

中華民國第 65 屆中小學科學展覽會

作品說明書

國小組 物理科

探究精神獎

080122

飛砂走石-探討石英砂在不同條件下可承受的最大重量

學校名稱： 新北市永和區秀朗國民小學

| | |
|--------|-------|
| 作者： | 指導老師： |
| 小四 張菀庭 | 徐玉珊 |
| 小四 王芷寧 | 賴瑾萱 |

關鍵詞： 石英砂、可承受重量、表面張力

作品名稱：飛砂走石-探討石英砂在不同條件下可承受的最大重量

摘要

本研究探討砂子在不同條件下分別可承受的最大重量。經過簡單試驗後，就材料取得的合法性、便利性、穩定性等考量，我們選擇用市售不同粗細的石英砂（細砂9V、中砂5V及粗砂2V）作為實驗的材料。在實驗中，我們用不同粗細的石英砂，加入不同水量，均勻混合並分別定型後，經由自製裝置固定後在砂子上逐漸增加所施加的重量，探討砂子至崩塌前所能承受的最大重量。藉由實驗我們觀察不同粒徑的砂子在加入不同水量下可承受最大重量的變化，分析這些因素對於砂柱可承受最大重量的影響。此外，我們利用熱風乾燥法，證實砂柱在水分含量降低下，會破壞結構穩定性，導致砂柱的承重力降低。最後用自製設備利用重量法來探討液體表面張力對於砂粒的結構之影響。

壹、前言

一、研究動機

每到夏日，爸爸媽媽通常會帶我們公園或海灘玩砂，並柱成不同造型的城堡或城牆，此時，我們發現若只用乾燥的砂子，常常無法順利成型，若添加一些水後，濕濕的砂子往往比較容易定型、堆起，然而水份太少，無法塑形；過多卻又會導致水分流出、砂子太重而崩塌，這個現象讓我們好奇砂子是否有最佳含水量。另外，不同砂岸的砂子往往隨著當地地理條件以及內、外營力作用程度的不同而導致其種類、顆粒大小不一，因此，我們也想同時試驗不同粗細的砂子在一定的含水量情況下所能負荷的重量是否存在差異性。

二、文獻回顧

依據中山大學李賢華教授在聯合報的訪談表示，美麗砂雕成形，關鍵在表面張力，砂子加水才有凝聚力。依據維基百科的定義，表面張力（英語：*Surface Tension*）在物理上的狹義的定義是指液體試圖獲得最小表面位能的傾向；廣義地說，所有兩種不同物態的物質之間界面上的張力被稱為表面張力。表面張力最常見的例子發生在液體與其他物質的接觸面。以水為例，水的表面張力來自於由凡得瓦力所造成的內聚力。

另依據教育百科的定義，分子是因為互相吸引而凝聚成液體，在液體中的分子四面八方都受到吸引力，也因每個方向的受力都相等，平衡合力為零。液體的表面有表面張力，所以

當我們用一環浸在液體中，在提到表面以上時，液體的表面積增加，就需要作功，這個功也就是需要用力去提起金屬環。但若在表面上的分子並不平衡，就會合成一種往下拉的合力，換句話說，如果表面位能較高，超過的單位面積就稱為表面張力。

三、研究目的

- (一) 探討砂柱在不同含水量下可承受最大重量的變化
- (二) 探討不同粒徑之砂子在固定含水量下可承受最大重量的差異
- (三) 探討塑形砂柱利用熱風乾燥的承重試驗
- (四) 藉由試驗探討液體表面張力對於砂粒的結構之影響

貳、研究設備及器材

一、研究器材與材料

| | | | | | |
|-----|-------|------|------|-------|------------|
| 電子秤 | 量筒 | 玻璃燒杯 | 量杯 | 攪拌棒 | 自製壓克力塑形用模具 |
| 紙筒 | 塑膠盆 | 塑膠湯匙 | 塑膠盤 | 寶特瓶 | 石英砂 |
| 純水 | 自製給水器 | 石英砂 | 平整石材 | 低溫烘烤箱 | Excel 軟體 |

二、研究設備

| 材料及設備 | 做法與目的 |
|--|--|
|  <ul style="list-style-type: none">● 實驗一：自製實驗裝置以測量砂柱承重力。 | <p>(一) 作法：</p> <ol style="list-style-type: none">1. 於電子秤上秤得100公克重石英砂，實驗一，我們以裁切後的塑膠飲料瓶塑型後，隔著一層壓克力板用放上一個裝水的塑膠瓶進行施力，並且逐漸增加水重直至觀測到砂柱出現坍塌情形。2. 但由於塑膠飲料瓶塑型的砂柱很容易因為飲料瓶不平整的地方造成實驗砂柱的耗損，也不利計算固定體積，所以我們以壓克力為材料自製圓筒型塑型模具，以標準化每一個試驗用的砂柱，進行實驗二。 <p>(二) 目的：</p> <ol style="list-style-type: none">1. 將砂柱成圓柱狀則有一平面方便施力，且不會有脆弱稜角。2. 用壓克力板墊著有助於砂柱平均受力。3. 以自製給水器，以穩定水流速增加砂柱荷重可漸進地觀察砂柱崩解情況，得到較準確的數值。 |
|  <ul style="list-style-type: none">● 實驗二：改良標準化砂柱製作設備。 | |



自製塑形用模具



自製給水器



壓克力板（架）



玻璃燒杯



烤箱



電子秤



平整石材

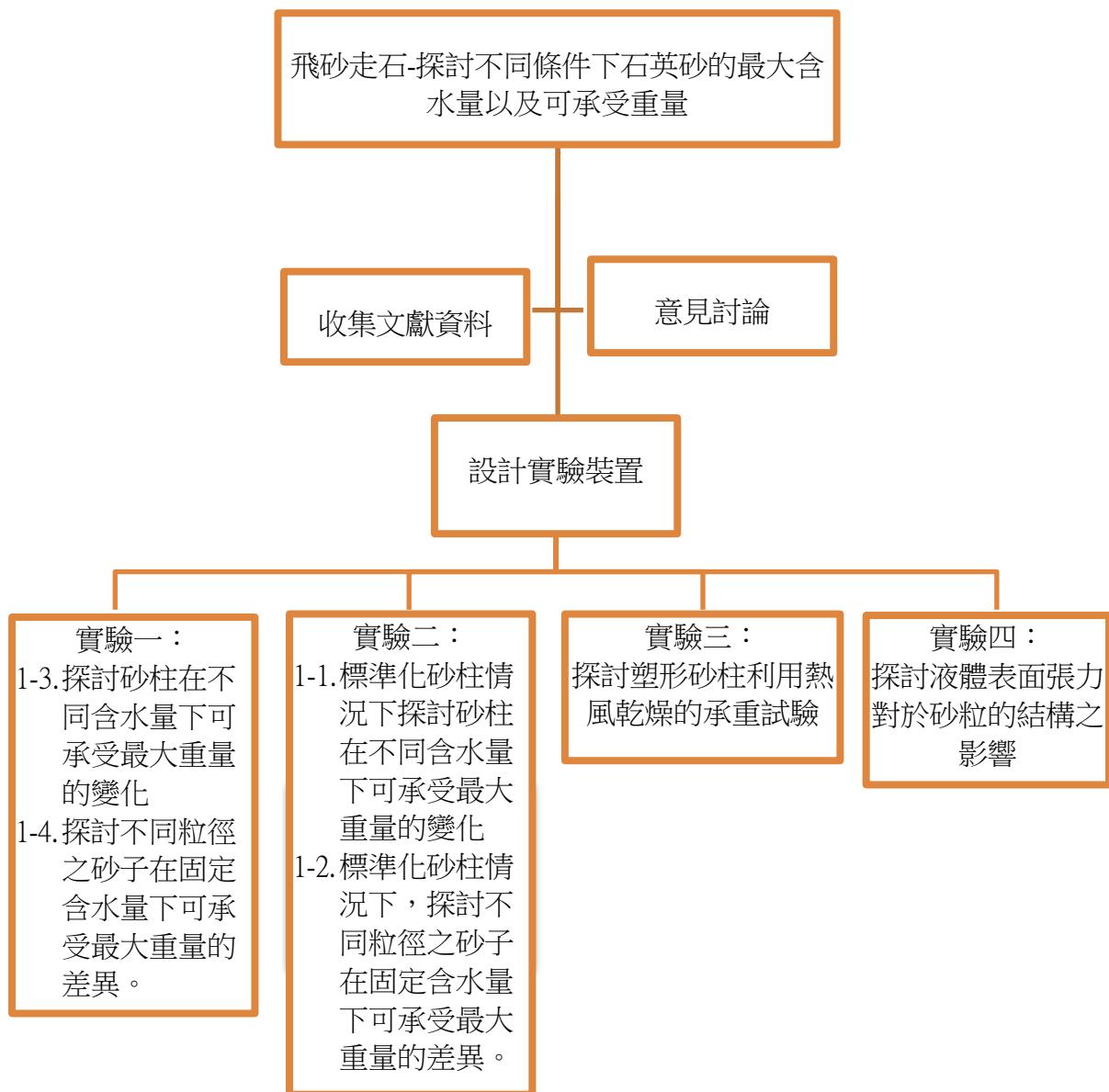


不同粒徑石英砂

圖1、本實驗使用的研究器材與材料 (照片來源：本研究者拍攝)

參、 研究過程與方法

一、研究架構



二、實驗裝置的發想與設計

我們決定模擬並簡化柱砂堡的情形，固定使用100公克的石英砂，混合純水後裝入塑膠飲料瓶中塑形。另外，由於純水比重固定，我們決定用重量法觀察砂柱最大可承受重量，再放上另一塊壓克力板，確保砂柱平均受力，圖2為實驗流程之圖示，但由於使用塑膠飲料瓶作為砂柱塑形工具，不平整的容器，容易造成脫模時砂柱的耗損，因輕微敲打使砂柱脫膜也容易造成砂柱結構的破壞，所以我們在實驗二改良了標準化砂柱製造器以及將相關器材皆給予標準化，例如原本我們是以量杯將水直接倒入寶特瓶中，再秤水的重量，但考量到這樣的方式或許會因為倒入水流速的快慢，造成砂柱崩塌的變因，所以購入自動給水器，水加入容器中的

流速得以固定。此外，我們在電子秤上放置放上具有向上的4支腳柱的壓克力架，再將圓柱體砂柱放在壓克力架的定位點上，蓋上透明壓克力板後，放上玻璃燒杯，並加入純水，搭配上肉眼觀察砂柱崩塌的情形，則可在砂柱崩塌程度類似時獲得標準相對一致的「砂柱最大可承受重量」數值。。

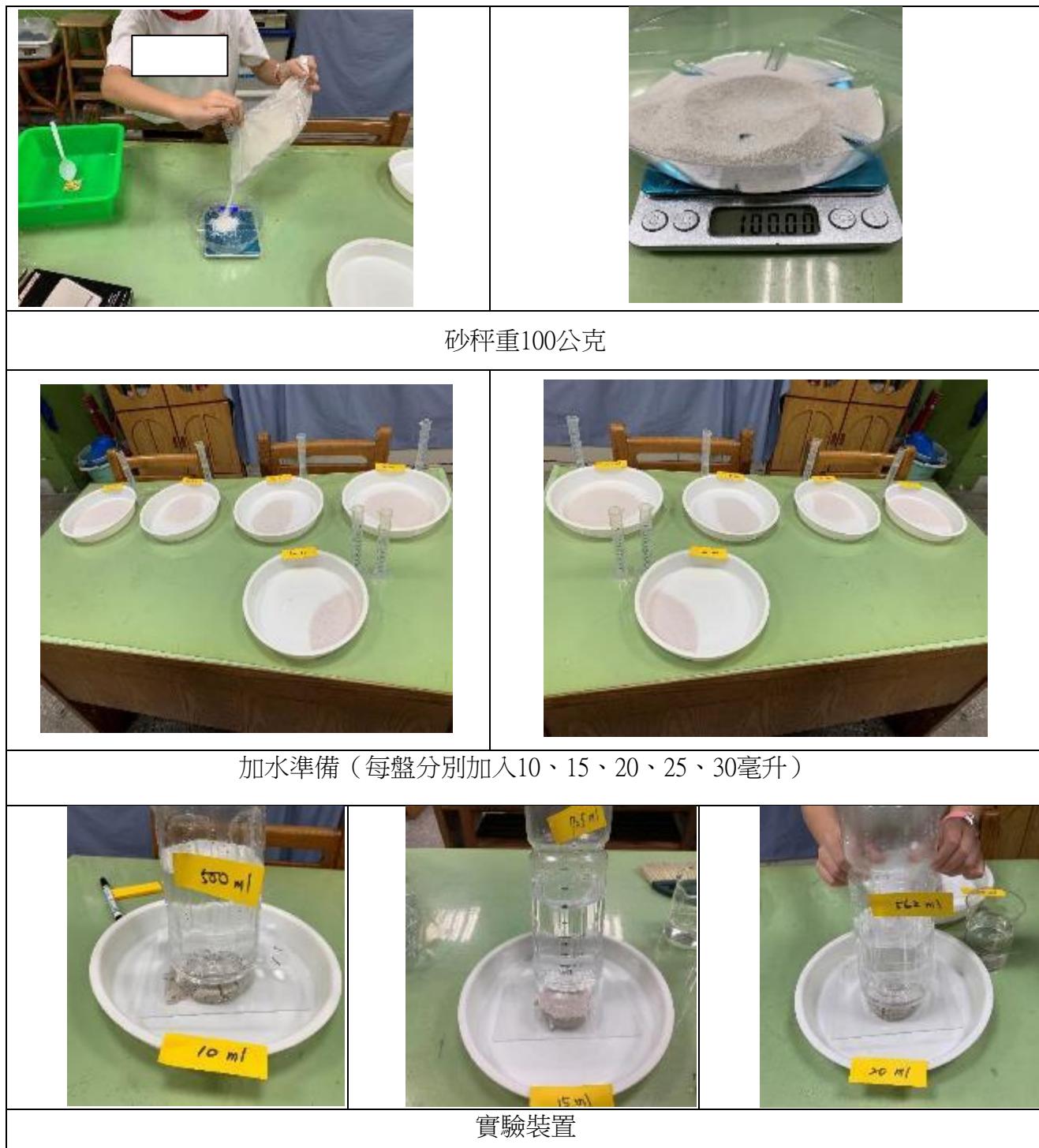
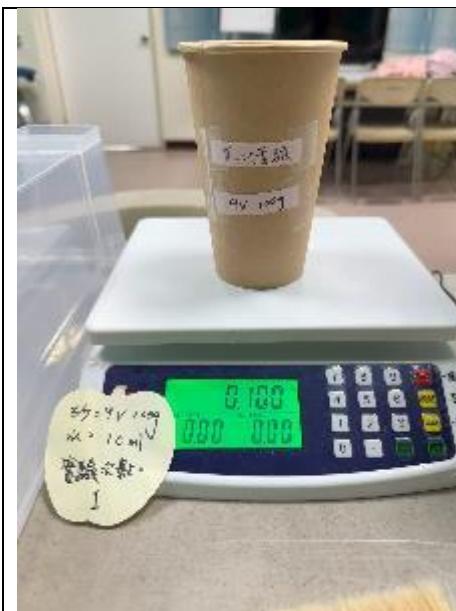


