

多電極太陽光電模組受機械荷重之有限元素數值探討

林冠宏¹、胡宣德¹、李永峰¹、林福銘²、彭成渝²

¹ 國立成功大學土木工程學系

² 工業技術研究院綠能與環境研究所

摘要

隨著氣候變遷，全球暖化影響，加上石油燃料的枯竭，各國紛紛開始尋找新的替代能源，像是水力發電，風力發電，生質能發電以及太陽能發電等等……。太陽能發電有許多優點，操作簡易不需人手，耐久性強，良好的保養可維持二十年以上的發電。由於太陽能面板為了能照射陽光，因此需長期架設於室外，在高緯度國家，太陽能電池模組常受積雪過重而導致鋁框支架挫曲變形，進而使整體太陽能模組內部高單價發電材料斷裂，而在台灣，過大的風壓也將造成鋁框變形。本研究以有限元素軟體 ABAQUS 建構太陽能電池模組負載分析，根據規範 IEC61215 負載均壓 2400Pa 來獲取太陽能電池模組內部最大應力與變形，同時改變鋁框支架位置，來評估最佳的設計方式。最後將分析結果整理，建議較佳之鋁框支架位置，同時預期模組內部材料最易破壞區，以利後續太陽能電池模組設計之參考。

關鍵字： 太陽能電池模組、多電極、ABAQUS、有限元素法

ABSTRACT

Due to climate changing, impact of global warming and the depletion of fuels of petroleum, people around the world are starting to look for alternative sources of energy, such as hydropower, wind power, biomass energy and solar power. Solar power has many advantages: simple operation, strong durability. Solar panels can be used to serve power generation for more than 20 years if it is well-maintenance. In order to be able to irradiate the sun, the solar cell modules need to be set up long-term outdoors. Because solar cell modules are often subject to excessive snow which leads to buckling deformation of aluminum frame at high latitudes, the high-priced single-generation materials in the solar cell module fracture. In Taiwan, too much wind pressure will also cause deformation of the aluminum frame. In this study, we build the load analysis of solar cell modules with ABAQUS. According to the standard IEC 61215, we set the uniform pressure 2400pa on panels and analyze the maximum stress and deformation from the solar cell module. We change the position of mounts to obtain the best design. Finally, we sum up the result of total analysis and recommend the best position of mounts and find out the most likely failure zone in solar cell modules.

Keywords: solar cell module、ABAQUS、Finite element method

一、緒論

1.1 前言

隨著地球能源逐漸匱乏，加上溫室效應日益嚴重，找尋新的替代能源是未來不可或缺的重要議題[1]，常見替代能源有水力、風力、太陽能發電，以及生質能發電，而太陽能發電有許多優點，首先，太陽光為取之不盡，用之不竭之能量，只要有陽光的存在，發電就不會中斷，其二，若無特殊外在破壞，太陽能發電中的矽晶電池能夠維持一定穩輸出，其三，太陽能發電過程不需複雜的技術問題，且發電過程安全無虞[2]。近年來，太陽能發電轉換功率突破不少，加上安裝區域較不設限，往往一般民眾家中屋頂即能設置，因此是相當普及與乾淨的綠能發電裝置。

1.2 研究目的與內容

由於太陽能電池模組長期架設於戶外，受到外在環境影響[3]，在臺灣最常見就是颱風所帶來的風壓力，在高緯度國家則需面臨雪壓力，而高強度的載重容易使面板有過大的變形，進而引發內部發電材料的毀損，另一方面，包覆於面板周圍之鋁框或固定面板之支架也恐因受高應力導致扭曲變形，故本文以有限元軟體 ABAQUS 建立常見規格之太陽能電池模型，依據規範 IEC61215 規定之負載，改變支架架設位置，透過變形量的評估，獲取最佳的設計位置，而另一方面，藉由數值模擬分析，探討框體的應力情形，以確保結構體的穩定。

ABAQUS 是一套常見的有限元分析軟體，其圖形介面方便建立與編輯模型，可快速設定邊界條件、材料參數輸入，接觸面之設定與選取，加上清晰的縮圖形式，讓使用者容易上手，提高整體效率。

二、文獻回顧

2.1 太陽能電池

市面上所使用的太陽能電池包括全電池模組與半電池模組(圖 1)，半電池模組為減少全電池模組一半面積，並以平行方式連接，因此通過各匯流條之電流量會減少一半，大大降低內電阻，增加整體效率。

