

平屋頂單斜式棚架主要風力抵抗系統設計風力之探討

邵詩涵^{1*} 陳瑞華² 黎益肇³

^{1*}國立臺灣科技大學營建工程系 碩士

²國立臺灣科技大學營建工程系 副教授

³國立臺灣科技大學臺灣建築科技中心 助理教授

摘要

平屋頂單斜式棚架型為我國特有之太陽能板設置型式，國外鮮少進行研究，而國內相關研究主要著重於局部構件及外部被覆物之風壓，對主要風力抵抗系統之研究仍嫌不足。因此，本研究利用 2019 年建研所計畫「太陽光電系統之耐風設計規範研擬」以及 2024 年工研院計畫「太陽光電系統耐風設計委託服務」之風洞實驗數據進行分析，對棚架下方支撐條件進行假設，忽略棚架動態效應，分析不同實驗情況下面板整體受力情況，分別獲得支撐柱之柱軸力歷時和柱彎矩歷時，並對歷時進行極值分析，以探討平屋頂單斜式棚架主要風力抵抗系統之設計風力。

結果顯示，針對地面單斜式棚架主要風力抵抗系統之設計風力，ASCE 7-22 所提供之淨風壓係數能合理包絡風洞實驗所得之極值；而針對平屋頂單斜式棚架主要風力抵抗系統之設計風力，目前仍欠缺相關之計算方式，雖 ASCE 7-22 不適用於平屋頂單斜式棚架，但本研究仍嘗試將 ASCE 7-22 之淨風壓係數套用於平屋頂單斜式棚架，在單柱、四柱鉸接、四柱固接等支撐條件下，綜合考慮棚架下有阻擋或無阻擋之情形，ASCE 7-22 所得之柱軸壓力至少為風洞實驗的 1.15 倍；柱軸拉力為 1.35 倍；柱彎矩為 1.20 倍，表示 ASCE 7-22 所提供之淨風壓係數能有效包絡平屋頂單斜式棚架風洞實驗結果。若欲推估出平屋頂單斜式棚架之淨風壓係數，建議可以 ASCE 7-22 中用於地面單斜式棚架之淨風壓係數為基礎，透過地面與平屋頂之差異修正，作為平屋頂棚架設計之參考。

關鍵字：風洞實驗、太陽光電系統、平屋頂單斜式棚架型、風力係數、耐風設計規範

Keywords: Wind tunnel test, Solar photovoltaic system, Single-slope flat-roof canopy, Wind force coefficient, Wind-resistant design code

1. 前言

因應全球氣候變遷與能源轉型趨勢，作為綠色能源之一的太陽光電系統設置數量日益增長，在各類設置型式中，平屋頂單斜式棚架型目前尚無適用之耐風規範，且其為我國特有之設置型式，國外鮮少進行研究，而國內陳瑞華等(2019)於建研所計畫「太陽光電系統之耐風設計規範研擬」中，針對地面單斜式棚架與平屋頂單斜式棚架進行了一系列之風洞試驗，據此提出耐風設

計草案，其後羅元隆等(2024)於工研院計畫「太陽光電系統耐風設計委託服務」中，針對更多形式之平屋頂單斜式棚架進行了後續之風洞試驗，但兩者皆著重於局部構件及外部被覆物之風壓，對主要風力抵抗系統之研究仍嫌不足。

針對地面單斜式棚架，由面板傳遞至支撐柱之設計風力可依據「建築物耐風設計規範及解說」(2014)表 2.9「開放式建築物之單斜式屋頂的風力係數」決定，其係取自 ASCE 7-88，而現今 ASCE 7-22(2022)已提出更合理之風力係數，且依據羅元隆等(2023)這一部分未來新版「建築物耐風設計規範及解說」會依 ASCE 7-22 作修訂。因此本研究利用上述執行之風洞數據分析面板整體受力情況，並假設棚架下方支撐條件，分別獲得支撐柱之柱軸力歷時和柱彎矩歷時，且對歷時進行極值分析，將所得極值與以 ASCE 7-22 圖 27.3-4 和圖 27.3-7 之淨風壓係數 C_N 所得結果進行比較，雖 ASCE 7-22 不適用於平屋頂單斜式棚架，但本研究仍嘗試將 ASCE 7-22 之淨風壓係數套用於平屋頂單斜式棚架，以探討平屋頂單斜式棚架主要風力抵抗系統之設計風力。

