

中華民國第 59 屆中小學科學展覽會  
作品說明書

---

高級中等學校組 地球與行星科學科

佳作

051901

水與砂的華爾茲—地震時建築物在不同含水量  
的土壤中沉陷量之研究

學校名稱：新北市私立辭修高級中學

作者：  高二 王梓芯  高二 鄧耀輝  高二 劉宸輔	指導老師：  季紅菱
---	------------------

關鍵詞：土壤液化、部分飽和、基質吸力

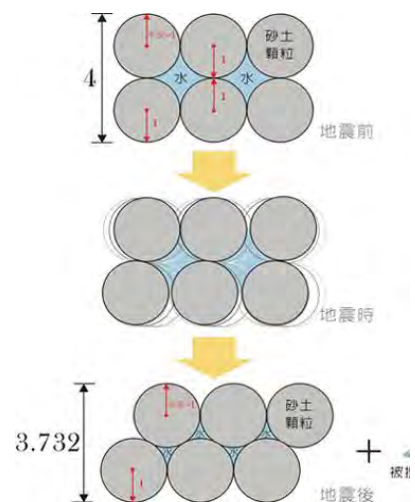
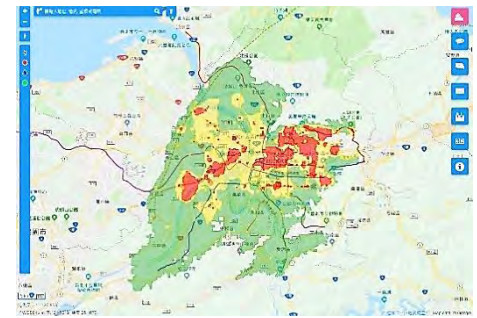
## 摘要

地震常伴隨發生土壤液化。我們發現除了飽和土壤的液化會使土壤失去支撐力而造成建築物沉陷之外，土壤的強度也會隨含水量不同而變化，此現象是受到水的表面張力在土壤顆粒之間產生的基質吸力所影響。我們為了瞭解土壤中含水量影響的情形，設計相關實驗，以建築物的沉陷量檢測土壤的強度變化。實驗推知：當土壤部分飽和時，因水的基質吸力而使土壤強度增強；土壤粒徑越小時，基質吸力愈大，使土壤強度增強；在地震加速度介於 150~600gal 間時，加速度與建物沉陷量呈線性關係。而在天然土壤中，因含有扁平、粗糙的板岩碎屑、以及細粒的黏土，均導致土壤強度較純石英砂強。希望本實驗資料配合地質調查，可以更有效的掌握填海造陸、填方、河川地區的土壤強度。

## 壹、 研究動機

地球科學課地震災害的單元中有介紹到關於政府公佈的大台北地區土壤液化潛勢危險區，雖然我們的住家附近並無土壤液化的危機，但我們還想更進一步研究台灣其他地方的液化問題，查詢資料發現台北盆地古地質的湖泊與現今觀測到的土壤液化區域不謀而合，所謂的高潛勢區都是在接近河流河道的地區，但卻又有少數地區並非如此。於是想更進一步了解，此現象是否與土壤中的含水量有相對應的關係。

另外，在幾個月以前到海邊玩時看到了小朋友在堆沙堡，我們就在好奇，為何平常隨便堆、隨便倒的沙子，能砌成各式各樣的角度和形狀，經過查詢發現，原來堆沙堡的時候需有一定量的沙配上一一定量的水才能不易倒塌。綜合這

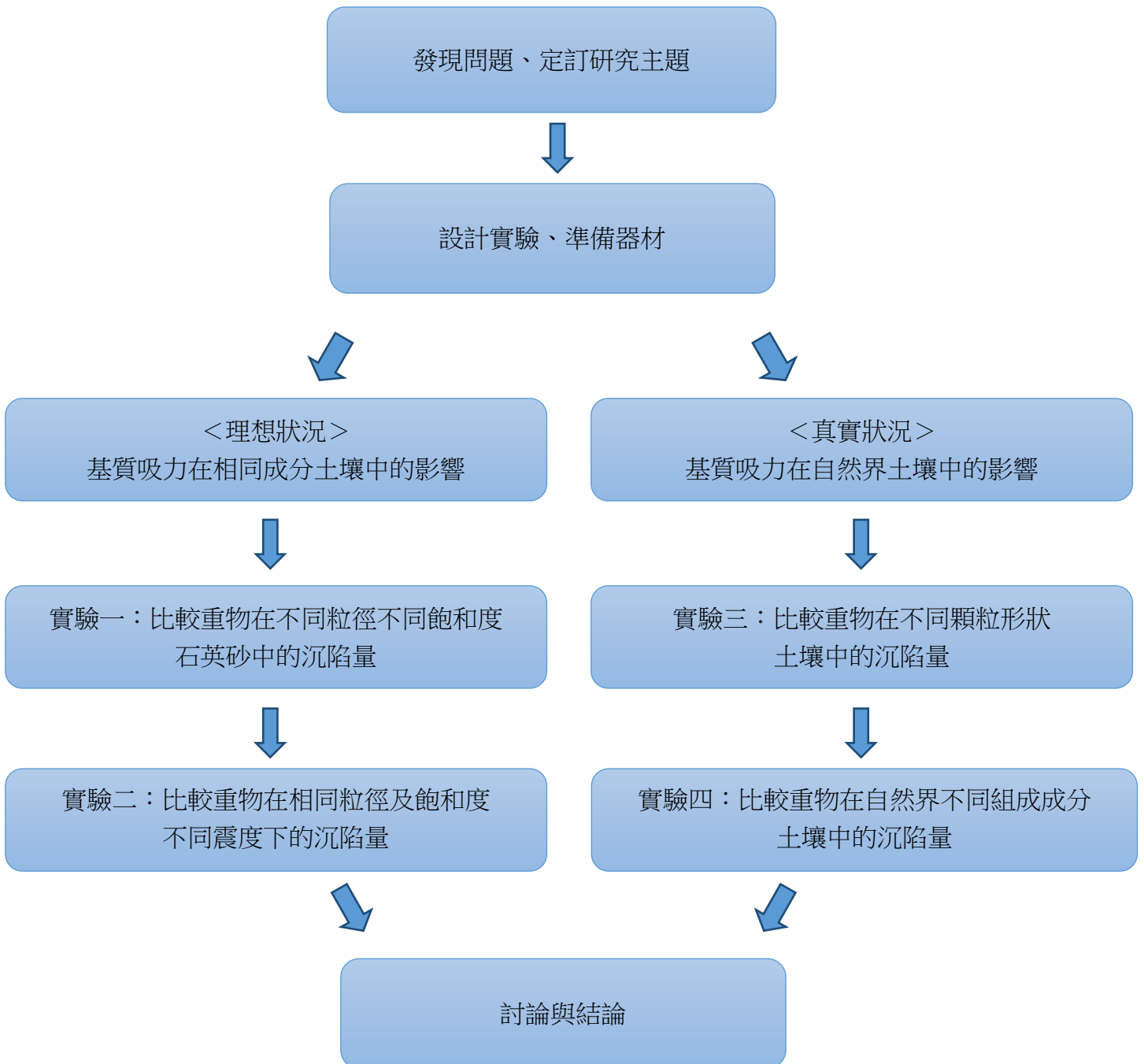


些疑問，我們便好奇到底土壤中水的含量和土壤的強度有甚麼關聯。查詢資料發現水與砂之間，會產生一種張力，影響土壤的強度，而這種力量叫做”基質吸力”，為了更瞭解所謂的”基質吸力”對土壤的影響，我們設計了相關實驗。

## 貳、 研究目的

台灣是一個地震頻仍的地方，希望能藉由簡易的實驗設計，瞭解建築物在不同土壤材質、不同含水量之下的下陷情形。期望能更進一步了解自己的生活在週遭，土壤不同含水量對建築物的影響，讓這些知識更加活用在未來，並對相關問題有所貢獻。

研究步驟：



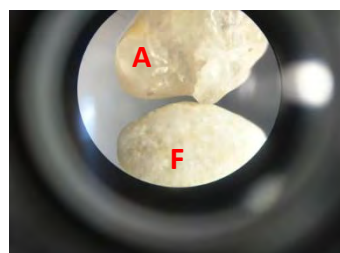
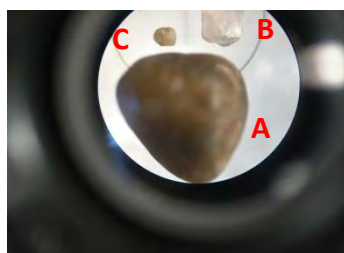
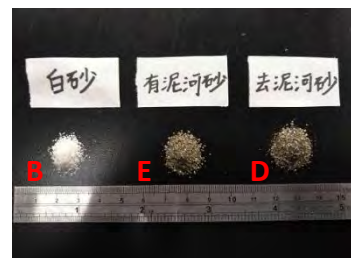
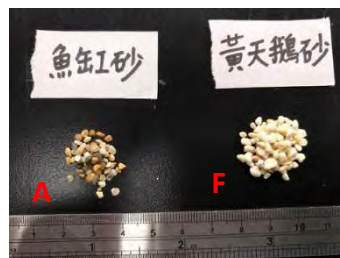
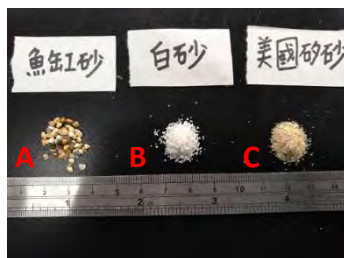
### 參、 研究設備及器材



烘箱、烤箱、燒杯、水、培養皿、濾網、塑膠盒、滴管、湯匙、計算機、鉛塊、配重物、塑膠片、電子秤(上限 150 公克)、尺、自製地震模擬平台。魚缸砂、白砂、美國矽砂、河砂、黃天鵝砂。

不同性質的土壤樣本比較一覽表：

代稱	名稱	粒徑	材質	形狀	粗糙度
A	魚缸砂	2.00~3.00mm(細礫)	石英砂	球狀	粗糙
B	白砂	0.90~1.10mm(粗砂)	石英砂	球狀	粗糙
C	美國矽砂	0.25~0.45mm(中砂)	石英砂	球狀	粗糙
D	河砂(無黏土)	0.90~1.10mm(粗砂)	石英砂	球狀	粗糙
			板岩屑	扁平	粗糙
E	河砂(有黏土)	0.90~1.10mm(粗砂)	同上，含黏土	同上	同上
F	黃天鵝砂	2.50~5.00mm(細礫)	石英砂	扁平	平滑



## 肆、研究過程或方法

### 一、實驗一：比較重物在不同粒徑不同飽和度石英砂中的沉陷量

比較三種材質相同但粒徑大小不同的石英砂進行實驗，分別是樣本 A、B、C。

#### (一)實測 A 的飽和量

##### 1. 實測過程：

準備已經用烤箱烘乾的砂 800 公克，接著再將水加入砂中，進行攪拌，並且壓密，一直到水剛好淹過沙子的高度後，立即停止加水，並記錄加入的水的重量，並將此定義為 100%飽和，而後實驗中的各種”部分飽和”皆定義為 100%飽和水量的 X%，如水量為 100%飽和水量的 1/4，則稱為”25%飽和”。

800 公克乾燥 A						平均
水(公克)	173.27	174.35	173.14	172.41	172.65	173.16

2. 結果：每 800 公克的 A 如須達到 100%飽和，必須加入約 173.16 公克的水。

#### (二)實測 B 的飽和量

##### 1. 實測過程：

800 公克乾燥 B						平均
水(公克)	198.17	198.06	197.42	196.70	198.70	197.81

2. 結果：每 800 公克的 B 如須達到 100%飽和，必須加入約 197.81 公克的水。

#### (三)實測 C 的飽和量

##### 1. 實測過程：

800 公克乾燥 C						平均
水(公克)	180.57	178.89	182.23	181.39	180.56	180.72

2. 結果：每 800 公克的 C 如須達到 100%飽和，必須加入約 180.72 公克的水。

#### (四) 實驗步驟

將烘乾後的砂子放入塑膠盒，利用秤子測量每盒重量 800 公克，加入適當的水，利用塑膠片和尺把所有盒中的砂子刮平保持一樣的高度，並以砝碼或以養樂多罐盛裝砂子配重保持相同質量。接著以地震模擬平台壓縮彈簧至固定伸長量後放開，使震動平台

水平方向來回晃動，以模擬地震情況，震動完後測量重物的最大及最小沉陷量，平均後即為重物平均沉陷量，之後均簡稱為沉陷量。

	
<p>(1)將水加入砂中</p>	<p>(2)將樣本固定在地震平台上</p>
	
<p>(3)進行搖晃</p>	<p>(4)測量並記錄沉陷量</p>

## 二、實驗二：比較重物在相同粒徑及飽和度不同震度下的沉陷量 (以 94%飽和的樣本 C 為例)

(一)改變自製地震平台中的彈簧伸長量，測量其加速度。

(二)將手機固定在地震平台上，使用” vibrometer APP” 測量最大加速度。並錄影

以  $S = 1/2at^2$  計算檢驗其加速度。找出四種加速度的伸長量。

1. 伸長量 40.0 公分時，加速度約為 600 公分/秒平方(七級地震)
2. 伸長量 34.0 公分時，加速度約為 450 公分/秒平方(七級地震)
3. 伸長量 28.0 公分時，加速度約為 300 公分/秒平方(六級地震)
4. 伸長量 22.0 公分時，加速度約為 150 公分/秒平方(五級地震)

(三)重覆實驗一(四)步驟，測量不同加速度下的重物沉陷量。

## 三、實驗三：比較不同顆粒形狀的沉陷量

比較兩種粒徑相似但形狀不同的砂進行實驗，分別是 F(扁平)、A(球狀)

(一)實測樣本 F 的飽和量

1.實測過程：



800 公克乾燥 F						平均
水(公克)	162.40	169.46	160.60	164.60	160.62	163.47

2.結果：每 800 公克的 F 如須達到 100%飽和，必須加入約 163.47 公克的水。

(二)實測樣本 A 的飽和量

1.實測過程：如實驗一(一)

2.結果：每 800 公克的 A 如須達到 100%飽和，必須加入約 173.16 公克的水。

(三)重覆實驗一(四)步驟，量測不同樣本在不同飽和水量下的沉陷量

四、實驗四：比較重物在自然界不同組成成分土壤中的沉陷量

為了更能應用於實際情形，採集天然河砂 E 並與粒徑相似的石英砂 B 進行比較，經過實驗得知，E 沉陷量均較小。觀察後發現，天然河砂 E 的組成成分和顆粒形狀均與 B 不同，且含有大量黏土，為瞭解其影響程度，將樣本中的黏土濾除後，再分為 E 與 D 進行實驗。

(一)實測 B 的飽和量

1.實測過程：如實驗一(二)

2.結果：每 800 公克的 B 達到 100%飽和，必須加入約 197.81 公克的水。

(二)實測 E 的飽和量

1.實測過程：

800 公克乾燥 E						平均
水(公克)	174.35	177.74	178.12	176.51	175.41	176.43

2.結果：每 800 公克的 E 如須達到 100%飽和，須加入約 176.43 公克水。

(三)實測 D 的飽和量

1.實測過程：

800 公克乾燥 D						平均
水(公克)	199.65	205.18	202.42	200.10	207.84	203.13

2.結果：每 800 公克的 D 如須達到 100%飽和，須加入約 203.13 公克水。

(四)重覆實驗一(四)步驟，量測不同樣本在不同飽和水量下的沉陷量。

## 伍、 研究結果

### 一、 實驗一：比較重物在不同粒徑不同飽和度石英砂中的沉陷量

(一)比較重物在 A、B、C 三種土壤中，從 50%飽和~100%飽和的沉陷量

表二、A 在 50%飽和~100%飽和的沉陷量(採用鉛塊平均沉陷量)(單位:公分)