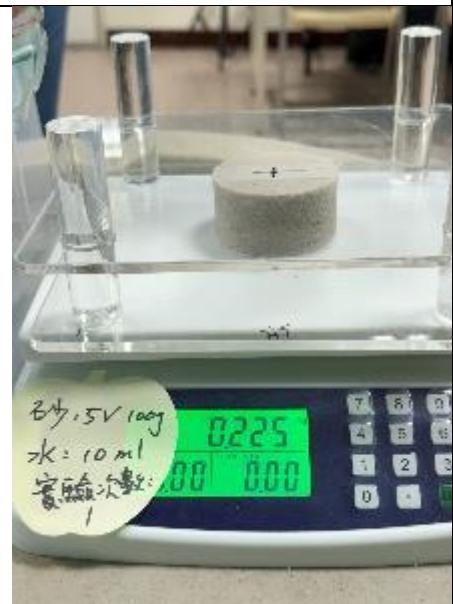
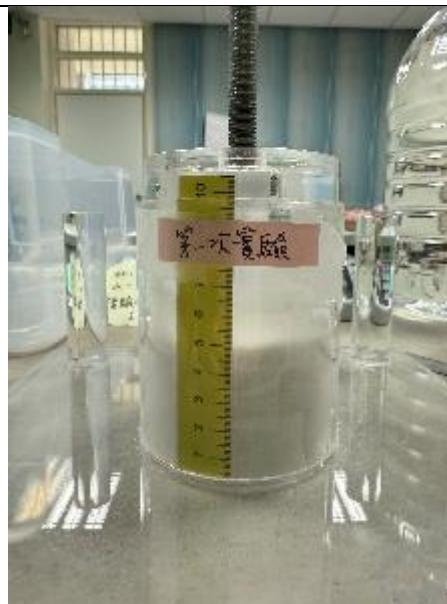
圖2、砂柱承重力的試驗設備與流程 (照片來源：本研究者拍攝)



1. 砂秤重100公克

2.水秤重（不同組水量不同）

3.混砂



4.自製模具塑形

5.壓塑後脫模

6.電子秤放上壓克力架，再將圓柱體砂放在壓克力板（架）上，再放上另一塊壓克力板

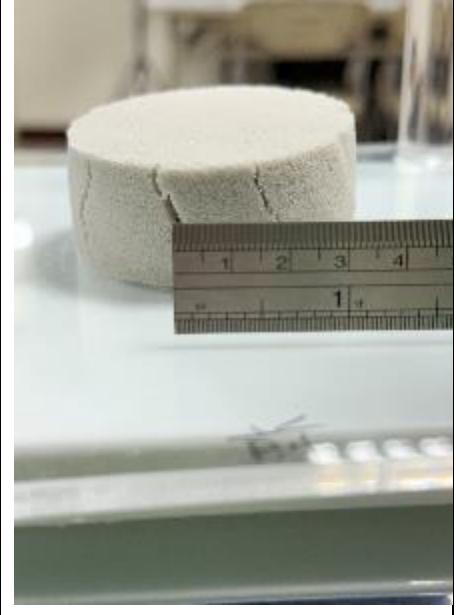
| | | |
|---|--|---|
|  |  |  |
| <p>7. 將玻璃燒杯放在壓克力板上，由於電子秤上方的壓克力架有4支向上腳柱，可防止玻璃燒杯因圓柱體砂崩落而掉下造成損壞。</p> | <p>8. 利用自製給水器在玻璃燒杯加入水。</p> | <p>9. 持續加入水，以肉眼觀察圓柱體砂崩塌情形，直至崩塌時，停止給水，記錄電子秤所顯示的重量數據，作為「砂柱最大可承受重量」。</p> |
|  |  | |
| <p>10. 圓柱體砂崩解後，移除玻璃燒杯及壓克力板，觀察砂柱裂紋。</p> | <p>11. 測量砂柱最大裂紋寬度。</p> | |

圖3、改良實驗設備後，標準化砂柱承重力的試驗設備與流程(照片來源：本研究者拍攝)

在實驗用砂子的選擇上，我們原先想用不同孔隙的篩網自行篩出不同粒徑的砂子，不過後來實際採買材料時發現市面上的石英砂已分為三種粒徑販售，因此直接採用市面上的三種石英砂進行實驗。

2V (粗砂)，粒徑 : 0.60~1.18mm (16-21目)

5V (中砂)，粒徑 : 0.15~0.30mm (45-57目)

9V (細砂)，粒徑 : 0.053~0.30mm (80-95 目)

在將石英砂塑型的模具選擇上，我們首先用方形牛奶瓶試做模具，但底層面積太大，高度相對太低不易定型與觀察，因此後來作罷。在那之後，我們又收集了3種捲筒型廚房紙巾中間的紙筒，裁切成適合的高度（以100公克石英砂能方便塑形為主）幫助塑形。然而因為收集到的紙捲與所使用的石英砂的摩擦力太大，導致容易沾黏，且硬度又不夠而脫模不易。此外，在較為經濟的情況下，我們選擇以塑膠瓶來設計模具，發現某廠牌小瓶優酪乳的飲料瓶不論在材質、直徑的選擇上都較為合適，因此決定採用，並根據實驗用石英砂的體積裁切成約4.5公分高的模具進行了實驗一。但發現，不平整的容器，容易造成脫模時砂柱的耗損，因輕微敲打使砂柱脫膜也容易造成砂柱結構的破壞，我們為了避免誤差太大導致實驗失去準確度，因此，我們決定自行改造石英砂塑型的模具，改採壓克力來製作實驗設備，以降低實驗中的誤差情況。

三、實驗一之1：探討砂柱在不同含水量下可承受最大重量的變化

我們將2V、5V、9V 的石英砂各自秤重100公克，並且分別加入10毫升、15毫升、20毫升、25毫升、30毫升的純水，在塑膠盤中以塑膠瓶塑型後放上壓克力板和寶特瓶後進行實驗，觀察塑形狀況以及測量砂柱崩塌時所加入的純水體積，製作表格紀錄，並繪製成折線圖觀察。

四、實驗一之2：探討不同粒徑之沙子在固定含水量下可承受最大重量的差異

我們將實驗一的實驗紀錄繪製成長條圖比較不同粒徑的沙子在相同的含水量下進行實驗後所測得的數據，試分析其差同。

五、實驗二之1：標準化砂柱情況下，探討砂柱在不同含水量下可承受最大重量的變化

我們將細砂（粒徑為9V）的石英砂秤重100公克，並且分別加入10毫升、20毫升、25毫升、30毫升的純水，混合溶液後借助自製模具塑形成穩定且可平均受力的圓柱體後進行實驗，觀察塑形狀況以及測量砂柱崩塌時所加入的純水體積，製作表格紀錄，並繪製成折線圖觀察。

我們將實驗二之1的實驗紀錄繪製成長條圖比較不同粒徑的沙子在相同的含水量下進行實驗後所測得的數據，試分析其差同。

六、實驗二之2：標準化砂柱情況下，探討不同粒徑之砂子在固定含水量下可承受最大重量的差異

為探討不同粒徑之砂子在固定加水量下，所承受的最大重量是否不同，我們延續實驗二之1的結果，另外加入中砂（粒徑為5V）及粗砂（粒徑為2V），各自秤重100公克，並且分別加入10毫升、20毫升、25毫升、30毫升的純水，混合溶液後借助自製模具塑形成穩定且可平均受力的圓柱體後進行實驗，觀察塑形狀況以及測量砂柱崩塌時所加入的純水體積，製作表格紀錄，並繪製成折線圖觀察。

七、實驗三：探討塑形砂柱利用熱風乾燥的承重試驗

由實驗一及實驗二的結果，找到承重力最佳組合，採用細砂（粒徑為9V）的石英砂秤重100公克，加入20毫升純水的組別，混合溶液後借助自製模具塑形成穩定且可平均受力的圓柱體後進行實驗，將圓柱體砂放在壓克力板（架）上，再放上另一塊壓克力板，上方以燒杯加入銅板（總共3000公克）重壓，整體放入烤箱，溫度設定90°C，利用熱風乾燥的方法，觀察砂柱水分蒸發後，是否能夠繼續承重（圖3）。



圖3、利用烘箱的熱風乾燥探討塑形砂柱是否可持續承重 (照片來源：本研究者拍攝)

八、實驗四：探討液體表面張力對於砂粒的結構之影響

我們參考網路的資料（表面張力實驗器）後，發現液體表面張力可採用可移動張力測定系統計算，但我們沒有這樣的設備，故自行找尋可用的儀器與道具來設計證實表面張力存在

的方法。我們自行設計一個帶有捲線設計的自製支架，可上下懸吊物品，而選用的物品採用與石英砂相近的石材（礦物盒取得，該石材表面為平整狀態，長與寬均為2.7公分，高為0.9公分），石材綁線後裝置在捲線器上，可上下捲動。我們再將自製支架置放在裝水的燒杯正上方，而燒杯放在電子秤上，可量測重量。自製支架不會碰觸燒杯與電子秤，自製設備如圖4及圖5。試驗前，我們先記錄燒杯和水的重量；接者，將綁線後的石材完全浸入水中，記錄燒杯、水及石材的整體重量；試驗啟動後，我們透過捲線器慢慢將石材從水中拉起，當石材拉出水面時，動態記錄整體的重量變化（記錄4個時段的重量）；最後，當石材完全脫離水面後，我們再記錄燒杯和水的重量。實驗三所有過程，進行3重複試驗。

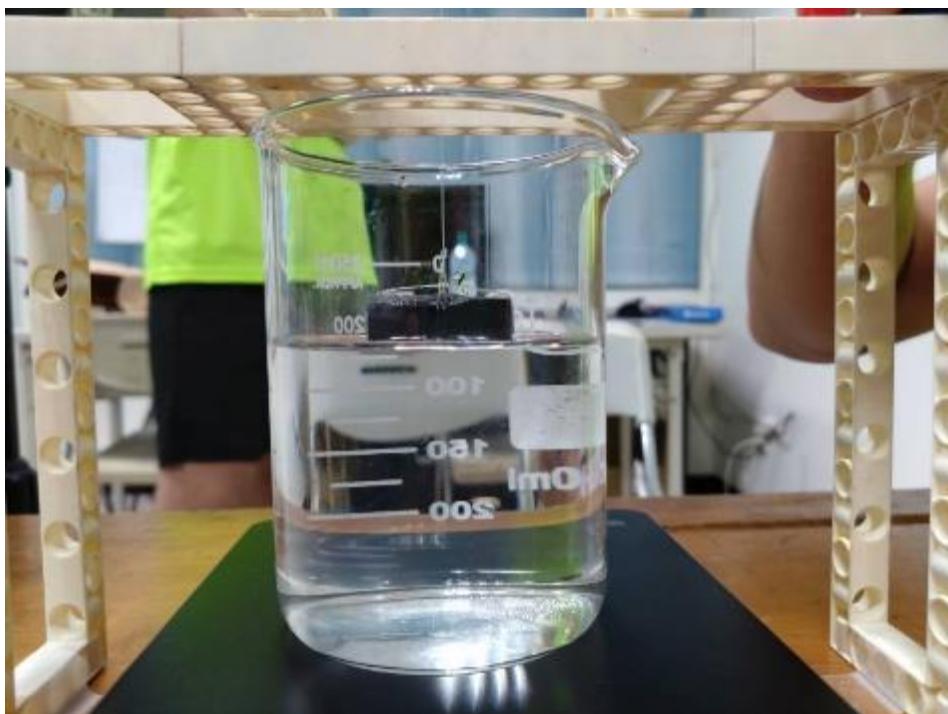


圖4、自行製作證實表面張力的存在的設備 (照片來源：本研究者拍攝)



圖5、表面張力試驗懸吊用的石材(照片來源：本研究者拍攝)

肆、研究結果

一、實驗一之1：探討砂柱在不同含水量下可承受最大重量的變化

我們將實驗結果整理為表格如下

表1、細砂 (9V) 砂柱在不同含水量下可承受最大重量 (公克)

| 9V 石英砂100克，空瓶46.7克， (塑型物:直徑5.5公分，高約3-3.5公分) | | | | | |
|---|-------|-----|-----|---------|----------|
| 加水量 (毫升) | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 |
| 塑型狀況 | 可，偏鬆散 | 可 | 可 | 可，濕高度下降 | 尚可，輕壓水滲出 |
| 可負荷水量 (毫升) | 422 | 640 | 720 | 1720 | 1060 |

表2、細砂 (5V) 砂柱在不同含水量下可承受最大重量 (公克)

| 5V 石英砂100克，空瓶46.7克， (直徑4.5公分，高4公分) | | | | | |
|------------------------------------|-----|-----|-----|----------|----------|
| 加水量 (毫升) | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 |
| 塑型狀況 | 可 | 可 | 可 | 可，但底盤有水珠 | 有水溢出無法塑型 |
| 可負荷水量 (毫升) | 200 | 245 | 260 | 400 | X |

表3、細砂 (2V) 砂柱在不同含水量下可承受最大重量 (公克)

| 2V 石英砂100克，空瓶46.7克， (直徑4.5公分，高4公分) | | | | | |
|------------------------------------|--------------------------|----|----|----|----|
| 加水量 (毫升) | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 |
| 塑型狀況 | 可 | 可 | 可 | 可 | 可 |
| 可負荷水量 (毫升) | X | X | X | X | X |
| 備註 | 砂柱支撐力不夠，空瓶放上去(46.7公克)就倒了 | | | | |

