

附件三

## 屏東縣第66屆國民中小學科學展覽會 作品說明書

科 別： 生活與應用科學(一)

組 別： 國小組

作品名稱： 這座橋真「斜張」！——探討竹筏斜張橋的結構改良與極限承載

關 鍵 詞： 斜張橋 、 結構改良 、 載重測試 （最多3個）

編號： A6017

製作說明：

1. 說明書封面僅寫科別、組別、作品名稱及關鍵詞。
2. 編號：報名時取號。
3. 封面編排由參展作者自行設計。

# 這座橋真「斜張」！—探討竹筷斜張橋的結構改良與極限承載

## 【研究摘要】

本研究旨在探討斜張橋的結構特性與穩定性。研究團隊受高屏溪斜張橋啟發，利用竹筷與棉繩製作兩代橋樑模型進行對比。第一代模型因橋塔不直與接合面過小，在承載 23 瓶飲料及 15 本習作後即發生嚴重變形而失敗。第二代改良型採用「雙面拼接法」強化橋面，並以「竹籤」補強接合處，輔以平均化的索力分配。實驗運用「影像量化觀測法」，透過固定相機與方格背景紙精確記錄不同載重下的位移量。結果顯示，第二代模型成功承載全部 23 瓶飲料及 48 本習作，展現優異的結構剛性。結論證實，透過精準的材料接合與合理的力傳遞路徑規劃，能大幅增強斜張橋的結構承載力。

## 壹、前言

### 一、研究動機

在每次前往高雄的途中，我們總會經過壯觀的高屏溪「斜張橋」(圖 1)。此外，我們在各地旅遊時也見過許多不同類型的「吊橋」(圖 2)，不論是人行或是車用，其多變的結構都引發了我們強烈的好奇心。

雖然斜張橋與吊橋外觀上都有許多鋼纜，但我們發現它們在物理力學上的受力方式似乎並不相同。為了揭開這些橋樑能支撐巨大重量的奧秘，我們決定動手製作模型，深入探討其結構設計與穩定性的關係。

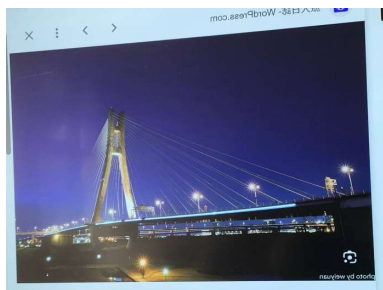


圖 1



圖 2

### 二、文獻探討與名詞定義

在開始實驗前，我們針對常見的索力橋樑進行了資料蒐集與原理分析，主要分為以下三類：

#### (一)、吊橋 (Suspension Bridge)

- 1、結構特徵：由兩根高大的橋塔支撐，中間垂下弧線形的主纜，並透過垂直的吊桿拉住橋面。
- 2、力傳遞路徑：橋面重量→吊桿 → 主纜 → 兩端的「錨碇座」。
- 3、簡單比喻：就像家裡的晾衣繩，衣服掛在繩子上，力量由繩子兩端拉住。

#### (二) 斜張橋 (Cable-stayed Bridge)(圖 3)

- 1、結構特徵：橋塔上直接伸出多條直線鋼索，直接拉住橋面，呈現放射狀或扇形分佈。
- 2、力傳遞路徑：橋面重量 → 斜向鋼索 → 直接傳回「橋塔」。
- 3、簡單比喻：就像撐著雨傘，雨傘布重量是靠傘骨直接傳到中間的傘柄上。

#### (三) 脊背橋 (Extradosed Bridge)(圖 4)

- 1、結構特徵：結合了梁橋與斜張橋的特徵，橋塔較矮，鋼索角度較平緩。
- 2、力傳遞路徑：由厚實的橋身（梁體）與鋼索共同分擔重量。
- 3、簡單比喻：就像一個力氣很大的人背著重物，同時用兩根繩子提著重物來減輕負擔。



