

# 屏東縣第 61 屆國中小學科學展覽會 作品說明書

科 別：物理科

組 別：國中組

作品名稱：彈珠衝衝衝之楊森效應載重測試

關 鍵 詞：楊森效應、彈珠、重量

編號：B2024

## 摘要

本實驗主要在探討不同變因下，固體顆粒在圓筒中的向下重量變化。當圓筒中的顆粒與筒壁接觸時，會產生一個向上的摩擦力，而使得固體顆粒對圓筒底部的重量產生減輕的現象。實驗結果顯示會影響底部重量減輕的因素有(1)顆粒半徑、(2)顆粒數量、(3)不同顆粒的排列方式。其中顆粒半徑與不同顆粒的排列方式，會在顆粒數量較少時產生明顯的影響。而當顆粒數量夠多時，數量變成影響重量減輕比例的主因。

在我們的實驗結果中，顆粒數量較少時，有機會使圓筒底部的重量大於顆粒的總重。但是當顆粒數量夠多時，重量減輕比例都會趨近 80%。

## 壹、研究動機

國 2 下理化第 6 章力與壓力的單元時，老師給我們看了一篇有關穀倉效應(楊森效應)的文章。內容寫到把米放入穀倉中，穀物的實際重量與放入的重量間的減輕比例，而且隨著穀物的數量增加，穀倉底部承載重量反而會減輕。我們對此現象感到非常之好奇，想說如果自己用隨手可得的一些材料做組合，找出其中的規律一定會非常有趣，於是展開了一系列的實驗。

## 貳、研究目的

### 一、探討不同單一內容物粒徑對減輕比例增減的影響

實驗 1-1：全放小彈珠時，磅秤讀數如何變化。

實驗 1-2：全放大彈珠時，磅秤讀數如何變化。

### 二、探討內容物混和比例對減輕比例增減的影響

實驗 2-1：大彈珠重：小彈珠重=1：3 (先混合均勻後，再投入管中)。

實驗 2-2：大彈珠重：小彈珠重=3：1 (先混合均勻後，再投入管中)。

實驗 2-3：大彈珠重：小彈珠重=1：1 (先混合均勻後，再投入管中)。

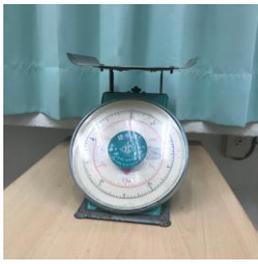
### 三、探討內容物排列方式對減輕比例增減的影響

實驗 3-1：大彈珠重：小彈珠重=1：1(先投入小彈珠，再投入大彈珠)。

實驗 3-2：大彈珠重：小彈珠重=1：1(先投入大彈珠，再投入小彈珠)。

實驗 3-3：大彈珠重：小彈珠重=1：1(大小彈珠依照任意順序投入)。

## 參、研究設備及器材

| 器材 | 梯子  | 彈珠  | 磅秤   | 捲尺  |
|----|---|---|--|---|
| 照片 |  |  |  |  |

## 肆、研究過程及方法

### 一、實驗步驟

#### 實驗 1-1：只放小彈珠對重量減輕比例的影響

步驟 1：將小彈珠每 500g 為一單位裝起來(如下圖一)。

步驟 2：將紙管懸吊並固定在梯子上。

步驟 3：磅秤上放一個蓋子，再將其放在紙管下方(紙管與蓋子不互相碰觸)。

步驟 4：再將彈珠倒入紙管測量每次重量變化。

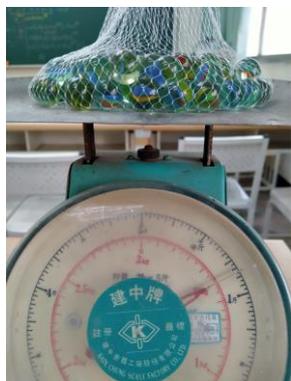
#### 實驗 1-2：只放大彈珠對重量減輕比例的影響

步驟 1：將大彈珠每 500g 為一單位裝起來(如下圖二)。

步驟 2：將紙管懸吊並固定在梯子上。

步驟 3：磅秤上放一個蓋子，再將其放在紙管下方(紙管與蓋子不互相碰觸)。

步驟 4：再將彈珠倒入紙管測量每次重量變化。



(圖一 小彈珠)



(圖二 大彈珠)

