

# 太陽光電模組與夾扣件受機械荷重之有限元素分析

黃靖雅<sup>1</sup> 胡宣德<sup>2\*</sup> 李永峰<sup>3</sup> 林福銘<sup>4</sup>

關鍵詞：太陽光電模組、夾具、ABAQUS、有限元素法。

## 摘 要

太陽光電模組裝設於室外環境，在過大的風壓加載下，可能導致零件間之螺絲鬆動，甚至面板與支撐架脫離。本文以 ABAQUS 有限元素分析軟體建立太陽光電模組模型，依據規範 IEC 61215 施加均佈載重 2,400 Pa，探討風壓下模組的變形與受力情況。針對矽晶全電池太陽光電模組（雙支架平鋪型）類型分析。結果顯示，適當鎖固力可減少模組零件之位移及應力反應，但過大鎖固力可能造成支撐架及螺絲損毀。比較靜態與動態分析結果知兩者差異性小。負向風壓作用下，會產生較大之變形量，且負向風壓需要較大鎖固力使模型穩定，可知負向風壓是可能造成模組損壞的重要因素。

## FINITE ELEMENT ANALYSIS OF SOLAR PHOTOVOLTAIC MODULES AND CLAMPS SUBJECTED TO MECHANICAL LOADS

Ching-Ya Huang

Department of Civil Engineering  
National Cheng Kung University  
Tainan, Taiwan 70101, R.O.C.

Hsuan-Teh Hu

Department of Civil Engineering  
National Cheng Kung University  
Tainan, Taiwan 70101, R.O.C.

Yung-Feng Lee

Department of Civil Engineering  
National Cheng Kung University  
Taipei, Taiwan 10617, R.O.C.

Fu-Ming Lin

Green Energy and Environment Research Laboratories  
Industrial Technology Research Institute  
Hsinchu County, Taiwan 31061, R.O.C.

Key Words : solar photovoltaic module, clamp, ABAQUS, finite element method.

## ABSTRACT

The solar photovoltaic modules need to be installed outdoors. However, the long term and strong wind loads might loosen the screws between the solar photovoltaic modules, the clamps and the frames, or even completely separated. The model of the solar photovoltaic modules in this research is established with the software ABAQUS, which is based on the finite element method. According to the standard IEC 61215, a uniform wind pressure of 2,400 Pa is applied to the solar panels to determine the maximum stress and the magnitude and position of the deformation. This research analyzes the crystalline-silicon solar photovoltaic module (2-roots and roof-top). Results show that enough tightening force can reduce the deformation and stress; however, the frames, clamps, and fasteners might be damaged due to the excess tightening force under a great wind load. The result of applying periodic wind load is similar to the static wind load analysis. In addition, the negative wind load causes larger deformation than the positive one; therefore this condition needs a larger tightening force to make the solar system be stable enough to converge. It means that negative wind load have significant impact on the solar system.

<sup>1</sup> 國立成功大學土木工程學系碩士班研究生

<sup>2</sup> \*通訊作者，國立成功大學土木工程學系教授

<sup>3</sup> 國立成功大學土木工程學系博士後研究員

<sup>4</sup> 工業技術研究院綠能與環境研究所，太陽光電技術組組長/正研究員

## 一、前言

工業化與科技發展的過程中，需仰賴大量的能源進行，其中火力發電過度燃燒化石燃料，引發能源危機，更導致嚴重的氣候變遷、全球暖化等環境問題。而核能發電潛在的安全問題卻是在使用時不可忽略的考量。各國開始發展乾淨的替代能源，其中太陽光電具有安裝的便利性及後續操作簡易等優點，而其使用壽命長，若非嚴重的外力破壞，大多可以使用 20 年以上。為了接收陽光直射，台灣地區之太陽能板大多裝設於房屋之屋頂平台，導致模組易受到強風、降雨等外力破壞，因此系統固定方式、本身結構強度皆為須考量的重要因素 [1]，探討太陽光電模組受強烈颱風的破壞因素後，本文主要針對以下兩種受風力破壞的型式：

1. 支撐架與基礎結構間鎖固力不足
2. 模組與支撐架間鎖固力不足

將依據規範 IEC 61215 (International Electrotechnical Commission, Crystalline silicon terrestrial photovoltaic (PV) modulus-Design qualification and type approval) 之負載，此規範是以太陽光電模組受機械荷重下其電性衰退的行為作為判斷，以均佈風壓 2,400 Pa 為標準。系統的安裝方式為平鋪型雙支架，模組則選擇目前主流規格晶矽型 3BB (Bus Bar) 之全電池模組。本文採用 ABAQUS 有限元素分析軟體建立 3D 數值模型，改變模型鎖固力與風壓值，外力包含正、負風壓及週期動態風壓，紀錄零件的應力分布與變形，探討零件受風壓影響下可能發生損壞的區域，以及鎖固力大小對於模型穩定的影響。

## 二、文獻回顧

### 2.1 太陽光電模組結構介紹

太陽光電模組包含面板與外圍鋁框兩部分，介於兩者之間的空隙會以膠質材料 (MS) 填滿 (如圖 1) [2]，面板內部為多層材料所構成 (圖 2)，包含玻璃 (Glass)、EVA (Ethylene-vinyl acetate)、矽晶片 (Silicon)、導電焊帶

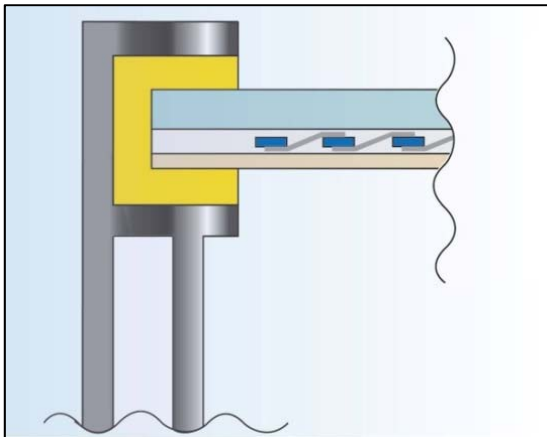


圖 1 模組板剖面圖 [2]

