

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

Economical and Safety Structural Design of Shed Roof Type Steel Construction Building for Bio-production

國立台灣大學生物環境系統工程系副教授

國立台灣大學生物環境系統工程系碩士

侯文祥

王啓順

Wen-Shang Hou

Chi-Shuen Wang

摘 要

為落實本土化農用設施設計目標，本研究從結構安全與經濟探討台灣地區生物生產簡易式設施的合理設計。採用單斜式構造以輕型鋼材進行設計，考慮室內生物生產需求棟高，在 1.36 至 2.50 間取四種跨高比，搭配三種主構架間距變化組成 12 個模組，以電腦軟體進行安全性與經濟性分析。結果顯示在棟長度以 10 m 為一單元，室內面積小於 33 m² 的較小空間需求時，以跨高比 1.4 以下、主構架間距 2m 較經濟；而地板面積約 33~55 m² 範圍內，以主構架間距 2.5m 較經濟，其經濟跨高比自 1.50 起可提高至 2.50，以有效擴充室內可利用空間體積。可以確認在主構架構件承受 12 級風力與 5 級地震力時，各骨架最大應力比愈接近 1 時，愈能符合經濟設計。

關鍵詞：生物生產設施，結構安全性，材料經濟性，跨高比，單斜式。

ABSTRACT

This study discusses the rational design of bio-production buildings in Taiwan. In terms of structure, this study adopts shed roof as building shape and light-gauge steel as material. Four span-height ratios between 1.36 to 2.50 and three main frame space variations are chosen to constitute 12 modules, then computer software is used to analyze safety and economy of each module. The results show that if the building length is an unit in 10m with space requirement under 33m², it will be more economy when span-height ratio under 1.4 and main frame space under 2m. Furthermore, if the space requirement of the building is between 33 to 55m², then the most economy way

is to keep the frame space in 2.5m that the span-height ratio may raise from 1.50 to 2.50 and the indoor space is increased at the same time. It can find that the stress ratio of every frame member for the economy designs approaches to one at the twelfth wind load and fifth earthquake load.

Keywords: Bio-production building, Structural safety, Economical building materials, Span-height ratio, Shed roof type.

一、前言

台灣地處亞熱帶氣候及地震帶上，夏秋季有颱風，又時有地震。對於農漁牧等生物產業而言，地震和颱風容易造成設施與生物的損害。傳統的生物生產設施，多未經良好結構設計，地震或颱風來襲時經常造成損壞。民國 88 年九二一地震即造成中部地區禽畜舍約七萬坪面積受損（九二一地震畜牧產業重建技術服務手冊，2000）。因此，在台灣加入世界貿易組織後，生產型態正面臨升級轉型，節約設備成本與能源，營造良適的生物生產環境，建立可全年利用的生物生產設施，已是發展新時代生物生產產業的重要課題。台灣地區生物生產用簡易設施至今仍無設計規範可供參考。反觀同樣位於地震帶的日本，早於 1981 年分別制定「設施園藝設計手冊」與「畜舍設計構造安全基準」，內容涵蓋結構設計基準、結構設計大綱、施工要點、結構分析、工程契約書及農舍建築管理等六大部分。即使如此，卻仍在近十餘年間因風害、地震災害及雪害等天然災害造成約四成的設施受損，政府需提供約 40%的天然災害損失經費做為設施損失補助。因此日本乃於 1997 年起積極修定上述基準，至今仍未完成修訂。由日本經驗，本研究希望改進台灣本土化生物生產設施，使其在結構方面能安全承受必要程度的地震與颱風侵襲，且在結構設計與材料上符合經濟性；因此，在結構設計方面，考慮構造簡單、易施工、工期短，並可發展為連棟式大面積生產工場的單斜式外型設計。材料使用市售輕型鋼材，取得容易。應用電腦軟體配合設計規範進行結構分析，使構造物能確保安全無虞且用料經濟。在尺寸設計上，以適合人員

進行作業管理的尺度，決定必要的低壁側高度。以台灣所在緯度的四季日射角度決定適合的屋頂斜度。並考量室內空間利用的經濟性，在棟跨度不至於過大、高壁側不至於過高的情況下，選定四種跨高比進行分析研究。屋頂斜角依台灣的緯度與日射角度關係設定為 23.5 度。尺寸則設定棟長度單位 10 m、低壁側高度 2.2 m，比較 1.36、1.50、2.00、2.50 四種跨高比（棟跨度與棟低壁側高度之比值），搭配 2 m、2.5m、3.3m 三種主構架間距（即 10m 棟長方向之構架間隔）組合成 12 個模組，以電腦軟體進行結構分析。在電腦分析的過程中，確定每一個設計模組用鋼量均達到最節省的情況，同時符合現有鋼構建築物規範所規定之安全性。最後，再針對構成該模組構造物的單位地板面積之用鋼量及單位空間體積之用鋼量，探討跨高比與主構架間距變化對材料用量的經濟性影響。本研究的流程，示意如圖 1。

二、文獻回顧

2.1 生物生產用構造物之構造形式與特性

參考林(2002)及設施園藝設計手冊(1988)等書籍，整理出一般的生物生產用構造物特性包括以輕型鋼材、鍍鋅鋼管為構造物骨架材料，作成半圓、切圓、山牆、單斜等構架外型；外殼被覆材料具有透光性好、保溫性強、氣密性好、輕質、便宜、更換容易等特徵；且具有建造容易、操作簡單、成本低廉之特點。Agricultural Buildings and Structures (1996)、設施園藝設計手冊(1988)等書籍，大致將其分為平頂式、隧道式、單斜式、山形、連棟式等。其中，在亞熱帶與熱帶型氣候地區最有可能以結構設計手法手段進行室內光與

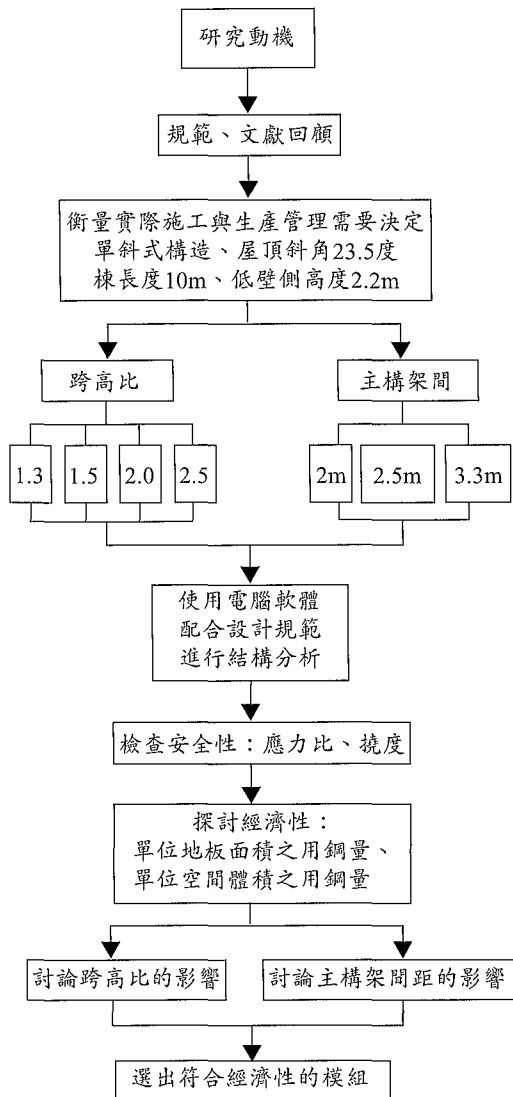


圖 1 研究流程

溫熱環境調節，且可發展成連棟式工場的經濟性設計者即為單斜式外型。然而，至今在台灣卻仍不多見此類型構造物，即使如此，國內至今針對各種不同外型的簡易式低造價構造物之結構安全與經濟設計之相關文獻發表卻仍未見。因此，本研究即先探討單斜式之結構單元設計。

