

簡易設施結構耐風設計之研究¹

張金元、田雲生、陳令錫²

摘 要

簡易設施廣泛應用於作物栽培，然臺灣夏季有強風侵襲，在結構耐風能力不足情況下常使設施損壞，因此適度提昇設施結構耐風能力，能降低固定資本之損失。本研究採用內政部營建署之耐風設計規範進行簡易設施結構強度分析，分別以對照組及四種補強方式進行計算，結果顯示，設施在承受側向風速47.5 m/s風壓力作用時，未進行補強結構設計之對照組，其變形量為22.6 mm，而四種補強方式之變形量結果排序，分別為倒T形結構18.1 mm、山形結構15.0 mm、V形結構13.9 mm、 $1\frac{1}{4}$ 管徑10.8 mm，可知以 $1\frac{1}{4}$ 管徑之鍍鋅鐵管耐風能力最佳，管材用量也為全部模組中最高，而其所需重量增幅達28%；採用山形結構補強方式，則可以最經濟之管材用量得到較低變形結果，而管材增量僅4.35%。

關鍵字：簡易設施、結構、颱風。

前 言

臺灣位處於亞熱帶與熱帶區，夏季炎熱且有颱風侵襲，為使作物栽培不受氣候影響，近年來已廣泛應用設施以排除不利作物生長之環境。設施依組成可分為精密溫室、簡易溫室、網室等。其中，簡易溫室依基礎又可區分為簡易型(以地錨牽引無固定基礎)、簡固型(混凝土結構基礎)；骨架規格亦可區分為圓鐵或方鐵管材搭設而成之棚架。簡易溫室具有構造簡單、搭設容易、價格低等特點，為目前採用最多之型式，然亦是目前受風損害風險最高之型式。一般而言，設施受風損壞原因有結構設計不良、強風抵抗能力不足、施工品質及維護不佳或已達使用年限等。在颱風災害調查中，發現隧道式簡易設施損毀原因大部分係因橫向結構補強不夠，並且若設施長度過長，整體受風面變大，側邊將無法承受強風壓力，導致簡易溫室主骨架嚴重變形⁽³⁾。運用結構分析軟體STAAD探討簡易式隧道型輕構架溫室之結構安全及用材經濟，研究發現構造物高度相同、跨距越大，基礎向上拉拔力及軸壓力越大，且最大應力比發生位置及破壞均發生在與地接合處⁽⁵⁾。利用有限元素分析軟體ANSYS計算單斜頂式溫室結構，以縮短桁條跨距及增加鋼管厚度可改善溫室抗風能力，其中以縮短桁條跨距為最經濟的方法，約可提高抗風級數一級以上，而增加鋼管厚度方法則可降低風力對結構物所造成的應力值，此方式可使沿海地區單棟單斜頂式溫室達所需之抗風需求⁽⁷⁾。

¹ 行政院農業委員會臺中區農業改良場研究報告第 0780 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、助理研究員。

綜合以上研究成果，本文將以設施內部無橫向結構為對照組，分析結構耐風能力，並設計一種增加管外徑及內徑補強措施及三種內部結構補強措施，以確保結構之安全並降低損害風險，其結果作為搭建之參考。

材料與方法

耐風設計規範理論

本研究採用內政部營建署於2006年訂定之耐風設計規範⁽²⁾為理論分析基礎，相關設定方式敘述如下：

一般建築物之基本設計風速係對應於50年回歸期，為考慮建築物受風損壞時，對生命的危害及財物損失之程度，使用用途係數I將設計風速調高或降低，依據建築物耐風設計規範，設施屬第四類建築物，其定義為建築物破壞時，對人類之生命危害度小，如臨時性設施及非居住儲藏設施等，其所訂定之用途係數I=0.9。

地況種類依建築物所在位置及其附近地表特性而定，以地況C種類而言，其定義為平坦開闊之地面、草原、海岸或湖岸地區，其零星座落之障礙物高度小於10 m者。考量農業簡易設施在空曠地受風力作用較大，因此將之視為地況C種類計算。

因紊流關係且建築物為振動體，風速具有隨時間變動的特性及其對建築物之影響，建築物在受風力作用時會產生振動，因此計算時須考慮風的動態效應，即考慮陣風反應因子G，此因子可將順風向造成的動態風壓轉換成等值風壓處理，為簡化計算，規範中定義普通建築物之陣風反應因子可直接取G=1.77計算。

