

改進竹棚架安全性及可靠性的工程分析

總結報告書

呈交
職業安全及健康局

承辦人

張志成博士
香港科技大學土木工程系

余同希教授
香港科技大學機械工程系

二零零二年六月十九日

目錄

第一章:引言.....	1
1.1 竹棚架在香港的使用.....	1
1.2 竹棚架的好處和缺點.....	1
1.3 工程問題	3
1.4 研究計劃和方法.....	3
第二章:竹的物料特性.....	5
2.1 壓縮試驗	5
2.2 不同濕度下的壓縮試驗	6
2.3 老化影響下的壓縮試驗	6
2.3.1 室內老化條件.....	6
2.3.2 戶外老化條件.....	6
2.4 三點荷載試驗	7
2.5 壓屈試驗	7
第三章:固定繫帶及連接處的物料特性.....	17
3.1 固定繫帶的拉力試驗.....	17
3.2 固定繫帶的潛變影響.....	17
3.3 固定繫帶在連接竹桿件時的張力試驗	17
3.4 竹棚架連接處的試驗.....	17
第四章:真實比例的棚架試驗.....	19
4.1 目的	19
4.2 真實比例棚架的描述.....	19
4.3 試驗器具	19
4.4 平均分佈荷載試驗	19
4.4.1 試驗裝置	19
4.4.2 試驗結果	20

4.5 下墮荷載試驗	21
4.5.1 試驗裝置	21
4.5.2 試驗結果	21
第五章:試驗與有限元分析的比較	37
5.1 有限元模型的描述	37
5.2 試驗與有限元分析的比較	37
5.2.1 平均分佈荷載試驗的比較	37
5.2.2 下墮荷載試驗的比較	37
5.3 真實比例棚架的安全性及可靠性分析	38
第六章:一些常見棚架的有限元分析	42
6.1 建築地盤使用的竹棚架	42
6.2 維修用的竹棚架	42
第七章:結論和建議	48
參考文獻	50

表目錄

表 2.1: 篙竹在壓縮試驗下的物料特性	8
表 2.2: 毛竹在壓縮試驗下的物料特性	8
表 2.3: 木杉在壓縮試驗下的物料特性	8
表 2.4: 室內老化條件下的壓縮試驗結果	8
表 2.5: 三點荷載試驗下的物料特性	9
表 2.6: 壓屈試驗的結果	9
表 3.1: 固定繫帶拉力試驗的總結	18
表 3.2: 竹棚架連接處試驗的總結	18
表 4.1(a): 5 kN 荷載施於下層工作平台的試驗結果	22
表 4.1(b): 10 kN 荷載施於下層工作平台的試驗結果	22
表 4.1(c): 15 kN 荷載施於下層工作平台的試驗結果	23
表 4.1(d): 5 kN 荷載施於上層工作平台的試驗結果	23
表 4.1(e): 10 kN 荷載施於上層工作平台的試驗結果	24
表 4.1(f): 5 kN 荷載同時施於上層及下層工作平台	24
表 4.1(g): 10 kN 荷載同時施於上層及下層工作平台	25
表 4.2: 下墮試驗的數目及試驗位置	25
表 4.3(a): 沒有平均分佈荷載下一個 20 公斤沙包的下墮試驗的彎曲應變 ($\times 10^{-6}$)	26
表 4.3(b): 沒有平均分佈荷載下一個 20 公斤沙包的下墮試驗的彎曲壓力 (N/mm^2) ..	26
表 4.4(a): 在平均分佈荷載 3 kN/m^2 下一個 20 公斤沙包的下墮試驗的彎曲應變 ($\times 10^{-6}$)	27
表 4.4(b): 在平均分佈荷載 3 kN/m^2 下一個 20 公斤沙包的下墮試驗的彎曲壓力 (N/mm^2)	27
表 5.1: 有限元分析與試驗結果的比較 (平均分佈荷載等於 8.02 kN/m^2)	39
表 5.2(a): 在位置 3 的下墮試驗結果	39
表 5.2(b): 在位置 4 的下墮試驗結果	39
表 5.3: 小橫杆在平均分佈荷載下的安全性和可靠性	39

表 5.4: 直杆在平均分佈荷載 3 kN/m^2 施於下層平台時的安全性和可靠性	40
表 5.5: 大橫杆在下墮力下的安全性和可靠性 (簡單支撐).....	40
表 5.6: 大橫杆在下墮力下的安全性和可靠性 (緊固支撐).....	40
表 6.1: 小橫杆在平均分佈荷載下的安全性和可靠性	43
表 6.2: 平均分佈荷載 3 kN/m^2 施於建築地盤使用的竹棚架下層平台時直杆的安全性和可靠性.....	43
表 6.3: 在 5 kN 下墮力施於建築地盤使用的竹棚架時直杆的安全性和可靠性.....	43
表 6.4: 平均分佈荷載 3 kN/m^2 施於維修使用的竹棚模型下層平台時直杆的安全性和可靠性.....	43
表 6.5: 在 5 kN 下墮力施於維修使用的竹棚模型時直杆的安全性和可靠性.....	44

圖目錄

圖 2.1(a): 篙竹的物料特性與面積的關係	10
圖 2.1(b): 篙竹的物料特性與直徑的關係	10
圖 2.1(c): 篙竹的面積與直徑的關係	11
圖 2.1(d): 篙竹的楊氏模量與直徑的關係	11
圖 2.2(a): 毛竹的物料特性與面積的關係	12
圖 2.2(b): 毛竹的物料特性與直徑的關係	12
圖 2.2(c): 毛竹的面積與直徑的關係	13
圖 2.2(d): 毛竹的楊氏模量與直徑的關係	13
圖 2.3(a): 竹子在不同濕度下的強度	14
圖 2.3(b): 竹子在不同濕度下的楊氏模量	14
圖 2.4(a): 毛竹在老化作用下強度的減小	15
圖 2.4(b): 篙竹在老化作用下強度的減小	15
圖 2.5(a): 試驗前的末端情況	16
圖 2.5(b): 試驗後的末端情況	16
圖 3.1: 固定繫帶在潛變影響下的結果	18
圖 4.1: 竹棚架的前視圖	28
圖 4.2: 竹棚架的側視圖	28
圖 4.3: 竹棚架的尺寸圖	29
圖 4.4(a): 應變傳感器	29
圖 4.4(b): 拉力機	29
圖 4.4(c): 數據機及電腦	30
圖 4.4(d): 應力傳感器	30
圖 4.5: 毛竹上的應變傳感器	30
圖 4.6(a): 在前方直杆上的應變傳感器的位置	31
圖 4.6(b): 在後方直杆上的應變傳感器的位置	32

圖 4.7: 40 kg 沙包下墮前的情形	33
圖 4.8: 40 kg 沙包下墮後的情形	33
圖 4.9: 40 kg 沙包在中央的直杆下墮前位置 9 的情形	34
圖 4.10: 40 kg 沙包在中央的直杆下墮後位置 9 的情形	34
圖 4.11: 橫杆在位置 9 損壞.....	35
圖 4.12: 安全帶繫在位置 10 上.....	35
圖 4.13: 在 60 kg 沙包下墮後橫杆在位置 10 損壞	36
圖 5.1: 竹棚架的有限元模型	41
圖 6.1: 位於深井的竹棚架	45
圖 6.2: 斜蓬與結構支撐	45
圖 6.3: 位於深井的竹棚架的近照	46
圖 6.4: 位於科技大學內的竹棚架	46
圖 6.5: 位於科技大學內的竹棚架的底部	47
圖 6.6: 位於科技大學內的竹棚架的近照	47

第一章: 引言

1.1 竹棚架在香港的使用

竹棚架在香港是一種流行的臨時性結構。它廣泛地被應用於建築施工，建築物表面和外牆的維修，裝飾和標誌的裝設及斜坡保養等。Fu [1] 在 1993 年指出超過三分之二的竹棚架應用於建築施工。So 和 Wong [2] 整理出竹棚架在香港的市場佔有率。他們的結論是，竹棚架在八十年代和在九十年代於私人建築工程佔有率分別為 100% 和 95%。同樣，在公眾部分，竹棚架在由香港房屋協會和屋宇署發出的建築物工作方面的市場佔有率為 100%。

1.2 竹棚架的好處和缺點

竹棚架在香港流行的原因可歸因於下面的因素：

1) 價格低廉

So 和 Wong [2] 指出一枝 6 米長的竹桿在 1998 年的平均價格大約為港幣 10 元，而一條 6 米長，48 毫米直徑的鋼管大約為港幣 80 元、一條 2 米長的鋁合金管大約為港幣 250 元。雖然金屬管的可用壽命大約為 15 至 20 年，但是這些金屬管的高昂儲存費用使它們在香港建築業中很少出現。

2) 搭建及拆除快捷簡便

豎立和拆除竹棚架相對來說較容易和快捷。典型竹子的重量是約 1.1 至 1.3 kg/m³ [3]。建造和拆除竹棚架不需要使用特別工具。技術熟練的竹棚架工人每天平均能夠搭建 600 至 700 平方米或者拆除 2,000 平方米的竹棚架。比較起來，技術熟練的金屬架工人每天只能夠搭建 300 至 400 平方米或者拆除 500 到 600 平方米的金屬棚架。

3) 使用靈活方便

竹棚架可以按照形狀，高度，和工作空間的改變而改變，靈活適用不同建築物的需要。竹子能夠被裁短而不會影響它的物料特性，這使它能迎合建築物的特別形狀，輪廓，或者角位。

然而，竹棚架並非完全沒有缺點，這些缺點有可能導致嚴重後果，並且會對工人引致潛在危險。這些缺點包括：

1) 物料特性的變化

竹子是一種自然材料，它的物料特性並不均勻。它的物料特性取決於品種、成長年期、產地、以及含水率。更為複雜的是，甚至一枝竹子的橫截面積、含水率、硬度和強度都隨部位之不同而不同。Zhou [4] 總結了 61 種品種的竹子的一些特性，包括單位重量、吸水膨脹的百分比、維管束密度、抗壓和抗拉強度等。從 1963 到 1978 期間，在中國的 11 個省 26 個地區得來 311 枝竹提供了總共 9,000 個樣本。Jansseu [5] 在 1991 年搜集和總結關於竹子特性的報告。報告提及了竹子的特性會隨它的熱膨脹率，含水率、彈性、彎曲、壓縮、剪力和撓曲率而變化。竹子亦很容易在正常的天氣變化下被腐蝕。當在濕度低的環境下，竹子會爆裂，而在濕度高的環境下，它的強度會降低。在香港的暖和潮濕的環境下，竹子的可用壽命預期將少於一年 [4]。

2) 品質控制和人為因素

搭建和拆除竹棚架是非常依賴工人的技術和經驗。〈建築地盤(安全)規例〉第 38E 條規例指“這條規例規定只有具足夠經驗並曾受訓練的工人及在合資格的人監督下才可搭建，更改或拆卸棚架。”合資格的人指他完成正式的竹棚工作訓練，例如職業訓練局舉辦的三年制竹棚工業學徒計劃，或建造業訓練局舉辦的一年全日制竹棚架訓練課程，或其他類似的竹棚訓練課程/計劃，或已在建造業訓練局舉辦的竹棚工藝技能測試中取得合格的成績；和具備十年或以上的竹棚架工作經驗。曾受訓練的人是指該人已完成相等於上述為“合資格的人”而舉辦的正式的竹棚工作訓練，並具備最少三年竹棚架工作經驗。這些對竹棚架工人資格及訓練的嚴格要求是為了確保竹棚架的品質和安全。

3) 竹棚架的保養和管理

由於下述的原因，竹棚的定期檢查是絕對需要的。

- I) 竹子的物料特性有明顯的不均性及易受環境的影響而變化或減弱;
- II) 用作連接竹棚的尼龍繩索具潛變及疲勞的特性;
- III) 容易被意外損害和不正當地拆除。

在<建築地盤(安全)規例>第 38F 條規例指 “ 這條規例規定任何棚架都不能使用，除非: (a) 在首次使用前已經由合資格的人檢查; (b)定期地在緊接每次使用前 14 天內，已經由合資格的人檢查。 ”

1.3 工程問題

竹棚架在大學裡並不是一個流行的研究科目，很少論文對竹棚架作一個有系統的研究。Chen, et.al [6] 為竹棚架提供了一個電腦化的方法去分析和設計竹棚架。一個雙層的竹棚架被用作測試直至斷裂去檢驗這些電腦分析結果。Yu 和 Chung [7] 對兩個竹子品種，篙竹和毛竹，進行超過 500 個壓縮和 200 個彎曲測驗，完成了一個統計分析的結果。他們發現含水率是一個決定兩種竹子的物料特性最重要的物理特性。

竹棚架在建築工業中的普遍性很不幸的伴隨著頗高的意外比率。據勞工處統計，1994 至 1998 年間總共發生了 31 宗關於竹棚架的嚴重事故 [8]。這一數據說明，為了保障建築工地的施工安全，極需對竹棚架的安全性及可靠性進行全面、詳盡而深入的研究。

1.4 研究計劃和方法

這個計劃的目的在於進行一個詳細和系統的研究去找出竹棚的安全性和可靠性。研究會同時使用實驗室試驗的結果和電腦的分析計算。研究計劃的步驟包含以下四個項目：

1) 竹的物料特性

竹的物料特性，包括彈性、抗拉強度、抗壓強度、抗彎強度、抗剪強度、撓曲率和熱膨脹，都是這個研究的基礎。這些特性受到竹子的品種、竹節的數目、含水率、氣候條件、自然缺憾等因素影響。我們將經由一系列適當控制的試驗，綜合出這些竹的物料特性。