2.2 結構安全設計法

(1) 設計規範與基準

本研究的標的物為生物生產用輕型鋼構造

物，我國之建築規範對於此類建築物並未訂定規範。在參考書籍方面，大致上以翻譯日本「設施園藝ハンドブック」(1981)之「設施園藝設計手冊」(1988)為較專業完整的溫室設計參考書籍。本研究之構造物亦屬建築物，故本文綜合參考目前國內之「建築技術規則」(2002)、「建築物耐震設計規範」(2001)、「鋼構造建築物鋼結構設計技術規範」(2000)及「日本溫室設計暫定基準」(2001)等。設計方法方面，目前我國鋼構造多採用容許應力法(ASD, Allowable Stress Design)，其設計精神為需要的設計應力等於極限應力除以一個安全係數。設計公式如式(1)：

$$\sum Qi = \sum Rn \div \sum SF \dots\dots\dots (1)$$

其中 $\sum Qi$ ：需要的設計應力、 $\sum Rn$ ：極限應力、 $\sum SF$ ：安全係數

而需要的設計應力 $\sum Qi$ ，也可以用載重組合來代表。在「鋼構造建築物鋼結構設計技術規範」(2000)中，規定了數種應考慮的載重組合方式，本研究的輕型鋼構造物適合取下列三種載重組合作分析： $D+L$ 或 $0.75(D+L \pm 1.25W)$ 或 $0.75(D+L \pm EQ)$ ，其中 D ：靜載重、 L ：活載重、 W ：風力、 EQ ：地震力。

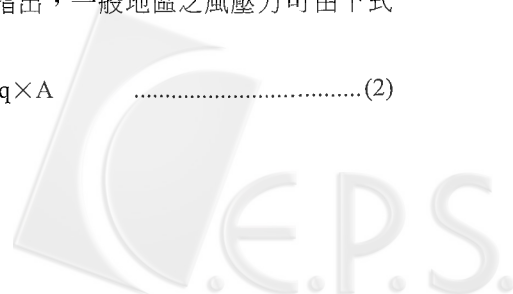
設施園藝設計手冊(1988)規定，考量工作舒適性，鋼架溫室的樑與桁條之最大允許撓度應分別符合柱間跨度 (L) 及主架構間距的 $L/150$ 與 $L/100$ 以下。

(2) 構造物的載重計算

陳(1996)指出構造物的載重包括垂直載重，即活載重與靜載重；以及水平載重，即風力、地震力等。依上述規範，本研究考量的主要載重為靜載重、風力、地震力。靜載重包括骨架鋼材自重與被覆板材重量，單位為 kg/m 。由於輕型鋼結構本身自重較輕，在設計技術上，颱風之風力為主要載重。

設施園藝設計手冊(1988)及日本設施園藝協會(2001)指出，一般地區之風壓力可由下式求知：

$$P = C \times q \times A \dots\dots\dots (2)$$



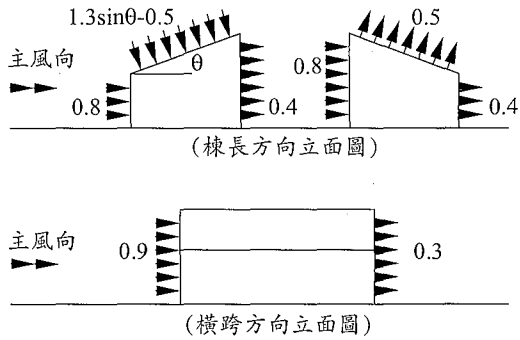


圖 2 單斜式構造物的風力係數 C(設施園藝設計手冊, 1988)

表 1 颱風的風級、風速與風壓力關係(本研究整理)

颱風分級	近中心最大風速 m/sec	換算之風壓力 kg/m ²	相當風級
輕度颱風	17.2~32.6	18~66	8~11
中度颱風	32.7~50.9	67~161	12~15
強烈颱風	51.0 以上	162 以上	16 以上

其中 P：風力(kg)、C：風力係數、q：風壓力(kg/m²)、A：受風面積(m²)

風力係數 C 為依建築物形狀不同而決定之係數，本研究的單斜式構造物之風力係數，依設施園藝設計手冊(1988)及日本設施園藝協會(2001)規定，如圖 2 所示。

風壓力 q 的計算與風速有關，一般採用式 3 計算(設施園藝設計手冊，1988)：

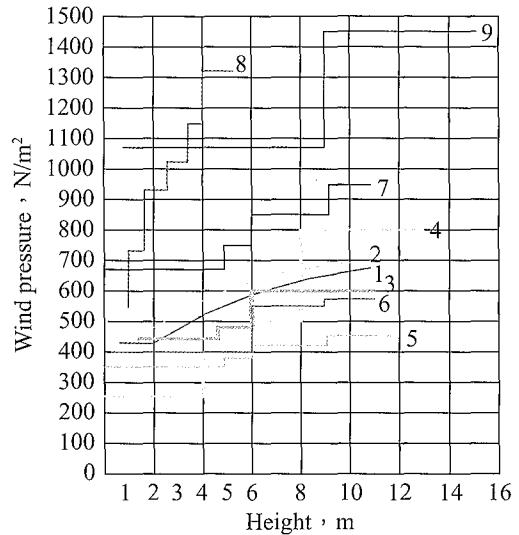
$$q = (1/16) V^2 \quad \dots\dots\dots(3)$$

其中 q：風壓力(kg/m²)、V：風速(m/sec)。再配合中央氣象局(2003)所提供之「陸上應用之蒲福風級表」、「颱風強度標準劃分表」，颱風的風級、風速與風壓力關係可以整理如表 1。

由歷年來之颱風記錄顯示，距離地面高度 15 m 處之最大瞬時風速約為 V = 60 m/sec。根據實驗得知風速約與高度之四次方根成正比(設施園藝設計手冊，1988)，即：

$$V/V_0 = \sqrt[4]{(h/h_0)} \quad \dots\dots\dots(4)$$

現假設以 15 公尺高處之風為基準，則由公式 3 及 4 可計算出風速度壓 $q = 58.1\sqrt{h} \doteq 60\sqrt{h}$



- (1) NEN 3859m 1996, The Netherlands;
- (2) ISHS Draft 01, 1991, for European greenhouse Standard;
- (3) UNI 6781-71, 1971, Italy;
- (4) DIN 1955, 1986, Germany;
- (5) ASAE-EP 288-4, 1992, for 70km/h wind speed;
- (6) ASAE-EP 288-4, 1992, for 80km/h;
- (7) ASAE-EP 288-4, 1992, for 100km/h;
- (8) 設施園藝設計手冊(1987)
日本設施園藝協會規範(2001)
- (9) 我國建築技術規則(2001)

