

中華民國第 52 屆中小學科學展覽會

作品說明書



科 別：物理科

組 別：高中組

作品名稱：沙盤推演

關 鍵 詞：沙坑、碰撞、鐵球

編 號：

## 摘要

當球體落入沙子時，會造成沙坑並在周圍形成一圈隆起，球體也有部分體積沒入沙子內。因此我們設計實驗，以銅球、鐵球、彈珠及填充不同材質的乒乓球做為掉落物，由不同高度靜止釋放，進而測量沙面隆起平均寬度  $w$  及球體穿透深度  $d$ 。經實驗分析發現，沙面隆起平均寬度  $w$  與球直徑  $D$  的四分之三次方和釋放高度  $h$  的四分之一一次方成正比，又  $w$  也與單位密度撞擊動能  $(\frac{E_k}{\rho_b})$  ( $\rho_b$  為球體密度) 的四分之一一次方成正比。對密度較小的球而言， $d$  與總下落高度  $H$  的三分之一一次方成正比；對密度較大的球而言， $d$  與總下落高度  $H$  的二分之一一次方、球密度  $\rho_b$  的一次方及球直徑  $D$  的一次方成正比，且此時  $d$  可由單位截面積的撞擊動量決定。我們推測，當  $d < D$  時(對密度較小的球)，沙子對球體的作用力可類比成液體的浮力  $F \propto Dz^2$  ( $z$  為球體底部與原沙面的距離)；當  $d > D$  時(對密度較大的球)，沙子對球體的作用力可類比為彈力  $F \propto \frac{D}{\rho_b} z$ ，當球沒入愈深，受到沙子給予的阻力愈大，如彈簧壓縮量愈大，彈力也愈大。最後推論形成沙面隆起與球體穿透的物理機制並不相同。

## 壹、研究動機

小時候在沙灘上遊玩時，都喜歡拿起石頭朝著沙子用力丟下砸出一個沙坑，或者用腳大力地踏進沙裡。我們會明顯發現到當使用越大的力量或速度時，在沙面上造成沙坑的一圈隆起和陷入的深度也越大，但是在用更大的力量時，似乎很難再撞得更深和撞出更大的隆起，究竟是什麼因素造成隆起平均寬度和石頭穿透深度的改變呢？因此引發我們設計鐵球撞擊沙面的實驗，觀察撞擊過程中發生的現象並探索其間的關係。

## 貳、研究目的

- 一、探討沙面隆起平均寬度  $w$  與鐵球接觸沙子時瞬間動量  $P$ 、瞬間動能  $E_k$  之間的關係
- 二、探討沙面隆起平均寬度  $w$  與鐵球質量  $M$ 、釋放高度  $h$  之間的關係
- 三、討論撞擊動能以何種形式轉移給沙子
- 四、探討鐵球穿透深度  $d$  與鐵球落入沙子時瞬間動量  $P$ 、瞬間動能  $E_k$  之間的關係
- 五、探討鐵球穿透深度  $d$  與鐵球質量  $M$ 、總下落高度  $H$  之間的關係
- 六、討論鐵球落入沙子後與沙子間的作用力形式

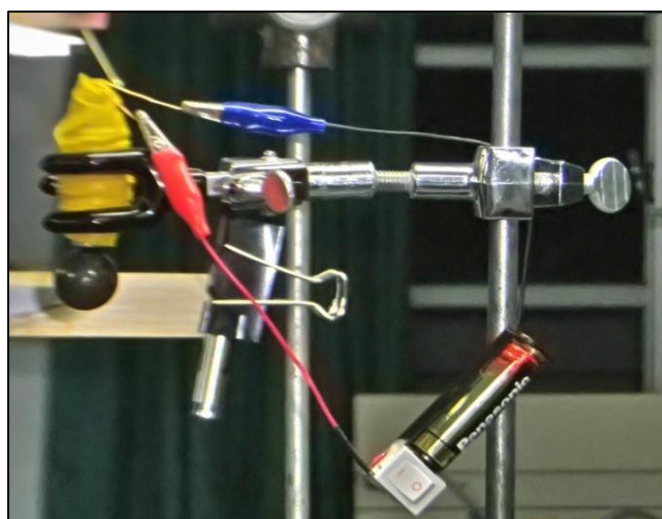
## 參、實驗器材

### 一、器材一覽表

一、	圓形玻璃盆(直徑 20.0cm，總深度 13.5cm)			
二、	沙子總質量 4.30kg，裝入沙盆後沙子深度 9.0cm，平均密度約 $1.5\text{g/cm}^3$ ，沙子顆粒大小約 $400\mu\text{m}$			
三、	實驗用球,規格如下表(依密度大小排列)，如圖一			
	球編號	球直徑 D(cm)	球質量 M(g)	密度 $\rho_b(\text{g/cm}^3)$
	球 A	銅球	2.540	73.095
	球 B	鐵球	2.220	45.041
	球 C	鐵球	2.540	67.265
	球 D	鐵球	3.015	111.923
	球 E	鐵球	3.500	173.695
	球 F	填充鉛粒的乒乓球	3.975	184.350
	球 G	填充鋼珠的乒乓球	3.975	151.080
	球 H	填充鋅粉的乒乓球	3.975	89.734
	球 I	彈珠	2.540	20.785
	球 J	填充沙子的乒乓球	3.975	51.766
四、	直尺、游標尺			
五、	自製釋放器×2			
六、	自製深度測量儀			
	雷射筆×2			
	游標尺×1			
	C 型夾×2			
	長尾夾×2			
	支架×2			
七、	高速攝影機與 streamPix 軟體			



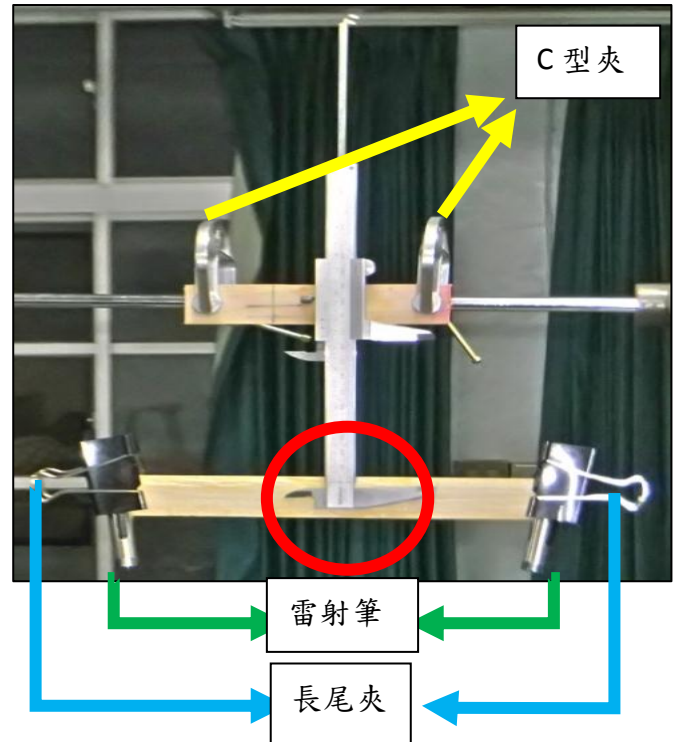
(圖一)實驗用球



(圖二)電磁鐵釋放器



(圖三)乒乓球釋放器



(圖四)深度測量儀

## 二、器材製作

### (一)填充內質的乒乓球：(如圖一)

以不同密度的鉛粒、鋼珠、鋅粉、沙子填入乒乓球中，並混合白膠使球內質固定

### (二)電磁鐵釋放器：(見圖二)

取漆包線纏繞於一六角型鐵心約數百匝，再以絕緣膠帶包覆，並設計開關以利操作。

### (二)乒乓球釋放器：(見圖三)

主要由游標尺構成

1. 取一段木條，將游標尺黏於木條上(如圖三)

2. 以一個 C 型夾將木條固定於橫桿上

### (三)深度測量儀：(見圖四)

主要由一隻游標尺和兩隻雷射筆構成

1. 首先取一段木條，以木條中央黏於游標尺的前端(圖四中以紅色圓圈標出)

2. 以長尾夾將雷射筆固定在木條兩端

3. 再利用一木條與游標尺面相黏合，利用兩個 C 型夾將之固定於橫桿上

4. 最後以鉛錘校正，使整個游標尺身在正面與側面皆呈垂直



(圖五)實驗擺設

## 肆、研究過程及方法

### 一、使用符號說明

$M$ ：球質量

$R$ ：球半徑

$D$ ：球直徑

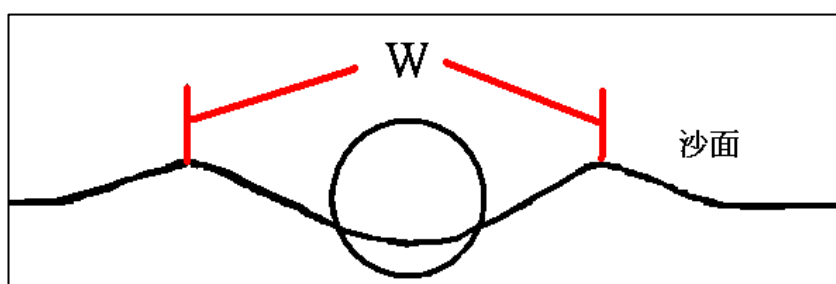
$\rho_b$ ：球密度

$w$ ：沙面隆起最高點所形成圓環的平均寬度(圖六)

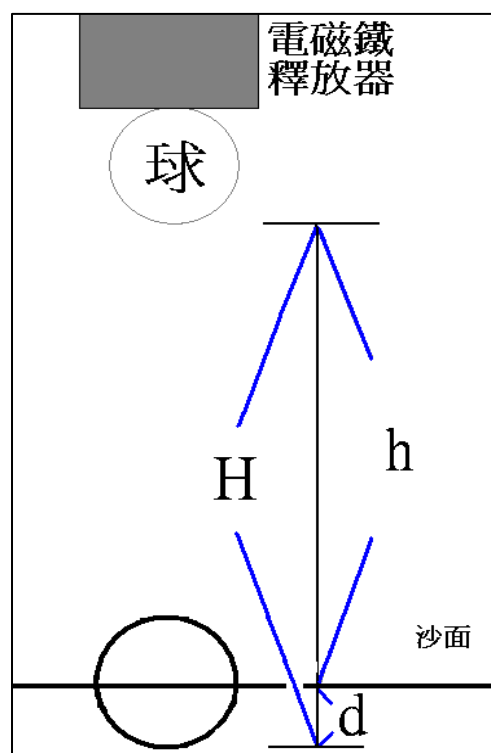
$h$ ：釋放高度。球釋放前其底部到沙面的距離(圖七)

$d$ ：穿透深度。球沒入沙中靜止時其底部和原沙面的距離(圖七)

$H$ ：鐵球總落下高度。 $H=h+d$ (圖七)



(圖六) $w$  示意圖



(圖七) $d$ 、 $h$  和  $H$  示意圖

### 二、實驗步驟

1. 調整深度測量儀之游標尺，確認兩雷射光束能在沙面上交於一點。若否，則調整長尾夾與雷射筆，直到兩雷射光束能交於一點，亦即使兩雷射光束在同一平面上
2. 調整釋放器的高度，使鐵球從距離沙面高度 5cm 或 10cm 開始釋放
3. 使釋放器中的球靜止落下至沙盆中心
4. 調整深度測量儀之游標尺，使兩雷射光束交於球頂，記錄測量儀上的游標尺讀數
5. 利用直尺測量沙坑的隆起平均寬度  $w$ ，
6. 沙盆重置：將沙盆內的沙倒出至另一盆，再將沙倒回原盆並少許搖晃使每次的沙面高度(即沙面至玻璃缸底部的距離)相等
7. 重複操作步驟 1 至步驟 6 五次
8. 以 5cm 或 10cm 為間隔移動釋放器，以調整不同釋放高度，重複步驟 1 至步驟 7
9. 各個實驗用球均依步驟 1 至步驟 8 操作



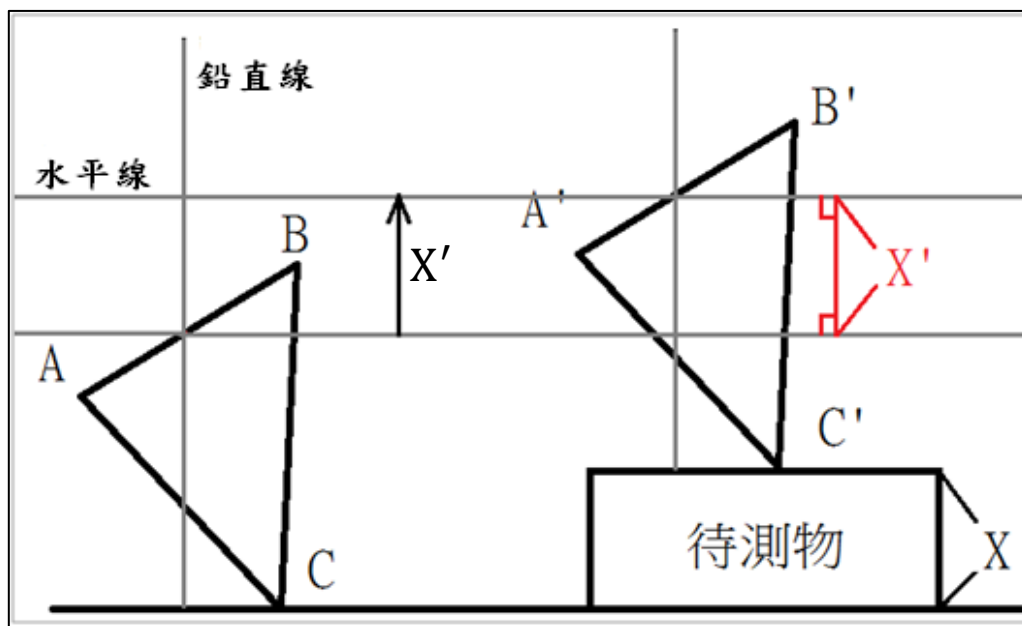
### 三、實驗方法

#### (一)測量深度 $d$ 之原理和用法

##### (1)測量原理：

深度測量儀的運作情形能以(圖八)中測量待測物高度來說明：圖中先將兩雷射筆置於 A、B 兩點，設  $\overline{AC}$  和  $\overline{BC}$  為兩雷射光束，兩光束交點為 C。因深度測量儀中雷射筆與游標尺為連動系統，故當游標尺在鉛直線上移動時，便有如  $\triangle ABC$  在鉛直方向做平移。若待測物在鉛直方向上的高度為  $X$ ，使用深度測量儀時，必須先上下調整游標尺，使兩雷射光束於平面上交於一點，亦即將  $\triangle ABC$  之 C 點落在平面上，記錄第一次游標尺之讀數，再將待測物置於平面上，重新調整游標尺，使光束交於待測物頂端，亦即將  $\triangle ABC$  向上平移  $X'$  成為  $\triangle A'B'C'$ ，使  $C'$  落於待測物頂端，記錄第二次游標尺之讀數。因游標尺之架設方向為頭朝下，故第一次的讀數會大於第二次的讀數，最後可得知

