

# 中華民國第 61 屆中小學科學展覽會

## 作品說明書

---

國小組 物理科

佳作

080110

「救命」的安全平網~降低落下人員傷害的設計

學校名稱：新北市三重區重陽國民小學

作者：  小六 梁家康  小六 林珈妘  小六 許湘琪	指導老師：  黃鵬翔  林坤稜
---	-----------------------------

關鍵詞：安全平網、自由落體、衝擊力

## 摘要

當球落下至安全平網時，**彈簧秤**、**繫繩角度**，以及**網面**都會有變化。我們先製作不同設計的安全平網網體，利用彈簧秤測量繫繩拉力，再利用雷射筆反射軌跡法測量球落下的衝擊力，並利用 **Arduino** 連接**超音波測距器**來測量網面下陷程度，驗證雷射筆反射軌跡法的準確性。再來我們利用球的位置變化來算出有、無安全平網時的衝擊力，並用透明塑膠球裝顏料水觀察受力情形。實驗結果如下：

- 一、 球由越高的高度落下，衝擊力越大，水的震盪越明顯。
- 二、 衝量越大，衝擊力不一定越大。
- 三、 有安全平網時，會比直接撞擊桌面、軟墊還安全。
- 四、 理想的安全平網是以較**有彈性的材質做為邊繩**、**外圍框架撐平網面**、**繫繩數量較多**、**適當大小的網面**，以及**網孔稍小**為佳。

## 壹、研究動機

電視新聞報導有老公在機場把妻子從四樓丟下的事件，雖然掉落在安全平網上，但是傷勢嚴重。安全平網除了能夠接住落下的人員外，應該也要減少落下人員的傷害，所以我們思考什麼樣的設計比較能夠減少落下人員的傷害？研究過程中還要思考衝擊力要如何測量？以及如何呈現物體受力的情形？升上六年級後，學習到 **Arduino** 相關課程，所以也想知道 **Arduino** 連接不同的感應器在研究中能否提供幫助？

## 貳、研究目的

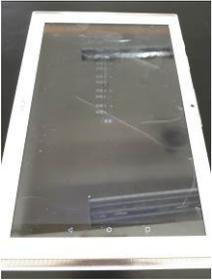
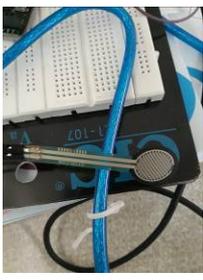
- 一、 測量不同設計安全平網的衝擊力
  - (一) 製作不同設計的安全平網網體
  - (二) 利用**彈簧秤**來觀察不同設計安全平網的繫繩受力情形
  - (三) 利用**雷射筆反射軌跡**來測量下墜皮球的衝擊力
  - (四) 利用**超音波感測器測量下陷程度**驗證雷射筆反射軌跡法的準確性
- 二、 探討有安全平網時較直接撞擊不同平面材質安全的原因
  - (一) **不同碰撞平面材質**(無安全平網)對下墜皮球衝擊力與受力情形
  - (二) **有安全平網時**對下墜皮球衝擊力與受力情形

## 參、研究設備及器材

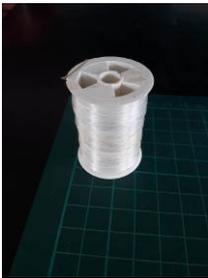
### 一、 軟體：

圖示					
軟體	<b>Phyphox(手機物理實作)</b>	<b>Free Video to JPG Converter</b>	<b>IC Measure</b>	<b>Arduino</b>	<b>Excel</b>
說明	利用聲音觀測落下高度與反彈高度	可以將 1 秒的影片轉換成 120 張的定格畫面	將影片慢速播放後暫停，再量測點到點距離	用來設定與測量相關感應器	用來分析與圖現相關數據

### 二、 觀測設備及器材：

照片					
名稱	<b>平板</b>	<b>GoPro</b>	<b>FSR402 壓力感測器</b>	<b>超音波測距器</b>	<b>筆電</b>
說明	下載相關軟體及錄音	高速攝影機，以每秒 120 張拍攝	用以測量撞擊力大小	測量皮球至桌面的高度	分析相關數據

### 三、 測量工具：

照片					
名稱	<b>皮球</b>	<b>20 g 砝碼</b>	<b>彈簧秤</b>	<b>釣魚線</b>	<b>觀測柱</b>
說明	撞擊物	改變皮球重量	觀察繫繩拉力的大小	拉起皮球	測量下陷程度

### 四、 其他觀測設備及器材：

定滑輪、手機、雷射筆、羽毛球網、棉線、彈簧繩、木棍、透明塑膠球

## 肆、研究過程

### 一、文獻探討：

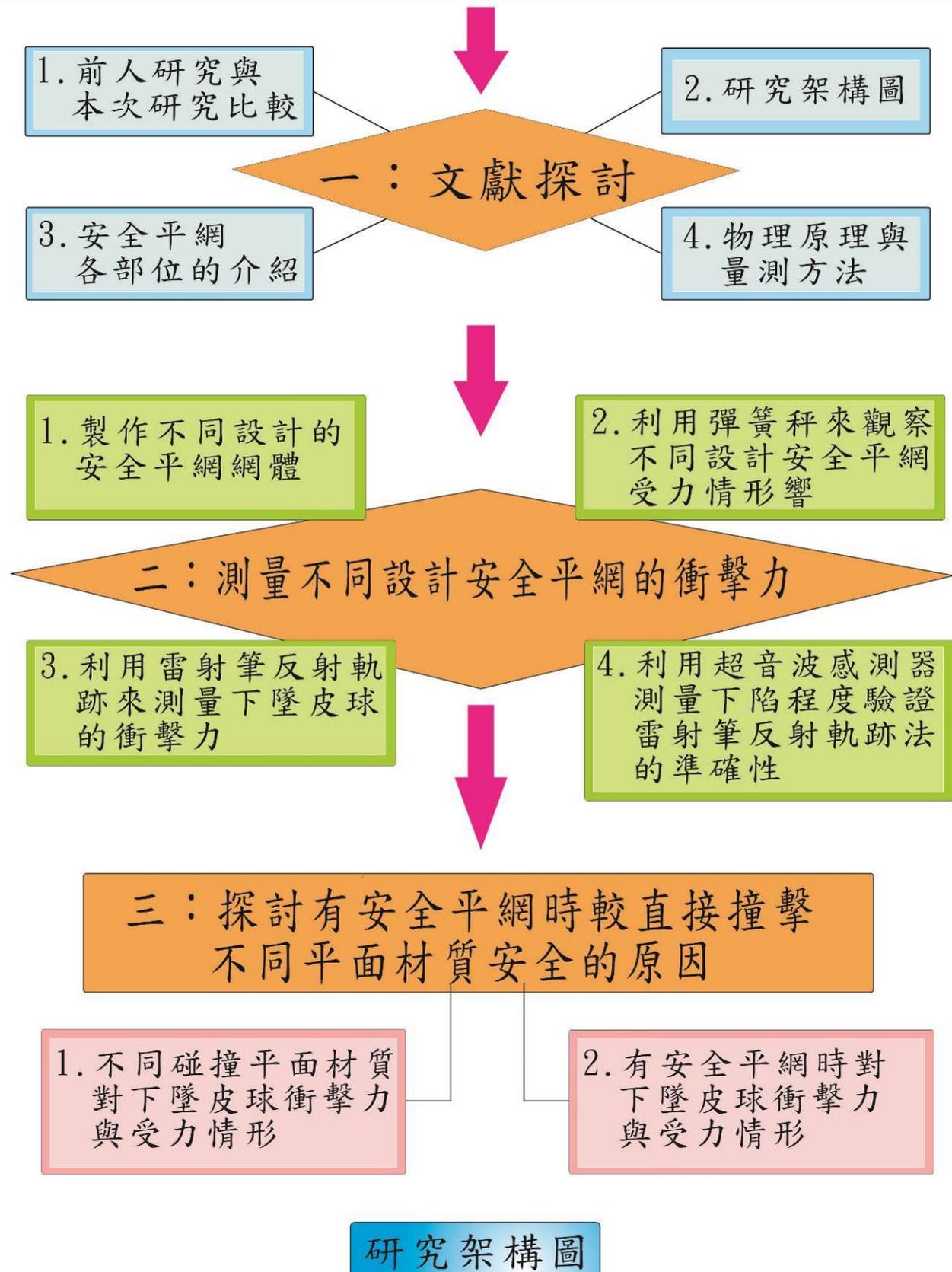
#### (一) 前人研究與本次研究比較

在科展資訊管理系統中搜尋「衝擊力」，與主題相關的有以下三篇作品，如下表：

研究別 分類	前人研究			本次研究
發表科 展屆數	2014 年臺灣國 際科學展覽會	2015 年臺灣國際 科學展覽會	2019 資優校際高 峰論壇物理組 05	第 61 屆中小學科 學展覽會
科展題目	乒乓球彈跳運動 研究	仙「鋁」奇「圓」 — 探討鎢鋼球碰 撞的力與能量	鋼珠撞擊壓克力 板之恢復係數及 衝量研究	「救命」的安全平 網~降低落下人員 傷害的設計
實驗方法	訊號產生器接到 乒乓球上，木板 接到電腦錄音輸 入端，由錄音程 式加以記錄	利用高速攝影機 拍攝鎢鋼球碰撞 產生的情況與能 量的傳遞	以鋼珠撞擊壓克 力板，利用 WavePad 軟體記 錄撞擊聲，轉換成 彈起高度	利用高速攝影機 拍攝下墜皮球與 不同設計的安全 平網接觸時，衝擊 力的變化
撞擊物	乒乓球、排球	大、小鎢鋼球	鋼珠	皮球
撞擊表面	木板、鐵板、球 拍	另一顆大、小鎢鋼 球	壓克力板	不同設計安全平 網
與本研究相 關實驗結果 與本次研究 物理運用	1. 乒乓球恢復係 數：鐵板 = 木板 > 橡皮 2. 碰撞時間：鐵 板 < 木板 < 橡皮 3. 乒乓球碰撞 力：鐵板 > 木板 > 橡皮 4. 碰撞力與入射 速度均成一次方 正比線性關係	1. 變形的測試物 表面恢復原狀。球 獲得動能後向上 反彈 2. $V_1 - V_2 = -e(u_1 - u_2)$	1. 相同質量鋼 珠，壓克力板厚度 與恢復係數呈正 相關 2. 靠近邊際的地 方會有邊際效應 產生，使得恢復係 數下降 3. 相同鐵球質 量，改變壓克力板 厚度時，碰撞時間 並不會改變	1. 碰撞力與恢復係 數以及碰撞時間 有關 2. 衝量(J): 等於動 量的變化量( $\Delta P$ ) = 平均衝擊力(F) × 碰撞時間( $\Delta t$ ) = 落 體質量(M) × 速度 變化( $\Delta V$ ) 3. 下墜皮球要中網 心，避免邊際效應

三篇前人研究主要是研究自由落體中撞擊物與被撞擊物在撞擊時的物理特性；而本次研究是觀察有無安全平網，以及不同設計的安全平網受皮球撞擊後，球的動量變化以及網子的作用力乘上碰撞時間之關聯性來研究。因此本研究是可以藉安全平網下陷程度來觀察衝擊力的大小，這是其他三篇前人研究沒有涉入的部分。

# 「救命」的安全平網~降低落下人員傷害的設計



### (三) 安全平網各部位的介紹：

結構名稱	說明	手繪示意圖
邊繩	穿過網體四周邊緣網目的繩子	
繫繩	把安全網固定在框架上的繩子	
網孔	網體的繩子交錯而成的孔洞	
網面	網繩編結而成，具有菱形或方形的網目	

### (四) 物理原理與量測方法：

本研究的球的位置變化實驗主軸為  $J = \Delta P = F \times \Delta T = M \times \Delta V$ ，因此：

(一) **F** 方面公式：物體向上的力(F)-物體的重力(Mg)=物體的合力(Ma) (力~維基百科)

本研究中：物體向上的力為網子給球的反作用力；物體的重力為皮球的重量乘上重力加速度；物體的合力為球給網子的作用力

測量方法：用不同皮球的重量測量球距離桌面的高度，再使用下墜皮球測量碰撞期間球距離桌面的高度，即是網子給球的作用力；球的重力為定值。

(二)  $\Delta t$  方面：碰撞時間是指兩物體相接觸的時間，本研究是指撞擊物剛接觸物體表面至撞擊物離開物體表面的時間。

測量方法：使用定格畫面來計算剛接觸至離開的張數。

(三) **M** 方面：研究中皮球的質量為定值，用電子秤測量。

(四)  $\Delta V$  方面：公式為  $(V = \sqrt{2 \times g \times h})$ ，落下速度(V1)是以落下高度(最高點至最低點)；反彈速度(V2)是以反彈高度(最低點至反彈後最高點)來推算，再把兩個速度相加(運動方向相反)即為  $\Delta V$ 。

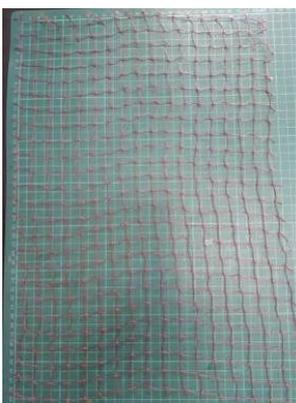
測量方法：使用軟體(手機物理實作)來測量皮球碰撞不同表面材質落下高度與反彈高度；有安全平網時因聲音過小無法蒐集，因此是利用定格畫面來測量球的最低點與反彈高度。

## 二、研究目的一：測量不同設計安全平網的衝擊力

### (一) 製作不同設計的安全平網網體

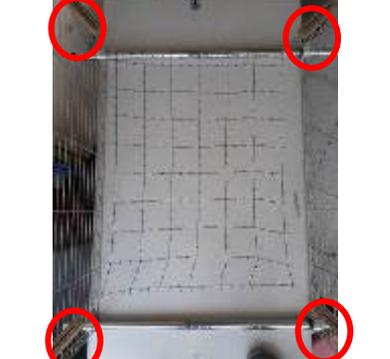
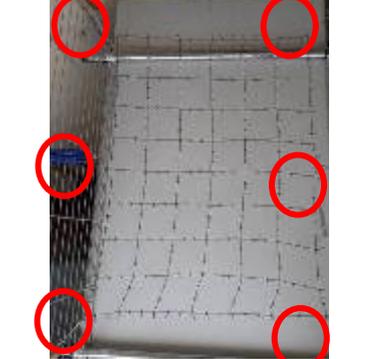
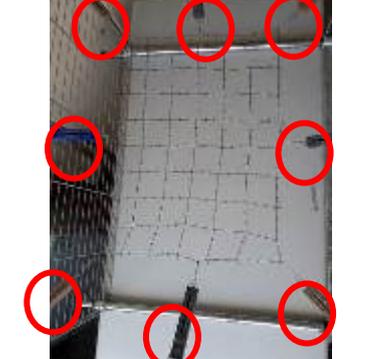
#### 1. 不同邊繩材質的安全平網網體