**實驗 2-1：改變比例為大彈珠重：小彈珠重=1：3 時，對重量減輕比例的影響。**

步驟 1：將兩種彈珠按照大彈珠重：小彈珠重=1：3 為一單位裝起來(總重 400g)。

步驟 2：將紙管懸吊並固定在梯子上。

步驟 3：磅秤上放一個蓋子，再將其放在紙管下方(紙管與蓋子不互相碰觸)。

步驟 4：再將彈珠倒入紙管測量每次重量變化。

**實驗 2-2：改變比例為大彈珠重：小彈珠重=3：1 時，對重量減輕比例的影響。**

步驟 1：將兩種彈珠按照大彈珠重：小彈珠重=3：1 為一單位裝起來(總重 400g)。

步驟 2：將紙管懸吊並固定在梯子上。

步驟 3：磅秤上放一個蓋子，再將其放在紙管下方(紙管與蓋子不互相碰觸)。

步驟 4：再將彈珠倒入紙管測量每次重量變化。

**實驗 2-3：改變比例為大彈珠重：小彈珠重=1：1 時，對重量減輕比例的影響。**

步驟 1：將兩種彈珠按照大彈珠重：小彈珠重=1：1 為一單位裝起來(總重 400g)。

步驟 2：將紙管懸吊並固定在梯子上。

步驟 3：磅秤上放一個蓋子，再將其放在紙管下方(紙管與蓋子不互相碰觸)。

步驟 4：再將彈珠倒入紙管測量每次重量變化。

**實驗 3-1：改變彈珠倒入順序為先小彈珠再大彈珠對重量減輕比例的影響。**

步驟 1：將兩種彈珠按照大彈珠重：小彈珠重=1：1 為一單位裝起來(總重 400g)。

步驟 2：將紙管懸吊並固定在梯子上。

步驟 3：磅秤上放一個蓋子，再將其放在紙管下方(紙管與蓋子不互相碰觸)。

步驟 4：依照小彈珠先、大彈珠後(先倒入小彈珠 200gw，再倒入大彈珠 200g，依此類推)的順序倒入紙管，並測量每次重量變化。

**實驗 3-2：改變彈珠倒入順序為先大彈珠再小彈珠對重量減輕比例的影響。**

步驟 1：將兩種彈珠按照大彈珠重：小彈珠重=1：1 為一單位裝起來(總重 400g)。

步驟 2：將紙管懸吊並固定在梯子上。

步驟 3：磅秤上放一個蓋子，再將其放在紙管下方(紙管與蓋子不互相碰觸)。

步驟 4：依照大彈珠先、小彈珠後(先倒入大彈珠 200gw，再倒入小彈珠 200gw，依此類推)的順序倒入紙管，並測量每次重量變化。

實驗 3-3：將大小彈珠依照任意順序倒入對重量減輕比例的影響。

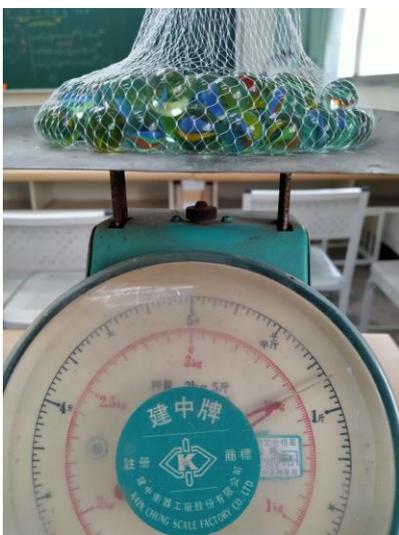
步驟一：將兩種彈珠按照大彈珠重：小彈珠重=1：1 為一單位裝起來(總重 400g)。

步驟二：將紙管懸吊並固定在梯子上。

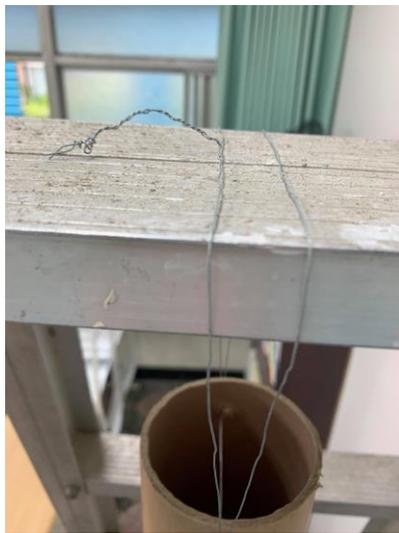
步驟三：磅秤上放一個蓋子，再將其放在紙管下方(紙管與蓋子不互相碰觸)。

步驟四：將彈珠依照隨意順序(將大小彈珠各 200gw 隨意混合)倒入紙管，並測量每次重量變化。

## 二、實驗流程圖示意圖



將彈珠秤重分裝



固定紙筒於梯子上



懸吊紙筒，裝置如圖



磅秤置於紙筒下方



注意紙筒不能接觸紙盒



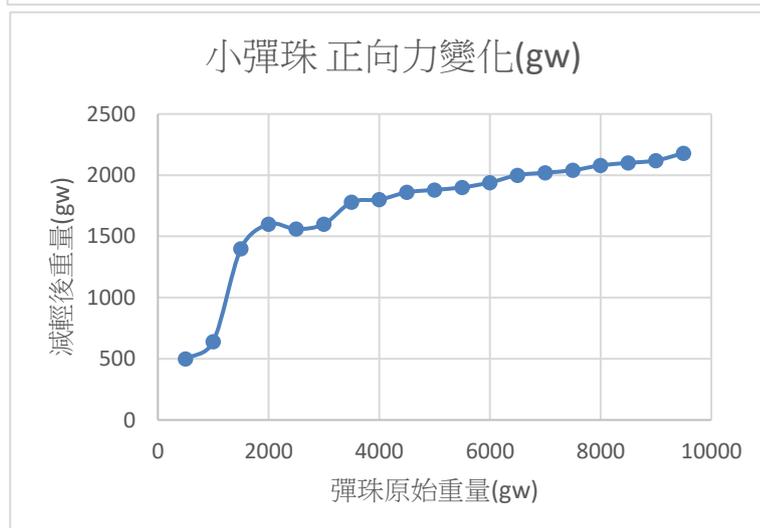
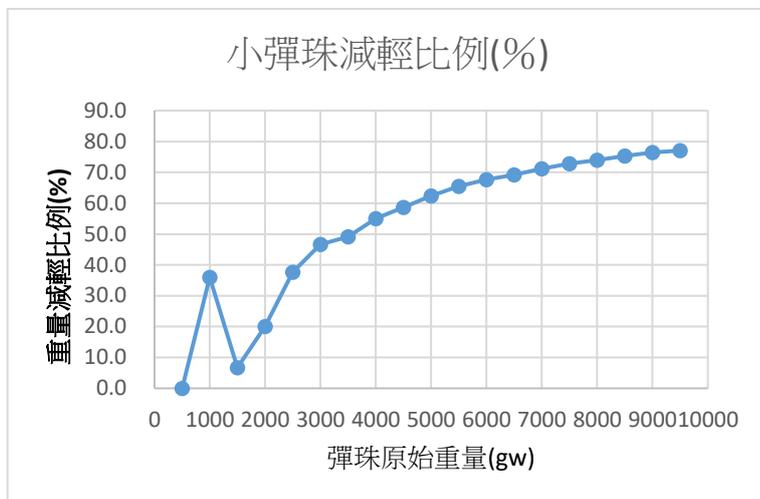
倒入彈珠並逐次記錄

