

臺北市第 44 屆中小學科學展覽會

作品說明書

科 別：物理科

組 別：國小組

作品名稱：誰能撐得比我多？小紙橋立大功

關 鍵 詞：紙橋、摺向、橋墩

編 號：

摘要

本次研究是利用紙橋來模擬橋樑的設計，承載負重。首先，我們先利用手邊現有的紙材，找出哪一種材質的紙橋可以承載最多的重量。再來，我們開始推論紙橋負載的變因，例如：增加寬度、厚度、摺痕的數量、摺痕的方向與增設橋墩。於是我展開一連串的實驗，並加以分析實驗結果。我們發現這些不同的變因，都會影響紙橋的負載量，其中，在四摺紙橋上、下各黏一張紙的紙橋則能夠增加負載的重量。

在四摺紙橋上、下各黏一張紙，因為符合了「上層抗壓，下層抗拉」的標準，因此可以負載更多的錢幣，就像是瓦楞紙箱的設計一樣。最後，我們也發現增設橋墩也可以讓紙橋增加更多的支撐點，使紙橋下層更不容易變形，因而增加更多的承載量。

壹、研究動機

平常我們全家最喜愛的休閒活動，就是到各地旅遊。旅遊時，經常可看到各種形形色色不同形狀的橋，有拱橋、吊橋、斜張橋……等。在我們目前所居住的城市，高架橋樑是最主要的聯外道路，它讓我們更方便通行到各個區域，讓我們的交通更順暢，且快速的到達我們的目的地。

我們在三年級「生活中的力」單元中學到力的大小和方向性，也在五年級「力的世界」單元中，認識了力會改變物體的形狀。於是我透過紙橋的設計，改變紙材、增加寬度、增加厚度、摺痕的數量、摺痕的方向與增設橋墩，觀察這些變因，對紙橋載重的影響。

貳、研究目的

- 一、利用不同的紙材作為橋面，比較所能負載的重量。
- 二、利用相同的紙材，比較不同橋面張數所能負載的重量。
- 三、利用相同的紙材，比較不同橋面寬度所能負載的重量。
- 四、利用相同的紙材，比較不同橋面摺數所能負載的重量。
- 五、利用相同的紙材，比較不同橋面摺向所能負載的重量。
- 六、利用相同的紙材，比較四摺橋面，在上、下各黏一張紙，紙橋載重的情形。
- 七、利用相同的紙材，並加上橋墩，比較不同橋墩數量所能負載的重量。
- 八、依照上述的實驗，找出最能支撐重物的紙橋設計。

參、研究設備與器材

- 一、精密天平一台
- 二、紙盒 2 個（高度 9cm）
- 三、牛皮紙 1 張
（長 16cm 寬 10cm，約 1.6g）
- 四、80 磅重的影印紙 1 張
（長 16cm 寬 10cm，約 1.3g）
- 五、西卡紙（長 16cm 寬 10cm，約 4g）
&（長 16cm 寬 5cm，約 2g）
&（長 9cm 寬 10cm，約 2g）各數張
- 六、10 元錢幣 120 枚（一枚約 7.5 克）
- 七、罐裝飲料 4 瓶（一瓶約 285 克）
- 八、大瓶礦泉水 1 瓶（一瓶約 1600 克。）



