

# 中華民國第 60 屆中小學科學展覽會

## 作品說明書

---

國小組 生活與應用科學(二)科

第三名

082921

哇！在沙子裡泡澡～流化床應用之研究

學校名稱：臺中市西屯區上安國民小學

作者： 小六 張子芸 小六 蔡子亮 小六 簡廷剛 小五 張禕信 小五 曾惟駿 小五 賴朋禹	指導老師： 蘇子傑
---	--------------

關鍵詞：沙池、流化床、液體化

## 摘要

本研究來自對網路上「流化床液體沙池」影片的好奇，想嘗試自製沙池，並探究沙粒種類、高度、排氣強弱及排氣孔距、孔洞尺寸、排列等因素，對沙池液體化影響。研究藉由對「沙池中物體拉動固定距離所需時間」、「沉入沙池物體減少重量」、「浮於沙池物體沒入體積」，定量測量沙池的阻力、浮力、密度等性質，並與「水」做比較，計算液體化程度。研究結果發現最佳沙池裝置為：用顆粒較小的沙、3mm 最小孔洞、12cm 適中沙面高度、6 級最大排氣，排氣孔斜下的裝置，可獲得「阻力、密度約為水的 1.5 倍、浮力與水相仿」的液體化效果。最後研究以傾瀉實驗證明沙池除了具休閒娛樂功用，也能有效提昇運送固體顆粒的效率。

## 壹、研究動機

在 YOUTUBE 網站上有一位外國的 youtuber~Mark Rober，常在影片中分享非常特別的科學實驗或嘗試，其中他有一部影片「Liquid Sand Hot Tub- Fluidized air bed」(液體沙池~流化床，<https://www.youtube.com/watch?v=My4RA5IOFKs&t=510s>)引起我們的興趣(圖 1-1-1)。影片中，Mark Rober 在小泳池中裝置了特殊的構造，讓浴缸裡的沙看起來像水一樣，形成一個類似「沙池」的裝置，不但可以在其中游動，玩具船可以在其中前進、乒乓球或玩具小鴨可以壓下後浮起。

這樣神奇的裝置非常吸引我們，但由於影片中的裝置非常龐大，需要的設備(金屬管、高壓氣瓶)也不容易取得，我們想試著用身邊可以取得的物品，模擬影片的裝置，嘗試是否能做出同樣的沙池效果。除了沙池裝置的模擬外，我們也探討如何測量出沙池的液體化程度，並藉此研究改變沙池排氣孔設置、排氣強弱、沙面高度及沙顆粒等條件，對沙池液體化程度的影響，研究出最接近液體樣貌的沙池，並探討它在生活中的應用。

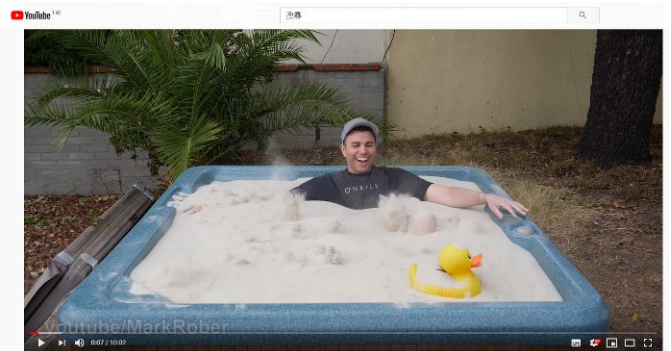


圖 1-1-1 Liquid Sand Hot Tub

## 貳、研究目的

- 一、自製沙池裝置可行性之探究
- 二、沙池液體化程度定量測量探討
- 三、沙池顆粒種類對液體化程度之影響
- 四、沙池沙面高度對液體化程度之影響
- 五、沙池排氣強弱對液體化程度之影響
- 六、沙池排氣孔設置方式對液體化程度之影響
- 七、沙池裝置對運送固體顆粒應用之研究

## 參、研究設備及器材

### 一、沙池裝置材料與工具：

- (一) 沙粒種類：貓沙、灰沙、白沙。
- (二) 裝置材料：透明 PP 整理箱、4 分管、1/2 吋三接管、1/2 吋彎頭接管、硬質水管膠合劑、絕緣膠帶、吹塵器。
- (三) 製作工具：電鑽（含 3mm、4.5mm、6mm 鑽頭）、水管鉗、木槌、焊槍、尺。

### 二、測量設備：

- (一) 阻力測量設備：200 克重物（含塑膠盒、鐵製螺帽\*4、絕緣膠帶）、綿線、滑輪、20 克砝碼\*2、碼錶。
- (二) 浮力測量設備：200 克沉體（含磁鐵塊、絕緣膠帶）、彈簧秤。
- (三) 密度測量設備：500 克浮體（含 1000cm<sup>3</sup> 塑膠盒、螺帽、保鮮膜、橡皮筋）。
- (四) 其他材料：電子秤、熱熔膠槍。

### 三、記錄設備：數位相機（拍照及錄影用）、電腦（回放影片用）、實驗記錄表。

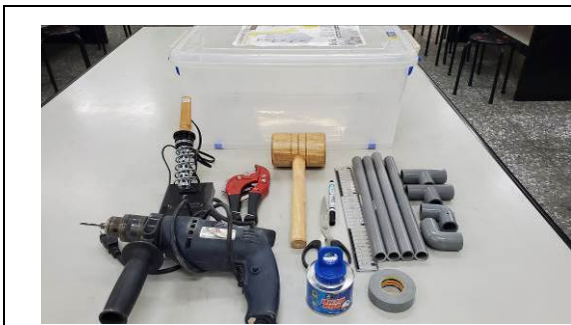


圖 3-1-1 沙池裝置材料與工具



圖 3-1-2 沙粒種類



圖 3-1-3 測量設備



圖 3-1-4 記錄設備

## 肆、研究過程或方法

研究首先依照 Mark Rober 拍攝的影片內容，利用透明 PP 收納箱及硬水管製作沙池裝置，嘗試改變進氣設備、水管連接及排氣孔位置，確認可行的自製沙池裝置。其次利用液體具有低阻力、浮力的原理，設計定量測量沙池液體化程度的方式，並藉由設計的測量方式，研究改變沙池顆粒種類、沙面高度、排氣強弱、排氣孔設置方式等因素，對液體化程度的影響。

最後根據實驗最佳的沙池裝置，進行運送固體顆粒應用的探討。

## 一、自製沙池裝置之研究過程

### (一) 沙池裝置器材選擇：

#### 1. 進氣設備：

Mark Rober 在影片使用類似高壓鋼瓶的設備，將空氣灌入沙池的管道中，由於我們不易取得或購買高壓鋼瓶，因此我們思考家中或學校是否有可取代的進氣設備，我們嘗試了以下幾種失敗的進氣設備：

- (1) 學校的手動打氣筒：方便操作，但風力太小，無法定量且持續的提供進氣。
- (2) 車用的電動打氣機：需要連接車上的點煙器開關，不方便使用。
- (3) 充電式電動打氣機：原本認為這種採用 USB 充電的小型電動打氣機可以作為研究用，且攜帶方便，但實際操作後才發現電動打氣機提供的是小量、間斷噴氣的進氣，對於需要持續大量進氣的沙池裝置，是不適合的。

		
圖 4-1-1 失敗進氣設備 1 手動打氣筒	圖 4-1-2 失敗進氣設備 2 車用電動打氣機	圖 4-1-3 失敗進氣設備 3 充電式電動打氣機

就在我們因為找不到適合的進氣設備，打算放棄研究時，意外的在電腦教室發現老師所使用的**吹塵器**，類似吸塵器的反效果，**可持續吹出穩定的風力，且能夠調整出風力大小**，適合作為沙池裝置的進氣設備，如圖 4-1-4。

	
圖 4-1-4 電腦教室吹塵器	圖 4-1-5 吹塵器風力實驗

為了了解吹塵器的風力大小，我們試著用圖 4-1-5 的裝置，以吹塵器推動 200 克重物在水管軌道間前進，以各級風力能夠讓重物前進的距離，比較吹塵器的風力差異。吹塵器風力為 1~6 級，我們選擇 2 級、4 級、6 級三種風力作為實驗設計。實驗結果如表 4-1-1。

表 4-1-1 吹塵器風量實驗結果

風力	第一次	第二次	第三次	平均	倍數關係
2 級	55.0cm	59.5cm	60.0cm	<b>58.17cm</b>	以 2 級風力為標準
4 級	105.0cm	108.0cm	111.0cm	<b>108.00cm</b>	<b>1.86 倍</b>
6 級	137.0cm	133.0cm	133.5cm	<b>134.50cm</b>	<b>2.31 倍</b>

依據上述實驗結果可確認吹塵器各級風力雖然不是倍數關係，但確實有明顯的風力差異，可作為後續實驗了解排氣強弱對於沙池作用的影響。

## 2.沙池箱體與排氣管道：

Mark Rober 在影片中使用小型泳池跟類似銅管的物品製作沙池箱體與排氣管道，但他也有用 PP 收納箱和硬水管來進行小型的模擬實驗，因此我們嘗試在五金行購買類似的器材。經過搜尋及店員的建議，我們選擇的箱體及排氣管道材料如下：

- (1) 箱體：選擇較方正、底部空間充足的 PP 收納箱作為沙池箱體。(圖 4-1-6)
- (2) 排氣管道：選擇較細、較容易切斷打洞的 4 分硬水管，利用 1/2 吋的彎頭接管及 1/2 吋的三通接管做連接，依照五金行的建議用硬質水管膠合劑連接。(圖 4-1-7)



圖 4-1-6 作為沙池箱體的 PP 箱

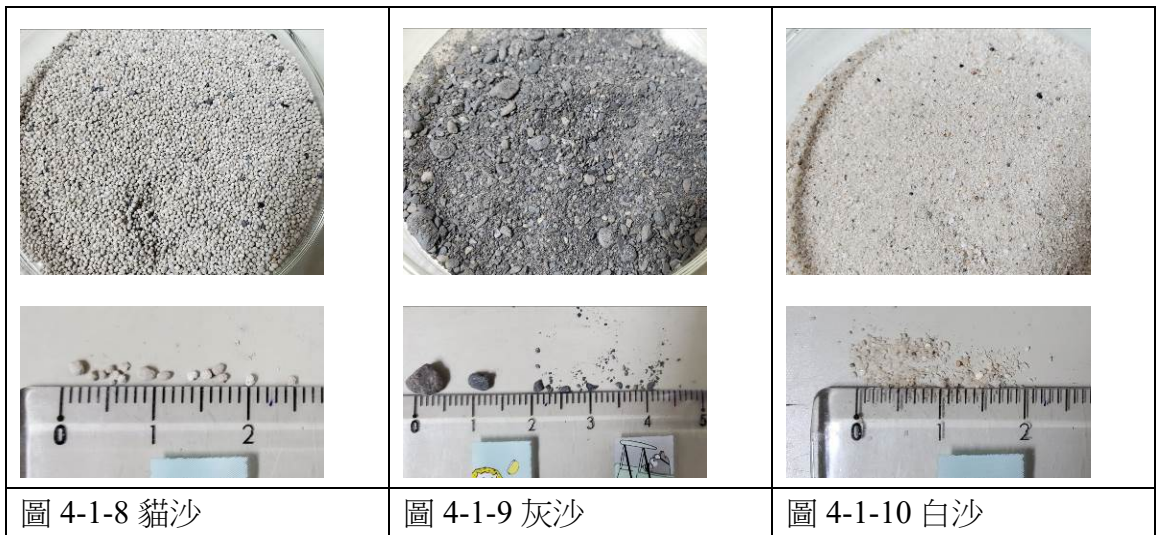


圖 4-1-7 利用硬質水管膠合劑連接水管

## 3.沙粒種類：

我們最初想利用學校沙坑的沙粒作為研究用，但發現沙坑含有許多雜草等雜質，且有點潮溼，因此改前往五金行購買。五金行提供三種沙粒來源：水泥沙、貓沙、灰沙（沙包用），其中水泥沙遇水可能會凝固，為避免清洗困難，故僅選擇後兩者（貓沙挑選販售款式中顆粒最小的種類）。另外，我們又在學校附設的幼兒園中，發現白沙坑的白沙可利用，因此共計有三種沙類，敘述如下：

- (1) 貓沙：顆粒直徑約 0.5~1.5mm，**顆粒較大**，大小較均勻，多為圓球狀，如圖 4-1-8。
- (2) 灰沙：顆粒直徑約<0.5mm~5mm，**顆粒大小差異大**，包含小礫石及沙塵，不規則型，如圖 4-1-9。
- (3) 白沙：顆粒直徑<0.5mm，**顆粒最小**，多為小顆粒或沙塵，如圖 4-1-10。



(二) 沙池裝置初探實驗：

**1. 第一代裝置：單排直上排氣孔+貓沙**




由於從影片中只知道需在水管上等距離打洞，做成排氣孔，但洞距、打洞尺寸等細節並不清楚。我們先試著配合 PP 箱的大小，將硬水管以彎頭接管及三通接管連接為 4 排排氣孔的裝置，可打洞的管身長度為 27cm。因此我們設計每 3cm 打一個洞，總共  $8 \times 4 = 32$  個排氣孔。(如圖 4-1-11、4-1-12)

我們在排氣管裝置右下角用三通接管取代彎頭接管，做出連接吹塵器的位置，再利用焊槍在 PP 箱熱融出一個孔洞，以絕緣膠帶密封 PP 箱與排氣管。在沙池裝置中先試用顆粒較大、大小較均勻的貓沙做初探實驗。(如圖 4-1-13、4-1-14)



實驗首先倒入 5cm 高貓沙，發現進氣後，排氣孔上方的沙粒直接被噴開，形成明顯沙洞，周圍的沙則沒有影響，未出現液體化效果(如圖 4-1-15)。我們進一

步增加貓沙高度至 8cm 高，狀態與 5cm 相同（如圖 4-1-16）；增加至 10cm 高時，不再出現噴沙狀況，沙池表面完全沒有反應，也未出現液體化效果（如圖 4-1-17）。

		
<p>圖 4-1-15 單排直孔排氣+貓沙 5cm 形成沙洞，無液體化效果</p>	<p>圖 4-1-16 單排直孔排氣+貓沙 8cm 形成沙洞，無液體化效果</p>	<p>圖 4-1-17 單排直孔排氣+貓沙 10cm 表面無反應，無液體化效果</p>

### 2. 第二代裝置：雙排斜上排氣孔+貓沙

經過前項實驗，我們發現朝上的排氣孔容易在表面噴出沙洞，卻無法影響周圍的沙，造成液體化效果。因此我們改將排氣孔打在水管中心線兩側各一公分位置（如圖 4-1-18），每根排氣管會有兩排斜上排氣的氣孔，除了將氣流往周圍排出，也讓排氣量增加一倍（如圖 4-1-19）。

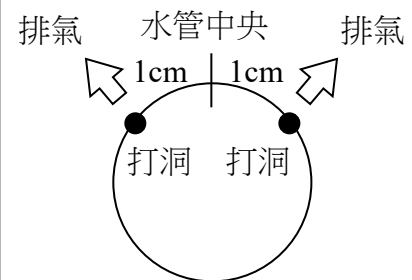





圖 4-1-18 雙排斜孔設計方式

實驗於前項結果相似，5cm 高的貓沙同樣會有噴出沙洞、無液體化的現象（如圖 4-1-20）；增加至 8cm 時則沒有噴沙狀況，沙池表面沒有反應（僅揚起微弱沙塵），無液體化現象（如圖 4-1-21），效果比單排直上的排氣孔更差。

		
<p>圖 4-1-19 改為雙排斜孔排氣孔</p>	<p>圖 4-1-20 雙排斜孔排氣+貓沙 5cm 形成沙洞，無液體化效果</p>	<p>圖 4-1-21 雙排斜孔排氣+貓沙 8cm 表面無反應，無液體化效果</p>

### 3. 第三代裝置：雙排斜下排氣孔+貓沙、灰沙、白沙

經過前兩次初探實驗失敗，我們發現向上噴氣的方式，在沙池深度淺時，會形成噴孔、深度深時則無法有效果。我們重新檢視 Mark Rober 的影片，發現他展示裝置時，水管上方似乎沒有孔洞，我們推測他可能將**排氣孔向下裝置**，於是我們重新安裝沙池裝置，將排氣管反面裝置。(如圖 4-1-22)









圖 4-1-22 排氣孔改朝下

倒置排氣管後，沙池不再出現噴孔，但竟然連 5cm 高貓沙都無任何液體化的現象，沙池表面完全沒有反應。我們又推論問題可能來自貓沙顆粒太大，因此進一步利用顆粒較小的灰沙，及顆粒最小的白沙再次進行實驗。

