

# 中華民國 第 49 屆中小學科學展覽會

## 作品說明書

---

國小組 物理科

最佳團隊合作獎

080111

真能落得輕鬆嗎？

學校名稱：臺北市松山區敦化國民小學

作者：  小六 林靖為 小六 林心怡 小六 蔡孟學 小六 任常誼	指導老師：  鄧永雪 趙君慈
---	-------------------------

關鍵詞：重力加速度、瞬間衝撞力、緩衝材料

# 作品名稱：真能落得輕鬆嗎？

## 摘要：

物體自高處落下真能落得輕鬆嗎？實驗發現鋼珠從高處落下時，其墜落時的瞬間速度會加快，除了重力外，還受到周圍環境(氣體或液體)所造成的阻力影響；而物體著地時瞬間衝撞力會受到物體質量、墜落速度變化及地板材質影響；此外，高空墜蛋實驗瞭解到氣泡布、黏度高的花生醬及果醬能有效保護雞蛋不破損，而以米當包裝材料、以鹽當承接物來保護蛋也能達到較好的保護效果；觀察人偶墜落時，頭部的加速運動及軀幹質量都會影響頭部撞擊地面的受力，下肢墜地時會受到地面摩擦力而影響頭部撞擊地面的時間，頭部提早觸地將使頭部傷害指數升高。

## 壹、研究動機

最近新聞常常報導一些有關人或物體從高處墜落的事件，包括嘉義市清潔工人執行垃圾清運工作時，奮不顧身地伸出雙手將三樓墜落的男子一把接住，因高樓墜落的衝力強勁而被壓倒在地，但最後僅受輕傷；台中一名懷孕廿八週的孕婦忙著晾衣服，一不小心從三樓十公尺高的陽台失足墜樓跌落地面，經過搶救後婦人剖腹產母子均平安獲救；還有美國洗窗工人從 47 樓失足墜落竟然能奇蹟似的生還，以及美國紐約摩天大樓有一隻貓從 32 樓落下卻大難不死，這些高處墜落還能意外存活的訊息都引起了我們的驚奇和疑惑。究竟物體掉落時真的能落得輕鬆嗎？物體落下時的速度到底有多快？墜落到地面時瞬間衝撞的力量到底有多大？這就是我們要研究的主題。

我們的研究與下列課程內容有關：

- 一、牛頓版自然與生活科技第二冊第二單元「生活中的力」。
- 二、康軒版自然與生活科技第五冊第四單元「力與運動」。

## 貳、研究目的

- (一)觀察及測量物體墜落時速度的變化。
- (二)觀察及測量物體墜落時瞬間衝撞力的變化。
- (三)設計緩衝材料來減緩物體墜落時的破損程度。
- (四)觀察人偶墜落的運動情形。

## 參、研究設備及器材



## 肆、研究過程或方法

### 研究主題一、觀察及測量物體墜落時速度的變化

#### (一)實驗目的

兩個輕重不同的物體從高處落下，有人說只有在體積形狀相同的時候才會同時落地；有人說只有在重力相同時才會同時落地；有人說只有當物體都很重時才會同時落地。物體從高處落下時的運動情形到底是什麼？落入水中的情形是否有不同？於是我們進行了下列的實驗。

#### (二)實驗說明

##### 1.落下物體的選定

(1)我們想瞭解物體在空中及水中墜落時的速度到底有多快，原先是選擇圓型球體、長方體、不規則的落體來實驗，幾次試驗後發現除了圓形球體外，其餘形體較難找到重心，導致施放時常有偏斜落下的情形，所以我們決定選擇圓型球體的落體來實驗，希望能降低觀測值的偏差率。

(2)圓型球體中本想採用乒乓球、棒球、鋼珠來實驗，結果決定選擇鋼珠來當作落體，因為鋼珠的材質較硬，在一定的高度落下時球體變形的機率較小，較少的彈力作用，而且較易於觀察水中落下的情形，所以我們選擇了不同質量、不同大小的鋼珠當作落體來實驗。

##### 2.物體墜落速度的測量工具

(1)我們選用數位攝影法的方式來觀察及測量物體墜落的速度，由高速數位相機拍攝物體落下的運動情形，再由電腦定格測量出物體運動位置與時間變化。

(2)將所拍攝物體落下過程的每幅影像使用 GIMP 影像處理軟體來判讀，高速數位相機錄製的影像可以把動態影像轉換成每 1/60 秒一格的靜態畫面，利用 1/60 秒一格的靜態畫面測量出物體墜落到地面上的座標位置(y)與時間(t)。用 Excel 軟體畫出 y 與 t 的關係圖，來了解物體落下的運動情形及時間變化。

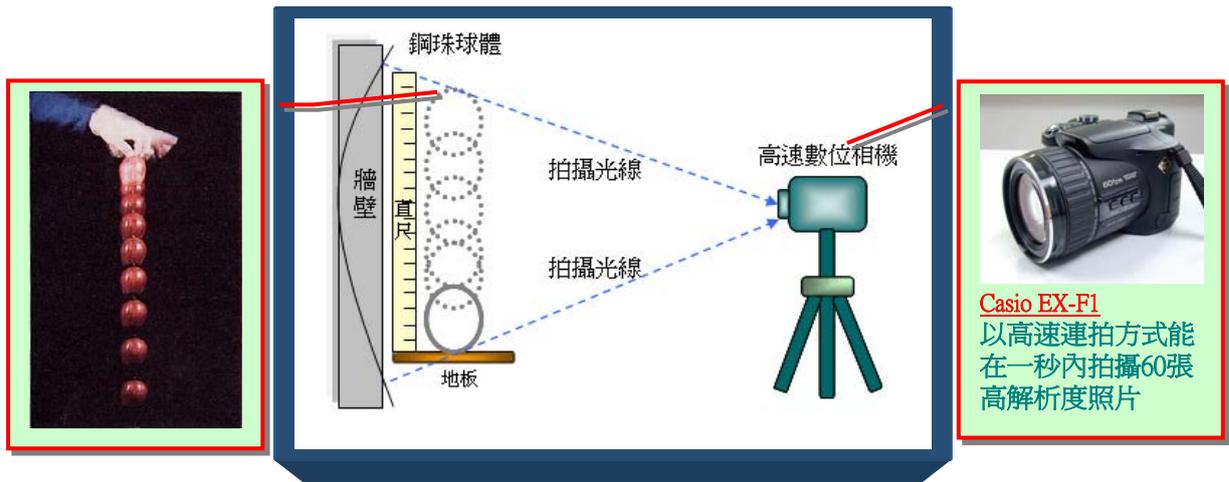
以下設計幾個實驗來觀察及測量鋼珠在空中及水中墜落時速度的變化。

#### (三)實驗設計

### 【實驗一之一】輕重不同的鋼珠從空中落下，觀察及測量鋼珠於空中落地時速度的變化。

##### 1.實驗裝置

如圖一，實驗器材包括直尺、直徑及質量不等的實心鋼珠共六顆、高速數位相機及三角架、GIMP 影像處理軟體。



圖一 空中落體實驗裝置圖

## 2. 實驗步驟

- (1) 選擇一個平面的牆壁，將直尺黏貼於牆壁上，以鉛錘線來定位，確認直尺垂直於地面。
- (2) 將高速數位相機架在三角架上，腳架放置於距離落體約 150 公分處拍攝，並將腳架高度調整至與落體施放的高度一半處等高，且於牆壁前方放置一日光燈來打光，以便圖像的觀察。
- (3) 將下列不同直徑、不同質量的實心鋼珠當作掉落的物體(簡稱「落體」)，分別從離地 60 公分、80 公分、100 公分、120 公分、140 公分的高處落下，實驗操作由同一人執行並且控制鬆放鋼珠時的力道與方向，使其呈靜止不施力的狀態直線墜落。

表一 鋼珠球體的種類

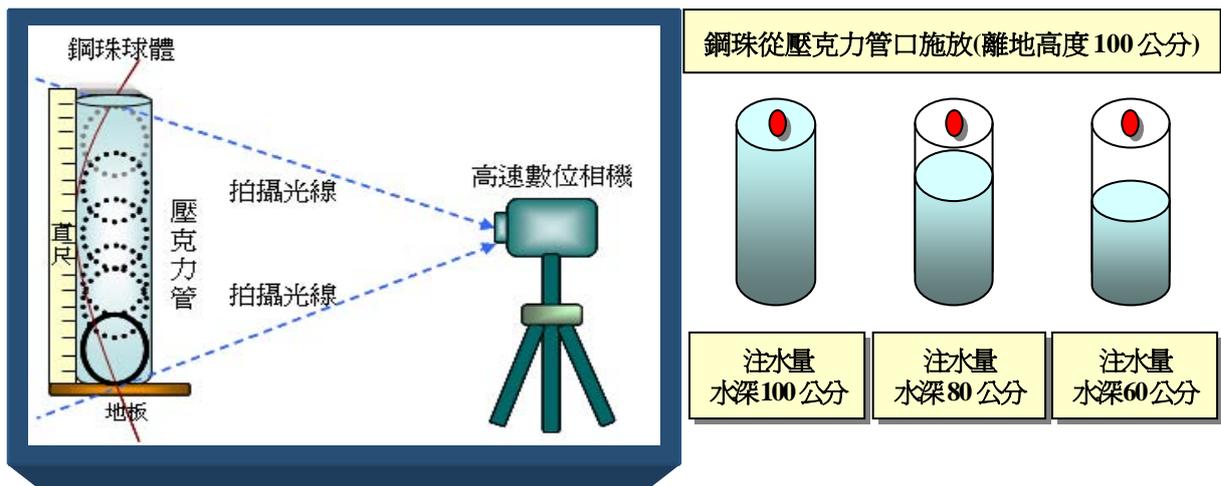
鋼珠編號	鋼珠 1 號	鋼珠 2 號	鋼珠 3 號	鋼珠 4 號	鋼珠 5 號	鋼珠 6 號
鋼珠直徑	6.0 公分	5.0 公分	4.0 公分	3.0 公分	2.0 公分	1.2 公分
鋼珠質量	880 公克	510 公克	261 公克	110 公克	33 公克	7 公克
鋼珠表面積 ( $4\pi r^2$ )	$36\pi$ 平方公分	$25\pi$ 平方公分	$16\pi$ 平方公分	$9\pi$ 平方公分	$4\pi$ 平方公分	$1.44\pi$ 平方公分
鋼珠體積 ( $\frac{4}{3}\pi r^3$ )	$36\pi$ 立方公分	$20.833\pi$ 立方公分	$10.667\pi$ 立方公分	$4.5\pi$ 立方公分	$1.333\pi$ 立方公分	$0.288\pi$ 立方公分
鋼珠密度 (質量/體積)	7.8 公克立方公分	7.8 公克立方公分	7.8 公克立方公分	7.8 公克立方公分	7.9 公克立方公分	7.7 公克立方公分

- (4) 將鋼珠由靜止中施放、墜落，同時以高速數位相機拍攝鋼珠靜止落下的運動過程中全景的動態影像。數位相機以自動對焦方式拍攝，快門設定為 1/3000 秒、光圈為 F2.7(W)、拍攝速度為每秒記錄 60 張影像。
- (5) 將拍攝落體過程的每幅影像使用 GIMP 影像處理軟體來判讀及記錄鋼珠的位置(y)與時間(t)。

## 【實驗一之二】輕重不同的鋼珠從水中落下，觀察及測量鋼珠於水中掉落時速度的變化。

### 1. 實驗裝置

如圖二，實驗器材包括直尺、直徑及質量不等的實心鋼珠共六顆、壓克力管、撈取珠子的長柄勺、高速數位相機及三腳架、GIMP 影像處理軟體。



圖二 水中落體實驗裝置圖

## 2. 實驗步驟

- (1) 製作直徑 15 公分、高 100 公分、厚度 0.3 公分的圓柱體壓克力管當作水槽，將直尺黏貼於管壁上，以鉛錘線來定位，確認直尺垂直於地面。
- (2) 水槽置於高 80 公分的塑膠地墊上，將高速數位相機架在三角架上，腳架放置於距離水槽 150 公分處拍攝，並將腳架高度調整至與落體施放的高度一半處等高，且於水槽前方放置一日光燈來打光，以便於圖像的觀察。
- (3) 將不同直徑不同質量的 1 號至 6 號鋼珠(同實驗一之一)當作掉落的物體，壓克力管分別裝入 60 公分、80 公分及 100 公分的水，將鋼珠從壓克力管口頂端(離地高度 100 公分)落下，實驗操作由同一人執行並且控制鬆放鋼珠時的力道與方向，使其呈靜止不施力的狀態直線墜落。
- (4) 將鋼珠於管口施放、墜落，同時以高速數位相機拍攝鋼珠靜止落下的運動過程中全景的動態影像。數位相機以自動對焦方式拍攝，快門設定為 1/3000 秒、光圈為 F2.7(W)、拍攝速度為每秒記錄 60 張影像。
- (5) 將拍攝落體過程的每幅影像使用 GIMP 影像處理軟體來判讀及記錄鋼珠的位置(y)與時間(t)。

## 研究主題二、觀察及測量物體墜落時瞬間衝撞力的變化

### (一) 實驗目的

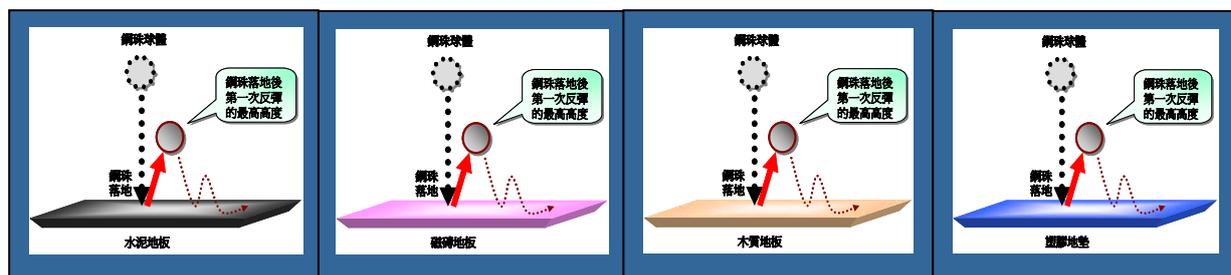
為了瞭解物體墜落觸地時其瞬間衝撞地面所受到的交互作用力的衝擊(以下簡稱「瞬間衝撞力」)到底有多大，我們設計了幾種測定瞬間衝撞力的方法來測量，說明如下：

### (二) 實驗設計

#### 【實驗二之一】鋼珠球體彈跳高度測量法

1. 創意來源：物體受力後會產生形狀的變化(稱為形變)或運動情形的改變(即產生加速度)，作為測量力的依據。

2.實驗器具：直尺、較不易變形且直徑及質量不等的實心鋼珠共六顆當作落體(撞擊物)，受撞物(被撞擊物)分別為水泥地板、磁磚地板、木質地板及塑膠地墊。



圖三 鋼珠球體彈跳高度實驗裝置圖

3.實驗步驟：

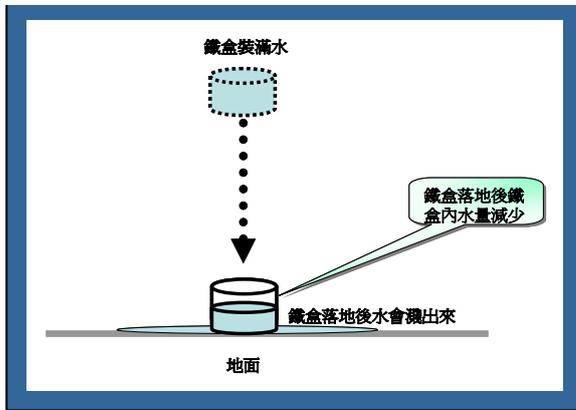
- (1)取 1 號至 6 號不同直徑、不同質量的實心鋼珠(同實驗一之一)當作落體，以鉛錘線定位來確認直尺垂直於地面，受撞物的地面材質分別為水泥地板、磁磚地板、木質地板及塑膠地墊，厚度均為 5 公分。
- (2)將鋼珠分別從離地高度 60 公分、80 公分、100 公分的高處落下，由同一人施放並且控制鬆放鋼珠時的力道與方向，使其呈靜止不施力的狀態直線墜落。
- (3)觀察及測量不同直徑、不同質量鋼珠於不同高度落下並撞擊到不同材質的地面後第一次彈跳的最高高度，來測定鋼珠墜落著地的瞬間衝撞力程度。