二、實驗一之1：探討不同粒徑之沙子在固定含水量下可承受最大重量

我們將實驗結果整理為表格如下：

表4、不同粒徑之沙子在固定含水量下可承受最大重量（公克）

| 純水體積(ml) | 可承受最大重量（公克） | | |
|----------|-------------|-------|--------|
| | 粗砂2V | 中砂5V | 細沙9V |
| 10 | <46.7 | 246.7 | 468.7 |
| 15 | <46.7 | 291.7 | 686.7 |
| 20 | <46.7 | 306.7 | 766.7 |
| 25 | <46.7 | 446.7 | 1766.7 |
| 30 | <46.7 | X | 1106.7 |

三、實驗二之1：標準化砂柱下，探討不同含水量下可承受最大重量的變化

我們利用細砂（9V，粒徑：0.053~0.30mm，80-95目）探討砂柱在不同加水量下可承受最大重量的變化，將實驗結果整理為表1及圖6、圖7。

表5、標準化細砂（9V）砂柱在不同含水量下可承受最大重量（公克）

| 9V 石英砂 | 第一次重複 | 第二次重複 | 第三次重複 | 平均值 |
|--------|-------|-------|-------|--------|
| 10ml | 3742 | 3757 | 4199 | 3899.3 |
| 20ml | 5345 | 4702 | 5877 | 5308.0 |
| 25ml | 5277 | 4828 | 4028 | 4711.0 |
| 30ml | 塑形失敗 | 塑形失敗 | 塑形失敗 | - |

註1：可承受最大重量（公克） = 水量 + 壓克力板（架）（固定為225克） + 燒杯（固定為1170克）。

註2：9V 石英砂，加水30毫升因為執行三次後，都有水溢出，且脫模失敗，無法塑形，故加入加水25毫升的組別（圖6）。





| | | |
|----------------------|--------------------|-------------------------|
| 9V 石英砂，加水30毫升，造成水分流出 | 9V 石英砂，加水30毫升，嘗試脫模 | 9V 石英砂，加水30毫升，脫模失敗，無法塑形 |
|----------------------|--------------------|-------------------------|

圖6、加水超過塑形極限，造成脫模失敗的狀態。





| | | |
|---------------|-----------------------------------|--------------------------------|
| 9V 石英砂，加水10毫升 | 9V 石英砂，加水20毫升，塑形後表面完整，觸碰不崩塌，柱體扎實。 | 9V 石英砂，加水25毫升，塑形後觸碰不崩塌，看起來較鬆綿。 |
|---------------|-----------------------------------|--------------------------------|

圖7、9V 石英砂加水10毫升、20毫升、25毫升後塑形的圓柱體外觀圖
(照片來源：本研究者拍攝)

二、 實驗二之2：標準化砂柱下，探討不同粒徑之砂子在固定含水量下可承受最大重量的差異

延續實驗二之1的結果，另外加入中砂（粒徑為5V）及粗砂（粒徑為2V），探討不同粒徑之砂子在固定含水量下可承受最大重量的差異，我們將中砂及粗砂實驗結果整理為表2及表3。

表6、標準化砂柱下中砂（5V）砂柱在不同含水量下可承受最大重量（公克）

| 5V 石英砂 | 第一次重複 | 第二次重複 | 第三次重複 | 平均值 |
|--------|-------|-------|-------|--------|
| 10ml | 225 | 225 | 225 | 225.0 |
| 20ml | 3497 | 3688 | 3448 | 3544.3 |
| 25ml | 塑形失敗 | 塑形失敗 | 塑形失敗 | - |
| 30ml | 塑形失敗 | 塑形失敗 | 塑形失敗 | - |

註1：5V 石英砂，加水10毫升可承受最大重量（公克）僅為壓克力板（架）（固定為225克），若把燒杯放上（固定為1170克），則砂柱圓柱體直接崩塌，無法承受更大重力。

註2：5V 石英砂，加水30毫升無法塑形。

表7、標準化砂柱下，粗砂（2V）砂柱在不同含水量下可承受最大重量（公克）

| 2V 石英砂 | 第一次重複 | 第二次重複 | 第三次重複 | 平均值 |
|--------|-------|-------|-------|-------|
| 10ml | 225 | 225 | 225 | 225.0 |
| 20ml | 225 | 225 | 225 | 225.0 |
| 25ml | 塑形失敗 | 塑形失敗 | 塑形失敗 | - |
| 30ml | 塑形失敗 | 塑形失敗 | 塑形失敗 | - |

註1：2V 石英砂，加水10毫升及加水20毫升的組別可承受最大重量（公克）僅為壓克力板（架）（固定為225克），若把燒杯放上（固定為1170克），則砂柱圓柱體直接崩塌，無法承受更大重力。

註2：2V 石英砂，加水25毫升及加水30毫升的組別均無法塑形。

三、實驗三：探討塑形砂柱利用熱風乾燥的承重試驗

利用烘箱的熱風乾燥探討塑形砂柱是否可持續承重，選用細砂（粒徑為9V）與中砂（粒徑為5V）加入20毫升純水的組別塑形成圓柱體砂柱，利用90°C熱風乾燥後，每15分鐘記錄重量變化與圓柱體砂柱是否保持完整狀態。我們將實驗結果整理如圖片，我們可觀察熱風乾燥後，圓柱體砂柱的重量隨時間慢慢減少，代表砂柱的水分被熱風帶走，因而水分含量持續降低，降低至一定程度時，圓柱體砂柱便因重物壓力（9V砂柱負重為3000公克、5V砂柱負重2000公克）而發生崩塌現象。

| | | | |
|---|---|--|---|
|  |  |  |  |
| 烘乾前，連同壓克力板 總重343.2公克。 | 烘乾15分後，連同壓克 力板總重342.0公克。 | 烘乾30分後，連同壓克 力板總重339.4公克。 | 烘乾45分後，連同壓克 力板總重336.7公克。 |

圖8、細砂（粒徑為9V）加入20毫升的純水塑形後，熱風乾燥的承重試驗

（照片來源：本研究者拍攝）

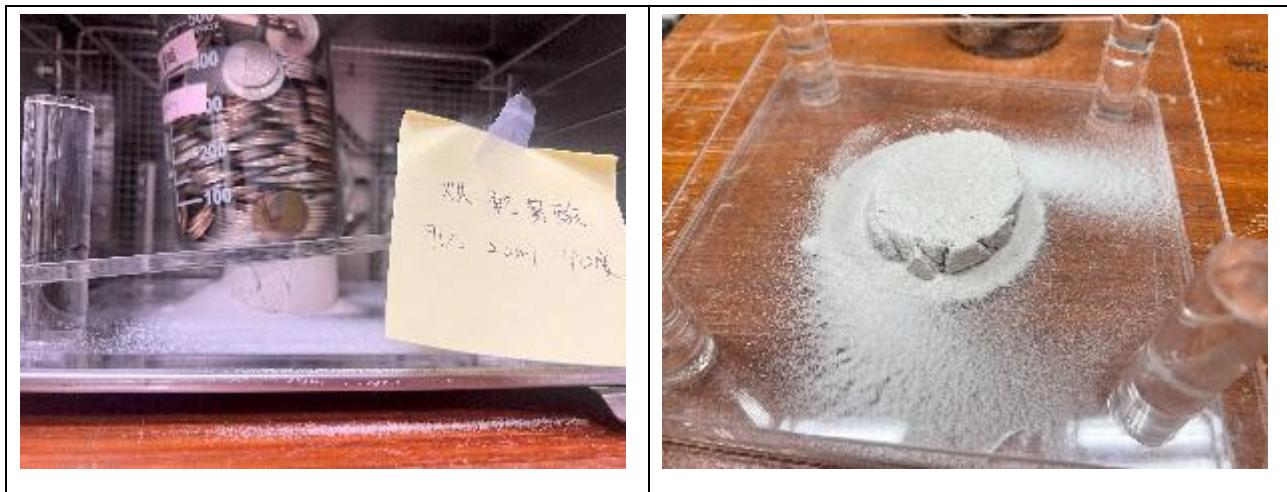


圖9、熱風乾燥的承重試驗，圓柱體砂柱在熱風乾燥1小時19分開始崩落，1小時30分完全

崩塌（照片來源：本研究者拍攝）

表8、9V與5V加入20毫升純水塑形後，砂柱熱風乾燥所需時間實驗記錄

| 粒徑 | 熱風乾燥(90 度)崩塌所需時間 |
|---------------------|------------------|
| ① 9V (受重 3000 克) | 1 小時 30 分 |
| ② 5V (受重 2000 克) | 1 小時 35 分 |

四、實驗四：探討液體表面張力對於砂粒的結構之影響

我們採用自製設備利用重量法來偵測表面張力的存在，實驗數據如表4。當石材未浸入燒杯中的水時，水加燒杯的平均重量為326.1克；透過捲線器慢慢將石材放入水中後，水、燒杯及石材的平均重量為333.5克；透過捲線器慢慢將石材拉出水面時，發現電子秤所測量的重量會發生動態性變化，記錄4個時段，平均值從328.1克、326.2克、325.2克至324.2克，重量會隨著捲線器將石材拉出水面而變輕；最後當石材已完全脫離水面後，水加燒杯的平均重量回到326.2克。

表9、石材與液體表面張力實驗記錄

(單位：克)

| | 第一次重複 | 第二次重複 | 第三次重複 | 平均值 |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|
| ③ 水+燒杯（石材未浸入） | 326 | 326.2 | 326.2 | 326.1 |
| ②水+燒杯+石材 | 333.1 | 333.9 | 333.6 | 333.5 |
| ③石材拉出水面，但尚未離開水面 1 | 328.1 | 327.9 | 328.3 | 328.1 |
| ④石材拉出水面，但尚未離開水面 2 | 326.3 | 326.2 | 326.2 | 326.2 |
| ⑤石材拉出水面，但尚未離開水面 3 | 325.3 | 324.8 | 325.6 | 325.2 |
| ⑥石材拉出水面，但尚未離開水面 4 | 324.3 | 324 | 324.4 | 324.2 |
| ⑦水+燒杯（石材已完全脫離水面） | 326.2 | 326.2 | 326.2 | 326.2 |

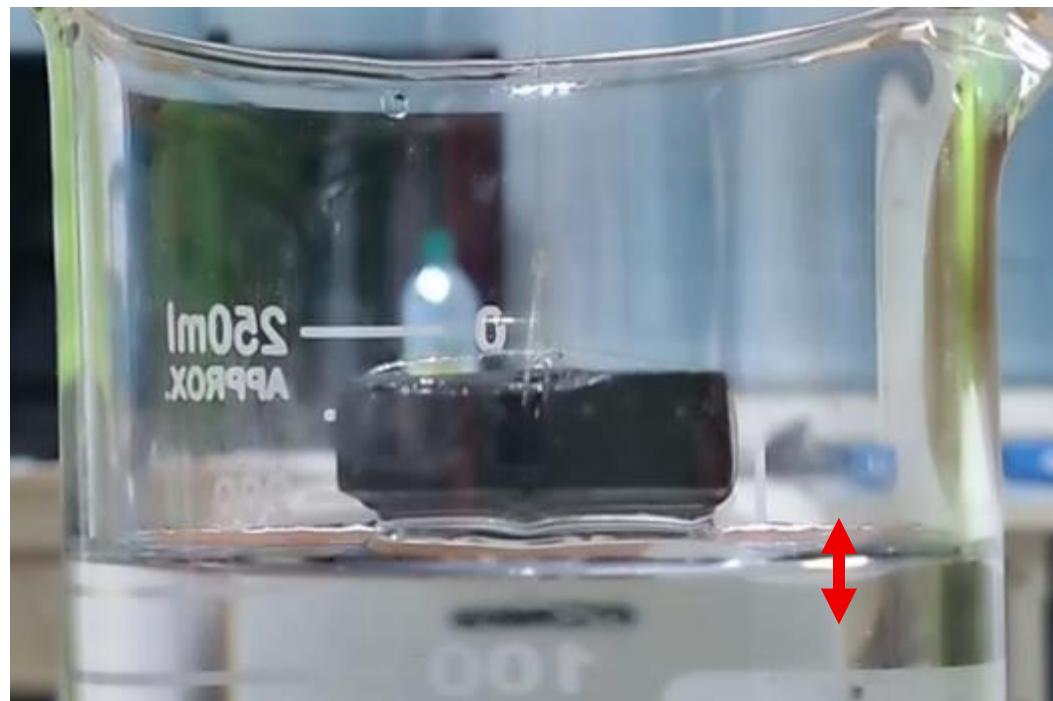
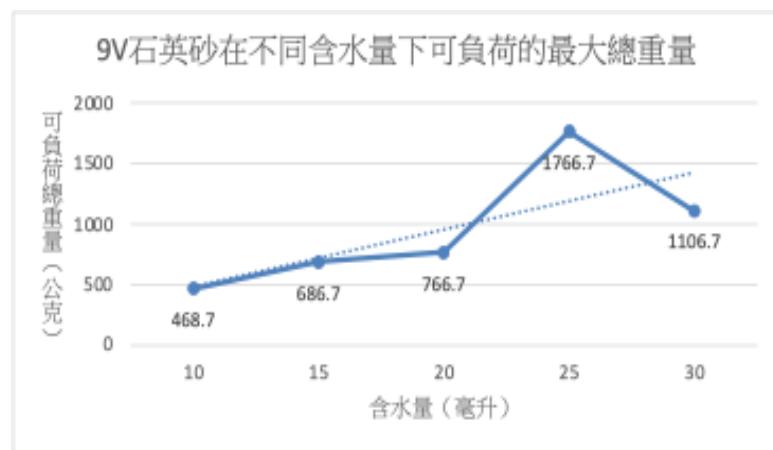
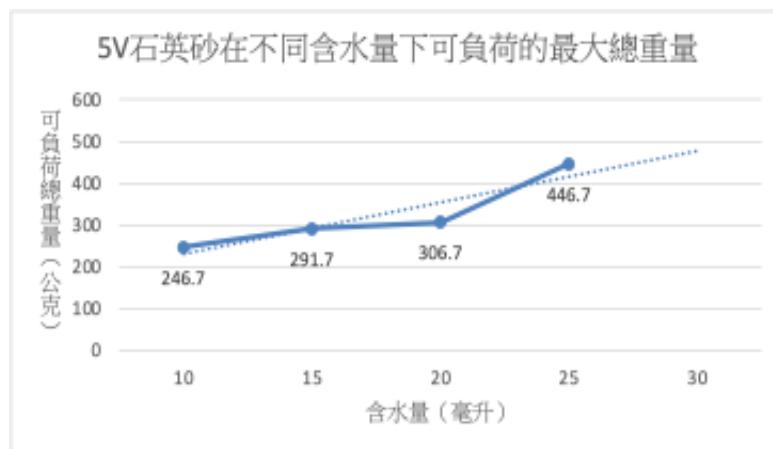


