

中華民國第 60 屆中小學科學展覽會 作品說明書

國中組 生活與應用科學(二)科

佳作

032905

以小博大~桁架結構初探

學校名稱：金門縣立金湖國民中學

作者： 國二 陳雅庭 國二 陳奕霖 國二 黃煥城	指導老師： 傅淑芳 楊昆明
---	-----------------------------

關鍵詞：三角形、桁架、載重比

摘要

桁架(TRUSS)是以三角形為基本結構再不斷延伸的結構，其應用在生活中屢見不鮮。本實驗在探討簡單桁架結構的穩定性，其穩定性以載重比($R = \text{承重}/\text{自重}$)表示，載重比越大，穩定性越高。若以單一三角形來看桁架結構，底角越小的等腰三角形結構穩定性最好；直角三角形及不對稱的三角形都次之。其次，多三角形的簡單桁架，其構造越對稱且內含的三角形數量越多，結構越穩定，承重的載重比值(R)越大。簡單桁架內的零桿件雖不受力但對結構的穩定性卻有很大的助力。再者，不同幾何造型的桁架橋中以三角形桁架橋的載重比最大，具有以小搏大的概念，是製作桁架橋時，值得參考的桁架橋造型。

壹、研究動機

還記得從我們小時候金門縣的金門大橋開始動工，從那時候起我們就對金門大橋的結構有著極大的興趣。去年，有幸參加金門縣烈嶼自造中心辦理的橋樑設計比賽時，見識到各種不同的橋樑設計，也看到小小的一座木製橋樑卻能承載達自身重量幾十到幾百倍重的重量，真的是以小博大，讓我不禁好奇？這是怎麼辦到的，於是我們決定動手做做看，探究其中的奧妙，let's go！

貳、研究目的

第一部分：桁架桿件連結的最適方法與特性

實驗一、探討桿件連接處的工法對載重比的影響

實驗二、探討桿件連接處的膠黏的黏膠量對載重比的影響

實驗三、探討桿件連接處的膠黏的凝膠時間對載重比的影響

第二部分：桁架三角形的最適選擇與特性

實驗四、探討桁架外框三角形的形狀對載重比的影響

實驗五、探討桁架內三角形的數量對載重比的影響

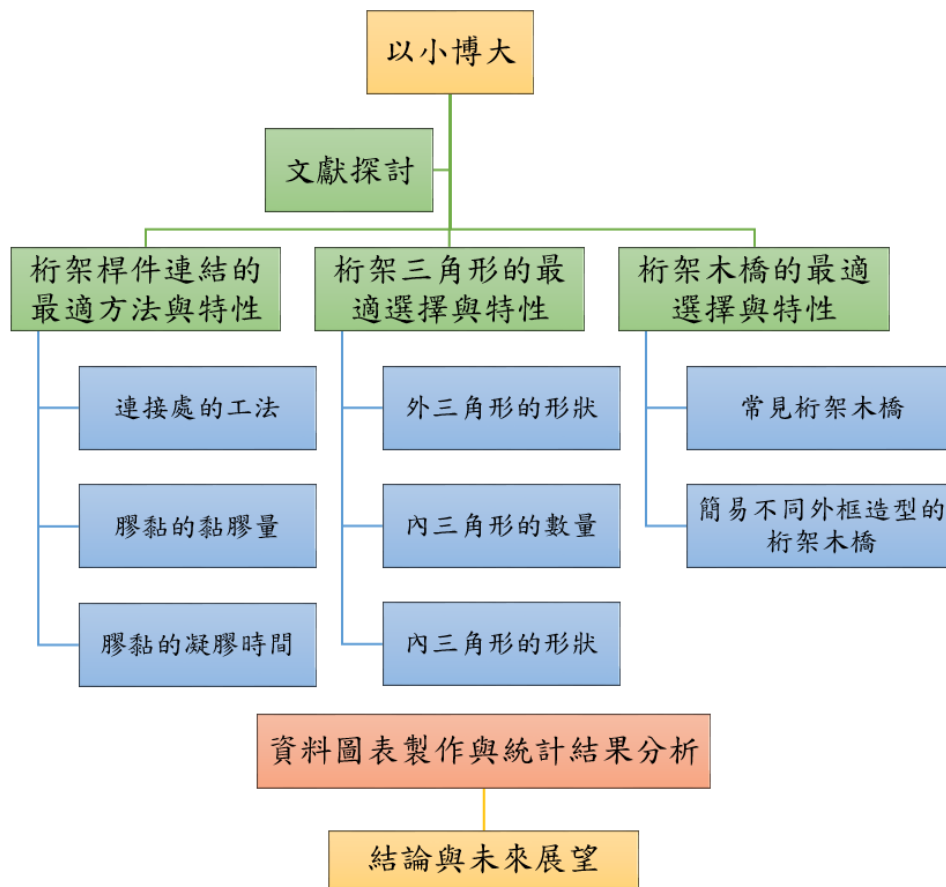
實驗六、探討桁架內三角形的形狀不同對載重比的影響

第三部分：桁架木橋的最適選擇與特性

實驗七、探討常見桁架木橋的載重比與自行設計桁架木橋的比較

實驗八、探討不同幾何造型的桁架木橋載重比

※研究架構，如下圖一：












圖一、研究架構圖

參、研究設備及器材

本次研究主要以探討桁架結構的穩定性為主，其過程需模擬製作很多桁架結構，會到很多電動機具，活動中使用的各項設備與器材說明如下表一。

下表一、研究設備與器材說明：

品名/用途	照片	品名/用途	照片
8×8×1800mm 木條/ 桁架結構材料		F 夾/ 固定結構用	
線鋸機/ 裁切桁架桿件用		快速夾/ 固定結構用	

品名/用途	照片	品名/用途	照片
鑽孔機/ 鑽洞用		砂帶機/ 砂磨桿件	
刨木機/ 刨平桿件，調整 厚度等		電子吊秤 (拉力計)/ 測試承重大小， 荷重 200Kgw	
鈦棒膠 II/ 膠黏桁架桿件 用，特性： 1.膠合強度：3750psi 2.可作業時間 (Open Time)：5 分(資料 來源：建成工具)		電子吊秤 (拉力計)/ 測試承重大小， 荷重 50Kgw	
電動千斤頂/ 為測試桁架結構 承重的拉力來 源，荷重 300Kgw		自制測試架/ 測試結構承重用	
直角規、直尺、 三角板、圓規/ 設計、製作桁架 結構用		鉛筆、橡皮擦、 砂紙、S 掛勾、 竹籤、鐵釘/ 設計、製作桁架 結構用	

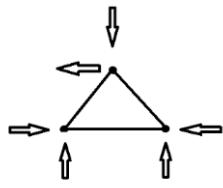
肆、研究過程或方法

一、文獻探討

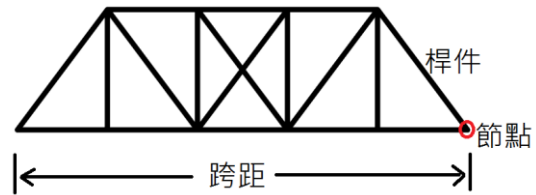
(一)、桁架是什麼

1. 桁架是橋樑與屋頂工程常用的輕重量、高強度的承載結構物，為鋼性直桿材料。
2. 三根桿件所構成的桁架，在適當的支撐下，可以承受與桁架同一平面內任意方向桿件所能承受的載重，故三角形為桁架的基本結構，如下圖二。
3. 桁架又可分為簡單桁架、複合型桁架、複雜型桁架。簡單桁架由三支桿件所構成的

三角形，每增加一個新節點就需增加兩個不共線桿件，又稱為平面桁架，如圖三。



圖二、桁架基本構造~三角形



圖三、平面桁架示例圖

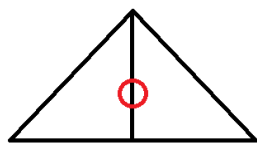
(二)、桁架的用途與特色

早期是用在建築，後多在橋梁及各式工程，桁架具有幾個特色：

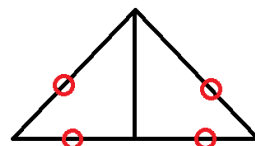
1. 桁架純受拉力、壓力構件，以三角形為基礎發展成完整結構系統。
2. 桁架各桿件間主要是以鉸接或焊接之方式連接。
3. 桁架本身是利用桿件受力後伸長或縮短之特性，及其結合角度之改變來抵抗及改變外力方向。
4. 桁架屬於向量的結構系統。
5. 桁架結構內的三角形具內在穩定性，可以此型態擴張成大型桁架。

(三)、桁架結構 ~ 零桿件

1. 在桁架構件中，部分桿件可能因荷載作用方式不同，而並不傳遞力，這些桿件稱為不受力桿件或零桿件。常見的不受力桿件有二種情形：
 - (1). 當三桿件接於同一節點時，其中恰有二桿件置於同一直線上，若此節點不受外力作用，則第三根桿件必為不受力桿件，如圖四之一的“○”記號處的桿件。
 - (2). 當二桿件接於同一節點，且二桿件並不位於同一直線上，若此節點不受外力作用，則此二桿件必皆為不受力桿件，如下圖四之二的“○”記號處的桿件。



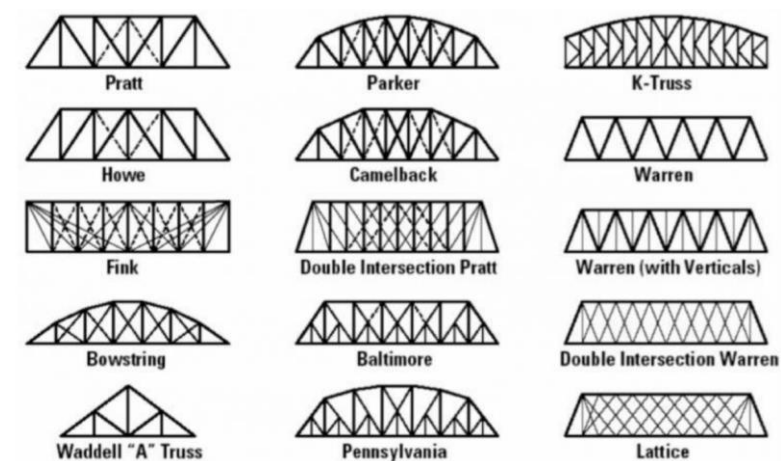
圖四之一、零桿件之一



圖四之二、零桿件之二

(四)、桁架橋種類

桁架橋的主體類似屋子裡的「桁」，「桁」原本是指屋頂下面托住椽子的橫木，這種結構是由短木樑發展成的堅固三角形連結組合而成，而後發展成鋼鐵結構，應用到橋梁構築時會再用一個架子支撐橋體，一般跨距較大的鋼橋，為了避免梁的深度太大而看起來笨重，多會採用桁架橋的設計方式。常見的形式如下圖五。



圖五、常見的桁架橋形式(圖片來源：高雄市海洋教育推廣系列資料)



- (五)、 疑問：(1) 無論桁架結構由何種三角形組成，其對結構的影響都一樣嗎？
 (2) 桁架桿件的連接方式對結構的穩定度有影響嗎？
 (3) 不同的桁架結構的幾何外型，對結構的穩定度又有何影響？

二、 承重測試設備

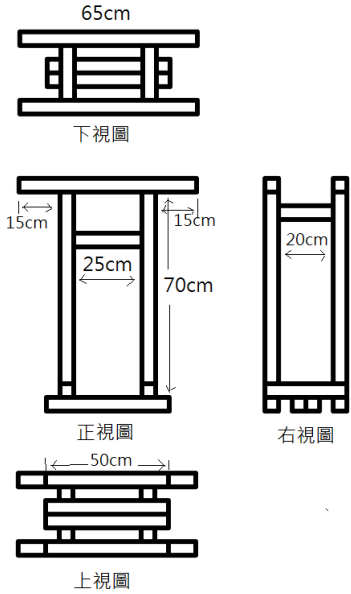

(一)、 承重測試設備演進

1. 本次實驗因桁架結構造型不同，自重亦不盡相同，故測量各種結構的最大承重後以載重比進行比較。
2. 在測量承重時，從最初簡易設備使用時的不便與數據的不精確性，從中進行改良，最後甚至向金門烈嶼科技與自造中心商借電動千斤頂、大規格電子吊秤等，再自製測試架後，才讓實驗順利進行，其設備改進的過程如下表二說明。

表二、承重測試設備改進說明表

項次	所需器材	圖片	說明
第一代承重測試設備	自製測試架、電子秤(50Kgw)、手動千斤頂等		<ol style="list-style-type: none"> 1. 電子秤最大承重量為50Kgw，超過即無法測量。 2. 測量時，手搖千斤頂的速度不一。
第二代承重測試設備	電子吊秤(200Kgw)、電動千斤頂、直尺、S掛勾、童軍繩、自製測試架		<ol style="list-style-type: none"> 1. 電子秤最大承重量為200Kgw，足夠本次實驗使用。 2. 電動千斤頂的升降速度穩定。 3. 測試架結構穩定，易調整跨距大小。

(二)、自製測試架

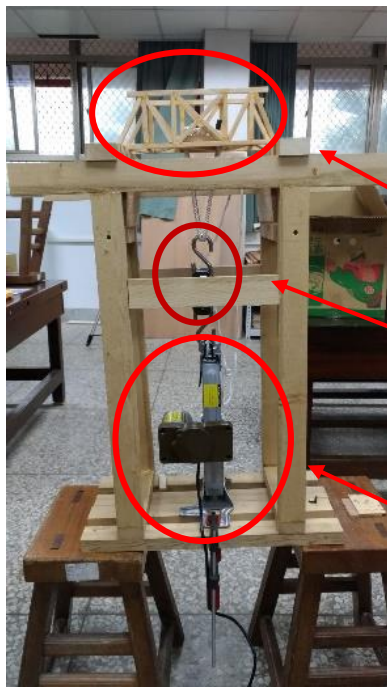
設計圖(四視圖)	完成圖
 <p>65cm 下視圖</p> <p>15cm 15cm 25cm 70cm 正視圖</p> <p>20cm 右視圖</p> <p>50cm 上視圖</p>	 <p>材料：2.5x5x70cm松木材 成品尺寸：65x30x80cm</p>

(三)、桁架結構承重測試方式

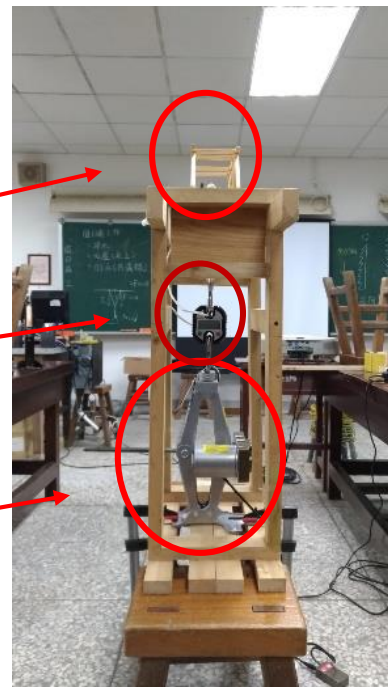
1. 將製作完成的桁架結構以電子天平測重，並記錄為桁架結構之自重(W_1)。
2. 桁架結構放置於測試架上，固定跨距兩端各有 2 公分在測試架上，底部中央放置一片 7.5*6cm 的載重板，並於下方吊掛電子吊秤(拉力計)，連接電動千斤頂，並確認三者在同一直線上。
3. 準備攝影機錄影，歸零電子吊秤的讀數，啟動千斤頂，逐漸增加下方拉力，直到桁架結構出現斷裂為止，讀取測試過程中，電子吊秤(拉力計)最大數值，並在量測紀錄表上記錄最大承載的重量(W_2)，如下圖六之一、圖六之二、圖六之三、。
4. 計算載重比(R)， $R = W_2/W_1$ 。