$$X = X' = \text{第一次的讀數} - \text{第二次的讀數}$$



(圖八)深度測量儀類比圖

##### (2)測量方法(圖九)：

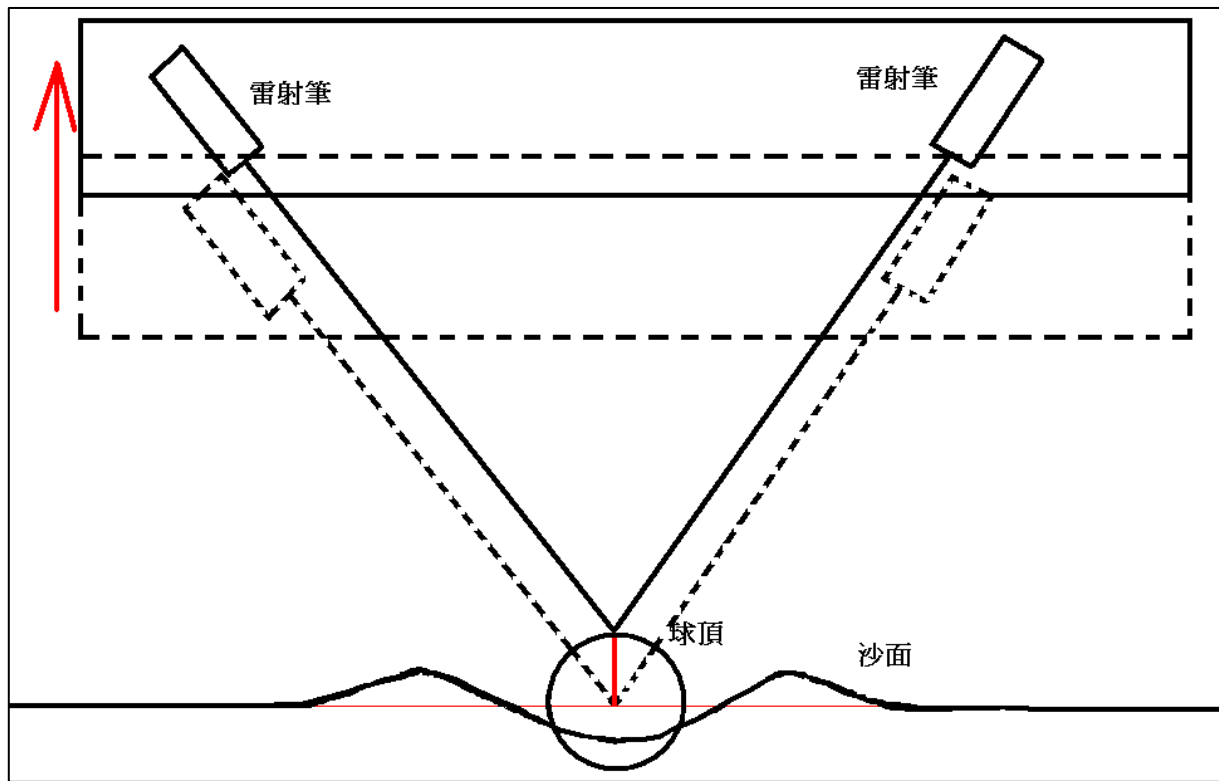
首先調整測量儀之游標尺使兩束雷射光交於沙面而呈一點，讀取第一次游標尺讀數。待球落入沙中後，再將光線交於球頂端一點，再讀取第二次游標尺讀數。則原沙面到球頂的距離等於第一次讀數減去第二次讀數

而鐵球穿透沙子深度  $d = \text{鐵球直徑} - \text{原沙面到球頂的距離}$

若落下停止後，球頂低於原沙面，如欲將兩光線交於球頂，必須將游標尺向下移，使交點下降使交於球頂位置，所以球頂的讀數會較沙面的讀數大，沙面讀數減去球頂讀數為負值，將球直徑減去此負值為球沒入沙中深度且其大於球直徑，符合球頂低於原沙面的狀況。

備註：因測量儀器為游標尺，故數值精確度取到 cm 小數點後第三位。

(下頁圖九為球頂高於原沙面的情況)



(圖九)穿透深度測量示意圖

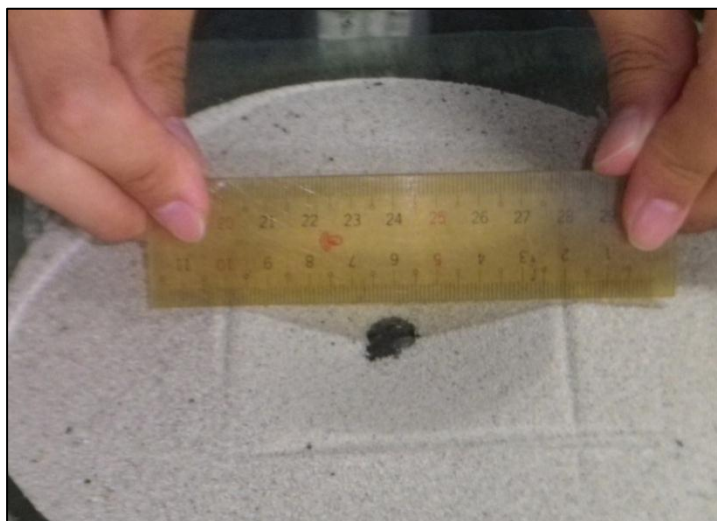
## (二)測量沙面隆起平均寬度 $w$ 之方法

測量方法：

(1)以隆起的最高點為測量依據(如圖六)

(2)沙面隆起大致上呈圓形，因此我們取互相垂直的兩段(圓的半徑)，利用直尺測量此兩段的長度後平均為一次數據的隆起平均寬度  $w$

備註：因測量儀器為直尺，其最小刻度為 mm，故數值精確度取到 cm 小數點後第二位



(圖十)測量隆起平均寬度  $w$

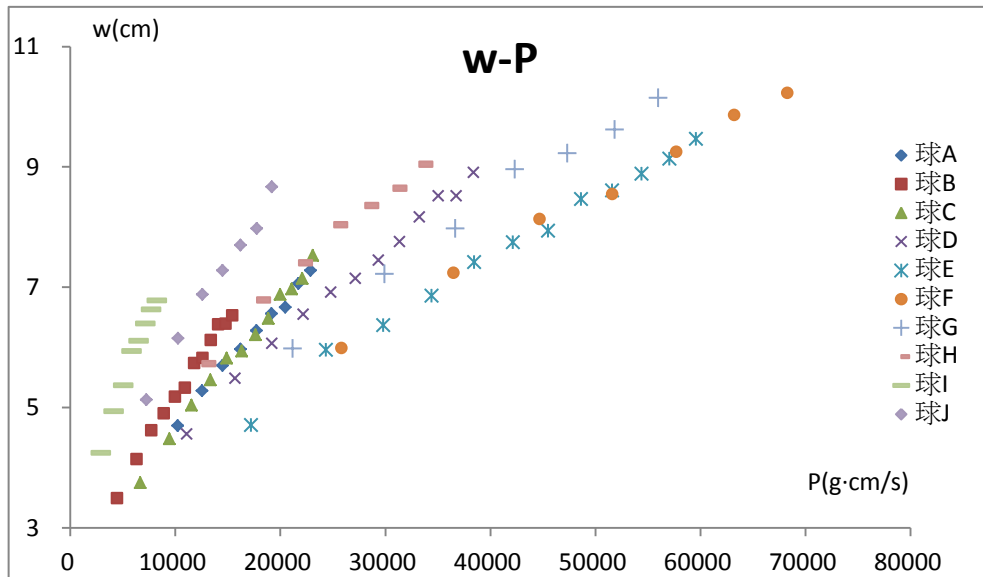
## 伍、研究結果與討論

### 一、沙面隆起平均寬度 $w$ ：

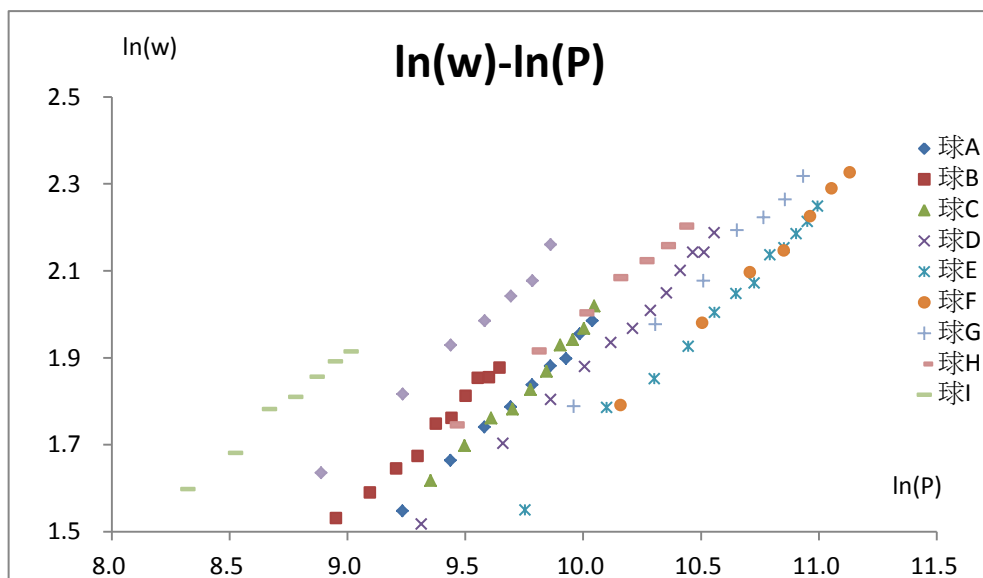
經高速攝影機拍攝鐵球撞擊沙面至停止的過程，我們觀察沙坑的形成大致如下：鐵球落入沙面後，首先有一部份的沙子自撞擊處往外噴濺，接著位於表層的沙子會被鐵球向外擠壓造成一圈近似圓形的隆起，最後向外噴濺的沙子落下並覆蓋在沙坑周圍。向外圍擠壓的範圍愈大，代表沙子所具有的動量與能量愈大，而沙子的動量與能量為鐵球落入沙面瞬間的動量與動能經由碰撞轉移。因此，鐵球落入沙面時，其撞擊動量  $P$  或撞擊動能  $E_k$  愈大，造成沙面隆起平均寬度愈大(即圓形隆起的直徑愈大)，所以我們將實驗數據進行相關的分析。

#### (一) $w$ 與 $P$ 之關係

由圖十一及圖十二可看出，在同一顆球撞擊沙面的情況下， $P$  愈大， $w$  就愈大，這符合直觀的想法。在  $P$  相同的情況下，對於相同密度的鐵球(球 B 到 E)，球直徑  $D$  愈小， $w$  卻愈大，如圖十三；對於球直徑  $D$  為 2.540cm 的球 A、C 和 I 及 3.975cm 的球 F、G、H 和 J，在  $P$  相同的情況下，密度  $\rho_b$  愈小， $w$  愈大，如圖十四。且對於所有球， $w$  與  $P$  之間的冪次關係並不相同(即  $w$  與  $P$  在不同球的情況下存在不一樣的關係)。

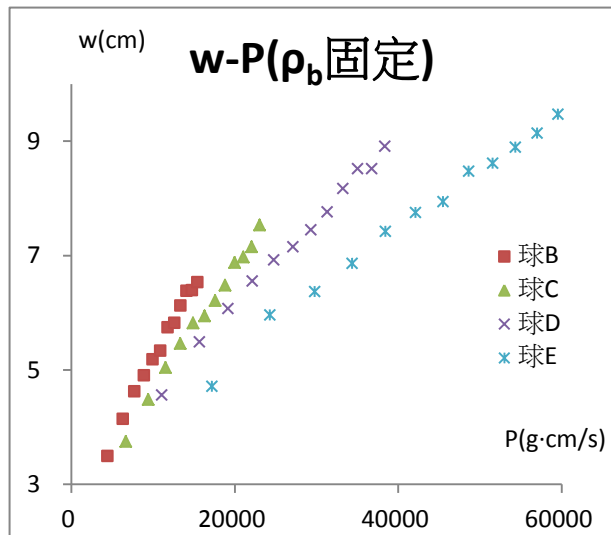


(圖十一)  $w$  與  $P$

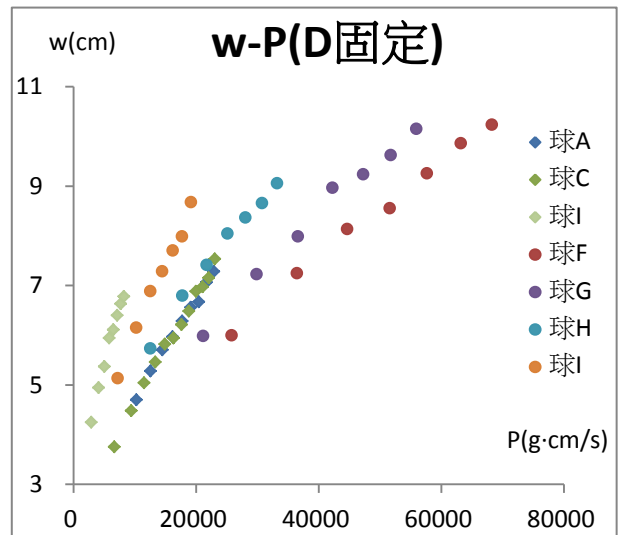


(圖十二)  $\ln(w)$  與  $\ln(P)$





(圖十三)  $w$  與  $P(\rho_b \text{ 固定})$



(圖十四)  $w$  與  $P(D \text{ 固定})$

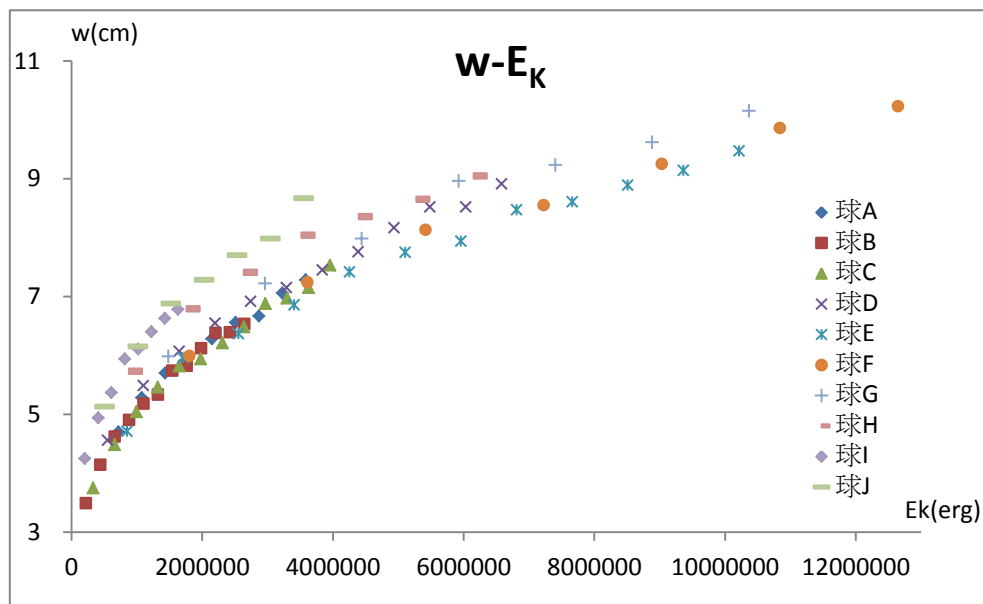
## (二) $w$ 與 $E_k$ 之關係

由圖十六可看出， $w$  與  $E_k$  的關係依球的密度大致分為三個區域

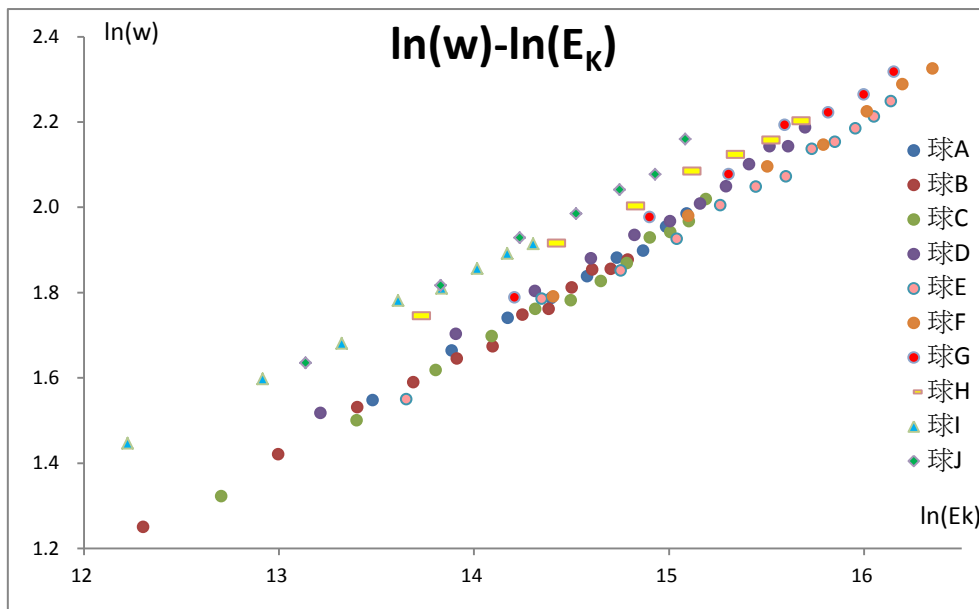
- (1)第一區：密度較大的球(球 A 到球 G)。此七顆球的數據點大致分布於同一直線
- (2)第二區：密度較小的球(球 I 及球 J)。此兩顆球的數據點分布亦在同一直線上，雖偏離第一區，但大致與其平行
- (3)第三區：密度介於第一區與第二區之間的球 H。在  $E_k$  較小時其數據點較接近第二區，但隨著  $E_k$  增大，數據點分布卻趨向第一區