圖10、當石材被拉起的瞬間，石材的下表面與水的接觸面會形成一種短暫的拉力，並形成液態介面（紅色箭頭處）(照片來源：本研究者拍攝)

伍、討論

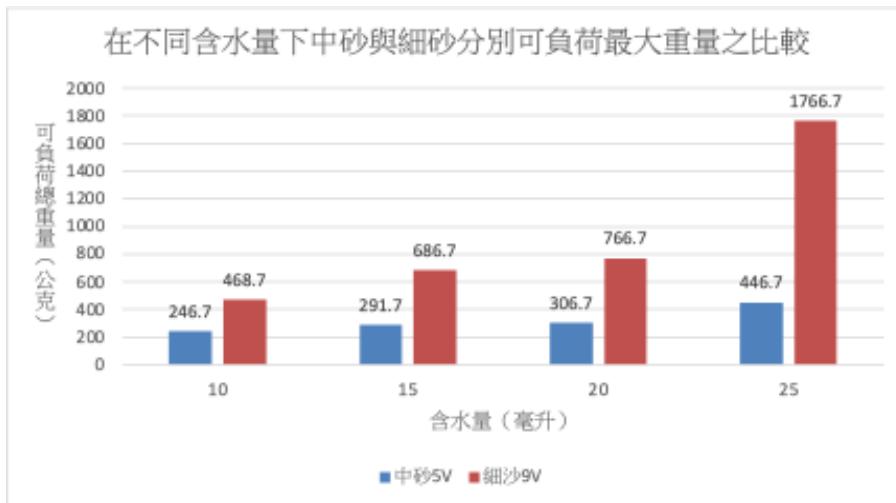
一、實驗一之1：探討砂柱在不同含水量下可承受最大重量的變化

撇除可承受重量太小而無法得知準確實驗數據的2V 石英砂組別，我們將剩餘兩組（5V、9V 石英砂）的實驗數據繪製成折線圖，並輔以趨勢線觀察，圖表如下：



從圖中我們可以觀察到無論是5V 還是9V 石英砂，砂柱含水量與可負荷總重量大致上都呈正相關。我們推測是因為砂柱孔隙間的水分子與石英砂產生附著力，造成類似毛細現象與表面張力的原理而有助於砂柱的凝聚，增加砂柱可承受重量。因此當砂柱含水量越高，孔隙間的水分子越充裕，砂柱可負荷的最大總重量自然就會越重。不過，我們也發現9V 石英砂在含水量30毫升時的可承受重量反而較含水量25毫升時要來得低，我們推測此現象的原因可能是砂柱在兩者之間達到飽和含水量，過多的水反而降低砂礫間的摩擦力而降低砂柱的穩固性，導致砂柱可負荷的最大總重量驟降，此解釋也呼應了實驗記錄中我們觀察到砂柱「輕壓有水滲出」的情形。

二、實驗一之2：探討不同粒徑之沙子在固定含水量下可承受最大重量的差異



觀察上圖，我們可以發現在砂柱中加入純水時，無論純水體積為10、15、20、或者25毫升，9V 砂柱可負荷最大重量的表現都較5V 為佳。我們推測其原因一來9V 石英砂粒徑較小，在相同形狀、體積的砂柱中顆粒數量較多，砂礫排列本來就較為緊密、穩固；二來9V 石英砂粒徑小、顆粒多的特性也導致其與砂柱中水分子的接觸面積較大，與水分子的總作用力較強，有助於砂柱的凝聚，增加砂柱可負荷的最大重量。

三、實驗二之1：標準化砂柱情況下，探討砂柱在不同含水量下可承受最大重量的變化

利用細砂（9V，粒徑：0.053~0.30mm，80-95 目）探討砂柱在不同含水量下可承受最大重量的變化，將實驗結果以散布圖方式呈現，並加上趨勢線觀察，圖表如下：

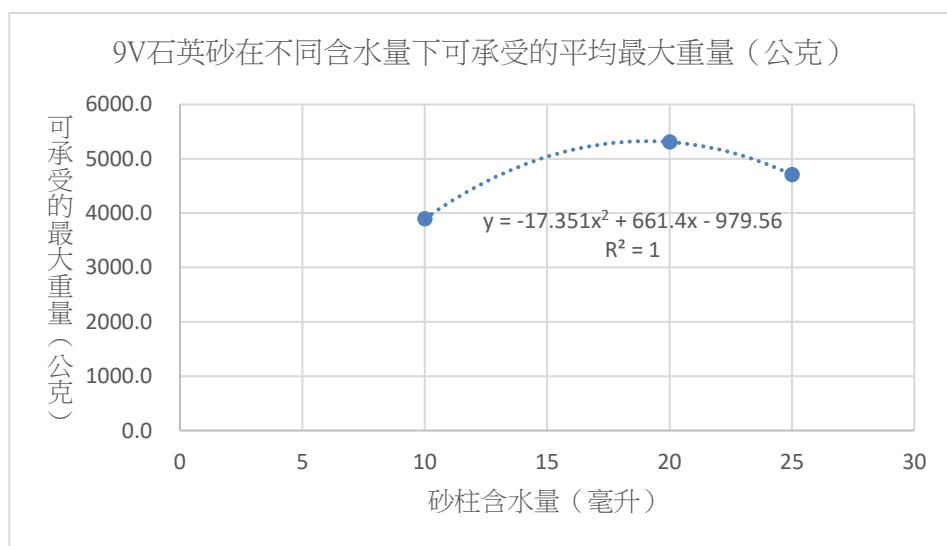


圖11、利用9V石英砂在不同含水量下可承受最大重量的散布圖 (圖片來源：本研究者繪製)

從圖中我們可以觀察到9V 石英砂砂柱含水量與可承受最大重量並非呈現一條直線的趨勢線，而是出現二次多項式的曲線。我們推測是因為砂柱孔隙間的水分子間因氫鍵而產生內聚力，水分子又與石英砂產生附著力，造成類似毛細現象與表面張力的原理而有助於砂柱的凝聚，增加砂柱可承受重量。理論上，當砂柱含水量越高，孔隙間的水分子越充裕，砂柱可負荷的最大總重量自然就會越重。不過從我們的實驗發現，9V 石英砂在含水量30毫升時，因水分過多，而無法讓砂柱塑形，我們推測此現象的原因可能是砂柱在兩者之間因超過飽和含水量，故過多的水會因水的重量而流出；此外，在可塑形的三種處理組（10毫升、20毫升、25毫升）中，在含水量25毫升時的可承受重量反而較含水量20毫升時要來得低，我們推測此現象的原因可能是砂柱的含水量過高，反而降低砂礫間的摩擦力而降低砂柱的穩固性，導致砂柱可負荷的最大總重量開始下降的緣故。

二、實驗二之2：標準化砂柱情況下，探討不同粒徑之砂子在固定含水量下可承受最大重量的差異

延續實驗一的結果，加入中砂（粒徑為5V）及粗砂（粒徑為2V），探討不同粒徑之砂子在固定含水量下可承受最大重量的差異，由直方圖（圖12）可觀察，加入30毫升的純水的組別，三種不同粒徑的石英砂因無法塑形而都沒有觀測數據；加入25毫升的純水的組別，中砂及粗砂因無法塑形而都沒有觀測數據，僅有細砂砂柱可承受4711.0公克的重量；加入20毫升的純水的組別，粗砂僅能承受壓克力板（225公克）的重量，中砂砂柱可承受3544.3公克的重量，細砂砂柱可承受5308.0公克的重量；加入10毫升的純水的組別，粗砂及中砂砂柱僅能承受壓克力板（225公克）的重量，細砂砂柱可承受3899.3公克的重量。因此，我們發現在砂柱中加入純水時，無論純水體積為10、20、或者25毫升，細砂砂柱可負荷最大重量的表現都較粗砂及中砂砂柱為佳。我們推測其原因一來9V 石英砂粒徑較小，在相同形狀、體積的砂柱中顆粒數量較多，砂礫排列本來就較為緊密、穩固；二來9V 石英砂粒徑小、顆粒多的特性也導致其與砂柱中水分子的接觸面積較大，與水分子的總作用力較強，有助於砂柱的凝聚，增加砂柱可負荷的最大重量（圖13）。

根據文獻記載，濕砂之所以能夠柱疊成砂雕，是因為水分在砂粒之間形成液橋（capillary bridge），透過液體的表面張力與毛細力（capillary force）產生吸附力，使砂粒彼此黏合而形成穩固結構。這種現象與砂粒的粒徑大小密切相關，因為粒徑會影響液橋的形成條件與其產生的吸力強度。研究指出，砂粒粒徑越小，液橋的數量與穩定性越高，因此能夠支撐更多的水分與結構力。液橋的吸力與幾個因素有關：包括粒子半徑、液橋體積、液體的表面張力、與兩粒砂之間的距離等。根據 Young - Laplace 方

程式，液橋所產生的壓力與粒徑呈反比關係，即粒徑愈小，毛細壓力愈大，導致砂粒間的黏附力提升。

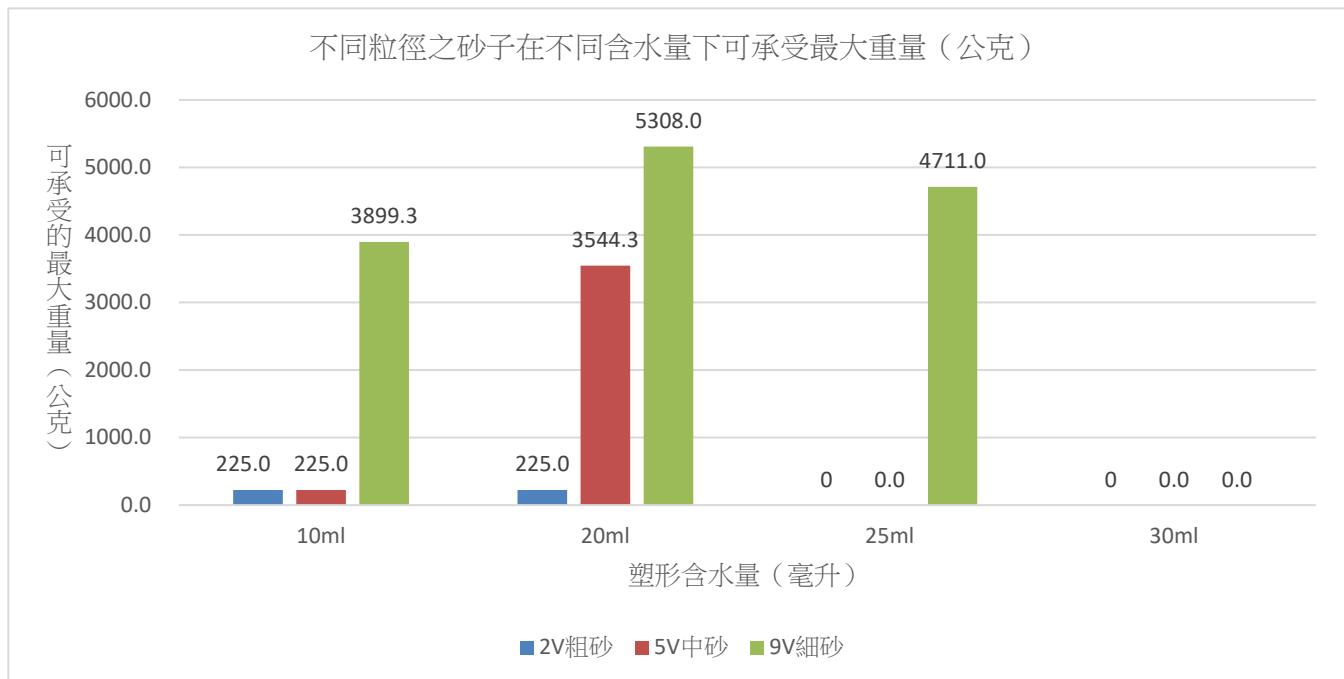


圖12、不同粒徑之砂子在固定含水量下可承受最大重量(圖片來源：本研究者繪製)

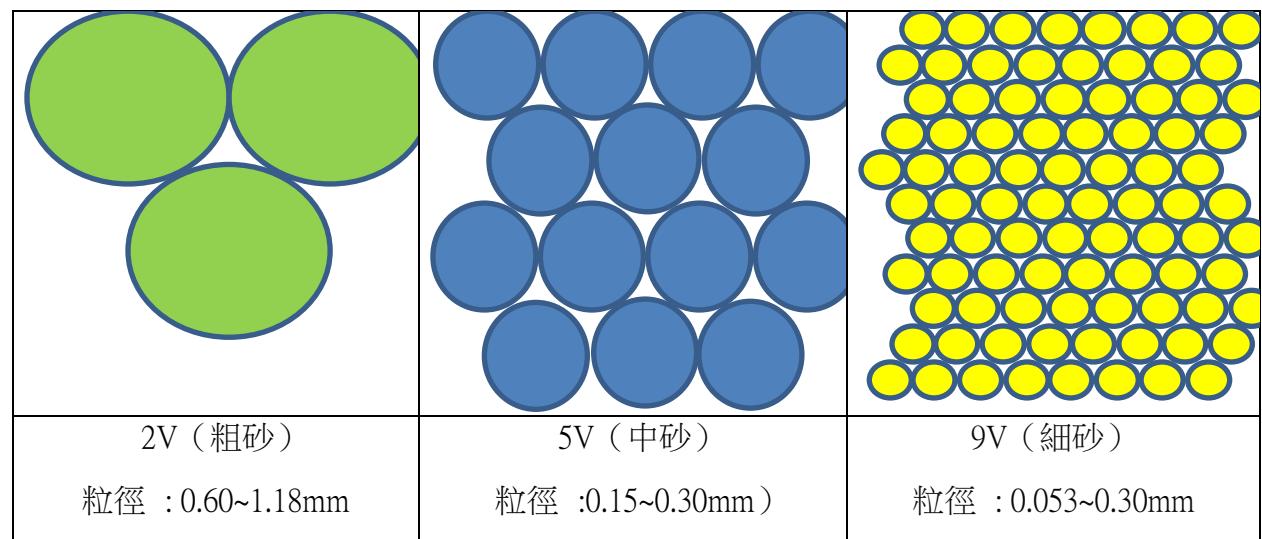


圖13、本實驗中使用不同粒徑石英砂的示意圖 (圖片來源：本研究者繪製)