次數 含水量	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	平均沉陷量 (公分)
50%飽和	0.60	0.65	0.6	0.65	0.65	0.63
63%飽和	0.40	0.40	0.50	0.40	0.50	0.44
75%飽和	0.45	0.60	0.55	0.55	0.65	0.56
88%飽和	0.70	0.70	0.75	0.60	0.75	0.70
100%飽和	1.10	1.05	1.20	1.10	1.25	1.14

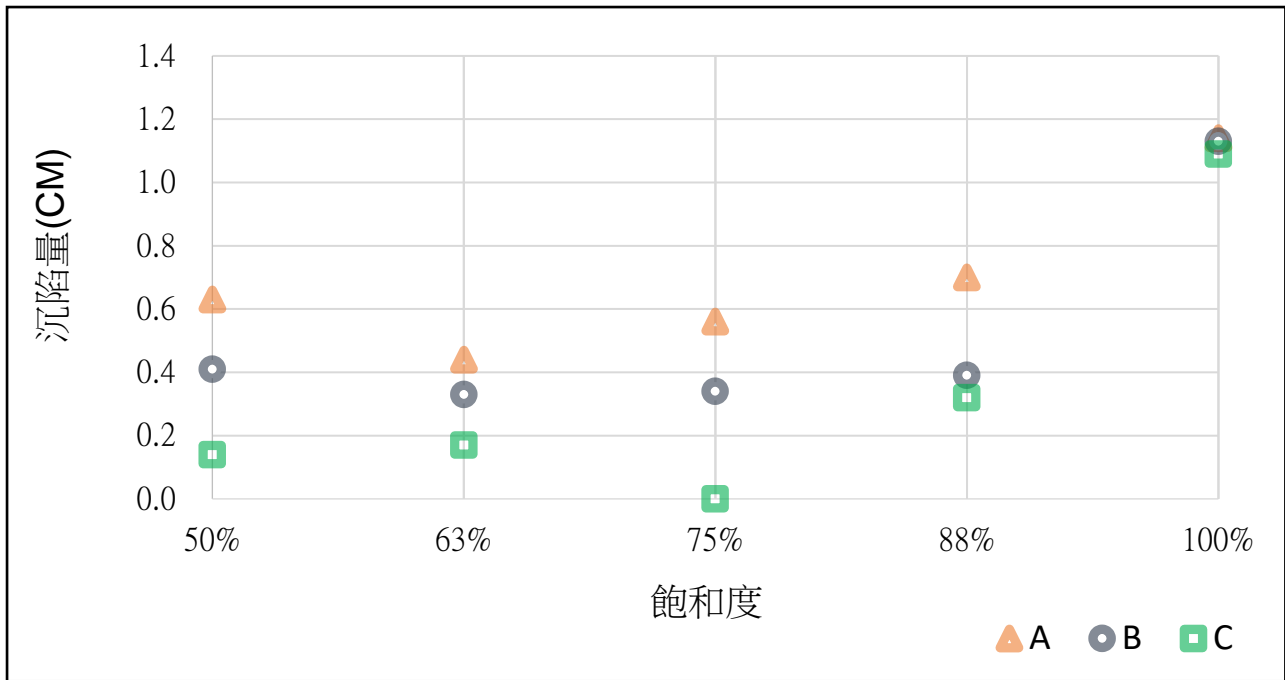
表三、B 在 50%飽和~100%飽和的沉陷量(採用鉛塊平均沉陷量)(單位:公分)

次數 含水量	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	平均沉陷量 (公分)
50%飽和	0.45	0.40	0.45	0.40	0.35	0.41
63%飽和	0.25	0.30	0.35	0.35	0.40	0.33
75%飽和	0.20	0.30	0.50	0.50	0.20	0.34
88%飽和	0.30	0.45	0.35	0.45	0.40	0.39
100%飽和	1.10	1.10	1.20	1.05	1.20	1.13

表四、C 在 50%飽和~100%飽和的沉陷量(採用鉛塊平均沉陷量)(單位:公分)

次數 含水量	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	平均沉陷量 (公分)
50%飽和	0.15	0.20	0.10	0.15	0.10	0.14
63%飽和	0.15	0.10	0.15	0.20	0.25	0.17
75%飽和	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
88%飽和	0.30	0.35	0.35	0.35	0.25	0.32
100%飽和	1.10	1.10	1.10	1.10	1.05	1.09





圖二、A、B、C 在 50%飽和~100%飽和的沉陷量

由圖二可知，粒徑大的 A 在各種水量的沉陷量皆最多，B 次之，粒徑小的 C 則最少。三種樣本在 63%~75%飽和之間的沉陷量較少，在 100%飽和時的沉陷量最多。但水量小於 63%時，反而沉陷量又增加，為了瞭解水量更少時的沉陷情形，故進行下列實驗。結合實驗(一)的資料，繪製成圖三。

(二)比較 A、B、C 在不加水~100%飽和的沉陷量

表五、A 在不加水~100%飽和的沉陷量(採用鉛塊平均沉陷量)(單位:公分)

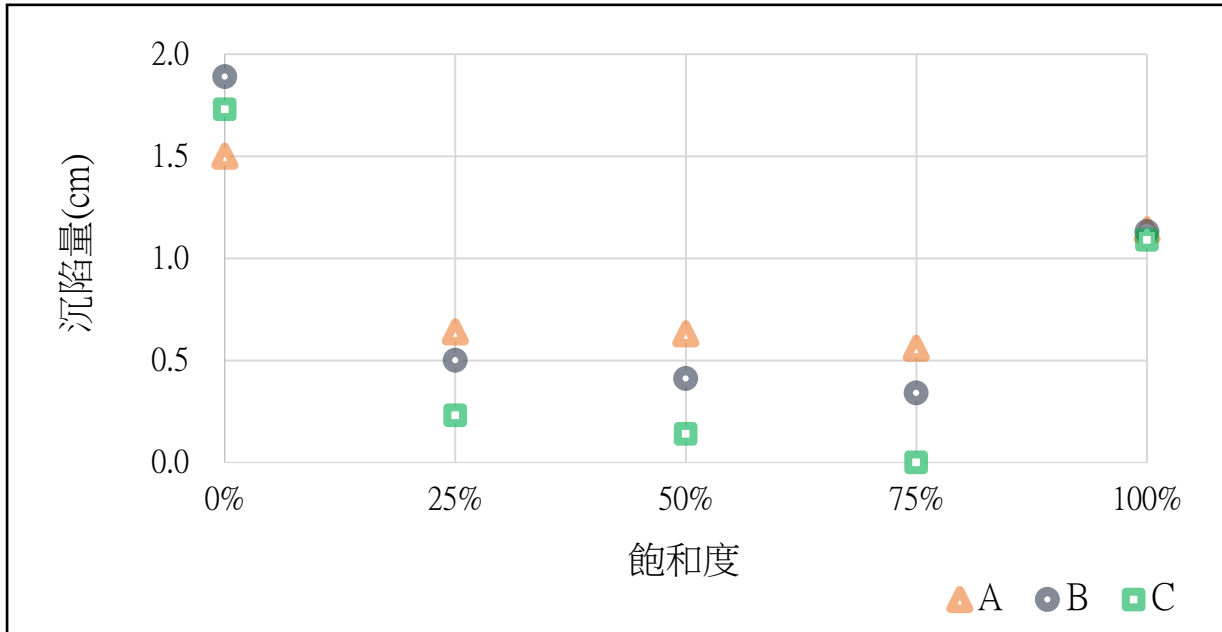
次數 含水量	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	平均沉陷量 (公分)
不加水	1.70	1.65	1.30	1.25	1.60	1.50
25%飽和	0.55	0.60	0.70	0.60	0.75	0.64

表六、B 在不加水~100%飽和的沉陷量(採用鉛塊平均沉陷量)(單位:公分)

次數 含水量	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	平均沉陷量 (公分)
不加水	1.95	1.85	1.85	1.80	2.00	1.89
25%飽和	0.45	0.45	0.55	0.50	0.55	0.50

表七、C 在不加水~100%飽和的沉陷量(採用鉛塊平均沉陷量)(單位:公分)

次數 含水量	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	平均沉陷量 (公分)
不加水	1.80	1.70	1.70	1.65	1.80	1.73
25%飽和	0.20	0.20	0.25	0.30	0.20	0.23



圖三、A、B、C 在不加水~100%飽和的沉陷量

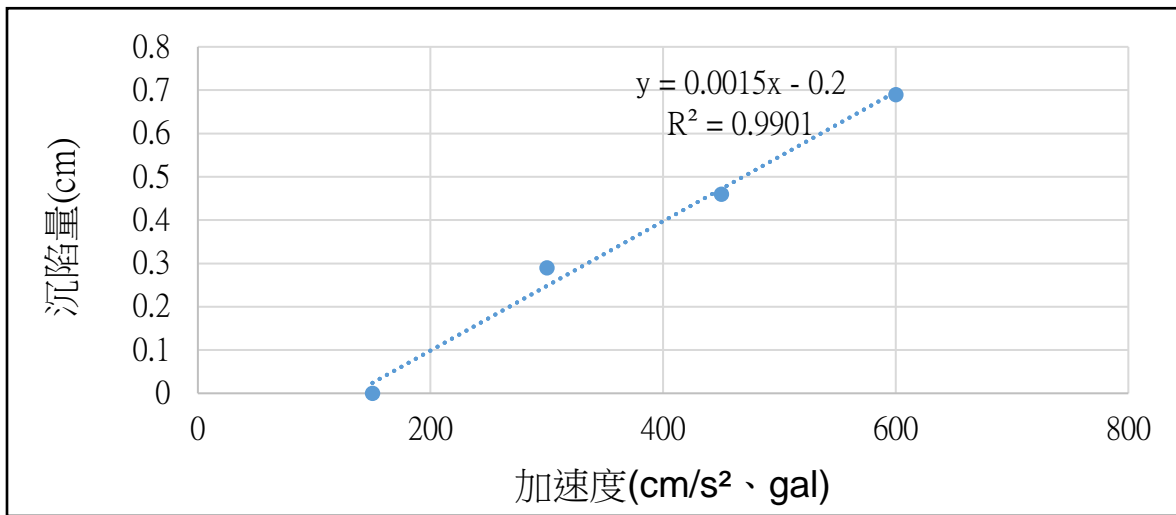
由圖三可知，粒徑大的 A 在 25%飽和以上的沉陷量皆最多，B 次之，C 則最少。

當水量小於 50%時，重物的沉陷量均有增加的情形。而三種樣本在部分飽和時的沉陷量是較少的，在不加水與 100%飽和時的沉陷量較多。

## 二、實驗二：比較重物在相同粒徑及飽和度不同震度下的沉陷量 (以 94%飽和的樣本 C 為例)

表八、不同震度的沉陷量(採用鉛塊平均沉陷量)(單位:公分)

次數 含水量	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	平均沉陷量 (公分)
a = 150 gal	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
a = 300gal	0.20	0.35	0.30	0.25	0.35	0.29
a = 450 gal	0.45	0.45	0.55	0.50	0.35	0.46
a = 600gal	0.70	0.90	0.70	0.60	0.55	0.69



圖四、不同震度的沉陷量

由圖四可知，加速度愈大，沉陷量就愈大，在震度介於 150~600gal 之間時，加速度與沉陷量呈線性關係，關係式為  $y = 0.0015x - 0.2$ ，相關係數可達 0.9901。

### 三、實驗三：比較重物在不同顆粒形狀土壤中的沉陷量

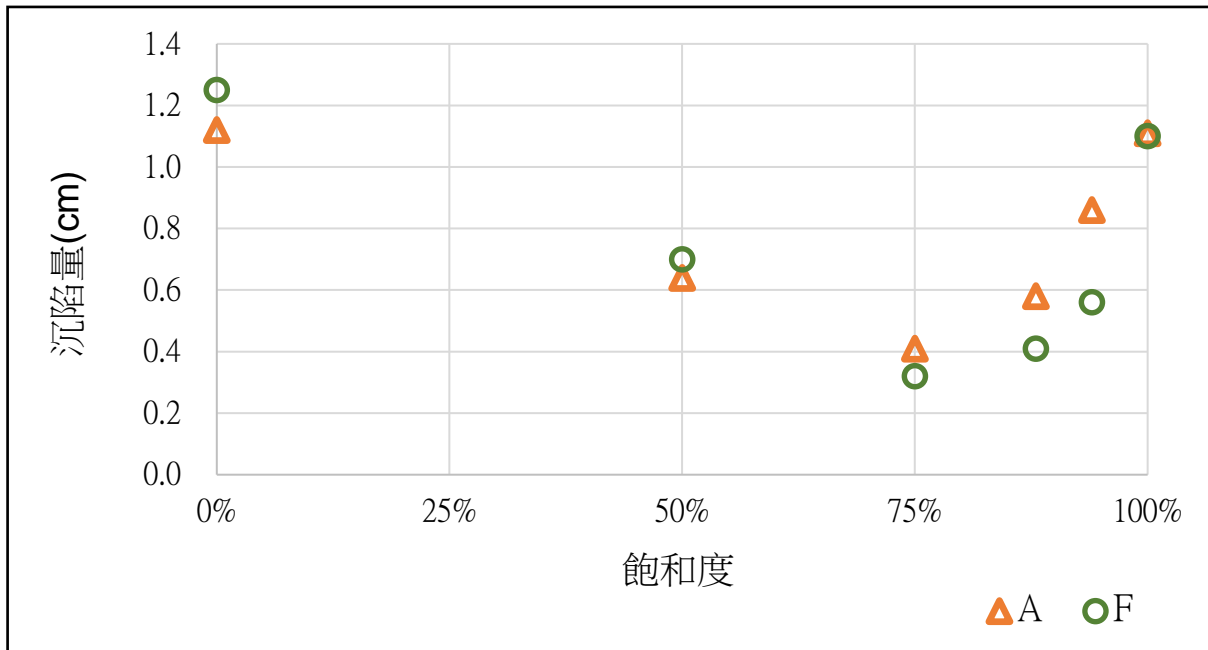
比較 F 和 A 在 50%飽和~100%飽和的沉陷量

表九、F 在 50%飽和~100%飽和的沉陷量(採用鉛塊平均沉陷量)(單位:公分)

次數 含水量	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	平均沉陷量 (公分)
不加水	0.93	1.35	1.10	1.43	1.40	1.25
50%飽和	0.63	0.68	0.65	0.83	0.73	0.70
75%飽和	0.35	0.25	0.25	0.40	0.35	0.32
88%飽和	0.50	0.30	0.40	0.45	0.38	0.41
94%飽和	0.55	0.45	0.70	0.55	0.53	0.56
100%飽和	1.05	1.10	1.13	1.10	1.10	1.10

表十、A 在 50%飽和~100%飽和的沉陷量(採用鉛塊平均沉陷量)(單位:公分)

次數 含水量	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	平均沉陷量 (公分)
不加水	0.80	1.20	1.20	1.25	1.05	1.12
50%飽和	0.60	0.95	0.50	0.65	0.50	0.64
75%飽和	0.40	0.50	0.40	0.35	0.40	0.41
88%飽和	0.60	0.58	0.63	0.45	0.65	0.58
94%飽和	0.80	0.90	0.80	0.85	0.95	0.86
100%飽和	1.10	1.10	1.10	1.10	1.14	1.11