改用顆粒較小的灰沙及白沙，沙池終於發生液體化狀況，不論是 5cm、10cm，甚至 15cm 高的沙池高度，沙池表面都會出現類似沙的氣泡(我們稱為**沙泡**)，將手深入沙池中，可以明顯感到類似水一樣的流動感。

相較之下，灰沙沙池產生的沙泡較小，揚起的沙塵較少(如圖 4-1-23~25)；白沙則會產生較大的沙泡，但也會製造較多的沙塵(如圖 4-1-26~28)。經過第三代裝置的初探實驗，我們發現採用「**雙排斜孔向下**」的排氣管裝置，及「**灰沙或白沙**」的沙粒種類，可以製造出沙池的效果。

		
圖 4-1-23 雙排斜孔向下+灰沙 5cm 形成沙泡，有液體化效果	圖 4-1-24 雙排斜孔向下+灰沙 10cm 形成沙泡，有液體化效果	圖 4-1-25 雙排斜孔向下+灰沙 15cm 形成沙泡，有液體化效果
		
圖 4-1-26 雙排斜孔向下+白沙 5cm 形成沙泡，有液體化效果	圖 4-1-27 雙排斜孔向下+白沙 10cm 形成沙泡，有液體化效果	圖 4-1-28 雙排斜孔向下+白沙 15cm 形成沙泡，有液體化效果



### (三) 沙池裝置改良：

經過初探實驗確認沙池裝置的可行性後，我們依照初探實驗的裝置及實驗狀況，試著對沙池裝置做更適合進行操作的改良：

1. **調整 PP 箱規格**：原本採用 47x33x19cm 的 PP 箱，發現因為只有中央部分有排氣孔，使沙池液體化範圍較小，因此正式實驗改用 57x39x23.5cm 的 PP 箱，可打洞的排氣管長度可由 27cm 增長為 35cm，沙池高度可調整的範圍也較大。
2. **增加排氣孔數**：除了排氣管可打洞的長度增加，我們也將原本 3cm 的孔距調整為 2.5cm，使排氣孔數變成每排 13 個，共計 13x8=104 個排氣孔，較初探實驗裝置增加近 1/2 數量。
3. **調整進氣口位置**：初探實驗中，設計在排氣管裝置右下角以三通接管連接吹塵器，導致排氣管裝置兩側的風量可能不同，正式實驗改將排氣管裝置兩側均以三通接管接出，連接置中央單一進氣口。

## 二、定量測量沙池液體化程度之研究設計

### (一) 液體化程度之定義：

因為固體的沙粒在性質上和水幾乎完全不同，我們必須定義出能夠評定出沙池液體化程度的標準，以確定後續實驗中，沙池效果的優劣。經過討論，我們決定用兩項固體沙粒不具有的水特性，來衡量沙池液體化程度。

#### 1. 利用「**阻力**」定量測量沙池液體化程度：

相較於固體，水有一個明顯的特性，就是物體在水中移動受到的阻力較低，所以 Mark Rober 的影片中，玩具、球可以自由的在沙池中推動，而一旦進氣停止，物品就會被埋在沙中，無法移動。

測量低阻力最簡單的方式是直接測量最大靜摩擦力的大小，但在充滿沙泡的沙池中，物體不易固定在原位，且充滿沙塵，不易測量與觀察拉動物體開始移動的拉力大小。因此我們改試著以「**物體受同一拉力作用，移動固定距離的時間**」作為**阻力**大小的判斷。

- (1) 固定物體移動距離，測量物體移動時間，便能利用公式算出物體所受拉力產生的加速度：

$$\therefore S_{\text{物體移動距離}} = 1/2 \times a_{\text{物體加速度}} \times t_{\text{移動時間}}^2$$

$$\therefore \boxed{a_{\text{物體加速度}}} = 2 \times S_{\text{物體移動距離}} \div t_{\text{移動時間}}^2$$

- (2) 再利用力與加速度的公式，就能算出物體在沙池中移動所受的阻力：

$$\therefore (F_{\text{拉力}} - F_{\text{阻力}}) = m_{\text{物體質量}} \times a_{\text{物體加速度}}$$

$$\therefore \boxed{F_{\text{阻力}}} = F_{\text{拉力}} - m_{\text{物體質量}} \times (2 \times S_{\text{物體移動距離}} \div t_{\text{移動時間}}^2)$$

- (3) 研究以物體在水中的阻力為標準，比較出沙池阻力為幾倍（百分比表示）。

## 2.利用「浮力」定量測量沙池液體化程度：

物體在液體中會受到浮力作用，在 Mark Rober 的影片中，球可以被壓入沙池中再浮起，呈現類似在水中受浮力之作用。雖然沙池浮力與真實浮力成因不盡相同，但我們仍想以物體在沙池中所受到的浮力影響，定義其液體化的程度。

- (1) 首先我們利用能沉入水中的物體，同樣放入沙池中，以「物體沒入液體中減少的重量為所受浮力」計算浮力，將沒入水中的浮力作為標準，比較出沙池浮力為幾倍（百分比表示）。

$$F_{\text{沉體浮力}} = W_{\text{物體重量}} - F_{\text{測量重量}}$$

- (2) 其次，對於能浮在沙池上的物體，則可以利用「物體漂浮於液體上，浮力等於物重，亦等於沒入體積×液體密度」計算出密度。以水的密度  $1\text{g/cm}^3$  作為標準，比較出沙池作用時的密度為幾倍（百分比表示）。

$$F_{\text{浮體浮力}} = W_{\text{物體重量}} = V_{\text{沒入體積}} \times D_{\text{液體密度}}$$

### (二) 測量物體於沙池中所受阻力之實驗裝置：

#### 1.重物裝置：

- (1) 在塑膠盒中，固定 4 個重量約 45-50 克之金屬螺帽，以熱熔膠密封塑膠盒，並黏上一個掛勾。(如圖 4-2-1)
- (2) 以絕緣膠帶密封並微調重量，調整物體重量為 200 克重。(如圖 4-2-2、4-2-3)

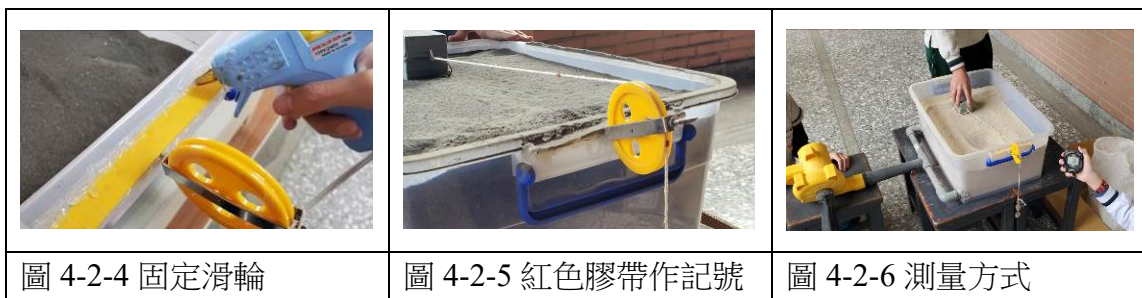
#### 2.滑輪裝置：

- (1) 在沙池 PP 箱一側，以熱熔膠固定一個滑輪，以綿線牽引重物繞過滑輪，並於綿線另一側吊掛 20 克砝碼 2 個，製造 40 克重之拉力。(如圖 4-2-4)
- (2) 確認沙池液體化範圍可讓重物前進約 15cm，在綿線上啟動及前進 15cm 後的位置，分別以紅色絕緣膠帶作記號。(如圖 4-2-5)

#### 3.測量方式：(如圖 4-2-6)

- (1) 啟動吹塵器使沙池液體化。
- (2) 計時人員手持碼錶，確認沙池液體化後，喊開始並按下計時。
- (3) 另一人聽聞開始口令後，放開重物讓其受砝碼拉力前進。
- (4) 計時人員確認第二記號處通過滑輪後停止計時。
- (5) 全程以相機錄影，於電腦上定格播放，確認重物前進 15cm 時間，重複 5 次。





(三) 測量沉體於沙池中所受浮力之實驗裝置：

1. 重物裝置：利用密度較大的磁鐵塊，加上一個金屬掛勾，以熱熔膠及絕緣膠帶黏合，並微調重量至 200 克重。(如圖 4-2-7、4-2-8)
2. 測量方式：(如圖 4-2-9)
  - (1) 啟動吹塵器使沙池液體化。
  - (2) 計時人員手持碼錶，確認沙池液體化後，喊開始並按下計時。
  - (3) 另一人聽聞開始口令後，以彈簧秤吊掛重物，使重物完全沒入沙池中。
  - (4) 計時人員記錄達 5 秒後停止計時。
  - (5) 全程以相機錄影，於電腦上定格播放，確認每一整數秒鐘之物體秤重，每次實驗可獲得 5 個秤重結果。



(四) 測量浮體於沙池中所漂浮狀況之實驗裝置：

1. 重物裝置：在具有刻度的正方體塑膠盒中，以熱熔膠固定金屬螺帽，上方用橡皮筋固定保鮮膜，防止沙粒掉入盒中，用熱熔膠微調重量為 500 克重。(如圖 4-2-10、4-2-11)
2. 測量方式：(如圖 4-2-12)
  - (1) 啟動吹塵器使沙池液體化。
  - (2) 計時人員手持碼錶，確認沙池液體化後，喊開始並按下計時。
  - (3) 另一人聽聞開始口令後，將重物放入沙池中漂浮。
  - (4) 計時人員記錄達 3 秒後停止計時。
  - (5) 停止後以相機拍照，於電腦上播放，確認沒入體積，重複實驗 5 次。

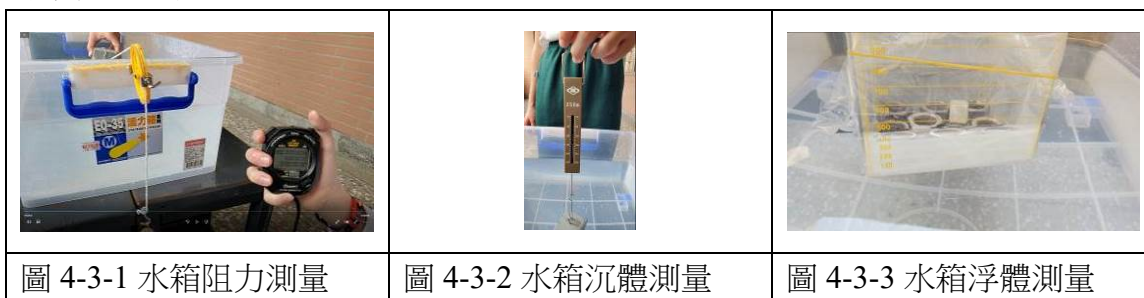


### 三、顆粒種類、排氣強弱及沙面高度對沙池液體化程度影響的實驗設計

在改良出最佳的沙池實驗裝置，並設計好三種定義液體化程度的實驗方式後，我們開始針對影響沙池液體化程度的各項因素進行研究。我們依序使用不同種類的沙粒，並分別實驗在不同沙面高度，使用不同排氣風力的沙池效果，藉由阻力、浮力、密度的測量與計算，與水的狀況進行比較，了解各因素對沙池液體化程度的影響。

#### (一) 對照組實驗：

將沙池實驗裝置，去除排氣管的設置，PP 箱內改盛裝 12cm 高的水，進行三項實驗方式，如圖 4-3-1、4-3-2、4-3-3：



#### (二) 實驗組類別：

分別以沙的「顆粒種類」、「沙面高度」，以及沙池排氣管的「排氣強弱」作為實驗因素，以下列方式改變三項因素：

1. 顆粒種類：分別以灰沙、白沙、貓沙三種沙粒進行實驗。
2. 沙面高度：因為排氣管本身佔有約 3~4cm 的高度，為使排氣能充分作用，並避免沙面過高溢出 PP 箱，我們以 8cm、12cm、16cm 三種沙面高度進行實驗。
3. 排氣強弱：分別以吹塵器 2 級、4 級、6 級（最大）風力進行實驗。

依上述三項實驗因素，設計實驗組類別如表 4-3-1：

表 4-3-1 「顆粒種類」、「沙面高度」、「排氣強弱」實驗組類別

組別	顆粒種類	沙面高度	排氣強弱
A11	灰沙	8cm	2 級
A12	灰沙	8cm	4 級
A13	灰沙	8cm	6 級
A21	灰沙	12cm	2 級
A22	灰沙	12cm	4 級

組別	顆粒種類	沙面高度	排氣強弱
A23	灰沙	12cm	6 級
A31	灰沙	16cm	2 級
A32	灰沙	16cm	4 級
A33	灰沙	16cm	6 級
B11	白沙	8cm	2 級
B12	白沙	8cm	4 級
B13	白沙	8cm	6 級
B21	白沙	12cm	2 級
B22	白沙	12cm	4 級
B23	白沙	12cm	6 級
B31	白沙	16cm	2 級
B32	白沙	16cm	4 級
B33	白沙	16cm	6 級
*C11	貓沙	8cm	6 級

\*備註：貓沙因於最低高度及最大排氣風力下仍無任何反應，未進行其餘類別實驗

### (三) 實驗流程與記錄：

1. 實驗項目：各組別實驗分別進行「阻力、浮力、密度」三項測量實驗。

2. 實驗記錄：

- (1) 以相機分別錄影或拍照實驗結果，另外並拍攝實驗過程中沙池表面狀況。
- (2) 於電腦上定格播放或放大檢視實驗結果，記錄數據。
- (3) 計算各組別沙池「阻力、浮力、密度」，並與對照組進行倍數比較。

## 四、排氣孔設置方式對沙池液體化程度影響的實驗設計

以改良版沙池實驗裝置的排氣管為標準，我們針對排氣孔孔距、排氣孔大小，及排氣孔的排列方式進行改變，設計出三大類共 6 種排氣孔設置方式，在相同的實驗條件下，研究排氣孔設置方式對沙池液體化程度的影響。







(一) 對照組實驗：與前項實驗設計相同，以水箱實驗結果作為對照。

(二) 實驗組類別：

分別以排氣孔的「孔距」、「孔洞尺寸」，以及「排列方式」作為實驗因素，以下列方式改變三項因素：







- 1 孔距：以改良的沙池裝置 2.5cm 孔距作標準，另外製作 1.25cm (1/2 倍)、5cm (2 倍) 孔距的排氣管裝置，如表 4-4-1。

表 4-4-1 各類孔距之排氣管裝置

		
		
D1：孔距 1.25cm	D2：孔距 2.5cm	D3：孔距 5cm





2.孔洞尺寸：以改良的沙池裝置排氣孔直徑 3mm 作標準，因已無更小的電鑽鑽頭，故另外以 4.5mm、6mm 直徑的鑽頭製作不同大小的的排氣孔，如表 4-4-2。

表 4-4-2 各類直徑排氣孔之排氣管裝置

		
		
E1：孔直徑 3mm	E2：孔直徑 4.5mm	E3：孔直徑 6mm

3.排列方式：除原本的正常雙排對稱的排氣孔排列方式，另製作交錯排列的排氣孔排列進行研究，如表 4-4-3。

表 4-4-3 各類排氣孔排列方式之排氣管裝置

	
	
F1：對稱排氣孔排列	F2：交錯排氣孔排列

### (三) 實驗流程與記錄：

- 1.實驗項目：以白沙 12cm 高度、排氣風力 6 級作為實驗方式，依各組別實驗分別進行「阻力、浮力、密度」三項測量實驗。
- 2.實驗記錄：
  - (1) 以相機分別錄影或拍照實驗結果，另外並拍攝實驗過程中沙池表面狀況。
  - (2) 於電腦上定格播放或放大檢視實驗結果，記錄數據。
  - (3) 計算各組別沙池「阻力、浮力、密度」，並與對照組進行倍數比較。

## 五、沙池裝置對運送固體顆粒應用之實驗設計

完成各種沙池裝置的影響因素後，我們嘗試以較佳的裝置組合，研究應用沙池裝置的流化床原理，是否可以讓固體顆粒更有效的運送。研究設計以沙池裝置進行沙粒傾瀉實驗，比較排氣啟動前後沙粒傾瀉狀況。

### (一) 實驗裝置：

- 1.沙池裝置：以白沙 12cm 高度、6 級風力大小，配合孔距 2.5cm、直徑 3mm、對稱排列的排氣孔裝置進行實驗。
- 2.傾瀉裝置：於沙池一側高 10cm 之位置，以焊槍開洞，裝上一個球形轉閥的出沙口裝置，如圖 4-5-1。

