

# 中華民國第 51 屆中小學科學展覽會 作品說明書

---

國中組 地球科學科

第三名

030512

沖沖沖！石頭石頭我不怕～探討水的力量對大  
自然的災害及其防治之道

學校名稱：彰化縣立陽明國民中學

作者：  國二 洪偲瑋  國二 謝宇宣  國一 蔡宇航	指導老師：  蔡名峯  韓顏吉
---	-----------------------------

關鍵詞：土石流、水的力量、水流沖力控制器

# 沖沖沖!!! 石頭石頭我不怕

～探討水的力量對大自然的影響及其防治之道

## 摘要

爲了探究「水的力量」對大自然的影響，本組以抽水馬達、水位控制器、連通管、三通開關、大塑膠盆及電子秤等儀器，組成「水流沖力控制儀器」。實驗中：測得水位高度和水速平方成正比，而與出水口孔徑大小無關；以直立電子秤測得水的沖力與水速平方成正比；利用小石頭製成河床，並以密度與石頭相近的正立方體鉛塊受水流沖擊，推測出沖走鉛塊的最大重量和水速四次方以上成正比；利用陶土混水製成不同密度的泥漿，模擬土石流的流動情形；設計了梯形、倒梯形、河壩、倒河壩及丁壩等五種河道，測試發現河壩型河道最能減緩水流速，明顯地降低水流的沖擊力；改做不同階梯密度的減速模組，並以軟體 Tracker 輔助分析，得知低密度階梯減速模組，減速效果最佳。

## 壹、研究動機

民國 98 年 8 月的莫拉克颱風，連日豪大雨不停的沖刷，導致南台灣山區大規模的地層滑動、路毀橋斷，造成土石流，使得南部各地受到重創。今年日本東北地震引發的巨大海嘯，大量海水沖擊沿岸居民建築物，造成房屋倒塌流走及生命財產嚴重損害。基於這樣的現象，水的力量真的如此巨大嗎？本組想藉由此次科展的機會來研究水流速度與沖擊力的關係，並嘗試模擬土石流的情形，研究不同密度液體的水流力量。並思考如何降低水的流速，以減少水流對自然生態的破壞。



圖 1 台東太麻里慘遭土石流淹沒



圖 2 海嘯重創日本

## 貳、研究目的

爲了探討土石流沖擊石頭的力量，先利用簡單的理論模型推導水的流速與沖力的關係，及固定流速下所能推動石頭的最大重量，再著手設計實驗，並將實驗結果與理論相互驗證。

- 一、探討土石流沖擊石頭的力量。
- 二、設計**水流沖力控制儀器**。
- 三、探討**不同水位高低**及出水口**孔徑大小**對水流速之影響。
- 四、探討**不同水位高低**及出水口**孔徑大小**對水的力量之影響。
- 五、探討水的流速與所能推動**鉛塊最大重量**之關係。
- 六、探討**不同密度泥漿**的流速與所能推動**鉛塊最大重量**之關係。
- 七、探討各式減速模組**降低水流速度**的原因及應用。

## 參、研究設備與器材



圖 3 大塑膠盆



圖 4 電子秤 (精密度 0.1g)



圖 5 抽水馬達



圖 6 不同孔徑的出水孔蓋



圖 7 立方體鉛塊



圖 8 彩色小石頭 50 顆



圖 9 染色的石頭(壓克力顏料)



圖 10 瞬間接著劑



圖 11 油性黏土



圖 12 陶土



圖 13 布滿小石頭的河床



圖 14 放電子秤的架子



圖 15 壓克力管架



圖 16 自製水道



圖 17 製作壓克力管接頭-磨



圖 18 製作壓克力管接頭-鑽



圖 19 測量不同水位和出水孔大小之水的力量



圖 20 陶土和水充分混合，得到泥漿



圖 21 陶土加水，製作泥漿

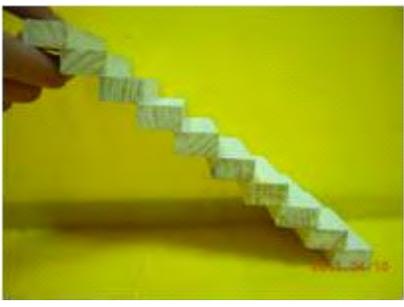


圖 22 減緩流速-(正)梯形

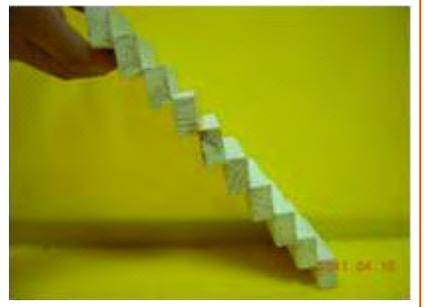


圖 23 減緩流速-(倒)梯形



圖 24 減緩流速－(正)河壩



圖 25 減緩流速－(倒)河壩



圖 26 減緩流速－丁壩



圖 27 梯形減速模組(1 階)

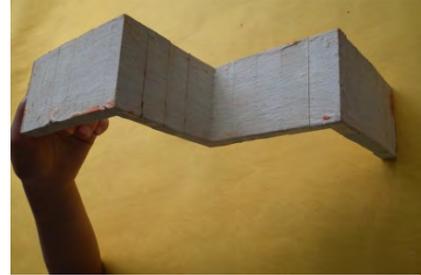


圖 28 梯形減速模組(2 階)

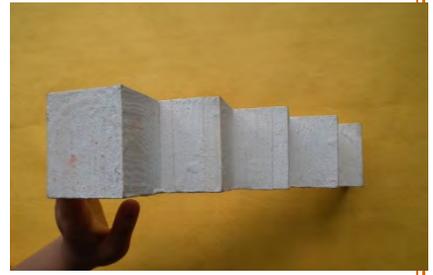


圖 29 梯形減速模組(5 階)



圖 30 梯形減速模組(10 階)



圖 31 小紅球(可漂於水上)



圖 32 高速攝影機

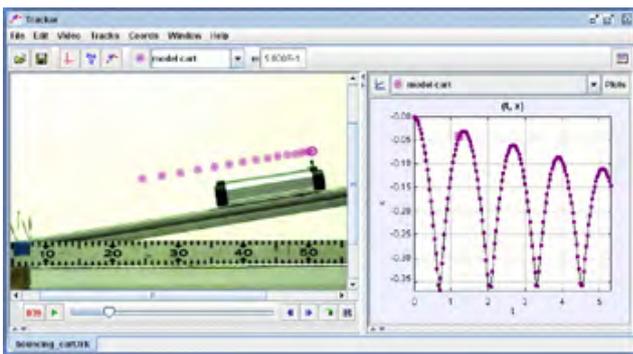


圖 33 軌跡追蹤軟體 Tracker

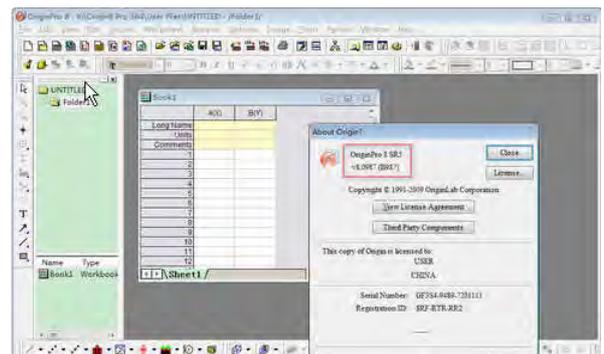


圖 34 數據處理軟體 Origin Pro 8.1



水位控制器內部構造

皮尺：  
得知水位高度。

重錘與鐵架：  
固定壓克力管。

出水孔蓋

沖力測量器(直  
立電子秤)：測  
量出水孔沖出  
的水力。

水位控制器：利用  
連通管原理控制  
水位高度。

漏水管：多餘水量  
可經由此排出，以  
達到水位控制的  
目的。

馬達：將水抽到水  
位控制器上。

三通開關：避免水  
量過大，使漏水管  
來不及將多於水  
量排出。

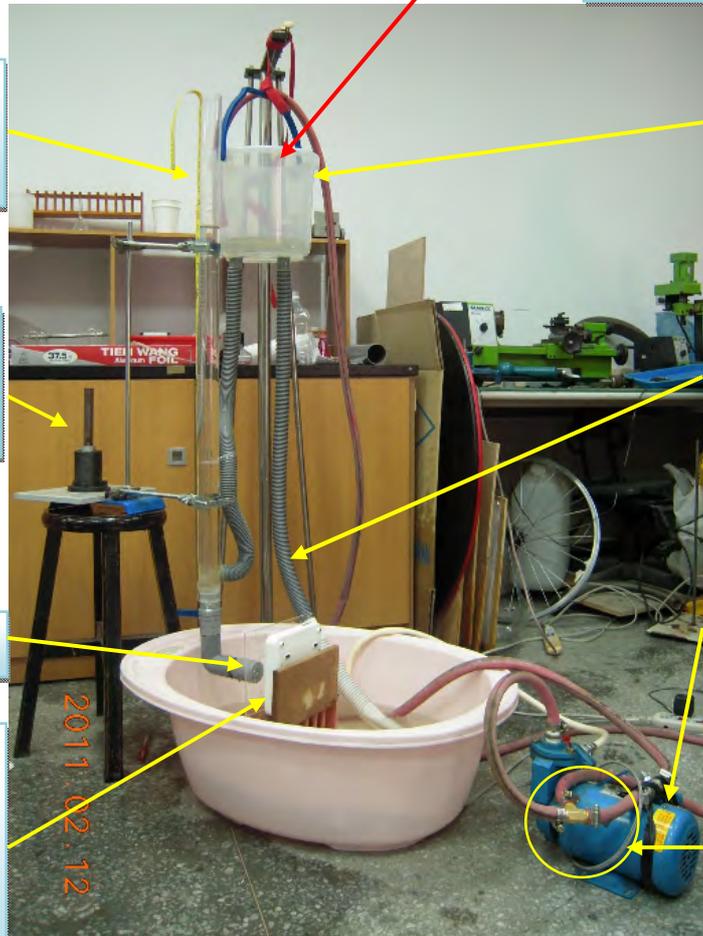


圖 35 水流沖力控制儀器及實驗裝置圖

## 肆、研究過程與方法

### 一、探討土石流沖擊石頭的力量

每當豪大雨時，湍急的流水推動巨大的石頭，造成嚴重災害。但石頭又大又重，河水有那麼大的力量來推動嗎？本組使用一個簡單的物理模型，來估算水流衝擊石頭的力量，並以此理論來設計實驗，加以驗證水的力量。

假設河水是一柱流體，密度為 $\rho_0$ ，截面積為 $A$ 的流水柱，在 $\Delta t$ 時間內從水槍中噴射出沖擊一個鉛直平面的水的體積為 $Av\Delta t$ ，這些水的質量 $m = \rho_0 Av\Delta t$ 。這些水沖擊平面前一瞬間的動量為 $mv$ ，方向沿水平；沖擊平面後向四處散開，幾乎沒有水平方向的速度，亦即這些水沖擊平面後幾乎沒有水平方向的動量。這些水動量的改變主要是因受到平面的作用力。由物理動量定理，解得

$$F = \frac{\Delta P}{\Delta t} = \frac{mv - 0}{\Delta t} = \rho_0 Av^2 \quad (1)$$

水衝擊的力量與液體的密度、水柱截面積及水流速度平方成正比。

#### (一) 土石流的力量

由式子(1)可知，流體沖擊的力量與其密度成正比，土石流夾帶著泥土和石頭，整體的密度比水大，沖擊的力量比單純水流大的多，所以造成的災害就更大。

#### (二) 水的流速的力量

由式子(1)可知流體沖擊的力量與流體速度平方成正比。高山上的水流速度越快，造成的沖擊力量也越大，因此在上游河岸會有侵蝕的行為，而下游因水速減緩而有泥沙堆積的情形。

