

臺灣簡易溫室結構分析之研究¹

張金元²、田雲生²

摘 要

蘇迪勒、尼伯特、梅姬颱風接連侵襲臺灣，重創農業栽培設施，因臺灣農業設施結構及施工方式多樣化，為對溫室結構之耐風性及變形量進行學理探討與建立分析準則，本研究運用有限元素分析軟體進行桁架結構分析，依據簡易溫室尺寸規格，運用套裝軟體SolidWorks及其結構分析套件Simulation，採用線架構繪製溫室桁架分析模組，並建立國內使用廣泛之圓拱型簡易溫室結構分析方法，加速模擬分析速度。經試驗結果發現，以農糧署公告之UP-600型簡易溫室為例，其參考圖之跨距6 m、棟高3.45 m、管徑26.2 mm、厚度1.6 mm，結構最大位移為 62 mm、管件降伏強度 268 MPa，發生位置於溫室棟長向中央處，較現行傳統簡易溫室結構強度提升11.4%以上，以及管件降伏強度降低25.1%，進而減少管件及塑膠布損壞風險。

關鍵詞：溫室、結構、颱風、有限元素分析

前 言

2015年蘇迪勒颱風、2016年尼伯特、梅姬颱風接連侵襲臺灣，重創農業栽培設施，造成諸多溫網室倒塌或傾斜，經濟損失嚴重。在農業設施損失金額方面，蘇迪勒颱風估計損失金額2億5,834萬元，主要受害地區位於雲林縣、高雄市、嘉義縣、桃園市、屏東縣⁽³⁾；尼伯特颱風估計損失金額1億1,102萬元，主要受害地區為臺東縣、高雄市、屏東縣⁽⁴⁾；梅姬颱風估計損失金額1億3,820萬元，主要受害地區為高雄市、臺南市、雲林縣⁽⁵⁾。經由現地調查，尤以簡易溫室形式受損較多，可區分為塑膠布、防蟲網等披覆材掀開、破損之輕度受損，以及骨架彎曲、脫落、斷裂及坍塌等中重度結構損壞，並以中重度溫室結構損壞所造成的經濟損失最為嚴重。探究溫室損壞的成因，常見為管件強度不足而降伏損壞，造成結構變形、彎折、坍塌，最終造成溫室結構嚴重受損⁽⁸⁾。為對簡易溫室結構之耐風性及變形量進行學理探討與建立分析準則，運用有限元素分析軟體Solidworks進行結構分析，期望加強溫室設施結構安全，並提供設施搭建業者參考。本研究將試驗分析管材與搭建尺寸等組裝方式，探討其受應力變化，作為溫室結構耐風強度改善之依據。

¹ 行政院農業委員會臺中區農業改良場研究報告第 0941 號。

² 行政院農業委員會臺中區農業改良場助理研究員、副研究員。

材料與方法

結構模擬軟體

有限元素軟體為Solidworks Simulation Professional 2016年版⁽¹¹⁾，軟體繪圖建立零組件模型，由分析套件設定邊界條件及應力參數，以3D零組件圖像視覺及電腦輔助工程(CAE)模擬分析。

軟體中邊界條件設定係數，管件選用軟體內建之鍍鋅鋼材料屬性，其彈性模數為200 GPa、蒲松比(Poisson ratio) 0.29、材料密度7,870 kg/m³、降伏強度203 MPa、抗拉強度356 MPa。零組件接觸類型設定為無貫穿，並將其摩擦係數設定為0.15，選擇標準細網格⁽¹⁰⁾，機械材料特性之分析參數如表一所示。