設施較一般建築物結構強度弱，在颱風來襲時須緊閉門窗，因此視為封閉式建築物，受風時各結構面具有不同的風壓係數，風壓係數與建築物的幾何形狀有關，本研究以拱型屋頂所用之外風壓係數C_p進行計算。

風壓力為結構體受風時，於立向投影全面積所產生之壓力，作用在封閉式建築物上的風壓力P (kgf/m²)為外風速壓q (kgf/m²)、陣風反應因子G及風壓係數C_p之乘積，一般地區之風壓力P可由式1求出：

$$P = qGC_p - q_iGC_{pi} \quad (式1)$$

式中：

- P : 風壓力(kgf/m²)。
- q : 外風速壓(kgf/m²)。
- q_i : 內風速壓(kgf/m²)。
- G : 普通建築物之陣風反應因子；G=1.77。
- C_p : 封閉式建築物受風壓作用之外風壓係數。
- C_{pi} : 封閉式建築物受風壓作用之內風壓係數。

其中，因視設施為封閉式建築物，故不考量風從出入口及窗位置進入設施內所造成的內部風壓量，則以內風壓係數C_{pi}=0情況計算。

當風吹至結構物上而完全靜止時，對結構物受風面所產生之壓力稱為外風速壓 q (Velocity Pressure)，其與風速 V 關係式2如下所示：

$$q = \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (\text{式2})$$

計算時，取溫度 25°C 及一大氣壓力 (101.325 kPa) 下之條件，空氣密度 $\rho = 1.184 \text{ kg/m}^3$ ，將空氣密度除以重力加速度 9.81 m/s^2 轉換單位為 $0.12 \text{ kgf} \cdot \text{sec}^2/\text{m}^4$ ，代入式2整理後可得式3如下：

$$q = 0.06V^2 \quad (\text{式3})$$

作用在建築物上之外風速壓 q 與風速 V 之平方成正比，且風速隨地面高度增加而遞增，當高度增加至梯度高度 z_g (gradient height) 後，風速則保持均勻分布，其速度稱為梯度風速 (gradient velocity)，風速與高度 z 之關係可由式4表示：

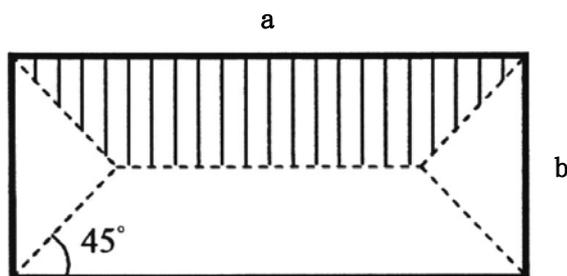
$$\frac{V_z}{V_{10}} = \left(\frac{z}{10}\right)^\alpha \quad 0 \leq z \leq z_g \quad (\text{式4})$$

式中：

- V_z : 高度 z 處之風速(m/s)。
- V_{10} : 10 m 高之風速(m/s)。
- α : 相對於 10 分鐘之平均風速之垂直分布法則之指數。
- z : 離地面之高度。
- z_g : 梯度高度。

板之降伏線理論

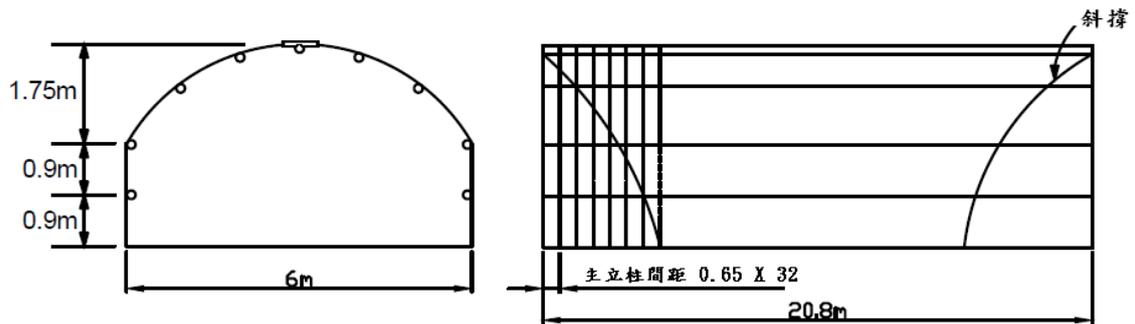
溫室結構受風時，被覆於溫室外側之材料將承受風壓力作用，所受負載再傳遞至骨架所組成之單元結構區塊所支撐，根據板之降伏線理論，板極限分析之破壞理論稱為降伏線理論，當降伏線產生，則使板形成一破壞機構⁽⁶⁾。圖一中虛線為降伏線，各周邊構件受風壓力負載之範圍，即為降伏線與構件所夾之封閉區域，如骨架所組成之單元結構區塊構件 a 所承擔負載範圍為斜線面積。長邊桿件 a 與短邊桿件 b 所組成之單元結構區塊， a 桿件受力面積為 $ab/2 - b^2/4$ 、 b 桿件受力面積為 $b^2/4$ 。