#### (三) 土石流河水能沖走多重的石頭

下面簡單估算流速為 $v$ 的河水能沖走石頭的最大質量。為便於估算在不考慮浮力下，假設石頭是邊長為 $a$ 的正立方體，如圖 36 所示。 $F$  為河水的沖力。若石頭的密度為 $\rho$ ，河水的密度為 $\rho_0$ ，那麼石頭所受到的重力 $mg = \rho ga^3$ 。

石頭受到河水沖擊，會因河床凹凸不平而開始滾動，繞圖 36 中 $\overline{AB}$ 邊向前翻滾，亦即河水能沖走石頭的條件是：河水沖力 $F$ 對 $\overline{AB}$ 邊的力矩大於或等於重力對 $\overline{AB}$ 邊的力矩。用式子表示為

$$F \times \frac{a}{2} \geq mg \times \frac{a}{2} \quad (2)$$

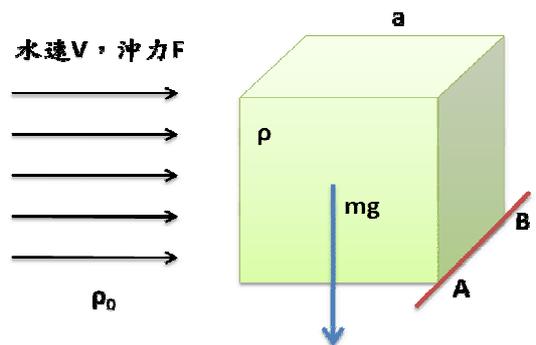


圖 36 石頭受水流沖擊示意圖

亦即 $F \geq mg$ 時石頭會翻轉。依照前面(1)式整個沖擊面有效力矩的平均力為(1)式的一半，

所以固定流速下，河水能沖走的石頭最大質量 $m = \rho a^3 = \frac{\rho_0^3}{8\rho^2 g^3} v^6$  (3)

可見，河水所能沖走的石頭最大質量與河水流速的 6 次方成正比。

一般石頭的密度 $\rho = 2.5 \text{ g/cm}^3$ ，水的密度 $\rho_0 = 1.0 \text{ g/cm}^3$ ，由 (3) 式知，水流速度 $v$ 所能沖走的石頭最大邊長 $a = 2.0 \times 10^{-2} v^2$ 及最大質量 $m = 2.0 \times 10^{-2} v^6$ 。

當河水的流速 $v = 0.5 \text{ m/s}$ 時，可求得能被河水沖走的石頭最大邊長 $a = 0.5 \text{ cm}$ ，石頭質量 $m = 0.31$  克，但當河水的流速 $v = 5.0 \text{ m/s}$ 時，能被河水沖走的石頭最大邊長 $a = 50 \text{ cm}$ ，而最大質量 $m = 312 \text{ kg}$ 。如果考慮水的浮力，流水將可以沖走更大的石頭。

## 二、水流沖力控制儀器之探討

(一) 實驗中為了探討水位高低與水的沖力關係，本組必須設計一套能夠在沖水的同時，還能保持水位固定的實驗裝置，因此利用簡單的水管、抽水馬達等材料，並根據連通管原理設計出水流沖力控制儀器(如圖 37)。

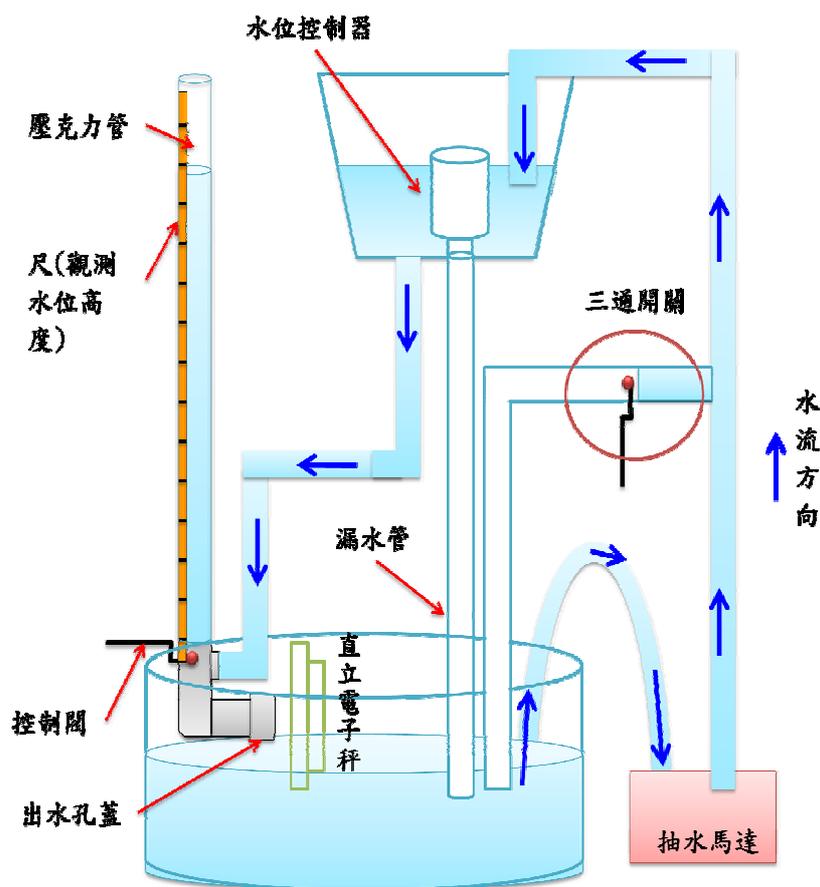


圖 37 水流沖力控制儀器示意圖。

- (1) 水經由馬達抽上去，水位如果超過水位控制器，多餘的水將由漏水管流出，並藉連通管裝置來控制壓克力管內的水位高低。
- (2) 為了避免馬達抽水速度太快，造成多餘的水來不及由水位控制器排出，因此設計三通開關來控制馬達抽到水位控制器的水量

(二) 利用**水位控制器**、**連通管**來保持壓克力管內水的高度，當出水孔蓋的水流出，水位高度不會變化，因此可以得到**穩定的水流速度**。

(三) 爲了**省水**，從出水孔蓋流出的水，排放到大塑膠盆，再用**抽水馬達**將收集的水抽到**水位控制器**。

(四) 水位控制器可以保持水位，若抽水馬達抽上來的水過多，將會從漏水管流到大塑膠盆，達到**控制水位高度**的效果。

(五) 上下移動水位控制器，可控制壓克力管內水位固定在某一高度，因而控制出水孔蓋水流出的速度。在壓克力管旁邊**黏一條軟尺**，以確定每次實驗時水位高度。

(六) 抽水馬達爲校內舊的馬達，**馬力爲 1/2 匹馬力**，在出水孔較小時，流出的水量也較少，抽水馬達抽進水位控制器的水，漏水管來不及流掉，會造成水位控制器的水滿出來。因此本組設計了**三通開關**，調整三通開關可讓抽到水位控制器的水量變少，三通開關的另一端將多出來的水流到大塑膠盆。設計如**圖 39** 所示。



圖 38 水位控制器(改用泥漿)

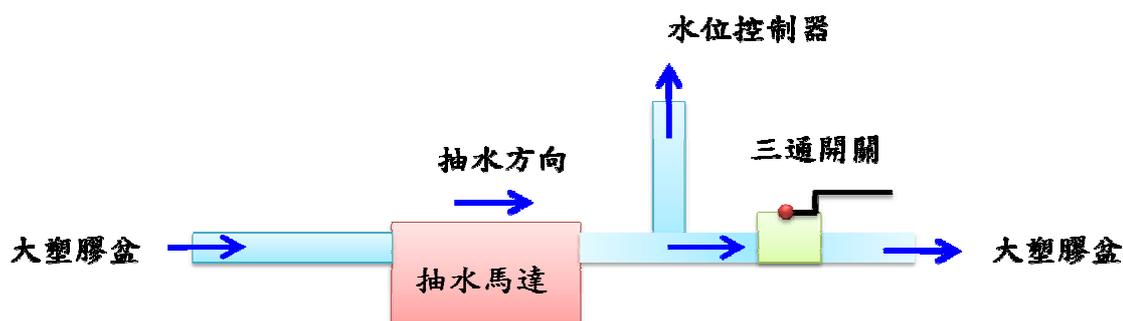


圖 39 抽水馬達裝置圖

(七) 製作孔徑爲 3.0mm、4.0mm、5.0mm、6.0mm、7.0mm、8.0mm 的出水孔蓋(如**圖 6**)。

### 三、探討不同水位高低及出水口孔徑大小對水流速之影響。

(一) 爲了測量不同水位高度經各孔徑的水流速，利用水流沖力控制儀器(如**圖 37**)，控制不同的水位高度，並在實驗裝置的出水處裝上各種孔徑的出水孔蓋(如**圖 6**)。

(二) 然後將控制閥打開 30 秒，以桶子接水，以量筒測量容量，記錄水位高度與流出的水量。重複測量三次，以確保數據不會有太大的誤差。

(三) 將流到水桶的水量除以測量時間 30 秒及出水孔的截面積，就可得到水速，並以 Excel 處理數據。

#### 四、探討不同水位高低及出水口孔徑大小對水的力量之影響。

- (一) 製作可將**電子秤直立**置於上方的架子，放置穩定後，於沖水前，先做歸零的動作。當水從出水孔蓋水平地沖在電子秤上，便會四處散開而流掉，此時電子秤只會測量到水平的沖力，與鉛直的重力無關，故可**藉由直立電子秤測量水的沖擊力量**。



圖 40 水的沖力測量情形

- (二) 固定孔徑大小的出水孔蓋，測量不同水位高度之水的沖力大小，並記錄之。  
(三) 換上**不同孔徑大小的出水孔蓋**，再測量不同水位高度之水的沖力大小，並記錄之。  
(四) 利用實驗三的結果—水位高度與流速的關係，來對應此實驗的沖力大小，就可得到水速與沖力的關係。

#### 五、探討水的流速與所能推動鉛塊最大重量之關係。

- (一) 由網路查得石頭的平均密度約為  $2.5 \text{ g/cm}^3$ ，鉛塊的密度為  $2.7 \text{ g/cm}^3$ ，因此以鉛塊來代替石塊，且鉛塊較易切割，可方便製作成正立方體。  
(二) 為了驗證前項之理論估算，我們製作 5 個不同規格的正立方體，邊長分別為 1.00、1.26、1.56、1.93、2.54 cm，(如圖 7)。  
(三) 為了模擬實際水道河床底部，本組以小石頭黏貼在壓克力板上，模擬佈滿小石頭的河床，如圖 42。  
(四) 將立方體鉛塊放置在佈滿小石頭的河床上，並且放在出水口；為了讓水沖出來充滿整個鉛塊，此一實驗不安裝出水孔蓋。  
(五) 調整水位高度，打開控制閥，觀察鉛塊是否會因水柱的沖擊而翻滾。  
(六) 如果鉛塊不動，調整水位高度，使水流速增加，直到鉛塊因水柱衝擊而翻滾，記錄此一水位高度。

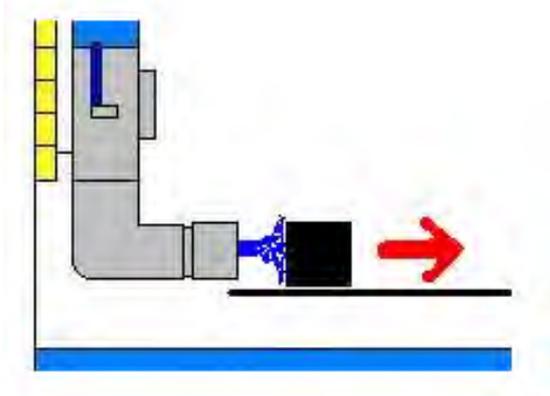


圖 41 水沖擊鉛塊示意圖



圖 42 水沖擊鉛塊實驗情形

## 六、探討不同密度泥漿的流速與所能推動鉛塊最大重量之關係。

爲了瞭解土石流的力量，本組將陶土溶入水裡，充分混合後得到 A、B 兩種水土混合物，分別稱爲「泥漿 A」和「泥漿 B」，取樣 100ml 秤重，得到兩混合物的密度約爲  $1.12 \text{ g/cm}^3$  和  $1.20 \text{ g/cm}^3$  (水的密度爲  $1.0 \text{ g/cm}^3$ )，泥漿在短時間內 (10 分鐘) 還不太會沈澱，本組使用泥漿依前述步驟迅速完成實驗。