(4)由圖十七知，數據均呈直線分布，斜率都約為 0.25。因此我們可得  $w \propto E_k^{\frac{1}{4}}$

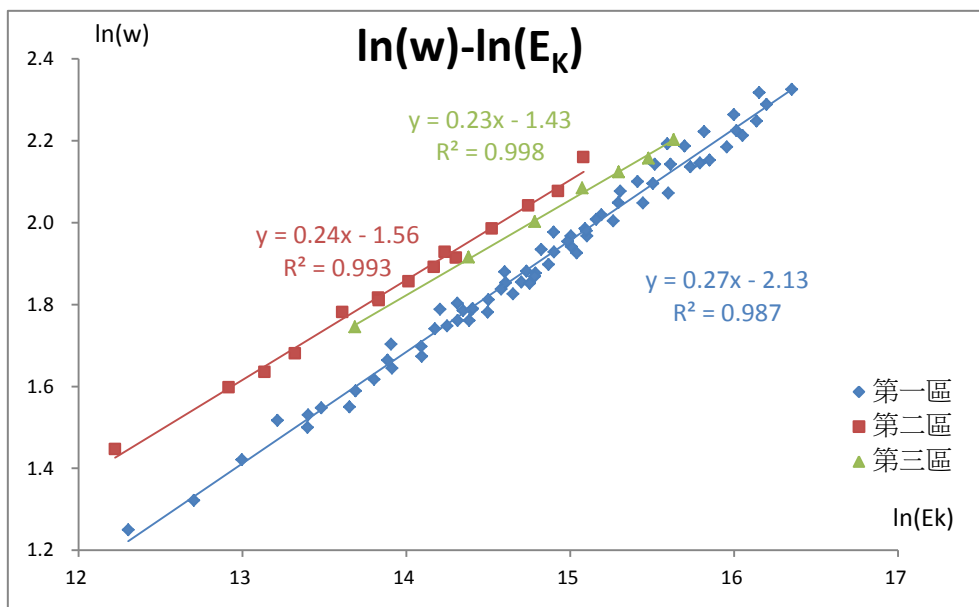
(5)由圖十五知，相同  $E_k$  時，球密度  $\rho_b$  愈小， $w$  愈大(與  $D$  無關)



(圖十五)  $w$  與  $E_k$



(圖十六)  $\ln(w)$ 與  $\ln(E_k)$



(圖十七)  $\ln(w)$ 與  $\ln(E_k)$

### 討論

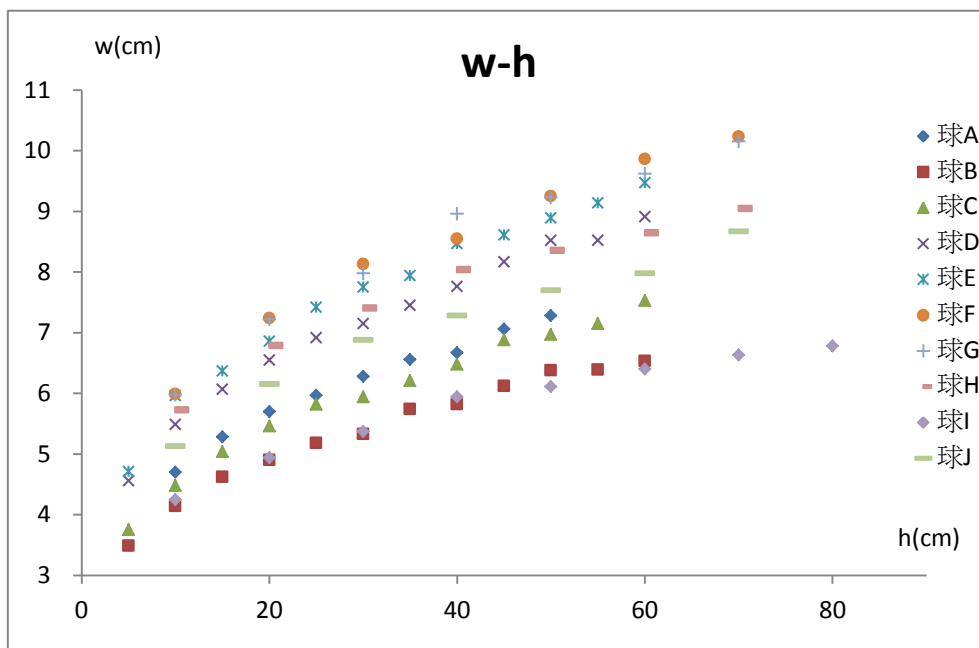
一開始我們僅用不同直徑、相同密度的鐵球(球 B 到 E)進行實驗，由實驗結果得沙面隆起平均寬度  $w$  正比於撞擊動能的四分之一一次方，於是我們猜測球的撞擊動能主要轉換成克服沙坑部分的沙子移出的位能，若沙坑中被移開的沙子體積(或質量)與  $w^3$  成正比，且被移開的高度大略為沙坑深度而正比於  $w$ ，則  $w^4$  正比於  $E_k$ ，與  $w \propto E_k^{\frac{1}{4}}$  頗為一致。而後續實驗中我們加入不同密度的球，發現密度相近的球其數據點大致分布在同一直線上，如圖十六中第一區密度較大與第二區密度較小的球的數據分布，但第一區與第二區的球在相同的動能撞擊沙面，卻造成不同的隆起範圍。由趨勢線斜率知，不論是哪一區的球，沙面隆起平均寬度  $w$  皆與撞擊動能的四分之一一次方成正比，代表不同密度的球也符合一開始我們使用相同密度的球所得之推測。

(三)由力學能守恆可知，球撞擊動能 $E_k = \frac{1}{2}Mv^2 = Mgh$  ( $v$  為撞擊速率)，與球密度 $\rho_b$ 、直徑  $D$  及釋放高度  $h$  有關。因此我們作進一步分析。

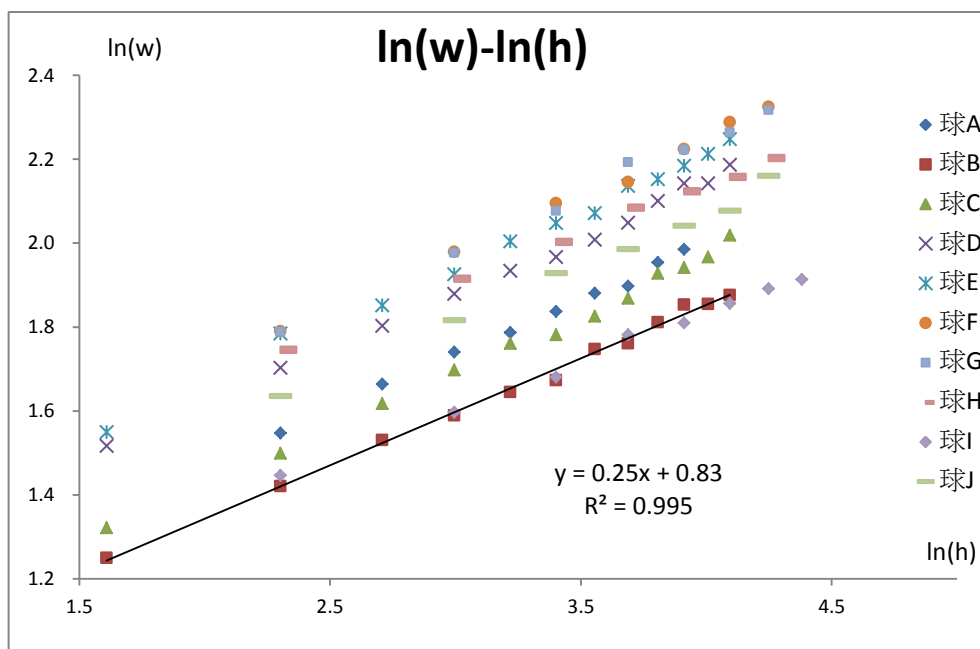
#### (1) $w$ 與 $h$ 之關係

由圖十八及圖十九可知，每顆球的  $w$  大約都與  $h$  的 $\frac{1}{4}$ 次方成正比，即對同顆球來說

$$w \propto h^{\frac{1}{4}}$$



(圖十八)  $w$  與  $h$

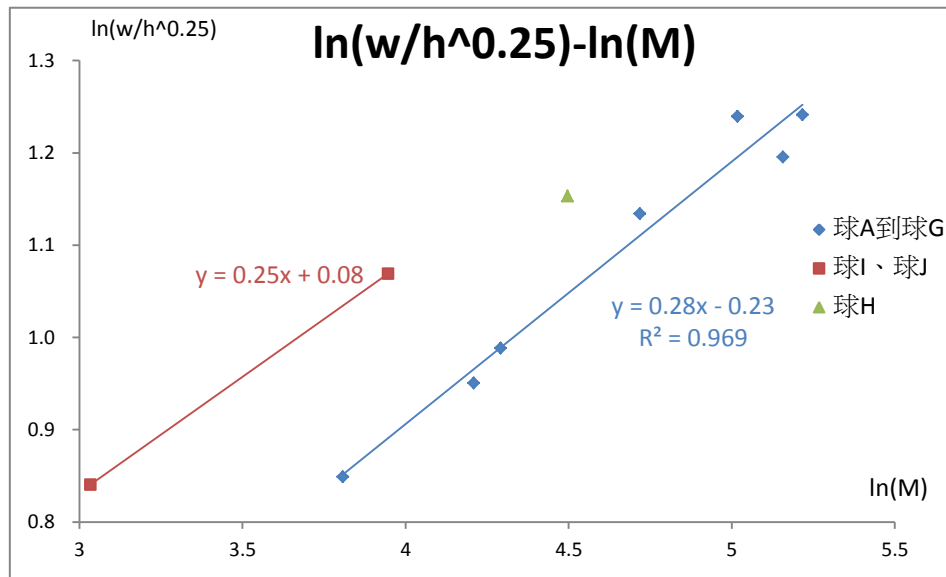


(圖十九)  $\ln(w)$ 與  $\ln(E_k)$

## (2)w 與 M 之關係

將所有球在不同的釋放高度所得  $\frac{w}{h^4}$  的平均值與 M 取對數(ln)作圖，如圖二十。w 與 M 的關係依球的密度大致分為三個區域：第一區(密度較大的球 A 到球 G)、第二區(密度較小的球 I 與球 J)及第三區(密度介於第一區與第二區的球 H)，而並非分布於同一直線上。由趨勢線之斜率知，對密度較大的球而言，w 大約與 M 的  $\frac{1}{4}$  次方成正比，即

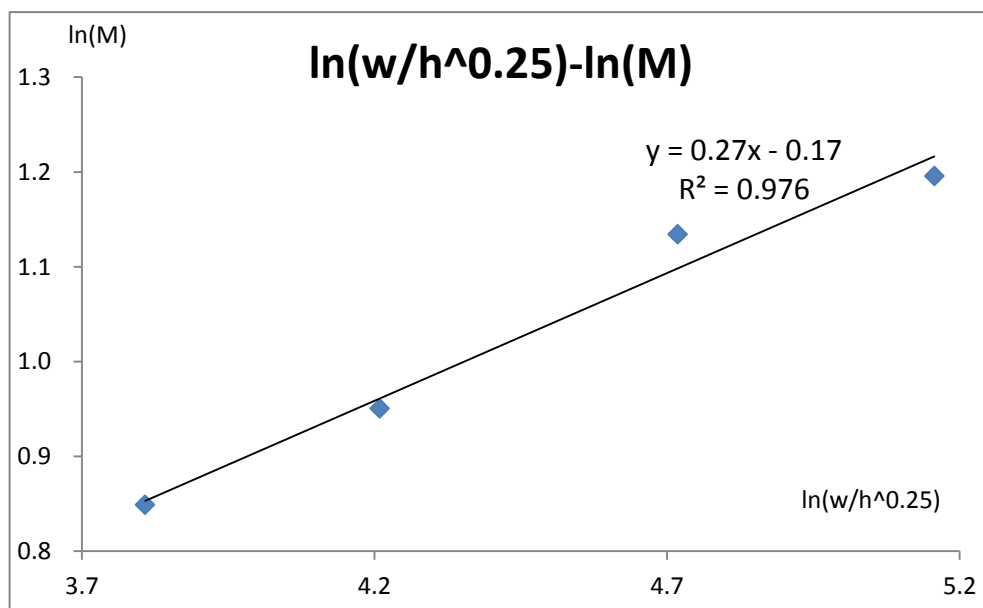
$$w \propto M^{\frac{1}{4}}$$



(圖二十)ln(w/h^0.25)-ln(M)

由圖二十知 w 並不直接與 M 相關。M 是由球的密度與體積決定，因此我們進一步分析 w 與  $\rho_b$  和 D 的關係。

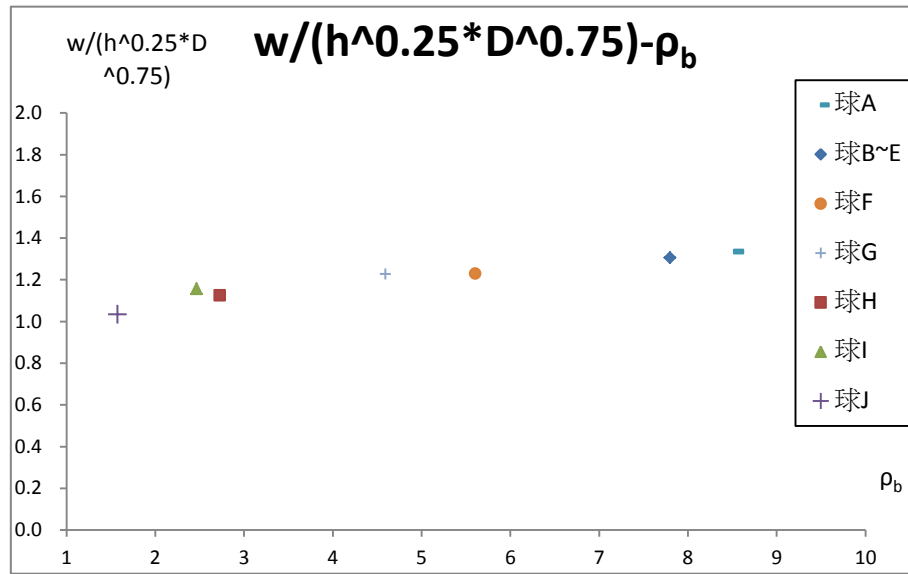
將鐵球(球 B、C、D、E)，以同顆球在不同釋放高度所得  $\frac{w}{h^4}$  之平均值與 M 取對數作圖，如圖二十一。因為鐵球(球 B、C、D、E)密度固定，則由  $w \propto M^{\frac{1}{4}}$ ，可得  $w \propto D^{\frac{3}{4}}$