### (二) 實驗組別：

- 1.對照組：關閉吹塵器，使沙粒由出沙口自然傾瀉。
- 2.實驗組：開啟吹塵器，使沙粒於沙池液體化作用下傾瀉。

### (三) 實驗流程與記錄：(如圖 4-5-2)

- 1.關閉球形轉閥，將沙池一側抬高 20cm。
- 2.依對照組或實驗組需求，關閉或開啟吹塵器。
- 3.打開球形轉閥，使沙粒傾瀉到下方量杯，同時進行計時。
- 4.10 秒後關閉球形轉閥，測量傾瀉到量杯中的沙粒容積。
- 5.各組實驗 3 次，記錄及比較結果。



圖 4-5-1 沙池傾瀉裝置



圖 4-5-2 沙池傾瀉實驗

## 伍、研究結果與討論

依據各項實驗設計，分別提出研究結果與討論。首先針對初探實驗的研究結果，改良出效果較好的沙池裝置。其次利用阻力、浮力與密度定義的液體化程度定量測量結果，分別說明沙粒的顆粒種類、沙面高度、排氣強弱，以及各類排氣孔設置方式，對沙池液體化程度的影響。最後則以沙粒的傾瀉實驗，了解沙池裝置對運送固體顆粒的應用效果。

### 一、初探實驗的研究結果與討論

#### (一) 沙池裝置的改良成果：經過 1~3 代裝置嘗試，再加以改良如下(如圖 5-1-1)

- 1.箱體：以 57x39x23.5cm 大小的 PP 收納箱作為沙池箱體，具有外型方正、容量適中、容易切割、方便觀察等優點。

- 2.排氣管：以 4 分硬水管為主體，材質硬度及厚度適中，能承受進氣壓力，又容易鑽孔，搭配彎頭及三通接管作連接。排氣孔以 3mm 直徑鑽頭，於水管中央兩側各 1cm 處，對稱鑽孔，形成 8 排 104 孔的排氣孔，在箱體中需將排氣孔朝下放置。
- 3.進氣管：另行設計單入雙出的進氣管，使進氣更為均勻，並可拆除、連接不同樣式的排氣管。
- 4.吹塵器：作為進氣裝置，能穩定且高壓的提供進氣，並可調整風力大小。

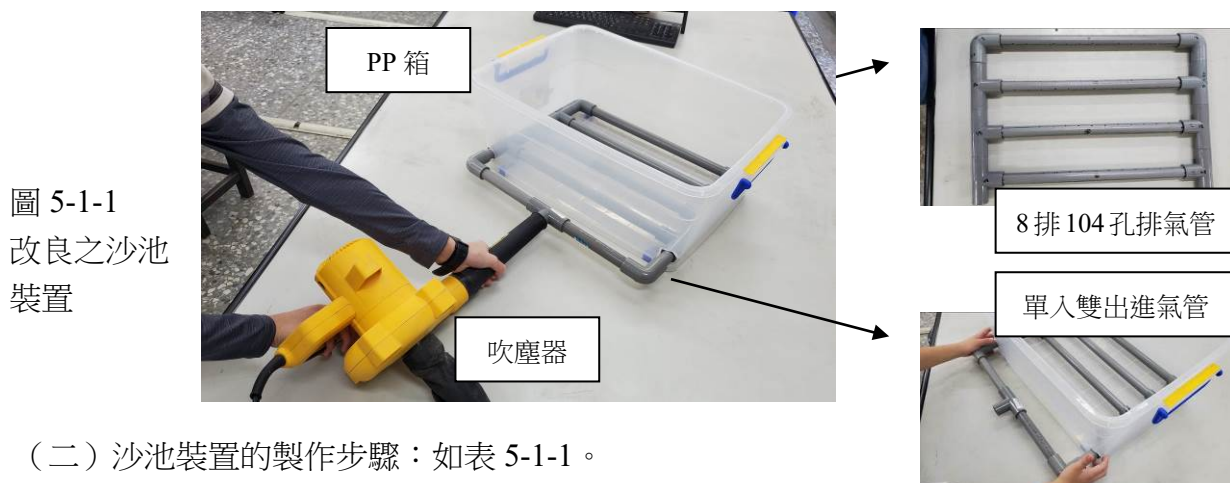


圖 5-1-1  
改良之沙池  
裝置

(二) 沙池裝置的製作步驟：如表 5-1-1。

表 5-1-1 沙池裝置製作步驟

步驟 1.切割適當長的 4 分硬水管	步驟 2.在水管中央兩側 1cm 處畫線	步驟 3.間隔 2.5cm 畫出排氣孔位置	步驟 4.以硬質水管膠合劑連接水管	步驟 5.完成排氣管裝置組合
步驟 6.以電鑽鑽出排氣孔	步驟 7.以焊槍在 PP 箱上熱熔兩個洞	步驟 8.將進氣裝置接上排氣管	步驟 9.以絕緣膠帶密封 PP 箱上縫隙	步驟 10.連接吹塵器完成沙池裝置

## 二、液體化程度定量測量方式的研究結果與討論～以「水」作為研究標準

### (一) 利用「阻力」定量測量液體化程度～以「水」作為對照組之結果：

研究以「物體受同一拉力作用，移動固定距離的時間」計算物體所受阻力大小，並利用「水」作為對照組，實驗結果如表 5-2-1：

表 5-2-1 水的阻力實驗（對照組）

水面高度	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	平均
12cm	0.55	0.53	0.51	0.60	0.60	<b>0.558</b>

單位：秒

根據上述實驗結果，物體移動 15cm 的平均時間為 0.558 秒，利用物體「移動距離與加速度、時間」之關係公式： $S_{\text{物體移動距離}} = 1/2 \times a_{\text{物體加速度}} \times t_{\text{移動時間}}^2$ ，可計算出



$$a_{\text{物體加速度}} = 0.15 \times 2 \div 0.558^2 = 0.964 \text{ m/s}^2。$$

再利用力與質量、加速度的關係公式： $(F_{\text{拉力}} - F_{\text{阻力}}) = m_{\text{物體質量}} \times a_{\text{物體加速度}}$ ，以拉力為 40 克重砝碼，相當於  $0.04 \times 9.8 = 0.392$  牛頓、物體質量為 0.2 公斤（200 克），可計算出  $F_{\text{阻力}} = 0.392 - 0.2 \times 0.964 = 0.199$  牛頓。

## （二）利用「浮力」定量測量液體化程度～以「水」作為對照組之結果：

研究以「物體沒入液體中減少的重量為所受浮力」作為浮力大小的判斷，並利用「水」作為對照組，發現物體由沒入前的 200 克重，變為沒入後的 145 克重（如圖 5-2-1）。由實驗結果可計算此物體在水中  $F_{\text{沉體浮力}} = 200 - 145 = 55$  克重。

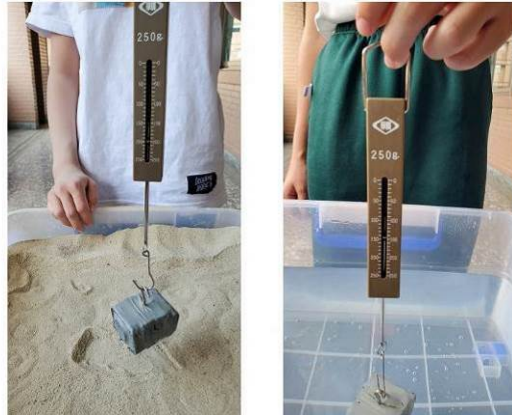


圖 5-2-1 物體沉入水中的重量變化

## （三）利用「密度」定量測量液體化程度～以「水」作為對照組之結果：

研究以「物體漂浮於液體上，浮力等於物重，亦等於沒入體積×液體密度」作為密度大小的判斷，並利用「水」作為對照組，發現 500 克的物體沒入體積為  $450\text{cm}^3$ 。（如圖 5-2-2）

由於已知水的  $D_{\text{液體密度}} = 1\text{g/cm}^3$ ，實驗結果理論上應沒入  $500\text{cm}^3$ ，判斷塑膠盒上刻度僅為內部容積，未考慮塑膠盒本身所佔之體積，故測量結果應加入  $50\text{cm}^3$  作為實際沒入體積。



圖 5-2-2 重物漂浮於水上的沒入體積

## 三、顆粒種類、沙面高度及排氣強弱對沙池液體化程度影響的研究結果與討論

確認沙池實驗裝置及定量測量液體化程度的方式後，我們進一步研究沙粒的種類、沙面高度及排氣強弱，對沙池液體化程度的影響。採用三種沙粒、三種沙面高度及三種排氣風力設計實驗組合，進行阻力、浮力、密度的三項測量實驗，並分別討論實驗結果。

### （一）由阻力實驗探討顆粒種類、沙面高度及排氣強弱對液體化影響的結果與討論：

研究以「物體受同一拉力作用，移動固定距離的時間」計算物體所受阻力大小，針對不同沙顆粒、沙面高度及排氣強弱做實驗，與對照組「水」的阻力 0.199 牛頓做比較，實驗結果如表 5-3-1：

5-3-1 阻力實驗探討顆粒種類、沙面高度及排氣強弱對液體化影響之實驗結果

組別	沙種	高度 (cm)	風力 (級)	移動時間(秒)					平均	阻力 (N)	比較 對照組
				第一次	第二次	第三次	第四次	第五次			
A11	灰沙	8	2	無法完成移動					-	-	-
A12	灰沙	8	4	1.69	1.51	1.68	1.74	1.69	<b>1.662</b>	<b>0.370</b>	185%
A13	灰沙	8	6	1.1	1.34	1.49	1.13	1.15	<b>1.242</b>	<b>0.353</b>	177%
A21	灰沙	12	2	無法完成移動					-	-	-
A22	灰沙	12	4	0.97	1.00	1.03	1.10	1.00	<b>1.020</b>	<b>0.334</b>	167%
A23	灰沙	12	6	0.81	0.78	0.72	0.97	0.97	<b>0.850</b>	<b>0.309</b>	154%
A31	灰沙	16	2	9.00	11.40	無法完成移動			-	-	-
A32	灰沙	16	4	1.29	1.24	1.18	1.20	1.17	<b>1.216</b>	<b>0.351</b>	176%
A33	灰沙	16	6	1.01	1.02	0.90	0.94	0.97	<b>0.968</b>	<b>0.328</b>	164%
B11	白沙	8	2	8.28	10.22	9.20	11.14	9.16	<b>9.600</b>	<b>0.391</b>	196%
B12	白沙	8	4	1.68	1.89	2.20	2.06	2.00	<b>1.966</b>	<b>0.376</b>	188%
B13	白沙	8	6	1.13	1.08	1.41	1.16	1.22	<b>1.200</b>	<b>0.350</b>	175%
B21	白沙	12	2	2.10	3.00	3.07	2.03	2.03	<b>2.446</b>	<b>0.382</b>	191%
B22	白沙	12	4	1.26	1.06	1.09	1.16	1.16	<b>1.146</b>	<b>0.346</b>	173%
B23	白沙	12	6	0.98	0.81	1.00	0.91	1.00	<b>0.940</b>	<b>0.324</b>	162%
B31	白沙	16	2	無法完成移動					-	-	-
B32	白沙	16	4	1.13	1.03	1.02	1.04	1.09	<b>1.062</b>	<b>0.339</b>	169%
B33	白沙	16	6	1.09	1.03	0.95	1.00	1.02	<b>1.018</b>	<b>0.334</b>	167%
C11	貓沙	8	6	無法完成移動					-	-	-

由表 5-3-1 可了解在沙池作用下，原本無法在靜止沙面上無法被 40 克重砝碼拉動的物體，除少數幾組實驗外，皆能達成類似在水中低阻力的移動效果。但所有的組別所計算出的阻力皆比在水中大，阻力約為 1.5~2 倍左右，顯示在沙池所製造的低阻力效果仍較真實液體差。接著我們進一步以折線圖分析顆粒種類、沙面高度與排氣強弱造成的影響：

### 1. 顆粒種類對阻力的影響：(圖 5-3-1)

- (1) 由折線圖可以發現以灰沙與白沙進行阻力實驗，各組結果互有高低，計算總平均值也只有 0.004 牛頓的差異，且阻力大小的趨勢大致相同，可能因為兩種沙粒多數顆粒都在 0.5mm 以下，即使灰沙參雜部分較大的小石礫，但對阻力影響不大。
- (2) 以貓沙完全無法造成沙池作用的結果，顯示顆粒較大的沙粒，較不易造成沙池的效果。

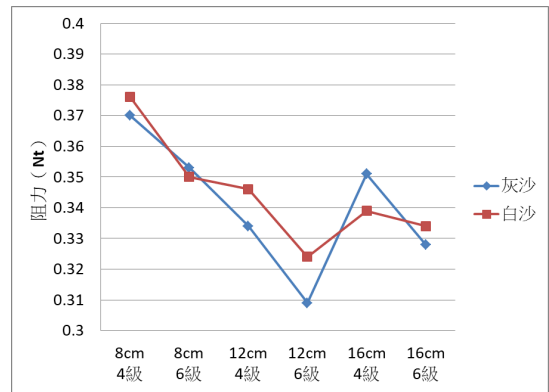


圖 5-3-1 顆粒種類對阻力影響折線圖

### 2. 沙面高度對阻力的影響：(圖 5-3-2)

- (1) 由折線圖可以發現不同沙面高度所造成的阻力，基本上為 8cm 時最大、16cm 時次之、12cm 時阻力最小，且利用折線圖可看出在各組實驗的比較上具有類似的趨勢，顯示沙面高度對於阻力有明顯的影響。
- (2) 依據結果發現，沙面高度並非越低或越高能有較好的低阻力效果，而是在特定高度效果有最佳結果。

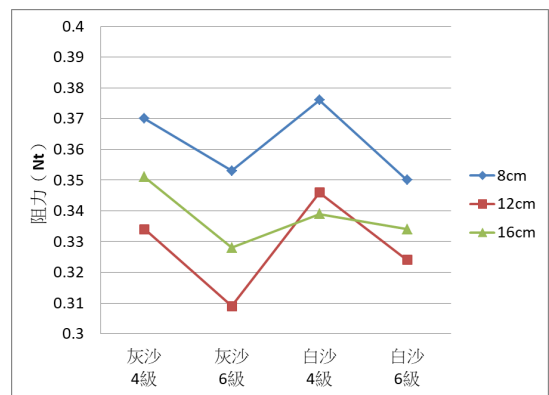


圖 5-3-2 沙面高度對阻力影響折線圖

### 3. 排氣強弱對阻力的影響：(圖 5-3-3)

- (1) 由折線圖可以發現不同排氣風力所造成的阻力，很一致的呈現 6 級風力造成的阻力小於 4 級風力，且利用折線圖可看出在各組實驗的比較上具有類似的趨勢，顯示排氣強弱對於阻力有明顯的影響。
- (2) 2 級風力僅能在白沙 12cm 高度時有效形成液體化作用，其餘實驗組別中皆無法使重物完成移動。由於三種風力的力量差異大約僅 1~3 倍的關係，並非差異很大，顯示要形成沙池液體化效果，應該有一臨界排氣力量。

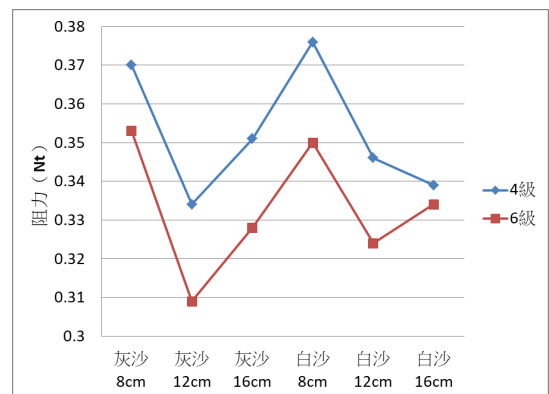


圖 5-3-3 排氣強弱對阻力影響折線圖

(二) 由浮力實驗探討顆粒種類、沙面高度及排氣強弱對液體化影響的結果與討論：

研究以「物體沒入液體中減少的重量為所受浮力」計算物體所受浮力大小，針對不同沙顆粒、沙面高度及排氣強弱做實驗，與對照組「水」造成的浮力 55gw 做比較，實驗結果如表 5-3-2：