圖五、不同顆粒形狀的沉陷量

由圖五可知，兩種砂皆在 75% 有最少的沉陷量。球狀 A 在 75% 飽和以上水量後的沉陷量皆較多，在 75% 飽和以下則是扁平的 F 較多。

#### 四、實驗四：比較重物在自然界不同組成成分土壤中的沉陷量

表十一、B 在 50% 飽和~100% 飽和的沉陷量(採用鉛塊平均沉陷量)(單位:公分)

次數 含水量	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	平均沉陷量 (公分)
50% 飽和	0.45	0.40	0.45	0.40	0.35	0.41
63% 飽和	0.25	0.30	0.35	0.35	0.40	0.33
75% 飽和	0.20	0.30	0.50	0.50	0.20	0.34
88% 飽和	0.30	0.45	0.35	0.45	0.40	0.39
100% 飽和	1.10	1.10	1.20	1.05	1.20	1.13

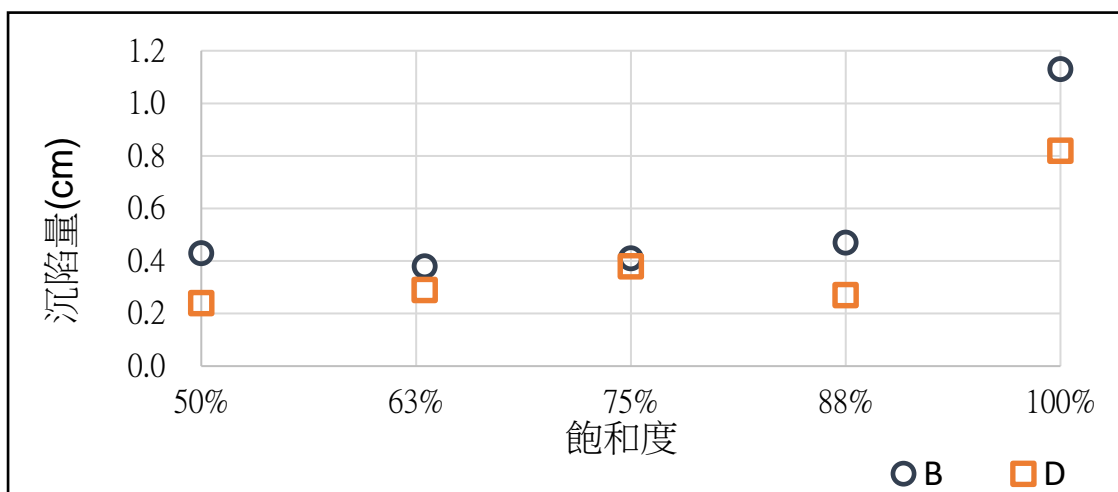
表十二、E 在 50% 飽和~100% 飽和的沉陷量(採用鉛塊平均沉陷量)(單位:公分)

次數 含水量	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	平均沉陷量 (公分)
50% 飽和	0.25	0.30	0.30	0.30	0.15	0.26
63% 飽和	0.15	0.10	0.25	0.20	0.25	0.19
75% 飽和	0.25	0.15	0.20	0.30	0.20	0.22
88% 飽和	0.15	0.25	0.35	0.25	0.20	0.24
100% 飽和	0.65	0.80	0.90	0.80	0.70	0.77

表十三、D 在 50%飽和~100%飽和的沉陷量(採用鉛塊平均沉陷量)(單位:公分)

次數 含水量	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	平均沉陷量 (公分)
50%飽和	0.25	0.20	0.25	0.25	0.25	0.24
63%飽和	0.25	0.30	0.30	0.35	0.25	0.29
75%飽和	0.35	0.35	0.40	0.35	0.45	0.38
88%飽和	0.30	0.20	0.35	0.20	0.30	0.27
100%飽和	0.90	0.80	0.80	0.85	0.75	0.82

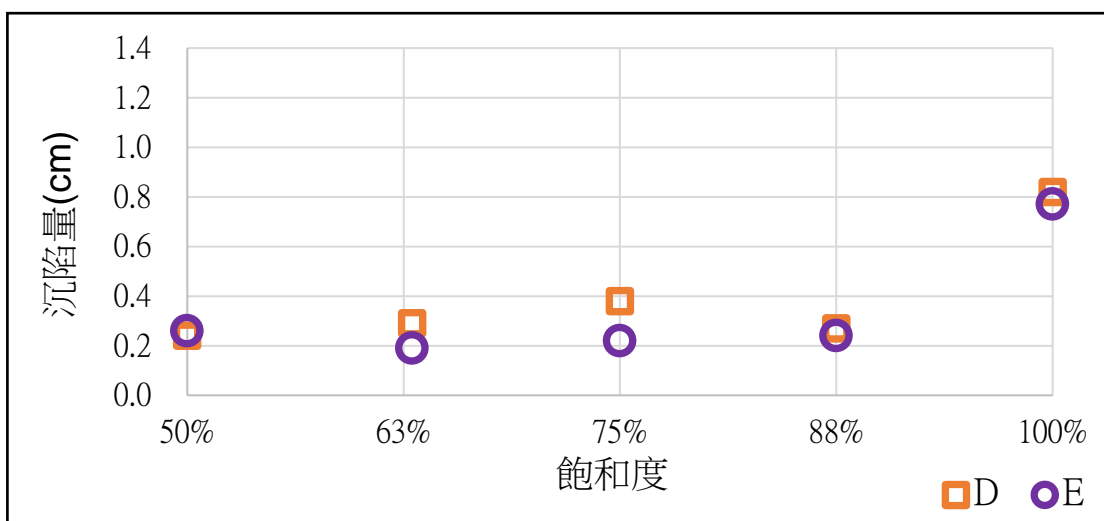
(一)比較 B、D 在 50%飽和~100%飽和的沉陷量



圖六、比較 B、D 在 50%飽和~100%飽和的沉陷量

由圖六可知，石英砂 B 的沉陷量皆比天然河砂 D 多。

(二)比較河 D、E 在 50%飽和~100%飽和的沉陷量



圖七、比較 D、E 在 50%飽和~100%飽和的沉陷量

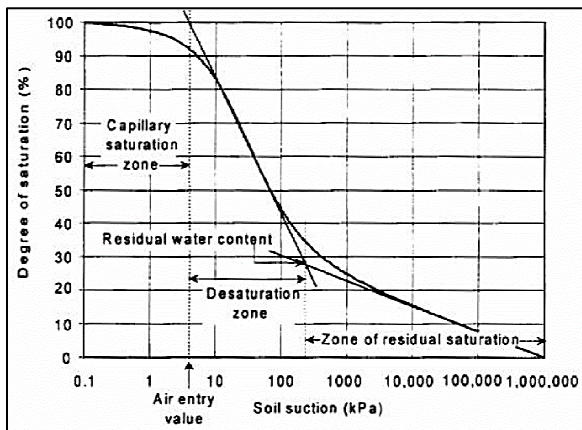
由圖七可知，不含泥的 D 的沉陷量較含泥的 E 多。

## 陸、 討論

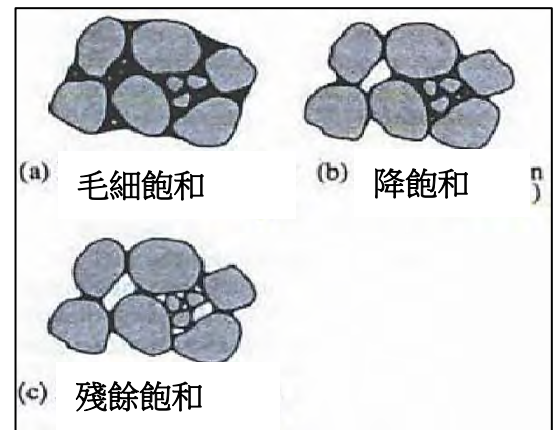
### 一、 實驗一：比較重物在不同粒徑不同飽和度石英砂中的沉陷量

#### (一)A、B、C 在 50%飽和~100%飽和的沉陷量

1. 所有粒徑的土壤在 100%飽和時，重物的沉陷量均較多，推論是因為 100%飽和時土壤發生了液化而使沉陷量較多。
2. 所有粒徑的土壤在 63%~75%飽和時的沉陷量均最少，且愈接近 100%飽和時，沉陷量愈大，是因為基質吸力的大小受含水比例影響(如圖八、九)(鄒，2007)。基質吸力是指在部分飽和的土壤狀態下，水分和空氣會在土壤的顆粒與顆粒間的孔隙中，產生毛細現象。由圖八可知，在水量高於 90%飽和時，處於毛細飽和階段，此時期愈接近 100%飽和，基質吸力愈小，土壤強度較弱，故沉陷量較大。



圖八、土壤在不同含水量的基質吸力圖



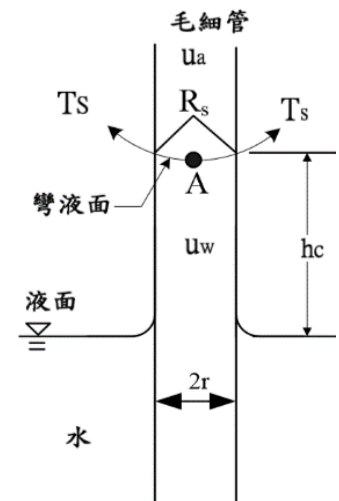
圖九、不同飽和階段示意圖

(a:毛細飽和 b:降飽和 c:殘餘飽和)

3. 顆粒最細的中砂 C 在部分飽和時，沉陷皆最少，應與顆粒間的基質吸力有關。基質吸力受顆粒間水的表面張力及粒徑大小影響，而顆粒粗的細礫 A，因孔隙較大，故基質吸力較小，較易沉陷。如圖十(陳，2009)。

$$\text{公式：} u=2T_s/r$$

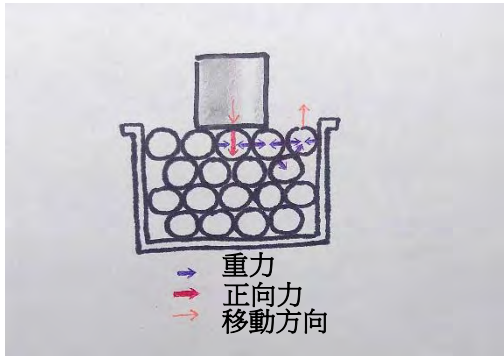
(u 為基質吸力、 $T_s$  為表面張力、 $r$  為毛細管半徑)



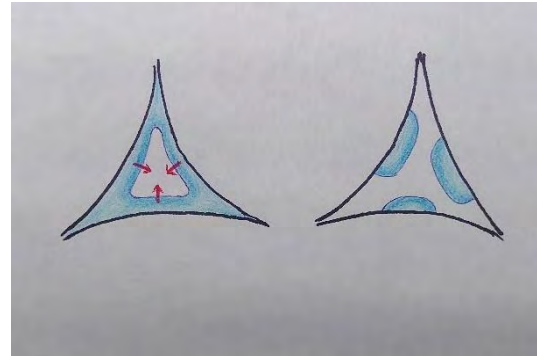
圖十、毛細現象示意圖

(二) 比較樣本 A、B、C，即細礫、粗砂、中砂在不加水~100%飽和的沉陷量

當水量少於 25%飽和時，會產生類似乾沙的狀況，在震動的過程中，建築物會受重力作用排開沙土往下沉陷。可能是因為此時孔隙中的水分較為分散(如圖十二)，無法產生足夠的基質吸力將砂粒聚在一起，而使土壤強度減小。

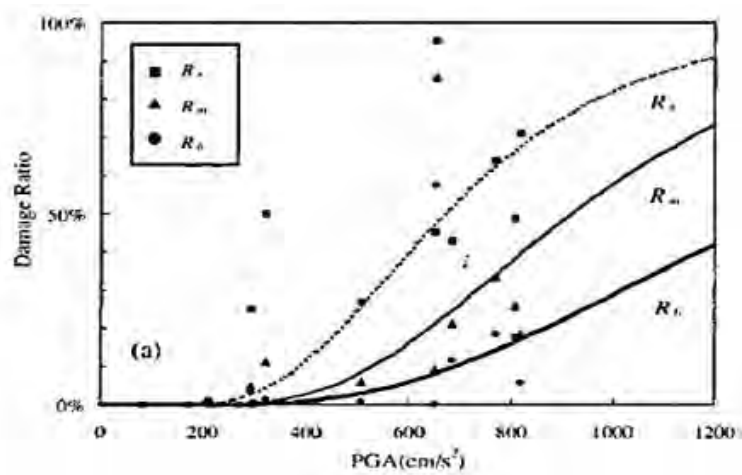


圖十一、重物沉陷示意圖



圖十二、部分飽和時孔隙中水分分布情形

二、實驗二：比較重物在相同粒徑及飽和度不同震度下的沉陷量 (以 94%飽和的樣本 C 為例)



圖十三、震度與災損關係圖

由實驗可知，當加速度愈大時，建築物沉陷量也愈大。繪製成圖表後發現，加速度要大到一定程度時重物才會開始沉陷，並且可以看到加速度和沉陷量呈線性關係，此圖線性回歸公式為  $y=0.0015x-0.2$ ，相關係數為 0.9901。本次實驗所測的加速度為台灣地區常發生液化的地震加速度範圍，加速度在 150 到 600gal 區間對應到前人研究中的建物易損曲線(圖十三)(羅，2005)，的是接近線性。而加速度更大時是否也符合研究中的易損曲線，因破壞程度已達飽和，災害則有趨緩的現象，呈現指數關係，則有待進一步研究。



### 三、實驗三：比較重物在不同顆粒形狀土壤中的沉陷量

在 75%飽和~100%飽和時因為 A 顆粒形狀為球狀，我們推論是因為顆粒與顆粒之間的縫隙較大，相較顆粒形狀較扁平的 F 更容易沉陷，如圖十四。但在不加水~75%飽和，反而是扁平的 F 沉陷量大，推論是因為顆粒與顆粒間的水分不多，沒有充滿在孔隙裡，此時基質吸力影響較小，所以會受到摩擦力影響，A 的表面較粗糙，如圖十五，所以沉陷較少。



圖十四、左為 A(球狀)，右為 F(扁平)

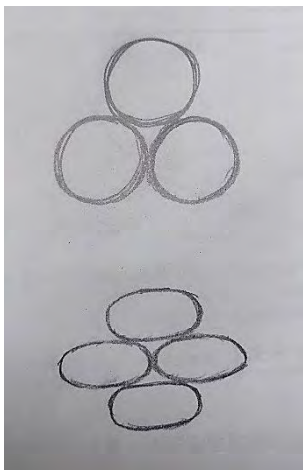


圖十五、上為 A(粗糙)，下為 F(光滑)

### 四、實驗四：比較重物在自然界不同組成成分土壤中的沉陷量

(一) D 含有板岩碎屑，而板岩表面較粗糙，摩擦力就會較大，且形狀皆為扁平狀，所以顆粒間的孔隙較小，所以沉陷量較小。如圖十六。

(二) E 含有較細粒的黏土，經過資料查詢，黏土因具有黏滯力的存在，且顆粒細，使基質吸力更大，故土壤不容易液化，如圖十七(陳，2009)。



圖十六、顆粒形狀與孔隙大小示意圖

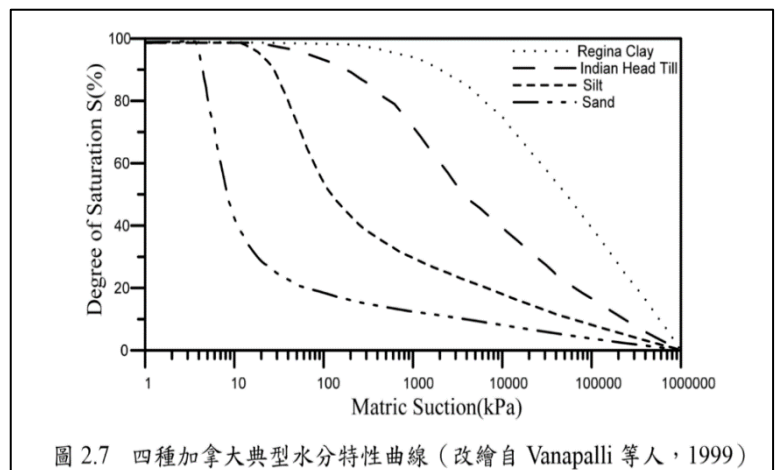


圖 2.7 四種加拿大典型水分特性曲線 (改繪自 Vanapalli 等人, 1999)

