

# 中華民國第 52 屆中小學科學展覽會 作品說明書

---

國小組 物理科

080104

一「紙」神功

學校名稱：屏東縣屏東市忠孝國民小學

作者：  小六 黃啟瑋 小六 林姝頤 小六 林文中 小六 陳品蕙 小六 戴千千	指導老師：  戴信容 張巧蕙
---	-------------------------

關鍵詞：紙、載重、力

# 一「紙」神功

## 摘要

我們在科學園遊會中見識到「紙」的力量，就展開有關的研究。在閱讀相關報告後，決定以「圖畫紙」及紙上放量杯、連續倒水的方式實驗。

研究發現：以短邊對折或以對角線為基準線對折處理的圖畫紙，摺數越多載重越強。而以短邊為底畫出不同夾角為基準線的折紙實驗，則角度越大載重就越強。再深入分別研究摺數、每摺高度、每摺頂角角度，則發現摺數越多、高度越低、頂角 60 度載重效果最好。

若在折紙下面黏貼紙條或底板固定兩邊，載重比未固定的好。在空心圓柱和放射狀柱體實驗，發現圓周較大效果較好，在柱內加上十字或米字柱體載重力會更增強；柱體承受不了時，常常是以柱身凹陷或是旋轉方式倒下。最後，我們也實驗證明紙柱越短載重力就越強。

關鍵詞：紙、載重、力

# 一「紙」神功

## 壹、研究動機

五年級自然課中曾經上到和「力」有關的課程，而在去年學校舉辦的科學園遊會中，有一站是用衛生紙捲將椅子提起來的的遊戲，哇！紙的力量好大呀！於是，我們幾位同學想深入了解紙到底可以承受多大的力，就請老師指導我們進行下列有關「紙」載重力的研究。

## 貳、研究目的

- 一、想知道不同折法的紙張與紙張載重力的關係。
- 二、想了解紙張的摺數和每一摺的高度與紙張載重力的關係。
- 三、想知道紙張每一摺的頂角角度與紙張載重力的關係。
- 四、想研究如果將有摺紙張固定是否會增加紙張載重力。
- 五、想知道空心圓紙柱和不同放射狀柱體的組合與紙張載重力的關係。
- 六、想了解空心圓紙柱是否越短紙張載重就越強。

## 參、文獻探討

當我們向老師表示想研究「紙的載重」的時候，老師就提醒我們這個主題已經有很多人研究。果然，相關研究很多，我們依年代由遠至近編號，再把這些報告內容分類整理（限於篇幅，整理結果詳見附件一）。綜合這些研究報告的結果，我們決定將我們的研究處理如下：

- 一、實驗用的紙張：用「**圖畫紙、活頁紙**」作為研究實驗用紙。因為取得方便、實驗效果不錯，最重要的是方便我們將紙折成不同樣式來測試載重。
- 二、紙張擺放方式：**紙直接擺在實驗平盤上**。
- 三、**計算紙張承受力的方法**：將 1000 cc 方形量杯放在紙上，再用**連續倒水方式**將水注入方形量杯中，直到方形量杯倒下。這方式改進了以往研究的缺點，計算載重力的數值可以精細到個位數了。

## 肆、研究設備或器材

我們使用的研究器材有：圖畫紙（140 磅、16 開）、1000 cc（10\*10\*10 cm）方形量杯數個、實驗平盤、水箱、600 cc 圓形量筒數個、注射針筒（秤水重量時用來微調）、小秤（如圖 a）、大秤、直尺、量角器、三角板、活頁紙、塑膠管、計算機、課桌椅。



圖 a：秤及量筒

## 伍、研究方法、結果與討論

**研究問題一之一：短邊對折和以對角線為基準對折的紙張，兩種不同折法紙張載重力會不同嗎？**

### （一）研究方法：

- 1、我們在以對角線為基準的折法之前，先用一般人常用的「對折」方式進行實驗。將 20 張 16 開的圖畫紙利用短邊對折，折成洗衣板波浪狀如圖 1-1，紙的摺數分別為 2 摺（如圖中紅色曲線標示）、4 摺、8 摺、16 摺，每種摺數各 3 張。
- 2、將 2 摺的圖畫紙放在實驗平盤上，再將方形量杯放置在圖畫紙上。

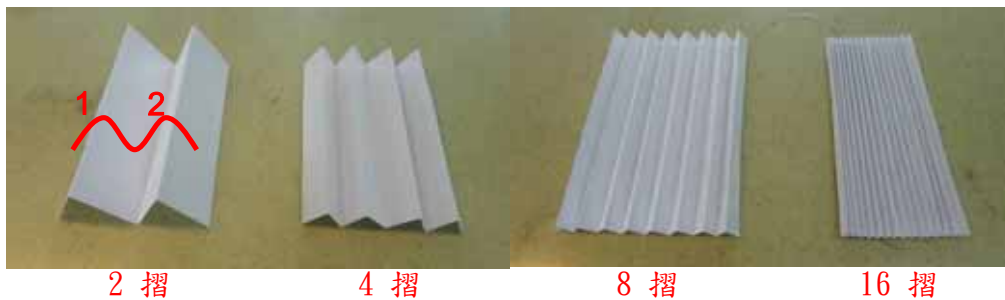


圖1-1 短邊對折、不同摺數的圖畫紙

3、用圓形量筒每次量取 600 克的水，將水慢慢注入方形量杯內，如果方形量杯沒倒，在量杯上面再疊一個空的方形量杯，再倒水（如圖 1-2）。重複以上方法，直到紙被壓平或量杯倒下（如圖 1-3）。將注入的水量以及方形量杯重量總和紀錄下來，代表紙的載重力。每一摺數的圖畫紙都實驗 3 次，再求平均數。



圖 1-2 方形量杯放在紙上、紙放在實驗平盤上、平盤置於水箱上，下面紅色大水箱是用來接方形量杯倒下時的水（左邊實驗的是 4 摺圖畫紙；右邊是 8 摺圖畫紙）



圖 1-3 紙被壓平或量杯倒下情形

4、接著，我們嘗試不同折法：以圖畫紙對角線為基準線，利用數學三角形畫高的方式找出折線位置（如圖 1-4），也將紙折成洗衣板的波浪狀，摺數為 2 摺、4 摺、8 摺、16 摺（如圖 1-5）。其餘實驗步驟如短邊對摺的實驗方法。實驗相片如圖 1-6、圖 1-7。