圖 3 各國規範風壓力比較(林，2002)

h，h 為距離地面之高度。而日本之「建築基準法施行令」中的風壓力規定亦同上述。

依我國「建築技術規則」第三十三條之風壓力規定，台灣地區共分四個風力級區。風壓力為建築物構造立向投影全面積所受風之壓力。Elsner 等(2000)比較荷蘭 NEN 規範、義大利 UNI 規範、德國 DIN 規範、美國 ASAE 規範，可知美國 ASAE 規範對風力要求最高。而林(2002)整理設施園藝設計手冊(1988)、日本設施園藝協會(2001)規範及我國建築技術規則之風壓力規範資料，與上述歐美各國規範比較於圖 3，得知在高度 6 m 以下之構造物，依據設施園藝設計手冊及日本設施園藝協會之計算方式可承受之風力最大，本研究即以此做為可承受風力之計算方式。

生物生產用輕型構造物因重量較輕，其結構設計之控制因子，應屬風力控制，例如美國 ASAE 規範即無考慮地震力因素(林，2002)。但考量台



灣屬於地震區，因此本研究仍依我國「建築物耐震設計規範」(2001)計算最小設計水平地震力如式(5)：

$$V = \frac{ZI}{1.4\alpha_y} \left(\frac{C}{Fu}\right)_m W, \left(\frac{C}{Fu}\right)_m \leq 1.0 \dots\dots\dots(5)$$

- 其中 V：最小設計水平總橫力(即水平地震力)
W：建築物全部靜載重
Z：震區水平加速度係數
I：用途係數
 α_y ：起始降伏地震力放大倍數
C：工址正規化水平加速度反應譜係數
Fu：結構系統地震力折減係數

上列 Z、I、 α_y 值可依規範條文選定。C 值必須先以建築物高度求出基本震動週期 T，再配合地盤種類查詢規範中的附表得知。Fu 值則必須依照所設計的結構系統型式，查詢規範中的附表得知結構系統韌性容量 R 值，再換算為容許韌性容量 Ra 值，配合基本震動週期 T，依照地盤種類從規範條文中選取適用公式計算求得。規範中並限制 $\left(\frac{C}{Fu}\right)_m \leq 1.0$ ，是為避免短週期建築物因為 $\frac{C}{Fu}$ 值過大而難以設計，以符實用。

2.3 電子計算機在結構設計之應用

我國「建築技術規則」(2002)中的建築構造編第七條規定：「使用電子計算機程式之結構計算，可以設計標準、輸入值、輸出值等能以符合結構計算規定之資料，代替計算書。但所用電子計算機程式必須先經直轄市、縣(市)主管建築機關備案。當地主管建築機關認為有需要時，應由設計人提供其他方法證明電子計算機程式之確實，作為以後同樣設計之應用。」。而參考台北縣政府(2000)八九北府工建字第 298635 號公文，在該年 5 月 1 日前准予備案之結構應用程式一覽表中記載有 29 種應用程式，依照字母順序排列分別為：APILE、ATRUDL、CSI ETABS、ECOM、ETABS Plus、GROUP、GTSTRUDL、ISDS、LPILE、PLAXIS、PTFAP、RIDO、SAP 2000、SAP 90、SAPCON、SAPHAT、SAPSTL、SCM3D、SES、SETABD、SFRAME、STAAD

III、STAAD PRO、STED、STRAP、TABS、TACREN、WALL3、WALLE3、結構行家系列軟體等，其中，在國內廣泛被使用的為 STAADIII。

三、材料與方法

3.1 結構安全與經濟設計

(1) 構造形式：

本研究採用單斜式屋頂設計，因考量單斜式構造簡單，施工容易，興建時可減少成本，而且可以由單一構造發展為連棟式構造。屋頂向南方傾斜，斜角設定為 23.5 度，因為台灣位於北緯 23.5 度附近，此角度可使屋頂面一年四季日照量相近，有利於提供穩定的室內環境調節設計，以利於全年生物生產。

構造物的尺寸方面，考量人的工作適宜高度，設定低壁側高度(H_L)為 2.2m。棟跨度(W)與屋頂邊長(S)、高壁側高度(H_H)則作為設計變動值，以探討其經濟性設計。由於本研究參考 Agricultural Buildings and Structures (James, 1996) 一書中指出單斜式屋頂的跨度在 5.6 m 以下無須考慮增加中柱或以桁架設計，並考量棟跨度過大會使屋頂邊長過長、高壁側高度過高而造成不易施工、空間不便利用，所以取棟跨度相對於低壁側高度有四種跨高比變化，分別為 $W:H_L = 1.36$ 、1.50、2.00、2.50，對應 W 分別為 3m、3.3m、4.4m、5.5m。高壁側高度(H_H)因此也有 3.50m、3.63m、4.11m、4.59m 四種高度，屋頂邊長(S)分別為 3.27m、3.60m、4.80m、6.00m 等變化。設定棟長度(L)為 10m，形成的內部地板面積為 30 m²、33 m²、44 m²、55 m²，空間體積為 85.50 m³、96.20 m³、138.82 m³、186.73 m³。構造物尺寸諸元參見表 2。

在構造物骨架方面，分為主構架(梯形斷面的門形)、兩側主樑、兩側壁桁條、屋頂桁條四個部分來設計，主構架的間距(D)有 2m、2.5m、3.3m 三種配置，分別將棟長度分為五、四、三等分。兩壁側桁條的間距約在 1.03m~1.21m 之間，屋頂桁條的間距約在 1.09m~1.20m 之間。綜合跨高比與主構架間距兩項變因，共組成 12 個設計模組進行結構分析。構造物外型與桁條配置



表 2 結構分析設定之構造物尺寸

跨高比	低壁側高	棟跨度	高壁側高	屋頂邊長	棟長	地板面積	空間體積
$W:H_L$	H_L, m	W, m	H_H, m	S, m	L, m	A, m^2	V, m^3
1.36	2.2	3.0	3.50	3.27	10	30	85.50
1.50	2.2	3.3	3.63	3.60	10	33	96.20
2.00	2.2	4.4	4.11	4.80	10	44	138.82
2.50	2.2	5.5	4.59	6.00	10	55	186.73

表 3 候選 H 型鋼斷面性質表(東和鋼鐵企業股份有限公司產品)

本研究之代號	標稱尺寸 mm	斷面尺寸 mm				計算截面積 A cm ²	計算單位質量 kg/m	慣性矩 cm ⁴		迴轉半徑 cm		截面模數 cm ³		塑性斷面模數 cm ³	
		HxB	t ₁	t ₂	R			I _x	I _y	r _x	r _y	S _x	S _y	Z _x	Z _y
W1	100x50	100x50	5	7	8	11.85	9.3	187	15	3.98	1.11	37	6	44	10
W2	125x60	125x60	6	8	9	16.84	13.2	413	29	4.95	1.31	66	10	78	16
W3	150x75	150x75	5	7	8	17.85	14.0	666	49	6.11	1.66	89	13	102	21
W4	100x100	100x100	6	8	10	21.90	17.2	383	134	4.18	2.47	77	27	88	41
W5	175x90	175x90	5	8	9	23.05	18.1	1214	97	7.26	2.06	139	22	157	34