(圖二十一)ln(w/h^0.25)-ln(M) (鐵球)

若假設  $w$  正比於  $D$  的四分之三次方適用於所有密度的球。我們將所有球的  $\frac{w}{D^{0.75}h^{0.25}}$  與  $\rho_b$  作圖，如圖二

十二。發現  $\frac{w}{D^{0.75}h^{0.25}}$  不隨  $\rho_b$  的變化而有明顯改變，代表  $w$  應與  $\rho_b$  無關



(圖二十二)  $w/(h^{0.25} D^{0.75}) - \rho_b$

綜合上述結果與討論，對所有球而言

$$w \propto D^{\frac{3}{4}} h^{\frac{1}{4}}$$

即由球體的直徑  $D$  和釋放高度  $h$  便可決定  $w$  的大小。

### 討論

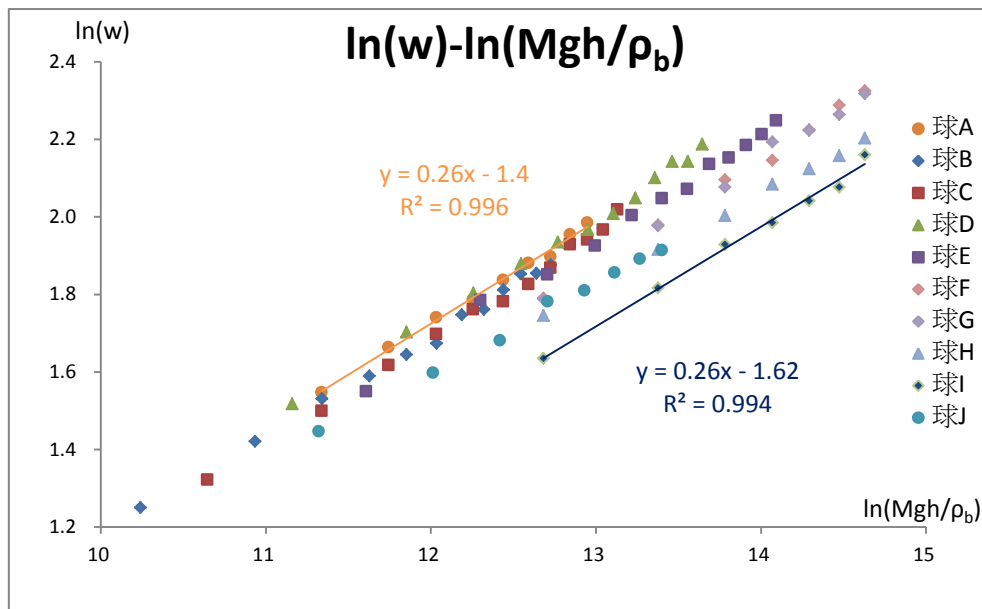
將  $w \propto D^{\frac{3}{4}} h^{\frac{1}{4}}$  化為  $E_k$  的形式：

$$w \propto D^{\frac{3}{4}} h^{\frac{1}{4}} \propto \left( \frac{\rho_b D^3 h}{\rho_b} \right)^{\frac{1}{4}} \propto \left( \frac{Mgh}{\rho_b} \right)^{\frac{1}{4}}$$

故 
$$w = k \left( \frac{Mgh}{\rho_b} \right)^{\frac{1}{4}}$$

如圖二十三，趨勢線之斜率皆約為  $\frac{1}{4}$ ，且大致都會交於  $y$  軸上同一點(即截距相同)，代表  $w$  直接與  $\left( \frac{Mgh}{\rho_b} \right)^{\frac{1}{4}}$  相關聯。我們認為此關係之物理意義為：決定沙面隆起平均寬度  $w$  之主要因素為單位密度的撞擊動能  $\frac{E_k}{\rho_b}$ ，而非撞擊動量  $P$  或撞擊動能  $E_k$ 。由此式也可看出由圖十五所觀察到的結果：當  $E_k$  為定值時， $\rho_b$  密度愈小，代表單位密度的撞擊動能愈大，因此  $w$  也愈大。





(圖二十三)  $\ln(w)$  與  $\ln(Mgh)$

## 二、球穿透深度 $d$

依功能原理  $\bar{F}d = MgH$  ( $\bar{F}$  為球落入沙面後，沙子施予球之平均力)，因此我們取  $d$  與  $H$  及  $M$  的實驗數據進行分析。我們假設  $d \propto M^x H^y$ 。

### (一) $d$ 與各種變數之分析

#### (1) $d$ 與 $H$ 之關係

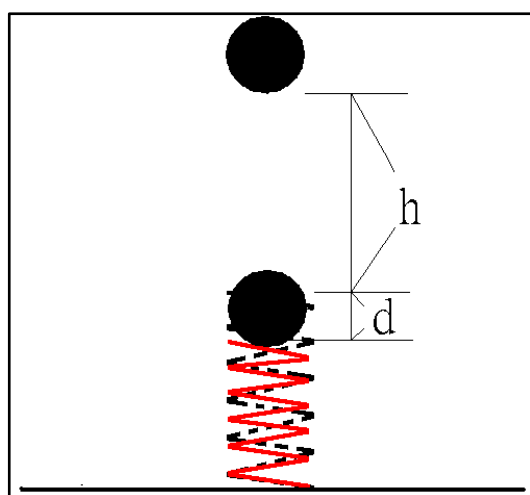
如同球自彈簧上方  $h$  處落下撞擊彈簧，在彈簧壓縮  $d$  後停止(如圖二十四)，

依據功能原理： $\bar{F}d = Mg(h + d)$  ( $\bar{F}$  為彈簧施予球之平均力)

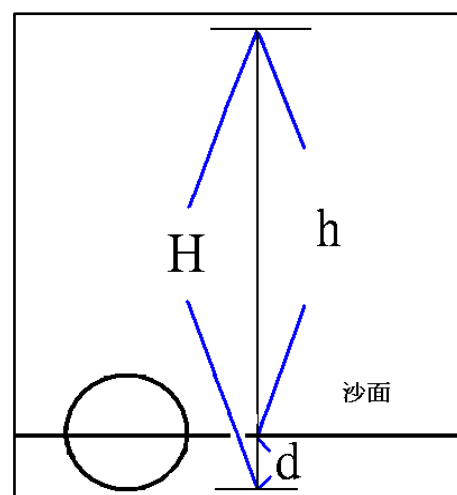
球自沙面上方  $h$  處靜止落下撞擊沙面，繼續穿透  $d$  後停止如(如圖二十五)，

同樣依據功能原理，得到  $\bar{F}d = MgH$  ( $\bar{F}$  為球落入沙面後，沙子施予球之平均力)

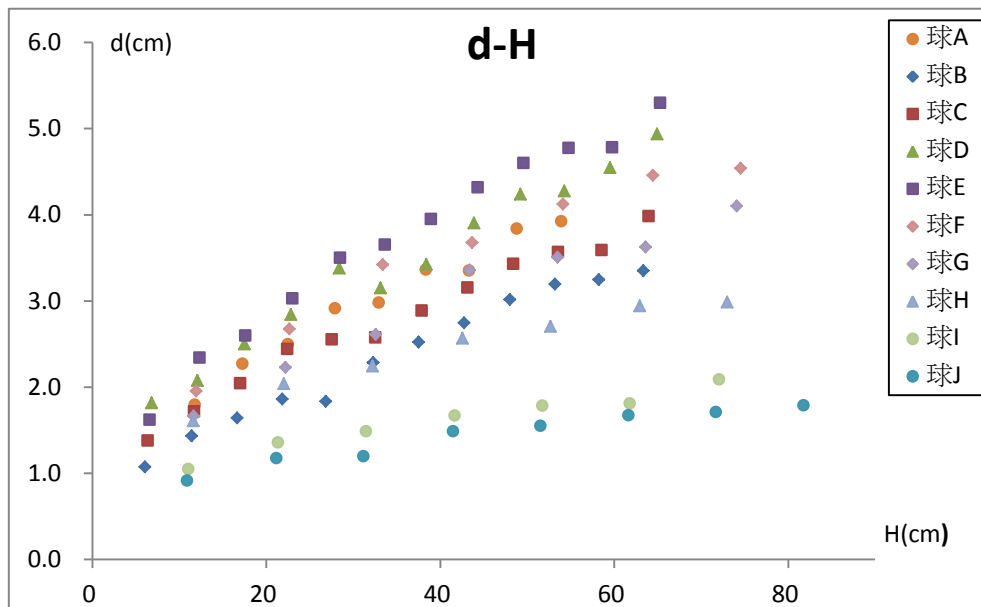
因此我們取  $d$  與  $H$  的實驗數據作圖並進行分析如圖二十六及圖二十七。



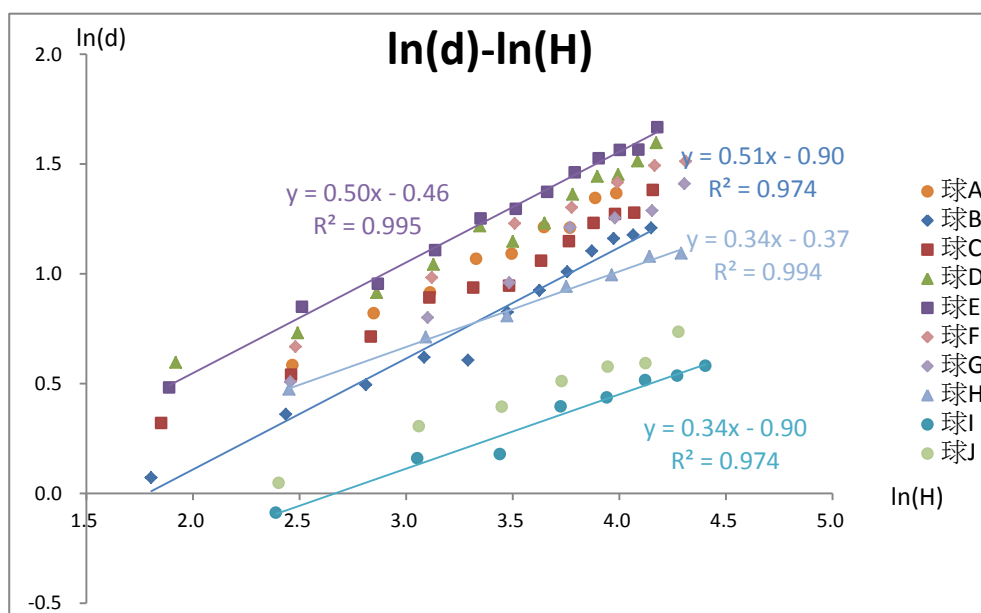
(圖二十四)



(圖二十五)



(圖二十六)  $d$  與  $H$



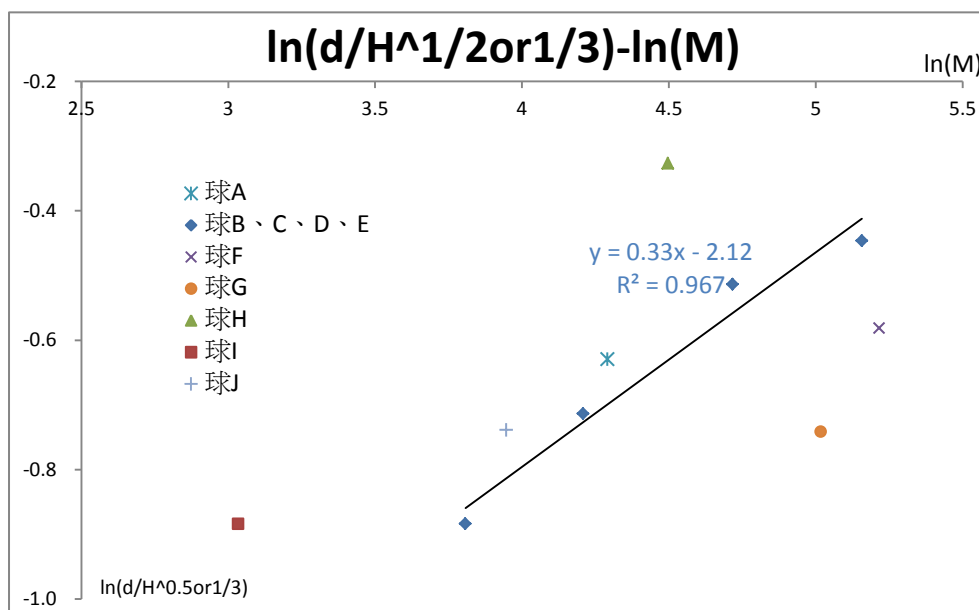
(圖二十七)  $\ln(d)$  與  $\ln(H)$

由圖二十七可看出， $d$  與  $H$  的關係依球密度的大小大致分為兩種情況：

1. 密度較大的球(球 A 到 G)： $d$  約與  $H$  的  $\frac{1}{2}$  次方成正比
2. 密度較小的球(球 H 到 J)： $d$  約與  $H$  的  $\frac{1}{3}$  次方成正比

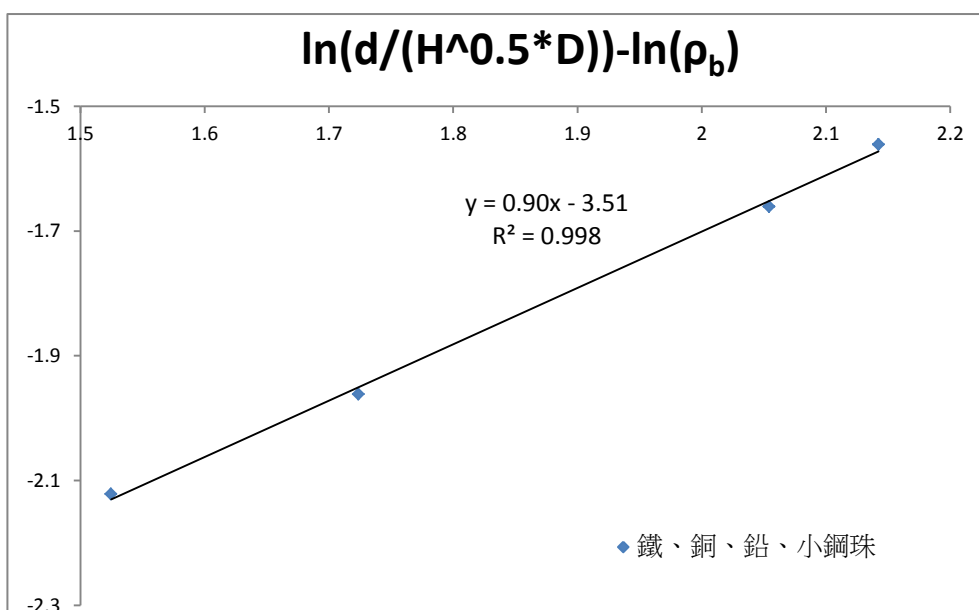
## (2)d 與 M 及 D 之關係

將密度較大的球(球 A 到 G)，以同顆球在不同的釋放高度所得 $\frac{d}{H^2}$ 的平均值及密度較小的球(球 H 到 J) 以同顆球在不同的釋放高度所得 $\frac{d}{H^3}$ 的平均值與 M 取對數(ln)作圖，如圖二十八。對於密度相同、質量不同的四顆鐵球(球 B 到 E)而言，其數據點分布大致呈一直線，由趨勢線斜率知，當球密度固定時， $d \propto M^{\frac{1}{3}} \propto (D^3)^{\frac{1}{3}}$ ，故 d 大約與 D 成正比。



(圖二十八) ln(d/H<sup>1/2or1/3</sup>)-ln(M)

