

# 生物生產用隧道式輕構架溫室結構安全及經濟設計

## Economical and Safety Structure Design of Tunnel-type Greenhouse for Bio-production

國立台灣大學生物環境系統工程學系副教授

國立台灣大學生物環境系統工程研究所碩士

侯文祥

林益鵬

Wen-Shang Hou

Yi - Peng Lin

### 摘 要

本研究以設施安全及用材經濟兩設計原則，探討最常用於生物生產用的簡易式隧道型輕構架溫室之結構設計，以建立本土化設施設計用的基本資料。運用模矩及開放建築概念，設計三種不同高跨比、三種構架尺度、三種主構架配置間距及二種桁條配置間距角等組合成 54 組構架，在安全承受十二級風力、五級地震力及構造物自重下，運用結構分析電腦程式 STAAD-III 模擬計算所需用鋼量。再探討構成室內單位體積空間、構成室內單位面積、室內高度等所需用鋼量最少的設計模組，並檢核基礎容許支承载力及抗拉拔力，以供設計建造之參考。結果得知高跨比 1 : 3，主構架間距 1m，桁條配置間距 20 度之平均單位體積用鋼量最低，為 2.44kg/m<sup>3</sup>，較高跨比 1 : 2 模組減少 33%，較高跨比 1 : 4 模組減少 47%；其創造 1m<sup>3</sup> 室內空間量之材料平均成本為 114.7 元/m<sup>3</sup>，較高跨比 1 : 2 之材料成本減少 32%，也較高跨比 1 : 4 節省 54%。設施所構成的室內可用面積所需用鋼量也以高跨比 1 : 3 最經濟。故建議棟長度以 10m 為單元時，設施構成室內的空間量在 195 m<sup>3</sup> 至 550 m<sup>3</sup> 間、室內面積在 90 m<sup>2</sup> 至 150 m<sup>2</sup> 間，以高跨比 1 : 3、主構架間距 1m、桁條配置間距 20 度設計最經濟。

**關鍵詞：**隧道式溫室，結構安全，經濟。

### ABSTRACT

The research presents a tunnel type pipe structure designed for bioproduction. Under the principles of safety and economy, the data bases of the design were estimated. The research also illustrates the comparison of 54 modeling structure including 3 different height and span ratios, 3 structure scales, 3 frame spacing and 2 truss pitch angles. The computer program STAAD-III, with the demand of 12<sup>th</sup> degree wind force and 5<sup>th</sup> degree earth quake force resistance, calculates and estimates way of constructing while

checking the fundamental allowable force. The results find that the minimum material needed is  $2.44\text{kg/m}^3$  with height and span ratio equals 1 : 3, frame spacing is 1m, trust allocation pitch is 20 degree. This saves 33% of the material than module with height and span ratio is 1 : 2 or 47% than it is 1 : 4. The average cost of the material to create a  $1\text{m}^3$  inner space is NT \$ 114.7/  $\text{m}^3$ , while is 32% less than the height and span ratio is 1 : 2, or 54% less than the height and span ratio reaches 1 : 4. When the height and span ratio is 1 : 3, the inner area extends to its maximum and the cost is most economical as well. It is recommended that the buildings stays 10 meter long with inner space between  $195$  to  $550\text{m}^3$  and inner area between  $90$  to  $150\text{m}^2$ . height and span ratio keeps 1 : 3. main truss spacing is 1 meter and trust allocation inter remains 20 degree. This combination is the most efficient and safe design founded in this study.

**Keywords:** Tunnel type greenhouse, Safety structure, Economy.

## 一、緒 論

### 1.1 研究動機與方法

台灣加入 WTO 之後，農業生產必將朝精準化方向發展，因此適合利用於植物栽培、動物飼養、水產養殖等之「生物生產用輕型構造物」設計，如能同時確保力學安全及造價經濟，將能使生產過程受環境干擾減少，提升產業競爭力。但至今台灣對塑膠布溫室建造並沒有一定規範，市面上建造樣式眾多，且因其自重較一般建築物為輕，而平均每年有 3.2 個颱風侵襲台灣，因此易受颱風破壞，又台灣亦位於地震帶上，農用設施構造物因未經結構分析設計，無法確認其安全性。為使台灣生物生產用輕型構造物結構具有一定抗風、耐震強度的安全設計，以朝模組化大量生產，本研究以台灣常用之鍍鋅鋼管材料與隧道式外型為對象，運用模組化設計概念，建立輕型構造物之外型、尺寸、組構模組之系統；依現行台灣建築技術規則、設施園藝設計手冊等，以結構分析軟體(STAAD-III)為結構分析工具，求得所需用鋼量。進而探討隧道式構造物在承受相同設計外力情況下其高跨比、主構架配置間距及桁條配置間距角與符合安全性的最經濟用鋼量之關係及基礎斷面、深度之檢核，以提供農民建造設計之參考。

### 1.2 研究範圍

針對生物生產用隧道式輕型構造物之建築外觀、結構材料、被覆材料及建築工址的研究範圍說明如下：1. 生物生產用：指作為植物、動物，生產之構造物，以人可進入作業研究為範圍。2. 隧道式：構造型式僅限於構造物外觀的上部曲線由半圓、切圓所構成。3. 被覆材料：使用國內最常用之軟質聚乙烯 (PE) 或聚氯乙烯 (PVC) 塑膠布等農用被覆材料。4. 輕型構造物：因被覆材料為輕質塑膠布，構架材料以等向性鍍鋅鋼管市售產品規格作組合，因此構造物重量甚輕。5. 基地位置：因台北盆地在地震時有盆地放大地震力效應，建物較易損壞，且台北盆地依建築技術規則〈2001〉之台灣風力分級區與西部地區風壓力設計值相同，因此基地範圍假設在台北盆地。

## 二、文獻回顧

### 2.1 隧道式生物生產輕型構造物

國內生物生產用構造物種類繁多。沈、蔡、黃(1999)調查台灣之塑膠布隧道式溫室面積約 2000 公頃，而玻璃溫室僅約 300 公頃。小澤(1987)調查日本當年玻璃溫室面積為 1965 公頃，塑膠板溫室有 39466 公頃，而隧道式塑膠布溫室則有 57586 公頃為主流。溫(1994)提到中國之塑料溫室佔全部溫室面積三分之二。Elsner 〈2000〉指