不同材質的邊繩，彈性不大相同，彈性大小為彈簧繩>童軍繩>木棍，這些彈性不同的邊繩，對衝擊力會產生什麼影響呢？我們將羽毛球網剪下長 25 孔、寬 18 孔的網子，製作出無邊繩的網面，將無邊繩的網面(圖 1)分別穿入彈簧繩(圖 2)、童軍繩(圖 3)，以及木棍(圖 4)，如此做出不同邊繩材質的安全平網網體。

照片				
說明	圖 1：無邊繩	圖 2：彈簧繩做邊繩	圖 3：童軍繩做邊繩	圖 4：木棍做邊繩

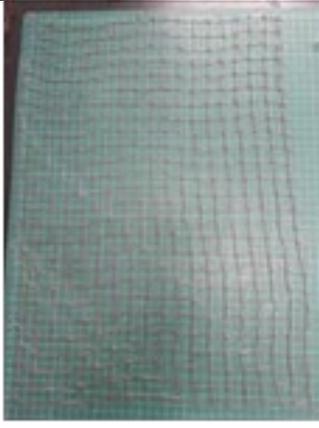
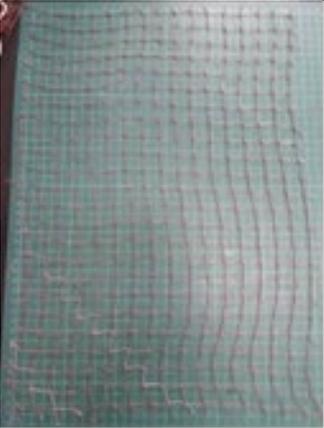
#### 2. 不同繫繩數量的安全平網球設計

從生活經驗來看，繫繩數量越多，承受的撞擊力越大。然而這些數量不同的繫繩，對衝擊力會產生什麼影響呢？我們將彈簧秤綁在外框上，將無邊繩(18×25)網體固定在 4 支彈簧秤掛鉤上，變成 4 條繫繩的設計(圖 5)；再將彈簧秤 2 支固定在較長邊的框架上，變成 6 條繫繩的設計(圖 6)；最後再將彈簧秤 2 支固定在較短邊的框架上，變成 8 條繫繩的設計(圖 7)。

照片			
說明	圖 5：四條繫繩的設計	圖 6：六條繫繩的設計	圖 7：八條繫繩的設計

### 3. 不同網面大小安全平網球的衝擊力

網面的大小通常會因為設置的場所而不同，那網面大小對衝擊力會產生什麼影響呢？我們採用網面大小為寬 18 孔、長 25 孔做為網面大的設計(圖 8)，將羽球網剪成寬 17 孔、長 24 孔的網體(圖 9)就成了網面中的設計；將羽球網剪成寬 16 孔、長 23 孔的網體(圖 10)就成了網面小的設計。

照片			
說明	圖 8：網面大(18×25)	圖 9：網面中(17×24)	圖 10：網面小(16×23)

### 4. 不同網孔大小安全平網球的衝擊力

網孔大小與繩子粗細、編法有關，那網孔大小對衝擊力會產生什麼影響呢？因為我們發現將網孔與網孔中間的線剪斷後，網孔就會變大(圖 11)，所以在網孔小的部分，採用寬 18 孔、長 25 孔的網體做為網孔小的設計(圖 12)；讓網孔增大的方式是將寬 18 孔、長 25 孔的網體(網孔小)，每間隔四個網孔中間的線剪掉，就是將羽球網剪成寬 2 孔、長 2 孔，形成一個 2×2 的網孔網面，就成了網孔中的設計(圖 13)；再間隔九個網孔中間的線剪掉，就是將羽球網剪成寬 3 孔、長 3 孔，形成一個 3×3 的網孔，就成了網孔大的設計(圖 14)。

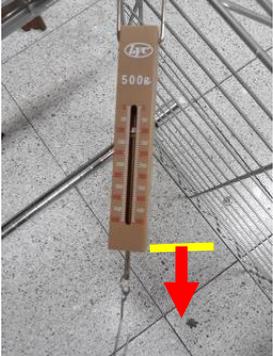
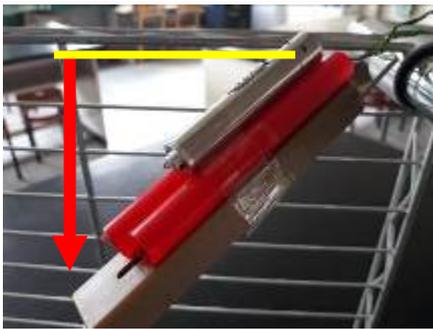
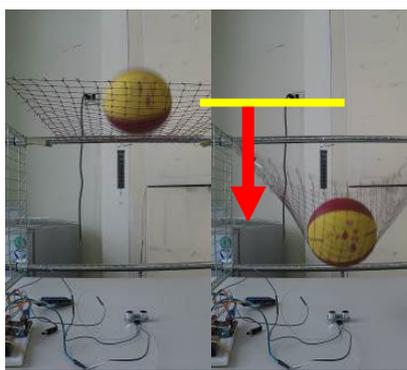
照片				
說明	圖 11：剪開中間	圖 12：網孔小(1×1)	圖 13：網孔中(2×2)	圖 14：網孔大(3×3)

## (二) 利用彈簧秤來觀察不同設計安全平網的繫繩受力情形

### 1. 力與形變的發想

在五年級「力與運動」中有提及，物品受力越大，形變越大。因此我們要測量衝擊力可以由物體形變的程度來進行，我們假設物體形變(下陷)越大，衝擊力也會越大。物體形變在研究中有三個地方可以觀察到：

圖 15：研究中能觀察到物體形變的三個地方

圖示			
說明	彈簧秤受力越大，彈簧伸長量越大，讀數越大	網面受力越大，繫繩一側下垂越多，雷射筆的仰角就越高	衝擊力越大，網面下垂程度越大

研究中針對三種形變皆有測量，利用不同方法的實驗結果交互對照，可以提高研究的準確性。

### 2. 利用彈簧秤測量不同設計安全平網的繫繩拉力

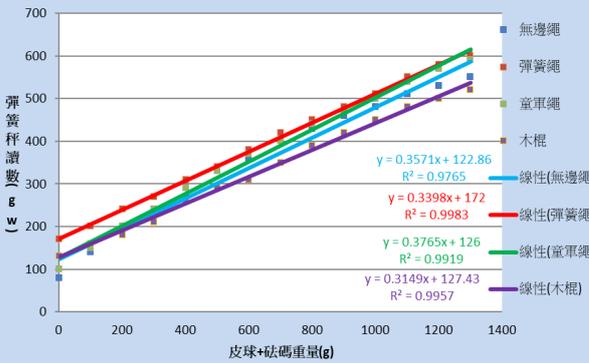
我們想知道，當衝擊力對繫繩拉力的影響，因為當衝擊力越大時，繫繩的拉力也會越大，如果有設計可以減少繫繩的拉力，這樣繫繩較不會斷開，落下的人員較不會因繫繩斷開而掉落地面。我們將不同設計安全平網網體四個角落掛上彈簧秤，除了作為繫繩使用外，還能利用彈簧秤的讀數觀察拉力的大小，因為彈簧秤最大的讀數是 500 g，所以當彈簧秤的拉力超過 500 g 時，我們採用彈簧秤並聯(如右圖 16)的方式來進行測量，再將兩個彈簧秤的讀數加總起來。這樣我們就能測量當皮球重量改變時，繫繩的拉力大小。



### 3. 利用彈簧秤測量不同設計安全平網的繫繩拉力實驗結果

將實驗結果利用 Excel 進行整理與分析 (下圖為整理後資料, 原始資料收於附錄中)

圖 17：彈簧秤測量不同設計安全平網繫繩拉力關係圖

名稱	不同重量皮球在 <b>不同邊繩材質</b> 安全平網 彈簧秤讀數關係圖	不同重量皮球在 <b>不同繫繩數量</b> 安全平網 彈簧秤讀數關係圖
關係圖	 <p>Figure 17 (Left): Spring scale readings (g) vs. ball + weight (g) for different rope materials. The graph shows four linear regression lines with the following equations and R-squared values:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>無邊繩: <math>y = 0.3571x + 122.86</math>, <math>R^2 = 0.9765</math></li> <li>彈簧繩: <math>y = 0.3398x + 172</math>, <math>R^2 = 0.9983</math></li> <li>童軍繩: <math>y = 0.3765x + 126</math>, <math>R^2 = 0.9919</math></li> <li>木棍: <math>y = 0.3149x + 127.43</math>, <math>R^2 = 0.9957</math></li> </ul>	
結果分析	<p>1. <math>R^2</math> 都高達 0.97 以上，表示皮球+砝碼重和彈簧秤讀數的相關性都非常高</p> <p>2. 趨勢線斜率最小的是<b>木棍</b>(0.314)表示皮球+砝碼重影響彈簧秤讀數的變化較小</p>	<p>1. <math>R^2</math> 都高達 0.95 以上，表示皮球+砝碼重和彈簧秤讀數的相關性都非常高</p> <p>2. 斜率最小的是<b>八條彈簧繩</b>(0.187)表示皮球+砝碼重影響彈簧秤讀數的變化較小</p>
名稱	不同重量皮球在 <b>不同網面大小</b> 安全平網 彈簧秤讀數關係圖	不同重量皮球在 <b>不同網孔大小</b> 安全平網 彈簧秤讀數關係圖
關係圖		
結果分析	<p>1. <math>R^2</math> 都高達 0.97 以上，表示皮球+砝碼重和彈簧秤讀數的相關性都非常高</p> <p>2. 斜率都<b>差不多</b>表示皮球+砝碼重影響彈簧秤讀數的變化差不多，<b>但網面越大讀數越小</b></p>	<p>3. <math>R^2</math> 都高達 0.97 以上，表示皮球+砝碼重和彈簧秤讀數的相關性都非常高</p> <p>4. 斜率最小的是<b>小網孔</b>(0.357)表示皮球+砝碼重影響彈簧秤讀數的變化較小</p>

#### 4. 實驗發現

- (1) 彈簧秤讀數越大，越能撐起網面，網面較不容易下垂。
- (2) 彈簧秤會隨著重量增加而讀數變大，這與課本內容受力越大，形變越大相符。
- (3)  $R^2$  都非常接近 1 表示皮球+砝碼重和彈簧秤讀數的相關性都非常高。
- (4) 以趨勢線來看，**木棍做邊繩、繫繩越多、網孔較小**的設計，皮球重量增加，彈簧秤的讀數增加較少(斜率較小)；**網面大小**則較無影響(斜率差不多)。

(5) 繫繩越多越能分攤球的重量。

(6) 網面越小時，網面拉力就越大，彈簧秤讀數越大。

### (三) 利用網子形變來測量下墜皮球衝擊力的雷射筆反射軌跡法

#### 1. 利用雷射筆仰角測量衝擊力

球撞擊安全平網時，繫繩接網面一端會向下，固定在繫繩上的雷射筆仰角會隨之升高(如右圖 18)，我們要找出形變與衝擊力的關係後，才能確認受撞擊時所承受的衝擊力。雷射筆的仰角會隨著皮球重量增加而增加，再利用鏡子反射(入射角等於反射角) 來放大效果，照射到桌上白紙(詳細裝置如圖 19)。

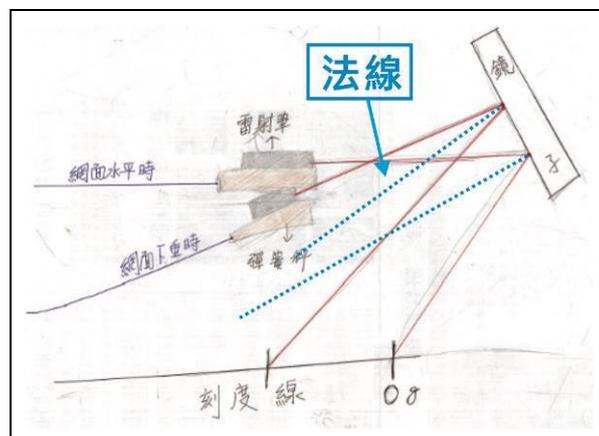


圖 18：手繪示意圖

圖 19：測量雷射筆照射的仰角與衝擊力的關係裝置圖

### 雷射筆裝置測量球落下的衝擊力



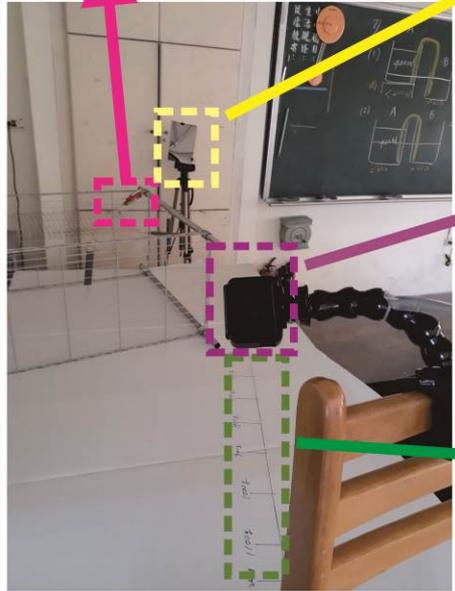
**雷射筆**

網面凹陷時，彈簧秤的角度會改變，雷射筆照射的位置也會不同。



**反射鏡**

雷射筆照射在鏡子的位置不同，鏡子反射的角度也會不同，這樣具有放大的效果，讓量測更容易。



**高速攝影機 定格畫面**

高速攝影機拍攝後轉成定格畫面，光點在刻度位置測得衝擊力大小。



**刻度線**

利用砝碼增加皮球的重量，並刻劃不同重量時雷射筆照射的位置。

### (1) 定滑輪裝置改變皮球重量

用定滑輪（減少摩擦力，**不省力也不費力**）和砝碼來調整皮球的重量。舉讓皮球重量變成 50 g 為例子，皮球淨重為 150 g，用釣魚線在照片右側綁住皮球固定，定滑輪另一側鉤住 100 g 砝碼，這樣皮球壓在網子上的重量即會變成  $150 - 100 = 50$  g 重，如果是要增加皮球重量則是將砝碼置於皮球上，如果皮球重量要 300 g，則是將 150 g 的砝碼置於皮球上。詳細裝置如圖 20 所示：

