

屏東縣第 60 屆國中小學科學展覽會 作品說明書

科 別：物理科

組 別：國小組

作品名稱：遇水造橋－紙橋的耐重程度探討

關 鍵 詞： 紙、載重、斜張橋（最多三個）

編號：A2026

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：由承辦學校統一編列。
- 3.封面編排由參展作者自行設計。

作品名稱：遇水造橋—紙橋的耐重程度探討

摘要：

一張平凡的影印紙，透過形狀改變，以不同的結構及組合方式來進行紙橋載重實驗，發現其載重能力是有差異的。

在現今的橋樑設計中，造型奇特，斜張橋更是常見，透過紙橋的模擬操作，發現橋上鋼繩的間距、高度、數量都會影響橋梁的載重，在橋梁的設計中得到一些印證。

壹、研究動機

國語第五課的課文到南方澳去，提到的南方澳的美景，在課程進行時，剛好發生南方澳大橋倒塌的不幸事件，我發現大橋居然是用鋼繩在支撐龐大的橋體，這讓我感到十分神奇和訝異，也對此類的橋樑設計埋下了好奇心。

而在自然第四單元中提到的力的作用，我們利用彈簧、砝碼來作實驗，在實驗中我們觀察了懸掛物品重量與彈簧伸長量之間的規律變化，也學到有彈性的物體是有彈性限度的，這讓我聯想到這樣鋼繩沒彈性，該也有承受的重量限度，所以我們決定利用身旁最容易取得的紙張把斜張橋、砝碼稱中作結合來實驗看看。

貳、研究目的

一張平凡無奇的紙，如何承受巨大的載重，我們將紙一張張捲成紙捲，增強其耐重，並嘗試不同的結構及組合方式，進行耐重能力測試比較，找出最能夠承受重量的紙橋結構，最後進行結構的分析及探討，發現做出最堅固紙橋的關鍵。

另外，我們也發現現今的斜張橋設計，都會將中柱作橋墩固定於河床上，讓橋體更穩固，所以我們也嘗試將最外側的結構柱體放置在橋墩之上，我們想知道這樣的設計對斜張橋是否有幫助，因此，我們再將紙橋最外圍的兩根側柱放置在桌子上，比較是否能夠讓紙橋結構變得更加堅固。

參、研究設備及器材

A4 廢紙		剪刀	
雙面膠		塑膠袋	
S 型掛勾		重物	

肆、研究過程與方法

- 一、 蒐集完整 A4 大小廢棄紙張、雙面膠、實驗必須用具，並將一張張 A4 紙捲成紙捲。
- 二、 分別依照設計圖做出紙橋，並且依照紙橋中柱高度、紙橋斜柱間距、紙橋斜柱數量這三種分類將它們分組
- 三、 實驗操作：
 - (一) **實驗一：** 控制變因~紙張的大小、紙捲的長度、桌子間寬度

	操縱變因	控制變因
第一組	紙橋斜柱數量 (3 根、5 根、7 根)	紙橋中柱高度(20cm) 紙橋斜柱間距(7.5cm)
第二組	紙橋中柱高度 (15cm、20cm、25cm)	紙橋斜柱數量(5 根) 紙橋斜柱間距(7.5cm)
第三組	紙橋斜柱間距 (5cm、7.5cm、10cm)	紙橋斜柱數量(5 根) 紙橋中柱高度(20cm)

作法:將做好的紙橋放置於兩張桌子之間，**間距維持 40 公分**，並且於中央開始增加載重物，每次必須維持 5 秒重物沒有碰到地板才算成功，且可以不斷地增加重量直到橋體無法再承受重量。

(二)實驗二: 控制變因~紙張的大小、紙捲的長度

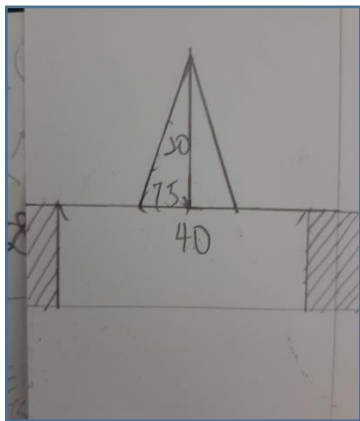

	操縱變因	控制變因
第四組	紙橋斜柱數量 (3 根、5 根、7 根)	紙橋中柱高度(20cm) 橋的長度(30cm)
第五組	紙橋中柱高度 (15cm、20cm、25cm)	紙橋斜柱數量(5 根) 紙橋斜柱間距(7.5cm) 橋的長度(30cm)
第六組	紙橋斜柱間距 (5cm、7.5cm、10cm)	紙橋斜柱數量(5 根) 紙橋中柱高度(20cm)