【圖一】設備與器材

肆、研究過程與方法

（本次實驗皆以「紙盒間隔 12cm，紙張離地面高度 9cm，紙張跨接紙盒各 2cm」為標準）

- 一、用不同的紙張實驗，找出最能負重的紙張。

（一）用同樣大小（長 16cm 寬 10cm）的西卡紙、牛皮紙和影印紙做成的紙橋來做承重的比較：



【圖二】西卡紙承受硬幣實驗



【圖三】牛皮紙承受硬幣實驗



【圖四】影印紙承受硬幣實驗

二、用西卡紙製作紙橋，觀察不同形式的紙橋負重的情形。

(一) 用 1 張和 2 張重疊的大西卡紙（長 16cm 寬 10cm），做為承重的紙橋；



【圖五】1 張大西卡紙承受硬幣實驗 【圖六】2 張大西卡紙承受硬幣實驗

(二) 用 2 張重疊的大西卡紙（長 16cm 寬 10cm）和小西卡紙（長 16cm 寬 5cm），做為承重的紙橋



【圖七】2 張大西卡紙承受硬幣實驗 【圖八】2 張小西卡紙承受硬幣實驗

(三) 取同樣大小的西卡紙（長 16cm 寬 10cm）折成單條、雙條、三條和四條不同的摺痕的紙橋，擺放方向為摺痕和兩岸垂直，比較負重的情形。



【圖九】單條摺數 (A) 的西卡紙承受硬幣實驗



【圖十】雙條摺數 (^^) 的西卡紙承受硬幣實驗



【圖十一】三條摺數 (W) 的西卡紙承受硬幣實驗



【圖十二】四條摺數 (M) 的西卡紙承受硬幣實驗

(四) 將同樣大小的西卡紙 (長 16cm 寬 10cm)、摺成相同摺數，比較摺向與兩岸平行和摺向與兩岸垂直的負載程度：

(為了讓紙橋能跨在兩個間隔 12cm 紙盒上，直向摺長度 16cm 的邊，橫向摺寬度 10cm 的邊。)



【圖十三】摺向與兩岸垂直的西卡紙承受硬幣實驗



【圖十四】摺向與兩岸平行的西卡紙承受硬幣實驗

三、試著改良紙橋，找出能讓紙橋更可以負重的方法

(一) 將同樣大小的西卡紙 (長 16cm 寬 10cm)、摺成相同摺數，並在上、下各用白膠黏一張紙做成紙橋，比較摺向與兩岸平行和摺向與兩岸垂直的負載程度：



【圖十五】摺向與兩岸平行並在上、下各黏一張紙的紙橋承受硬幣實驗



【圖十六】摺向與兩岸平行並在上、下各黏一張紙的紙橋承受硬幣實驗之一



【圖十七】摺向與兩岸平行並在上、下各黏一張紙的紙橋承受硬幣實驗之二

(二) 將長 9cm 寬 10cm 的小西卡紙，捲成圓筒型(直徑約 3.2cm)的紙橋墩，置於紙橋底部作為支撐來做負重比較：



【圖十八】固定一個紙橋墩可承受幾枚硬幣的實驗



【圖十九】固定一個紙橋墩可承受幾瓶小罐裝飲料的實驗



【圖二十】固定兩個橋墩可承受幾瓶飲料的實驗

伍、研究結果

一、比較不同紙張得到的結果：

| | 西卡紙 | 牛皮紙 | 影印紙 |
|-------------|--------|--------|--------|
| 所能承載的硬幣 1 枚 | ○ | 無法承載硬幣 | 無法承載硬幣 |
| 所能承載的硬幣 2 枚 | ○ | X | X |
| 所能承載的硬幣 3 枚 | ○ | | |
| 所能承載的硬幣 4 枚 | 無法承載硬幣 | | |

註：○表示可以

- (一) 除了西卡紙以外的紙張，如牛皮紙或影印紙等厚度較薄的紙張，皆無法支撐任何錢幣的重量。
- (二) 西卡紙較其他紙張的厚度厚，故能支撐錢幣的重量，因此，爾後均以西卡紙做負重的試驗。

二、比較不同厚度得到的結果：

| | 一張大西卡紙 | 兩張大西卡紙 |
|-------------|--------|--------|
| 所能承載的硬幣 1 枚 | ○ | ○ |
| 所能承載的硬幣 2 枚 | ○ | ○ |
| 所能承載的硬幣 3 枚 | ○ | ○ |
| 所能承載的硬幣 4 枚 | 無法承載硬幣 | ○ |
| 所能承載的硬幣 5 枚 | X | ○ |
| 所能承載的硬幣 6 枚 | | ○ |
| 所能承載的硬幣 7 枚 | | ○ |
| 所能承載的硬幣 8 枚 | | ○ |
| 所能承載的硬幣 9 枚 | | 無法承載硬幣 |