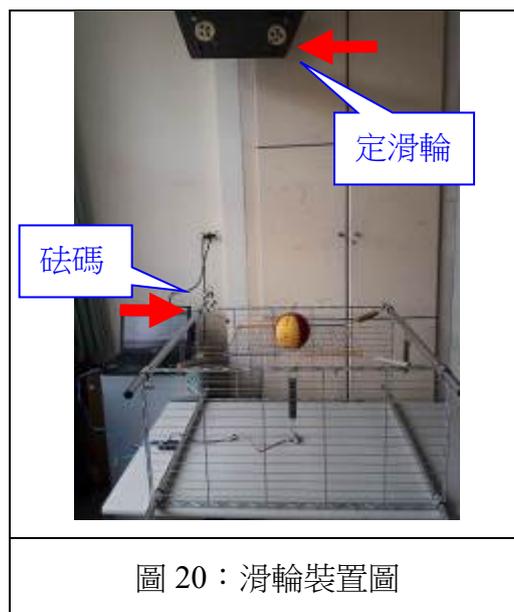


圖 20：滑輪裝置圖

### (2) 繪製刻度線

不同的皮球重量，雷射光反射的光點位置會不同，我們利用麥克筆在紙板上標示不同重量時光點的位置，先從 0 g 開始，之後每隔 100 g 標示一次。

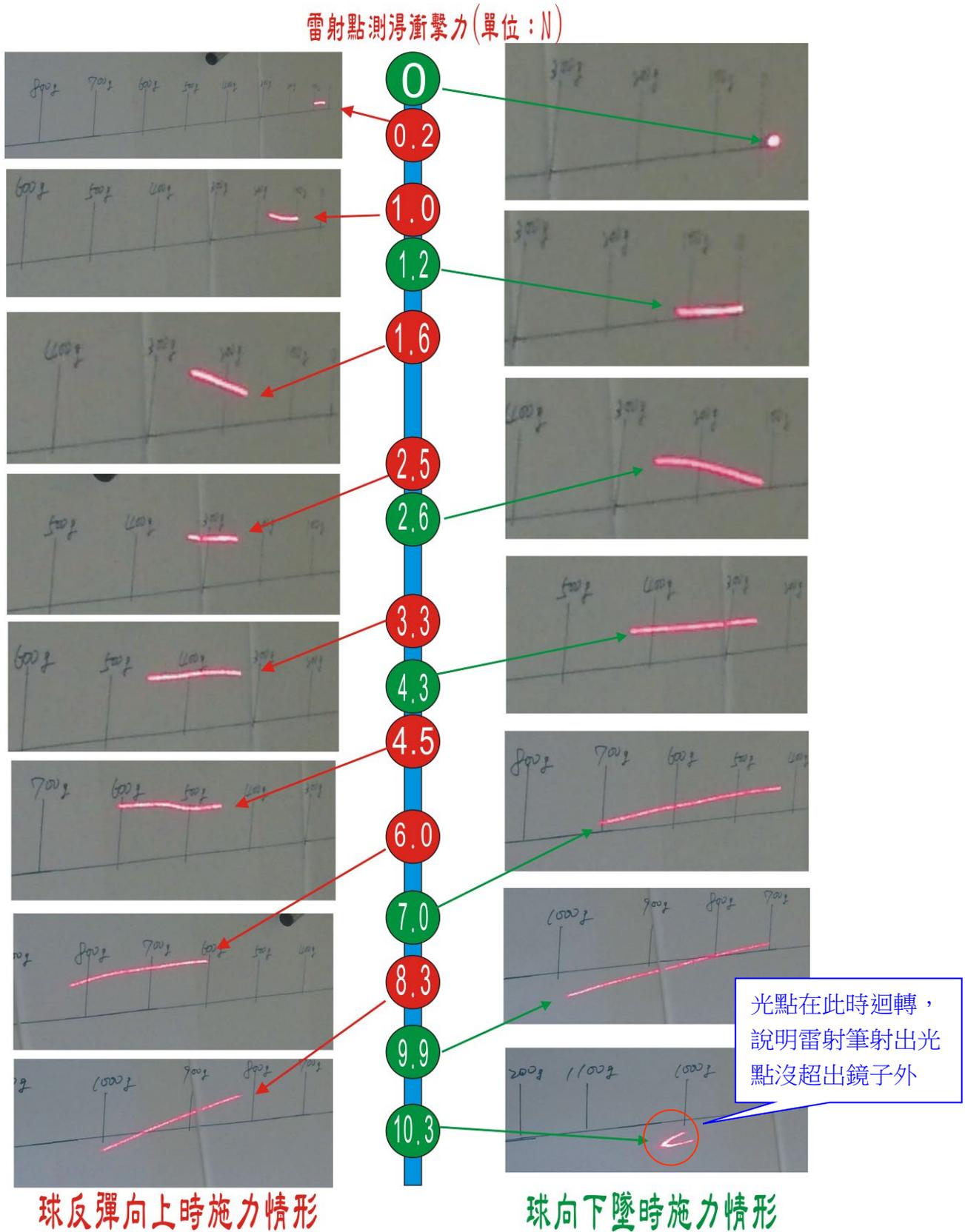
### (3) 利用定格畫面測量衝擊力

當我們標示完刻度線後，我們讓皮球由 20 cm 高的地方落下(超音波感測器測量落下高度，超音波感測器後面會有描述)，我們使用 GoPro 高速攝影(每秒 60 張)再用 Free Video to JPGConverter 軟體來轉換成皮球落下的定格畫面，再利用定格畫面中的雷射筆反射的光點位置(圖 21)，判斷此張定格畫面的衝擊力，加總後再平均後求出平均衝擊力。定格畫面與結果如圖 22 所示：(以無邊繩，網面  $18 \times 25$ ，網面上方 20 cm 落下為例)，力以光點前方為準，單位利用重力加速度  $10 \text{ N/kg}$  換算成牛頓(N)。



圖 21：雷射筆仰角越大，反射的光點越後面

圖 22：雷射筆照射的仰角測量平均衝擊力的定格畫面與結果



平均衝擊力的計算方式為每張定格畫面加總後除上張數，計算式子如下：

$$(0+0.2+1+\dots+10.3)/15 = 4.18 \text{ N}$$

## 2. 實驗結果：表 4-1 不同設計安全平網利用創意測量測得的平均衝擊力

項次 不同設計		最大衝擊力	F1+...+Fn (F 總和)	定格畫面張 數(張)	△T (接觸時間)	平均衝擊力
不同 材質 邊繩	無邊繩	10.3 N	62.7 N	15 張	0.25 sec	4.18 N
	彈簧繩	10.5 N	63.9 N	15 張	0.25 sec	4.26 N
	童軍繩	9.6 N	64.5 N	16 張	0.27 sec	4.03 N
	木棍	7.4 N	47.6 N	12 張	0.20 sec	3.97 N
不同 繫繩 數量	四條繫繩	10.3 N	62.7 N	15 張	0.25 sec	4.18 N
	六條繫繩	9.6 N	52.9 N	13 張	0.22 sec	4.07 N
	八條繫繩	8.4 N	47.9 N	12 張	0.20 sec	3.99 N
不同 網面 大小	網面大	10.3 N	62.7 N	15 張	0.25 sec	4.18 N
	網面中	10.7 N	63.8 N	14 張	0.23 sec	4.55 N
	網面小	11.1 N	64.7 N	14 張	0.27 sec	4.62 N
不同 網孔 大小	網孔小	10.3 N	62.7 N	15 張	0.25 sec	4.18 N
	網孔中	11.0 N	70.6 N	16 張	0.27 sec	4.41 N
	網孔大	12.7 N	74.6 N	17 張	0.28 sec	4.39 N

## 3. 實驗發現

- (1) 由最大衝擊力以及平均衝擊力來看，以木棍做為邊繩時、八條繫繩、網面大，以及網孔小的設計，衝擊力較小，這樣的設計對落下人員的傷害較小。
- (2) 網面小的衝擊力最大，是較不好的設計，人員有可能受到較大的傷害。
- (3) 我們雖然測出了不同設計的安全平網衝擊力，但思考有沒有其他的方法可以驗證我們測出來的衝擊力是合理的，於是我們想到利用超音波感測器來測量。

#### (四) 超音波感測器驗證雷射筆反射軌跡法的準確性

##### 1. 找出網子下陷程度與衝擊力的關係

我們用定滑輪（減少摩擦力，**不省力也不費力**）和砝碼來調整皮球的重量，方法同雷射筆反射軌跡法。網面下垂程度會隨著重量增加而增加，我們先製作高度標示桿(5 cm 間隔)，發現不夠精準，因此我們利用六年級資訊課學到的 **Arduino 連接超音波測距器**來測量，超音波測距器可以將誤差的距離縮小至 0.3 cm 以內。裝置如圖 23 所示：

圖 23：測量網子下陷程度與衝擊力的關係裝置圖



2. 網子下陷程度與衝擊力的關係(下圖為整理後資料，原始資料收錄於附錄中)

圖 24：網子下陷程度與衝擊力的關係圖

名稱	不同重量皮球在 <b>不同邊繩材質</b> 安全平網 距離桌面高度關係圖	不同重量皮球在 <b>不同繫繩數量</b> 安全平網 距離桌面高度關係圖
關係圖		
結果分析	<p>1. <math>R^2</math>都高達 0.82 以上，表示皮球+砝碼重和下陷距離的相關性都非常高</p> <p>2. 趨勢線斜率最小的是<b>木棍</b>(0.0159)，表示皮球+砝碼重影響下陷程度的變化較小</p>	<p>1. <math>R^2</math>都高達 0.82 以上，表示皮球+砝碼重和下陷距離的相關性都非常高</p> <p>2. 趨勢線斜率最小的是<b>八條彈簧繩</b>(0.0123)</p>
名稱	不同重量皮球在 <b>不同網面大小</b> 安全平網 距離桌面高度關係圖	不同重量皮球在 <b>不同網孔大小</b> 安全平網 距離桌面高度關係圖
關係圖		
結果分析	<p>1. <math>R^2</math>都高達 0.82 以上，表示皮球+砝碼重和下陷距離的相關性都非常高</p> <p>2. 趨勢線斜率最小是<b>網面大</b>(0.0171)，表示皮球+砝碼重影響下陷程度的變化較小</p>	<p>1. <math>R^2</math>都高達 0.81 以上，表示皮球+砝碼重和下陷距離的相關性都非常高</p> <p>2. 趨勢線斜率最小是<b>網孔小</b>(0.0171)，表示皮球+砝碼重影響下陷程度的變化較小</p>

3. 網子下陷程度測量衝擊力

我們使用圖像量測軟體 IC Measure，利用定格畫面來準確測量下陷距離，只要將測量線如圖 25 拉至球的底部與超音波測距器，即可測出真實高度。定格畫面與結果如圖 26(以無邊繩，網面 18×25，網面上方 20 cm 落下為例)，單位重力加速度由原本 10 N/kg 改為較

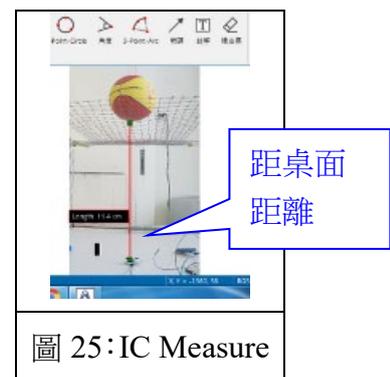
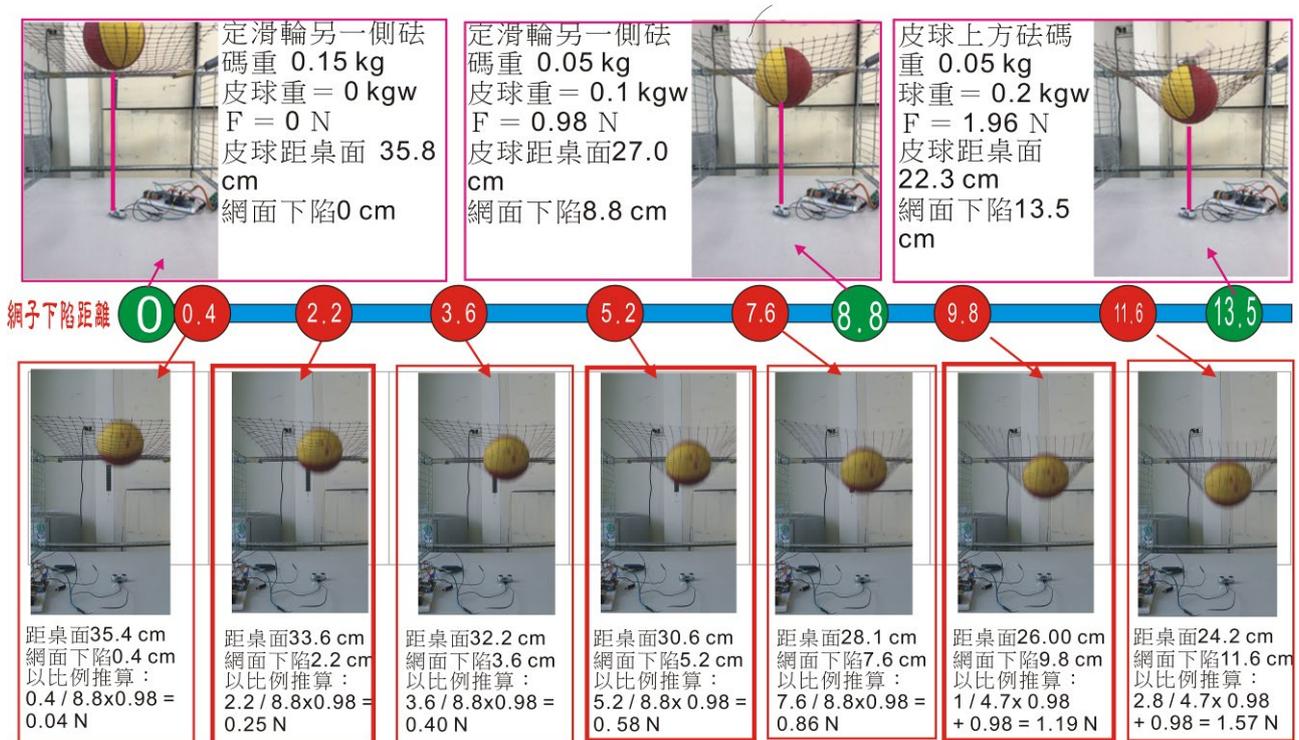