出歐洲南部如希臘、葡萄牙、西班牙、義大利、法國等，塑膠布溫室仍佔大部分，且其中隧道型所佔比例最大。可知隧道式塑膠溫室目前使用最多。塑膠布溫室自重較一般建物輕，「風力」為構造物結構設計之主要控制外因。台灣不但具有比日本的地域環境特徵更適合發展生物生產之天然環境條件，且地理位置更具發展優越性，但台灣地處颱風及地震發生地帶上，因此如何兼具抵抗風力及地震力，將是台灣的「生物生產用輕型構造物」結構設計亟需正視的重要課題。經實地量測及文獻紀錄可知，外型尺寸繁多，並無一定制式尺寸，若以人可進入工作之較大型構造物，高度約 1.8~5.0 公尺，跨度約 2~20 公尺，甚至更大型尺度亦有。主構架配置間距約 0.5~3 公尺，桁條配置間距角則多集中在 20°~30° 之間〈Elsner, 2000〉，地下結構部份多用獨立基礎，若為臨時性構造，則有直接埋入地盤之做法〈越, 1988〉。高跨比方面則大致介於 1:1.5~1:5 之間，因此本研究以使用最普遍的高跨比 1:2、1:3、1:4，棟高度 3、4、5 公尺，跨度 6、8、9、10、12、15、16、20 公尺；主構架配置間距 0.5、1、2 公尺，桁條間距角 30°、20° 等組合。隧道式輕型構造物各部構造名稱及定義如圖 1 所示。

## 2.2 模組計畫及開放建築研究

**模組計畫**(Modules planning)指建築物為求施工方便性及經濟性等因素，將平面空間作均一、規則及反覆之切割劃分，此種切割的最小單位稱為「單位模矩」(陳, 2000)。中國國家標準(CNS2927)規定，以 10cm 為基本模矩，本研究之生物生產用輕型構造物之外型及構架，即以此模矩概念構成。**開放式建築**(Open building)是系統化建築方式，運用構造物組成層級之一種設計概念，達成日後維修方便，施工便利。Habracken 在 60 年代對大眾住宅設計與營造提出將建築物分為「支架體」層級、「填充體」層級之理念。支架體即結構體，填充體為被覆材設備部分，每個層級皆有自主性又能結合且可各自分成主系統及次系統，如此在營造時可控制成本，且日後

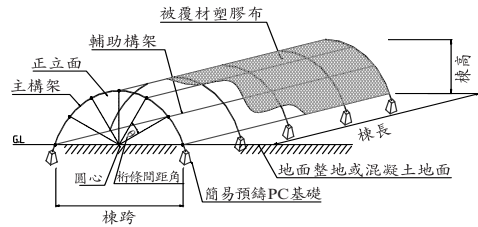


圖 1 隧道式生物生產輕型構造物示意圖

使用維修較方便；本研究即運用此概念於構造物結構分析。

## 2.3 結構設計規範及設計方法

結構設計方面，因本研究屬鋼骨材構造，目前台灣鋼構造多採用容許應力法(Allowable Stress Method)，設計精神為需要的設計應力  $\Sigma Qi$  等於極限應力  $\Sigma Rn$  除以一個安全係數  $\Sigma SF$ 。 $\Sigma Qi$  也可以用下列載重係數的組合來代表： $D+L$ 、 $D+W$ 、 $D+E$ 、 $(D+L+W) \times 0.75$ 、 $(D+L+E) \times 0.75$ ，其中  $D$ ：靜載重、 $L$ ：活載重、 $W$ ：風力、 $E$ ：地震力。變形控制方面，設施園藝設計手冊(1988)規定，考量工作舒適性，塑膠布溫室之撓度，在樑構件部分須小於樑跨度的 150 分之一，桁條構件須小於桁條跨度的 100 分之一。至於結構上的荷重與結構分析計算流程及內容部分，請參考侯、王(2004)文獻。

各模組構架之結構分析步驟為：1、依上述計算作用於輕型結構體之載重及外力後，將其輸入結構分析軟體 STAAD-III，以求取構架之應力及變形。2、選定構件之斷面形狀及構件規格；確認在各種載重組合中，產生於斷面內任何部位之最大應力皆在材料之容許應力內。3、結構系統承受各種荷重組合時，各部位的應形量應確認符合規定。4、風載重之計算，乃根據「主構架載重分擔寬之原則」(王, 1988)，如圖 2。

## 2.4 STAAD-III 軟體簡介

本研究之結構應力分析軟體工具 STAAD-III 程式是美國為因應建築、土木結構工程分析問題而發展出的有限元素程式，其全名為 Structural Analysis and Design，主要功能係針對

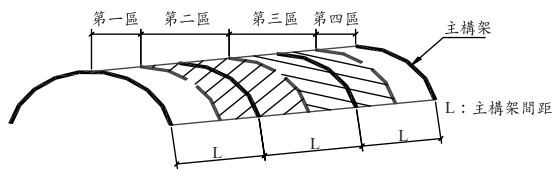


圖 2 主構架載重分擔寬示意圖

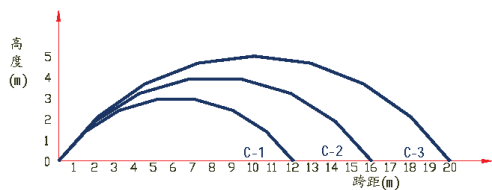
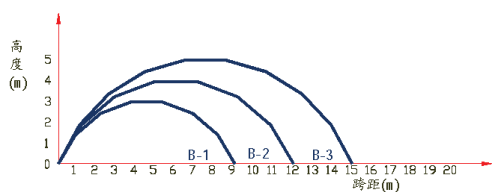
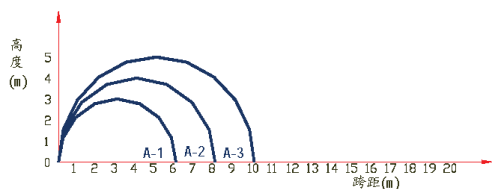