圖 3



圖 4

### 三、研究目的

- (一)、透過實際觀察與資料查詢，釐清斜張橋在結構上的受力影響差異。
- (二)、使用相同的材質（竹筷與棉繩），設計並製作出穩定度高且承載能力強的斜張橋模型。

(三)、針對第一代模型的缺失進行分析，找出影響橋樑穩定性的關鍵變因（如接合方式、索力分配等），並完成改良。

## 貳、研究設備與器材

### 一、研究設備及器材

(一)、主要材料：竹筷（共約 400 根）、白膠、棉繩、竹籤。

(二)、工具：尺、筆、電子秤（測量承重）、刷子、橡皮筋、冰棒棍、長尾夾、平板電腦。

### 二、材料選定與評估

為了確保實驗的公平性與準確度，我們選擇品質較統一的「竹筷」與「棉繩」作為主要材料，其優點在於品質穩定、取得容易且規格一致。我們曾考慮過以下材料，但因特定原因予以淘汰：

(一)、木頭：取得不易，且每根粗細大小不同，難以大量生產與精確實驗。

(二)、紙捲：容易受潮變形，且每次捲繞的粗細與強度難以維持相同，結構過於脆弱。

## 參、研究過程與模型改良歷程

### 一、第一代模型：初探與發現問題

我們初步模仿斜張橋的外型製作了第一座橋。

(一)、橋面製作：採用 3223 的方式黏接(圖 5、圖 6)，由於黏合面太少，導致橋面高低不平且容易分離。

(二)、橋塔與柱子：採用包裹式做法(圖 7、圖 8)，因缺乏規劃導致柱子不直、外觀凌亂，支撐力弱。

(三)、發現問題：

1、橋塔四根主柱不夠筆直，造成受力無法有效向下傳遞。

- 2、橋面不平整，接合處縫隙過大。
- 3、棉繩索力分配不均，導致橋面發生傾斜。
- 4、白膠塗抹過多反而導致材料滑動脫落。



圖 5



圖 6



圖 7



圖 8

## 二、第二代模型：改良與結構強化

針對第一代的缺失，我們進行了以下技術改良：

- (一)、材料挑選：預先篩選平滑筆直的竹筷，並切除頂端縫隙過大部分(圖 9)。
- (二)、結構強化：在竹筷接合處加入「竹籤」增加密合度，防止滑動並強化剛性 (圖 10、圖 11)。
- (三)、橋面改良：改用「雙面拼接法」，增加接觸面積並大幅提升平整度(圖 12、圖 13、圖 14)。
- (四)、索力平均化：修正棉繩的間距與張力，改用平均配重方式，確保每條索力都能有效地將重量傳回橋塔。



圖 9



圖 10



圖 11



圖 12



圖 13



圖 14

#### 肆、研究結果

本研究透過量化的觀測設定，針對兩代橋樑結構進行「受壓形變」與「極限承載力」之對比實驗。

##### 一、實驗觀測與測量設定。

為了精確捕捉橋樑在受重後的細微位移，本實驗建立了標準化的觀測系統：

(一)、定點觀測：相機架設於固定位置，對焦中心點設定為橋樑中間位置。

(二)、空間控制：相機高度設定為 16 cm，距離橋塔外側固定為 30 cm。

(三)、量化基準：於橋樑後方設置數學方格紙板，每格為 1 平方公分的小方格，作為判讀橋面下陷量（位移）的視覺基準。



|                      |                         |                       |                      |
|----------------------|-------------------------|-----------------------|----------------------|
| 定點觀測<br>對焦中心點設定為橋樑中間 | 空間控制<br>距離橋塔外側固定為 30 cm | 空間控制<br>相機高度設定為 16 cm | 量化基準<br>橋樑後方設置數學方格紙板 |
|----------------------|-------------------------|-----------------------|----------------------|

## 二、載重過程之形變分析

本實驗使用三種標準重量物進行逐級加壓測試：小瓶果汁（178g、圖 15）、大瓶飲料（423g、圖 16）及習作本（169g、圖 17）。



圖 15



圖 16



圖 17

### （一）、第一座斜張橋觀測

- 1、過程紀錄：進行 23 次連續拍照（每增加一瓶飲料拍攝一次）。
- 2、變形規律：觀察 23 張序列照片發現(表 1)，隨著飲料瓶數增加，橋面中心點在方格紙上的高度座標逐漸下移。