2) 竹棚連接處和固定尼龍繫帶的特性

竹棚是靠尼龍繫帶連接起來的，所以繫帶的特性和強度需要先在試驗中加以確定。試驗包括竹枝固定方法的影響及尼龍繫帶的物料特性。

3) 電腦模擬及分析

在確定竹子及竹棚連接處的特性後，我們建立了有限元模型來分析一些典型棚架，例如單層竹棚架系統、雙層竹棚架系統和斜坡用竹棚架。這些棚架系統是根據在 2001 年由勞工處出版的<竹棚架工作安全守則> [9] 中的規定而設計。之前所找出的物料特性將用來制定有限元模型。研究將包括：

- a. 在不同活荷載和固定荷載組合下，竹棚架在一些重要位置所承受最大應力和變形。
- b. 在不同活荷載和固定荷載組合下並且加上一些衝擊的荷載，竹棚架的一些特別的位置所承受的最大壓力和變形。衝擊力是用以模擬由竹棚架偶然跌下的工人所引起的外載。
- c. 在不同活荷載、固定荷載和衝擊力組合下，竹棚架的極限荷載。

4) 真實比例的竹棚架測試

我們搭建了一個典型的竹棚架，用來與電腦分析的結果作比較。這個棚架符合 <竹棚架工作安全守則> [9] 第 4 部分提出的技術要求。測試的方法將盡可能依據一些認可的國際標準。在棚架的一些重要位置裝上了應變傳感器用以量度各種不同荷載組合下的竹棚架變形。

第二章: 竹的物料特性

在香港慣用的竹棚架材料有三種: 篙竹 (BP or Kao Jue) , 毛竹 (PP or Mao Jue) 及 木杉 (Fir)。這些材料的基本物料特性將在本章透過以下試驗方法取得。

2.1 壓縮試驗

表 2.1 - 2.3 表示出三種類型的竹子的直徑 (D) 、橫截面積 (A) 、抗壓強度 (S) 和楊氏模量 (E) 的平均值 (mean) 和標準差 (std)。抗壓強度是從測量得到的橫切面積除記錄到的最終荷載得到。在這些表中，亦顯示了強度的 95%可能性的低值。從這些表能夠得到下面的觀察結果：

- (1) 相同的類型材料 (篙竹和毛竹) , 竹節的存在和位置都不太影響強度和楊氏模量。
- (2) 篙竹和毛竹的強度大約相同，而篙竹的楊氏模量比毛竹的為高。
- (3) 木杉的抗壓強度和楊氏模量比篙竹和毛竹的數值明顯地低。

圖 2.1 顯示篙竹測驗結果的詳細分析。下面概述了一些觀察：

- (1) 當篙竹的面積與直徑增加時，其強度將減少。
- (2) 當篙竹的面積與直徑增加時，其極限荷載將增加。
- (3) 當篙竹的直徑增加時，它的楊氏模量一般會減少。

毛竹測驗結果的詳細分析在圖 2.2 中提供。值得注意的是毛竹的特性與篙竹的特性有類似的變化。

2.2 不同濕度下的壓縮試驗

試驗結果顯示當相對濕度增加時，篙竹、毛竹和木杉的極限強度和楊氏模量都會減少。不同含水率的樣本有不同的損壞模式。當這些樣本的含水率高的時候，損壞模式為末段損壞，而當樣本的含水率低的時候，損壞模式變為縱向分裂。圖 2.3 (a) 和 (b) 顯示了這個減少傾向。試驗結果亦顯示毛竹和木杉在相對濕度增加時有相似的減少比率。而相對濕度對篙竹有更大的影響。由於篙竹的壁厚比另外兩種都薄，因此濕氣更容易進入整個橫切面積。所以，篙竹的含水率比另外兩種材料的為高，導致篙竹比另外兩種材料更易受濕度的影響。

2.3 老化影響下的壓縮試驗

2.3.1 室內老化條件

表 2.4 總述室內老化條件下的測驗結果。表中的星號 " * "代表在未能完成壓縮測驗前已在竹子樣本中看見嚴重爆裂的情況。

基於這些測驗結果，可以得出下面的結論：

1. 在 ASTM D1037-96 的方法下，所有三種類型的竹子的抗壓強度都減少到與它們的在表 2.1 到 2.3 中顯示的 95% 可能性的低值相近。
2. 在 GB13124 - 91 方法下得到的抗壓強度有類似傾向。

2.3.2 戶外老化條件

圖 2.4 顯示在戶外老化影響下毛竹和篙竹的抗壓強度會隨時間減少。雖然數據比較波動，但是看出竹子的抗壓強度在戶外老化條件下與沒有受任何老化影響的類似尺寸的竹子相比減低大約 20%。

2.4 三點荷載試驗

三點荷載試驗的結果總結在表 2.5。這些結果顯示在三點荷載試驗中找到的極限強度比在壓縮試驗中找到的那些更高。

2.5 壓屈試驗

表 2.6 展出從試驗中取得竹子的壓屈荷載 (buckling load)。為了比較，在表中亦顯示了在簡單的支撐和緊固的支撐下的理論壓屈荷載 (theoretical buckling load)。結果顯示出試驗的壓屈荷載大約在這兩個理論壓屈荷載之間。這是一個合理的結果，因為這些試驗樣本的末端條件既不是簡單支撐 (simple support)，也不是緊固支撐 (clamped support)。事實上，當初始曲率 (initial curvature) 小的時候，末端條件表現得像緊固支撐，而當初始曲率大時，末端條件便表現得像簡單支撐。如果使用緊固的條件去決定一枝長竹子的壓屈荷載會對它作出較高的估計，這樣的估計是不安全的。另一方面，有曲率的簡單支撐條件提供了長竹子的壓屈荷載的最低估計。在沒有明顯彎曲的情況下，沒有曲率的簡單支撐條件的壓屈荷載可作為最低估計值。圖 2.5 (a) 和 (b) 顯示測試樣本在試驗前和後它的末端情況。

表 2.1: 篙竹在壓縮試驗下的物料特性

NL	D (mm)		A (mm ²)		S (N/mm ²)			E (kN/mm ²)	
	平均值	標準差	平均值	標準差	平均值	標準差	95% 機率	平均值	標準差
1/4	53.2	6.8	969.5	365.5	58.6	7.7	45.9	7.9	1.3
1/2	53.4	6.8	969.8	355.4	56.6	6.0	46.7	7.9	1.6
無	54.6	5.5	989.5	295.8	56.0	9.7	40.1	7.6	2.1

註: NL = 竹節位置 (node location)

表 2.2: 毛竹在壓縮試驗下的物料特性

NL	D (mm)		A (mm ²)		S (N/mm ²)			E (kN/mm ²)	
	平均值	標準差	平均值	標準差	平均值	標準差	95% 機率	平均值	標準差
1/4	77.8	18.8	1875.7	1002.1	60.1	12.9	38.9	6.7	1.9
1/2	77.4	18.5	1814.1	883.1	61.7	9.8	45.5	6.5	2.1
無	77.8	9.5	1739.6	427.9	60.4	7.8	47.5	6.1	1.2

表 2.3: 木杉在壓縮試驗下的物料特性

D (mm)		A (mm ²)		S (N/mm ²)			E (kN/mm ²)	
平均值	標準差	平均值	標準差	平均值	標準差	95% 機率	平均值	標準差
92.6	7.0	6763.4	1044.7	25.8	6.4	15.3	3.9	1.2

表 2.4: 室內老化條件下的壓縮試驗結果

條件	材料	竹節位置	S (N/mm ²)	E (kN/mm ²)
ASTM D1037-96	BP	1/4	44.2	9.2
	BP	1/2	*	*
	BP	None	42.2	5.1
	PP	1/4	46.8	7.2
	PP	1/2	*	*
	PP	None	*	*
	Fir	None	16.7	0.8
GB13124-91	BP	1/4	50.4	11.3
	BP	1/2	40.7	6.9
	BP	None	*	*
	PP	1/4	54.8	6.2
	PP	1/2	50.4	6.9
	PP	None	55.7	12.5
	Fir	None	14.8	0.8

表 2.5: 三點荷載試驗下的物料特性

材料	E (kN/mm ²)	S (N/mm ²)
Fir	6.3	44.6
PP	11.8	78.7
BP	20.0	80.7

表 2.6: 壓屈試驗的結果

樣品 編號	類型	初始曲率 ($\times 10^{-6} \text{ mm}^{-1}$)	壓屈荷載 (kN)	理論壓屈荷載 (kN)		
				有曲率, 簡單支撐	無曲率, 簡單支撐	無曲率 固定支撐
1	BP	5.3	11.4	3.6	3.9	15.4
2	BP	19	7.8	3.9	5	20.1
3	BP	20	15.6	5.3	6.3	25.4
4	BP	27	5.4	4.2	5.7	23
5	BP	46	9.4	5.7	8.8	35.1
6	BP	48	4.9	2.6	4.3	17
7	PP	24	36.7	12.6	17.3	69.2
8	PP	40	29.8	20.6	34.9	139.7
9	Fir	1.6	69.7	36.4	37	147.9
10	Fir	11	59.3	54.7	62.7	250.9