- (一) 西卡紙的厚度較一般紙類要厚，但所承載的重量亦有限。
- (二) 將西卡紙做成的紙橋數量增加成兩張，重疊使厚度變厚，可發現其承載的重量比原來一張厚度的承載重量還要多，兩張厚度的承載重量是一張厚度的兩倍以上，故可知如將其橋面的厚度增加，所能承載的重量亦越多。

三、比較不同寬度得到的結果：

| | 兩張大西卡紙 | 兩張小西卡紙 |
|-------------|--------|--------|
| 所能承載的硬幣 1 枚 | ○ | ○ |
| 所能承載的硬幣 2 枚 | ○ | ○ |
| 所能承載的硬幣 3 枚 | ○ | ○ |
| 所能承載的硬幣 4 枚 | ○ | ○ |
| 所能承載的硬幣 5 枚 | ○ | 無法承載硬幣 |
| 所能承載的硬幣 6 枚 | ○ | X |
| 所能承載的硬幣 7 枚 | ○ | |
| 所能承載的硬幣 8 枚 | ○ | |
| 所能承載的硬幣 9 枚 | 無法承載硬幣 | |

橋面的厚度一樣但寬度變窄時，可發現可承受的重量也變輕、變少了。

四、比較不同摺數得到的結果：

| | 一條摺數 | 兩條摺數 | 三條摺數 | 四條摺數 |
|--------------|------|------|------|------|
| 所能承載的硬幣 5 枚 | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 所能承載的硬幣 10 枚 | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 所能承載的硬幣 15 枚 | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 所能承載的硬幣 20 枚 | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 所能承載的硬幣 25 枚 | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 所能承載的硬幣 30 枚 | 無法承載 | ○ | ○ | ○ |
| 所能承載的硬幣 35 枚 | X | ○ | ○ | ○ |
| 所能承載的硬幣 40 枚 | | ○ | ○ | ○ |
| 所能承載的硬幣 45 枚 | | 無法承載 | ○ | ○ |
| 所能承載的硬幣 50 枚 | | X | ○ | ○ |
| 所能承載的硬幣 55 枚 | | | ○ | ○ |
| 所能承載的硬幣 60 枚 | | | ○ | ○ |
| 所能承載的硬幣 65 枚 | | | 無法承載 | ○ |
| 所能承載的硬幣 70 枚 | | X | X | ○ |
| 所能承載的硬幣 75 枚 | | | | ○ |
| 所能承載的硬幣 80 枚 | | | | ○ |
| 所能承載的硬幣 85 枚 | | | | ○ |
| 所能承載的硬幣 90 枚 | | | | 無法承載 |

(一) 將同樣大小厚度的紙張，摺成摺數不同的紙橋，可明顯的發現其形狀改變後，承載重量比原來平面時增加了好幾倍。

(二) 摺數(形狀改變)越多其所承載的重量也變得更重。

負荷量的順序是：四摺 > 三摺 > 兩摺 > 一摺

五、比較摺痕方向不同的紙橋得到的結果：

| | 四摺橋摺向與兩岸垂直 | 四摺橋摺向與兩岸平行 |
|--------------|------------|------------|
| 所能承載的硬幣 20 枚 | ○ | 無法承載硬幣 |
| 所能承載的硬幣 40 枚 | ○ | ✕ |
| 所能承載的硬幣 60 枚 | ○ | |
| 所能承載的硬幣 80 枚 | ○ | |
| 所能承載的硬幣 85 枚 | ○ | |
| 所能承載的硬幣 90 枚 | 無法承載硬幣 | |

同樣大小、厚度相同的紙張，摺數(形狀)相同但方向改變，由與兩岸垂直改為與兩岸平行，平行的形狀完全無法承受任何的重量，故可知紙橋摺痕的方向亦是影響承載量的重要因素之一。