註：本研究以 W10 以下產品做分析，但 W5 以上產品規格不載入本文中。

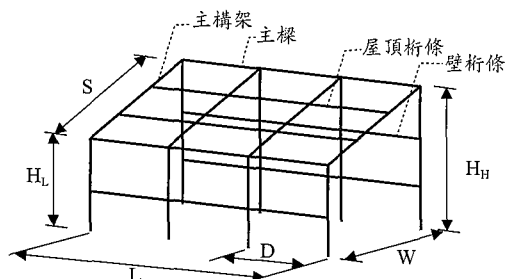


圖 4 結構分析設定之構造物示意圖

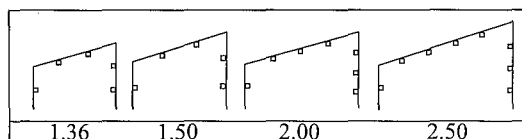


圖 5 四組跨高比之桁條配置圖(沿各邊長度等間距配置)

情形如圖 4、圖 5 所示。

(2) 結構分析使用軟體

本研究使用 Research Engineers 公司出品之 STAADIII 結構分析軟體，該軟體於鋼結構方面支援 AISC (American Institute of Steel Construction, 美國鋼結構協會) 等多種規範設計。本研究

使用其 AISC ASD (Allowable Stress Design, 容許應力設計) 規範，配合我國「鋼構造建築物鋼結構設計技術規範」之容許應力法執行結構分析。

(3) 結構設計分析流程

主要步驟為：先選擇梯形主構架之跨高比、間距以決定一個模組；然後建立輸入檔，執行 STAADIII 軟體分析，再判讀是否安全與是否經濟。

(4) 骨材規格與特性

本研究設計的構造物骨架所用鋼材，乃參考東和鋼鐵企業股份有限公司所生產的型鋼之斷面性質表，分別選取 H 型鋼 10 種、C 型鋼 15 種作為設計候選鋼材。詳細的規格與特性如表 3、表 4 所示。

(5) 載重估算

a. 構造物自重

上述輕型構造物自重主要為結構體骨架鋼材的重量，以及外表面被覆材料的重量。骨材方面，用鋼的重量由選用的鋼材性質決定，經 STAADIII 軟體計算求得。被覆材料方面，本研究預計壁面使用厚度 1 mm 的硬質 PVC 塑膠板，屋頂使用厚度 1 mm 的硬質 PC 塑膠板。經

表 4 候選 C 型鋼斷面性質表(東和鋼鐵企業股份有限公司產品)

本研究之代號	斷面尺寸 mm		計算截面積 A cm ²	計算單位質量 kg/m	重心位置 cm		慣性矩 cm ⁴		迴轉半徑 cm		截面模數 cm ³		剪力中心 cm	
	HxBxC	t			C _x	C _y	I _x	I _y	r _x	r _y	S _x	S _y	X ₀	Y ₀
C1	60x30x10	1.6	2.07	1.63	0	1.06	11.6	2.56	2.37	1.11	3.88	1.32	2.5	0
C2	60x30x10	2.0	2.54	1.99	0	1.06	14.0	3.01	2.35	1.09	4.65	1.55	2.5	0
C3	60x30x10	2.3	2.87	2.25	0	1.06	15.6	3.32	2.33	1.07	5.20	1.71	2.5	0
C4	75x45x15	1.6	2.95	2.32	0	1.72	27.1	8.71	3.03	1.72	7.24	3.13	4.1	0
C5	70x40x25	1.6	3.03	2.38	0	1.80	22.0	8.00	2.69	1.62	6.29	3.64	4.4	0
C6	75x45x15	2.0	3.64	2.86	0	1.72	33.0	10.5	3.01	1.70	8.79	3.76	4.0	0
C7	75x35x15	2.3	3.68	2.89	0	1.29	31.0	6.58	2.91	1.34	8.28	2.98	3.1	0
C8	75x45x15	2.3	4.14	3.25	0	1.72	37.1	11.8	3.00	1.69	9.90	4.24	4.0	0
C9	90x45x20	2.3	4.71	3.70	0	1.73	58.6	14.2	3.53	1.74	13.0	5.14	4.1	0
C10	100x50x20	2.3	5.17	4.06	0	1.86	80.7	19.0	3.95	1.92	16.1	6.06	4.4	0
C11	100x50x20	2.8	6.21	4.87	0	1.88	99.8	23.2	3.96	1.91	20.0	7.44	4.3	0
C12	90x45x20	3.2	6.37	5.00	0	1.72	76.9	18.3	3.48	1.69	17.0	6.57	4.1	0
C13	100x50x20	3.2	7.01	5.50	0	1.86	107	24.5	3.90	1.87	21.3	7.81	4.4	0
C14	100x50x20	4.0	8.55	6.71	0	1.86	127	28.7	3.85	1.83	25.4	9.13	4.3	0
C15	100x50x20	4.5	9.47	7.43	0	1.86	139	30.9	3.82	1.81	27.7	9.82	4.3	0

表 5 被覆板材重量估算

跨高比 W:H _L	側壁面積 m ²	側壁板重 kg	屋頂面積 m ²	屋頂板重 kg	板材總面積 m ²	板材總重 kg
1.36	74.10	67.16	32.70	36.57	106.80	103.73
1.50	77.54	70.28	35.97	40.23	113.50	110.50
2.00	90.86	82.35	47.97	53.65	138.83	136.01
2.50	105.25	95.39	59.97	67.08	165.21	162.46

註：1. 側壁使用 PVC 板，屋頂使用 PC 板；

2. 依 2002 年下半年台北市全發建材行詢價換算，1mm 厚度的 PVC 與 PC 浪板分別為每平方公尺約新台幣 90 元與 230 元。

實測得知，10 cm × 10 cm 之厚度 1 mm 的 PVC 板重量約為 9.063 g，PC 板重量約為 11.185 g。本研究設計的四種跨高比之構造物，側壁面積約為 74.10 m² 至 105.25 m²，屋頂面積約為 32.70 m² 至 59.97 m²，估算之板材重量如表 5 所示。

b. 風力：

風力的計算，依據設施園藝設計手冊(王，1988)及日本設施園藝協會(2001)規範設計。主要依式 4 計算求得風力，再化為均佈載重由主構架與主樑承載。計算步驟如下：

首先，由圖 4 求出各部位的風力係數 C 值。

本研究單斜式構造物應考慮圖中的三種形式：風向為棟跨向時，風由高壁側吹向低壁側或風由低壁側吹向高壁側；以及風向為棟長度向時。整理結果如表 6 所示。

風壓力 q 值則由式 4 計算求得，整理結果如表 7 所示。

各骨架構件所分擔載重面積 A，可計算得表 8 所示。

綜合以上代入式 2 計算，可求得風力 P。為了減少本文內容，僅以棟長之風力分布為例整理如表 10，至於風向為棟跨向，包括風由高壁側

表 6 構造物各部位的風力係數 C 值

	風向為棟跨向	
	風由高壁側吹向 低壁側	風由低壁側吹 向高壁側
低壁側立面	0.4	0.8
高壁側立面	0.8	0.4
屋頂斜面	0.5	0.0184
風向為棟長度向		
梯形立面(迎風)	0.9	
梯形立面(背風)	0.3	

表 7 構造物的風壓力 q 值(單位: kg/m²)