5、兩組實驗結果整理成圖表，在進行比較分析。

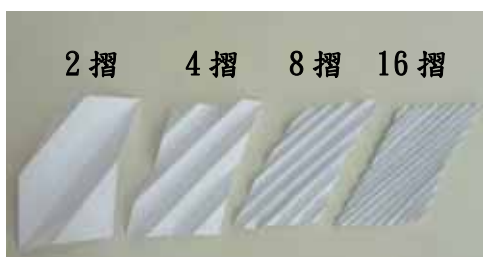


圖 1-5 以對角線為基準折出的樣品

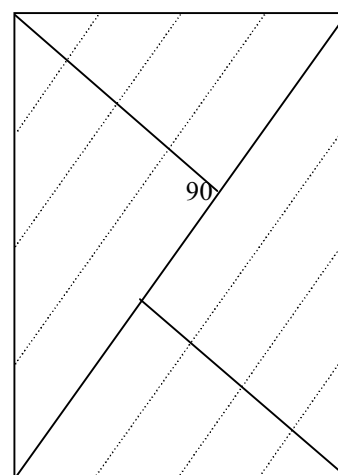


圖 1-4 以對角線為基準線找出折線，此為 4 摺圖樣



圖 1-6 對角線 4 摺實驗



圖 1-7 對角線 8 摺實驗

## (二) 研究結果：

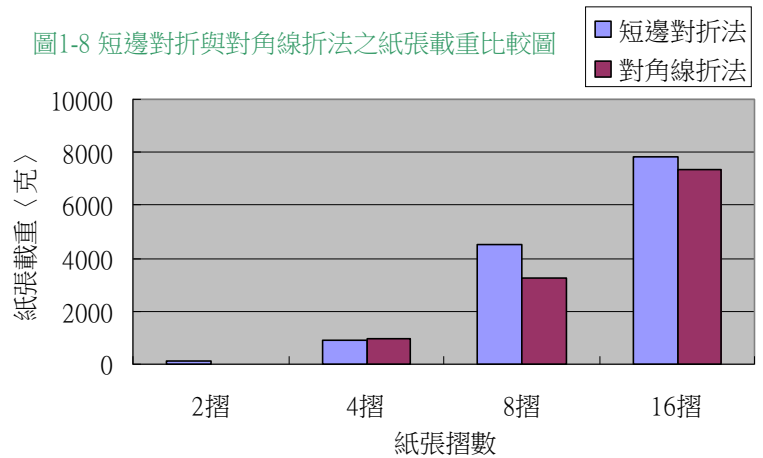
1. 我們將短邊對折和對角線為基準對折兩種折法、不同摺數的實驗數據整理如下表 1-1 及圖 1-8。(詳細記錄請見附件二)

表 1-1 短邊對折及對角線為基準對折法  
不同摺數之實驗結果

摺數 折法	2 摺	4 摺	8 摺	16 摺
短邊對折	250	898	4522	7825
對角線折法	0	942	3228	7343

※表內數字為 3 次平均數，單位：公克

圖 1-8 短邊對折與對角線折法之紙張載重比較圖



## (三) 結果討論：

1. 從實驗的結果發現：無論是短邊對折或是對角線為基準對折，兩種折法都是——**摺數越多圖畫紙所承受的載重力就越強。16 摺的載重竟然都超過 7 公斤。**

2. 兩者互相比較發現：大部分是**短邊對折的載重力比對角線為基準折法的載重力強。**

3. 和全國科科展第 24 屆作品「哪一種形狀的紙載重力大」比較，他們的研究結果是：「摺數越少的載重越多！」這結果和我們的剛好相反。因為他們的實驗方法是「個別砝碼放在折線上」和我們使用的「折線上放方形量杯再倒水」不同導致實驗結果相反。但是我們認為我們結論才對！因為**摺數越多，接觸底面的點也越多，承受的重量就有這麼多的接觸點來分攤，就越不容易倒才對。**

4. 在對角線為基準對折法的 2 摺實驗結果都是 0，這是因為這種折法形成左右兩邊只有一點、中間是一直線接觸實驗平盤的關係，無法站穩，連方形量杯都放不上去，根本無法倒水。

5. 4 摺的實驗中，短邊對折的平均 898 克比對角線折法的平均 942 克少一些，這是因為在短邊對折 4 摺的實驗中，我們放的方形量杯慢慢增加重量後，漸漸把紙張每一摺的頂角往下壓，**紙被壓往下時也會往兩邊伸展**，當伸展到摺線超過上方的方形量杯時，頓時 4 摺的承受折線少掉一半只剩 2 摺，一下子力無法平衡，紙上的物體就倒下來了。

## 研究問題一之二：不同角度折法的紙張會不會影響紙張載重力呢？

### (一) 研究方法：

1. 因為對角線為基準線的折法，引發我們的聯想：基準線和底邊的夾角角度不同會不會影響紙張載重力呢？於是，以短邊為底邊，我們量到對角線與底邊的夾角為 54 度，最大的角度是以長邊對折的 90 度，在這兩者間再細分成與底邊夾角 66 度和 78 度兩種。

(如圖 1-9)。計算式如下：

$$(90-54) \div 3 = 12$$

$$54 + 12 = 66$$

$$66 + 12 = 78$$

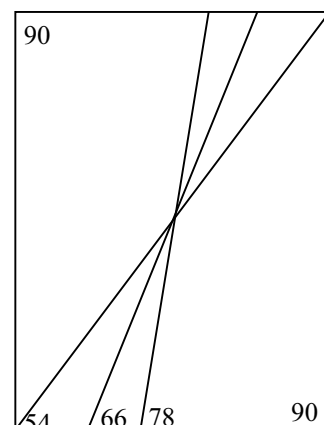


圖 1-9 不同角度的折線



2. 因為研究問題一之一實驗的結果：4 摺的不穩定、16 摺的承受力很大且要花很多時間摺紙，所以這個實驗都使用 8 摺的進行比較。折出來的成品如圖 1-10。

3. 同研究一之一的方法進行實驗記錄結果。
4. 另外也測量折線與底盤接觸的總長度以及摺紙高度紀錄下來，再進行比較分析。

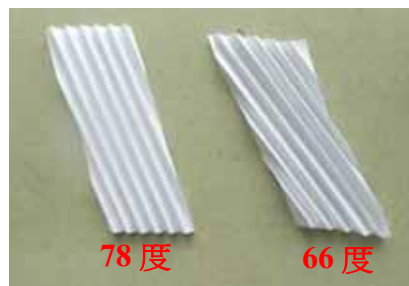


圖 1-10 夾角 78 度、66 度圖樣

## (二) 研究結果：

1. 我們將實驗數據，整理成表 1-2 及圖 1-11。(詳細記錄請見附件三) 因為測量對角線角度時，量到以短邊為底的夾角，所以 90 度的也是以短邊為底、以長邊對折折法進行實驗。