六、在四摺紙橋上、下各黏一張紙，負重的結果：

| | 摺向與兩岸垂直上、下黏紙 | 摺向與兩岸平行上、下黏紙 |
|-------------------------|--------------|--------------|
| 所能承載的硬幣 35 枚 | ○ | ○ |
| 所能承載的硬幣 70 枚 | ○ | ○ |
| 所能承載的硬幣 105 枚 | ○ | 無法承載硬幣 |
| 所能承載的硬幣 120 枚 | ○ | ✕ |
| 所能承載的硬幣 120 枚 再加一罐飲料 | ○ | |
| 所能承載的硬幣 120 枚 再加二罐飲料 | ○ | |

與上一個實驗，沒有黏紙的四摺橋比較，可以發現：在四摺紙橋上、下各黏一張紙，可以達到比沒有黏紙的四摺紙橋，更多的承載量，就像是瓦楞紙箱的設計一樣，因此可以負載更多的錢幣。

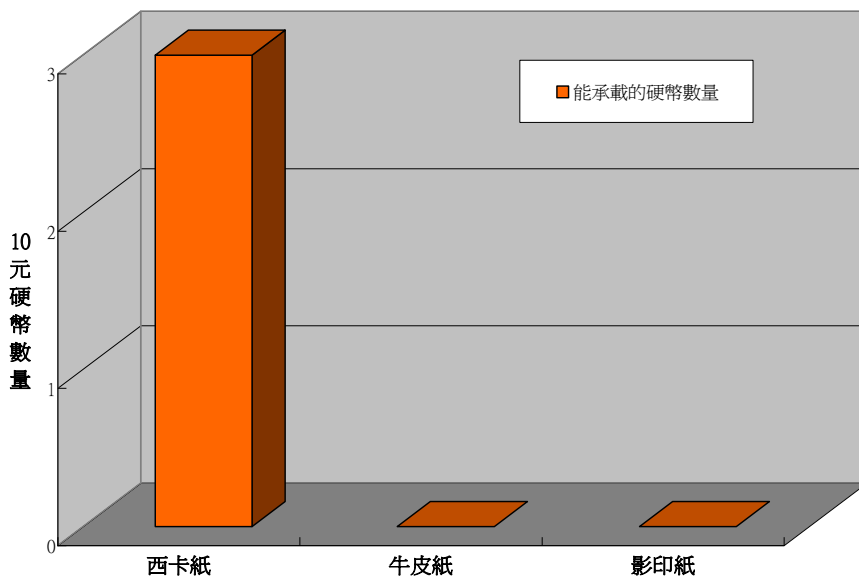
七、比較加上橋墩得到的結果：

| | 加上 1 個橋墩 | 加上 2 個橋墩 |
|----------------------------|----------|----------|
| 所能承載的硬幣 50 枚 | ○ | ○ |
| 所能承載的硬幣 100 枚 | ○ | ○ |
| 所能承載的硬幣 120 枚 | ○ | ○ |
| 所能承載的小罐裝飲料 1 瓶 | ○ | ○ |
| 所能承載的小罐裝飲料 2 瓶 | ○ | ○ |
| 所能承載的小罐裝飲料 3 瓶 | ○ | ○ |
| 所能承載的小罐裝飲料 4 瓶 | 無法承載物品 | ○ |
| 所能承載的小罐裝飲料 4 瓶 和一瓶大瓶礦泉水 | X | ○ |

- (一) 其大小、厚度和形狀皆不變的情況下，在紙橋下加上一個橋墩，其所能承載的重量，遠遠超出原來的承載量，除了錢幣外，甚至也可承載四瓶的小罐裝飲料。
- (二) 其大小、厚度和形狀皆不變的情況下，在紙橋下加上兩個橋墩，除了可以承載原來的四瓶小罐裝飲料之外，可再加上一瓶 1600 克的大瓶礦泉水的負荷量，其實驗可知：橋墩越多，越可以讓橋面承載超過原來重量好幾倍的負荷量。