而無論是全電池模組或是半電池模

組，其兩者皆有不同的電極規格，常見如 2BB(2 電極)、3BB(3 電極)、4BB(4 電極)、.....等(圖 2)，電極會在製程時鐳於細晶片上下兩端。隨著電極數之增加，電極本身寬度愈細，如需維持相同電阻率，其使用之銅箔導線(Ribbon)相對要增厚使截面積不變。

2.2 電池模組結構

太陽能電池模組主要由太陽能電池板與固定電池板之鋁框組成，太陽能電池面板本身為材料複雜之疊層板，第一層為太陽能玻璃，具有高強度，為面對載重的第一道防線，第二層為 EVA(Ethylene-vinyl acetate)材料，抗寒耐熱，保護包覆於層中之發電材料，矽晶片(Silicon)與 Ribbon，抵禦外在環境變化，最後一層為背板(Backsheet)，密封面板底部隔絕水分與防止靜電產生，而鋁框為固定電池板的結構，在與電池板交接處有膠質材料填充於空隙中。

2.2.1 太陽能玻璃

普通玻璃含鐵量過高且玻璃反射率高，因此不利於太陽能發電，為了降低玻璃的反射率，玻璃製造商在玻璃表面塗佈一層薄膜層，稱為減反射塗層，另一方面，為了增加透光率，採用浸蝕工法，可使玻璃透光率提高 5%。因此，標準之太陽能玻璃通常採低鐵剛化玻璃，其透光率高，抗衝擊能力強且使用年限高[4]，可作為整體面板的第一道防護線。

2.2.2 EVA 材料

EVA 材料是乙烯和醋酸乙烯酯之聚合物，其透明、柔軟，且具有熱容黏接性，因此相當適合作為太陽能電池封裝材料，然而，未經改良之 EVA 材料耐熱性差，易產生熱收縮而使太陽能電池碎裂，致使黏膠脫層，為了改良其特性，在添加紫外光吸收劑、紫外光穩定劑等[4]，能有效改善 EVA 耐老化性能，即大大降低太大之熱收縮，以承受外在天氣變化。

改良之 EVA 材料在未經熱壓成型前在常溫狀態時無黏性，方便於裁切，使用時，按照熱固化條件進行層壓封裝，冷卻後即產生永久黏合密封。

2.2.3 矽晶圓電池

矽晶圓電池為太陽能面板最重要的發電材料，發電原理為將含有元素磷(P)及元素鋁(Al)的矽(Si)所製成的 p-n 半導體，當太陽光通過 p-n 介面，該處之電子與電洞就會形成電流。矽元素於地球含量約 26%，僅次於氧元素與氫元素，非常豐富，但對於太陽能發電所要求的矽卻是高純度，其純度需要 99.999999%，其提煉方式相當艱難，首先，利用氧化還原方式，將矽由二氧化矽提煉出來，但此階段所提煉之矽精度只有 95%，且過程相當耗電，必須在經由物理法或化學法才能得到最後的高純度矽[2]，因此，太陽能面板製成造價大部分由此控制。

市面上常見之矽晶片，可分為單晶與多晶，單晶顧名思義即為單一物質所組成，其製造過程相當精密，需長時間與高技術配合，價格較高，另一方面，多晶在製造上相對簡單許多，價格也低廉，但由於雜質較高，其發電效能大約為 13~16%，而單晶純度高，效能大約為 15~20%，在實驗室之轉換效能最高可至 29%[2]。

2.2.4 Ribbon

Ribbon 為太陽能電池面板中的重要材料之一，銲於矽晶片上下兩端，主要功能為傳遞發電之電流，其材料主體為銅線，占了約 99.9%，在製程時依據不同尺寸需求進行軋延處理，而後在外層鍍層錫化合物，防止內部銅線氧化，並且增加可銲性，而在此兩階段需嚴密控制品質，若控制不當，造成電流傳遞不加，會影響太陽能面板的整體效能與壽命。

2.2.5 背板

背板為太陽能面板最後一道防線，依客戶要求可分為許多種類，常見背板組成材料為 Tedlar 複合材料，為一種高透光率的透明材料，且具有耐老化、不透氣、抗腐蝕、以及耐候性佳，而為了延長太陽能面板使用壽命，會將 Tedlar 材料與其他材料合成疊層，像是 TPT(Tedlar/Polyester/Tedlar)，就是具有高強度、阻燃特性，且對太陽光起反射作用，降低面板整體溫度，而增加發電效能，但其價格較高，且不利黏合，因而發展出 TPE(Tedlar/Polyester/EVA)材料，與 EVA 黏

