確性，應說明壓力管線的長度，及對擾動風壓之影響。</p>	<p>提供結構歷時分析計算之用，因此可將瞬時間風擾動特性涵蓋於歷時分析過程，並觀察其結果。</p> <p>3. 本研究採用的管線為內徑 1mm，長度 25cm，此類型管線系統均經白噪音訊號檢驗其頻率域扭曲，減少量測誤差，關於管線校正地說明補充於文中第 23 頁。</p>
<p>鄭技師兆鴻</p>	<p>1. 屋頂光電板所占面積上限是否需考量消防逃生之最小面積之規定？</p> <p>2. 是否需考量最大瞬間陣風壓力的影響？</p> <p>3. 是否可以進行圓頂風場應力分析？</p>	<p>1. 依現行法規仍受到消防法規規範，進行檢查。</p> <p>2. 本研究採用的光電板氣動力模型雙面均設風壓管線，採用同位置瞬時資料相減方式求得該點位的淨風壓時序列資料，除計算其平均值與擾動值外，並提供結構歷時分析計算之用，因此可將瞬時間風擾動特性涵蓋於歷時分析過程，並觀察其結果。</p> <p>3. 本年度以平屋頂及斜坡屋頂為主。</p>
<p>財團法人工業技術研究院綠能與環境研究所 (詹博士 麒璋)</p>	<p>1. 本計畫所探討及試驗的內容相當不錯，但最後的研究目的應更明確，是要探討與改進現行耐風設計規範，還是要訂定一個太陽光電支撐架的設置準則？</p> <p>2. 未來本計畫要訂定出什麼具體成果？</p>	<p>1. 感謝指導。本計畫由氣動力實驗與結構分析等方向來探討風場對太陽光電板或陣列的風載重，涵蓋模型氣動力實驗、結構分析軟體的計算檢討與耐風性能優化設計建議等。國內線型建築</p>

		<p>物耐風設計規範以建築物及其構件為主，並未針對太陽光電板風荷載進行規範，實務上多以開放式斜屋頂之風壓建議值為設計值。本研究透過氣動力實驗探討其風荷載特徵，並以結構分析軟體了解支架系統的內力分布狀況，期在架設光電板及提升耐風性能上作出建議及建議工程師選擇架設方式與位置之準則，對政府在陽光屋頂政策推動上有所貢獻。</p> <p>2. 本研究透過氣動力實驗探討其風荷載特徵，並以結構分析軟體了解支架系統的內力分布狀況，期在架設光電板及提升耐風性能上作出建議及建議工程師選擇架設方式與位置之準則，對政府在陽光屋頂政策推動上有所貢獻。</p>
<p>何所長 明錦</p>	<p>1. 太陽能板安裝在結構設計上應符合法令或規範上安全性的要求。</p> <p>2. 太陽能板安裝排列上要考慮到前後左右之距離，以避免因陰影所造成發電效率影響，是否於報告書中增加簡要的安裝對照表？</p>	<p>1.遵照辦理。</p> <p>2.太陽能板模組陣列間距與陣列傾斜角度、無遮陰時段的考量有關，且主要受當地緯度、太陽位置影響。架設於屋頂部位一般建議採用前後排方式設置，模組陣列之陰影長度即為最小之模組陣列間距，以維護發電效率，已增加關於陰影長度之</p>