2. 研究方法

本研究依據「太陽光電系統之耐風設計規範研擬」以及「太陽光電系統耐風設計委託服務」所執行之風洞實驗數據，分別對地面單斜式棚架與平屋頂單斜式棚架進行分析。圖 1 為單斜式棚架之實驗配置示意圖，其中 L_p 為面板弦長； L_w 為面板寬度； h_1 為面板與支承面(地面或屋頂面)之最小距離； h_2 為面板與支承面(地面或屋頂面)之最大距離； θ 為面板傾角； $A = L_w \times L_p$ 為面板面積；風向角設為 γ ，當 $\gamma = 0^\circ$ 時風正吹棚架高邊。地面單斜式棚架共 2 個案例，其實場參數 h_2 為 12 m； θ 為 10° ； L_p 為 28 m； L_w 為 52 m；實驗參數為面板下方無阻擋和有阻擋。平屋頂單斜式棚架共 45 個案例，其下方建築物高度固定為 10 m； h_2 固定為 4.5 m； θ 有 10° 、 15° 、 20° 以及 25° 4 種； L_p 固定為 9 m， L_w 隨著面板長寬比(L_w/L_p)不同會有 4.5 m、9 m、18 m 三種；實驗參數為面板下方有無阻擋、面板有無突出以及屋頂上有無女兒牆。

2.1 極值分析

根據設定目標之歷時求取對應之極值。首先，以每段歷時 5 分鐘將原歷時分段，分別取出各段之最大值與最小值，並以 Type I 極值分布進行擬合。之後以 5 分鐘之 Type I 分布參數推導對應 1 小時之分布參數，最後取 1 小時對應之 Type I 分布 78 百分位數作為設計值之參考，最大值之極值以下簡稱最大極值，最小值之極值以下簡稱最小極值。

2.2 面板受力及支撐柱受力分析

首先將風洞實驗所得之原淨風壓係數歷時以 1 秒移動平均處理後得到新的淨風壓係數歷時 $C_{p,i}$ ，將其乘以風壓測點所對應之附屬面積 A_i ，據此可推得該測點之受力歷時 f_i 。面板整體所受之正向力與彎矩的符號及方向定義於圖 2，以面板形心為原點建立座標系統。當正向力作用方向指向面板上表面為正，遠離面板上表面為負。面板整體所受之正向力 f_N 定義為 $\sum f_i$ ，面板整體所受之彎矩 m_x 定義為 $\sum f_i \times y_i$ ， m_y 定義為 $\sum f_i \times x_i$ ，其中 x_i 與 y_i 為第 i 個測點之 xy 座標。

為觀察不同案例之面板整體受力，以及推估與 ASCE 7-22 相對應之淨風壓係數，將 f_N 、 m_x 與 m_y 進行正規化，面板正向力係數 C_{F_N} 定義為 f_N 除以 A ；面板彎矩係數 C_{M_x} 定義為 m_x 除以 AL_p ； C_{M_y} 定義為 m_y 除以 AL_w 。為觀察 ASCE 7-22 之適用性，分別假設棚架下方為單柱、四柱鉸接與

四柱固接三種情形分析支撐柱受力，考量本研究重點為淨風壓係數之比較，故不考慮動態效應。單柱為假設棚架由面板形心一根支撐柱支撐，其柱軸力 F 定義為 f_N 除以 A ，柱彎矩 M 定義為 $\sqrt{m_x^2 + m_y^2}$ 除以 $A\sqrt{A}$ 進行正規化。四柱為假設棚架由面板角落之四根支撐柱支撐，採用 SAP2000 分析得各時間點之支撐柱受力，並將所得軸力除以 A ，彎矩除以 $A\sqrt{A}$ 進行正規化，以求得支撐柱的柱軸力歷時和柱彎矩歷時。依據前述之極值分析方法，可由 C_{F_N} 、 C_{M_y} 、 C_{M_x} 、柱軸力與柱彎矩之歷時資料分別求得最大極值與最小極值，不同案例以及不同風向角的求取方式皆相同。