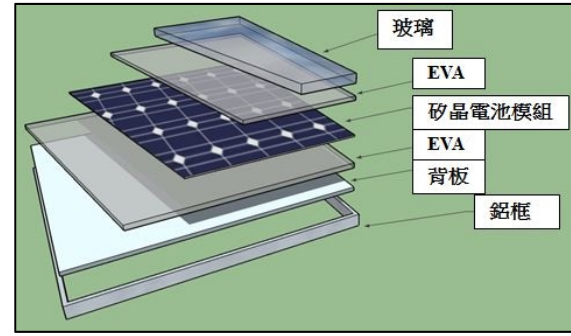


圖 2 模組各層結構

(Ribbon) 及背板 (Backsheet)。最上層的玻璃功能為保護模組不受外力破壞。EVA 分成上下兩層包覆矽晶片及導電焊帶，為一種透明膠膜，提供保護絕緣的功能 [3]。矽晶圓電池與導電焊帶為主要影響發電的材料。外圍鋁框考量材料重量及抗腐蝕能力，使用的是鋁合金 6005-T6 材料。

### 2.2 夾具與扣件

夾具的目的在於將太陽光電模組以螺絲鎖固於支撐架上，依裝設位置分為端夾具與間夾具，材料使用鋁合金 6005-T6。扣件為鎖固用的螺絲與螺帽，本文以不鏽鋼 304 (SS304) 的 M8 六角螺絲與六角螺帽進行分析，關於螺絲鎖緊的程度，楊盛雄 [4] 說明螺絲鎖緊作業時，一般施加完外力後，於塑性範圍內會有最大的鎖緊力，而未施加外力前，初期鎖緊力須以下式的值為標準：

$$F_i = A_t (0.7 \sigma_{yp}) \quad (1)$$

$F_i$ ：螺紋預負載或初期鎖緊力

$A_t$ ：拉應力面積

$\sigma_{yp}$ ：螺紋降伏應力

M8 螺絲拉應力面積為 36.6 mm<sup>2</sup>，螺紋降伏應力取 205 MPa，代入式(1)計算得鎖固力為 5252.1 N，作為本文鎖固力參考值。

### 2.3 太陽光電模組與風壓

李清安等人 [5] 針對颱風對於太陽能板的影響之研究結果發現，依據氣象局統計資料，侵入台灣者多為中度颱風，風壓介於 1,250 Pa ~ 3,060 Pa，分析損壞原因有：(1) 風速過大 (2) 周遭無屏障物 (3) 面板強度不足 (4) 固定方式欠佳等四項因素，顯示在裝設太陽能系統時，除了需達到充足的發電效率外，太陽能模組結構的穩定與安全性亦不可輕視。

賈維桓 [6] 以 ABAQUS 有限元素分析軟體建立太陽光電模組模型，包括模組中各材料層、外側鋁框及下方支撐架等，討論鋁框框體斷面、摩擦係數、荷載及拘束等因素對於各材料的受力與變形影響。封閉型的鋁框框體斷面抗載能力較開放型佳，而在摩擦係數足夠的狀況下可以有效避免模組脫框的行為，且可降低鋁框上應力集中的現象。

劉政佑 [7] 在考量安全性與材料成本的情況下，透過縮減框體斷面與玻璃厚度進行輕量化分析，其中縮減玻璃厚度對於鋁框及玻璃應力影響較大，並改變支架數量來討論最佳的架設方式，分析結果顯示三根支架相較兩根支架可以有效降低玻璃應力，卻會提高生產成本。

林冠宏 [2] 針對模組中的玻璃材料進行三點彎矩試驗，修正玻璃 E 值為 69 GPa。針對太陽光電模組內部之導電焊帶的受力與變形，討論導電焊帶轉折角為 10 度、15 度、30 度、45 及 60 度等 5 種情形，結果顯示於轉折角 30 度時會產生最大應力，若調整轉折區寬度為原始之 1.4 倍時，可降低約 40% 之應力值，避免面板因外力影響導致發電效率下降。

### 三、數值模型建立

#### 3.1 模型建立與材料參數

本次分析採用的面板全域規格長 1,640 mm，寬 990 mm，由 10 (長向) × 6 (短向) 片矽晶太陽電池晶片組成，依據其對稱性，分析採用兩片二分之一的太陽光電模組組合，對稱的特性於邊界條件中設定，模型平面圖如圖 3 與圖 4，整體模型排列與全域座標示意如圖 5。面板中各層材料厚度如表 1。外側鋁框尺寸如圖 6，鋁框與面板間由膠質材料填充，橫向支撐架如圖 7，並利用夾具扣件將鋁框固定於橫向支撐架上，端夾具與間夾具如圖 8 與圖 9，垂直紙面方向的夾具厚度皆為 38 mm，所有鎖固用的螺絲均為 M8-45L 六角螺絲，螺帽為六角螺帽，螺絲組合的模型會以接觸與預緊力設定方式，簡化螺紋的幾何形狀與功能，並利用垂直支撐架如圖 10，厚度為 50 mm，連接橫向支撐架與結構物。而各材料參數說明如表 2 [2,6]。