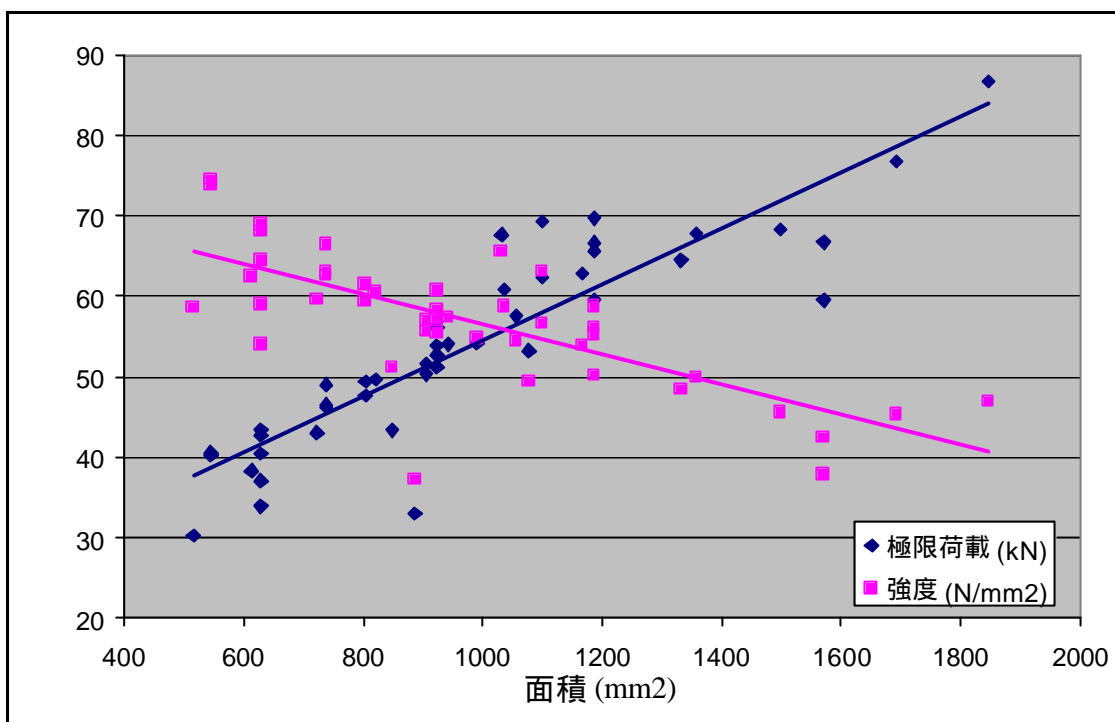


圖 2.1(a): 篙竹的物料特性與面積的關係

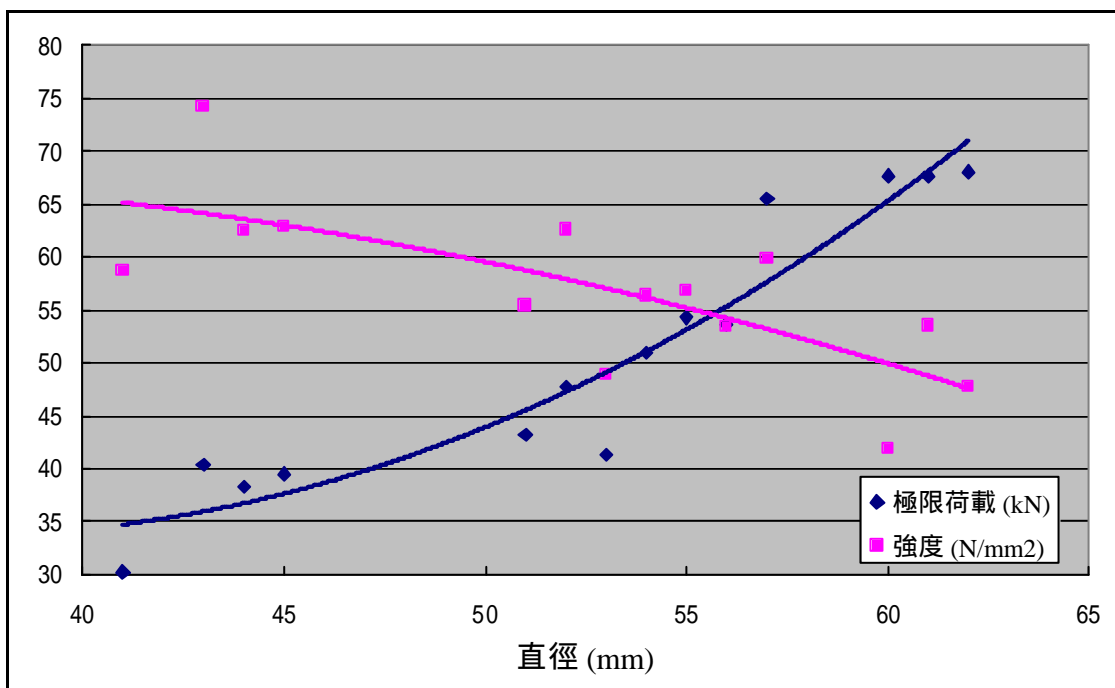


圖 2.1(b): 篙竹的物料特性與直徑的關係

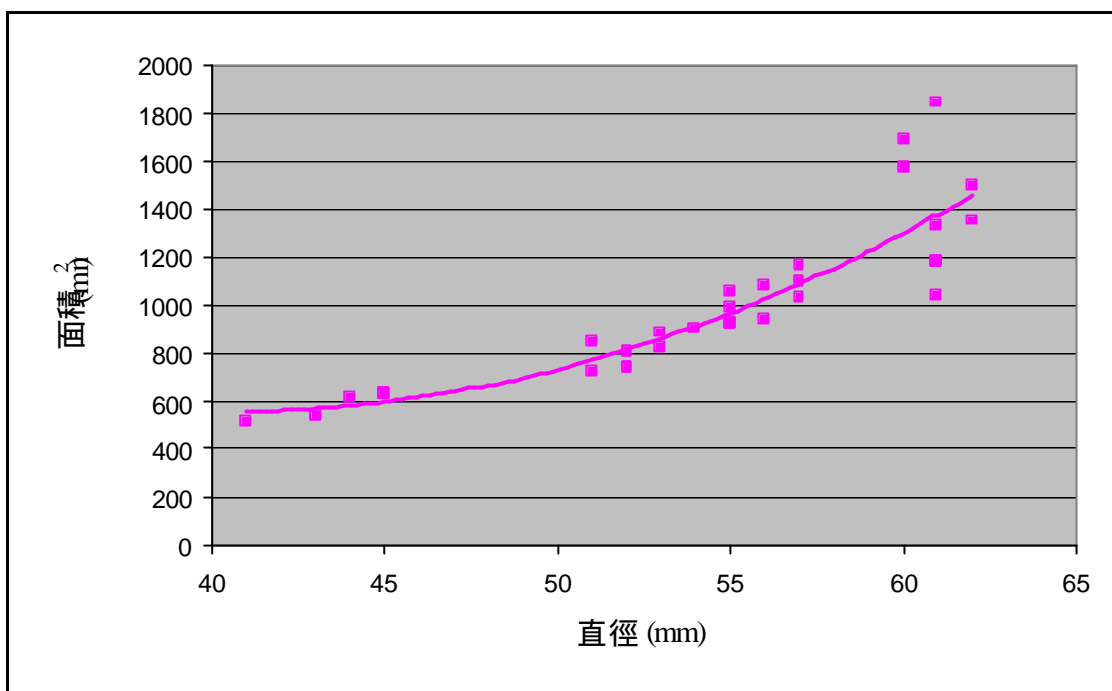


圖 2.1(c): 篙竹的面積與直徑的關係

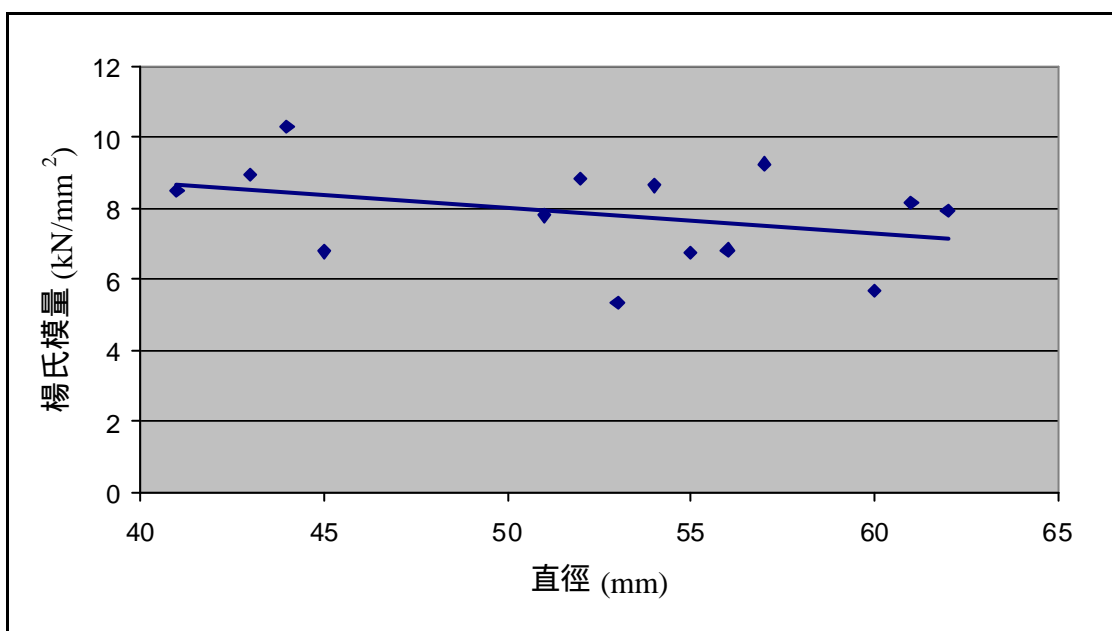


圖 2.1(d): 篙竹的楊氏模量與直徑的關係

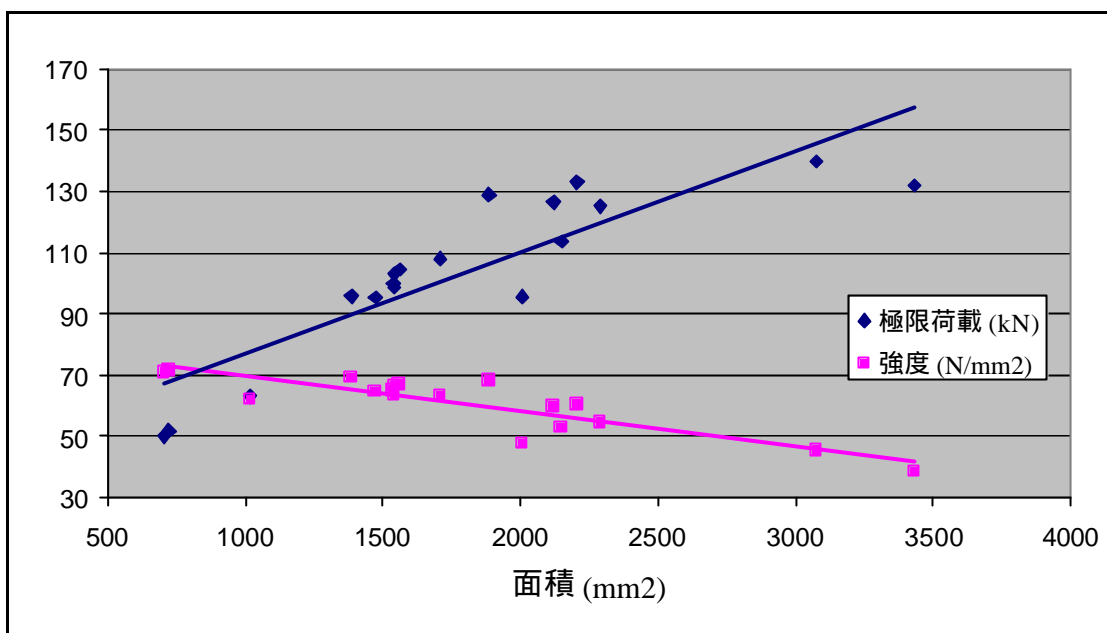


圖 2.2(a): 毛竹的物料特性與面積的關係

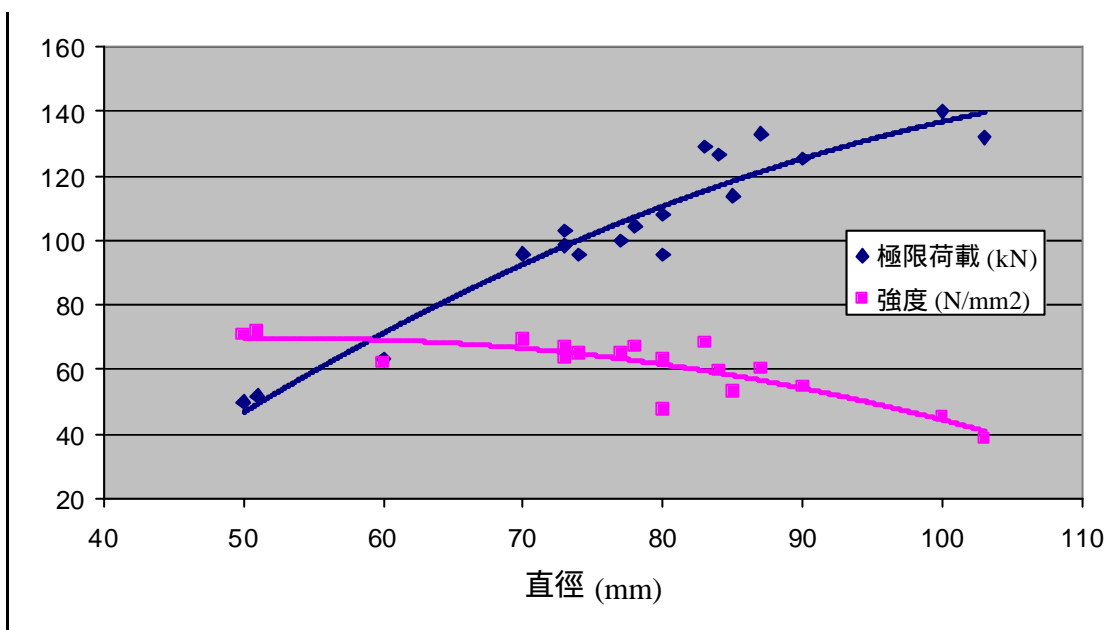


圖 2.2(b): 毛竹的物料特性與直徑的關係

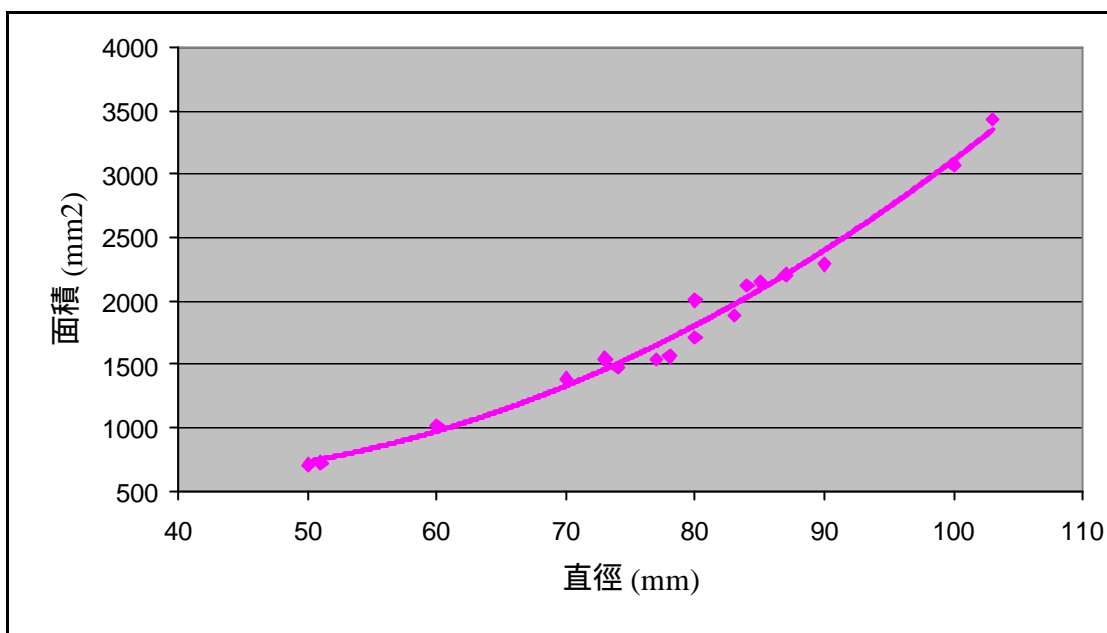


圖 2.2(c): 毛竹的面積與直徑的關係

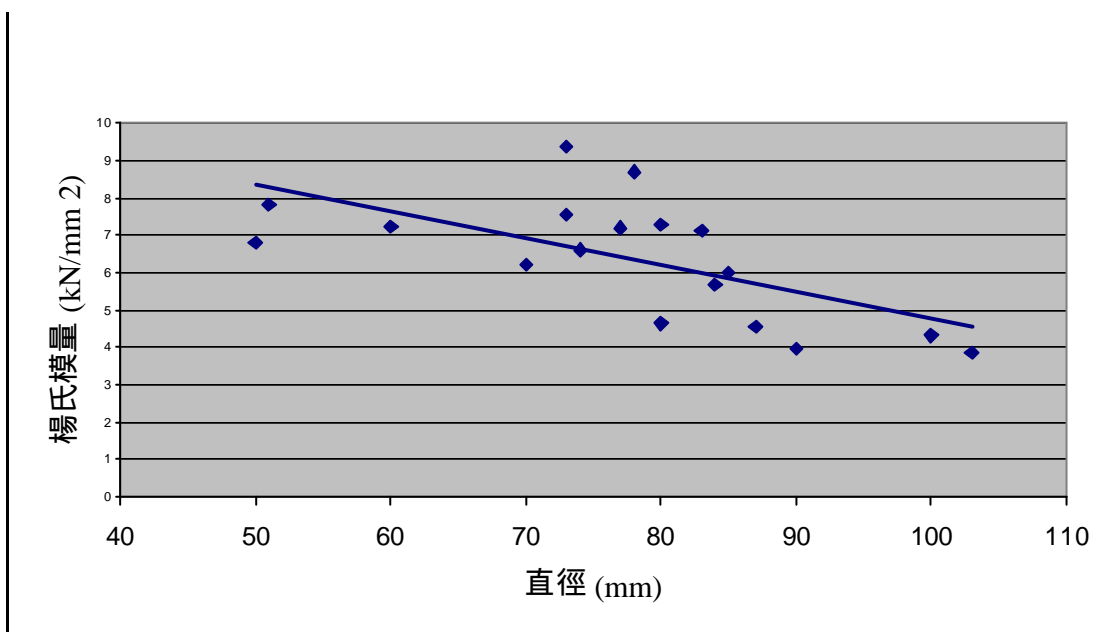


圖 2.2(d): 毛竹的楊氏模量與直徑的關係

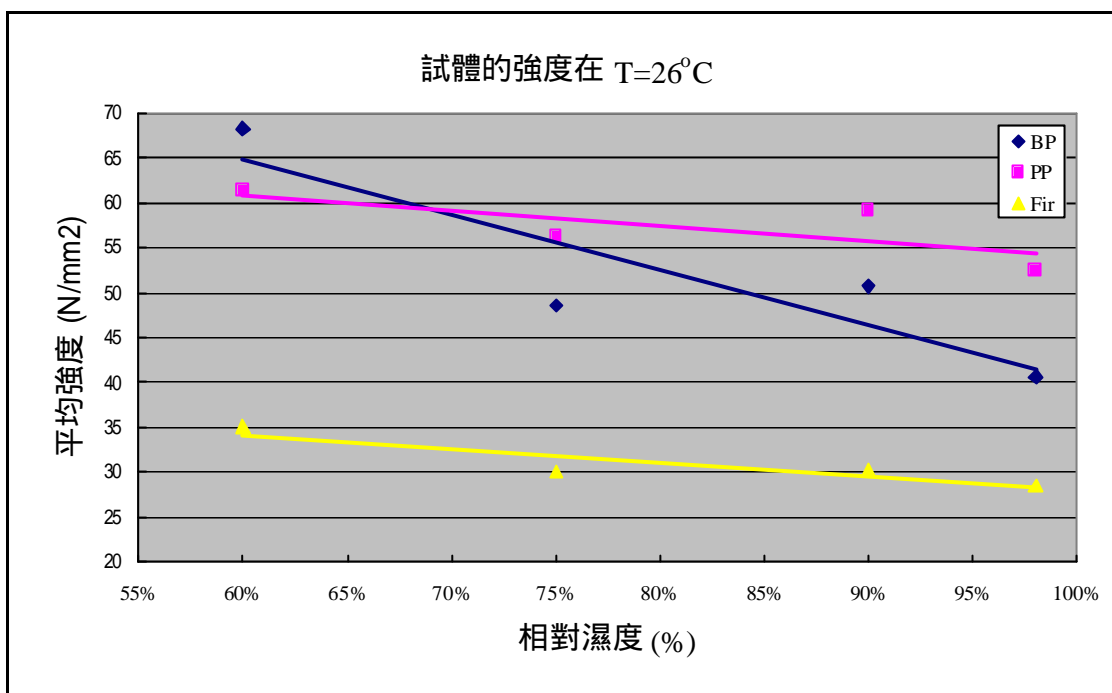


圖 2.3(a): 竹子在不同濕度下的強度

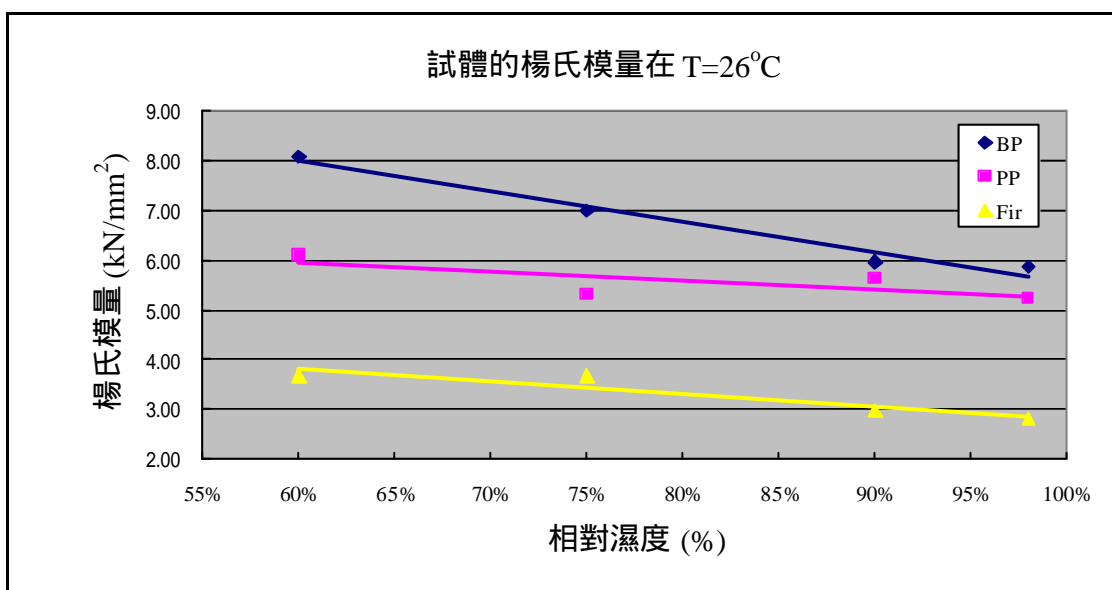


圖 2.3(b): 竹子在不同濕度下的楊氏模量

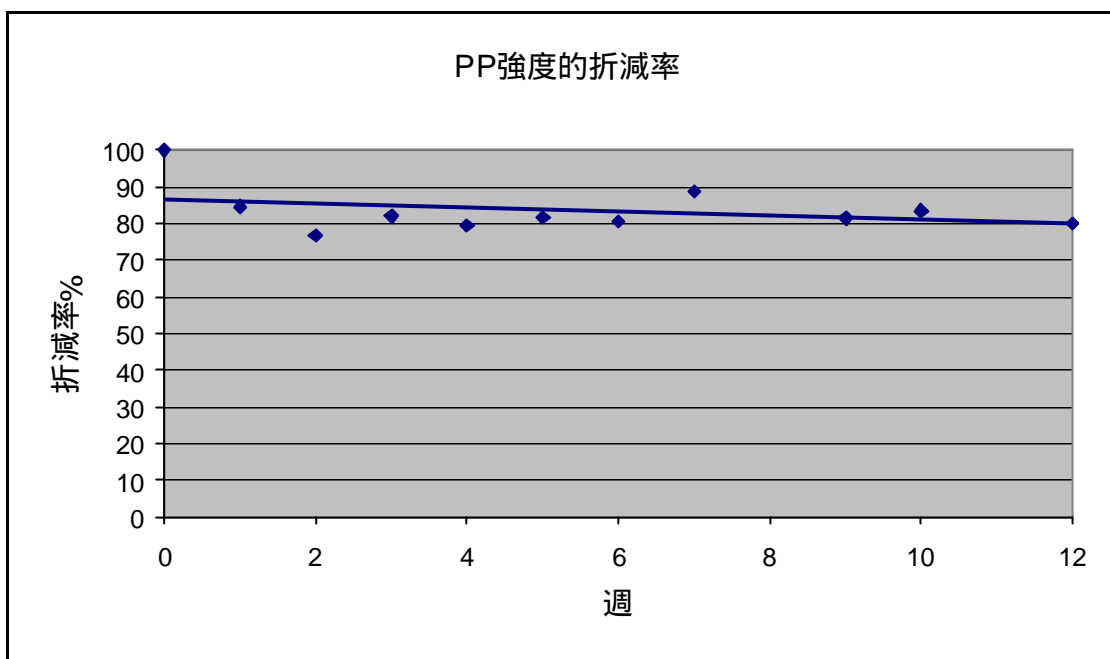


圖 2.4(a): 毛竹在老化作用下強度的減小

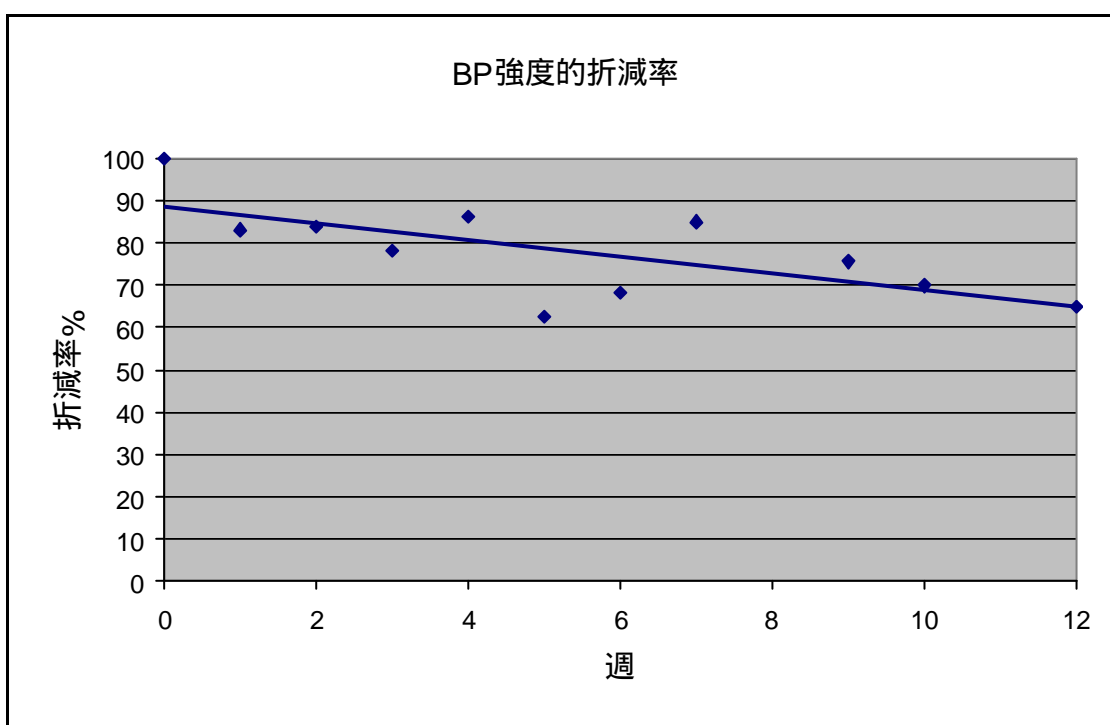


圖 2.4(b): 篙竹在老化作用下強度的減小



圖 2.5(a): 試驗前的末端情況



圖 2.5(b): 試驗後的末端情況

第三章: 固定繫帶及連接處的物料特性

3.1 固定繫帶的拉力試驗