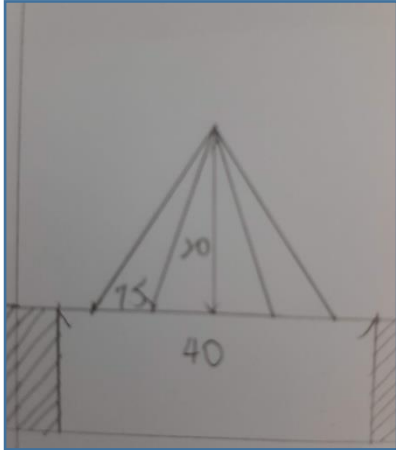

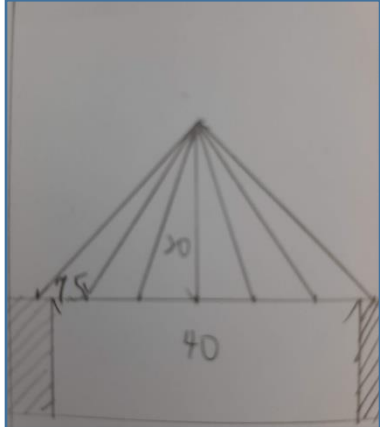

作法:將做好的紙橋放置於兩張桌子之間，**間距為最左右兩根側柱能放置於桌面的寬度**，並且於中央開始增加載重物，每次必須維持 5 秒重物沒有碰到地板才算成功，且可以不斷地增加重量直到橋體無法再承受重量。