表 1-2 不同角度摺紙的載重力實驗結果：

角度 載重	90 度 長邊對折	78 度	66 度	54 度
平均 (克)	5767	3545	2695	2598
與底盤 接觸的 總長度	243 cm	193 cm	151 cm	134 cm
每一摺 的高度	1.0 cm	1.4 cm	1.8 cm	2.0 cm

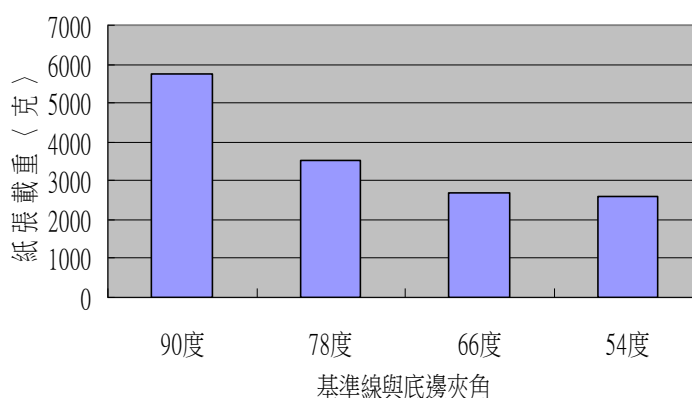


圖1-11 與底邊不同夾角折法之紙張載重比較圖

## (三) 結果討論：

1. 從表 1-2 及圖 1-11 中可以發現：折線與底邊夾角的角度較大的，紙的載重力也較大。折線和底邊成 90 度的載重力是最強的，78 度次之，54 度載重力最少。

2. 比較研究問題一之一和一之二「同樣是對角線、8 摺的實驗結果」：研究一之一載重平均為 3228 克，研究一之二平均為 2598 克，有些差異。可能是因為每天空氣中濕度都不一樣，圖畫紙吸收溼氣以後，會使載重力受影響。所以我們每次同一個研究問題的實驗都會在同一天進行。

3. 我們進一步分析摺紙「與底盤接觸的折線總長度」、「每一摺的高度」，發現：同樣都是 16 開大小的紙張、都折成 8 摺，但是因為折線與短邊夾角度數的不同，使得角度較大的折線總長度較長，折出來的高度卻是比較低的，形成支撐點多、重心又比較穩的狀態，所以載重力就比較多。這樣的結果延伸應用到日常生活中，很多時候建築物、生活用品等為了創意或美觀，就設計了各種不同角度的造型，應該要注意這些非直角的造型，其載重力可能會有減少的情形。

## 研究問題二之一：相同高度不同摺數的紙張載重力變化如何？

### (一) 研究方法：

1、研究問題一中我們使用的是同樣 16 開大小的圖畫紙進行不同折法的實驗，深入探究後，發現：雖然紙張大小一樣，但是折成不同摺數時，同時折紙的高度、與底面接觸的折線總長度也隨之不同，無法像我們在自然課所學的-只有操縱變因一項不同。所以，有摺的紙張載重力的變化到底是摺數的影響？還是

高度的影響？這是以以前的文獻中並未呈現的，於是我們決定進一步控制高度，在摺紙高度相同的情形下進行摺數不同的實驗比較。

2、這次我們決定使用活頁紙。因為活頁紙已經有印好的格線，可以減少我們畫線的誤差；而且活頁紙比圖畫紙更薄，更容易折，也減少我們因為厚度折出高低不平折線的誤差。

3、我們以活頁紙一格作為一摺的高度，分別折出2摺、4摺、8摺、12摺四種摺數紙張（因為活頁紙格數的關係最多只能到12摺），如圖2-1。同研究一的方法進行實驗，記錄後再進行比較分析。

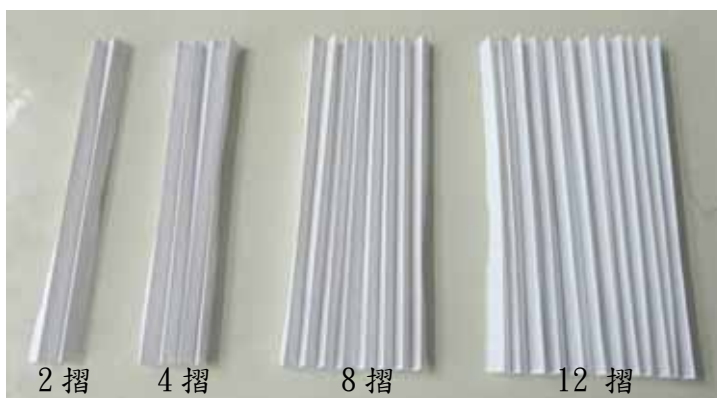


圖 2-1 相同高度、不同摺數的活頁紙

### (二) 研究結果：

1、將相同高度的2、4、8、12摺數的活頁紙實驗數據，整理如下表2-1及圖2-2。（詳細記錄請見附件四）

表 2-1 相同高度不同摺數的紙張載重力

摺數 載重	2摺	4摺	8摺	12摺
平均 (克)	108	1032	2311	4326

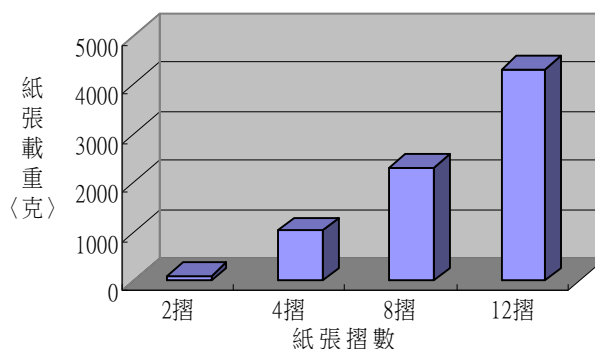


圖2-2 相同高度不同摺數紙張載重比較

### (三) 結果討論：

1. 從實驗的結果發現：同樣高度的紙張，摺數越多紙的載重力就越強。

2. 2摺的紙張因為底面積比較小，方形量杯比較大，不容易放上去，所以載重效果很差。

## 研究問題二之二：相同摺數不同高度的紙張載重力變化如何？

### (一) 研究方法：

1、接著我們進一步控制摺數，在摺數相同的情形下進行高度不同的實驗比較。

2、這個實驗我們還是使用活頁紙。以活頁紙格線1格、2格、3格、4格四種高度分別摺出都是4摺的紙張樣式，如圖2-3。同研究問題一的方法實驗，記錄後再做比較分析。

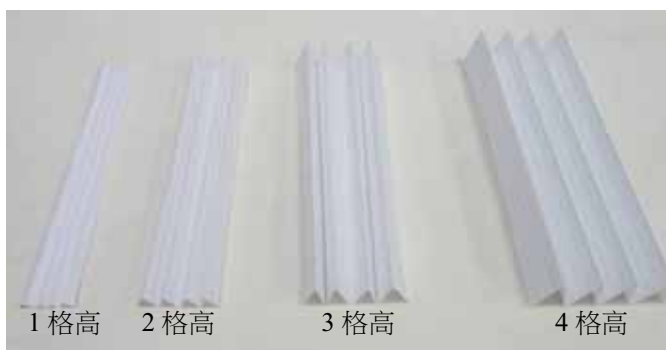


圖 2-3 相同摺數不同高度紙張樣式

## (二) 研究結果：

- 1、實驗整理如下表 2-2 及圖 2-4。  
(詳細記錄請見附件五)