圖六之一、桁架結構最大承重測試實驗圖



圖六之一、承重實驗測試架正面圖



圖六之二、承重實驗測試架側面圖

待測物

拉力計

千斤頂

三、桁架製作木條材料篩選過程

1. 由建材五金行購入的木條，於製作桁架結構前，需先目視篩選，將木條紋路類似、不翹曲、變形、不缺損的挑出備用，如圖七。
2. 再用游標尺檢視、確認木條規格，過小者淘汰，過大者用刨木機刨成8x8mm的尺寸備用，如圖八之一、圖八之二。



圖七、目視篩選過木條



圖八之一、游標尺檢視、確認規格圖

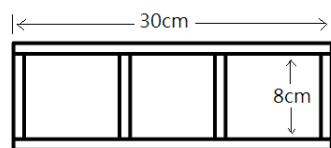


圖八之二、刨木機工作圖

四、實驗過程

實驗一 探討桿件連接處的工法對載重比的影響(膠接法、鉸接法、釘接法、榫接法)

1. 設計平面結構，長、寬約為 30x9.6 cm，如下圖九。


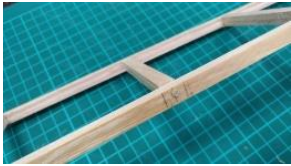
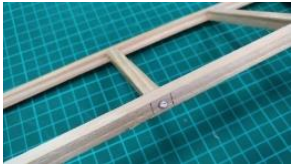
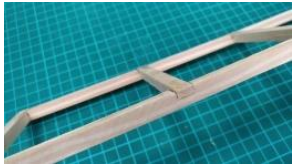


圖九、30x9.6 cm 平面結構圖

2. 根據設計圖，以篩選過的 8*8mm 方形木條為材料，裁切適當木條長度，在桿件連結

處以鈦棒膠黏合、固定膠黏時間為 24 小時後備用。

3. 以自製測試架進行平面結構承重測試並計算及比較其載重比。
4. 改變桿件連結處的連接方式為鉸接、釘接、榫接等方法，如圖十、重複上述步驟。

			
膠接： 用定量鈦棒膠為黏著劑，將桿件黏合	鉸接： 在桿件連接處鑽洞，插入竹籤固定	釘接： 在桿件連接處用鐵釘固定	榫接： 在桿件連接處，用榫的方式固定木條

圖十、桿件各種連接方式圖(膠接法、鉸接法、釘接法、榫接法)

實驗二 探討桿件連接處的膠黏的黏膠量對載重比的影響(0.02mL~0.10mL)

1. 承[實驗一]的平面結構設計，長、寬為 30×9.6cm。
2. 以篩選過的 8×8mm 方形木條為材料，裁切適當木條長度，以注射針筒為量取黏膠工具，吸取鈦棒膠，分別在桿件連結處各塗抹 0.02mL 鈦棒膠後抹平、黏合，固定膠黏時間為 1 天。
3. 以自製測試架進行平面結構承重測試並計算及比較其載重比。
4. 改變膠黏的黏膠量為 0.04mL、0.06mL、0.08mL、0.10mL 等狀態，如圖十一，重複上述步驟。



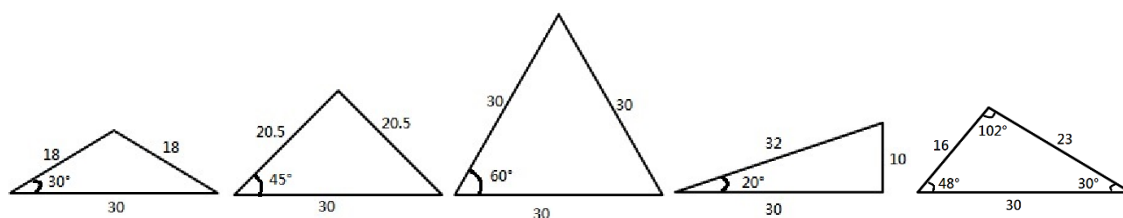
圖十一、不同膠黏量的平面結構完成圖

實驗三 探討桿件連接處的膠黏的凝膠時間對載重比的影響(1~5 天)

1. 承[實驗一]的平面結構設計，長、寬為 30×9.6cm。
2. 以篩選過的 8×8mm 方形木條為材料，裁切適當木條長度，以注射針筒為定量工具，吸取鈦棒膠，分別在桿件連結處各塗抹定量鈦棒膠黏合。
3. 膠黏時間 1 天後，以自製測試架進行平面結構承重測試並計算及比較其載重比。
4. 重複上述步驟，改變膠黏的時間為 2 天、3 天、4 天、5 天。

實驗四 探討桁架外三角形的形狀對載重比的影響(等腰△、直角△、任意△)

1. 設計各種不同形式的外三角形桁架結構，形式分別為底角 30° 等腰 Δ 、底角 45° 等腰 Δ 、底角 60° 等腰 Δ 、直角 Δ 、任意 Δ ，規格符合底部長度(跨距)為 30cm，內寬為 8cm，內高至少為 8cm，如圖十二。



圖十二、各種桁架外三角形的設計圖

2. 根據設計圖，以篩選過的 8x8mm 方形木條為材料，裁切適當木條長度，用定量鈦棒膠為黏著劑，將木條黏合、固定 1 天的膠黏時間，成品如圖十三。

桁架結構設計 → 裁切桿件 → 組裝測試 → 膠黏固定 → 完成



圖十三、各種不同的桁架外三角形完成圖

3. 以自製測試架進行桁架結構承重測試並計算及比較其載重比。

實驗五 探討桁架內三角形的數量對載重比的影響(1~8 個 Δ)

1. 以桁架外框尺寸為底部長度(跨距)30cm、內寬度 8cm、內高度 10cm 的等腰三角形為框架，依序增加框架內的三角形數量，設計出結構內三角形數量不同的桁架結構，如圖十四。



圖十四、各種不同三角形數量的桁架設計圖

2. 根據設計圖，以篩選過的 8*8mm 方形木條為材料，裁切適當木條長度，用定量鈦棒膠為黏著劑，將木條黏合、固定 24 小時的膠黏時間，成品如圖十五。

桁架結構設計 → 裁切桿件 → 組裝測試 → 膠黏固定 → 完成

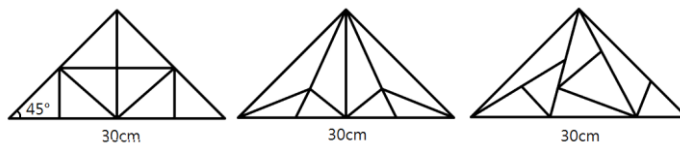
3. 以自製測試架進行桁架結構承重測試並計算及比較其載重比。



圖十五、不同三角數量的桁架結構完成圖

實驗六 探討桁架內三角形的形狀對載重比的影響

1. 以單面桁架外框造型為等腰底角 45° 三角形，底部長度(跨距)30cm、內寬度 8cm 為主，設計出框架內有相同三角形數量但不同三角形形狀的桁架結構，分別是直角 Δ 且結構對稱、任意 Δ 且結構對稱及任意三角形但結構不對稱，設計圖如圖十六。



圖十六、桁架結構內不同三角形狀設計圖

2. 根據設計圖，以篩選過的 $8*8\text{mm}$ 方形木條為材料，裁切適當木條長度，用定量鈦棒膠為黏著劑，將木條黏合成桁架結構，固定膠黏時間為 24 小時，成品如圖十七。

桁架結構設計 → 裁切桿件 → 組裝測試 → 膠黏固定 → 完成

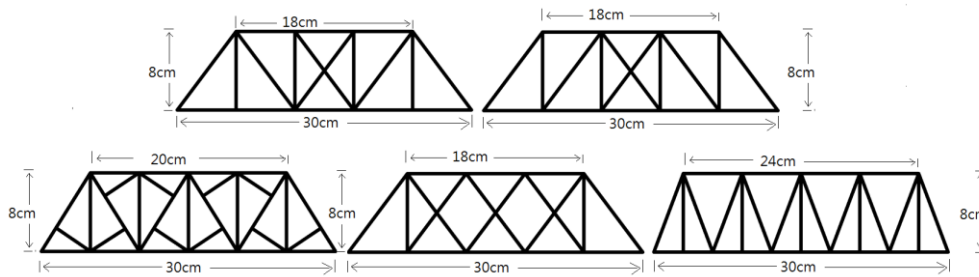
3. 以自製測試架進行桁架結構承重測試並計算及比較其載重比。



圖十七、桁架結構內不同三角形狀完成圖

實驗七 探討常見桁架木橋的載重比

1. 根據參考資料三，模仿設計幾種常見的桁架木橋，木橋底部長度(跨距)為 30cm，內寬為 8cm，內高為 8cm，設計圖如圖十八。



圖十八、常見的桁架木橋設計圖

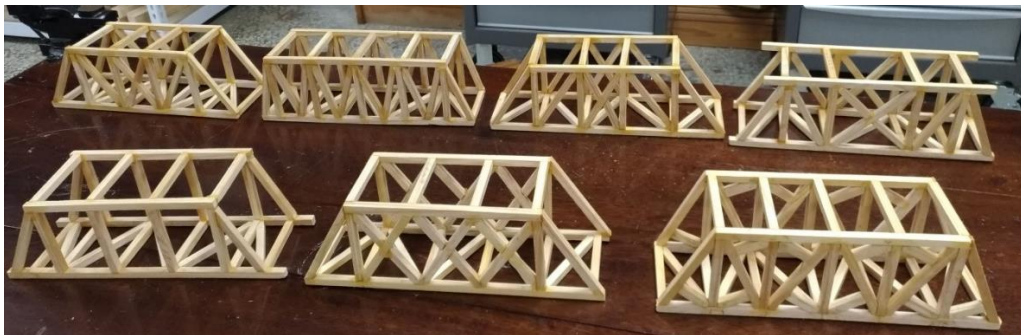
2. 根據設計圖，以篩選過的 8*8mm 方形木條為材料，裁切適當木條長度，用定量鈦棒膠為黏著劑，將木條黏合、固定 24 小時的膠黏時間，製作過程如圖十九、成品如圖二十。

桁架結構設計 → 裁切桿件 → 組裝測試 → 膠黏固定 → 完成

3. 以自製測試架進行桁架結構承重測試並計算及比較其載重比。



圖十九、桁架橋製作過程圖

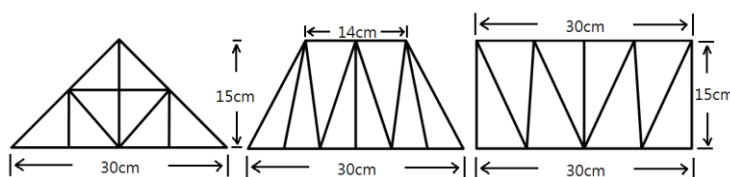


圖二十、我們的作品 - 常見的桁架木橋

實驗八 探討不同幾何造型的桁架木橋載重比

(限定跨距 30cm、內高 15cm、內寬 8cm 的梯形、矩形、三角形比較)

1. 設計出單面結構內含 8 個三角形且對稱的桁架木橋，底部長度(跨距)為 30cm，內寬為 8cm，內高為 15cm，外框架分別為梯形、矩形及三角形，設計圖如圖二十一。



圖二十一、不同幾何造型的桁架木橋設計圖

2. 根據設計圖，以篩選過的 8*8mm 方形木條為材料，裁切適當木條長度，用定量鈦棒膠

膠為黏著劑，將木條黏合、固定 24 小時的膠黏時間，成品如圖二十二。

桁架結構設計 → 裁切桿件 → 組裝測試 → 膠黏固定 → 完成

3. 以自製測試架進行桁架結構承重測試並計算及比較其載重比。



圖二十二、不同幾何造型的桁架木橋完成圖

伍、研究結果與討論

實驗一、探討桿件連接處的工法對載重比的影響(膠黏、鉸接、釘接、樁接)

(一) 實驗假設：結構桿件間連接的工法不同，例如膠黏法、鉸接法、釘接法及樁接法等，因為工法不同會影響結構的最大承重與載重比。



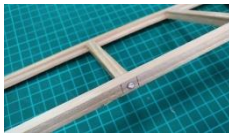
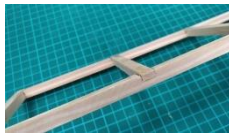
(二) 實驗設計：

操縱變因	結構桿件間連接工法(膠黏法、鉸接法、釘接法及樁接法)
控制變因	結構形狀與大小、桿件材質與大小
應變變因	最大承重、載重比

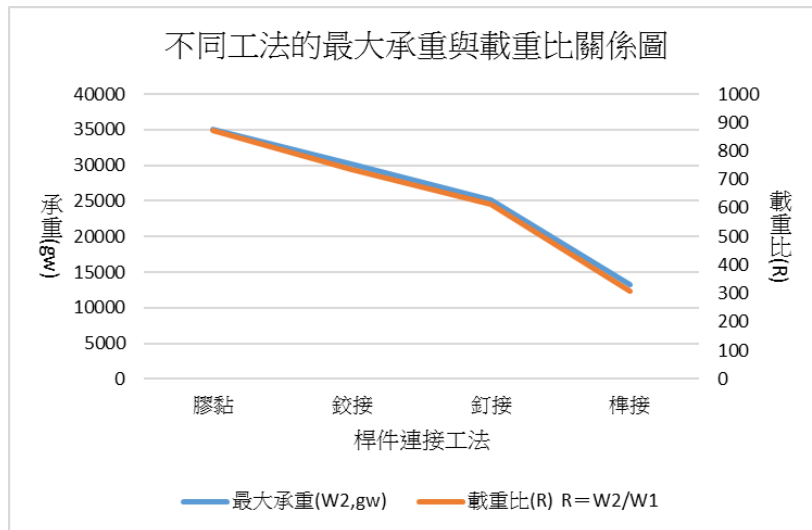
(三) 實驗結果：

1. 結構桿件間的連接工法不同，結構的穩定度也不同，各種工法結構的最大承重與載重比如表三說明。

表三、各種工法結構的最大承重與載重比

	膠黏法	鉸接法	釘接法	樁接法
圖片				
完成桿件 連接時間 (min)	5min (不含膠乾時間)	40min	30min	150min
自重 ($W_{1,gw}$)	40.2	41.1	41	43.2
最大承重 ($W_{2,gw}$)	35100	30200	25100	13300
載重比 ($R = W_2/W_1$)	873	735	612	308

2. 不同工法結構的最大承重與載重比關係圖，如圖二十三。



圖二十三、不同工法結構的最大承重與載重比關係圖

- 各工法的最大承重與載重比比較，由大而小依序為：
膠黏法 > 鉸接法 > 釘接法 > 榫接法
- 載重比最大的工法是膠黏法，承重為自身重量的873倍。



(四) 實驗討論：

1. 結構破壞情況

- 膠黏法、鉸接法、榫接法的結構於達到最大承重時的破壞情況類似，都是在節點處斷開桿件，其中，榫接法的載重比最小，推測為榫接工法的截切木條，切斷木條纖維，降低木條強度，讓榫接處成為結構的弱點；鉸接法亦有類似的狀況。
- 釘接法的結構於達到最大承重時，靠近節點處的桿件裂開，推測為打釘處仍是結構相對脆弱的地方，當桿件受力超過木條負荷即由此脆弱點裂開。
- 不同工法的結構於最大承重的破壞情況如下表四說明，