### 【實驗二之二】鋼珠球體衝擊音量測量法

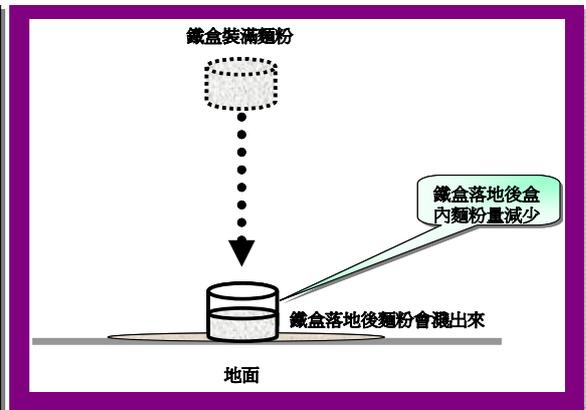
- 1.創意來源：當鐵鎚敲擊鐵釘時，鐵鎚與鐵釘間接觸會產生力的交互作用，施力較大時所釋放出來的聲音能量較大，作為測量撞擊力的依據。
- 2.實驗器具：直尺、較不易變形且直徑及質量不等的實心鋼珠共六顆當作落體 (撞擊物)，水泥地板、磁磚地板、木質地板及塑膠地墊為受撞物、MP3 錄音裝置、Audacity 音效編輯軟體。
- 3.實驗步驟：
  - (1)取 1 號至 6 號不同直徑、不同質量的實心鋼珠(同實驗一之一)當作落體，以鉛錘線定位來確認直尺垂直於地面，受撞物的地面材質分別為水泥地板、磁磚地板、木質地板及塑膠地墊。
  - (2)將鋼珠分別從離地高度 60 公分、80 公分、100 公分、120 公分、140 公分的高處施放，由同一人施放並且控制鬆放鋼珠時的力道與方向，使其呈靜止不施力的狀態直線墜落。
  - (3)鋼珠施放的同時啟動 MP3 錄音系統來錄製鋼珠觸地所傳遞的聲音。
  - (4)開啓 Audacity 音效編輯軟體介面，利用此軟體來記錄鋼珠落體觸地時的音效聲波。
  - (5)觀察及測量不同直徑、不同質量鋼珠於不同高度落下並撞擊到不同材質的地面後釋放的聲音能量大小，來測定鋼珠墜落著地的瞬間衝撞力程度。

### 【實驗二之三】液體及麵粉溢出量測量法

1. 創意來源：提水澆花時，兩人相撞水桶的水會濺出，而搬運麵粉時受到碰撞，麵粉很容易散落滿地的啓示。
2. 實驗器具：直尺、電子秤、水、麵粉、直徑 12 公分及 18 公分的鐵盒各一個。



圖四 液體溢出量測量衝撞力實驗裝置圖



圖五 麵粉溢出量測量衝撞力實驗裝置

#### 3. 實驗步驟：

- (1) 將大小不同的鐵盒裝滿水，用電子秤測量滿水時的重量。
- (2) 以鉛錘線方式來確認直尺垂直於地面，然後將裝滿水的鐵盒分別從離地高度 100 公分及 200 公分的高處靜止落下，重複進行十次實驗。
- (3) 鐵盒著地撞擊地面時水會濺出，觀察及測量鐵盒內存留的水量並推算濺出量，來測定鐵盒墜落著地的瞬間衝撞力程度。
- (4) 將鐵盒內重新裝滿麵粉，重覆進行上述 1 到 3 的實驗步驟，觀察及測量鐵盒內存留的麵粉量並推算濺出量，來測定鐵盒墜落著地的瞬間衝撞力程度。

### 研究主題三、設計緩衝材料來減緩物體墜落時的破損程度

#### (一) 實驗目的

物體從高處落下的衝撞力太大時，可能會帶來兩敗俱傷的慘狀，我們該如何減少衝撞力的傷害呢？從我們蒐集的資料中發現，有的是增加物體的空氣阻力來減緩重力加速度，例如加裝降落傘的裝置；有的是設計不同的材料來減緩衝撞力。在墜落極短時間內可能無法減少物體落下的加速度時，通常會以緩衝材料來延長著地的時間以緩衝地面的反作用力，此即為本實驗設計的主要目的。

#### (二) 實驗說明

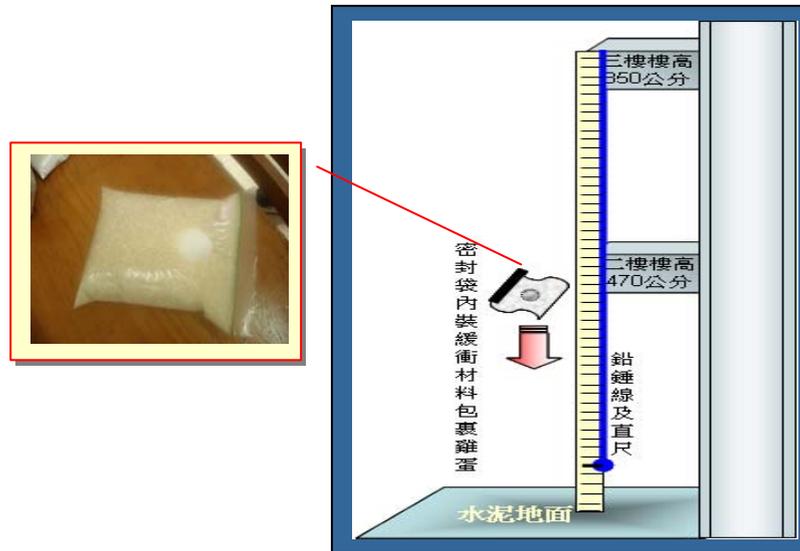
古代人常用“雞蛋碰石頭”來比喻自不量力，可見，雞蛋是極易碎的，輕輕一磕就碎了，人的生命也是如此。如果說雞蛋能從十幾米高的地方落下而安然無恙，那簡直就是天方夜譚。但是科學有時能將不可思議的事情變為現實，這個實驗的設計主要是以雞蛋掉落為例，設計不同的材料以減緩雞蛋落地的衝撞力，來保護高空墜落的雞蛋不破損。

#### (三) 實驗設計

**【實驗三之一】設計減緩衝撞力的材料來包裹雞蛋，觀察雞蛋於空中落地時的破裂程度。**

**1.實驗裝置**

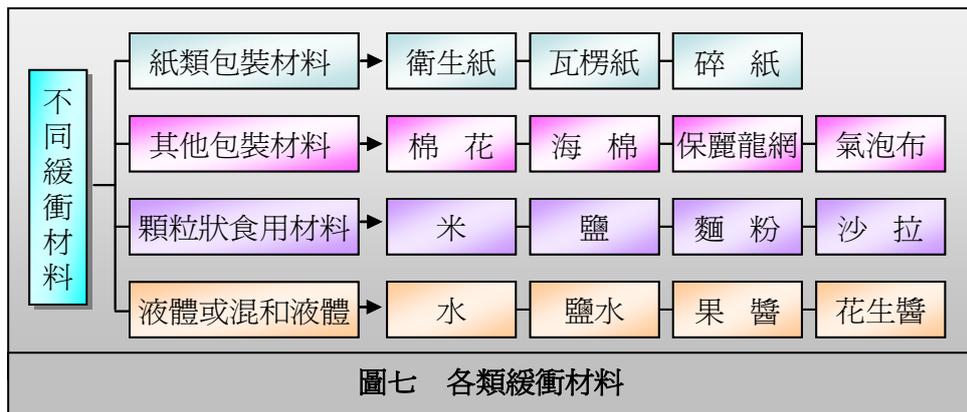
如圖六，實驗器材包括生雞蛋數個、各式緩衝材料(包括衛生紙、瓦楞紙、碎紙、棉花、海綿、保麗龍網、氣泡布、鹽、麵粉、米、沙拉、水、鹽水、果醬、花生醬)、塑膠密封袋、直尺、鉛錘線、碼錶、高速數位相機及三角架、電子秤。



圖六 緩衝材料包裹雞蛋之緩衝實驗裝置圖

**2.實驗步驟**

(1)準備一個長 22 公分、寬 18 公分的塑膠密封袋，選擇下列各種質地柔軟或有彈性的材料當作緩衝材料並填充於密封袋中，緩衝材料將雞蛋嚴嚴實實地包裹起來，而且要確保雞蛋放置在中心處，使整個雞蛋懸空，不論哪個面著地，雞蛋都不會著地。

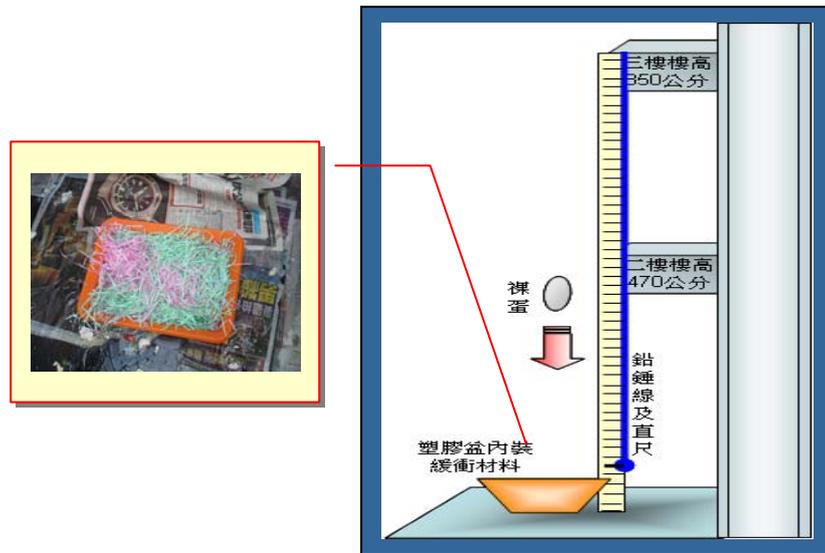


- (2)測量各式裝滿緩衝材料及雞蛋後的密封袋重量。
- (3)以鉛錘線定位來確認直尺垂直於地面，以紙板固定雞蛋落下的位置。
- (4)將加裝緩衝裝置的雞蛋從學校二樓(高度約 470 公分)及三樓(高度約 850 公分)的走廊平放扔下，使其為靜止無施力的狀態下落下，用碼錶計時落下的速度，重複進行五次實驗。
- (5)觀察及記錄雞蛋落地後的破裂程度。

**【實驗三之二】設計減緩衝撞力的材料來當作雞蛋落地時的被撞擊物，觀察雞蛋於空中落地時的破裂程度。**

**1.實驗裝置**

如圖八，實驗器材包括生雞蛋數個、同實驗三之一之各式緩衝材料(包括衛生紙、瓦楞紙、碎紙、棉花、海綿、保麗龍網、氣泡布、鹽、麵粉、米、沙拉、水、鹽水、果醬、花生醬)、承裝緩衝材料的塑膠盆、直尺、鉛錘線、碼錶、高速數位相機及三角架。



圖八 緩衝材料包裹雞蛋之緩衝實驗裝置圖

**2.實驗步驟**

- (1)準備一個長 30 公分、寬 21 公分、高 11 公分的塑膠盆，將各式質地柔軟或彈性較佳的材料如衛生紙、瓦楞紙、碎紙、棉花、海綿、保麗龍網、氣泡布、鹽、麵粉、米、沙拉、水、鹽水、果醬、花生醬等當作緩衝材料並填充於塑膠盆內，盆內各式緩衝材料當作承受裸蛋落下時的受撞物或承接物。
- (2)以鉛錘線定位來確認直尺垂直於地面，以紙板固定雞蛋落下的位置。
- (3)承接物置於蛋降落點的地面上，將雞蛋從學校二樓(高度約 470 公分)及三樓(高度約 850 公分)的走廊平放扔下，使其為靜止無施力的狀態下落下，用碼錶計時落下的速度，重複進行五次實驗。
- (4)觀察及記錄雞蛋落地後的破裂程度。

**研究主題四、觀察人偶墜落時的運動情形**

**(一)實驗目的**

在日常生活中，大人和兒童們意外跌倒、墜落的事常常發生，其中以墜落的傷害程度較大。俗話說：「一失足成千古恨」，在墜落時若是頭部首先遭受撞擊，極容易造成嚴重傷害，甚至死亡；而軀幹著地時也會有相當程度的傷害，僥倖逃過一劫且毫髮無傷的應該算是奇蹟。在進行前面三項研究主題之後，我們想要瞭解人們從高處墜落時的過程，於是我們進行了如下的實驗。

## (二)實驗說明

### 1.實驗人偶的選定

我們以塑膠製作的玩具人偶(以下簡稱「人偶」)來當作真人墜落的實驗模型，人偶身高 30 公分，體重 300 公克。

### 2.觀察人偶墜落的觀察工具

我們選用高速數位相機來拍攝人偶墜落的動態過程，並透過高速數位相機每 1/60 秒拍攝一張影像的功能將拍攝結果擷取成靜態影像，希望能較精準來觀察人偶落地的情形。

## (三)實驗設計

- 1.將人偶由臀部吊起，頭部垂直朝下，以頭頂與地面之間距離定義為墜落高度，墜落高度設為 60 公分、100 公分及 140 公分。
- 2.地面材質選擇塑膠地墊、木質地板、磁磚地板及水泥地板四種地板材質來進行實驗，塑膠地墊材質柔軟有彈性，磁磚地板材質的表面較為光滑，木質地板及水泥地板粗糙且堅硬。
- 3.將人偶從墜落高度落下，由同一人施放並且控制鬆放人偶時的力道與方向，使其呈靜止不施力的狀態直線墜落。
- 4.以高速數位相機拍攝人偶靜止落下時運動過程中全景的動態影像。
- 5.將人偶由頭頂垂直吊起，改由頭上腳下的方向落下，重覆進行上述 1 到 4 的實驗步驟。

## 伍、研究結果

### 一、觀察及測量物體墜落時速度的變化

【實驗一之一】輕重不同的鋼珠從空中落下，觀察及測量鋼珠於空中落地時速度的變化。

#### (一)實驗記錄：(詳細數據詳見附錄)

以下是直徑 6 公分的鋼珠從離地高處 60 公分的空中墜落所拍攝的完整影像，我們將影像以每 1/60 秒的時間間隔拆成一張張單幅影像，量出不同時間的鋼珠球體在空中落下的位置，結果如下：

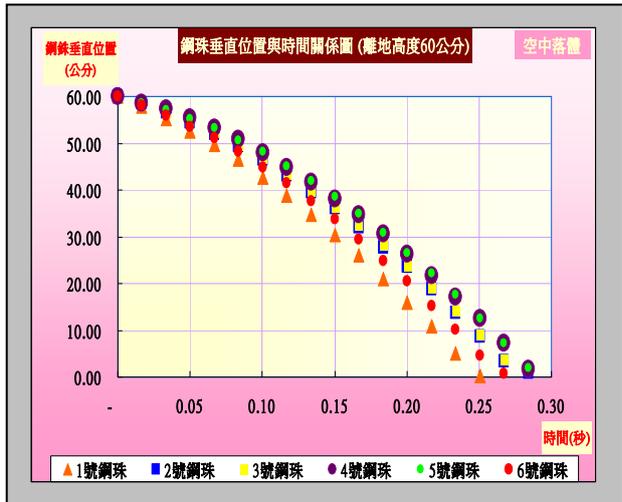


圖九 直徑 6 公分鋼珠空中墜落影像分析 (自 60 公分高處靜止落下)

表二 鋼珠於離地 60 公分之空中落下位置與時間變化

時間/距離	時間(秒)	1號鋼珠	2號鋼珠	3號鋼珠	4號鋼珠	5號鋼珠	6號鋼珠
第 0/60秒	-	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00
第 1/60秒	0.0167	57.88	58.51	58.32	58.62	58.64	58.14
第 2/60秒	0.0333	55.20	56.58	56.39	57.39	57.14	55.93
第 3/60秒	0.0501	52.43	54.46	54.89	55.49	55.24	53.58
第 4/60秒	0.0668	49.56	51.98	52.32	53.31	53.33	51.03
第 5/60秒	0.0835	46.48	49.43	49.76	50.86	50.68	48.13
第 6/60秒	0.1002	42.71	46.41	46.64	47.85	48.10	44.75
第 7/60秒	0.1169	38.91	43.11	43.27	44.91	45.17	41.37
第 8/60秒	0.1336	34.70	39.63	39.88	41.72	41.84	37.51
第 9/60秒	0.1503	30.40	36.24	36.42	38.16	38.57	33.64
第10/60秒	0.1670	25.98	32.07	32.48	34.69	34.90	29.36
第11/60秒	0.1837	20.97	27.75	28.13	30.49	30.95	24.88
第12/60秒	0.2004	15.89	23.52	23.79	26.20	26.60	20.39
第13/60秒	0.2171	10.84	18.70	19.02	21.78	22.18	15.22
第14/60秒	0.2338	5.05	13.85	14.22	17.09	17.55	10.04
第15/60秒	0.2505	0.25	8.75	9.11	12.48	12.45	4.52
第16/60秒	0.2672		3.34	3.76	7.21	7.28	0.80
第17/60秒	0.2839		0.94	1.93	1.66	1.97	