## 五、研究結果與討論

### 一、實驗結果

#### 實驗 1-1：只放小彈珠對重量減輕比例的影響

| 小彈珠重量 (gw) | 磅秤讀數 (gw) | 重量減輕比例(%) |
|------------|-----------|-----------|
| 500        | 500       | 0.0       |
| 1000       | 640       | 36.0      |
| 1500       | 1400      | 6.7       |
| 2000       | 1600      | 20.0      |
| 2500       | 1560      | 37.6      |
| 3000       | 1600      | 46.7      |
| 3500       | 1780      | 49.1      |
| 4000       | 1800      | 55.0      |
| 4500       | 1860      | 58.7      |
| 5000       | 1880      | 62.4      |
| 5500       | 1900      | 65.5      |
| 6000       | 1940      | 67.7      |
| 6500       | 2000      | 69.2      |
| 7000       | 2020      | 71.1      |
| 7500       | 2040      | 72.8      |
| 8000       | 2080      | 74.0      |
| 8500       | 2100      | 75.3      |
| 9000       | 2120      | 76.4      |
| 9500       | 2180      | 77.1      |

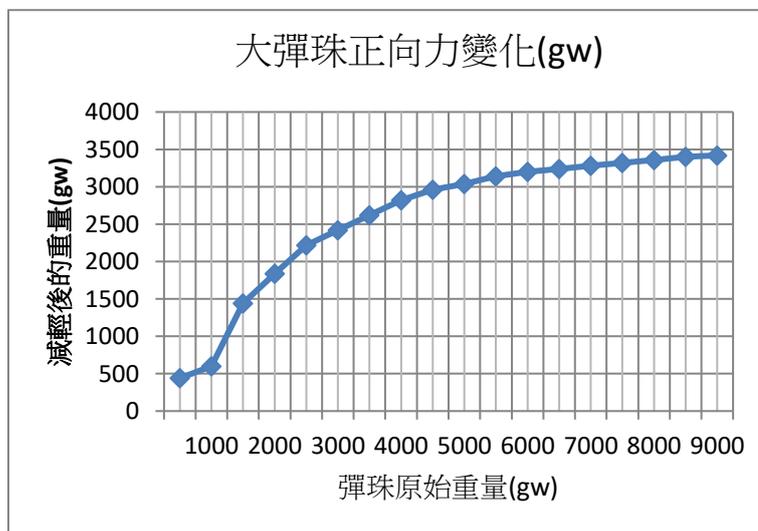
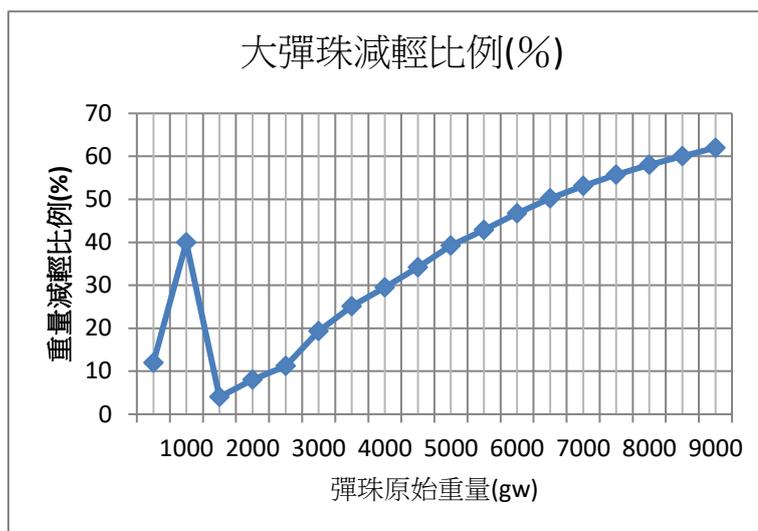


我們一開始只是考慮原始重量與減輕重量之間的關係，從圖中只能看出重量會減輕，而且減輕到後期，似乎會有趨緩的情形出現，無法做出更多的推論，因此我們想到了也許可以用重量減輕的比例下去觀察。

轉換出重量減輕的百分比圖後，從圖中可以看出在 500gw 與 1500gw 時，減輕重量的比例明顯的下降外，其餘都是呈現上升的趨勢。而在 500gw 時，減輕比例為 0%，我們猜測是因為 500gw 的小彈珠無法卡住管壁，因此無法提供向上的摩擦力支撐。而在 1500gw 時，減輕比例又一次明顯的下降，我們猜測是因為這時達到了最大靜摩擦力，表示彈珠要開始向下運動，因此重量減輕比例最小。而超過 1500gw 之後，會變成動摩擦力，此時摩擦力又會隨著彈珠給管壁的正向力增加而上升，因此重量減輕比例又開始增加。

## 實驗 1-2：只放大彈珠對重量減輕比例的影響

| 大彈珠重量(gw) | 磅秤讀數(gw) | 重量減輕比例(%) |
|-----------|----------|-----------|
| 500       | 440      | 12.0      |
| 1000      | 600      | 40.0      |
| 1500      | 1440     | 4.0       |
| 2000      | 1840     | 8.0       |
| 2500      | 2220     | 11.2      |
| 3000      | 2420     | 19.3      |
| 3500      | 2620     | 25.1      |
| 4000      | 2820     | 29.5      |
| 4500      | 2960     | 34.2      |
| 5000      | 3040     | 39.2      |
| 5500      | 3140     | 42.9      |
| 6000      | 3200     | 46.7      |
| 6500      | 3240     | 50.2      |
| 7000      | 3280     | 53.1      |
| 7500      | 3320     | 55.7      |
| 8000      | 3360     | 58.0      |
| 8500      | 3400     | 60.0      |
| 9000      | 3420     | 62.0      |