跨高比	1.36	1.50	2.00	2.50
低壁側高度 之風壓力	88.99	88.99	88.99	88.99
高壁側高度 之風壓力	112.25	114.32	121.64	128.55

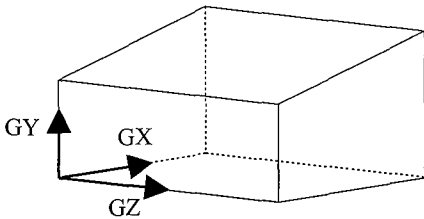


圖 6 全域(Global)座標定義

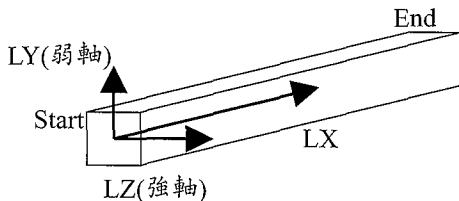


圖 7 構件之區域(Local)座標定義

向低壁側吹或低壁側向高壁側吹等的風力結果請參閱王啓順論文內容(2003)。本研究在 STAAD III輸入檔所使用的座標定義方式如圖 6、圖 7 所示。

再將表 10 所整理出的風力 P 值，除以相對應的構件長度，化為均布載重，為建立 STAAD III輸入檔用之資料，計算結果也以風向為棟長向為例整理如表 11 所示。

表 8 各骨架構件因風向變化所分擔載重面積 (單位: m²)

風向為棟跨向 (風由高壁側向低壁側吹或低壁側向高壁側吹)

	跨高比			
	1.36	1.50	2.00	2.50
主構架間距 2m	1.36	1.50	2.00	2.50
低壁側中柱(立面)	2.20	2.20	2.20	2.20
低壁側側柱、樑(立面)	1.10	1.10	1.10	1.10
高壁側中柱(立面)	3.50	3.63	4.11	4.59
高壁側側柱、樑(立面)	1.75	1.82	2.06	2.30
屋頂中柱(斜面)	3.27	3.60	4.80	6.00
屋頂側柱、樑(斜面)	1.64	1.80	2.40	3.00
主構架間距 2.5m	1.36	1.50	2.00	2.50
低壁側中柱(立面)	2.75	2.75	2.75	2.75
低壁側側柱、樑(立面)	1.38	1.38	1.38	1.38
高壁側中柱(立面)	4.38	4.54	5.14	5.74
高壁側側柱、樑(立面)	2.19	2.27	2.57	2.87
屋頂中柱(斜面)	4.09	4.50	6.00	7.50
屋頂側柱、樑(斜面)	2.04	2.25	3.00	3.75
主構架間距 3.3m	1.36	1.50	2.00	2.50
低壁側中柱(立面)	3.63	3.63	3.63	3.63
低壁側側柱、樑(立面)	1.82	1.82	1.82	1.82
高壁側中柱(立面)	5.78	5.99	6.78	7.57
高壁側側柱、樑(立面)	2.89	3.00	3.39	3.79
屋頂中柱(斜面)	5.40	5.93	7.92	9.90
屋頂側柱、樑(斜面)	2.70	2.97	3.96	4.95

風向為棟長度向 (單位: m²)

	跨高比			
	1.36	1.50	2.00	2.50
低壁側柱	1.27	1.37	1.69	1.96
高壁側柱	3.22	3.73	5.89	8.53
屋頂柱	2.03	2.26	3.15	4.09

表 10 風向為棟長向之風力 P 分布值 (單位: kg)

	跨高比			
	1.36	1.50	2.00	2.50
低壁側柱 (迎風)	102.02	109.72	135.16	157.01
高壁側柱 (迎風)	325.67	383.69	644.75	987.16
屋頂柱 (迎風)	204.71	232.54	345.12	462.77
低壁側柱 (背風)	34.01	36.57	45.05	52.34
高壁側柱 (背風)	108.56	127.90	214.92	329.05
屋頂柱 (背風)	68.24	77.51	115.04	154.26



表 11 風向為棟長度向之風力轉化為構件之均布載重(單位：kg/m)

	跨高比			
	1.36	1.50	2.00	2.50
低壁側柱 (迎風)	46.37	49.87	61.44	71.37
高壁側柱 (迎風)	93.05	105.70	156.87	215.07
屋頂柱 (迎風)	62.61	64.66	71.95	77.17
低壁側柱 (背風)	15.46	16.62	20.48	23.79
高壁側柱 (背風)	31.02	35.23	52.29	71.69
屋頂柱 (背風)	20.87	21.55	23.98	25.72

c. 地震力

地震力的計算，依照我國「建築物耐震設計規範」(2001)規定式 5，計算最小設計水平總橫力 V。其中 震區水平加速度係數 Z 值，選擇規範中數值較大之地震甲區，得 $Z = 0.33$ 。用途係數 I 值，本研究的構造物依規範條文視為第四類建築物， $I = 1.0$ 。 α_y 值依照規範條文規定，鋼結構以容許應力設計， α_y 值為 1.20。工址正規化水平加速度反應譜係數 C 值，必須先依照規範對鋼構造建築物之規定，以式 $T = 0.085h_n \frac{1}{4}$ 動週期 T。其中 T：基本震動週期(sec)、 h_n ：高壁側屋頂高度(m)；本研究並假設地盤種類為規範中之第三類地盤(軟弱地盤)，查詢規範中的附表得知 $C = 2.5$ 、 $R = 4.8$ 、 $R_a = 2.9$ ，可計算出 $F_u = 2.191$ 。

綜合上述，代入式 5 即可得知：規範之最小設計水平總橫力 V (即地震力)，相較於建築物全部靜載重 W，其倍率為 $V/W = 0.196$ 。也就是說，用於設計的地震力大小應為構造物靜載重的 0.196 倍。

(6) 載重組合

本研究的輕型構造物為生物生產用單層構造物，活載重少，可不必考慮，L 視為 0；依「鋼構造建築物鋼結構設計技術規範」(2000)中的 $\pm 1.25W$ 、 $\pm EQ$ 意指要考慮不同水平方向之風力、地震力。因此，每一模組均須於 STAADIII 輸入檔中建入以下六種狀況的載重組合： $D \cdot 0.75$ ($D + 1.25 W_{Gx}$)、 $0.75 (D - 1.25 W_{Gy})$ 、 $0.75 (D + 1.25 W_{Gz})$ 、 $0.75 (D + EQ_{Gx})$ 、 $0.75 (D + EQ_{Gz})$ 。

3.2 結構安全性分析

判讀由 STAADIII 軟體執行之後產生的輸出檔，其中 STAADIII 軟體將會列出各構件是否通過設計規範檢查，即應力比(設計載重所產生之應力/構件可承受應力)是否小於 1。如果有未通過的構件，則選用更大斷面積的鋼材，重覆執行分析，直到全數構件均通過。並檢視輸出檔中所列出的各節點位移量，是否亦在 2-2(1)節所規定的撓度上限範圍之內。

3.3 材料經濟性分析

檢視由 STAADIII 軟體執行之後產生的輸出檔，其中 STAADIII 軟體將會列出各構件所選用的型鋼種類，以及各型鋼種類的重量小計與全部用鋼重量總計。依據此輸出檔的資料，對於不同跨高比與主構架間距設計的各模組，各自在安全的範圍內選定最節省鋼材用量的型鋼配置方式。