圖 43 以量筒測量泥漿容量



圖 44 以泥漿做實驗的情形

### (一) 泥漿密度與水位高度、流速的關係。

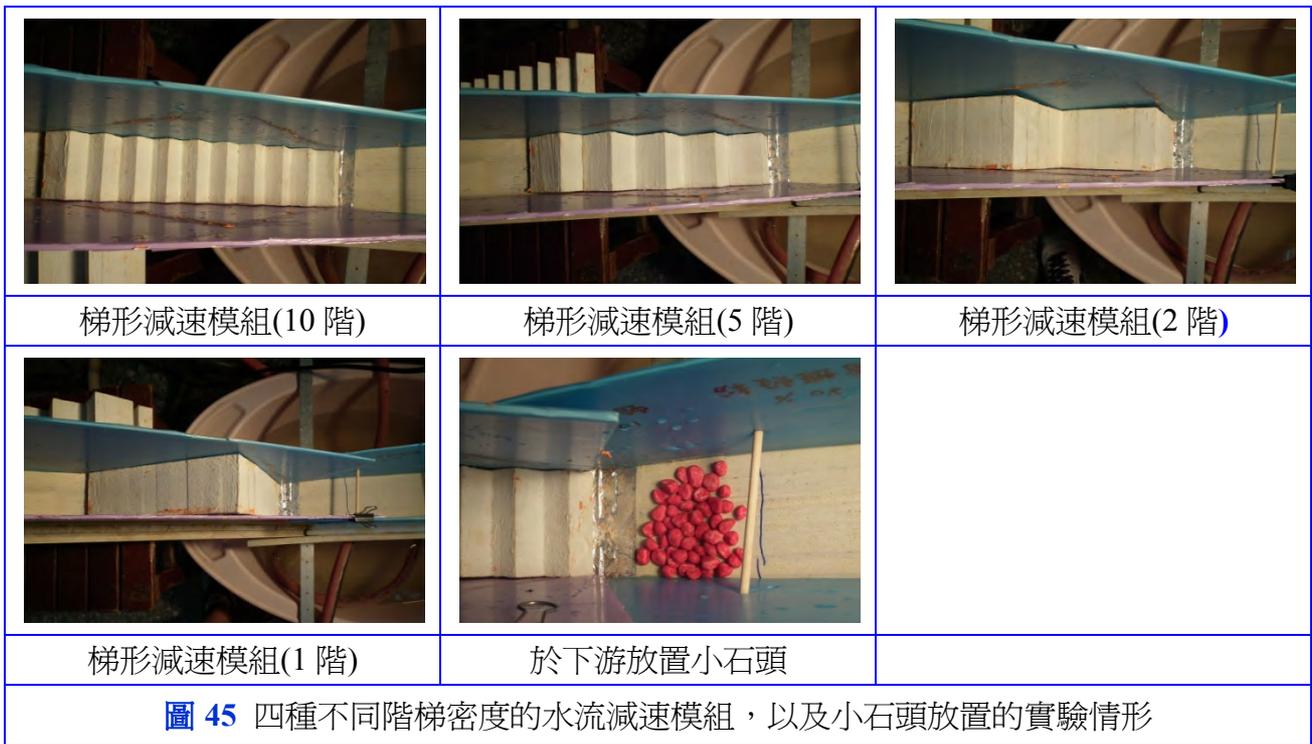
爲了測量不同位高度泥漿經各孔徑的泥漿流速，如**實驗三**，控制不同的泥漿高度，然後將控制閥打開 30 秒，以桶子接泥漿，以量筒測量其容量，記錄泥漿高度及 30 秒時所流出的泥漿體積。將流到水桶的泥漿量除以 30 秒及出水孔的截面積，就可得到泥漿流速。

### (二) 探討泥漿的流速對不同鉛塊大小的沖擊力。

如**實驗五**，將立方體鉛塊放置在佈滿小石頭的河床上，調整泥漿水位高度，打開控制閥，觀察鉛塊是否會因泥漿沖擊而翻滾。如果鉛塊不動，調整泥漿水位高度，直到鉛塊因泥漿衝擊而翻滾，記錄此一泥漿水位高度。

## 七、探討各式減速模組降低水流速度的原因及應用。

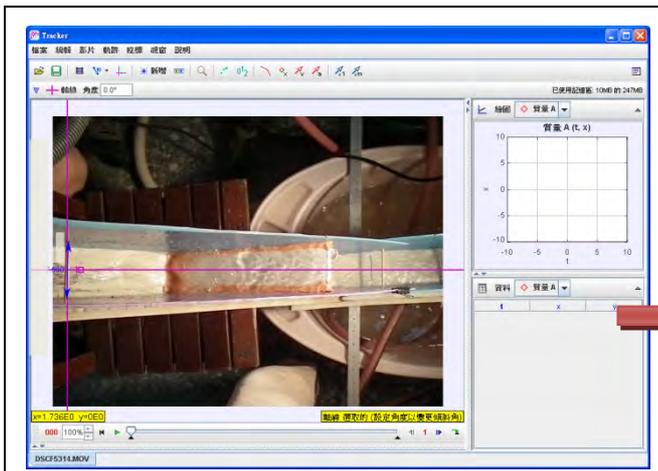
- (一) 使用市售的積木製作**梯形、倒梯形、河壩、倒河壩及丁壩**五種減低水流速度的模組。
- (二) 將減速模組置於上游河道，使水流由上往下流動，且流過**減速模組**。
- (三) 在下游河道的前端放置**50 顆小石頭**，並將下游河道分成三段，以便觀察石頭受水流沖擊後的分布情形。
- (四) 實驗裝置完成後，打開抽水馬達，讓水流直接流下，流經減速模組後，沖擊下游河道的小石頭，時間爲 30 秒，**記錄小石頭的分布情形**。
- (五) 根據上述實驗結果，進行實驗修正，改以梯型模組來進行實驗，在固定長度及高度下設計了 1 階、2 階、5 階、10 階的梯型模組，並改用較大顆的紅色石頭方以便於區分出水流的強弱；且出水口處以水流沖力控制儀器來控制水流強弱。



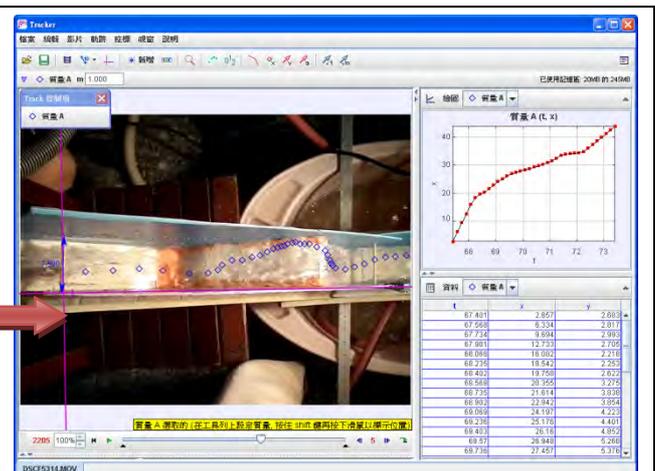
(六) 為了更精確的了解梯形減速模組的減速效果，我們利用網路上找到免費的物理軌跡分析軟體 Tracker，來分析用高速攝影機所拍攝的小紅球隨水流流動的影片。其實驗步驟如下：

**物理動態軌跡分析技術 (Tracker)**





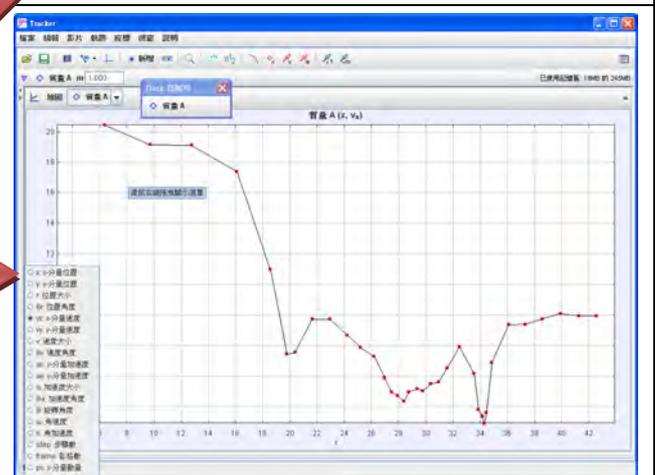
設定比例尺，及座標軸



追蹤小紅球的軌跡



分析出小紅球  $V_x$  隨時間變化情形



分析出小紅球  $V_x$  隨位置  $x$  分量變化情形

此套軟體(免費)功能非常強大，只要隨著影片的播放將小紅球標記出來，便可以很輕鬆的了解小紅球的運動情形，舉凡速度、加速度、速度分量、位移、位移分量、角速度、角加速度.....等皆可以分析出來。本組利用此技術來分析水流受到減速模組影響後，速度變化情形。

## 伍、研究結果

### 一、探討不同水位高低及出水口孔徑大小對水流速之影響。

使用不同孔徑的出水孔蓋，並利用水位控制器，固定壓克力管內的水位高度，然後測量 30 秒內經由出水蓋孔徑流出的水量：

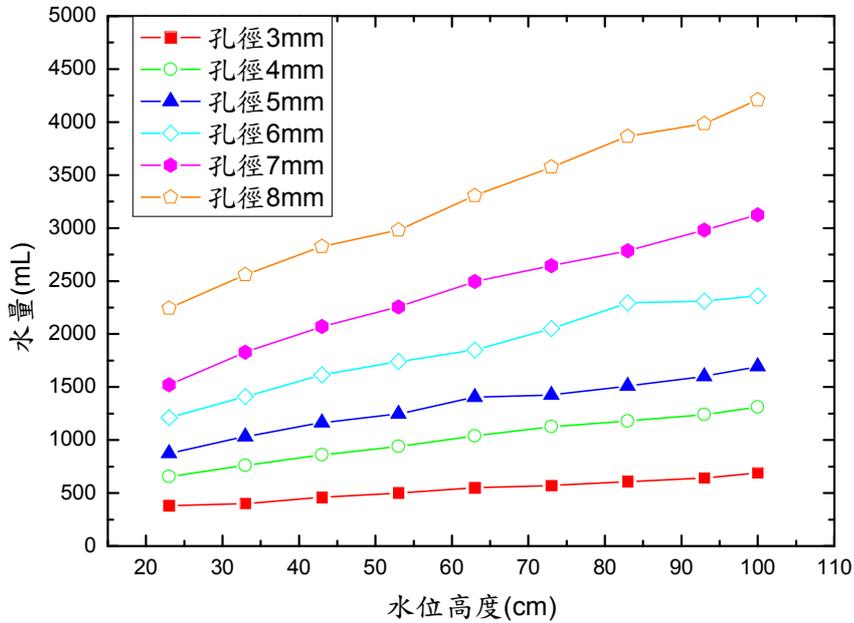


圖 46 各種出水蓋孔徑，不同的水位高度在 30 秒的流水量大小。，出水蓋的孔徑越大，水位高度越高，其流水量也越多。將流水量除以測量時間 30 秒，及孔徑的截面積可得到水速。