表 2-2 相同摺數不同高度的紙張載重力

高度 載重	1 格高	2 格高	3 格高	4 格高
平均 (克)	1028	870	385	265

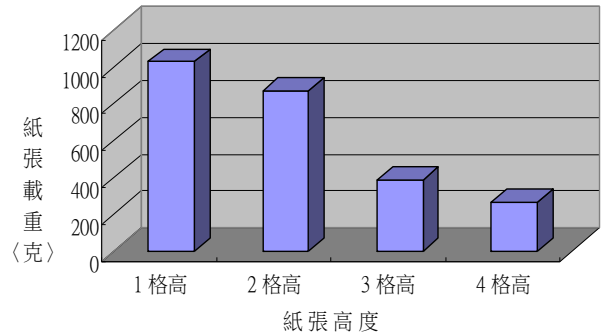


圖 2-4 相同摺數不同高度紙張載重比較

## (三) 結果討論：

1. 從實驗結果發現：同樣摺數的紙張，高度越低的紙載重力反而越強。這表示有摺的紙張每摺的高度越低，重心就越穩，載重就越強。
2. 綜合研究問題一、研究問題二，我們發現：紙張大小、摺數、高度這三種變因相互之間，會因為一種變因的改變而跟著改變。例如：研究一是紙張大小一樣，可是當摺數不同時，高度也隨之不同，摺數越多每一摺的高度就會隨著降低；研究二之一是控制高度一樣，可是摺數不同時，摺數越多紙張就越大。經過我們分別控制不同的變因進行交叉比較研究後，我們可以得到一個綜合的結論：當紙張越大、摺數越多、高度越低時，紙張的載重力也就越強！

### 研究問題三：每一摺高度相同、頂角角度不同的紙張載重力有何不同？

#### (一) 研究方法：

1、研究問題二，我們使用活頁紙深入研究紙張摺數、每摺高度的影響，因為活頁紙比圖畫紙薄，折出來後發現：一樣的折法，有些折起來就比較集中，每一摺頂角就比較小，有些則往外擴散一些，每一摺的頂角就比較大。這樣的頂角變化會不會也是影響載重的重要因素呢？於是我們決定再用較厚的圖畫紙實驗，這次實驗控制每一摺紙的垂直高度，再比較頂角角度不同的載重情形。

2、為了要讓頂角角度固定，就必須將接觸底面的折線固定才不會往外散開，我們在摺紙的底部加一張圖畫紙，並畫出會接觸底面的折線位置，用雙面膠做黏貼。

3、我們將每一摺與底面形成的三角形的高都設定為 2 公分（如圖 3-1），頂點的夾角分別為 30 度、60 度、90 度、120 度（如圖 3-2~3-4），應用數學的畢氏定理及計算機算出不同頂角形成的斜邊長，以及需要的紙張大小（詳見附件六），再裁切紙張、劃線，折出實驗紙張。在這次實驗中，不同角度的紙張摺數都是 4 摺（如圖 3-5）。

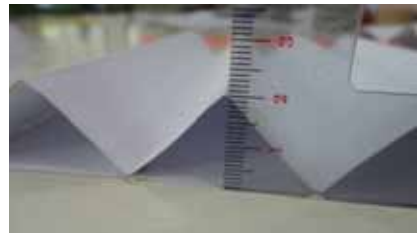


圖 3-1 每一摺垂直高度都是 2 cm

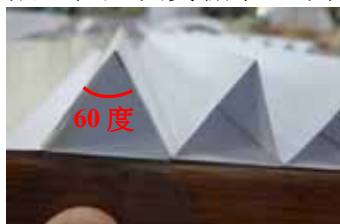


圖 3-2 利用三角板的 60 度角檢核折好的紙張



圖 3-3 利用三角板的 90 度角檢核折好的紙張

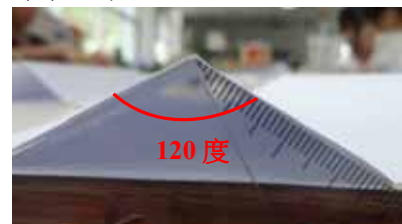


圖 3-4 利用三角板的 90 度+30 度角檢核折好的紙張（頂角 120 度）



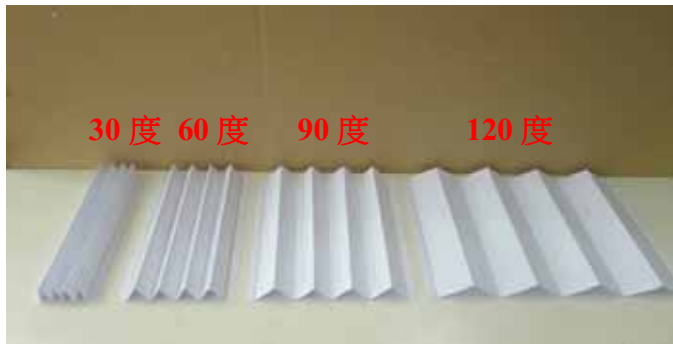


圖 3-5 都是 4 摺、垂直高度 2 cm，頂角夾角不同的紙張



圖 3-7 利用虹吸原理讓水自然流出，減少手的影響

4、因為前面的實驗我們是用手直接將水慢慢倒入方形量杯，老師提醒我們思考如何控制倒入的力量不受手的影響？經過大家討論，我們決定用四年級學過的虹吸原理，利用水管及水位差讓水自然流出（如圖 3-7）。我們先秤好裝在水族箱的水 6 kg，實驗開始就讓水流入方形量杯，快滿時，將水管口按住，再疊一個方形量杯，再放水，重複以上動作，直到方形量杯倒下，再秤水族箱剩下的水量，水族箱減少的水量就是紙張的載重力。