三、實驗三：探討塑形砂柱利用熱風乾燥的承重試驗

利用熱風乾燥探討塑形砂柱是否可持續承重，利用細砂（粒徑為9V）與中砂（（粒徑為5V）加入20毫升純水的組別塑形成圓柱體砂柱，實驗二之1的組別（水分維持組）可承受4702公克～5877公克的外加重量（平均為2308.0公克），實驗三的組別（熱風乾燥組）則隨圓柱體砂柱水分含量的降低，而支撐不過3000公克的外加重量，故砂柱是否保持一定的水分含量，將是砂柱是否可承重的關鍵。根據網路查詢的資料，只要砂柱保持一定的水分，就可讓砂子顆粒間藉由水的表面張力形成毛細作用及液體橋樑，使砂粒之間產生黏性與張力，形成類似膠水的效果，讓砂柱維持穩定，並能夠維持一定的負重能力。

四、實驗四：探討液體表面張力對於砂粒的結構之影響

利用重量法來偵測表面張力的存在，當我們使用的道具（平整石材）拉出水面至完全脫離時，測量的重量會發生動態性變化。首先，當石材向上拉出水面時，但因石材仍有部分體積在水面下，下方的電子秤仍可測量到石材的重量，故重量會介於水+燒杯+石材的總重及水+燒杯的總重之間；當石材整體拉出水面的瞬間，石材的下表面與水的接觸面會形成一種短暫的拉力，並形成液態介面，此時，電子秤量測數字會稍微低於水與燒杯的重量，就可換算成表面張力；當石材完全脫離水面後，石材與水面的表面張力消失，電子秤量測數字回歸水與燒杯的重量。

根據網路查詢的資料，表面張力（surface tension）是靜止液體在界面形成的特有現象，為液體分子間或液體分子與其他物體的接觸面之間，相互吸引的結果；此種分子間彼此互相吸引的力稱為分子力（molecular force），主要分為兩種：同種分子間互相吸引的力稱為內聚力，異種分子間互相吸引的力稱為附著力。

另一方面，根據第56屆科展作品說明書，國小物理組：表面功夫實驗可知，物體表面積與表面張力作用力如示意圖14，當物體表面積越大，表面張力會越大，故我們反觀本次實驗，粒徑越小的砂粒(9V)，所形成的表面總面積最大(如圖13所示)，故我們可以知道粒徑越小，同一面積下石礫排列所形成的表面總面積越大(9V>5V>2V)，表面張力越大，可承受的耐重程度越大。

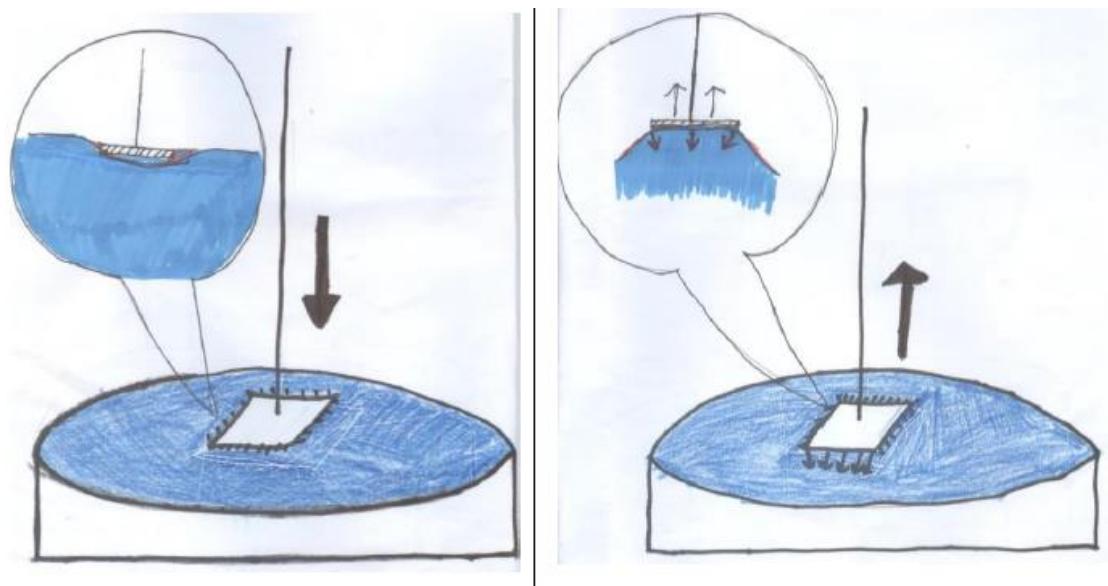


圖14、物體表面積與表面張力示意圖 (節自第56屆科展作品說明書，國小物理組：表面功夫)

陸、結論

- 一、利用9V 石英細砂為材料，加入10毫升、20毫升、25毫升、30毫升純水進行塑形，水分過多時，石英細砂無法塑形，在可塑形的三種處理組（10毫升、20毫升、25毫升）中，在含水量25毫升時的可承受重量反而較含水量20毫升時要來得低，可能是砂柱的含水量過高，反而降低砂礫間的摩擦力而降低砂柱的穩固性，導致砂柱可負荷的最大總重量開始下降。
- 二、在砂柱中加入純水時，9V 石英砂柱相較於5V 砂柱粒徑較小、顆粒數目較多，砂柱中砂柱排列較緊密、與水分子接觸面積較大，作用力較強，因而砂柱凝聚性較佳，可承受較大重量。
- 三、砂柱需要保持一定的水分，讓砂子顆粒間藉由水的表面張力形成毛細作用及液體橋樑，使砂粒之間產生黏性與張力，讓砂柱維持穩定及維持一定的負重能力。若利用熱風乾燥將砂柱的水分降低，砂柱的穩定性會被破壞，也會喪失負重能力。
- 四、利用重量法來偵測表面張力的存在，當我們使用的道具（平整石材）拉出水面至完全脫離時，測量的重量會發生動態性變化，另外藉由觀察也發現當石材被拉起的瞬間，石材的下表面與水的接觸面會形成一種短暫的拉力，並形成液態介面，這就是表面張力，根據前人研究，當物體表面積越大，表面張力會越大，呼應本實驗，同一面積下石礫排列所形成的表面總面積越大($9V > 5V > 2V$)，表面張力越大，可承受的耐重程度越大。

柒、參考文獻資料

- 一、國小自然科學四下，南一出版社，2023。
- 二、國中自然與生活科技二上，翰林出版社，2019。
- 三、國中自然與生活科技二下，翰林出版，2019。
- 四、高中物理(全)，龍騰文化，2019。
- 五、高中物理(全)，南一出版社，2019。
- 六、表面張力，維基百科，取自<https://zh.wikipedia.org/zh-tw/表面張力>
- 七、氫鍵，維基百科，取自<https://zh.wikipedia.org/zh-tw/氢键>
- 八、毛細現象，維基百科，取自<https://zh.wikipedia.org/zh-tw/毛细现象>
- 九、表面張力，教育百科，取自
<https://pedia.cloud.edu.tw/Entry/WikiContent?title=%E8%A1%A8%E9%9D%A2%E5%BC%B5%E5%8A%9B&search=%E8%A1%A8%E9%9D%A2%E5%BC%B5%E5%8A%9B>
- 十、鄭朝陽。2013。美麗砂雕成形，關鍵在表面張力，砂子加水才有擬聚力。聯合報第AA3版新聞中的科學，取自<https://www.nsysu.edu.tw/p/404-1000-80996.php?Lang=zh-tw>
- 十一、揭開水的面紗，CAECE NTU 水環境 O2O 教育，取自
<http://water.caece.net/255813828327700303403875432023.html>
- 十二、亞提士科學儀器有限公司。表面張力實驗器，取自
https://www.atis.com.tw/physical%20instrument%20Entire_page_6b/c-p/c-p-m/A01-691P-Y51%E8%A1%A8%E9%9D%A2%E5%BC%B5%E5%8A%9B%E5%AF%A6%E9%A9%97.pdf
- 十三、林信輝、江永哲。1979。砂體含水率與飛砂量之關係試驗。中華水土保持學報10(2)：173-193。
- 十四、蔡尚芳。2003。表面張力。科學教育月刊 257：21-30。
- 十五、鄧文彥。2009。液橋模型與砂粒結合力分析。應用物理季刊 15 (2)：43-50。
- 十六、劉紹銘。2013。細粒濕砂毛細壓力滯後效應研究。水利工程學報29 (1)：22-31。
- 十七、黃銘傑。2015。不同粒徑砂之毛細力實驗探討。國立臺灣大學土木工程學系碩士論文。
- 十八、江奕佳、葛莞君、劉律辰、賴明煜、吳俊良。2016。中華民國第56屆中小學科學展覽會作品說明書

【評語】080122

本作品探討石英砂在不同條件下可承受最大重量的研究。作者進行一系列實驗，檢視了砂粒大小和含水量如何影響砂柱的穩定性與承重能力。實驗設備有重要的改進：從牛奶瓶塑形到自製壓克力模具，以及引入自動給水器，大幅提高了實驗的精準度和穩定性，作品研究目的明確，其科學探究精神值得肯定。作者能自行設計實驗裝置，進行實驗，值得鼓勵。其中探討液體表面張力對砂粒結構的影響，具巧思獨創之處。是件有趣的作品。

作品海報

飛砂走石

探討石英砂在不同條件下可承受的最大重量

研究動機

每到夏日，爸爸媽媽通常會帶我們到公園或海灘玩沙，我們喜歡把沙子堆成不同造型的城堡或城牆，此時，我們發現若只用乾燥的沙子，常常無法順利成形，若添加一些水後，濕濕的沙子往往比較容易定型、堆起，然而水份太少，無法塑形；過多卻又會導致水分流出、砂子太重而崩塌，這個現象讓我們好奇沙子是否有最佳含水量。另外，不同沙岸的砂粒往往隨著當地地理條件以及內、外營力作用程度的不同而導致其種類、顆粒大小不一，因此，我們也想同時試驗不同粗細的砂粒在一定的含水量情況下所能負荷的重量是否存在差異性。

研究目的

- (一) 探討砂柱在不同含水量下可承受最大重量的變化
- (二) 探討不同粒徑之砂粒在固定含水量下可承受最大重量的差異
- (三) 探討塑形砂柱利用熱風乾燥的承重試驗
- (四) 藉由試驗探討液體表面張力對於砂粒結構之影響