圖 25：IC Measure

精準的 9.8 N/kg，平均衝擊力為每張定格畫面加總後除上張數。

圖 26：利用下陷程度測量平均衝擊力的定格畫面與結果(呈現前 7 張，共 37 張)

用砝碼改變皮球重量，用來找出作用力與網子下陷程度關係



用 0.15 kg 皮球在網面上方 20 cm 落下，每個定格畫面的下陷程度推算作用力大小

我們利用比與比例的關係讓數據更精準，以上圖 26 為例，100 g 下陷是 8.8 cm，當第一張圖下陷 0.4 cm 時，它的衝擊力是 8.8 分之 0.4，又 100 gw 等於 0.98 N 換算成第一張圖的衝擊力就是 0.04 N；其他的部分也利用這樣的比例關係，讓數據更接近真實，因為有 37 張圖要推算(如圖 27)，所以平均衝擊力是 37 張圖的衝擊力加總起來除以張數，算式如下：

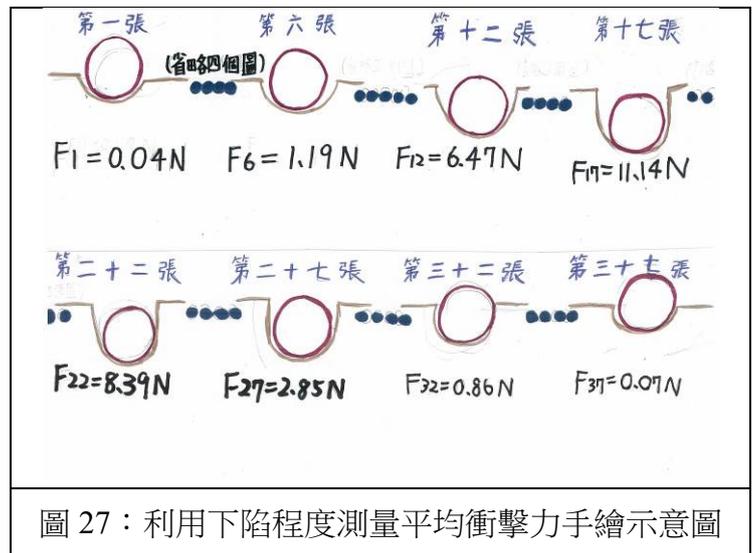


圖 27：利用下陷程度測量平均衝擊力手繪示意圖

$$(0.04 + 2.2 + 3.6 + \dots + 0.07) / 37 = 4.27\text{ N}$$

#### 4. 實驗結果：表 4-2：不同設計安全平網利用網面凹陷測得的平均衝擊力

項次 不同設計		最大衝擊力	F1+...+Fn (F 總和)	定格畫面張 數(張)	△T (接觸時間)	平均衝擊力
不同 材質 邊繩	無邊繩	11.40 N	157.99 N	37 張	0.308 sec	4.27 N
	彈簧繩	11.70 N	162.96 N	37 張	0.308 sec	4.40 N
	童軍繩	10.66 N	150.82 N	35 張	0.292 sec	4.31 N
	木棍	8.17 N	122.12 N	32 張	0.267 sec	3.82 N
不同 繫繩 數量	四條繫繩	11.40 N	157.99 N	37 張	0.308 sec	4.27 N
	六條繫繩	10.18 N	133.58 N	32 張	0.267 sec	4.17 N
	八條繫繩	10.01 N	119.28 N	30 張	0.250 sec	3.98 N
不同 網面 大小	網面大	11.40 N	157.99 N	37 張	0.308 sec	4.27 N
	網面中	11.96 N	162.96 N	36 張	0.300 sec	4.53 N
	網面小	12.32 N	170.23 N	36 張	0.300 sec	4.73 N
不同 網孔 大小	網孔小	11.40 N	157.99 N	37 張	0.308 sec	4.27 N
	網孔中	12.25 N	169.25 N	38 張	0.25 sec	4.45 N
	網孔大	13.88 N	172.63 N	39 張	0.27 sec	4.43 N

#### 5. 實驗發現

- (1) 由趨勢線斜率、最大衝擊力、平均衝擊力來看，以木棍做為邊繩時、八條繫繩、網面大，以及網孔小的設計都是較小的，與雷射筆反射軌跡法結果相同。
- (2) 網面小的衝擊力最大，是較不好的設計，與雷射筆反射軌跡法結果相同。
- (3) 用超音波感測器測量與雷射筆反射軌跡法的結果大致相同，因此推論雷射筆反射軌跡法有其準確性，看到實驗結果我們心裡的疑惑就解開了。

### 三、 研究目的二：有安全平網較安全的原因

#### (一) 不同碰撞平面材質(無安全平網)對下墜皮球衝擊力與受力情形

前人研究已有討論過乒乓球、排球、鉻鋼球以及鋼珠的撞擊不同接觸面的實驗，所以我們想要知道有無安全平網的差異。

##### 1. 無安全平網時衝擊力測量方法

在前人研究「鋼珠撞擊壓克力板之恢復係數及衝量研究」中，使用聲音來測量反彈高度與飛行時間。剛好**手機物理實作 (Phyphox)**具有同樣的功能(如右圖 28)，可以幫助我們快速的判斷反彈高度與飛行時間，我們利用平板下載 APP 軟體後，再利用高度標示桿輔助測量，皮球在大概位置時放下，多次測量直到接近要量測的數值。碰撞時間我們用高速攝影機拍攝，再用定格畫面測量，每秒 120 張，如果 3 張圖代表 3/120 秒。

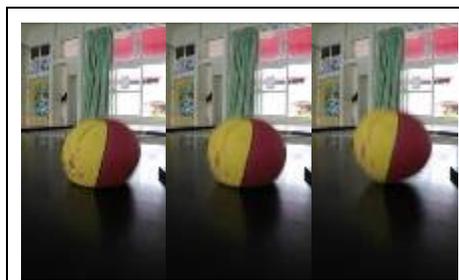


圖 28：球落下的定格畫面(3 張)

##### 2. 手機物理實作使用說明

右圖 29 為示範說明，我們要測量從 30 cm 高落下。高度 0 的數據 32.40 公分是**落下高度**，高度 1 的數據 23.13 公分為**第一次反彈高度**，落下時間為 0.434 秒。如果我們要測量落下高度 30 cm 的撞擊力，我們會反覆測量直到數據接近 30 cm。

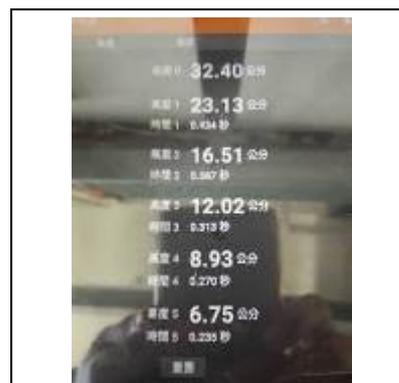


圖 29：使用結果

##### 3. 換算衝擊力

右圖 30 為手繪示意圖，我們以桌面上方 20 cm 為例。H(落下高度)=19.91 cm；V<sub>1</sub>(落至桌面前速度)=1.98 m/s； $\Delta T$ (碰撞時間)=4/120 s；h(反彈最高點)=12.36 cm；V<sub>2</sub>(離開桌面速度)=1.56 m/s；M(皮球重)=0.15 kg。利用動量公式，球的動量變化= $M \times (V_1 + V_2) = 0.53 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$ ；球的作用力=

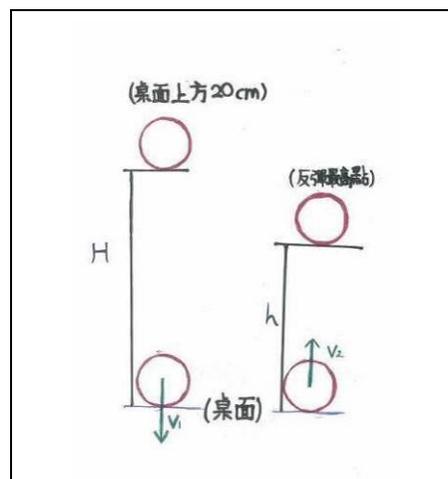


圖 30：球撞擊桌面手繪示意圖

$$M \times \Delta V / \Delta T + M \times G = 17.40 \text{ N}$$

#### 4. 實驗結果

我們的研究是先實驗皮球在無安全平網下的動量變化，做法是以手機物理實作軟體來測量，透過皮球落在桌面(一般實驗桌)，以及軟墊所產生的撞擊聲音來測得落下高度及反彈高度。另外再以 GoPro 拍攝定格畫面來測得碰撞時間。研究分成碰撞接觸平面上方 10 cm、20 cm，以及 30 cm 高落下等實驗，結果如下表 4-3、4-4。

表 4-3：皮球從不同高度落下至桌面衝擊力相關數據

項次 落下高度	碰撞時間( $\Delta T$ )	初速度 (V1)	反彈高度	反彈速度 (V2)	$M*\Delta V$	F ( $M*\Delta V/\Delta T$ )	球衝擊力 (含重力)
<b>9.81 cm</b> (約 10 cm)	4/120 (sec)	1.39 (m/sec)	6.45 (cm)	1.12 (m/sec)	<b>0.377</b> (kg*m/sec)	11.31(N)	<b>12.78(N)</b>
<b>19.91 cm</b> (約 20 cm)	4/120 (sec)	1.98 (m/sec)	12.36 (cm)	1.56 (m/sec)	<b>0.531</b> (kg*m/sec)	15.93(N)	<b>17.40(N)</b>
<b>29.88 cm</b> (約 30 cm)	4/120 (sec)	2.42 (m/sec)	17.13 (m)	1.83 (m/sec)	<b>0.634</b> (kg*m/sec)	19.02 (N)	<b>20.49(N)</b>

表 4-4：皮球從不同高度落下至軟墊衝擊力相關數據

項次 落下高度	碰撞時間 ( $\Delta T$ )	初速度	反彈高度	反彈速度	$M*\Delta V$	F ( $M*\Delta V/\Delta T$ )	球作用力 (含重力)
<b>9.72 cm</b>	4/120 (sec)	1.38 (m/sec)	6.02 (cm)	1.08 (m/sec)	<b>0.369</b> (kg*m/sec)	11.07(N)	<b>12.54(N)</b>
<b>20.25 cm</b>	4/120 (sec)	1.99 (m/sec)	10.47 (cm)	1.43 (m/sec)	<b>0.513</b> (kg*m/sec)	15.39(N)	<b>16.86(N)</b>
<b>30.19 cm</b>	4/120 (sec)	2.43 (m/sec)	15.34 (m)	1.73 (m/sec)	<b>0.624</b> (kg*m/sec)	18.72 (N)	<b>20.19(N)</b>

#### 5. 透明塑膠球裝水來呈現球受力的情形

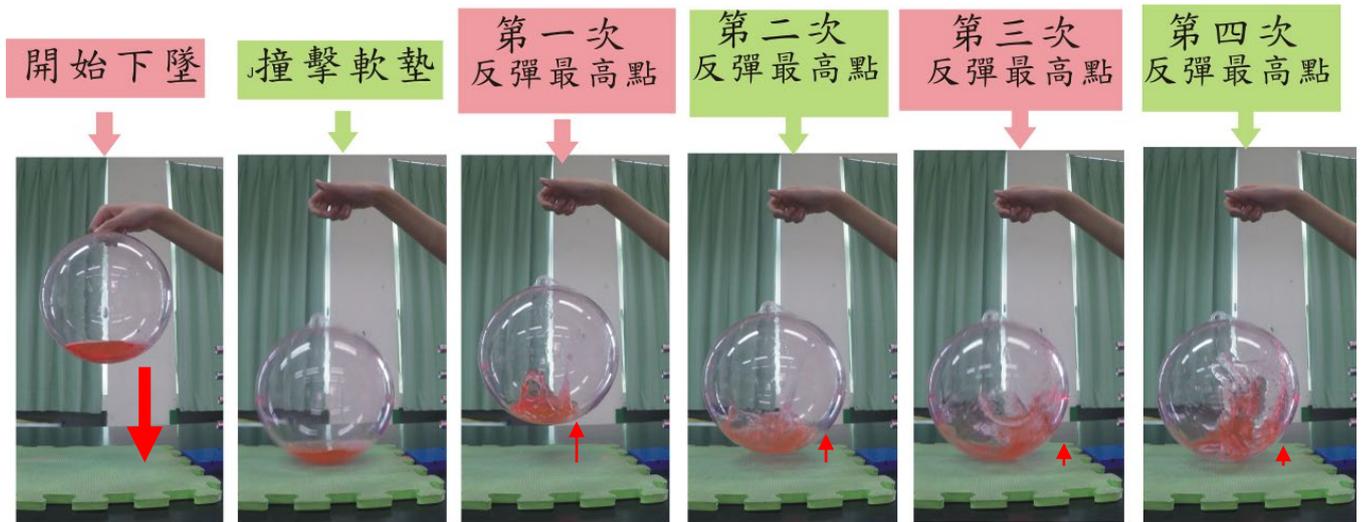
為了準確呈現落下人員受力的情況，於是我們使用透明塑膠球，我們裝入有顏色的水來方便判斷。為了準確判斷落下高度，我們在側邊架設四支雷射筆輔助，如果是落下高度 5 cm，5 cm 高的雷射光點就會出現在塑膠球最低點(如圖 31)。

在觀察沒有安全平網時水的震盪的情形，發現不同時機點水的震盪情形各有不同，碰撞越多次，水的變化越多，因為第一次反彈最高點較能清楚呈現球體內水的震盪情形，因此我們採用第一次反彈至最高點，作為我們的受力情形(如圖 32)。



圖 31：實驗裝置

圖 32：高度 20 cm 落下至軟墊水震盪情形



以透明塑膠球裝顏料水，軟墊上方 20 cm 落下，利用每個定格畫面可以知道水的震盪情形

6. 透明塑膠球裝水來呈現球受力的情形結果(反彈至最高點)

照片				
說明	圖 33：桌面 5 cm 高 落下反彈至最高	圖 34：桌面 20 cm 高 落下反彈至最高	圖 35：軟墊 5 cm 高 落下反彈至最高	圖 36：軟墊 20 cm 高 落下反彈至最高

