



太陽光電系統鋁合金棚架型支撐架結構分析與設計

Structural Analysis and Design of the Aluminum Scaffold-type PV Supporting Frame

莊明介 M. C. Chuang¹、謝尚賢 S. H. Hsieh²、葉芳耀 F. Y. Yeh³、
詹麒璋 C. C. Chan⁴、黃朝揚 C. Y. Huang⁵
國研院國震中心(NCREE/NARLabs) ¹副研究員、³研究員
國立臺灣大學(NTU) 土木工程學系 ²教授兼系主任
工研院綠能所(GEL/ITRI) ⁴經理、⁵資深工程師

在臺灣，裝配於屋頂或地面的太陽光電系統棚架型支撐架，在面對颱風與地震兩大天然嚴峻考驗時，支撐架能否承受強大風壓及地震力，並讓太陽能模組穩定地鎖固於支撐架上，使光電系統發揮功能，是需要被關注的結構工程議題。鋁合金構材具有質輕且耐腐蝕的優點，為適合用於沿海地區的支撐架，而有別於鋼結構的接合方式，鋁合金支撐架大多採用特殊接合型式，所以本研究團隊針對鋁合金棚架型支撐架的結構分析與設計方法進行研究與探討。

Photovoltaic (PV) systems have been widely used in Taiwan over the past few years. A PV supporting frame, also called a PV mounting system, is used to fix PV modules on surfaces such as roofs, building facades, or the ground, so the frame plays a key role in safety. A PV supporting frame located in Taiwan has to sustain two extreme external loads: seismic forces and strong wind loads caused by typhoons. Hence, the structure of the supporting frames should be designed properly. In this paper, the structural analysis and design of aluminum scaffold-type supporting frames are briefly introduced. A simplified simulation method of the aluminum scaffold-type supporting frames is proposed. Through comparing with the observed results of sinusoidal sweep tests, it shows that the natural frequencies of the frame system can be reasonably predicted with SAP2000 by using the proposed simulation method. Thus, engineers can use the proposed simulation method to predict natural frequencies and thereby select the appropriate design codes in the design of PV supporting frames.

關鍵詞/Key Words

太陽光電(Photovoltaic; PV)、棚架型支撐架(Scaffold-type Supporting Frame)、鋁合金結構(Aluminum Structure)、結構分析(Structural Analysis)、結構設計(Structural Design)



前言

我國政府規劃於2025年將再生能源發電占比提升至20%，其中太陽光電(Photovoltaic; PV)系統累積裝置容量目標為20 GW，這當中屋頂型設置目標為3 GW、地面型設置目標為17 GW。為了達到前述目標，我國政府近年來推行相關政策來加速太陽光電再生能源設備的建置。例如經濟部自2012年起全力推動「陽光屋頂百萬座計畫」⁽¹⁾，採「逐步擴大、先屋頂後地面」的方式推動PV系統的應用普及化。2016年，行政院推動「太陽光電2年推動計畫」，透過各部會規劃相關策略與措施，將PV系統的設置目標分為屋頂型與地面型。屋頂型設置目標包含中央公有屋頂、工廠屋頂、農業設施與其他屋頂；地面型設置目標包含鹽業用地、嚴重地層下陷區域、水域空間、掩埋場等各類型場域。2018年起，經濟部又推動「綠能屋頂全民參與推動計畫」，採取優惠的躉購費率來鼓勵全民儘早參與設置PV系統。