圖十 鋼珠於離地 60 公分之空中落下位置與時間關係



表三 鋼珠於離地 60 公分之空中落下距離與時間變化

時間/距離	時間(秒)	1號鋼珠	2號鋼珠	3號鋼珠	4號鋼珠	5號鋼珠	6號鋼珠
第 0/60秒	-	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
第 1/60秒	0.0167	2.12	1.49	1.68	1.38	1.36	1.86
第 2/60秒	0.0333	4.80	3.42	3.61	2.61	2.86	4.07
第 3/60秒	0.0501	7.57	5.54	5.11	4.51	4.76	6.42
第 4/60秒	0.0668	10.44	8.02	7.68	6.69	6.67	8.97
第 5/60秒	0.0835	13.52	10.57	10.24	9.14	9.32	11.87
第 6/60秒	0.1002	17.29	13.59	13.36	12.15	11.90	15.25
第 7/60秒	0.1169	21.09	16.89	16.73	15.09	14.83	18.63
第 8/60秒	0.1336	25.30	20.37	20.12	18.28	18.16	22.49
第 9/60秒	0.1503	29.60	23.76	23.58	21.84	21.43	26.36
第10/60秒	0.1670	34.02	27.93	27.52	25.31	25.10	30.64
第11/60秒	0.1837	39.03	32.25	31.87	29.51	29.05	35.12
第12/60秒	0.2004	44.11	36.48	36.21	33.80	33.40	39.61
第13/60秒	0.2171	49.16	41.30	40.98	38.22	37.82	44.78
第14/60秒	0.2338	54.95	46.15	45.78	42.91	42.45	49.96
第15/60秒	0.2505	59.75	51.25	50.89	47.52	47.55	55.48
第16/60秒	0.2672		56.66	56.24	52.79	52.72	59.20
第17/60秒	0.2839		59.06	58.07	58.34	58.03	

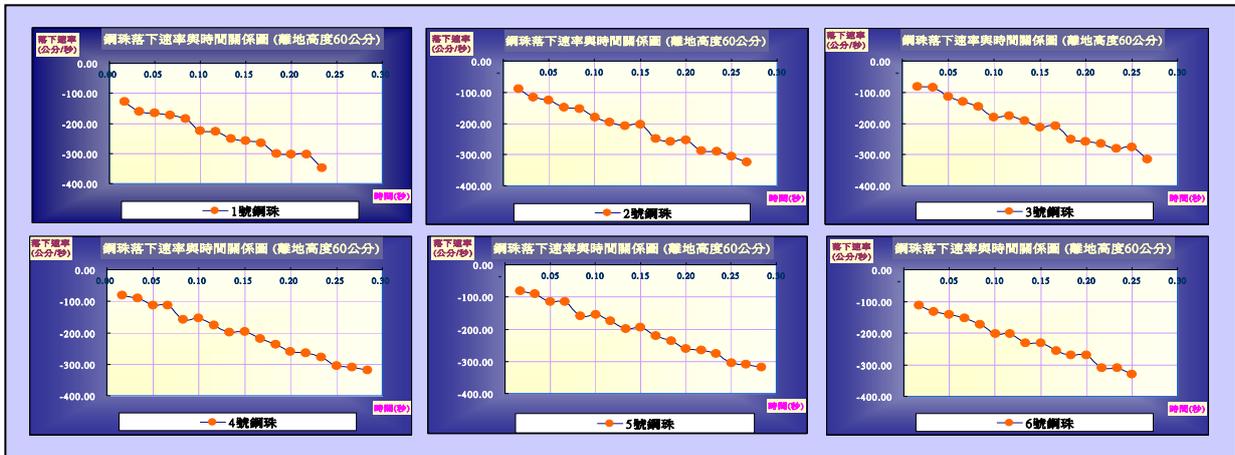
圖十一 鋼珠於離地 60 公分之空中落下距離與時間圖



表四 鋼珠於離地 60 公分之空中落下其速率之變化

時間/距離	時間(秒)	1號鋼珠	時間變化 $\Delta t(\text{sec})$	位移變化 $\Delta y(\text{cm})$	落下速率 (cm/s)	2號鋼珠	時間變化 $\Delta t(\text{sec})$	位移變化 $\Delta y(\text{cm})$	落下速率 (cm/s)	3號鋼珠	時間變化 $\Delta t(\text{sec})$	位移變化 $\Delta y(\text{cm})$	落下速率 (cm/s)
第 0/60秒	-	60.0000				60.0000				60.0000			
第 1/60秒	0.0167	57.8816	0.0167	-2.118	-126.8505	58.5072	0.0167	-1.493	-89.3892	58.3180	0.0167	-1.682	-100.7159
第 2/60秒	0.0334	55.2024	0.0167	-2.679	-160.4286	56.5790	0.0167	-1.928	-115.4611	56.3914	0.0167	-1.927	-115.3654
第 3/60秒	0.0501	52.4298	0.0167	-2.773	-166.0250	54.4642	0.0167	-2.115	-126.6347	54.8930	0.0167	-1.498	-89.7287
第 4/60秒	0.0668	49.5637	0.0167	-2.866	-171.6213	51.9762	0.0167	-2.488	-148.9820	52.3242	0.0167	-2.569	-153.8206
第 5/60秒	0.0835	46.4796	0.0167	-3.084	-184.6795	49.4260	0.0167	-2.550	-152.7066	49.7554	0.0167	-2.569	-153.8206
第 6/60秒	0.1002	42.7101	0.0167	-3.770	-225.7193	46.4093	0.0167	-3.017	-180.6407	46.6361	0.0167	-3.119	-186.7822
第 7/60秒	0.1169	38.9094	0.0167	-3.801	-227.5848	43.1127	0.0167	-3.297	-197.4012	43.2722	0.0167	-3.364	-201.4317
第 8/60秒	0.1336	34.7038	0.0167	-4.206	-251.8356	39.6295	0.0167	-3.483	-208.5749	39.8777	0.0167	-3.394	-203.2629
第 9/60秒	0.1503	30.4047	0.0167	-4.299	-257.4320	36.2396	0.0167	-3.390	-202.9880	36.4220	0.0167	-3.456	-206.9253
第10/60秒	0.1670	25.9809	0.0167	-4.424	-264.8938	32.0722	0.0167	-4.167	-249.5449	32.4771	0.0167	-3.945	-236.2245
第11/60秒	0.1837	20.9653	0.0167	-5.016	-300.3373	27.7493	0.0167	-4.323	-258.8563	28.1346	0.0167	-4.343	-260.0301
第12/60秒	0.2004	15.8874	0.0167	-5.078	-304.0682	23.5197	0.0167	-4.230	-253.2695	23.7921	0.0167	-4.343	-260.0301
第13/60秒	0.2171	10.8406	0.0167	-5.047	-302.2028	18.6992	0.0167	-4.821	-288.6527	19.0215	0.0167	-4.771	-285.6668
第14/60秒	0.2338	5.0461	0.0167	-5.794	-346.9735	13.8476	0.0167	-4.852	-290.5150	14.2202	0.0167	-4.801	-287.4980
第15/60秒	0.2505	0.2485	0.0167	-4.798	-287.2792	8.7472	0.0167	-5.100	-305.4132	9.1132	0.0167	-5.107	-305.8100
第16/60秒						3.3358	0.0167	-5.411	-324.0359	3.7615	0.0167	-5.352	-320.4596
第17/60秒						0.9411	0.0167	-2.395	-143.3952	1.9267	0.0167	-1.835	-109.8719

時間/距離	時間(秒)	4號鋼珠	時間變化 $\Delta t(\text{sec})$	位移變化 $\Delta y(\text{cm})$	落下速率 (cm/s)	5號鋼珠	時間變化 $\Delta t(\text{sec})$	位移變化 $\Delta y(\text{cm})$	落下速率 (cm/s)	6號鋼珠	時間變化 $\Delta t(\text{sec})$	位移變化 $\Delta y(\text{cm})$	落下速率 (cm/s)
第 0/60秒	-	60.0000				60.0000				60.0000			
第 1/60秒	0.0167	58.6196	0.0167	-1.380	-82.6572	58.6394	0.0167	-1.361	-81.4707	58.1370	0.0167	-1.863	-111.5569
第 2/60秒	0.0334	57.3926	0.0167	-1.227	-73.4731	57.1428	0.0167	-1.497	-89.6177	55.9290	0.0167	-2.208	-132.2156
第 3/60秒	0.0501	55.4908	0.0167	-1.902	-113.8832	55.2380	0.0167	-1.905	-114.0589	53.5830	0.0167	-2.346	-140.4790
第 4/60秒	0.0668	53.3129	0.0167	-2.178	-130.4147	53.3333	0.0167	-1.905	-114.0589	51.0300	0.0167	-2.553	-152.8743
第 5/60秒	0.0835	50.8589	0.0167	-2.454	-146.9461	50.6802	0.0167	-2.653	-158.8678	48.1320	0.0167	-2.898	-173.5329
第 6/60秒	0.1002	47.8527	0.0167	-3.006	-180.0090	48.0951	0.0167	-2.585	-154.7943	44.7510	0.0167	-3.381	-202.4551
第 7/60秒	0.1169	44.9079	0.0167	-2.945	-176.3353	45.1699	0.0167	-2.925	-175.1619	41.3700	0.0167	-3.381	-202.4551
第 8/60秒	0.1336	41.7177	0.0167	-3.190	-191.0299	41.8365	0.0167	-3.333	-199.6031	37.5060	0.0167	-3.864	-231.3772
第 9/60秒	0.1503	38.1594	0.0167	-3.558	-213.0719	38.5712	0.0167	-3.265	-195.5296	33.6420	0.0167	-3.864	-231.3772
第10/60秒	0.1670	34.6931	0.0167	-3.466	-207.5614	34.8977	0.0167	-3.674	-219.9708	29.3640	0.0167	-4.278	-256.1677
第11/60秒	0.1837	30.4907	0.0167	-4.202	-251.6452	30.9520	0.0167	-3.946	-236.2649	24.8790	0.0167	-4.485	-268.5629
第12/60秒	0.2004	26.1962	0.0167	-4.295	-257.1557	26.5983	0.0167	-4.354	-260.7061	20.3940	0.0167	-4.485	-268.5629
第13/60秒	0.2171	21.7790	0.0167	-4.417	-264.5030	22.1764	0.0167	-4.422	-264.7796	15.2190	0.0167	-5.175	-309.8802
第14/60秒	0.2338	17.0857	0.0167	-4.693	-281.0344	17.5505	0.0167	-4.626	-277.0002	10.0440	0.0167	-5.175	-309.8802
第15/60秒	0.2505	12.4844	0.0167	-4.601	-275.5240	12.4484	0.0167	-5.102	-305.5150	4.5240	0.0167	-5.520	-330.5389
第16/60秒	0.2672	7.2083	0.0167	-5.276	-315.9341	7.2783	0.0167	-5.170	-309.5885	0.7980	0.0167	-3.726	-223.1138
第17/60秒	0.2839	1.6562	0.0167	-5.552	-332.4656	1.9721	0.0167	-5.306	-317.7356				



圖十二 鋼珠於離地 60 公分之空中落下其速率與時間關係圖

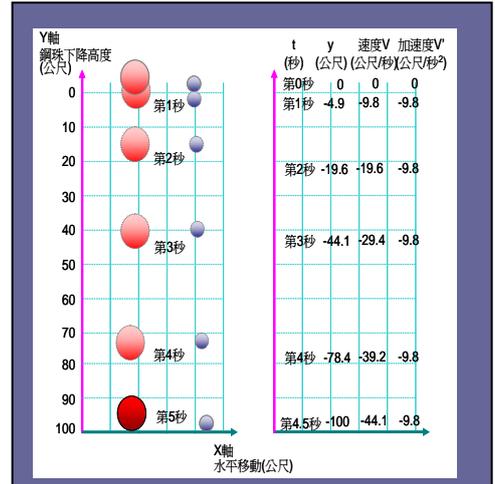
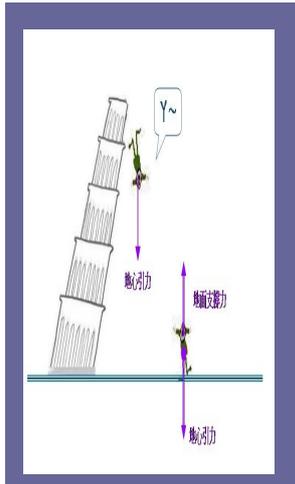
(二)實驗結果

- 1.從高處墜落的鋼珠，於剛開始掉落時每 1/60 秒落下的距離較小，離地愈近時有加速降落的情形。不同質量的鋼珠從相同高度落下的速度較無明顯差異，不同質量的鋼珠幾乎同時著地，其落地的時間也無明顯差異。
- 2.分析鋼珠落下位置、下降距離與時間關係的曲線圖，意味著加速運動。從圖十及圖十一所示，由於鋼珠球體於落下時正在加速，鋼珠落下的距離隨時間增加而增加，所以曲線成彎曲。

- 分析鋼珠落下速率與時間的關係圖，意味著加速降落的情形。從圖十二所示，從圖形上是一直線(對角線)，對角線上的速度隨時間增加而增加，意味著加速運動。鋼珠從零速度到完成較大的負速度(因下降關係所以是負的)，也就是說鋼珠朝著向下的方向不斷的加速推進。
- 同質量的鋼珠從不同高度降落時，墜落高度較高時落下的時間較久，速度愈快。
- 鋼珠從空中墜落時，無論重力大小如何，其落下的方向總是豎直向下的。

(三)實驗啟發與反思

高空墜落時為何會有加速降落的情形呢？我們查得的資料顯示，物體從空中靜止墜落時，會受到地心引力的作用，所受的這個力--地心引力會給地球上同一高度的物體相同的加速度，這就是重力加速度，它會讓你以大約  $9.8 \text{ m/s}^2$  或  $980 \text{ cm/s}^2$  的速度一直加速。



圖十三 物體墜落的重力加速度圖示

【實驗一之二】輕重不同的鋼珠從水中落下，觀察及測量鋼珠於水中掉落時速度的變化。

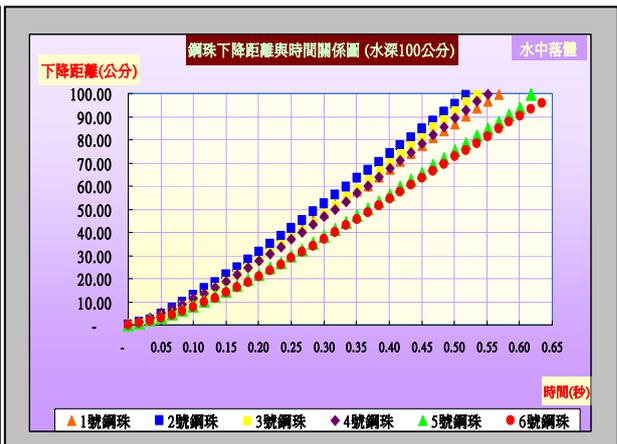
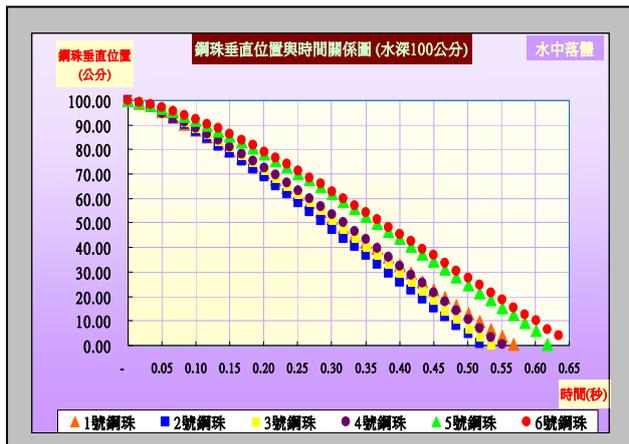
(一)實驗記錄：(詳細數據詳見附錄)