圖十七、不同水量、不同粒徑的基質吸力關係圖

## 柒、 結論

### 一、實驗結論

- (一) 土壤在 100%飽和並晃動時，土壤產生液化作用，此時因孔隙水壓上升，土壤顆粒與顆粒之間作用力降至零，使土壤強度驟降，產生下沉。土壤在含有部分水量並晃動時，未飽和的水與水之間的張力和土壤間產生了基質吸力，使土壤強度增加而使沉陷量減少。土壤在不含水並晃動時，顆粒與顆粒間的作用力中沒有了基質吸力的影響，土壤強度減弱，造成重力大於正向力而產生沉陷。
- (二) 基質吸力會因土壤顆粒大小而有所改變，當土壤顆粒愈小時，基質吸力會增大，土壤強度增強，沉陷量較少；當土壤顆粒愈大時，基質吸力會減小，土壤強度減弱，沉陷量較大。
- (三) 在有較大的地震加速度時，因晃動給予土壤的能量較多，而使建物易沉陷；在有較小的地震加速度時，因晃動給予土壤的能量較少，而使建物不易下沉。在 150~600gal 間，加速度與沉陷量呈線性關係。
- (四) 土壤的顆粒形狀是扁平或是球狀，也會影響沉陷的情形。顆粒形狀扁平時，孔隙較小，導致基質吸力較大，土壤強度增強，沉陷量較小；顆粒形狀為球形時，孔隙較大，導致基質吸力變小，土壤強度減弱，沉陷量較大。
- (五) 沉陷量也會因成分不同而改變。在自然土壤(河砂)中，因其成分除石英砂外，也含有扁平、粗糙的板岩碎屑，導致沉陷量較少。而若其中又含有黏土這類顆粒大小極細的土壤，則會因較大基質吸力產生黏滯力，也會使土壤強度增強而沉陷量較小。

### 二、心得

經過實驗後，我們發現在中砂到細礫的範圍內，顆粒較小的土壤，穩定度較好，但是一旦發生液化，無論顆粒粗細，皆會產生大規模的沉陷。未來我們希望再針對不同震度及不同粒徑，作更完整的實驗，希望這個階段的實驗結果，能應用在防災相關的問題上，讓更多人能免於危難之中。

## 捌、 參考資料及其他

- 1.地質知識服務網地質百科 <https://twgeoref.moeacgs.gov.tw/GipOpenWeb/wSite/mp?mp=105>
- 2.土壤液化問與答 <https://www.liquid.net.tw/CGSSL/QA.html>
- 3.土壤液化潛勢查詢系統 <https://www.liquid.net.tw/CGSSL/Public/process/Mainpage.aspx>
- 4.泛科學 <https://pansci.asia/archives/93837>
- 5.陳尚亦(2009)。粒徑分佈狀況對不飽和崩積土壤吸力之研究。國立台灣科技大學營建工程系碩士論文。
- 6.石秉根(2002)。顆粒粒徑對飽和砂質土壤液化相關行為影響之研究。朝陽科技大學營建工程系碩士論文。
- 7.羅啟源(2005)。以等建度與等母體數建立建築物易損曲線-以及級地震為例。國立中央大學土木工程學系碩士論文。
- 8.鄒鄭翰(2007)。部分飽和土壤之精簡力學模式與應用。國立交通大學土木工程學系碩士論文。

## 【評語】 051901

本研究對於土壤液化與含水量的問題，進行推論假設，提出明確且符合科學的方法加以驗證，實驗的設計及結果的分析有完整的表現。是一個很好的科學問題習作。唯本研究命題平凡，主題建議加入更多創意，增加吸引力。



# 摘要

地震常伴隨發生土壤液化。我們發現除了飽和土壤的液化會使土壤失去支撐力而造成建築物沉陷之外，土壤的強度也會隨含水量不同而變化，此現象是受到水的表面張力在土壤顆粒之間產生的基質吸力所影響。我們為了瞭解土壤中含水量影響的情形，設計相關實驗，以建築物的沉陷量檢測土壤的強度變化。實驗推知：當土壤部分飽和時，因水的基質吸力而使土壤強度增強；土壤粒徑越小時，基質吸力愈大，使土壤強度增強；在地震加速度介於150~600gal間時，加速度與建物沉陷量呈線性關係。而在天然土壤中，因含有扁平、粗糙的板岩碎屑、以及細粒的黏土，均導致土壤強度較純石英砂強。

## 壹、研究動機

我們從政府公佈的大台北地區土壤液化潛勢危險區，發現所謂的高潛勢區都是在接近河流河道的地區，但卻又有少數地區並非如此。另外也好奇為何堆沙堡的時候沙子需配上少許的水才能不易倒塌。所以我們想研究到底土壤中水的含量和土壤的強度有甚麼關聯，查詢資料發現水與砂之間有”基質吸力”影響土壤強度，為了更瞭解所謂的”基質吸力”的影響，我們設計了相關實驗。

## 貳、研究目的

台灣是一個地震頻仍的地方，希望能藉由簡易的實驗設計，瞭解建築物在不同土壤材質、不同含水量之下的下陷情形。期望能更進一步了解自己的生週遭，土壤不同含水量對建築物的影響，讓這些知識更加活用在未來，並對相關問題有所貢獻。研究步驟：

發現問題、訂定研究主題

設計實驗、準備器材

<理想狀況>  
基質吸力在相同成分土壤中的影響

<真實狀況>  
基質吸力在自然界土壤中的影響

實驗一：比較重物在不同粒徑不同飽和度石英砂中的沉陷量

實驗三：比較重物在不同顆粒形狀土壤中的沉陷量

實驗二：比較重物在不同震度下的沉陷量

實驗四：比較重物在自然界不同成分土壤中的沉陷量

討論與結論

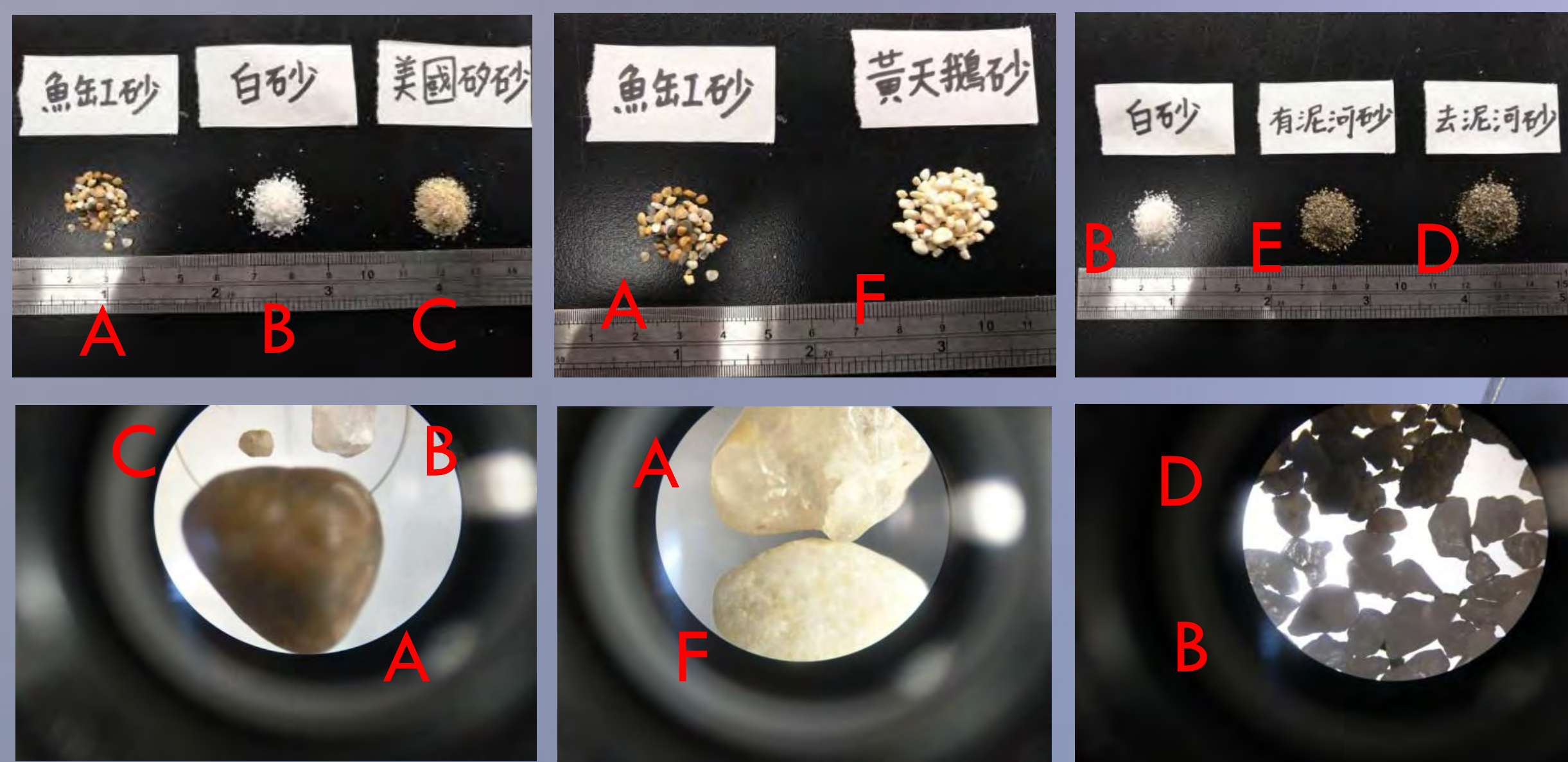
## 參、研究設備及器材



烤箱、燒杯、水、培養皿、濾網、塑膠盒、滴管、湯匙、計算機、鉛塊、配重物、塑膠片、電子秤(上限150公克)、尺、自製地震模擬平台(伸長度34公分時，加速度約為450gal)。

不同性質的土壤樣本比較一覽表：

代稱	名稱	粒徑	材質	形狀	粗糙度
A	魚缸砂	2.00~3.00mm (細礫)	石英砂	球狀	粗糙
B	白砂	0.90~1.10mm (粗砂)	石英砂	球狀	粗糙
C	美國砂砂	0.25~0.45mm (中砂)	石英砂	球狀	粗糙
D	河砂 (無黏土)	0.90~1.10mm (粗砂)	石英砂	球狀	粗糙
			板岩屑	扁平	粗糙
E	河砂 (有黏土)	0.90~1.10mm (粗砂)	同上， 含黏土	同上	同上
F	黃天鵝砂	2.50~5.00mm (細礫)	石英砂	扁平	平滑



## 肆、研究過程或方法

定義：

### 一、飽和度

在800公克乾砂中，加水進行攪拌、壓密至孔隙中充滿水，此時加入的水量即為 100%飽和。而後實驗中的各種「部分飽和」皆定義為100%飽和水量的X%，如水量為100%飽和水量的1/4，則稱為「25%飽和」。每800公克的A、B、C、D、E、F如需達100%飽和，分別需加入173.16、197.81、180.72、203.13、176.43、163.47公克的水。

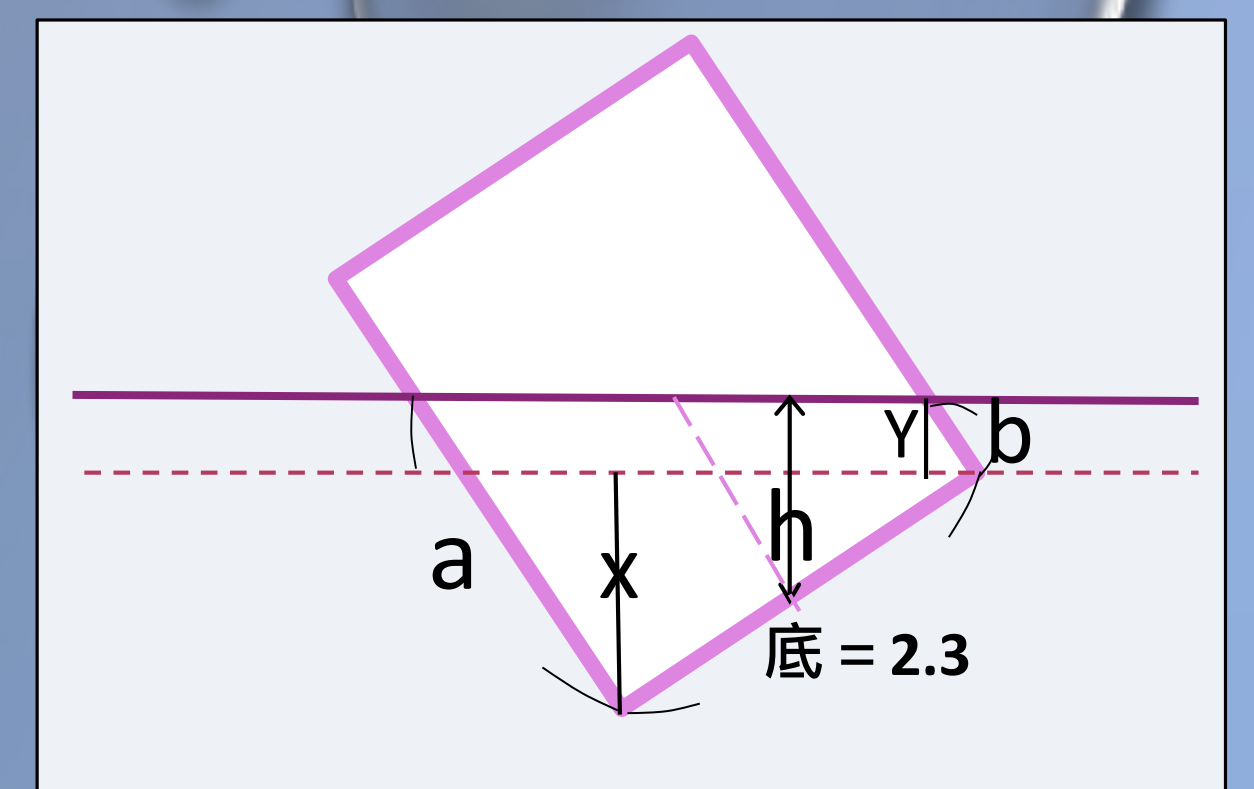
### 二、沉陷量

測量重物的最大沉陷量a及最小沉陷量b，轉換為垂直平均沉陷量：

$$h = \frac{x}{2} + Y = \frac{2.3(a+b)}{2\sqrt{(a-b)^2 + (2.3)^2}}$$
，此即為重物沉陷量，均簡稱為沉陷量。