合極佳，但因少一層 Tedlar，耐候性降低，但價格低廉，且工作性佳，因此封裝上使用逐漸題高[4]。

2.3 鋁框

鋁是世界上最常使用的材料之一，廣泛運用在土木、航太、民生……等等，其導電率僅次於銅和銀，因此常用於電子產業。而利用各種元素添加與不同的退火機制可製造出各式各樣鋁合金，高硬度鋁合金最高強度可達 600MPa，普通硬度鋁合金強度則 200~450MPa，其中 6063 鋁合金，因加入定量的之鎂銦元素而具有優良的可銲性，工作性大幅提升，同時本身具有良好耐磨性與抗腐蝕性，且在一般狀態下，在外層會形成一道保護膜，以防止內部遭受侵蝕，故其抵禦天候變化影響，因此 6063 鋁合金為太陽能模組最常採用鋁框。

三、模型建立

3.1 模型尺寸與材料參數

太陽能電池面板為平面對稱之矩形板，由於集電盒不提供整體勁度，故不予建模模擬，因此在分析上可採四分之一有限元素模擬。全域太陽能面板模型長 1640mm，寬 990mm，總厚度 4.7mm，由上至下各層材料分別為玻璃(3.2mm)、EVA(1.3mm)、背板(0.2mm)，其中矽晶片(0.2mm)與 Ribbon(0.15mm)包覆於 EVA 層中，如圖 3，太陽能板與鋁框剖面圖如圖 4 所示。

太陽能面板模型由 10×6 片矽晶電池模組組成，單一矽晶片長寬皆為 156mm，各晶片排列間格為 2mm，而 Ribbon 為傳遞電子的導體，鋪設於矽晶片上，且排列方式由前片矽晶片上端連至後片矽晶片下端，因此在晶片交界處會有一轉折角，如圖 5。類型採四分之一分析，矽晶電池模組為 5×3 片，而太陽能面板長為 820mm，寬為 495mm，詳細排列圖 6。鋁框與支架斷面尺寸則如圖 7 所示，其材料皆為鋁。

太陽能面板分析上採線彈性，鋁框與支架則採塑性，而分析所採用的楊氏模數與柏松比則列表於表 1。

3.2 邊界條件設定

由於採四分之一模型分析，因此需在太陽能電池模組對稱斷面設置對稱邊界；而在

鋁框與太陽能面板交界空隙處，設置類橡膠材料填充，模擬真實交界處之黏著劑，此材料與太陽能面板與鋁框設置接觸機制會在後續說明，最後在支架底端設置成固定端。

根據規範 ICE61215，取均布壓力 2400Pa 作用於太陽能面板上。

3.3 元素選擇

太陽能面板為平面對稱矩形板，考量接觸分析，採六面體實體元素劃分，而為了在眾多種類元素中找出最適當的分析元素，現以 C3D8、C3D8R、C3D8I、C3D20R 四種常見元素在相同邊界條件與負載下，比較各種元素於玻璃基板之最大 1 方向(x 軸)應力 S11、最大 2 方向(y 軸)應力 S22、最大 3 方向(z 軸)位移 U3 等分布圖，並套用平板力學中 Lévy solution 之模型為解析參考，結果記於表 2 與表 3。

由表 2、表 3 可知，C3D8 元素因存有剪力自鎖效應而使元素過剛，產生多餘剪切應力，C3D8R 元素則所得應力發生點不符合解析解之位置，而 C3D8I 元素與 C3D20R 元素所計算的結果與解析解接近，但因 C3D20R 元素節點數較多，分析時間較長，以 C3D8I 相較效益不大，故使用 C3D8I 元素做為後續整體分析。

3.4 收斂性分析

太陽能板為材料複雜之疊層板，而鋁框與支架則為單一均質材料，若使用原模型進行收斂，因含接觸分析，分析時間較長，故將原本接觸設定簡化為 Simply Support，只針太陽能板做收斂性分析，當收斂性參考值不再隨著網格加密而改變，則表示收斂完成，結果如圖 8。

由圖 8 可知，網格數量在 150000 左右時，太陽能面板的最大位移改變幅度漸緩，代表收斂完成，而由於太陽能面板為複雜材料疊層板，因此保守取網格數量 200508 作為後續分析。