7. 實驗發現

- (1) 從越高的地方落在軟墊，球的反彈高度越高、衝量越大、衝擊力越大，水的震盪越明顯，落在桌面上也是同樣的現象
- (2) 由衝量、衝擊力與水震盪情形來看，球落在桌面都較落在軟墊的大。
- (3) 塑膠球撞擊越多次，水震盪越明顯，證明衝擊力是可以相加的。

## (二) 有安全平網時，球位置變化的測量方法

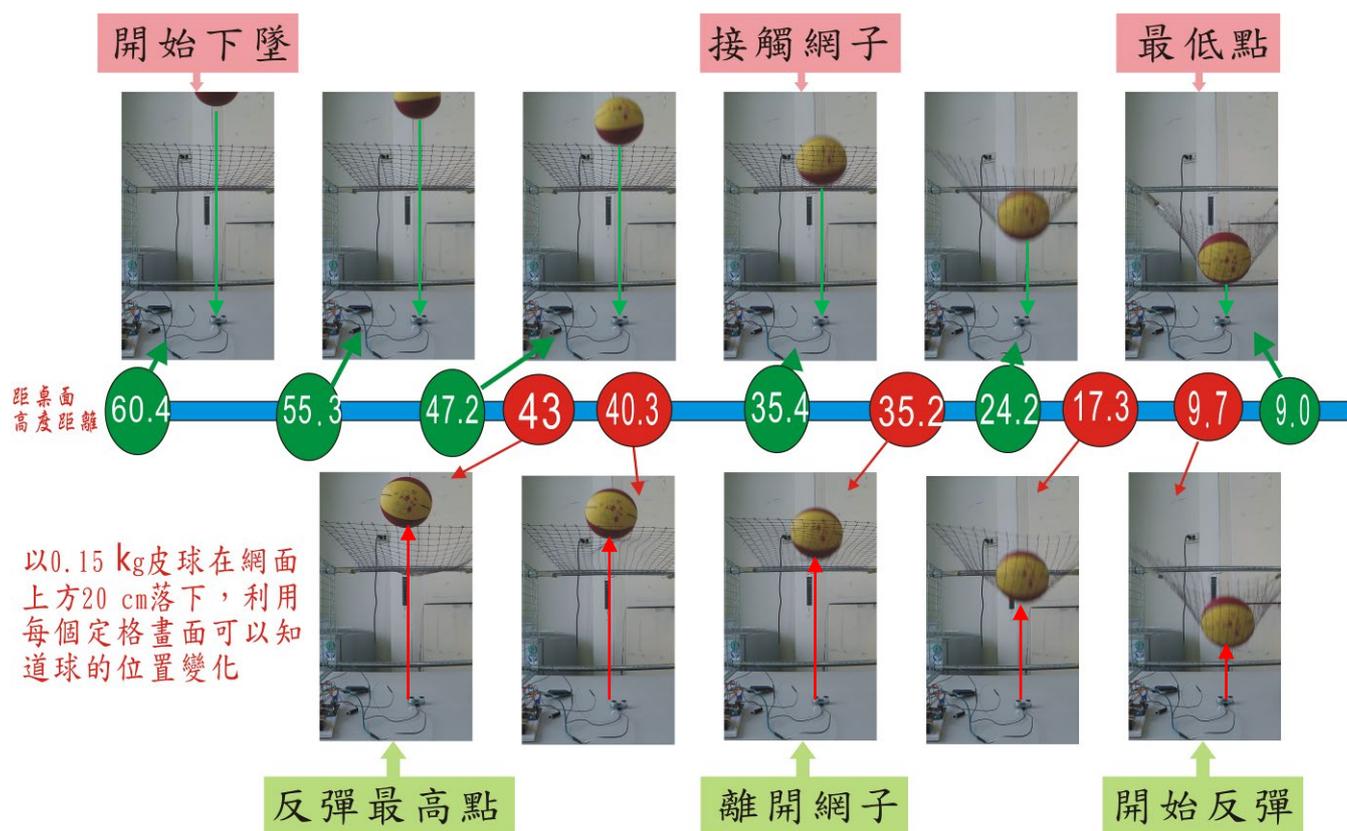
### 1. 測量方法

安全平網聲音太小，無法利用上述方式來測量球的位置變化，我們利用網面下陷程度與撞擊力實驗模組中的裝置，先組裝不鏽鋼框架，再將四支彈簧秤固定在框架上，之後用網體固定在彈簧秤上(寬 18 孔、長 25 孔)。利用高速攝影機拍攝的定格畫面，交由圖像量測軟體 IC Measure 來測得球距離桌面的高度。

### 2. 使用說明

皮球撞擊安全平網，觀察球的位置變化，最後用定格畫面推算落下距離、反彈高度，以及碰撞時間。安全平網距離桌面為 40 cm，因此在距桌面 50 cm 高為網子上方 10 cm；60 cm 高為網子上方 20 cm；70 cm 高為網子上方 30 cm。說明如圖 37(以無邊繩，網面 18\*25，網面上方 20 cm 落下為例)：

圖 37：有安全平網時，球的位置變化測量方式



### 3. 換算衝擊力

右圖 38 為手繪示意圖，我們以網子上方 20 cm 為例。H(落下至最低點距離)=51.43 cm；V<sub>1</sub>(落至最低點應有的速度)=3.17 m/s； $\Delta T$ (碰撞時間)=37/120 s；h(最低點反彈至最高點距離)=34.03 cm；V<sub>2</sub>(能反彈至最高點應有的速度)=2.58 m/s；M(皮球重)=0.15 kg。利用動量公式，球的動量變化= $M \times (V_1 + V_2) = 0.86 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$ ，因為是自由落體，所以衝擊力我們加上  $M \times G$ 。球的作用力=

$$M \times \Delta V / \Delta T + M \times G = 4.27 \text{ N}。$$

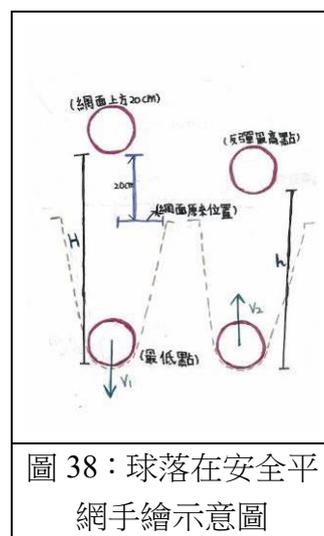


圖 38：球落在安全平網手繪示意圖

### 4. 實驗結果：表 4-5：皮球從不同高度落下至安全平網記錄

項次 落下高度	最低點	反彈最高點	初速度 (V1)	末速度 (V2)	M*ΔV (球的衝量)	ΔT(碰撞 時間)	M*ΔV/ΔT	M×G (重力)	球的作用 力(含重力)
網子上方 10 cm	9.37 cm	38.4 cm	2.84 m/sec	2.39 m/sec	0.785 kg*m/sec	0.325 sec	2.415 N	1.47 N	3.886 N
網子上方 20 cm	8.97 cm	43.0 cm	3.17 m/sec	2.58 m/sec	0.863 kg*m/sec	0.308 sec	2.799 N	1.47 N	4.269 N
網子上方 30 cm	8.05 cm	51.0 cm	3.49 m/sec	2.9 m/sec	0.959 kg*m/sec	0.283 sec	3.375 N	1.47 N	4.845 N

### 5. 透明塑膠球裝水來呈現球受力的情形

在觀察有安全平網時水的震盪的情形，碰撞越多次，水的變化越多，這與直接撞擊桌面與軟墊時相同，為此我們採用第一次反彈至最高點，作為我們受力情形(如圖 39)。

圖 39：有安全平網時，不同時間水震盪情形

照片				
說明	下墜前	剛碰撞網面時	第一次最低點	離開網面
照片				
說明	反彈最高點	第二次最低點	第二次反彈最高點	第三次最低點

## 6. 不同高度落下水震盪的情形(反彈至最高處)

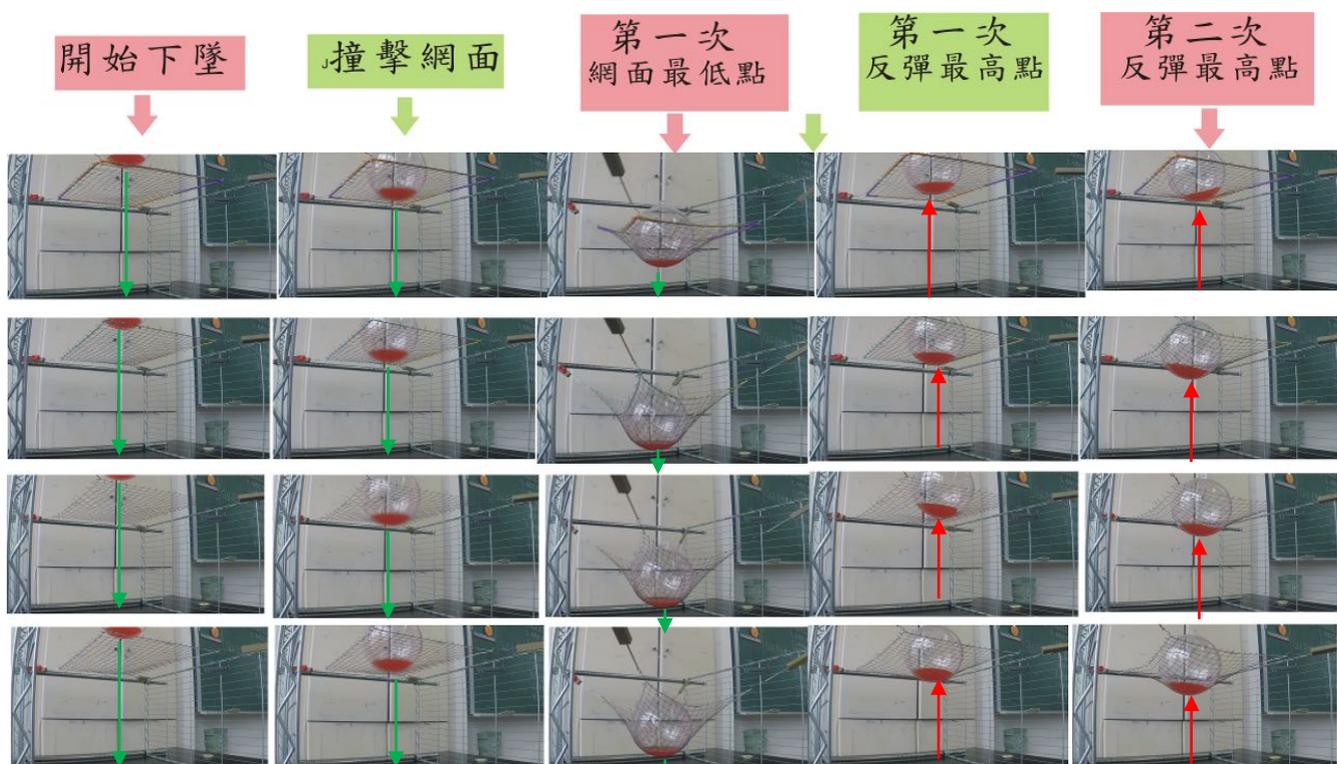
透明塑膠球裝水由網子上方 10 cm、20 cm、30 cm 高分別落下。由右圖 40、41、42 來看，無論從 10、20、30 cm 高落下，水都只有較小震盪，震盪都不明顯。

照片			
說明	圖 40：網子上方 10 cm 落下反彈	圖 41：網子上方 20 cm 落下反彈	圖 42：由網子上方 30 cm 落下反彈

## 7. 不同邊繩材質的安全平網水震盪的情形

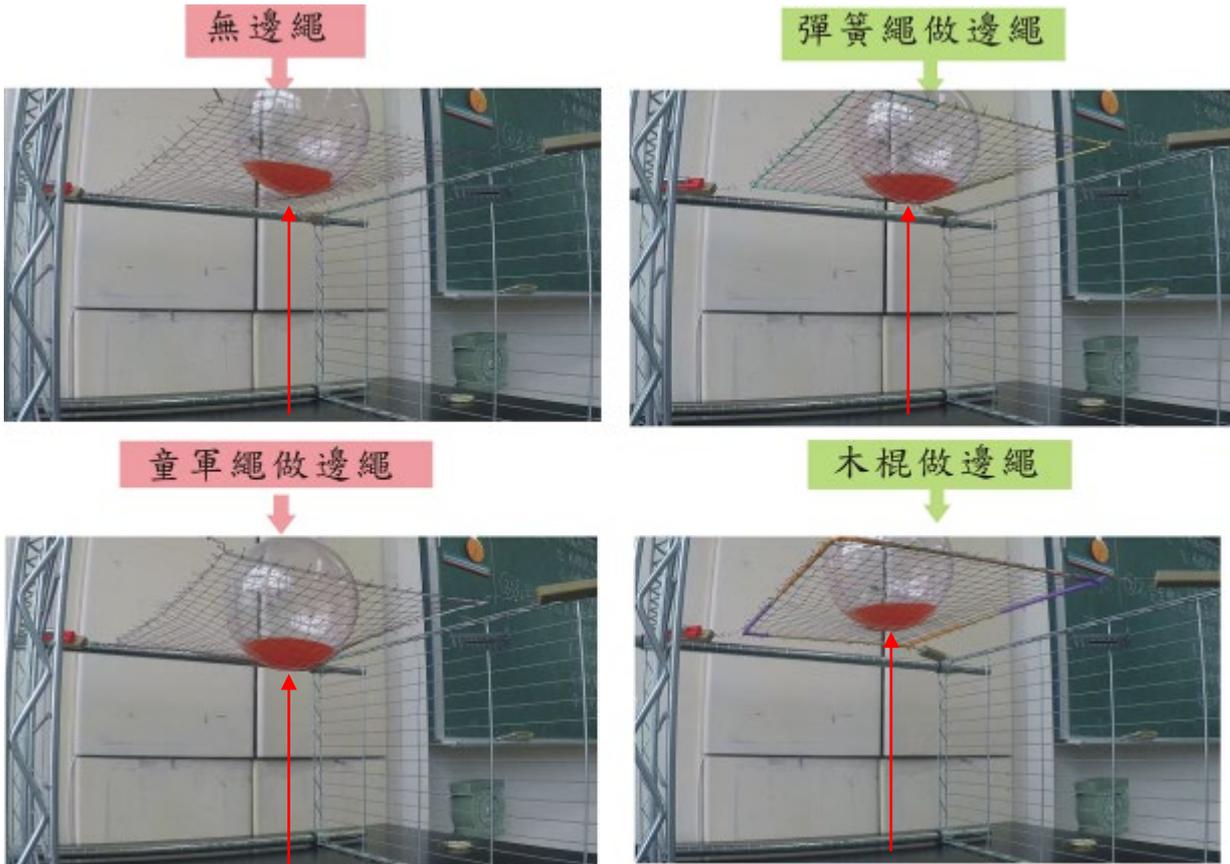
透明塑膠球裝水由網子 20 cm 高落在不同邊繩材質的安全平網，如圖 43、44，依序為以無邊繩、彈簧繩做邊繩、童軍繩做邊繩、木棍做邊繩：