5、輪流進行 30、60、90、120 度的實驗，每項都實驗 3 次，記錄後求平均再進行比較分析。

### （二） 研究結果：

1、將頂點夾角分別為 30、60、90、120 度的摺紙實驗數據，整理如表 3-1 及圖 3-6。（詳細紀錄請見附件七）

表 3-1 不同頂角的紙張載重力實驗紀錄

角度 載重	30 度	60 度	90 度	120 度
平均 (克)	3892	4777	3760	3812

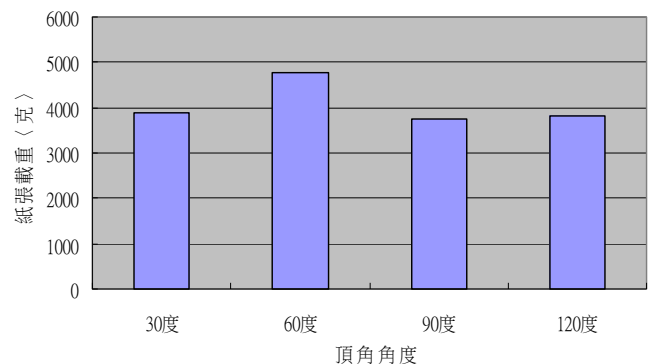


圖3-6 每摺相同高度不同頂角角度載重比較

### （三） 結果討論：

1. 從表 3-1 及圖 3-6 可以看出：同樣摺數是 4 摺、每一摺同樣垂直高度是 2 cm 的有摺紙張，頂角夾角 60 度的時候載重力平均為 4777 公克，是所有夾角角度中載重效果最好的。可能是因為我們設計的頂角 60 度的摺紙，剛好也是正三角形，三邊、三角都相等，形成最穩固的支撐架構。如果日常生活中有類似的物品，建議採用 60 度的夾角來設計。

2. 其他 30 度、90 度、120 度夾角的載重力約在 3750~3900 公克之間，載重效果差不多。

### 研究問題四：如果將有摺紙張固定是否會增加紙張載重力呢？

從研究問題一之一實驗，我們發現「紙被重壓往下時也會往兩邊伸展」，讓承載的重物容易倒下；研究問題三，為了讓頂角角度固定，我們將與底面接觸的

折線用雙面膠固定。於是，我們就聯想到：如果把摺紙固定，紙就不會往兩邊伸展，是不是可以增加載重力呢？我們就進行下面實驗證明看看。

### (一) 研究方法：

1. 我們利用研究問題一之一短邊對摺的 4 摺、8 摺的作為研究圖樣。因為要將兩邊固定必須有黏貼處的關係，所以把原來 4 摺、8 摺的上下面顛倒，各分別設計成「黏貼中間紙條 (2.5 cm×12 cm)」、「加底面 (19.6 cm×12 cm) 只黏貼兩邊」兩種樣式 (如圖 4-1、4-2、4-3)。黏貼完後反轉過來，就變成是 3 摺、7 摺。



圖 4-1：  
左-3 摺只黏貼中間紙條固定  
右-3 摺加底面黏貼兩邊固定



圖 4-2：  
左-7 摺只黏貼中間紙條固定  
右-7 摺加底面黏貼兩邊、中間未黏



圖 4-3：  
左-7 摺只黏貼中間紙條 (反面)  
右-7 摺加底面黏貼兩邊 (反面)

2. 上面第 1 點加紙條或加底板固定的樣式，接近我們生活中使用的瓦楞紙，我們想比較一下：是不是上面設計的樣式承受力就可以達到和瓦楞紙一樣的效果呢？我們在 7 摺的圖畫紙類型中，又加了「加底面摺線全部黏貼底面」、「加上下面摺線全部黏貼 (瓦楞紙樣式)」的設計，如圖 4-4、圖 4-5。



圖 4-4：左-7 摺，摺線全部黏貼底面；  
右-7 摺加上下底面摺線全部都黏貼

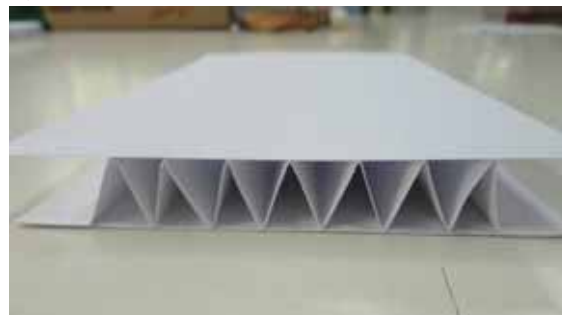


圖 4-5：7 摺加上下底面摺線全部都黏貼的近看樣式，就像瓦楞紙放大版

3. 實驗方法如研究一之一，實驗情形如圖 4-6、4-7、4-8。每次實驗後都記錄數據，再進行比較分析。



圖 4-6：3 摺加底面黏貼兩邊實驗情形



圖 4-7：7 摺加底面黏貼兩邊固定的實驗情形



圖 4-8：7 摺加上下底面都黏貼的實驗情形

## (二) 研究結果：

1. 我們把實驗結果，整理成表 4-1 及圖 4-9：(詳細紀錄請見附件八)

表 4-1：有摺紙張不同固定方式實驗記錄

項目 載重	3 摺 + 紙條	3 摺 + 底板 只黏兩邊	7 摺 + 紙條	7 摺 + 底板 只黏兩邊	7 摺 + 底板 全黏	7 摺 + 上下 底板全黏
平均 (克)	1700	2308	5622	5842	6142	7633

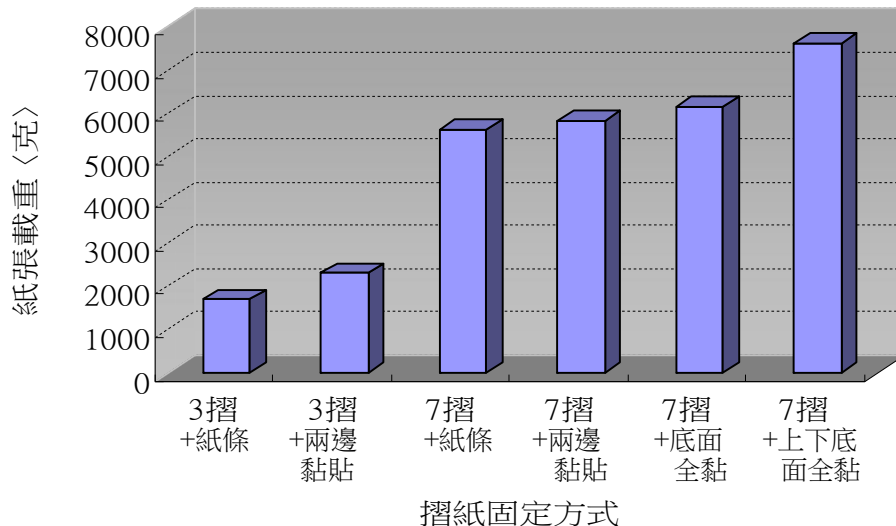


圖 4-9 不同固定方式有摺紙張載重比較

## (三) 結果討論：

1. 果然，摺紙加上固定以後，實驗結果比研究一之一沒有固定的效果好。原先 4 摺樣式沒有固定的時候，就是因為紙被壓往下時也會往兩邊伸展而有頓時倒下情形，平均載重力只有 898 克，同樣的樣式變成中間用紙條將兩邊固定而且變成 3 摺的情形下就可以載重 1700 克，接近原來的 2 倍了。如果將兩邊都黏貼固定，更可以達到 2308 克。原先 8 摺樣式沒有固定時是 4522 克，現在固定變成 7 摺樣式時，中間紙條固定的載重力有 5622 克、加底板將兩邊固定的載重力是 5842 克，也都增加了！