表 5-3-2 浮力實驗探討顆粒種類、沙面高度及排氣強弱對液體化影響之實驗結果

組別	沙種	高度 (cm)	風力 (級)	測量沉體物重					浮力 (gw)	比較 對照組	
				1 秒時	2 秒時	3 秒時	4 秒時	5 秒時			平均
A11	灰沙	8	2	無法沒入					-	-	-
A12	灰沙	8	4	無法沒入					-	-	-
A13	灰沙	8	6	無法沒入					-	-	-
A21	灰沙	12	2	無法沒入					-	-	-
A22	灰沙	12	4	145	150	130	145	150	<b>144.0</b>	<b>56.0</b>	102%
A23	灰沙	12	6	145	140	150	145	150	<b>146.0</b>	<b>54.0</b>	98%
A31	灰沙	16	2	無法沒入					-	-	-
A32	灰沙	16	4	145	150	140	135	135	<b>141.0</b>	<b>59.0</b>	107%
A33	灰沙	16	6	145	145	140	145	150	<b>145.0</b>	<b>55.0</b>	100%
B11	白沙	8	2	無法沒入					-	-	-
B12	白沙	8	4	145	145	150	135	145	<b>144.0</b>	<b>56.0</b>	102%
B13	白沙	8	6	150	150	160	145	150	<b>151.0</b>	<b>49.0</b>	89%
B21	白沙	12	2	130	140	125	140	150	<b>137.0</b>	<b>63.0</b>	115%
B22	白沙	12	4	150	150	150	135	155	<b>148.0</b>	<b>52.0</b>	95%
B23	白沙	12	6	155	150	155	140	140	<b>148.0</b>	<b>52.0</b>	95%
B31	白沙	16	2	135	135	145	135	145	<b>139.0</b>	<b>61.0</b>	111%
B32	白沙	16	4	145	145	150	155	145	<b>148.0</b>	<b>52.0</b>	95%
B33	白沙	16	6	150	140	145	140	150	<b>145.0</b>	<b>55.0</b>	100%
C11	貓沙	8	6	無法沒入					-	-	-

表 5-3-2 所呈現的實驗結果中，標示「無法沒入」代表重物會碰觸未流動的沙面，無法完全沒入沙面下形成沉體，故無法正確計算其所受浮力。而在成功使重物沒入的組別中，我們很發現沙池對沉體所造成的浮力效果，大小為 49gw~63gw，竟與水所造成的浮力相當類似，沙池浮力大約比水浮力減少或增加 10% 左右，顯示沙池的浮力雖然與水浮力成因不相同，但效果卻相當類似。接著我們進一步以折線圖分析顆粒種類、沙面高度與排氣強弱造成的影響：

### 1. 顆粒種類對浮力的影響：(圖 5-3-4)

- (1) 由折線圖可以發現顆粒種類對此實驗成功與否影響很大，除貓沙完全無法作用外，灰沙僅有 4 個組別能使重物完全沒入，顯示表面雖然有液體化效果，但內部卻仍維持固體效果。而顆粒較均勻的白沙就幾乎能讓重物完全沒入。
- (2) 由於成功組別數差異大，無法明確比較顆粒種類對浮力的影響趨勢。

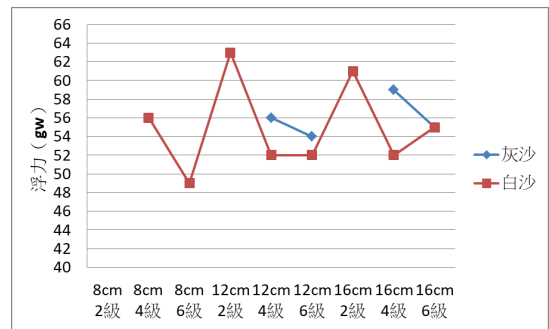


圖 5-3-4 顆粒種類對浮力影響折線圖

### 2. 沙面高度對浮力的影響：(圖 5-3-5)

- (1) 由折線圖可以發現 8cm 沙面高度的實驗僅有 2 組成功，且浮力狀況不穩定，代表沙面高度低，反而在沙池內部較無液體化效果。
- (2) 12cm 及 16cm 的實驗結果非常接近，兩者的浮力平均值僅差 1gw，各實驗組別的變化趨勢也類似，顯示沙面高度雖然與沙池內部液體化有關，但對浮力大小影響不明顯。

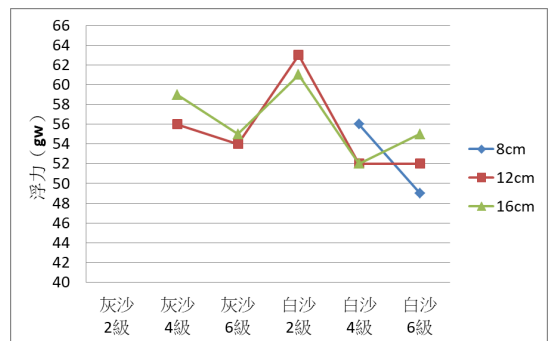


圖 5-3-5 沙面高度對浮力影響折線圖

### 3. 排氣強弱對浮力的影響：(圖 5-3-6)

- (1) 由折線圖可以發現 2 級排氣風力的實驗，反而有較大浮力值，但這也有可能是 2 級排氣的液體化效果不佳，造成的固體顆粒支撐的偽浮力效果。
- (2) 4 級風力造成的浮力效果稍比 6 級風力佳，但差異不大，且無明顯的規律結果。

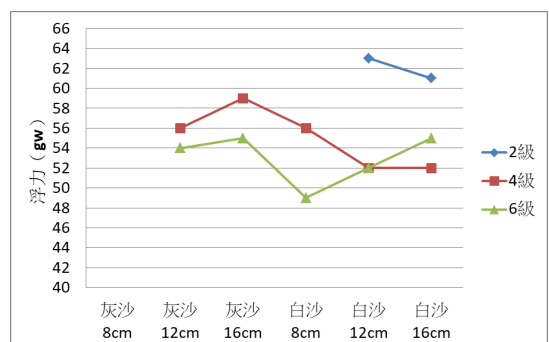


圖 5-3-6 排氣強弱對浮力影響折線圖

(三) 由**密度實驗**探討顆粒種類、沙面高度及排氣強弱對液體化影響的結果與討論：

研究以「物體漂浮於液體上，浮力等於物重，亦等於沒入體積×液體密度」計算沙池呈現的密度大小，針對不同沙顆粒、沙面高度及排氣強弱做實驗，與對照組「水」的密度  $1\text{g/cm}^3$  做比較，實驗結果如表 5-3-3：

表 5-3-3 密度實驗探討顆粒種類、沙面高度及排氣強弱對液體化影響之實驗結果

組別	沙種	高度 (cm)	風力 (級)	測量沒入體積					平均	密度 ( $\text{g/cm}^3$ )	比較 對照組
				第一次	第二次	第三次	第四次	第五次			
A11	灰沙	8	2	270	260	240	260	250	<b>256.0</b>	<b>1.63</b>	163%
A12	灰沙	8	4	335	325	345	350	345	<b>340.0</b>	<b>1.28</b>	128%
A13	灰沙	8	6	335	325	340	345	345	<b>338.0</b>	<b>1.29</b>	129%
A21	灰沙	12	2	360	365	365	360	365	<b>363.0</b>	<b>1.21</b>	121%
A22	灰沙	12	4	315	345	345	350	360	<b>343.0</b>	<b>1.27</b>	127%
A23	灰沙	12	6	330	320	335	340	305	<b>326.0</b>	<b>1.33</b>	133%
A31	灰沙	16	2	205	225	235	195	185	<b>209.0</b>	<b>1.93</b>	193%
A32	灰沙	16	4	315	320	305	290	290	<b>304.0</b>	<b>1.41</b>	141%
A33	灰沙	16	6	320	330	335	335	330	<b>330.0</b>	<b>1.32</b>	132%
B11	白沙	8	2	295	290	300	275	280	<b>288.0</b>	<b>1.48</b>	148%
B12	白沙	8	4	315	305	315	325	315	<b>315.0</b>	<b>1.37</b>	137%
B13	白沙	8	6	315	300	300	310	300	<b>305.0</b>	<b>1.41</b>	141%
B21	白沙	12	2	315	335	300	315	295	<b>312.0</b>	<b>1.38</b>	138%
B22	白沙	12	4	305	295	300	300	310	<b>302.0</b>	<b>1.42</b>	142%
B23	白沙	12	6	310	300	325	305	310	<b>310.0</b>	<b>1.39</b>	139%
B31	白沙	16	2	300	295	300	280	295	<b>294.0</b>	<b>1.45</b>	145%
B32	白沙	16	4	300	275	300	295	295	<b>293.0</b>	<b>1.46</b>	146%
B33	白沙	16	6	325	300	300	305	305	<b>307.0</b>	<b>1.40</b>	140%
C11	貓沙	8	6	無法沒入					-	-	-

備註：因物體最後沒入沙面時可能呈現傾斜狀況，使左右沒入深度不同，故實驗結果分別量測塑膠盒左右沒入深度，以平均值計算沒入的體積。

由表 5-3-3 實驗結果中，可以發現物體在沙池漂浮時，沒入的體積全部小於在水中，若以浮力的概念而言，代表沙池液體化時，其呈現的密度效果大於水，經過計算並扣除差異較大的兩組實驗，液體化沙池的密度相當於  $1.21\text{g}/\text{cm}^3 \sim 1.48\text{g}/\text{cm}^3$  間，大約是水的  $1.2 \sim 1.5$  倍。接著我們進一步以折線圖分析顆粒種類、沙面高度與排氣強弱造成的影響：

### 1. 顆粒種類對密度的影響：(圖 5-3-7)

- (1) 由折線圖可以發現白沙所呈現的密度結果較為一致，都在  $1.4 \sim 1.5 \text{g}/\text{cm}^3$  左右，但灰沙所造成的密度效果差異較大，可能與其組成顆粒大小不均勻有關。
- (2) 扣除灰沙 2 個差異較大的數據，白沙所形成的密度略大於灰沙，顯示均勻、較小的顆粒會形成較大的液化密度。

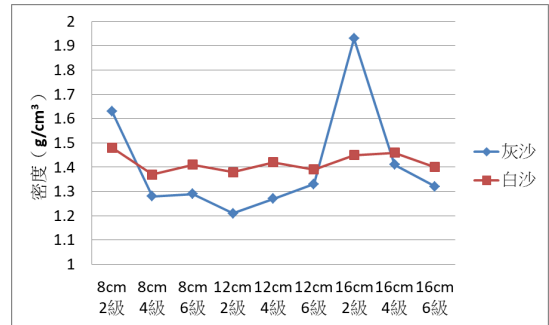


圖 5-3-7 顆粒種類對密度影響折線圖

### 2. 沙面高度對密度的影響：(圖 5-3-8)

- (1) 由折線圖可以發現除灰沙以 2 級風力的實驗組別外，其餘實驗組別中，不同沙面高度所造成的密度差異較小，且互有高低，沒有明顯的趨勢與規律，顯示沙面高度對於液化後密度的影響不大。

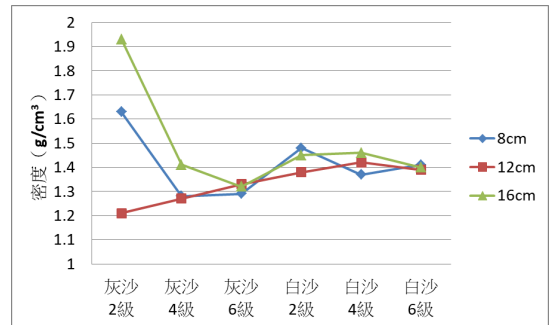


圖 5-3-8 沙面高度對密度影響折線圖

### 3. 排氣強弱對密度的影響：(圖 5-3-9)

- (1) 由折線圖可以發現 4 級與 6 級的排氣風力，造成的密度差異較小，且互有高低，沒有明顯的趨勢與規律，顯示此排氣強弱對於液化後密度的影響不大。
- (2) 2 級風力造成的密度結果差異很大，可能由於沙池內部未完全液體化，物體並非完全漂浮於其上，而有受到部分無液化效果的沙粒支撐。

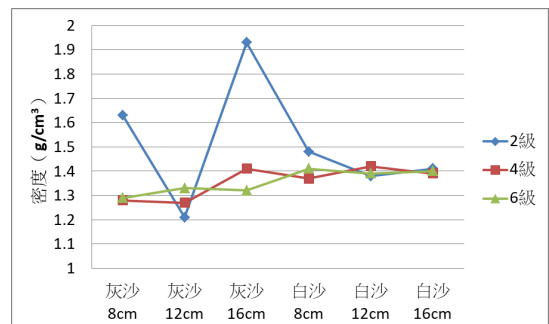




















圖 5-3-9 排氣強弱對密度影響折線圖

(四) 各組實驗沙池表面液體化狀況記錄：

透過錄影的方式，記錄各組實驗中沙池表面液體化狀況，並以截圖的方式分析沙池液體化狀況與實驗結果之關連，如表 5-3-4：

表 5-3-4 各組實驗沙池液體化狀況

		
灰沙-8cm 高-2 級風力	灰沙-8cm 高-4 級風力	灰沙-8cm 高-6 級風力
		
灰沙-12cm 高-2 級風力	灰沙-12cm 高-4 級風力	灰沙-12cm 高-6 級風力
		
灰沙-16cm 高-2 級風力	灰沙-16cm 高-4 級風力	灰沙-16cm 高-6 級風力
		
白沙-8cm 高-2 級風力	白沙-8cm 高-4 級風力	白沙-8cm 高-6 級風力
		
白沙-12cm 高-2 級風力	白沙-12cm 高-4 級風力	白沙-12cm 高-6 級風力
		
白沙-16cm 高-2 級風力	白沙-16cm 高-4 級風力	白沙-16cm 高-6 級風力



由表 5-3-4 的沙池表面狀況推論：

1. 白沙的沙泡明顯較灰沙更大，但過大的沙泡可能造成對物體的阻力及浮力變大，使其與水的性質反而差異較大（灰沙的三項性質都更接近水）；但灰沙也因沙泡較少，使液體化程度不穩定，實驗數據差異較白沙大，甚至無法測量。
2. 灰沙在 2 級風力時沙泡小而稀疏，尤其是靠進氣口的第二排位置幾乎完全未出現沙泡，導致多組實驗無法量測實驗結果。
3. 研究推測氣流因進氣方向，會使遠離進氣口的排氣管反而獲得最大的排氣風力，另外靠箱側的排氣，能藉由垂直的箱壁上升，所以在風力較小時，第二排排氣管位置的沙泡狀況最不明顯，甚至完全沒有沙泡；第四排沙泡狀況最明顯。風力足夠時，此差異較不明顯。（如圖 5-3-10）



圖 5-3-10 進氣狀況推論圖

第二排排氣管  
沙泡效果最差

#### 四、排氣孔設置方式對沙池液體化程度影響的研究結果與討論

針對排氣孔孔距、孔洞尺寸、排列方式等因素的改變，進行阻力、浮力、密度的三項測量實驗，並分別討論實驗結果。

##### （一）由阻力實驗探討排氣孔設置方式對液體化影響的結果與討論：

研究以「物體受同一拉力作用，移動固定距離的時間」計算物體所受阻力大小，針對不同排氣管孔距、孔洞尺寸、排氣孔排列方式做實驗，與對照組「水」的阻力 0.199 牛頓做比較，實驗結果如表 5-4-1：

表 5-4-1 阻力實驗探討排氣孔設置方式對液體化影響之實驗結果

組別	實驗項目	移動時間（秒）					平均	阻力（N）	比較對照組	
		第一次	第二次	第三次	第四次	第五次				
D1	孔距 (cm)	1.25	1.03	1.03	1.13	1.14	0.98	<b>1.062</b>	<b>0.339</b>	169%
D2		2.5	0.98	0.81	1.00	0.91	1.00	<b>0.940</b>	<b>0.324</b>	162%
D3		5	1.06	1.04	1.00	1.04	0.98	<b>1.024</b>	<b>0.335</b>	167%

E1	孔洞	3	0.98	0.81	1.00	0.91	1.00	<b>0.940</b>	<b>0.324</b>	162%
E2	尺寸	4.5	1.31	1.35	1.27	1.32	1.28	<b>1.306</b>	<b>0.357</b>	178%
E3	(mm)	6	1.49	1.60	1.50	1.50	2.06	<b>1.630</b>	<b>0.369</b>	185%
F1	排列	對稱	0.98	0.81	1.00	0.91	1.00	<b>0.940</b>	<b>0.324</b>	162%
F2	方式	交錯	0.96	0.91	0.90	0.96	0.90	<b>0.926</b>	<b>0.322</b>	161%

### 1.孔距對阻力的影響：

由表 5-4-1 可知孔距對沙池阻力影響較小。孔距 1.25cm、5cm 所造成的阻力，分別是 0.339、0.335 牛頓，比 2.5cm 孔距略大，但差距皆不到 10%。三者因孔距大小使排氣孔數差異 2~4 倍，但結果卻十分接近，與我們的預期不同。