圖一、板降伏線理論之單元結構區塊。
Fig 1. Yield line theory of the unit block.

分析模組

拱型溫室骨架為一般構造用鍍鋅鐵管(俗稱鋸管)材質，本研究對象溫室屋脊高度1.8 m、拱高1.75 m、跨距6 m，溫室棟長度20.8 m，主要骨架間距為0.65 m，具有九組桁條向骨架及四支斜撐，拱型溫室結構尺寸如圖二所示。一組拱型骨架係由兩支圓拱鍍鋅鋸管材與連接管所組成，組裝完成之拱型骨架組直接插入土壤中壓實，再與桁條向骨架以彈簧夾及三通夾片接合後，使用鋼索與地錨拉緊骨架結構以抵抗拉拔力。

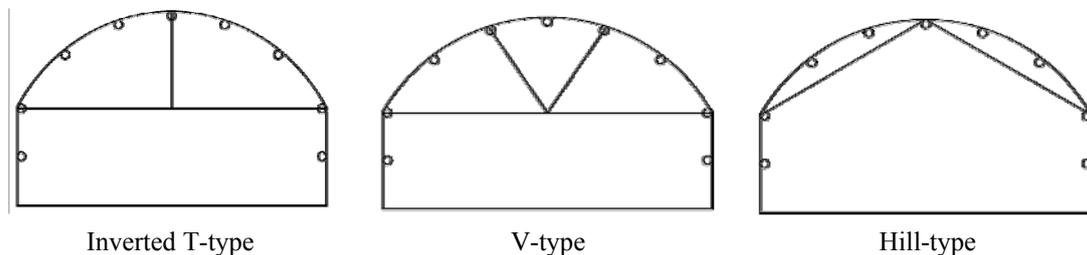


圖二、拱型溫室結構尺寸。

Fig. 2. Structure size of the arch greenhouse.

簡易溫室普遍應用標稱管徑1英吋之鋸管搭建，因此本研究將以此管徑建立分析模組，其內部無橫向補強結構，設定為對照組。另外，設定一種管內外徑增加補強措施及三種內部結構補強措施，探討不同補強形式之耐風強度，其中三種內部結構補強措施分別為倒T形結構、山形結構、V形結構，皆是使用1英吋之鋸管，形式如圖三顯示，而管內外徑增加補強措施則是使用 $1\frac{1}{4}$ 吋管徑鋸管，五種結構所用管徑規格如表一所示。

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，設定機械材料特性，給定彈性係數(Elastic modulus, E)、蒲松比(Poisson's Ratio, ν)及材料密度(Density, ρ)等分析參數如表二所示，分析軟體內設定單位系統為SI制(kg, m, s, K, A, N, V)，網格式選用軟體內建之Medium級數。



圖三、三種內部補強措施。

Fig. 3. Three structure models of the arch greenhouse.