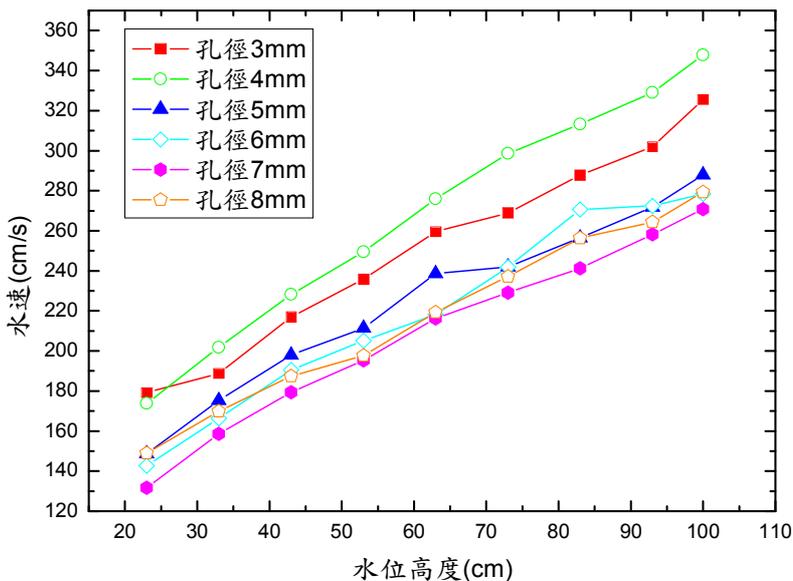
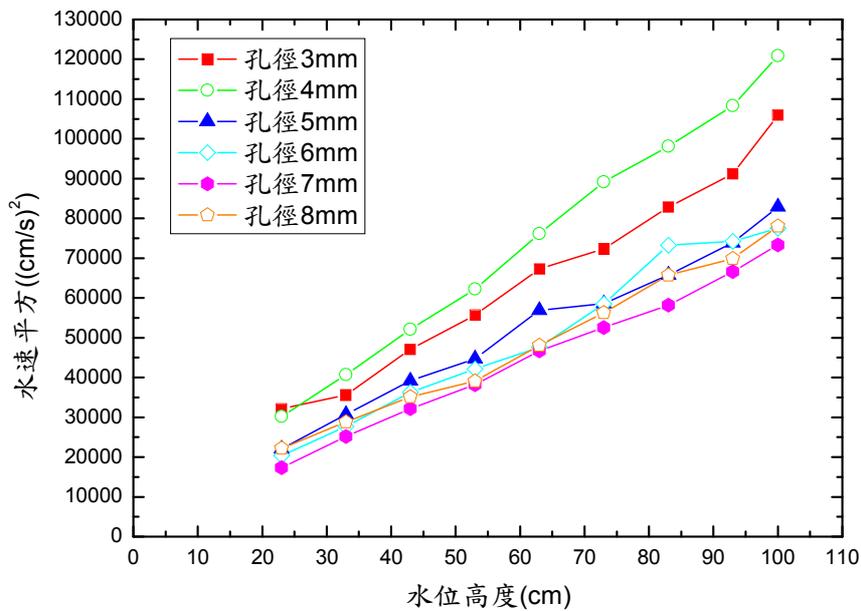


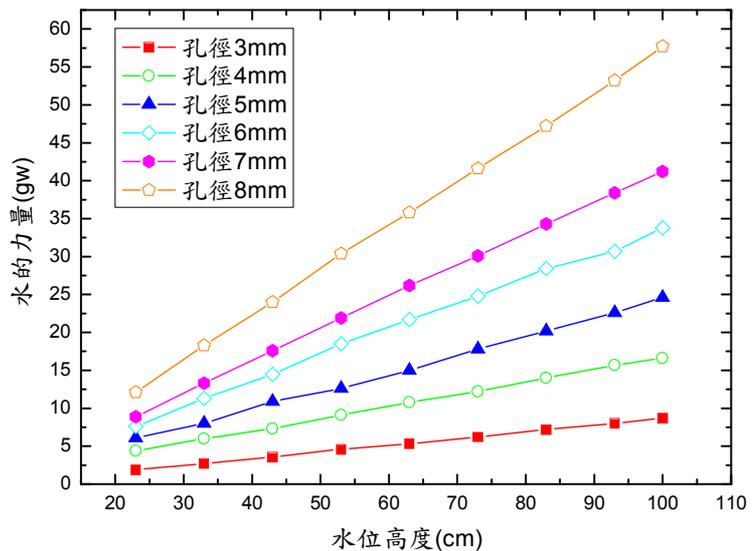
圖 47 各種出水蓋孔徑，水速與水位高度的關係圖。可看出水位高低會影響水速，不同的孔徑大小只有約略影響水速，其順序並沒有特別的規律。從圖中可觀察到若將曲線外差到高度為零時，其速度不為零，可見速度應不會是和水位高度成正比。我們將水的速度取平方，作水速平方對水位高度的關係圖，轉換後的圖形如圖 48。



**圖 48** 各種出水蓋孔徑，水速平方與水位高度的關係圖。發現任一孔徑之出水孔蓋，其水位高度越高，水速的平方也越大。理論上這可從水位高度的位能轉變成動能得知  $\rho gh = 1/2 \rho v^2$ 。且發現不管孔徑大小如何，水位高度與水速平方成線性關係，且曲線幾近外差到原點，這與理論相符合。理論上，水的流速只與水位高度有關，孔徑大小並不太會影響流出的水速。另外，可發現孔徑仍會影響水的速度，只是影響並不是很大。這個實驗結果，可能是水蓋的厚度所造成孔徑邊緣的摩擦力，或是出水蓋孔徑製作不良所造成的。

## 二、探討不同水位高低及出水口孔徑大小對水的力量之影響。

在水流沖力控制器的出水孔前放置一個直立電子秤，如圖 19。當水從出水孔蓋水平地沖在電子秤上後，就會向四處散開而流掉，可藉由此裝置測量水平的水流沖擊力量。測量在不同孔徑大小和不同高度的水位下，水沖擊電子秤所顯示的數據，如圖 49。



**圖 49** 各種出水蓋孔徑，水的沖力與水位高度的關係圖。發現任何一種孔徑大小，其水位高度越高，其水的沖擊力量也越大。

這裡本組有興趣的是，水的速度和其沖擊力道間的關係。爲了瞭解水的沖力與水速的關係，本組測量不同孔徑下，水位高度對沖力有何影響。由前項實驗可得到水位高度與所造成水流速度之關係，如圖 47；而這裡的實驗，如圖 49 可得水位高度與水的沖力關係。利用圖 47、圖 49 的數據可得水的速度與水的沖力關係圖如圖 50 所示。

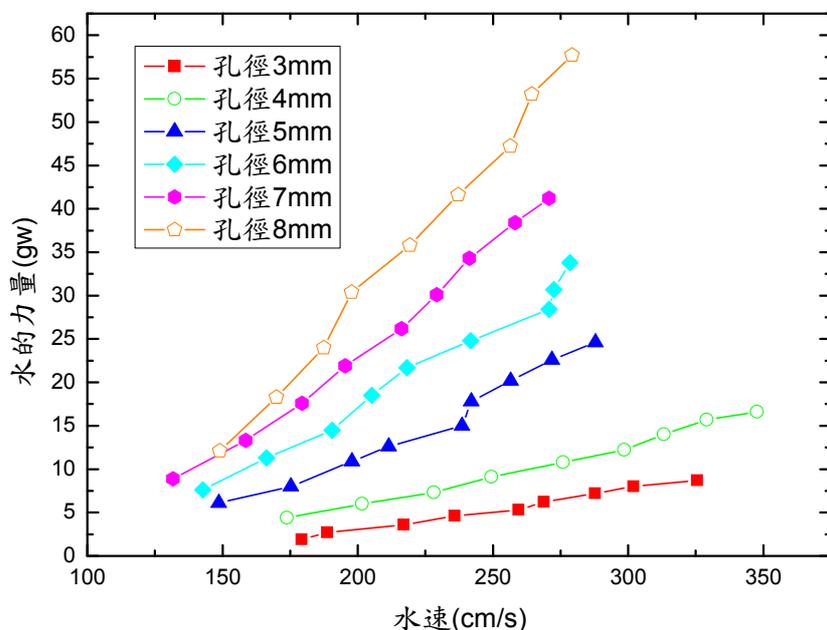


圖 50 各種出水蓋孔徑，水的沖力與水速的關係，發現水速增加，會造成水的沖力急遽增加。

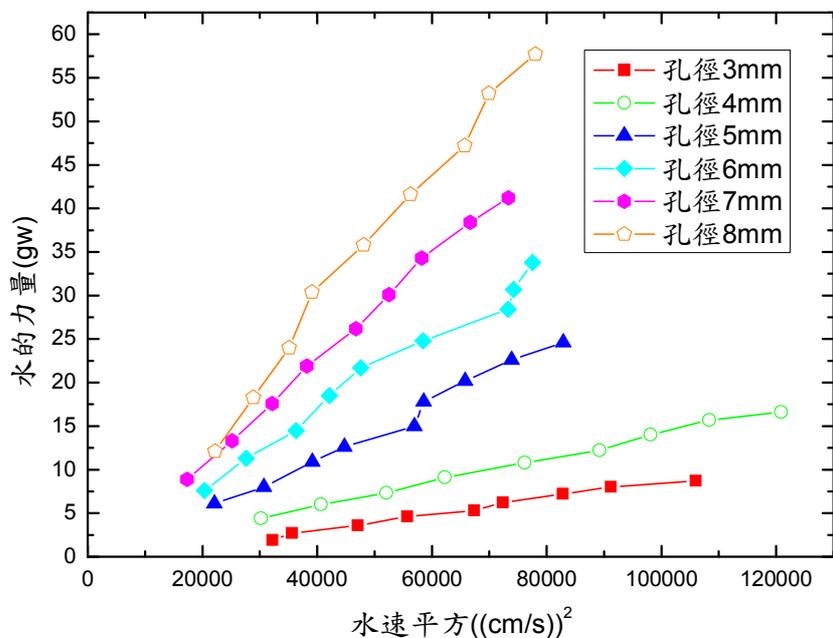


圖 51 各種出水蓋孔徑，水的沖力與水速平方的關係，發現水的沖力與水速平方成正比，這樣實驗結果與式(1) 相吻合。



### 三、探討水的流速與所能推動鉛塊最大重量之關係。

爲了與理論的模型相比較，製作了 5 個不同邊長的正立方體鉛塊，把鉛塊放在出水口前，調整水位高度，使鉛塊翻滾，並利用前項實驗水位高度與水速的關係，找出水速與所能沖走鉛塊最大重量間的關係。推動不同鉛塊所需的水位高度如圖 52。