將所有 12 個模組分別所需的單位地板面積用鋼量、單位空間體積用鋼量資料彙整之後，再分別就相同跨高比時不同主構架間距對用鋼量的影響，以及相同主構架間距時不同跨高比對用鋼量的影響，分析討論以評估其經濟性。

四、結果與討論

4.1 骨架結構設計

(1) 骨架構件與節點數目

本研究的 12 個設計模組，依照不同主構架間距，以及不同桁條配置方式，會產生不同的構件與節點數目。由於構件與節點數目的多少，可能影響施工的便利性，間接影響到工期長短與建造成本，因此一併列出供參考，如表 12 所示。

(2) 骨架鋼材型式最適化

將各模組依照 3.1 節所述之方法分析、最適化之後，骨架選用的鋼材型式結果如表 13，對照前述 3.1 節的表 3、表 4，可以得知所選用的型鋼斷面性質。原則上，主構架與主樑優先選用 H 型鋼(代號為 W)，若尚有餘裕才選用 C 型鋼；兩壁側與屋頂桁條優先選用 C 型鋼(代號為 C)，若無法承受足夠之設計應力才選用 H 型鋼。所有構件均在安全無虞的情況下，盡可能選用截面

表 12 各模組構件與節點數目

主構架 間距 跨高比	2 m		2.5 m		3.3 m	
	構件 數	節點 數	構件 數	節點 數	構件 數	節點 數
1.36	83	54	68	45	53	36
1.50	83	54	68	45	53	36
2.00	105	66	86	55	67	44
2.50	116	72	95	60	74	48

表 13 各模組骨架選用鋼材型式(C、W 型號別參考表 3、表 4)

跨高比	主構架間距	2 m	2.5 m	3.3 m
1.36	梯形主構架	W1	W2	W2
	主樑	C6	C10	C15
	兩壁側桁條	C8	C10	C13
	屋頂桁條	C1	C4	C4
1.50	梯形主構架	W2	W2	W2
	主樑	C6	C11	W4
	兩壁側桁條	C8	C11	C14
	屋頂桁條	C1	C4	C4
2.00	梯形主構架	W3	W3	W3
	主樑	C11	C14	W4
	兩壁側桁條	C10	C13	C14
	屋頂桁條	C1	C4	C9
2.50	梯形主構架	W3	W3	W5
	主樑	C14	W2	W4
	兩壁側桁條	C13	C14	W4
	屋頂桁條	C10	C11	C11

積較小的鋼材斷面型式，以達符合安全與經濟之要求。

4.2 結構安全性

(1) 應力比檢測

本研究各模組均經過 STAADIII 軟體結構分析，通過設計規範檢查，各構件所產生的應力比(設計載重所產生之應力/構件可承受應力)均小於 1，可確認各模組所得結果的安全性。各模組計算出的構件最大應力比及其發生處，整理如表 14 所示。由各模組構件及節點編號，可以得知構件最大應力比發生的位置，大多為中央部位主構架的柱腳處，以及高壁側立面上方樑角與下

表 14 各模組構件最大應力比與發生處

跨高比	主構架 間距 m	主構架之構件		樑與桁條之構件	
		最大應 力比	發生處 編號	最大應 力比	發生處 編號
1.36	2.0	0.950	17,25	0.875	70,72
	2.5	0.675	17	0.932	57,60
	3.3	0.893	17	0.939	47
1.50	2.0	0.593	17,25	0.915	71
	2.5	0.743	17	0.770	68
	3.3	0.977	17	0.730	53
2.00	2.0	0.769	21,31	0.998	105
	2.5	0.898	21	0.936	72,73
	3.3	0.991	21	0.944	67
2.50	2.0	0.781	23,34	0.941	77
	2.5	0.981	23	0.977	65
	3.3	0.756	23	0.906	51

表 15 各模組最大節點位移量與發生處

跨高比	主構架間 距 m	最大節點位 移量 cm	發生處節 點編號
1.36	2.0	1.001	6
	2.5	0.645	6
	3.3	0.833	6
1.50	2.0	0.884	6
	2.5	0.772	6
	3.3	0.974	6
2.00	2.0	1.218	5
	2.5	1.351	5
	3.3	1.523	5
2.50	2.0	1.934	6
	2.5	2.412	6
	3.3	1.835	6

方的桁條處，這些位置即為該模組較弱的構件位置。分析結果也顯示，最大應力比發生位置的構件，主控力皆為高壁側向低壁側吹的棟跨向風之風力。

(2) 撓度檢測

在撓度檢測方面，整理各模組的最大節點位移量如表 15 所示。得知最大節點位移量發生的位置，為棟長向風(構造物桁樑方向的風)之迎風面邊緣屋頂主構架中央部位。本研究設計分析的構造物之棟長方向柱跨度，即為主構架間距，由表 15 可知各模組的最大節點位移量均符合 2.2(1) 節規定之最大允許撓度標準(L/100)，因此本研究

表 16 各設計模組構成的地板面積、空間體積與所需的骨架總長、總用鋼量

跨高比	主構架間距 m	地板面積 m ²	空間體積 m ³	骨架總長 m	總用鋼量 kg
1.36	2.0	30	85.50	123.82	686 *
	2.5			114.85	840
	3.3			105.88	832
1.50	2.0	33	96.20	126.56	932
	2.5			117.13	911 *
	3.3			107.71	1087
2.00	2.0	44	138.82	156.64	1240
	2.5			145.53	1200 *
	3.3			134.43	1343
2.50	2.0	55	186.73	176.72	1589 *
	2.5			163.93	1621
	3.3			151.15	2148

註：「*」者為相同跨高比之較經濟模組

的 12 個模組均符合設施園藝設計手冊(1988)規定的考量工作舒適性之溫室撓度標準。

4.3 材料經濟性

對於利用地面從事生產的生物生產用結構物，如溫室、畜舍、室內養殖池等，可以室內單位地板面積構成之建材成本高低作經濟性考量；至於室內空間立體化生產利用方式的結構物，則可以室內單位空間體積構成之建材成本高低作經濟性考量。因此本研究在確立結構安全性的前題下，對於材料經濟性的評估，以單位地板面積用鋼量與單位空間體積用鋼量兩項結果討論。各設計模組所構成的地板面積、空間體積、骨架總長、總用鋼量，整理如表 16 所示。並且，將單位地板面積用鋼量與單位空間體積用鋼量結果整理如表 17、表 18。

依據 2003 年 1 月 25 日工商時報資料，東和鋼鐵公司的型鋼每公噸報價約在新台幣 13000 元至 13500 元之間。若以每公噸 13000 元估計，建造本研究經濟設計的 30、33、44、55m² 構造物所需型鋼之材料費，由表 16 計算可得總計約 9000、12000、16000、21000 元，由表 17 計算可得每平方公尺約 300 至 400 元。

表 17 各設計模組之單位地板面積用鋼量(單位：kg/m²)

跨高比 \ 主構架間距	2.0 m	2.5 m	3.3 m
	1.36	22.87 *	28.00
1.50	28.24	27.61 *	32.94
2.00	28.18	27.27 *	30.52
2.50	28.89 *	29.47	39.06

註：「*」者為相同地板面積下之較經濟模組

表 18 各設計模組之單位空間體積用鋼量(單位：kg/m³)