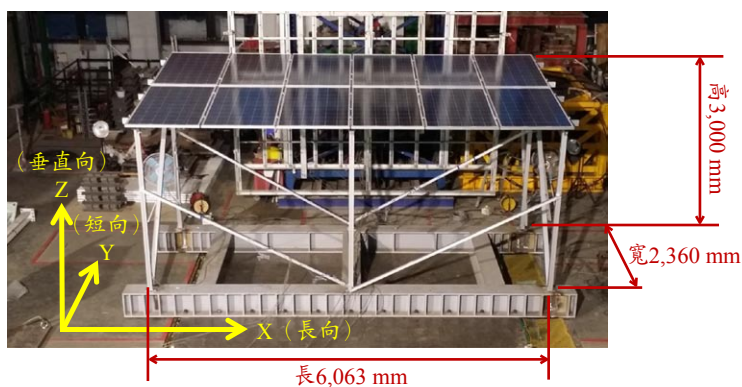
棚架型PV系統支撐架

1. 棚架型支撐架之相關政策

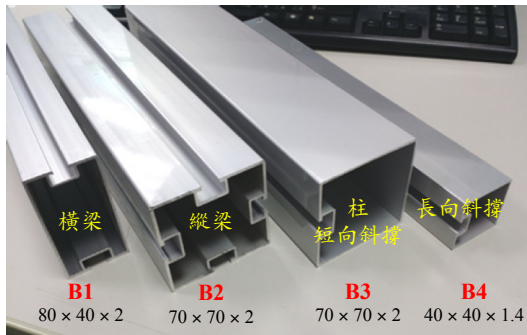
在前述推動PV系統普及化的相關政策中，除了有優惠的電能躉購費率，經濟部也與內政部共同修正「設置再生能源設施免請領雜項執照標準」⁽²⁾。依照現行的規定，設置於地面的高度自地面起算4.5公尺以下、設置於屋頂的高度自屋頂面起算4.5公尺以下之PV系統，以及設置於屋頂突出物的高度自屋頂突出物面起算1.5公尺以下之PV系統，此三種PV系統可免申請雜項執照。近年來，在前述PV系統於特定高度以下免雜照的政策推動下，臺灣出現愈來愈多的棚架型PV系統設置案例(圖一)。

2. 鋁合金支撐架與特殊接合型式

在臺灣，常見的PV系統支撐架(簡稱支撐架)，其構件型式常為冷軋型鋼或是鋁擠斷面構件(圖二)。相較於冷軋型鋼所組成的鋼造支撐架，採用鋁擠斷面構件所構成的鋁合金支撐架(圖一)，以6005-T5鋁合金構材為例，除了具有鋁合金輕量的優點，且由於6005-T5降伏強度約240 MPa，與結構用鋼材的強度相近，故於建築物屋頂上增設PV系統時，在相同的風力與地震力荷載條件下，鋁合金的PV系統支撐架自重對於既有樓板的荷載強度需求增加幅度較



▲圖一 鋁合金棚架型PV系統支撐架(振動台試驗試體)



▲圖二 試體構件選用之鋁擠斷面構件

小。此外，相較於鋼造支撐架，鋁合金支撐架具有較佳的抗腐蝕能力，相當適合用於臺灣的沿海地區。然而，在採用鋁合金構件組構支撐架結構系統時，大多採用特殊連接器（圖三(a)）、L型角鋁的基底型式（圖三(b)），以及單軌斷面柱與斜撐螺栓鎖固的接合（圖三(c)）等特殊接合型式。當採用這樣的接合方式時，鋁合金支撐架結構系統中各個構件的邊界與束制條件與一般常見的鋼造支撐架必定有所不同，所以這樣的差異對於鋁合金支撐架整體的動力行為影響為何？如何模擬支撐架以進行有效的分析與設計？這些與結構安全息息相關的議題都值得受到關注，所以本研究針對鋁合金棚

架型支撐架(Scaffold-type Supporting Frame)的結構分析(Structural Analysis)與結構設計(Structural Design)，進行研究與探討。

3. PV系統支撐架結構設計現況

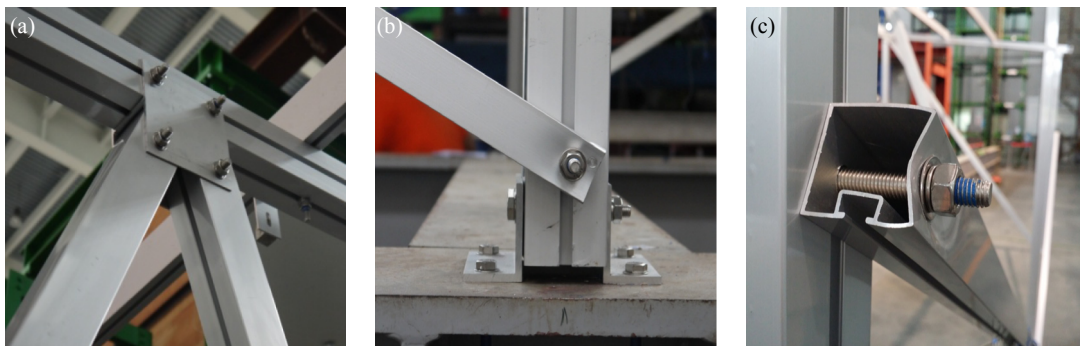
本研究蒐集到40個PV系統支撐架設計案的結構計算書，針對分析模型的建立方法、需求荷載的計算方法，以及設計檢核的項目進行彙整。這些案例的主要差異與常見的設計盲點茲說明如下。