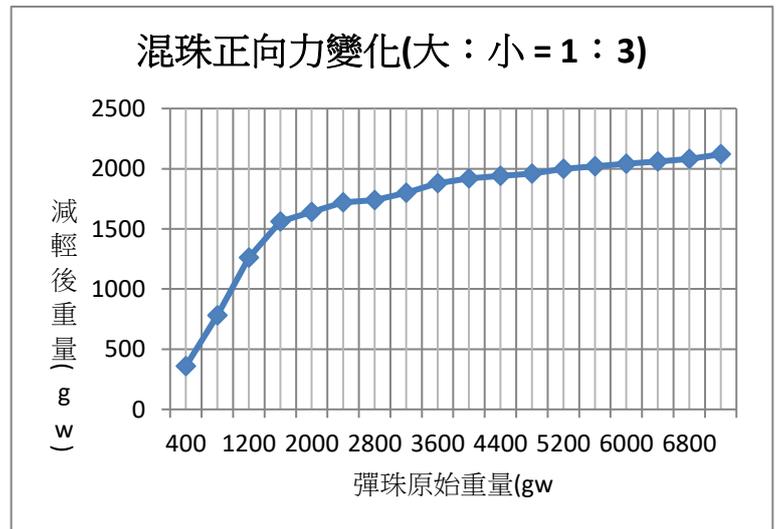
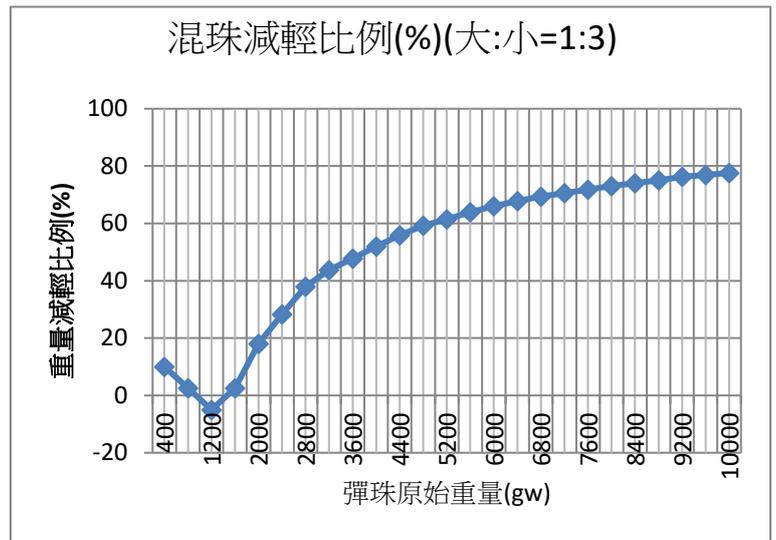


為了驗證小彈珠重量為 500gw 時，為何秤得讀數沒有減少的原因，我們改用了直徑較大的大彈珠重複實驗 1-1 的步驟進行測量。從減輕比例中可以看出大彈珠在 500gw 時，重量就開始減輕了，這點應證了我們在實驗 1-1 中的猜測。雖然兩種彈珠是一樣的重量，但是小彈珠在管中所疊的層數較大彈珠少，此時上層的彈珠向下壓的重量不足以使下層彈珠對管壁產生足夠的正向力，所以小彈珠跟管壁之間就無法形成向上的摩擦力。

另外從大彈珠重量減輕比例的圖中，也可以看出和小彈珠有類似的趨勢。一樣是在 500gw 與 1500gw 時，重量減輕比例下降，而過了 1500gw 之後，減輕比例又呈現上升的趨勢。因為小彈珠跟大彈珠唯一的區別只有半徑不同，所以根據摩擦力的理論，在同樣材質的條件下，兩種彈珠對紙筒的相對靜摩擦力係數是相同的。兩種不同的彈珠對同一個紙筒的重量減輕比例呈現一樣的趨勢，表示我們對重量減輕比例與摩擦力關係的猜測是正確的。

**實驗 2-1：改變比例為大彈珠重：小彈珠重=1：3**

| 混珠重量<br>(wg) | 磅秤讀數<br>(gw) | 混珠減輕比例<br>(%) |
|--------------|--------------|---------------|
| 400          | 360          | 10.0          |
| 800          | 780          | 2.5           |
| 1200         | 1260         | -5.0          |
| 1600         | 1560         | 2.5           |
| 2000         | 1640         | 18.0          |
| 2400         | 1720         | 28.3          |
| 2800         | 1740         | 37.9          |
| 3200         | 1800         | 43.8          |
| 3600         | 1880         | 47.8          |
| 4000         | 1920         | 52.0          |
| 4400         | 1940         | 55.9          |
| 4800         | 1960         | 59.2          |
| 5200         | 2000         | 61.5          |
| 5600         | 2020         | 63.9          |
| 6000         | 2040         | 66.0          |
| 6400         | 2060         | 67.8          |
| 6800         | 2080         | 69.4          |
| 7200         | 2120         | 70.6          |
| 7600         | 2140         | 71.8          |
| 8000         | 2160         | 73.0          |
| 8400         | 2180         | 74.0          |
| 8800         | 2200         | 75.0          |
| 9200         | 2180         | 76.3          |
| 9600         | 2220         | 76.9          |
| 10000        | 2240         | 77.6          |

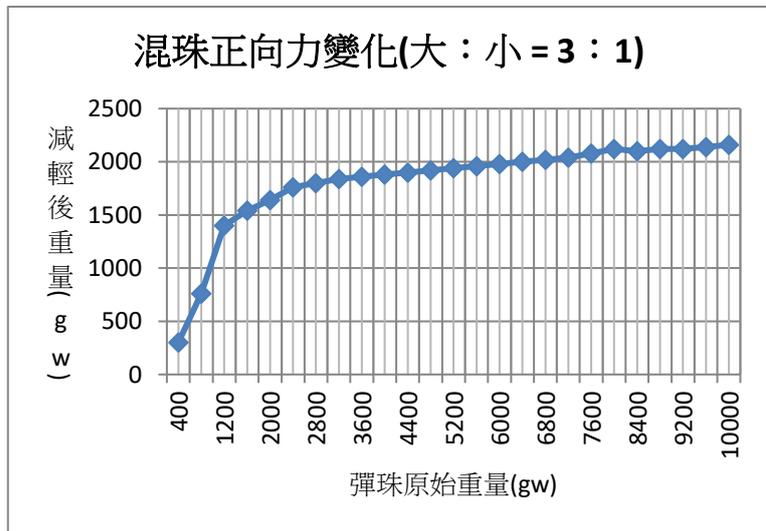
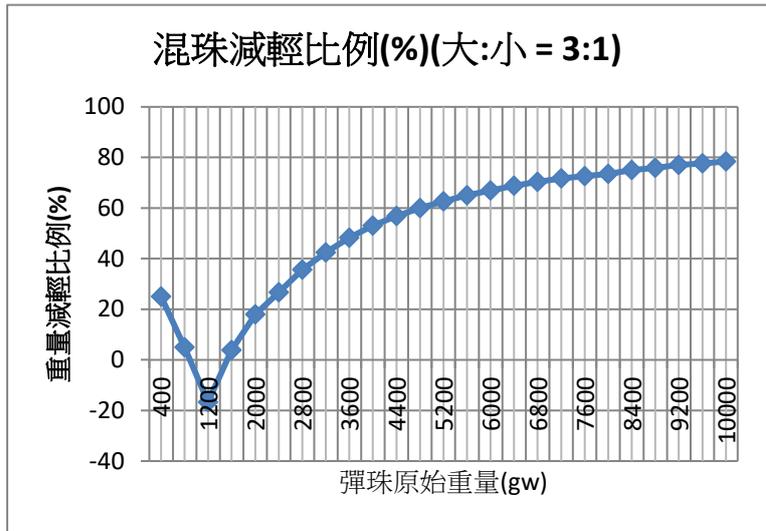