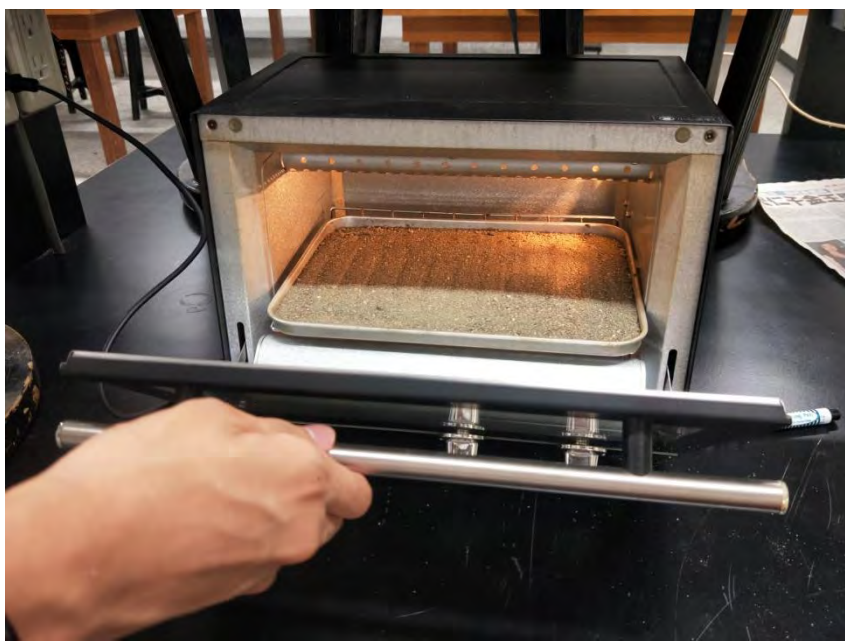




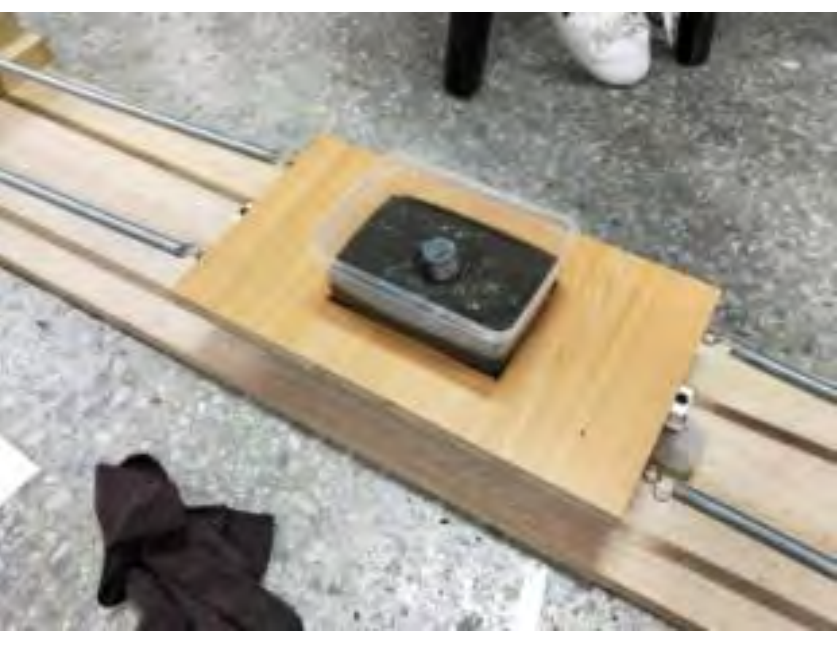

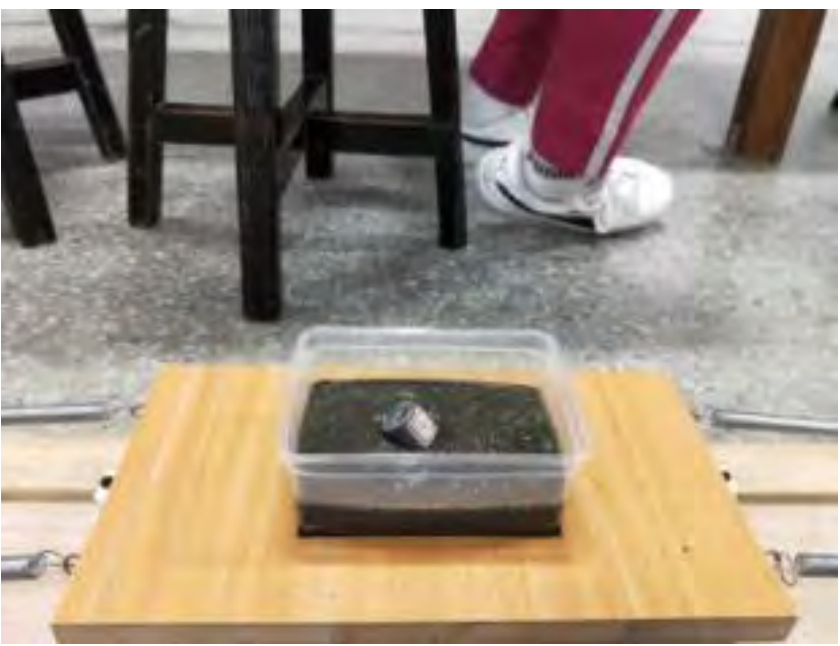
### 三、加速度

改變自製地震平台中的彈簧伸長度，測量其加速度。將手機固定在搖晃平台上，使用「vibrometer APP」測量最大加速度。伸長度40.0、34.0、28.0、22.0公分時，加速度分別約為600gal(七級地震)、450gal(七級地震)、300gal(六級地震)、150gal(五級地震)。