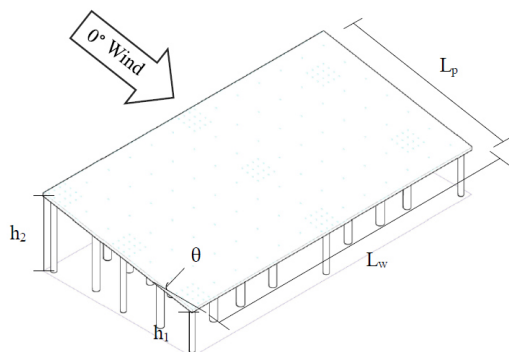


圖 1 單斜式棚架實驗配置示意圖（取自陳瑞華等(2019)）

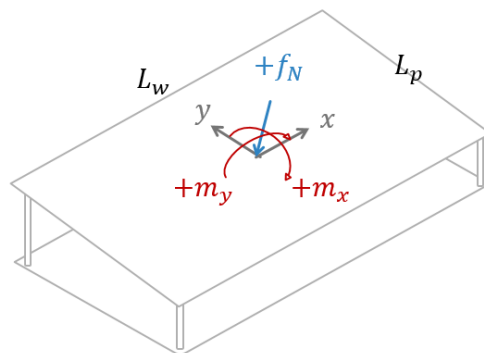


圖 2 符號與座標系統定義

3. 結果與討論

本節將對棚架為單柱、四柱鉸接與四柱固接三種支撐條件，計算支撐柱柱軸力極值與柱彎矩極值並與 ASCE 7-22 所得進行比較，最後嘗試以風洞實驗數據推估相對應之淨風壓係數。

3.1 面板及支撐柱受力分析

地面單斜式棚架共 2 個案例，針對棚架為單柱、四柱鉸接與四柱固接三種支撐條件，將 ASCE 7-22 所提供之支撐柱最大受力(規範值)除風洞實驗所得之支撐柱最大受力(實驗值)彙整於表 1，規範值皆能包絡實驗值，驗證了 ASCE 7-22 淨風壓係數 C_N 之合宜性。接著探討平屋頂單斜式棚架主要風力抵抗系統之設計風力，其相較於地面壓力下降且拉力上升。為觀察各實驗參數影響，每次改變一參數並選用 ASCE 7-22 之無阻擋或有阻擋之淨風壓係數與風洞實驗結果比較。

無阻擋且無女兒牆之平屋頂單斜式棚架共 24 個案例，將規範值除以實驗值之最不利情況彙整於表 2，ASCE 7-22 無阻擋淨風壓係數所提供之柱軸壓力至少為風洞實驗的 2.28 倍，柱軸拉力為 1.35 倍，柱彎矩為 1.27 倍。有阻擋且無女兒牆之平屋頂單斜式棚架共 7 個案例，將規範值除以實驗值之最不利情況彙整於表 2，ASCE 7-22 有阻擋淨風壓係數所提供之柱軸壓力至少為風洞實驗的 1.53 倍，柱軸拉力為 1.71 倍，柱彎矩為 1.19 倍。有女兒牆平屋頂單斜式棚架之 C_{F_N} 、 C_{M_x} 與 C_{M_y} 與有阻擋類似，故建議將女兒牆面積納入下方阻塞比計算，以作為有無阻擋淨風壓係數之選用判斷。無阻擋且有女兒牆之平屋頂單斜式棚架共 7 個案例，將規範值除以實驗值之最不利情況彙整於表 2，ASCE 7-22 有阻擋淨風壓係數所提供之柱軸壓力至少為風洞實驗的 1.15 倍，柱軸拉力為 1.76 倍，柱彎矩為 1.36 倍。無面板突出及有面板突出平屋頂單斜式棚架之 C_{F_N} 、 C_{M_x} 與 C_{M_y} 近乎相同，代表面板有無突出對於主要風力抵抗系統而言影響不大，故可單純依面板下方阻塞比選用無阻擋或有阻擋之淨風壓係數。面板突出之平屋頂單斜式棚架共 7 個案例，將