▲ 不同粒徑石英砂

研究架構

飛
砂
走
石

設計
實驗
裝置

實驗一
砂粒與水的關係

- 1. 探討砂柱在不同含水量下可承受最大重量的變化
- 2. 探討不同粒徑的砂粒在固定含水量下可承受最大重量的差異

實驗二
改良實驗一裝置

- 1. 標準化砂柱情況下，探討砂柱在不同含水量下可承受最大重量的變化
- 2. 標準化砂柱情況下，探討不同粒徑之砂粒在固定含水量下可承受最大重量的差異

實驗三
乾燥對砂粒的影響

探討塑形砂柱利用熱風乾燥的承重試驗

實驗四
液體表面張力
與砂粒的關係

探討液體表面張力對於砂粒結構之影響

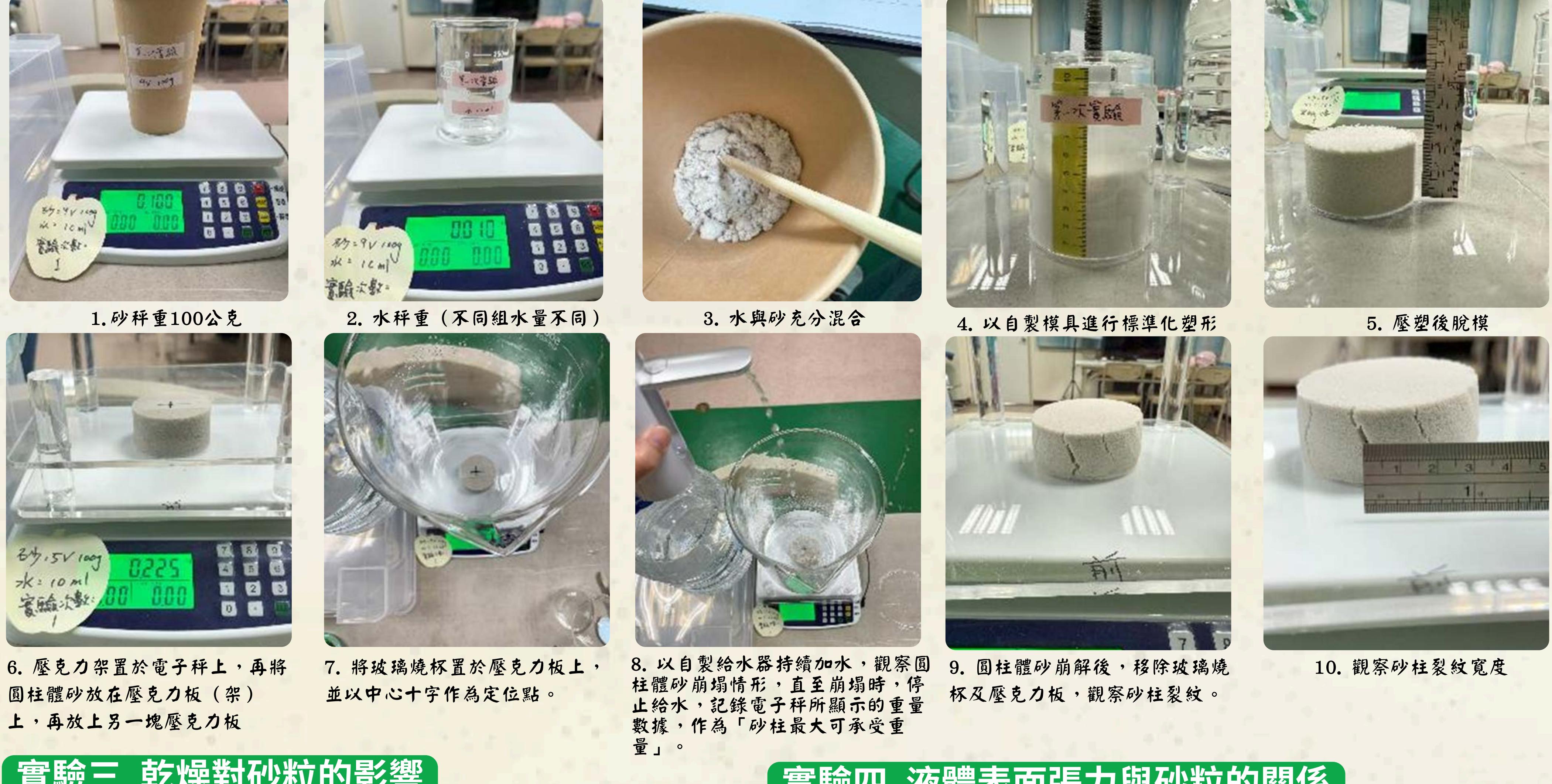
實驗步驟與流程

實驗一 砂粒與水的關係



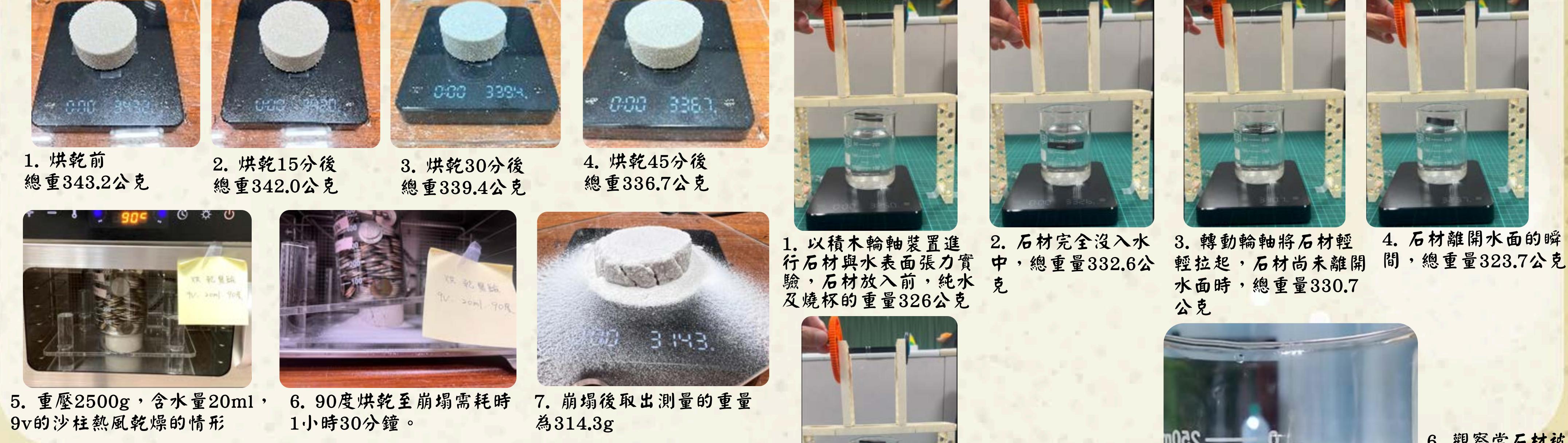
1. 砂秤重100公克 2. 用手攪拌砂粒 3. 將攪拌均勻的砂粒倒塑膠瓶塑形 4. 將砂柱脫模 5. 不同含水量砂柱可承受重量的實驗過程

實驗二 改良實驗一裝置



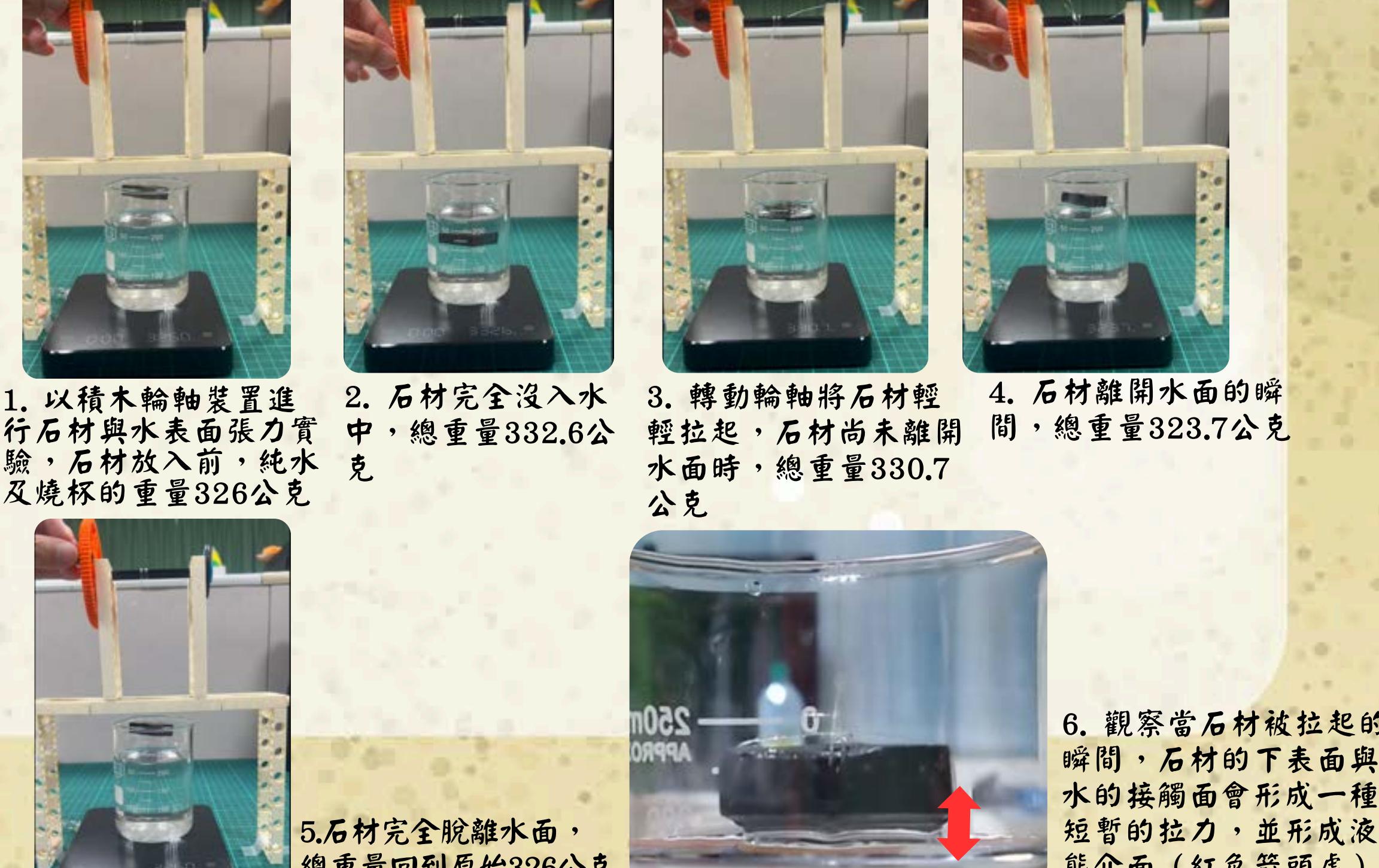
6. 壓克力架置於電子秤上，再將圓柱體砂放在壓克力板（架）上，再放上另一塊壓克力板
7. 將玻璃燒杯置於壓克力板上，並以中心十字作為定位點。
8. 以自製給水器持續加水，觀察圓柱體砂崩塌情形，直至崩塌時，停止給水，記錄電子秤所顯示的重量數據，作為「砂柱最大可承受重量」。
9. 圓柱體砂崩解後，移除玻璃燒杯及壓克力板，觀察砂柱裂紋。
10. 觀察砂柱裂紋寬度

實驗三 乾燥對砂粒的影響



1. 噴乾前
總重343.2公克
2. 噴乾15分後
總重342.0公克
3. 噴乾30分後
總重339.4公克
4. 噴乾45分後
總重336.7公克
5. 重壓2500g，含水量20ml，
9v的沙柱熱風乾燥的情形
6. 90度烘乾至崩塌需耗時
1小時30分鐘。
7. 崩塌後取出測量的重量
為314.3g

實驗四 液體表面張力與砂粒的關係



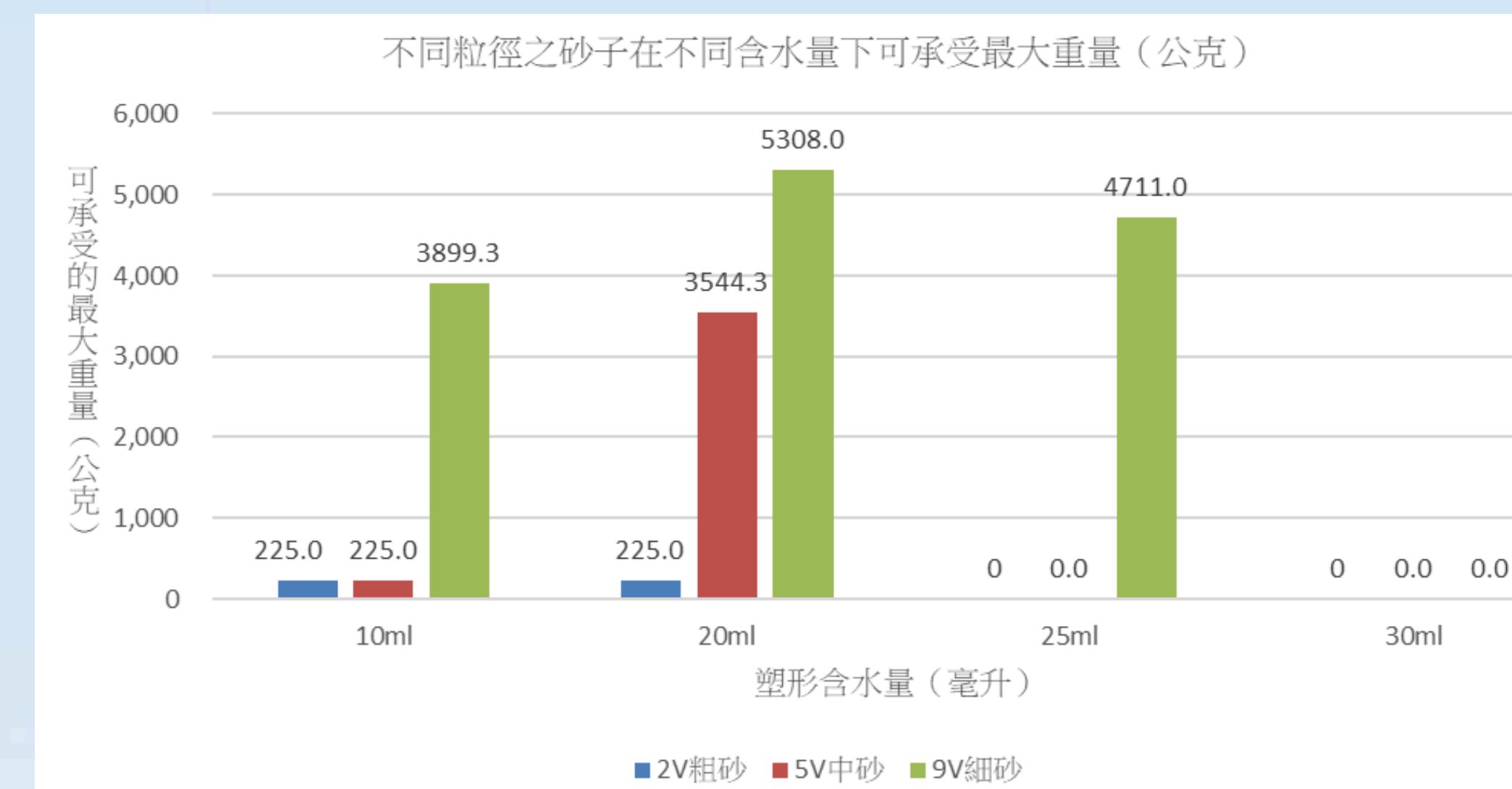
5. 石材完全脫離水面，
總重量回到原始326公克

6. 觀察當石材被拉起的
瞬間，石材的下表面與
水的接觸面會形成一種
短暫的拉力，並形成液
態介面（紅色箭頭處）

實驗二：2. 標準化砂柱情況下，探討不同粒徑之沙子在固定含水量下可承受最大重量

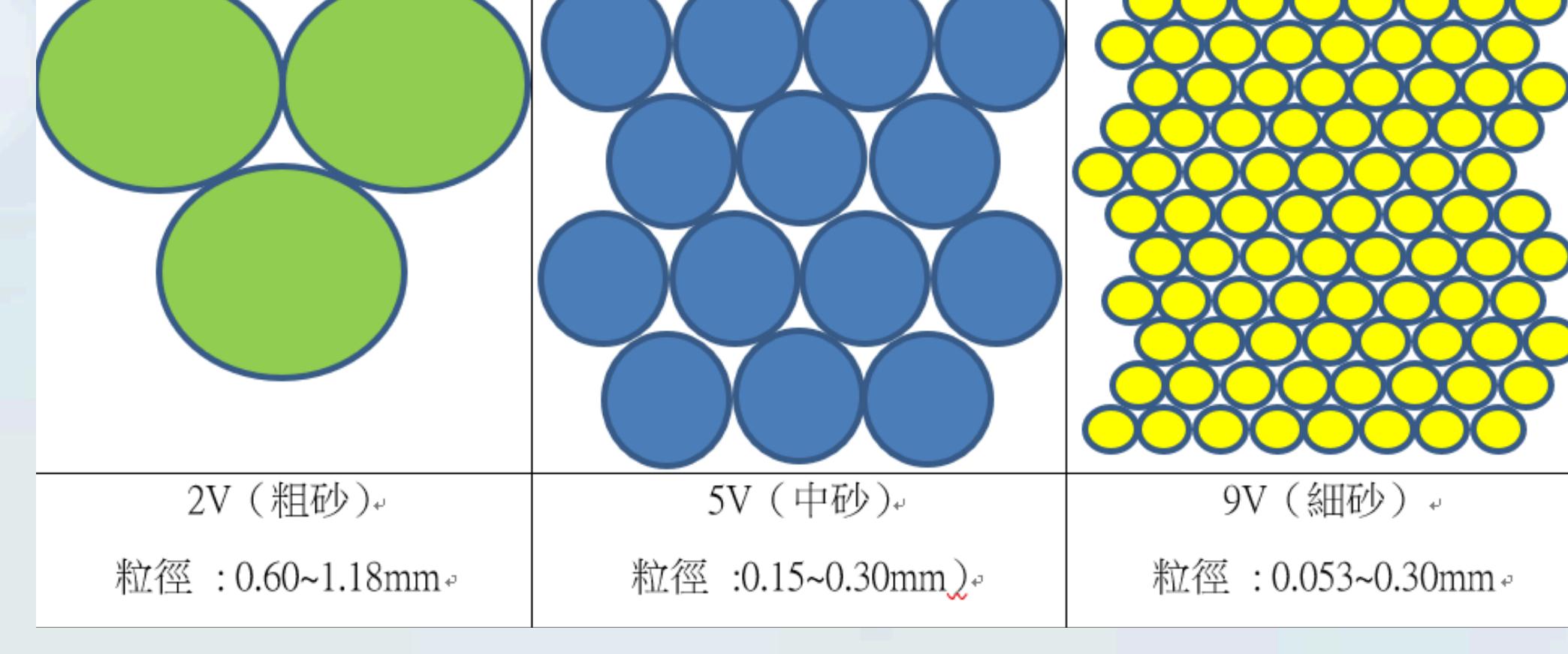
【實驗結果】實驗結果整理如下圖表：

| 加水量(ml) | 砂柱可承受最大重量(公克) | | |
|---------|---------------|------|------|
| | 粗砂2V | 中砂5V | 細砂9V |
| 10 | 225 | 225 | 3899 |
| 20 | 225 | 3544 | 5308 |
| 25 | 無法塑形 | 無法塑形 | 4711 |
| 30 | 無法塑形 | 無法塑形 | 無法塑形 |