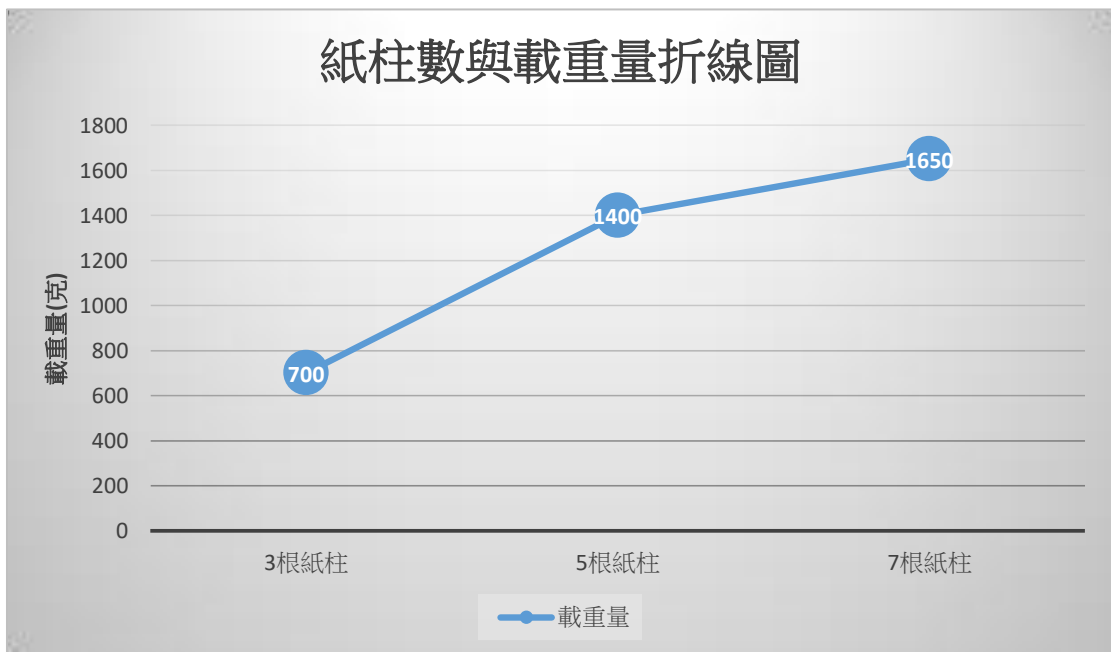
伍、研究成果

一、實驗操作一

(一)、第一組

	設計圖	實驗照片
3 根 紙 柱		

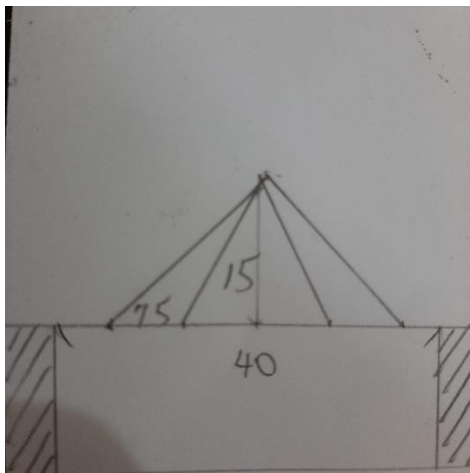

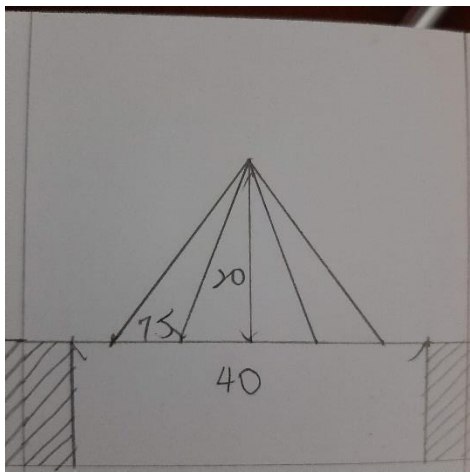

5根紙柱		
7根紙柱		

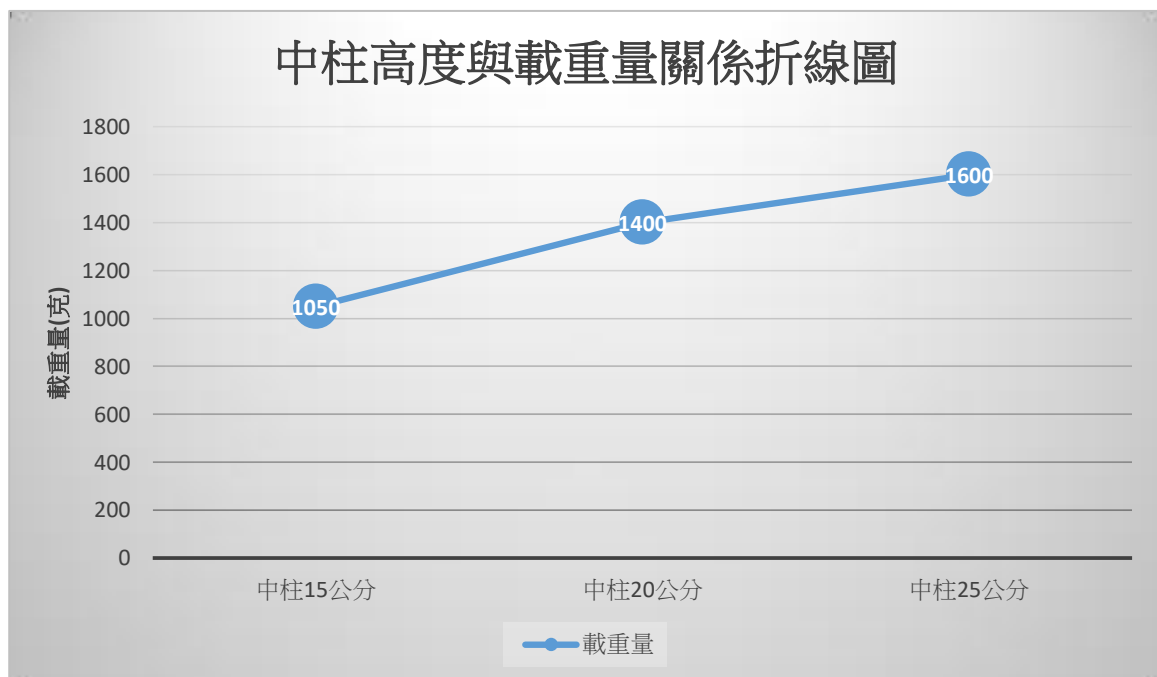
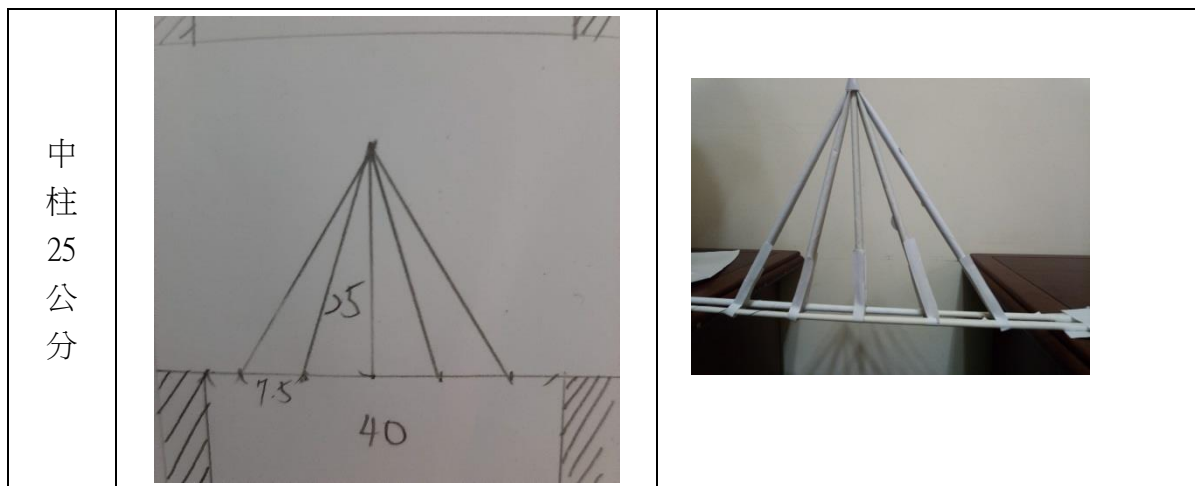