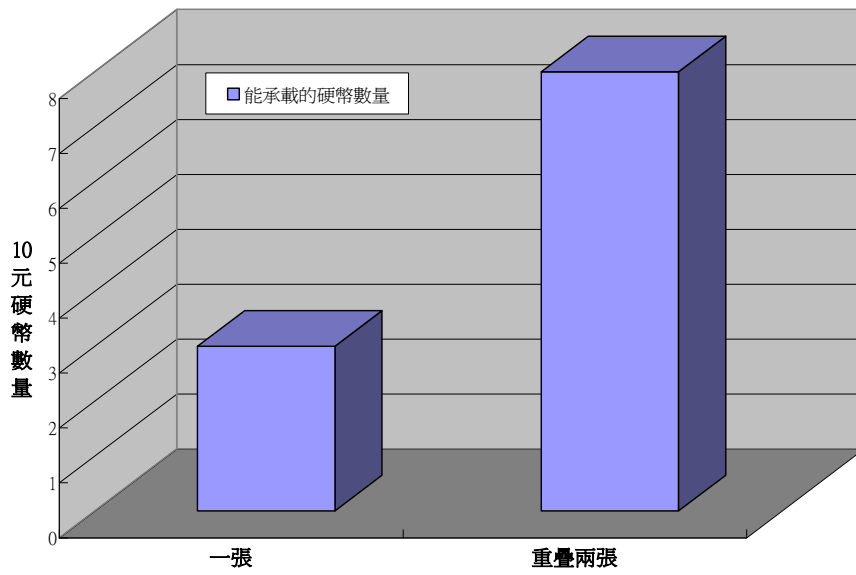
陸、討論

- 一、爲什麼架在紙盒上的西卡紙橋，可以承受錢幣的重量呢？因爲架在紙盒上的西卡紙橋，就像是一條條並排的隱形樑，而紙盒兩端就是支撐點；當放上錢幣時，隱形樑就會將錢幣的重量，傳送到兩端的支撐點，支撐點產生反作用力，將紙橋撐住；但紙橋也會因爲錢幣數量重量的增加，而產生形狀改變，最後撐不住就會倒塌！除了西卡紙以外的紙張，其餘如牛皮紙和影印紙等，厚度較薄的紙張，皆無法支撐任何錢幣的重量。

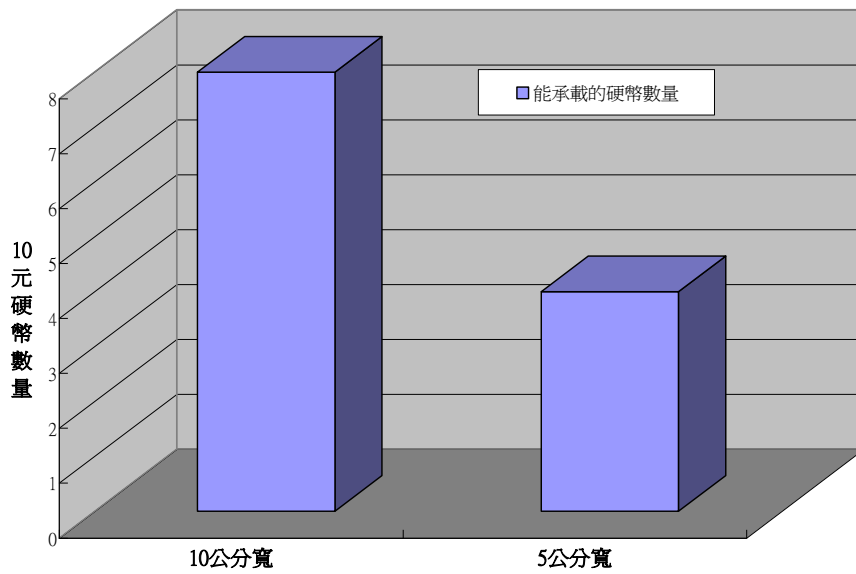


單張不同材質的紙橋載重比較

- 二、增加紙橋的厚度或是寬度好呢？可得知紙橋的厚度或寬度增加時，都能夠增加承擔的重量。由實驗中可得知，兩張大西卡紙的厚度比一張大西卡紙厚兩倍，所能承擔的重量變更多；兩張大西卡紙的寬度比兩張小西卡紙寬兩倍，所能承擔的重量當然也就更多了。