表一、機械材料特性之分析參數

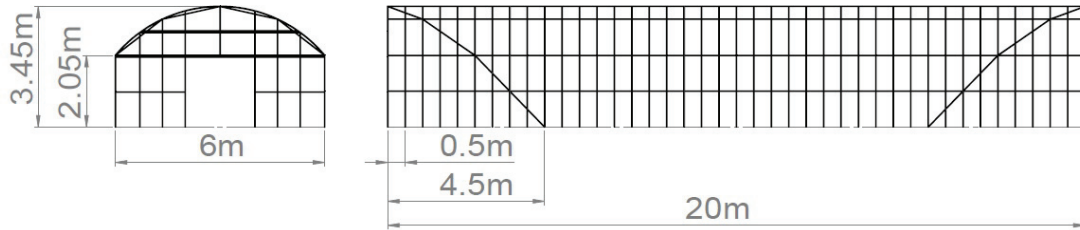
Table 1. Mechanical material properties

Mechanical material properties	Coefficient
Elastic modulus, E	200 GPa
Density, ρ	7,870 kg/m ³
Poisson's ratio, ν	0.29
Tensile yield strength	203 MPa
Tensile strength	356 MPa

分析模組

簡易溫室模型由行政院農業委員會農糧署公告之簡易型溫室結構為分析模組⁽⁶⁾，該簡易溫室圖說係於2016年10月依照行政院農業委員會指示成立設施技術服務團，經會議討論繪製而成，其溫室跨距區分為5.4 m、6 m、7.2 m，代號分別為UP-540、UP-600、UP-720等3型，本研究將以跨距6 m、代號UP-600型溫室結構建立分析模組。

簡易溫室UP-600型主要骨架使用一般構造用鍍鋅鐵管材質，產業名稱為鍍鋅鋁管，溫室山牆面尺寸為棟高3.45 m、簷高2.05 m，溫室棟長向尺寸：主要骨架間距為0.5 m，具有九組桁條向骨架，前後側分別使用2支斜撐支撐山牆面結構，溫室內部倒T型補強結構組以每組間格距離為2 m設立。管件尺寸：主要立柱管件及內部補強結構管件使用直徑26.2 mm、管厚1.6 mm，斜撐、山牆面及桁條向骨架使用直徑22.2 mm、管厚1.6 mm，該結構尺寸設定為分析模組一，為農糧署公告型式，管件選用符合國家標準之鋼材，依據公告圖說明，其降伏應力規範介於200~500 MPa之間、抗拉強度須介於300~690 MPa之間，UP-600型簡易溫室結構尺寸如圖一所示。



圖一、UP-600 型簡易溫室結構尺寸

Fig. 1. UP-600 Structure size of the Taiwan arch greenhouses

由於現行產業於簡易溫室搭建普遍應用標稱管徑1”之鋁管，其主要立柱管件係使用直徑31.8 mm、管厚約1.8 mm之管材；內部倒T型結構搭建則採用間隔距離為4 m為一組，因此探討補強結構間距2 m、4 m之結構強度差異性；使用直徑31.8 mm鋁管材料之溫室主體，於產業上主要立柱多採行1 m間距搭建，因此探討主要立柱間距0.5 m、1 m之結構強度差異性。

綜合上述結構搭建模式，分別建立6種分析模組，探討不同結構搭建形式之耐風強度，其中，結構尺寸分別使用主要立柱間距0.5 m、1 m，倒T形內部補強結構間距2 m、4 m，主要立柱管徑26.2 mm、管厚1.6 mm及管徑31.8 mm、管厚1.8 mm，共6種簡易溫室分析模組，尺寸設定如表二所示。其中，分析模組之斜撐、山牆面及桁條管件尺寸均與模組一相同設定。

實務上，管件接合方式以零件及螺栓相互連接，分析時係將各個接合處視為固定接點，並且假設各管材能確實接合。分析前先設定機械材料特性，建立彈性係數(Elastic modulus, E)、蒲松比(Poisson's Ratio, ν)及材料密度(Density, ρ)等分析參數如表一所示，分析軟體內設定單位系統為SI制(kg, m, s, K, A, N, V)，網格尺寸選用軟體內建之Medium級數。

表二、六種結構分析模組之尺寸規格

Table 2. Specifications of the 6 greenhouse structure models

Six structures model	Span (m)	Structure specifications		Pipe specifications	
		Distance of tube (m)	Distance of strengthen structure (m)	Diameter (mm)	Thickness (mm)
Model 1	6	0.5	2	26.2	1.6
Model 2	6	0.5	2	31.8	1.8
Model 3	6	1	2	26.2	1.6
Model 4	6	1	2	31.8	1.8
Model 5	6	1	4	26.2	1.6
Model 6	6	1	4	31.8	1.8