(1) 分析模型的建立方法

①案例中應用的結構分析程式包含商用軟體（例如：Midas、STAAD.Pro、ETABS與SAP2000），此外還有依照結構力學自行發展的簡易試算表，這類試算表通常僅能用來做局部構件的設計與檢討，無法對PV系統整體結構進行模擬與分析。

②許多PV系統支撐架採用相似或相同的基礎型式，但是模擬的方式卻因結構工程師的個人判斷而有著極大的差異（例如：鉸接、固接）。

③多數案例僅取全結構中的部分結構（又稱子結構）來進行模擬。因此，當依照規範計算設計風力、設計地震力時所需要的全結構自然頻率則無法得知。



▲圖三 鋁合金PV系統支撐架常見接合型式，(a) H型連接器；(b) L型角鋁接合；(c)斜撐與單軌鋁擠型斷面柱鎖固



(2) 需求荷載的計算方法

①部分案例未將耐震設計規範（設計地震力）納入考量，在未考慮側向地震力的情況下，將會低估支撐架結構中斜撐（拉桿）的需求荷載，而產生結構安全上的疑慮。

②計算附屬於建築物之結構物（例如屋頂棚架型PV系統支撐架）設計地震力時，構體共振放大係數(a_p)給定方式並不明確。

③對於主要控制PV系統支撐架結構設計的風力項目，各個構件在「主要風力抵抗系統」與「局部構材及外部被覆物」歸屬的認定，以及計算設計風力所引用的規範，都因結構工程師個人的判斷不同，而有很大的差異。

(3) 設計檢核的項目

①僅選取具代表性的部分單元體（子結構）來進行設計與檢核。

②部分案例之扣件、基礎與接合處未檢核。

③部分案例構件之長細比(kL/r)未檢核，或是檢核未通過。

④非鋼造構件（例如鋁合金構件）直接採用鋼結構容許應力設計法規範進行檢核，此作法的合理性尚未被明確檢討。

綜觀國內業者在執行PV系統支撐架結構設計工作的現況，如同上述彙整結果，的確存在著許多設計上的盲點，例如援引錯誤的規範進行設計風力與設計地震力的計算。為了改善此現況，工業技術研究院綠能與環境研究所（工研院綠能所）與臺中市結構工程技師公會綜合相關法規、設計方法等相關資料⁽³⁻⁹⁾，研擬適用於鋼造或鋁合金造支撐架結構設計的「太陽光電系統支撐架結構設計參考手冊（草案）」⁽¹⁰⁾。設計參考手冊內容與結構分析模型的關係將於本文後段進行說明。