圖 3 棟高度及跨距組合圖

鋼構造建築物之結構分析及設計。運用 STAAD-III 分析實際工程問題時，需先建立有限元素模型，其必須掌握原則為 1、節點佈置原則：於材料性質或斷面積性質不同處須設置節點，另集中力作用點與束制點亦須設置節點。2、元素分布疏密原則：在材料性質、斷面積性質或經工程判斷之應力會急遽變化之位置，須以較密之元素模擬。且在圓孔週邊之模擬時，欲達精確之模擬，360°應分成 24 個元素以上，而本研究隧道式外型為 180°之圓弧，共分成 18 個元素，故撓度分析應屬精確。

### 三、隧道式輕型構造物模組建立

#### 3.1 型構造物模組建立

以模組概念依高度跨距比為 1:2、1:3、1:4，主構架間距 0.5m、1m、2m，桁條配置間距

高跨比	高跨尺寸	主構架間距	桁條間距角
A 型 H:L=1:2	A-1	A-1-1	(30°)
		A-1-2	(20°)
		A-1-3	(20°)
A-2	A-2-1	(30°)	
	A-2-2	(20°)	
	A-2-3	(20°)	
A-3	A-3-1	(30°)	
	A-3-2	(30°)	
	A-3-3	(20°)	

圖 4 A 型高跨比 <1:2> 各模組構架組合

角 30°、20°，構架尺度從高度 3m 至 5m，構架跨距 6m 至 20m 等為變數，以棟長 10m 為常數，共設計出 A 型〈高跨比 1:2〉、B 型〈高跨比 1:3〉、C 型〈高跨比 1:4〉等三種最常使用的高跨比模組；各型再依高度、跨距比各分成三種外型尺寸，單位為公尺，A 型的高度：跨距比計有 3:6、4:8、5:10 等，B 型計有 3:9、4:12、5:15 等，C 型計有 3:12、4:16、5:20 等，如圖 3 所示。各型各模組之構件配置組合，以 A 型高跨比 1:2 組合的 18 個模組為例，詳如圖 4。

#### 3.2 輕型構造物結構分析模式建立

將 54 組模組構造物作為構件斷面設計分析對象，並以 AutoCad 先建立圖形，定出座標點，再輸入於 STAAD-III 軟體內建立立體構造模組。進而確認構造材料特性，本研究之構架材料為鍍鋅鋼管，材料性質依楊氏係數 Elastic modulus 為  $E=2.1 \times 10^7 t/cm^2$ ，波森氏比 Poisson's Ratio  $\nu=0.3$ 。分析模式如圖 5。

#### 3.3 輕型構造物荷重分析計算

作用於結構上荷重有靜載重、風力荷重、地震力荷重等，其中(1)靜荷重部分：STAAD-III 結構分析軟體可依各模組輸入之鍍鋅鋼管斷面尺寸算出，而被覆材料以厚度 0.1mm 塑膠布覆蓋時， $1m^2$ 之重量為 0.14kg，計算得知各高跨比構架平均被覆材所占結構重量約為 1.97%至

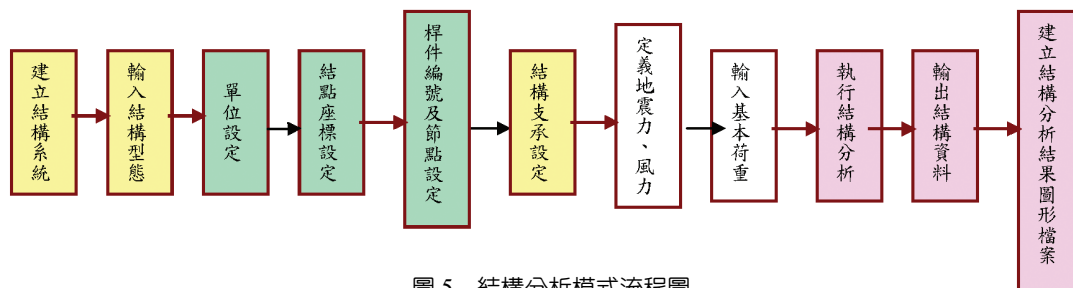


圖 5 結構分析模式流程圖

表 1 高跨比 1：2 模組單位體積用鋼量比較

高跨比(空間體積)	構架配置					
	1m, 30°	1m, 20°	0.5m, 30°	0.5m, 20°	2m, 30°	2m, 20°
3m : 6m (141m <sup>3</sup> )	3.5	3.7	3.26	2.97	3.8	5.9
4m : 8m (251.3m <sup>3</sup> )	3.8	3.9	5.49	5.61	4.5	4.73
5m : 10m (392.7m <sup>3</sup> )	3.9	4	5.7	5.7	6.12	6.18
單位體積用鋼量(kg/m <sup>3</sup> )	3.73	3.87	4.82	4.76	4.81	5.60

3.4%，所佔重量比例甚小，且經 STAAD-III 執行結構分析，所需最小鋼管尺寸與未考慮被覆材重量所得之最小鋼管尺寸一樣，故本研究於結構分析時不考慮被覆材重量。(2)風力荷重計算部分：依風力係數、風壓力、受風面積等相乘計算。其中風力係數依設施園藝設計手冊〈1988〉，以 AutoCad 套繪對應於本文各模組，受風面積則將各模組構架依「主構架載重分擔寬原則」，並配合風力係數之變化區段，及主構架配置間距，所求得各模組各區段之分擔載重面積。求得各模組之上述資料，即可求得主構架各個樑元素之均佈載重風力值，並將其輸入於 STAAD-III 中。詳細內容，請參考侯、王（2004）文獻。(3)地震力計算部分：依建築物耐震設計規範（2000），規定最小設計水平地震力，包括：構造物基地所屬地區之震區水平加速度係數， $Z=0.23$ ；構造物基地正規化水平加速度反應譜係數  $C$ ，本研究假設地盤條件極差，屬長周期，依規定  $C=1.3$ ；結構系統地震力折減係數  $F_u$ ，本研究之構造物依規範規定在台北盆地高度 3m，為極短週期， $F_u$  值為 2.33，高度 4m 及 5m 者為短週期， $F_u$  值為 2.38；檢查  $C/F_u \leq 1.0$ ；起始伏降伏地震力放大係數  $\alpha_y$ ，本研究之構造物依鋼結構容許應力法設計， $\alpha_y=1.2$ ；建築物用途係數  $I$ ，依規定  $I=1.0$ ；建築

物全部靜載重  $W$ ，依各構架總用鋼量重量計算之；最小設計水平地震力  $V$ ，高度 3m 者  $V=0.0587W$ 、高度 4m 及 5m 者  $V=0.0575W$ 。詳細計算內容，請參考侯、王（2004）文獻。