尼龍繫帶的試驗綜合在表 3.1 中展示。結果顯示繫帶的強度大約是竹子的三倍，而它的楊氏模量大約是竹子的三分之一。高的加重速度會導致較高的繫帶特性值。

3.2 固定繫帶的潛變影響

試驗結果顯示於圖 3.1。在尼龍繫帶上加上 50 N 的張力荷載，固定繫帶的初始伸長量大約是 0.5 毫米，在 15 小時以後伸長量到達 3 毫米並趨於穩定。由 50 N 荷載引起的潛變大約是 3%。另一方面，在 100 N 的張力荷載下，初始伸長量是大約為 1 毫米，在 25 小時以後趨於穩定至 4.7 毫米。由 100 N 荷載引起的潛變大約是 5%。

3.3 固定繫帶在連接竹桿件時的張力試驗

固定繫帶在連接竹桿件時的平均張力大約是 23 N。這力量比在第 3.1 部分中獲得的 1135 N 的極限張力力量少得多，這說明在連接竹桿件時不太可能令尼龍繫帶斷裂。然而在固定繫帶中產生的平均張力力量預期會引起潛變行為，而潛變大約是 2 %。這個潛變預期會使竹桿件的連接隨時間而鬆馳。

3.4 竹棚架連接處的試驗

竹棚架連接處的試驗結果綜合在表 3.2。這四種連接類型的動摩擦力大約是 100 至 200 N，而旋轉剛度大約是 200 至 300 N-m/rad。這些結果在竹棚架的電腦分析方面很有用處。

表 3.1: 固定繫帶拉力試驗的總結

潛變率 (mm/min)	E (kN/mm ²)		極限荷載 (N)		強度 (N/mm ²)	
	平均值	標準差	平均值	標準差	平均值	標準差
8	1.80	0.08	1135.0	36.1	189.2	6.0
80	2.28	0.14	1162.0	98.6	193.7	16.4

表 3.2: 竹棚架連接處試驗的總結

	即時摩擦力 (N)		轉動勁度 (N m/rad)	
	平均值	標準差	平均值	標準差
BP-PP	170	11.3	262.6	6.3
PP-Fir	277	49	305.8	35.5
BP-Fir	94.7	27.2	200.3	34.8
BP-BP	151.3	35.6	220.1	25.4