### 2.孔洞尺寸對阻力的影響：

在阻力實驗中，影響較大的是孔洞尺寸，我們進一步將每次實驗的阻力值以折線圖分析，如圖 5-4-1。折線圖結果明顯呈現出孔洞直徑越大，會形成較大的阻力，3mm 孔洞尺寸效果較佳。(但限於電鑽鑽頭限制，無法鑽出更小的孔洞，不能確認孔洞越小是否效果更佳)

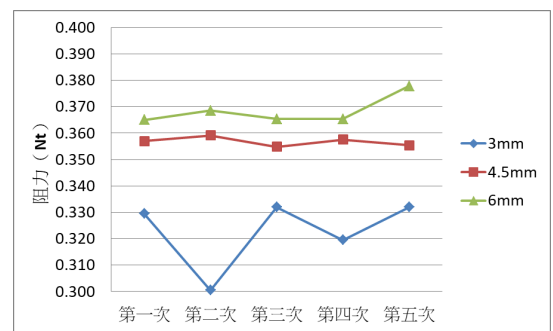


圖 5-4-1 孔洞尺寸對阻力影響折線圖

### 3.排氣孔排列方式對阻力的影響：

交錯的排氣孔排列方式，與對稱排列幾乎沒有差異，兩者僅差 0.02 牛頓，差異不到 1%，可視為不影響沙池阻力。

#### (二) 由浮力實驗探討排氣孔設置方式對液體化影響的結果與討論：

研究以「物體沒入液體中減少的重量為所受浮力」計算物體所受浮力大小，針對不同排氣管孔距、孔洞尺寸、排氣孔排列方式做實驗，與對照組「水」造成的浮力 55gw 做比較，實驗結果如表 5-4-2：

表 5-4-2 浮力實驗探討排氣孔設置方式對液體化影響之實驗結果

組別	實驗項目	測量沉體物重					平均	浮力 (gw)	比較對照組	
		1 秒時	2 秒時	3 秒時	4 秒時	5 秒時				
D1	孔距 (cm)	1.25	150	150	155	155	155	<b>153.0</b>	<b>47.0</b>	85%
D2		2.5	155	150	155	140	140	<b>148.0</b>	<b>52.0</b>	95%
D3		5	155	145	140	150	150	<b>148.0</b>	<b>52.0</b>	95%
E1	孔洞	3	155	150	155	140	140	<b>148.0</b>	<b>52.0</b>	95%
E2	尺寸	4.5	150	145	140	140	145	<b>144.0</b>	<b>56.0</b>	102%
E3	(mm)	6	155	140	130	150	145	<b>144.0</b>	<b>56.0</b>	102%
F1	排列	對稱	155	150	155	140	140	<b>148.0</b>	<b>52.0</b>	95%
F2	方式	交錯	150	140	145	140	145	<b>144.0</b>	<b>56.0</b>	102%

### 1.孔距對浮力的影響：

由表 5-4-2 可知 1.25cm 的孔距會造成比較小的浮力。進一步將每秒的浮力值畫成折線圖（圖 5-4-2），可發現孔距 1.25cm 的實驗結果較穩定，孔距較大，變化幅度也較大，可能與排氣氣流不穩定有關。

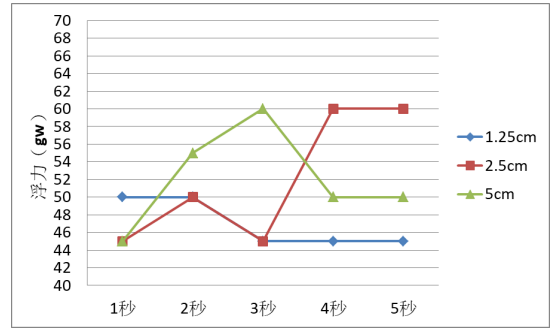


圖 5-4-2 孔距對浮力影響折線圖

### 2.孔洞尺寸對浮力的影響：

由表 5-4-2 可知孔洞尺寸加大時，造成浮力變大，但進一步以折線圖(圖 5-4-3)觀察，實驗結果變化大，無法明顯表示孔洞尺寸與浮力有關。

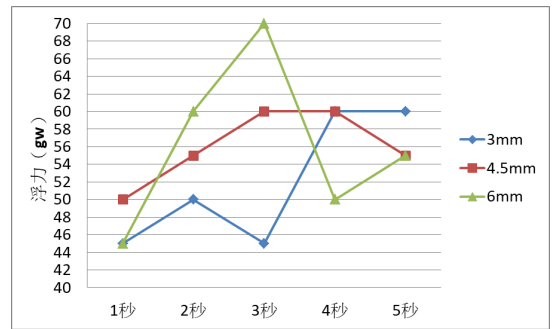


圖 5-4-3 孔洞尺寸對浮力影響折線圖

### 3.排氣孔排列方式對浮力的影響：

由表 5-4-2 可知交錯的排氣孔排列方式，造成的浮力較大，平均值較對稱排列多了 4gw，但差異不到 10%。

## (三) 由密度實驗探討排氣孔設置方式對液體化影響的結果與討論：

研究以「物體漂浮於液體上，浮力等於物重，亦等於沒入體積×液體密度」計算沙池呈現的密度大小，針對不同排氣管孔距、孔洞尺寸、排氣孔排列方式做實驗，與對照組「水」的密度 1g/cm<sup>3</sup> 做比較，實驗結果如表 5-4-3：

表 5-4-3 密度實驗探討排氣孔設置方式對液體化影響之實驗結果

組別	實驗項目	測量沒入體積					平均	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	比較對照組	
		第一次	第二次	第三次	第四次	第五次				
D1	孔距 (cm)	1.25	355	300	290	300	295	308.0	1.40	140%
D2		2.5	310	300	325	305	310	310.0	1.39	139%
D3		5	290	300	295	300	300	297.0	1.44	144%
E1	孔洞尺寸 (mm)	3	310	300	325	305	310	310.0	1.39	139%
E2		4.5	245	305	295	320	320	297.0	1.44	144%
E3		6	310	330	320	335	325	324.0	1.34	134%
F1	排列方式	對稱	310	300	325	305	310	310.0	1.39	139%
F2		交錯	275	280	295	285	295	286.0	1.49	149%

### 1.孔距對密度的影響：

由表 5-4-3 可知孔距對沙池密度影響較小，三種孔距所造成的密度差異不超過

0.05g/cm<sup>3</sup>，都大約是水的 1.4 倍。

## 2.孔洞尺寸對密度的影響：

由表 5-4-3 可知 6mm 的孔洞造成較小的密度，但根據折線圖（圖 5-4-4），雖然 4.5mm 孔洞造成的密度皆大於 6mm，但與 3mm 孔洞的實驗結果互有高低，顯示孔洞尺寸與密度並沒有明顯的關係。

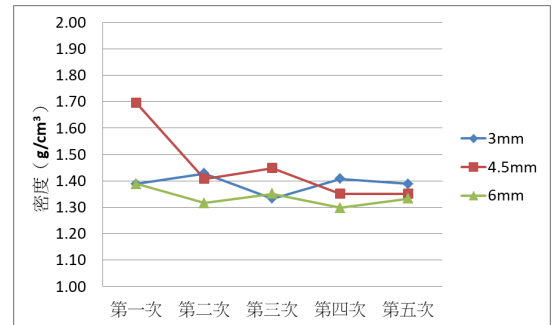


圖 5-4-4 孔洞尺寸對密度影響折線圖

## 3.排氣孔排列方式對密度的影響：

由表 5-4-3 可知交錯的排氣孔排列方式，造成的密度較大，平均值較對稱排列多了 0.1g/cm<sup>3</sup>。

### (四) 各組實驗沙池液體化狀況記錄：

透過錄影的方式，記錄各組實驗中沙池液體化狀況，並以截圖的方式分析沙池液體化狀況與實驗結果之關連，如表 5-4-4：

表 5-4-4 各組實驗沙池液體化狀況

孔距-1.25cm	孔距-2.5cm	孔距-5cm
孔洞尺寸-3mm	孔洞尺寸-4.5mm	孔洞尺寸-6mm
排氣孔對稱排列	排氣孔交錯排列	

由表 5-4-4 的沙池表面狀況推論：

- 1.不同的排氣孔設置方式，沒有對表面沙泡狀況造成明顯影響。

- 2.不同孔距雖然會形成數量不同的排氣孔數（1.25cm-每排 26 個、2.5cm-每排 13 個、5cm-每排 6 個），但實驗觀察所形成的沙泡狀況沒有太大的差異。
- 3.孔洞尺寸 6mm 的沙泡數明顯較少，可能是造成阻力和浮力較大的原因。
- 4.排氣孔對稱及交錯排列，對沙泡的影響不明顯。

## 五、沙池裝置對運送固體顆粒應用的研究結果與討論

根據前述各項實驗結果，我們歸納較佳的裝置組合：「**3mm 孔洞尺寸，以 12cm 的沙面高度，配合 6 級的最大排氣風力**」，利用實驗結果較穩定的**白沙**進行應用沙池裝置來傾瀉沙粒的實驗，並與未開啟的吹塵器的對照組進行比較（如圖 5-1-1、5-1-2），實驗結果如下表 5-1-1。

表 5-1-1 傾瀉實驗結果

組別	10 秒內傾瀉量 (cm <sup>3</sup> )			平均
	第一次	第二次	第三次	
對照組 關閉吹塵器	130	130	140	<b>133.3</b>
實驗組 開啟吹塵器	500	520	450	<b>490.0</b>

依照表 5-1-1 的實驗結果，啟動沙池裝置使沙液體化後，確實能大幅增加沙的傾瀉速度，相同的傾瀉時間內，實驗組的傾瀉量將近對照組的 4 倍。若有運送或傾瀉固體顆粒的需求，運用類似沙池裝置的流化床原理，確實相當有幫助呢！



圖 5-1-1 實驗組：開啟吹塵器傾瀉

圖 5-1-2 對照組：關閉吹塵器傾瀉

## 陸、結論

一、以 **PP 收納箱** 作為沙池箱體，**硬水管** 作為排氣管，並利用 **吹塵器** 作為進器裝置，可設計出模擬沙池裝置。排氣管的最佳設置方式為：

- (一) 水管中央兩側各 1cm 處等距鑽孔，將排氣孔向下倒置，使氣流向 **斜下方** 噴出。
- (二) 進氣管為單進雙出連接排氣管兩端，使進氣均勻。

二、利用「水」作為液體化標準，以下列三種方式定量測量出沙池的液體化程度：

- (一) 測量 200 克物體受 40 克重拉力拉動 15cm 所需的時間，計算沙池中所受 **阻力**。

$$F_{\text{阻力}} = F_{\text{拉力}} - m_{\text{物體質量}} \times a_{\text{物體加速度}} = F_{\text{拉力}} - m_{\text{物體質量}} \times (2 \times S_{\text{物體移動距離}} \div t_{\text{移動時間}}^2)$$

- (二) 測量 200 克物體沉入沙池中的秤量重量，計算沙池中所受的 **浮力**。

$$F_{\text{沉體浮力}} = W_{\text{物體重量}} - F_{\text{秤量重量}}$$

- (三) 測量 500 克物體漂浮於沙池上所沒入的體積，計算沙池的 **密度**。

$$D_{\text{液體密度}} = W_{\text{物體重量}} \div V_{\text{沒入體積}}$$

三、**顆粒較大**的沙池**無法產生液體化效果**，顆粒均勻的沙池液體化性質較為穩定。

- (一) 貓沙無法使沙池產生液體化效果，另兩種顆粒種類對液體化程度影響不大。
- (二) 白沙顆粒較為均勻，較灰沙更能產生穩定一致的實驗結果。

四、**沙面高度**對沙池**阻力**有明顯影響，對浮力與密度則無明顯關係。

- (一) 沙面高度與阻力並非正比或反比關係，而是在 **特定高度（本實驗為 12cm）** 能產生最好的低阻力效果。
- (二) 沙面高度對沙池浮力與密度較無明顯關係，但高度低不易使沙池內部液體化。

五、**排氣風力**越大，沙池**阻力**越低；對浮力與密度則無明顯關係。

六、排氣管**孔洞尺寸**越大，沙池**阻力**明顯增加、**浮力**稍微增加，其餘排氣孔設置方式對各項液體化程度影響較小。

七、可利用沙池表面**沙泡**的產生狀況，觀察沙池液體化程度：

- (一) **第二排排氣管**上方位置，於風力較小時，無法產生沙泡及液體化狀況。
- (二) 顆粒較小的**白沙**能產生比灰沙更明顯、更大的沙泡。
- (三) 排氣孔設置方式對沙泡產生影響較小，僅孔洞尺寸大會產生較少的沙泡。

八、本研究以 **3mm 孔洞**、**12cm 沙面高**、**6 級最大排氣**能得到最佳沙池液體化效果。相較於水，沙池產生的**阻力及密度約為 1.5 倍**、**浮力則幾乎與水相同**，確實能讓物體在沙池上游動或壓下、浮起，可替代水池作休閒娛樂使用。

九、運用沙池裝置進行沙粒的傾瀉，傾瀉速度將近為直接傾瀉的 **4 倍**，可作為良好的固體顆粒運送或傾瀉應用。



圖 6-8-1 利用沙池玩洗澡玩具

## 柒、參考資料

**YOUTUBE 影片-Liquid Sand Hot Tub- Fluidized air bed**。(無日期)。民 108 年 12 月 2 日。

取自：<https://www.youtube.com/watch?v=My4RA5I0FKs>

**神奇砂實驗**。(無日期)。民 108 年 12 月 2 日。取自：

<https://www.masters.tw/205394/fluidized-air-bed>

郭修伯、黃安妮(民 104)。**粉末登場：你是風兒我是沙-流體化床**。科學發展，513，10-15。

## 【評語】 082921

本研究建置流體化沙池，並探究沙粒種類、高度、排氣強弱及排氣孔距、孔洞尺寸、排列等因素，對沙池液體化影響。以水為基準，定量測量沙池的阻力、浮力、密度等性質，計算砂池液體化程度，很有見地。雖然動機是替代水池作為休閒娛樂使用，但對問題的解析，有條有理。如果沙粒粒徑可經篩選，氣體分散更均勻，流體化程度會更完全，液化特性更能呈現。

# 研究動機

在工程師 Mark Rober 的影片「Liquid Sand Hot Tub- Fluidized air bed」中，他製作一個類似「沙池」的裝置，可以讓人在沙中游泳、玩玩具船，把乒乓球壓下後浮起。我們想試著用可取得的物品，模擬影片的裝置，嘗試做出同樣的沙池效果。我們也想探討如何測量出沙池的「液體化程度」，並藉此研究改變沙池「排氣強弱、沙面高度、沙顆粒及排氣孔設置」等條件，對沙池液體化程度的影響，實驗出最接近液體樣貌的沙池，並探討它在生活中的應用。



# 研究目的

- 一、自製沙池裝置可行性之探究
- 二、沙池液體化程度定量測量探討
- 三、沙池顆粒種類對液體化程度之影響
- 四、沙池沙面高度對液體化程度之影響
- 五、沙池排氣強弱對液體化程度之影響
- 六、沙池排氣孔設置方式對液體化程度之影響
- 七、沙池裝置對運送固態顆粒應用之研究

# 研究設備及器材

## 一、沙池裝置材料與工具：

- (一) 沙粒種類：貓沙、灰沙、白沙。
- (二) 裝置材料：透明 PP 整理箱、4 分管、1/2 吋三通接管、1/2 吋彎頭接管、硬質水管膠合劑、絕緣膠帶、吹塵器。
- (三) 製作工具：電鑽（含 3mm、4.5mm、6mm 鑽頭）、水管鉗、木槌、焊槍、尺。



## 二、測量裝置：

- (一) 阻力測量：200 克重物（塑膠盒、螺帽、絕緣膠帶）、綿線、滑輪、20 克砝碼\*2、碼錶。
- (二) 浮力測量：200 克沉體（含磁鐵塊、絕緣膠帶）、彈簧秤。
- (三) 密度測量：500 克浮體（含 1000cm<sup>3</sup> 塑膠盒、螺帽、保鮮膜、橡皮筋）。
- (四) 其他材料：電子秤、熱熔膠槍。