#### 四、STAAD-III 模擬分析結果

##### 4.1 各模組構架室內空間體積構成與用鋼量分析

將 54 組模組之節點編號、桿件編號、荷重資料、材料性質等，輸入 STAAD-III 內執行分析，可得出在符合規範安全下各構架模組之最低用鋼量。並依高跨比及構成室內空間體積或面積相同，但構架配置不同之各模組為相互比較單元，以單位空間體積用鋼量為評估指標，求取何種構架配置的單位體積用鋼量最省。

##### 1. 高跨比 1：2 各模組單位體積用鋼量分析

由表 1，可知棟長 10m、棟高 3m、跨度 6m 構成的室內空間體積為 141m<sup>3</sup>，在六種構架配置模組中，最經濟的設計為主構架配置間距 0.5m，桁條間距角 20°、配置 10 根，其單位體積用鋼量為 2.97 kg/m<sup>3</sup>。棟高 4m、跨度 8m 的室內空間體積為 251.3m<sup>3</sup>，在六種配置中，以主構架配置間距 1m，桁條間距角 30°、配置 7 根，其單位體積用鋼量為 3.8 kg/m<sup>3</sup> 最經濟。高度 5m、跨度 10m

表 2 高跨比 1 : 3 模組單位體積用鋼量比較

高跨比(空間體積) \ 構架配置	1m, 30°	1m, 20°	0.5m, 30°	0.5m, 20°	2m, 30°	2m, 20°
3m : 9m (195m <sup>3</sup> )	3.3	2.5	5.8	6.1	2.3	2.56
4m : 12m (346.8m <sup>3</sup> )	2.5	2.3	4.2	3.84	2.59	2.59
5m : 15m (541.9m <sup>3</sup> )	3.16	2.53	4.26	3.49	3.86	3.86
單位體積用鋼量(kg/m <sup>3</sup> )	2.99	2.44	4.75	4.48	2.92	3.00

表 3 高跨比 1 : 4 模組單位體積用鋼量比較

高跨比(空間體積) \ 構架配置	1m, 30°	1m, 20°	0.5m, 30°	0.5m, 20°	2m, 30°	2m, 20°
3m:12m(251.6m <sup>3</sup> )	4.45	4.09	6.76	5.5	5.1	3.7
4m:16m(447.2m <sup>3</sup> )	6.62	5.64	8.77	7.96	4.83	4.87
5m:20m(698.8m <sup>3</sup> )	7.7	5.77	9.99	9.87	5.77	5
單位體積用鋼量(kg/m <sup>3</sup> )	6.26	5.17	8.51	7.78	5.23	4.52

的室內空間體積為 392.7m<sup>3</sup>，構架配置仍以主構架配置間距 1m，桁條間距角 30°、配置 7 根最經濟，用鋼量為 3.9 kg/m<sup>3</sup>。以上三組比較可知高跨比 1 : 2 之各模組其單位體積用鋼量隨高度及跨距增大而增加；就平均單位體積用鋼量最經濟而言，以主構架配置間距 1m，桁條間距角 30°、配置 7 根所組成之構架，其單位體積用鋼量變化最小，平均值也最小為 3.73 kg/m<sup>3</sup>。

#### 2. 高跨比 1 : 3 各模組單位體積用鋼量分析

由表 2，可知棟高 3m、跨距 9m 構成的室內空間體積為 195m<sup>3</sup>，在六種構架配置模組中，以主構架配置間距 2m，桁條間距角 30°、配置 7 根的構架配置最經濟，其單位體積用鋼量為 2.3 kg/m<sup>3</sup>。高度 4m、跨距 12m 的空間體積為 346.8m<sup>3</sup>，六種模組中，以主構架配置間距 1m，桁條間距角 20°、配置 10 根最經濟，其單位體積用鋼量為 2.3 kg/m<sup>3</sup>。高度 5m、跨距 15m 的空間體積為 541.9m<sup>3</sup>，構架配置仍以主構架配置間距 1m，桁條間距角 20°、配置 10 根最經濟，用鋼量為 2.53 kg/m<sup>3</sup>。就平均單位體積用鋼量最經濟而言，高跨比 1 : 3 之各模組其單位體積用鋼量，以主構架配置間距 1m，桁條間距角 20°、配置 10 根最穩定，其平均值為 2.44 kg/m<sup>3</sup> 最少。

#### 3. 高跨比 1 : 4 各模組單位體積用鋼量分析

由表 3，可知棟長 10m、高度 3m、跨距 12m 構成的室內空間體積為 251.6m<sup>3</sup>，在六種構架配置模組中，以主構架配置間距 2m，桁條間距角 20°、配置 10 根者最經濟，其單位體積用鋼量為 3.7kg/m<sup>3</sup>。高度 4m、跨距 16m 的室內空間體積為 447.2m<sup>3</sup>，構架配置以主構架配置間距 2m，桁條間距角 30°、配置 7 根者最經濟，其單位體積用鋼量為 4.83 kg/m<sup>3</sup>。高度 5m、跨距 20m 的空間體積為 698.8m<sup>3</sup>，構架配置仍以主構架配置間距 2m，桁條間距角 20°、配置 10 根最經濟，用鋼量為 5 kg /m<sup>3</sup>。就平均單位體積用鋼量最經濟而言，高跨比 1 : 4 之各模組其單位體積用鋼量隨高度及跨距增大而增加，就構架配置而言，以主構架配置間距 2m，桁條間距角 20°、配置 10 根，所組成之構架，其單位體積用鋼量變化最小，平均值也最小為 4.52 kg/m<sup>3</sup>。

#### 4.2 各模組應力比比較

STAAD-III 分析出之各模組應力比，得知高跨比 1 : 2、1 : 3、1 : 4 之各模組最大應力比均 ≤ 1，代表軸應力及撓曲應力均小於材料容許應力值，即表示桿件受力後均在安全範圍內，而其最大應力比產生位置均發生在與地面接合之部份，控制之外力則為風力。控制之風向，高跨比