表四、不同工法的桁架結構於最大承重時的破壞情況說明

工法	膠接法	鉸接法
圖片		
說明	結構破壞點為各個節點處(桿件連接處)，於承重達到最大瞬間，節點桿件裂開而彈飛。	結構破壞點為節點處，推測為竹籤鉸接處會切斷木條的纖維連接，降低木條的整體韌度，所以當受力達最大負載時，會從結構上較脆弱的鉸接處斷裂。

工法	釘接法	榫接法
圖片		
說明	結構於達到最大承重時，靠近節點處的桿件裂開，推測為打釘處仍是結構相對脆弱的地方，當桿件受力超過木條負荷即由此處裂開。	結構破壞點為節點處，推測為榫接工法會切斷木條的纖維連接，降低整體韌度，當受力達最大負載時，會從結構上較脆弱的榫接處斷裂。

2. 膠黏法的膠黏力推算

- (1). 根據膠黏法使用的鈦棒膠 II 的出廠資料顯示，其膠合強度為 3750psi，經換算處理， $1 \text{ psi} = 70.26 \text{ gw/cm}^2$ ，則 $3750 \text{ psi} = 263.47 \text{ kgw/cm}^2$ 。
- (2). 裝載承重板的桿件，其膠黏處的面積為 $0.8 \times 0.8 \times 4 = 2.56 \text{ cm}^2$ ，因此，根據出廠資料，此膠黏面積可承載的力量大小為 $70.26 \times 2.56 = 179.87 \text{ kgw}$ ，而本次實驗的最大承重為 35.1 kgw，只為理論值的 19.51%。

3. 桿件連接工法選擇

由以上實驗，我們發現，**實驗用的細木條，在結構桿件的連接方式以膠接法最好**，此法所測得的載重比不但最大，且花費的時間也最少，故之後的桿件連接方式都是以方法進行。

實驗二、探討桿件連接處的黏膠量對載重比的影響(0.02mL~0.10mL)

- (一) 實驗假設：桿件間的連接，因為黏膠量不同會影響結構的最大承重與載重比。
- (二) 實驗設計：

操縱變因	連接桿件的黏膠量
控制變因	桿件材質與大小、桿件連接工法、膠黏時間
應變變因	最大承重、載重比

(三) 實驗結果：

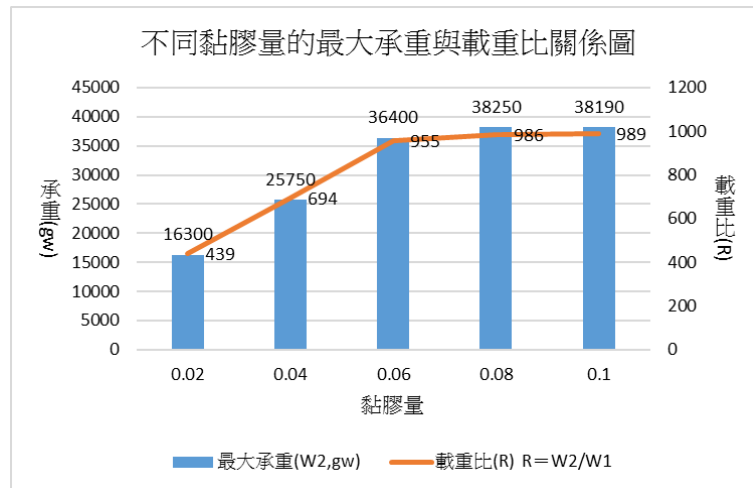
1. 膠黏結構桿件間的黏膠量不同，結構的穩定度也不同，不同黏膠量的最大承重與載重比如表五說明。

表五、不同黏膠量的結構的最大承重與載重比

黏膠量	0.02ml	0.04ml	0.06ml	0.08ml	0.10ml
自重(W_1, gw)	37.1	37.1	38.1	38.8	38.6

最大承重 (W_2, gw)	16300	25750	36400	38250	38190
載重比 ($R = W_2/W_1$)	439	694	955	986	989
備註			出現溢滿現象	出現溢滿現象	出現溢滿現象

2. 不同黏膠量的最大承重與載重比關係圖，如圖二十四。



圖二十四、不同黏膠量的最大承重與載重比關係圖

3. 我們發現，在塗滿桿件連接處的接觸面的情況下，黏膠量由0.02mL增加至0.06mL時，膠黏量越大，結構的最大承重與載重比也越大；但從0.06mL至0.10mL，結構的最大承重與載重比則變化不大，顯示在實驗中，桿件因連接而使用的膠黏量增加至0.06mL之後，其對結構的穩定度影響都類似。

(四) 實驗討論：

1. 塗膠的均勻度

為能控制變因，讓每次實驗的桿件間的膠黏狀態一致，塗抹鈦棒膠Ⅱ時，會先在桿件連接處做記號，將膠塗抹在桿件的橫切面，兩接觸面互相摩擦、塗勻後，用F夾夾緊，若膠太多則會溢滿，以此來控制膠黏量的均勻度與厚度。

2. 膠黏量選擇

經由以上實驗，我們於往後的實驗裡，結構桿件間的膠黏量都以0.08mL為主，約為 0.125mL/cm^2 ，並於桿件連接後，用F夾夾緊、待乾。

實驗三、探討桿件連接處的膠黏的凝膠時間對載重比的影響(1~5 天)

(一) 實驗假設：桿件間的連接，因為凝膠時間的不同會影響結構的最大承重與載重比。

(二) 實驗設計：

操縱變因	凝膠時間
------	------

控制變因	桿件材質與大小、桿件連接工法、黏膠量
應變變因	最大承重、載重比

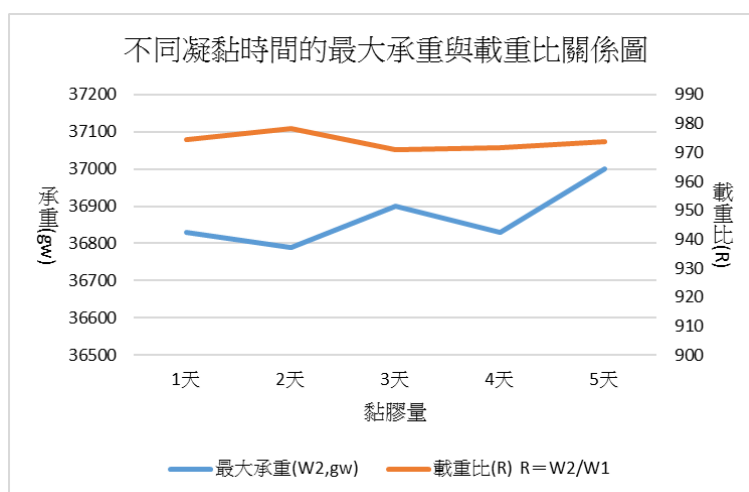
(三) 實驗結果：

1. 膠黏桿件間的凝黏時間分別是1~5天時，其結構的穩定度差異不大，不同凝黏時間的最大承重與載重比如表六說明。

表六、不同凝黏時間的最大承重與載重比說明

凝膠時間	1 天	2 天	3 天	4 天	5 天
自重(W_1, gw)	37.8	37.6	38.1	37.9	38
最大承重(W_2, gw)	36850	36700	36900	36800	37000
載重比(R) $R = W_2/W_1$	975	976	969	971	974

2. 不同凝黏時間的最大承重與載重比關係圖，如圖二十五。



圖二十五、不同凝黏時間的最大承重與載重比關係圖

3. 我們發現，凝膠時間不同，其最大承重介於36700gw ~ 37000gw之間，差值為300gw；載重比介於969 ~ 976之間，差值為7，其間的差異不大，有可能是實驗或設備造成的誤差，因此，雖然1~5天的凝膠時間不同，但其對結構的穩定度影響不大。

(四) 實驗討論：

1. 鈦棒膠的凝膠時間

本實驗使用的鈦棒膠在產品上說明的可作業時間（Open Time）為5分鐘，表示上膠5分鐘之後，膠黏處就能固定，不易被變動，且經訪談幾位生活科技老師的使用經驗得知，鈦棒膠通常在上膠1天後就可完全凝固，這也與我們的實驗結果吻合。

2. 凝膠時間的選擇

經由以上實驗結果，我們於往後的實驗裡，結構桿件間的凝膠時間都設定至少1天，在第3天才會進行承重等測試。

實驗四、探討桁架三角形的形狀對載重比的影響(等腰△、直角△、任意△)

(一) 實驗假設：常見的三角形有等腰三角形、正三角形、直角三角形及任意角度三角形，不同形狀的桁架三角形會影響結構的最大承重與載重比。

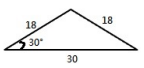
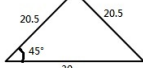

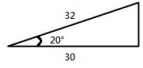

(三) 實驗設計：

操縱變因	不同三角形形狀
控制變因	桿件材質與大小、桿件連接工法、黏膠量、膠黏時間
應變變因	最大承重、載重比

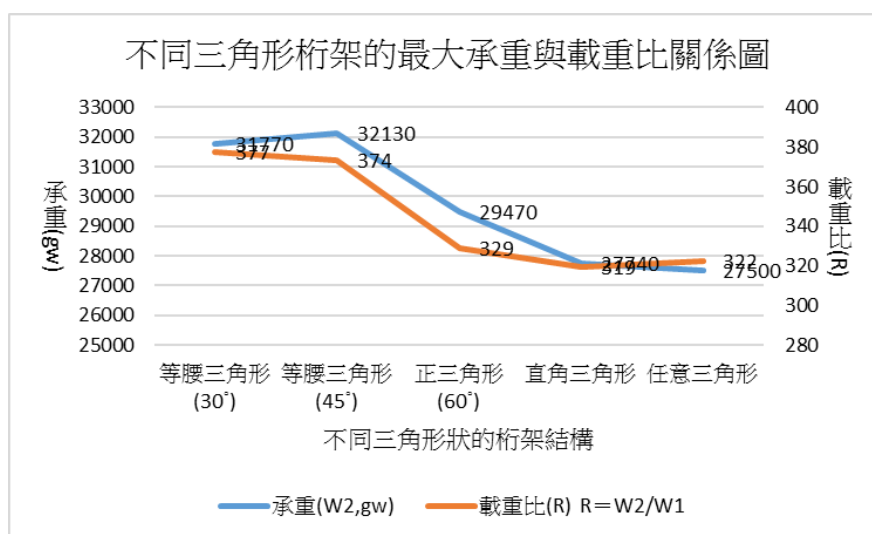
(四) 實驗結果：

1. 結構的三角形狀不同，結構所受的最大承重與載重比也不同，如表七說明。

表七、不同三角形狀的桁架結構的最大承重與載重比

	等腰三角形 (30°)	等腰三角形 (45°)	正三角形 (60°)	直角三角形	任意三角形
單邊構造					
自重(W ₁ ,gw)	84.2	86	89.6	86.9	85.3
最大承重 (W ₂ ,gw)	31770	32130	29470	27740	30900
載重比(R) R=W ₂ /W ₁	377	374	329	319	322

2. 不同桁架三角形的最大承重與載重比關係圖，如圖二十六。



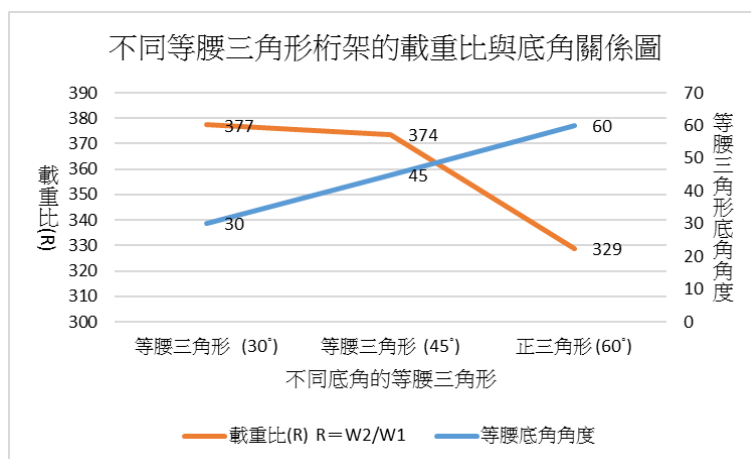
圖二十六、不同桁架三角形的最大承重與載重比關係圖

3. 載重比比較：

等腰三角形(30°) > 等腰三角形(45°) > 正三角形(60°) > 任意三角形 > 直角三角形

4. 載重比與底角的關係：

形狀越對稱，底角越小的等腰三角形，載重比越大，如圖二十七。



圖二十七、載重比與三角形底角的關係圖

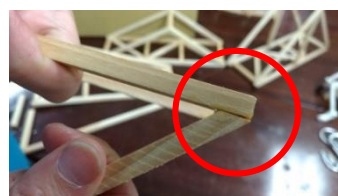
(四) 實驗討論：

1. 結構破壞情況

當三角形桁架受力達最大負載時，結構破壞點都在結構的節點上部分裂開(桿件連接處裂開)，其中，60°等腰三角形的底邊桿件甚至完全裂開，而直角三角形的多數節點上的桿件都裂開，如圖二十八說明。



圖二十八之一、30°等腰三角形節點處裂開



圖二十八之二、45°等腰三角形節點處裂開



圖二十八之三、60°等腰三角形底邊桿件完全裂開



圖二十八之四、直角三角形多數節點的桿件裂開

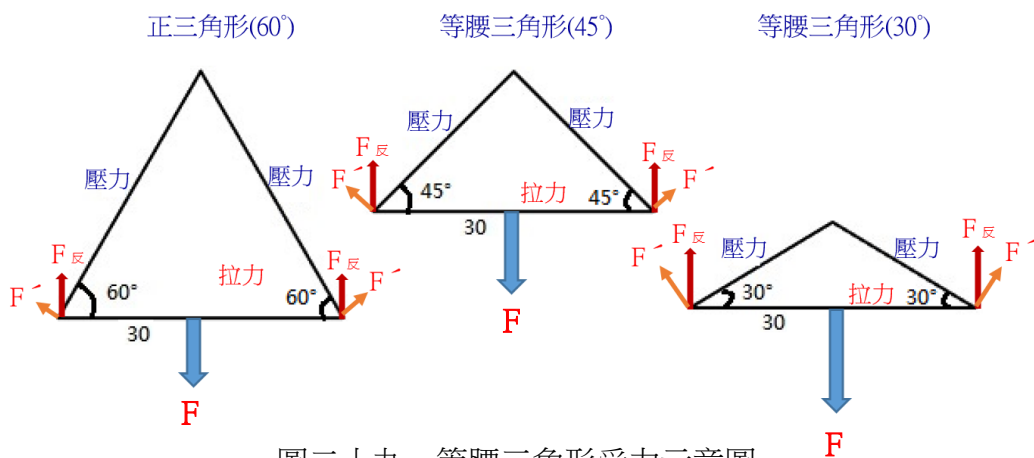
2. 等腰三角形兩腰桿件受力分析

- (1). 相同底邊長度，等腰三角形的底角越小，高也越小，兩邊等腰的長度也越短，當三角形底邊受拉力(F)時，若假設底邊兩端點所受反作用力(F_反)在與兩腰垂直的分力(F_⊥)對頂點造成的力矩相同，則力臂(等腰長度)越小，可承受的力越大，如圖二十九。因此，等腰三角形的底角越小的桁架結構可承受越大的拉力，載重比也越大。