四、太陽能模型測試

4.1 各層材料變異分析探討

由於太陽能面板為材料複雜之疊層板，因此確認各層材料對於太陽能面板之整體變形量影響至關重要。考慮以相同負載與

相同邊界條件下，分別變異各層材料楊氏係數，探討各層材料楊氏係數對於整體太陽能面板變形量之影響，結果紀錄於表 4。

由表 4 可知，玻璃之楊氏係數的變動對於整體太陽能面板變形量有極大的影響，不論是放大或是縮小楊氏係數相對於其他材料的變異皆是最高的，故確定太陽能玻璃之楊氏係數為必要課題。

4.2 太陽能玻璃板測試

現以一塊長 420 mm，寬 380mm，厚 3.05mm 之太陽能玻璃板，於玻璃板中線施加一線載重，在平行線載重之兩邊緣底端設置滾支承，量測玻璃板中心之變形量，實驗圖詳圖 9，將載重與變形量曲線圖繪製圖 10。

由圖 10 可知，載重與變形量圖形為一直線，因此材料上在線彈性階段，故楊氏係數(E)與變形量(Δ)成反比，即

$$E_{glass} = \frac{E_n \times \Delta_n}{\Delta_{glass}}$$

其中 E_n 與 Δ_n 為數值分析所假設之楊氏係數與所得出之玻璃變形量，而 E_{glass} 與 Δ_{glass} 為實際玻璃之楊氏模數與變形量。

上述公式可帶出 E 值為 68.733GPa，取整數 69GPa 為後續分析太陽能玻璃之楊氏係數。

4.3 太陽能面板測試

確認完太陽能玻璃之楊氏係數後，為了確認數值分析與實際面板受載重後差異，以一塊由 4×4 片矽晶片所組成之太陽能電池面板，尺寸為 400mm×380mm×4.5 mm(長×寬×厚)，於板中線設置一剛性棒模擬線載重施加，在平行線載之兩邊緣底端設置滾支承，量測板中心變形量。實驗裝置如圖 11，實驗結果繪製於圖 10。

由於實驗時，接觸面的不平整恐導致線載重在施加時發生受力不均勻的情形，故本研究分析五種情況，分別為集中受力、線載重 0.2L、線載重 0.5L、線載重 0.8L 與線載重 L，來探討誤差關係。由表 5 可知，線載重 L 分析明顯與實驗不符合，相對誤差為 -12%，而集中載重至線載重 0.5L 相對誤差

則為 0.5%至-6%，相對誤差由正轉負，因此推測面板受力情況可能發生於兩受力條件區間，而受力過程則由集中受力漸漸轉為線載重之可能，推測其最終線載大致為 0.4L，而受力轉變過程恐造成變形量之誤差，其相對誤差約為 4.5%(圖 12)。

4.4 鋁框面板接觸測試

太陽能面板與鋁框中之空隙由膠質材料填充，而膠質材料的破壞為高度非線性之問題，若使用膠黏元素模擬，於過多的網格中恐發生不收斂而分析失敗，故簡化分析，以實體元素建立膠質材料，並於接觸面設置摩擦係數，而為了評估何種接觸方式適當，分別分析 Type1、Type2、Type3 及 Type4 四種接觸情況，其中 Type1 為黏膠同時與鋁框和面板設定一般接觸，摩擦係數為 0.25，Type2 為膠與鋁框為緊密結合，而與面板為一般接觸，Type3 為膠與鋁框和面板緊密結合，而 Type4 為不設膠，面板下調與框直接接觸，設一般摩擦。而邊界條件皆為施加均壓 2400Pa 於模組且支架底端不允許轉角與變形發生，其分析結果於表 6。

由表 6 可知，Type1 與 Type4 變形量過大，且面板已與支架上緣接觸，較不符實際狀況，而 Type2、Type3 分析結果變形量差異不大，但考慮實際情況下，填充膠質材料膠結於面板與鋁框中在彈性狀態下不會分離，故後續分析以 Type3 為主要參考依據。

五、數值模擬分析

5.1 分析方向與代號說明

市面上常見之太陽能模組架設方式採雙根支架及三根支架，其差異在三根支架多一根支架於模組長向之對稱軸。支架接合方面，通常會使用螺帽索固鋁框底部，而在本次分析，支架與太陽能電池模組之框體底部接觸使用 Tie 設定，不允許框體底部與支架產生相對滑動，因此不考慮螺帽斷裂與塊狀剪力破壞效應。

市面上支架鎖固位置由各廠商自行設計而有所差異，本次分析四種支架位置，代號分別為 case1、case2、case3 及 case4，在雙根支架中，case1 為支架位置距短框外緣 1/3 長框長度，case2 為支架位置距短框外緣 1/4 長框長度，case3 為支架位置距短框外緣 1/5 長框長度，case4 為支架位置距短框外緣