## 三、記錄設備：數位相機（拍照及錄影用）、電腦（回放影片用）、實驗記錄表。

# 研究過程與方法

## 一、自製沙池裝置之研究過程

### (一) 沙池裝置器材選擇：

#### 1. 進氣設備：

利用電腦教室所使用的吹塵器，可持續吹出穩定的風力，且能夠調整出風力大小。



我們用吹塵器推動 200 克重物在水管軌道間前進，比較吹塵器各級風力差異。依據實驗結果可確認吹塵器各級風力雖然不是倍數關係，但確實有明顯的風力差異。

風力	第一次	第二次	第三次	平均	倍數關係
2 級	55.0cm	59.5cm	60.0cm	58.17cm	以 2 級風力為標準
4 級	105.0cm	108.0cm	111.0cm	108.00cm	1.86 倍
6 級	137.0cm	133.0cm	133.5cm	134.50cm	2.31 倍

#### 2 沙池箱體與排氣管道：

- (1) 箱體：選擇較方正、底部空間充足的 PP 收納箱作為沙池箱體。
- (2) 排氣管道：4 分管硬水管利用 1/2 吋彎頭接管及三通接管連接，以硬質水管膠合劑連接。



#### 3. 沙粒種類：

- (1) 貓沙：顆粒直徑約 0.5 ~ 1.5mm，顆粒較大，大小較均勻，多為圓球狀。
- (2) 灰沙：顆粒直徑約 <0.5mm ~ 5mm，顆粒大小差異大，包含小礫石及沙塵，不規則型。
- (3) 白沙：顆粒直徑 <0.5mm，顆粒最小，多為小顆粒或沙塵。



### (二) 沙池裝置初探實驗：

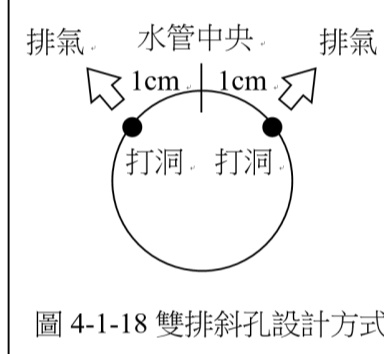
#### 1. 第一代裝置：單排直上排氣孔+貓沙

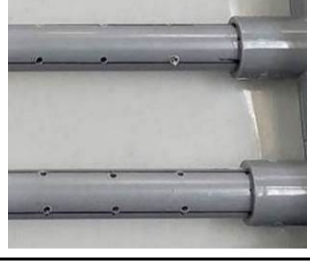


配合 PP 箱的大小，將硬水管以彎頭接管及三通接管連接為 4 排排氣孔的裝置，每 3cm 一個洞，總共 32 個排氣孔。另在排氣管右下角用三通接管做出連接吹塵器的位置。

		
單排直孔排氣+貓沙 5cm 形成沙洞，無液體化效果	單排直孔排氣+貓沙 8cm 形成沙洞，無液體化效果	單排直孔排氣+貓沙 10cm 表面無反應，無液體化效果

#### 2. 第二代裝置：雙排斜上排氣孔+貓沙







前項實驗發現朝上的排氣孔容易在表面噴出沙洞，改將排氣孔打在水管中心線兩側各一公分位置，每根排氣管會有兩排斜上排氣的氣孔，讓排氣量增加一倍。



		
改為雙排斜孔排氣孔	雙排斜孔排氣+貓沙 5cm 形成沙洞，無液體化效果	雙排斜孔排氣+貓沙 8cm 表面無反應，無液體化效果

#### 3. 第三代裝置：雙排斜下排氣孔+貓沙、灰沙、白沙

經過前兩次實驗失敗，發現向上噴氣的方式，在沙池深度淺時，會形成噴孔、深度深時則無法有效果。於是我們重新安裝沙池裝置，讓排氣管向下排氣，並增加灰沙及白沙實驗。結果發現不再有噴氣孔產生，用灰沙和白沙有液體化效果。

		
雙排斜孔向下+灰沙 5cm 形成沙池，有液體化效果	雙排斜孔向下+灰沙 10cm 形成沙池，有液體化效果	雙排斜孔向下+灰沙 15cm 形成沙池，有液體化效果
		
雙排斜孔向下+白沙 5cm 形成沙池，有液體化效果	雙排斜孔向下+白沙 10cm 形成沙池，有液體化效果	雙排斜孔向下+白沙 15cm 形成沙池，有液體化效果

## 二、定量測量沙池液體化程度之研究設計

### (一) 液體化程度定義：

#### 1. 利用「阻力」定量測量：以「物體受同一拉力作用，移動固定距離的時間」作為阻力大小的判斷。

- (1) 固定物體移動距離，測量物體移動時間，便能利用公式算出物體所受拉力產生的加速度：

$$a_{\text{物體加速度}} = \frac{2 \times S_{\text{物體移動距離}}}{t_{\text{移動時間}}^2}$$

- (2) 再利用力與加速度的公式，就能算出物體在沙池中移動所受的阻力：

$$F_{\text{阻力}} = F_{\text{拉力}} - m_{\text{物體質量}} \times (2 \times S_{\text{物體移動距離}} / t_{\text{移動時間}}^2)$$

- (3) 以物體在水中的阻力為標準，比較出沙池阻力為水的幾倍（百分比表示）。

#### 2. 利用「浮力」定量測量：雖然沙池浮力與真實浮力成因不盡相同，但我們仍想以物體在沙池中所受到的浮力效果，定義其液體化的程度。

- (1) 以「物體沒入液體中減少的重量為所受浮力」計算浮力，將沒入水中的浮力作為標準，比較出沙池浮力為水的幾倍（百分比表示）。

$$F_{\text{沉體浮力}} = W_{\text{物體重量}} - F_{\text{測量重量}}$$

- (2) 以「物體漂浮於液體上，浮力等於物重，亦等於沒入體積×液體密度」計算密度。以水的密度 1g/cm<sup>3</sup> 作為標準，比較出沙池作用時的密度為水的幾倍（百分比表示）。

$$F_{\text{沉體浮力}} = W_{\text{物體重量}} = V_{\text{沒入體積}} \times D_{\text{液體密度}}$$

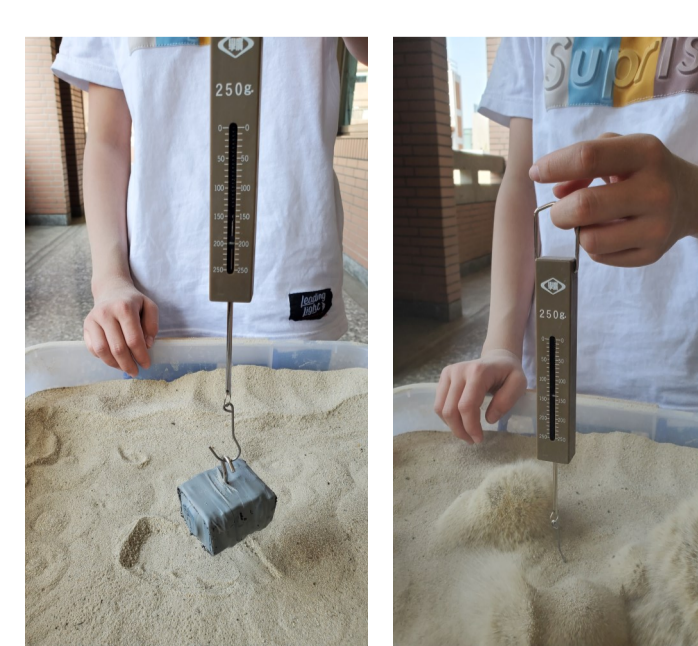
### (二) 測量物體於沙池中所受阻力之實驗裝置：

1. 重物裝置：以塑膠盒裝金屬螺帽，調整重量為 200 克重。
2. 滑輪裝置：利用滑輪懸掛 40 克砝碼，在綿線上啟動及前進 15cm 後的位置，分別以紅色絕緣膠帶作記號。
3. 測量方式：利用計時、錄影與定格播放，確認重物前進 15cm 時間，每項實驗重複 5 次。



### (三) 測量沉體於沙池中所受浮力之實驗裝置：

1. 重物裝置：利用密度較大的磁鐵塊，加上一個金屬掛勾，以熱熔膠及絕緣膠帶黏合，並微調重量至 200 克重。
2. 測量方式：利用計時、錄影與定格播放，確認每一整數秒鐘之物體秤重，每項實驗可獲得 5 個秤重結果。



### (四) 測量浮體於沙池中漂浮狀況之實驗裝置：

1. 重物裝置：以塑膠盒裝金屬螺帽，並用保鮮膜覆蓋，防止沙粒落入盒中，調整重量為 500 克重。
2. 測量方式：利用計時、錄影與定格播放，確認重物沒入體積，每項實驗重複 5 次。





### 三、顆粒種類、排氣強弱及沙面高度對沙池液體化程度影響的實驗設計：

(一) 對照組實驗：將沙池實驗裝置，去除排氣管的設置，PP箱內改盛裝12cm高的水，進行三項實驗方式。

(二) 實驗組類別：

組別	顆粒種類	沙面高度	排氣強弱
A11	灰沙	8cm	2級
A12	灰沙	8cm	4級
A13	灰沙	8cm	6級
A21	灰沙	12cm	2級
A22	灰沙	12cm	4級
A23	灰沙	12cm	6級
A31	灰沙	16cm	2級
A32	灰沙	16cm	4級
A33	灰沙	16cm	6級
B11	白沙	8cm	2級
B12	白沙	8cm	4級
B13	白沙	8cm	6級
B21	白沙	12cm	2級
B22	白沙	12cm	4級
B23	白沙	12cm	6級
B31	白沙	16cm	2級
B32	白沙	16cm	4級
B33	白沙	16cm	6級
*C11	貓沙	8cm	6級

(三) 實驗流程與記錄：

1. 實驗項目：各組分別進行「阻力、浮力、密度」三項測量實驗。
2. 實驗記錄：以相機分別錄影或拍照實驗結果，定格播放或檢視實驗結果，記錄數據。

### 四、排氣孔設置方式對沙池液體化程度影響的實驗設計：

(一) 對照組實驗：同前項實驗設計。

(二) 實驗組類別：

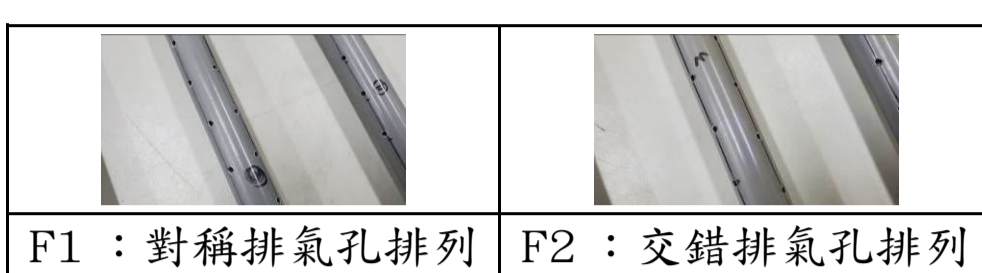
1. 孔距大小：以2.5cm孔距作標準，另外製作1.25cm、5cm孔距的排氣管裝置。



2. 孔洞尺寸：以直徑3mm作標準，另外製作4.5mm、6mm直徑的排氣孔裝置。



3. 排列方式：除雙排對稱的排氣孔排列，另製作交錯排列的排氣孔。



(三) 實驗流程與記錄：

1. 實驗項目：以白沙、12cm高度、風力6級作為實驗方式，各組分別進行「阻力、浮力、密度」三項實驗。
2. 實驗記錄：同前項實驗設計。

### 五、沙池裝置對運送固態顆粒應用的實驗設計：

(一) 實驗裝置：

1. 沙池裝置：以白沙12cm高度、6級風力大小，配合孔距2.5cm、直徑3mm、對稱排列的排氣孔裝置進行實驗。

2. 傾瀉裝置：於沙池一側高10cm之位置，以焊槍開洞，裝上一個球形轉閥的出沙口裝置。



(二) 實驗組別：

1. 對照組：關閉吹塵器，使沙粒由出沙口自然傾瀉。
2. 實驗組：開啟吹塵器，使沙粒於沙池液體化作用下傾瀉。

(三) 實驗流程與記錄：

1. 關閉球形轉閥，將沙池一側抬高20cm。
2. 依實驗需求，關閉或開啟吹塵器。
3. 打開球形轉閥，使沙粒傾瀉到下方量杯。
4. 10秒後測量傾瀉到量杯中的沙粒容積。
5. 各組實驗3次，記錄及比較結果。

## 研究結果與討論

### 一、初探實驗的研究結果與討論：

(一) 沙池裝置的改良成果：

1. 箱體：改以較大的57x39x23.5cm PP收納箱作為沙池箱體，具有外型方正、容量適中、容易切割、方便觀察等優點。
2. 排氣管：以4分硬水管搭配彎頭及三通接管連接。用3mm直徑鑽頭於水管中央兩側各1cm處，對稱鑽孔，形成8排104孔的排氣孔，在箱體中需將排氣孔朝下放置。
3. 進氣管：設計單入雙出的進氣管，使進氣更為均勻，並可拆除、連接不同樣式的排氣管。
4. 吹塵器：作為進氣裝置，能穩定且高壓的提供進氣，並可調整風力大小。



圖 5-1-1 改良之沙池裝置

(二) 沙池裝置的製作步驟：

步驟 1. 切割適當長的4分硬水管	步驟 2. 在水管中央兩側1cm處畫線	步驟 3. 間隔2.5cm畫出排氣孔位置	步驟 4. 以硬質水管膠合劑連接水管	步驟 5. 完成排氣管裝置組合
步驟 6. 以電鑽鑽出排氣孔	步驟 7. 焊槍在PP箱上熱熔兩個洞	步驟 8. 將進氣裝置接上排氣管	步驟 9. 以絕緣膠帶密封PP箱上縫隙	步驟 10. 連接吹塵器完成沙池裝置

### 二、液體化程度定量測量方式的研究結果與討論～以「水」作為研究標準

(一) 對照組「水」的「阻力」測量結果：

水面高度	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	平均
12cm	0.55	0.53	0.51	0.60	0.60	0.558

根據實驗結果，物體移動15cm的平均時間為0.558秒，可計算出：

$$a_{\text{物體加速度}} = 0.15 \times 2 \div 0.558^2 = 0.964 \text{ m/s}^2$$

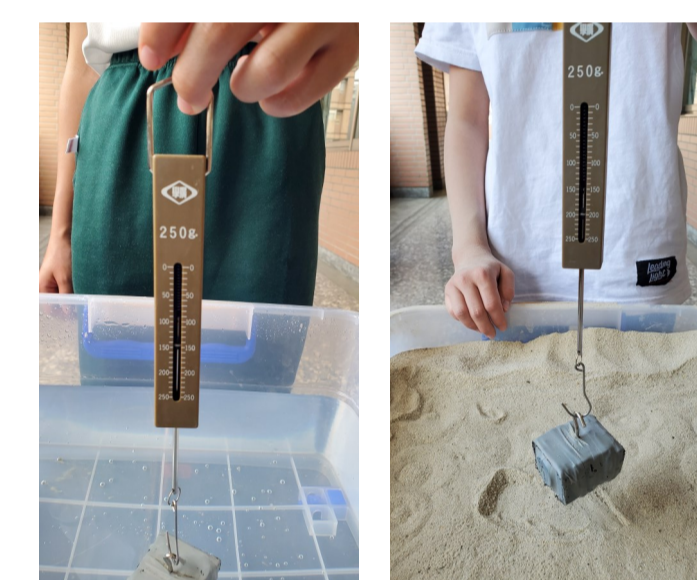
再以拉力為40克重砝碼，相當於 $0.04 \times 9.8 = 0.392$ 牛頓，物體質量為0.2公斤（200克），可計算出：

$$F_{\text{阻力}} = 0.392 - 0.2 \times 0.964 = 0.199 \text{ 牛頓}$$

(二) 對照組「水」的「浮力」測量結果：

實驗重物由沒入前的200克重，變為沒入後的145克重。由實驗結果可計算此物體在水中

$$F_{\text{沉體浮力}} = 200 - 145 = 55 \text{ 克重}$$



(三) 對照組「水」的「密度」測量結果：

研究發現500克的物體沒入體積為 $450 \text{ cm}^3$ 。由於已知水的 $D_{\text{液體密度}} = 1 \text{ g/cm}^3$ ，實驗結果理論上應沒入 $500 \text{ cm}^3$ ，判斷塑膠盒上刻度僅為內部容積，未考慮塑膠盒本身所佔之體積，故後續測量結果應加入 $50 \text{ cm}^3$ 作為實際沒入體積。