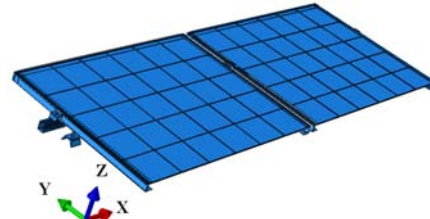


圖 5 太陽光電模組排列示意圖

表 1 模組各層材料厚度

材料名稱	厚度 (mm)
玻璃	3.2
EVA	1.3
矽晶片	0.2
導電焊帶	0.15
背板	0.2

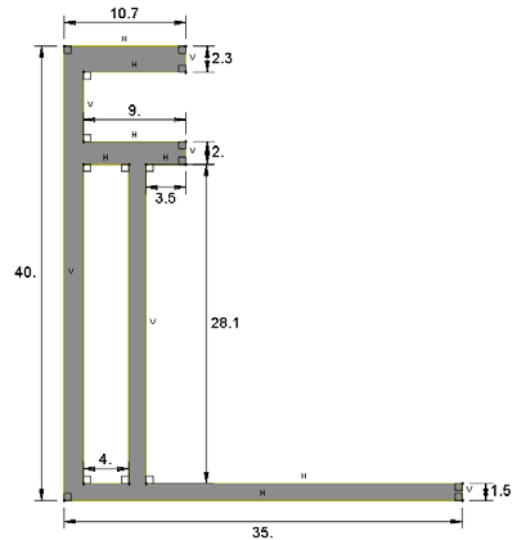


圖 6 鋁框尺寸圖 (單位：mm)

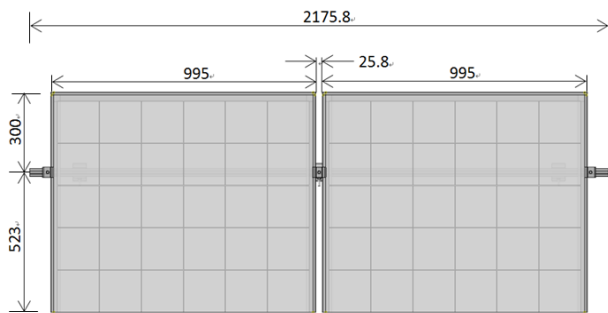


圖 3 平面圖(正面)(單位：mm)

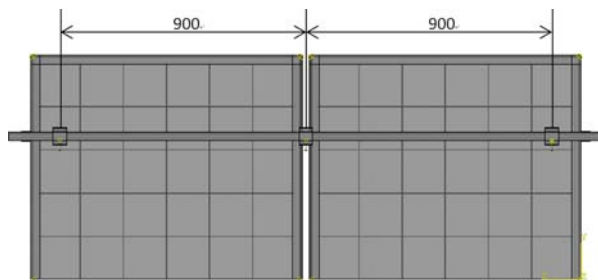


圖 4 平面圖(反面)(單位：mm)

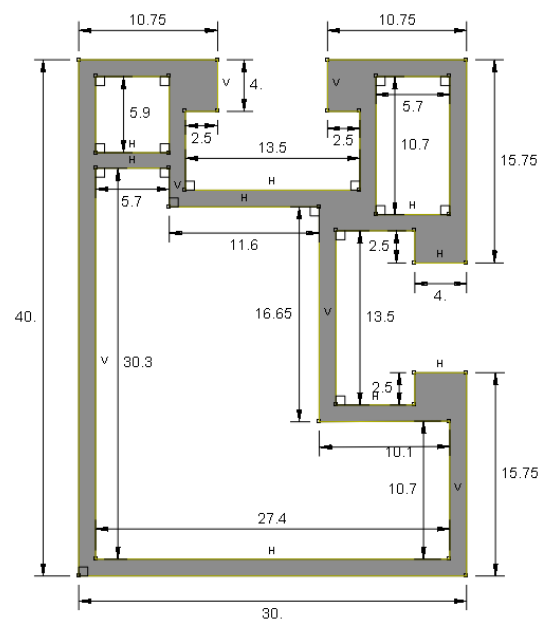


圖 7 橫向支撐架尺寸圖 (單位：mm)

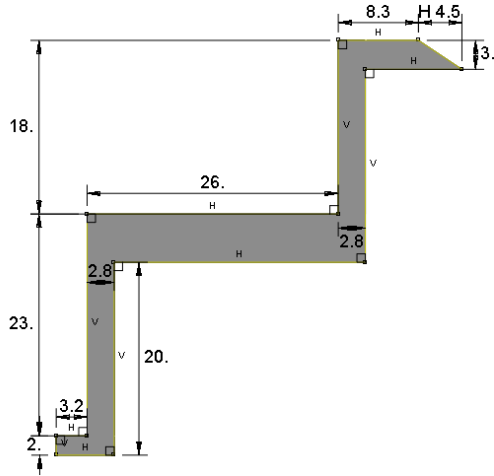


圖 8 端夾具尺寸圖 (單位: mm)

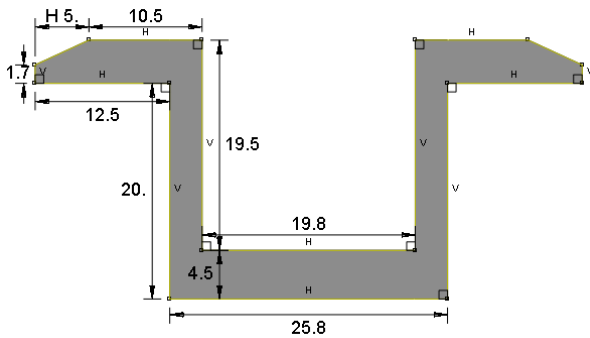


圖 9 間夾具尺寸圖 (單位: mm)

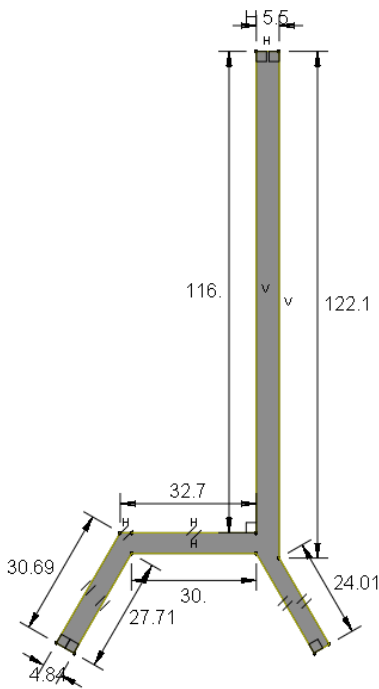


圖 10 垂直支撐架尺寸圖 (單位: mm)

