

# 死亡陷阱～流沙

高中組地球科學科第二名

省立台南女子高級中學

作者：許曄琳、謝佩含、邱靖巧  
指導教師：王世芳、許家禎

## 一、研究動機

科幻小說與電影往往將流沙形容成妖怪，且一般人由於對它無所認識，於是有了死亡陷阱之印象。流沙為自然現象之一，究意它是如何構成，為何如此為人所懼，我們的研究動機由此而來[1]。

## 二、研究目的

在此實驗中，將藉著模型，推測流沙之成因，並探討：

- 1.流沙之室內模擬。
- 2.使整個容器成為流沙之模擬。
- 3.流沙與水流速度的關係。
- 4.流沙與沙土顆粒大小之關係。

## 三、研究設備與器材

- 1.容器：小型整理箱長28.4公分，寬18.4公分，高16公分
- 2.透明水管：4條
- 3.碼表：一只
- 4.沙：
  - i.一般常見黃沙一取自校園，經過篩濾雜質而得，篩孔網徑0.59公釐
  - ii.海沙一取自黃金海岸，篩孔網徑0.67公釐
  - iii.石英砂一借自成大實驗室。篩孔網徑0.60公釐
- 5.小人玩偶：4個（加上黏土以增加重量）
- 6.油土：3包
- 7.不織布：1塊（用以阻擋沙粒回流堵住出水口）
- 8.保麗龍：厚2.45公分，1片
- 9.空礦泉水瓶1500毫升：2個

## 四、研究過程及方法

### 實驗一：室內流沙之模擬（如圖1）

1. 在小整理箱下方鑽孔一個。
2. 以一小塊不織布蓋住水管一端，將包著不織布的那一端透明水管插入孔內。
3. 水管另一端則接保特瓶，以適量油土裹住外圍，使不漏水。
4. 將黃沙填至14公分高，並於沙層面上之容器壁鑽孔，以排出多餘之水。
5. 實驗時，以管夾之鬆緊程度控制水流大小。
6. 將保特瓶固定，並將其內部水位調高至一定高度。
7. 瞬間鬆開水管，以產生水流。
8. 於出水孔正上方、旁邊，分別站上小人玩偶，觀察小人玩偶是否下沉。

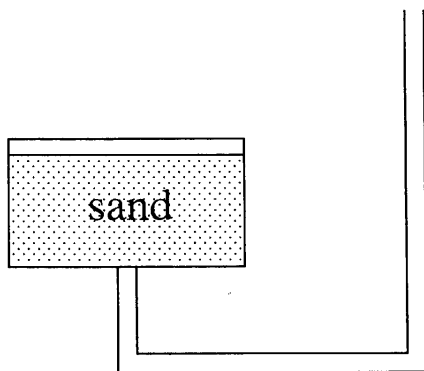


圖1：實驗一之裝置示意圖

### 實驗二：擴大的流沙現象之模擬

1. 在小整理箱下方偏一側鑽孔一個。
2. 以一小塊不織布蓋住水管一端，將其插入孔內。
3. 另一端則接至保特瓶，以適量油土裹往外圍，使不漏水。
4. 另將一塊保麗龍板，裁成適合容器的大小。並在保麗龍塊上戳出12孔，蓋上不織布然後將其壓入箱中，使其與箱底相差約2公分，與容器間的孔隙以油土填滿，於保麗龍板上方，裝入黃沙。
5. 將保特瓶固定，並將其內部水位調至一定高度。
6. 實驗時，以管夾鬆緊程度控制水流。