表五 鋼珠於水深100公分離地100公分處落下位置與時間變化

時間/距離	時間(秒)	1號鋼珠	2號鋼珠	3號鋼珠	4號鋼珠	5號鋼珠	6號鋼珠
第0/60秒	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
第1/60秒	0.0167	98.91	98.81	98.90	98.79	99.08	99.33
第2/60秒	0.0333	97.86	97.67	97.84	96.99	97.98	98.33
第3/60秒	0.0500	95.39	95.44	96.27	94.92	96.78	97.04
第4/60秒	0.0668	92.92	92.69	94.07	93.03	95.35	95.65
第5/60秒	0.0835	90.45	90.26	91.26	91.18	93.70	94.03
第6/60秒	0.1002	87.89	87.27	88.64	88.62	91.77	92.26
第7/60秒	0.1169	85.18	84.42	86.20	86.28	89.74	90.26
第8/60秒	0.1336	82.43	81.52	83.53	83.71	87.58	88.49
第9/60秒	0.1503	79.34	78.39	80.77	81.10	85.37	86.10
第10/60秒	0.1670	76.44	75.40	77.69	78.18	82.98	83.91
第11/60秒	0.1837	73.45	72.12	74.88	75.34	80.54	81.62
第12/60秒	0.2004	70.50	68.65	71.80	72.46	78.15	78.94
第13/60秒	0.2171	67.61	65.09	68.54	69.45	75.48	76.55
第14/60秒	0.2338	64.52	61.76	65.27	66.39	73.04	73.93
第15/60秒	0.2505	61.45	58.30	62.05	63.19	70.19	71.21
第16/60秒	0.2672	58.11	54.73	58.69	59.82	67.48	68.39
第17/60秒	0.2839	54.78	51.17	55.33	56.67	64.67	65.86
第18/60秒	0.3006	51.74	47.51	51.61	53.38	61.82	62.90
第19/60秒	0.3173	48.23	43.90	47.93	50.14	58.88	59.89
第20/60秒	0.3340	45.00	40.34	44.16	46.68	55.84	57.17
第21/60秒	0.3507	42.29	36.78	40.66	43.17	52.80	54.26
第22/60秒	0.3674	39.82	33.22	37.03	39.79	49.68	51.39
第23/60秒	0.3841	36.16	29.70	33.25	36.01	46.69	48.33
第24/60秒	0.4008	32.65	26.09	29.62	32.46	43.70	45.33
第25/60秒	0.4175	29.42	22.53	25.89	28.95	40.52	42.37
第26/60秒	0.4342	26.09	18.97	22.08	25.35	37.39	39.41
第27/60秒	0.4509	22.67	15.36	18.53	21.57	34.27	36.68
第28/60秒	0.4676	19.30	11.75	14.16	17.92	31.09	33.48
第29/60秒	0.4843	16.35	8.28	10.90	14.32	28.01	30.48
第30/60秒	0.5010	12.98	4.67	7.03	10.68	24.70	27.42
第31/60秒	0.5177	9.66	0.73	3.45	7.08	21.62	24.70
第32/60秒	0.5344	6.57		0.41	3.34	18.44	21.50
第33/60秒	0.5511	3.53			0.33	15.36	18.68
第34/60秒	0.5678	0.49				12.46	15.48
第35/60秒	0.5845					9.38	12.43
第36/60秒	0.6012					6.21	9.99
第37/60秒	0.6179					0.50	6.65
第38/60秒	0.6346						4.07
第39/60秒	0.6513						0.92

表六 鋼珠於水深100公分離地100公分處落下距離與時間圖

時間/距離	時間(秒)	1號鋼珠	2號鋼珠	3號鋼珠	4號鋼珠	5號鋼珠	6號鋼珠
第0/60秒	0.0167	1.09	1.19	1.01	1.22	0.92	0.67
第1/60秒	0.0333	2.14	2.33	2.16	3.02	2.02	1.67
第2/60秒	0.0500	4.61	4.56	3.73	5.09	3.22	2.96
第3/60秒	0.0668	7.08	7.32	5.93	6.98	4.65	4.35
第4/60秒	0.0835	9.55	9.74	8.74	8.82	6.30	5.97
第5/60秒	0.1002	12.11	12.73	11.36	11.39	8.23	7.74
第6/60秒	0.1169	14.82	15.58	13.80	13.73	10.26	9.74
第7/60秒	0.1336	17.58	18.48	16.47	16.29	12.42	11.51
第8/60秒	0.1503	20.66	21.61	19.23	18.90	14.63	13.90
第9/60秒	0.1670	23.56	24.61	22.31	21.83	17.02	16.09
第10/60秒	0.1837	26.55	27.88	25.12	24.66	19.46	18.38
第11/60秒	0.2004	29.50	31.35	28.20	27.54	21.85	21.06
第12/60秒	0.2171	32.40	34.91	31.46	30.56	24.52	23.45
第13/60秒	0.2338	35.48	38.24	34.73	33.62	26.96	26.07
第14/60秒	0.2505	38.57	41.71	37.95	36.81	29.81	28.79
第15/60秒	0.2672	41.90	45.27	41.31	40.19	32.52	31.61
第16/60秒	0.2839	45.22	48.83	44.67	43.34	35.33	34.14
第17/60秒	0.3006	48.26	52.49	48.39	46.62	38.18	37.10
第18/60秒	0.3173	51.78	56.10	52.07	49.86	41.12	40.11
第19/60秒	0.3340	55.01	59.66	55.84	53.33	44.16	42.83
第20/60秒	0.3507	57.71	63.22	59.34	56.84	47.20	45.74
第21/60秒	0.3674	60.18	66.79	62.97	60.21	50.32	48.61
第22/60秒	0.3841	63.84	70.30	66.75	63.99	53.31	51.67
第23/60秒	0.4008	67.36	73.91	70.38	67.55	56.30	54.67
第24/60秒	0.4175	70.59	77.47	74.11	71.06	59.48	57.63
第25/60秒	0.4342	73.91	81.04	77.92	74.66	62.61	60.59
第26/60秒	0.4509	77.33	84.65	81.47	78.44	65.73	63.32
第27/60秒	0.4676	80.70	88.26	85.84	82.08	68.91	66.52
第28/60秒	0.4843	83.65	91.72	89.10	85.64	71.99	69.52
第29/60秒	0.5010	87.02	95.33	92.07	89.33	75.30	72.58
第30/60秒	0.5177	90.35	99.28	96.55	92.93	78.38	75.30
第31/60秒	0.5344	93.43		99.59	96.66	81.56	78.50
第32/60秒	0.5511	96.47			99.68	84.64	81.32
第33/60秒	0.5678	99.51				87.54	84.52
第34/60秒	0.5845					90.62	87.57
第35/60秒	0.6012					93.79	90.01
第36/60秒	0.6179					96.95	93.35
第37/60秒	0.6346						95.93
第38/60秒	0.6513						99.08



圖十四 鋼珠於水深100公分離地100公分處落下位置與時間變化

圖十五 鋼珠於水深100公分離地100公分處落下距離與時間關係

表七 鋼珠於水深100公分離地100公分處落下其速率之變化

時間/距離	時間(秒)	1號鋼珠	時間變化 $\Delta t(\text{sec})$	位移變化 $\Delta y(\text{cm})$	落下速率 (cm/s)	2號鋼珠	時間變化 $\Delta t(\text{sec})$	位移變化 $\Delta y(\text{cm})$	落下速率 (cm/s)	3號鋼珠	時間變化 $\Delta t(\text{sec})$	位移變化 $\Delta y(\text{cm})$	落下速率 (cm/s)
第 0/60秒	-	100.0000				100.0000				100.0000			
第 1/60秒	0.0167	98.9075	0.0167	-1.093	65.4192	98.8125	0.0167	-1.188	71.1078	98.9880	0.0167	-1.012	60.5988
第 2/60秒	0.0334	97.8625	0.0167	-1.045	62.5749	97.6725	0.0167	-1.140	68.2635	97.8380	0.0167	-1.150	68.8623
第 3/60秒	0.0501	95.3925	0.0167	-2.470	147.9042	95.4400	0.0167	-2.233	133.6826	96.2740	0.0167	-1.564	93.6527
第 4/60秒	0.0668	92.9225	0.0167	-2.470	147.9042	92.6850	0.0167	-2.755	164.9701	94.0660	0.0167	-2.208	132.2156
第 5/60秒	0.0835	90.4525	0.0167	-2.470	147.9042	90.2625	0.0167	-2.423	145.0599	91.2600	0.0167	-2.806	168.0240
第 6/60秒	0.1002	87.8875	0.0167	-2.565	153.5928	87.2700	0.0167	-2.993	179.1916	88.6380	0.0167	-2.622	157.0060
第 7/60秒	0.1169	85.1800	0.0167	-2.708	162.1257	84.4200	0.0167	-2.850	170.6587	86.2000	0.0167	-2.438	145.9880
第 8/60秒	0.1336	82.4250	0.0167	-2.755	164.9701	81.5225	0.0167	-2.898	173.5030	83.5320	0.0167	-2.668	159.7605
第 9/60秒	0.1503	79.3375	0.0167	-3.087	184.8802	78.3875	0.0167	-3.135	187.7246	80.7720	0.0167	-2.760	165.2695
第 10/60秒	0.1670	76.4400	0.0167	-2.898	173.5030	75.3950	0.0167	-2.993	179.1916	77.6900	0.0167	-3.082	184.5509
第 11/60秒	0.1837	73.4475	0.0167	-2.992	179.1916	72.1175	0.0167	-3.277	196.2575	74.8840	0.0167	-2.806	168.0240
第 12/60秒	0.2004	70.5025	0.0167	-2.945	176.3473	68.6500	0.0167	-3.468	207.6347	71.8020	0.0167	-3.082	184.5509
第 13/60秒	0.2171	67.6050	0.0167	-2.897	173.5030	65.0875	0.0167	-3.563	213.3234	68.5360	0.0167	-3.266	195.5689
第 14/60秒	0.2338	64.5175	0.0167	-3.088	184.8802	61.7625	0.0167	-3.325	199.1018	65.2700	0.0167	-3.266	195.5689
第 15/60秒	0.2505	61.4300	0.0167	-3.088	184.8802	58.2950	0.0167	-3.468	207.6347	62.0500	0.0167	-3.220	192.8144
第 16/60秒	0.2672	58.1050	0.0167	-3.325	199.1018	54.7325	0.0167	-3.563	213.3234	58.6920	0.0167	-3.358	201.0778
第 17/60秒	0.2839	54.7800	0.0167	-3.325	199.1018	51.1700	0.0167	-3.563	213.3234	55.3340	0.0167	-3.358	201.0778
第 18/60秒	0.3006	51.7400	0.0167	-3.040	182.0359	47.5125	0.0167	-3.658	219.0120	51.6080	0.0167	-3.726	223.1138
第 19/60秒	0.3340	48.2250	0.0334	-3.515	105.2395	43.9025	0.0167	-3.610	216.1677	47.9280	0.0167	-3.680	220.3593
第 20/60秒	0.3507	44.9950	0.0167	-3.230	193.4132	40.3400	0.0167	-3.563	213.3234	44.1560	0.0167	-3.772	225.8683
第 21/60秒	0.3674	42.2875	0.0167	-2.708	162.1257	36.7775	0.0167	-3.563	213.3234	40.6600	0.0167	-3.496	209.3413
第 22/60秒	0.3841	39.8175	0.0167	-2.470	147.9042	33.2150	0.0167	-3.563	213.3234	37.0260	0.0167	-3.634	217.6048
第 23/60秒	0.4008	36.1600	0.0167	-3.658	219.0120	29.7000	0.0167	-3.515	210.4790	33.2540	0.0167	-3.772	225.8683
第 24/60秒	0.4175	32.6450	0.0167	-3.515	210.4790	26.0900	0.0167	-3.610	216.1677	29.6200	0.0167	-3.634	217.6048
第 25/60秒	0.4342	29.4150	0.0167	-3.230	193.4132	22.5275	0.0167	-3.563	213.3234	25.8940	0.0167	-3.726	223.1138
第 26/60秒	0.4509	26.0900	0.0167	-3.325	199.1018	18.9650	0.0167	-3.563	213.3234	22.0760	0.0167	-3.818	228.6228
第 27/60秒	0.4676	22.6700	0.0167	-3.420	204.7904	15.3550	0.0167	-3.610	216.1677	18.5340	0.0167	-3.542	212.0958
第 28/60秒	0.4843	19.2975	0.0167	-3.373	201.9461	11.7450	0.0167	-3.610	216.1677	14.1640	0.0167	-4.370	261.6766
第 29/60秒	0.5010	16.3525	0.0167	-2.945	176.3473	8.2775	0.0167	-3.468	207.6347	10.8980	0.0167	-3.266	195.5689
第 30/60秒	0.5177	12.9800	0.0167	-3.373	201.9461	4.6675	0.0167	-3.610	216.1677	7.0340	0.0167	-3.864	231.3772
第 31/60秒	0.5344	9.6550	0.0167	-3.325	199.1018	0.7250	0.0167	-3.942	195.949	3.4460	0.0167	-3.588	235.5291
第 32/60秒	0.5511	6.5675	0.0167	-3.088	184.8802					0.4100	2.0167	-3.036	1.5054
第 33/60秒	0.5678	3.5275	0.0167	-3.040	182.0359								

時間/距離	時間(秒)	4號鋼珠	時間變化 $\Delta t(\text{sec})$	位移變化 $\Delta y(\text{cm})$	落下速率 (cm/s)	5號鋼珠	時間變化 $\Delta t(\text{sec})$	位移變化 $\Delta y(\text{cm})$	落下速率 (cm/s)	6號鋼珠	時間變化 $\Delta t(\text{sec})$	位移變化 $\Delta y(\text{cm})$	落下速率 (cm/s)
第 0/60秒	-	100.0000				100.0000				100.0000			
第 1/60秒	0.0167	98.7850	0.0167	-1.215	72.7545	99.0800	0.0167	-0.920	55.0898	99.3315	0.0167	-0.668	40.0299
第 2/60秒	0.0334	96.9850	0.0167	-1.800	107.7844	97.9760	0.0167	-1.104	66.1078	98.3288	0.0167	-1.003	60.0449
第 3/60秒	0.0501	94.9150	0.0167	-2.070	123.9521	96.7800	0.0167	-1.196	71.6168	97.0395	0.0167	-1.289	77.2006
第 4/60秒	0.0668	93.0250	0.0167	-1.890	113.1737	95.3540	0.0167	-1.426	85.3892	95.6548	0.0167	-1.385	82.9192
第 5/60秒	0.0835	91.1800	0.0167	-1.845	110.4790	93.6980	0.0167	-1.656	99.1617	94.0313	0.0167	-1.624	97.2156
第 6/60秒	0.1002	88.6150	0.0167	-2.565	153.5928	91.7660	0.0167	-1.939	115.6886	92.2645	0.0167	-1.767	105.7934
第 7/60秒	0.1169	86.2750	0.0167	-2.340	140.1198	89.7420	0.0167	-2.024	121.1976	90.2590	0.0167	-2.006	120.0898
第 8/60秒	0.1336	83.7100	0.0167	-2.565	153.5928	87.5800	0.0167	-2.162	129.4611	88.4923	0.0167	-1.767	105.7934
第 9/60秒	0.1503	81.1000	0.0167	-2.610	156.2874	85.3720	0.0167	-2.208	132.2156	86.1048	0.0167	-2.388	142.9641
第 10/60秒	0.1670	78.1750	0.0167	-2.925	175.1497	82.9800	0.0167	-2.392	143.2335	83.9083	0.0167	-2.197	131.5269
第 11/60秒	0.1837	75.3400	0.0167	-2.835	169.7605	80.5420	0.0167	-2.438	145.9880	81.6163	0.0167	-2.292	137.2455
第 12/60秒	0.2004	72.4600	0.0167	-2.880	172.4551	78.1500	0.0167	-2.392	143.2335	78.9423	0.0167	-2.674	160.1198
第 13/60秒	0.2171	69.4450	0.0167	-3.015	180.5389	75.4820	0.0167	-2.668	159.7605	76.5548	0.0167	-2.388	142.9641
第 14/60秒	0.2338	66.3850	0.0167	-3.060	183.2335	73.0440	0.0167	-2.438	145.9880	73.9285	0.0167	-2.626	157.2605
第 15/60秒	0.2505	63.1900	0.0167	-3.195	191.3174	70.1920	0.0167	-2.852	170.7784	71.2068	0.0167	-2.722	162.9790
第 16/60秒	0.2672	59.8150	0.0167	-3.375	202.0958	67.4780	0.0167	-2.714	162.8180	68.8895	0.0167	-2.817	168.6976
第 17/60秒	0.2839	56.6650	0.0167	-3.150	188.6228	64.6720	0.0167	-2.806	168.0240	65.8588	0.0167	-2.531	151.5419
第 18/60秒	0.3006	53.3800	0.0167	-3.285	196.7066	61.8200	0.0167	-2.852	170.7784	62.8983	0.0167	-2.961	177.2754
第 19/60秒	0.3173	50.1400	0.0167	-3.240	194.0120	58.8760	0.0167	-2.944	176.2874	59.8900	0.0167	-3.008	180.1347
第 20/60秒	0.3340	46.6750	0.0167	-3.465	207.4850	55.8400	0.0167	-3.036	181.7964	57.1683	0.0167	-2.722	162.9790
第 21/60秒	0.3507	43.1650	0.0167	-3.510	210.1796	52.8040	0.0167	-3.036	181.7964	54.2555	0.0167	-2.913	174.4162
第 22/60秒	0.3674	39.7900	0.0167	-3.375	202.0958	49.6760	0.0167	-3.128	187.3054	51.3905	0.0167	-2.865	171.5569
第 23/60秒	0.3841	36.0100	0.0167	-3.780	226.3473	46.6860	0.0167	-2.990	179.0419	48.3345	0.0167	-3.056	182.9940
第 24/60秒	0.4008	32.4550	0.0167	-3.555	212.8743	43.6960	0.0167	-2.990	179.0419	45.3263	0.0167	-3.008	180.1347
第 25/60秒	0.4175	28.9450	0.0167	-3.510	210.1796	40.5220	0.0167	-3.174	190.0599	42.3658	0.0167	-2.961	177.2754
第 26/60秒	0.4342	25.3450	0.0167	-3.600	215.5689	37.3940	0.0167	-3.128	187.3054	39.4053	0.0167	-2.961	177.2754
第 27/60秒	0.4509	21.5650	0.0167	-3.780	226.3473	34.2660	0.0167	-3.128	187.3054	36.6835	0.0167	-2.722	162.9790
第 28/60秒	0.4676	17.9200	0.0167	-3.645	218.2635	31.0920	0.0167	-3.174	190.0599	33.4843	0.0167	-3.199	191.5719
第 29/60秒	0.4843	14.3650	0.0167	-3.555	212.8743	28.0100	0.0167	-3.082	184.5509	30.4760	0.0167	-3.008	180.1347
第 30/60秒	0.5010	10.6750	0.0167	-3.690	220.9581	24.6980	0.0167	-3.312	198.3234	27.4200	0.0167	-3.056	182.9940
第 31/60秒	0.5177	7.0750	0.0167	-3.600	215.5689	21.6160	0.0167	-3.082	184.5509	24.6983	0.0167	-2.722	162.9790
第 32/60秒	0.5344	3.3400	0.0167	-3.735	223.6527	18.4420	0.0167	-3.174	190.0599	21.4990	0.0167	-3.199	191.5719
第 33/60秒	0.5511	0.3250	0.0167	-3.015	180.5389	15.3600	0.0167	-3.082	184.5509	18.6818	0.0167	-2.817	168.6976
第 34/60秒	0.5678					12.4620	0.0167	-2.898	173.5329	15.4825	0.0167	-3.199	191.5719
第 35/60秒	0.5845					9.3800	0.0167	-3.082	184.5509				