- (2). 根據力平衡原理， $F=2F_{反}$ ， $F' = F_{反} \times \cos \theta$ ， θ 為等腰三角形的底角，可推算出單一等腰三角形桁架受力達最大負載時的各桿件受力大小，如表八所示。

表八、單一等腰三角形桁架受力達最大負載時的各桿件受力大小

	30°等腰三角形	45°等腰三角形	60°等腰三角形
底角大小	30°	45°	60°
F (gw)	31770	32130	29470
F _反 (gw)	15885	16065	14735
F' (gw)	13757	11360	7368



圖二十九、等腰三角形受力示意圖

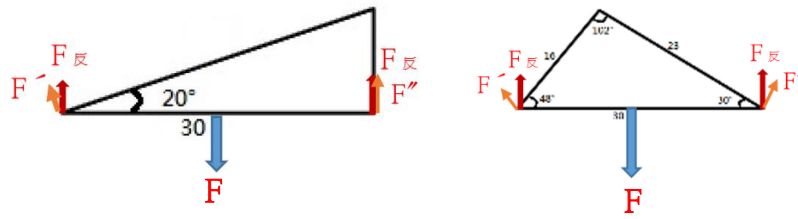
3. 直角三角形及任意三角形桿件受力分析

- (1). 圖三十，直角三角形因斜邊最長，承上 2.說明，相同的轉動力矩，所需施力最小，且形狀不對稱，兩邊受力不同，結構不穩定，容易被破壞，所以載重比最小；且載重達最大負荷時，結構桿件節點處多處斷開，結構解體。

- (2). 根據力平衡原理， $F=2F_{反}$ ， $F' = F_{反} \times \cos \theta$ ， θ 為三角形的底角，可推算出單一三角形桁架受力達最大負載時的各桿件受力大小，如表九所示。

表九、單一直角&任意三角形桁架受力達最大負載時的各桿件受力大小

	直角三角形		任意三角形	
底角大小	90°	20°	30°	48°
F (gw)	27740	27740	30900	30900
F _反 (gw)	13870	13870	15450	15450
F' (gw)	—	13034	—	10338
F'' (gw)	13870	—	13380	—



圖三十、直角&任意三角形受力示意圖

實驗五、探討桁架內三角形的數量對載重比的影響(1~8 個△)

(一) 實驗假設：桁架結構內的三角形數量不同會影響結構的最大承重與載重比。

(二) 實驗設計：

操縱變因	結構內的三角形數量
控制變因	桿件材質與大小、桿件連接工法、黏膠量、膠黏時間
應變變因	最大承重、載重比

(三) 實驗結果：

1. 桁架結構內的三角形數量不同，結構所受的最大承重與載重比也不同，如表十說明。

表十、不同三角數量的桁架結構載重比

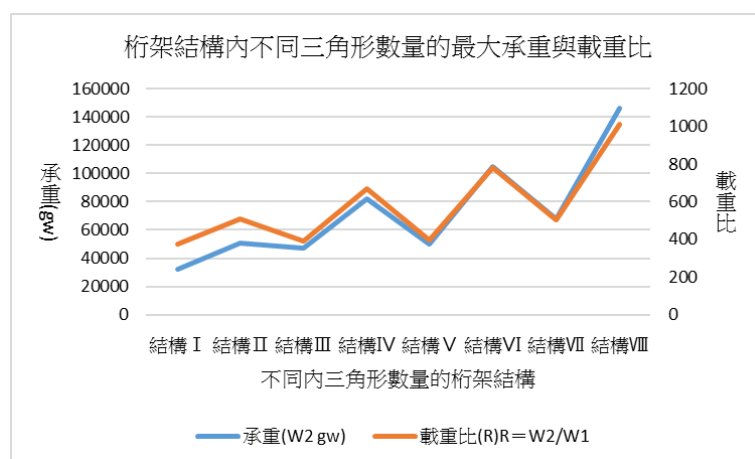
	結構 I	結構 II	結構 III	結構 IV	結構 V	結構 VI	結構 VII	結構 VIII
三角形數量	1 個	2 個	3 個	4 個	5 個	6 個	7 個	8 個
單面構造								
自重 (W ₁ 、gw)	86	99.5	121.6	123.2	125.9	134.1	135.9	144.5
承重 (W ₂ 、gw)	32130	50450	47350	82300	49650	104600	68050	145900
載重比 (R) R=W ₂ /W ₁	374	507	389	668	394	780	501	1010

2. 載重比比較

桁架結構內三角形數量的數量不同，其結構的載重比，由大而小依次為：

8個△ > 6個△ > 4個△ > 2個△ > 7個△ > 5個△ > 3個△ > 1個△，

桁架結構內不同三角形數量的最大承重與載重比關係圖，如圖三十一。

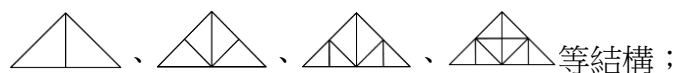


圖三十一、桁架結構內不同三角形數量的最大承重與載重比關係圖

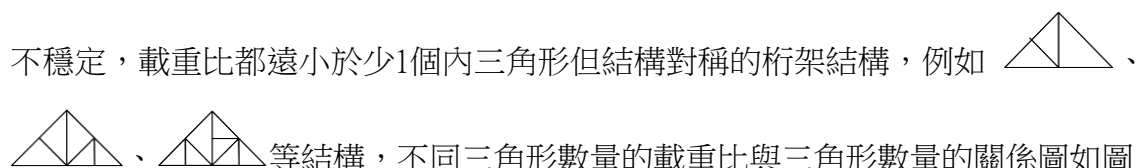
圖、桁架結構內不同三角形數量的最大承重與載重比關係圖

3. 三角形數量與結構穩定度

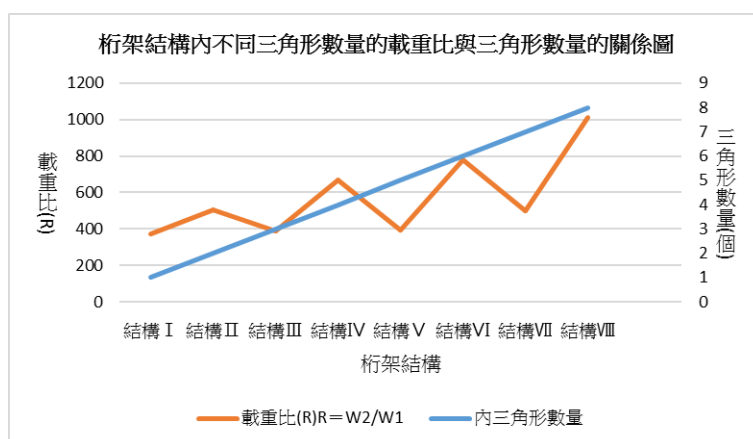
桁架結構內，三角形數量越多且結構越對稱者，即三角形數量呈偶數增加者，桁架構造越穩固，載重比值(R)越大，例如



另外，三角形的數量雖越多但結構不對稱者，即三角形數量呈單數增加者，結構都較不穩定，載重比都遠小於少1個內三角形但結構對稱的桁架結構，例如



等結構，不同三角形數量的載重比與三角形數量的關係圖如圖三十二。

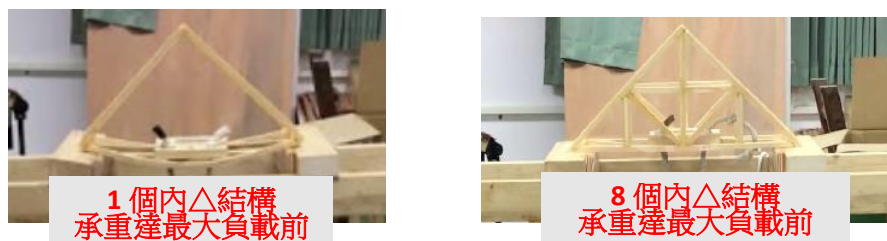


圖三十二、不同三角形數量的載重比與三角形數量的關係圖

(四) 實驗討論：

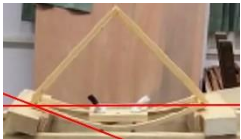
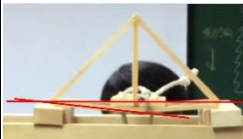




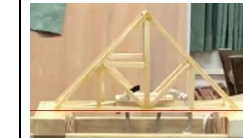

1. 三角形數量與底邊桿件形變量進行承重測試時，桁架結構的底座桿件會隨著拉力的增加使彎曲形變越明顯，而具有不同三角數量的桁架結構的形變量也會不同。根據實驗錄製影片，我們將不同三角數量的桁架結構於達最大承重時的影像截圖比對發現，桁

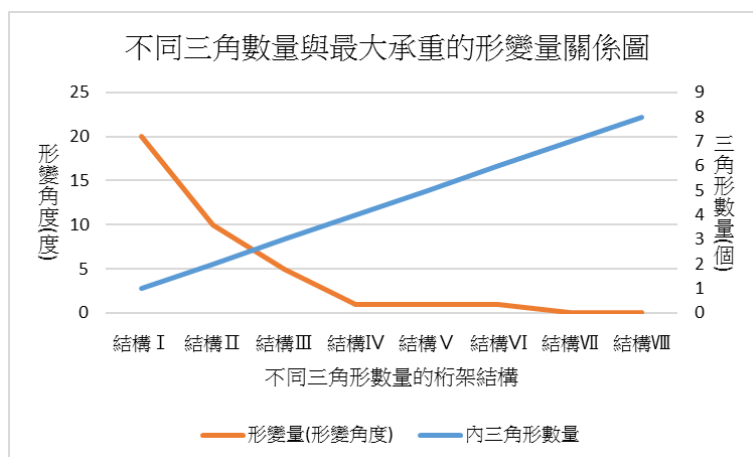
架結構內的三角數量越多，其在最大承重時，底座桿件的彎曲形變量越小，如圖三十三；其形變量如表十一說明，關係圖如圖三十四所示。



圖三十三、不同三角數量（數量1與數量8）的桁架結構底邊於承重達最大負載時的形變狀況

表十一、不同三角數量（數量1與數量8）的桁架結構底邊於承重達最大負載時的形變量

	結構 I	結構 II	結構 III	結構 IV
內三角形數量	1	2	3	4
形變量 (形變角度)	20	10	5	1
實驗圖				
	結構 V	結構 VI	結構 VII	結構 VIII
內三角形數量	5	6	7	8
形變量 (形變角度)	1	1	0	0
實驗圖				

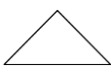

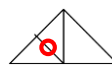
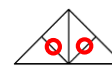
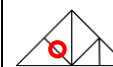
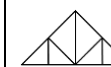
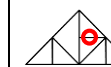
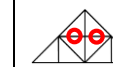



圖三十四、不同三角數量與最大承重的形變量關係圖

2. 結構零桿件

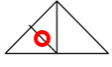

依零桿件判斷原則，在本次實驗中，桁架三角形單面構造內的零桿件應如下表十二的“○”標示。再依此對照載重比值(R)，零桿件雖然不受力，但在穩定結構上應有顯著的功效。

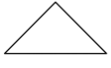
表十二、零桿件標示表

	1 個	2 個	3 個	4 個	5 個	6 個	7 個	8 個	
單面構造									
載重比 (R)	374	507	389	668	394	780	501	1010	

3. 結構不對稱與應力集中

桁架結構不對稱時，一旦受外力拉扯就會產生「應力集中」現象，容易從 V 字尖角的部分斷裂，故結構載重比都小，例如

 及  等結構，其載重比為 389 及 394，和結構

 的載重比 374 差異不大；反之，若為對稱結構，則能有效分攤應力，載重比也較大，例如

 及  等結構。

※省思：

橋梁建置完成啟用後，後續維護相當重要，任何部位的鏽蝕與鬆脫，將等同結構不對稱的狀態，產生應力集中現象，降低橋梁載重比，增加橋梁崩塌機率，影響大眾的生命安全。

實驗六、探討桁架結構內三角形的形狀對載重比的影響

(一) 實驗假設：桁架結構內的三角形形狀不同、結構是否對稱等，都會影響結構的載重比。

(二) 實驗設計：

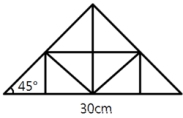
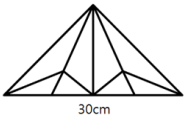
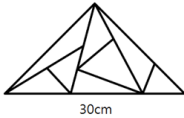
操縱變因	不同內三角形形狀
控制變因	桿件材質與大小、桿件連接工法、黏膠量、膠黏時間、內三角形數量
應變變因	最大承重、載重比

(三) 實驗結果：

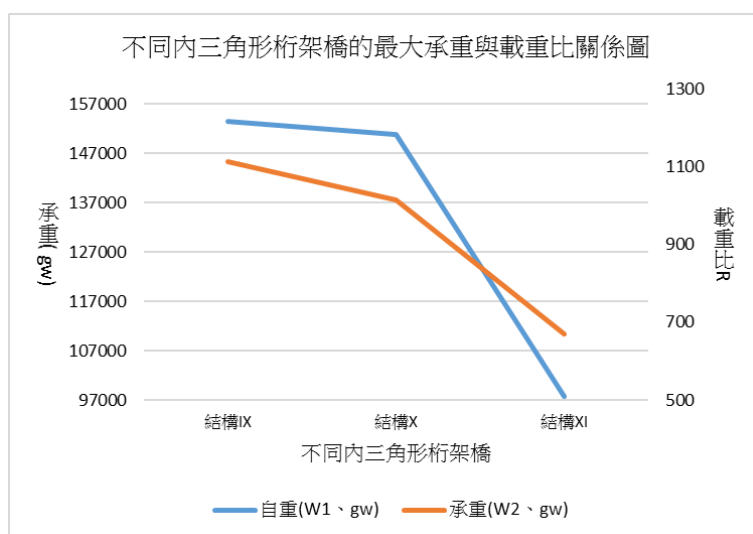
- 我們發現，桁架結構內的三角形形狀不同，其結構的最大承重與載重比也會不同，但只要結構對稱，其差異不大，如結構IX與結構X，其最大承重分別為153.4kgw及150.8kgw，數值差約2.6kgw，載重比分別為1113及1014，數值差約99；反之，當結構不對稱時，如結構XI，其結構的最大承重數值比對稱的結構少約53kgw，載重比數值

則小約344，如下表十三說明。

表十三、結構內三角形狀不同的最大承重與載重比說明

	結構 IX	結構 X	結構 XI
			
內三角形狀	直角三角形	任意三角形 且對稱	任意三角形 但不對稱
單側桁架構造內 三角形數量	8	8	8
自重(W_1 、gw)	137.8	148.7	145.9
承重(W_2 、gw)	153400	150800	97700
載重比(R) $R = W_2/W_1$	1113	1014	670