		<p>計算公式說明及對照圖於第 23 頁。</p>
<p>陳組長 建忠</p>	<p>1. 請檢核評選會議意見之執行情形，如：1.評估與設計兩準則，2.陽光屋頂計畫書原稿及數量分佈。(請逐項比對委員發言事項詳為說明。)</p> <p>2. 報告書第四章第三節(第 37 頁起)有關陽光屋頂設計準則有需修正部分如下：</p> <p>甲.耐風設計考慮因素</p> <p>a. 第 3 項提到太陽光電板以安裝角隅為宜，而角隅位置應是兩個或以上之邊緣交接處，要如何安裝在角隅而避免邊緣？(2.6.2 又說不宜安裝於角隅，宜整合。)</p> <p>b. 第 5 項中提及不能只做靜載重分析，那要如何分析，宜明確敘述。</p> <p>c. 第 6 項中提及支撐結構系統的給定，過度簡略，是誰給定？給定甚麼？應清楚說明。</p> <p>乙.設計準則之研擬</p> <p>(一) 總則第 3 項提及所需符合國家檢驗標準為何，請明確敘述。</p> <p>(三)安全性能檢驗</p> <p>3.1.1 錨固承載力檢驗</p>	<p>1.對評選會議意見檢討改進報告內容。依據耐風設計規範中與太陽光電板類似條件之構造物，評估光電板耐風性能應採用開放式單斜屋頂所受風荷載為準。關於設計準則本研究依據文獻資料、氣動力實驗成果、結構分析結果等歸納其耐風性能的特徵，據以建議準則。</p> <p>2.</p> <p>甲.耐風設計考慮因素：</p> <p>a.太陽光電板以安裝角隅為宜為誤植，應為避免安裝於屋頂角隅區域。</p> <p>b.僅作靜載重分析未考慮風壓作用瞬時不均匀分布的特性，因此本研究對於支撐架的結構分析計算採用相當於實場十分鐘的歷時分析。</p> <p>c.第 6 項文句不完整，”支撐結構系統的給定”等字句應予刪除。</p> <p>乙.設計準則之研擬</p> <p>a.於(一) 總則第 3 項提及所需符合國家檢驗標準，目前太陽光電板架設安裝尚無明確規範與標準，由耐風性能</p>

	<p>1.承載力檢驗</p> <p>a. 第 1 項提及不影響主體結構或結構構件之安全，是如何不影響？(有裝應就有影響)</p> <p>b. 第 2 項須符合設計要求，但設計要求為何未提到。</p> <p>2.太陽能光電系統與建築主體結構採用後加錨栓連接時，應符合規定</p> <p>a. 第 2 項提到錨栓數不少於兩個，其施作方式為何？(固定方式不是 PIN 或 ROLLER?)</p> <p>3.1.2 支撐架強度檢驗</p> <p>a. 第 3 項敘述中提及有兩道防線，文中僅提到第二道防線，第一道防線可在報告書中敘明。</p> <p>3. 報告中未見評估準則？此外，設計準則及評估案例宜列入第 10,11 兩頁。</p> <p>4. 27-35 頁之比較圖，難以直接使用，請整理成便於使用的方式呈現。</p>	<p>觀點，光電板模組本身強度應符合現行國家標準，如 CNS15118-1(太陽光電模組之安全確認—第 1 部：構造要求)、CNS15118-2(太陽光電模組之安全確認—第 2 部：測試要求)、CNS15197(太陽光電模組抗撞擊損壞能力之測試)等。</p> <p>b. 錨固承載力檢驗段落中所謂”太陽光電系統傳遞的荷載和作用力，應不影響建築主體結構或結構構件的安全”係指建築物主結構系統於屋頂加裝太陽光電模組後增加的載種不應危及結構安全。設計要求則為建築物主結構系統進行結構分析，包含光電模組時，仍應符合結構設計時之安全載重範圍。</p> <p>c. 常見的基座錨固方式包括埋入基座、螺栓錨錠等方式，要求兩根以上錨栓數可避免單根破壞造成系統嚴重損傷。</p> <p>d. 二道防蝕觀念一般應用於鋼結構的防蝕規劃，通常一道為底漆、二道為面漆，面漆層承受外界環境造成侵蝕，並加以定期養護，使侵蝕現象阻絕於第二道，鋼結</p>
--	---	---