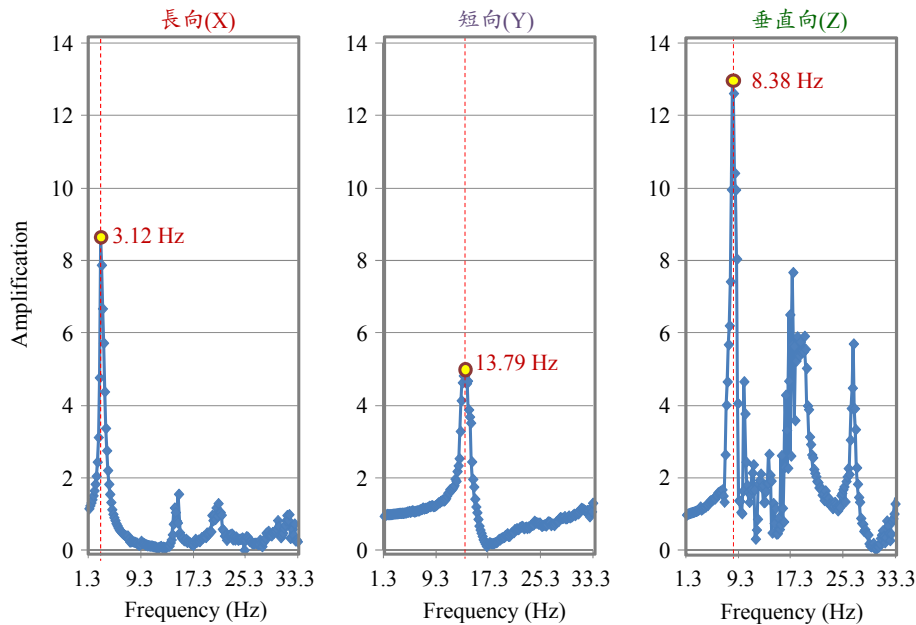
鋁合金PV系統支撐架結構動力行為

正確的結構分析與設計應當始於合適的數值模型，為了解目前常見的鋁合金PV系統支撐架的動力行為與受震反應，並以實驗結果來評估模擬方法的準確性，國家地震工程研究中心（國震中心）研究團隊與工研院綠能所人員綜合相關設計方法與參照相關規範條文⁽³⁻⁹⁾，設計一座典型的鋁合金棚架型支撐架（圖一），並進行振動台試驗測試其動力行為與耐震能力⁽¹¹⁾。在搜尋試體自然頻率的過程中，是以強度0.05 g之變頻正弦波，搜尋頻率範圍為1.3 Hz~33.3 Hz，對於試體輸入變頻正弦波進行掃頻測試，並以佈設在支撐架頂面上的加速規量測訊號，與輸入波來計算傳遞函數，尋找試體在長向、短向、垂直向（圖一）的自然頻率($f_{n,exp}$)，自然頻率搜尋結果如圖四所示。

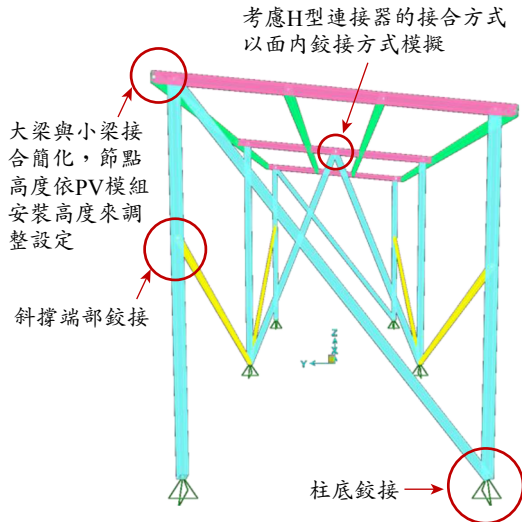
鋁合金PV系統支撐架結構分析

1. 分析模型之簡化模擬方法

本研究提出適用於鋁合金PV系統支撐架的簡化模擬方法，並採用業界常用的結構分析軟體SAP2000來建立支撐架的數值模型（圖五），進行模態分析。以前述振動台試驗的試體（圖一）為例，簡化模擬支撐架的操作重點包含①柱底設為鉸接；②斜撐端部設為鉸接；③簡化模擬大梁與小梁的接合處，讓大梁與小梁的構架元素(Frame Element)交會在同一節點，且讓節點位置接近PV模組所在的高度位置，並以固接方式模擬接合處；④短向立面上，考慮H型連接器（圖三(a)）的接合方式，以鉸接方式模擬梁柱接頭的面內(In-plane)行為；⑤不考