規範值除以實驗值之最不利情況彙整於表 2，其比值與無阻擋且無女兒牆之案例相近，綜上 ASCE 7-22 所提供之淨風壓係數 C_N 能有效包絡平屋頂單斜式棚架風洞實驗結果。

表 1 地面單斜式棚架之規範值/實驗值比值

規範值 實驗值	單柱			四柱鉸接		四柱固接		
	壓力	拉力	彎矩	壓力	拉力	壓力	拉力	彎矩
無阻擋	3.46	2.08	1.89	2.54	1.86	2.53	1.86	1.85
有阻擋	1.40	2.03	1.21	1.56	1.89	1.53	1.89	1.69

表 2 平屋頂單斜式棚架之無阻擋規範值/實驗值比值

規範值 實驗值	單柱			四柱鉸接		四柱固接		
	壓力	拉力	彎矩	壓力	拉力	壓力	拉力	彎矩
無阻擋且無女兒牆	3.19	1.58	1.32	3.75	1.35	2.28	1.35	1.27
有阻擋且無女兒牆	2.27	1.76	1.19	1.56	1.71	1.53	1.73	1.44
無阻擋且有女兒牆	2.00	1.92	1.39	1.16	1.78	1.15	1.76	1.36
無阻擋且面板突出	3.75	1.67	1.52	3.03	1.45	3.02	1.44	1.35

3.2 淨風壓係數之估算

以無阻擋地面單斜式棚架之支撐柱受力觀察 ASCE 7-22 載重類別 A 和 B 的設置目的，因兩根高邊柱趨勢會相似，兩根低邊柱趨勢也會相似，故只繪出一側作代表。如圖 3 所示，可發現 $\gamma = 0^\circ$ 和 180° 時，載重類別 A 在背風側柱提供較大之柱軸拉力，載重類別 B 在迎風側柱提供較大之柱軸拉力； $\gamma = 90^\circ$ 時，載重類別 A 提供拉力，載重類別 B 提供壓力。

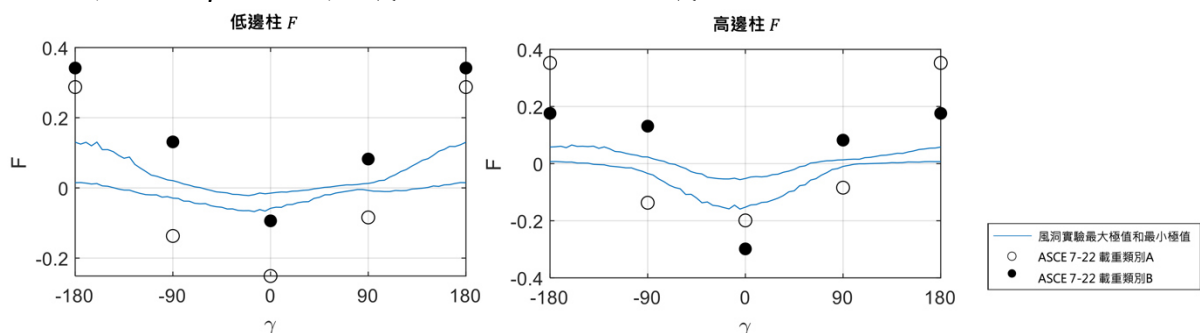


圖 3 無阻擋地面單斜式棚架四柱固接之柱軸力和柱彎矩隨風向角變化趨勢

參考 Uematsu 等(2008)所提出之方法，以無阻擋地面單斜式棚架為例進行說明淨風壓係數之估算方式。首先找出 $\gamma = 0^\circ$ 時 C_{FN} 和 C_{M_x} 之最大極值、最小極值以及平均值，如圖 4 所示建立六邊形包絡線，假設面板為剛性構件且四個角落鉸接支撐，可由六邊形包絡線的六個頂點所對應之六組 C_{FN} 與 C_{M_x} 組合，計算相對應之高邊支撐柱軸力和低邊支撐柱軸力，將在低邊柱（背風