### 三、顆粒種類、沙面高度及排氣強弱對沙池液體化程度影響的研究結果與討論：

(一) 由阻力實驗探討顆粒種類、沙面高度及排氣強弱對液體化影響：

1. 實驗結果：

組別	沙種	高度 (cm)	風力 (級)	移動時間 (秒)					平均	阻力 (N)	比較對照組
				第一次	第二次	第三次	第四次	第五次			
A11	灰沙	8	2	無法完成移動					-	-	-
A12	灰沙	8	4	1.69	1.51	1.68	1.74	1.69	1.662	0.370	185%
A13	灰沙	8	6	1.1	1.34	1.49	1.13	1.15	1.242	0.353	177%
A21	灰沙	12	2	無法完成移動					-	-	-
A22	灰沙	12	4	0.97	1.00	1.03	1.10	1.00	1.020	0.334	167%
A23	灰沙	12	6	0.81	0.78	0.72	0.97	0.97	0.850	0.309	154%
A31	灰沙	16	2	9.00	11.40	無法完成移動			-	-	-
A32	灰沙	16	4	1.29	1.24	1.18	1.20	1.17	1.216	0.351	176%
A33	灰沙	16	6	1.01	1.02	0.90	0.94	0.97	0.968	0.328	164%
B11	白沙	8	2	8.28	10.22	9.20	11.14	9.16	9.600	0.391	196%
B12	白沙	8	4	1.68	1.89	2.20	2.06	2.00	1.966	0.376	188%
B13	白沙	8	6	1.13	1.08	1.41	1.16	1.22	1.200	0.350	175%
B21	白沙	12	2	2.10	3.00	3.07	2.03	2.03	2.446	0.382	191%
B22	白沙	12	4	1.26	1.06	1.09	1.16	1.16	1.146	0.346	173%
B23	白沙	12	6	0.98	0.81	1.00	0.91	1.00	0.940	0.324	162%
B31	白沙	16	2	無法完成移動					-	-	-
B32	白沙	16	4	1.13	1.03	1.02	1.04	1.09	1.062	0.339	169%
B33	白沙	16	6	1.09	1.03	0.95	1.00	1.02	1.018	0.334	167%
C11	貓沙	8	6	無法完成移動					-	-	-

(二) 由浮力實驗探討顆粒種類、沙面高度及排氣強弱對液體化影響：

1. 實驗結果：

組別	沙種	高度 (cm)	風力 (級)	測量沉體物重						浮力 (gw)	比較對照組
				1秒時	2秒時	3秒時	4秒時	5秒時	平均		
A11	灰沙	8	2	無法沒入						-	-
A12	灰沙	8	4	無法沒入						-	-
A13	灰沙	8	6	無法沒入						-	-
A21	灰沙	12	2	無法沒入						-	-
A22	灰沙	12	4	145	150	130	145	150	144.0	56.0	102%
A23	灰沙	12	6	145	140	150	145	150	146.0	54.0	98%
A31	灰沙	16	2	無法沒入						-	-
A32	灰沙	16	4	145	150	140	135	135	141.0	59.0	107%
A33	灰沙	16	6	145	145	140	145	150	145.0	55.0	100%
B11	白沙	8	2	無法沒入						-	-
B12	白沙	8	4	145	145	150	135	145	144.0	56.0	102%
B13	白沙	8	6	150	150	160	145	150	151.0	49.0	89%
B21	白沙	12	2	130	140	125	140	150	137.0	63.0	115%
B22	白沙	12	4	150	150	150	135	155	148.0	52.0	95%
B23	白沙	12	6	155	150	155	140	140	148.0	52.0	95%
B31	白沙	16	2	135	135	145	135	145	139.0	61.0	111%
B32	白沙	16	4	145	145	150	155	145	148.0	52.0	95%
B33	白沙	16	6	150	140	145	140	150	145.0	55.0	100%
C11	貓沙	8	6	無法沒入						-	-

2. 各因素影響分析：

除少數幾組實驗外，皆能達成類似在水中低阻力的移動效果，但阻力約為1.5~2倍左右，顯示在沙池所製造的低阻力效果仍較真實液體差。

- (1) 顆粒種類：灰沙和白沙阻力的結果與趨勢大致相同，但貓沙無法形成沙池作用，顯示顆粒較大，沙池液體化效果較差。
- (2) 沙面高度：8cm時阻力最大、12cm時阻力最小，16cm次之，顯示沙面高度並非越低或越高能有最好的低阻力效果。
- (3) 排氣強弱：6級風力造成的阻力小於4級風力，2級風力僅能在白沙12cm高度時有效形成液體化作用，顯示要形成沙池液體化效果，風力越大越好，且應該有一臨界排氣力量。

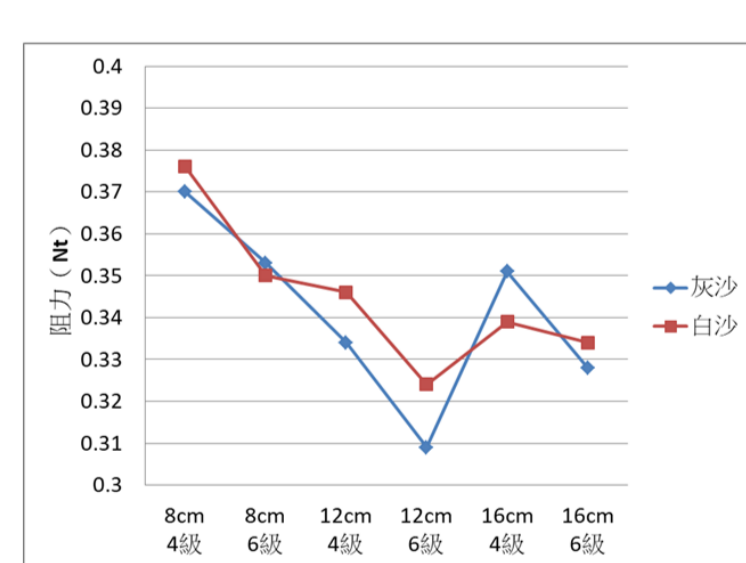


圖 5-3-1 顆粒種類對阻力影響折線圖

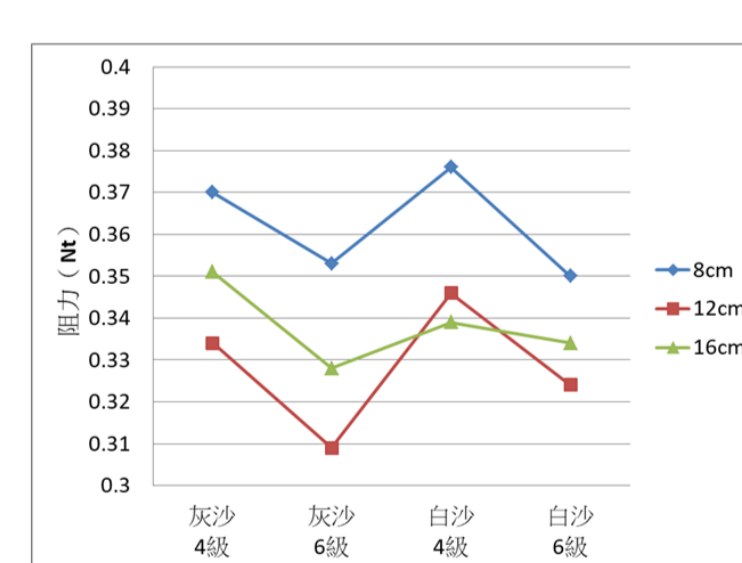


圖 5-3-2 沙面高度對阻力影響折線圖

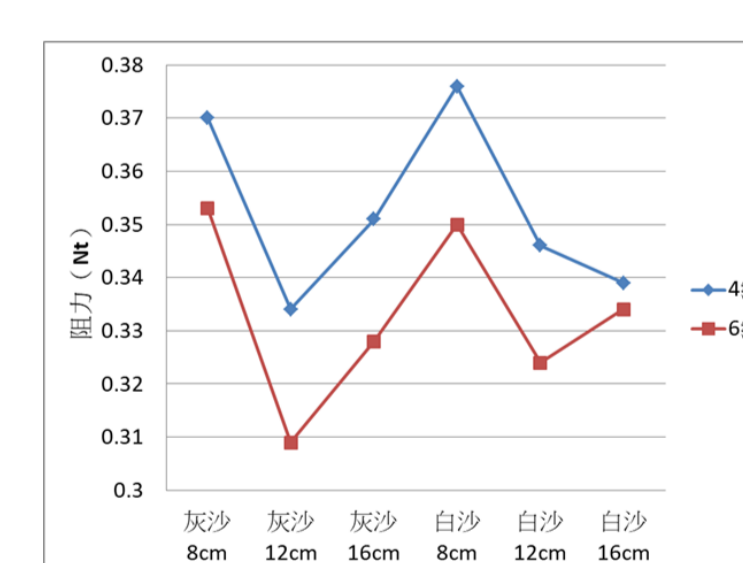


圖 5-3-3 排氣強弱對阻力影響折線圖

2. 各因素影響分析：

沙池對沉體所造成的浮力大小為49~63gw，與水（55gw）相似，大約差距10%左右，顯示沙池的浮力成因雖不相同，但效果卻相當類似。

- (1) 顆粒種類：顆粒種類對此實驗成功與否影響很大，顆粒較均勻的白沙較能讓重物完全沒入。
- (2) 沙面高度：8cm沙面高度的實驗僅有2組成功，代表沙面高度低較無液體化效果。12cm及16cm的實驗結果非常接近，對浮力大小影響不明顯。
- (3) 排氣強弱：2級排氣風力反而有較大浮力值，但多組實驗失敗，可能是液體化效果不佳，造成的固態顆粒支撐的偽浮力效果。4級風力的浮力效果稍比6級佳，但差異不大。

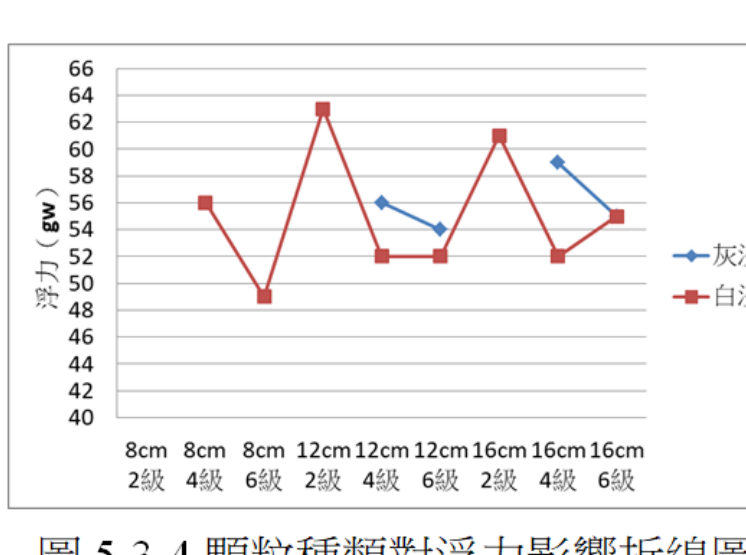


圖 5-3-4 顆粒種類對浮力影響折線圖

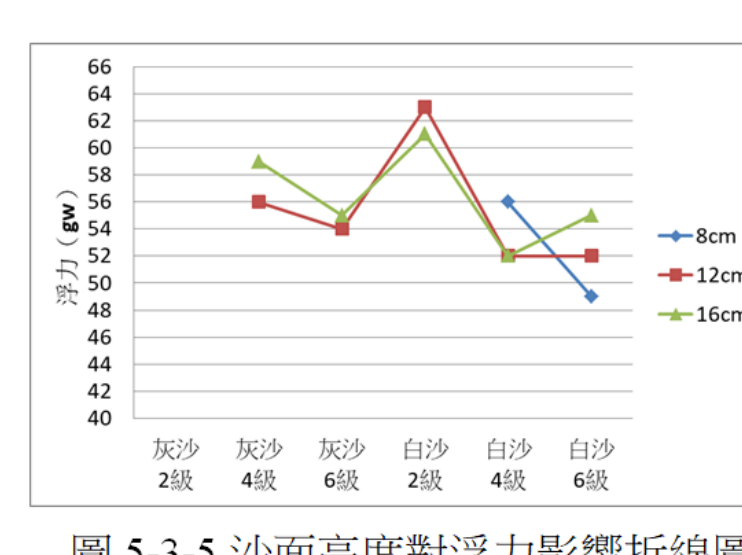


圖 5-3-5 沙面高度對浮力影響折線圖

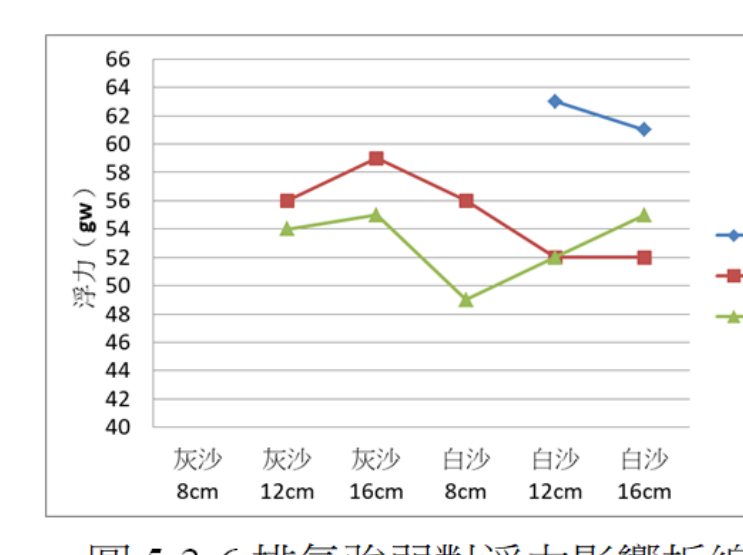


圖 5-3-6 排氣強弱對浮力影響折線圖

(三) 由密度實驗探討顆粒種類、沙面高度及排氣強弱對液體化影響：

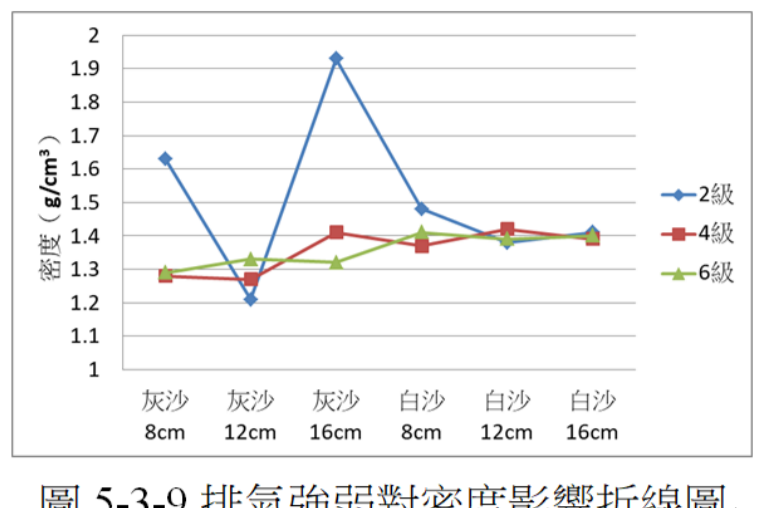
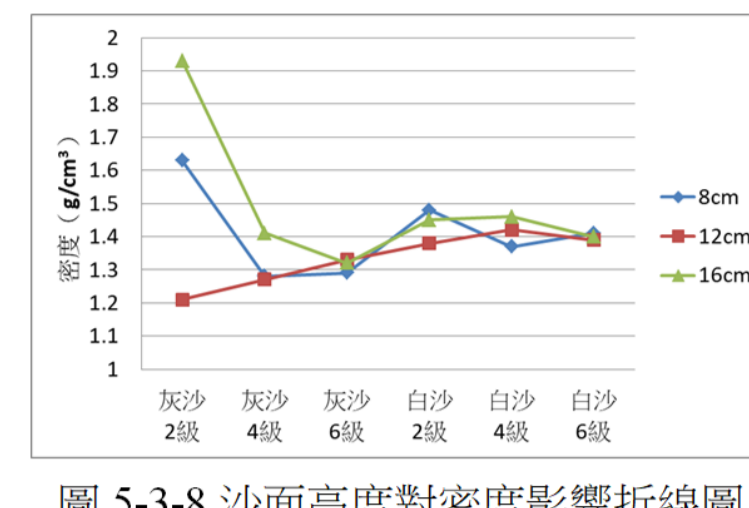
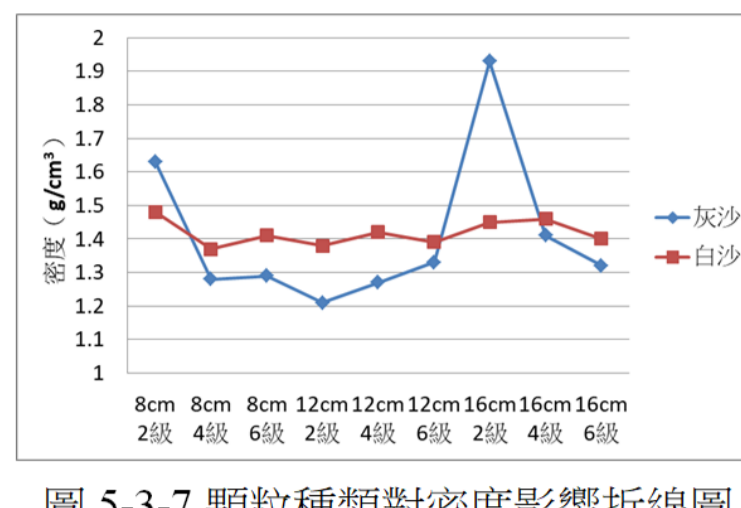
1. 實驗結果：