結果與討論

溫室結構模擬方法之推算

溫室結構所受載重部分，在垂直方向有靜載重(Dead load)，在水平方向有風壓力(Wind pressure)及地震載重(Seismic load)。靜載重為構造物本身構件及加載於構造物上全部物件之重量。在本研究中，結構主體靜載重有鍍鋅鐵管、結合零件(彈簧夾、三通夾片)及塑膠布等組合自重，因產業廣泛應用的彈簧夾、三通夾片，若在軟體中進行計算，將不易網格化及延長運算時間，因此為簡化軟體分析，僅考慮鍍鋅鐵管載重。此外，因風壓力為簡易設施結構主要的影響因子，為簡化分析過程，計算時則不考慮地震載重對結構之影響。

由於被覆材料若使用厚度0.1 mm之塑膠布覆蓋時，單位面積1 m²之平均重量約為0.14 kgf⁽⁷⁾，與主要骨架結構重量所佔比例小，且因已使用臺灣本島地區基本設計風速進行計算，故本研究於結構分析時，則不考慮被覆材料重量。而溫室受風壓力作用後之力量，將由骨架所組成之單元結構桿件所支撐，並且力量係垂直作用於桿件上。

風壓力

依據內政部營建署建築物耐風設計規範⁽²⁾，考量設施在開闊地或海岸地區受風力作用較大，計算時係假設該地點為地況C種類，為平坦開闊之地面或草原或海岸或湖岸地區，其零星座落之障礙物高度小於10 m者，其相關係數 $\alpha=0.15$ 、梯度高度 $z_g=300$ m代入公式1中，整理後可得離地面高度10 m處之基本設計風速 $V_{10}(C)$ 與梯度高度之關係式2如下所示：

$$V_{zg} = V_{10}(C) \left(\frac{z}{300} \right)^{0.15} = 1.665 V_{10}(C) \quad (\text{式1})$$

故地況C種類、高度 $z=5$ m處之風速與梯度高度之關係式，可由式 $\frac{V_z}{V_{zg}} = \left(\frac{z}{z_g} \right)^\alpha$ 整理後之公式2表示：

$$V_z = V_{zg} \left(\frac{z}{z_g} \right)^\alpha = 1.665 V_{10}(C) \left(\frac{z}{z_g} \right)^\alpha \quad (\text{式2})$$

其中，風速須乘上用途係數 $I=0.9$ 。本研究設施高度 $z=3.5$ m，為保守估計，當高度小於5 m時，亦採用5 m處風速壓之地況係數計算，將式2代入式3整理後，可得設計風速壓 $q(z)$ 式3及式4如下：

$$q(z) = 0.06 (1.665)^2 \left(\frac{z}{z_g} \right)^{2\alpha} [I V_{10}(C)]^2 \quad (\text{式3})$$

$$= 0.166 \left(\frac{z}{z_g} \right)^{2\alpha} [I V_{10}(C)]^2 \quad (\text{式4})$$

臺灣地區各地之基本設計風速共分為每秒47.5 m、42.5 m、37.5 m、32.5 m、27.5 m、22.5 m共6個地區⁽²⁾，而中央氣象局颱風資料庫顯示，測站於蘇迪勒颱風在臺中梧棲地區測得最大陣風風速54.2 m/s、最大風速30.8 m/s；尼伯特颱風在臺東地區測得最大陣風風速57.2 m/s、最大風速16.6 m/s；梅姬颱風於臺中梧棲地區測得最大陣風風速57.2 m/s、最大風速33.5 m/s⁽¹⁾。蘇