		<p>構防蝕設計亦有更多道防蝕設計。</p> <p>3. 依據耐風設計規範中與太陽光電板類似條件之構造物，評估光電板耐風性能應採用開放式單斜屋頂所受風荷載為準。關於設計準則本研究依據文獻資料、氣動力實驗成果、結構分析結果等歸納其耐風性能的特徵，據以建議準則。</p> <p>4. 平均風壓係數及擾動性風壓係數圖表目的在呈現不同配置的太陽光電板陣列所受風荷載的強烈程度，可據以評估各種不同配置下太陽光電板陣列是否有嚴重的結構安全問題，將加強報告中對於圖表的解釋與說明。</p>
<p>李主任 鎮宏</p>	<p>1. 支撐架是否納入斜撐建議透過結構分析將結果納入報告書中。</p> <p>2. 太陽能板墊高最大高度建議納入考量，如此可兼顧結構安全及發電效益。</p>	<p>1. 本研究支撐架的結構性能分析除採用現行市面之結構系統進行分析計算，實際探討其桿件內力在受到強風擾動下的分布情形，更進一步在結構改進建議中，則改善目前支撐結構的桿件布局，包括斜撐的安裝，及其對內力分散的影響，在第四章第二節中加以說明。</p> <p>2. 由文獻資料及研究結果顯示，適度的抬升光電板有助於減緩風荷載，墊高的高度</p>

		<p>實務上亦有考慮爭取更多的陽光照射而將支撐系統作高的手法，因此墊高的限制似仍應以日設量取得及周圍是否有其他遮擋須加以避開為考量因素，本文第二章第二節則針對日射取得的評估以公式加以說明。</p>
--	--	--

附錄四、專家座談委員發言單及廠商回應一覽表

內政部建築研究所 104 年度建築技術多元創新與推廣應用精進計畫

協同研究計畫(二)第 2 案「陽光屋頂耐風評估與設計準則」

專家座談會

一、時 間：104 年 9 月 18 日（星期五）上午 10 時

二、地 點：內政部建築研究所討論室(一)

三、主持人：陳若華

記錄：王家驊

表 A-3 專家座談委員發言單及廠商回應一覽表

委員	審查委員意見	廠商回應
陳技師 志勇	<ol style="list-style-type: none"> 1. 建議支撐結構須新增支撐基座 (pad)，且僅能架設於既有屋頂梁柱結構上。 2. 須檢討原結構之外加應力。 3. 建議不論公私建物均須要求技師簽證 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 感謝指導，基於結構應力傳遞的考量及避免屋頂防水層受到破壞，建議支撐架應有基座，並以建築物興建時設置為佳，可正確與梁柱系統結合。 2. 感謝指導，建築物結構分析時即應考慮光電模組外加之載重，並符合結構安全要求。 3. 依現行法規有關結構安全部份應由依法登記開業之建築師或土木技師或結構技師簽證負責，並函送該管直轄市、縣(市)政府備查。應有必要建議加以注意。

<p>方教授 富民</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 在研擬太陽能光電板設計準則時，是否有可能訂出一個建築物高度限制。 2. 當陣列是光電板於非符合矩形屋頂面之走向設置時，在風力之考慮為何？ 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 配合氣動力實驗期程，本年度研究之建築物以中低層高度的建築物為主，高層建築物架設太陽光電板陣列未包含於本年度研究範圍。 2. 本研究僅取用簡單構型建築物做為載體，探討光電模組受風作用的特性，如對於特殊安裝條件仍應個別進行實驗或電腦模擬的檢討。
<p>張教授景 鐘</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 實驗配置示意圖不清楚請修正。 2. 實驗光電板間距請說明單位間距定義值。 3. 實驗結果敘述”最低”的”負風壓”，建議考量一般民眾認知，適度修正。 4. 有關空間相關係數之方向性採”弦向”敘述，請再檢討或補充說明。 5. 太陽光電板設計準則之研擬，建議尺寸標準規格化，以利後續產業發展，如預埋錨定固定基座施作。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 感謝指導，配合修正表 3-1 及增加表 3-2 與表 3-3，加強其說明性。 2. 本研究中調整光電板陣列排間距，採用的位移量以光電板寬度為間距單位。 3. 感謝指導，已修正用語以”強烈負壓”一詞代替所謂”最低負壓”避免誤解。 4. 簡報中所指”弦向”汐止言光電板長軸走向。 5. 本研究中調整光電板陣列排間距，採用的位移量以光電板寬度為間距單位，由不同退縮量、間距量等實驗成果，可供設計者考量預埋錨定固定基座施作位置參考。
<p>黎研究員 益肇</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 邊界層縮尺為 1/200，建築尺寸挑選的原則為何？屋因次畫風素 U 在哪？ 2. 實驗結果能否與規範計算比較其 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 本研究採用地況 C 作為基本流場特徵，因此縮尺訂為 1/200，模型設計考量建築物應不屬於高層建築，量體