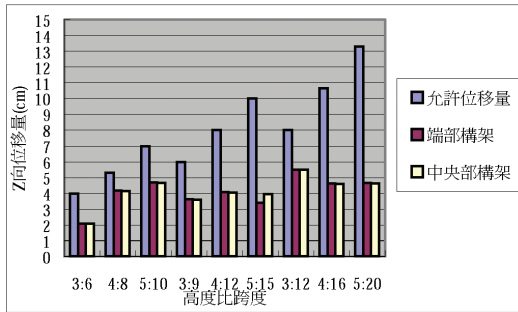


圖 6 各模組邊緣構架及中央構架最大位位移比

1:2 以 X 向〈構造物棟跨度方向〉之風力為主；高跨比 1:3 各模組，3m:9m 時以 X 向之風力為主，在高跨比 4m:12m、5m:15m 則由 Z 向〈構造物棟長度方向〉之風力控制；高跨比 1:4 之各模組以 X 向之風力為主。

#### 4.3 位移分析比較

由 4.1 所得各不同高跨比中，平均單位體積用鋼量最經濟之構架模組，進行位移比較分析。將輕型構造物遭受外力時，邊緣構架及中央部構架，最大位移點之 X、Y、Z 方向之位位移量，經檢核其位位移量均符合設施園藝設計手冊（王，1988），整理如圖 6。此位移之產生原因，乃由風力所造成，而位位移量最大位置，多發生在中央端部，且沿棟長之風力〈Z 向〉為控制因子。由於隧道型屋頂，其側面為曲面風阻較少，而正面為平面，風阻較大，因此棟長向〈Z 向〉之位位移較棟跨距向〈X 向〉之位移大。

#### 4.4 各模組總空間量與單位體積用鋼量關係

就單位體積用鋼量與總空間量經濟關係而言，取平均單位體積用鋼量最經濟之不同高跨比模組作分析，由圖 7 可知各高跨比最經濟用鋼量與空間量經濟關係。以高跨比 1:3 之平均單位體積用鋼量 2.44kg/m<sup>3</sup> 最經濟，較高跨比 1:2 之平均單位體積用鋼量 3.73kg/m<sup>3</sup> 節省 33%，也比高跨比 1:4 之平均單位體積用鋼量 4.52kg/m<sup>3</sup> 節省 47%。若將用鋼量換成金額，如圖 8，高度 3m，跨度 9m，空間量 195m<sup>3</sup>，主構架間距 2m，桁條間距 30°時，單位體積成本為 105 元/m<sup>3</sup>。平

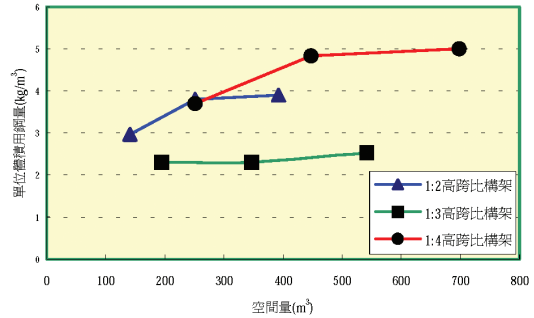


圖 7 室內空間構成與單位體積用鋼量關係

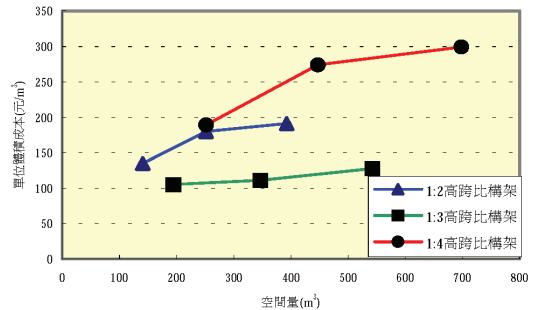


圖 8 室內空間構成與單位體積成本關係

均而言，高跨比 1:3 模組創造 1m<sup>3</sup> 之空間量，其單位體積材料成本為 114.6 元/m<sup>3</sup>，比高跨比 1:2 各模組中最經濟骨架配置之構架的平均單位體積材料成本 168.6 元/m<sup>3</sup> 省 32%，比高跨比 1:4 各模組中最經濟骨架配置之構架的平均單位體積材料成本 253.9 元/m<sup>3</sup>，節省 54%。

#### 4.5 室內面積與單位體積用鋼量關係

由表 1 至表 3 中，就單位體積用鋼量與各模組構架造成室內可用面積之經濟關係而言，得知如圖 9、圖 10。在總面積 90m<sup>2</sup> 至 150m<sup>2</sup> 範圍內，以高跨比 1:3 模組構架最經濟，當高跨比 1:3 構架造成 90m<sup>2</sup> 室內可用面積時，其單位體積用鋼量為 2.3kg/m<sup>3</sup>；成本為 105 元/m<sup>3</sup>，而高跨比 1:2 構架造成 80m<sup>2</sup> 時，其單位體積用鋼量反而較高，為 3.8kg/m<sup>3</sup>，成本為 180 元/m<sup>3</sup>。當高跨比 1:3 構架造成 120m<sup>2</sup> 時，其單位體積用鋼量為 2.3kg/m<sup>3</sup>，成本為 111 元/m<sup>3</sup>；而高跨比 1:4 構架造成相同的面積 120m<sup>2</sup> 時，其單位體積用鋼量為 3.7kg/m<sup>3</sup>，成本為 189 元/m<sup>3</sup>。