▲圖四 試體自然頻率($f_{n,exp}$)搜尋結果



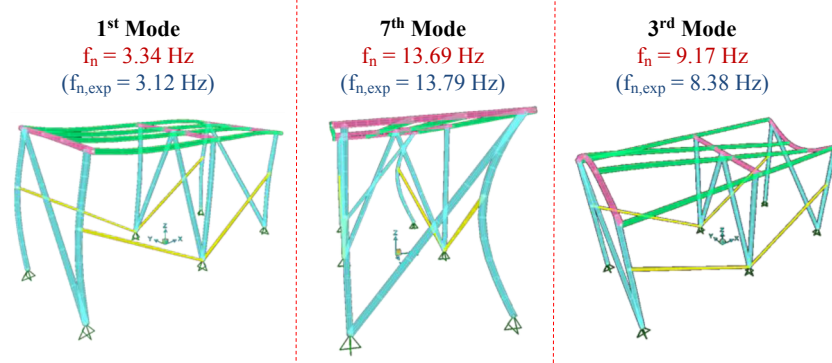
▲圖五 簡化模擬SAP2000數值模型

慮屋頂面PV模組所帶來的面內束制效應，故不會使用剛性隔板(Rigid Diaphragm)的束制方式來調整支撐架頂面上的面內剛性；
⑥PV模組重量都以外加靜載重的方式施加

於構架元素，因為不需額外模擬PV模組，故能避免增加模型不必要的複雜度。

2. 簡化模擬與實驗量測的結果比較

依照本研究提出的簡化模擬方法所建立的SAP2000數值模型，經進行模態分析後所得到的結果，可以與振動台試驗⁽¹¹⁾量測到的試體自然頻率(圖四)進行比對，藉以評估簡化模擬方法是否恰當。SAP2000模態分析結果如圖六所示，第一振態(自然頻率 $f_n = 3.34$ Hz)顯著變形為試體長向側移；第七振態(自然頻率 $f_n = 13.69$ Hz)顯著變形為試體短向側移；第三振態(自然頻率 $f_n = 9.17$ Hz)顯著變形為試體頂面上的垂直變位。由圖中亦可看出，SAP2000數值模型模態分析的結果(f_n)與試驗自然頻率搜尋的結果($f_{n,exp}$)相當接近，故可知本研究所提出的數值模擬方法當屬適宜。



▲圖六 SAP2000模態分析結果(f_n) vs. 自然頻率搜尋結果($f_{n,exp}$)

PV系統支撐架結構設計

1. 太陽光電系統支撐架結構設計參考手冊(草案)

工研院綠能所與臺中市結構工程技師公會綜合相關法規、設計方法等相關資料⁽³⁻⁹⁾，研擬「太陽光電系統支撐架結構設計參考手冊(草案)」⁽¹⁰⁾，手冊內容主要是依據現有規範與業界需求，針對三種常見的PV系統支撐架類型(棚架型、距置型、平貼型)進行設計方法的歸納與彙整，並依照安裝位置(地面或屋頂)，一共提出五項設計流程(Design Procedure; DP)(表一)。以屋頂棚架型PV系統為例，如設計參考手冊所載，設計支撐架結構的建議流程與須遵循的相關規範章節，如圖七所示。