將密度較大的球(球 A 到 G)，以同顆球在不同的釋放高度所得 $\frac{d}{DH^2}$ 的平均值與 $\rho_b$ 取對數(ln)作圖，如圖二十九。由趨勢線之斜率可知，發現 d 大約與 $\rho_b$ 成正比。



(圖二十九) ln(d/(H<sup>0.5</sup>\*D))-ln( $\rho_b$ )

綜合上述，對密度較大的球(球 A 到 G)而言，可得

$$d \propto \rho_b D H^{\frac{1}{2}}$$

而密度較小的球，依現有的實驗數據只能求得  $d$  約與  $H$  的  $\frac{1}{3}$  次方成正比，尚無法求出  $d$  與  $\rho_b$  及  $D$  的關係。即對密度較小的球而言

$$d \propto H^{\frac{1}{3}}$$

### 討論

由實驗結果發現，密度較小的球， $d \propto H^{\frac{1}{3}}$ ；而密度較大的球， $d \propto H^{\frac{1}{2}}$ 。我們推測球沒入沙子後，受到沙子作用力若與速度無關，沙子對球的作用力可表示為：

$$\begin{cases} F = k_1 D z^2 & , d < D \\ F = k_2 \frac{D}{\rho_b} z & , d > D \end{cases} \quad \text{其中 } k_1、k_2 \text{ 為常數，} z \text{ 為球底部到沙面的距離}$$

當球體部分沒入沙中，沙子對球的作用力可類比成液體的浮力，浮體所受浮力取決於球沒入體積，而  $F \propto D z^2$  中的  $D z^2$  也可合理表為球的沒入體積。當球體全部沒入沙中，沙子對球的作用力可類比為彈簧壓縮時的彈力  $F \propto z$ ，當球沒入愈深，受到沙子給予的阻力愈大，如彈簧壓縮量愈大，彈力也愈大。

推導：

(1) 對於密度較小的球：

$$F = k_1 D z^2$$

$$\begin{aligned} W &= \int_0^d F \, dz = \int_0^d k_1 D z^2 \, dz \\ &= \left[ \frac{1}{3} k_1 D z^3 \right]_0^d = \frac{1}{3} k_1 D d^3 \end{aligned}$$

$$\text{依功能原理 } W = MgH, \quad \frac{1}{3} k_1 D d^3 = MgH = \frac{4}{3} \pi \left( \frac{D}{2} \right)^3 \rho_b g H$$

$$D d^3 \propto D^3 \rho_b H$$

$$\text{得} \quad d \propto \rho_b^{\frac{1}{3}} D^{\frac{2}{3}} H^{\frac{1}{3}}$$

(2)對於密度較大的球：

$$F = k_2 \frac{D}{\rho_b} z$$

$$\begin{aligned}\int_0^d F dz &= \int_0^d k_2 \frac{D}{\rho_b} z dz \\ &= \left[ \frac{1}{2} k_2 \frac{D}{\rho_b} z^2 \right]_0^d = \frac{1}{2} k_2 \frac{D}{\rho_b} d^2\end{aligned}$$

$$\text{依功能原理 } W = MgH, \quad \frac{1}{2} k_2 \frac{D}{\rho_b} d^2 = MgH = \frac{4}{3} \pi \left( \frac{D}{2} \right)^3 \rho_b gH$$

$$\frac{D}{\rho_b} d^2 \propto D^3 \rho_b H$$

得

$$d \propto \rho_b D H^{\frac{1}{2}}$$

### 討論

對於  $d \propto \rho_b D H^{\frac{1}{2}}$ ，若將其化為 P 的形式

$$d \propto \rho_b D H^{\frac{1}{2}} \propto \left( \frac{M}{D^3} \right) D H^{\frac{1}{2}}$$

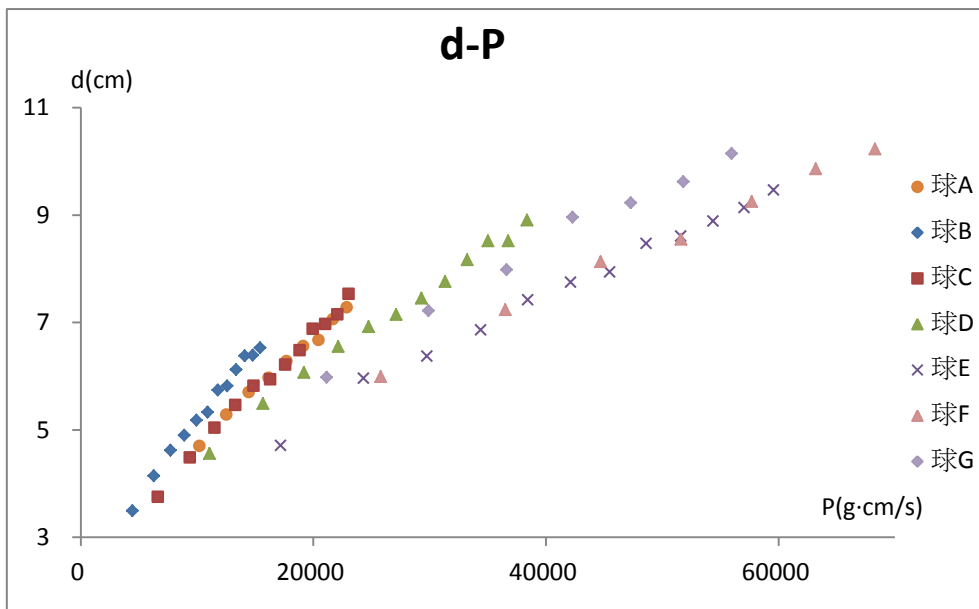
$$\text{又撞擊速率 } v = \sqrt{2gh} \propto \sqrt{h} \approx \sqrt{H}$$

$$\text{所以 } d \propto \left( \frac{M}{D^3} \right) D v$$

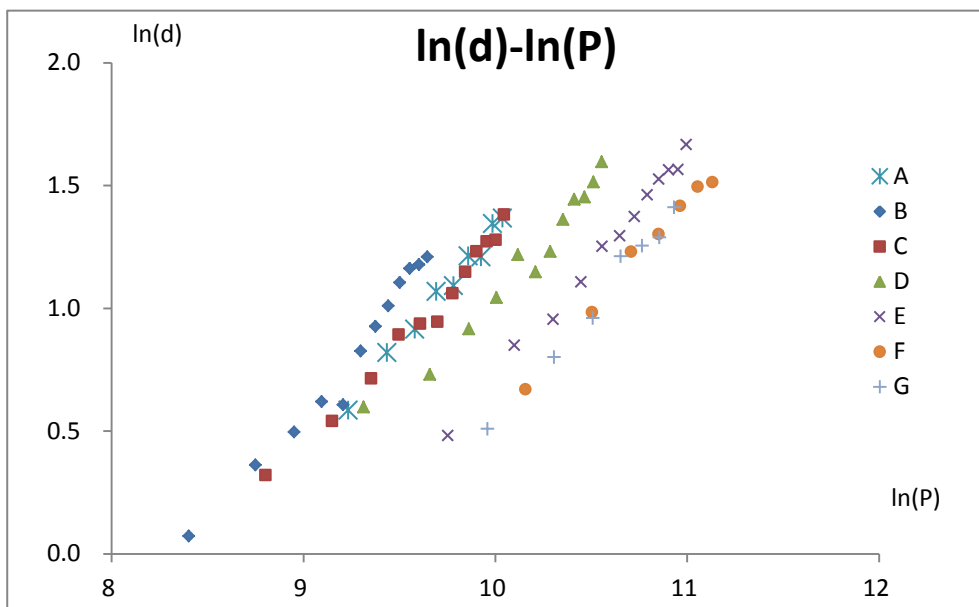
$$\text{得 } d \propto \frac{P}{D^2}$$

由  $d \propto \frac{P}{D^2}$ ，可解釋圖三十所觀察到的結果：對密度較大的球(球 A 到 G)，P 固定時，D 愈小，d 愈大。亦即對密度較大的球(球 A 到 G)，決定穿透深度的主因為球體單位截面積的撞擊動量。





(圖三十) d-P



(圖三十一) ln(d)-ln(P)

## 討論

由前述，對所有球而言  $w \propto D^{\frac{3}{4}} h^{\frac{1}{4}}$  都適用，但對密度較大與密度較小的球， $d$  卻有  $d \propto H^{\frac{1}{2}}$  與  $d \propto H^{\frac{1}{3}}$  兩種不同形式，可見沙坑的形成過程中，造成沙面隆起及穿透的作用機制應該不同。

## 陸、結論

一、沙面隆起平均寬度  $w$ ：

(一)  $w \propto D^{\frac{3}{4}} h^{\frac{1}{4}}$ ，可推知  $w$  僅由球直徑  $D$  及釋放高度  $h$  決定，而與球密度  $\rho_b$  無關。

(二)  $w \propto \left( \frac{Mgh}{\rho_b} \right)^{\frac{1}{4}}$ ， $w$  由單位密度的撞擊動能決定。當  $E_k$  為定值時， $\rho_b$  愈小的球，造成的  $w$  愈大。

二、穿透深度  $d$ ：

(一) 對密度較大的球(球 A 到 G)而言：

$$(1) d \propto \rho_b D H^{\frac{1}{2}}。$$

(2)  $d$  大致正比與  $\frac{P}{D^2}$ 。亦即  $d$  由球體單位截面積的撞擊動量決定。當  $P$  為定值時， $D$  愈小的球，穿透深度  $d$  愈大。

(3) 當  $d > D$  時，沙子對球的作用力可類比為彈簧壓縮時的彈力，即  $F \propto z$ 。

(二) 對密度較小的球(球 H 到 J)而言：

$$(1) d \propto H^{\frac{1}{3}}。$$

(2) 當  $d < D$  時，沙子對球的作用力可類比成液體的浮力，即  $F \propto D z^2$ 。

(三) 造成沙面隆起及球體穿透的作用機制應該不同

## 柒、未來展望

一、取更多密度較小的球進行實驗，探討其穿透深度  $d$  與  $\rho_b$ 、 $D$  及  $H$  的關係

二、以密度較小的球，從較高的  $h$  靜止下落，探討當  $d > D$  時， $d$  是否與  $H$  的二分之一次方成正比

三、以密度較大的球，從較小的  $h$  靜止下落，探討當  $d < D$  時， $d$  是否與  $H$  的三分之一次方成正比

四、改變沙面到容器底部的距離，探討會造成何種不同的結果

五、改變沙子的性質(如密度、粒徑及堆積型態……等)，探討會造成何種不同的結果

## 捌、參考資料

1. 普通物理學；Harris Benson；朱達勇、谷天心、徐植蔚、鄭宜男譯；歐亞書局有限公司。2008 年 6 月出版七刷。

2. H.Katsuragi & D.J.Durian: Unified force law for granular impact cratering. Department of Physics and Astronomy, University of Pennsylvania, Philadelphia, Pennsylvania, 19104-6396, USA.

3. Vanissra Boonyaleepun & Se-Won Jang: Formation of Craters in Sand. IB Physics, International School Bangkok

4. J.R. Claycomb: Impact crater experiments for introductory physics and astronomy laboratories. Department of Mathematics and Physics, Houston Baptist University, Houston, TX 77074, USA.

5. Joseph C. Amato<sup>aS)</sup> and Roger E. Williams: Crater formation in the laboratory: An introductory in error analysis. Department of Physics and Astronomy, Colgate University, Hamilton, New York 13346

6. J.S. Uehara, M.A. Ambroso, R.P. Ojha, and D.J. Durian, UCLA Department of Physics & Astronomy, Los Angeles, CA 90095-1547

## 附錄

### 一、實驗數據

#### (一)直徑 2.220cm 銅球

釋放高度：5cm

	沙面	球頂	寬度 1	寬度 2	寬度(平均)	球頂到沙面距離	球落入沙面深度
1	5.990	4.785	3.55	3.60	3.58	1.205	1.015
2	6.345	4.855	3.65	3.55	3.60	1.490	0.730
3	5.985	4.975	3.45	3.60	3.53	1.010	1.210
4	6.000	5.100	3.40	3.35	3.38	0.900	1.320
5	5.940	4.815	3.35	3.35	3.35	1.125	1.095
平均					3.49	1.146	1.074

釋放高度：10cm

	沙面	球頂	寬度 1	寬度 2	寬度(平均)	球頂到沙面距離	球落入沙面深度
1	5.820	5.125	4.05	4.20	4.13	0.695	1.525
2	5.940	5.365	4.00	4.05	4.03	0.575	1.645
3	5.815	5.000	4.25	4.30	4.28	0.815	1.405
4	4.625	3.755	4.15	4.15	4.15	0.870	1.350
5	4.930	4.060	4.10	4.10	4.10	0.870	1.350
平均					4.14	0.765	1.455

釋放高度：15cm

	沙面	球頂	寬度 1	寬度 2	寬度(平均)	球頂到沙面距離	球落入沙面深度
1	4.510	3.760	4.65	4.50	4.58	0.750	1.470
2	4.390	3.985	4.65	4.65	4.65	0.405	1.815
3	4.315	3.850	4.70	4.60	4.65	0.465	1.755
4	4.160	3.355	4.60	4.60	4.60	0.805	1.415
5	4.425	3.955	4.65	4.60	4.63	0.470	1.750
平均					4.62	0.579	1.641

釋放高度：20cm

	沙面	球頂	寬度 1	寬度 2	寬度(平均)	球頂到沙面距離	球落入沙面深度
1	5.955	5.495	4.80	4.85	4.83	0.460	1.760
2	6.140	5.845	4.90	5.05	4.98	0.295	1.925
3	6.305	5.880	4.90	5.00	4.95	0.425	1.795
4	6.800	6.515	4.80	4.65	4.73	0.285	1.935
5	6.570	6.230	4.95	5.05	5.00	0.340	1.880
平均					4.90	0.361	1.859

釋放高度：25cm

	沙面	球頂	寬度 1	寬度 2	寬度(平均)	球頂到沙面距離	球落入沙面深度
1	6.905	6.990	5.15	5.45	5.30	-0.085	2.305
2	6.890	6.840	5.20	5.30	5.25	0.050	2.170
3	6.550	7.075	5.45	5.55	5.50	-0.525	2.745
4	9.355	9.225	5.15	5.20	5.18	0.130	2.090
5	7.490	7.575	5.35	5.40	5.38	-0.085	2.305
平均					5.32	-0.103	2.323

釋放高度：30cm

	沙面	球頂	寬度 1	寬度 2	寬度(平均)	球頂到沙面距離	球落入沙面深度
1	6.545	6.630	5.15	5.25	5.20	-0.085	2.305
2	6.425	6.400	5.10	5.30	5.20	0.025	2.195
3	6.440	6.330	5.45	5.50	5.48	0.110	2.110
4	6.465	6.525	5.50	5.50	5.50	-0.060	2.280
5	6.580	6.890	5.25	5.30	5.28	-0.310	2.530
平均					5.33	-0.064	2.284

釋放高度：35cm

	沙面	球頂	寬度 1	寬度 2	寬度(平均)	球頂到沙面距離	球落入沙面深度
1	8.680	9.000	5.60	5.60	5.60	-0.320	2.540
2	8.680	8.870	5.80	5.75	5.78	-0.190	2.410
3	8.755	9.100	5.85	5.80	5.83	-0.345	2.565
4	8.660	9.025	5.75	5.80	5.78	-0.365	2.585
5	8.685	8.980	5.70	5.75	5.73	-0.295	2.515
平均					5.74	-0.303	2.523

釋放高度：40cm

	沙面	球頂	寬度 1	寬度 2	寬度(平均)	球頂到沙面距離	球落入沙面深度
1	7.890	8.455	5.65	5.70	5.68	-0.565	2.785
2	7.930	8.200	5.75	5.80	5.78	-0.270	2.490
3	8.000	8.560	5.90	5.85	5.88	-0.560	2.780
4	7.675	8.205	5.95	5.95	5.95	-0.530	2.750
5	7.805	8.500	5.65	5.95	5.80	-0.695	2.915
平均					5.82	-0.524	2.744