跨高比 \ 主構架間距	2.0 m	2.5 m	3.3 m
	1.36	8.02 *	9.83
1.50	9.69	9.47 *	11.30
2.00	8.93	8.64 *	9.67
2.50	8.51 *	8.68	11.50

註：「*」者為相同空間體積下之較經濟模組

由於本研究設計各模組的變因主要有兩項：跨高比、主構架間距。跨高比會影響內部地板面積與空間體積構成，以及骨架使用鋼材的規格大小；而主構架間距則會影響構件與節點數目，以及骨架使用鋼材的總長度與規格大小。因此，以下在討論單位地板面積用鋼量、單位空間體積用鋼量兩方面的結果時，分別就相同跨高比下不同主構架間距，以及相同主構架間距下不同跨高比的用鋼經濟性影響情況作討論。

(1) 相同跨高比下不同主構架間距的經濟性影響

相同跨高比所構成的室內地板面積、空間體積相同，當主構架間距增加可以減少骨架用鋼總長度，卻可能需要選用更大截面積的鋼材以符合安全性。因此，將各模組的單位地板面積用鋼量、單位空間體積用鋼量，依照相同跨高比作比較，製作得圖 8、圖 9，分別歸納其用鋼量與主構架間距的關係。得知構成單位地板面積與單位空間體積的所需的用鋼量變化情形，兩者大同小



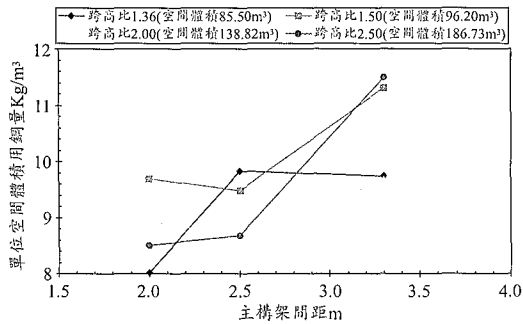


圖 8 相同跨高比下不同主構架間距之單位空間體積用鋼量

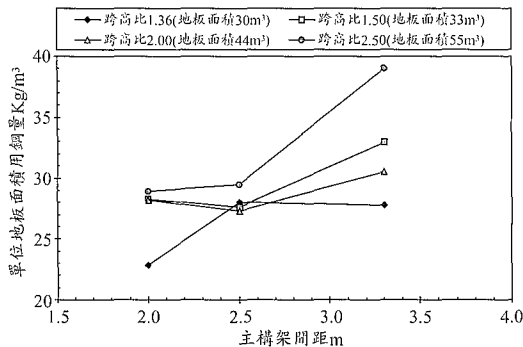


圖 9 相同跨高比下不同主構架間距之單位地板面積用鋼量

異。跨高比 1.36 時的用鋼量，以主構架間距 2.0 m 最少；在 2.0m 至 2.5m 之間，大幅增加；在 2.5m 至 3.3m 之間，小幅下降。跨高比 1.50 及 2.00 時的用鋼量，以主構架間距 2.5 m 最少；在 2.0m 至 2.5m 之間，小幅下降；在 2.5m 至 3.3m 之間，大幅增加。跨高比 2.50 時的用鋼量，以主構架間距 2.0 m 最少；在 2.0m 至 2.5m 之間，小幅增加；在 2.5m 至 3.3m 之間，大幅增加。再由表 18 得知，跨高比在 1.36、1.50、2.00、2.50 的四種設計情況，分別構成室內地板面積 30 m²、33 m²、44 m²、55 m²，空間體積 85.50 m³、96.20 m³、138.82 m³、186.73 m³，由於主構架間距設計不同，使得相同跨高比下最省鋼的模組相較於最耗鋼的模組，單位地板面積與單位空間體積用鋼量都分別節省了 18%、16%、11%、26%。

以上結果顯示，從生物生產用途空間需求觀點而言，高壁側高度 4.6 m、棟跨度 5.5 m 以內的

單斜式輕型構造物，主構架間距以 2.5 m 以下較佳。增加主構架間距以減少骨架總用鋼長度的做法，不僅節省的用鋼量有限；因而必須增大鋼材截面積以符合安全性時，所增加的用鋼量卻可能更大。所以，將主構架間距維持在一定的合理範圍之內即可達最佳經濟性。

(2) 相同主構架間距下不同跨高比的經濟性影響：

在相同主構架間距下增加跨高比，固然地板面積、空間體積會有增加，但主構架用鋼長度增加亦是必然的；同時，跨距加大使得設計應力也增大，一旦主構架的構件應力比過高，就必須選用更大截面積的鋼材以符合安全性，用鋼量也會有較大幅度的增加。

將各模組的單位地板面積用鋼量與單位空間體積用鋼量，依照相同主構架間距作比較，配合主構架構件最大應力比製作得圖 10 與圖 11。得知在主構架構件最大應力比原本就已經很高的情況下去增加跨高比，會使得單位地板面積、單位空間體積用鋼量都大幅增加。如主構架間距為 2m 且跨高比由 1.36 增為 1.50、主構架間距為 3.3m 且跨高比由 2.00 增為 2.50 的過程，主構架構件最大應力比降低了 38%、24%，使得單位地板面積用鋼量增加了 24%、28%，單位空間體積用鋼量增加了 21%、19%。其餘模組，大致呈現出應力比持續增加，而單位地板面積用鋼量、單位空間體積用鋼量小幅減少的趨勢。

以上結果顯示，為增加室內生產空間，增加單斜屋的跨高比，使得地板面積、空間體積增大的做法，在構件之容許應力尚有餘裕的受力情況下，可以降低單位地板面積、單位空間體積用鋼量，達更經濟的效果。例如主構架間距為 2.5 m 的情況，跨高比由 1.36 增加到 2.50，可以使得可利用的地板面積自 30 m² 增大到 55 m²，增加近一倍，而單位地板面積用鋼量卻幾乎不變，約為 28 kg/m²~29.5 kg/m²；空間體積自 85.50 m³ 增大到 186.73 m³，增加一倍以上，而單位空間體積用鋼量甚至減少了，約從 9.8 kg/m³ 減至 8.6 kg/m³。但是，一旦構件應力比過大而換用更大截面積的鋼材，使得其可承受應力未完全發揮