	<p>差異。</p> <ol style="list-style-type: none"> 3. 建議未來可用 CFD 探討更多案例。 4. 光電板間距選擇應符合實驗，以發電效益為優先。 5. 準則研擬宜將太陽光電板作墊高設計，以利下方氣流通過。 	<p>接近一般民房或工業廠房，並注意符合風洞阻塞比的限制等因素，選擇本研究之建築物幾何尺寸。</p> <ol style="list-style-type: none"> 2. 實驗結果主要提供分辨對於太陽光電模組較不利的風荷載條件，以進一步研究提升耐風性能之策略。 3. CFD 目前蓬勃發展，且逐漸受到業界的接受，未來朝向此路線發展，可更有效率的檢討各式風載重。 4. 太陽能板模組陣列間距與陣列傾斜角度、無遮陰時段的考量有關，且主要受當地緯度、太陽位置影響。架設於屋頂部位一般建議採用前後排方式設置，模組陣列之陰影長度即為最小之模組陣列間距，以維護發電效率，已增加關於陰影長度之計算公式說明及對照圖於第 23 頁。 5. 感謝指導，由文獻資料及研究結果顯示，適度的抬升光電板有助於減緩風荷載，確有必要建議適度墊高光電板。
<p>傅總經理仲麟</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 配合結構分析計算成果，試驗結果建益提供各風向角光電板上之平均風壓與擾動性風壓分布，以作為對照之用。 2. 結構分析計算成果中，各桿件內 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 感謝指導，實驗結果之平均風壓係數及擾動性風壓係數圖表目的在呈現不同配置的太陽光電板陣列所受風荷載的強烈程度，可據

	<p>力極值圖顯示出桿件內力極值，但僅顯示桿件編號，另應有感建編號與位置對照圖，以利了解桿件位置。</p> <p>3. 建議可蒐集最近颱風事件下，是否有實際破壞案例作參考。</p>	<p>以評估各種不同配置下太陽光電板陣列是否有嚴重的結構安全問題，將加強報告中對於圖表的解釋與說明，並提供分辨對於太陽光電模組較不利的風荷載條件，進一步研究提升耐風性能之策略。</p> <p>2. 感謝指導，由於光電板甚為瘦長，各桿件分布圖說的呈現不易，已加強圖面顏色對比及編號文字字體放大，以提供較佳視覺效果。</p> <p>3. 感謝指導，本研究將持續蒐集相關颱風風損資料，以作為比較。</p>

附錄五、期末審查會委員發言單及廠商回應一覽表

內政部建築研究所 104 年度建築技術多元創新與推廣應用 精進計畫協同研究計畫(二)第 2 案「陽光屋頂耐風評估與設 計準則」期末審查會

一、時 間：104 年 11 月 6 日（星期五）下午 2 時 30 分

二、地 點：內政部建築研究所討論室(一)

三、主持人：何所長明錦（陳組長建忠代） 記錄：蔡宜中、李信宏

表 A-4 期末審查會委員發言單及廠商回應一覽表

委員	審查委員意見	廠商回應
朱教授 佳仁	<ol style="list-style-type: none"> 本研究可補足國內關於太陽能板設置於屋頂之風力規範準則。 報告書中 P.14，所提及 David(2013) 應為 Banks(2013)，而 Nicolas(2013) 應為 Pratt and kopp(2013)，請更正。 建議建研所將此計畫之成果報告寄給國內太陽能板系統業者，有助其設計設置時參酌。 報告書中圖 4-15，圖片中桿件編號字體太小不易分辨，建議可以放大字體，以利後續讀者參考。並可將研究成果簡化成較簡易關係式，可讓結構技師計算支撐桿件之最大可能應力時參考。 報告書中圖 4-17~4-35 及 4-39~4-41 之圖上實線、虛線的差異為何？建 	<ol style="list-style-type: none"> 感謝指導。 修正報告書內容。 感謝指導。 修正報告書內容。 圖中實線代表正值，虛線代表負值，以利區分，補充說明於報告書。