在第一組的實驗之中，我們固定了中柱的高度以及斜柱的間距，從我們做出的實驗數據看來，斜柱的數量和耐重程度呈現正相關，也就是說越多的斜柱就能承載越多，我們認為這是因為有越多的斜柱就能夠分散更多的重量，讓每根斜柱所承受的壓力不至於過大而扭曲斷裂。

此外，從實驗數據看來，同樣是多增加了兩根柱，從三根變為五根的耐重程度大於五根變為七根的耐重程度很多，我們猜想這是因為每根柱子的傾斜角度不同所造成的，如果所添加的柱子愈趨近於垂直，他所能承載的重量就愈大，反之，若是增加的柱子愈趨近於水平，他就對整座斜張橋的承載能力沒有太大幫助。

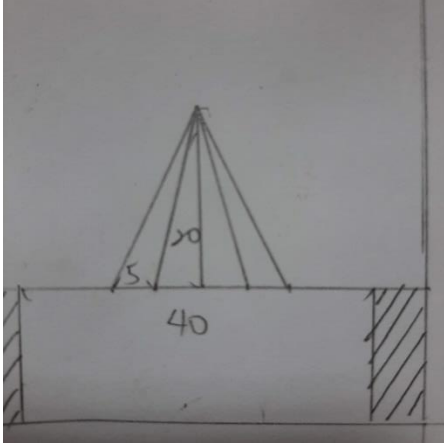

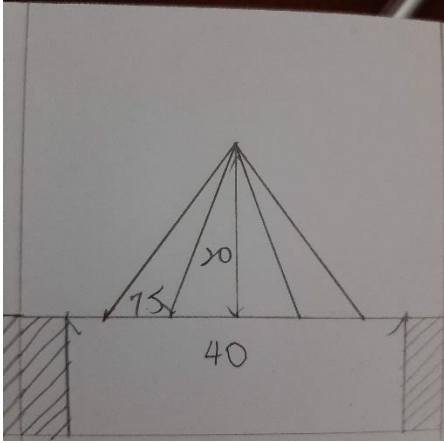
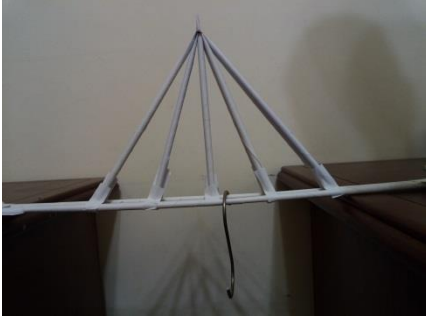
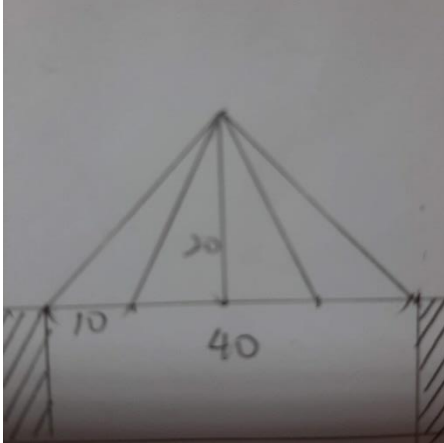
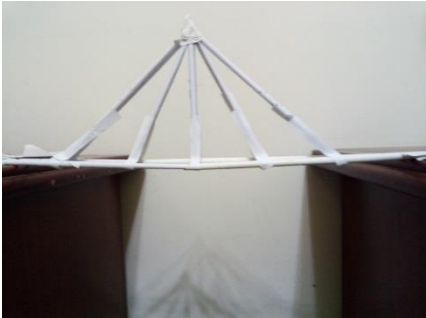
(二)、第二組