表 2 材料參數

	Young's Modulus (MPa)	Poisson's Ratio	Yield Strength (MPa)	Ultimate Strength (MPa)	Density (g/cm <sup>3</sup> )
Glass	69000	0.23	-	194	2.5
EVA	25	0.48	-	-	0.96
Silicon Cell	162500	0.223	-	300	2.32
Backsheet	3450	0.39	-	-	1.2
Ribbon	50000	0.36	67.87	231	-
Aluminum	70000	0.35	300	360	2.7
MS	10	0.48	-	-	1.62
SS304	193000	0.29	205	515	8

### 3.2 接觸方式與摩擦係數設定

面板與鋁框間的空隙由膠質材料填充，設定膠質材料與太陽光電模組、鋁框的接觸面均設定為緊密接合 (Tie)。為了模擬螺絲鎖固，將螺絲與螺帽設定為緊密接合，施加預力的過程螺絲與螺帽不會分離，其他零件接觸面設定各材料間摩擦係數如表 3 [4]，因原始夾具於部分接觸面採鋸齒狀設計，零件粗糙面示意如圖 11 (紅色區塊)，用意在於提高摩擦力。

表 3 接觸面之摩擦係數

接觸材料	摩擦係數
鋁-鋁 (光滑面)	1.05
鋁-鋁 (粗糙面)	1.35
螺絲螺帽-鋁	0.15

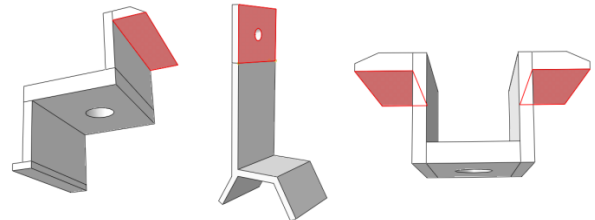


圖 11 鋁材粗糙面示意圖 (紅色區塊)

### 3.3 荷重與邊界條件

依據規範 IEC 61215 之規定，太陽光電模組在承受風壓時結構不能損壞且維持其光電轉換效率，須能抵抗 2,400 Pa 的風壓力，風壓施加於面板與鋁框。而鎖固力的施加採用 ABAQUS 中的 Bolt load 選項，在螺絲內部產生預拉力。模型於 Y 向對稱，對稱面無 Y 向位移，而 3D 元素無轉角自由度，並在支架底部設定為固定端。

## 四、太陽能板模組簡化與收斂性分析

### 4.1 模組簡化分析

太陽光電模組的層狀結構中的導電焊帶材料厚度較小，且長細比大，若將導電焊帶納入分析，則需要配合其尺寸切割網格，導致元素數量增加，耗費時間過長，因此在不影響整體分析的誤差範圍內，進行模組簡化，並不考慮夾

具扣件。本次簡化分析所使用的尺寸與配置：模組取單面四分之一，且下方橫向支撐架簡化，整體分析模型如圖 12，設定鋁框與支撐架接觸為緊密接合。橫向支撐架下方設定為固定端，X、Y 向對稱，施加均壓 24,00 Pa 於太陽光電模組與鋁框上。省略部分材料，並重新切割網格，分別探討下列六種情況：

- Case 1. 矽晶片與導電焊帶以 EVA 取代。
- Case 2. 導電焊帶以 EVA 取代。
- Case 3. EVA、矽晶片、導電焊帶、背板以玻璃取代。
- Case 4. EVA、矽晶片、導電焊帶以玻璃取代。
- Case 5. 僅由 3.2 mm 玻璃組成 (玻璃原始厚度)。
- Case 6. 由 3.2 mm 玻璃與 0.2 mm 背板材料組成。

結果如表 4，可知 Case 2 得到的結果誤差最小。比較 Case 3 與 Case 4 位移結果，因玻璃 E 值較背板大，在 Case 3 情況下面板較 Case 4 不易變形，因此 Case 3 位移及應力皆較小。Case 5 與 Case 6 調整面板厚度為玻璃及背板的原始厚度，不同於 Case 3、4 的結果，Case 5、6 之玻璃厚度相同，而 Case 6 多了 0.2 mm 的背板，背板 E 值雖較低，但仍可降低面板變形的程度。觀察 Case 5 與 Case 6 的結果，位移變大許多，顯示矽晶片雖然所占體積小，但卻具有較高的楊氏模數，去除後就會同 Case 1 的情形位移變大。因此後續為了降低元素數量，以 Case 2 去除導電焊帶材料，以 EVA 材料取代，並元素重新分割的模組模型進行分析。



圖 12 簡化用 1/4 模型示意圖

表 4 簡化模型分析結果

	面板元素量	Max. von Mises Stress (MPa)	Max. U3 (mm)	Stress Error (%)	U3 Error (%)
完整模型	255840	316.92	40.2542	--	--
Case 1	233058	353.917	48.9489	11.67	21.60
Case 2	234910	316.109	40.5025	0.25	0.62
Case 3	226026	222.28	21.7378	29.86	46.00
Case 4	233058	237.403	23.681	25.09	41.17
Case 5	250800	354.126	51.7217	11.74	28.49
Case 6	278712	353.715	50.9758	11.61	26.63

## 4.2 網格收斂性分析

參考林冠宏 [2] 於其論文中，以平板力學的 Levy Solution 作為解析解，比較以 C3D8、C3D8R、C3D8I、C3D20R 四種元素所模擬的數值解結果，以 C3D20R 精準度最高，但分析時間過長，而 C3D8 及 C3D8R 誤差較 C3D8I 為大，且 C3D8I 元素較穩定容易收斂，因此本文以 C3D8I 元素進行分析。