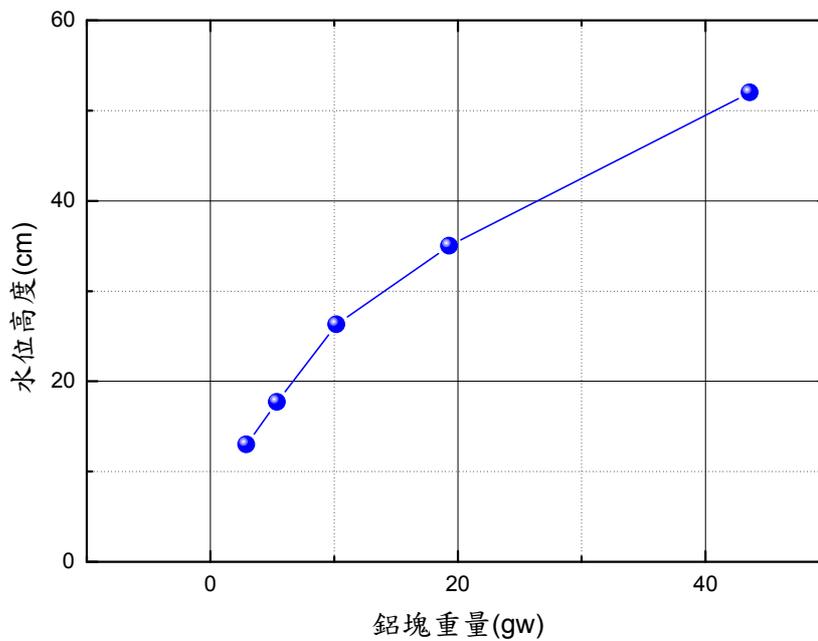


圖 52 鉛塊重量與其所被沖走所需之水位關係圖

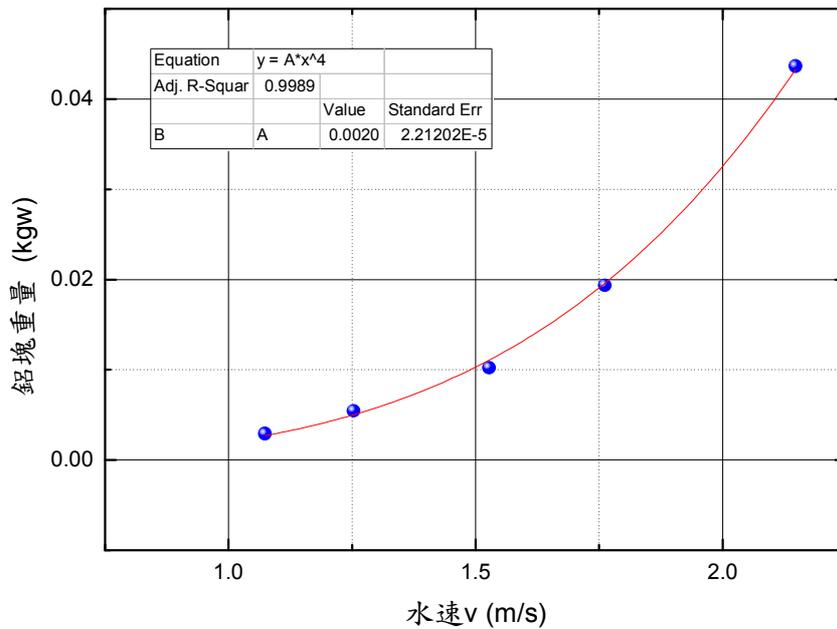


圖 53 鉛塊重量與其所被沖走所需之流速關係圖

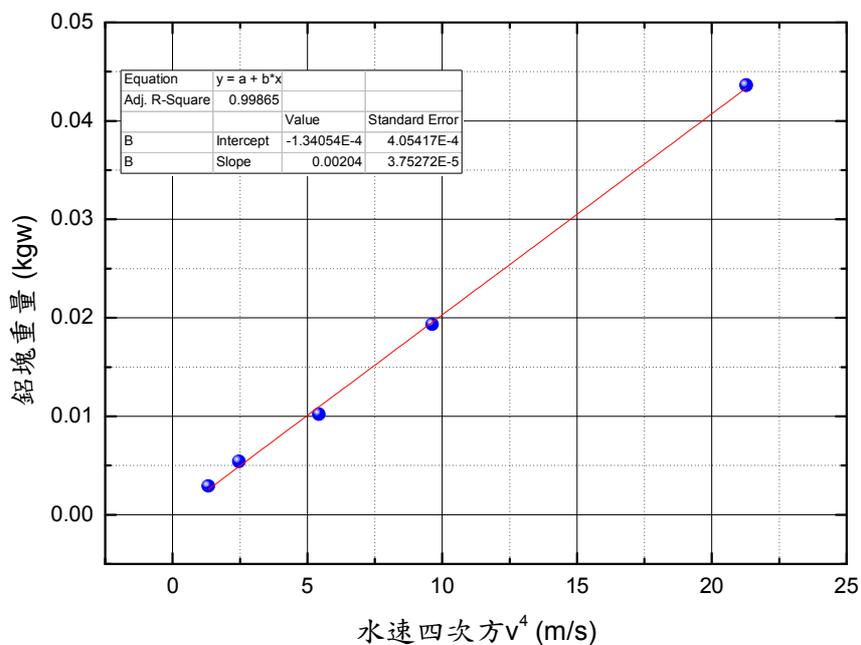


圖 54 鉛塊重量與其所被沖走所需之流速四次方關係圖

由圖 52 顯示推動不同鉛塊重量所需的水位高度。由前面實驗可知水位高度與流速平方成正比，關係式為  $h=0.11271v^2$ ，經由轉換可得圖 53 及圖 54 的結果。發現所能沖走鉛塊最大重量至少與流速四次方以上成正比，理論上應與流速的六次方成正比，但是考慮實際的狀況，如水的浮力、摩擦……等因素，這樣的結果是可以接受的。除此之外，可看出水對大自然破壞情形會隨水流速增加而變得非常劇烈，因此經由控制水的速度可以降低水對大自然破壞的情形。

#### 四、探討不同密度泥漿的流速與所能推動鉛塊最大重量之關係。

##### (一) 泥漿密度與水位高度、流速的關係。

以「泥漿 A」和「泥漿 B」，來進行實驗。選擇較大孔徑（8 mm）的出水孔蓋，測量三十秒流出的泥漿量，除以量測時間 30 秒及孔徑的截面積可求得泥漿流速，如圖 53。



圖 55 調配好的泥漿

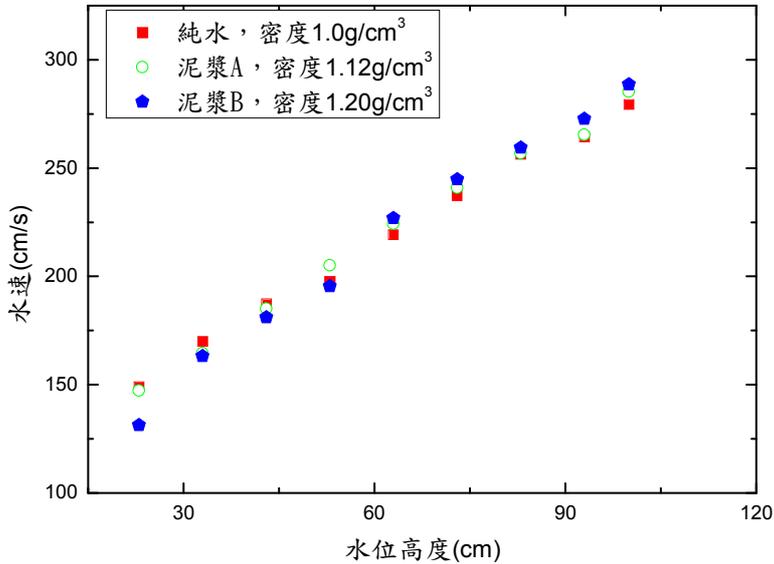


圖 57 泥漿沖擊鉛塊的情形

圖 56 出水蓋孔徑為 8.0 mm，純水、泥漿 A、泥漿 B，水位高度與水速的關係圖。不管是純水或是不同密度的泥漿，相同的水位高度所造成的流速幾乎不受到影響。本組只用出水蓋孔徑為 8.0 mm 作測試，是因其它孔徑太小泥漿不易流出。

##### (二) 探討泥漿的流速對不同鉛塊大小的沖擊。

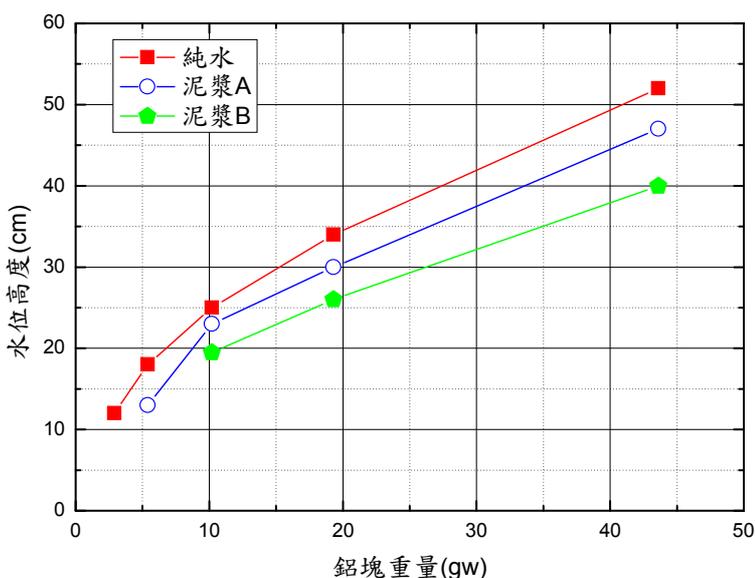
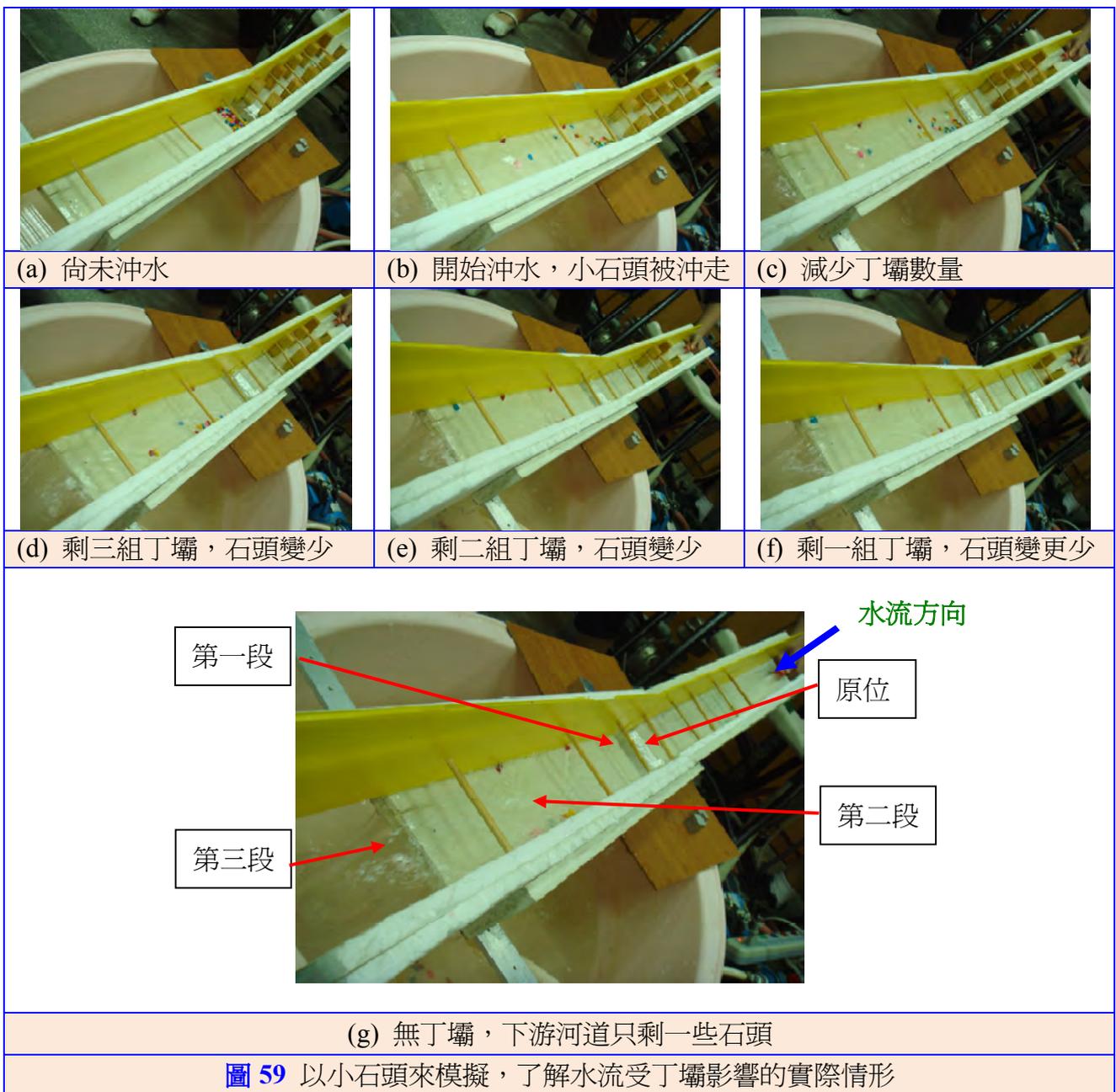