1/6 長框長度，而在三根支架分析中則在四種 case 中各於長框對稱軸多加入一根支架。

分析結果以變形量與應力方式呈現，其中變形量將考慮最大太陽能面板 3 方向(厚度方向)之變位(U3)且於四種 case 中繪製兩條路徑圖(詳圖 5.1)之 U3 趨勢，在應力方面將針對支撐整體模組之鋁框與最先承受外力之玻璃，以最大 1 方向(短框方向)拉壓應力，以及最大 2 方向(長框方向)拉壓應力與材料破壞準則中之 Mises 應力進行探討。

5.2 變形量分析

本次分析最大變形量皆發生於太陽能面板中心，由圖 5.2 可知雙根支架分析中，改變支架位置，U3 有明顯變化趨勢，其中以 case1 變形量最小，case4 變形量最大，而在三根支架分析中 U3 則無明顯變化趨勢，且於每個 case 中變形量皆小於雙根支架分析，其原因為第三根支架架設於長軸對稱軸，因此增加此軸線之勁度，因此大大降低太陽能面板變形量。

路徑一

由圖 13 及圖 14 可發現，無論在雙根支架或三根支架，在支架架設處，其變形量皆非常小，有效抑制模組變形，在 case1 中，由於雙根支架位置靠近於長框對稱軸，故兩根支架間距離縮短，勁度相對提高，變形量減少，也因如此，支架與短框間距離變長，故勁度降低，變形量提高，但在三根支架分析中發現 case1 差異不大，因為在只有雙根支架時兩支架間勁度本身高，變形量本身就小，故在加一支架對於勁度影響有限，因此材料使用效能降低。

在雙根支架分析中，發現隨著支架越接近短框，其中心位移越大，反之支架遠離短框，中心變形愈小，但邊緣兩側位移提高，而在三根支架分析中則是支架愈靠近短框，其整體變形量範圍愈小，於 case4 時有最小的位移。

路徑二

由圖 15 及圖 16 可發現，無論是雙根支架抑或三根支架，其變形趨勢大致相同，且最大變形皆發生於板中心，其原因為路徑二位於短框對稱軸，而支架只與鋁框下緣接觸，故對於短框對稱軸影響有限，而在路徑

二頭尾為面板與鋁框黏合，故勁度提高，變形量小。由雙根支架分析中可知支架位置離短框越遠，變形量明顯越少，而在三根支架分析中則變形量減少有限。

5.3 應力分析

5.3.1 框架應力分析

由分析發現，最大拉壓應力普遍發生在支架與框體下緣接觸面，周圍區域亦呈現較高的應力值，其原因為接觸面為斷面不連續，因此容易造成應力集中現象，同時發現三根支架設計之應力值普遍小於雙根支架設計，推測可能為多加一根支架使受力重新分配，而載重不變，故使每根支架所乘載之外力減少，應力因而降低。

由圖 17 及圖 18 可知，雙根支架分析中，支架位置離短框越近，MaxS11 愈小，而 MaxS22 則越大，而在三根支架分析中，MaxS11 成長趨勢與雙根支架一樣，但 MaxS22 則否，但兩者在 case4 時 MaxS22 都有最大值。另一方面，雙根支架設計在 case2 有最大 Mises，故小心材料降伏產生之過大塑性變形發生，而在三根支架方面則呈現相反，有最小 Mises，為最佳安全之設計。

5.3.2 玻璃應力分析

由圖 19 及圖 20 可知，玻璃主要由短框方向(1 方向)受力控制，拉壓應力 S11 皆大於 S22，且在雙根支架分析中，隨著支架位置靠近短框，其 MaxS11 與 MinS22 有變小的趨勢，而在三根支架分析中則呈現相反趨勢。由於不管在雙根支架或三根支架，其 S11 極大於 S22 應力，故其 Mises 趨勢也與 S11 應力走向相同，在雙根支架中，case1 有最大 Mises，cases4 則有最小 Mises，但在三根支架分析則是相反。

六、結論與未來展望

由太陽能面板分析與模型測試中，玻璃之勁度對於整體面板變形最為關鍵，由實驗與分析比對得出玻璃楊氏模數為 69Gpa。

接觸設定方面，由於本次分析太陽能面板採線彈性分析，鋁框則為塑性分析，由於材料在線彈性階段，面板與框體間的黏膠並不會分離，因此在接觸行為為緊密黏合。

太陽能電池模組數值分析中，由太陽能

板變形量考量可知，對於靠近支架處之面板區域有效控制變形量增加，遠離支架處效果衰退，以產品壽命考量為主，雙根支架組裝支架普遍承受較大之應力，而三根支架組中有效抑制支架應力值，且支架位置距短框外緣 1/4 長框長度為較安全之設計。