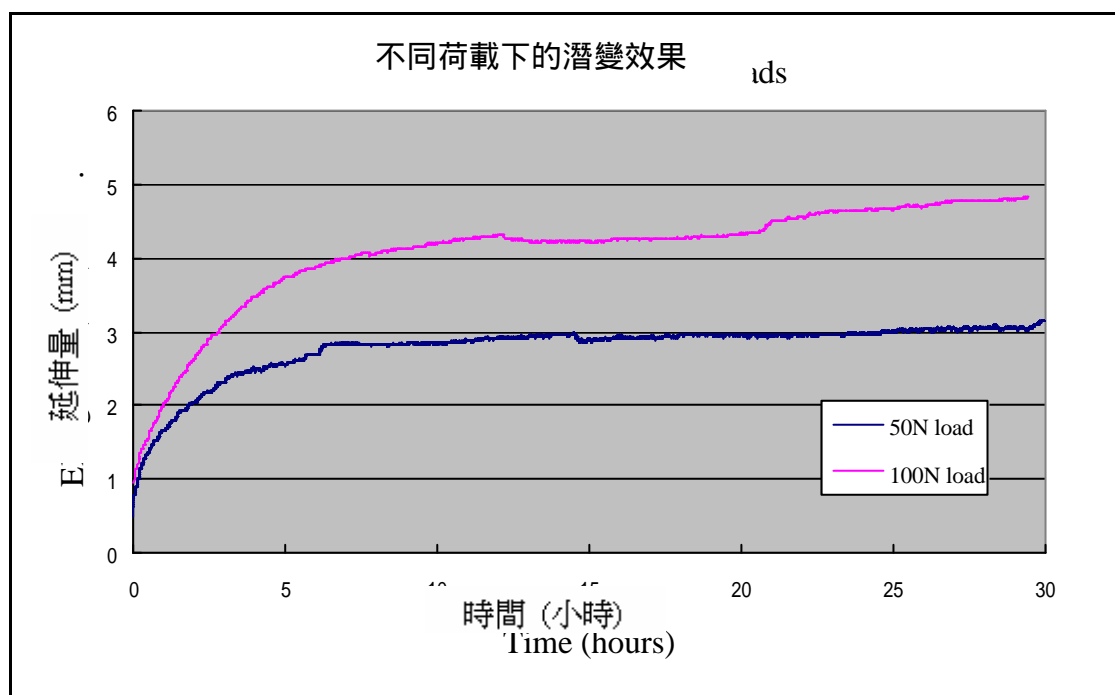


圖 3.1: 固定繫帶在潛變影響下的結果

第四章: 真實比例的棚架試驗

4.1 目的

真實比例的竹棚架測試目的是以試驗的方法驗證竹棚架在分佈荷載及衝力作用下的安全性及可靠性。

4.2 真實比例棚架的描述

用來測試的棚架是一個雙層棚架。其尺寸是 4.98m x 3.6m x 0.6m (高 x 長 x 厚)。每層有 7 枝直杆 (standard)，其中最外 2 枝是毛竹，中間 1 枝是木杉，其餘 4 枝是篙竹。此棚架有 2 個工作平台分別為於高 1.3m 及 4m 處。棚架的後層有 2 枝毛竹斜撐，前層則有 2 枝篙竹斜撐。圖 4.1 至 4.3 顯示這個棚架的狀況。

4.3 試驗器具

在此試驗中，必須使用以下的器具：應變傳感器 (圖 4.4(a))，拉力機 (圖 4.4(b))，數據機及電腦 (圖 4.4(c))及應力傳感器 (圖 4.4(d))。一共有 49 個應變傳感器裝置於直杆件各個不同位置 (圖 4.5, 4.6(a), 4.6(b))

4.4 平均分佈荷載試驗

4.4.1 試驗裝置

在勞工處所出版的<竹棚架工作安全守則>中，竹棚架所需承受的平均分佈荷載 (UDL) 是 3kN/m²。此試驗包含以下 7 種試驗情況：

1. 荷載施於下層工作平台
 - a. 5 kN 力 (UDL = 2.67 kN/m²)
 - b. 10 kN 力 (UDL = 5.35 kN/m²)

- c. 15 kN 力 ($UDL = 8.02 \text{ kN/m}^2$)
- 2. 荷載施於上層工作平台
 - a. 5 kN 力 ($UDL = 2.67 \text{ kN/m}^2$)
 - b. 10 kN 力 ($UDL = 5.35 \text{ kN/m}^2$)
- 3. 荷載同時施於上層及下層工作平台
 - a. 5 kN 力 ($UDL = 2.67 \text{ kN/m}^2$)
 - b. 10 kN 力 ($UDL = 5.35 \text{ kN/m}^2$)

每個試驗情況，我們做了 5 次不同的試驗。

4.4.2 試驗結果

平均分佈荷載試驗的結果綜合於表 4.1 (a) - (g)。根據這些結果，我們可以得到以下的結論：

1. 毛竹 (直杆 1 和 7) 和木杉 (直杆 4) 承受的力比篙竹 (直杆 2、3、5 和 6) 承受的為大。
2. 在相同的工作台上加平均分佈荷載，直杆所承受的力與平均分佈荷載大約成線性正比。
3. 在兩個工作台上加平均分佈荷載，直杆所承受的力大約等於在底部和在上層工作台上分別加荷載得到的直杆的力的相加。
4. 測量的應變標準差非常小，這證明試驗結果非常一致。
5. 當平均分佈荷載加至 5.35 kN/m^2 (或者拉力機的力量達到 10 kN) 時，竹棚架的任何一部分都見不到有明顯的變形或損害的跡象。當 15 kN 的力量 (或者平均荷載等於 8.02 kN/m^2) 加在下層工作平台時，可聽到竹棚架產生一些噪音，但當外力解除後，並沒有觀察到任何明顯的變形或損壞。
6. 在直杆產生的壓力比在第 2.1 部分中發現的抗壓強度少得多。這說明這些直杆不會因壓縮而損壞。
7. 依據第 2.5 部分的結果，一枝 0.6 米長的毛竹的壓屈荷載是 241 kN，這數值遠大於量測到直杆實際的荷載力，這代表這些直杆並不會產生壓屈破壞。

4.5 下墮荷載試驗

4.5.1 試驗裝置

下墮荷載試驗分為兩個部分: 1) 下墮時無平均荷載及 2) 下墮時有 3kN/m^2 的 UDL 各加於上下兩個平台。表 4.2 綜合所做試驗的數目及試驗位置。

4.5.2 試驗結果

表 4.3 及 4.4 綜合出下墮試驗的結果，其中表 4.3 (a) 及 (b) 展示了沒有平均分佈荷載下一個 20 公斤沙包的下墮試驗的結果，表 4.4 (a) 及 (b) 展示了在平均荷載 3kN/m^2 下一個 20 公斤沙包的下墮試驗的結果。從這些結果，能夠觀察到下面的結論：

1. 竹子的彎曲壓力比在第 2.4 部分中所找到的抗彎強度低得多。其比值約為 1 比 100。
2. 在下墮試驗中，直杆的垂直力量並不太明顯。大多數直杆都沒有承受垂直力。
3. 從表 4.3 (b) 中可以看到在沒有平均分佈荷載下，彎曲壓力通常集中在下墮的位置或鄰近位置。最高的彎曲壓力通常在下墮的位置出現。
4. 在位置 8 進行了一個 40 公斤沙包的下墮試驗，結果顯示在連接處產生很大下降。圖 4.7 和 4.8 展示了在下墮前後連接處的位置。連接處的下跌大約為 25 毫米。除了位置 8 外，鄰近位置亦有下跌。圖 4.9 和 4.10 顯示在位置 9 接合處的移位約為 20 毫米。
5. 當一個 40 公斤的沙包由位置 9 下墮，可以見到橫杆產生明顯的損壞 (見圖 4.11)。這說明這些橫杆不能負擔這樣的衝擊荷載。
6. 當一個 60 公斤的沙包由位置 10 下墮，可以見到橫杆產生了明顯的變形 (見圖 4.12 及 4.13)。這說明這些橫杆並不適合用於固定安全帶。

表 4.1(a): 5 kN 荷載施於下層工作平台的試驗結果

	直杆	應變 ($\times 10^{-6}$)		力 (kN)	
		平均值	標準差	平均值	標準差
前部	1 (PP)	-19.58	0.38	-0.26	0.01
	2 (BP)	-24.42	1.28	-0.12	0.01
	3 (BP)	-16.58	0.80	-0.08	0.00
	4 (Fir)	-24.67	0.76	-0.37	0.01
	5 (BP)	-5.08	1.28	-0.03	0.01
	6 (BP)	-21.50	3.97	-0.11	0.02
	7 (PP)	-20.00	2.10	-0.31	0.03
背部	1 (PP)	-46.83	2.02	-0.62	0.03
	2 (BP)	-17.67	1.15	-0.17	0.15
	3 (BP)	-11.58	1.01	-0.13	0.12
	4 (Fir)	-26.42	5.14	-0.17	0.47
	5 (BP)	1.92	0.80	0.02	0.01
	6 (BP)	-5.00	2.65	-0.02	0.01
	7 (PP)	-28.08	2.18	-0.37	0.03

表 4.1(b): 10 kN 荷載施於下層工作平台的試驗結果

	直杆	應變 ($\times 10^{-6}$)		力 (kN)	
		平均值	標準差	平均值	標準差
前部	1 (PP)	-36.17	2.25	-0.48	0.03
	2 (BP)	-58.17	7.77	-0.29	0.04
	3 (BP)	-35.50	2.78	-0.18	0.01
	4 (Fir)	-47.83	2.25	-0.72	0.03
	5 (BP)	-13.33	6.21	-0.07	0.03
	6 (BP)	-48.67	2.93	-0.24	0.01
	7 (PP)	-43.00	3.17	-0.57	0.04
背部	1 (PP)	-86.67	3.51	-1.15	0.05
	2 (BP)	-37.17	1.04	-0.18	0.01
	3 (BP)	-21.67	5.48	-0.11	0.03
	4 (Fir)	-63.00	5.63	-0.95	0.09
	5 (BP)	6.83	2.08	0.03	0.01
	6 (BP)	-10.17	2.57	-0.05	0.01
	7 (PP)	-47.17	6.45	-0.62	0.09

表 4.1(c): 15 kN 荷載施於下層工作平台的試驗結果

	直杆	應變 ($\times 10^{-6}$)		力 (kN)	
		平均值	標準差	平均值	標準差
前部	1 (PP)	-59	2.9	-0.78	0.04
	2 (BP)	-85.2	6.2	-0.42	0.03
	3 (BP)	-39	5.4	-0.19	0.03
	4 (Fir)	-66.2	4.3	-1.00	0.07
	5 (BP)	-20.4	7.2	-0.10	0.04
	6 (BP)	-74.3	3.8	-0.37	0.02
	7 (PP)	-64	4.9	-0.84	0.07
背部	1 (PP)	-124	8.4	-1.64	0.11
	2 (BP)	-57	4.0	-0.28	0.02
	3 (BP)	-32.7	4.8	-0.16	0.02
	4 (Fir)	-83.2	10.6	-1.25	0.16
	5 (BP)	7.3	4.9	0.04	0.02
	6 (BP)	-12.2	4.6	-0.06	0.02
	7 (PP)	-72	8.1	-0.95	0.11

表 4.1(d): 5 kN 荷載施於上層工作平台的試驗結果

	直杆	應變 ($\times 10^{-6}$)		力 (kN)	
		平均值	標準差	平均值	標準差
前部	1 (PP)	-13.50	2.0	-0.18	0.03
	2 (BP)	-23.83	5.7	-0.12	0.03
	3 (BP)	-22.00	3.5	-0.18	0.11
	4 (Fir)	-21.17	1.0	-0.32	0.02
	5 (BP)	-13.17	1.5	-0.07	0.01
	6 (BP)	-23.00	4.3	-0.11	0.02
	7 (PP)	-12.40	1.2	-0.15	0.02
背部	1 (PP)	-19.17	5.0	-0.25	0.07
	2 (BP)	-11.67	4.5	-0.06	0.02
	3 (BP)	-9.17	3.5	-0.05	0.02
	4 (Fir)	-34.00	2.3	-0.51	0.03
	5 (BP)	-31.17	2.3	-0.15	0.01
	6 (BP)	-98.67	3.5	-0.49	0.02
	7 (PP)	-7.50	5.3	-0.10	0.07

表 4.1(e): 10 kN 荷載施於上層工作平台的試驗結果

	直杆	應變 ($\times 10^{-6}$)		力 (kN)	
		平均值	標準差	平均值	標準差
前部	1 (PP)	-25.50	2.0	-0.34	0.03
	2 (BP)	-49.83	3.7	-0.25	0.02
	3 (BP)	-42.83	2.3	-0.26	0.07
	4 (Fir)	-44.33	2.8	-0.67	0.04
	5 (BP)	-24.50	0.5	-0.12	0.00
	6 (BP)	-44.33	5.8	-0.22	0.03
	7 (PP)	-25.04	4.1	-0.35	0.04
背部	1 (PP)	-13.50	31.7	-0.18	0.42
	2 (BP)	-33.00	3.9	-0.16	0.02
	3 (BP)	-29.83	2.3	-0.15	0.01
	4 (Fir)	-66.50	7.3	-1.00	0.11
	5 (BP)	-58.67	3.2	-0.29	0.02
	6 (BP)	-166.83	3.5	-0.83	0.02
	7 (PP)	-18.33	10.6	-0.24	0.14

表 4.1(f): 5 kN 荷載同時施於上層及下層工作平台

	直杆	應變 ($\times 10^{-6}$)		力 (kN)	
		平均值	標準差	平均值	標準差
前部	1 (PP)	-38.17	3.06	-0.50	0.04
	2 (BP)	-54.83	3.06	-0.27	0.02
	3 (BP)	-43.50	4.58	-0.22	0.02
	4 (Fir)	-44.33	1.04	-0.67	0.02
	5 (BP)	-21.50	0.87	-0.11	0.00
	6 (BP)	-44.00	6.14	-0.23	0.00
	7 (PP)	-33.33	2.71	-0.43	0.03
背部	1 (PP)	-43.33	17.90	-0.81	0.03
	2 (BP)	-38.00	3.97	-0.20	0.04
	3 (BP)	-26.00	3.00	-0.13	0.03
	4 (Fir)	-35.00	15.55	-0.63	0.10
	5 (BP)	-36.33	1.76	-0.18	0.01
	6 (BP)	-69.33	19.81	-0.51	0.11
	7 (PP)	-34.33	3.79	-0.45	0.05