2. 3 摺的樣式，兩邊固定的效果(2308 克)比只有中間固定一紙條的(1700 克)效果好。所以，黏貼固定的範圍越多，讓紙的結構變更穩定，載重就增加了。

3. 7 摺的樣式，兩邊固定的效果(5842 克)比只有中間固定一紙條的(5622 克)效果好一些。因為 7 摺的本身比較穩定，所以只要中間固定一紙條，不讓紙張往外擴大，就有不錯的載重效果。

4. 以 7 摺的樣式，再延伸製作底面全部黏貼、加上下底面全部黏貼的樣式進行實驗，結果是：摺紙黏貼固定越多，載重力就越強。這就是為什麼紙箱要使用瓦楞紙的原因。但是從實驗結果，我們也發現：只有黏貼一面底板的摺紙樣式就可以達到 6142 克載重力，其實也滿強的，如果不是用來裝沉重的冰箱、電視、冷氣…等家電，裝小型家電或貨物的紙箱，其實可以考慮用這種只黏貼一面的摺紙樣式，我們推估每個紙箱可以節省 1/4 紙張成本(瓦楞紙上下面各 1 份紙量、中間有摺部份是 2 份紙量)，這樣可以大大減少樹木被砍的數量。



### 研究問題五：空心圓紙柱和不同放射狀柱體的組合會影響紙張載重力嗎？

因為有同學在研究不同折法時，隨手將紙捲成放射狀的柱體，我們突發奇想：這樣的柱體和以往研究報告所呈現的空心圓柱、長方柱、三角柱、多邊柱都不相同，放射狀柱體載重情形會更好嗎？於是就進行了這個實驗。

#### (一) 研究方法：

1. 如研究問題一之一，將圖畫紙先短邊對折成 4 摺，並將紙張立起，改黏折為十字立體放射狀柱體（圖 5-1A2）；再以同樣方式做成 8 摺的米字立體放射狀柱體（圖 5-1B2）。因為都是以短邊對折的，所以柱體高都是 19.6 cm。

2. 配合十字與米字放射狀柱體大小，將圖畫紙改折為大小不同的空心圓柱，其直徑分為 7 cm（圖 5-1A1）、3.65 cm（圖 5-1B1）。柱體高也都是 19.6 cm。

3. 將 4 摺的十字立體放射狀柱體，放入直徑 7 cm 的圓柱體內，組合成如圖 5-1A3；將 8 摺的米字立體放射狀柱體，放入直徑 3.65 cm 的圓柱體內，組合成如圖 5-1B3。

4. 另外，配合大的空心圓柱，也黏摺了大的米字，兩者組合成如圖 5-1AB。

5. 實驗的操作方式同研究一（實驗情形如圖 5-2~5-5），再將實驗結果記錄、比較分析。

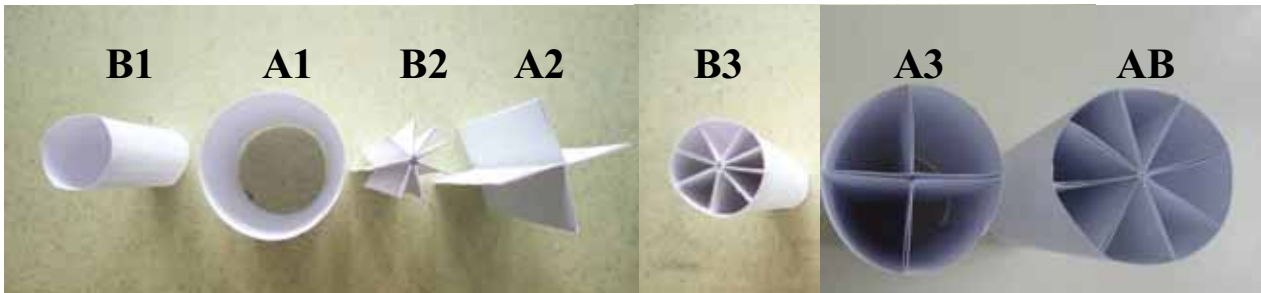


圖 5-1 圓柱與放射狀柱體的不同組合樣式

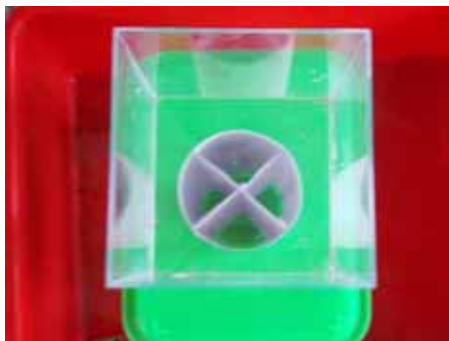


圖 5-2 大圓柱加十字放射狀柱體實驗



圖 5-3 小圓柱加米字放射狀柱體實驗



圖 5-4 米字放射狀柱體實驗情形



圖 5-5 大直徑空心圓柱實驗情形

## (二) 研究結果：

1. 將實驗數據整理，得到表 5-1 及圖 5-6。(詳細紀錄請見附件九)

表 5-1 空心圓紙柱和不同放射狀柱體組合之載重力實驗紀錄

代號	A1	B1	A2	B2	A3	B3	AB
紙柱類型	○	○	+	米	⊕	⊗	⊗
說明	直徑 7 cm	直徑 3.65 cm	4 摺黏折成十字放射狀柱體	8 摺黏折成米字放射狀柱體	A1 + A2 的組合	B1 + B2 的組合	A1+大 B2 的組合
載重平均(克)	2855	1318	487	503	3822	1620	4283