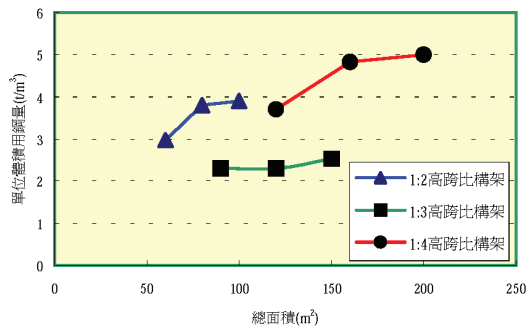


圖 9 室內面積構成與單位體積用鋼量關係

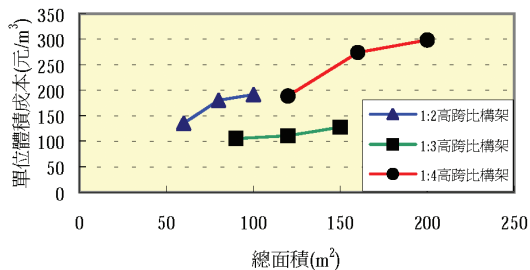


圖 10 室內面積構成與單位體積成本關係

#### 4.6 室內高度構成與室內單位面積用鋼量關係

從各模組平均最經濟之構架所創造的室內可用面積用鋼量及高度的關係，進一步換算成單位面積用鋼量與高度關係，並製成圖 11。得知單位面積用鋼量均隨高度增加而增加，以高度 3m 至 5m 範圍而言，單位面積用鋼量變化以高跨比 1:3 構架增加最緩，表示最經濟，其用鋼量從 5.44kg/m<sup>2</sup> 增至 9.1kg/m<sup>2</sup>；高跨比 1:4 之單位面積用鋼量增加最大，表示最不經濟；高跨比 1:2 構架則比 1:4 構架之單位面積用鋼量節省。換算為單位面積用鋼量成本，仍以高跨比 1:3 構架最經濟，較高跨比 1:2 構架節省一倍成本，較高跨比 1:4 構架節省二倍成本，結果示於圖 12。

#### 4.7 各模組支承反力比較，即基礎檢核

將高跨比 1:2, 1:3, 1:4 模組中平均單位空間體積用鋼量最低的模組，比較其支承反力狀況，作為基礎設計之依據。各模組的最大支承反力均因風力作用產生，最大彎矩亦由風力作用產生。將各模組之基礎最大支承反力、彎矩整理

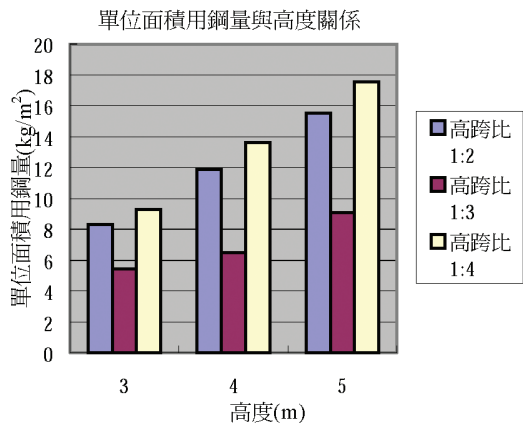


圖 11 高度與室內單位面積用鋼量關係

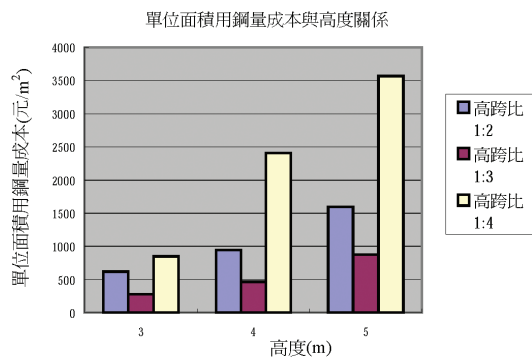


圖 12 高度與室內單位面積用鋼量成本關係

於表 4，比較可知迎風面基礎之支承反力與支承彎矩最大，高跨比 1:4 之各構架模組其支承反力及支承彎矩均明顯較高跨比 1:2 及 1:3 為大，因此其基礎所需之尺寸相對亦應較大，整體而言較不經濟。

本研究的基礎型式係以溫室常用之混凝土方柱體作為原型，以設施園藝設計手冊（1988）所定之基地土質分類應力表為構造物地盤的長期容許應力承载力之依據，並以常見之砂質地盤及黏土地盤、壤土地盤為主，取其中之鬆散沙質地盤、中度及較硬黏土地盤、稍硬及軟壤土地盤來做構造物地盤條件。而基礎之斷面尺寸估算，係依構造物主構架鍍鋅鋼管材料的直徑，再加上埋入土壤之法定保護層，兩側各 7.5cm 來估算，以檢核基礎斷面積是否足夠。又本文探討的構造物屬輕型構造物，故需檢討基礎之抗拉拔力，就



表 4 支承點最大反力及彎矩

外型		支承反力 (t)				支承彎矩 (m-t)				主構架斷面尺寸	
高跨比 m	空間量 m <sup>3</sup>	控制 荷重	X	Y	Z	控制 荷重	X	Y	Z	外徑 mm	厚度 mm
3*6	141	風力	-0.12	-0.016	-0.07	風力	0.04	0.01	0.07	48.6	3.5
4*8	251.33	風力	-0.22	-0.08	-0.12	風力	-0.11	-0.03	-0.22	76.3	3.5
5*10	292.7	風力	-0.3	-0.11	-0.17	風力	-0.15	-0.05	0.38	101.6	3.5
3*9	195	風力	-0.17	-0.17	-0.08	風力	-0.04	-0.03	0.05	48.6	2.5
4*12	346.8	風力	-0.26	-0.25	-0.13	風力	-0.07	-0.04	0.09	60.5	2.5
5*15	541.9	風力	-0.35	-0.34	-0.18	風力	-0.13	-0.09	-0.14	89.1	2.5
3*12	251.6	風力	-0.35	-0.27	-0.26	風力	-0.23	0.23	-0.14	101.6	3.5
4*16	447.2	風力	-0.51	-0.37	-0.54	風力	-0.53	-0.52	-0.29	139.8	5
5*20	698.8	風力	-0.66	-0.47	-0.92	風力	-0.92	0.89	-0.47	165.2	5

表 5 各構架模組基礎

主構架斷面 外徑 (mm)	稍硬壤土地盤基礎尺寸		鬆砂質地盤基礎尺寸		柔軟黏土地盤基礎尺寸		基礎數量
	斷面(cm)	深度(cm)	斷面(cm)	深度(cm)	斷面(cm)	深度(cm)	
48.6	20*20	70	20*20	70	20*20	70	22
76.3	25*25	70	25*25	70	25*25	70	22
101.6	25*25	75	25*25	75	25*25	75	22
48.6	20*20	70	20*20	70	30*30	70	22
60.5	25*25	90	25*25	90	40*40	70	22
89.1	25*25	150	30*30	110	45*45	70	22
101.6	25*25	75	25*25	75	40*40	70	12
139.8	30*30	170	30*30	170	45*45	75	12
165.2	50*50	140	50*50	140	50*50	140	12