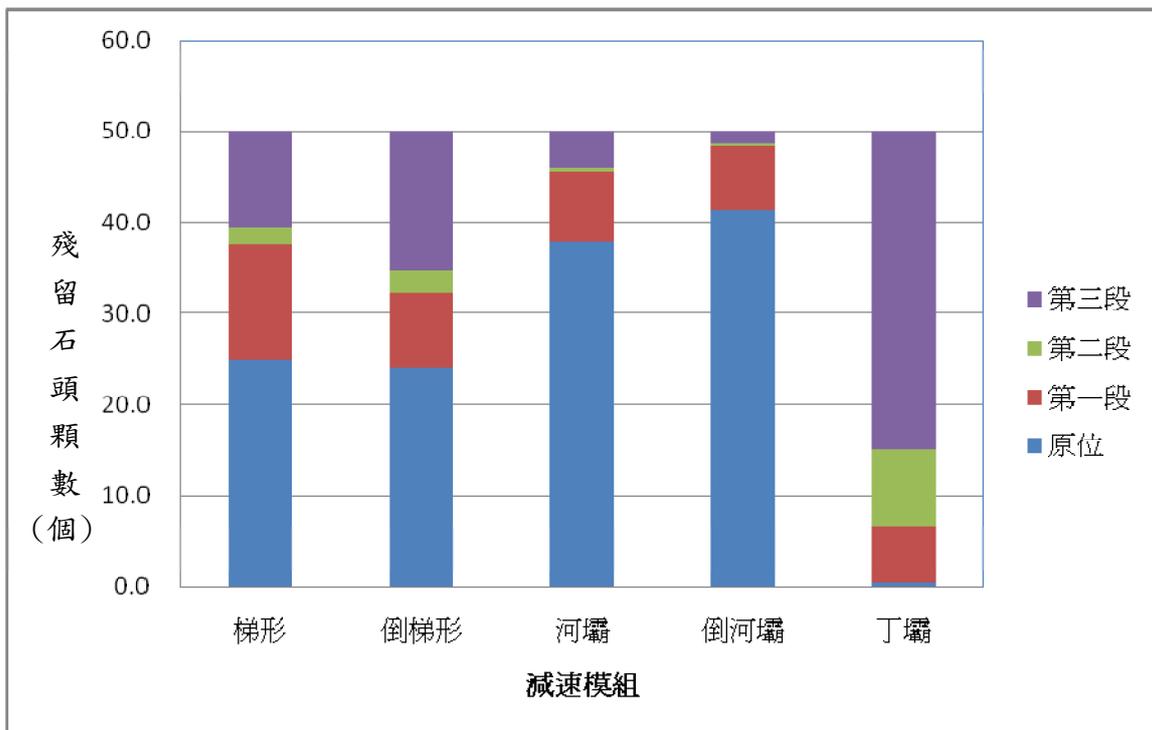
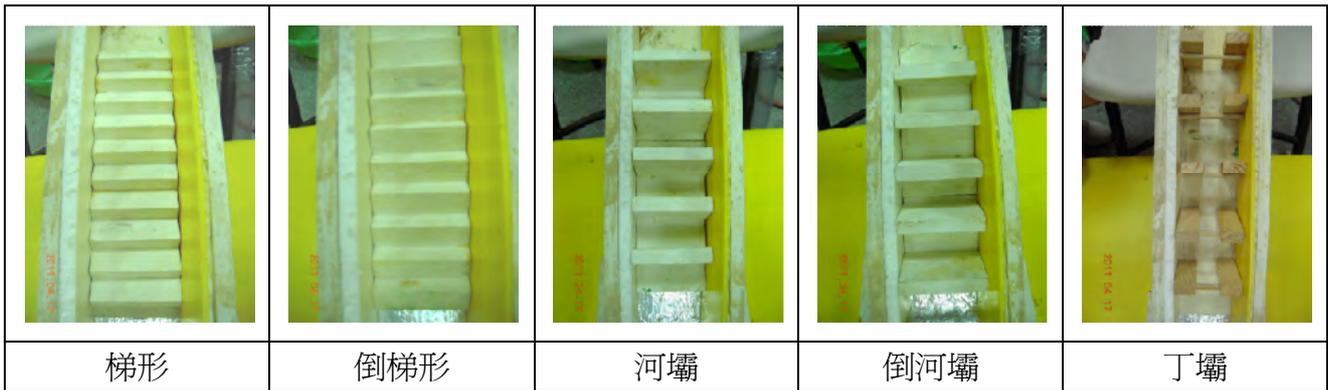
圖 58 出水蓋孔徑為 8.0mm，純水、泥漿 A、泥漿 B，沖走鉛塊重量與所需水位高度之關係圖。可看出泥漿與純水的趨勢相似，只要水流速度（水位高度）增加一點，則可沖走的鉛塊重量就增加許多。泥漿密度越高，將可用較低的水位沖走相同重量的鉛塊，也就是泥漿密度越高，在較低水流速度可將相同重量的鉛塊沖走，可見土石流夾帶砂石，密度提升，所帶來的破壞情形較嚴重。

五、探討各式減速模組降低水流速度的原因及應用。

既然水的流速會造成石頭翻滾，本研究將測試不同的河道減速模組的形狀，找出最佳的減緩河道水速的方法，進而減少災害。檢測方法是將減速模組置於上游河道，使水流由上往下流動，並流過減速模組。在下游河道的前端放置 50 顆小石頭，並將下游河道分成三段，以便觀察石頭受水流沖擊後的移動情形。實驗裝置完成後，打開抽水馬達，讓水流直接流下，流經減速模組而沖擊下游河道的小石頭，實驗時間為 30 秒，記錄小石頭的分布情形。此實驗分別對純水、泥漿 A 測試比較。圖 59 為水流受丁壩影響的實際實驗情形，記錄所有減速模組置的小石頭分布情形的實驗數據，彙整成石頭分布累積圖，如圖 60。

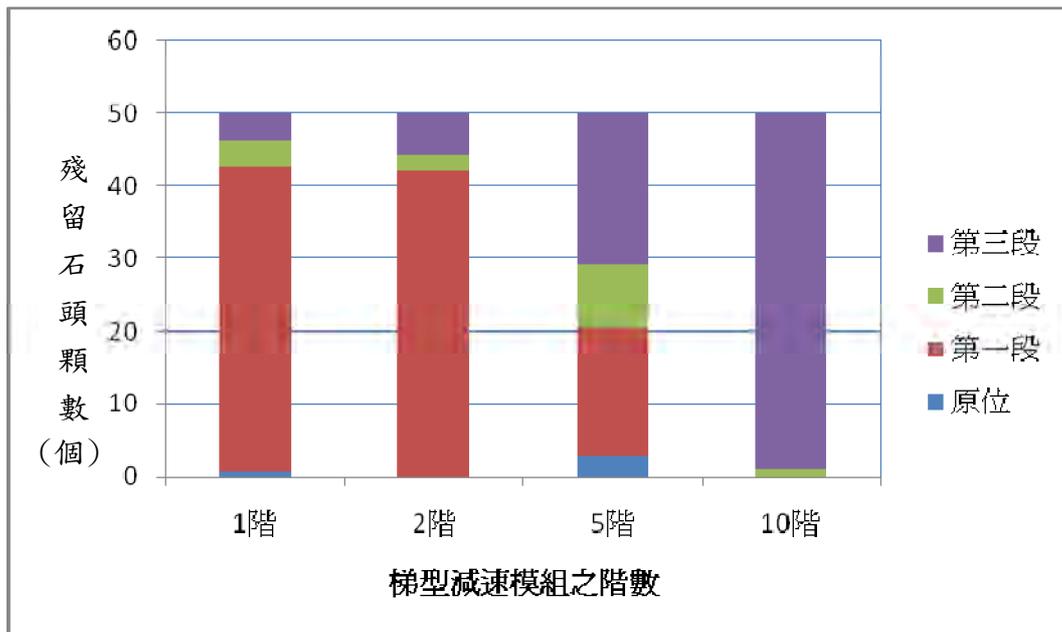


### 五種不同減速模組



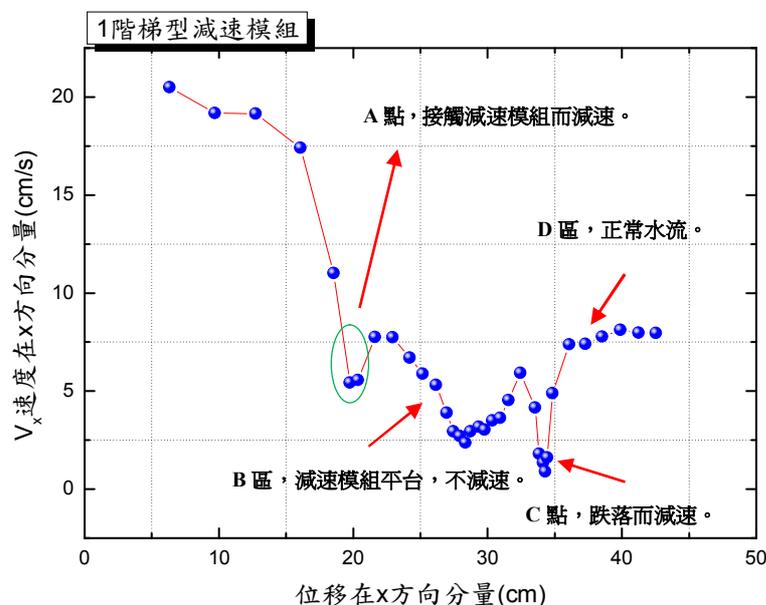
**圖 60** 由各河道減速模組所造成河道各段殘留石頭分布情形。發現不同河道減速模組的減低水流流速功效不同。依小石頭仍停留在原位，可以得到**減低水流流速功效依序為倒河壩、河壩、梯型、梯型、最後是丁壩**。由實驗結果發現**河壩型的減速效果最佳**，本組將在後面討論這樣的結果。

(五) 根據上述實驗結果，進行實驗修正，改以梯型模組來進行實驗，在固定長度及高度下設計了 1 階、2 階、5 階、10 階的梯型模組，並改用較大顆的紅色石頭方以利區分出水流的強弱；且出水口處以水流沖力控制儀器來控制水流強弱。實驗結果整理在**圖 61**。



**圖 61** 不同階數的梯型減速模組所造成河道各段殘留石頭分佈情形。階數越多，水流減速效果越差，其中以 1 階梯型減速模組所殘留的石頭最多，且 1 階及 2 階所沖走的石頭都分布在第一段河道。本組將在後面討論這樣的結果。

(六) 爲了更精確的了解梯型減速模組減速效果，我們利用網路上找到免費的物理軌跡分析軟體 Tracker，分析用高速攝影機所拍攝的小紅球隨水流流動的影片。



**圖 62** 1 階梯型減速模組，由圖可以觀察到小紅球隨水流移動，受到減速模組的影響運動狀態改變的情形。剛接觸減速模組時減速效果最明顯(A 點)，然後在平台區流動(B 區)，最後再掉落至底端(C 點)，然後於下游正常流動(D 區)。D 區的流速有稍微提升的情形。

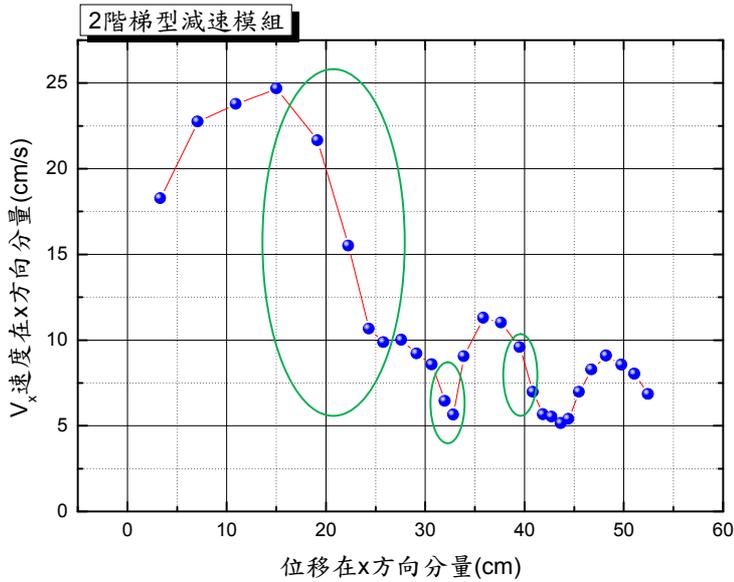


圖 63 2 階梯型減速模組，由圖可以觀察到小紅球隨水流移動，受到減速模組的影響運動狀態改變的情形。可以發現有 3 階段減速效果，第 1 段是剛接觸減速模組，剩下兩段是跌落階梯所造成。