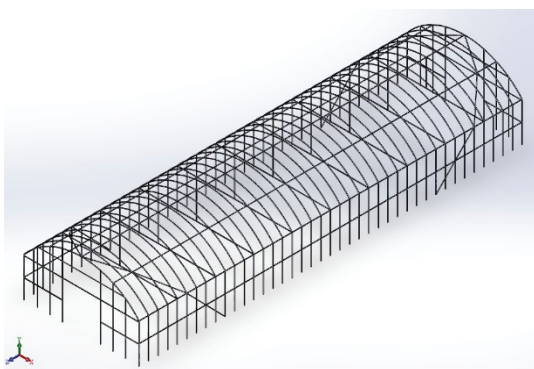
迪勒、尼伯特、梅姬颱風造成臺灣中南部及東部地區溫網室設施嚴重損壞，其中以每秒32.5m之基本設計風速以上即涵蓋全臺受災害地區。此外，由行政院農業委員會農糧署公告之UP簡易溫室圖，設定溫室之設計風速為30 m/s，相當於蒲福風級11級之28.5~32.6 m/s範圍，綜上所述，本研究將以耐風設計規範之設計風速每秒32.5 m進行計算。

在基本設計風速方面，由耐風設計規範中取臺灣本島地區基本設計風速 $V_{10}(C)=32.5$ m/s進行計算，其強度相當於輕度颱風及蒲福風級11級風之上限值。將地況C相關係數 $\alpha=0.15$ 、梯度高度 $z_g=300$ m、 $z=5$ m及用途係數 $I=0.9$ 代入式4中，可得在高度10 m處之設計風速壓為 41.58 kgf/m²。

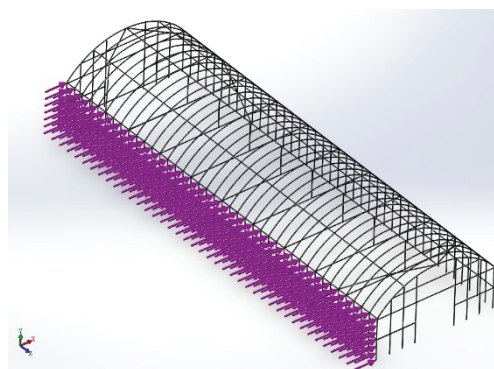
臺灣簡易溫室常用圓拱型結構，風壓係數 C_p 值主要與建築物的幾何形狀有關，並經由結構物尺寸之比值，計算牆面、拱形屋頂等處之風壓係數。本文為簡化分析計算式，使溫室結構可快速進行分析作業，將設定風壓係數 $C_p=1$ ，以及簡化風壓力分析，不考慮拱型屋頂及背面牆面的風壓力，僅由溫室迎風面牆面承受側向風力。溫室牆面為長20 m、屋簷高2.05 m，面積為 41 m²，乘上設計風速壓 41.58 kgf/m²，則牆面需承受 1704.78 kgf力量，由牆面之立柱管件承受，其中模組一、模組二之牆面立柱管件共為41支，因此每支管件需承受應力 41.58 kgf。而模組三、模組四、模組五、模組六之牆面立柱管件共為21支，因此每支管件承受應力 81.18 kgf。

簡易溫室結構分析結果

在溫網室結構建模方面，依據農糧署公告簡易溫室結構之尺寸規格，運用套裝軟體Solidworks繪製分析模組，如圖二所示，採用線架構方式建立結構桁架，再分別依據線指定管徑規格，建立國內使用廣泛之圓拱型簡易溫室結構，此建模方式可簡單化建模，提供國內產業參考應用，使業者可快速上手，降低分析難度，並促進溫室產業應用成效。



圖二、Solidworks 軟體建模之溫室分析模組
Fig. 2. The Greenhouse analysis model built by solidworks software



圖三、UP-600 型簡易溫室結構快速建模分析
Fig. 3. Modeling analysis of UP-600 type Taiwan plastic greenhouse structure

在溫網室結構分析方面，使用Solidworks附加軟體Simulation有限元素分析軟體，模擬溫室結構承受季節強風之管件應力及位移量分析，示意圖如圖三所示。由農糧署公告無固定基礎之簡易溫室圖，結構編號UP-600型，其六種結構分析結果如表三所示，其中模組一為農糧署公告之結構形式，骨架結構最大位移量為62 mm、管件最大降伏強度268 MPa，發生位置位於溫室長向中央處，此結構位移位置與以往分析結果相同⁽⁹⁾，惟鋼材用量於模組一公告型式較模組六傳統形式提高31.37%。

表三、六種分析模組之最大降伏強度、變形量及管材增量

Table 3. The maximum stress, deformation and steel amount of the 6 structure models