表 4.1(g): 10 kN 荷載同時施於上層及下層工作平台

	直杆	應變 ($\times 10^{-6}$)		力 (kN)	
		平均值	標準差	平均值	標準差
前部	1 (PP)	-71.00	2.18	-0.94	0.03
	2 (BP)	-113.17	6.29	-0.56	0.03
	3 (BP)	-78.83	7.52	-0.39	0.04
	4 (Fir)	-86.00	5.68	-1.30	0.09
	5 (BP)	-40.83	2.02	-0.20	0.01
	6 (BP)	-86.00	10.48	-0.46	0.00
	7 (PP)	-65.1	2.37	-0.89	0.03
背部	1 (PP)	-43.33	17.90	-1.57	0.08
	2 (BP)	-38.00	3.97	-0.39	0.03
	3 (BP)	-26.00	3.00	-0.31	0.02
	4 (Fir)	-35.00	15.55	-1.25	0.20
	5 (BP)	-36.33	1.76	-0.32	0.02
	6 (BP)	-69.33	19.81	-0.83	0.07
	7 (PP)	-34.33	3.79	-0.92	0.03

表 4.2: 下墮試驗的數目及試驗位置

位置	試驗			
	20kg 沙包	20kg 沙包 加上 3kN/m ² UDL	40kg 沙包	60kg 沙包
1	5 次	5 次		
2	5 次	5 次		
3	5 次	5 次		
4	5 次	5 次		
5	5 次	5 次		
6	5 次	5 次		
7	5 次	5 次		
8			5 次	
9			1 次(構件損壞)	
10				1 次(構件損壞)

表 4.3(a): 沒有平均分佈荷載下一個 20 公斤沙包的下墮試驗的彎曲應變 ($\times 10^{-6}$)

	直杆	位置 1	位置 2	位置 3	位置 4	位置 5	位置 6	位置 7
前部	1 (PP)	18.42	36.85	18.43	0.00	36.85	0.00	27.64
	2 (BP)	27.64	36.85	9.21	9.21	27.64	18.43	27.64
	3 (BP)	27.64	46.06	18.43	9.21	46.06	9.21	18.43
	4 (Fir)	0.00	0.00	9.21	92.13	27.64	0.00	27.64
	5 (BP)	9.21	9.21	9.21	27.64	9.21	0.00	18.42
	6 (BP)	0.00	55.28	18.43	18.43	9.21	9.21	9.21
	7 (PP)	9.21	0.00	0.00	18.43	18.43	0.00	9.21
背部	1 (PP)	36.85	36.85	0.00	9.21	0.00	0.00	9.21
	2 (BP)	9.21	36.85	9.21	18.43	18.42	9.21	9.21
	3 (BP)	18.42	9.21	55.28	9.21	46.06	9.21	18.43
	4 (Fir)	9.21	18.43	73.71	175.05	9.21	0.00	9.21
	5 (BP)	9.21	0.00	0.00	0.00	27.64	36.85	9.21
	6 (BP)	9.21	9.21	9.21	18.43	27.64	110.59	36.85
	7 (PP)	36.86	9.22	18.43	9.21	46.06	9.21	46.06

表 4.3(b): 沒有平均分佈荷載下一個 20 公斤沙包的下墮試驗的彎曲壓力 (N/mm^2)

	直杆	位置 1	位置 2	位置 3	位置 4	位置 5	位置 6	位置 7
前部	1 (PP)	0.11	0.22	-0.11	0.00	-0.22	0.00	-0.17
	2 (BP)	0.19	0.26	-0.06	0.06	-0.19	0.13	-0.19
	3 (BP)	-0.19	-0.32	0.13	0.06	0.32	0.06	0.13
	4 (Fir)	0.00	0.00	0.03	0.28	-0.08	0.00	0.08
	5 (BP)	-0.06	0.06	-0.06	0.19	-0.06	0.00	-0.13
	6 (BP)	0.00	-0.39	-0.13	0.13	0.06	0.06	-0.06
	7 (PP)	0.06	0.00	0.00	0.11	-0.11	0.00	-0.06
背部	1 (PP)	0.22	0.22	0.00	0.06	0.00	0.00	0.06
	2 (BP)	0.06	0.26	0.06	0.13	0.13	0.06	0.06
	3 (BP)	-0.13	-0.06	0.39	0.06	0.32	0.06	0.13
	4 (Fir)	0.03	0.06	0.22	0.53	-0.03	0.00	0.03
	5 (BP)	-0.06	0.00	0.00	0.00	-0.19	-0.26	0.06
	6 (BP)	-0.06	0.06	-0.06	0.13	0.19	-0.77	-0.26
	7 (PP)	0.22	0.06	-0.11	0.06	-0.28	0.06	-0.28

表 4.4(a):在平均分佈荷載 3 kN/m^2 下一個 20 公斤沙包的下墮試驗的彎曲應變 ($\times 10^{-6}$)

	直杆	位置 1	位置 2	位置 3	位置 4	位置 5	位置 6	位置 7
前部	1 (PP)	-4.22	9.21	-51.07	0.00	-73.69	-32.64	-50.28
	2 (BP)	0.21	18.42	-18.64	0.00	-73.69	9.00	-55.07
	3 (BP)	3.00	-18.42	43.07	-27.63	-92.12	33.85	49.07
	4 (Fir)	-32.64	-27.64	-13.43	-9.21	9.21	-22.64	-5.00
	5 (BP)	-46.28	-36.85	-64.28	9.22	9.21	-55.07	-55.49
	6 (BP)	-25.03	-82.91	-48.66	18.43	27.64	-21.02	-34.25
	7 (PP)	21.43	9.21	6.21	0.00	-9.21	6.21	3.00
背部	1 (PP)	67.89	64.49	24.24	18.43	-9.21	24.24	40.25
	2 (BP)	68.29	92.12	60.69	9.21	-36.85	60.69	68.29
	3 (BP)	31.84	36.86	97.14	27.64	-64.48	51.08	68.69
	4 (Fir)	4.60	9.21	59.90	9.24	9.21	-13.81	4.60
	5 (BP)	-31.85	-27.64	-32.64	46.07	36.85	-69.49	-13.43
	6 (BP)	-68.32	-55.29	-79.11	-46.06	-9.21	-180.50	-95.95
	7 (PP)	15.02	-18.42	-51.86	18.43	101.36	-24.22	-67.90

表 4.4(b): 在平均分佈荷載 3 kN/m^2 下一個 20 公斤沙包的下墮試驗的彎曲壓力 (N/mm^2)

	直杆	位置 1	位置 2	位置 3	位置 4	位置 5	位置 6	位置 7
前部	1 (PP)	-0.03	0.06	-0.31	0.00	-0.44	-0.20	-0.30
	2 (BP)	0.00	0.13	-0.13	0.00	-0.52	0.06	-0.39
	3 (BP)	0.02	-0.13	0.30	-0.19	-0.64	0.24	0.34
	4 (Fir)	-0.10	-0.08	-0.04	-0.03	0.03	-0.07	-0.02
	5 (BP)	-0.32	-0.26	-0.45	0.06	0.06	-0.39	-0.39
	6 (BP)	-0.18	-0.58	-0.34	0.13	0.19	-0.15	-0.24
	7 (PP)	0.13	0.06	0.04	0.00	-0.06	0.04	0.02
背部	1 (PP)	0.41	0.39	0.15	0.11	-0.06	0.15	0.24
	2 (BP)	0.48	0.64	0.42	0.06	-0.26	0.42	0.48
	3 (BP)	0.22	0.26	0.68	0.19	-0.45	0.36	0.48
	4 (Fir)	0.01	0.03	0.18	0.03	0.03	-0.04	0.01
	5 (BP)	-0.22	-0.19	-0.23	0.32	0.26	-0.49	-0.09
	6 (BP)	-0.48	-0.39	-0.55	-0.32	-0.06	-1.26	-0.67
	7 (PP)	0.09	-0.11	-0.31	0.11	0.61	-0.15	-0.41