7.瞬間鬆開水管，以產生水流。

8.於許多點分別站上小人玩偶，觀察小人玩偶是否下沉。

### 實驗三：水位差與流沙現象之關係

1.為了測量方便，我們將出水口改設在箱壁側面。

2.測出黃沙之比重 $G_s$ ，及沙體浸水密度 $r_{sub}$ 。

3.重覆實驗一，並分別調整水位差高度，瞬間鬆開水管，以產生水流，並隨時添水，保持相同高度。

4.測出在一定時間內由於水位高度差所產生之水流，所形成之流沙現象，以探討水位差與有效應力之關係。以沙子下陷後之深度 $h'$ 為表示方法。

5.推測若『高度差愈大，則 $h'$ 也愈大』是否正確。

### 實驗四：

1.將箱內沙改為海沙，測出海沙之比重 $G_s$ 及沙體浸水單位重 $r_{sub}$ 。

2.重覆實驗一（步驟1~7）、實驗三（步驟3~4）。

3.再將箱內沙改為石英沙，測出石英沙之比重 $G_s$ 及沙體浸水單位重 $r_{sub}$ 。

4.重覆實驗一（步驟1~7）、實驗三（步驟3~4）。

5.推測若『高度差愈大，則 $h'$ 也愈大』是否正確。

6.以實驗四之結果與實驗三比較。

## 五、研究結果

### 觀察一

在水流出口之上方，才會產生流沙現象。

當水流逐漸使整個沙體飽和後，輕拍沙體，在水流出口之上方，發現沙有向下形成凹陷之現象。若分別在正中央與另一處站上小人玩偶，則發現只有正中央的小人玩偶下陷。但因出水孔徑較小，使得流沙現象範圍也小，因小人玩偶尺寸只比流沙範圍略小，故難以完全陷入。

### 觀察二

此項實驗裝置，使得水流進入容器後，並不馬上進入沙層，而上升至一定高度，方一起滲入。由於保麗龍隔板上出水孔較實驗一所用者多，故多數地方皆有流沙現象。使小人玩偶立於保麗龍有孔處之上方，發現小人玩偶下陷之地點較實驗一者多。

觀察三：（如圖2）

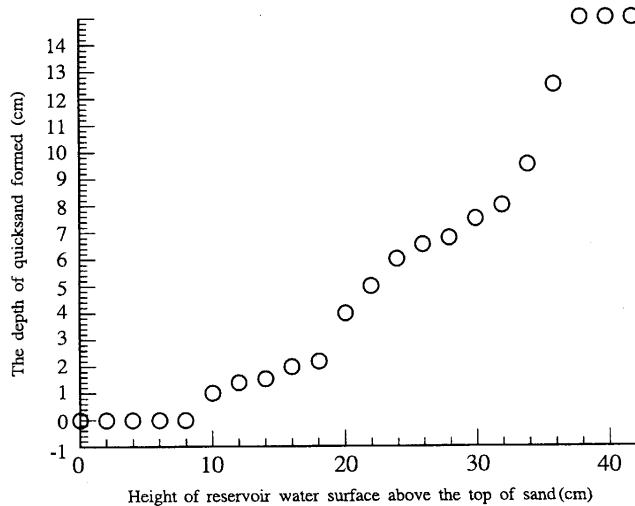


圖2：流沙形成深度與水位差之關係

1. 測出沙體之比重  $G_s$ 。

$$G_s = \frac{W_s}{V_s} = \frac{W_s * G_T}{W_s - W'_s} \quad (1)$$

上式中， $W_s$  為乾沙之淨重， $V_s$  為乾沙之靜體積， $W'_s$  為乾沙在水中重， $G_T$  為當時溫度下，蒸餾水之比重。

i. 以彈簧秤秤出乾沙重  $W_s = 140$  克重。

ii. 以彈簧秤秤出乾沙在水中重  $W'_s = 82$  克重。

iii. 將  $W_s$  與  $W'_s$  代入(1)式得  $G_s = 2.43$ 。

2. 再測出土壤含水比  $w$ ， $W = \frac{W_w}{W_s}$  ( $W_w$  為土壤中所含水之淨重)

i. 測得  $W_s + W_w = 190$  克重，因  $W_s = 140$  克重，故  $W_w = 50$  克重。

ii. 所以  $w = \frac{190-140}{140} * 100\% = 37.5\%$

3. 測出沙體浸水比重  $I_{sub}$ 。

i. 又  $w = \frac{S * e}{G_s}$ 。(而  $e$  為孔隙比， $S$  為水之飽和度)