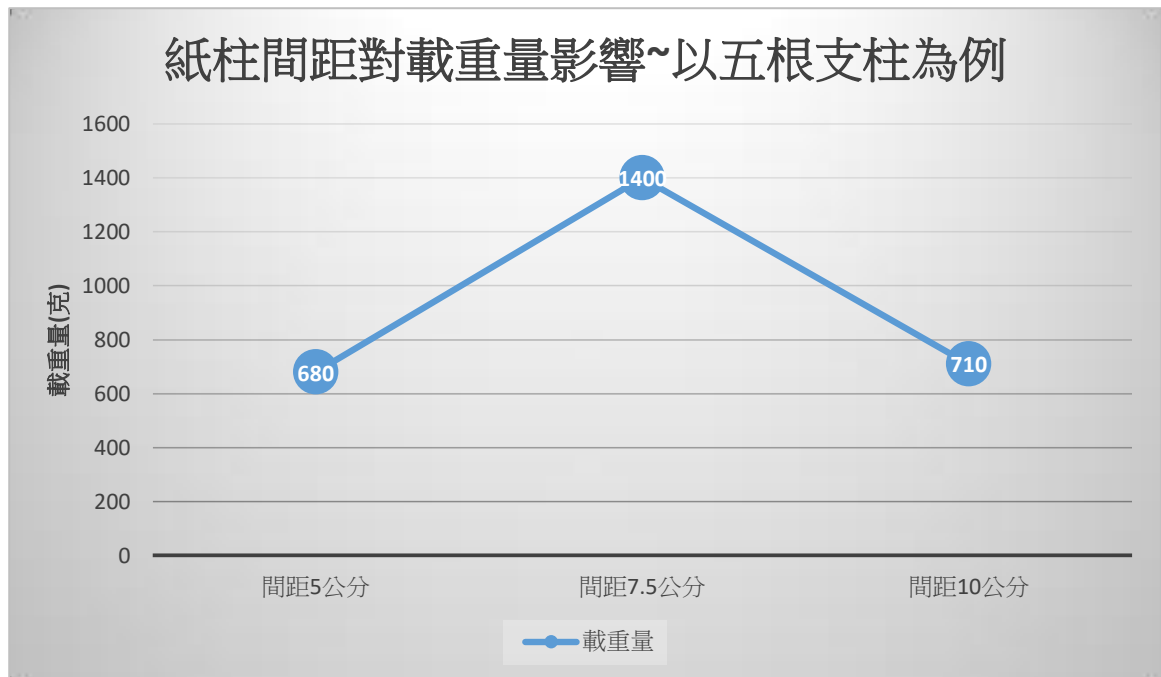
	設計圖	紙橋照片
中柱 15 公分		
中柱 20 公分		



在第二組的實驗中，我們固定的是柱子的數目以及斜柱的間距，從我們做出的實驗數據看來，中柱的高度和耐重程度呈現正相關，中柱愈高的斜張橋所能承載的重物愈多，我們猜測造成此現象的原因可能和第一組相似，也就是和斜柱的傾斜程度有關，從設計圖來看，愈矮的中柱的斜張橋會連帶地造成斜柱的傾斜角度愈大，使其無法發揮他們的最大功效，而愈高的中柱則可讓斜柱都接近垂直，使各個紙柱都能撐住更大的重量。