圖 4.1: 竹棚架的前視圖



圖 4.2: 竹棚架的側視圖

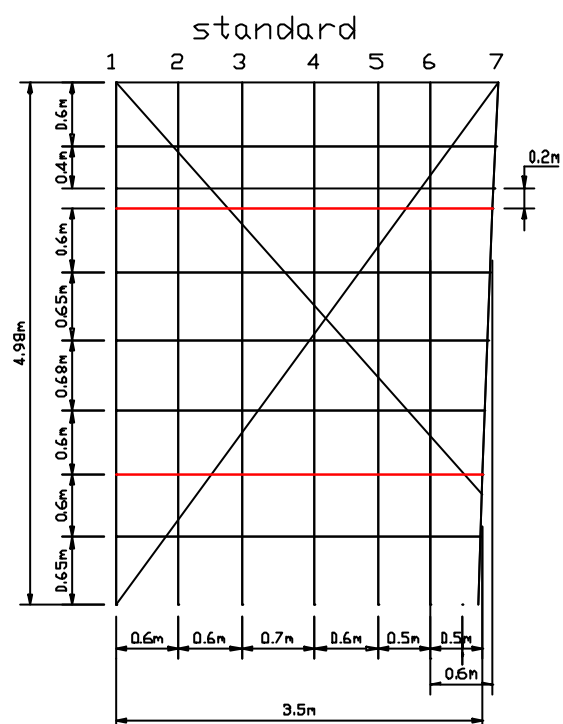


圖 4.3: 竹棚架的尺寸圖

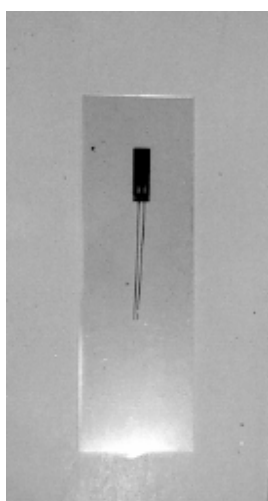


圖 4.4(a): 應變傳感器

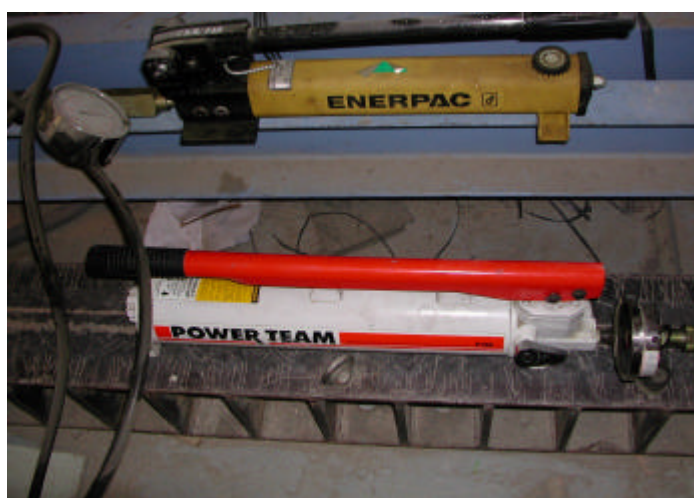


圖 4.4(b): 拉力機

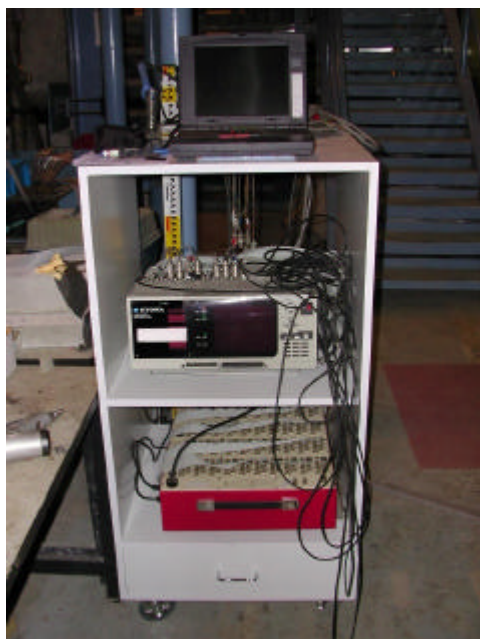


圖 4.4(c): 數據機及電腦



圖 4.4(d): 應力傳感器



圖 4.5: 毛竹上的應變傳感器

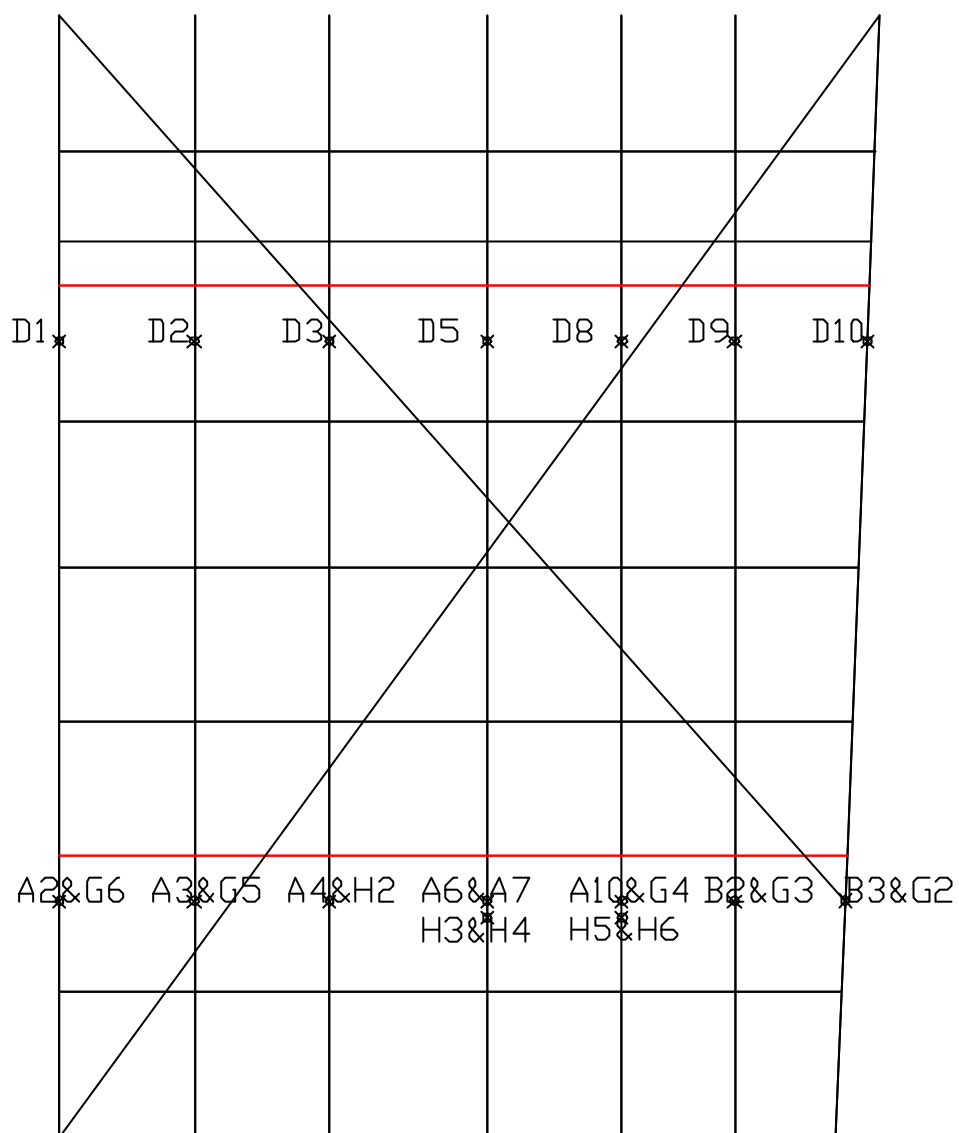


圖 4.6(a): 在前方直杆上的應變傳感器的位置

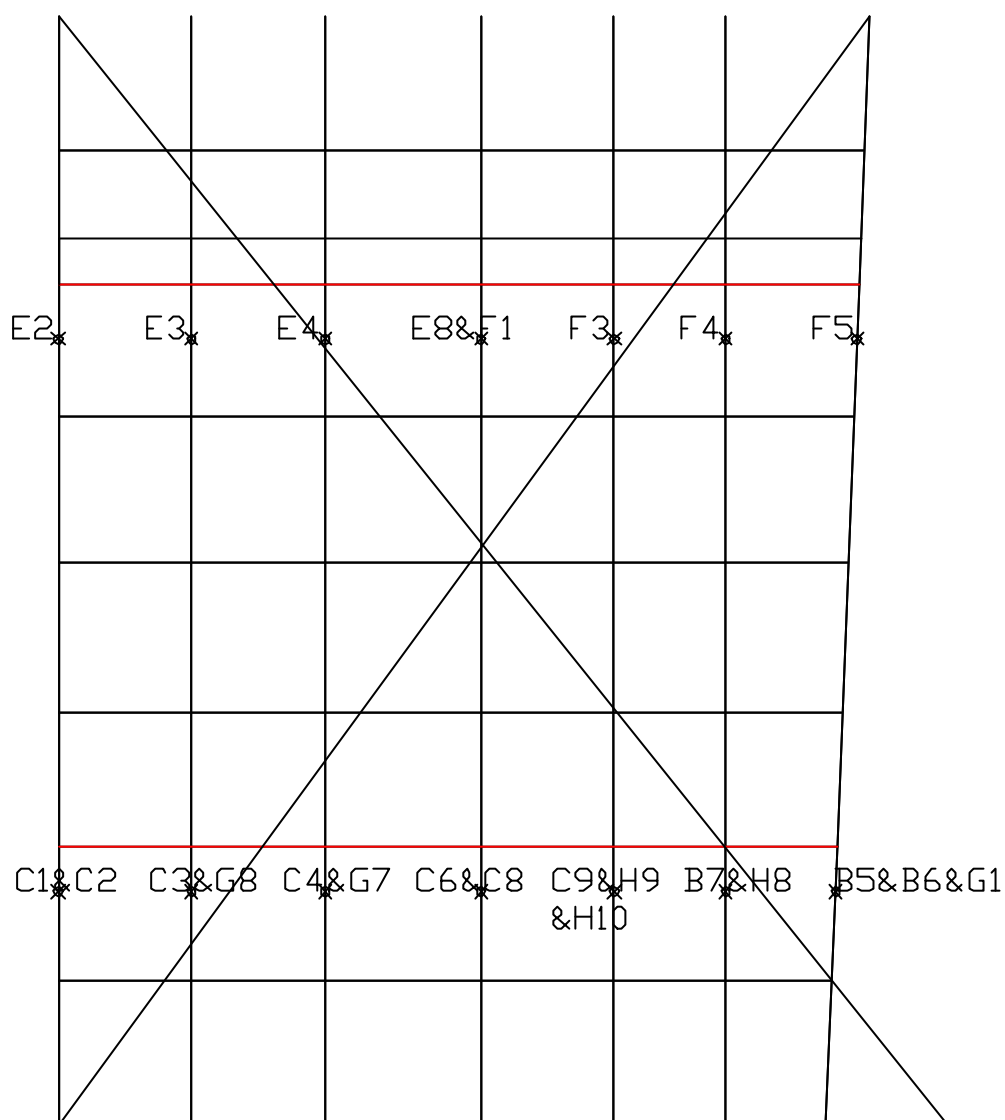


圖 4.6(b): 在後方直杆上的應變傳感器的位置



圖 4.7: 40 kg 沙包下墮前的情形



圖 4.8: 40 kg 沙包下墮後的情形



圖 4.9: 40 kg 沙包在中央的直杆下墮前位置 9 的情形



圖 4.10: 40 kg 沙包在中央的直杆下墮後位置 9 的情形



圖 4.11: 橫杆在位置 9 損壞



圖 4.12: 安全帶繫在位置 10 上

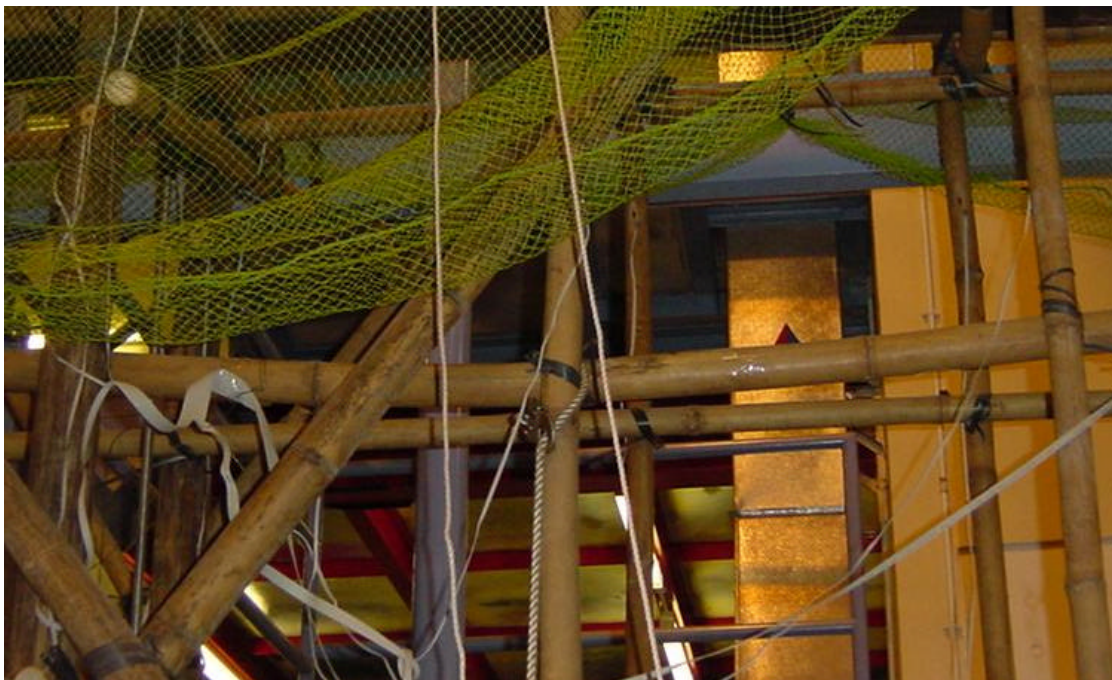


圖 4.13: 在 60 kg 沙包下墮後橫杆在位置 10 損壞

第五章: 試驗與有限元分析的比較

5.1 有限元模型的描述

在此部，我們使用有限元程式 SAP2000 來模擬竹棚架在平衡荷載及下墮荷載下的情況。我們使用線性非等方性框架單元來模擬各個竹桿件，用非線性鉤單元來模擬桿件連接處。這個有限元的模型可見於圖 5.1。

5.2 試驗與有限元分析的比較

5.2.1 平均分佈荷載試驗的比較

表 5.1 比較了有限元分析的直桿力和試驗測量的結果。根據這些比較，可以觀察到下面的結果：

1. 兩個結果都顯示毛竹和木杉比篙竹荷載更多的力。
2. 就毛竹和木杉而言，有限元分析的結果及試驗結果的差別並不大，約略為 10 至 20% 左右。
3. 兩個結果都顯示甚至當平均分佈荷載超過了設計值的二倍時，棚架的直杆都不會產生損壞。

5.2.2 下墮荷載試驗的比較

表 5.2 (a) 和 (b) 分別展示兩個相似的比較，它們分別在位置 3 和 4 丟下一個 20 公斤的沙包。從這些結果，能夠得到下面的觀察：

1. 儘管兩個結果之間有些差別，但兩者的彎矩都是同一個數位。
2. 除了與下墮的沙包直接相連的篙竹外，在毛竹和木杉中的彎矩比在篙竹中的為高。
3. 這些彎矩看來損壞不了這些直杆，也不會損害整體棚架。

4. 一個沙包的自由下墮產生的損壞影響似乎是局部性的，這可能導連接位的滑移和/或水平大橫杆斷裂。當沙包的重量超過 40 公斤時，在實驗室中可觀察到大橫杆的損壞。

5.3 真實比例棚架的安全性及可靠性分析

在本研究中，棚架的安全性及可靠性的認定是依據一個量化指標 - 安全指數。此安全指數的定義是：

$$\text{安全指數} = \frac{\text{物料特性強度值}}{\text{量測或分析值}}$$

當安全指數小於 1 時，即量測或分析值大於物料特性強度值，代表棚架在此情況下已損壞。另一方面愈大的安全指數，代表棚架越安全。

表 5.3 及 5.4 顯示棚架在平均荷載作用下的安全性和可靠性分析。而表 5.5 及 5.6 顯示棚架在下墜荷載下的安全性和可靠性分析。根據這些分析結果，我們可以得到以下的結論：

- (1) 在設計平均分佈荷載作用下，預期小橫杆和直杆都不會損壞。小橫杆的安全指數在 4 到 7 之間，而直杆的安全指數則在 70 到 90 之間。
- (2) 在下墜力的作用下，連接直杆和大橫杆的固定繫帶預期會在一個 20 公斤的重量的自由下墜中滑動。同樣，大橫杆預期會在一個重量由 40 到 60 公斤之間的物體產生的下墜力作用下損壞。
- (3) 由下墜力產生的損害是非常局部性。雖然大橫杆在下墜力作用下可能損壞，但是直杆在 60 公斤的自由下墜作用下仍顯得非常安全。

表 5.1: 有限元分析與試驗結果的比較 (平均分佈荷載等於 8.02 kN/m²)

背部	有限元 (kN)	實驗 (kN)	差值	前部	有限元 (kN)	實驗 (kN)	差值
1 (PP)	-1.23	-1.64	0.41	1 (PP)	-0.73	-0.78	0.05
2 (BP)	-0.75	-0.28	-0.47	2 (BP)	-0.71	-0.42	-0.29
3 (BP)	-0.74	-0.16	-0.58	3 (BP)	-0.68	-0.19	-0.49
4 (Fir)	-1.38	-1.25	-0.13	4 (Fir)	-1.22	-1.00	-0.22
5 (BP)	-0.57	0.04	-0.61	5 (BP)	-0.48	-0.10	-0.38
6 (BP)	-0.51	-0.06	-0.45	6 (BP)	-0.47	-0.37	-0.1
7 (PP)	-0.97	-0.95	-0.02	7 (PP)	-1.09	-0.84	-0.25

表 5.2(a): 在位置 3 的下墮試驗結果

背部	有限元 (N-m)	實驗 (N-m)	差值	前部	有限元 (N-m)	實驗 (N-m)	差值
1 (PP)	2.32	0.00	2.32	1 (PP)	1.74	3.80	-2.06
2 (BP)	1.41	0.47	0.94	2 (BP)	0.92	0.47	0.45
3 (BP)	5.19	2.80	2.39	3 (BP)	1.11	0.93	0.18
4 (Fir)	10.05	11.12	-1.07	4 (Fir)	4.11	1.39	2.72
5 (BP)	1.05	0.00	1.05	5 (BP)	0.84	0.47	0.37
6 (BP)	0.91	0.47	0.44	6 (BP)	0.73	0.93	-0.20
7 (PP)	1.85	3.80	-1.95	7 (PP)	1.65	0.00	1.65

表 5.2(b): 在位置 4 的下墮試驗結果

背部	有限元 (N-m)	實驗 (N-m)	差值	前部	有限元 (N-m)	實驗 (N-m)	差值
1 (PP)	1.70	1.90	-0.20	1 (PP)	1.50	0.00	1.50
2 (BP)	1.09	0.93	0.16	2 (BP)	0.91	0.47	0.44
3 (BP)	1.20	0.47	0.73	3 (BP)	0.95	0.47	0.48
4 (Fir)	18.30	26.40	-8.10	4 (Fir)	9.21	13.89	-4.68
5 (BP)	1.16	0.00	1.16	5 (BP)	1.04	1.40	-0.36
6 (BP)	1.12	0.93	0.19	6 (BP)	1.05	0.93	0.12
7 (PP)	2.10	1.90	0.20	7 (PP)	1.80	3.80	-2.00