組別	沙種	高度 (cm)	風力 (級)	測量沒入體積					密度 (g/cm <sup>3</sup> )	比較對照組		
				第一次	第二次	第三次	第四次	第五次			平均	
A11	灰沙	8	2	270	260	240	260	250	256.0	1.63	163%	
A12	灰沙	8	4	335	325	345	350	345	340.0	1.28	128%	
A13	灰沙	8	6	335	325	340	345	345	338.0	1.29	129%	
A21	灰沙	12	2	360	365	365	360	365	363.0	1.21	121%	
A22	灰沙	12	4	315	345	345	350	360	343.0	1.27	127%	
A23	灰沙	12	6	330	320	335	340	305	326.0	1.33	133%	
A31	灰沙	16	2	205	225	235	195	185	209.0	1.93	193%	
A32	灰沙	16	4	315	320	305	290	290	304.0	1.41	141%	
A33	灰沙	16	6	320	330	335	335	330	330.0	1.32	132%	
B11	白沙	8	2	295	290	300	275	280	288.0	1.48	148%	
B12	白沙	8	4	315	305	315	325	315	315.0	1.37	137%	
B13	白沙	8	6	315	300	300	310	300	305.0	1.41	141%	
B21	白沙	12	2	315	335	300	315	295	312.0	1.38	138%	
B22	白沙	12	4	305	295	300	300	310	302.0	1.42	142%	
B23	白沙	12	6	310	300	325	305	310	310.0	1.39	139%	
B31	白沙	16	2	300	295	300	280	295	294.0	1.45	145%	
B32	白沙	16	4	300	275	300	295	295	293.0	1.46	146%	
B33	白沙	16	6	325	300	300	305	305	307.0	1.40	140%	
C11	貓沙	8	6	無法沒入					-	-	-	-

2. 各因素影響分析：

物體沒入體積全部小於在水中，代表沙池液體化的密度效果大於水，沙池的密度相當於 1.21 ~ 1.48g/cm<sup>3</sup> 間，大約是水的 1.2 ~ 1.5 倍。

- (1) 顆粒種類：白沙所形成的密度略大於灰沙，顯示均勻、較小的顆粒會形成較大的液化密度。
- (2) 沙面高度：不同沙面高度所造成的密度差異較小，且沒有明顯的規律，顯示沙面高度對於液化後密度的影響不大。
- (3) 排氣強弱：4 級與 6 級的排氣風力，造成的密度差異較小；2 級風力造成的結果差異很大，可能由於沙池未完全液體化，物體受到部分無液化效果的沙粒支撐。



四、排氣孔設置方式對沙池液體化程度影響的研究結果與討論：

(一) 由阻力實驗探討排氣孔設置方式對液體化影響：

1. 實驗結果：

組別	實驗項目	移動時間 (秒)					平均	阻力 (N)	比較對照組	
		第一次	第二次	第三次	第四次	第五次				
D1	孔距 (cm)	1.25	1.03	1.03	1.13	1.14	0.98	1.062	0.339	169%
D2		2.5	0.98	0.81	1.00	0.91	1.00	0.940	0.324	162%
D3		5	1.06	1.04	1.00	1.04	0.98	1.024	0.335	167%
E1	孔洞尺寸 (mm)	3	0.98	0.81	1.00	0.91	1.00	0.940	0.324	162%
E2		4.5	1.31	1.35	1.27	1.32	1.28	1.306	0.357	178%
E3		6	1.49	1.60	1.50	1.50	2.06	1.630	0.369	185%
F1	排列方式	對稱	0.98	0.81	1.00	0.91	1.00	0.940	0.324	162%
F2		交錯	0.96	0.91	0.90	0.96	0.90	0.926	0.322	161%

2. 各因素影響分析：

- (1) 孔距大小：三種孔距大小使排氣孔數差異 2-4 倍，結果卻差距不到 10%，顯示孔距對阻力影響較小。
- (2) 孔洞尺寸：孔洞直徑越大，會形成較大的阻力，3mm 孔洞效果較佳。
- (3) 排列方式：交錯的排氣孔排列方式，與對稱排列差異不到 1%，可視為不影響沙池阻力。

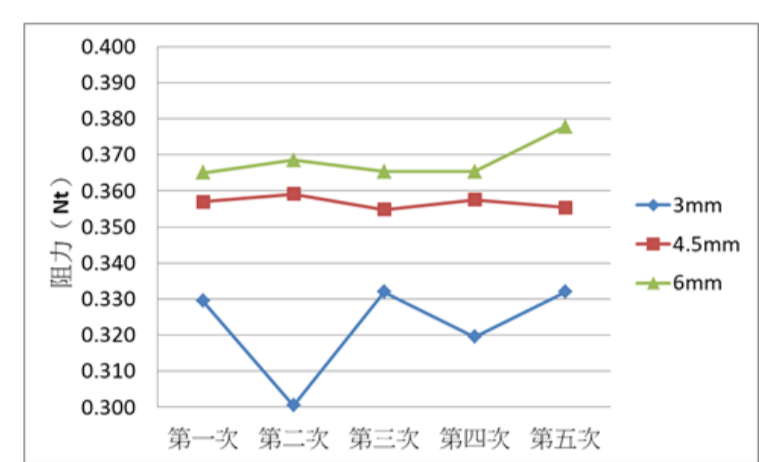


圖 5-4-1 孔洞尺寸對阻力影響折線圖。

(二) 由浮力實驗探討排氣孔設置方式對液體化影響：

1. 實驗結果：

組別	實驗項目	測量沉體物重					平均	浮力 (gw)	比較對照組	
		1 秒時	2 秒時	3 秒時	4 秒時	5 秒時				
D1	孔距 (cm)	1.25	150	150	155	155	155	153.0	47.0	85%
D2		2.5	155	150	155	140	140	148.0	52.0	95%
D3		5	155	145	140	150	150	148.0	52.0	95%
E1	孔洞尺寸 (mm)	3	155	150	155	140	140	148.0	52.0	95%
E2		4.5	150	145	140	140	145	144.0	56.0	102%
E3		6	155	140	130	150	145	144.0	56.0	102%
F1	排列方式	對稱	155	150	155	140	140	148.0	52.0	95%
F2		交錯	150	140	145	140	145	144.0	56.0	102%

2. 各因素影響分析：

- (1) 孔距大小：孔距 1.25cm 實驗結果較穩定，孔距較大，變化幅度也較大，可能與排氣氣流不穩定有關。
- (2) 孔洞尺寸：以折線圖觀察結果變化大，無法顯示孔洞尺寸與浮力有關。
- (3) 排列方式：交錯的排列方式，造成的浮力較大，平均值較對稱排列多了 4gw，但差異不到 10%。

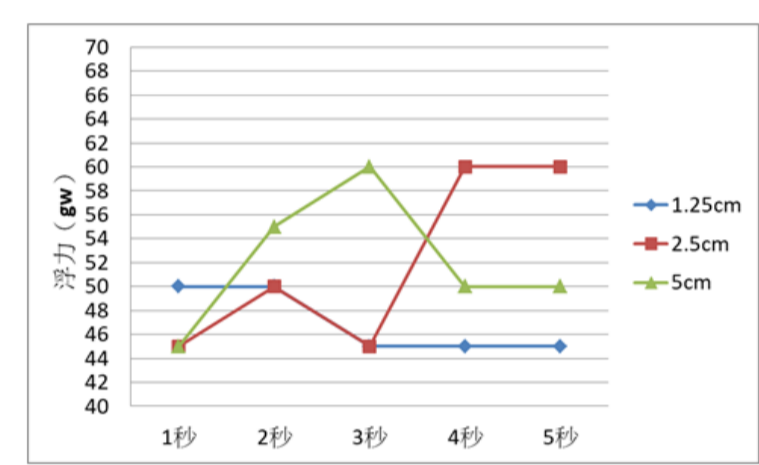


圖 5-4-2 孔距對浮力影響折線圖。

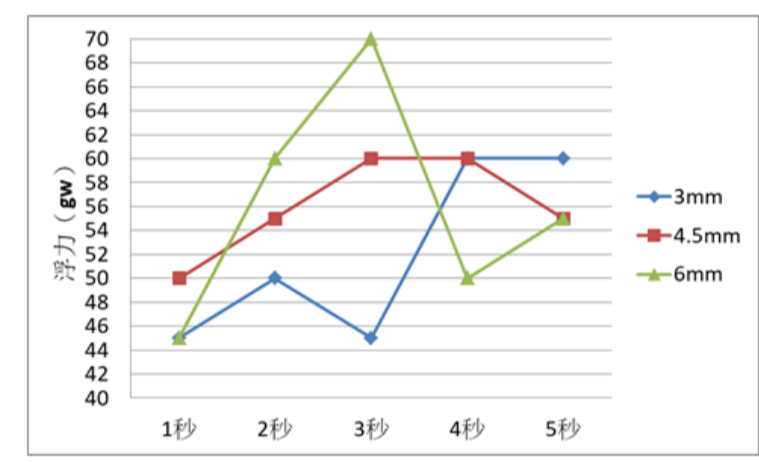


圖 5-4-3 孔洞尺寸對浮力影響折線圖。

(三) 由密度實驗探討排氣孔設置方式對液體化影響：

1. 實驗結果：

組別	實驗項目	測量沒入體積					平均	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	比較對照組	
		第一次	第二次	第三次	第四次	第五次				
D1	孔距 (cm)	1.25	355	300	290	300	295	308.0	1.40	140%
D2		2.5	310	300	325	305	310	310.0	1.39	139%
D3		5	290	300	295	300	300	297.0	1.44	144%
E1	孔洞尺寸 (mm)	3	310	300	325	305	310	310.0	1.39	139%
E2		4.5	245	305	295	320	320	297.0	1.44	144%
E3		6	310	330	320	335	325	324.0	1.34	134%
F1	排列方式	對稱	310	300	325	305	310	310.0	1.39	139%
F2		交錯	275	280	295	285	295	286.0	1.49	149%

2. 各因素影響分析：

- (1) 孔距大小：三種孔距造成的密度差異不超過 0.05g/cm<sup>3</sup>，約水的 1.4 倍。
- (2) 孔洞尺寸：4.5mm 造成的密度大於 6mm，但與 3mm 互有高低，顯示孔洞尺寸與密度並無明顯的關係。
- (3) 排列方式：交錯排列方式，造成的密度較大，平均值多了 0.1g/cm<sup>3</sup>。

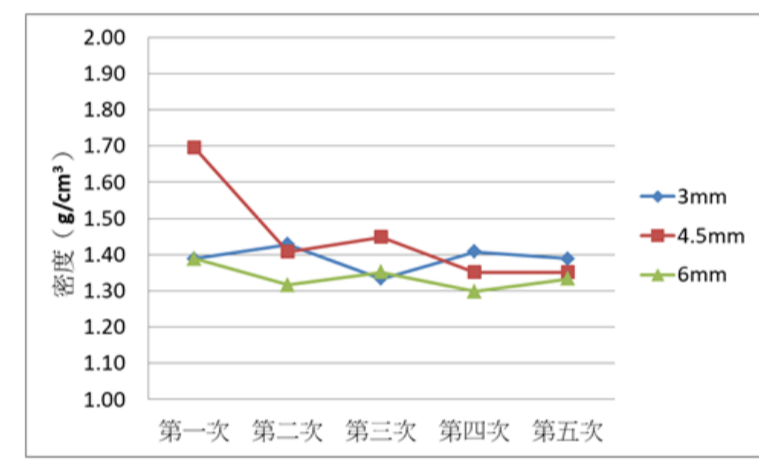


圖 5-4-4 孔洞尺寸對密度影響折線圖。

五、沙池裝置對運送固態顆粒應用的研究結果與討論

(一) 實驗結果：

組別	10 秒內傾瀉量 (cm <sup>3</sup> )			
	第一次	第二次	第三次	平均
對照組 關閉吹塵器	130	130	140	133.3
實驗組 開啟吹塵器	500	520	450	490.0



(二) 研究討論：

沙液體化後確實能大幅增加傾瀉速度，實驗組的傾瀉量將近對照組的 4 倍。若有運送或傾瀉固態顆粒的需求，運用類似沙池裝置的流化床原理，確實相當有幫助呢！

**各組實驗沙池液體化 (沙泡產生) 狀況**



↑ 排氣管設置方式對沙池液體化的影響

← 顆粒種類、沙面高度、排氣強弱對沙池液體化的影響

**研究結論**

- 一、以 PP 收納箱作為沙池箱體，硬水管作為排氣管，並利用吹塵器作為進器裝置，可設計出模擬沙池裝置。最佳設置方式為排氣孔向下倒置，使氣流向斜下方噴出；進氣管為單進雙出連接排氣管兩端，使進氣均勻。
- 二、利用「水」作為液體化標準，以下列三種方式定量測量出沙池的液體化程度：
  - (一) 測量 200 克物體受 40 克重拉力拉動 15cm 所需的時間，計算沙池中所受阻力。 $F_{\text{阻力}} = F_{\text{拉力}} - m_{\text{物體質量}} \times (2 \times S_{\text{物體移動距離}} \div t_{\text{移動時間}}^2)$
  - (二) 測量 200 克物體沉入沙池中的秤量重量，計算沙池中所受的浮力。 $F_{\text{沉體浮力}} = W_{\text{物體重量}} - F_{\text{秤量重量}}$
  - (三) 測量 500 克物體漂浮於沙池上所沒入的體積，計算沙池的密度。 $D_{\text{液體密度}} = W_{\text{物體重量}} \div V_{\text{沒入體積}}$
- 三、顆粒較大 (貓沙) 的沙池無法產生液體化效果，顆粒均勻 (白沙) 的沙池液體化性質較為穩定。
- 四、沙面高度對沙池阻力有明顯影響，並非正比或反比關係，而是在特定高度 (本實驗為 12cm) 能產生最好的低阻力效果。對浮力與密度則無明顯關係，但高度低不易使沙池內部液體化。
- 五、排氣風力越大，沙池阻力越低；對浮力與密度則無明顯關係。
- 六、排氣管孔洞尺寸越大，沙池阻力明顯增加、浮力稍微增加，其餘排氣孔設置方式對各項液體化程度影響較小。
- 七、可利用沙池表面沙泡的產生狀況，觀察沙池液體化程度：
  - (一) 第二排排氣管上方位置，不易產生沙泡及液體化狀況。
  - (二) 顆粒較小的白沙能產生比灰沙更明顯、更大的沙泡。
  - (三) 孔洞尺寸大會產生較少的沙泡，其他排氣孔設置方式影響較小。
- 八、本研究中以 3mm 孔洞尺寸、12cm 沙面高度，配合 6 級的最大排氣風力能得到最佳的沙池液體化效果。相較於水，沙池的阻力及密度約為 1.5 倍、浮力幾乎與水相同，能讓物體在沙池上游動或壓下浮起，可替代水池的休閒娛樂使用。
- 九、運用沙池裝置進行沙粒的傾瀉，傾瀉速度將近為直接傾瀉的 4 倍，可作為良好的固態顆粒運送或傾瀉應用。



**參考資料**

YOUTUBE 影片-Liquid Sand Hot Tub- Fluidized air bed。(無日期)。民 108 年 12 月 2 日。取自：<https://www.youtube.com/watch?v=My4RA5I0FKs>

神奇砂實驗。(無日期)。民 108 年 12 月 2 日。取自：<https://www.masters.tw/205394/fluidized-air-bed>

郭修伯、黃安婉 (民 104)。粉末登場：你是風兒我是沙 - 流體化床。科學發展，513，10-15。