(三)、第三組

	設計圖	紙橋照片
間距 5 公分		
間距 7.5 公分		
間距 10 公分		

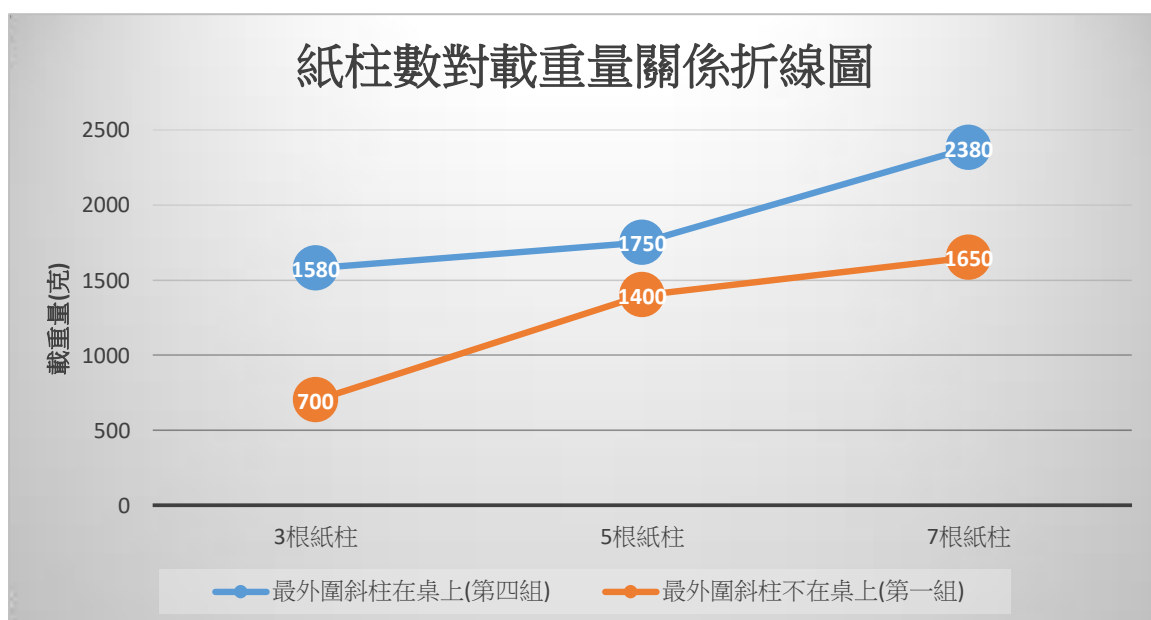


第三組我們想進行比較的變因是間距的差異，從我們的實驗數據看來，間距為 7.5 公分的斜張橋最能夠耐重，間距 5 公分的斜張橋則很快就斷了，這與我們之前所預測的結果不盡相同，依據我們之前的推斷，愈接近垂直的紙柱所能載重的能力愈強，間距 5 公分的斜張橋應為這三者間最能耐重的，我們試著探討其原因，結果發現這座橋斷裂的與其他座皆不相同，其他的斜張橋都是從中間凹陷扭曲，但這一座卻是從旁邊開始彎曲，我們想這是因為間距太小會使得重量過於集中中間，且外圍的橋樑有過大的距離沒有支柱拉抬著，才會導致這座橋不耐重的情形。

二、實驗操作二

(一)第四組

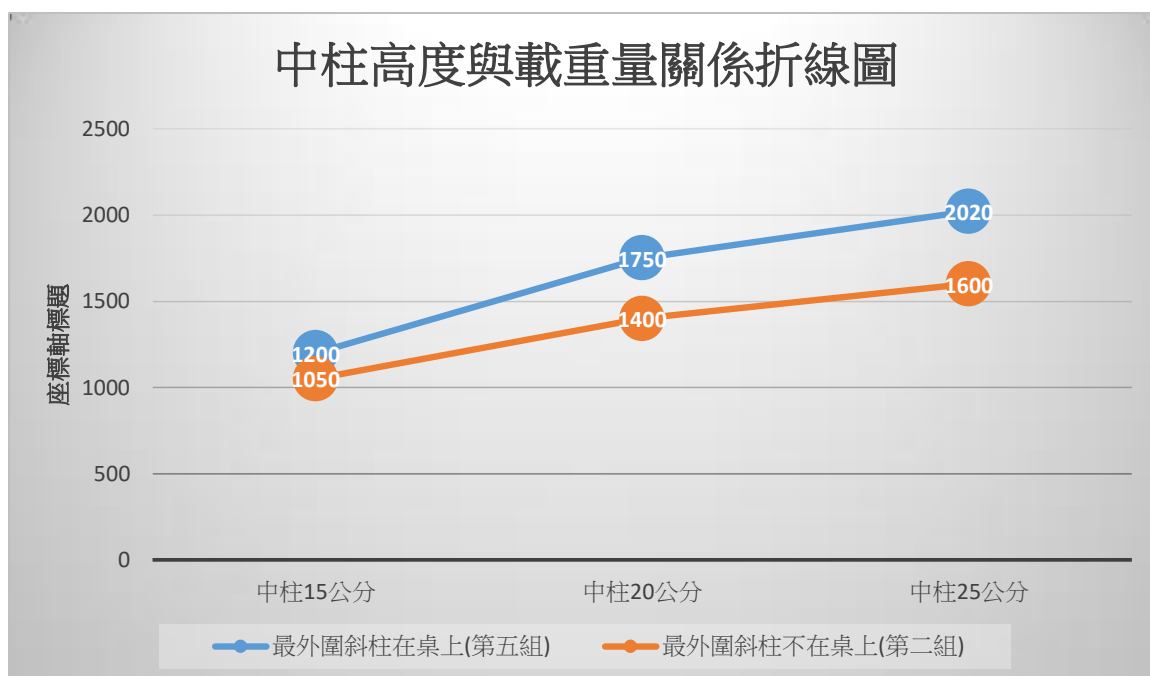
	設計圖	紙橋圖片
3 根紙柱		
5 根紙柱		
7 根紙柱		



我們將最外圍的斜柱放置在桌上，重新測量不同數量紙柱橋梁的耐重程度，並與我們第一組所做的實驗數據相比較，我們發現這次所秤得的數據都大於原先的數據，可見如此做法真的能夠提升紙橋承載力，我們認為這是由於桌面能夠給予紙柱一個力量，抵銷一部分重物所帶來的重力，使其結構較不易受到損壞。