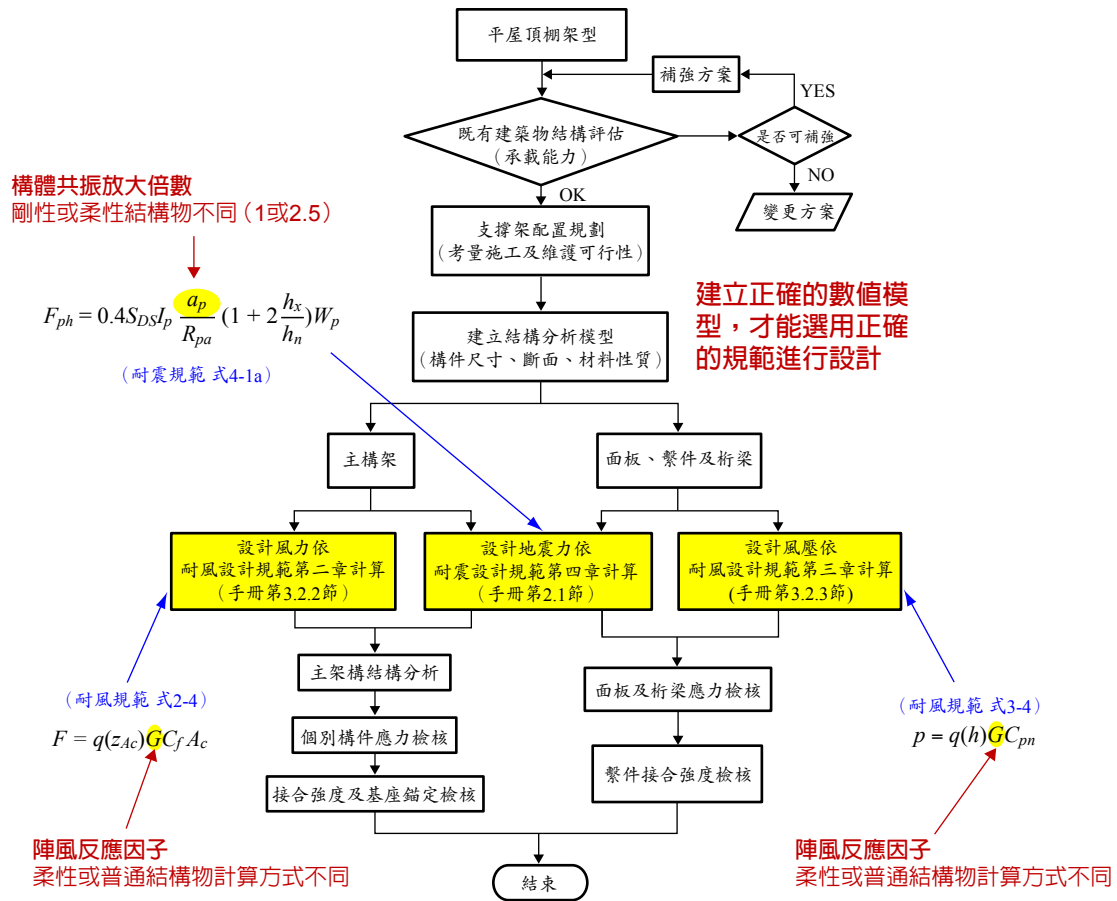
2. 結構物自然頻率對於設計的重要性

依照設計參考手冊⁽¹⁰⁾與相關設計規範的規定(圖八)，為了正確地選擇對應的規範進行設計風力與地震力的計算，工程師需要估算結構物自然頻率，判斷結構物在計算設計地震力時是屬於柔性或為剛性結構物。由於兩種結構物的共振放大係數

▼表一 設計流程(DP)列表

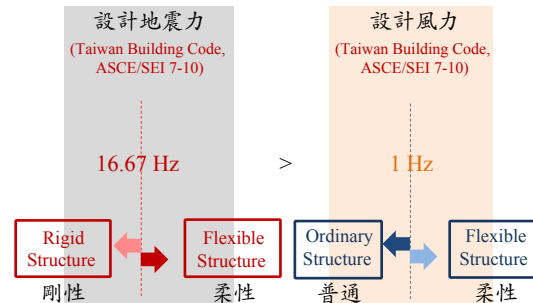
位置 \ 型式	棚架型	距置型	平貼型
斜屋頂	—	—	DP5
平屋頂	DP1	DP3	—
地面	DP2	DP4	—

(a_p)不同(柔性結構物：2.5；剛性結構物：1)，在計算設計風力時，也需要判斷支撐架屬於柔性或為普通結構物，因為其陣風反應因子(G)計算方式亦不同。然而，目前國內從事PV系統支撐架結構設計的工程師多採用建築物耐震⁽⁶⁾、耐風設計規範⁽⁸⁾所提供的經驗公式來計算結構物自然頻率。但這些用來估算結構物自然頻率的經驗公式，僅適用於一般鋼筋混凝土或鋼結構建築物。由於鋼筋混凝土與鋼結構的建築，與鋁合金支撐架的構材性質、組構方式、質量大小與分配方式等皆有顯著差異，故直接使用設計規範的經驗公式並不合理。因此，在目前尚未有規範或研究可提供適用於估算鋁合金支撐架自然頻率的經驗公式之情況下，唯有建立支撐架整體的數值模型，才能估算合理的自然頻率，據以選