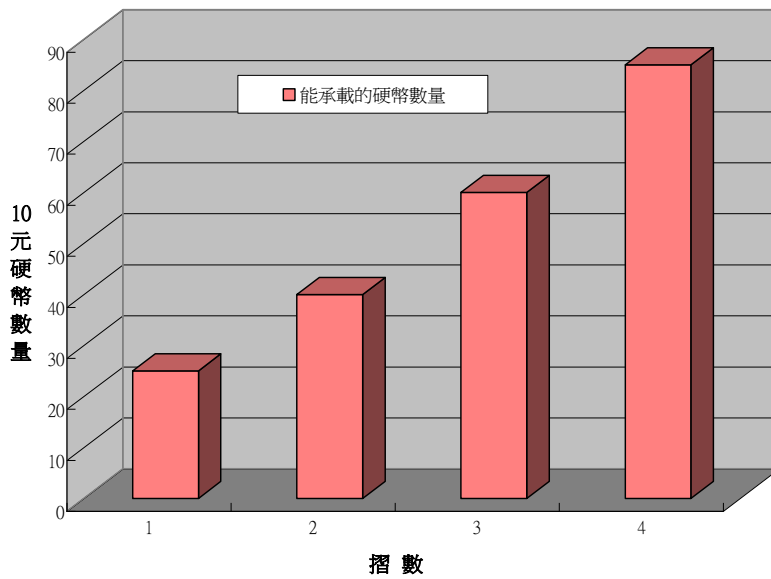


重疊不同張數西卡紙載重比較



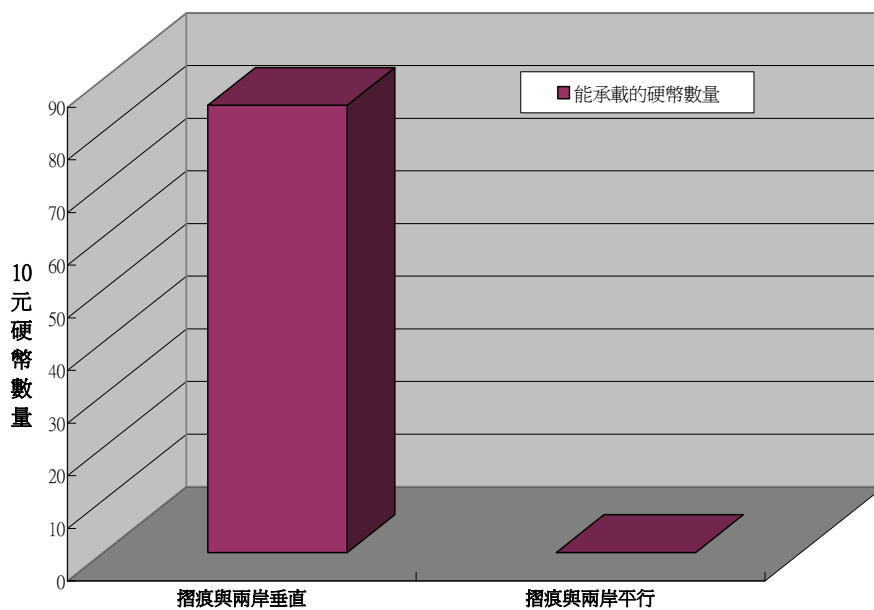
不同寬度的紙橋載重比較

三、由摺數的影響實驗中可發現同樣的條件下，只要將摺數增加，其所能承載的重量也就提高了更多。由此實驗可印證摺數越多，所承載的負荷量也就越大，所以四條摺數（ $\wedge\wedge\wedge$ ）也就比一條摺數（ \wedge ）好，負荷量的順序是：四摺 > 三摺 > 兩摺 > 一摺。