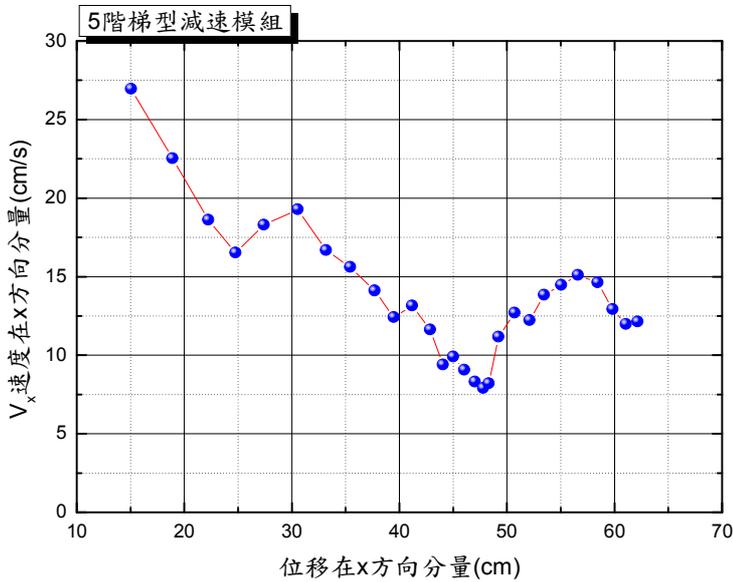


圖 64 5 階梯型減速模組，由圖中可以觀察到小紅球隨水流移動，受到減速模組的影響運動狀態改變的情形。除了剛開始接觸減速模組有較大的減速外，其餘皆是緩慢且連續的減速。

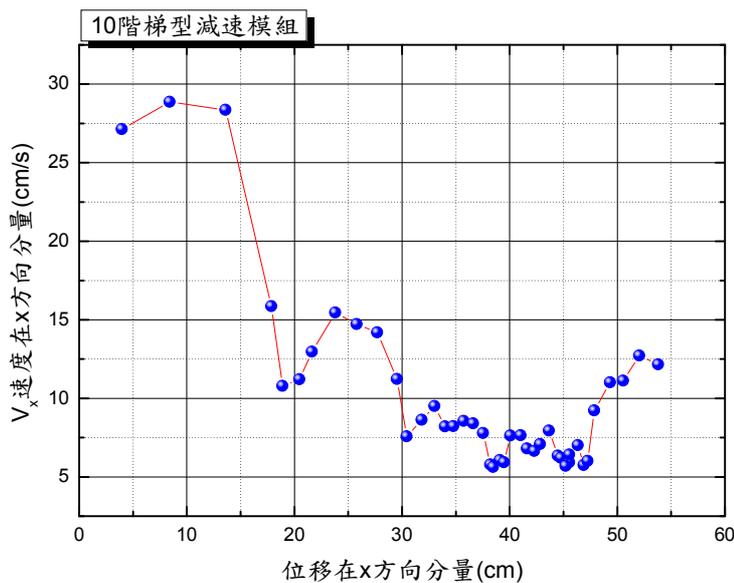
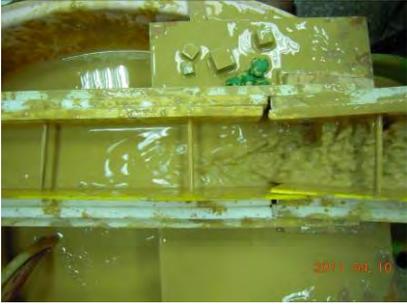


圖 65 10 階梯型減速模組，由圖可以觀察到小紅球隨水流移動，受到減速模組的影響運動狀態改變的情形。除了剛開始接觸減速模組有較大的減速外，後段就無較明顯之減速效果。

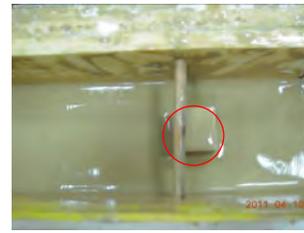
## 泥漿的實驗觀察

表一 以泥漿沖擊鉛塊，觀察在正常水道及使用梯形減速模組後的圖片列表

	正常水道	使用梯形減速模組
鉛塊(邊長 1.00cm)		
鉛塊(邊長 1.26cm)		
鉛塊(邊長 2.54 cm)		
<p><b>說明：</b>由上表之圖片可以觀察到，經由加裝梯形減速模組後，泥漿流動的情形有明顯減緩的現象。</p>		

## 泥漿沖擊鉛塊情形

表二 泥漿沖擊鉛塊之圖片列表

			
<p><b>說明：</b>由上表之圖片可以觀察到，如果泥漿流速緩慢，在沖擊鉛塊時，泥漿會緩緩流過鉛塊，並不會對鉛塊造成明顯影響；若泥漿流速極快，則會使鉛塊有移動的情形。</p>			

## 陸、討論

### 一、土石流衝擊石頭的力量

(一) 本組設計水流沖力控制儀器，來探討土石流衝擊石頭的力量，瞭解為何湍急的流水可以帶走巨大的石頭。理論上水衝擊的力量與液體的密度、水柱截面積及水柱速度平方成正比  $F = \rho Av^2$ 。

(二) 由簡單的理論模型知道河水能沖走的石頭最大質量與河水流速的 6 次方成正比，

$m = \rho a^3 = \frac{\rho_0^3}{8\rho^2 g^3} v^6$ 。當水的流速增大為 10 倍時，能被水沖走的石頭質量增大到百萬倍，結果令人驚訝。

### 二、水流沖力控制儀器

(一) 一開始的設計因為沒有抽水馬達，非常浪費水資源。經改良原儀器裝置，以連通管、水位控制器及抽水馬達組合，實驗時便可以穩定的控制壓克力管的水位。

(二) 水位控制器可以保持水位，若抽水馬達抽上來的水過多，將會從漏水管流到大塑膠盆，以保持水的高度，因此可以得到穩定的水流速度。

(三) 為了省水，利用學校內舊的 1/2 馬力抽水馬達將收集的水抽到水位控制器，再用來做實驗。上下移動水位控制器，改變水位高度，以控制水流出的速度。

(四) 實驗又碰到一個難題，因抽水馬達馬力固定，當使用出水蓋孔徑較小時，流出的水量比較少，因此造成漏水管來不及流掉多餘的水，水位控制器的水便會滿出來。因此設計一個三通開關，調整三通開關的大小，可讓想要的水量，分別抽到水位控制器，或流到大塑膠盆，解決這一個難題。

(五) 要測量水的沖擊力，嘗試多次，但都失敗。最後使用直立電子秤，當水從出水蓋水平地沖在電子秤上後，就向四處散開而流掉，此時電子秤只會測量到水平的沖力，與鉛直的重力無關，故可藉由電子秤測量水的沖擊力量。

### 三、探討不同水位高低及出水口孔徑大小對水流速之影響。

(一) 水位在 20 公分高度時，其流出的水速約為 150 cm/s，而水位在 100 公分高度時，其流出的水速增加到約 300 cm/s。但圖 47 中可觀察到若將曲線外差到高度為零時，其速度不為零，可見速度應不會是和水位高度成正比。

(二) 經數據處理，得到水位高度與水速平方成正比，與出水蓋孔徑大小無關。從一般的物理能量關係，水位高度的位能轉變成動能得知  $\rho gh = 1/2 \rho v^2$ ，水位高度與水速平方成

線性關係，孔徑大小並不太會影響流出的水速，實驗結果與理論相符合。

- (三) 實驗發現孔徑仍會稍影響水的速度，推測可能是水蓋的厚度所造成孔徑邊緣的摩擦力，或是出水蓋孔徑製作不良所造成的。

#### 四、探討不同水位高低及出水口孔徑大小對水的力量之影響。

- (一) 本組測量六種不同孔徑 (3.0 mm、4.0 mm、5.0 mm、6.0 mm、7.0 mm、8.0 mm) 的出水蓋。任何一種孔徑大小，其水位高度越高，其水的沖擊力量也越大。這是很合理的結果，山中瀑布越高，水衝下來的力道就越大。
- (二) 各種出水蓋孔徑，水的沖力與水速的關係，由圖 50 發現水速增加，會造成水的沖力急速增加。這也是為什麼每當大雨來時，河水的流速增加，會造成嚴重的環境破壞。
- (三) 如圖 51，研究結果顯示，對於各種出水蓋孔徑，發現水的沖力與水速平方成正比，，這樣實驗結果與式 (1) 相吻合。若大雨造成流水的速度增加十倍，其沖擊的力道將會是一百倍，所以水的流速快慢是造成環境破壞的主因。

#### 五、探討水的流速與所能推動鉛塊最大重量之關係。

- (一) 網路查得石頭的平均密度約為  $\rho = 2.5 \text{ g/cm}^3$ ，本組找到與石頭密度相近的鉛塊，其密度為  $2.7 \text{ g/cm}^3$ 。而且鉛塊較容易加工切割，製作成正立方體。
- (二) 為了模擬實際水道河床底部，本組以小石頭黏貼在壓克力板上，模擬佈滿小石頭的河床，鉛塊會因水衝擊而翻滾。
- (三) 實驗發現水流速度只要增加一點點，則可沖走的鉛塊重量就增加許多。雖然無法真正知道能沖擊鉛塊重量與水的速度幾次方成正比，但從圖 53、54 預估，至少和水速的四次方以上成正比，這個結果所造成的災害已經夠嚴重了。
- (四) 理論上水速的六次方與翻滾石頭重量成正比。因此要如何降低水的速度，防止大石頭被沖走，這將是降低災害的重要課題。

#### 六、探討不同密度泥漿的流速與所能推動鉛塊最大重量之關係。

- (一) 因泥漿在短時間內 (10 分鐘) 還不太會沈澱，抽水馬達也可以抽得動，所以可以模擬土石流的實驗。本組原本也構想使用細沙或小石頭，能更真實的模擬土石流，但細沙或小石頭會沈澱，無法完成同樣的實驗，所以最後放棄此一構想，只用不同密度泥漿作實驗。

- (二) 由圖 57 發現不管是純水或是不同密度的泥漿，相同的水位高度所造成的流速幾乎不受影響，有此式子  $\rho gh = 1/2 \rho v^2$ ，可以知道流體密度對其速度影響不大，主要還是受水位高度影響，實驗結果與理論相符合。
- (三) 純水、泥漿 A、泥漿 B 對不同鉛塊重量需多少水位高度的水流才可以沖走，由圖 58 結果發現泥漿與純水的趨勢相似，但泥漿密度越高，將可用較低的水位沖走相同重量的鉛塊，也就是泥漿密度越高，在較低水流速度便可將相同重量的鉛塊沖走，可見土石流夾帶砂石，密度提高，所帶來的破壞情形較嚴重。