由於土體飽含水份，可令  $S = 1$ ，

ii. 所以孔隙比  $e = 0.375 * 2.43 = 0.874$

$$I_{sub} = \frac{G_s - 1}{1 + e} * I_w$$

$$\text{故 } I_{sub} = \frac{2.43-1}{1+0.87} = 0.91$$

- 4.由表1得知，當水位差為10公分時，才形成流沙現象。
- 5.當水位差為0~10公分時，沙體無動靜。
- 6.當水位差接近9.95公分時，流沙現象不明顯。
- 7.而當水位差逐漸增大時，則沙面擾動亦相對增大。當水位差 $h \geq 36$ 公分時，則沙體擾動浮至表面（如圖14）。此時若伸手觸探流沙下，可知其下至底全空（如圖15），沙粒甚稀，唯有水流。物體在此種狀況下下沉相當快。
- 8.當水位差愈大，沙面擾動愈大。

觀察四：（如圖3、圖4）

1.方法與實驗三同。海沙：得

$$\text{i. } G_s = \frac{140}{(140-70.3)} = 2.01$$

$$\text{ii. } w = \frac{180.6-160}{160} * 100\% = 29\%$$

$$\text{iii. } e = 2.01 * 0.29 = 0.58$$

$$\text{iv. } I_{sub} = \frac{1.01}{1.58} = 0.63$$

石英沙：

$$\text{i. } G_s = \frac{140}{(140-76.9)} = 2.22$$

$$\text{ii. } w = \frac{173-140}{140} * 100\% = 24\%$$

$$\text{iii. } e = 2.22 * 0.24 = 0.53$$

$$\text{iv. } I_{sub} = \frac{1.22}{1.53} = 0.79$$

- 2.由表2可知，大約水位差在8公分時，始有流沙現象。  
由表3可知，大約水位差在10公分時，始有流沙現象。
- 3.海沙：當水位差為0~8公分時，沙體無動靜。  
石英沙：當水位差為0~10公分時，沙體無動靜。
- 4.海沙：當水位差接近8公分時，流沙現象不明顯。  
石英沙：當水位差接近10公分時，流沙現象不明顯。

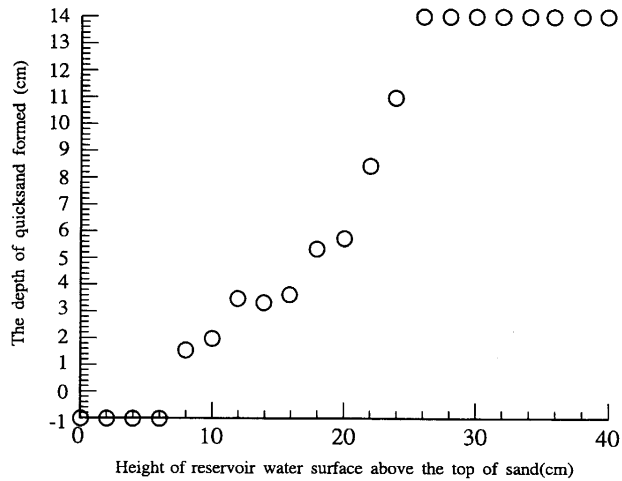


圖3：海沙所形成之流沙現象深度h'與水位差之關係圖

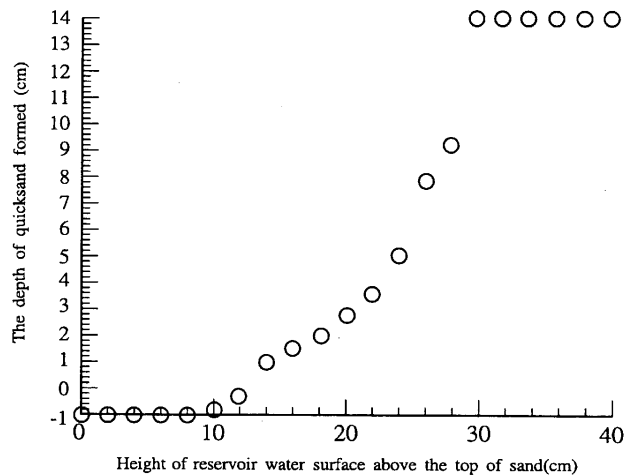


圖4：石英沙所形成之流沙現象深度h'與水位差之關係圖

5. 海 沙：而當水位差逐漸增大時，則沙面擾動亦相對增大。當水位差 $h \geq 26$ 公分時，則沙體擾動浮至表面。

石英沙：而當水位差逐漸增大時，則沙面擾動亦相對增大。當水位差 $h \geq 30$ 公分時，則沙體擾動浮至表面。

6. 海 沙：當水位差愈大，沙面擾動愈大。

石英沙：當水位差愈大，沙面擾動愈大。

## 六、結論與討論 [2, 3]

結論一：

流沙現象，一般而言，乃是沙體不能承載重量，物體因而下沉。此種自然界特殊現象，並非如一般所推測沙粒為圓狀，流沙現象乃是由於水流在沙體中之流動，造成有效應力為零而成。以下討論土壤之有效應力與蓄水池位置之關係，以解釋流沙現象。