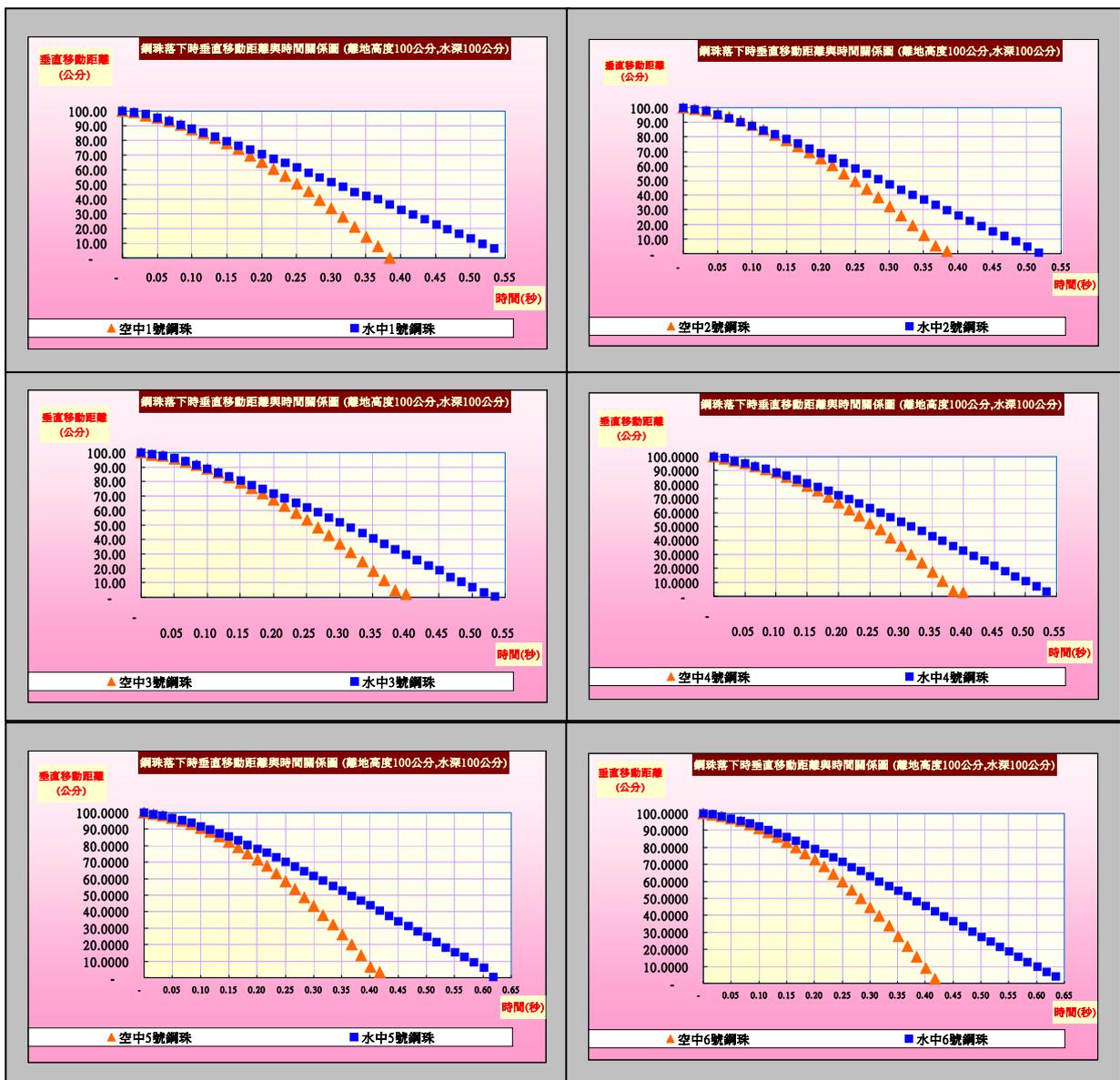
(二)實驗結果

- 1.水中墜落的鋼珠，剛開始落下時，每 1/60 秒落下的距離較小，離地愈近時有加速降落的情形。
- 2.由於鋼珠球體於落下時正在加速，而且鋼珠落下的距離隨時間增加而增加，所以曲線成彎曲。
- 3.不同質量的鋼珠落地的時間有差異，較輕的 5 號及 6 號鋼珠落地時間較久。

研究主題一之”空中與水中落體墜落時速度變化”之綜合分析

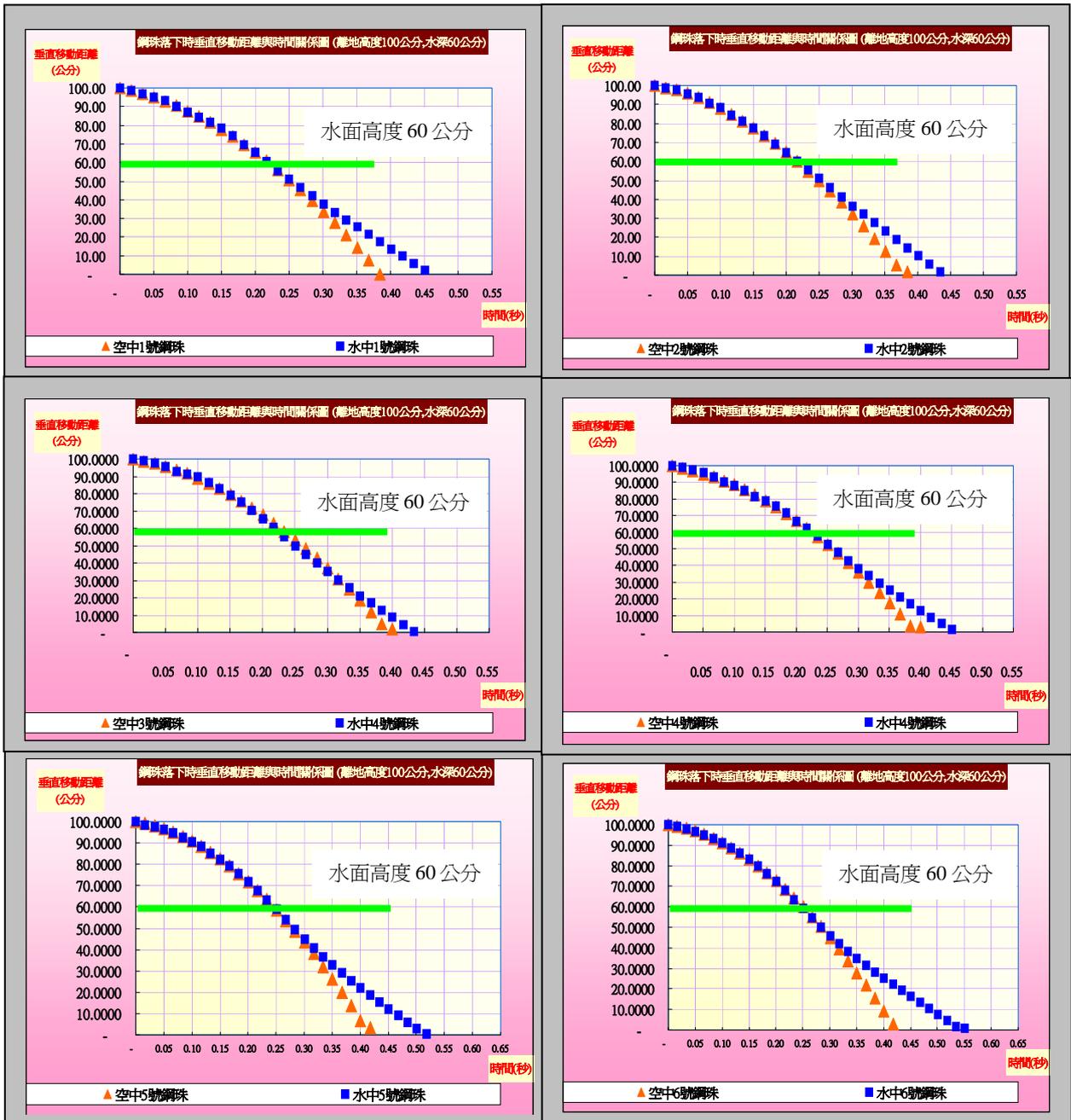
(一)實驗記錄：(詳細數據詳見附錄)

【鋼珠從水槽口(離地高度 100 公分)落下，水槽內注水之水量深 100 公分】



圖十六 空中落體與水中落體垂直移動距離與時間比較圖 (墜落高度 100 公分,注水量水深 100 公分)

【鋼珠從水槽口(離地高度 100 公分)落下，水槽內注水之水量深 60 公分】



圖十七 空中落體與水中落體垂直移動距離與時間比較圖 (墜落高度 100 公分，注水量水深 60 公分)

(二)實驗結果

- 1.比較鋼珠從空中落下與水中落下的垂直移動距離與時間的關係，同質量的鋼珠從同一高處落下，於水中落底的時間較空中落地的時間久，水中落體每 1/60 秒落下的加速度現象較空中落體緩和，所以曲線較平坦；空中落體則因為加速度情形較明顯，所以曲線較陡峭。
- 2.當下墜高度 100 公分且水槽注水量深度 60 公分，同質量鋼珠從管口 100 公分處施放時，空中落體與水中落體的速度較無明顯差異，但是當鋼珠於離地 60 公分處落水且撞擊到水面時，會破壞水的表面張力且受到周圍阻力的影響，使得降落的速度變慢，水中落體的曲線不像空中落體一樣一直為遞減彎曲的，於鋼珠碰觸到水面後因速度變慢而呈現 S 型反轉的方向變化。

## 二、觀察及測量物體墜落時瞬間衝撞力的變化

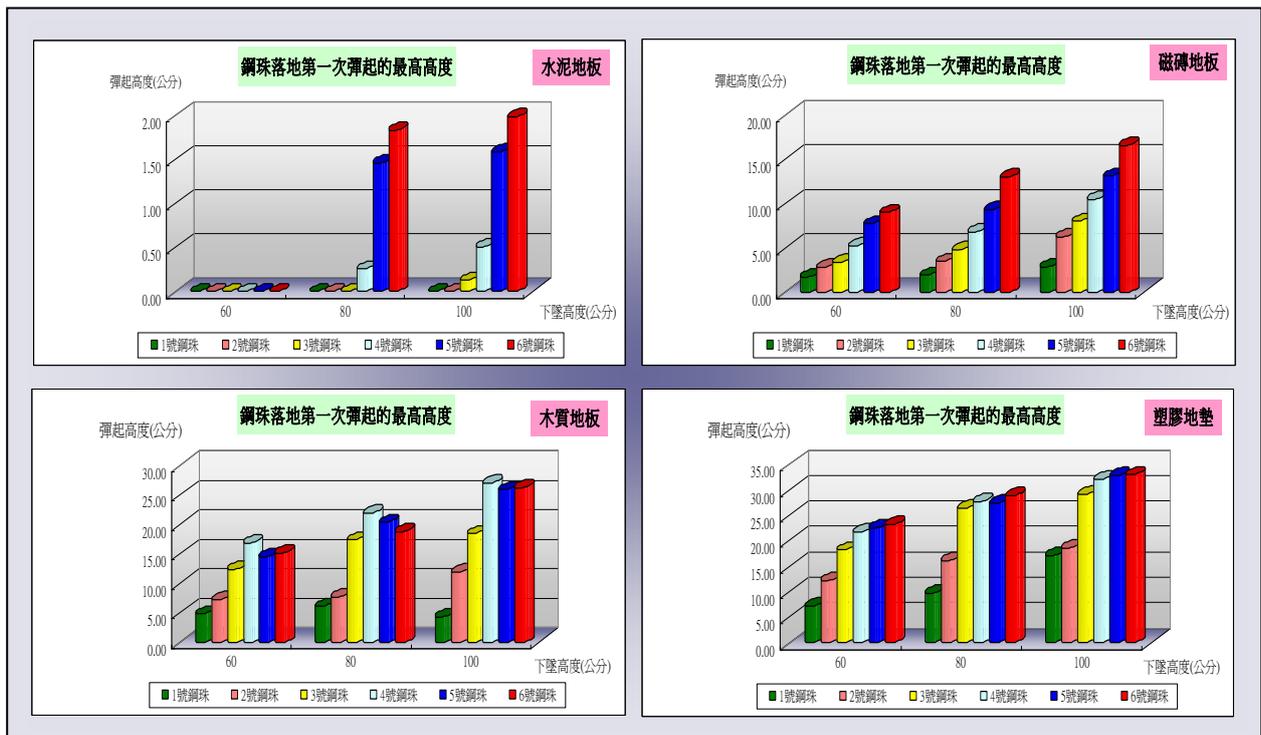
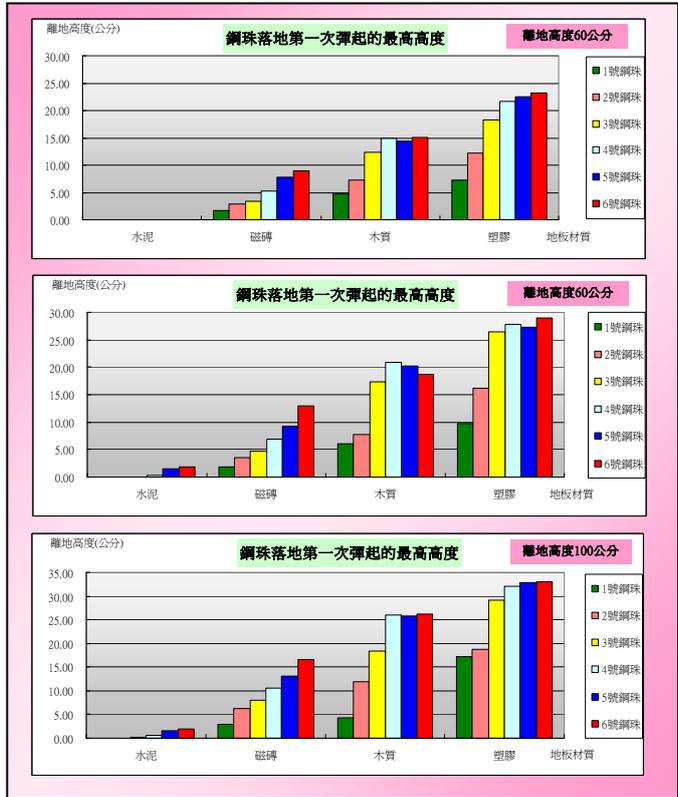
### 【實驗二之一】鋼珠球體彈跳高度測量法

(一)實驗記錄：(詳細數據詳見附錄)