【分析討論】

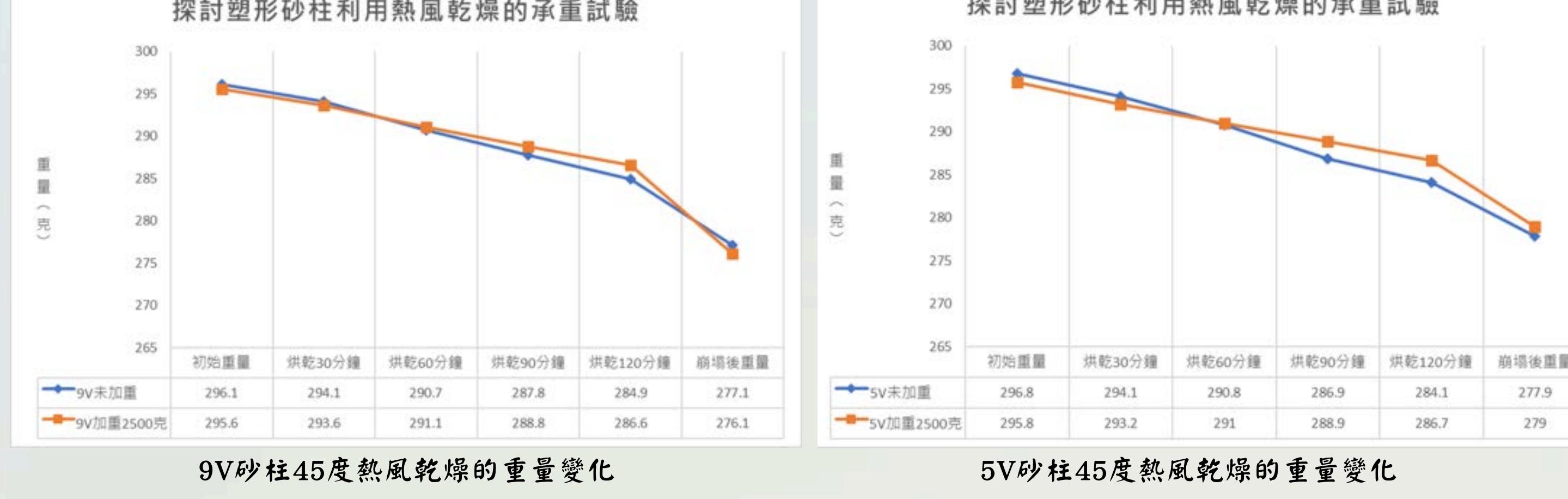
- 無論純水體積為 10、20、或 25 毫升，細砂砂柱可負荷的最大重量表現均優於粗砂及中砂砂柱。
- 根據文獻，濕潤的沙子之所以能夠堆砌成令人驚嘆的沙雕，其秘密在於水分在砂粒間扮演了「黏著劑」的角色。這些微量的水分會在相鄰的砂粒間形成所謂的「液橋」(Liquid Bridge)。
- 液體的表面張力會產生一種內聚力，將砂粒緊密的「拉」在一起，賦予了濕沙超乎想像的結構強度。
- 然而，砂粒的大小是影響結構穩定性的關鍵，砂粒的粒徑越小，單位體積內形成的液橋數量就越多，整體的吸附力也越強，因此更能承受重量，塑造出更複雜的結構。簡單來說，越細的砂子，黏著效果越好，與我們的實驗結果十分吻合。



相同面積下，不同粒徑砂子排列示意圖

實驗三：探討塑形砂柱利用熱風乾燥的承重試驗

【實驗結果】採用9V、5V的砂粒，加入20ml的純水做成標準化砂柱，分別以未重壓及重壓的狀態進行45度熱風乾燥實驗，實驗結果整理如下圖表：



| 粒徑 | 9V | |
|------|--------|----------|
| | 砂柱狀態 | 未加重 |
| 砂柱狀態 | 未加重 | 加重2500公克 |
| 崩塌耗時 | 4小時47分 | 5小時8分 |
| 5V | | |
| 砂柱狀態 | 未加重 | 加重2500公克 |
| 崩塌耗時 | 5小時8分 | 3小時51分 |



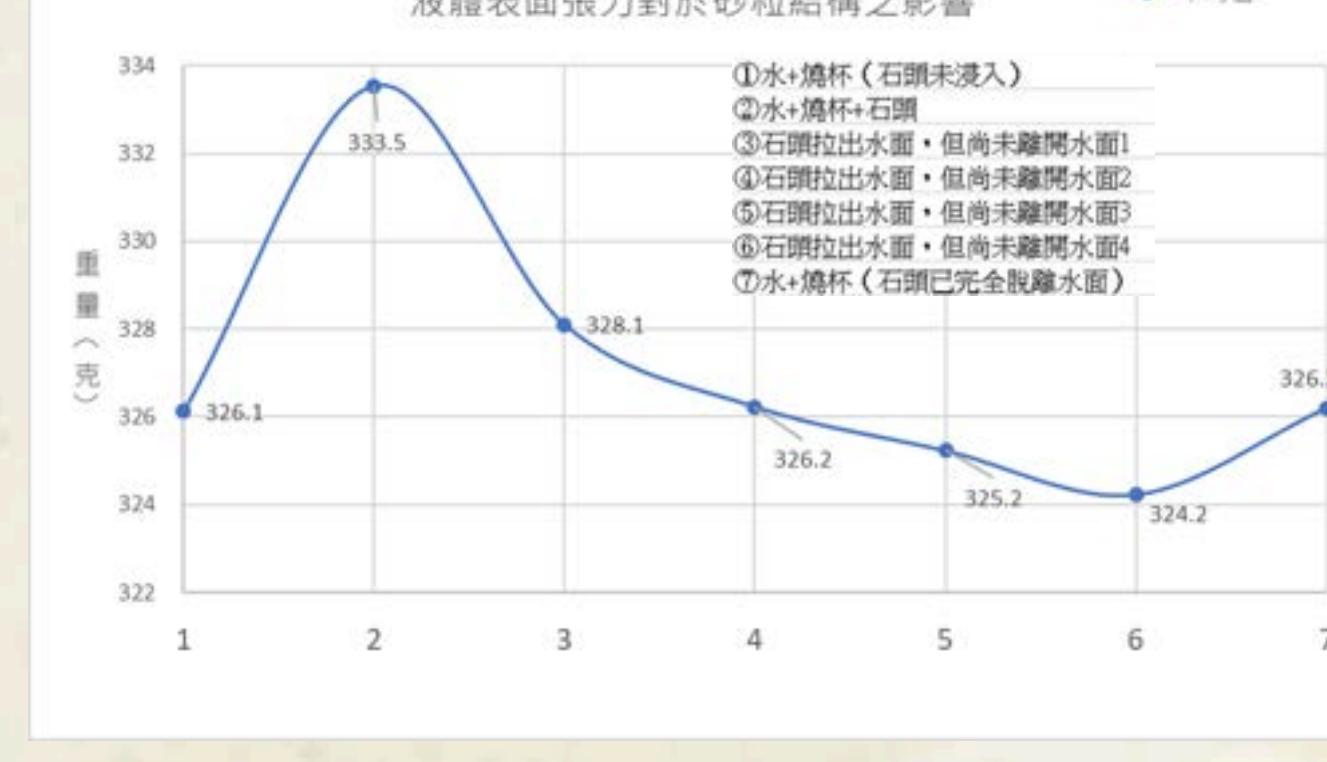
【分析討論】

- 砂柱能否持續承重，保持一定的水分含量是關鍵。只要砂柱保持水分含量，就能讓砂子顆粒間藉由水的表面張力產生黏性與張力，形成類似膠水的效果。最終，這有助於砂柱維持穩定，並能夠保持一定的負重能力。然而，當我們利用熱風低溫烘乾，讓砂柱的水分含量降低，砂柱即失去其承重能力，持續乾燥，觀察到水分散失後砂柱崩塌情況。

實驗四：液體表面張力對於砂粒的結構之影響

【實驗結果】利用重量法偵測表面張力，進行三次重複實驗，實驗結果記錄如下：

| | 第一次重複 | 第二次重複 | 第三次重複 | 平均值 |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|
| ①水+燒杯 (石頭未浸入) | 326 | 326.2 | 326.2 | 326.1 |
| ②水+燒杯+石頭 | 333.1 | 333.9 | 333.6 | 333.5 |
| ③石頭拉出水面，但尚未離開水面1 | 328.1 | 327.9 | 328.3 | 328.1 |
| ④石頭拉出水面，但尚未離開水面2 | 326.3 | 326.2 | 326.2 | 326.2 |
| ⑤石頭拉出水面，但尚未離開水面3 | 325.3 | 324.8 | 325.6 | 325.2 |
| ⑥石頭拉出水面，但尚未離開水面4 | 324.3 | 324 | 324.4 | 324.2 |
| ⑦水+燒杯 (石頭已完全脫離水面) | 326.2 | 326.2 | 326.2 | 326.2 |



【分析討論】

- 根據第56屆科展作品說明書，國小物理組的「表面功夫實驗」指出，物體表面積越大，表面張力作用力會越大。
- 反觀本次實驗，粒徑越小的砂粒，在相同體積下所形成的總表面積最大，表面張力作用力會越大。

總論

【含水量對砂柱穩定性的影響】

- 在塑形時，砂柱需要適量的水分才能保持穩定。當含水量為10毫升、20毫升和25毫升時，石英細砂可以塑形。然而，如果水分過多（例如在25毫升時），雖然仍在可塑範圍內，但砂柱可承受的重量反而會比含水量20毫升時低。這可能是因為含水量過高，會降低砂粒之間的摩擦力，進而影響砂柱的穩固性，使其能負荷的最大總重量下降。

- 砂柱需要保持一定的水分，以便透過水的表面張力形成毛細作用和液體橋樑，使砂粒之間產生黏性和張力，從而維持砂柱的穩定性和負重能力。如果將砂柱的水分乾燥，這種穩定性會被破壞，砂柱也將失去負重能力。

【砂粒特性對砂柱穩定性的影響】

- 相較於5V砂柱，9V石英砂柱的粒徑較小、顆粒數目較多。這使得砂柱中砂粒排列更緊密，與水分子接觸的面積更大，作用力更強，因此砂柱的凝聚性較佳，可以承受更大的重量。

【表面張力與負重能力的關係】

- 表面張力可以透過重量法來偵測。當石材從水中拉出時，其下表面與水的接觸面會產生短暫的拉力，形成液態介面，這就是表面張力。研究顯示，物體表面積越大，表面張力會越大。在砂柱實驗中，同一面積下，砂粒排列形成的總表面積越大（例如9V石英砂的總表面積大於5V和2V），其表面張力也越大，因此可承受的重量也越大。

未來研究方向

- 嘗試尋找其他液體可作為替代純水，以提升砂柱的可承重能力。
- 以不同粒徑的砂子混合後，嘗試找出最佳含水量的比例。

實驗過程與結果



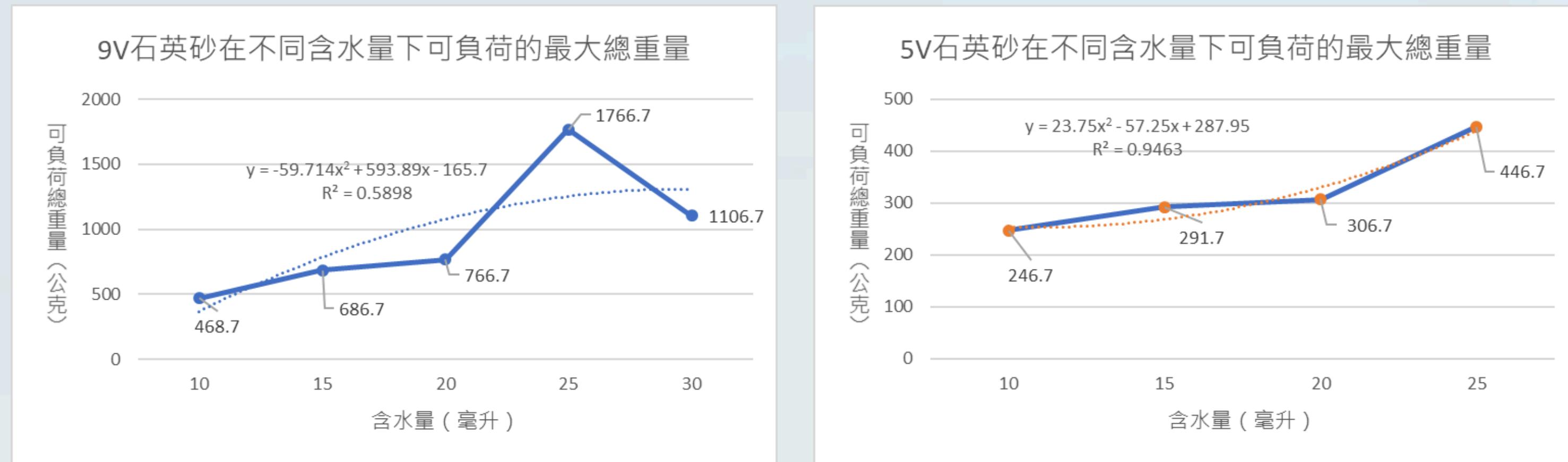
實驗一：1. 探討砂柱在不同含水量下可承受最大重量的變化

- 2V、5V、9V 的石英砂各自秤重100公克，並且分別加入10毫升、15毫升、20毫升、25毫升、30毫升的純水
- 塑膠盤中以塑膠瓶塑形後放上壓克力板和寶特瓶後進行實驗
- 觀察塑形狀況以及測量砂柱崩塌時所加入的純水水量