6 structures model span, distance of tube, distance of strengthen structure, m	Diameter, thickness, mm	Maximum stress, MPa	Maximum deformationmm, mm	Increase weight, kg	
Model 1	6-0.5-2	26.2-1.6	268	62	691
Model 2	6-0.5-2	31.8-1.8	168	34	854
Model 3	6-1-2	26.2-1.6	512	111	478
Model 4	6-1-2	31.8-1.8	321	63	562
Model 5	6-1-4	26.2-1.6	557	124	442
Model 6	6-1-4	31.8-1.8	358	70	526

六種分析模組之最大降伏強度、變形量、鋼材用量排序，分別為模組二、模組一、模組四、模組六、模組三、模組五。依據公告圖說明，管件降伏應力須介於200至500 MPa之間，模組一268 MPa、模組二168 MPa、模組四321 MPa、模組六358 MPa共4型符合前述之管件降伏強度要求，其中模組二為168 MPa有最佳之表現；選用Ø31.8 mm、T=1.8 mm管材規格之分析模組二、四、六，其中模組六傳統形式有最大降伏強度358 MPa；模組一為管材選用Ø26.2 mm、T=1.6 mm中，唯一符合管件降伏強度500 MPa範圍內要求之分析模組，其餘模組三 512 MPa、模組五557 MPa管件降伏強度均超出500 MPa的要求。進一步探討可發現，該兩型模組選用管徑、管厚為Ø26.2 mm、T=1.6 mm、主要立柱間距為1 m，由結果顯示，將無法抵禦11級風32.5 m/s風速設定之強風侵襲，設施結構有損壞之疑慮，因此若選用Ø26.2 mm、T=1.6 mm之鍍管規格，則應參考農糧署公告之結構型式搭建，即採用主要立柱間距為0.5 m搭設。此外，若以嚴格標準審視，管件降伏應力須在200 MPa內，則僅有模組二之結構設定符合耐風條件，因此，管件的選擇及搭建的尺寸，為結構抵禦強風的關鍵因子，依據設施搭建所在地，應選擇合適且適切的管件降伏強度及搭設尺寸。

公告與傳統型式之比較，現行傳統簡易溫室多選用主要立柱管徑為直徑31.8 mm、管厚1.8 mm，並且主柱間距為1 m、內部補強結構為4 m，設定為分析模組六，為產業慣行搭建之結構尺寸，其骨架結構分析結果顯示，最大位移量為70 mm、管件最大降伏強度358 MPa，為第四排序，而模組一公告形式選用主要立柱管徑為直徑26.2 mm、管厚1.6 mm，並且主柱間距為0.5 m、內部補強結構為2 m，分析結果顯示，最大位移量為62 mm、管件最大降伏強度268 MPa。模組一公告形式可較模組六傳統形式在抑制結構位移量提升11.4%，以及在管件降伏強度降低25.1%。換言之，公告形式可較現行傳統簡易溫室提升結構強度，並減少主要支撐管件受力，因此可降低管件損壞風險，並且因管件加密及主柱間距縮減至0.5 m，使管件受力減半，可進而降低塑膠布損壞機率，延長使用年限。

結論與建議

簡易溫室設施因具有構造簡單、搭設容易、造價低，及易於拆裝移動等特性，廣受國內栽培使用，惟在臺灣常因颱風侵襲而損壞，造成嚴重的經濟損失，因此結構需重新最佳化設計補強。本研究建立並分析六種結構模組，探討各型結構之管件降伏強度及變形量抑制效果。其中，農糧署公告之簡易溫室結構形式，其結構變形量抑制結果符合需求。在受風壓力作用時，加密骨架間距及增設補強結構，皆可有效抑制結構位移量，以及降低管件受風之降伏強度。六種分析模組均在主要立柱的柱腳處，有最大應力之發生，因此需選擇符合管件降伏強度要求之結構形式，如模組一、二、四、六結構，管件最大降伏強度可在358 MPa以內。使用套裝軟體分析簡易溫室結構耐風能力，可加速溫室設計時間，亦減少依經驗設計造成失誤之不必要的費用支出，可提供較為科學化之分析方法，提供設施產業參考選用，以提升相關應用技術。