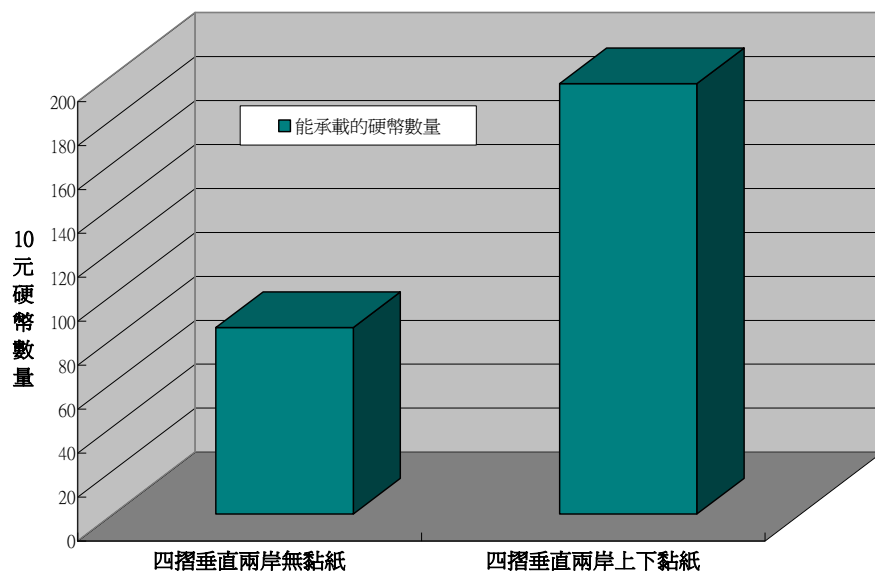
不同摺數的紙橋載重比較

四、如果摺痕的方向改變，答案可就和原來大不相同囉！比較摺向與兩岸垂直和平行後可得知：摺向與兩岸垂直能將重量傳送到兩端的支撐點，故能承載錢幣的重量，但摺向與兩岸平行則不行，因為摺向與兩岸垂直的紙橋會讓支撐點變得更多，而摺向與兩岸平行的紙橋因為對摺後形狀改變，不但沒有讓承載量增加，反而讓紙橋無法承載物品。所以不管增加多少摺數，更要一併把方向性也一起考慮進去。

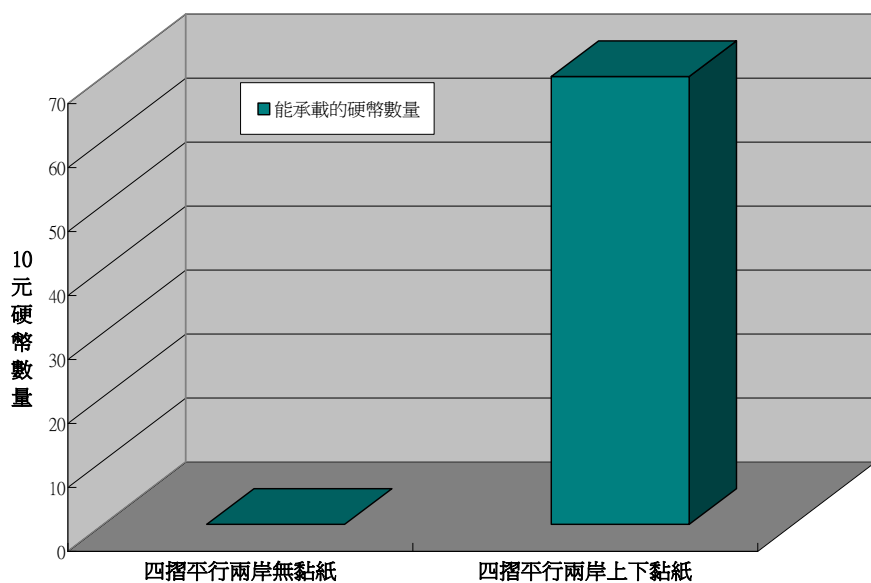


摺痕方向不同的紙橋載重比較

五、想要做出可以負重的紙橋，就必須讓上層抗壓，下層抗拉。只要把握這個原則，紙橋就能夠支撐更多的錢幣。那麼在有摺痕的紙橋上、下各黏一張紙，把所有支撐點都固定住，讓它不易變形，當然就可以支撐更多更多的錢幣囉！甚至連摺向與兩岸平行的紙橋也可以承受 70 枚硬幣的重量呢！（我把飲料的重量換算成硬幣數量，繪製以下的柱狀圖）