在前兩個實驗中，我們大概掌握了彈珠重量減輕比例的圖形，但是根據我們數據得到的圖形總覺得不夠漂亮。我們知道最大靜摩擦力和動摩擦力的大小，與物體給予接觸面的正向力成正比，而彈珠給紙筒的正向力又來自於上層彈珠給下層彈珠重量的分力。也就是說彈珠與彈珠間排列的越緊密，表示上層重量相同時，下層彈珠給予管壁的正向力會越大，所以我們將大小彈珠依照不同比例混和，而且將 500gw 的間距改成了 400gw，設計了實驗 2-1~2-3。

在實驗 2-1 中，重量為 1200gw 時，我們首次觀察到重量減輕比例為負值，也就是說磅秤測得的數值比彈珠總重還重。一開始我們認為是實驗過程有瑕疵，所以重新進行了測量，但是重複幾次都得到類似的結果，這使我們開始猜測也許不是實驗有瑕疵，所以我們決定先進行下一個實驗。

**實驗 2-2：改變比例為大彈珠重：小彈珠重=3:1**

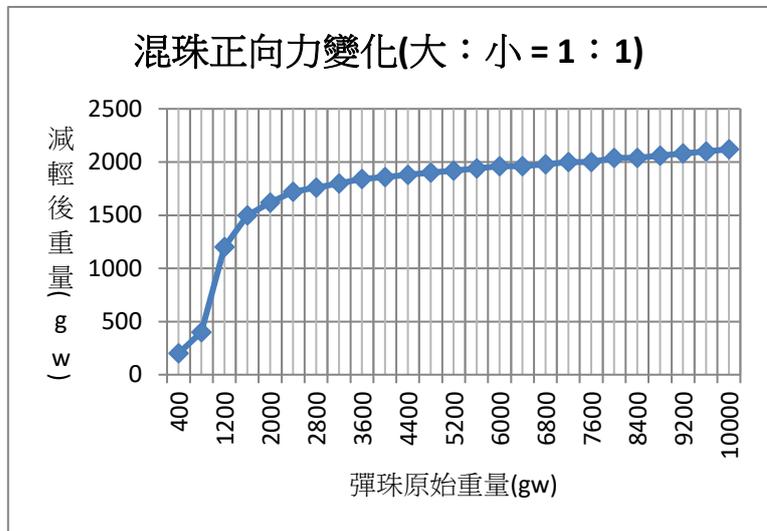
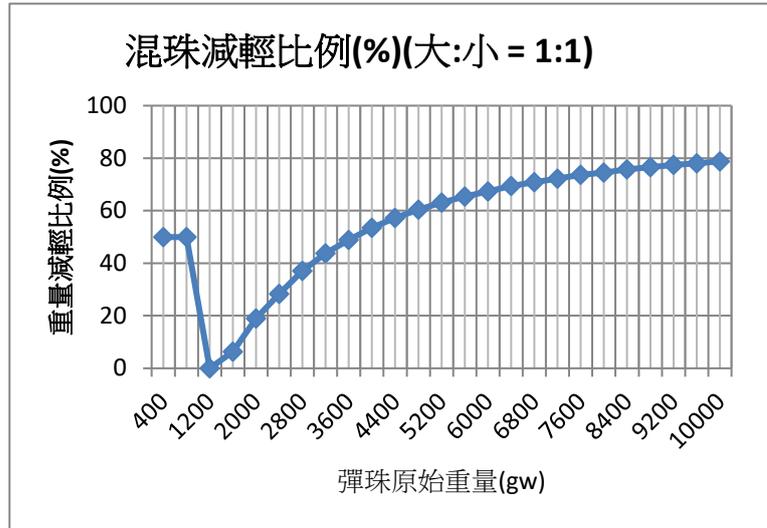
| 混珠重量 (gw) | 磅秤讀數 (gw) | 重量減輕比例(%) |
|-----------|-----------|-----------|
| 400       | 300       | 25.0      |
| 800       | 760       | 5.0       |
| 1200      | 1400      | -16.7     |
| 1600      | 1540      | 3.8       |
| 2000      | 1640      | 18.0      |
| 2400      | 1760      | 26.7      |
| 2800      | 1800      | 35.7      |
| 3200      | 1840      | 42.5      |
| 3600      | 1860      | 48.3      |
| 4000      | 1880      | 53.0      |
| 4400      | 1900      | 56.8      |
| 4800      | 1920      | 60.0      |
| 5200      | 1940      | 62.7      |
| 5600      | 1960      | 65.0      |
| 6000      | 1980      | 67.0      |
| 6400      | 2000      | 68.8      |
| 6800      | 2020      | 70.3      |
| 7200      | 2040      | 71.7      |
| 7600      | 2080      | 72.6      |
| 8000      | 2120      | 73.5      |
| 8400      | 2100      | 75.0      |
| 8800      | 2120      | 75.9      |
| 9200      | 2120      | 77.0      |
| 9600      | 2140      | 77.7      |
| 10000     | 2160      | 78.4      |