由於本次分析在 Ribbon 在晶片交接處為模擬轉角發生，因此在特定區域間所計算之應力值非常大，以超出材料本身極限。

本次分析針對市面上最常見之 3BB 太陽能電池模組，由於太陽能電池模組架設於戶外，其外力施加方式變化多端，故本次分析建立一套標準的分析流程，提供後續不同載重組合之模組分析參考。

七、致謝

本研究工作承蒙能源局資助，謹此致謝。

八、參考文獻

- [1] M. A. Midillia, D. Ibrahim, and A. Murat: 'Green energy strategies for sustainable development', 2005.
- [2] 齊藤勝裕，3 小時讀通太陽能電池，新北市：世茂出版有限公司，2012。
- [3] G. TamizhMani: 'Testing the reliability and safety of photovoltaic modules: failure rates and temperature effects', Photovoltaics International journal, 2008.
- [4] 沈輝，曾祖勤，太陽能光伏發電技術，北京：化學工業出版社，2008。
- [5] 劉政佑，' Numerical Analysis of Mechanical Loads on the Solar Photovoltaic Module '，成大土木工程研究碩士論文，2013

九、表格

	Young's Modulu(MPa)	Poisson's Ratio	Fracture Strength(MPa)
Glass	70000	0.23	100-500
EVA	25	0.48	-
Silicon Cell	162500	0.223	300
Backsheet	3450	0.39	57
Ribbon	91073	0.363	-

表 1 材料參數

	C3D8	C3D8R	C3D8I	C3D20R	解析解
Max S11(MPa)	82.8021	52.6208	52.435	52.4731	52.373
Max S22(MPa)	34.135	22.1142	21.58	21.5969	21.554
Max U3(mm)	23.7361	28.9428	26.9636	26.9888	26.92

表 2 各元素數值解與解析解

	C3D8	C3D8R	C3D8I	C3D20R	解析解
Max S11	(493,0)	(493,0)	(493,0)	(493,0)	(493,0)
Max S22	(493,0)	(493,0)	(493,383)	(493,389)	(493,385)
Max U3	(493,0)	(493,0)	(493,0)	(493,0)	(493,0)

表 3 各元素數值解與解析解發生位置(X mm, Y mm)

十、圖片



圖 1、全電池模組與半電池模組

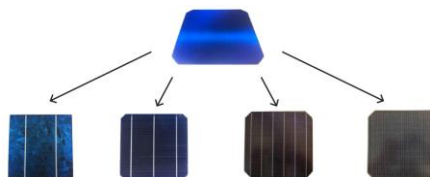


圖 2、多電極結構

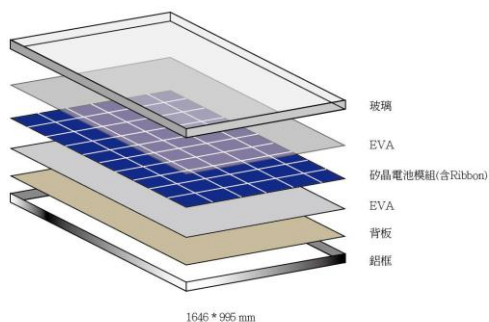


圖 3 各層結構

(E 值×0.5 倍)					
材料	EVA	backsheet	glass	ribbon	silicon
變形量 (mm)	9.73	9.32	15.16	9.15	9.83
變動成長(%)	6.42	1.93	65.80	0.03	7.55
(E 值×1.5 倍)					
變形量 (mm)	8.84	8.99	6.61	9.14	8.78
變動成長(%)	-3.28	-1.61	-27.67	-0.01	-4.01

表 4 各層材料 E 值變異正負 50% 比較

線載重長度(L)	集中力	0.2L	0.5L	0.8L	L
變形量 (mm)	10.53	10.29	9.83	9.38	9.14
誤差 (%)	0.49	-1.76	-6.20	-10.41	-12.71