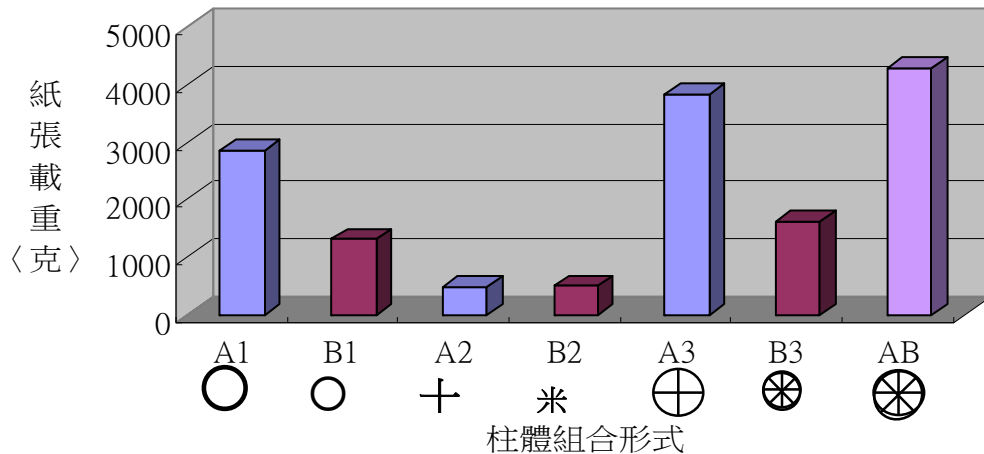


圖 5-6 空心圓紙柱和不同放射狀柱體組合之載重力比較

## (三) 結果討論：

1、比較空心圓柱 A1 (大) 和 B1 (小) 結果顯示：**直徑較大的空心圓柱載重力較好**。這是因為大圓周長比較長，接觸和撐住的點比小圓多；而且大圓範圍往外擴大，讓支撐的物體重心更穩固。

2、以放射狀柱體 A2 (十) 和 B2 (米) 來做比較：**兩者平均相差不到 20 克，其實並沒有太大的差異**。這是因為十字放射狀柱體往外範圍較大讓物體重心較穩，但是支撐點較少；而米字放射狀柱體比較內縮，但是接觸支撐點較多，所以各有優缺點。

3、再將空心圓柱和放射狀柱體比較 (A1、A2、B1、B2)：我們可以發現**空心圓柱都比放射狀柱體載重效果佳**。

4、將空心圓柱和放射狀柱體組合呈 A3 ⊕、B3 ⊗ 以及大圓加大米字組合的 AB 柱體比較，發現：還是大圓周的效果好，而在柱體裡面加上米字的又比加十字的效果更好。現在市面上有許多紙家具、紙建築，大部分是用瓦楞紙組合，或是如圖 5-7 陶米社區的紙教堂—用厚紙做成的圓柱空



圖 5-7 紙教堂的紙柱



心，如果想要更堅固的話，可以在柱內增加十字或米字放射狀柱體，支撐效果會更好。

5、我們也發現：這項柱體的載重實驗過程中，當柱體支撐不住時，**空心圓柱**是以「中上部份柱身凹下」的方式倒下（如圖 5-8），而**放射狀柱體**則以「旋轉」的方式倒下。這就應印證到--地震時，為什麼房子的柱子會在中上半部折斷或扭曲使水泥碎裂的原因了。圖 5-9 是集集鎮武昌宮柱子在 921 地震搖晃時，承受不了上方屋頂建築重量折斷的情形；圖 5-10 則是光復國中地震園區內保留原樣展示的柱子。



圖 5-8 實驗後的空心圓柱



圖 5-9 武昌宮柱子折斷的情形



圖 5-10 柱子水泥裂開情形

### 研究問題六：空心圓紙柱是否越短紙張載重越強？

在參閱歷屆科展作品時，看到第 33 屆作品「載卡多——從平面到立體，活頁紙三度空間的研究和應用」，其中有一個結論是--「柱體高度越短承載越大」，而評審給的評語是：「短至某一極限的情況並未深入分析」。看到評審的評語，就引發了我們的挑戰心：到底可以短到多少？載重是否真的越短就越好？

#### （一）研究方法：

1. 該件作品研究柱體高度的比較是採用四角柱，其實他們的作品中就已經說明圓柱載重效果比四方柱好，所以我們決定採用圓柱進行實驗。

2. 該件作品實驗最短的高度是 6 公分。我們直接使用 16 開的圖畫紙，以長邊 27 cm 圍成圓柱，扣除 0.3 cm 用來黏貼的部分，圓柱周長為 26.7 cm。以短邊 19.6 cm 作為最高的柱高，其次為 10 cm、5 cm、2.5 cm、1.2 cm、0.6 cm 共分成 6 組。如圖 6-1。

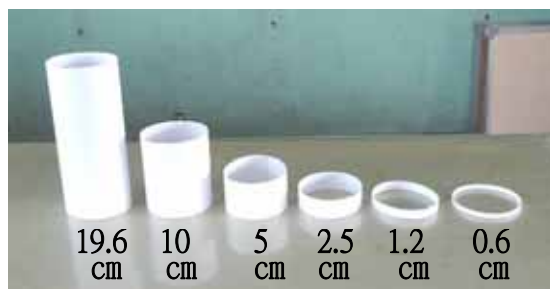


圖 6-1 不同高度的空心圓紙柱

3. 同研究一的實驗方法，進行紙柱載重實驗，實驗情形如圖 6-2~6-4。紀錄實驗數據並做比較分析。

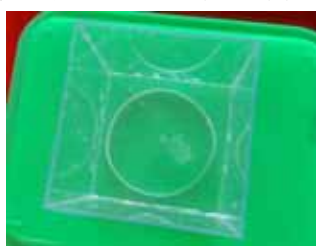


圖 6-2 量杯放在 0.6 cm 圓柱上方



圖 6-3 高 1.2 cm 紙柱實驗情形



圖 6-4 高 2.5 cm 紙柱實驗情形

## (二) 研究結果：

1. 實驗後，圓形紙柱被壓扁情形如圖 6-5。我們將實驗結果整理成表 6-1 及圖 6-6。(詳細紀錄請見附件十)

表 6-1 紙柱高度對紙載重力的影響實驗紀錄表

柱高 載重	19.6 cm	10 cm	5 cm	2.5 cm	1.2 cm	0.6 cm
平均 (克)	3270	3660	4067	4225	4663	5687