2. 不同內三角形狀的桁架結構，其最大承重越大，載重比也越大，由大而小依次為：結構IX > 結構X > 結構XI，其關係圖如下圖三十五所示。



圖三十五、不同內三角形桁架結構的最大承重與載重比關係圖

(四) 實驗討論：

1. 桁架結構對稱對結構穩定度的影響

從實驗結果發現，當桁架結構內的三角形狀不同時，影響桁架結構穩定度的主要因素為結構是否對稱，推論為結構對稱時，不論何種內三角形狀，結構內桿件能均勻分散外力，讓結構承受的外力不會集中於某處，而有應力集中的現象發生。

2. 桿件破壞情況說明

對稱結構於外力達最大承重時，結構破壞處為底座桿件木條斷裂，但整體側邊結構完整，可見結構對稱的桿件能有效對抗外力直至桿件材質無法承受為止。反之，不對稱

的結構於外力達最大承重時，不但底座桿件斷裂且側邊桿件也有斷裂現象，此再次說明不對稱桿件容易發生應力集中的現象。

實驗七、探討簡易桁架木橋的載重比

(一) 實驗假設：常見的桁架橋型式有普拉特桁架、郝氏桁架、四角華倫桁架、華倫桁架等，不同的桁架橋會有不同的載重比。

(二) 實驗設計：

操縱變因	不同型式桁架橋
控制變因	桿件材質與大小、桿件連接工法、黏膠量、膠黏時間
應變變因	最大承重、載重比

(三) 實驗結果：

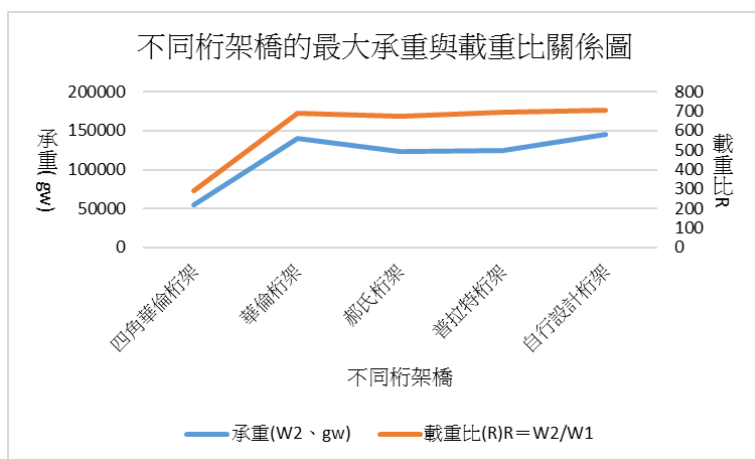
1. 常見的梯形桁架橋，除了四角華倫桁架結構外，另外四者的最大承重介於123.2kgw~145.2kgw之間，相差22kgw；但換算其載重比則介於674~705之間，相差31。顯示這四款結構的最大承重雖有不同，但載重比(穩定性)差異不大，如下表十四說明。

表十四、常見梯形桁架橋結構的最大承重與載重比說明

	四角華倫桁架	華倫桁架	郝氏桁架	普拉特桁架	自行設計桁架
單邊構造					
單側桁架構造內三角形數量	10	14	10	10	20
自重 (W ₁ 、gw)	189.6	203.2	182.9	179.6	206.1
最大承重 (W ₂ 、gw)	54950	139900	123200	125100	145200
載重比(R) R = W ₂ /W ₁	290	688	674	697	705

2. 不同桁架橋的最大承重越大，載重比也越大，由大而小依次為：

自行設計桁架 > 普拉特桁架 > 郝氏桁架 > 華倫桁架 > 四角華倫桁架，其關係圖如圖三十六。

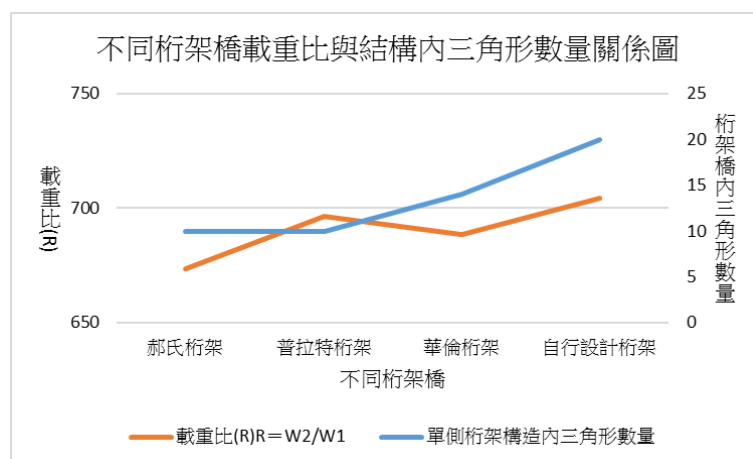


圖三十六、不同梯形桁架橋的最大承重與載重比關係圖

(四) 實驗討論：

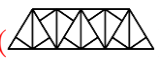
1. 載重比與結構內三角形數量

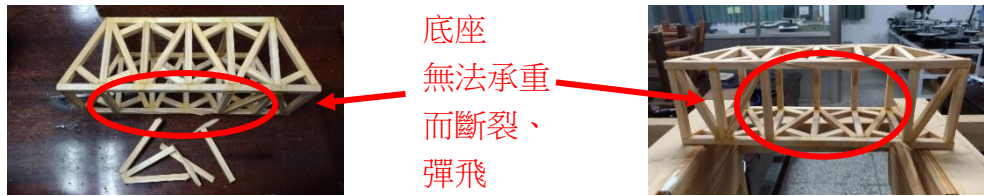
我們發現，桁架橋單面構造內，三角型的數量越多，結構載重比也有越大的趨勢，可能的原因為：三角形數量越多，結構內有越多的桿件，較多的桿件可分擔受拉或受壓的外力，因此，桁架構造越穩固，載重比(R)越大，如圖三十七。






圖三十七、不同桁架橋載重比與結構內含三角形數量關係圖

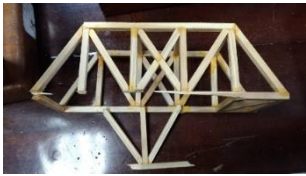
2. 結構內三角形數量與底座受力形變

- (1). 本次實驗，自行設計桁架結構 ()，結構內不但有最多的三角形數量，且有偏橫向的桿件，此結構當受外力達最大承重時，其彎曲形變量非常小，桿件材質因無法負荷而瞬間斷裂、彈飛，但其縱向桁架基本架構不變，可見較多且具有各方向的三角形桿件能有效舒緩縱向拉力或壓力，使結構不易被破壞，如圖三十八。

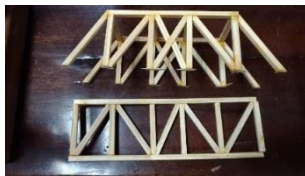


圖三十八、自行設計桁架結構受力達最大承重被破壞圖

(2). 其它桁架橋結構，普拉特桁架 ()、郝氏桁架 ()、華倫桁架 () 等結構，其受外力達最大承重時，其結構底座彎曲形變量仍然非常小，但在達承重最大瞬間為整個結構底座瞬間斷裂、彈飛，其縱向桁架基本架構不變，如圖三十九~圖四十一。



圖三十九、普拉特桁架被破壞圖




圖四十、郝氏桁架被破壞圖



圖四十一、華倫桁架被破壞圖

3. 探討四角華倫桁架結構





四角華倫桁架 () 的中間桿件(X)處，其製作方法為榫接方式，當達最大承重時的破壞點也在此處，其原因可能為榫接方式破壞桿件結構而致其最大承重與載重比都較其它桁架橋的小，如圖四十二。

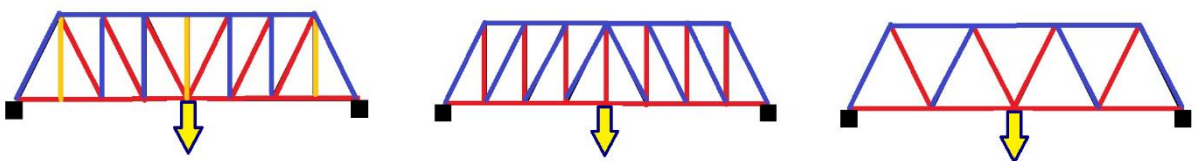


圖四十二、四角華倫桁架承重測試後結構圖

4. 桁架桿件受力種類

理想桁架結構為二力桿件，作用力只能作用於節點上，並有桿件受力為零的零桿件。各桿件受力區分為拉力或壓力，下圖四十四為施力在桁架結構的底邊中心節點時，各桿件可能受拉力或壓力的概況，藉此拉力或壓力互相協調，維持桁架結構的穩定。

( 表示外力；藍色線段  表示壓力；紅色線段  表示拉力；黃色線段  表示零桿件)



圖四十四、桁架結構各桿件可能受拉力或壓力的概況模擬圖

實驗八、探討不同外型的桁架木橋載重比

(一) 實驗假設：桁架橋外型可為矩形、梯形與三角形，不同外型的桁架橋會有不同的載重比

(二) 實驗設計：

操縱變因	不同外框幾何結構
控制變因	桿件材質與連接工法、黏膠量、膠黏時間、內三角形數量
應變變因	最大承重、載重比

(三) 實驗結果：

1. 不同幾何外框的桁架橋結構，其最大承重值介於152.9kgw~153.5kgw之間，只相差0.6kgw；但載重比介於742~1113之間，相差371，差異非常大，如下表十五說明。

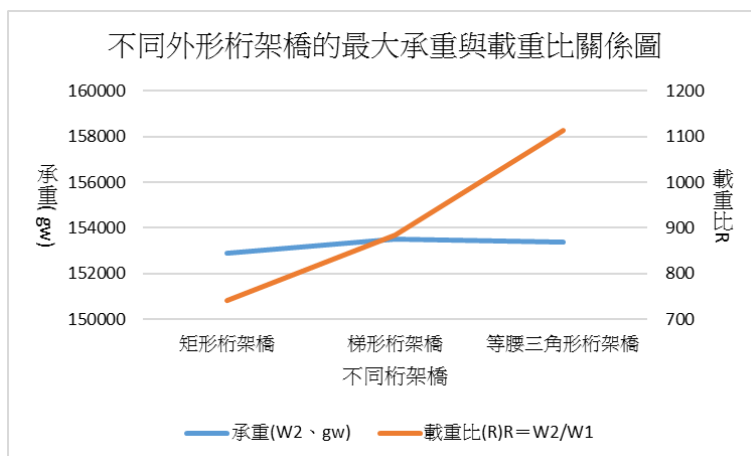
表十五、不同幾何外框的桁架橋結構的最大承重與載重比說明

	矩形桁架橋	梯形桁架橋	等腰三角形桁架橋
結構簡圖			
單側桁架構造內三角形數量	8	8	8
自重(W_1 、gw)	206.1	173.4	137.8
承重(W_2 、gw)	152900	153500	153400
載重比(R) $R = W_2/W_1$	742	885	1113

2. 載重比比較

不同幾何外框的桁架橋，其載重比由大而小依次為：

等腰三角形桁架橋 > 梯形桁架橋 > 矩形桁架橋，其關係圖如圖四十三。



圖四十三、不同幾何外框桁架橋的最大承重與載重比關係圖

(四) 實驗討論：

1. 桿件長短與勁度

不同幾何造型的桁架橋，雖同樣內含八個三角形，七根桿件及結構承受的最大承重相似，但因三角形桁架橋使用的桿件較少且較短，可見三角形桁架橋的桿件可承受較大的外力，此應與結構桿件的勁度有關，**桿件越短，勁度越大，可承受的外力越大。**

2. 載重比與經濟效益

在本次實驗中，不同的幾何造型的桁架橋雖然都有相似的最大承重值，但其中，三角形桁架橋所換算的載重比值卻比其它幾何形狀的結構大很多，**代表相同的承重條件，製作三角形桁架橋所需的成本最少，經濟效益最大**，是值得參考的桁架橋結構。

陸、研究結論

- 一、桁架結構桿件連結的方法有膠黏法、鉸接法、釘接法及榫接法等，其中以膠黏法製作的結構載重比最大，且完成工法所花費的時間最少。
- 二、連接桁架結構桿件，利用膠黏法所需的最適膠黏量約為 $0.125\text{mL}/\text{cm}^2$ 。
- 三、連接桁架結構桿件，利用膠黏法所需的最適等待黏膠乾燥的時間為至少 1 天。
- 四、桁架結構的三角形，若具對稱性且底角越小，則所構成的桁架結構越穩定，承載外力的承重與載重比也越大。
- 五、桁架結構內含三角形數量越多，且具對稱性的結構，則桁架結構越穩定，承載外力的承重與載重比也越大。
- 六、桁架結構內雖含有相同數量的三角形數量，若結構不對稱則會有應力集中的現象，使承載外力的承重與載重比都較小。
- 七、常見梯形桁架橋的載重比差異不大，結構的穩定性相似，但若在結構內增加各種方向桿件所構成的三角形，則能有效分散各種應力，提昇該結構的載重比，例如自行設計的桁架。
- 八、不同造型的桁架橋，例如用矩形、梯形、三角形等幾何形狀設計而成的桁架橋，其最大承重差異不大，但載重比差異頗大，其中以三角外型的桁架橋表現最好，代表其結構最穩定，用料最省，達到“以小搏大”的成效。

柒、未來展望

本次實驗主要以細木條製作簡單桁架的結構穩定性為探討標的，大部分是單面桁架的形狀與結構的關係，較少探討其它的材質、複雜桁架或計算到各結構桿件的受力大小等，未來我們會朝這方面繼續努力，再做相關探討與研究。

捌、參考資料及其他

- 一、 翰林出版社(2020.02)。「結構與生活」。生活科技第二冊，P.06-P.13。
- 二、 徐耀賜(2002)。**桁架結構**。台北市：全華科技圖書股份有限公司。
- 三、 高雄海洋教育推廣系列。**橋樑設計**。2020年3月02日取自
<http://php.trying.com.tw/kunedu/upload/03-02-08-a00301.pdf>
- 四、 每日頭條。**什麼是鉸接？**。2020年3月02日取自 <https://kknews.cc/zh-tw/news/b59vra6.html>
- 五、 每日頭條。**桁架橋的演變**。2020年3月02日取自 <https://kknews.cc/travel/5zkj38l.html>
- 六、 華人百科。**桁架**。2020年3月02日取自
<https://www.itsfun.com.tw/%E6%A1%81%E6%9E%B6/wiki-051567-727227>
- 七、 每日頭條。**應力在生活中的應用、避免及影響**。2020年3月22日取自
<https://kknews.cc/zh-tw/news/jbzje6.html>
- 八、 教育百科。**勁度**。2020年3月22日取自
<https://pedia.cloud.edu.tw/Entry/Detail/?title=%E5%8B%81%E5%BA%A6>

【評語】 032905

1. 使用相對簡易的桁架素材，並以桁架橋的應用進行探究，是有趣的主題。
2. 探討桁架結構與桿件連接方式對其負重比的影響。想法雖然簡單，但實驗變因清楚，實驗過程合理。
3. 探討細木條製作簡單桁架的結構穩定性，雖桁架結構已廣泛應用於大樓或橋樑結構，也有相對應的理論與軟體計算應力，但探討桁架的形狀與結構穩定的關係是本作品的特點。
4. 實驗所使用之木條雖取得方便，但與現實生活中之橋樑材質有相當大的本質差異。桿件連接方式的影響與直覺不符，可能與木條的機械性質相關。
5. 如能更清楚說明本研究之新發現，特別是自行設計桁架新創之處，更能突顯其價值。