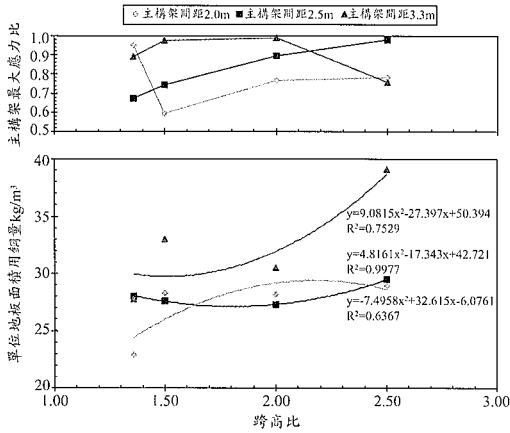


圖 10 相同主構架間距下不同跨高比之單位地板面積用鋼量與主構架應力比

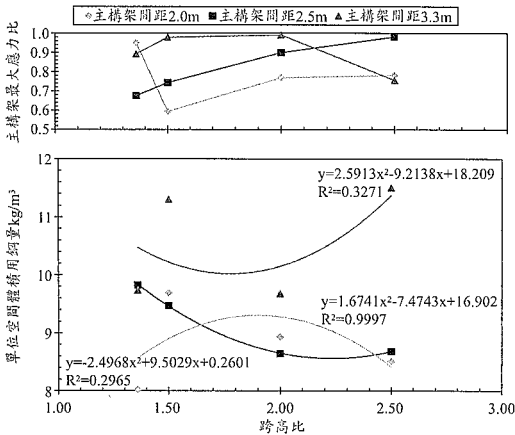


圖 11 相同主構架間距下不同跨高比之單位空間體積用鋼量與主構架應力比

時，單位地板面積、單位空間體積用鋼量將隨之增大，而成爲不經濟設計。例如主構架間距爲 3.3 m 的情況，跨高比由 2.00 增加到 2.50，地板面積自 44 m² 增大到 55 m²，單位地板面積用鋼量即由 30.5 kg/m² 增加至 39.1 kg/m²，增加了近 30%。因此，可以確認在主構架構件最大應力比接近 1 時，能夠找到較經濟的設計模組。

五、結論與建議

5.1 結構設計結論

以屋頂斜角 23.5 度的單斜式構造，設定棟長度 10 m、低壁側高度 2.2 m，然後分 1.36、1.50、

2.00、2.50 四種跨高比，搭配 2 m、2.5 m、3.3 m 三種主構架間距組合成 12 個模組，選取市售 H 型鋼 10 種、C 型鋼 15 種作爲設計候選鋼材，使用電腦軟體執行結構分析確定每一個設計模組都是符合安全，且用鋼量達到最節省的情況。再針對構成該模組構造物的單位地板面積用鋼量及單位空間體積用鋼量，探討跨高比與主構架間距變化所造成的經濟性影響，得到以下結論：

- (1) 從生物生產用途空間需求觀點而言，高壁側高度 4.6 m、棟跨度 5.5 m 以內的單斜式構造物，主構架間距以 2.5 m 以下較佳。以增加主構架間距方式來減少骨架總用鋼長度的做法，所能節省的用鋼量有限；反而因爲必須增大鋼材截面積以符合安全性時，所增加的用鋼量可能更大。所以，將設計主構架間距維持在一定的合理範圍之內即可達最佳經濟性。
- (2) 爲增加室內生產空間，增加單斜屋的跨高比，使得地板面積、空間體積增大的做法，在構件之容許應力尚有餘裕的受力情況下，可以降低單位地板面積、單位空間體積用鋼量，達更經濟的效果。但是，一旦構件應力比過大而換用更大截面積的鋼材，使得其可承受應力未完全發揮時，單位地板面積、單位空間體積用鋼量將隨之增大，而成爲不經濟設計。因此，可以確認在主構架構件最大應力比接近 1 時，能夠找到較經濟的設計模組。
- (3) 單斜式構造物設計，在棟長度 10 m 單元，地板面積小於 33 m² 的較小斷面空間需求時，以跨高比 1.4 以下、主構架間距 2 m 較經濟；而地板面積約 33 m²~55 m² 的範圍內，以主構架間距 2.5 m 較經濟，其經濟跨高比自 1.50 起可提高至 2.50，以擴充室內可利用空間。

5.2 建議

對於本研究相關之後續研究，以及實際應用方面，建議如下：

- (1) 目前國內對於生物生產用構造物，並無專

表 20 經濟模組風力減半設計之骨架總用鋼量比較

設計風力	相當風速	骨架總用鋼量 kg			
		跨高比 1.36	1.50	2.00	2.50
		主構架間距 2m	2.5	2.5	2
原強度	原強度(約 44 m/s)	686	911	1200	1589
減為 1/2	減為 71%(約 31 m/s)	440(減少 36%)	499(減少 45%)	1045(減少 13%)	1369(減少 14%)

屬法令規範其結構設計所應考量的載重與受力情形，本研究將其視為一般建築物配合現有法令規範設計，未來如有專屬之法令規範訂定，應遵從新規範重行設計。

- (2) 本研究結構設計所採用之風力計算方式，是假設構造物位於空曠處單獨承受強風吹襲之情況。若假設構造物周圍有防風林或其他設施，對於跨高比 1.36、1.50、2.00、2.50 四種情況中最經濟的設計模組，將風力降低為 1/2 進行計算，結果如表 20 所示。由表可知各模組可分別再減少骨架總用鋼量 36%、45%、13%、14%，意即在不大大於 2.0 的較小跨高比設計之構造物，可得到較明顯的骨架材料減量效果。因此建議對於跨高比較小的單斜式構造物，可以輔以防風林或其他設施以降低構造物需承受風力，節省骨架用鋼。至於如何設計達到相當風力減量之防風林或其他設施，可成為後續相關研究深入探討之課題。
- (3) 本研究之單斜式構造物結構設計模組，可增加更多種的跨高比與主構架間距變化，或是改變棟長與屋頂斜度等方式，以更多組合進行分析，建立經濟設計資料庫，以落實本土化農用設施設計目標。

參考文獻

- 九二一地震畜牧產業重建技術服務團(2000)，九二一地震畜牧產業重建技術服務手冊，行政院農委會。
- 九二一地震畜牧產業重建技術服務團(2001)，建造防震畜舍須知，行政院農委會。
- 工商時報(2003/1/25)，元月來東鋼二度調漲型鋼價格。 <http://tw.stock.yahoo.com/n/hist/IT/2003/01/25/161063.html>。
- 中央氣象局(2003)，陸上應用之蒲福風級表，中央氣象局網站，<http://www.cwb.gov.tw>。

- 中央氣象局(2003)，颱風強度標準劃分表，中央氣象局網站，<http://www.cwb.gov.tw>。
- 王啓順(2003)，生物生產單斜式雙層被覆空氣膜構造物之結構與環境設計，台灣大學生物環境系統工程學研究所，碩士論文。
- 內政部營建署(2001)，建築物耐震設計規範及解說，營建雜誌社。
- 內政部營建署(2002)，建築技術規則，營建雜誌社。
- 王鼎盛主編(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。
- 台北縣政府(2000)，八九北府工建字第 298635 號公文。
- 林益鵬(2002)，生物生產隧道式輕型構造物結構安全及經濟之設計研究，台灣大學生物環境系統工程學研究所，碩士論文。
- 陳清泉(1996)，建築結構設計原理，台灣大學土木系暨研究所。
- Elsner, B.V., D.Briassonlis, D. Waaijenberg, A. Mistriotus, C. Von Zabeltitz, J. Gratraud, G. Russo, R. Suay Cortes (2000), Review of Structural and Functional Characteristics of Greenhouse in European Union Countries, Part II : Typical Designs. Journal of Agricultural Engineering Research, 75, 111-126.
- Lindley J. A. and J. H. Whitaker (1996), Agricultural Buildings and Structures, American Society of Agricultural Engineers.
- Research Engineers, Inc. (1997), STAAD-III Rel 22.3W 32-bit.
- 日本施設園藝協會(2001)，施設園藝ハンドブック，日本園藝情報センター。

收稿日期：民國 93 年 3 月 8 日

修正日期：民國 93 年 3 月 26 日

接受日期：民國 93 年 4 月 6 日