誌 謝

本研究承蒙農委會科技計畫項下補助經費。試驗期間承蒙中興大學生物產業機電工程學系黃裕益教授不吝賜教與指導；中興大學生物產業機電工程學系盛中德教授、建國科技大學自動化工程系樂家敏退休教授斧正，以及農業機械研究室同仁劉志聰、李安心、賴碧琴、茆聰銘鼎力配合協助，方得以順利完成，謹此一併致謝。

參考文獻

1. 中央氣象局 2018 颱風資料庫 <http://rdc28.cwb.gov.tw/TDB/ntdb/pageControl/typhoon>。
2. 中華民國內政部營建署 2015 建築物耐風設計規範及解說 台北。
3. 行政院農業委員會104年8月蘇迪勒颱風農業災情報告 發布日期：資料發布日期104年8月14日。網路查詢時間：107年7月14日 網址：

- https://www.coa.gov.tw/theme_data.php?theme=news&sub_theme=agri&id=5297&print=Y。
4. 行政院農業委員會105年7月尼伯特颱風農業災情報告 發布日期：資料發布日期105年7月12日。
網路查詢時間：107年7月14日 網址：
https://www.coa.gov.tw/theme_data.php?theme=news&sub_theme=agri&id=5483。
 5. 行政院農業委員會105年9月梅姬颱風農業災情報告 發布日期：資料發布日期105年10月03日
網路查詢時間：107年7月14日 網址：
https://www.coa.gov.tw/theme_data.php?theme=news&sub_theme=agri&id=6678。
 6. 行政院農業委員會農糧署UP簡易溫室圖2017年版 網頁下載路徑：行政院農業委員會農糧署>農糧業務>溫網室設施補助專區>參考圖樣及契約範本 網路查詢時間：107年5月29日 網址：
https://www.afa.gov.tw/peasant_index.aspx?CatID=2477。
 7. 侯文祥、林益鵬 2004 生物生產用隧道式輕構架溫室結構安全及經濟設計 農業工程學報 50(4): 39-50。
 8. 張金元、田雲生 2015 蘇迪勒颱風設施受損調查與因應對策 臺中區農情月刊第195期
 9. 張金元、田雲生、陳令錫 2012 簡易設施結構耐風設計之研究 臺中區農業改良場研究彙報 114: 45-55。
 10. 實威國際 2015 SolidWorks Simulation 2015 原廠教育訓練手冊 全華圖書股份有限公司。
 11. Dassault Systemes SOLIDWORKS Simulation 原廠官網 網路查詢時間：107年7月14日 網址：
<http://www.solidworks.com/sw/products/simulation/packages.htm>。

Study on the Improvement of Wind Resistance Capacity in the Plastic Greenhouse Structure in Taiwan¹

Chin-Yuan Chang² and Yun-Sheng Tien²

ABSTRACT

Typhoons named SOUDELOR, NEPARTAK and MEGI invaded Taiwan successively and caused damage to the agricultural greenhouse. Due to the diversification of Taiwan agricultural plastic greenhouse and construction methods, it was necessary to conduct theoretical discussions and analysis for the wind resistance and deformation of greenhouse structures. The research uses the finite element analysis software for structural analysis, according to the announced by Agriculture and Food Agency specification of the plastic greenhouse, SOLIDWORKS and SIMULATION software were used for structure analysis, the line architecture is used to establish greenhouse truss analysis module, and establish a circular arch type greenhouse structure. The adoption of analytical methods can accelerate the speed of simulation analysis. According to the results, the UP-600 type greenhouse has width of 6 m, tube diameter of 26.2 mm, thickness of 1.6 mm, maximum deformation of 62 mm, and tube strength of 268 MPa. The structural strength of the plastic greenhouse increases 11.4%, and the stress of the main tube reduce 25.1%, which can reduce the risk of damage to the tube and plastic compared with convention at design.

Key words: greenhouse, structures, typhoons, finite element method

¹Contribution No. 0941 from Taichung DARES, COA.

²Assistant Engineer, Associate Engineer of Taichung DARES, COA.