(一) 當蓄水池水位與沙體等高時 (如圖5)：

於A點以微觀觀之，則A點所受之總應力為

$$\rho = H * I_{sat}$$

( $I_{sat}$  為飽和水份之土壤比重,  $I_{sat} = \frac{G_s + e}{1 + e} * I_w$ , e 為孔隙比)

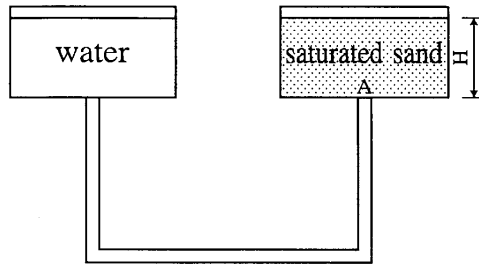


圖5：實驗裝置示意圖---蓄水池水位與沙體等高度

中和應力 (孔隙壓力) 為  $u = H * I_w$

有效應力 (決定支配體積與剪力強度之力) 為

$$\rho' = \rho - u = H * I_{sat} - H * I_w$$

上式中,  $I_w$  為當時溫度下水之單位重, 設為  $1 \text{ g/cm}^3$ 。

又  $I_{sub} = I_{sat} - I_w$ ,

$$\therefore \rho' = H * I_{sub}$$

其中  $I_{sub}$  為土壤浸水密度。

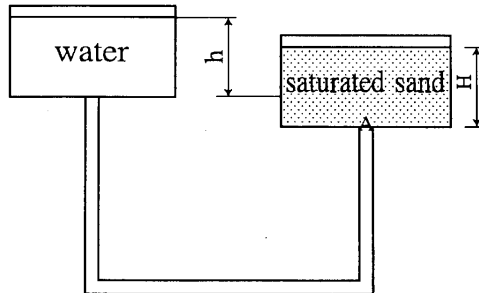


圖6：實驗裝置示意圖---蓄水池水位較沙體高 h

(二) 但當提高蓄水池水位 (如圖6) :

A點之總應力為

$$\rho = H * I_{sat}$$

但中和應力為

$$u = (H + h) * I_w$$

$$\therefore \rho' = \rho - u$$

$$= H * I_{sat} - H * I_w - h * I_w$$

$$= H * I_{sub}$$

而流沙現象乃是A點之土粒不能載重，也就是有效應力  $\rho'$  為零。令

$$\rho' = 0$$

$$0 = H * I_{sub} - h * I_w$$

$$H * I_{sub} = h * I_w$$

$$\text{令 } \frac{h}{H} = i_c$$

又

$$I_{sub} = \frac{G_s - 1}{1 + e} * I_w$$

$$\therefore i_c = \frac{h}{H} = \frac{I_{sub}}{I_w} = \frac{G_s - 1}{1 + e}$$

上式中， $i_c$  稱為臨界水力坡降。沙體之  $I_{sub}$  為一定值， $H$  為控制變數，故可求出黃沙之  $i_c = 0.91$ ；海沙之  $i_c = 0.63$ ；石英沙之  $i_c = 0.79$ 。當黃沙之高度  $H = 14$  公分時，最小之應有水位為  $h = H * i_c = 9.95$  公分。當  $h \geq H * i_c$  時，則 A 點產生流沙現象，也就是說，此時水位差所產生之水流速度恰可迫使沙粒稍稍分開，使沙堆擴大，而沙粒部份由一層水墊支持，並不全是靠其它沙粒的支撐了。