網格的大小會影響分析的精準度與分析時間的多寡，並且要避免網格過度扭曲或是過於細長，為了取得較適當的分析元素量，需透過收斂性分析衡量精度與分析的效率。本次收斂性分析以相同模型但切割為不同密度的網格，共使用 8 組元素數量來進行比較，隨著元素數量的增加，分析結果逐漸趨於穩定，而不產生大變化時即代表收斂完成。以面板的位移結果為主，觀察圖 13，可知道當整體模型網格數量為 275157 時，各零件最大位移趨於穩定，因此後續以此網格數 275157 作為分析模型。

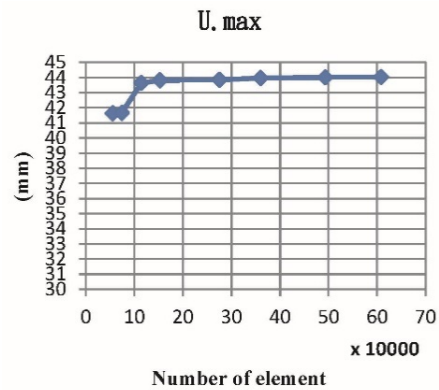


圖 13 面板收斂性分析

## 五、數值模擬分析

### 5.1 降伏 (破壞) 準則

太陽光電模組中以玻璃材料作為基準，玻璃為脆性材料，以其最大應力點作為破壞點，意即當其最大主軸應力 (Maximum principal stress) 大於材料的極限應力時，表示材料破壞。而鋁材及不鏽鋼材料為延展性材料，考量該材料在三個維度之應力狀態，以其 von Mises stress 是否達降伏強度，判斷材料為彈性或是塑性行為，若進入塑性行為表示結構可能因為應變過大而破壞。

### 5.2 無鎖固狀態與最小鎖固力

考慮無鎖固狀態，代表鎖固力設定為 0，但由於數值模擬在計算接觸面時若摩擦力過小，造成模型出現大位移，然而在使用靜力分析的情形下並不允許模型不穩定的情況發生，因而導致分析無法完成。因此在 2,400 Pa 正風壓的情況下，鎖固力增加至 0.2 N 才得以收斂，取此值為收斂的最小鎖固力。



### 5.3 鎖固力分析

為了討論鎖固力改變並隨著風壓的增加的各種結果差異，本次使用鎖固力：0.2 N、500 N、1,000 N、2,000 N、3,000 N，及風壓：500 Pa、1,000 Pa、2,400 Pa、3,000 Pa，圖 14 為系統於 2,000 N，2,400 Pa 狀況下的變形狀態。

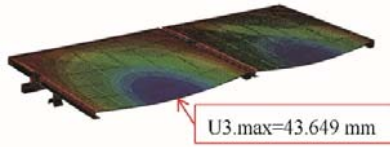


圖 14 2,000 N 鎖固力、2,400 Pa 風壓的受力結果

#### 5.3.1 玻璃應力結果

太陽光電模組最大位移發生在面板中心。最大主軸應力由圖 15 之 2,400 Pa 單一風壓下，可以看出鎖固力的增加會使位移變小的趨勢，但風壓對面板之影響較大於鎖固力之影響，此結果顯示在面板玻璃之主軸應力上 (如圖 16 所示)。模組中玻璃為脆性材料，主軸應力最大值發生於夾具下方，夾具鎖的越緊造成該處應力越大，以其極限強度 194 MPa 檢視是否破壞，結果顯示仍在安全的範圍內。

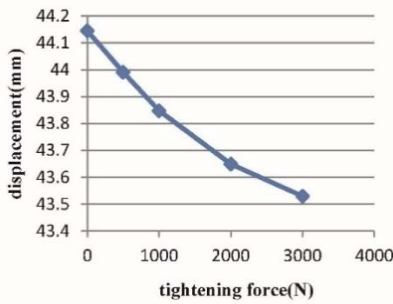


圖 15 風壓 2,400 Pa 下面板中心 U3

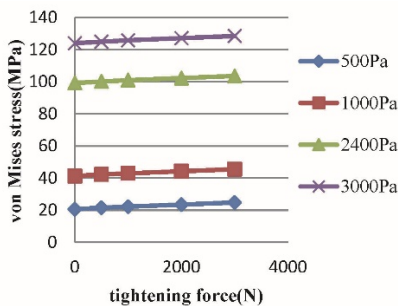


圖 16 玻璃最大主軸應力

#### 5.3.2 鋁框應力結果

鋁框 von Mises 應力由圖 17 可知在相同風壓下，隨著鎖固力的增加，最大應力值隨之下降，表示當鎖固力增加，夾具得以提供鋁框與橫向支撐架固定的力量，使得模型整體狀態更為穩定，顯示螺絲鎖固與否對系統的安全有一定程度的影響。鋁框與橫向支撐架透過夾具結合固定，因為面板與鋁框受風壓將受力藉由夾具傳遞至橫向支撐架，因此接近夾具下方位置都會有較大的應力出現。