表 5.3: 小橫杆在平均分佈荷載下的安全性和可靠性

UDL (kN/m ²)	小橫杆上之最大應力 (N/mm ²)	平均強度= 80.7N/mm ²		低於 95% 強度 = 49N/mm ²	
		> 平均值	安全係數	> 95%	安全係數
3	12.1	No	7.0	No	4.0
6	24.2	No	3.5	No	2.0
9	36.3	No	2.3	No	1.3
12	48.4	No	1.8	No	1.0
15	60.6	No	1.4	Yes	< 1.0
18	72.7	No	1.2	Yes	< 1.0
21	84.8	Yes	< 1.0	Yes	< 1.0

表 5.4: 直杆在平均分佈荷載 3 kN/m^2 施於下層平台時的安全性和可靠性

		直杆力 (kN)	安全係數	
			壓屈強度	壓力強度
前直杆	1 (PP)	0.41	377.3	303.8
	2 (BP)	0.41	72.2	98.3
	3 (BP)	0.39	75.9	103.3
	4 (Fir)	0.70	155.4	162.8
	5 (BP)	0.37	80.0	108.9
	6 (BP)	0.33	89.7	122.1
	7 (PP)	0.63	245.6	197.7
後直杆	1 (PP)	0.70	221.0	177.9
	2 (BP)	0.43	68.8	93.7
	3 (BP)	0.43	68.8	93.7
	4 (Fir)	0.79	137.7	144.3
	5 (BP)	0.28	105.7	143.9
	6 (BP)	0.27	109.6	149.2
	7 (PP)	0.55	281.3	226.5

表 5.5: 大橫杆在下墮力下的安全性和可靠性 (簡單支撐)

下墮重量 (kg)	大橫杆之最大 應力 (N/mm^2)	平均強度 = 80.7 N/mm^2		低於 95% 強度 = 49 N/mm^2	
		> 平均值	安全係數	> 95%	安全係數
20	105.6	Yes	<1.0	Yes	<1.0
40	159.4	Yes	<1.0	Yes	<1.0
60	202.9	Yes	<1.0	Yes	<1.0

表 5.6: 大橫杆在下墮力下的安全性和可靠性 (緊固支撐)

下墮重量 (kg)	大橫杆之最大 應力 (N/mm^2)	平均強度 = 80.7 N/mm^2		低於 95% 強度 = 49 N/mm^2	
		> 平均值	安全係數	> 95%	安全係數
20	52.8	No	1.5	Yes	<1.0
40	79.7	No	1.0	Yes	<1.0
60	101.5	Yes	<1.0	Yes	<1.0

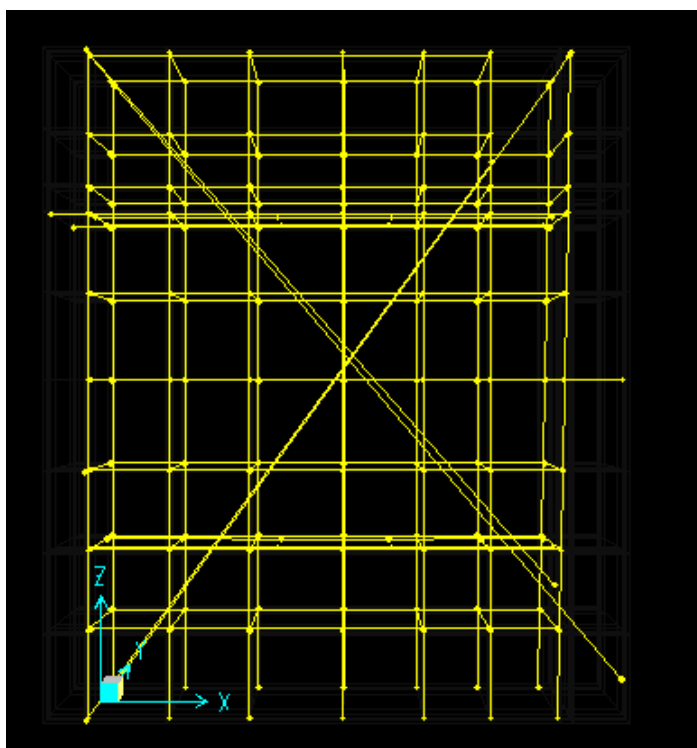


圖 5.1: 竹棚架的有限元模型

第六章: 一些常見棚架的有限元分析

6.1 建築地盤使用的竹棚架

被選定用來作分析的建築棚架位於深井，請見圖 6.1 至 6.3。棚架的尺寸為 9.6 m x 12 m x 0.6 m (長 x 高 x 寬)。表 6.1 及 6.2 顯示此棚架在平均荷載下的安全性和可靠性分析。而表 6.3 則顯示此棚架在 5 kN 下墮力作用下的安全性和可靠性分析。根據這些分析結果我們可以得到以下的結論：

- (1) 在設計平均分佈荷載作用下，預期小橫杆和直杆都不會損壞。小橫杆的安全指數在 4.4 到 7.2 之間，而直杆的安全指數在 12 到 69.2 之間。
- (2) 在下墮力的作用下，連接直杆和大橫杆的固定繫帶預期會在一個 20 公斤的重量的自由下墜中滑動。同樣，大橫杆預期會在一個重量由 40 到 60 公斤之間的物體產生的下墮力作用下損壞。
- (3) 由下墮力產生的損害是非常局部性。雖然大橫杆在下墮力作用下可能損壞，但是直杆在 60 公斤的自由下墜作用下仍顯得非常安全。

6.2 維修用的竹棚架

被選定用來作分析的維修棚架位於科技大學校園內，請見圖 6.4 至 6.6。表 6.4 及 6.5 顯示此棚架在平均荷載及下墮荷載作用下的安全性和可靠性分析。根據這些分析結果，我們可以得到以下的結論：

- (1) 在設計平均分佈荷載作用下，預期小橫杆和直杆都不會損壞。小橫杆的安全指數在 4.4 到 7.2 之間，而直杆的安全指數在 10.9 到 77.9 之間。
- (2) 在下墮力的作用下，連接直杆和大橫杆的固定繫帶預期會在一個 20 公斤的重量的自由下墜中滑動。同樣，大橫杆預期會在一個重量由 40 到 60 公斤之間的物體產生的下墮力作用下損壞。
- (3) 由下墮力產生的損害是非常局部性。雖然大橫杆在下墮力作用下可能損壞，但是直杆在 60 公斤的自由下墜作用下仍顯得非常安全。

表 6.1: 小橫杆在平均分佈荷載下的安全性和可靠性

UDL (kN/m ²)	小橫杆上之最大應力 (N/mm ²)	平均強度= 80.7N/mm ²		低於 95% 強度 = 49N/mm ²	
		> 平均值	安全係數	> 95%	> 平均值
3	11.2	No	7.2	no	4.4
6	22.4	No	3.6	no	2.2
9	33.5	No	2.4	no	1.5
12	44.7	No	1.8	no	1.1
15	55.9	No	1.4	yes	< 1.0
18	67.1	No	1.2	yes	< 1.0
21	78.3	No	1.0	yes	< 1.0
24	89.4	Yes	< 1.0	yes	< 1.0

表 6.2: 平均分佈荷載 3 kN/m² 施於建築地盤使用的竹棚架下層平台時直杆的安全性和可靠性

		直杆力 (kN)	安全係數	
			壓屈強度	壓力強度
後直杆	1 (PP)	0.9	23.9	138.4
	2 (PP)	1.7	12.7	73.3
	3 (PP)	1.8	12.0	69.2
	4 (PP)	1.7	12.7	73.3
	5 (PP)	0.8	26.9	155.7

表 6.3: 在 5 kN 下墮力施於建築地盤使用的竹棚架時直杆的安全性和可靠性

		直杆力 (kN)	安全係數	
			壓屈強度	壓力強度
前直杆	5 (PP)	0.6	302.7	194.6
	6 (BP)	0.9	40.4	46.8
	7 (BP)	1.3	26.5	30.8
	8 (BP)	0.8	44.0	51.0
	9 (PP)	0.6	345.9	222.4

表 6.4: 平均分佈荷載 3 kN/m² 施於維修使用的竹棚模型下層平台時直杆的安全性和可靠性

		直杆力 (kN)	安全係數	
			壓屈強度	壓力強度
後直杆	1 (PP)	0.5	34.9	249.1
	2 (PP)	1.1	15.8	113.2
	3 (PP)	1.0	17.4	124.6
	4 (PP)	1.6	10.9	77.9
	5 (PP)	1.3	13.4	95.8
	6 (PP)	1.1	15.7	112.2
	7 (PP)	1.1	16.6	118.6
	8 (PP)	1.1	15.4	110.2
	9 (PP)	1.0	17.1	122.1
	10 (PP)	0.6	31.7	226.5

表 6.5: 在 5 kN 下墮力施於維修使用的竹棚模型時直杆的安全性和可靠性

		直杆力 (kN)	安全係數	
			壓屈強度	壓力強度
前直杆	5 (PP)	0.2	144.8	167.9
	6 (BP)	1.1	177.7	114.3
	7 (BP)	0.9	37.0	42.9
	8 (BP)	1.2	168.4	108.3
	9 (PP)	0.3	112.1	130.0



圖 6.1: 位於深井的竹棚架



圖 6.2: 斜蓬與結構支撐



圖 6.3: 位於深井的竹棚架的近照



圖 6.4: 位於科技大學內的竹棚架



圖 6.5: 位於科技大學內的竹棚架的底部



圖 6.6: 位於科技大學內的竹棚架的近照

第七章: 結論和建議

從這個研究得到的結論和建議如下。

1. 一般使用的竹子包括篙竹，毛竹和木杉，它們的物料特性都如同第 2 章顯示那樣有很大的變化。其中楊氏模量的標準差大約是它平均值的 30%，而抗壓強度的標準差大約是它平均值的 20%。竹子的尺寸也有很大的變化。竹子直徑的標準差大約為篙竹平均值的 10%，毛竹平均值的 20%，和木杉平均值的 7%。
2. 當相對濕度增加時，竹子的物料特性值將會減小。這個減小的傾向大約是線性的。其中以篙竹的跌幅最為明顯。一個為期 12 星期的老化測驗也發現竹子的特性會隨著時間而線性減少。同樣地，篙竹的跌幅比毛竹的明顯。
3. 壓屈試驗顯示出竹子的壓屈荷載比將兩端採取緊固支撐所獲得的為低。如要較為準確的估算竹子的最低壓屈荷載，我們要假設竹子兩端為簡單支撐。
4. 在真實尺寸的棚架測試結果顯示，在比設計的分佈荷載 (3 kN/m^2) 大兩倍的情況下，棚架都沒有明顯的損害。這顯示棚架在設計分佈荷載下非常安全。
5. 下墮試驗結果顯示由一個 20 公斤的沙包自由下墮在直杆產生的力比直杆本身的強度小很多。在線性假定下，甚至當沙包的重量增加到三倍時，預期直杆都不會損壞。但在連接這個沙包的大橫杆處則觀察到有明顯的下降。當使用 40 公斤和 60 公斤的沙包時，大橫杆甚至會出現斷裂的情況。分析結果顯示在一個 20 公斤的沙包的自由下墮期間，它所產生的最大動態力遠超過竹子連接處的動摩擦力，因而產生大橫杆的滑降。同樣，這個最大力也可能因超過竹子的彎曲強度而引致大橫杆的斷裂。這些結果顯示，竹棚架連接處並不適合用做固定安全帶。為了確保施工人員的安全，有必要將安全帶繫於一個永久的建築物或者獨立而安全的救生繩上。
6. 試驗和有限元分析的結果存在一些差別。然而，主要桿件的荷載力差別約在 30%之內。即使有限元模型不能夠精確估計棚架內桿件力量，它也能夠被用作分析棚架安全的初步工具。

7. 在用有限元程序分析典型棚架時，當分層加設荷載時，小橫桿的安全指數在 4 以上，直桿的安全指數在 12 以上，因此小橫桿和直桿都不會損壞。而當所有工作平台上都加設分佈荷載時，棚架的安全指數在這個最差的可能荷載條件下減小到 2 左右。值得注意的是竹子特性的不均性，濕度和由於老化引致竹子特性的退化等等都會影響到這個安全指數，所以在這方面有必要繼續作深入的研究。
8. 本計劃並沒有研究棚架在強風作用下的安全性及可靠性。有鑒於棚架在強風中破壞的情形十分常見，所以非常有必要在這方面做進一步的研究。

參考文獻

1. Fu, W.Y. (1993). "Bamboo scaffolding in Hong Kong," *The Structural Engineer*, 71 (11), June 1993, 202-204.
2. So, F.Y.S. and Wong, F.K.W. (1998). "Bamboo scaffolding development in Hong Kong – a critical review," *Proceedings of the Symposium on Bamboo and Metal Scaffolding*, 23 Oct. 1998, 63-75.
3. (清華 - 金門) 建築安全研究中心, 香港地區竹腳手架和金屬腳手架安全與應用比較研究, 2001.
4. 周芳純, 竹材物理力學性質的研究, 南京林產工業學院學報, 1981 年六月, 第二期, 1-32.
5. Janssen, J.J.A. (1991). *Mechanical Properties of Bamboo*, Kluwer Academic Publishers.
6. Chan, S.L., Wong, F.K.W., So, F.Y.S. and Poon, S.W. (1998). "Empirical design and structural performance of bamboo scaffolding," *Proceedings of the Symposium on Bamboo and Metal Scaffolding*, 23 Oct. 1998, 5-21.
7. Yu, W.K. and Chung, K.F. (2001). "Mechanical properties of bamboo for scaffolding in building construction," *Proceeding of the International Conference on Construction*, Volume 2, 19-21 June 2001, 266-272.
8. 勞工處內部報告, 1994 至 1998 年期間 31 宗關於竹棚架意外成因的總結.
9. 勞工處職業安全及健康部, 竹棚架工作安全守則, 2001 年 3 月.
10. BS EN 364: 1993. *Personal protective equipment against falls from a height – Test methods*. British Standard