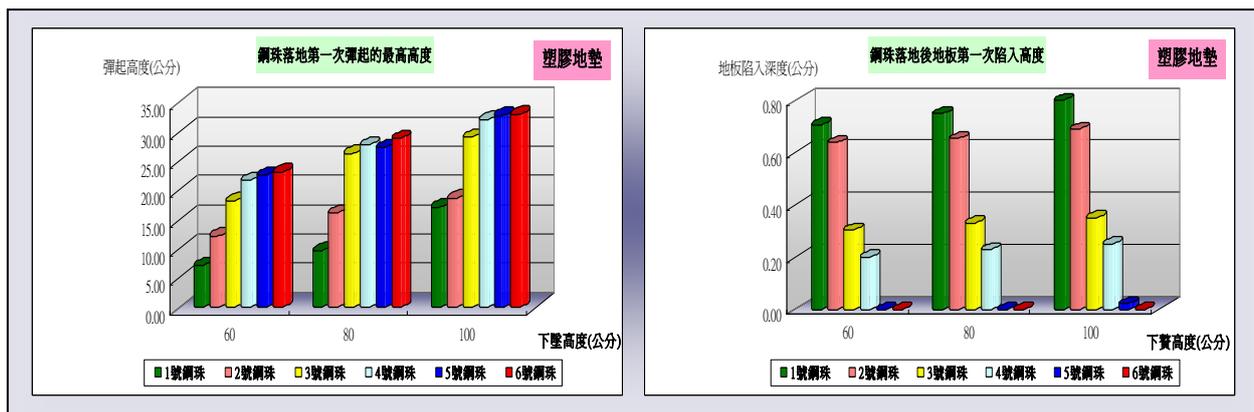
表八 鋼珠落地第一次彈起的最高高度

離地高度60公分						
彈起最高高度	1號鋼珠	2號鋼珠	3號鋼珠	4號鋼珠	5號鋼珠	6號鋼珠
水泥地板	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
磁磚地板	1.75	2.84	3.38	5.23	7.73	9.03
木質地板	4.80	7.22	12.39	14.87	14.49	15.11
塑膠地墊	7.22	12.28	18.23	21.73	22.62	23.21
離地高度80公分						
彈起最高高度	1號鋼珠	2號鋼珠	3號鋼珠	4號鋼珠	5號鋼珠	6號鋼珠
水泥地板	0.00	0.00	0.00	0.26	1.47	1.84
磁磚地板	1.94	3.50	4.79	6.85	9.35	13.00
木質地板	6.10	7.70	17.33	20.85	20.29	18.79
塑膠地墊	9.75	16.16	26.41	27.81	27.38	28.95
離地高度100公分						
彈起最高高度	1號鋼珠	2號鋼珠	3號鋼珠	4號鋼珠	5號鋼珠	6號鋼珠
水泥地板	0.00	0.00	0.13	0.51	1.59	1.99
磁磚地板	2.90	6.28	8.02	10.52	13.13	16.61
木質地板	4.29	11.89	18.40	25.97	25.85	26.17
塑膠地墊	17.17	18.69	29.16	32.11	32.87	33.00

圖十八 鋼珠落地彈起高度與地面材質關係



圖十九 鋼珠落地彈起的最高高度比較圖



圖二十 以塑膠地墊為例，鋼珠落地彈跳高度與地板陷入深度比較圖

## (二)實驗結果

### 1.墜落高度相同時，鋼珠的質量與落地彈跳的高度有關

鋼珠從同一高度落下，不同質量的鋼珠落地後第一次彈起的高度不同，反彈高度從較低到較高的順序為：

1 號鋼珠 < 2 號鋼珠 < 3 號鋼珠 < 4 號鋼珠 < 5 號鋼珠 < 6 號鋼珠

### 2.相同質量的鋼珠，墜落高度與落地彈跳的高度有關

相同質量的鋼珠從不同高度落下，落地後第一次彈起的高度不同，反彈高度從較低到較高的順序為：

60 公分高處墜落 < 80 公分高處墜落 < 100 公分高處墜落

### 3.鋼珠落地，對地面的施力與地面材質的軟硬程度有關

同一高度下，鋼珠掉落於不同材質的地板其第一次彈起的高度不同，反彈高度從較低到較高的順序為：

水泥地板 < 磁磚地板 < 木質地板 < 塑膠地墊

### 4.鋼珠落地，對地面的施力與地面材質下陷的深度有關

①同一高度不同質量的鋼珠掉落於塑膠地墊後地板向下凹陷的深度不同，凹陷深度從較淺到較深的順序為：

6 號鋼珠 < 5 號鋼珠 < 4 號鋼珠 < 3 號鋼珠 < 2 號鋼珠 < 1 號鋼珠

②相同質量的鋼珠從不同高度掉落於塑膠地墊後地板向下凹陷的深度不同，從較淺到較深的順序為：

60 公分高處墜落 < 80 公分高處墜落 < 100 公分高處墜落

## (三)實驗啟發與反思

瞬間衝撞力與鋼珠質量、落地速度及高度的關係

1. 不同質量大小的鋼珠從相同高度靜止落下於地面時，鋼珠落地後彈起，質量較重的鋼珠第一次落地反彈的最高高度較質量輕的鋼珠低。推測鋼珠落地反彈的高度可能決定於地面傳回給鋼珠的剩餘能量多寡。質量體積較大的鋼珠於落地後釋放或損耗較多的能量，對地面施力較大，導致回傳給鋼珠的剩餘能量較少，所以反彈的高度較低。因此，推論同一高度落下的物體愈重，其落地的瞬間衝撞力愈大。
2. 相同質量的鋼珠從不同高度落下時，離地愈高的空中墜落時其落地彈跳的高度較高，可能是因為撞擊瞬間的作用力會受到撞擊地面時的物體質量與速度變化影響，而落地速度與高度有關，鋼珠從較高處落下時速度變化較大，對地面的交互作用力(衝撞力)相對較大。故推論物體落下的離地高度與落地的瞬間衝撞力成正相關。

### 瞬間衝撞力與地板材質的關係

1. 鋼珠掉落到地面上，對地面的施力會和地面材質的軟硬程度有關。
  - ①水泥地板材質較堅硬，受力擠壓時產生形變較少，可能是鋼珠落地時能量損耗較大，碰撞地面的衝擊力較大，加上地面摩擦力，不利於球的反彈；
  - ②磁磚地板堅硬但地板表面光滑，受力後形變雖少但因摩擦力相對較少，所以落地彈起的高度較水泥地板高，而實驗中鋼珠因衝撞力過大，導致磁磚常有龜裂甚至破碎情形；
  - ③木質地板質地不均勻且材料內部有空隙，受力後會有鋼珠撞擊的凹痕，不像水泥及磁磚堅硬，所以鋼珠墜落於木質地板的反彈高度較前者為高；
  - ④塑膠地墊的材質較柔軟且有彈性，一旦受力後雖然容易變形但很快會恢復原狀。我們認為塑膠地墊就像彈簧一樣，會把被鋼珠碰撞(壓)的力暫時儲存起來(藏在被壓扁的材質結構中)，然後在恢復形狀的時後再把它釋放出來，所以傳回給鋼珠的能量較大，彈起的高度距離也較高。
2. 從高樓墜地大難不死與碰地到完全靜止的時間長短有相當大的關係。時間越長，受力越小；時間越短，受力越大。這是為何消防隊救人時，地上都會鋪上一層柔軟充氣墊，還有撐竿跳運動的軟墊，都是為了延長落地時的接觸時間，而且地板材質柔軟且有彈性，其受力後之撞擊力較小。

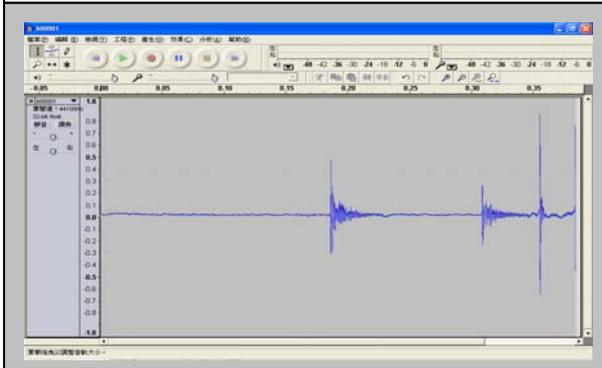
### 【實驗二之二】鋼珠球體衝擊音量測量法

(一)實驗記錄：(詳細數據詳見附錄)

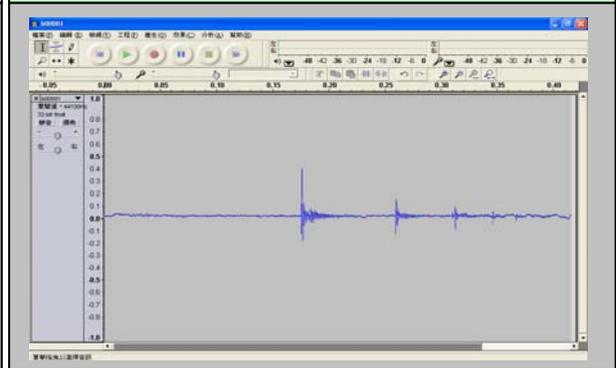
圖形縱軸表示鋼珠撞擊地面的聲音強度，橫軸表示時間



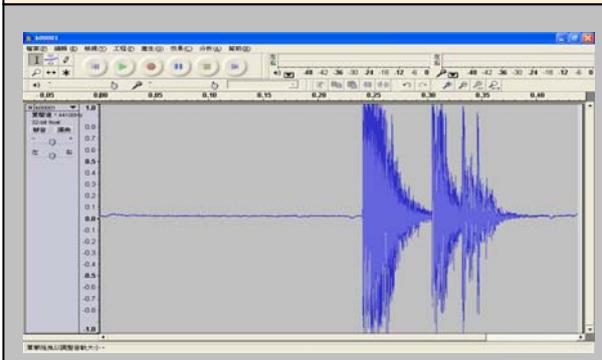
塑膠地墊：6號鋼珠從離地高度140公分落



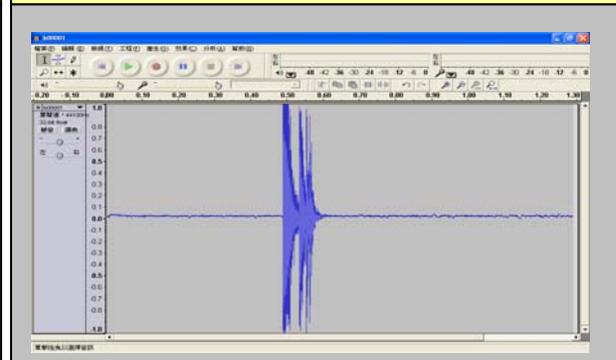
塑膠地墊：6號鋼珠從離地高度60公分落地



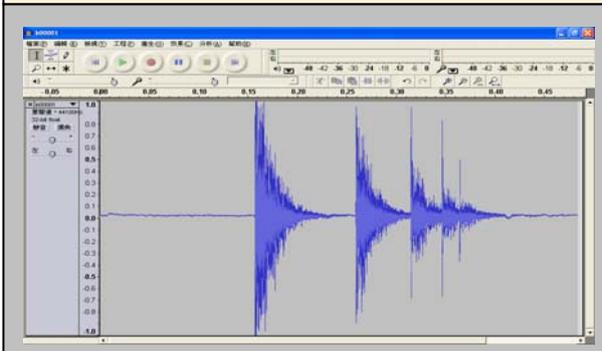
木質地板：1號鋼珠從離地高度140公分落



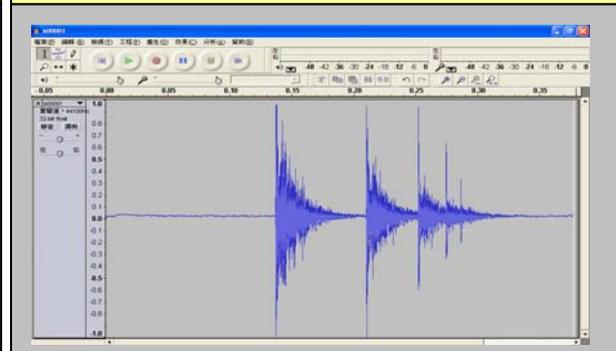
木質地板：1號鋼珠從離地高度60公分落地



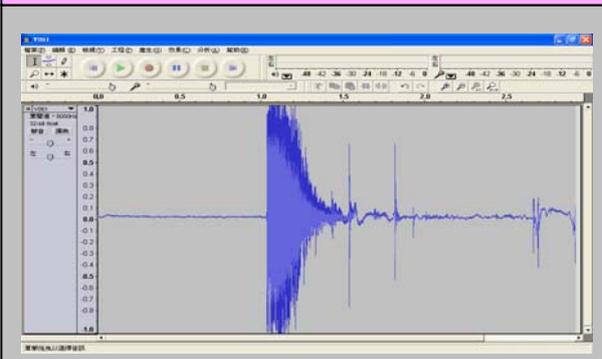
木質地板：6號鋼珠從離地高度140公分落



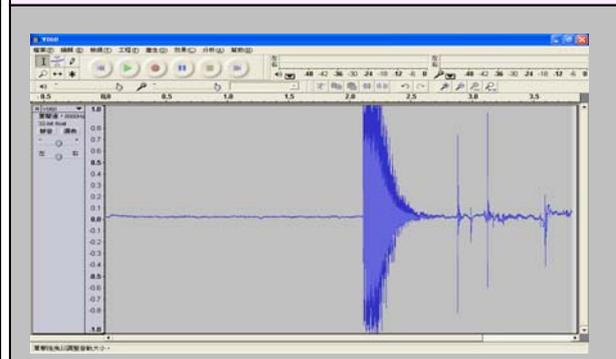
木質地板：6號鋼珠從離地高度60公分落地

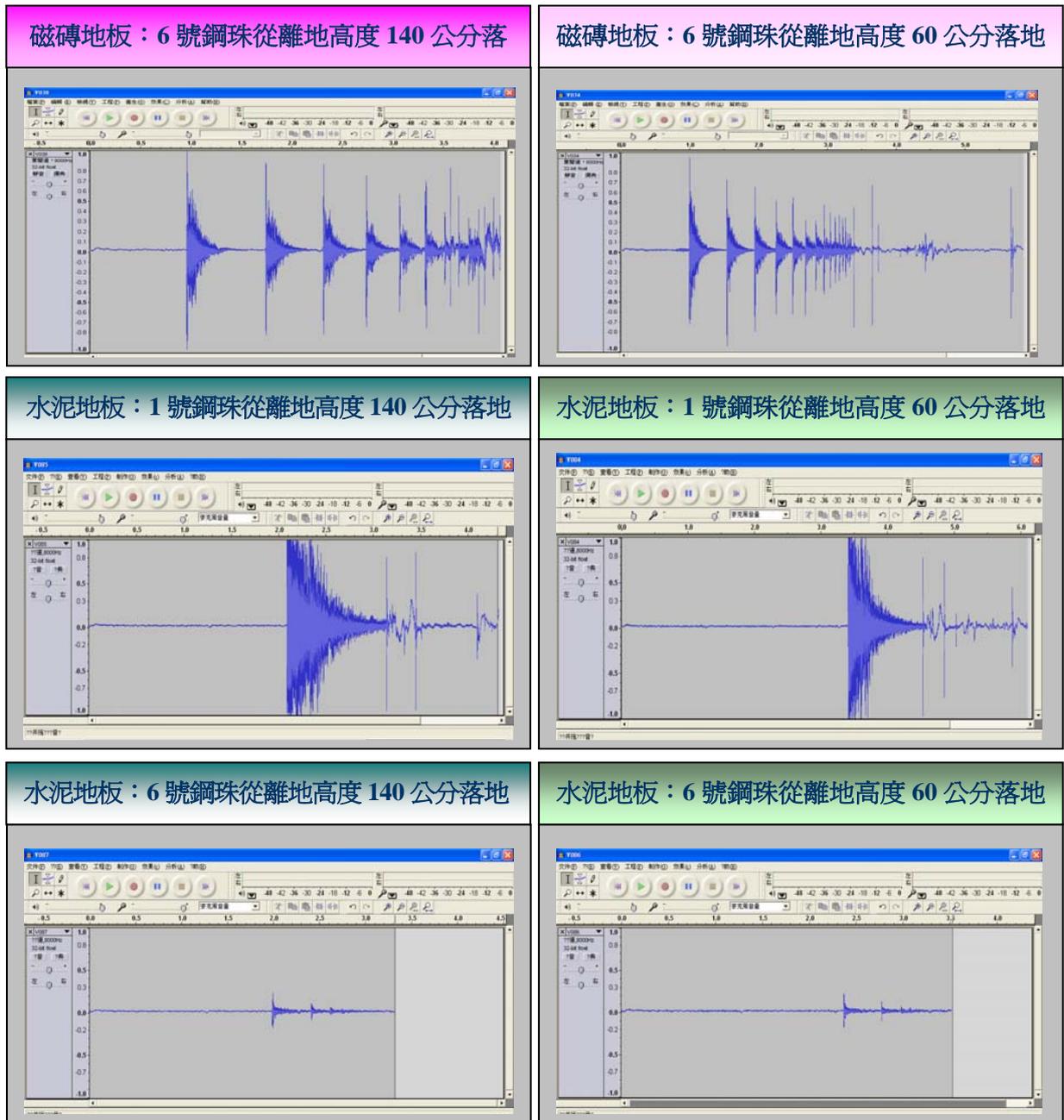


磁磚地板：1號鋼珠從離地高度140公分落



磁磚地板：1號鋼珠從離地高度60公分落地





圖二十一 鋼珠衝撞地面的聲音強弱比較圖

(二)實驗結果

1.墜落高度相同時，鋼珠的質量與落地聲音的強度有關

鋼珠從同一高度落下，不同質量的鋼珠落地後傳遞的聲音強度(大小聲)不同，依聲音強度從小到大的順序為：

6號鋼珠<5號鋼珠<4號鋼珠<3號鋼珠<2號鋼珠<1號鋼珠

2.相同質量的鋼珠，墜落高度與落地聲音的強度有關

相同質量的鋼珠從不同高度落下，落地後傳遞的聲音強度(大小聲)不同，依聲音強度從小到大的順序為：

60公分墜落<80公分墜落<100公分墜落<120公分墜落<140公分墜落

### 3.鋼珠落地，地面傳遞的聲音與地面材質的軟硬程度有關

同一高度下，鋼珠掉落於不同材質的地板其傳遞的聲音強度不同，依聲音強度從小到大的順序為：

塑膠地墊<木質地板<磁磚地板<水泥地板

#### (三)實驗啟發與反思

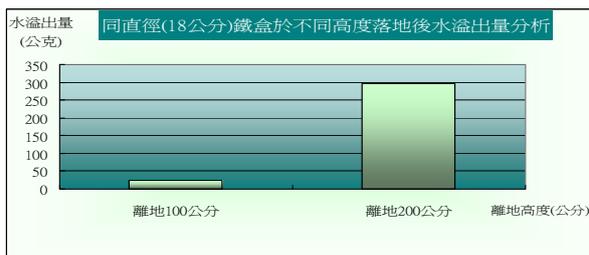
1. 鋼珠落地時，較重的鋼珠落地時釋放的聲音強度較大，推測較重的鋼珠於落地時透過聲音能量的傳遞而釋放，鋼珠落地時對地面施力大時其聲音傳遞的越大，顯示衝撞力越大。所以推論同一高度落下的物體愈重，其落地的瞬間衝撞力愈大。
2. 不同材質的地板傳遞的聲音能量也不同，鋼珠掉落於四種不同的材質中，以塑膠地墊釋出的聲音最小。塑膠地墊因材質為塑膠材料混合色料及粘著劑壓鑄而成，質地不均勻，材料間有孔隙，所以鋼珠與地面接觸時可能是材質及孔隙吸收部份能量而有較好的隔音效果，使得聲音傳遞較小。
3. 鋼珠落地後各次彈跳撞擊地面的聲音強度會隨著時間增加而遞減，而且每次彈跳撞擊聲音的時間間隔愈來愈短，推測是因為鋼珠落地後能量逐次消耗，使得殘留的聲音能量愈來愈少，彈跳的高度也愈來愈低，直到停止。而彈跳撞擊聲音的時間間隔也因為彈跳高度愈來愈低而減少。