(二)、第五組

	設計圖	紙橋圖片
中柱 15 公分		
中柱 20 公分		
中柱 25 公分		

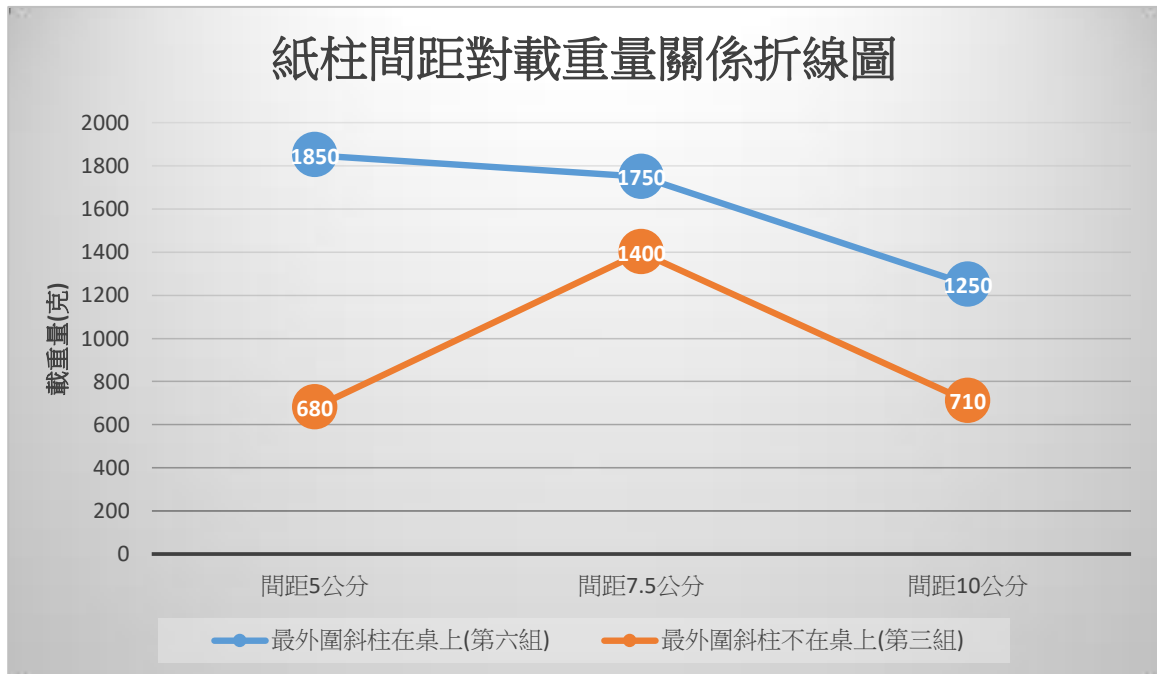
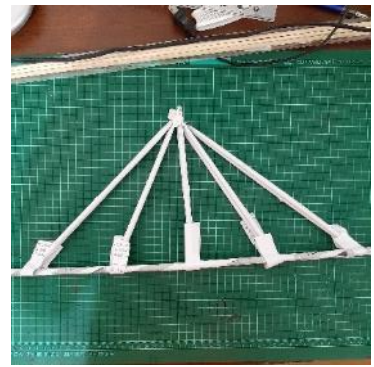
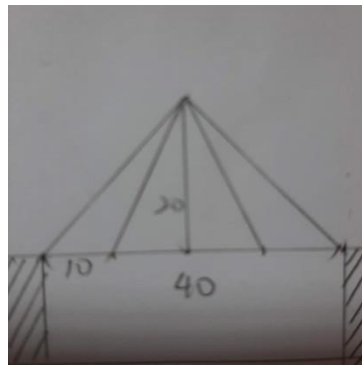


在這次的實驗測試中，我們依然可以發現到中柱的高度與載重能力呈現正相關，兩相比較之下，也可以發現到將最外圍側柱架在桌子上確實有助於整體橋梁的耐重程度。

(三)、第六組

	設計圖	真實圖片
間距 5 公分		
間距 7.5 公分		

間距 10 公分



第二次的實驗中，我們將最外圍斜柱放置於桌面上後，就能夠清楚的看出間距寬度與載重量呈現負相關，由於縮短了橋距，使得整座橋體都有受到紙柱的支撐，因此間距 5 公分的紙橋就不像第一次實驗一樣，從紙橋邊緣開始扭曲下陷，每座橋體的支撐能力也都有所提升。

7、為了確認我們所做的結構對於紙橋是有幫助的，我們另外做了一座沒有紙柱支撐的紙橋，結果發現雖然只是少了幾根紙柱，耐重程度卻大不相同，少了斜張橋結構的紙橋最多只能夠負重 60 公克。

陸、討論

綜合以上的實驗結果，我們討論出一個簡單的計算方法

紙橋的載重力 \equiv 桌子的支撐力 + 第一根紙柱的垂直分力 + 第二根紙柱的垂直分力 + …

(紙柱傾斜程度愈接近垂直其垂直分力愈大，愈接近水平愈小)

一、橫桿數量對於載重量的影響：

在第一組的實驗當中能夠看到，當我們橫桿數量越多的時候這座紙橋越能夠承載更多重量，因此由此可推斷出，當斜桿的數量越多越能夠將分散重物的重量，因此只要越多橫桿重物所產生的重量就能夠越分散在每一根斜桿上，減少每一根所負荷的重量，達成分散重量的效果，所以也能夠承載較多重量，因此斜桿對於紙橋的載重量具有正相關。