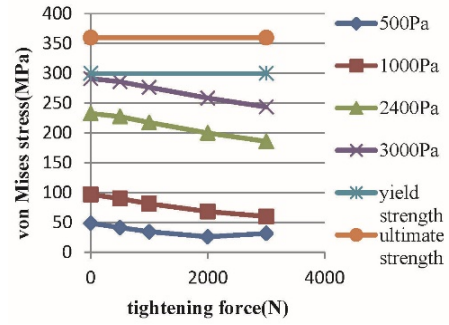


圖 17 鋁框 von Mises 應力

#### 5.3.3 橫向支撐架應力結果

橫向支撐架應力最大應力值發生在接近端夾具處之接觸點，此結果與鋁框是一致的。圖 18 顯示在風壓 2,400 Pa，鎖固力為 2,000 N 時支撐架應力已超過其降伏強度，而風壓在 3,000 Pa 時，甚至已經超過極限強度，可知當較大的正風壓加載時，橫向支撐架可能出現破壞的情況。鋁框的最大應力發生於間夾具下方與橫向支撐之接觸點，若取兩零件上接觸位置相近的各一點，比較其 Z 軸方向應力 (S33) 差與 von Mises 應力差，將第二階段 (施加完風壓) 結果繪於圖 19，由圖可知 von Mises 應力差值隨鎖固力增加而減少，表示施加風壓情況下，鎖固力增加可以減少鋁框與支撐架之間相對移動，兩接觸點間應力值會接近使得應力差趨近於零，而因為風壓使得鋁框變形，造成接觸面受力行為不單單是 Z 向的作用力，因此 Z 軸方向 S33 應力差並沒有趨近於零。

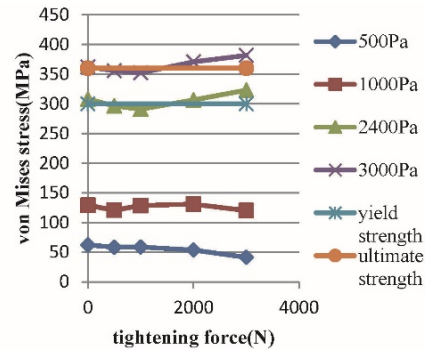


圖 18 橫向支撐架 von Mises 應力

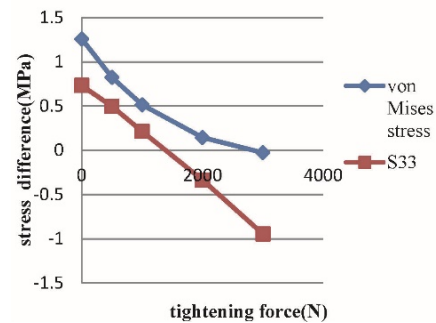


圖 19 鋁框與橫向支撐架應力差 (2,400 Pa)

### 5.3.4 夾具應力結果

兩夾具應力分布圖如圖 20 與圖 21，夾具隨著鋁框變形造成 AB 段及 CD 段受彎，導致兩種夾具都是在相似的區域有較大應力出現。將圖 20 端夾具上 A 點 X 方向位移減 B 點 X 方向位移之差除以兩點之 Z 向距離為其轉角 ( $\Delta$ )，相同地，將圖 21 間夾具上 C 點 X 方向位移減 D 點 X 方向位移之差除以兩點 Z 向距離為其轉角，圖 22 與圖 23 分別為端夾具與間夾具受各種風壓之鎖固力與 von Mises 應力關係圖，相同風壓下，隨著鎖固力的增加夾具之最大 von Mises 應力有漸增的趨勢，但皆不超過其降伏強度。當施加風壓後（第二階段），風壓與轉角關係如圖 24（端夾具）及圖 25（間夾具），在相同風壓下，鎖固力越大轉角越小，表示穩定的系統中面板與鋁框的變形小。

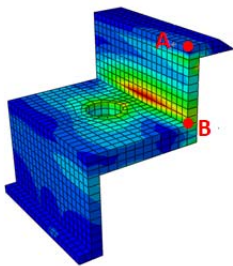


圖 20 端夾具應力分布 (2,400 Pa, 2,000 N)

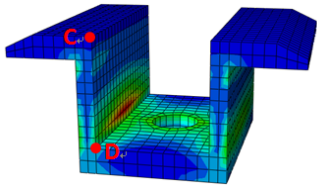


圖 21 間夾具應力分布 (2,400 Pa, 2,000 N)

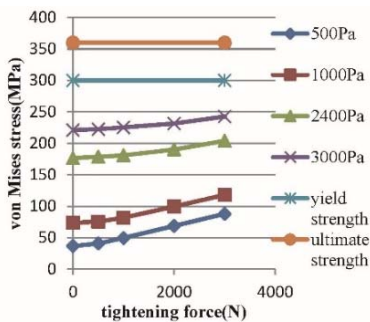


圖 22 端夾具 von Mises 應力

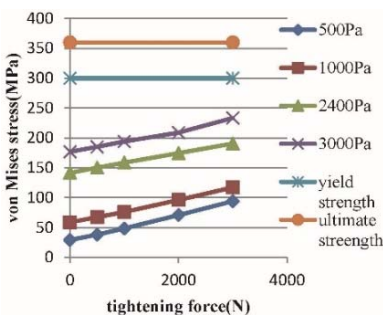


圖 23 間夾具 von Mises 應力

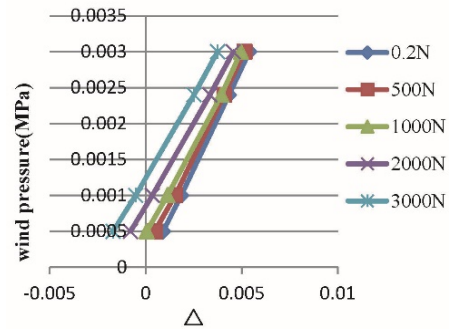


圖 24 端夾具風壓與轉角關係

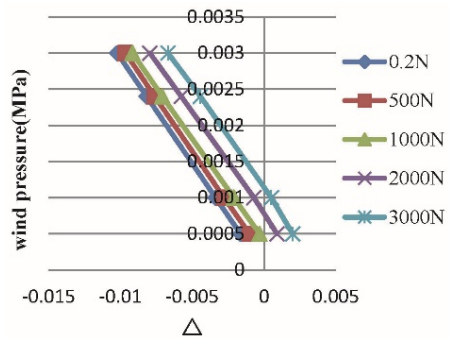


圖 25 間夾具風壓與轉角關係

### 5.3.5 垂直支撐架應力結果

垂直支撐架分為兩端與中間兩種位置，在中間位置的垂直支撐架應力偏大的區域是和鋁框接觸位置，應力值結果如圖 26，鋁框變形後向下壓，鋁框尖角與垂直支撐架接觸，而當鎖固力增加，鋁框變形變小，對垂直支撐架的應力也就減少，但當風壓達 3,000 Pa 時，材料已經降伏。兩端的垂直支撐架，最大應力發生於螺絲孔處，應力值皆在降伏強度內。