表一、五種結構模組所用管徑規格

Table 1. Pipe specifications of the 5 structure models

Five structures model	Pipe specifications, mm		
	Outer diameter	Bore diameter	Thickness
1" Diameter	33.5	28.6	2.45
1 $\frac{1}{4}$ " Diameter	42.2	37.3	2.45
Inverted T-type	33.5	28.6	2.45
V-type	33.5	28.6	2.45
Hill-type	33.5	28.6	2.45

表二、機械材料特性之分析參數

Table 2. Mechanical material properties

Mechanical material properties	Properties
Elastic modulus, E	210 GPa
Density, ρ	7,850 kg/m ³
Poisson's ratio, ν	0.3
Bulk modulus	175 GPa
Shear modulus	80.77 GPa
Tensile yield strength	250 MPa

結果與討論

耐風設計規範分析結果

考量設施在開闊地或海岸地區受風力作用較大，因此計算時係假設該地點為地況C種類，其相關係數 $\alpha=0.15$ 、梯度高度 $z_g=300$ m代入式4中，可得離地面高度10公尺處之基本設計風速 $V_{10}(C)$ 與梯度高度之關係式5如下所示：

$$V_{zg} = V_{10}(C) \left(\frac{z=300}{10} \right)^{0.15} = 1.665 V_{10}(C) \quad (\text{式5})$$

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6表示：

$$V_z = V_{zg} \left(\frac{z}{z_g} \right)^\alpha = 1.665 V_{10}(C) \left(\frac{z}{z_g} \right)^\alpha \quad (\text{式6})$$

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公尺時，亦採用5 m處之風速壓地況係數計算，將式6代入式3整理後，可得設計風速壓 $q(z)$ 式7及式8如下：

$$q(z) = 0.06 (1.665)^2 \left(\frac{z}{z_g} \right)^{2\alpha} [I V_{10}(C)]^2 \quad (\text{式7})$$

$$= 0.166 \left(\frac{z}{z_g} \right)^{2\alpha} [I V_{10}(C)]^2 \quad (\text{式8})$$

中央氣象局依據24個測站在1947年至1991年間128個侵臺颱風最大10分鐘平均風速資料建立基本設計風速，在臺灣本島地區分為六區，為能使分析結果能涵蓋臺灣本島地區，本研究取基本設計風速為最大值 $V_{10}(C)=47.5$ m/s進行計算，其強度相當於中度颱風及蒲福風級15級風。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8中，可得在高度10 m處之設計風速壓為 88.82 kgf/m²，將 $q(z)$ 值代入式1求風壓力 $P=q \times G \times C_p$ ，則溫室承受蒲福風級15級風情況下之風壓力關係式 $P=88.82 \times 1.77 \times C_p$ 。

外風壓係數 C_p

拱形屋頂承受側向風之外風壓係數，以拱高1.75 m及跨度6 m計算得拱高與跨度之比值 $r=0.29167$ ，高跨比 r 值介於 $0.2 \leq r < 0.3$ 之間，將 r 值代入公式，求得外風壓係數如表三所示，正值表示壓力，作用方向係垂直指向設施表面，負值表示吸力，作用方向係由設施表面垂直向外，溫室之拱型屋頂外風壓係數 C_p 值計算方式請參考耐風設計規範。

表三、溫室承受側向風之拱型屋頂外風壓係數(C_p)

Table 3. The pressure coefficient (C_p) from the side of the wind on the arch structure

C_p	Windward side	Central part	Leeward side
Maximum basic design wind speed $V_{10}(C)=47.5$ m/s (Beaufort scale 15 wind)	0.1375	-0.9917	-0.5