從我們討論出的思考方式也可以看出愈多紙柱就能讓紙橋支撐更多的特性，如果我們在原本固有的結構下增加更多支柱，以三根變為五根為例，計算會從

紙橋的載重力

$$\begin{aligned} &\equiv \text{桌子的支撐力} + \text{第一根紙柱的垂直分力} + \text{第二根紙柱的垂直分力} \\ &+ \text{第三根紙柱的垂直分力} \end{aligned}$$

變為

$$\begin{aligned} \text{紙橋的載重力} &\equiv \text{桌子的支撐力} + \text{第一根紙柱的垂直分力} + \text{第二根紙柱的垂直分力} \\ &+ \text{第三根紙柱的垂直分力} + \text{第四根紙柱的垂直分力} + \text{第五根紙柱的垂直分力} \end{aligned}$$

多了後面兩個項目，橋體的支撐力自然就跟著上升

二、中柱高度對於載重量的影響：

在第二組的實驗當中，也能夠發現紙橋的載重量也會隨著中柱的增高而也隨之增加，因此我們認為這個應該是每一根斜桿產生的垂直支撐力會因為中柱的升高導致和橋體的交角增加而增大，因此經由折線圖我們可以發現中柱高度也和載重量具有正相關。

從我們討論出的思考方式也可以看出中柱高度愈高就能讓紙橋支撐更多的特性，如果將中柱高度從 15 公分變為 20 公分，從計算上來看，中柱 15 公分和 20 公分的紙橋相比，除了中柱皆為垂直外，其餘紙柱的傾斜程度皆較小，所以其載重量也會隨之變小

三、紙柱間距對於載重量的影響：

我們從第三組的實驗中，可以得到紙橋斜桿的間距越大能載重的量卻反而會越小，這可能造成的原因可能與第二項實驗的原因有著相似之處，因為當我們將間距拉大斜桿和橋體的交角卻會變少，因而降低了紙橋的垂直支撐力，並且結構也變得較鬆散承受力量的點較不集中，因此紙橋本身也會較為脆弱，因此拉大橫桿間距並無助於增加紙橋的載重量，因此我們可以推斷出橫桿的間距與載重量呈現負相關

紙柱間距愈窄就能讓紙橋支撐更多的特性也可以從我們討論出的思考方式看出，如果將紙柱間距從 10 公分變為 7.5 公分，從計算上來看間距 10 公分和 7.5 公分的紙橋相比，除了中柱皆為垂直外，其餘紙柱的傾斜程度皆較小，所以其載重量也會較小

四、最外圍斜柱有無放置於桌面對於載重量的影響：

從第四、五、六組的實驗當中我們發現的一件事，如果我們將最旁邊的兩根橫桿放在桌面上時，比照前三組的實驗結果我們發現做出來的實驗數據都能支撐較多重量，會造成這一種現象最有可能就是因為最旁邊的那兩根橫桿接觸到了桌面，將一些自己負載的重量分散給桌面，降低了整座橋所乘載的重量，並且桌面也給與紙橋一個向上的支撐力，使得紙橋不但減輕了承受的重量也增加了所能負載的重量，因此在這兩個因素影響之下，兩邊斜桿有碰觸到桌面的這幾組都能夠在承載更多重量，因此是否有橫桿接觸到桌面對於載重有著一定影響力

我們再次從計算式中討論，斜柱位於桌面上相較於不在桌面上的多了一份桌子的支撐力，因此，所能支撐的重量更重。

柒、結論

紙橋的載重力

\equiv 桌子的支撐力 + 第一根紙柱的垂直分力 + 第二根紙柱的垂直分力
+ 第三根紙柱的垂直分力 + ...

(傾斜程度愈接近垂直愈大，愈接近水平愈小)

讓紙橋支撐更多重量的因素：

- 一、 紙柱的數量愈多
- 二、 中柱的高度愈高
- 三、 紙柱的間距愈小
- 四、 最外側的斜柱放置在桌面上

捌、參考文獻

- 一、遠哲科學趣味競賽~紙橋大力士
https://www.youtube.com/watch?v=OX_ZZ49Jqc4
- 二、「台科大紙橋 耐重 300 公斤可行機車」媒體報導。
<https://www.ntust.edu.tw/files/16-1126-282.php?Lang=zh-tw>
- 三、楊嘉慧(2009). 不怕大洪水的斜張橋 . 科學人雜誌
- 四、維基百科~南方澳大橋
<https://zh.wikipedia.org/wiki/>
- 五、高速公路南區養護工程分局線上主題網.開啟台灣公路橋樑的藝術-高屏溪斜張橋
<https://www.freeway.gov.tw/Southernarchives/publish.aspx?NID=3332&P=12890>