▲圖七 屋頂棚架型PV系統支撐架設計流程圖(DP1)

用正確的規範進行設計。當面對建立支撐架數值模型進行模態分析的這項工作時，結構工程師可採用本研究所提出的簡化模擬方法建立模型，求取較為合理且可信的結構物自然頻率。以前述的試體（3公尺高）（圖一）為例，在計算該結構物長向的設計地震力時，此支撐架屬柔性結構物（ $f_n = 3.34 \text{ Hz} < 16.67 \text{ Hz}$ ）；而在計算設計風力時，此支撐架屬普通結構物（ $f_n = 3.34 \text{ Hz} > 1 \text{ Hz}$ ），如圖八。故可知，有了合理估算的結構物自然頻率，才能選用正確的規範進行設計風力與地震力的計算與檢討，藉以落實支撐架結構設計的確實性與完整性，讓支撐



▲圖八 設計規範中依自然頻率進行結構物分類

架結構系統可以達到不僅是耐風、同時也能抗震的設計目標。



結語與未來展望

本研究簡化模擬的SAP2000數值模型模態分析結果與振動台試驗自然頻率搜尋結果十分接近，故本研究提出的模擬方法當屬適宜。

透過數值模型得到的結構物自然頻率，工程師可依相關設計規範的規定，判斷結構物在計算設計地震力時是屬於柔性或為剛性結構物，在計算設計風力時是屬於柔性或為普通結構物，故能採用正確的規範進行設計風力與地震力的計算。

根據設計參考手冊（草案）的設計流程，工程師可將PV支撐架（主構架）視為「主要風力抵抗系統」進行設計與檢討。另外，工程師可將PV模組（面板）、繫件（扣件）、桁梁視為「局部構材及外部被覆物」，採用較為嚴苛的局部風壓進行設計與檢討。然而，在2015年蘇迪勒颱風與近年來幾次風災所觀察到鋁合金PV系統支撐架的破壞型式，多肇因於扣件與螺桿和鋁擠型斷面接合處的破壞，足見接合型式的強度估算、設計檢核方法仍有需要改進之處。又因接合型式往往與各家廠商的產品與工法相關，故需要由有關單位訂定性能保證測試方法與性能標準。

PV系統支撐架設計影響PV系統長期運轉之可靠性，然而目前相關規定並未要求業者提供PV系統全面的結構計算書與計算檢核內容，日後倘若PV系統因颱風或地震而發生破壞時，將難以釐清相關責任的歸屬。因此，對於我國未來推動PV系統裝置

容量20 GW的總目標，相關單位應該建立更完善的結構設計與施工的查核機制，來為PV系統的結構安全進行更嚴格的把關。

誌謝

本研究案經費來自於財團法人工業技術研究院受經濟部能源局委託，執行108年度「太陽光電環境建構及系統高值化推動(3/3)」專案計畫之分包研究計畫「太陽光電系統支撐架結構設計研擬及電腦輔助檢核工程設計」，感謝經濟部能源局及工研院提供研究經費，才得以完成此研究內容。

參考文獻

1. 工業技術研究院，太陽光電單一服務窗口網站 (<https://www.mrpv.org.tw>)，2018年。
2. 內政部，設置再生能源設施免請領雜項執照標準，2018年。
3. 內政部，鋼結構極限設計法規範及解說，2010年。
4. 內政部，鋼結構容許應力設計法規範及解說，2010年。
5. 內政部，建築物耐震設計法規範及解說，2011年。
6. 內政部，混凝土結構設計法規範，2011年。
7. 內政部，建築技術規則，2013年。
8. 內政部，建築物耐風設計法規範及解說，2014年。
9. The Aluminum Association (AA), Aluminum Design Manual, U.S.A., 2015.
10. 工業技術研究院綠能與環境研究所，太陽光電系統支撐架結構設計參考手冊（草案），2016年。
11. 謝尚賢，莊明介，葉芳耀，吳安傑，王弘毅，詹麒璋，黃朝揚，太陽光電系統鋁合金棚架型支撐架動力行為與耐震性能之研究。中華民國第十三屆結構工程研討會暨第三屆地震工程研討會，桃園，臺灣，2016年。