表 1





(二)、第二座斜張橋觀測

- 1、過程紀錄：採取與第一座完全相同之觀測設定進行 23 次拍攝(表 2)。
- 2、變形規律：相較於第一代，第二代模型在相同瓶數（23 瓶）下，於方格紙上顯示的位移量明顯較小，顯示其結構剛性較強。

表 2





### 三、極限承載力對比測試 (Limit Load Test)

因兩座橋樑皆能完整承受 23 瓶飲料之重量，故改用「習作本」進行破壞性極限測試，每次增加 5 本(表 3、表 4)。

表 3

| 測試指標        | 第一座斜張橋                  | 第二座斜張橋               |
|-------------|-------------------------|----------------------|
| 飲料承載數       | 23 瓶 (通過)               | 23 瓶 (通過)            |
| 習作本承載<br>極限 | 15 本                    | 48 本 (全數通過)          |
| 失敗現象描述      | 橋面嚴重變形，導致下沉壓至四根橋柱，無法負荷。 | 結構完整，未出現顯著形變，仍可繼續負重。 |

表 4

| 測試結果 | 第一座斜張橋                                                                              | 第二座斜張橋                                                                               |
|------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 0 瓶  |  |  |

|                      |                                                                                   |                                                                                    |
|----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| 10 瓶<br>(6 大瓶加 4 小瓶) |  |  |
| 23 瓶                 |  |  |
| 極限失敗前                |  |  |

## 伍、 討論

根據實驗結果計算總承載力：

一、第一代承載力極限估算： $17 \times 178 + 6 \times 423 + 15 \times 169 = 6319$ 。

二、第二代承載力極限估算： $17 \times 178 + 6 \times 423 + 48 \times 169 = 11896$ 。

本研究透過對兩代橋梁模型的極限測試與影像觀測，針對結構改良與承載力之關係討論如下：

### 一、結構改良與負重效能之關係

根據實驗結果，第一代模型的極限承載力估算為 6,319g，而第二代改良模型則達到 11,896g。在同樣使用竹筷與棉繩的前提下，負重能力提升了近 1.88 倍，這證明了本研究提出的「結構強化方案」具有顯著成效：

(一)、接合面積與摩擦力：第二代改用「雙面拼接法」製作橋面，大幅增加了竹筷間的白膠黏合面積。根據力學原理，黏合面積增加能提供更大的抗剪力，減少了竹筷間因受壓而產生的滑動位移。