表 5 線載重分析

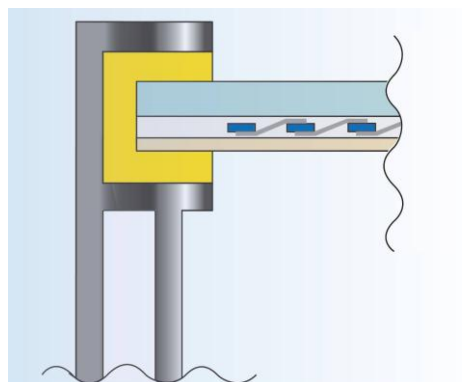


圖 4 模組剖面圖

	Type1	Type2	Type3	Type4
變形量 (mm)	46.98	39.24	35.00	68.56

表 6 接觸設置之變形量分析

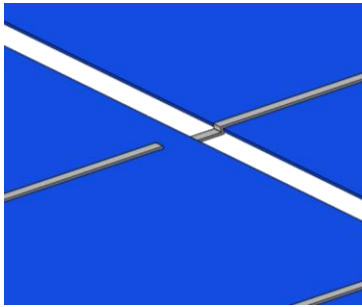


圖 5 Ribbon 轉折處

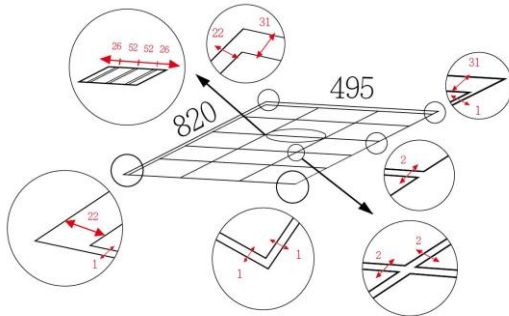


圖 6 四分之一矽晶片排列模型

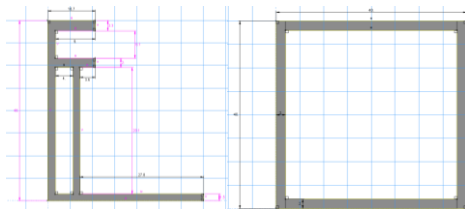


圖 7 框體與支架尺寸

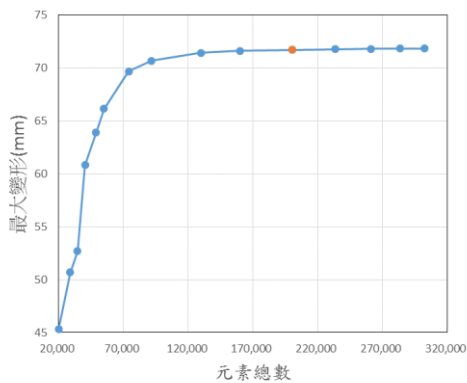


圖 8 收斂性分析



圖 9 玻璃試片三點彎曲試驗

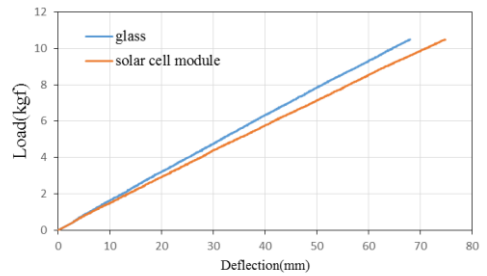


圖 10 玻璃及太陽能板 (不含鋁框) 之載重及變形曲線



圖 11 太陽能板試片 (不含鋁框) 三點彎曲試驗

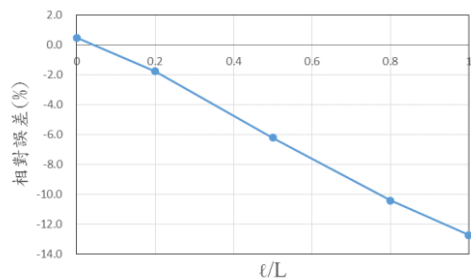


圖 12 相對誤差圖

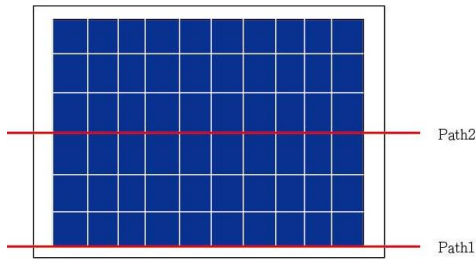