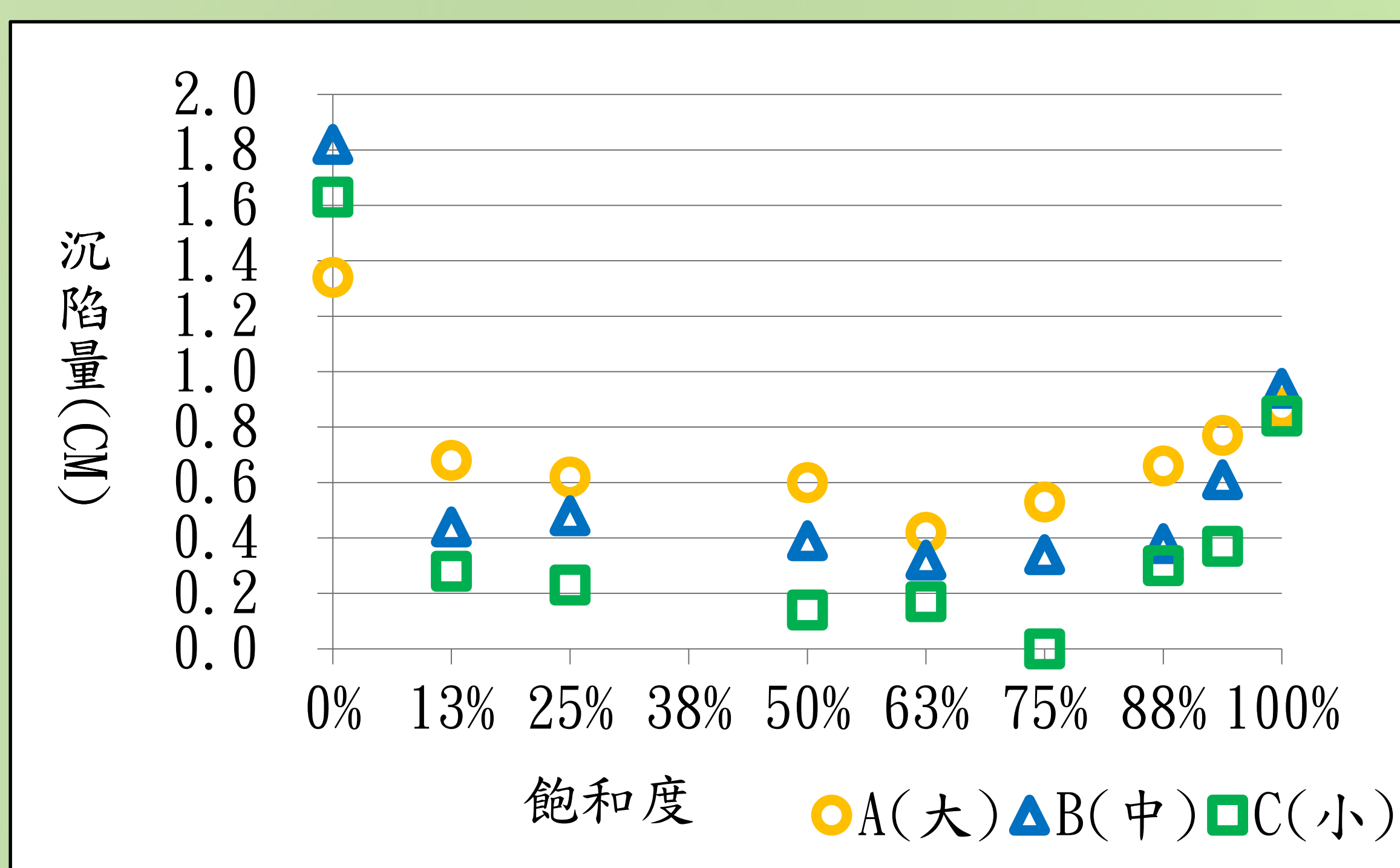


實驗過程：

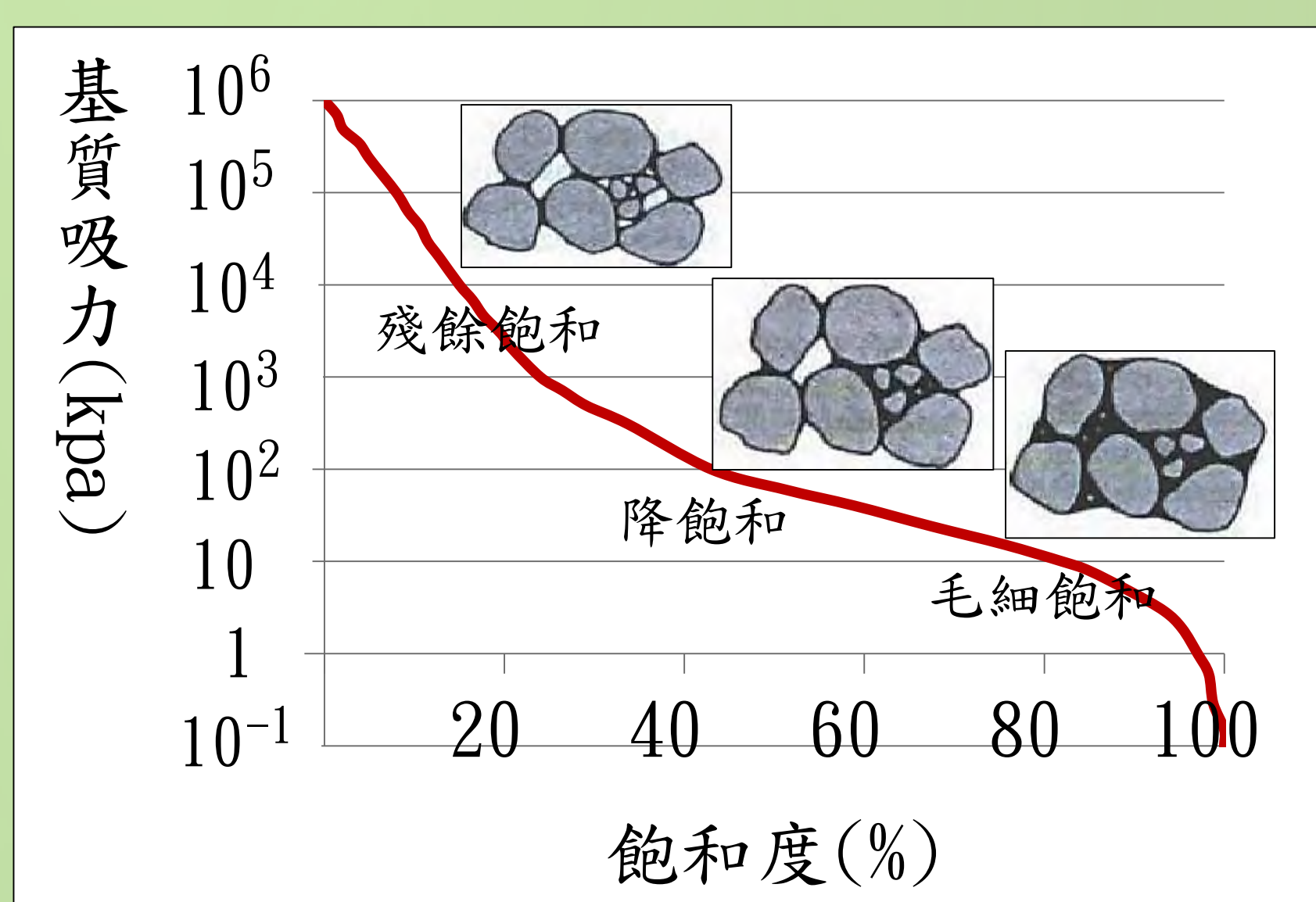
			
(1)將砂烘乾	(2)秤重800公克	(3)加水、攪拌壓密、測飽和水量	(4)加入適當比例的水至砂中
			
(5)再加入適當的配重	(6)將樣本固定在地震平台上	(7)將彈簧壓縮到固定伸長量，進行搖晃	(8)測量並紀錄沉陷量

伍、研究結果與討論

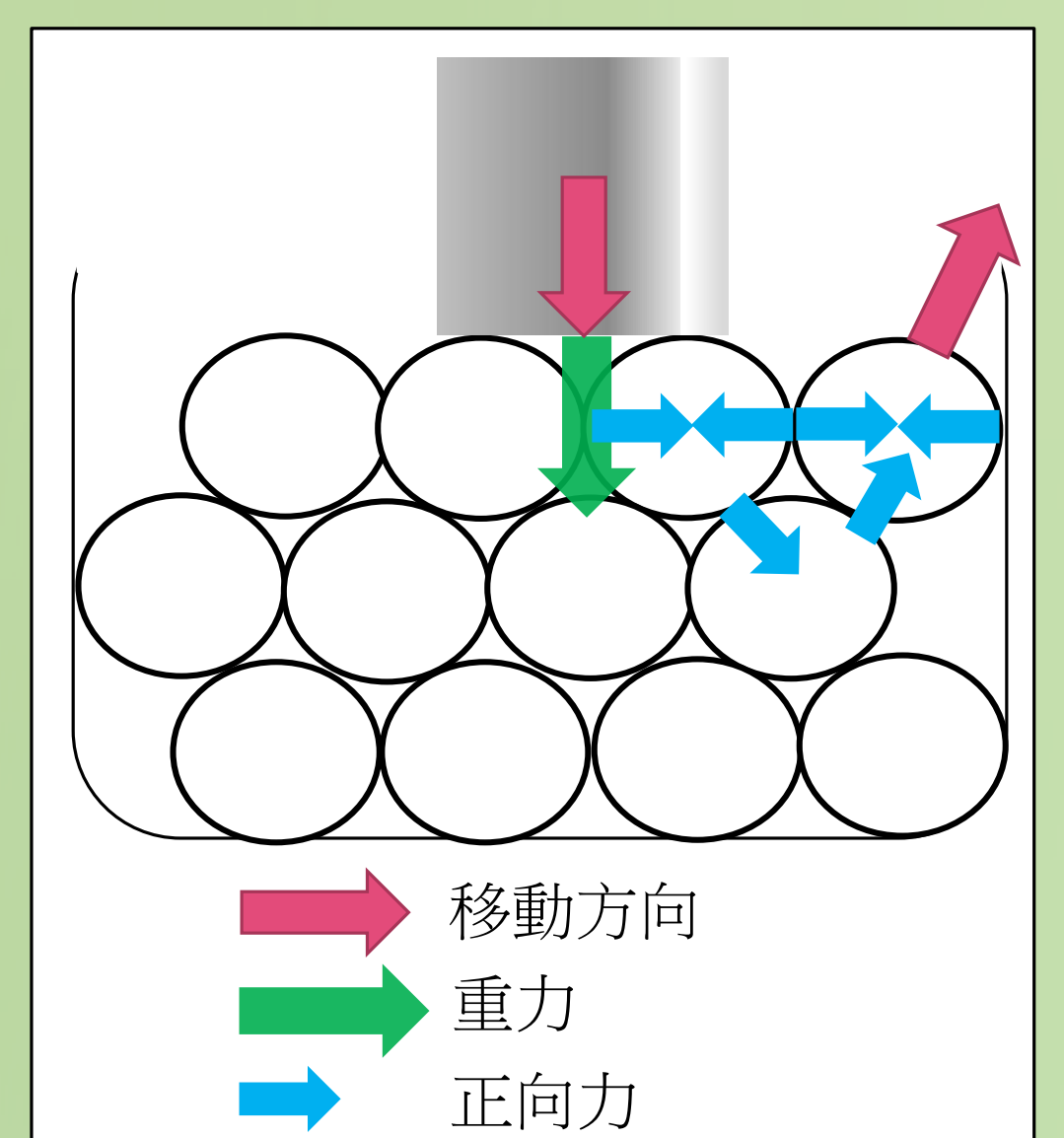
實驗一：比較重物在不同粒徑不同飽和度石英砂中的沉陷量



圖一、重物在不同粒徑(A、B、C)不同飽和度的沉陷量



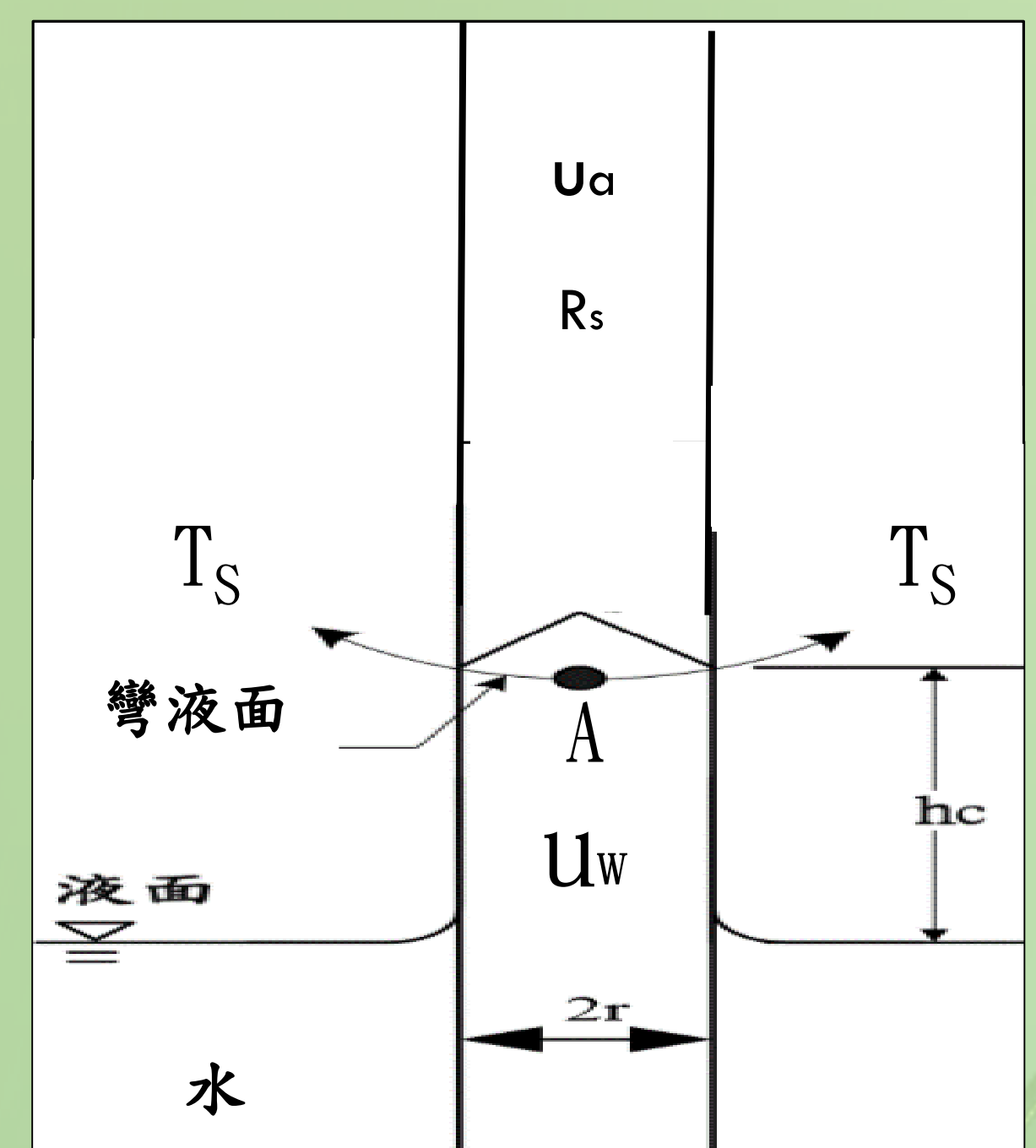
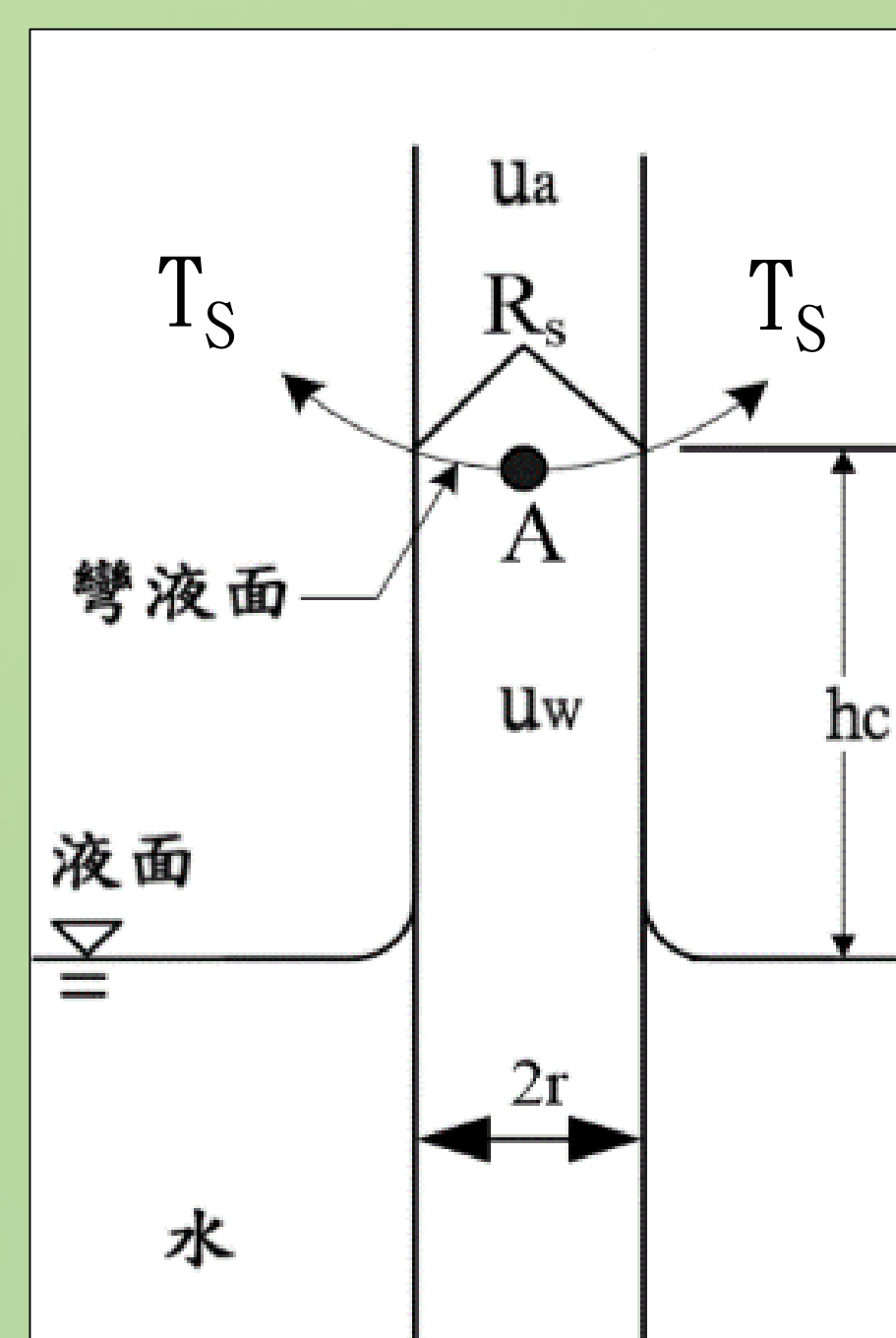
圖二、土壤在不同含水量的基質吸力圖 (改繪自鄒，2007)



圖三、重物沉陷示意圖

(一)比較重物在50%飽和~100%飽和的沉陷量

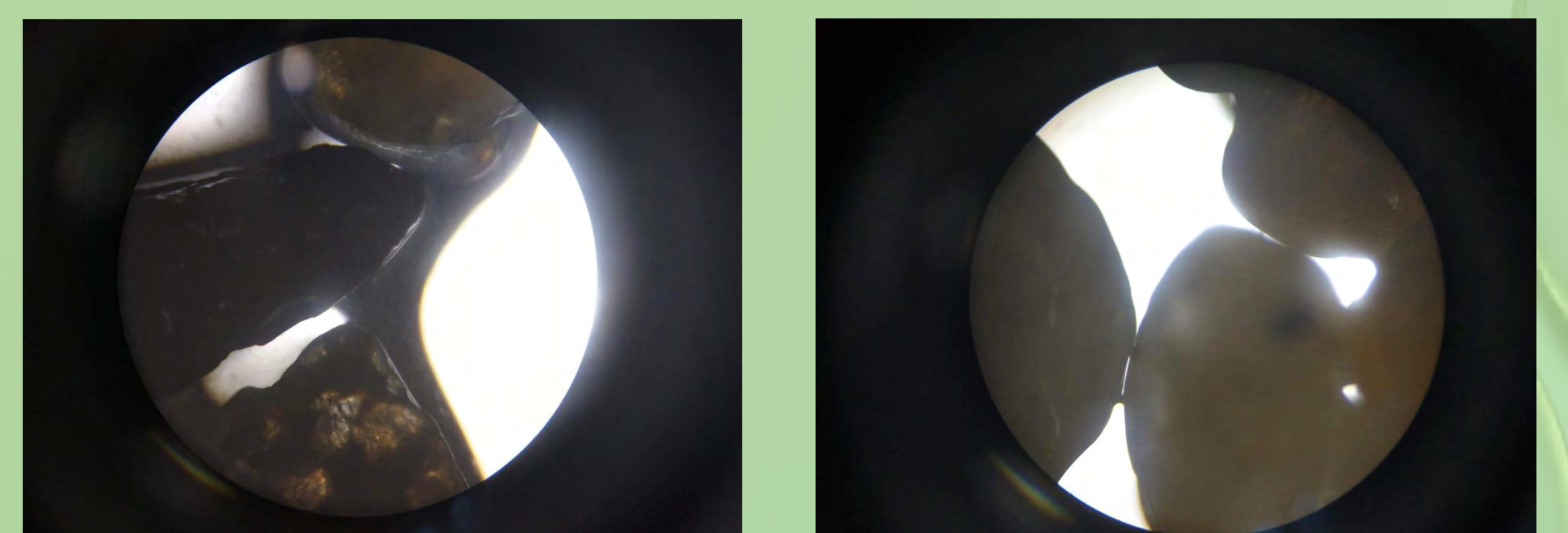
- 所有粒徑的砂在100%飽和時，發生了液化而使沉陷量較多。
- 顆粒最細的C砂在部分飽和時，沉陷皆最少，應與顆粒間的基質吸力有關。顆粒愈細，單位體積內的總表面積愈大，所以基質吸力較大；且顆粒細的C砂因作用在顆粒間表面張力的分力較大，故基質吸力較大，所以較不易沉陷。如圖四(陳，2009)。公式： $u=2Ts/r$  (u為基質吸力、Ts為表面張力、r為毛細管半徑)
- 所有粒徑的土壤在75%飽和後愈接近100%飽和時，沉陷量愈大，是因為基質吸力受含水比例影響，由圖二(鄒，2007)可知，在水量高於75%飽和時，處於毛細飽和階段，此時愈接近100%飽和，基質吸力愈小。



圖四、毛細現象示意圖(左為細毛細管，右為粗毛細管)

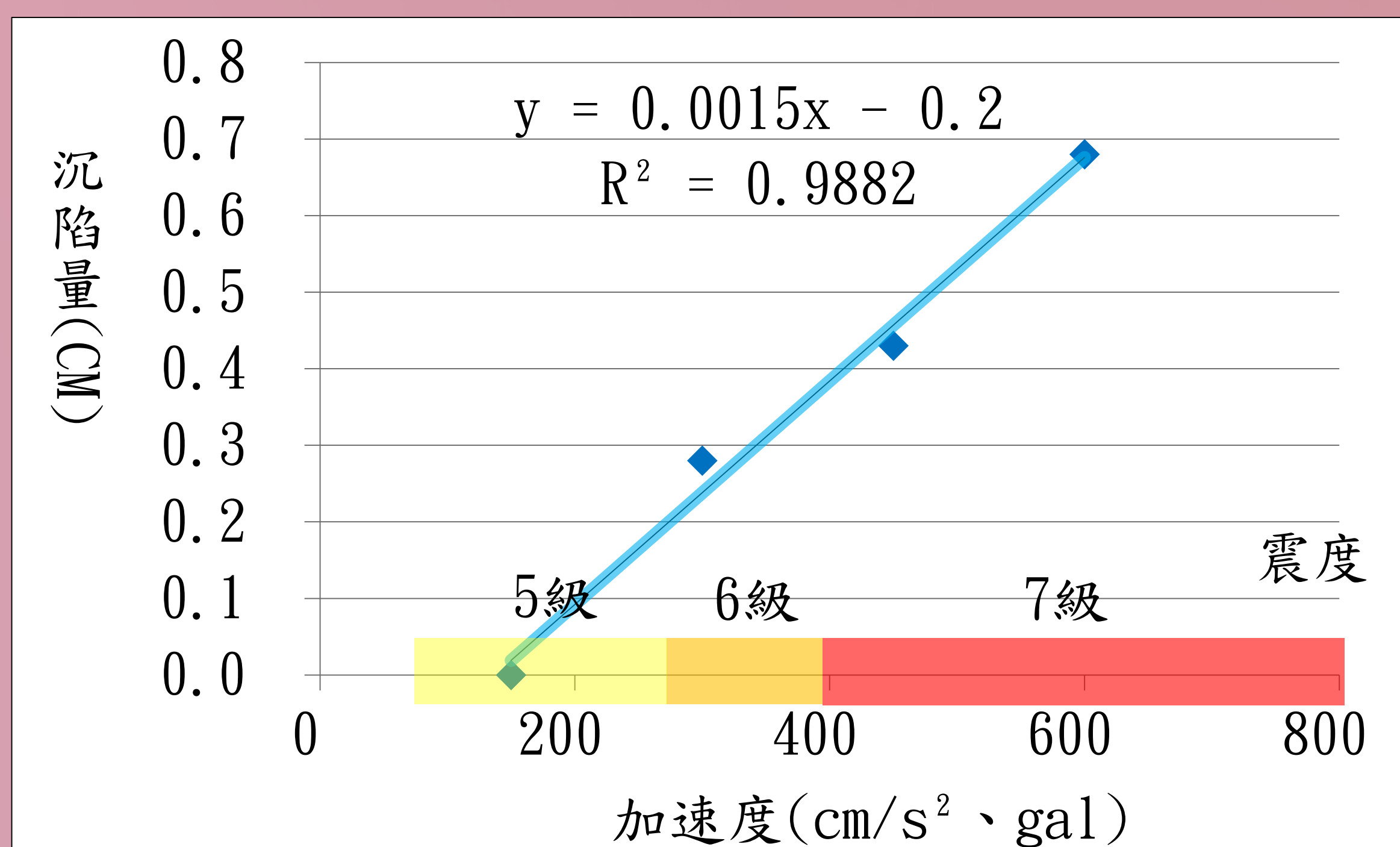
(二)比較重物在不加水~50%飽和的沉陷量

當水量少於50%飽和時，沉陷量會稍微增加，推測是因為在震動的過程中，孔隙中的水分較為分散(如圖五)，無法產生足夠的基質吸力將砂粒聚在一起，而使土壤強度減小，它會類似乾砂狀況，受重力作用排開砂土而往下沉陷。