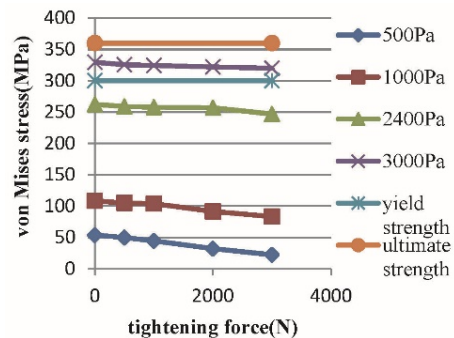


圖 26 垂直支撐架 (中) von Mises 應力

### 5.4 扣件螺絲應力結果

延展性材料的受力行為以 von Mises stress 為主，而鎖固力的施加方式是於螺絲內部施加預拉力，因此輔以螺絲軸向的應力來討論。施加風壓後，根據各螺絲應力結果知道，以端夾具螺絲最容易破壞，其 S33 與 von Mises 應力如

圖 27 與圖 28，規範 2,400 Pa 風壓下，鎖固力 3,000 N 時兩種應力皆高於降伏強度，而 3000 Pa 風壓時超過 1,000 N 的鎖固力狀況下應力皆大於降伏強度。比較 S33 與 von Mises 應力結果發現，當風壓增加至 2,400 Pa，兩種應力差異變大，可知在大風壓的狀況下，面板變形導致螺絲 S11 與 S22 應力變大。

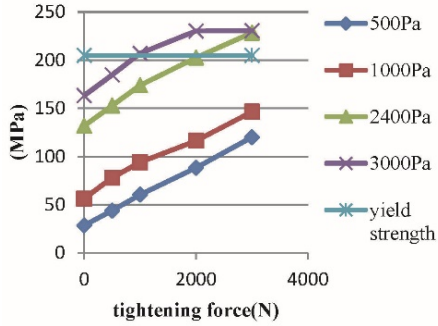


圖 27 端夾具螺絲軸向應力

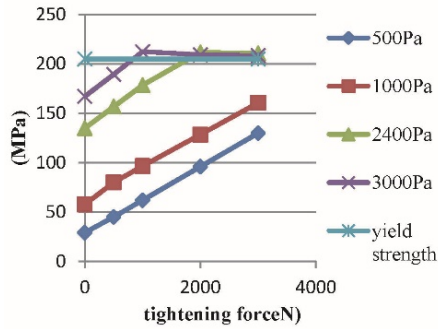


圖 28 端夾具螺絲 von Mises 應力

### 5.5 負風壓分析

以相同模型施加均佈負風壓 2,400 Pa，探討鎖固力的影響及其應力結果。不同於正風壓 2,400 Pa 的情況，僅需 0.2 N 的鎖固力模型即可收斂，負風壓 2,400 Pa 下需要 825 N 的才可使模型收斂，可知道負風壓對於鎖固力的需求較高。此部分設定鎖固力為 2,000 N，負風壓 2,400 Pa，系統受力變形結果如圖 29。最大應力值比較結果如圖 30，可知多數零件之最大應力皆以負風壓的狀態較大，顯示負風壓對太陽光電系統的影響較大，較可能在負風壓時發生損毀。其中以橫向支撐架與間夾具的應力值大於降伏強度 (300 MPa)，但在正負風壓下最大應力發生位置有差異，破壞位

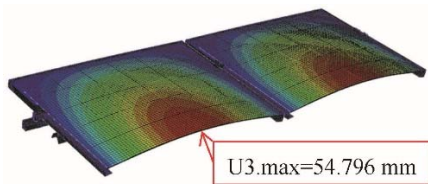


圖 29 2,000 N 鎖固力，-2,400 Pa 風壓的受力結果

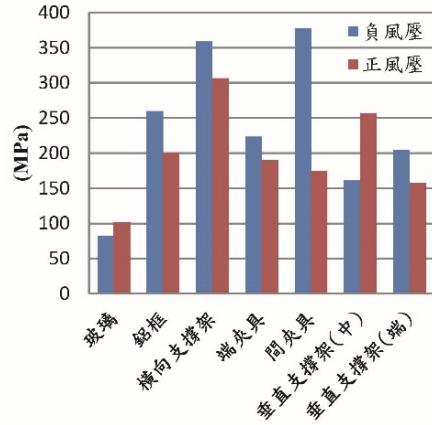


圖 30 各零件應力比較

置不同，橫向支撐架於間夾具螺絲鎖固位置有極大的應力值，是因面板往正 Z 向產生變形，螺絲為抵抗此變形對支撐架造成壓應力，而在端夾具螺絲鎖固處亦有相似情況，這可能導致螺絲受到過大的拉力後鬆動，造成系統不安全。間夾具最大應力發生在螺絲鎖固處，已超過鋁材的極限強度 360 MPa，此外該處螺絲 von Mises 應力值亦高達 223.1 MPa，表示間夾具處是負風壓狀況下系統中最危險的零件位置，且發生在與螺帽接觸的位置，可能因為變形過大導致螺絲鬆脫，甚至是夾具脫離。

### 5.6 動態風壓分析

本文設定一正弦函數之風壓，其週期為 5 秒，振幅為 2,400 Pa，分別施加 0.2 N 與 3,000 N 鎖固力。將此動態風壓分析結果之面板最大變形量如圖 31，其中實線部分為動態風壓作用之結果，而虛線部分是相同靜態風壓下的最大位