	議在於文中加以敘明。	
陳教授 瑞華	<ol style="list-style-type: none"> 3. 本研究成果對於推廣陽光屋頂助益甚多。 4. 建議未來是否將較成熟之研究成果納入設計規範中，以利技師於設計時可以加以參酌，可提升研究整體價值。 5. 前排光電板或女兒牆除提供遮蔽外，是否會因此造成下游渦流結構，進而影響後排光電板受風力？ 6. 報告書中作為結構分析所用之試驗風壓計(壓力掃描閥)之所占面積比例為何？ 7. 報告書中提及重要發現中之第 2 點及第 5 點文字可能會使讀著誤解，建議修正文字或用詞，以增加報告書的參考應用價值。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 感謝指導。 2. 後續將配合本所對於規範修訂之需求，提供資料建議。 3. 前排光電板或女兒牆除提供遮蔽外，是否會造成渦流影響後排光電板。由文獻中得知屋頂光電板陣列對屋頂表面氣流的雷諾應力有影響，本計畫實驗之擾動性風壓係數顯示，應屬影響不大。 4. 光電板上下表面各均勻分布 30 個風壓孔，整面風壓資料均可取得，結構分析採用的板面各點位的瞬時風壓，依支撐結構節點位置分配有效面積內的風壓積分計算節點載重，再進行結構物的時序列分析。。 5. 感謝指導，檢討修正文字內容。
陳技正 志鵬	<ol style="list-style-type: none"> 1. 支撐結構建議以焊接接合，以承受 42.5m/s 風速。是否考量訂定以螺栓接合時螺栓規格，及研擬設計準則 2.6.4(P.79)之螺栓規格？另隨太陽能板設置地點的高度，建議提高承受風速之設計。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 研究報告中採用 42.5m/sec 作為計算範例設計風速，係因為置取用台北市為例，依建築物耐風設計規範規定選用此風速，設計風速為第況 C 在高度十公尺處的風速。計算中有考慮建築物屋頂高度，並透過指數率計算

		<p>該高度應採用的設計風速，未來應用時亦應採用此方式計算合宜的風速。基於結構桿件接合穩定度，建議採用焊接方式，採用螺栓接合雖亦可行，建議由設計者依現場條件加以確認。</p>
<p>張教授 景鐘</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 本研究評估光電板排列方式、角度、高度、坡度、風向角等因素對受風荷載之情形，研究成果對實務工程設計有很大助益。 2. 於報告文中提及，現有業界採用之支撐架結構系統不佳，所提之改善方案可大幅降低各桿件應力(達 50%以上)，建議將此一成果推廣提供業界參考使用。 3. 建議建築業與太陽光電板業相互合作，使太陽光電板設計準則研擬更完善。如尺寸規格標準化，以利建築設計預埋錨定固定基座，以免日後施工破壞屋頂防水層。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 感謝指導。 2. 感謝指導。 3. 感謝指導，關於太陽光電板腳座位置與建築預置安裝基座能吻合，避免破壞防水層，已納入結論中。
<p>詹經理 麒璋</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 本研究的目的是及成果都相當優良，特別是針對台灣夏季颱風多，冬天季風強勁，而太陽光電系統都是以扣件為主、螺絲連結的戶外屋頂結構，因此本研究相當重要。而所做的風洞試驗結果正好可彌補太陽光電業者對於風載重分析之不足的盲點，故成果相當具參考價值，建議應將研究成果公佈大眾參考。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 感謝指導。 2. 以 CFD 分析替代風洞試驗就實務運用而言，為較經濟可行的辦法，但其邊界條件及計算模式選取之正確性檢核仍建議謹慎為之。 3. 感謝指導，已修正報告書中相關內容之數字。 4. 本研究由設置位置、排列方式、屋頂幾何外型等條件，