圖五、水分在土壤表面孔隙中分布狀態 (左為75%飽和，右為25%飽和)

實驗二：比較重物在不同震度下的沉陷量

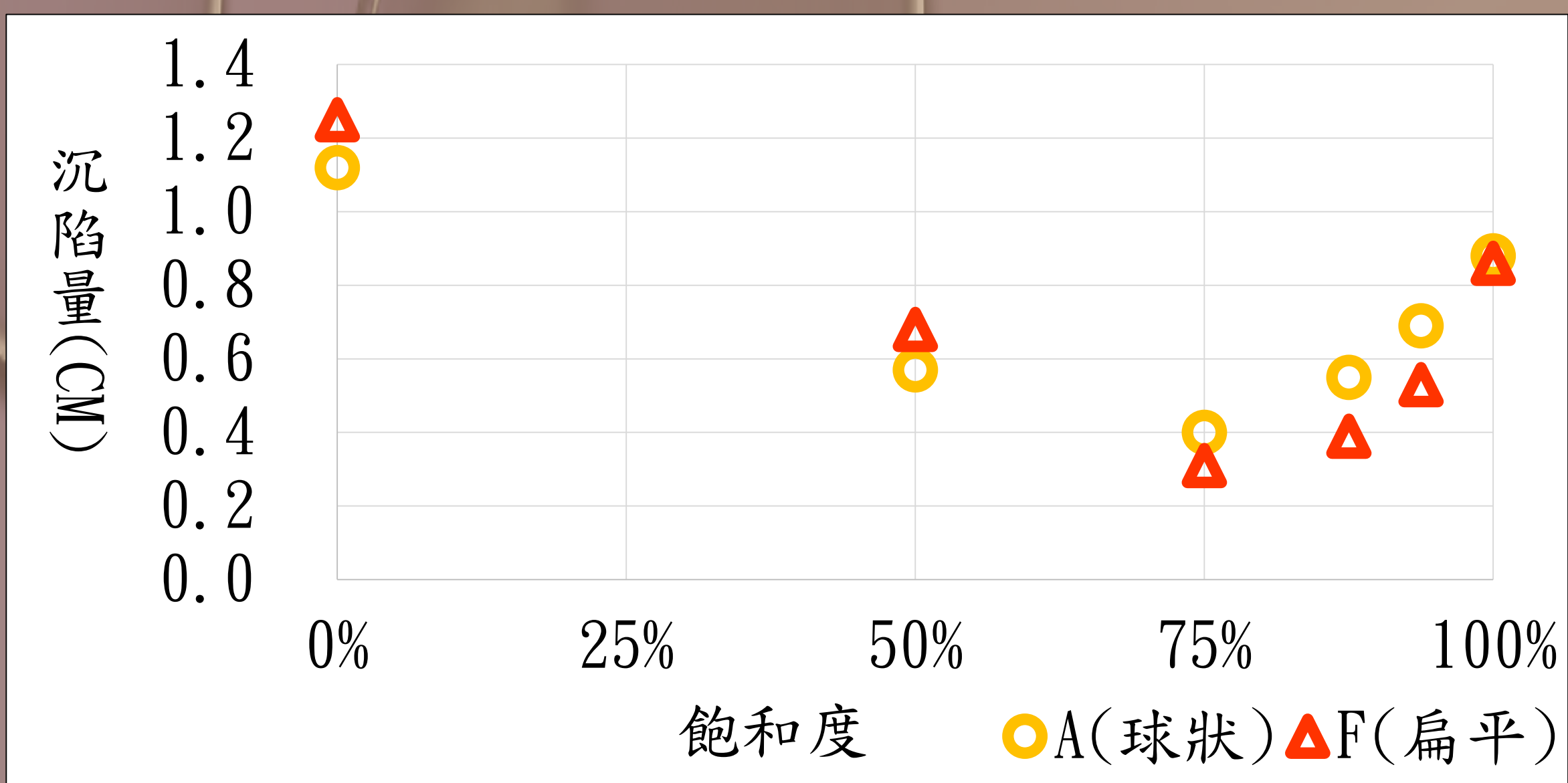


圖六、重物不同震度的沉陷量

當加速度愈大時，沉陷量也愈大。繪製成圖表後發現，加速度要大到一定程度時重物才會開始沉陷。本次實驗所測的加速度為台灣地區常發生的災害性地震加速度範圍，加速度在150到600gal的區間和沉陷量是呈線性關係。而加速度更大時是否也呈線性關係，則有待進一步研究。



### 實驗三：比較重物在不同顆粒形狀土壤中的沉陷量



圖七、重物在不同顆粒形狀的沉陷量

在75%飽和~100%飽和時A砂沉陷較大，推論是因為A砂為球狀，單位體積內的總表面積較小，使基質吸力較小，所以相較顆粒形狀扁平的F砂更容易沉陷，如圖八。但在不加水~75%飽和，球狀的A砂反而沉陷量大，推論是因為顆粒與顆粒間的水分不多，沒有充滿在孔隙裡，此時基質吸力影響較小，所以會受到摩擦力影響(如圖九，A砂休止角較大，摩擦力較大)，A的表面較粗糙，所以沉陷較少。



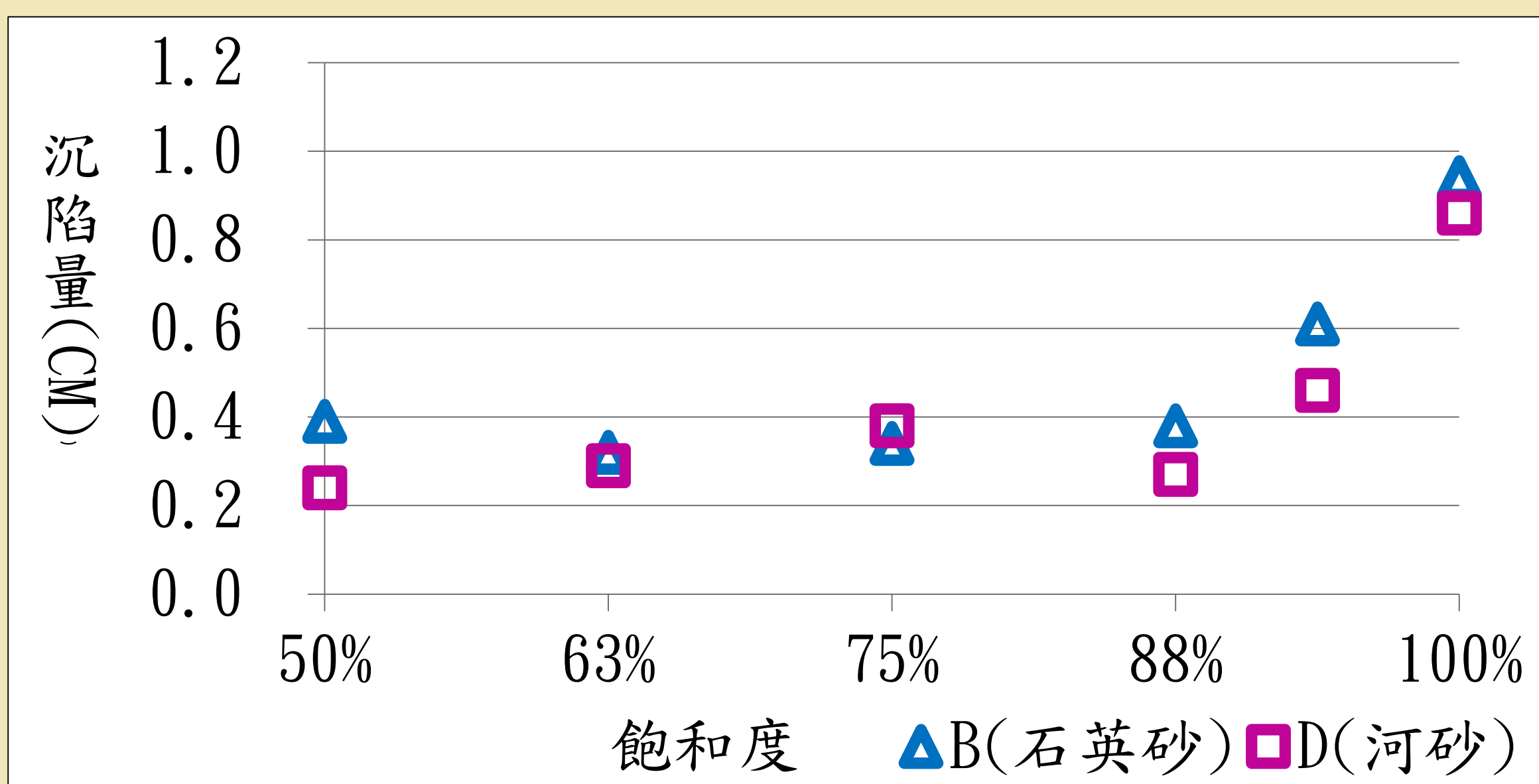
圖八、左為A(球狀) 右為F(扁平)