結論二：

原理與結論一相同，將一點擴為平面即是。

由於(1)保龍龍質料柔軟脆弱，無法在上面鑽較多的孔；(2)保麗龍與箱壁無法完全緊密連接，水流往往從旁滲入；以及(3)裝沙後，保麗龍無法支撐住沙子重量等緣由，使得這項實驗說不上成功。

結論三：

由觀察三的結果可知：



- 1.由觀察三、四之結果得知，當水位差愈大時，沙體擾動愈大。但由圖2、圖3、圖4之比較，得知圖2之斜率較大於圖3之斜率。也就是，若以海沙為樣本，與黃沙相比較，則在相同的水位差下，海沙的擾動較大。若以石英沙為樣本，與海沙相比較，則在相同的水位差下，仍是海沙的擾動較大。海沙的劇烈流沙的擾動現象，可以『沸騰』形容。這是與先前的假設不符的。

原先，我們推測較大的水位差才能使海沙形成流沙，因為海沙的顆粒大於黃沙之顆粒。但由觀察四的結果看來，似乎流沙的形成與沙子顆粒大小並不是絕對有關聯的。此乃因為我們忽略了在黃沙中，含有一些黏土物質，而這些黏土物質的存在，使得沙體反較不易形成流沙現象。由海沙的比重 $G_s=2.01$ 相較於黃沙之比重 $G_s=2.43$ ，海沙為較疏散無黏性之沙體，故較易形成流沙現象。

由觀察四的圖16、圖17中，得知在同樣的水位差之下，以海沙及石英沙為實驗對象的結果是大略相同的。這是因為，海沙泰半是由石英組成的，且無黏土的成份，所以和純粹的石英沙相比，其所形成流沙現象之結果是大致一樣的。

而水力坡降  $ic = \frac{G_s - 1}{1 + e}$ ，可知流沙現象與沙體之關聯在於比重 $G_s$ 與孔隙 $e$ ，與顆粒大小並無絕對關係。

- 2.由水力坡降  $ic = \frac{G_s - 1}{1 + e}$ ，可推測知若 $e$ 一定，而 $G_s$ 愈大，則 $ic$ 值愈大，表示須要較大的水位差以形成流沙。如圖21。

所以若 $G_s$ 愈小，即沙體愈疏散，則愈容易形成流沙。而 $G_s$ 則與沙體之孔隙比 $e$ 、顆粒大小、組成成份、含水比等有密切的關聯，這也是值得再深入探討之處。除了海沙之外，我們曾嘗試以工業用沙（其篩孔徑為1~2公分）作為實驗材料，但發現顆粒大至一程度，水流將直接由孔隙穿至沙層表面，不形成流沙現象。由於所取的實驗樣本太少，且沙體黏性不一，此次實驗不足以說明顆粒大小與流沙的關連。

- 4.實驗誤差之原因：因實驗裝置只是利用身邊所能得之簡便工具予以組合的，故所得之數據為大略之值，其精確度不是很大。
- 5.由於無精準的比重瓶等測量土壤單位重之儀器，故本次實驗土壤的比重與實際值差異甚巨，連帶著 $ic$ 值也受了影響，願下回實驗，這點可以改進。

## 七、展望

由結論三之討論，知流沙現象與沙體中含黏土量之多寡有密切關係，這點應

用在土木工程學上或許是相當有意義的。除此外，流沙的形成，不只與水位差、顆粒大小、比重、孔隙比有關係。與箱底地形變化、出水口口徑大小等也有關聯。關於流沙之實驗，往後可以朝變化出水口口徑、箱底地形等方面再做實驗探討。而顆粒大小方面，可以採集更多的沙樣，再做更深入、廣泛的研究。

## 八、參考書籍

- (1)Max Gunther 原著：『地球的奧秘( p.179~p.181)』，讀者文摘遠東有限公司，1979。
- (2)Das,braja M.,Principles of Geotechnical Engineering(2nd ed.)，PWS-KENT Publishing Co.,1990。
- (3)劉賢淋編著：『土壤力學與基礎工程』，天佑出版，1996。

## 評語

以不同的砂質樣品，作水溼流動的實驗，以模擬流沙現象，頗具創意。除實驗過程以水壓調整作變因外，理論上亦作簡單計算，砂子流動與水壓高度的預測。因此理論與實驗皆稱完整。整體而言，主題創新，實驗與理論皆清楚明晰。