### 【實驗二之三】液體及麵粉溢出量測量法

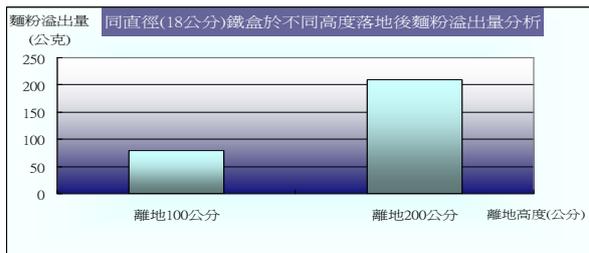
#### (一)實驗記錄

項目	離地高度 100 公分		離地高度 200 公分	
	鐵盒直徑 18 公分	鐵盒直徑 12 公分	鐵盒直徑 18 公分	鐵盒直徑 12 公分
鐵盒空盒之重量	200 公克	100 公克	200 公克	100 公克
鐵盒裝滿水之重量	1135 公克	605 公克	1135 公克	605 公克
落地後的水存留量	1110 公克	385 公克	840 公克	350 公克
落地後的水溢出量	25 公克	220 公克	295 公克	255 公克

項目	離地高度 100 公分		離地高度 200 公分	
	鐵盒直徑 18 公分	鐵盒直徑 12 公分	鐵盒直徑 18 公分	鐵盒直徑 12 公分
鐵盒空盒之重量	200 公克	100 公克	200 公克	100 公克
鐵盒裝滿麵粉之重量	1250 公克	355 公克	1250 公克	355 公克
落地後的麵粉存留量	1170 公克	310 公克	1,040 公克	280 公克
落地後的麵粉溢出量	80 公克	40 公克	210 公克	75 公克



圖二十二 鐵盆內液體溢出量之測量



圖二十三 鐵盆內麵粉溢出量之測量

## (二)實驗結果

- 1.離地愈高的高處落下的鐵盆其存留盆內的水量及麵粉量較少，溢出的水量及麵粉量較多。
- 2.從 200 公分高處落下，大鐵盆溢出的水量及麵粉量較離地 100 公分處落下時多，推論鐵盆從較高處墜地時之衝撞力較大。

### 研究主題二之”物體墜落時瞬間衝撞力的變化”之綜合分析

墜落高度相同時，較重的鋼珠落地彈跳的較低，但落地碰撞聲響較大，反之，較輕的鋼珠落地彈跳的高度較高，而落地碰撞聲響較小，推測可能是鋼珠將所有的能量傳給地面，地面同時將鋼珠給它的能量傳回給鋼珠，有部份能量因摩擦變成熱能消失，有部份轉變成聲能等，剩餘的能量傳回給鋼珠的反彈，彈的越高表示浪費在聲音能量越小；而水量及麵粉的濺射多推測衝撞力道較大所致。

## 三、設計緩衝材料來減緩物體墜落時的破損程度

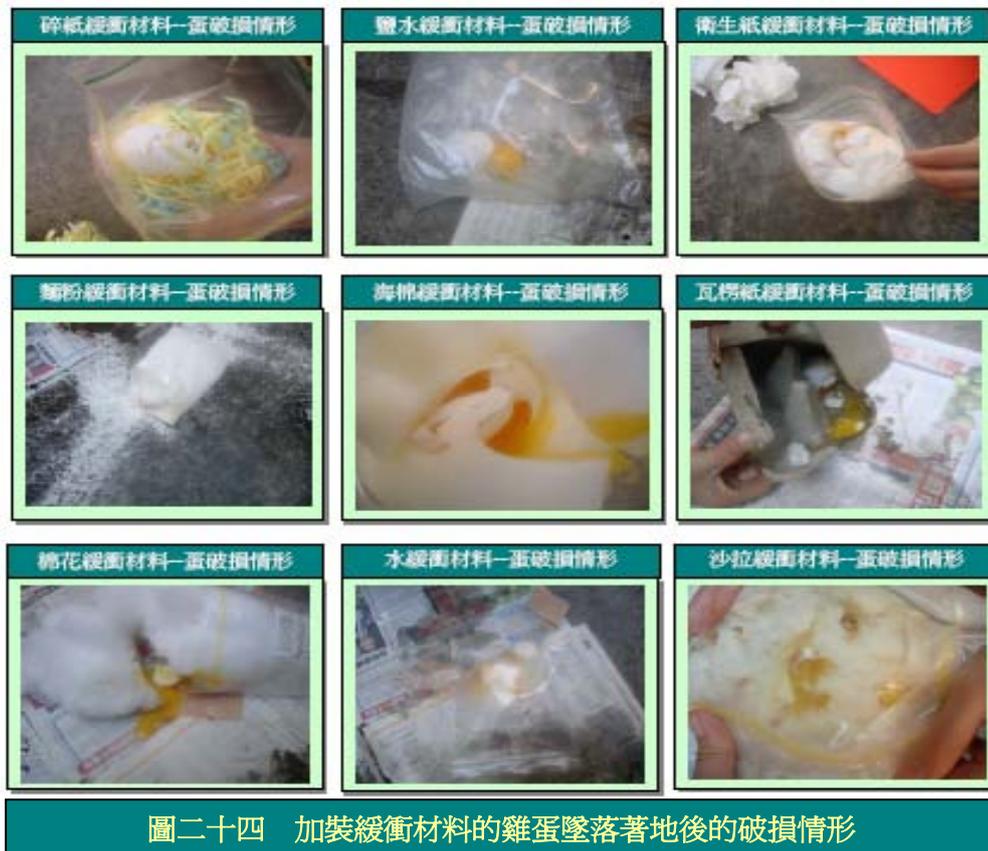
【實驗三之一】設計減緩衝撞力的材料來包裹雞蛋，觀察雞蛋於空中落地時的破裂程度。

### (一)實驗記錄

表十一 加裝緩衝材料的雞蛋著地破損情形

類別	緩衝材料	含蛋重量	樓層	護蛋成功機率	雞蛋破損程度說明
紙類包裝材料	衛生紙	130公克	二樓	0%	蛋殼有裂痕，未流出蛋汁。
			三樓	0%	
	瓦楞紙	180公克	二樓	0%	蛋殼破碎稀爛成細小碎片，蛋黃及蛋白流出成黏稠狀。
			三樓	0%	
	碎紙	125公克	二樓	0%	蛋殼破碎，蛋黃及蛋白流出成黏稠狀。
			三樓	0%	
其他包裝材料	棉花	100公克	二樓	0%	蛋殼破碎稀爛成細小碎片，蛋黃及蛋白流出成黏稠狀。
			三樓	0%	
	海棉	85公克	二樓	80%	蛋殼破碎稀爛成細小碎片，蛋黃及蛋白流出成黏稠狀。
			三樓	60%	
	保麗龍網	90公克	二樓	80%	蛋殼裂痕，未流出蛋汁。
			三樓	60%	
氣泡布	90公克	二樓	100%	蛋完好如初。	
		三樓	100%		
顆粒食用材料	米	1290公克	二樓	100%	蛋完好如初。
			三樓	100%	
	鹽	1750公克	二樓	60%	蛋殼有裂痕。
			三樓	60%	
	麵粉	980公克	二樓	60%	蛋殼有裂痕。
			三樓	60%	
沙拉	1360公克	二樓	0%	蛋殼破碎稀爛成細小碎片，蛋黃及蛋白流出成黏稠狀。	
		三樓	0%		
液體或混合液體	水	1310公克	二樓	0%	蛋殼破碎，蛋黃及蛋白流出成黏稠狀。
			三樓	0%	
	鹽水	1850公克	二樓	0%	蛋殼裂成兩半，蛋白流出，蛋黃卻很完整。
			三樓	0%	
	果醬	1800公克	二樓	100%	蛋完好如初。
			三樓	100%	
花生醬	1420公克	二樓	100%	蛋完好如初。	
		三樓	100%		

註：離地高度：二層樓高約 470 公分，三層樓高約 850 公分。



圖二十四 加裝緩衝材料的雞蛋墜落著地後的破損情形

## (二)實驗結果

- 1.本實驗中我們發現使用花生醬、果醬能保護蛋落地不破損，一般包裝用的氣泡布也能成功的保護蛋，更神奇的是以米來包裹雞蛋的護蛋成功率也是 100%。
- 2.紙類緩衝材料如碎紙、衛生紙、瓦楞紙等護蛋機率較差，蛋全部都破損；而液體緩衝材料如水、鹽水的保護功能也較差，蛋破汁流情況更嚴重，可發現雖然水及鹽水是柔軟的物質，但因為蛋落地高度很高，降落速度無法慢下來，當撞擊地面時，水及鹽水因過於柔軟，使蛋的速度無法減緩下來而直接猛撞地上，所以用水及鹽水來護蛋並不理想。
- 3.顆粒狀緩衝材料如麵粉、鹽有六成以上的機率使蛋不破損；緩衝材料質較柔軟的保麗龍網及海棉的護蛋效果也不錯，但柔軟的棉花較不密實，所以無法發揮護蛋作用。
- 4.由於一般物體都具有慣性，在高空墜蛋的整個緩衝裝置於落地的一瞬間，緩衝裝置靜止，然而雞蛋由於慣性還會繼續運動，造成雞蛋與緩衝裝置間相互擠壓、碰撞，容易損壞。然而加上緩衝裝置內部的飽滿度較高時，裝置內的雞蛋可減少震動而提高穩定性，雞蛋安全性就會增加。

## (三)延伸實驗

我們好奇的想知道上述緩衝物能保護蛋於三樓扔下時沒有破損，那麼在六樓的高處是否也是同樣結果，於是，我們將三樓成功護蛋的緩衝材料重覆於六樓(樓高約 23 公尺)進行落蛋實驗，實驗結果是海棉及氣泡布的緩衝材料能讓蛋安全降落不破損，其餘均無法達成護蛋效果。

(四)實驗啓發與反思

我們單手便可以捏破雞蛋，但為何高空落下的雞蛋能不破呢？因為我們在捏蛋時，所施的力於各方向對蛋殼作用而難以分散，於是蛋殼一捏就破了。加裝緩衝材料能達到護蛋效果，關鍵在於蛋的外形結構及使用包裝材料來包覆支撐，海棉、保麗龍網等材料將蛋緊密包裹使其力量均勻分布在蛋殼表面上並起緩衝作用，而蛋殼結構將下方接觸地面所施的力由上半個蛋殼分配承擔，使得力平均分配至蛋的每一處表面，達到減緩衝撞力效能。但是，如果緩衝材料太柔軟、被壓縮而造成力道分布不均，或是填充不夠緊實讓蛋出現搖晃而不穩定，都會降低護蛋效果。

**【實驗三之二】設計減緩衝撞力的材料來當作雞蛋落地時的被撞擊物，觀察雞蛋於空中落地時的破裂程度。**

(一)實驗記錄

表十二 緩衝材料作受撞物時雞蛋著地破損情形

類別	緩衝材料	樓層	護蛋成功機率	雞蛋破損程度說明
紙類包裝材料	衛生紙	二樓	100%	蛋掉落在紙堆後被彈了出來，彈跳後落地蛋才破裂。
		三樓	100%	
	瓦楞紙	二樓	100%	蛋從二樓掉落到瓦楞紙後被彈了出來，彈跳後落地蛋才破裂。 三樓掉落的蛋則破得稀爛且蛋黃蛋白流出。
		三樓	0%	
	碎紙	二樓	100%	蛋掉落在紙堆後被彈了出來，彈跳後落地蛋才破裂。
		三樓	100%	
其他包裝材料	棉花	二樓	0%	蛋落到最底部，蛋殼破得稀爛且蛋黃蛋白流出。
		三樓	0%	
	海棉	二樓	100%	蛋掉落在海棉後被彈了出來，彈跳後落地蛋才破裂。
		三樓	100%	
	保麗龍網	二樓	100%	蛋掉落在保麗龍網後被彈了出來，彈跳後落地蛋才破裂。
		三樓	100%	
氣泡布	二樓	100%	蛋掉落在氣泡布後被彈了出來，彈跳後落地蛋才破裂。	
	三樓	100%		
顆粒食用材料	米	二樓	0%	蛋落到最底部，蛋殼破得稀爛且蛋黃蛋白流出。
		三樓	0%	
	鹽	二樓	100%	蛋落於鹽堆中，蛋完好如初。
		三樓	100%	
	麵粉	二樓	0%	蛋殼裂成兩半，蛋黃未破。
		三樓	0%	
沙拉	二樓	0%	蛋殼裂成兩半，蛋黃蛋白流出。	
	三樓	0%		
液體或混合液體	水	二樓	0%	蛋殼裂成兩半，蛋黃蛋白流出。
		三樓	0%	
	鹽水	二樓	0%	蛋殼裂成兩半，蛋黃蛋白流出。
		三樓	0%	
	果醬	二樓	100%	蛋掉落后黏著固定於果醬中，蛋完好如初。
		三樓	100%	
花生醬	二樓	100%	蛋掉落后黏著固定於花生醬中，蛋完好如初。	
	三樓	100%		

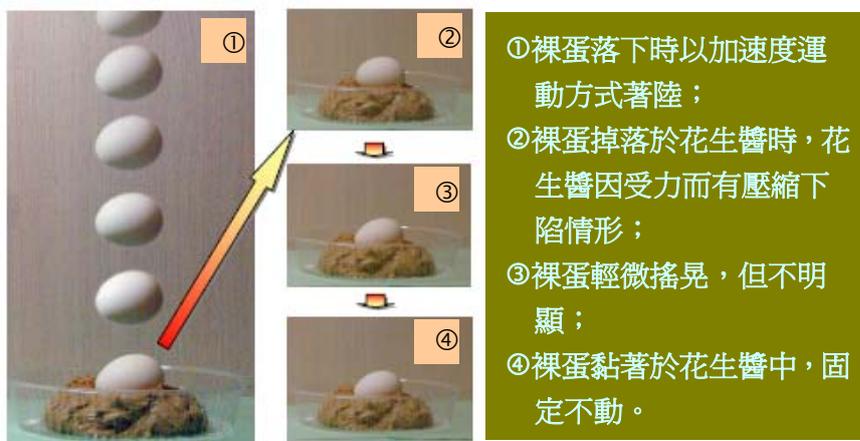
註：離地高度：二層樓高約 470 公分，三層樓高約 850 公分。

(二)實驗結果

- 1.在本實驗中發現，受撞物如衛生紙、碎紙、海棉、保麗龍網及氣泡布等包裝材料能承接裸蛋掉落時不破損，護蛋功能佳，不過這些緩衝材質有彈性，雞蛋於落地後可能會反彈，若無法確保雞蛋彈跳路徑可能會使雞蛋落到地面而破損。而瓦楞紙當受撞物時，雞蛋於二樓落下時可達護蛋功能，但是雞蛋從三樓處落下時就無法達到護蛋功能，蛋因為無法承受過大的力而破損；棉花質軟但不密實，保護功能不佳。
- 2.顆粒狀緩衝材料除了鹽可以成功接住蛋而不破損外，其餘護蛋效能不好。而液體緩衝材料如水、鹽水的保護功能也較差。
- 3.液體或混合液體中，花生醬及果醬是最佳的護蛋緩衝材料，主要是因為蛋掉落時，蛋好像被花生醬及果醬黏住，花生醬及果醬的黏度吸收了蛋的衝擊能量，且將力平均分散於蛋的接觸面積，使得蛋不破損，達成護蛋效果。