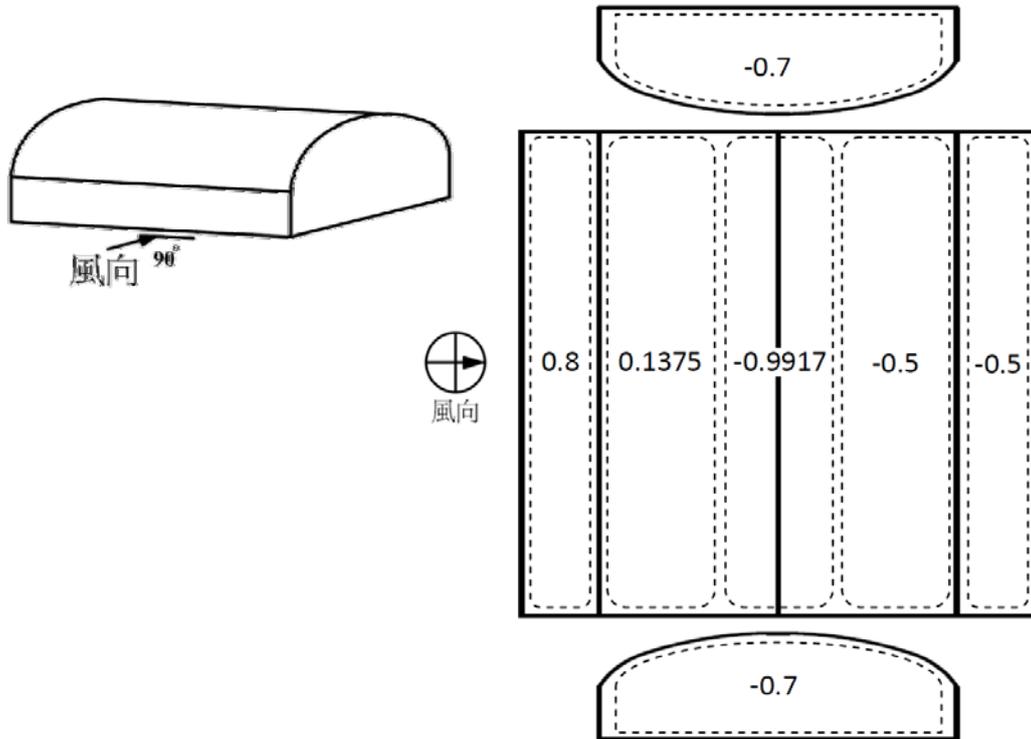
牆面承受側向風之平均外風壓係數，平行於風向之結構物水平尺寸 $L=6$ m (溫室跨距)，垂直於風向之結構物水平尺寸 $B=20.8$ m (溫室棟長度)，計算得 $L/B=0.288$ ，依據牆之平均外風壓係數規範，計算得牆各部外風壓係數如表四所示。

表四、溫室承受側向風之牆外風壓係數(C_p)

Table 4. The pressure coefficient (C_p) from the side of the wind on the wall structure

Coefficient of the wall C_p	Windward side	Leeward side	Crosswind side
	0.8	-0.5	-0.7

溫室承受側向風之牆及拱形屋頂外風壓係數 C_p 如圖四所示：



圖四、溫室承受側向風之牆及拱形屋頂外風壓係數(C_p)。

Fig. 4. The pressure coefficients (C_p) from the side of the wind on the wall and arch structure.

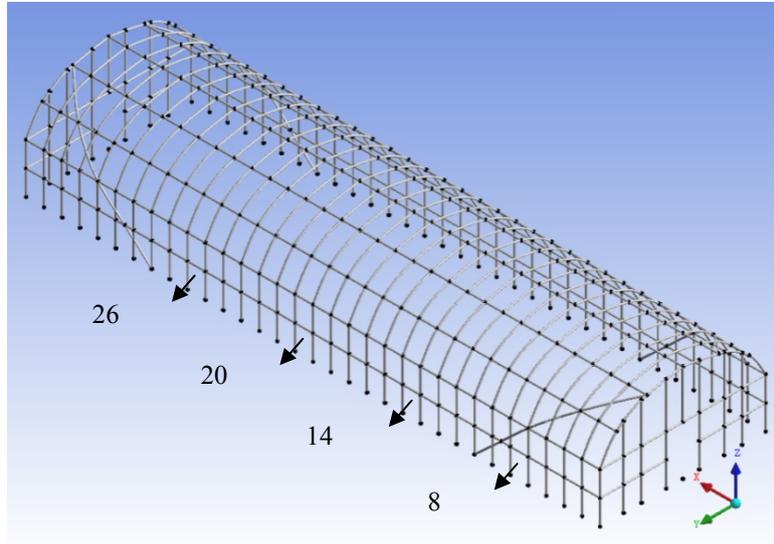
模組分析結果

設施所承受載重部分，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。

溫室在棟長向具有33組拱型骨架組，三種內部結構補強措施分別在設施內部裝設四組進行模擬分析，裝設位置分別在第8、14、20、26點處拱型骨架位置上。由骨架結構之各節點相對位置建立座標(x, y, z)系統，輸入ANSYS軟體建立模組，拱型溫室分析模型如圖五顯示。

由分析軟體計算得1英吋管徑所搭建之骨架結構靜載重為4,779 kg，若被覆材料以厚度0.1 mm之塑膠布覆蓋時， 1 m^2 之平均重量約為0.14 kgf⁽⁵⁾，總覆蓋面積約為260 m^2 ，則塑膠布總重量為36.4 kgf；計算得被覆材料重量約佔骨架結構總重量為0.76%，所佔重量比例小，且因使用臺灣本島地區最大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。溫室被覆材料受風壓力作用後，力量將依據板之降伏線理論，由骨架所組成之單元結構區塊所支撐，並且力量係垂直作用於各桿件上。



圖五、拱型溫室分析模型。

Fig. 5. Analysis model of the arch greenhouse.