所檢核設計出之基礎斷面積為基準，計算需多大深度才能承受拉拔力。將上述檢核資料，整理出各模組構架在不同地盤之基礎深度及斷面尺寸，如表 5。得知，高度相同時，跨距愈大，基礎拉拔力及軸壓力愈大，所需基礎斷面深度要愈大，尤其跨距大於 10m 以上更加明顯；基礎斷面尺寸隨地盤承载力增大而減小；基礎深度尺寸，與構造物受風昇力時基礎所產生之拉拔力有關，而與構造物所在地盤之承载力無關。因此原則上基礎斷面尺寸愈小，基礎深度尺寸要愈長，才能有足夠的抗拉拔力。

#### 4.8 防風林降低風力與節省用鋼量關係

本節探討在生物生產用輕型構造物的週邊環境有防風林時，因防風林降低風速而使風力減

小，比較構造物在符合安全條件時，單位空間體積用鋼量可減少的程度。假設防風林可使風速降低一半，由 33.4m/s 降低為 16.7m/s，再由平均單位空間體積用鋼量最經濟之設計模組，高跨比 1:3、主構架間距 1m、桁條配置十根、間距角 20°之構架模組進行模擬，結果整理於表 6，得知風速降低一半時，則單位空間體積用鋼量可減少 30%至 36%。

## 五、結論與建議

### 5.1 各模組構架配置設計與單位體積用鋼量之關係

1. 高跨比 1:2 時，構架配置以主構架間距 1m，桁條間距角 30°、配置 7 根桁條所組成之構架，其構成室內空間的平均單位體

表 6 風速減半對單位體積用鋼量之影響

高跨比	設計風速 (m/sec)	棟高 (m)	棟跨 (m)	主構架配置 間距 (m)	桁條配置間 距角 (度)	主構架尺寸 (mm)		結構總重 量 (t)	單位體積用 鋼量 (kg/m <sup>3</sup> )
						外徑	厚度		
1:3	33.4	3	9	1	20°	76.3	2.5	0.49	2.5
		4	12			60.5	2.5	0.78	2.3
		5	15			89.1	2.5	1.37	2.5
	16.7	3	9	1	20°	34	2	0.32	1.6
		4	12			42.7	2.5	0.57	1.6
		5	15			60.5	2.5	0.96	1.8

積用鋼量最小，為 3.73kg/m<sup>3</sup>。主構架鍍鋅鋼管的最小斷面尺寸，在高度 3m、跨距 6m 時為外徑 27.2mm、厚度 2.5mm；在高度 4m、跨距 8m 時，其必要外徑為 76.3mm、厚度為 3.5mm；在高度 5m、跨距 10m 時，其必要外徑為 101.6mm、厚度 3.5mm。

- 高跨比 1 : 3 時，構架配置以主構架間距 1m，桁條間距角 20°、配置 10 根桁條所組成之構架，其構成室內空間的平均單位體積之用鋼量最小，為 2.44kg/m<sup>3</sup>。主構架鍍鋅鋼管的最小斷面尺寸，在高度 3m、跨距 9m 時，外徑為 48.6mm、厚度 2.5mm；在高度 4m、跨距 12m，其外徑為 60.5mm、厚度 2.5mm；在高度 5m、跨距 15m 時，其外徑為 89.1mm、厚度 2.5mm。
- 高跨比 1 : 4 時，構架配置以主構架間距 2m，桁條間距角 20°、配置 10 根桁條，所組成之構架，其平均單位體積用鋼量最小，為 4.52kg/m<sup>3</sup>。主構架鍍鋅鋼管的最小斷面尺寸，在高度 3m、跨距 12m 時，外徑為 101.6mm、厚度 3.5mm；高度 4m、跨距 16m 時，外徑為 139.8mm、厚度 5mm；在高度 5m、跨距 20m，外徑為 165.2mm、厚度 5mm。

## 5.2 構造物的高跨比與單位體積用鋼量及成本關係：

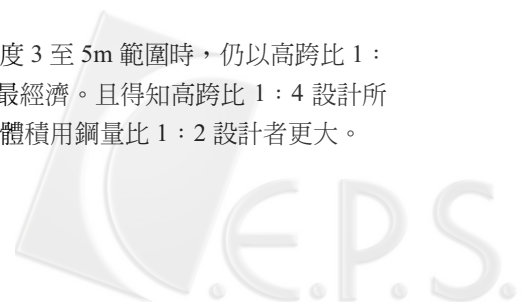
- 以模組用鋼量最少者之單位體積用鋼量平均值比較，高跨比 1 : 3 之平均單位體積用鋼量為 2.44kg/m<sup>3</sup>，比高跨比 1 : 2 之

3.73kg/m<sup>3</sup> 少了約 33%，也比高跨比 1 : 4 之 4.52kg/m<sup>3</sup> 少了約 47%，可知高跨比 1 : 3 構架所創造單位空間之用鋼量最經濟。

- 高跨比 1 : 3 之主構架所需斷面尺寸，均比高跨比 1 : 2 之主構架斷面小，但其所創造出之空間量卻比 1 : 2 模組各對應構架大，明顯較 1:2 之結構用料經濟。
- 相同高跨比的各尺度模組之單位體積用鋼量，原則上均隨尺度增加而增大。
- 高跨比 1 : 3，可得到單位體積用鋼量最小之設計，其創造 1m<sup>3</sup> 室內空間量的單位體積結構材料平均成本為 114.67 元/m<sup>3</sup>，較高跨比 1:2 者，少了約 32%，也較高跨比 1:4 者少了約 54%。

## 5.3 室內空間造成與單位體積用鋼量關係：

- 比較室內面積與單位體積用鋼量關係，得知室內面積在 90m<sup>2</sup> 至 150m<sup>2</sup> 範圍時，以高跨比 1 : 3、主構架間距 1m、桁條配置間距角 20°配置 10 根之設計最經濟，比高跨比 1 : 2 減少 1.5kg/m<sup>3</sup> 以上之用鋼量；也比高跨比 1 : 4 減少 1.4kg/m<sup>3</sup> 以上之用鋼量。
- 室內空間體積約 200m<sup>3</sup> 至 450m<sup>3</sup> 範圍時，以高跨比 1 : 3 設計最經濟，約需 2.3 kg/m<sup>3</sup> 至 2.5 kg/m<sup>3</sup> 的材料成本，比 1 : 2 或 1 : 4 高跨比需 3.5 kg/m<sup>3</sup> 至 4.8 kg/m<sup>3</sup>，可節省約 40%。
- 室內高度 3 至 5m 範圍時，仍以高跨比 1 : 3 設計最經濟。且得知高跨比 1 : 4 設計所需單位體積用鋼量比 1 : 2 設計者更大。