側柱) 導致最大柱軸拉力之情況定義為載重類別 A，將在高邊柱(迎風側柱) 導致最大柱軸拉力之情況定義為載重類別 B。接著如圖 5 將載重類別 AB 之 C_{FN} 與 C_{Mx} 等效為面板上半部和下半部兩段均勻載重並疊加，得到之 C_{NW0} 公式為 $C_{FN} - 4C_{Mx}$ ， C_{NL0} 公式為 $C_{FN} + 4C_{Mx}$ 。

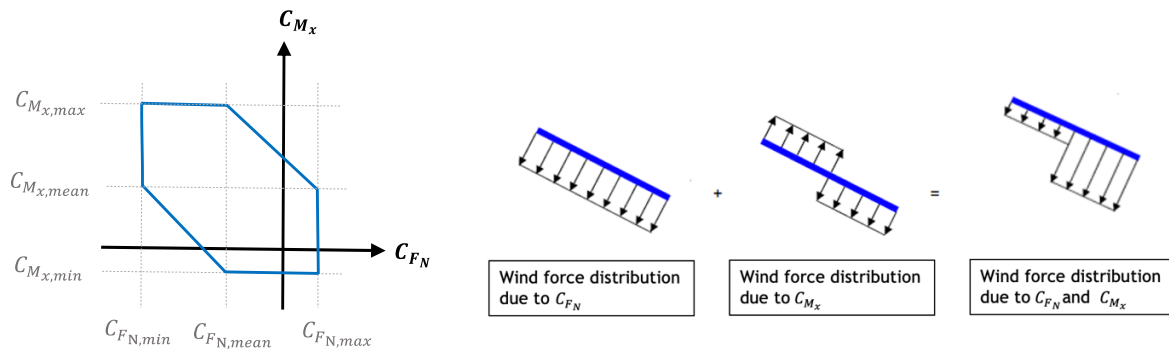


圖 4 $\gamma = 0^\circ$ 之 C_{FN} - C_{Mx} 包絡線示意圖 圖 5 C_{FN} 和 C_{Mx} 作用疊加示意圖(修自 Uematsu 等(2008))

為考慮 C_{My} 及風向角對柱軸力的影響，引入修正因子 α ，其定義為風向角 0° 至 45° 間產生的最大柱軸力極值除由 C_{NW0} 和 C_{NL0} 推估之柱軸力比值，等效靜態風載之設計淨風壓係數 C_{NW}^* 和 C_{NL}^* 為 C_{NW0} 和 C_{NL0} 乘上 α ， $\gamma = 180^\circ$ 時的 C_{NW}^* 和 C_{NL}^* 也依上述步驟推估，將結果彙整於表 3。在考慮同邊支撐柱的情形下，本研究 and Uematsu 等(2008)研究所得的 C_{NW}^* 和 C_{NL}^* 近似，但卻與 ASCE 7-22 存有一段差距，推測 ASCE 7-22 可能還考量其他假設或模型條件，例如需考慮不同面板之長寬比，以及面板下不同阻塞比的情形。

地面單斜式棚架之局部風壓和主要風力皆分別遵循 ASCE 7，若欲嘗試推估平屋頂單斜式棚架之淨風壓係數，建議以 ASCE 7-22 中適用於地面單斜式棚架之淨風壓係數為基礎，考慮地面單斜式棚架與平屋頂單斜式棚架的差別作修正。以 $\theta = 10^\circ$ 、 $L_w/L_p = 2$ 且無阻擋之地面和屋頂為例，將 ASCE 7-22 淨風壓係數 C_{NW} 及 C_{NL} 轉換成等效之 C_{FN} 與 C_{Mx} ，並根據屋頂與地面的 C_{FN} 與 C_{Mx} 比例進行調整，以修正為屋頂設置之條件，最後反推屋頂對應之 C_{NW0} 與 C_{NL0} 。修正因子 α 一樣修正為屋頂設置，將所得之 C_{NW0} 與 C_{NL0} 除以 $\alpha_{\text{地面}}$ ，再乘以 $\alpha_{\text{平屋頂}}$ ，即可求得用於平屋頂單斜式棚架之 C_{NW}^* 和 C_{NL}^* 。將推估之平屋頂單斜式棚架 C_{NW}^* 和 C_{NL}^* 彙整於表 3，以上修正方式可作為初步參考，提供未來建立平屋頂單斜式棚架設計風壓係數之推估架構。