釋放高度：45cm

	沙面	球頂	寬度 1	寬度 2	寬度(平均)	球頂到沙面距離	球落入沙面深度
1	8.280	9.025	6.15	6.15	6.15	-0.745	2.965
2	8.535	9.390	5.95	6.10	6.03	-0.855	3.075
3	8.310	8.770	5.75	5.85	5.80	-0.460	2.680
4	8.145	9.005	6.25	6.30	6.28	-0.860	3.080
5	8.415	9.480	6.35	6.30	6.33	-1.065	3.285
平均					6.12	-0.797	3.017

釋放高度：50cm

	沙面	球頂	寬度 1	寬度 2	寬度(平均)	球頂到沙面距離	球落入沙面深度
1	8.505	9.310	6.40	6.45	6.43	-0.805	3.025
2	8.605	9.820	6.55	6.55	6.55	-1.215	3.435
3	8.560	9.550	6.45	6.25	6.35	-0.990	3.210
4	8.650	9.665	6.30	6.30	6.30	-1.015	3.235
5	9.000	9.855	6.25	6.25	6.25	-0.855	3.075
平均					6.38	-0.976	3.196

釋放高度：55cm

	沙面	球頂	寬度 1	寬度 2	寬度(平均)	球頂到沙面距離	球落入沙面深度
1	8.720	9.775	6.45	6.15	6.30	-1.055	3.275
2	8.740	9.875	6.35	6.40	6.38	-1.135	3.355
3	8.685	9.590	6.50	6.40	6.45	-0.905	3.125
4	8.565	9.700	6.40	6.35	6.38	-1.135	3.355
5	8.535	9.435	6.45	6.45	6.45	-0.900	3.120
平均					6.39	-1.026	3.246

釋放高度：60cm

	沙面	球頂	寬度 1	寬度 2	寬度(平均)	球頂到沙面距離	球落入沙面深度
1	8.270	9.470	6.60	6.55	6.58	-1.200	3.420
2	8.615	9.675	6.40	6.50	6.45	-1.060	3.280
3	8.415	9.670	6.65	6.65	6.65	-1.255	3.475
4	8.510	9.515	6.35	6.50	6.43	-1.005	3.225
5	9.375	(沒入)	6.50	6.60	6.55		
平均					6.53	-1.130	3.350

(二)直徑 2.540cm 鋼球

釋放高度：5 cm

	沙面	球頂	寬度 1	寬度 2	寬度(平均)	球頂到沙面距離	球落入沙面深度
1	6.795	5.610	3.60	3.75	3.68	1.185	1.355
2	7.165	5.895	3.75	3.70	3.73	1.270	1.270
3	6.975	5.945	3.75	3.75	3.75	1.030	1.510
4	6.890	5.915	3.80	3.70	3.75	0.975	1.565
5	7.090	5.735	3.80	3.90	3.85	1.355	1.185
平均					3.75	1.163	1.377

釋放高度：10 cm

	沙面	球頂	寬度 1	寬度 2	寬度(平均)	球頂到沙面距離	球落入沙面深度
1	6.265	5.715	4.60	4.65	4.63	0.550	1.990
2	6.280	5.080	4.20	4.30	4.25	1.200	1.340
3	6.300	5.510	4.55	4.50	4.53	0.790	1.750
4	6.195	5.590	4.60	4.50	4.55	0.605	1.935
5	6.235	5.260	4.40	4.50	4.45	0.975	1.565
平均					4.48	0.824	1.716



釋放高度：15 cm

	沙面	球頂	寬度 1	寬度 2	寬度(平均)	球頂到沙面距離	球落入沙面深度
1	5.850	5.345	5.05	5.05	5.05	0.505	2.035
2	5.455	5.050	4.95	5.10	5.03	0.405	2.135
3	6.845	6.405	5.05	5.05	5.05	0.440	2.100
4	6.905	6.455	5.15	5.15	5.15	0.450	2.090
5	6.895	6.200	4.95	4.90	4.93	0.695	1.845
平均					5.04	0.499	2.041

釋放高度：20 cm

	沙面	球頂	寬度 1	寬度 2	寬度(平均)	球頂到沙面距離	球落入沙面深度
1	7.100	6.835	5.05	5.20	5.13	0.265	2.275
2	6.835	6.710	5.50	5.55	5.53	0.125	2.415
3	6.725	6.675	5.55	5.45	5.50	0.050	2.490
4	6.585	6.475	5.55	5.65	5.60	0.110	2.430
5	6.725	6.770	5.50	5.55	5.53	-0.045	2.585
平均					5.46	0.101	2.439

釋放高度：25 cm

	沙面	球頂	寬度 1	寬度 2	寬度(平均)	球頂到沙面距離	球落入沙面深度
1	6.620	6.650	5.75	5.70	5.73	-0.030	2.570
2	6.875	7.070	5.80	5.70	5.75	-0.195	2.735
3	7.030	7.000	5.95	5.85	5.90	0.030	2.510
4	6.820	6.870	5.85	5.90	5.88	-0.050	2.590
5	6.805	6.615	5.85	5.80	5.83	0.190	2.350
平均					5.82	-0.011	2.551

釋放高度：30 cm

	沙面	球頂	寬度 1	寬度 2	寬度(平均)	球頂到沙面距離	球落入沙面深度
1	6.970	7.085	6.30	6.00	6.15	-0.115	2.655
2	7.180	7.355	6.05	5.80	5.93	-0.175	2.715
3	7.525	7.510	5.80	5.65	5.73	0.015	2.525
4	7.490	7.405	6.00	5.90	5.95	0.085	2.455
5	7.330	7.300	6.00	5.90	5.95	0.030	2.510
平均					5.94	-0.032	2.572

釋放高度：35 cm

	沙面	球頂	寬度 1	寬度 2	寬度(平均)	球頂到沙面距離	球落入沙面深度
1	7.400	7.645	6.30	6.25	6.28	-0.245	2.785
2	7.440	7.785	6.30	6.45	6.38	-0.345	2.885
3	7.500	7.805	6.15	5.90	6.03	-0.305	2.845
4	7.405	7.740	6.20	6.20	6.20	-0.335	2.875
5	7.285	7.785	6.15	6.20	6.18	-0.500	3.040
平均					6.21	-0.346	2.886

釋放高度：40 cm

	沙面	球頂	寬度 1	寬度 2	寬度(平均)	球頂到沙面距離	球落入沙面深度
1	7.300	7.930	6.50	6.40	6.45	-0.630	3.170
2	7.090	7.780	6.65	6.45	6.55	-0.690	3.230
3	7.100	7.840	6.60	6.70	6.65	-0.740	3.280
4	7.155	7.715	6.55	6.60	6.58	-0.560	3.100
5	7.245	7.685	6.20	6.10	6.15	-0.440	2.980
平均					6.48	-0.612	3.152

釋放高度：45 cm

	沙面	球頂	寬度 1	寬度 2	寬度(平均)	球頂到沙面距離	球落入沙面深度
1	7.340	8.060	6.75	6.85	6.80	-0.720	3.260
2	7.425	8.675	7.00	6.85	6.93	-1.250	3.790
3	7.660	8.350	6.95	6.60	6.78	-0.690	3.230
4	7.735	8.745	7.05	6.95	7.00	-1.010	3.550
5	7.885	8.650	6.85	6.95	6.90	-0.765	3.305
平均					6.88	-0.887	3.427

釋放高度：50 cm

	沙面	球頂	寬度 1	寬度 2	寬度(平均)	球頂到沙面距離	球落入沙面深度
1	7.910	9.095	7.20	7.30	7.25	-1.185	3.725
2	7.915	8.888	6.60	6.80	6.70	-0.973	3.513
3	7.900	8.940	6.90	7.05	6.98	-1.040	3.580
4	8.075	8.915	6.85	6.80	6.83	-0.840	3.380
5	7.890	8.980	7.05	7.15	7.10	-1.090	3.630
平均					6.97	-1.026	3.566

釋放高度：55 cm

	沙面	球頂	寬度 1	寬度 2	寬度(平均)	球頂到沙面距離	球落入沙面深度
1	8.010	8.915	7.00	7.25	7.13	-0.905	3.445
2	7.050	8.170	7.25	7.30	7.28	-1.120	3.660
3	6.805	7.865	7.15	7.30	7.23	-1.060	3.600
4	6.795	8.060	6.85	7.10	6.98	-1.265	3.805
5	6.740	7.630	7.10	7.15	7.13	-0.890	3.430
平均					7.15	-1.048	3.588

釋放高度：60 cm

	沙面	球頂	寬度 1	寬度 2	寬度(平均)	球頂到沙面距離	球落入沙面深度
1	6.895	8.175	7.35	7.35	7.35	-1.280	3.820
2	6.610	8.150	7.50	7.35	7.43	-1.540	4.080
3	6.560	8.100	7.70	7.60	7.65	-1.540	4.080
4	6.760	8.285	7.65	7.65	7.65	-1.525	4.065
5	6.760	8.080	7.70	7.45	7.58	-1.320	3.860
平均					7.53	-1.441	3.981

(三)直徑 3.015cm 銅球

釋放高度：5cm

	沙面	球頂	寬度 1	寬度 2	寬度(平均)	球頂到沙面距離	球落入沙面深度
1	7.770	6.620	4.55	4.70	4.63	1.150	1.865
2	8.115	6.970	4.45	4.65	4.55	1.145	1.870
3	7.995	6.750	4.50	4.70	4.60	1.245	1.770
4	7.800	6.640	4.20	4.40	4.30	1.160	1.855
5	7.880	6.590	4.60	4.80	4.70	1.290	1.725
平均					4.56	1.198	1.817

釋放高度：10cm

	沙面	球頂	寬度 1	寬度 2	寬度(平均)	球頂到沙面距離	球落入沙面深度
1	7.690	6.510	5.55	5.65	5.60	1.180	1.835
2	7.565	6.540	5.40	5.55	5.48	1.025	1.990
3	7.505	6.925	5.55	5.45	5.50	0.580	2.435
4	7.395	6.500	5.10	5.40	5.25	0.895	2.120
5	7.535	6.525	5.55	5.65	5.60	1.010	2.005
平均					5.49	0.938	2.077

釋放高度：15cm

	沙面	球頂	寬度 1	寬度 2	寬度(平均)	球頂到沙面距離	球落入沙面深度
1	7.550	7.130	5.75	5.95	5.85	0.420	2.595
2	7.640	7.020	6.00	6.25	6.13	0.620	2.395
3	7.450	6.915	6.10	6.25	6.18	0.535	2.480
4	7.510	7.000	6.00	6.25	6.13	0.510	2.505
5	7.685	7.185	5.90	6.20	6.05	0.500	2.515
平均					6.07	0.517	2.498

釋放高度：20cm

	沙面	球頂	寬度 1	寬度 2	寬度(平均)	球頂到沙面距離	球落入沙面深度
1	7.575	7.580	6.60	6.90	6.75	-0.005	3.020
2	7.425	7.300	6.00	6.30	6.15	0.125	2.890
3	7.555	7.400	6.65	6.75	6.70	0.155	2.860
4	7.465	7.200	6.45	6.65	6.55	0.265	2.750
5	7.665	7.330	6.45	6.75	6.60	0.335	2.680
平均					6.55	0.175	2.840

釋放高度：25cm

	沙面	球頂	寬度 1	寬度 2	寬度(平均)	球頂到沙面距離	球落入沙面深度
1	7.555	8.010	6.80	7.10	6.95	-0.455	3.470
2	7.685	8.015	6.75	6.85	6.80	-0.330	3.345
3	7.700	8.150	7.05	7.10	7.08	-0.450	3.465
4	7.970	8.145	6.65	6.85	6.75	-0.175	3.190
5	7.780	8.200	7.05	7.00	7.03	-0.420	3.435
平均					6.92	-0.366	3.381

釋放高度：30cm

	沙面	球頂	寬度 1	寬度 2	寬度(平均)	球頂到沙面距離	球落入沙面深度
1	7.990	7.975	7.00	7.40	7.20	0.015	3.000
2	8.065	8.160	7.05	7.40	7.23	-0.095	3.110
3	8.320	8.245	6.95	7.15	7.05	0.075	2.940
4	8.025	8.300	6.95	7.10	7.03	-0.275	3.290
5	7.675	8.070	7.00	7.50	7.25	-0.395	3.410
平均					7.15	-0.135	3.150

釋放高度：35cm

	沙面	球頂	寬度 1	寬度 2	寬度(平均)	球頂到沙面距離	球落入沙面深度
1	7.890	8.300	7.20	7.50	7.35	-0.410	3.425
2	7.995	8.300	7.50	7.65	7.58	-0.305	3.320
3	8.355	8.515	7.45	7.50	7.48	-0.160	3.175
4	7.840	8.610	7.45	7.65	7.55	-0.770	3.785
5	7.960	8.355	7.25	7.35	7.30	-0.395	3.410
平均					7.45	-0.408	3.423

釋放高度：40cm

	沙面	球頂	寬度 1	寬度 2	寬度(平均)	球頂到沙面距離	球落入沙面深度
1	7.990	8.595	7.65	7.80	7.73	-0.605	3.620
2	8.050	9.020	7.80	7.90	7.85	-0.970	3.985
3	7.745	8.725	7.70	7.90	7.80	-0.980	3.995
4	7.920	8.655	7.60	7.70	7.65	-0.735	3.750
5	7.925	9.080	7.70	7.85	7.78	-1.155	4.170
平均					7.76	-0.889	3.904

釋放高度：45cm

	沙面	球頂	寬度 1	寬度 2	寬度(平均)	球頂到沙面距離	球落入沙面深度
1	7.455	8.990	8.40	8.30	8.35	-1.535	4.550
2	7.905	9.015	8.10	8.10	8.10	-1.110	4.125
3	7.765	8.770	8.25	8.10	8.18	-1.005	4.020
4	7.605	8.995	8.10	8.20	8.15	-1.390	4.405
5	7.880	8.955	7.95	8.20	8.08	-1.075	4.090
平均					8.17	-1.223	4.238

釋放高度：50cm

	沙面	球頂	寬度 1	寬度 2	寬度(平均)	球頂到沙面距離	球落入沙面深度
1	8.345	9.535	8.35	8.25	8.30	-1.190	4.205
2	7.900	9.265	8.65	8.70	8.68	-1.365	4.380
3	7.800	9.120	8.20	8.30	8.25	-1.320	4.335
4	8.115	9.365	8.60	8.90	8.75	-1.250	4.265
5	8.230	9.410	8.50	8.75	8.63	-1.180	4.195
平均					8.52	-1.261	4.276

釋放高度：55cm

	沙面	球頂	寬度 1	寬度 2	寬度(平均)	球頂到沙面距離	球落入沙面深度
1	8.220	9.470	8.35	8.25	8.30	-1.250	4.265
2	8.050	9.580	8.65	8.70	8.68	-1.530	4.545
3	7.990	9.300	8.20	8.30	8.25	-1.310	4.325
4	7.890	9.740	8.60	8.90	8.75	-1.850	4.865
5	7.700	9.415	8.50	8.75	8.63	-1.715	4.730
平均					8.52	-1.531	4.546

釋放高度：60cm

	沙面	球頂	寬度 1	寬度 2	寬度(平均)	球頂到沙面距離	球落入沙面深度
1	7.695	10.050	9.00	9.20	9.10	-2.355	5.370
2	7.745	9.815	8.90	8.95	8.93	-2.070	5.085
3	7.900	9.440	8.65	8.85	8.75	-1.540	4.555
4	7.905	9.780	9.05	8.70	8.88	-1.875	4.890
5	8.050	9.815	8.85	8.90	8.88	-1.765	4.780
平均					8.91	-1.921	4.936