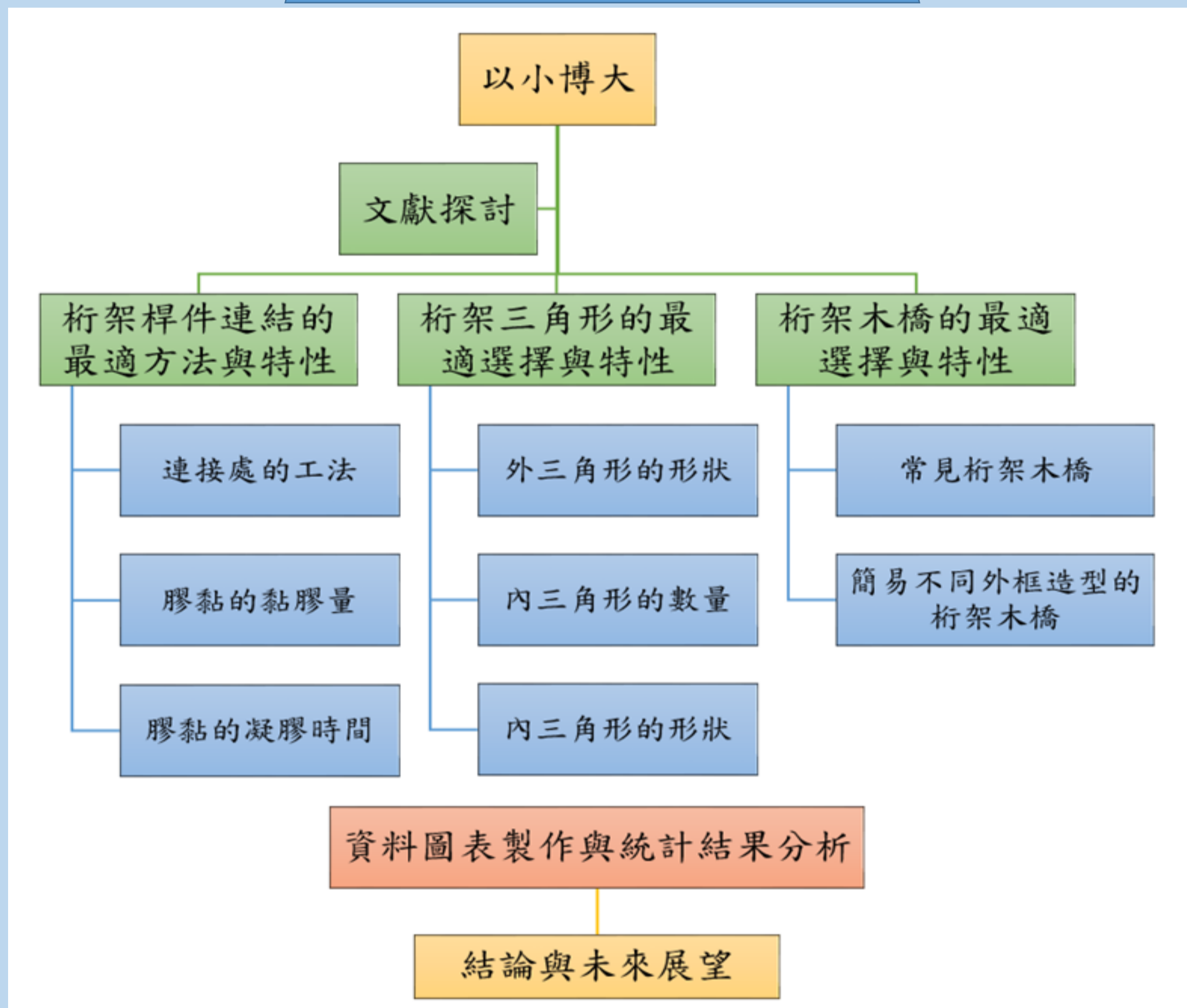
摘要

桁架(TRUSS)是以三角形為基本結構再不斷延伸的結構，本實驗在探討簡單桁架結構的穩定性，其穩定性以載重比($R = \text{承重}/\text{自重}$)表示，載重比越大，穩定性越高。若以單一三角形來看桁架結構，底角越小的等腰三角形結構穩定性最好；多三角形的簡單桁架，其構造越對稱且內含的三角形數量越多，結構越穩定，承重的載重比值(R)越大。再者，不同幾何造型的桁架橋中以三角形桁架橋的載重比最大，具有以小搏大的概念。

壹.研究動機

還記得從我們小時候金門縣的金烈大橋開始動工，從那時候起我們就對橋的結構有著極大的興趣。

貳.研究架構



參.研究設備及器材

8×8mm木條 線鋸機 鑽孔機 砂帶機 刨木機 電子吊秤(200kgw、50kgw) 鈦棒膠(黏合強度:3750psi 可作業時間:5min) 電動千斤頂(300kgw) 自制測試架

肆.研究過程或方法

一.承重測試設備

自製測試架

設計圖(四視圖)	完成圖
	<p>材料：2.5×5×70cm松木材 成品尺寸：65×30×80cm</p>

承重設備演進

項次	所需器材	圖片	說明
第一代承重測試設備	自製測試架、電子秤(50Kgw)、手動千斤頂等		<ol style="list-style-type: none"> 電子秤最大承重量為50Kgw，超過即無法測量。 測量時，手搖千斤頂的速度不一。
第二代承重測試設備	電子吊秤(200Kgw)、電動千斤頂、直尺、S掛勾、童軍繩、自製測試架		<ol style="list-style-type: none"> 電子秤最大承重量為200Kgw，足夠本次實驗使用。 電動千斤頂的升降速度穩定。 測試架結構穩定，易調整跨距大小。

三.桁架製作木條材料篩選過程



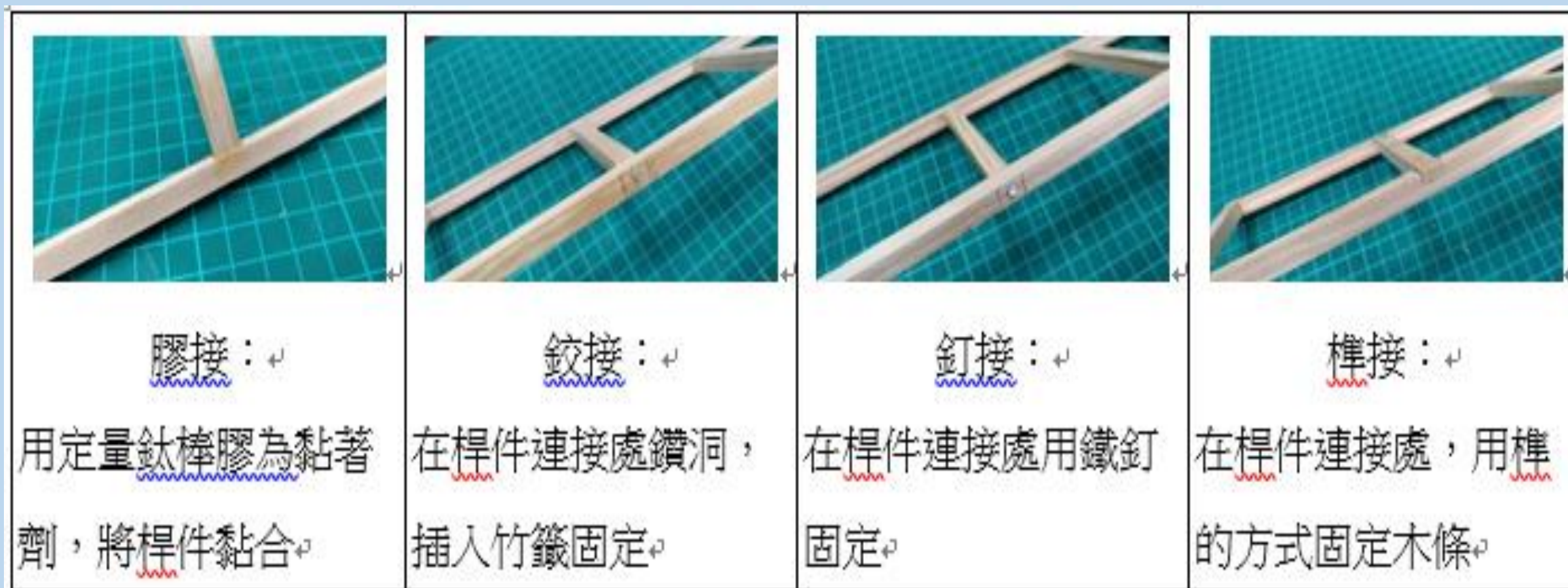
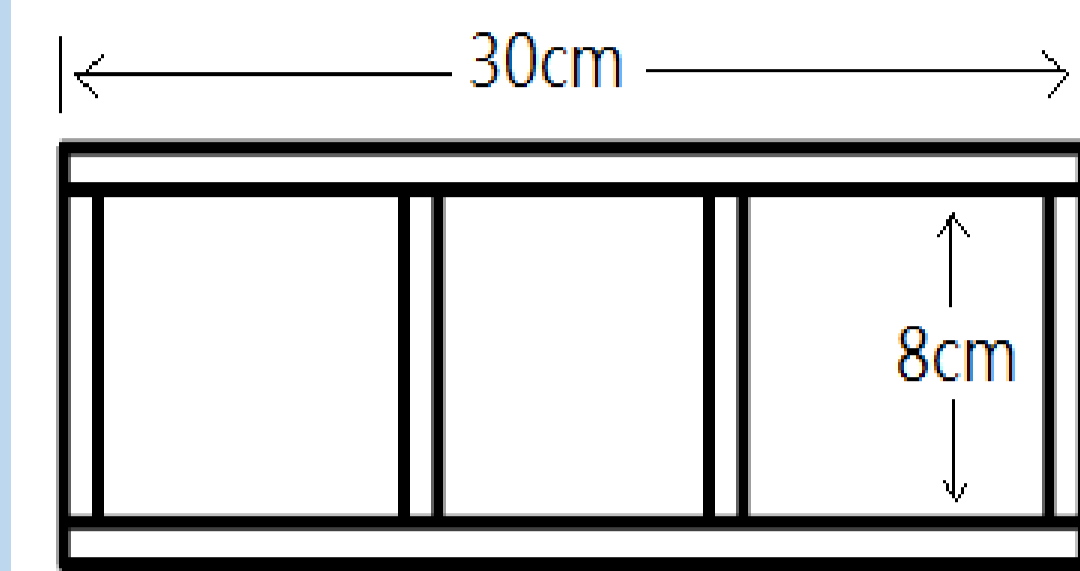
#纖維紋路目視篩選 → 尺寸確認 → 刨木機調整

四.實驗過程

實驗一 探討桿件連接處的工法對載重比的影響

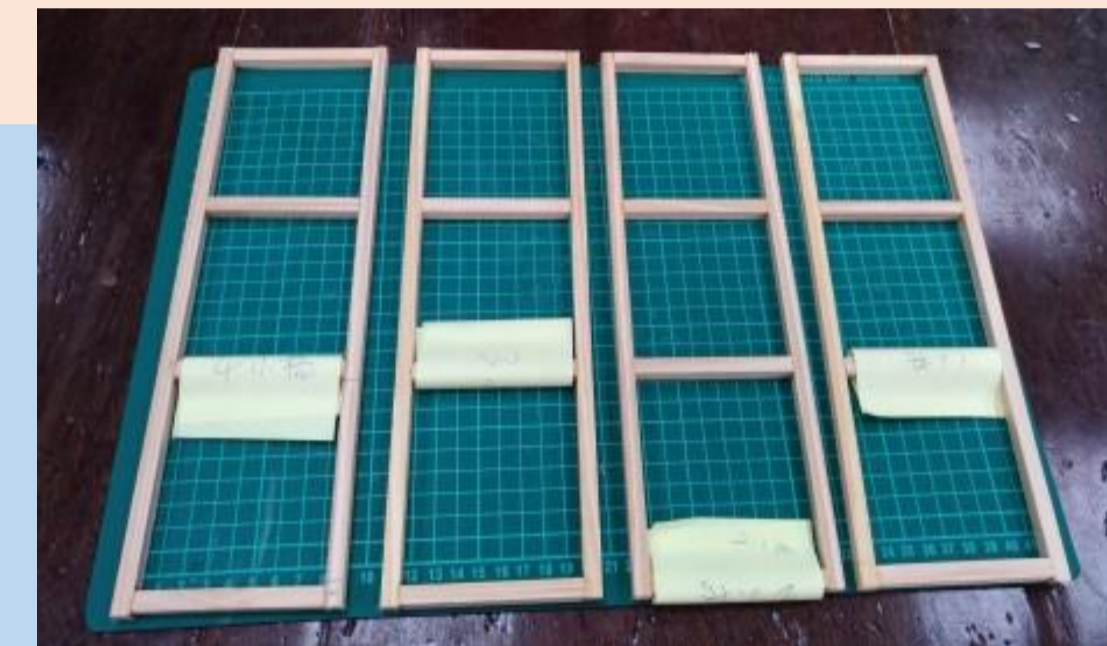
右圖為圖一.平面結構圖

下圖為圖二.桿件各種連接方式圖



實驗二 探討桿件連接的膠黏量對載重比的影響 (0.02~0.10ml)

右圖為圖三.不同膠黏量的實驗裝置圖

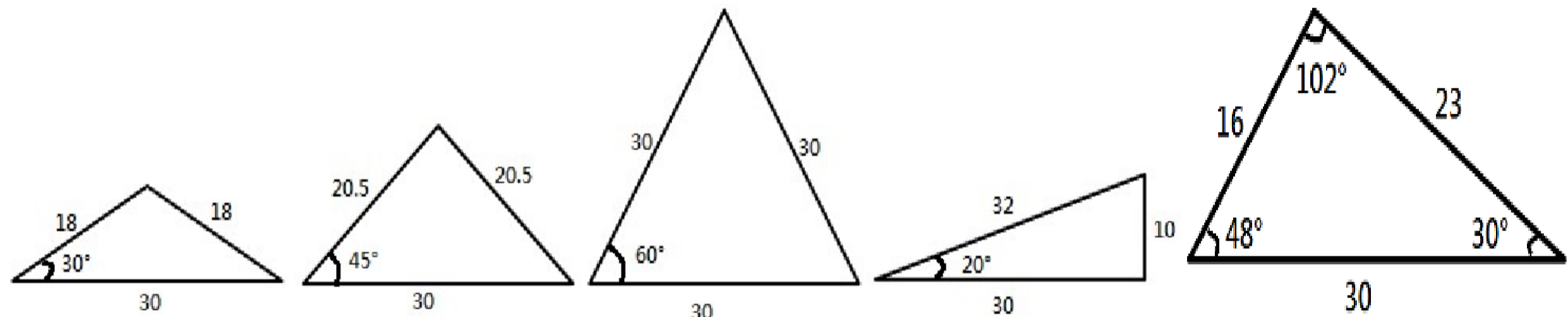


實驗三 探討桿件連接處的膠黏的凝膠時間對載重比的影響 (1~5天)

實驗四 探討桁架外三角形的形狀對載重比的影響

(等腰△、直角△、任意△)