圖 43：高度 20 cm 落下至不同邊繩的安全平網不同時間水震盪情形



以透明塑膠球裝顏料水，網面上方 20 cm 落下，利用每個定格畫面可以知道水的震盪情形

圖 44：高度 20 cm 落下至不同邊繩的安全平網反彈最高點水震盪情形(反彈至高點)



#### 8. 有無安全平網衝擊力與受力情形實驗結果發現

- (1) 從越高的地方落下，球的**反彈高度越高、衝量越大、衝擊力越大**，這與落下至桌面與軟墊的相同。
- (2) 有安全平網時，衝量較落下至桌面、軟墊的大；衝擊力較落下至桌面、軟墊的小。
- (3) 有安全平網時，因為網子會下陷，所以落下的距離增加，因此**球的衝量會較落在不同平面材質大**，但因**碰撞時間較長**，所以**球的衝擊力反而較小**，與物理公式： $F=M \times \Delta V / \Delta T$ ， $\Delta T$  (碰撞時間) 越大， $F$  越小符合。
- (4) 從越高的地方落下，水的震盪沒有明顯變化，但較落下至桌面、軟墊的震盪小很多。
- (5) 觀察水震盪情形時，**有安全平網 < 軟墊 < 桌面**。
- (6) 落在不同材質邊繩時，水震盪情形差不多，需要用更精準的方法或是儀器來測量。
- (7) 從上述結果來看，**人員落在安全平網會較落在桌面、軟墊時更為安全**。
- (8) 從球的位置變化也可以知道衝擊力的大小，如果沒有做這個研究，也不會發現原來有這麼多種方法可以測量衝擊力，像彈簧秤、雷射筆仰角、網面下陷程度，以及球的位置變化等。科學研究原來不是只有一條路可行，從不同條路走雖然終點應該會相同，但前進的方法不同，趣味也不同。

## 伍、討論

一、物體形變的三個地方，彈簧秤，雷射筆仰角，以及網面下陷程度結果有何不同？

1. 將實驗結果整理如表 5-1，以木棍做為邊繩時、八條繫繩、網面大，以及網孔小的設計，平均衝擊力較小；網面小的設計，平均衝擊力較大。雷射筆反射軌跡法與超音波感測器測下陷程度結果差不多，所以雷射筆反射軌跡法有其準確性。
2. 我們發現球的平均衝擊力越大，彈簧秤的讀數越大，網子拉力就越強。

表 5-1：彈簧秤，雷射筆仰角，以及網面下陷程度結果

不同設計		項次	皮球 800 g 時 彈簧秤讀數	雷射筆反射軌跡法的 平均衝擊力	超音波感測器測下陷 程度的平均衝擊力
不同 材質 邊繩	無邊繩		430 gw	4.18 N	4.27 N
	彈簧繩		450 gw	4.26 N	4.40 N
	童軍繩		440 gw	4.03 N	4.31 N
	木棍		390 gw	3.97 N	3.82 N
不同 繫繩 數量	四條繫繩		430 gw	4.18 N	4.27 N
	六條繫繩		310 gw	4.07 N	4.17 N
	八條繫繩		260 gw	3.99 N	3.98 N
不同 網面 大小	網面大		430 gw	4.18 N	4.27 N
	網面中		470 gw	4.55 N	4.53 N
	網面小		490 gw	4.62 N	4.73 N
不同 網孔 大小	網孔小		430 gw	4.18 N	4.27 N
	網孔中		450 gw	4.41 N	4.45 N
	網孔大		480 gw	4.39 N	4.43 N

## 二、衝擊力與水震盪情形有何關係？

1. 將實驗結果整理表格如表 5-2、表 5-3。

表 5-2：有無安全平網衝擊力與水震盪情形結果(反彈至最高點)

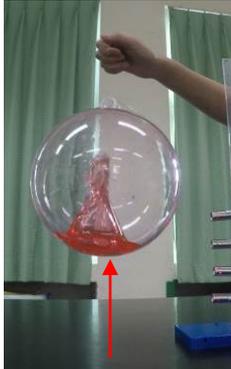
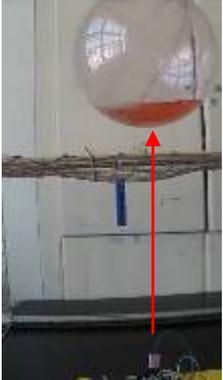
不同設計說明	球由桌面 20 cm 高落下	球由軟墊 20 cm 高落下	由網子上方 20 cm 落下
照片			
衝擊力	17.40 N	16.86 N	4.269 N

表 5-3：不同邊繩材質衝擊力與水震盪情形結果(網子上方 20 cm 落下反彈至最高點)

說明	無邊繩	彈簧繩做邊繩	童軍繩做邊繩	木棍做邊繩
照片				
衝擊力	4.18 N	4.26 N	4.03 N	3.97 N

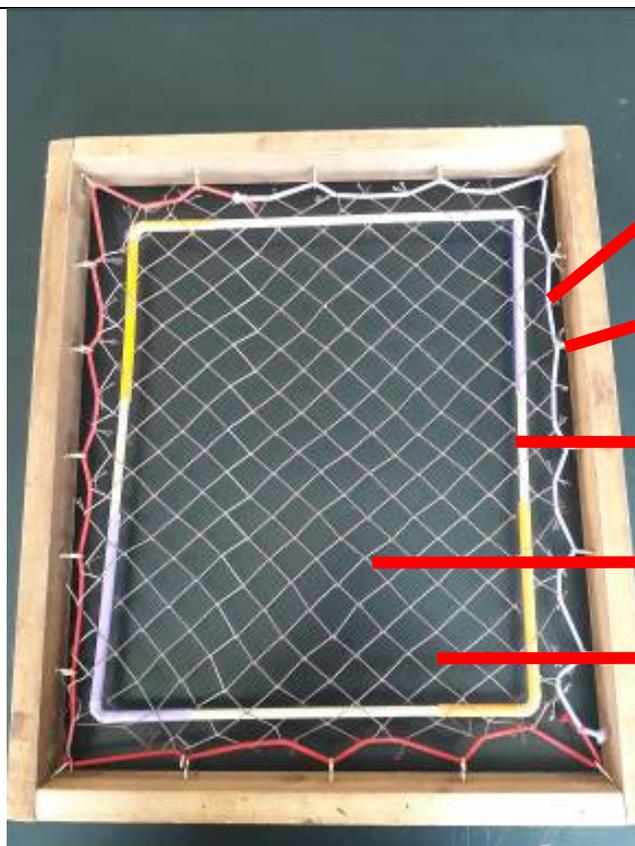
2. 衝擊力有安全平網<軟墊<桌面；水震盪的大小也是有安全平網<軟墊<桌面，所以衝擊力越大，水震盪情形越明顯。
3. 不同邊繩材質衝擊力差異不大，水震盪情形也差異不大，由此可知衝擊力與水震盪情形相關，水震盪情形可以得知水受力大小。

## 陸、結論

一、由研究結果我們得到下面結論：

1. 有安全平網時雖然無法有效的減少衝量，甚至會因為網子下陷使得球衝量增加，但因為**碰撞時間變長**，使得**衝擊力反而下降**。
2. 用**外圍框架撐起網面**，使得下陷的程度減少，因此如果在無法改變安全平網下，在網面上加上木棍可讓安全平網更安全。
3. **增加繫繩數量**是能有效分擔網子張力對繫繩的拉力，因此建議安全平網的設計要多增加繫繩數量。
4. 網面太小會增加衝擊力且容易使繫繩拉得太緊而斷開，但網面太大會讓網面下垂，因此在安全平網的設計上，還是建議**適當大小的網面**較佳。
5. 網孔越大時，物體落下的距離越長，有可能會撞擊到地面；但網孔越小，對於光線的遮擋越多，因此**稍小的網孔大小**可兼顧安全與採光。
6. 綜合上述結論，我們認為好的安全平網應該具備**有彈性的邊繩**、**外圍框架撐起網面**、**繫繩數量夠多**、**適當大小的網面**，以及**網孔稍小**等特點，我們製作縮小模型方便說明。

圖 6-1  
縮小  
模型  
模型  
照片  
與說  
明理  
想的  
安全  
平網  
設計



1. 有彈性的邊繩增加緩衝，邊繩採用穿過掛鉤不綁緊的方式。
2. 繫繩(掛勾)數量夠多，且平均分配在框架上，採用釘入的方式來固定。
3. **網面外圍框架撐起網面**，外圍框架可讓網面平整，下陷程度減少(**創新構想**)
4. 網面大小適中，可以讓網面水平且拉緊。
5. 網孔依裝置的大小與範圍來調整，盡量設置小網孔較佳。

## 二、未來的運用：

1. 我們利用學校的安全平網驗證下垂的網面也可以利用木棍或是鐵棍恢復，方法如下表：

表 6-1：撐起學校的安全平網下垂的網面說明表

分類 說明	無鐵架撐起的網面	材料	有外圍鐵架撐起	測量方法
照片				
說明	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 網面下垂</li> <li>2. 用紅外線測距器測得下垂網體最下處離地面 2.201 m</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 四支鋁棒伸縮桿</li> <li>2. 四個 L 型塑膠管</li> <li>3. 紅外線測距器</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 將鋁棒交錯穿過網體邊緣外側</li> <li>2. 四支鋁棒用 L 型塑膠管固定住</li> <li>3. 伸縮桿撐至最開</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 用紅外線測距器測得下垂網體最下處離地面 2.361 m</li> <li>2. 相減後得知網面上升了 0.16 m</li> </ol>

2. 成功撐起網面 0.16 m，所以外圍框架有撐平網面的功用。

3. 人們應針對裝設的安全平網加以審視、檢查，在邊繩、繫繩、網面，以及網孔大小方面進行改進，切莫在人員落下安全平網造成更大的傷害後再補救。

## 三、對後續研究的建議：

1. 希望未來能借到壓力相關檢測儀器。
2. 可以參考前人研究「乒乓球彈跳運動研究」中的研究方法來精準測量。

## 柒、參考文獻

- 一、維基百科「安全網」、「衝量」2020 年 8 月 1 日，取自 <https://zh.wikipedia.org/wiki/>
- 二、2014 年台灣國際科展一等獎—乒乓球彈跳運動研究
- 三、2015 年台灣國際科展二等獎—仙「鋁」奇「圓」
- 四、2019 GSF 物 5—鋼珠撞擊壓克力板之恢復係數及衝量研究
- 五、康軒版自然與生活科技五上第四單元「力與運動」

## 捌、附錄

表一：不同重量皮球對不同邊繩安全平網網體與繫繩的影響

皮球+砝碼 重量		0 g	100 g	200 g	300 g	400 g	500 g	600 g	700 g	800 g	900 g	1000 g	1100 g	1200 g	1300 g
無 邊 繩	距離桌面 高度(cm)	35.8	27.0	22.3	18.8	17.4	15.2	14.6	13.3	12.2	11.0	10.2	9.7	8.6	8.3
	彈簧秤讀 數(gw)	80	140	190	240	270	330	360	400	430	460	480	510	530	550
彈 簧 繩	距離桌面 高度(cm)	37.7	29.8	24.1	21.6	19.2	17.4	15.4	14.2	12.3	11.8	11.0	10.3	10.0	8.8
	彈簧秤讀 數(gw)	170	200	240	270	310	340	380	420	450	480	510	550	580	600
童 軍 繩	距離桌面 高度(cm)	36.7	27.3	22.3	20.6	17.5	16.5	14.7	13.1	12.0	10.7	9.7	8.9	8.4	7.9
	彈簧秤讀 數(gw)	100	150	200	240	290	330	370	400	440	470	500	540	570	590
木 棍	距離桌面 高度(cm)	38.2	33.9	30.8	28.6	26.7	25.0	24.0	22.3	21.2	20.0	18.0	17.3	16.7	15.7
	彈簧秤讀 數(gw)	130	160	180	210	260	290	310	350	390	420	450	480	500	520

表二：不同重量皮球對不同繫繩數量安全平網網體與繫繩的影響

皮球+砝碼 重量		0 g	100 g	200 g	300 g	400 g	500 g	600 g	700 g	800 g	900 g	1000 g	1100 g	1200 g	1300 g
四 條 繫 繩	距離桌面 高度(cm)	35.8	27.0	22.3	18.8	17.4	15.2	14.6	13.3	12.2	11.0	10.2	9.7	8.6	8.3
	彈簧秤讀 數(gw)	80	140	190	240	270	330	360	400	430	460	480	510	530	550
六 條 繫 繩	距離桌面 高度(cm)	36.2	29.9	27.4	25.9	23.6	22.5	21.4	20.5	19.5	19.0	18.3	17.7	16.6	15.7
	彈簧秤讀 數(gw)	90	120	140	160	190	230	270	290	310	320	330	340	350	360
八 條 繫 繩	距離桌面 高度(cm)	37.2	30.3	28.0	26.7	25.0	23.4	22.5	22.1	20.6	20.0	19.7	18.4	17.9	17.5
	彈簧秤讀 數(gw)	90	100	130	150	170	200	220	240	260	270	290	300	310	320

表三：不同重量皮球對不同網面大小安全平網網體與繫繩的影響

皮球+砝碼 重量		0 g	100 g	200 g	300 g	400 g	500 g	600 g	700 g	800 g	900 g	1000 g	1100 g	1200 g	1300 g
網面大	距離桌面 高度(cm)	35.8	27.0	22.3	18.8	17.4	15.2	14.6	13.3	12.2	11.0	10.2	9.7	8.6	8.3
	彈簧秤讀 數(gw)	80	140	190	240	270	330	360	400	430	460	480	510	530	550
網面中	距離桌面 高度(cm)	39.8	30.7	25.7	23.0	21.4	19.2	17.4	16.2	14.7	13.6	12.7	11.7	11.1	10.7
	彈簧秤讀 數(gw)	150	180	240	280	330	360	400	440	470	500	530	570	600	620
網面小	距離桌面 高度(cm)	40.2	32.0	27.7	24.8	22.8	20.9	18.7	17.3	15.5	14.7	14.0	13.7	13.4	13.2
	彈簧秤讀 數(gw)	200	240	280	320	350	390	430	460	500	540	570	600	630	650