(四)直徑 3.500cm 鋼球

釋放高度：5cm

	沙面	球頂	寬度 1	寬度 2	寬度(平均)	球頂到沙面距離	球落入沙面深度
1	7.690	5.690	4.85	4.65	4.75	2.000	1.500
2	7.540	5.815	4.70	4.70	4.70	1.725	1.775
3	7.540	5.755	4.60	4.90	4.75	1.785	1.715
4	7.715	5.620	4.70	4.50	4.60	2.095	1.405
5	7.690	5.885	4.70	4.75	4.73	1.805	1.695
平均					4.71	1.882	1.618

釋放高度：10cm

	沙面	球頂	寬度 1	寬度 2	寬度(平均)	球頂到沙面距離	球落入沙面深度
1	7.385	6.105	5.75	7.95	6.85	1.280	2.220
2	7.430	6.370	5.75	5.75	5.75	1.060	2.440
3	7.360	6.125	5.70	5.75	5.73	1.235	2.265
4	7.310	6.150	5.85	5.95	5.90	1.160	2.340
5	7.185	6.110	5.50	5.65	5.58	1.075	2.425
平均					5.96	1.162	2.338

釋放高度：15cm

	沙面	球頂	寬度 1	寬度 2	寬度(平均)	球頂到沙面距離	球落入沙面深度
1	7.335	6.440	6.05	6.40	6.23	0.895	2.605
2	7.325	6.400	6.40	6.40	6.40	0.925	2.575
3	7.635	6.800	6.15	6.30	6.23	0.835	2.665
4	7.575	6.705	6.45	6.60	6.53	0.870	2.630
5	7.415	6.425	6.35	6.60	6.48	0.990	2.510
平均					6.37	0.903	2.597



釋放高度：20cm

	沙面	球頂	寬度 1	寬度 2	寬度(平均)	球頂到沙面距離	球落入沙面深度
1	7.575	6.945	6.60	6.60	6.60	0.630	2.870
2	7.455	7.260	6.90	7.05	6.98	0.195	3.305
3	7.455	6.895	6.70	7.00	6.85	0.560	2.940
4	6.805	6.380	7.00	7.05	7.03	0.425	3.075
5	6.720	6.160	6.75	6.90	6.83	0.560	2.940
平均					6.86	0.474	3.026

釋放高度：25cm

	沙面	球頂	寬度 1	寬度 2	寬度(平均)	球頂到沙面距離	球落入沙面深度
1	6.601	6.780	7.55	7.45	7.50	-0.180	3.680
2	6.675	6.555	7.20	7.40	7.30	0.120	3.380
3	6.635	6.575	7.40	7.30	7.35	0.060	3.440
4	6.730	6.595	7.50	7.45	7.48	0.135	3.365
5	6.725	6.845	7.60	7.30	7.45	-0.120	3.620
平均					7.42	0.003	3.497

釋放高度：30cm

	沙面	球頂	寬度 1	寬度 2	寬度(平均)	球頂到沙面距離	球落入沙面深度
1	6.735	6.895	7.85	7.95	7.90	-0.160	3.660
2	6.810	6.895	7.65	7.65	7.65	-0.085	3.585
3	6.900	6.900	7.70	7.80	7.75	0.000	3.500
4	6.760	7.165	7.65	7.95	7.80	-0.405	3.905
5	6.750	6.850	7.60	7.70	7.65	-0.100	3.600
平均					7.75	-0.150	3.650

釋放高度：35cm

	沙面	球頂	寬度 1	寬度 2	寬度(平均)	球頂到沙面距離	球落入沙面深度
1	6.660	7.070	7.60	7.90	7.75	-0.410	3.910
2	6.795	7.115	8.00	8.00	8.00	-0.320	3.820
3	6.600	7.050	7.85	7.75	7.80	-0.450	3.950
4	6.905	7.130	7.65	7.90	7.78	-0.225	3.725
5	6.740	7.575	8.35	8.35	8.35	-0.835	4.335
平均					7.94	-0.448	3.948

釋放高度：40cm

	沙面	球頂	寬度 1	寬度 2	寬度(平均)	球頂到沙面距離	球落入沙面深度
1	6.485	7.350	8.40	8.65	8.53	-0.865	4.365
2	6.745	7.315	8.50	8.45	8.48	-0.570	4.070
3	6.940	7.465	8.35	8.40	8.38	-0.525	4.025
4	6.500	7.375	8.20	8.40	8.30	-0.875	4.375
5	6.515	7.760	8.60	8.70	8.65	-1.245	4.745
平均					8.47	-0.816	4.316

釋放高度：45cm

	沙面	球頂	寬度 1	寬度 2	寬度(平均)	球頂到沙面距離	球落入沙面深度
1	6.515	7.975	8.55	8.70	8.63	-1.460	4.960
2	8.210	9.170	8.40	8.65	8.53	-0.960	4.460
3	8.010	9.460	8.70	8.85	8.78	-1.450	4.950
4	8.580	9.435	8.55	8.50	8.53	-0.855	4.355
5	8.280	9.045	8.60	8.60	8.60	-0.765	4.265
平均					8.61	-1.098	4.598

釋放高度：50cm

	沙面	球頂	寬度 1	寬度 2	寬度(平均)	球頂到沙面距離	球落入沙面深度
1	9.125	10.265	8.65	8.50	8.58	-1.140	4.640
2	9.130	10.410	8.95	9.10	9.03	-1.280	4.780
3	9.125	10.140	8.65	8.65	8.65	-1.015	4.515
4	8.395	9.800	8.85	8.95	8.90	-1.405	4.905
5	8.230	9.760	9.25	9.30	9.28	-1.530	5.030
平均					8.89	-1.274	4.774

釋放高度：55cm

	沙面	球頂	寬度 1	寬度 2	寬度(平均)	球頂到沙面距離	球落入沙面深度
1	8.345	9.740	9.30	9.25	9.28	-1.395	4.895
2	8.495	9.790	9.35	9.15	9.25	-1.295	4.795
3	8.440	9.745	9.00	9.05	9.03	-1.305	4.805
4	8.445	9.710	9.05	9.05	9.05	-1.265	4.765
5	8.575	9.720	9.00	9.15	9.08	-1.145	4.645
平均					9.14	-1.281	4.781

釋放高度：60cm

	沙面	球頂	寬度 1	寬度 2	寬度(平均)	球頂到沙面距離	球落入沙面深度
1	8.320	10.350	9.40	9.60	9.50	-2.030	5.530
2	8.405	9.790	9.05	9.35	9.20	-1.385	4.885
3	8.120	10.360	9.80	9.80	9.80	-2.240	5.740
4	8.370	9.665	9.25	9.25	9.25	-1.295	4.795
5	8.345	10.380	9.70	9.50	9.60	-2.035	5.535
平均					9.47	-1.797	5.297

(五)直徑 2.540cm 銅球

釋放高度：10cm

	沙面	球頂	寬度 1	寬度 2	寬度(平均)	球頂到沙面距離	球落入沙面深度
1	7.970	7.510	4.60	4.55	4.58	0.460	2.080
2	8.010	7.075	4.85	4.80	4.83	0.935	1.605
3	8.335	7.490	4.60	4.50	4.55	0.845	1.695
4	8.130	7.380	4.75	4.85	4.80	0.750	1.790
5	8.130	7.385	4.70	4.75	4.73	0.745	1.795
平均					4.70	0.747	1.793

釋放高度：15cm

	沙面	球頂	寬度 1	寬度 2	寬度(平均)	球頂到沙面距離	球落入沙面深度
1	8.390	8.120	5.35	5.40	5.38	0.270	2.270
2	8.360	8.095	5.25	5.10	5.18	0.265	2.275
3	8.485	8.370	5.25	5.10	5.18	0.115	2.425
4	8.680	8.240	5.30	5.30	5.30	0.440	2.100
5	8.560	8.295	5.40	5.30	5.35	0.265	2.275
平均					5.28	0.271	2.269

釋放高度：20cm

	沙面	球頂	寬度 1	寬度 2	寬度(平均)	球頂到沙面距離	球落入沙面深度
1	8.255	8.170	5.65	5.75	5.70	0.085	2.455
2	8.390	8.305	5.65	5.70	5.68	0.085	2.455
3	7.735	7.600	5.50	5.65	5.58	0.135	2.405
4	8.450	8.600	5.80	5.75	5.78	-0.150	2.690
5	8.495	8.425	5.75	5.80	5.78	0.070	2.470
平均					5.70	0.045	2.495

釋放高度：25cm

	沙面	球頂	寬度 1	寬度 2	寬度(平均)	球頂到沙面距離	球落入沙面深度
1	8.590	8.735	5.95	5.80	5.88	-0.145	2.685
2	8.360	8.830	6.05	5.95	6.00	-0.470	3.010
3	8.315	8.790	5.90	6.05	5.98	-0.475	3.015
4	8.260	8.935	6.10	6.20	6.15	-0.675	3.215
5	8.635	8.720	5.95	5.75	5.85	-0.085	2.625
平均					5.97	-0.370	2.910

釋放高度：30cm

	沙面	球頂	寬度 1	寬度 2	寬度(平均)	球頂到沙面距離	球落入沙面深度
1	8.600	9.095	6.45	6.30	6.38	-0.495	3.035
2	8.300	8.615	6.10	6.10	6.10	-0.315	2.855
3	8.310	8.840	6.30	6.15	6.23	-0.530	3.070
4	8.755	8.980	6.20	6.25	6.23	-0.225	2.765
5	8.230	8.865	6.50	6.40	6.45	-0.635	3.175
平均					6.28	-0.440	2.980

釋放高度：35cm

	沙面	球頂	寬度 1	寬度 2	寬度(平均)	球頂到沙面距離	球落入沙面深度
1	8.515	9.230	6.35	6.50	6.43	-0.715	3.255
2	8.335	9.230	6.55	6.55	6.55	-0.895	3.435
3	8.400	9.170	6.50	6.50	6.50	-0.770	3.310
4	8.505	9.450	6.70	6.70	6.70	-0.945	3.485
5	8.430	9.215	6.60	6.65	6.63	-0.785	3.325
平均					6.56	-0.822	3.362

釋放高度：40cm

	沙面	球頂	寬度 1	寬度 2	寬度(平均)	球頂到沙面距離	球落入沙面深度
1	8.670	9.565	6.80	7.00	6.90	-0.895	3.435
2	7.970	8.955	6.80	6.50	6.65	-0.985	3.525
3	8.170	9.015	6.90	6.80	6.85	-0.845	3.385
4	8.090	8.710	6.30	6.45	6.38	-0.620	3.160
5	8.445	9.145	6.50	6.60	6.55	-0.700	3.240
平均					6.67	-0.809	3.349

釋放高度：45cm

	沙面	球頂	寬度 1	寬度 2	寬度(平均)	球頂到沙面距離	球落入沙面深度
1	8.350	9.860	7.25	7.25	7.25	-1.510	4.050
2	8.470	9.565	6.75	6.60	6.68	-1.095	3.635
3	8.435	9.675	7.05	7.10	7.08	-1.240	3.780
4	8.410	9.730	7.30	7.15	7.23	-1.320	3.860
5	8.455	9.775	7.10	7.05	7.08	-1.320	3.860
平均					7.06	-1.297	3.837

釋放高度：50cm

	沙面	球頂	寬度 1	寬度 2	寬度(平均)	球頂到沙面距離	球落入沙面深度
1	8.490	9.600	7.05	7.05	7.05	-1.110	3.650
2	8.230	9.520	7.25	7.30	7.28	-1.290	3.830
3	8.315	9.900	7.55	7.40	7.48	-1.585	4.125
4	8.365	9.755	7.20	7.10	7.15	-1.390	3.930
5	8.280	9.825	7.35	7.50	7.43	-1.545	4.085
平均					7.28	-1.384	3.924

(六)直徑 3.975cm 填充鉛粒的乒乓球

釋放高度：10cm

	沙面	球頂	寬度 1	寬度 2	寬度(平均)	球頂到沙面距離	球落入沙面深度
1	8.585	6.480	5.85	5.90	5.88	2.105	1.870
2	8.705	6.670	5.80	5.75	5.78	2.035	1.940
3	8.835	6.835	6.10	6.10	6.10	2.000	1.975
4	8.570	6.635	6.20	5.85	6.03	1.935	2.040
5	8.775	6.735	6.10	6.20	6.15	2.040	1.935
平均					5.99	2.023	1.952

釋放高度：20cm

	沙面	球頂	寬度 1	寬度 2	寬度(平均)	球頂到沙面距離	球落入沙面深度
1	8.500	7.160	7.20	7.10	7.15	1.340	2.635
2	8.580	7.270	7.30	7.20	7.25	1.310	2.665
3	8.510	7.310	7.40	7.35	7.38	1.200	2.775
4	8.585	7.235	7.25	7.20	7.23	1.350	2.625
5	8.660	7.360	7.05	7.30	7.18	1.300	2.675
平均					7.24	1.300	2.675

釋放高度：30cm

	沙面	球頂	寬度 1	寬度 2	寬度(平均)	球頂到沙面距離	球落入沙面深度
1	8.485	7.835	8.00	8.20	8.10	0.650	3.325
2	8.480	7.705	8.20	7.95	8.08	0.775	3.200
3	8.310	7.625	8.25	7.95	8.10	0.685	3.290
4	8.525	7.795	8.50	7.90	8.20	0.730	3.245
5	8.500	7.665	8.15	8.20	8.18	0.835	3.140
平均					8.13	0.735	3.240

釋放高度：40cm

	沙面	球頂	寬度 1	寬度 2	寬度(平均)	球頂到沙面距離	球落入沙面深度
1	8.500	8.170	8.25	8.45	8.35	0.330	3.645
2	8.565	8.080	8.45	8.25	8.35	0.485	3.490
3	8.625	8.220	8.70	8.70	8.70	0.405	3.570
4	8.230	8.400	8.95	8.50	8.73	-0.170	4.145
5	8.615	8.175	8.70	8.50	8.60	0.440	3.535
平均					8.55	0.298	3.677

釋放高度：50cm

	沙面	球頂	寬度 1	寬度 2	寬度(平均)	球頂到沙面距離	球落入沙面深度
1	8.485	8.655	9.25	9.30	9.28	-0.170	4.145
2	8.395	8.475	9.50	9.10	9.30	-0.080	4.055
3	8.300	8.610	9.25	9.40	9.33	-0.310	4.285
4	8.405	8.415	9.25	9.40	9.33	-0.010	3.985
5	8.265	8.435	8.80	9.20	9.00	-0.170	4.145
平均					9.25	-0.148	4.123

釋放高度：60cm

	沙面	球頂	寬度 1	寬度 2	寬度(平均)	球頂到沙面距離	球落入沙面深度
1	8.650	8.525	9.95	9.70	9.83	0.125	3.850
2	8.520	9.185	9.80	9.65	9.73	-0.665	4.640
3	8.610	9.165	9.85	9.90	9.88	-0.555	4.530
4	8.700	9.175	9.90	9.75	9.83	-0.475	4.450
5	8.405	9.240	10.20	9.90	10.05	-0.835	4.810
平均					9.86	-0.481	4.456

釋放高度：70cm

	沙面	球頂	寬度 1	寬度 2	寬度(平均)	球頂到沙面距離	球落入沙面深度
1	8.120	8.305	10.15	9.80	9.98	-0.185	4.160
2	8.010	8.400	10.05	10.10	10.08	-0.390	4.365
3	7.845	8.600	10.40	10.45	10.43	-0.755	4.730
4	7.740	8.520	10.50	10.55	10.53	-0.780	4.755
5	7.880	8.595	10.25	10.00	10.13	-0.715	4.690
平均					10.23	-0.565	4.540