	<ol style="list-style-type: none"> 2. 由於風荷重影響因素相當複雜，光電板形式、材質及所架設風環境都會有所差異。是否可根據本研究與 CFD 模擬軟體結果做比對，以利實際之太陽光電系統設置時，可用模擬方式進行，再將模擬結果所得之板面方向壓力，節點風壓力，輸入結構分析軟體內作分析（以替代風洞試驗）。 3. 能源局推動設置目標，已修正為 2030 年達 8700MW，報告內容宜作修正。 4. 本研究宜界定清楚是否屬於研擬耐風設計準則，還是設置準則，亦或是耐風應力設計準則。以目前所提的成果內容似乎過於簡單。 	<p>透過風洞實驗掌握期氣動力特性，並進一步探討有助於提升耐風性能的設置方式，因此涵蓋安裝設置及支撐結構設計兩大區塊內容，以一般型態下整體耐風性能為建議目標。</p>
<p>李主任 鎮宏</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 報告書 P.77 關於設計準則第一項耐風設計考慮因素第 5 點中提及將光電板適度提高，請加以說明如何設計。 2. 文中所建議之補強構件（如圖 4-37、38），請另以圖面表示，避免與 Midas 原始物件套疊在一起。 3. 研擬之設計準則建議另以附件方式呈現。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 光電板之適度提高以增加支撐柱高度進行為佳，抬高光電板可使板下氣流流通更為順暢，有助於減低板下正壓梯度，補充說明於報告書第四章第一節末。 2. 補充圖說。 3. 遵照辦理。
<p>陳組長 建忠</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 蘇迪勒颱風過境時研究團隊是否場勘？建議於文中補充風害場勘及調查，資料蒐集分析，其損害狀況可結合本所相關研究。本研究除一般假設情況外，是否可以此颱風為實際案例納入報告書 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 今年蘇迪勒颱風過境時，對於國內太陽光電板產生災情，就蒐集到的資料，以彰化芳苑的災情為例，補充說明於第一章前言，作為本計畫研究之背景資料，同時就

	<p>中，以提高本研究的價值。</p> <p>2. 研究團隊可以了解因蘇迪勒颱風受災之光電板是否有照工研院相關規範設計、施工和使用？</p> <p>3. 請在報告書中具體書寫預期成果逐項展現，以便應用。</p>	<p>其破壞時現場風速未逾設計風速，仍發生嚴重的災損，驗證本計畫針對安裝、布置、支架等多方面的因素加以檢討，應屬必要。</p> <p>2. 目前國內關於太陽光電板的系統安全以材料強度為基礎加以檢驗，對於安裝方面較常見的考量為避免遮蔽太陽光，維持發電效率，因此對於安裝、布置、支架等較細節的規定，較為不足。</p> <p>3. 研究計畫之進行依進度進行，如期完成研究之成果。</p>
--	---	--

參考書目

1. Aly Mousaad Aly, Girma Bitsuamlak, 2013, Aerodynamics of ground-mounted solar panels - Test model scale effects, *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 123, 250-260.
2. Bienkiewicz, B., Sun, Y., 1992. Local wind loading on the roof of a low-rise building. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 45, 11–24.
3. Bienkiewicz, B. , Y. Tamura, H.J. Ham, H. Ueda, K. Hibi, 1995, Proper orthogonal decomposition and reconstruction of multi-channel roof pressure, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol.54/55, pp.369-381
4. B. Nicolas Pratt, Gregory A. Kopp, 2013, Velocity measurements around low-profile, tilted, solar arrays mounted on large flat-roofs, for wall normal wind directions, *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 123, 226-238.
5. Cook, N.J. & J.R. Mayne, “A Refined Working Approach to the Assessment of Wind Loads for Equivalent Static Design”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol.6, p.p.125-137, (1980).
6. Cook, N.J. & J.R. Mayne, “A Novel Working Approach to the Assessment of Wind Loads for Equivalent Static Design”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol.4, p.p.149-164, (1979).
7. Chung, K.M., Chang, K.C., Chou, C.C., 2011. Wind load on residential and large-scale solar collector models. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 99 (1), 59-64.
8. Chung, K.M., Chang, K.C., Liu, Y.M., 2008. Reduction of wind uplift of a solar collector model. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 96 (8-9), 1294-1306.
9. Davis Banks, 2013, The role of corner vortices in dictating peak wind loads on tilted flat solar panels mounted on large, flat roofs, *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 123, 192-204.
10. Gregory A.Kopp n, Steve Farquhar, Murray J.Morrison., 2012. Aerodynamic mechanisms for wind loads on tilted, roof-mounted, solar arrays. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 111(2012)40–52
11. Hagan, M.T., and Menhaj, M.B., 1994, “Training feed-forward networks with the Marquardt algorithm,” *Transactions on neural networks*, IEEE, Vol. 5, No. 6, pp. 989-993.
12. Hecht-Nielsen, R., 1989, “Theory of the back propagation neural network,”