(二)、結構加強件的作用：在接合處嵌入「竹籤」的設計，其作用類似於建築工程

中的「植筋」。竹籤增加了材料間的密合度，使多根竹筷能像「一體化」的梁體共同受力，而非各自受力。

## 二、斜張橋索力分配的科學影響

在第一代模型測試中，觀察到橋面因索力不均而產生傾斜。透過第二代的改良，我們修正了棉繩的間距與張力，得出以下發現：

(一)、平均受力機制：當鋼索（棉繩）張力保持一致時，橋面的重量能更均勻地透過斜向鋼索傳遞至橋塔。

(二)、減少應力集中：索力平均化避免了特定幾根棉繩或橋面局部承受過大壓力，這是第二代能成功負擔 48 本習作而結構未崩塌的關鍵原因。

## 三、影像量化觀測之現象分析

透過固定機位與方格紙的影像對比，我們分析了橋梁的「下陷規律」：

(一)、位移與重力的正相關：隨重物增加，橋面中心點位移量遞增，且位移速度在接近極限負重前會加快。

(二)、剛性表現：第二代模型在相同載重下的方格位移量明顯小於第一代，代表改良後的結構具有更高的「剛性」（Stiffness），能有效抵抗外力引起的變形。

## 四、實驗誤差與改進建議

在本實驗中，可能存在之誤差來源包括：

(一)、材料一致性：雖然篩選了平直竹筷，但每根筷子的密度仍有些微差異。

(二)、黏合時間：白膠的完全乾燥程度可能影響接合強度。

未來研究若能增加不同「橋塔高度」或「鋼索排列角度」的對比，將能更完整地建構斜張橋的力學模型。

## 陸、結論與應用

### 一、研究結論

本研究透過兩代斜張橋模型的製作與載重對比實驗，得出以下結論：

(一)、結構改良對承載力有顯著提升：第一代模型在放置 23 瓶飲料及 15 本習作後即發生結構破壞；而第二代改良模型在相同條件下，能全數承載 23 瓶飲料及 48 本習作且結構完整。這證明了本研究提出的改良方案能有效提升橋樑強度。

(二)、關鍵成功因素分析：

1、接合技術：利用「雙面拼接法」增加橋面接觸面積，並輔以「竹籤」嵌入接合處，有效減少了竹筷間的位移與滑動，提升了整體剛性。

2、索力平衡控制：修正棉繩的間距與張力使其平均分配，能更有效率地將橋面載重引導至橋塔，減少了局部受力過大的變形風險。

3、影像量化觀測之有效性：透過固定相機位置與方格背景紙的觀測方式，我們能將抽象的「變形」轉化為精確的「座標位移」，成功觀察到載重與下陷量之間的關係。

## 二、實際應用與建議

本實驗的發現可作為未來模型製作或實際工程設計的參考：

(一)、材料篩選之重要性：實驗證明材料的平整度會直接影響接合的密合度。在實際工程中，材料的品質是結構安全的基礎。

(二)、結構加強件的啟發：我們在實驗中加入的「竹籤」，功能類似於建築工程中的「植筋」或「螺栓」，對於脆弱的接合處有顯著的補強效果。

(三)、索力監控與調整：斜張橋的維護必須確保每條鋼索的張力均勻。本實驗中「索力不均導致傾斜」的發現，提醒了現實中橋樑安全監測的重要性。

## 三、未來研究方向

由於時間與器材限制，本研究仍有可進一步探究之處：

(一)、環境變因測試：未來可增加「風阻測試」，觀察不同橋面寬度或橋塔形狀在強風環境下的震盪表現。

(二)、不同排列形式的索力研究：測試「放射狀」、「豎琴狀」與「扇形」排列的鋼索，哪一種在相同材料下具備最佳的載重效率。

(三)、不同橋塔高度的影響：研究橋塔高度與斜拉角度之間的黃金比例，以求達到最大的支撐力。

實驗的最後，感謝同學們在過程中所付出的努力與回饋，也感謝指導老師屢屢在我們遇到瓶頸時，提供更多的點子，更在橋梁乘載觀察提供相機協助，期待未來能繼續合作更多有趣的科展主題。

## 柒、參考資料及其他

### 1. 網路專業機構與科普資料

交通部高速公路局 - 橋梁工程簡介：提供台灣各大橋梁（如高屏溪斜張橋）的官方介紹與結構說明。取自 <https://www.freeway.gov.tw/Publish.aspx?cnid=2867>

維基百科：搜尋關鍵字 "橋"，可觀察橋梁結構的基礎示意圖與動態解釋。

取自 <https://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E6%A9%8B>

### 2. 新聞與社群媒體資訊（圖片與案例參考）

食尚玩家 - TVBS 新聞：用於觀察日本與台灣著名吊橋的實景照片。

取自 <https://reurl.cc/yOyYE2>

Facebook 粉絲專頁「工頭冷知識」：參考其關於「斜張橋」、「脊背橋」與「梁式橋」的圖解說明與專業知識分享（報告中圖片 3、4 之來源）。取自 <https://reurl.cc/R2dW0g>

### 3. 實地觀察

高屏溪斜張橋：本研究之觀察對象與初步模型設計靈感來源。

國立科學工藝博物館（高雄）：現場觀看關於「力學」與「土木建築」的科普教材，適合了解橋梁受力原理。