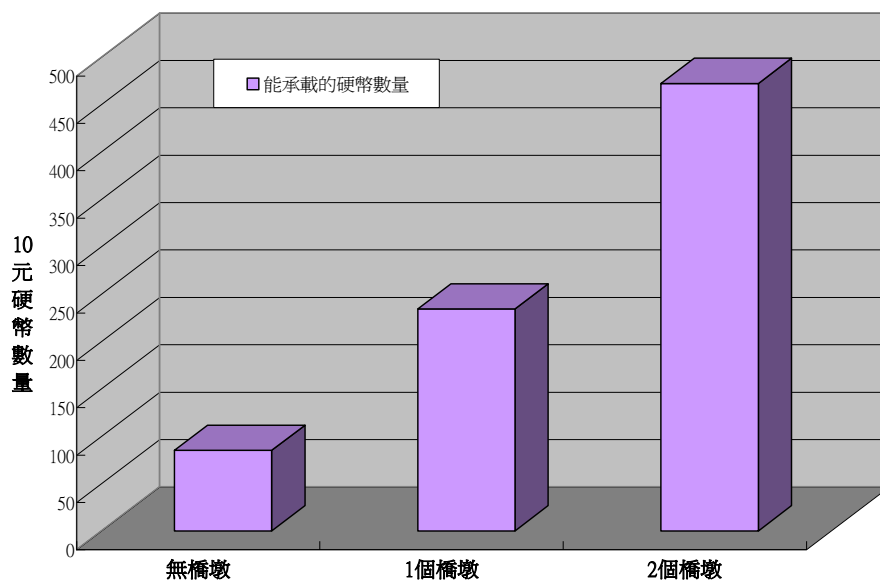


摺痕垂直兩岸四摺紙橋上下黏紙與無黏紙載重比較



摺痕平行兩岸的四摺紙橋上下黏紙與無黏紙載重比較

六、在紙橋下面增加橋墩，就能夠承受更多錢幣的重量嗎？答案是肯定的！增加橋墩就是「上層抗壓，下層抗拉」的最佳方法。如此一來就會讓支撐點增加，支撐點越多，支撐紙橋的反作用力就會變得更大，當然就可以承載更多的重量了。生活中所看到的長橋，橋面下所架設的橋墩就是這種用意了。



橋墩數量不同的紙橋載重比較

柒、結論

根據我們實驗的結果，若要做出一座最能負重的「紙」橋，除了紙橋本身的寬度、厚度要夠，紙橋下還需加設橋墩，才能承載更多的重量。

另外，紙橋的摺數與承載量的關係也是非常重要的，紙橋的摺數越多，支撐點就會越多，所能承載的重量也越多。但也要注意摺痕的方向，紙橋摺痕的方向要和兩岸垂直，才能夠達到承載量變更多的效果，否則會比沒有摺痕的平面紙張紙橋的效果更差。

在四摺紙橋上、下各黏一張紙的紙橋，因為符合了「上層抗壓，下層抗拉」的標準，因此可以負載更多的錢幣，就像是瓦楞紙箱的設計一樣。最後，我們也發現增設橋墩，也可以讓紙橋增加更多的支撐點，使紙橋下層更不容易變形，因而增加更多的承載量。

我們觀察生活中的橋樑設計：這些橋面總是又寬又厚，有的橋樑下，也加設了橋墩，有些在橋面上，加設了許多吊索。這些都是橋樑工程師們的傑作，他們考量了各種因素，也利用地形地物，創造出各式各樣的橋樑！這次小紙橋負重的實驗，就是應用橋樑負重的原理。所謂「小實驗、大發現」，在此又再次得到印證！

捌、參考資料及其他

- 一、周欣宜（2003）。小紙橋力量大。小牛頓兒童科學園地，231，84-90。
- 二、黃崇城（2007）。生活中的力。牛頓教科書自然與生活科技課本第二冊第二單元（30~51頁）。台北市：牛頓開發教科書股份有限公司。
- 三、許夢虹（2009）。力的世界。牛頓教科書自然與生活科技課本第六冊第四單元（48~59頁）。台北市：牛頓國編本。