表四：不同重量皮球對不同網孔大小安全平網網體與繫繩的影響

皮球+砝碼 重量		0 g	100 g	200 g	300 g	400 g	500 g	600 g	700 g	800 g	900 g	1000 g	1100 g	1200 g	1300 g
小網孔	距離桌面 高度(cm)	35.8	27.0	22.3	18.8	17.4	15.2	14.6	13.3	12.2	11.0	10.2	9.7	8.6	8.3
	彈簧秤讀 數(gw)	80	140	190	240	270	330	360	400	430	460	480	510	530	550
中網孔	距離桌面 高度(cm)	37.0	25.7	21.6	19.2	17.2	15.2	14.6	12.3	10.9	9.9	9.4	9.0	8.2	7.6
	彈簧秤讀 數(gw)	80	120	200	220	260	310	340	380	410	460	490	520	540	560
大網孔	距離桌面 高度(cm)	36.3	24.8	20.9	18.4	15.9	14.0	12.2	11.2	9.8	9.5	8.5	7.9	6.5	6.0
	彈簧秤讀 數(gw)	70	120	190	220	270	350	390	410	470	510	540	570	600	630

## 【評語】 080110

本作品研究如何設計較佳的安全平網，讓人從高處掉落時可以減少受傷的程度。在實驗中探討了不同邊繩、繫繩數量、網面大小及網孔大小等變因對安全平網的影響，並且設計量測繫繩受力與衝擊力的方法，整個研究成果充實詳盡，唯相類似成果很多，若能加上改良安全平網的自有創意就非常完滿了。

## 作品簡報



# 「救命」的安全平網~ 降低落下人員傷害的設計

國小組、物理科

編號：080110





# 前言

- 動機：新聞報導有老公把妻子從四樓丟下的事件，雖然掉落在安全平網上，但是傷勢嚴重，所以我們思考什麼樣的設計能夠減少落下人員的傷害？。
- 目的：
  - 測量不同設計安全平網的衝擊力
    - 製作不同設計的安全平網網體
    - 利用彈簧秤來觀察不同設計安全平網繫繩受力情形
    - 利用雷射光反射軌跡測量下墜皮球衝擊力
    - 利用超音波感測器驗證雷射筆反射軌跡法的準確性
  - 探討有安全平網時較直接撞擊不同平面材質安全的原因
    - 不同碰撞平面材質對下墜皮球衝擊力與受力情形
    - 有安全平網時對下墜皮球衝擊力與受力情形

# 研究過程~不同設計安全平網網體

## 1. 不同邊繩材質



木棍做邊繩



童軍繩做邊繩



彈簧繩做邊繩

## 2. 不同繫繩數量



4條彈簧秤

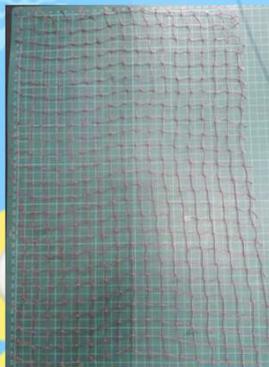


6條彈簧秤



8條彈簧秤

## 3. 不同網面大小



網面大



網面中



網面小

## 4. 不同網孔大小



網孔小



網孔中



網孔大

# 研究方法~彈簧秤來觀察繫繩受力情形



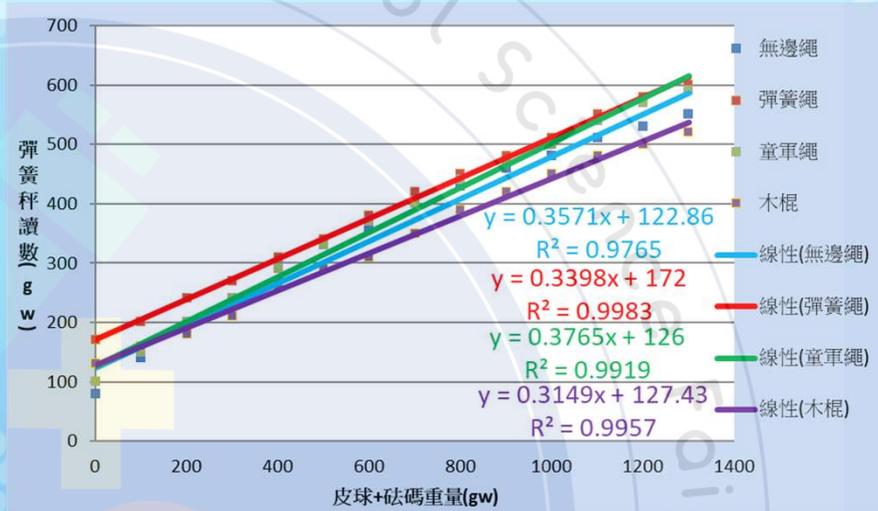
彈簧秤觀察繫繩受力情形



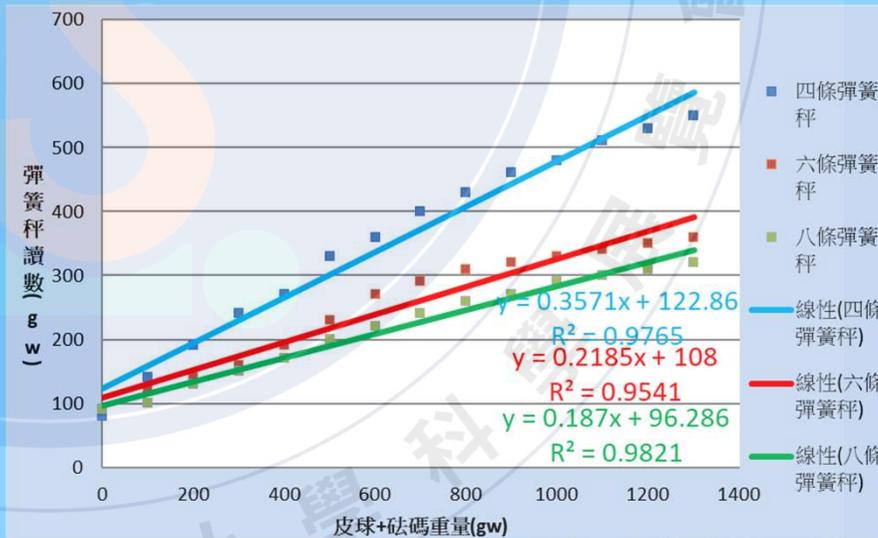
定滑輪

砝碼

定滑輪減少摩擦力；砝碼改變施力大小

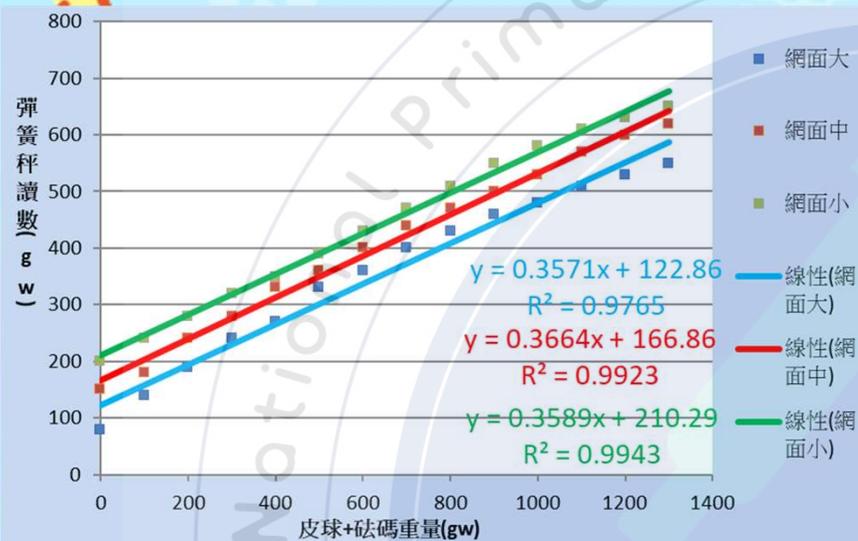


不同重量在不同邊繩設計彈簧秤讀數關係圖

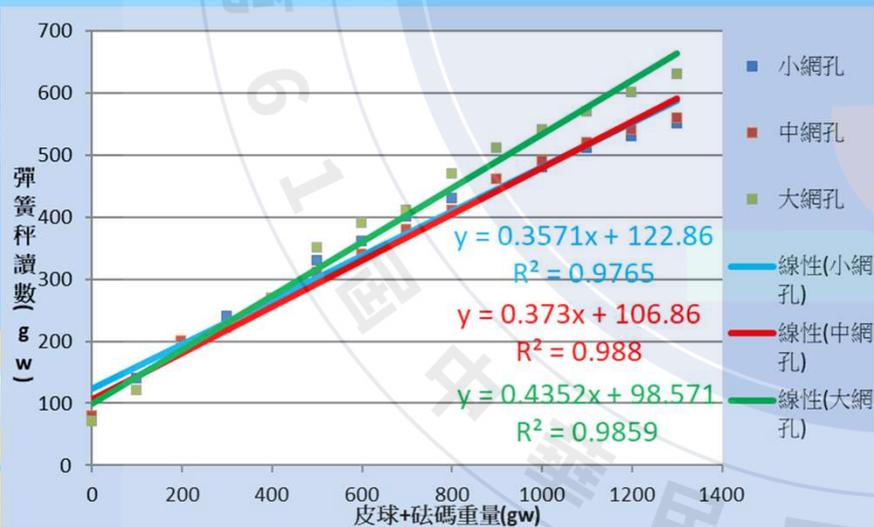


不同重量在不同繫繩數量設計彈簧秤讀數關係圖

# 研究方法~彈簧秤來觀察繫繩受力情形



不同重量在不同網面大小設計彈簧秤讀數關係圖



不同重量在不同網孔大小設計彈簧秤讀數關係圖

- R<sup>2</sup>都接近1表示兩者的相關性都非常高。
- 以趨勢線來看，木棍做邊繩、繫繩越多、網孔較小的設計，斜率較小；網面大小則斜率差不多。
- 繫繩越多越能分攤重量。
- 網面越小時，網面拉力就越大。