表 3 $\theta = 10^\circ$ 且無阻擋地面及平屋頂單斜式棚架案例所得之 C_{NW}^* 和 C_{NL}^* 比較

	載重 類別	風向角, 0°		風向角, 180°	
		C_{NW}^*	C_{NL}^*	C_{NW}^*	C_{NL}^*
ASCE 7-22	A	-0.70	-1.10	1.03	1.53
	B	-1.57	0.00	1.67	0.40
本研究 (地面)	A	-0.73	-0.24	0.56	0.31
	B	-0.90	-0.02	0.77	0.07
本研究 (屋頂)	A	-0.72	-1.20	0.83	0.48
	B	-1.70	-0.02	1.02	-0.02

4. 結論

本研究針對平屋頂單斜式棚架，以風洞實驗之結果探討其主要風力抵抗系統之受力情形，並進一步分析 ASCE 7-22 淨風壓係數對平屋頂單斜式棚架之適用性。

1. 針對面板傾角 10° 且面板底下無阻擋之四柱地面單斜式棚架，風向角 0° 和 180° 時，載重類別 A 在背風側柱提供較大之柱軸力，載重類別 B 在迎風側柱提供較大之柱軸力，
2. 本研究參考 Uematsu 等(2008)提出之方法，以及藉由對地面單斜式棚架四柱系統的觀察，由地面單斜式棚架風洞實驗推估所對應之設計淨風壓係數 C_{NW}^* 和 C_{NL}^* ，但發現與 ASCE 7-22 所提供之淨風壓係數 C_N 存在一定差距。
3. 建議將 ASCE 7-22 中針對地面單斜式棚架之設計淨風壓係數，透過地面單斜式棚架與平屋頂單斜式棚架之差異進行修正，作為平屋頂單斜式棚架之初步設計參考。
4. 在尚無針對平屋頂單斜式棚架之規範前，建議可暫將 ASCE 7-22 中適用於地面單斜式棚架之淨風壓係數應用於平屋頂單斜式棚架。在單柱、四柱鉸接、四柱固接假設下，ASCE 7-22 淨風壓係數能有效包絡本研究中平屋頂單斜式棚架之風洞實驗結果。
5. 無阻擋且有女兒牆之平屋頂單斜式棚架面板整體受力 C_{FN} 、 C_{Mx} 與 C_{My} 與有阻擋案例類似，故建議將女兒牆面積納入下方阻塞比之計算，以判斷選用 ASCE 7-22 無阻擋或有阻擋之淨風壓係數。
6. 本研究所採用之風洞實驗，面板有無突出對面板整體受力 C_{FN} 、 C_{Mx} 與 C_{My} 無顯著影響。

5. 致謝

感謝工業技術研究院綠能與環境研究所以及內政部建築研究所提供之風洞實驗原始數據，作為研究分析與驗證之重要基礎，使本研究能順利完成。

6. 參考文獻

- [1] 內政部營建署，建築物耐風設計規範及解說，2014 年。
- [2] 陳瑞華、傅仲麟等，“太陽光電系統之耐風設計規範研擬”，內政部建築研究所，2019 年。
- [3] 羅元隆、傅仲麟等，“建築物耐風設計規範及解說修訂草案研擬之研究”，內政部建築研究所，2023 年。
- [4] 羅元隆等，“太陽光電系統耐風設計委託服務”，工業技術研究院，2024 年。
- [5] Uematsu Y., Stathopoulos T., and Iizumi E., Wind loads on free-standing canopy roofs: Part 2—Overall wind forces, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 96, pp. 1029–1042, 2008.
- [6] American Society of Civil Engineers (ASCE), *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures (ASCE 7-22)*, 2022.