## 七、探討各式減速模組降低水流速度的原因及應用。

- (一) 上面的實驗證實大雨造成河流水速急速增加，因而可以帶走又大又重的石頭。但如何降低河流的水速呢？本組設計了幾種不同的減緩河道水速的方法：梯形、倒梯形、河壩、倒河壩及丁壩五種減低水流速度的模組，並與單純的河道比較。
- (二) 本組檢測方法是在河道分成三段，以便觀察石頭受水流沖擊後的移動情形。記錄所有減速模組置的小石頭分布情形的實驗數據，綜合這些數據，作其效能分析。
- (三) 實驗發現不同河道減速模組的減低水流流速功效不同。依小石頭仍停留在原位，可以得到減低水流流速功效依序為是倒河壩、河壩、梯型、倒梯型、最後是丁壩。由實驗結果發現河壩型的減速效果最佳，梯形水道減速模組次之，丁壩水道減速模組略遜一籌，但其效果都比單純的水道佳。
- (四) 解釋上面實驗的結果，分別使用圖 66、67、68 來分析河壩、梯形、及丁壩的水流的示意圖：

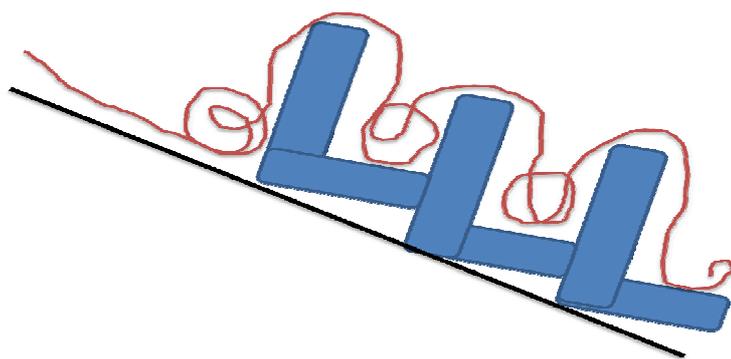
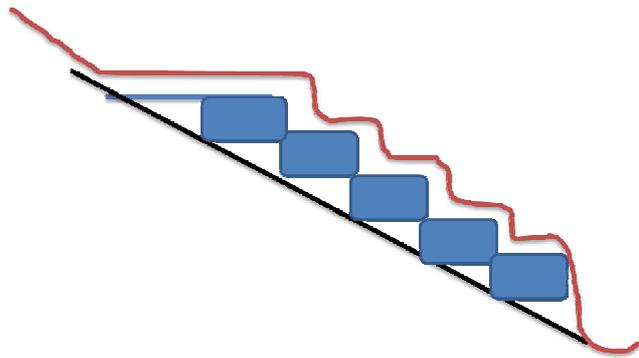
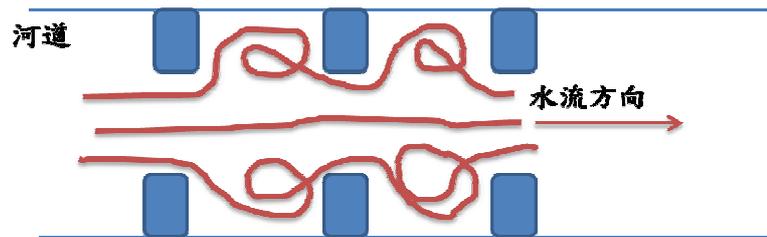


圖 66 河壩水流的示意圖。可發現水流在流經河壩型的減速模組時，水流會積存在河壩底部行成漩渦，且水流由河壩頂端跌落至底部，會損失動能，因而降低流速。



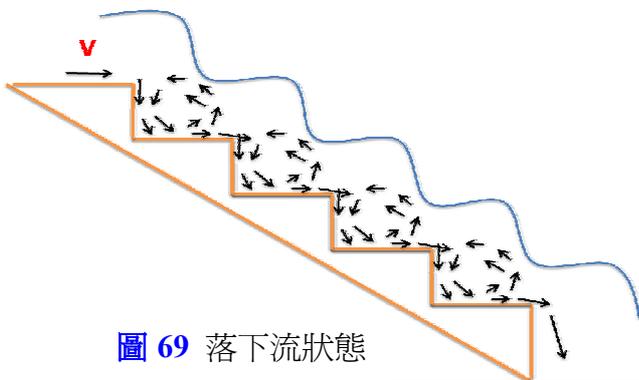
**圖 67** 梯形水流的示意圖。梯形模組之所以會減速則是因水流由上層階梯流至下層階梯時，會撞擊下層階梯而減低能量，因而減緩流速。



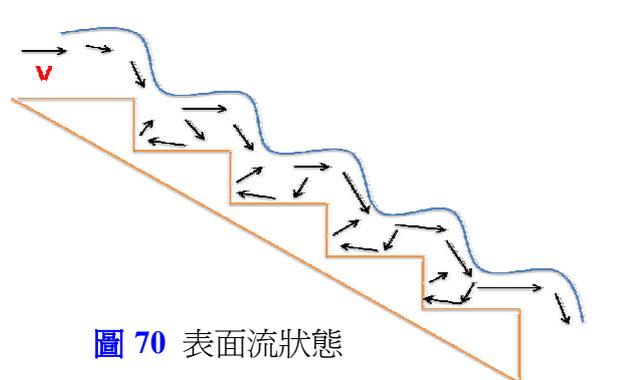
**圖 68** 丁壩的水流的示意圖。丁壩會減速則是因為水流會因丁壩的影響而產生漩渦，因而減少能量，使流速減緩，但效果並不比前兩種類型好，但是因為只佔用部分河道，有利於魚類迴流，對生態的影響較低。

(五) 由圖 61 結果發現階梯數越少減速效果越佳，跟我們原先設想的結果不同，我們最後找到行政院農委會水土保持局所提供的理論資料來加以解釋。

水流在流經階梯式減速模組時，會有兩種流動模式，分別稱之為落下流狀態及表面流狀態，如圖 69、70 所示，觀察實驗情形發現，階梯數越少，水流的流動模式會偏向落下流狀態，而階梯數越多則會呈現表面流的狀態，本組認為落下流狀態的流動，能量損失較多，因此 1 階梯型模組減速效果最佳。如果出水孔的水速降低，則較多階的梯型模組也會使水流呈現落下流狀態流動。



**圖 69** 落下流狀態



**圖 70** 表面流狀態

當水流的流速較為緩慢時，流動方式會以落下流狀態流動，減速效果明顯，若水速過快則會以表面流狀態流動，減速效果較差，因此為防止大雨所造成水流速急遽增加，可以使用落差較大的階梯，但對自然生態影響就比較大。

- (六) 由圖 61 結果又可看到，1 階及 2 階梯形減速模組的殘留石頭分布多集中在第一段河道，因為水流垂直沖下來時，可將石頭沖離原位，但卻沒有足夠且持續的力量將石頭沖更遠。
- (七) 階梯密度越低，則落差越大且水流也越易形成落下流狀態，使水流速度急遽減緩，這樣的現象，可以輕易的從大自然中觀察到，往往瀑布的下方都會伴隨著平靜的湖泊的產生。
- (八) 由圖 62~65 可以清楚看到水流受到四種不同階梯密度減速組的影響，有助於本組精確分析水流動的情形，協助本組設計更有效的減速模組。



圖 71 中國貴州黃果樹瀑布



圖 72 台灣十分瀑布

### 台灣常見的減速模組的應用



圖 73 台北縣雙溪鄉丁子蘭坑溪



圖 74 南投中寮月桃



圖 75 苗栗縣卓蘭鎮食水坑溪



圖 76 台北縣雙溪鄉牡丹溪

## 柒、結論

每當颱風或大雨一來，連日豪大雨不停的沖刷，山區大規模的地層滑動、路毀橋斷，造成土石流，湍急的河流可以沖垮橋墩，帶走巨大的石頭，從電視新聞就可以看見很大的石頭被大雨沖下山谷。本研究模擬大雨時河水的流速很大時，究竟能沖走多大的石頭。爲了瞭解這個問題，我們設計了幾個實驗，研究水位高低與水管流量和流動速度的關係，研究高低水位對不同水管大小流速的影響，並且研究不同水速度的沖擊力量。本實驗研究有幾項重要的結論：

- 一、實驗發現**水位高度越高，水量越大越快，流速越大，力量也越大**，可以沖走越大的石頭；而且**液體密度越大，其衝擊石頭的力量也越大**，這也代表大石頭能被快速的土流在河水的沖擊下不斷地翻滾而被沖走，大量的土流從山上流下來，一開始只帶走細砂石，但水流越快，流動的液體整體的密度也越大，就如雪滾般的越滾越大，力量也越大，可以把巨大石頭沖走。
- 二、利用不同水位設計和不同孔徑的出水口測得，**水位高度和水速平方成線性關係，與出水口孔徑大小無關**。
- 三、**利用直立電子秤測得水的沖力與水速平方成正比**。
- 四、實驗發現水流速度只要增加一點點，則可沖走的很大的石頭重量。理論上水速的六次方與翻滾石頭重量成正比。但**從實驗圖形預估至少和水速的四次方以上成正比**，這個結果告訴我們水的速度是造成的災害得原凶。因此要如何降低水的速度，防止大石頭被沖走，這將是降低災害的重要課題。
- 五、爲了降低河流的水速，減少災害，本組測試五種減緩河道水速的設計模組：梯形、倒梯形、河壩、倒河壩及丁壩，並與單純的河道比較。實驗結果發現**河壩型的減速效果最佳，梯形水道減速模組次之，丁壩水道減速模組略遜一籌**，但其效果都比單純的水道好。
- 六、水流在流經**河壩型的減速模組時，水流會積存在河壩底部行成漩渦，且水流由河壩頂端跌落至底部，會損失動能，因而降低流速**。梯形模組之所以會減速則是因水流由上層階梯流至下層階梯時，會撞擊下層階梯而減低能量，因而減緩流速。而**丁壩**會減速則是因爲水流會因丁壩的影響而產生漩渦，因而減少能量，使流速減緩，但效果並不比前兩種類型好，可是因爲只佔用部分河道，**有利於魚類洄流，對生態的影響較低**。
- 七、在固定高度及長度的條件下，階梯數越少的梯形減速模組減速效果越佳，因爲水流較易以落下流狀態來流動，但不利於自然生態的維護；而階梯數越多越易使水流以平面流狀態來流動，減速效果較差，尤其是大雨來時，河水流量及流速激增，會容易使多階的梯形減速模組喪失功能，所以必須根據溪流的狀況來決定梯型減速模組的階數密度。

八、使用物理動態軌跡分析技術，可以清楚的了解到水流受到減速模組的影響，確實是階梯密度越低，減速效果越佳。另外此技術可以提供人們進行關於水流方面的實驗，或是應用到分析大自然溪流的流動狀態，更進一步設計出觀察河流流速過大的警報器。



圖 77 土石流過後，受損的民宅。



圖 78 那瑪夏，民生村土石流現況。

## 捌、參考資料

- 一、薛靖寰等，2007，”水的力量”，中華民國第 47 屆中小學科展國小組自然科，國立臺灣科學教育館，台北。
- 二、王肇慶、蘇惠惠，”絢麗多彩的力學世界”，p44，北教育出版社。
- 三、鄧晴安等，2007，”土石流的流動之謎”，中華民國第 47 屆中小學科展高中組地球科學科，國立臺灣科學教育館，台北。
- 四、劉育成等，1997，”台灣心、雨中情”，中華民國第 36 屆中小學科展國小組地球科學科，國立臺灣科學教育館，台北。
- 五、詹昆樺等，2008，”土石流不流-探討土石流成因、對橋墩的破壞及預防機制”，中華民國第 48 屆中小學科展國小組自然科，國立臺灣科學教育館，台北。
- 六、陳映霖等，2005，”中流砥柱”，中華民國第 48 屆中小學科展國中組生物及地球科學科，國立臺灣科學教育館，台北。
- 七、<http://eco.swcb.gov.tw/fish.html>，行政院農業委員會水土保持局-生態工程。

## 【評語】 030512

優點：研究主題關心台灣之自然災害，學生表達能力佳。

缺點：研究題目，不夠明確，究竟是要研究水的力量所造成的災害，還是要探討自然災害的防治？流水作用力大小的測量不夠嚴謹。

建議：實驗模型中，各種配件形狀、樣貌、以及大小比例，應設法符合實際環境尺度。要改進作用力的測量方法。