#### 5.4 外風力、風向與構架最大應力關係：

1. 以結構分析軟體 STAAD-III 分析結果可知，各模組構架最大應力比發生位置均為與地接合部份，代表構架破壞將自端部破壞。
2. 最大應力比發生原因均由風力所造成。且控制之風向在構架高跨比 1:2 各尺度與高跨比 1:3 之高度 3m、跨度 9m 時，由構造物棟跨度方向風力所控制；而構架高跨比 1:4 各尺度與高跨比 1:3 之高度 4m 及 5m、跨度 12m 及 15m 構架，開始轉變為由構造物棟長度方向之風力控制。
3. 環境週邊有防風林時，當防風林將風速降低一半，風速由 33.4m/s 降低為 16.7m/s，則高跨比 1:3、主構架間距 1m、桁條配置 10 根、間距角 20°之構架模組，用鋼量可減少 30%至 36%。

#### 5.5 基礎部分

1. 構造物高度相同，跨距愈大者，基礎向上拉拔力及軸壓力愈大，所需之基礎斷面及深度要愈大，尤其跨度大於 10m 以上，基礎因風昇力產生之向上拉拔力更明顯。
2. 基礎斷面及深度尺寸可隨地盤容許承載力增加而減少。

#### 5.6 建議

1. 本研究針對室內空間體積在 140 至 700m<sup>3</sup>、室內空間面積 60 至 120m<sup>2</sup>、室內高度 3 至 5m 範圍作模擬探討，未來應對小於 140 m<sup>3</sup> 的小空間或大於 700 m<sup>3</sup> 的大型連棟構造物持續探討，以充實明確的設計用資料。至於高跨比 1:3 構成大於 550 m<sup>3</sup> 的模組分析結果仍有待持續探討，以建立高跨比 1:3 的完整設計資料。
2. 未來可就山牆式屋架或其他外型設計構造模組，分別持續進行結構安全分析及經濟性探討，以建立完整的設計資料，提供農民實用的輔導自行建構溫室手冊。
3. 可就基礎部分作更深入分析，例如擴展獨

立基礎、梯型獨立基礎、圓柱型獨立基礎、鍍鋅鋼管直接埋入式、并桁補強鍍鋅鋼管直接埋入式基礎等，在不同地質區利用之比較。

#### 參考文獻

1. 王鼎盛 主編，設施園藝設計手冊，pp. 3~7、53、80，行政院農委會，1988。
2. 內政部，建築技術規則，2001。
3. 王明衡譯，N. John Habraken 著，「開放建築的取向-案例與原則」，開放建築論文精選輯，中華民國建築學會，2000。
4. 沈再發、蔡金川、黃禮棟譯，小澤行雄、內藤文男，園藝設施學入門，台北市七星農田水利研究發展基金會，中國園藝學會，1999。
5. 林登峰、彭根龍、游振棋譯，M. Das Braja 著，基礎工程，pp. 560，高立圖書有限公司，1999。
6. 侯文祥、王啓順，「生物生產用單斜式構造物之輕型鋼架結構安全與經濟設計」，中國農業工程學報，50(2): 97-110，2004。
7. 黃永材譯，尾上孝一著，建築鋼骨構造，pp. 28~30、72、73，建興出版社，1999。
8. 陳清泉，建築結構設計原理，第 1~4 章，國立台灣大學土木工程研究所，1996。
9. 陳啓中，建築設備概論，pp. 91，詹氏書局，2000。
10. 鄒承曾，鋼結構設計學，pp. 180~762，詹氏書局，1991。
11. 廖慶隆，建築結構自動化設計導論，pp. 20~23，茂榮圖書有限公司，1976。
12. 營建雜誌社，2000，鋼構造建築物鋼結構設計技術規範—鋼結構容許應力設計法規範及解說，第八章。
13. ASAE, Commercial Greenhouse Design and Layout, EP460, 1999.
14. B. Von Elsner ; D. Briassonlis ; D. Waaijensberg ; A. Mistriotus ; C. Von Zabeltitz ; J. Gratraud ; G.Russo ; R. Suay Cortes, "Review of Structural and Functional Characteristics of

- Greenhouse in European Union Countries:Part I, Design Requirements”, Journal of Agricultural Engineering Research, 75, 1-16, 2000.
15. B. Von Elsner; D. Briassonlis ; D. Waaijenberg ; A. Mistriotus ; C. Von Zabeltitz ; J. Gratraud ; G. Russo ; R. Suay Cortes, “Review of Structural and Functional Characteristics of Greenhouse in European Union Countries: Part II, Typical Designs”, Journal of Agricultural Engineering Research, 75, 111-126, 2000.
16. Aldrich, R. A., Wells, D. A, “Estimating Wind Loads on Glasshouses”, Transactions of the ASAE, 22(5) : 1122-1128, 1979.
17. 日本畜産施設機械學會，畜舎設計規準.同解説，2000。
18. 日本施設園藝協會，施設園藝ハンドブック，第一章，（日）園藝情報センター，2001。
19. 戸城正博 圖解建築基準法令 第87條，（日）オーム社，1994。
20. 陳青雲、山口智治、畔柳武司，「中國の省エネルギー園藝施設「日光温室」について」，（日）農業施設 31(2):113-118, 2000。
21. 豊田裕道、森山英樹、瀨能誠之、前川孝昭，「園藝用プラスチックハウスの耐風性向上のための簡易基礎工法について〈第2報〉」，（日）農業施設 30(1) : 31~39, 1999。
22. 豊田裕道、森山英樹、瀨能誠之、前川孝昭，「園藝用プラスチックハウスの耐風性向上のための簡易基礎工法について〈第3報〉」，（日）農業施設 30(1) : 61~67, 1999。
23. 溫祥珍，溫室高效優質高產栽培技術，pp.3，（中國）農業出版社，1994。
24. 越鴻鈞，塑料大棚園藝，pp. 1~15、148~171，（中國）科學出版社，1988。

收稿日期：民國 93 年 4 月 15 日

修正日期：民國 93 年 10 月 4 日

接受日期：民國 93 年 10 月 14 日