在整理實驗 2-2 的數據之後，我們發現重量減輕比例同樣出現了負值，而且一樣是出現在 1200gw 時，這次是-16.7%，比實驗 2-1 變重的還要多。兩次實驗一樣是在 1200gw 時出現負值，這表示不是巧合，一定有背後的原因。所以我們決定先進行完實驗 2-3 再來討論。

**實驗 2-3：改變比例為大彈珠重：小彈珠重=1：1**

| 混珠重量<br>(gw) | 磅秤讀數<br>(gw) | 重量減輕<br>比例(%) |
|--------------|--------------|---------------|
| 400          | 200          | 50.0          |
| 800          | 400          | 50.0          |
| 1200         | 1200         | 0.0           |
| 1600         | 1500         | 6.3           |
| 2000         | 1620         | 19.0          |
| 2400         | 1720         | 28.3          |
| 2800         | 1760         | 37.1          |
| 3200         | 1800         | 43.8          |
| 3600         | 1840         | 48.9          |
| 4000         | 1860         | 53.5          |
| 4400         | 1880         | 57.3          |
| 4800         | 1900         | 60.4          |
| 5200         | 1920         | 63.1          |
| 5600         | 1940         | 65.4          |
| 6000         | 1960         | 67.3          |
| 6400         | 1960         | 69.4          |
| 6800         | 1980         | 70.9          |
| 7200         | 2000         | 72.2          |
| 7600         | 2000         | 73.7          |
| 8000         | 2040         | 74.5          |
| 8400         | 2040         | 75.7          |
| 8800         | 2060         | 76.6          |
| 9200         | 2080         | 77.4          |
| 9600         | 2100         | 78.1          |
| 10000        | 2120         | 78.8          |



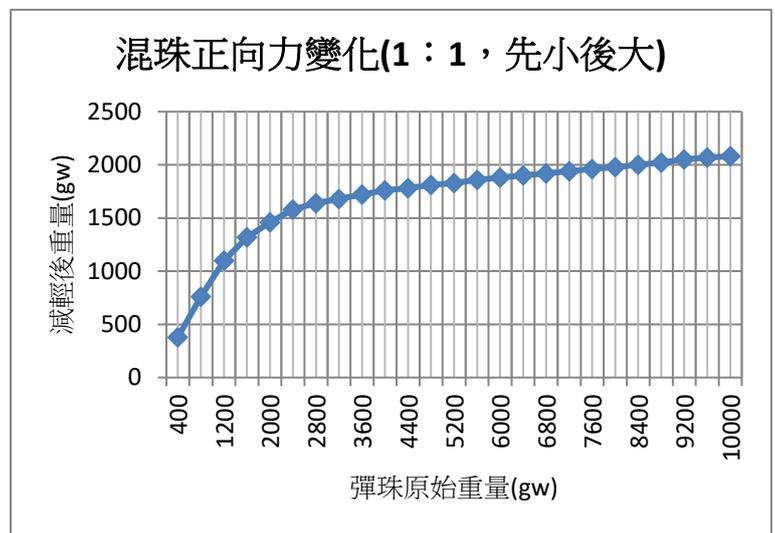
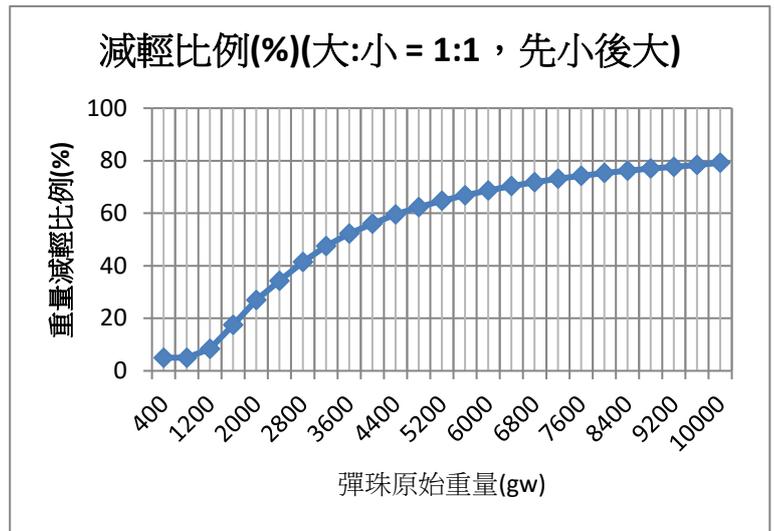
在實驗 2-3 的數據中，彈珠重量為 1200gw 的時候，減輕比例同樣明顯的下降，而且這次是 0%，表示重量沒有減輕。綜合實驗 2-1~2-3 來看，我們可以知道彈珠混和比例不同時，減輕比例圖形是類似的。但是做了幾次，只有在兩種彈珠比例為 1:1 時，才會在 1200gw 出現 0%。

減輕比例為 0% 很好解釋，就是彈珠下壓的重量沒有減輕。彈珠重量沒有減輕表示彈珠與紙筒間沒有摩擦力存在，但是又不是跟實驗 1-1 出現在一開始彈珠量較少的時候，這只有一個可能，彈珠對管壁的正向力值恰好使兩者間的摩擦力為最大靜摩擦力。此時彈珠會開始運動，而運動方向只能是向下，所以會造成磅秤測得的讀數跟原來的重量相同。

這樣一來，我們就可以推論實驗 2-1 與 2-2 中的負值成因，應該是彈珠與紙筒間為靜摩擦力，所以彈珠會拖著紙筒往下，進而造成重量增加。而且不同大小彈珠的組合，真的會造成彈珠與管壁間的正向力不同，使得最大靜摩擦力出現的時機不一樣。