### (三)延伸實驗

我們好奇的想知道上述緩衝物能保護蛋於三樓扔下時沒有破損，那麼在六樓的高處是否也是同樣結果，於是，我們將三樓成功護蛋的緩衝材料重覆於六樓(樓高約 23 公尺)進行落蛋實驗，實驗結果除了果醬無法護蛋外，其餘如衛生紙、碎紙、海棉、保麗龍網、氣泡布、鹽及花生醬的緩衝材料都能讓蛋安全降落不破損，成功達成護蛋效果。



圖二十五 裸蛋墜落於花生醬之影像分析

### (三)實驗啟發與反思

本實驗的緩衝材料可以有效的保護雞蛋不破損，那麼，應用於現實生活中，將雞蛋換成以人為主題，是否行得通？如何從火場中的高樓逃生？如何從登山墜谷中逃生？如何從高空墜落的飛機中逃生？或許這些緩衝材料能用來保護人，那就更有價值了。

## 四、觀察人偶墜落時的運動情形

### (一)實驗結果

由高速數位相機的影像觀察到人偶墜地時的情形，依頭部首先墜地及下肢首先墜地分析如下：



圖二十六 人偶頭部首先墜地之影像分析

### 1. 頭部首先墜地

- (1) 人偶墜落時有加速的情形，頭部承受的加速度會隨著撞擊高度的提升而明顯增加，人偶墜落的高度愈高時，速度愈快，落地後彈跳的高度也愈高，進而推測人偶對地面所施的力愈大，與地面相互作用的衝撞力也愈大。
- (2) 當頭部碰觸到地板後頸部受到壓縮而變形，可能是因為頭部向下的位移速度低於軀幹的速度，以致於軀幹擠壓頭部之故。



圖二十七 人偶下肢首先墜地之影像分析

### 2. 下肢首先墜地

- (1) 人偶墜落時有加速的情形，透過高速數位相機的影像顯示，下肢著地後人偶軀幹向後移動，隨著膝蓋向背面彎曲。
- (2) 受到地面的摩擦力影響，足部滑動的時間不同，人偶頭部觸地的情形會不同，若地面的摩擦力大，人偶足部落地後身體向後轉動，直到臀部、軀幹及頭部依序撞擊地面；若是摩擦力小，足部會滑動隨即頭部撞擊到地面。

## (二) 實驗啟發與反思

1. 「跳樓個案大都是自殺的比較多。」墜樓傷害最大致命傷在腦，因腦神經一旦斷裂，無法修補。頭部的加速度運動及軀幹重量可能會影響頭部撞擊地面的受力程度，即使保護到頭部，但頸部可能會因為受到壓縮作用導致變形，對頸部也會造成傷害。

2. 如果人在碰地時還能做些反應，例如將膝蓋多彎曲一下，或者打滾幾圈，只要碰撞到地面的作用時間延長，就能有效減緩人受到地面給的反作用力衝擊。但是落下時頸部受到擠壓變形，或兩隻腳碰地時從腳踝、骨盆、腰胸都可能被壓碎骨折，墜樓的傷害仍存在著。
3. 如何減緩衝撞力的傷害也經常被摔角選手拿去應用。當他們被摔落時，一般先藉由大面積的身體部位先著地(例如整個手臂或足臀...等)，來分散衝撞力量。也藉由肌肉的放鬆，讓衝撞力分成一系列較小的衝撞力，從腳、膝蓋、臀部、肋骨到肩膀，依序撞擊地板，來延長衝撞時間，也就是降低衝撞地板的力量。再加上擂台是特殊設計的，有厚海綿墊的保護功用，彈性好且可減緩衝撞力，所以甬為他們擔心，汽車的安全氣囊也是利用這個原理作成的。

## 陸、討論

- 一、在拍攝物體落下的運動情形時，因物體落下的速度非常快，施放物體的人與攝影的人必須合作無間，否則很難捕捉到物體墜落時的瞬間畫面。而且，物體因墜落的速度太快，使得影像被拉長而有模糊的長條狀；鋼珠到數位相機與直尺到數位相機的距離不同，加上相機本身的視角，還有施放力道及施放點的穩定度等，都會影響了物體位置的判讀而產生誤差值。
- 二、物體於空中落下的過程若只是受到重力的影響時，其落下高度與時間的關係圖應該是相同的，但是實驗中六顆鋼珠的自由落體仍有呈現不同的情形，顯示鋼珠落下時可能受到空氣阻力影響或數值判讀影響。在進行水中物體落下的實驗中，直徑較大的鋼珠於水中落下時常常會碰到管壁造成時間延遲而影響下落的速度，增加實驗誤差。而直徑較小的鋼珠較易受到水的流動而有漂浮情形，可能是因為水有波動情形，或是鬆放鋼珠時的力道與方向不穩的關係，使得鋼珠無法呈現直線的墜落，易造成時間誤差而影響觀測值，累積經驗後有改善。
- 三、物體於空中墜落時，或是於水中等液體墜落時是否會受到溫度的影響，使其落下的速度會改變，還有物體從斜坡(不同角度)落下時，其落下的速度是否會改變等，這些是我們會再深入研究的主題。
- 四、物體墜落時瞬間衝撞力的主要影響因素，經過我們查得資料及討論後推論如下：

$$\text{衝擊力 } F \times \text{時間 } \Delta t = \text{落體質量 } m \times \text{速度變化 } \Delta v$$

### 1. 瞬間衝撞力與鋼珠質量、落地彈跳的高度的關係

實驗中鋼珠落地後彈起，質量較重的鋼珠第一次落地反彈的最高高度較質量輕的鋼珠低。推測是由於鋼珠會將所有的能量傳給地面，同時地面將鋼珠給它的能量傳回給鋼珠，有部份能量因摩擦變成熱能消失，有部份轉變成聲能等其他能量，鋼珠落地反彈的高度將決定於地面傳回給鋼珠的剩餘能量多寡。不同質量大小的鋼珠落下的運動情形相同，落下的加速度不會因為質量改變，但是質

量會影響衝撞力的大小，質量體積較大的鋼珠於落地後損耗較多的能量，導致回傳給鋼珠的剩餘能量較少，所以反彈的高度較低。因此，推論同一高度落下的物體愈重，其落地的瞬間衝撞力愈大。

## 2.瞬間衝撞力與墜落高度的關係

相同質量的鋼珠從不同高度落下時，從較高處墜落其落地彈跳的高度較高，主要是因為撞擊瞬間的作用力會受到撞擊地面時的物體質量與速度變化影響，而落地速度變化與下墜高度有關，鋼珠從較高處落下時速度變化較大，對地面的交互作用力(衝撞力)相對較大，鋼珠落地損耗能量後仍有剩餘能量再回傳給鋼珠，所以反彈的高度較高，故推論物體落地速度變化會影響鋼珠彈跳高度，落地速度變化與落地的瞬間衝撞力成正相關。

## 3.瞬間衝撞力會隨彈跳高度遞減而減緩

鋼珠落地後第一次彈跳的高度較高，但不會回跳到原來落地的高度，在空中停留短暫時間後又落地，而第二次落地彈跳的高度則較第一次低，推測是鋼珠與地面接觸的瞬間衝撞力其實是能量的轉換，鋼珠於第一次著地時能量會損耗，鋼珠碰到地板時有一瞬間停止運動，然後才再次向上彈跳。這樣的碰撞產生熱能，甚至它產生的”碰”聲也使它失去動能，因為動能的失去於其他能量，所以會越彈越低，直到停止。

- 五、於高空墜蛋實驗中發現米的護蛋效果佳，推論可能是米堆之間有微小的空隙，不會直接壓迫到蛋，蛋的受力面積平均，分散蛋落下的衝撞力，所以蛋較不易破裂，例如貨車載運雞蛋時，裝蛋的箱子內通常會以米坑來保護蛋。此外，顆粒狀的緩衝材料只有鹽能夠保護雞蛋不破損，期待鹽能有類似奈米特性能對人類生活產生新奇的影響。
- 六、市面上的人偶產品大都用於車輛安全測試，未有針對墜落事故所設計的人偶，所以本實驗人偶的墜落過程，較不全然適合分析真實人體墜落的撞擊過程。
- 七、物體撞擊物體的情況很多，固體間或液體間的相互碰撞、固體與液體間碰撞等均是，而宇宙中小行星撞擊地球一直是科幻小說及電影的題材，科學家的研究顯示每晚平均有上億個天體掉進地球，大部分在大氣層中燃燒殆盡，掉落到地球的小隕石可能只是擊破玻璃，有的落地撞成隕石坑並產生巨大聲響，有的落入水中而掀起浪花甚至引發大海嘯。而直徑 50 公尺的小行星，平均每 100 年會與地球碰撞一次，若正巧落在台灣，足夠將整個台灣島毀掉。如何精密的計算掉落小行星的落地速度、時間及衝撞力，藉以擊中隕石質心使其偏離軌道，這將是目前科學家要打贏的宇宙戰爭，期望能發揮創意想出解決的方法。

## 柒、結 論

### 一、觀察及測量物體墜落時速度的變化

在空中的落體實驗中，鋼珠墜落過程中落下的瞬間速度會加快，而鋼珠的質量、大小對於加速度影響較不明顯。在水中的落體實驗中，鋼珠墜落過程中，除了重力外，還受到周圍環境(氣體或液體)所造成的阻力影響，使得水中落體落下的速度較為緩慢。

### 二、觀察及測量物體墜落時瞬間衝撞力的變化

- (一)以鋼珠彈跳高度及鋼珠撞擊地面時傳遞的聲音強度來測量瞬間撞擊力，結果發現，撞擊瞬間的作用力會受到撞擊地面時的物體質量與速度變化影響，撞擊將重力位能轉換成彈跳動能、聲能、撞擊的位能（陷入深度）或被撞濺出量加總，所以某項能量變多就有某項變少，如重的鋼珠彈跳低但產生較大的碰撞聲響，決定因素在於是否完全彈性碰撞，如果是完全彈性碰撞則幾乎全部重力位能轉換成彈跳動能，其他能量極小。而地板材質也會影響衝撞力道。
- (二)鋼珠落地後能量逐次消耗，使得鋼珠落地後各次彈跳撞擊地面的聲音強度會隨著時間增加而遞減，彈跳的高度也愈來愈低，導致每次彈跳撞擊聲音的時間間隔愈來愈短。
- (三)液體或麵粉溢出量的多寡與物體著地的瞬間衝撞力成正相關。

### 三、設計緩衝材料來減緩物體墜落時的破損程度

我們設計了各式的緩衝材料來保護高落墜落的蛋不破損，結果發現氣泡布、黏度高的花生醬及果醬的護蛋效能最好，而以米當包裝材料、以鹽當承接物來保護蛋也能達到較好的保護效果。

### 四、觀察人偶墜落時的運動情形

當頭部首先墜地時，頭部承受的速度會隨著撞擊高度的提升而增加，頭部的加速運動及軀幹質量會影響頭部撞擊地面的受力程度，也留意到頸部會受到軀幹重量的壓縮作用而變形；下肢首先墜地時，地面的摩擦力大會影響足部的滑動，使得頭部撞擊地面的時間早晚不同，摩擦力較小時頭部觸地的時間較早，加速運動及衝撞力作用使得頭部傷害指數提高，不利頭部的防護。

## 捌、參考資料及其他

- 1.維基百科全書，自由落體相關專題。
- 2.Paul G. Hewitt 著、常雲惠譯(2008年8月5日第二版)。觀念物理 I--牛頓運動定律、動量。台北市：天下遠見出版(股)公司。
- 3.傅學海教授(民98年11月8日)。球體在水中之墜落範例之一。台灣師範大學科學教育中心2008年數位教學實驗室活動計劃課程講義，取自 [http://www.sec.ntnu.edu.tw/edu/教學實驗室/97\(2008\)年/Teaching%20Digital%20Lab.htm](http://www.sec.ntnu.edu.tw/edu/教學實驗室/97(2008)年/Teaching%20Digital%20Lab.htm)。
- 4.«泛星」啓動 全球聯防天體撞擊 (民98年1月25日)。中時電子報科學周報。民98年1月25日，取自 <http://forums.chinatimes.com/report/science/PDF/20090125.pdf>。

5.全國中小學科展及國際科展作品有關自由落體的主題，取自 <http://www.ntsec.gov.tw>。

科展屆次	科展題目	研究動機與目的	測量工具	研究結果與發現
台灣省 第47屆 全國科展	它抓得住 我—以自 製精密計 時器探討 "g"世界的 奧妙	利用自製測量器來探 討自由落體的速度變 化與加速度的測定， 並利用單擺的擺動探 討地球重力加速度 g 值的測量。	自製測量器 ①同步攝影 ②簧片 ③磁簧 ④光敏感應器	①以光敏感應組測量 g 值最精確。 ②這些自製的精密測量裝置可廣泛應 用在理化課程的實驗。 ③實驗也發現，亞里斯多德「重物先 落下」及伽利略「物體皆同時落下」 的觀念，應分別是以小於兩百公克 重的重物及大於三百公克重的重物 做自由落體實驗所歸納出的結論。
台灣省 第47屆 全國科展	衝出鋒鎖 線—衝擊 對表面張 力之影響	探討水的表面張力和 水面狀態改變時，對 於落水物體的速度變 化量的關係，並設計 實驗證明實驗原理之 正確性。	數位攝影法及 物體運動軌跡 測速軟體 Tracker	①破壞表面張力可以減少物體撞擊水 面時所受衝擊力。 ②破壞物的速度與表面張力受破壞的 程度有關，速度越快表面張力被破 壞的程度就越小。 ③破壞物的重量與表面張力受破壞的 程度有關，重量越大表面張力被破 壞的程度就越大。 ④洗衣粉水溶液中表面張力因破壞物 高度的升高，而使得張力差的變化 幅度較大(效果較差)。
台灣省 第44屆 全國科展	水的自由 落體	觀察及測量雨滴落下 速度、落下過程小水 滴速度和加速度、並 且同時以肥皂水珠自 由落體來觀察小水滴 形變和震動。	數位攝影法及 光電計時器同 步記錄	①水滴落下加速度穩定但逐漸變小， 距離超過1公尺加速度變動大。 ②相同速度大水珠半徑大，加速度大。 ③風速大，水滴週期小。 ④肥皂水滴的數據點位置分散，不易 看出其變形週期。可能表面張力 小，水珠形變不穩定。
台灣省 第43屆 全國科展	簡易重力 加速度之 測量方法	測量自由落體、平拋 或斜拋物體時之重力 加速度值，並探討不 同質量(物體)與重 力加速度之關係。	光閘感應器裝 置、麥克風及 gold wave 聲音 編輯軟體	實驗計算之自由落體的重力加速度值 為 $973.3 \text{ cm/s}^2$ 、誤差為 0.7%，平拋時 的重力加速度的值為 $987.2 \text{ cm/s}^2$ 、誤差 為 0.7%，斜拋時的重力加速度的值為 $959.3 \text{ cm/s}^2$ 、誤差為 2.1%，證明了重力 加速度之值不隨其拋射方式、質量而 改變。
台灣省 2004年 國際科展	瞬間碰撞 數位影像 分析	測量桌球於碰撞拍面 時的速度，並觀察桌 球碰撞前及碰撞後在 空中旋轉的角度。	數位攝影法	桌球與拍面的接觸時距 $\Delta t$ = $1/177 \sim 1/211$ 秒，若相對速度越大，接 觸時距越大。若拍面速度越大，則摩 擦係數越大。
台灣省 2005年 國際科展	終端速度	觀察球體在液體中 (以沙拉油為例)的運 動情形，並測量球體 的終端速度、終端速 度與球體半徑的關 係、油的阻力係數 k 和重力加速度 g。	數位攝影法	實驗結果發現液體中球體運動方程式 無法符合理論結果；不同材質、大小 的球體與終端速度關係成正比；終端 速度與半徑關係理論是直線關係，但 實驗結果為二次函數關係；溫度會影 響油的黏滯度而影響阻力係數。

## **【評語】 080111**

實驗認真，團隊合作良好，但瞬間衝撞力的測量及其測量基準仍有改進的空間。