五種分析模組之變形量結果如表五所示，依排序為1"管徑22.6 mm、倒T形結構18.1 mm、山形結構15.0 mm、V形結構13.9 mm、 $1\frac{1}{4}$ "管徑10.8 mm；以鋼材使用量結果排序， $1\frac{1}{4}$ "管徑為6,118 kg、內部V形結構為5,078 kg、內部倒T形結構為5,011 kg、內部山形結構為4,987 kg、1"管徑4,779 kg。變形量降低結果以 $1\frac{1}{4}$ "管徑結構為最佳，其所增加之鋼材重量為1,339 kg，管材增量為全部模組中最高，而鋼材所需重量增幅達28%，若考量搭建成本，此模組將增加較高之材料費用，觀察變形量結果，可發現以增加管外徑及內徑方式，因管材截面積增加，可有效承受彎矩、拉壓應力及剪力。

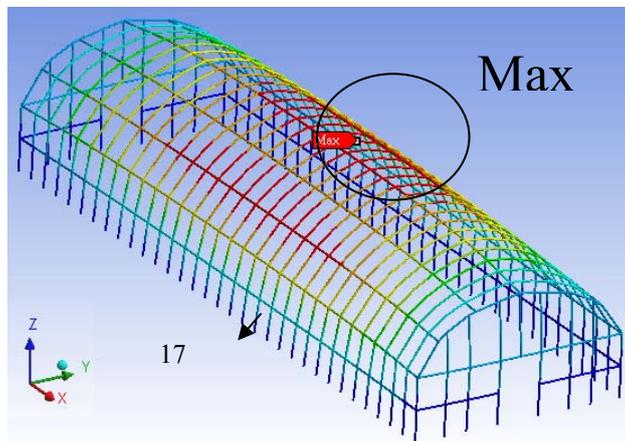
表五、五種分析模組之最大變形量及管材增量

Table 5. The maximum deformation and steel amount of the 5 structure models

5 structure models	Maximum deformation mm	Total weight kg	Increase weight kg	Percentage increase %
1" Diameter	22.6	4,779	-	-
$1\frac{1}{4}$ " Diameter	10.8	6,118	1,339	28%
Inverted T-type	18.1	5,011	232	4.85%
V-type	13.9	5,078	299	6.25%
Hill-type	15.0	4,987	208	4.35%

若考量鋼材成本，則以採用內部山形結構補強方式，可以最經濟之鋼材增加量208 kg，得到較佳之變形量降低效果，管材用量增幅僅4.35%。此外，若僅討論三種內部補強方式，則採用內部V形結構，變形量結果為三種內部補強結構中最佳，其所需之管材重量為299 kg，管材增量為三種內部補強結構中最高，管材重量增幅僅6.25%；內部倒T形結構為四種補強設計中，變形量抑制結果最低，由軟體動畫觀察模組受力情況，可發現倒T形結構因無斜向支撐，無法經由垂直方向傳遞及分散所承受之風壓力，所受之風壓力將完全由橫向桿件吸收及傳遞，且因溫室棟長向長度越長，受風壓作用之面積越大，則載重應力越高，導致變形量抑制結果較低。

拱型溫室承受側向風時，由分析結果發現，變形沿棟長向長度遞增至中央處，在中央處有最大變形，最大變形發生在棟長向中央處之拱型屋頂背風處端部，且五種模組之最大變形量皆發生在編號第17號拱型骨架上，如圖六圈選位置顯示：



圖六、拱型溫室之最大變形發生處。

Fig. 6. Maximum displacement position of the arch greenhouse.