實驗 3-1：改變彈珠倒入順序為先小彈珠 200gw 再大彈珠 200gw，以此順序循環。

| 混珠重量<br>(gw) | 磅秤讀數<br>(gw) | 重量減輕比例<br>(%) |
|--------------|--------------|---------------|
| 400          | 380          | 5.0           |
| 800          | 760          | 5.0           |
| 1200         | 1100         | 8.3           |
| 1600         | 1320         | 17.5          |
| 2000         | 1460         | 27.0          |
| 2400         | 1580         | 34.2          |
| 2800         | 1640         | 41.4          |
| 3200         | 1680         | 47.5          |
| 3600         | 1720         | 52.2          |
| 4000         | 1760         | 56.0          |
| 4400         | 1780         | 59.5          |
| 4800         | 1810         | 62.3          |
| 5200         | 1830         | 64.8          |
| 5600         | 1860         | 66.8          |
| 6000         | 1880         | 68.7          |
| 6400         | 1900         | 70.3          |
| 6800         | 1920         | 71.8          |
| 7200         | 1940         | 73.1          |
| 7600         | 1960         | 74.2          |
| 8000         | 1980         | 75.3          |
| 8400         | 2000         | 76.2          |
| 8800         | 2020         | 77.0          |
| 9200         | 2050         | 77.7          |
| 9600         | 2070         | 78.4          |
| 10000        | 2080         | 79.2          |

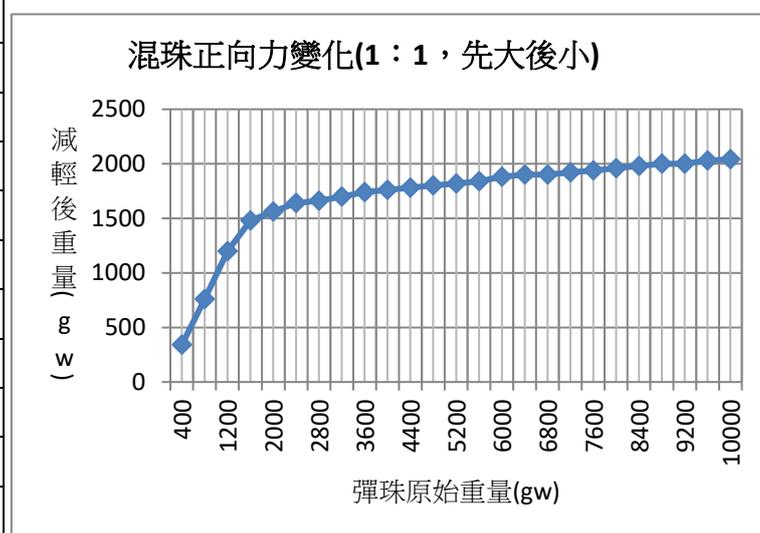
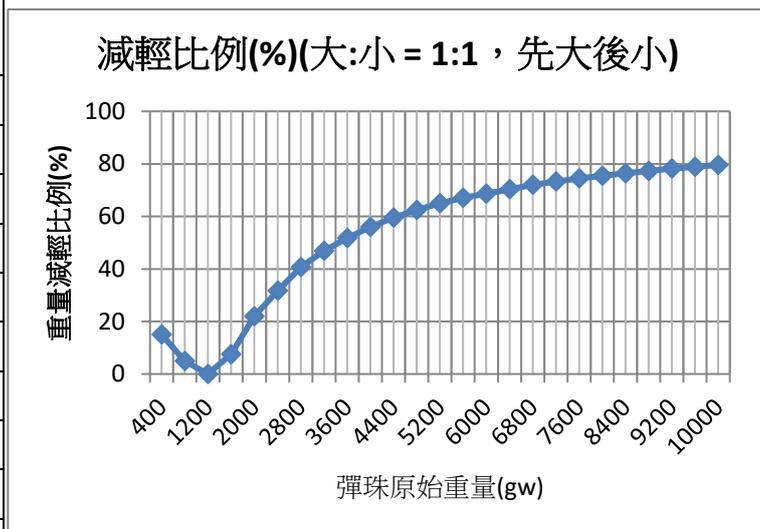


在實驗 3-1~3-3 中，我們試著將大小彈珠依照不同的順序放入紙筒中，想看看重量減輕比例會有甚麼不同。

實驗 3-1 中，是所有實驗結果中，唯一沒有出現重量減輕比例先下降再上升的一個。這表示不同的彈珠排列順序的確會影響重量減輕比例的變化。而 400gw 時的數據應證了我們在實驗 1-1 中的猜測，實驗 1-1 中，我們猜測小彈珠在 500gw 時，因為下壓重量不足以提供彈珠與管壁間夠大的正向力，進而使得彈珠與管壁間沒有摩擦力，所以重量沒有減少。而這次在 400gw 時，底層一樣是小彈珠，但上層變成大彈珠了，應該是大小彈珠接觸時，較容易填滿縫隙，使得彈珠與管壁間的摩擦力出現，因此造成重量減輕。