結構設計 → 裁切桿件 → 組裝測試 → 膠黏固定 → 完成

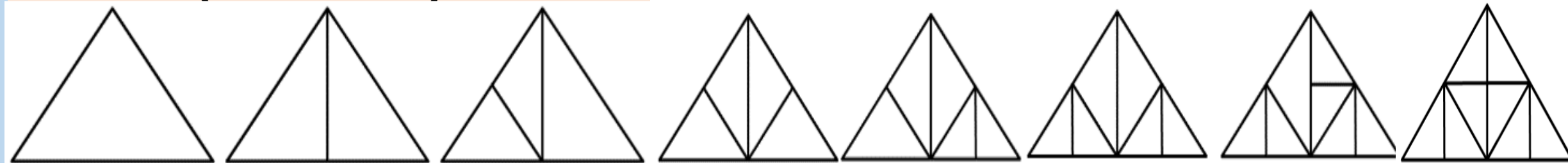


圖四、各種桁架外三角形的設計圖



圖五、各種不同的桁架外三角形完成圖

實驗五 探討桁架內三角形的數量對載重比的影響 (1~8個△)



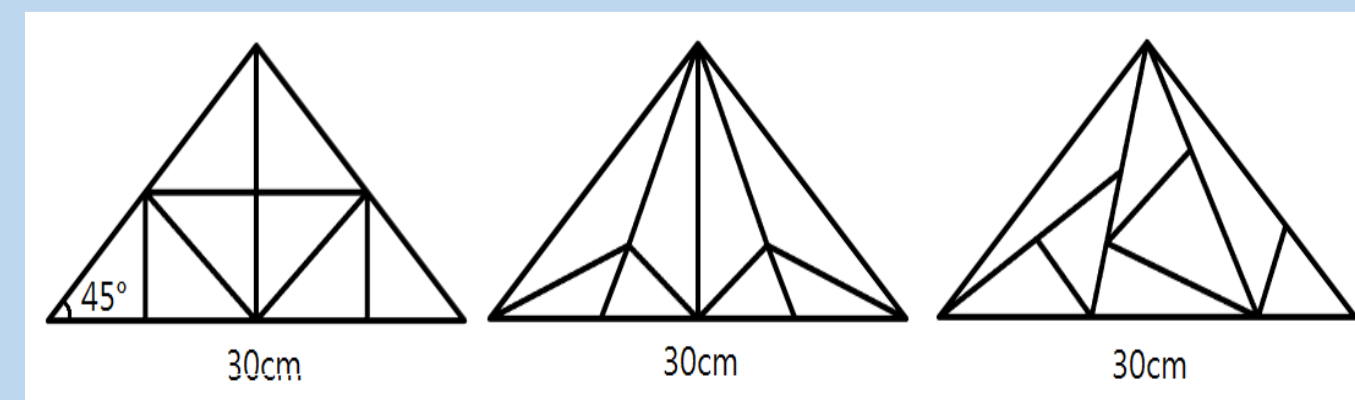
圖五、各種不同三角形數量的桁架設計圖



圖六、不同三角數量的桁架結構完成圖

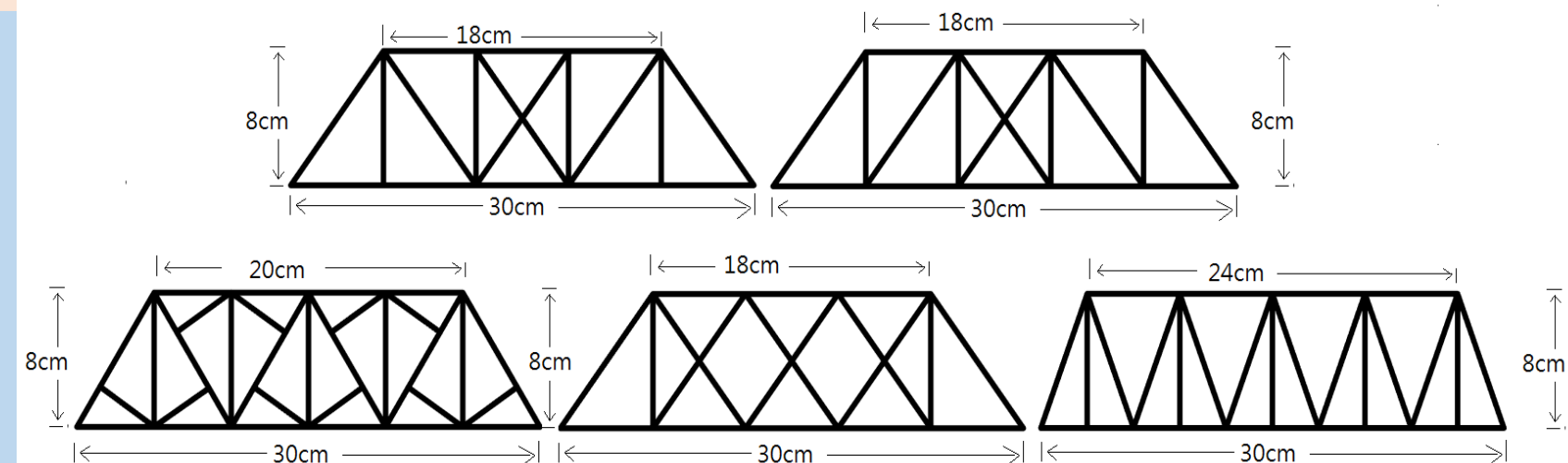
實驗六 探討桁架內三角形的形狀對載重比的影響

圖七、桁架結構內不同三角形狀設計圖

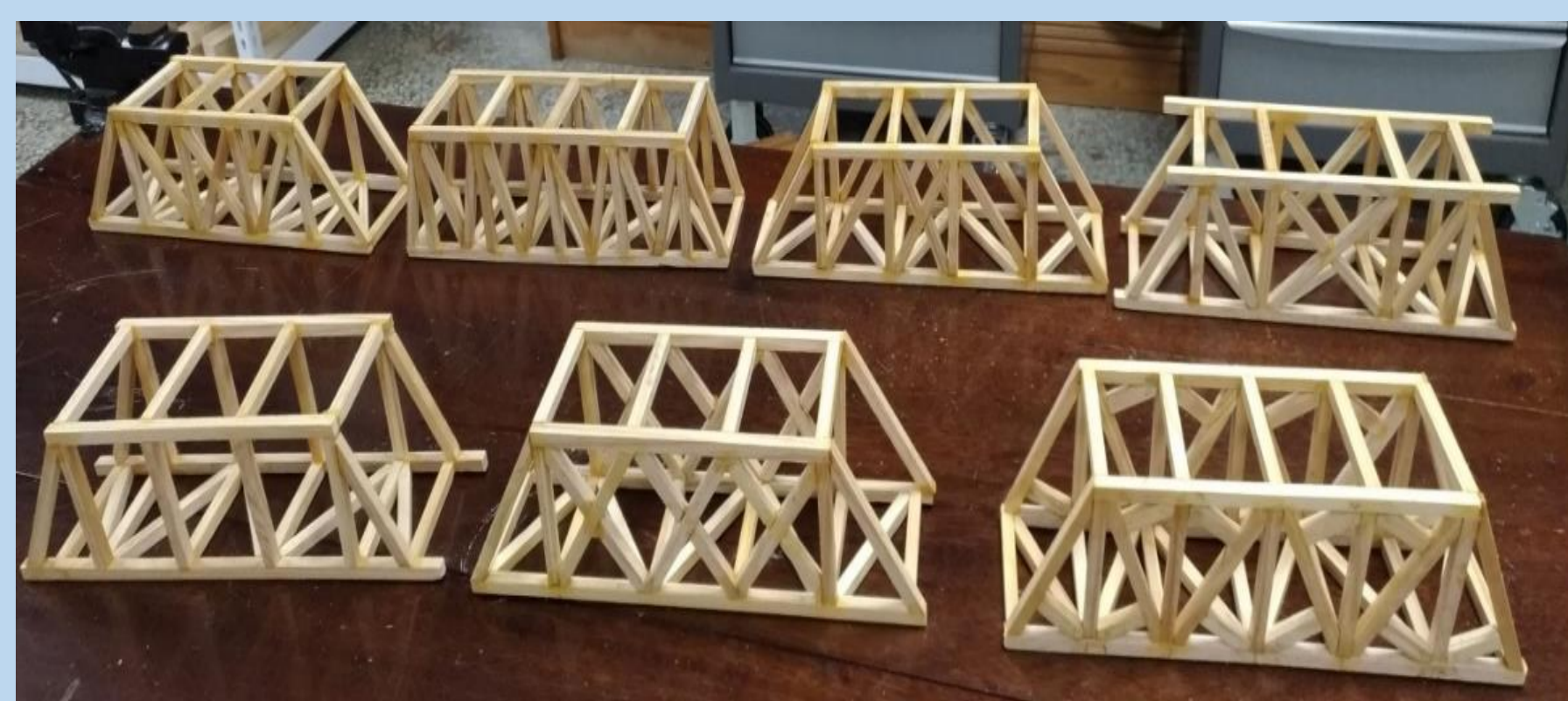


實驗七 探討常見桁架木橋的載重比

圖八、常見的桁架木橋設計圖

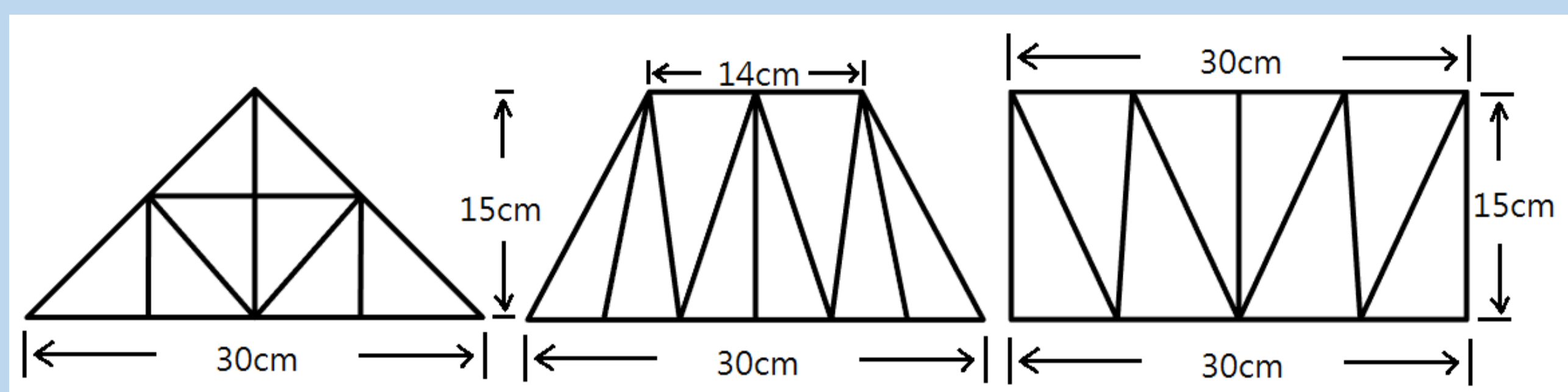


圖九、常見的桁架木橋成品圖



- 1.我們發現,在實驗中,桿件因連接而使用的膠黏量增加至0.06mL之後,其對結構的穩定度影響都類似。
- 2.膠黏量選擇
經由以上實驗,我們於往後的實驗裡,結構桿件間的膠黏量都以0.08mL為主,約為0.125mL/cm²

實驗八 探討不同幾何造型的桁架木橋載重比



圖十、不同幾何造型的桁架木橋設計圖



圖十一、不同幾何造型的桁架木橋完成圖

實驗三、探討桿件連接處的膠黏的凝膠時間對載重比的影響(1~5天)

凝膠時間	1天	2天	3天	4天	5天
自重(W _{1,gw})	37.8	37.6	38.1	37.9	38
最大承重(W _{2,gw})	36850	36700	36900	36800	37000
載重比(R) R=W ₂ /W ₁	975	976	969	971	974

- 1.有可能是實驗或設備造成的誤差,因此,雖然1~5天的凝膠時間不同,但其對結構的穩定度影響不大。
- 2.凝膠時間的選擇
經由以上實驗結果,我們於往後的實驗裡,結構桿件間的凝膠時間都設定至少1天

伍.研究結果與討論

實驗一、探討桿件連接處的工法對載重比的影響(膠黏、鉸接、釘接、榫接)

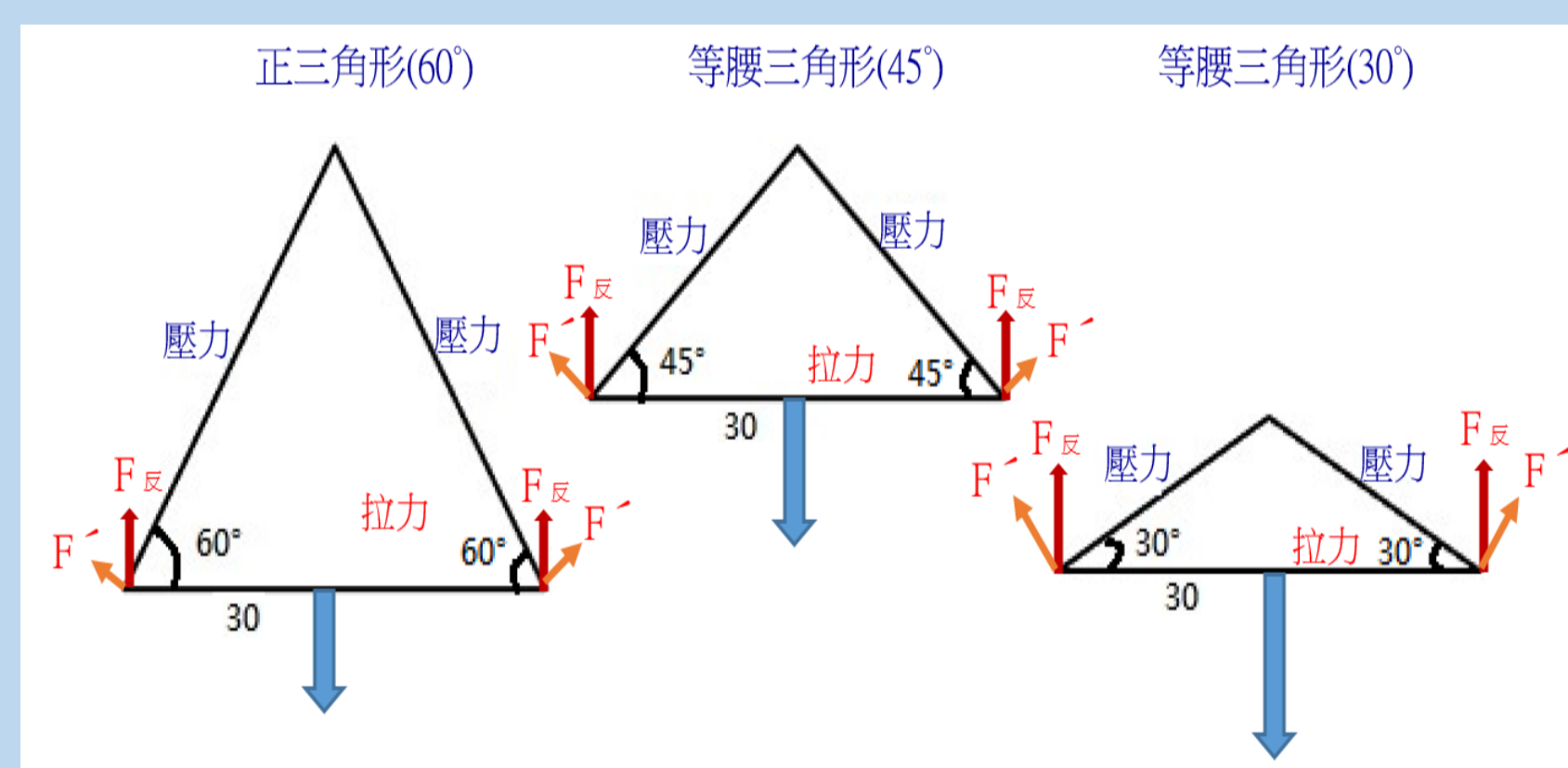
	膠黏法	鉸接法	釘接法	榫接法
圖片				
完成桿件連接時間(min)	5min+ (不含膠乾時間)	40min	30min	150min
自重(W _{1,gw})	40.2	41.1	41	43.2
最大承重(W _{2,gw})	35100	30200	25100	13300
載重比(R=W ₂ /W ₁)	873	735	612	308