- Proceeding of International Joint Conference on Neural Networks, IEEE, Vol. 1, pp. 593-605.
13. Jwo-Hua Chen, 2014, 'Wind Loadings on the Water Tank at Building Roof Top with Variant Installation Conditions', International Journal Applied Mechanics and Materials, vol.470, pp.1081-1084. (EI)
 14. Jwo-Hua Chen, Chin-Cheng Chou, 'Wind Loadings on the Low-rise Buildings Around the Hillside in Atmospheric Boundary layer', 2013, Applied Mechanics and Materials, Vol.351-352, pp.34-37.(EI)
 15. Michael Kasperski, 1996, Design wind loads for low-rise buildings : A critical review of wind load specifications for industrial buildings, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.61, p.p.169-179
 16. M.E. De Bortoli*, B. Natalini, M.J. Paluch, M.B. Natalini, 2002, Part-depth wind tunnel simulations of the atmospheric boundary layer, Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 90, 281-291.
 17. R. Nicolas Pratt, Gregory A. Kopp, 2013, Velocity measurements around low-profile, tilted, solar arrays mounted on large flat-roofs, for wall normal wind directions, Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 123, 226-238.
 18. Radu, A., Axinte, E., 1989. Wind forces on structures supporting solar collectors. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 32 (1-2), 93-100.
 19. Rumelnart, D.E., Hinton, G.E., and Williams, R.J., 1986, "Learning international representation by error propagation," Parallel Distributed Proceeding, D.E. Rumelnart et al., Eds, The MIT Press, Cambridge, MA, pp. 318-362.
 20. Wood, G.S., Denoon, R.O., and Kwok, K.C.S., 2001. Wind loads on industrial solar panel arrays and supporting roof structure. Wind and structures, an international journal, 4 (6), 481-494.
 21. 「最新建築技術規則」，2014，詹氏書局。
 22. 「建築物耐風設計規範及解說」，2014，內政部建築研究所。
 23. 「能源與產業政策白皮書」，行政院經濟部，2014。
 24. 「太陽光電發電設施應用於公共建設參考手冊」，行政院公共工程委員會，2011。
 25. 「公共工程或公有建築物設置太陽能發電系統參考資料彙編」，2009，工業技術研究院。
 26. 「建築節能技術手冊」，2013，財團法人台灣綠色生產力基金會。
 27. 「BIPV 建材一體型太陽光電系統應用研究」，2009，蔡宜中，內政部建築研究所自行研究計畫。
 28. 「太陽光電 (PV) 發電規劃設計、施工監造及運用」，2009.10，台灣電力公

- 司新能源施工處。
29. 何明錦，陳若華*，”單摺版式屋頂之低層廠棚建築風載重特性研究”，建築學報 62 期增刊(技術專刊)，99~116 頁，2007 年 12 月。(TSSCI)
 30. 陳彥均，2011，太陽光電發電系統規設與設置研討，中華技術，No.91，pp102-113。
 31. 鄭政利，詹肇裕，徐豪廷，2003，太陽光電系統導入建築構造計畫及外殼設計之研究，設計學報第 8 卷第 3 期。
 32. 陳若華，包匡，曾亮，李旻原，2012a，”太陽光電板設置於不同斜屋頂上所受風壓之初探”，空間設計學報。
 33. 陳若華，2012b，「低層建築物附屬設施之耐風性能研究」，內政部建築研究所協同研究計畫成果報告，ISBN：978-986-03-4705-0。
 34. <http://www.appledaily.com.tw/realtimenews/article/new/20150809/666239>

陽光屋頂耐風評估與設計準則

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：鄭元良、陳若華、李信宏、范智光、郭建源、
聶國昫、周晉成、王家驊

出版年月：104年12月

版次：第1版

ISBN：978-986-04-7280-6（平裝）