實驗 3-2：改變彈珠倒入順序為先大彈珠 200gw 再小彈珠 200gw，以此順序循環。

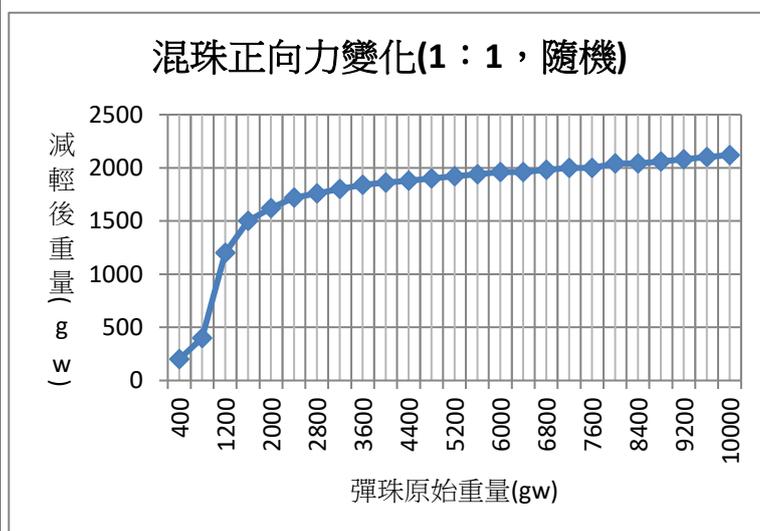
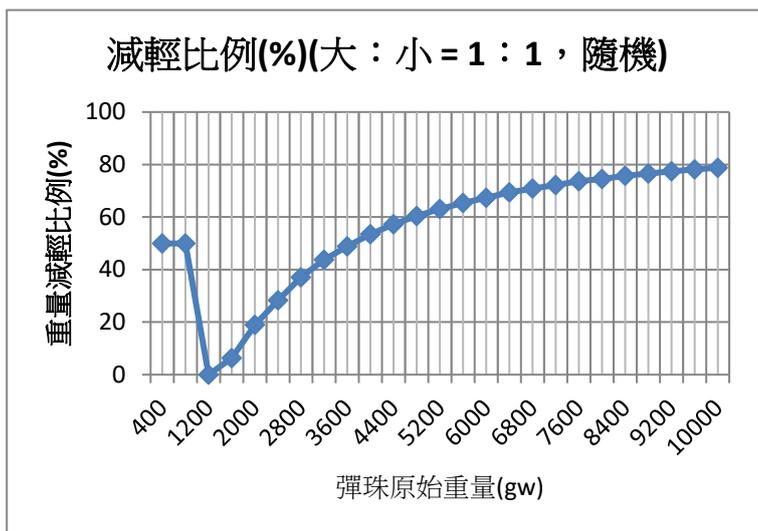
| 混珠重量<br>(gw) | 磅秤讀數<br>(gw) | 重量減輕比例<br>(%) |
|--------------|--------------|---------------|
| 400          | 340          | 15.0          |
| 800          | 760          | 5.0           |
| 1200         | 1200         | 0.0           |
| 1600         | 1480         | 7.5           |
| 2000         | 1560         | 22.0          |
| 2400         | 1640         | 31.7          |
| 2800         | 1660         | 40.7          |
| 3200         | 1700         | 46.9          |
| 3600         | 1740         | 51.7          |
| 4000         | 1760         | 56.0          |
| 4400         | 1780         | 59.5          |
| 4800         | 1800         | 62.5          |
| 5200         | 1820         | 65.0          |
| 5600         | 1840         | 67.1          |
| 6000         | 1880         | 68.7          |
| 6400         | 1900         | 70.3          |
| 6800         | 1900         | 72.1          |
| 7200         | 1920         | 73.3          |
| 7600         | 1940         | 74.5          |
| 8000         | 1960         | 75.5          |
| 8400         | 1980         | 76.4          |
| 8800         | 2000         | 77.3          |
| 9200         | 2000         | 78.3          |
| 9600         | 2030         | 78.9          |
| 10000        | 2040         | 79.6          |



在實驗 3-2 中，我們將彈珠依照大、小、大、小…的順序依次放入，結果重量減輕比例的圖形中，又出現了先降後升的結果，因此我們更確定了彈珠的排列方式會影響重量減輕比例。但是值得注意的是，這個影響似乎只發生在放彈珠的初期，到了最後減輕的重量比例都會在 78%~80%之間。這表示當彈珠的數量夠多之後，減輕的比例會趨向 80%，可惜的是我們在設備上受到了限制，無法繼續添加彈珠測量更多的數據。

### 實驗 3-3：改變彈珠倒入順序為隨機

| 混珠重量<br>(gw) | 磅秤讀數<br>(gw) | 重量減輕比例<br>(%) |
|--------------|--------------|---------------|
| 400          | 200          | 50.0          |
| 800          | 400          | 50.0          |
| 1200         | 1200         | 0.0           |
| 1600         | 1500         | 6.3           |
| 2000         | 1620         | 19.0          |
| 2400         | 1720         | 28.3          |
| 2800         | 1760         | 37.1          |
| 3200         | 1800         | 43.8          |
| 3600         | 1840         | 48.9          |
| 4000         | 1860         | 53.5          |
| 4400         | 1880         | 57.3          |
| 4800         | 1900         | 60.4          |
| 5200         | 1920         | 63.1          |
| 5600         | 1940         | 65.4          |
| 6000         | 1960         | 67.3          |
| 6400         | 1960         | 69.4          |
| 6800         | 1980         | 70.9          |
| 7200         | 2000         | 72.2          |
| 7600         | 2000         | 73.7          |
| 8000         | 2040         | 74.5          |
| 8400         | 2040         | 75.7          |
| 8800         | 2060         | 76.6          |
| 9200         | 2080         | 77.4          |
| 9600         | 2100         | 78.1          |
| 10000        | 2120         | 78.8          |



最後，我們決定試看看如果大小彈珠分批放入，但是不照順序的話，會出現怎樣的結果。於是我們將大小彈珠分別分成每包 200gw，然後全部放在同一個紙箱中，每次隨機從中抽出一包倒入紙筒中。結果跟我們在實驗中所得到的差不多，一開始比較不同，但是到了後期重量減輕的比例會趨近 80%。

## 陸、結論

- 一、根據實驗結果顯示，會影響重量減輕比例的因素應該有彈珠半徑、彈珠數量、大小彈珠排列方式三個。其中彈珠排列方式包含了大小混合的比例跟大小彈珠放置的順序，但是這些影響都發生在初期，當彈珠的數目夠多了之後，重量減輕比例會趨近於 80%。
- 二、彈珠在紙筒中之所以會減輕重量，是因為彈珠和管壁間的摩擦力造成。但是摩擦力又分成靜摩擦力與動摩擦力，所以在超過最大靜摩擦力之後，重量減輕比例才會呈現不斷上升。這應該是因為動摩擦力和正向力成正比，而彈珠與管壁間的正向力又會受到上層彈珠重量的影響，所以才會造成重量減輕比例呈現上升的趨勢。
- 三、在所有的實驗中，全部都放大彈珠的重量減輕比例圖形看起來最不相同，表示彈珠與彈珠的排列如果越緊密，就能得到越漂亮的實驗結果。

## 柒、未來展望

在本次實驗中，我們知道了彈珠重量減輕比例與摩擦力之間的關係，也知道了影響重量減輕比例的因素，但是礙於器材與時間的限制，無法做出更多的數據來驗證。因此，我們可以將下面的內容當成是下一個科展的實驗。

1. 找出彈珠與紙筒間的摩擦係數。
2. 找測量範圍更大的磅秤與更長的紙筒來實驗。
3. 除了彈珠之外，可以加入不同半徑的小球來實驗。

## 捌、參考資料

1. <<裝滿的穀倉壓力有多大？靜摩擦力與楊森效應>>linjunJR，2020。