實驗四、探討桁架三角形的形狀對載重比的影響(等腰△、直角△、任意△)

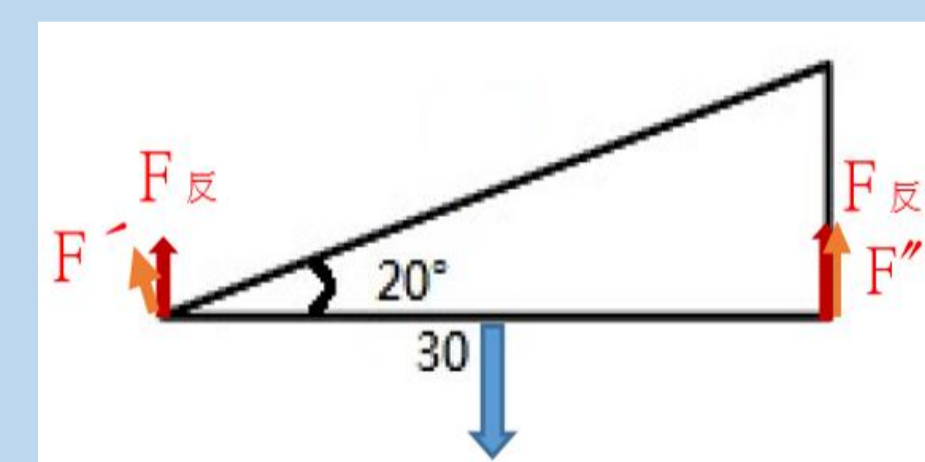
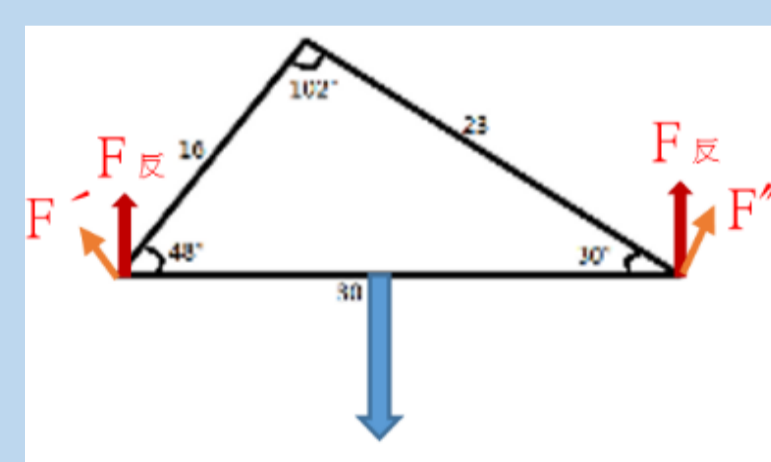
	等腰三角形(30°)	等腰三角形(45°)	正三角形(60°)	直角三角形	任意三角形
單邊構造					
自重(W _{1,gw})	84.2	86	89.6	86.9	85.3
最大承重(W _{2,gw})	31770	32130	29470	27740	30900
載重比(R=W ₂ /W ₁)	377	374	329	319	322

根據力平衡原理

等腰三角形的底角越小的桁架結構可承受越大的拉力,載重比也越大。



相同的轉動力矩,所需施力最小,且形狀不對稱,兩邊受力不同,結構不穩定



實驗五、探討桁架內三角形的數量對載重比的影響(1~8個△)

	結構 I	結構 II	結構 III	結構 IV	結構 V	結構 VI	結構 VII	結構 VIII
三角形數量	1個	2個	3個	4個	5個	6個	7個	8個
單面構造								
自重(W _{1,gw})	86	99.5	121.6	123.2	125.9	134.1	135.9	144.5
承重(W _{2,gw})	32130	50450	47350	82300	49650	104600	68050	145900
載重比(R=W ₂ /W ₁)	374	507	389	668	394	780	501	1010

桿件連接工法選擇

由以上實驗,我們發現,實驗用的細木條,在結構桿件的連接方式以膠接法最好,故之後的桿件連接方式都是以方法進行。

實驗二、探討桿件連接處的黏膠量對載重比的影響(0.02mL~0.10mL)

黏膠量	0.02ml	0.04ml	0.06ml	0.08ml	0.10ml
自重(W _{1,gw})	37.1	37.1	38.1	38.8	38.6
最大承重(W _{2,gw})	16300	25750	36400	38250	38190
載重比(R=W ₂ /W ₁)	439	694	955	986	989
備註			出現溢滿現象	出現溢滿現象	出現溢滿現象

	結構 I	結構 II	結構 III	結構 IV
內三角形數量	1	2	3	4
形變量(形變角度)	20	10	5	1
實驗圖				
	結構 V	結構 VI	結構 VII	結構 VIII
內三角形數量	5	6	7	8
形變量(形變角度)	1	1	0	0
實驗圖				

1. 結構零桿件

零桿件雖然不受力，但在穩定結構上應有顯著的功效。

	1個	2個	3個	4個	5個	6個	7個	8個
單面構造								
載重比(R)	374	507	389	668	394	780	501	1010

結構不對稱與應力集中

桁架結構不對稱時，一旦受外力拉扯就會產生「應力集中」現象

※省思：橋梁建置完成啟用後，後續維護相當重要，任何部位的鏽蝕與鬆脫，將等同結構不對稱的狀態，容易產生應力集中現象，降低橋梁載重比，增加橋梁崩塌機率，影響大眾的生命安全。

實驗六、桁架結構內三角形的形狀對載重比的影響

	結構 IX	結構 X	結構 XI
內三角形狀	直角三角形	任意三角形且對稱	任意三角形但不對稱
單側桁架構造內三角形數量	8	8	8
自重(W ₁ , gw)	137.8	148.7	145.9
承重(W ₂ , gw)	153400	150800	97700
載重比(R) R = W ₂ /W ₁	1113	1014	670

當桁架結構內的三角形狀不同時，影響桁架結構穩定度的因素為結構是否對稱。

結構對稱的桿件能有效對抗外力直至桿件材質無法承受為止。

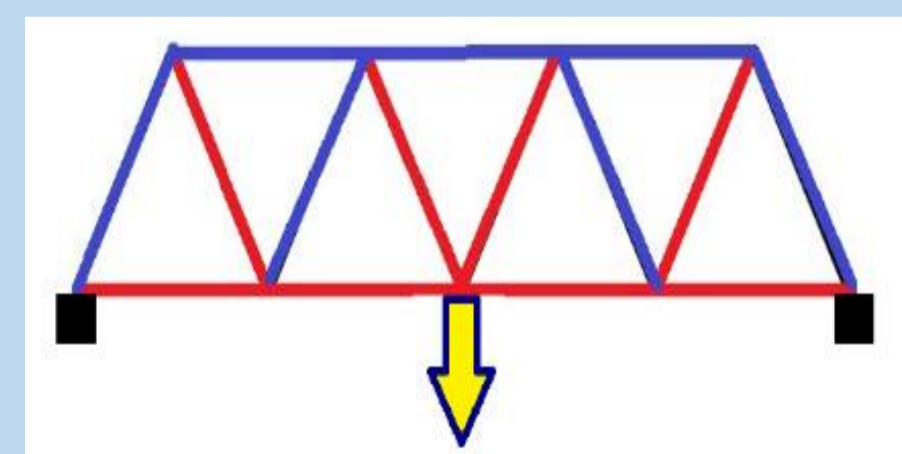
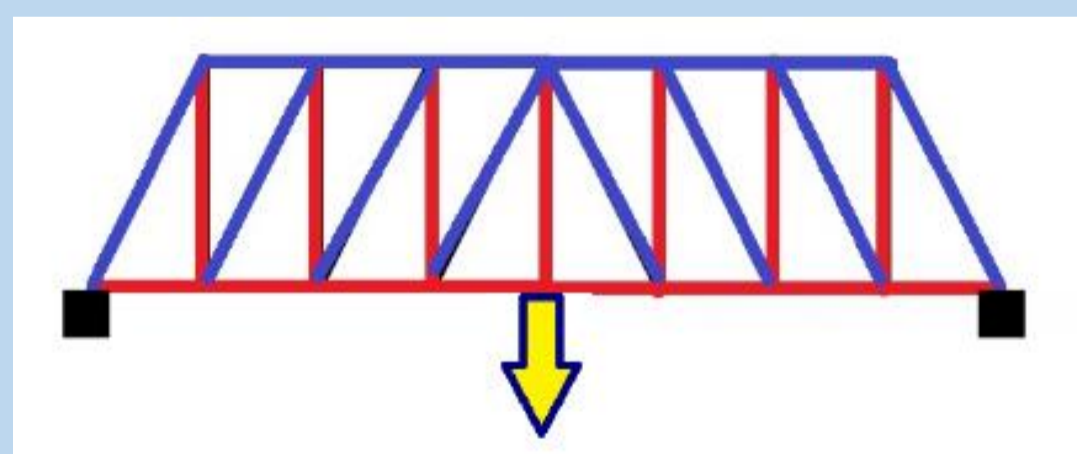
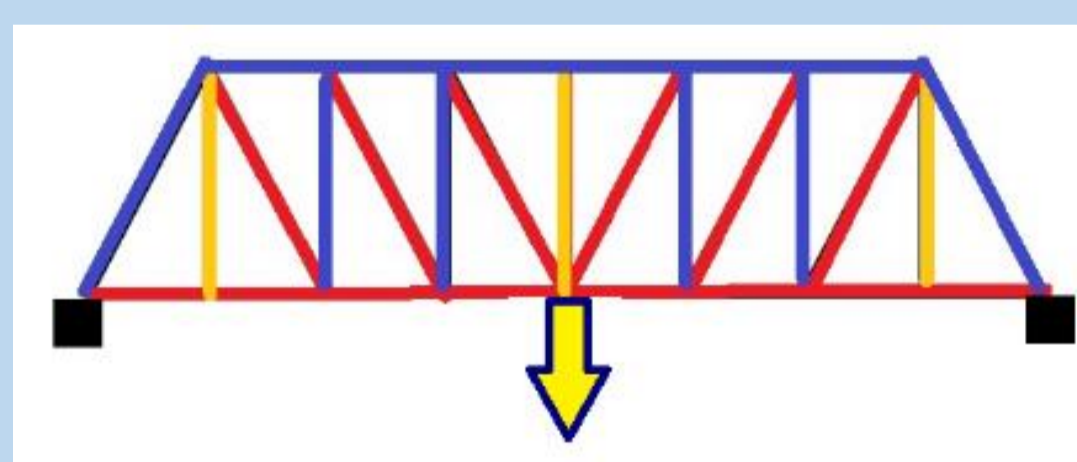
實驗七、探討簡易桁架木橋的載重比

	四角華倫桁架	華倫桁架	郝氏桁架	普拉特桁架	自行設計桁架
單邊構造					
單側桁架構造內三角形數量	10	14	10	10	20
自重(W ₁ , gw)	189.6	203.2	182.9	179.6	206.1
最大承重(W ₂ , gw)	54950	139900	123200	125100	145200
載重比(R) R = W ₂ /W ₁	290	688	674	697	705

本次實驗，自行設計桁架結構() 結構內不但有最多的三角形數量，且有偏橫向的桿件，此結構當受外力達最大承重時，其彎曲形變量非常小

桁架結構各桿件可能受拉力或壓力的概況模擬圖

(↓表示外力；藍色線段 — 表示壓力；紅色線段 — 表示拉力；黃色線段 — 表示零桿件)



實驗八、探討不同外型的桁架木橋載重比

	矩形桁架橋	梯形桁架橋	等腰三角形桁架橋
結構簡圖			
單側桁架構造內三角形數量	8	8	8
自重(W ₁ , gw)	206.1	173.4	137.8
承重(W ₂ , gw)	152900	153500	153400
載重比(R) R = W ₂ /W ₁	742	885	1113

1. 桿件長短與勁度

桿件越短，勁度越大，可承受的外力越大

2. 載重比與經濟效益

製作三角形桁架橋所需的成本最少，經濟效益最大

陸. 研究結論

- 以膠黏法製作的結構載重比最大，且完成工法所花費的時間最少。
- 連接桁架結構桿件，利用膠黏法所需的最適膠黏量約為0.125mL/cm²。
- 連接桁架結構桿件，利用膠黏法所需的最適等待黏膠乾燥的時間為至少1天。
- 桁架結構的三角形，若具對稱性且底角越小，則所構成的桁架結構越穩定，承載外力的承重與載重比也越大。
- 桁架結構內含三角形數量越多，且具對稱性的結構，則桁架結構越穩定，承載外力的承重與載重比也越大。
- 桁架結構內雖含有相同數量的三角形數量，不對稱則會有應力集中的現象，使承載外力的承重與載重比都較小。
- 若在結構內增加各種方向桿件所構成的三角形，則能有效分散各種應力，提昇該結構的載重比，例如自行設計的桁架。
- 本次實驗中，不同造型的桁架橋，例如用矩形、梯形、三角形等幾何形狀設計而成的桁架橋，其最大承重差異不大，但載重比差異頗大，其中以三角外型的桁架橋表現最好，代表其結構最穩定，用料最省，達到“以小搏大”的成效。

柒. 未來展望

探討其它的材質、複雜桁架或計算到各結構桿件的受力大小等，未來我們會朝這方面繼續努力，再做相關探討與研究。

捌. 參考資料及其他

- 翰林出版社(2020.02)。「結構與生活」。生活科技第二冊，P.06-P.13。
- 徐耀賜(2002)。桁架結構。台北市：全華科技圖書股份有限公司。
- 高雄海洋教育推廣系列。橋樑設計。2020年3月02日取自<http://php.trying.com.tw/kunedu/upload/03-02-08-a00301.pdf>
- 每日頭條。什麼是鉸接？。2020年3月02日取自<https://kknews.cc/zh-tw/news/b59vra6.html>
- 每日頭條。桁架橋的演變。2020年3月02日取自<https://kknews.cc/travel/5zjk38l.html>
- 華人百科。桁架。2020年3月02日取自<https://www.itsfun.com.tw/%E6%A1%81%E6%9E%B6/wiki-051567-727227>
- 每日頭條。應力在生活中的應用、避免及影響。2020年3月22日取自<https://kknews.cc/zh-tw/news/jbzjze6.html>
- 教育百科。勁度。2020年3月22日取自<https://pedia.cloud.edu.tw/Entry/Detail/?title=%E5%8B%81%E5%BA%A6>