圖 13 路徑線表示

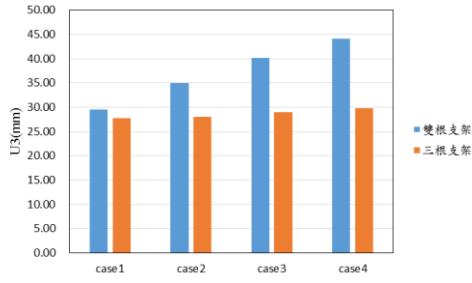


圖 14 模組最大變形量分析

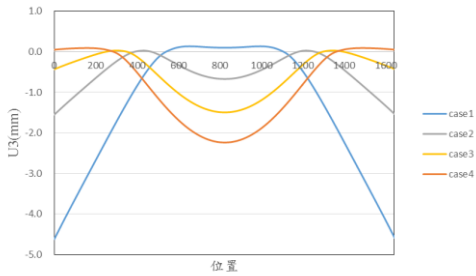


圖 15 雙根支架變形趨勢-路經一

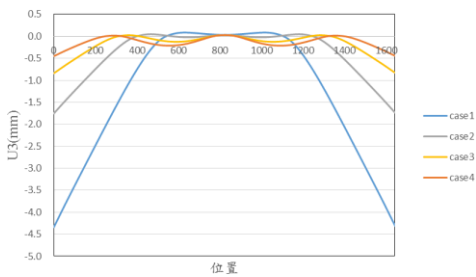


圖 16 三根支架變形趨勢-路經一

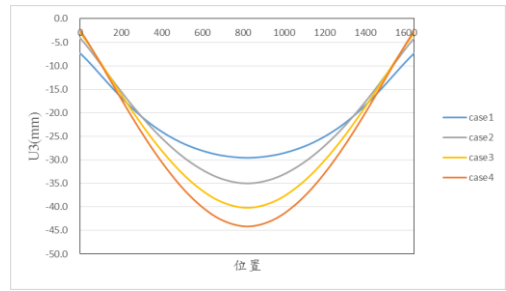


圖 17 雙根支架變形趨勢-路經二

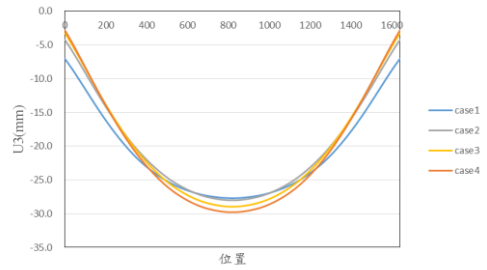


圖 18 三根支架變形趨勢-路經二

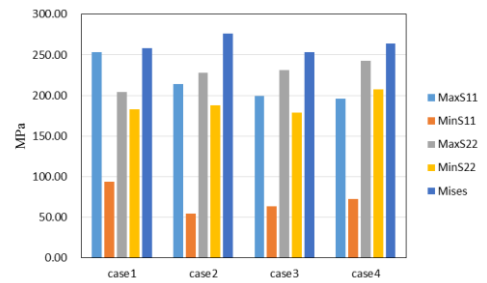


圖 19 雙根支架框架受力

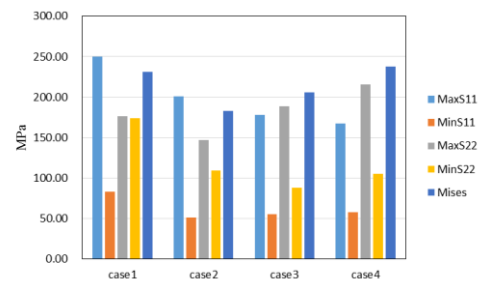


圖 20 三根支架框架受力

2016 SIMULIA Regional User Meeting

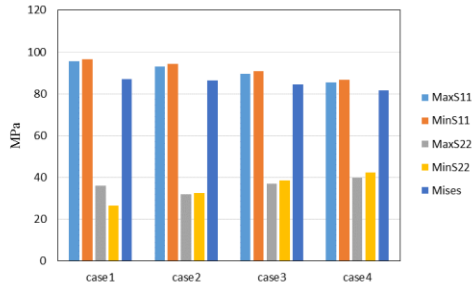


圖 21 雙根支架玻璃受力情況

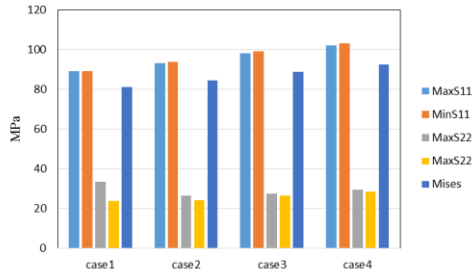


圖 22 三根支架玻璃受力情況