(七)直徑 3.975cm 填充鋼珠的乒乓球

釋放高度：10cm

	沙面	球頂	寬度 1	寬度 2	寬度(平均)	球頂到沙面距離	球落入沙面深度
1	9.360	7.040	5.90	5.90	5.90	2.320	1.655
2	9.330	6.960	5.95	5.95	5.95	2.370	1.605
3	9.265	6.990	5.90	5.95	5.93	2.275	1.700
4	9.170	6.870	6.05	6.10	6.08	2.300	1.675
5	9.250	6.955	6.10	6.00	6.05	2.295	1.680
平均					5.98	2.312	1.663

釋放高度：20cm

	沙面	球頂	寬度 1	寬度 2	寬度(平均)	球頂到沙面距離	球落入沙面深度
1	9.255	7.560	7.05	7.35	7.20	1.695	2.280
2	9.085	7.460	7.40	7.30	7.35	1.625	2.350
3	9.085	7.460	7.10	7.20	7.15	1.625	2.350
4	9.355	7.425	7.10	7.05	7.08	1.930	2.045
5	9.335	7.470	7.30	7.30	7.30	1.865	2.110
平均					7.22	1.748	2.227

釋放高度：30cm

	沙面	球頂	寬度 1	寬度 2	寬度(平均)	球頂到沙面距離	球落入沙面深度
1	9.140	7.870	8.15	8.10	8.13	1.270	2.705
2	9.170	7.850	7.90	8.00	7.95	1.320	2.655
3	9.125	7.790	7.95	8.00	7.98	1.335	2.640
4	9.135	7.465	7.75	7.95	7.85	1.670	2.305
5	9.240	8.010	8.10	7.90	8.00	1.230	2.745
平均					7.98	1.365	2.610

釋放高度：40cm

	沙面	球頂	寬度 1	寬度 2	寬度(平均)	球頂到沙面距離	球落入沙面深度
1	8.820	8.245	9.15	9.00	9.08	0.575	3.400
2	8.920	8.370	9.10	8.90	9.00	0.550	3.425
3	8.980	8.400	9.30	9.00	9.15	0.580	3.395
4	9.120	8.180	8.80	8.55	8.68	0.940	3.035
5	9.220	8.785	8.90	8.90	8.90	0.435	3.540
平均					8.96	0.616	3.359

釋放高度：50cm

	沙面	球頂	寬度 1	寬度 2	寬度(平均)	球頂到沙面距離	球落入沙面深度
1	8.980	8.310	9.20	9.40	9.30	0.670	3.305
2	9.280	8.720	9.20	9.10	9.15	0.560	3.415
3	9.095	8.640	9.35	9.40	9.38	0.455	3.520
4	9.015	8.585	9.20	9.10	9.15	0.430	3.545
5	9.160	8.940	9.35	9.00	9.18	0.220	3.755
平均					9.23	0.467	3.508

釋放高度：60cm

	沙面	球頂	寬度 1	寬度 2	寬度(平均)	球頂到沙面距離	球落入沙面深度
1	9.230	8.815	9.40	9.20	9.30	0.415	3.560
2	9.290	8.705	9.60	9.65	9.63	0.585	3.390
3	9.200	8.700	9.60	9.50	9.55	0.500	3.475
4	8.970	8.805	10.00	9.80	9.90	0.165	3.810
5	8.960	8.880	9.95	9.45	9.70	0.080	3.895
平均					9.62	0.349	3.626

釋放高度：70cm

	沙面	球頂	寬度 1	寬度 2	寬度(平均)	球頂到沙面距離	球落入沙面深度
1	9.100	9.180	10.20	10.20	10.20	-0.080	4.055
2	9.160	9.150	10.10	10.20	10.15	0.010	3.965
3	8.655	9.145	10.40	10.15	10.28	-0.490	4.465
4	9.070	9.110	10.20	10.20	10.20	-0.040	4.015
5	9.080	9.110	10.10	9.75	9.93	-0.030	4.005
平均					10.15	-0.126	4.101

(八)直徑 3.975cm 填充鋅粉的乒乓球

釋放高度：10cm

	沙面	球頂	寬度 1	寬度 2	寬度(平均)	球頂到沙面	球落入沙面深度
1	9.090	6.220	5.60	5.65	5.63	2.870	1.105
2	9.375	6.365	5.40	5.20	5.30	3.010	0.965
3	9.075	6.110	5.35	5.45	5.40	2.965	1.010
4	9.200	6.180	5.10	5.15	5.13	3.020	0.955
5	9.050	6.110	5.35	5.45	5.40	2.940	1.035
平均					5.37	2.961	1.014

釋放高度：20cm

	沙面	球頂	寬度 1	寬度 2	寬度(平均)	球頂到沙面	球落入沙面深度
1	9.075	6.805	6.80	6.80	6.80	2.270	1.705
2	8.935	6.410	6.50	6.50	6.50	2.525	1.450
3	9.135	6.510	6.35	6.50	6.43	2.625	1.350
4	9.020	6.650	6.50	6.70	6.60	2.370	1.605
5	9.090	6.550	6.75	6.50	6.63	2.540	1.435
平均					6.59	2.466	1.509

釋放高度：30cm

	沙面	球頂	寬度 1	寬度 2	寬度(平均)	球頂到沙面	球落入沙面深度
1	9.030	6.740	7.35	7.30	7.33	2.290	1.685
2	8.825	7.070	7.65	7.60	7.63	1.755	2.220
3	8.890	6.990	7.65	7.35	7.50	1.900	2.075
4	8.890	6.810	7.45	7.45	7.45	2.080	1.895
5	8.820	6.810	7.25	7.30	7.28	2.010	1.965
平均					7.44	2.007	1.968

釋放高度：40cm

	沙面	球頂	寬度 1	寬度 2	寬度(平均)	球頂到沙面	球落入沙面深度
1	8.750	6.885	7.90	7.80	7.85	1.865	2.110
2	8.710	7.400	8.35	8.30	8.33	1.310	2.665
3	8.835	7.047	7.95	8.00	7.98	1.788	2.187
4	8.645	7.480	8.35	8.40	8.38	1.165	2.810
5	8.800	7.265	8.20	8.10	8.15	1.535	2.440
平均					8.14	1.533	2.442

釋放高度：50cm

	沙面	球頂	寬度 1	寬度 2	寬度(平均)	球頂到沙面	球落入沙面深度
1	8.955	7.350	8.60	8.70	8.65	1.605	2.370
2	8.920	7.245	8.50	8.40	8.45	1.675	2.300
3	8.900	7.495	8.45	8.40	8.43	1.405	2.570
4	8.850	7.320	8.55	8.55	8.55	1.530	2.445
5	9.140	7.490	8.65	8.65	8.65	1.650	2.325
平均					8.55	1.573	2.402

釋放高度：60cm

	沙面	球頂	寬度 1	寬度 2	寬度(平均)	球頂到沙面	球落入沙面深度
1	8.960	7.465	8.80	8.85	8.83	1.495	2.480
2	8.795	7.345	8.55	8.75	8.65	1.450	2.525
3	8.805	7.380	8.75	8.70	8.73	1.425	2.550
4	9.035	7.470	8.40	8.40	8.40	1.565	2.410
5	8.980	7.525	8.65	8.55	8.60	1.455	2.520
平均					8.64	1.478	2.497

釋放高度：70cm

	沙面	球頂	寬度 1	寬度 2	寬度(平均)	球頂到沙面	球落入沙面深度
1	8.910	7.500	9.05	8.90	8.98	1.410	2.565
2	9.150	7.795	9.20	9.20	9.20	1.355	2.620
3	8.775	7.660	9.00	9.00	9.00	1.115	2.860
4	8.865	7.465	8.95	8.95	8.95	1.400	2.575
5	8.935	7.765	9.00	9.00	9.00	1.170	2.805
平均					9.03	1.290	2.685

(九)直徑 3.975cm 填充沙子的乒乓球

釋放高度：10cm

	沙面	球頂	寬度 1	寬度 2	寬度(平均)	球頂到沙面	球落入沙面深度
1	9.065	6.035	5.05	5.05	5.05	3.030	0.945
2	9.040	6.080	5.20	5.10	5.15	2.960	1.015
3	9.200	6.320	5.20	5.10	5.15	2.880	1.095
4	9.185	6.350	5.15	5.10	5.13	2.835	1.140
5	9.275	6.350	5.15	5.20	5.18	2.925	1.050
平均					5.13	2.926	1.049



釋放高度：20cm

	沙面	球頂	寬度 1	寬度 2	寬度(平均)	球頂到沙面	球落入沙面深度
1	9.190	6.420	6.15	5.90	6.03	2.770	1.205
2	9.185	6.610	6.30	6.10	6.20	2.575	1.400
3	9.275	6.660	6.25	5.90	6.08	2.615	1.360
4	9.100	6.445	6.35	6.20	6.28	2.655	1.320
5	9.115	6.635	6.20	6.10	6.15	2.480	1.495
平均					6.15	2.619	1.356

釋放高度：30cm

	沙面	球頂	寬度 1	寬度 2	寬度(平均)	球頂到沙面	球落入沙面深度
1	9.315	6.835	7.00	6.85	6.93	2.480	1.495
2	9.030	6.530	6.95	6.80	6.88	2.500	1.475
3	9.110	6.535	6.70	6.80	6.75	2.575	1.400
4	9.060	6.695	7.05	6.90	6.98	2.365	1.610
5	9.000	6.465	6.90	6.80	6.85	2.535	1.440
平均					6.88	2.491	1.484

釋放高度：40cm

	沙面	球頂	寬度 1	寬度 2	寬度(平均)	球頂到沙面	球落入沙面深度
1	9.330	7.065	7.35	7.30	7.33	2.265	1.710
2	9.000	6.635	7.25	7.20	7.23	2.365	1.610
3	9.240	6.960	7.25	7.20	7.23	2.280	1.695
4	9.170	6.850	7.35	7.35	7.35	2.320	1.655
5	9.255	6.945	7.35	7.20	7.28	2.310	1.665
平均					7.28	2.308	1.667

釋放高度：50cm

	沙面	球頂	寬度 1	寬度 2	寬度(平均)	球頂到沙面	球落入沙面深度
1	9.195	6.975	7.80	7.80	7.80	2.220	1.755
2	9.320	7.260	7.85	7.60	7.73	2.060	1.915
3	9.285	7.050	7.85	7.80	7.83	2.235	1.740
4	9.145	6.935	7.55	7.60	7.58	2.210	1.765
5	9.310	7.065	7.45	7.70	7.58	2.245	1.730
平均					7.70	2.194	1.781

釋放高度：60cm

	沙面	球頂	寬度 1	寬度 2	寬度(平均)	球頂到沙面	球落入沙面深度
1	9.370	7.165	7.70	7.85	7.78	2.205	1.770
2	9.395	7.200	8.05	8.00	8.03	2.195	1.780
3	9.480	7.265	7.85	7.95	7.90	2.215	1.760
4	9.330	7.130	8.10	8.00	8.05	2.200	1.775
5	9.185	7.165	8.15	8.10	8.13	2.020	1.955
平均					7.98	2.167	1.808

釋放高度：70cm

	沙面	球頂	寬度 1	寬度 2	寬度(平均)	球頂到沙面	球落入沙面深度
1	9.160	7.080	7.95	8.10	8.03	2.080	1.895
2	9.205	7.280	8.20	8.40	8.30	1.925	2.050
3	9.025	7.265	8.45	8.50	8.48	1.760	2.215
4	9.075	7.260	8.25	8.35	8.30	1.815	2.160
5	9.115	7.250	8.25	8.20	8.23	1.865	2.110
平均					8.27	1.889	2.086

(十)直徑 2.540cm 彈珠

釋放高度：10cm

	沙面	球頂	寬度 1	寬度 2	寬度(平均)	球頂到沙面距離	球落入沙面深度
1	12.715	11.012	4.20	4.10	4.15	1.703	0.822
2	12.720	11.035	4.20	4.30	4.25	1.685	0.840
3	12.520	11.020	4.10	4.20	4.15	1.500	1.025
4	12.780	11.110	4.30	4.30	4.30	1.670	0.855
5	11.130	9.640	4.40	4.35	4.38	1.490	1.035
平均					4.25	1.610	0.915

釋放高度：20cm

	沙面	球頂	寬度 1	寬度 2	寬度(平均)	球頂到沙面距離	球落入沙面深度
1	11.750	10.300	5.00	5.10	5.05	1.450	1.075
2	11.550	10.280	5.00	5.10	5.05	1.270	1.255
3	11.635	10.345	4.90	4.90	4.90	1.290	1.235
4	11.660	10.355	4.90	4.80	4.85	1.305	1.220
5	11.780	10.335	4.80	4.85	4.83	1.445	1.080
平均					4.94	1.352	1.173

釋放高度：30cm

	沙面	球頂	寬度 1	寬度 2	寬度(平均)	球頂到沙面距離	球落入沙面深度
1	11.490	10.050	5.40	5.50	5.45	1.440	1.085
2	11.190	9.965	5.40	5.45	5.43	1.225	1.300
3	11.500	10.125	5.30	5.20	5.25	1.375	1.150
4	11.630	10.240	5.40	5.40	5.40	1.390	1.135
5	11.500	10.280	5.40	5.20	5.30	1.220	1.305
平均					5.37	1.330	1.195

釋放高度：40cm

	沙面	球頂	寬度 1	寬度 2	寬度(平均)	球頂到沙面距離	球落入沙面深度
1	11.160	10.095	5.75	5.95	5.85	1.065	1.460
2	10.940	10.040	5.90	5.90	5.90	0.900	1.625
3	11.190	10.090	6.00	5.85	5.93	1.100	1.425
4	11.450	10.400	6.00	6.05	6.03	1.050	1.475
5	11.180	10.100	6.00	6.00	6.00	1.080	1.445
平均					5.94	1.039	1.486

釋放高度：50cm

	沙面	球頂	寬度 1	寬度 2	寬度(平均)	球頂到沙面距離	球落入沙面深度
1	11.670	10.635	6.25	6.30	6.28	1.035	1.490
2	11.610	10.590	6.10	6.00	6.05	1.020	1.505
3	11.790	10.655	5.90	6.00	5.95	1.135	1.390
4	12.560	11.675	5.90	6.10	6.00	0.885	1.640
5	12.570	11.755	6.25	6.30	6.28	0.815	1.710
平均					6.11	0.978	1.547

釋放高度：60cm

	沙面	球頂	寬度 1	寬度 2	寬度(平均)	球頂到沙面距離	球落入沙面深度
1	11.380	10.430	6.25	6.45	6.35	0.950	1.575
2	11.440	10.520	6.45	6.50	6.48	0.920	1.605
3	11.355	10.555	6.40	6.40	6.40	0.800	1.725
4	11.210	10.400	6.35	6.20	6.28	0.810	1.715
5	11.340	10.560	6.45	6.50	6.48	0.780	1.745
平均					6.40	0.852	1.673

釋放高度：70cm

	沙面	球頂	寬度 1	寬度 2	寬度(平均)	球頂到沙面距離	球落入沙面深度
1	12.840	11.980	6.60	6.70	6.65	0.860	1.665
2	11.245	10.345	6.50	6.90	6.70	0.900	1.625
3	11.350	10.670	6.60	6.50	6.55	0.680	1.845
4	11.565	10.735	6.65	6.65	6.65	0.830	1.695
5	11.610	10.800	6.70	6.50	6.60	0.810	1.715
平均					6.63	0.816	1.709

釋放高度：80cm

	沙面	球頂	寬度 1	寬度 2	寬度(平均)	球頂到沙面距離	球落入沙面深度
1	11.290	10.615	6.65	6.75	6.70	0.675	1.850
2	11.440	10.705	6.80	6.80	6.80	0.735	1.790
3	11.610	10.810	6.75	6.80	6.78	0.800	1.725
4	11.375	10.675	6.75	6.80	6.78	0.700	1.825
5	11.320	10.545	6.85	6.80	6.83	0.775	1.750
平均					6.78	0.737	1.788