圖九、土壤的休止角  
A砂:45度、B砂:40度、  
C砂:40度、D砂:48度、  
E砂:45度、F砂:43度。

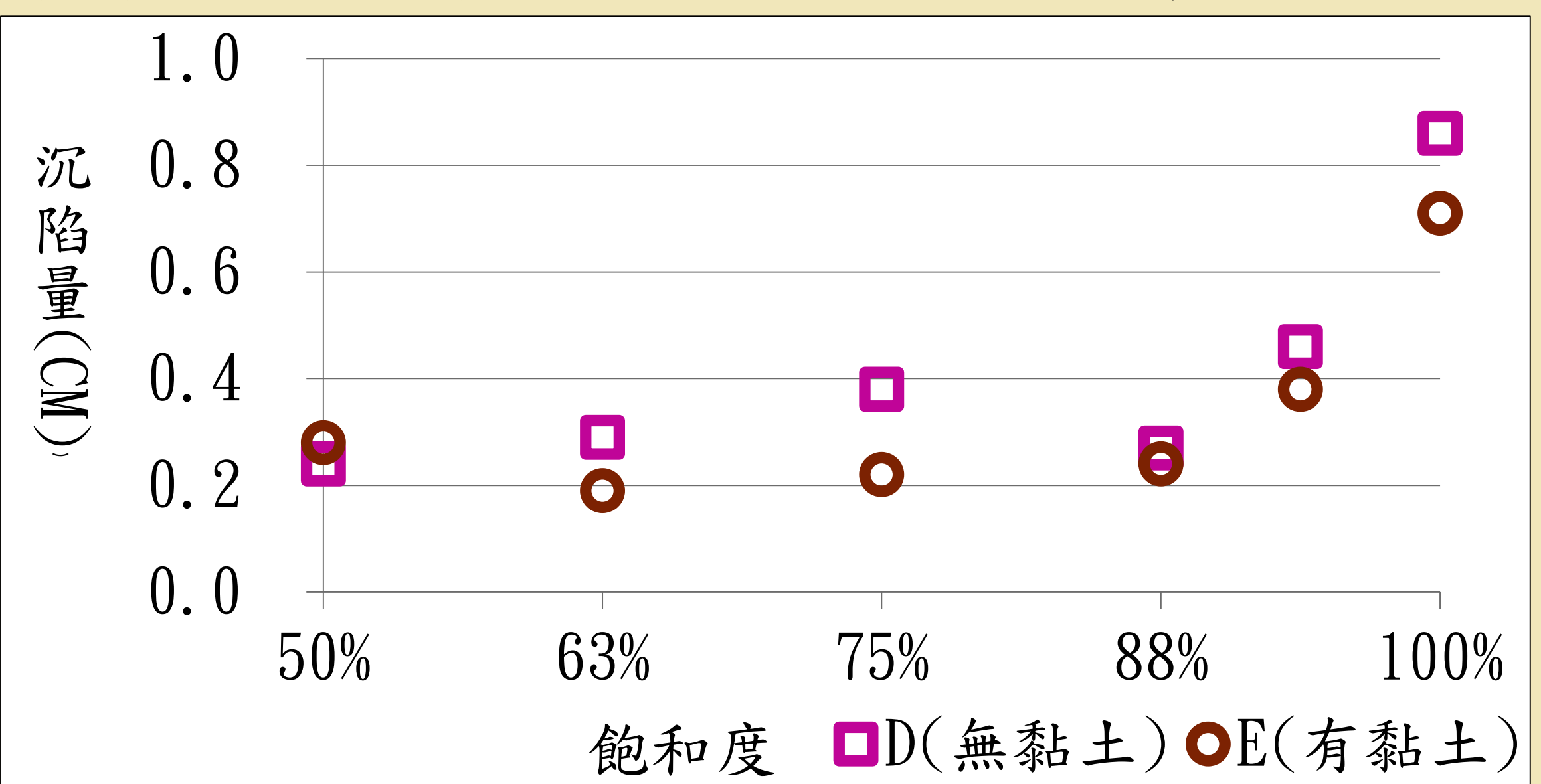
### 實驗四：比較重物在自然界不同成分土壤中的沉陷量

(一)比較重物在相同粒徑的石英砂與不含黏土河砂中的沉陷量



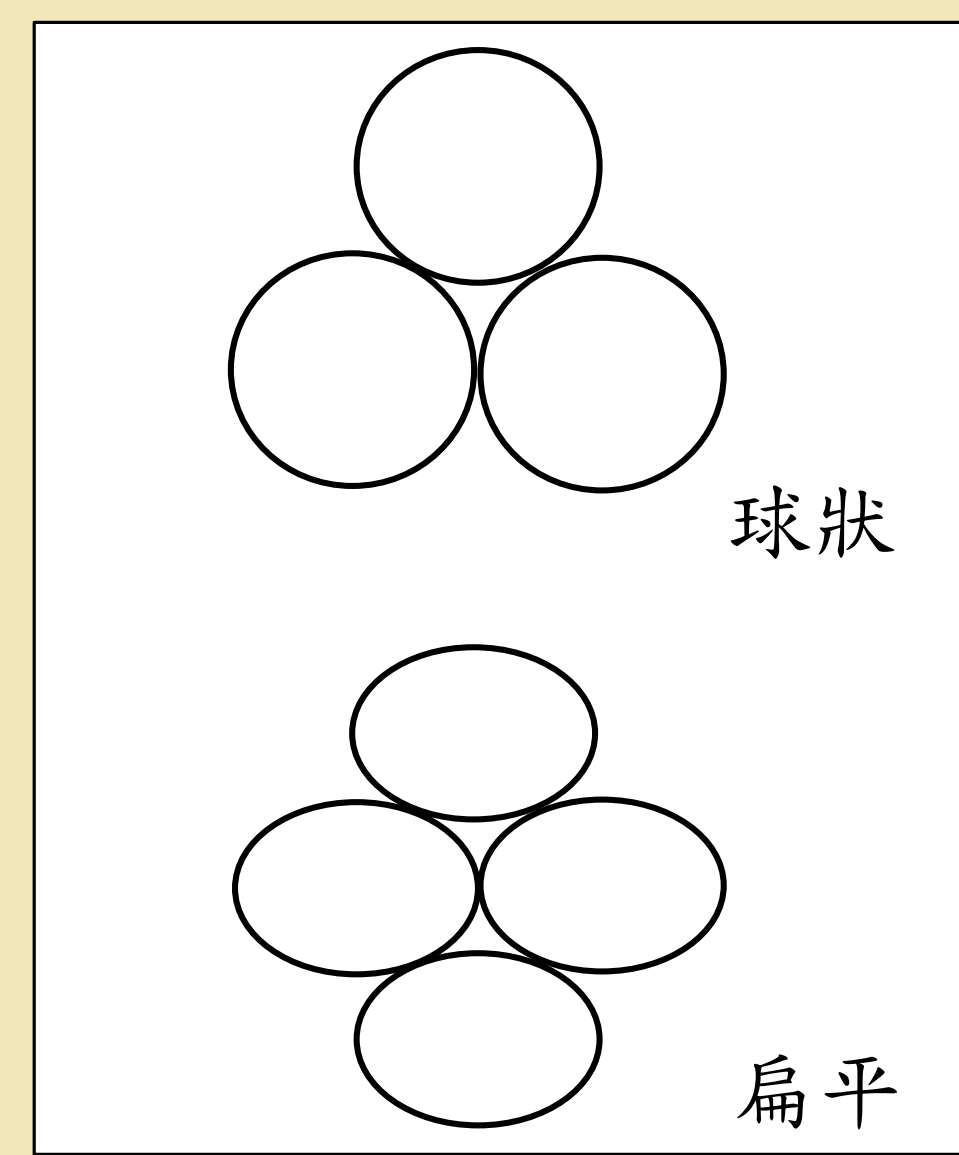
圖十、重物在不同成分(B、D)不同飽和度的沉陷量

(二)比較重物在含黏土與不含黏土河砂中的沉陷量



圖十二、重物在含黏土與不含黏土河砂(D、E)不同飽和度的沉陷量

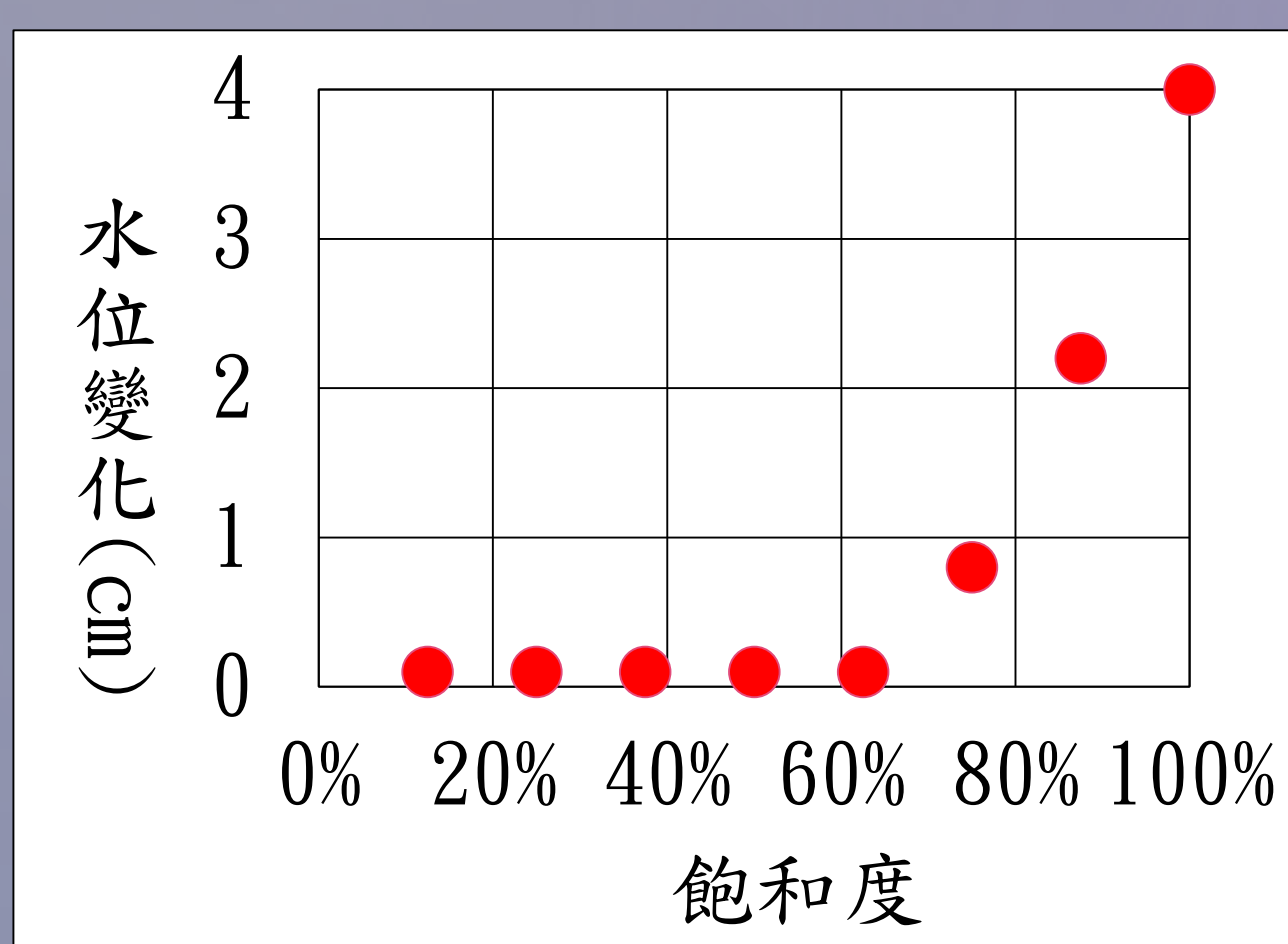
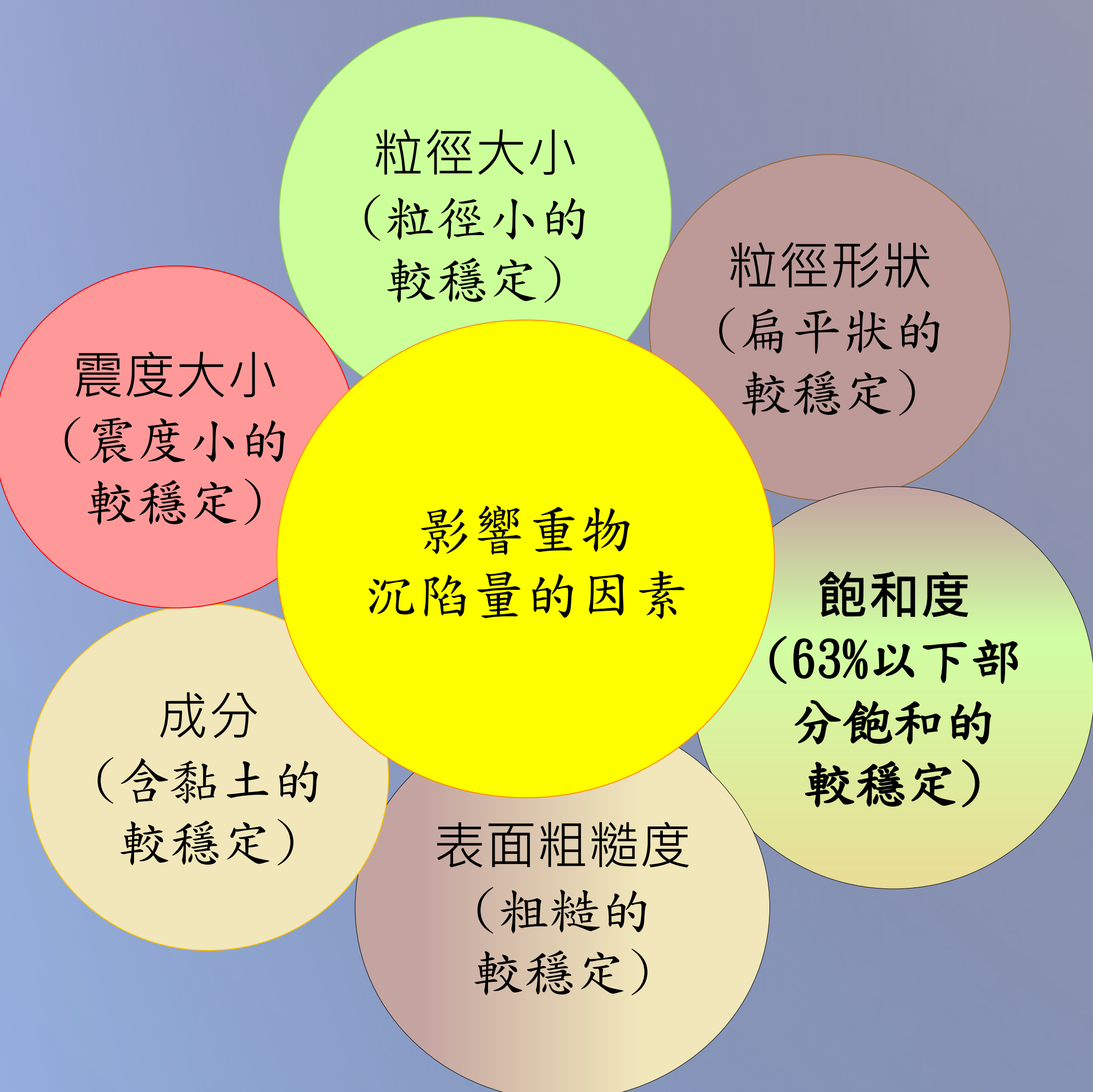
D砂含有板岩碎屑，而板岩表面較粗糙，摩擦力較大(如圖九，D砂休止角較大，摩擦力較大)，且其形狀皆為扁平狀，顆粒間的孔隙較小，單位體積內的總表面積較大，使基質吸力較大，較不易沉陷。



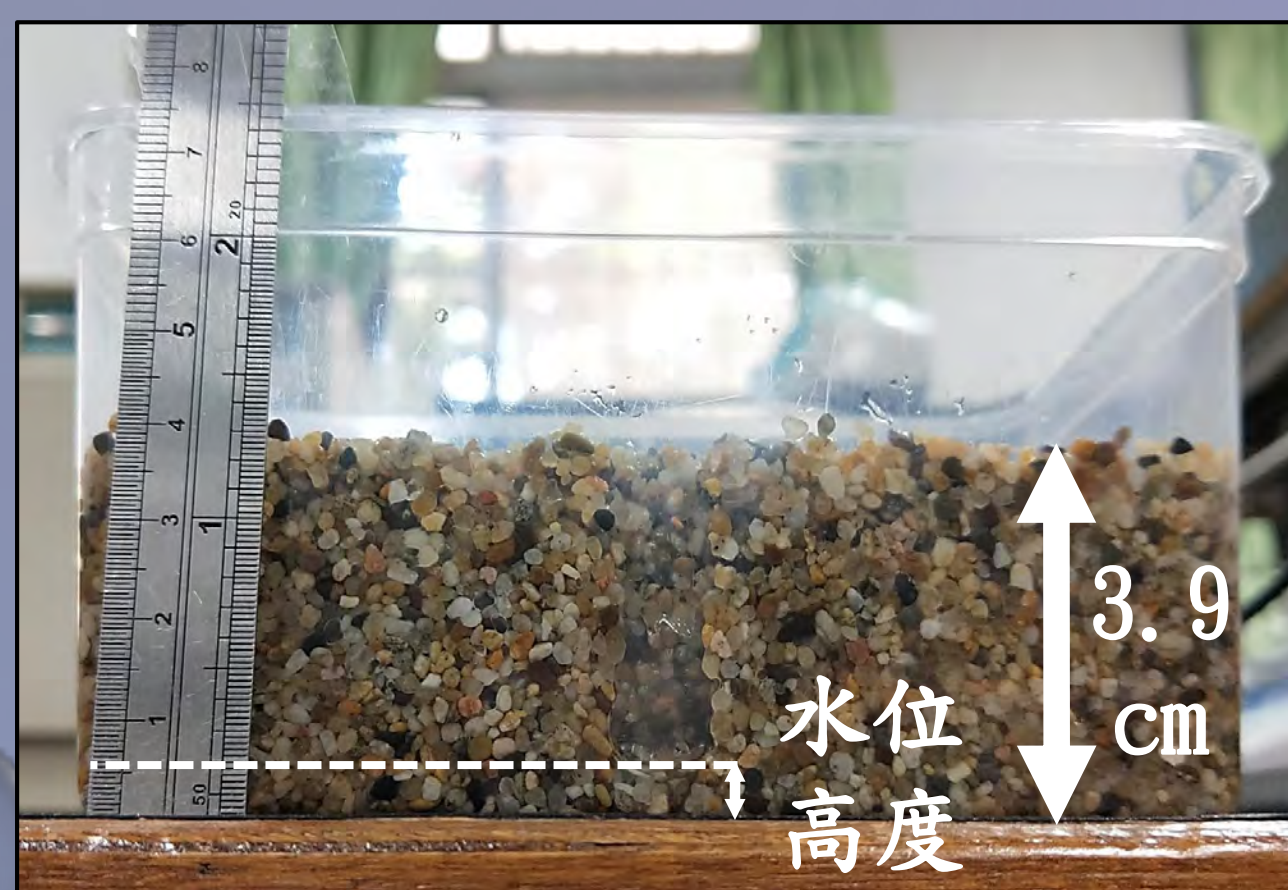
圖十一、顆粒形狀與孔隙大小示意圖

E砂含有較細粒的黏土，黏土因具有黏滯力的存在，且其顆粒細，單位體積內的總表面積較大，再加上其表面張力的分力較大，使基質吸力較大，所以較不易沉陷。

### 陸、結論與應用



圖十三、不同飽和度的地下水深度變化



圖十四、75%飽和時的水位

在實驗的各種條件下，75%飽和以上的沉陷量有明顯增加的趨勢，推測應與飽和地下水深度有相關(如圖十三、十四)，在75%飽和以上，水無法均勻分布在孔隙中，開始在底部累積，飽和和水位高度開始明顯上升。由本實驗結果，希望可應用於以地下水深度評估地震時建築物沉陷量的多寡，並以人工方式降低地下水位來提高土壤穩定度。

### 柒、參考資料及其他

1. 地質知識服務網地質百科 <https://twgeoref.moeacgs.gov.tw/GipOpenWeb/wSite/mp?mp=105>
2. 土壤液化問與答 <https://www.liquid.net.tw/CGSSL/QA.html>
3. 土壤液化潛勢查詢系統 <https://www.liquid.net.tw/CGSSL/Public/process/Mainpage.aspx>
4. 泛科學 <https://pansci.asia/archives/93837>
5. 陳尚亦(2009)。粒徑分佈狀況對不飽和崩積土壤吸力之研究。台灣科技大學營建工程系碩士論文
6. 石秉根(2002)。顆粒粒徑對飽和砂質土壤液化相關行為影響之研究。朝陽科大營建工程系碩士論文
7. 鄒鄭翰(2007)。部分飽和土壤之精簡力學模式與應用。國立交通大學土木工程學系碩士論文