結構承受負載時，變形量太大將造成接合零件脫落、覆蓋之塑膠布破裂等問題⁽⁴⁾，塑膠布溫室允許結構之變形量，樑之變形量須小於樑長度之1/150，而桁條之變形量須小於桁條長度之1/100⁽¹⁾，因此以此設施所使用之鋸管長度6 m計算，其變形量應小於40 mm，五種模組變形量分析結果雖未超過允許範圍，然而因各結構接點在軟體設定時，均採用固定接點選項，因此變形量結果將會比計算值更大，日後可就管件接合零件進行受力應變分析，將結果應用於接點參數設定，以建立更準確的分析資料。

結論與建議

簡易設施若是不具內部補強結構，其耐風能力較為不足，因此須適度補強，以延長使用年限。本研究分析之四種模組，對於變形量抑制皆有效果，其中，倒T形結構為國內常用形

式，由分析結果發現，其耐風能力較V形及山形結構變形量抑制結果低，日後可就V形及山形結構進行實際搭建，評估其應用可行性。受風壓力作用時，以增加管外徑及內徑方式，有最高之變形量降低效果，但也因此提高較多的材料費用，在考量成本及降低變形量的情況下，以內部結構補強措施施作可符合需求，其中又以內部山形結構可有較經濟之管材用量及變形量降低效果。

使用軟體進行結構耐風能力分析，除能節省時間外，亦能減少經驗試誤所造成的費用支出，然而設施在遭遇強風侵襲時，氣候、風向及風壓之變化卻是無法預期的，有別於分析時所設定的風是從穩定的方向及相同的力量作用在溫室，因此設施仍具有不可預期的損毀風險，除加強結構強度外，於颱風來臨前，正確及確實的防颱措施亦極為重要。

簡易設施常用彈簧夾、三通夾片，受風作用時會有應變，然而在軟體中係採固定節點方式設定，未來，可就管件接合零件及基礎部分進行結構強度分析，並且就各項補強方式進行成本分析，以建立更準確及實用的分析資料，提供使用者參考應用。

誌 謝

本研究承蒙農委會主辦之科技計畫項下補助經費。數學演算承國立中興大學生物產業機電工程學系謝禮丞教授及鄭嘉緯同學協助；試驗期間承中興大學生物產業機電工程學系盛中德教授、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教授斧正，方得以順利完成，謹此一併致謝。

參考文獻

1. 王鼎盛 1988 設施園藝設計手冊 台灣大學農業工程學系農業設施研究室編印。
2. 內政部營建署 2006 建築物耐風設計規範及解說 台北。
3. 周慶安、姜義展 1995 颱風災後栽培設施損害情形調查評估 桃園區農業專訊 9: 17-19。
4. 林聖泉 2001 溫室結構設計 施栽培自動化：國立台灣大學生物產業機電工程學系 p.93-101。
5. 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。
6. 陳柏宏 2001 鋼筋混凝土學與設計 台北：考用出版社。
7. 蘇湘華 2003 單斜頂式溫室結構抗風力強度分析 碩士論文 台中：國立中興大學生物產業機電工程學研究所。

Studies on the Improvement of Wind Resistance Capacity in the Walk-in Tunnel Greenhouse in Taiwan¹

Chin-Yuan Chang, Yun-Sheng Tien and Ling-Hsi Chen²

ABSTRACT

Walk in tunnel type of greenhouse is widely used to grow crop in Taiwan. The walk in tunnel greenhouse with a low wind-resistance capacity may be damaged by typhoon in the summer in Taiwan. To improve the structural resistance of the walk in tunnel greenhouse is crucial to reduce the natural disaster loss. In this study, CPAMI greenhouse structure specifications were included in the analyses of wind-resistant performance of greenhouse. Four improved design models and a control structure was under comparison. At 47.5 m/s wind pressure, the deformation of the control structure was 22.6 mm. Deformations of the four improved designs: inverted T-type, Hill-type, V-Type, and 1¹/₄" diameter were 18.1, 15.0, 13.9, 10.8 mm, respectively. Among the four models, 1¹/₄" diameter model obtained the best wind-resistance capacity, but with the highest cost. The increase of pipe weight was 28%. Alternatively, Hill-type structure had lowest pipe weight increase (4.35%) with a lower deformation. Thus, Hill-type structural improvement is an economical choice for the greenhouse culture.

Key words: Walk in Greenhouse, structures, typhoons.

¹ Contribution No. 0780 from Taichung DARES, COA.

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