# 研究方法~雷射光反射軌跡法測量衝擊力

## 雷射筆裝置測量球落下的衝擊力

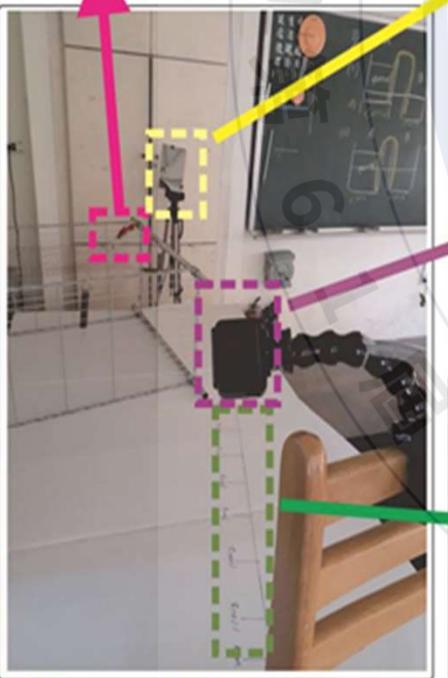
**雷射筆**

網面凹陷時，彈簧秤的角度會改變，雷射筆照射的位置也會不同。



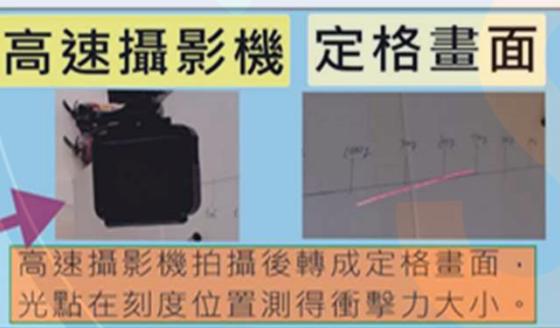
**反射鏡**

雷射筆照射在鏡子的位置不同，鏡子反射的角度也會不同，這樣具有放大的效果，讓量測更容易。

**高速攝影機 定格畫面**

高速攝影機拍攝後轉成定格畫面，光點在刻度位置測得衝擊力大小。

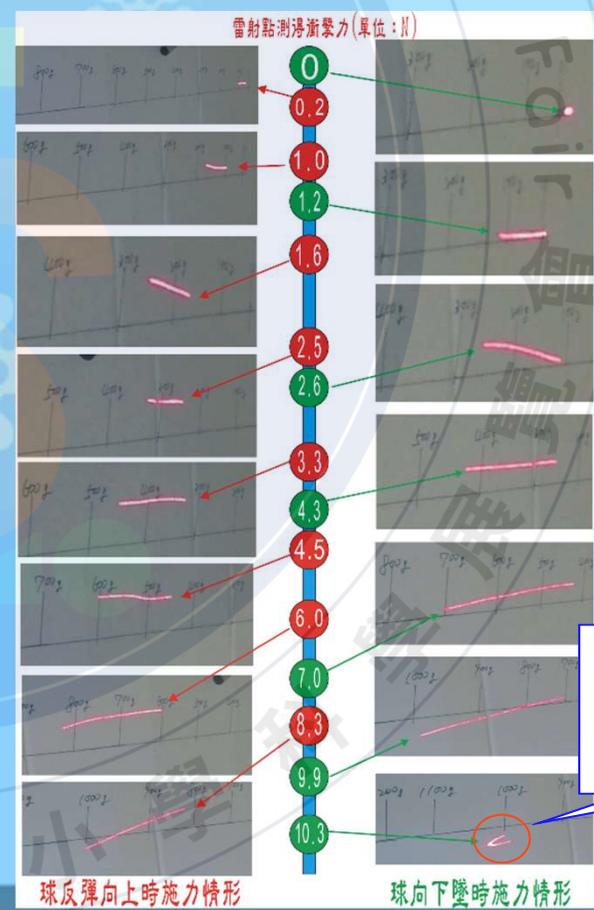


**刻度線**

利用砝碼增加皮球的重量，並刻劃不同重量時雷射筆照射的位置。



- 衝擊力越大，雷射筆仰角越大
- 反射鏡放大仰角變化，更容易觀察
- 刻度線呈現受力大小
- 高速攝影轉換成定格畫面



雷射筆照射的光點顯示衝擊力的定格畫面與結果

光點在此時迴轉，說明雷射筆射出光點沒超出鏡子外

# 研究方法~超音波感測器測量下陷程度 證雷射光反射軌跡法的準確性

網子凹陷程度測量球落下的衝擊力

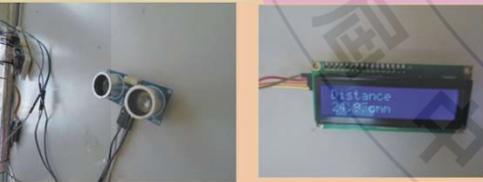
砝碼與定滑輪

利用砝碼改變皮球的重量，並用定滑輪減少摩擦力。

網體

不同設計的網體，下陷程度也會不同，研究共有不同邊繩、不同網面大小、不同網孔大小等網體。

超音波測距器 液晶顯示器



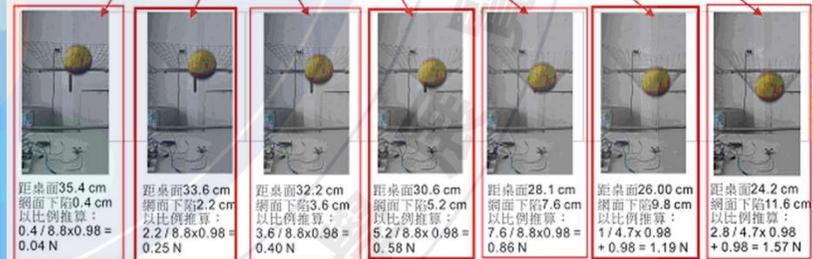
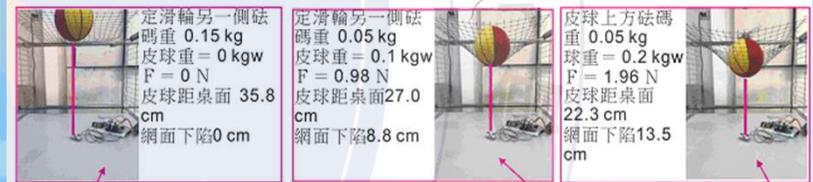
超音波測距器可測量球距離桌面的高度，且誤差在0.3 cm以內，再利用液晶顯示器方便判讀

彈簧秤

可作為繫繩，又具有測量拉力的功能。連接的四條彈簧拉力盡量平均，因此秤讀數差異不大。

- 衝擊力越大，網面下陷越多
- 超音波感測器測量下陷程度
- 液晶顯示器方便觀測
- 高速攝影轉換成定格畫面

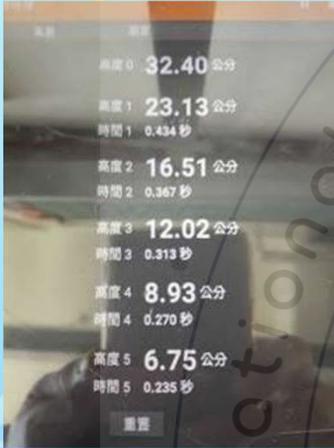
用砝碼改變皮球重量，用來找出作用力與網子下陷程度關係



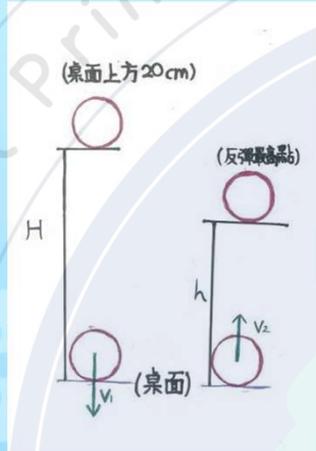
用0.15 kg皮球在網面上方20 cm落下，每個定格畫面的下陷程度推算作用力大小

由下陷程度推算衝擊力的定格畫面  
與結果(呈現前7張，共37張)

# 研究方法~撞擊平面的撞擊力與受力情形



手機物理實作



手繪示意圖



實驗情形

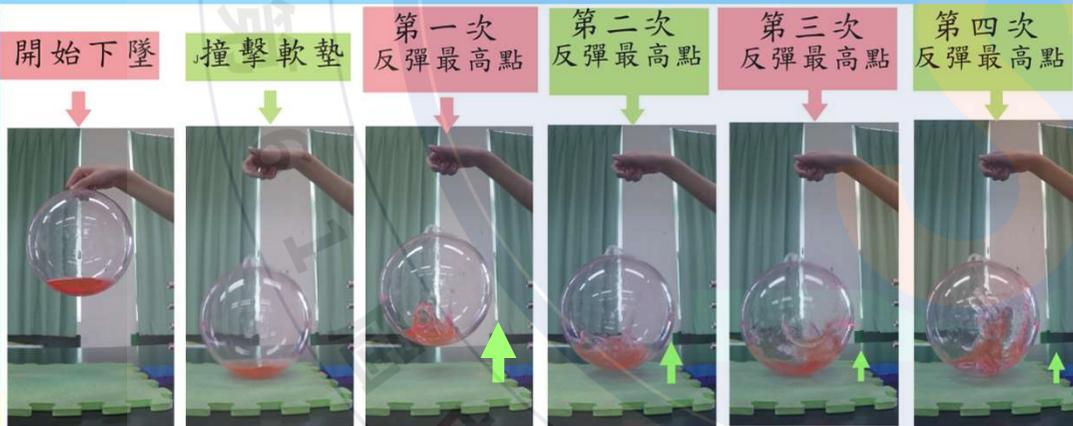
- 手機APP測量球位置變化
- 動量公式推算出衝擊力
- 透明塑膠球裝水觀察球受力情形



桌面5 cm



桌面20 cm



以透明塑膠球裝顏料水，軟墊上方20 cm落下，利用每個定格畫面可以知道水的震盪情形

不同時間點球受力情形



軟墊5 cm

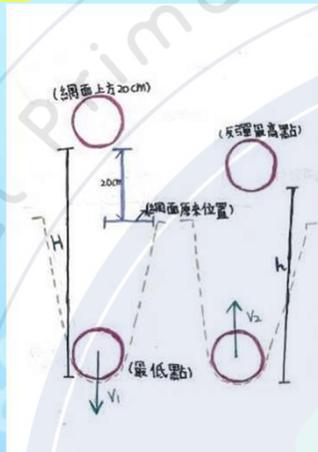


軟墊20 cm

# 研究方法~有安全平網時的撞擊力與受力情形



實驗裝置



手繪示意圖



實驗情形

- 定格畫面測量球位置變化
- **動量公式**推算出衝擊力
- 透明塑膠球裝水觀察球受力情形

用砝碼改變皮球重量，用來找出作用力與網子下陷程度關係

<p>定滑輪另一側砝碼重 0.15 kg 皮球重 = 0 kgw F = 0 N 皮球距桌面 35.8 cm 網面下陷 0 cm</p>	<p>定滑輪另一側砝碼重 0.05 kg 皮球重 = 0.1 kgw F = 0.98 N 皮球距桌面 27.0 cm 網面下陷 8.8 cm</p>	<p>皮球上方砝碼重 0.05 kg 球重 = 0.2 kgw F = 1.96 N 皮球距桌面 22.3 cm 網面下陷 13.5 cm</p>
--	---	---



<p>距桌面 35.4 cm 網面下陷 0.4 cm 以比例推算： <math>0.4 / 8.8 \times 0.98 = 0.04</math> N</p>	<p>距桌面 33.6 cm 網面下陷 2.2 cm 以比例推算： <math>2.2 / 8.8 \times 0.98 = 0.25</math> N</p>	<p>距桌面 32.2 cm 網面下陷 3.6 cm 以比例推算： <math>3.6 / 8.8 \times 0.98 = 0.40</math> N</p>	<p>距桌面 30.6 cm 網面下陷 5.2 cm 以比例推算： <math>5.2 / 8.8 \times 0.98 = 0.58</math> N</p>	<p>距桌面 28.1 cm 網面下陷 7.6 cm 以比例推算： <math>7.6 / 8.8 \times 0.98 = 0.86</math> N</p>	<p>距桌面 26.0 cm 網面下陷 9.8 cm 以比例推算： <math>1 / 4.7 \times 0.98 = 0.98</math> N</p>	<p>距桌面 24.2 cm 網面下陷 11.6 cm 以比例推算： <math>2.8 / 4.7 \times 0.98 = 1.57</math> N</p>
---	---	---	---	---	---	--

用 0.15 kg 皮球在網面上方 20 cm 落下，每個定格畫面的下陷程度推算作用力大小

不同時間點球的位置變化



網上 10 cm



網上 20 cm



網上 30 cm

# 研究結果~三種研究方法實驗結果

		800 g		
網面大	430 gw	4.18	4.27	
	450 gw	4.26	4.40	
	440 gw	4.03	4.31	
	390 gw	3.97	3.82	
網面中	430 gw	4.18	4.27	
	310 gw	4.07	4.17	
	260 gw	3.99	3.98	
網面小	430 gw	4.18	4.27	
	470 gw	4.55	4.53	
	490 gw	4.62	4.73	
網面極小	430 gw	4.18	4.27	
	450 gw	4.41	4.45	
	480 gw	4.39	4.43	

三種方法測量衝擊力實驗結果

- 由彈簧秤讀數、平均衝擊力來看，以木棍做為邊繩時、八條繫繩、網面大，以及網孔小的設計較佳，三個方法研究結果相同
- 網面小是較不好的設計，三個方法研究結果相同。

# 研究結果~有無安全平網的撞擊力與受力情形

項次 落下高度	碰撞時間( $\Delta T$ )	$M \cdot \Delta V$	球的衝擊力 (含重力)
9.81 cm (約10 cm)	0.033 (sec)	0.377 (kg*m/sec)	12.78 (N)
19.91 cm (約20 cm)	0.033 (sec)	0.531 (kg*m/sec)	17.40 (N)
29.88 cm (約30 cm)	0.033 (sec)	0.634 (kg*m/sec)	20.49 (N)

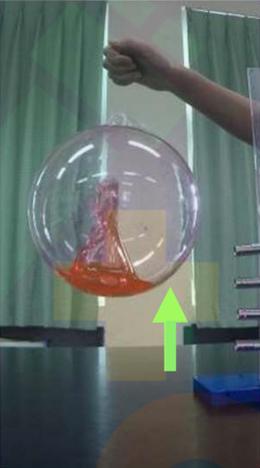
不同高度球落在**桌面**衝擊力結果

項次 落下高度	碰撞時間( $\Delta T$ )	$M \cdot \Delta V$	球的衝擊力 (含重力)
9.72 cm (約10 cm)	0.033 (sec)	0.369 (kg*m/sec)	12.54 (N)
20.25 cm (約20 cm)	0.033 (sec)	0.513 (kg*m/sec)	16.86 (N)
30.19 cm (約30 cm)	0.033 (sec)	0.624 (kg*m/sec)	20.19 (N)

不同高度球落在**軟墊**衝擊力結果

項次 落下高度	碰撞時間( $\Delta T$ )	$M \cdot \Delta V$	球的衝擊力 (含重力)
網子上方10 cm	0.325 (sec)	0.785 (kg*m/sec)	3.89 (N)
網子上方20 cm	0.308 (sec)	0.863 (kg*m/sec)	4.269 (N)
網子上方30 cm	0.283 (sec)	0.959 (kg*m/sec)	4.845 (N)

不同高度球落在**安全平網**衝擊力結果

不同設計 說明	球由 <b>桌面20 cm</b> 高落下	球由 <b>軟墊20 cm</b> 高落下	由 <b>網子上方20 cm</b> 落下
照片			

- 有安全平網時，球的衝量會較落在不同平面材質大，但因碰撞時間較長，所以球的衝擊力反而較小，與物理公式  $F = M \times \Delta V / \Delta T$ ，

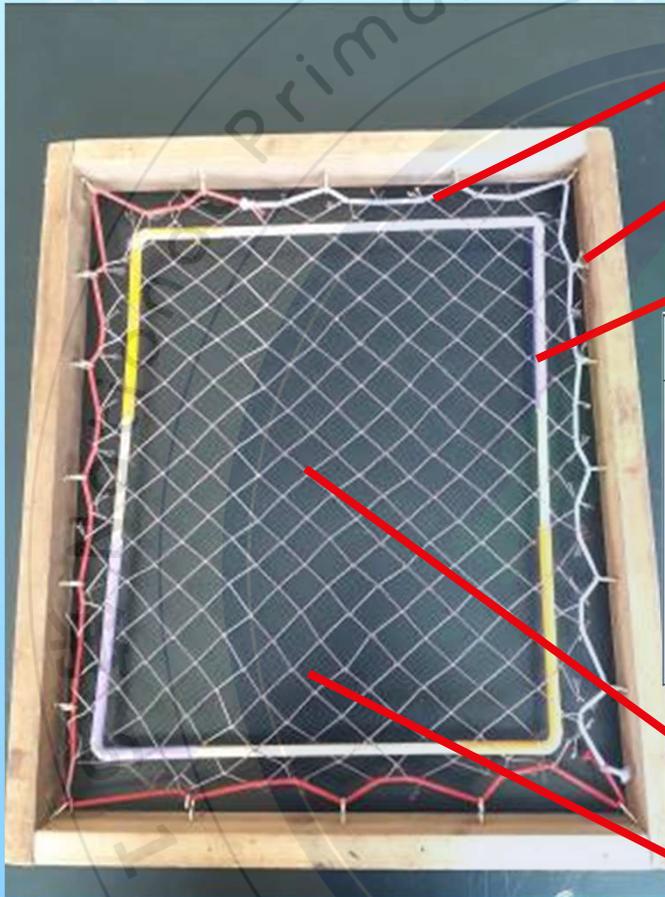
$\Delta T$  越大， $F$  越小符合。

- 由衝擊力以及水震盪情形，都是

桌面 > 軟墊 > 有安全平網。



# 結論~降低落下人員傷害的設計



- 邊繩具有彈性，增加緩衝
- 繫繩釘入牆面，且數量較多
- 外圍框架撐平網面

分類	無鐵架撐起的網面	材料	有外圍鐵架撐起	測量方法
說明				
照片				

撐平學校下垂的安全平網

- 網面大小適當
- 網孔稍小

## 重要參考文獻

- 2014 年台灣國際科展一等獎—乒乓球彈跳運動研究
- 康軒版自然與生活科技五上第四單元「力與運動」