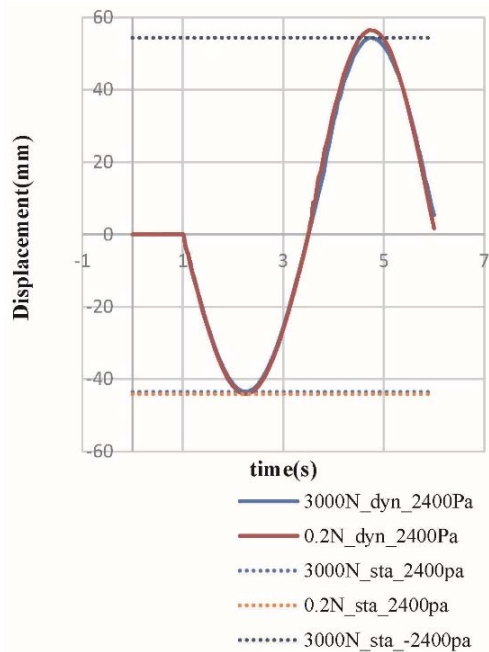


圖 31 面板中心位移



表 5 靜態與動態分析之最大應力差異比較

最大應力 差異 (%)	鎖固力	3,000N		
	風壓	2,400 Pa	2,400 Pa	- 2,400 Pa
鋁框	0.18	0.21	0.09	
橫向支撐架	0.09	0.15	0.10	
端夾具	0.26	0.12	0.67	
間夾具	0.33	0.11	0.24	
垂直支撐架 (中)	0.07	0.03	0.23	
垂直支撐架 (端)	0.10	0.11	0.18	

移,由圖中顯示:加載正向風壓時,施加鎖固力 0.2 N 與 3,000 N 之面板變形量幾乎沒有差異,且相同鎖固力之下,動態與靜態分析結果之變形量也幾乎一致;而動態風壓加載至最大負向風壓時,鎖固力 0.2 N 之變形量有大於 3,000 N 的現象,而在負風壓,鎖固力 3,000 N 時之靜態與動態分析結果相近。由表 5 比較其他零件之靜態與動態分析結果之差異,發現在此動態外力下,其分別在正壓與負壓階段時的最大應力與靜態的結果相近。

## 六、結 論

本研究以有限元素分析軟體 ABAQUS 進行數值模擬分析,針對太陽光電系統受到風壓作用下的行為,探討風壓與鎖固力對於各零件的影響,藉由應力分布結果知道正負風壓下,零件容易受損的區域。本次分析採用規範 IEC 61215 的 2,400 Pa 均佈風壓為標準,為了減少分析時間,將模組中導電焊帶 (Ribbon) 省略,以 EVA 取代充填,並透過收斂性分析得到兼具分析精準度與分析時間的網格來進行數值模擬。數值分析的結果獲得以下結論:

1. 本文之分析模型,加載正向風壓 (2,400 Pa),施加鎖固力 0.2 N,模組即可獲得穩定且收斂之分析結果;而加載負向風壓 (-2,400 Pa),則需施加鎖固力 825 N,模組才可獲得穩定且收斂之分析結果,而在相同穩固之鎖固力與風壓下負向風壓所產生之面板變形量會大於正向風壓。
2. 於夾具扣件施加較大之鎖固力,可增加模組之穩定性,減小面板與鋁框之變形量。但鎖固力對各零件應力反應之影響,遠小於外力風壓對其之影響。
3. 鎖固力過大,且在強風作用下,可能造成鎖固螺絲或橫向支撐架之損壞。以本文為例,鎖固力 2,000 N 以上,且風壓在 2,400 Pa 以上,螺絲已達材料降伏強度;鎖

固力 3,000 N,橫向支撐架在 2,400 Pa 風壓下達材料降伏,在 3,000 Pa 風壓下達材料極限強度。

4. 在正風壓的狀況下,對不同位置之夾具及螺絲,端夾具之變形量及所承受應力皆大於間夾具。而不同位置之垂直支撐架,以中間之垂直支撐架承受之應力大於兩端,為可能會先產生破壞之位置。
5. 負風壓的狀況下,多數零件的應力與變形值高於正風壓的情況,顯示負風壓對於系統的影響較嚴重,其中橫向支撐架與間夾具有破壞的風險。
6. 以週期性風壓進行動態分析,靜力分析與動力分析結果相近,兩者可視為相同。

## 參考文獻

1. 李清安、張克勤、李聰盛、鍾光民,「颱風對國內安裝使用太陽能熱水系統之損害探討」,中國工程師學會會刊,第 80 卷,第 4 期,第 134-142 頁 (2007)。
2. 林冠宏,「多電極太陽光電模組受機械荷重之有限元素分析」,碩士論文,國立成功大學土木工程研究所,台南 (2017)。
3. 沈輝、曾祖勤,太陽能光伏發電技術,化學工業出版社,北京,第 67-69 頁 (2008)。
4. 楊盛雄,「不銹鋼螺紋鎖緊特性之研究—以 M6-60 長不銹鋼螺紋結合 M 形不銹鋼夾緊件為例」,碩士論文,國立交通大學工學院精密與自動化工程學程,新竹 (2007)。
5. 李清安、張克勤、李聰盛、鍾光民,「颱風對太陽能熱水系統裝置損壞調查剖析:海棠颱風案例」,太陽能及新能源學刊,第 10 卷,第 2 期,第 2-5 頁 (2005)。
6. 賈維桓,「矽晶太陽光電模組機械荷重之數值分析」,碩士論文,國立成功大學土木工程研究所,台南 (2012)。
7. 劉政佑,「太陽光電模組受機械荷重之有限元素輕量化分析」,碩士論文,國立成功大學土木工程研究所,台南 (2013)。

---

107 年 3 月 30 日	收稿
107 年 12 月 7 日	修改
108 年 2 月 7 日	接受