【實驗結果】 實驗結果整理表格如下：

| 9V石英砂100克，空瓶46.7克 (塑型物:直徑5.5公分，高約3.5公分) | | | | | | 5V石英砂100克，空瓶46.7克 (塑型物:直徑4.5公分，高約4公分) | | | | | | 2V石英砂100克，空瓶46.7克 (塑型物:直徑4.5公分，高約4公分) | | | | | |
|--|------|-----|-----|---------|----------|--|-----|-----|-----|-----|------|--|-----------------------------|----|----|----|----|
| 加水量(ml) | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 加水量(ml) | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 加水量(ml) | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 |
| 塑形狀況 | 可，鬆軟 | 可 | 可 | 可，濕高度下降 | 尚可，輕壓水滲出 | 塑形狀況 | 可 | 可 | 可 | 有水珠 | 無法塑型 | 塑形狀況 | 可 | 可 | 可 | 可 | 可 |
| 可負荷水量 (公克) | 422 | 640 | 720 | 1720 | 1060 | 可負荷水量 (公克) | 200 | 245 | 260 | 400 | X | 可負荷水量 (公克) | 砂柱支撐力不夠 空瓶放上去(46.7公克)就倒了 | | | | |

【分析討論】 撇除可承受重量太小而無法得知準確實驗數據的2V石英砂組別，將剩餘兩組(5V、9V石英砂)的實驗數據繪製成折線圖，並輔以趨勢線觀察，圖表如下：



- 5V與9V石英砂，砂柱含水量與可負荷總重量大致呈現正相關。
- 9V砂柱在25-30毫升間達到飽和含水量。
- 過多的水分會降低砂柱的穩固性。導致砂柱可負荷的最大總重量驟降，呼應了實驗記錄中我們觀察到砂柱「輕壓有水滲出」的情形。

實驗一：2. 探討不同粒徑之砂粒在固定含水量下可承受最大重量

實驗用砂子：

2V(粗砂)，粒徑：0.60~1.18mm (16-21目)
5V(中砂)，粒徑：0.15~0.30mm (45-57目)
9V(細砂)，粒徑：0.053~0.30mm(80-95目)

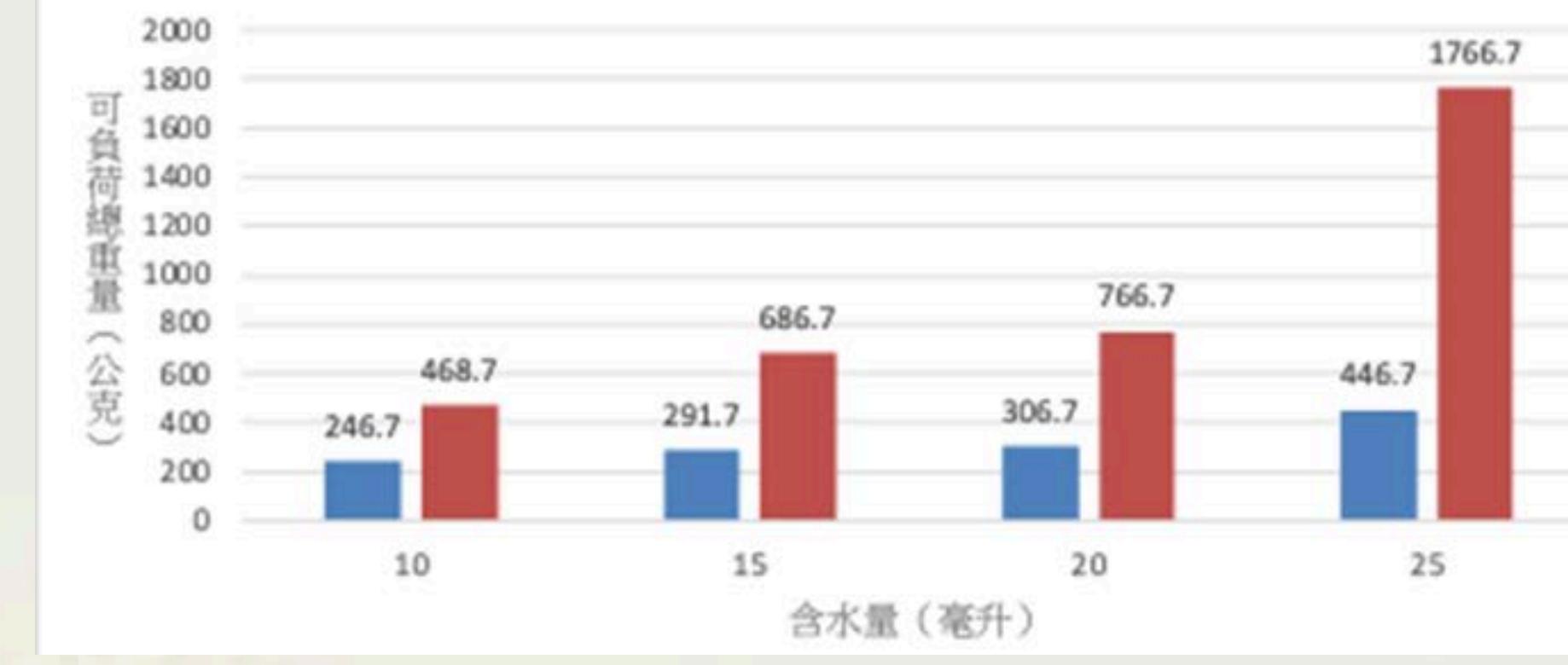
【實驗結果】 實驗結果整理如下圖表：

| 加水量(ml) | 砂柱可承受最大重量(公克) | | |
|---------|---------------|-------|--------|
| | 粗砂2V | 中砂5V | 細砂9V |
| 10 | <46.7 | 246.7 | 468.7 |
| 15 | <46.7 | 291.7 | 686.7 |
| 20 | <46.7 | 306.7 | 766.7 |
| 25 | <46.7 | 446.7 | 1766.7 |
| 30 | <46.7 | X | 1106.7 |

【分析討論】

- 從實驗結果可知，在不同粒徑下，無論加入純水量為10、15、20或25公克，細沙9V的砂柱可負荷最大重量的表現都較中砂5V為佳。
- 推測原因可能是細砂9V砂粒徑較小，在相同形狀、體積的砂柱中顆粒數量較多，砂礫排列本來就較為緊密、穩固，也因為9V粒徑小、顆粒多的特性，導致其與砂柱中的水分子接觸面積較大，與水分子的總作用力較強，有助於砂柱的凝聚，增加砂柱可負荷的最大重量。

在不同含水量下中砂與細砂分別可負荷最大重量之比較



實驗一遭遇的問題

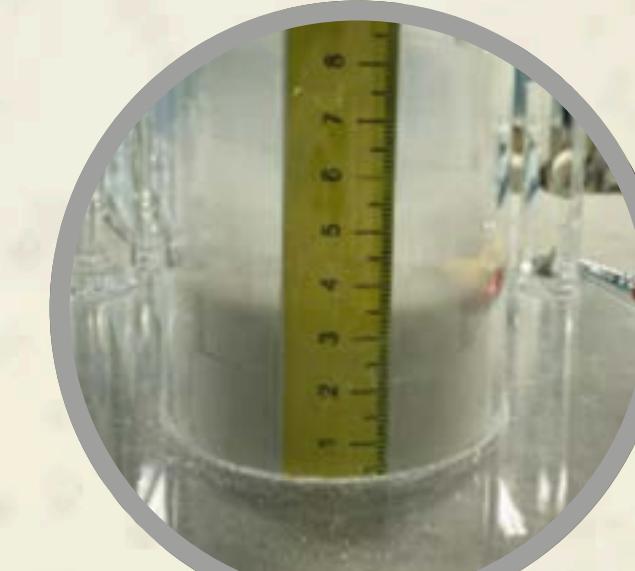
- 塑膠飲料瓶不平整：容易造成脫模時砂柱耗損。
- 輕微敲打脫模：容易造成砂柱結構破壞。
- 量杯倒水：水流速快慢可能造成砂柱崩塌的變因。



標準化改良措施

- 標準化砂柱製造器：解決塑膠飲料瓶不平整和脫模問題。
- 自動給水器：固定水流速，減少水流速造成的砂柱崩塌變因。
- 標準化秤重裝置：

 - 在電子秤上放置具有向上4支腳柱的壓克力架。
 - 將圓柱體砂柱放在壓克力架的定位點上。
 - 蓋上透明壓克力板，有助於平均受力。



標準化砂柱製造器



自動給水器



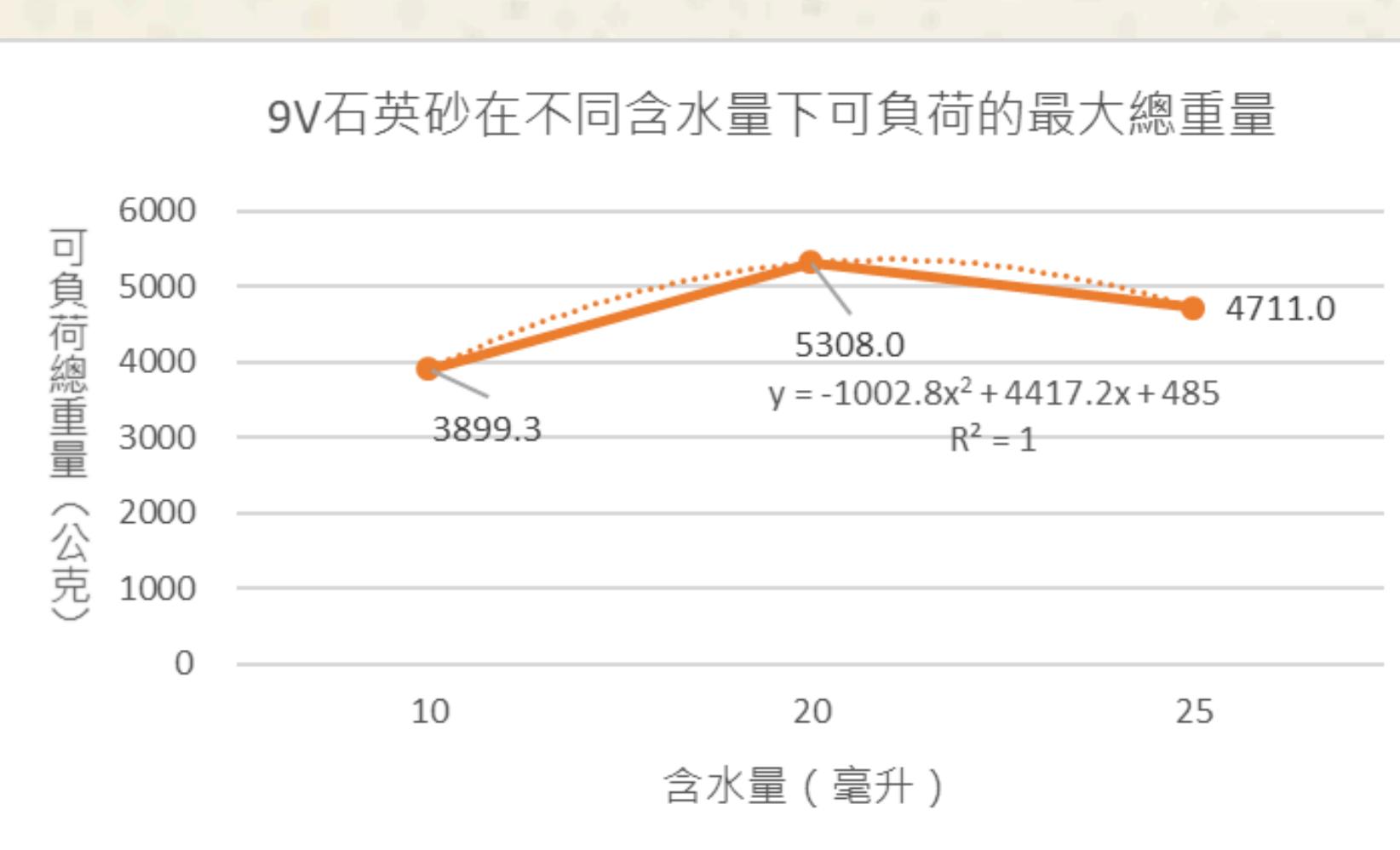
標準化秤重裝置

實驗二：1. 標準化砂柱情況下，探討砂柱在不同含水量下可承受最大重量的變化

我們採用9V細砂經過標準化模具壓製成砂柱進行實驗，來觀察砂柱在不同加水量下可承受最大重量的變化

【實驗結果】 實驗進行三次重複，結果整理為下表：

| 加水量(ml) | 9V砂柱在不同含水量下可承受最大重量 (公克) | | | |
|---------|-------------------------|-------|-------|------|
| | 第一次重複 | 第二次重複 | 第三次重複 | 平均值 |
| 10 | 3742 | 3757 | 4199 | 3899 |
| 20 | 5345 | 4702 | 5877 | 5308 |
| 25 | 5277 | 4828 | 4028 | 4711 |
| 30 | 塑形失敗 | 塑形失敗 | 塑形失敗 | 塑形失敗 |



【分析討論】

理論上，當砂柱含水量越高，孔隙間的水分子越充裕，砂柱可負荷的最大總重量自然就會越重。不過從我們的實驗發現，9V石英砂在含水量30毫升時，因水分過多，而無法讓砂柱塑形(如右圖)，我們推測此現象的原因可能是砂柱在25-30ml之間因超過飽和含水量，故過多的水會因水的重量而流出。