圖 6-5 實驗後紙柱被壓扁的樣子

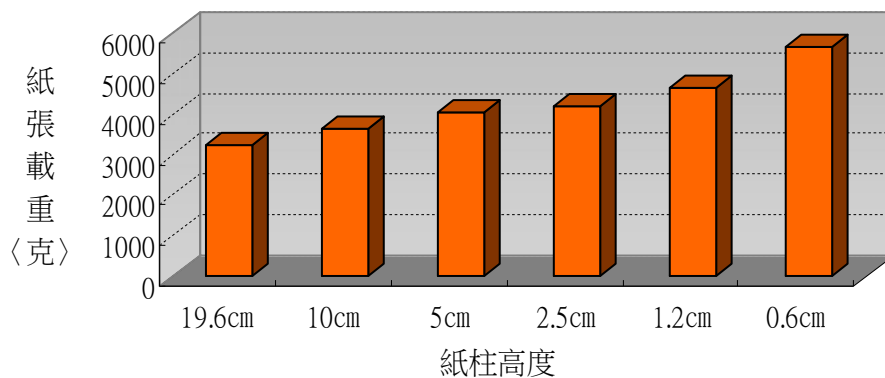


圖 6-6 紙柱高度對紙載重力的影響比較

## (三) 結果討論：

1. 從表 6-1 及圖 6-6 可以看出：**紙柱越短載重力就越強**。就是因為載重物體越低，重心就越穩就不容易倒的緣故。
2. 比較之前的科展作品，我們確實突破了他們的最短柱高 6 cm，我們實驗最短的柱高 0.6 cm，是他們 1/10。這樣柱高 0.6 公分、圓周 26.7 cm、厚度不到 0.1 cm 的小小紙環，竟然可以承受 5 公斤以上的重量，真的令我們驚訝！
3. 因為我們都是手工裁切的關係，柱高如果再小於 0.5 cm，我們無法精細的裁出一樣寬度的紙條，所以就沒有再往下進行實驗。這也讓我們想到：一般的家具下方都有「腳」，這些「腳」其實就是柱體，有的是四角柱、有的是圓柱、有的實心、有的空心、有的短、有的長，各種形式可能是綜合考慮會不會碰到地面的水、方便拖地、配合家具造型、材料成本…等等因素之後決定的。如果以減少成本為前提的話，我們建議廠商可以朝向「圓柱、空心、越短」的方向來製作家具的「腳」。

## 陸、結論與建議

- 一. 將 16 開圖畫紙以短邊對折或是以對角線為基準線作對折的方式折成不同摺數實驗，發現摺數越多圖畫紙的載重力就越強。這是因為摺數越多，接觸底面的點也越多，承受重量有這麼多的接觸點分攤，就不容易倒。
- 二. 將「短邊對折」和「以對角線為基準線作對折」兩種折法互相比較：大部分是短邊對折的載重力比對角線為基準折法的載重力強。
- 三. 深入進行基準線與底邊夾角的實驗，可以發現：折線與底邊夾角的角度越大，紙的載重力也越大。折線和底邊成 90 度的載重力是最強的。日常生活中，有些建築物、生活用品為了美觀設計成小於 90 度的造型，建議應該要注意這些造型的載重力相對也會減少的情形。
- 四. 我們分別控制紙張大小、摺數、高度這三種變因進行交叉比較研究後，得到一個綜合的結論：當紙張越大、摺數越多、高度越低時，紙張的載重力也就越強！
- 五. 有摺的紙張，每一摺的頂角是 60 度的時候載重效果最好。而其他 30 度、90 度、120 度的頂角，載重效果差不多。
- 六. 原先短邊對折樣式實驗時，會出現往兩邊伸展情形，如果將摺紙加上紙條黏貼或是底板固定兩邊以後，載重效果比沒有固定的效果好。
- 七. 7 摺的樣式，因為本身比較穩定，所以只要中間固定一紙條，不讓紙張往外擴大，就有可以接近底板固定兩邊的載重效果。
- 八. 以 7 摺的樣式，再延伸製作底面全部黏貼、加上下底面全部黏貼的實驗，我們發現：只有黏貼一面底板的摺紙樣式載重力也滿強的，建議裝小型家電或貨物的紙箱，可以考慮用這種只黏一面的樣式，可以節省紙張成本，減少樹木被砍伐。
- 九. 空心圓紙柱實驗結果：直徑較大的空心圓紙柱比直徑小的載重力較好。
- 十. 大十字和小米字放射狀柱體載重比較：兩者相差約 20 克，並無太大的差異。
- 十一. 空心圓柱和放射狀柱體比較：同樣直徑的空心圓柱比放射狀柱體載重效果佳。
- 十二. 將空心圓柱和放射狀柱體組合，發現：圓周大的載重效果還是比較好。而且空心圓柱和放射狀柱體組合呈現載重效果優於個別柱體，可見兩者組合後有加乘的作用。
- 十三. 柱體的載重實驗中，空心圓柱是以「中上部份柱身凹陷」的方式倒下，而放射狀柱體則以「旋轉」的方式倒下。這和地震時，房子的柱子會在中上半部折斷或扭曲情形一樣。建議未來在建築上應該加強柱子中上部份結構。
- 十四. 不同高度紙柱的實驗中，發現：紙柱越短載重力就越強。我們建議廠商在製作家具時，如果以減少成本為前提的話，可以朝向「圓柱、空心、越短」的方向來製作家具的「腳」。

## 柒、未來研究方向

- 一、在研究問題一，我們將一般紙張的「短邊對折法」延伸研究「對角線」、「與底邊不同夾角畫出之基準線」做對折的方式，進行有摺紙張的載重實驗，**是不是還有其他不同的創意折法？**
- 二、在研究問題五，我們將「空心圓柱」和「放射狀柱體」組合進行研究，**還有其他造形或組合方式嗎？**影響載重情形又是如何呢？
- 三、在研究問題六，實驗的空心圓紙柱圓周都是 26.7 cm，而研究問題五比較「相同高度、不同圓周」空心圓紙柱，得到的結論是「圓周大的載重效果好」。如果將「高度」及「圓周」這兩項變因再細分各項類型進行實驗，不知道會不會得到「圓周越大、高度越低，載重就越好」的實驗結論？或是圓周超過某過範圍載重反而降低呢？

## 捌、參考資料

- 一. 第 24 屆全國科展初小組物理科作品：「哪一種形狀的紙載重力大？」。
- 二. 第 33 屆全國科展初小組應用科學科作品：「載卡多—從平面到立體，活頁紙三度空間的研究與應用」。
- 三. 第 43 屆全國科展國小組物理科作品：「紙張大力士」。
- 四. 第 47 屆嘉義市科展國中組物理科作品：「紙柱的支撐力」。
- 五. 第 48 屆全國科展國中組生活與應用科學科作品：「歎為觀紙~常見的紙類承載重量分析」。
- 六. 第 49 屆全國科展國小組生活與應用科學科作品：「繩紙以法？紙繩應用在生活中」。

## 【評語】 080104

1. 各項實驗設計的變因皆有設計，頗能吸引大家的興趣。
2. 傳達各項變因時，應展示實物，同時能進行測試活動，也許更能展現傳達能力。