

# 2020 年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

- 作品編號** 180013
- 參展科別** 地球與環境科學
- 作品名稱** 水庫吸塵器—水庫水力旋流排淤之探討
- 得獎獎項** 大會獎：三等獎  
女性地質學家協會獎  
出國正選代表
- 就讀學校** 國立臺南第一高級中學  
國立臺南女子高級中學
- 指導教師** 施怡如
- 作者姓名** 謝詠晴、蔡捷羽
- 關鍵詞** 水庫、旋流、清淤

## 作者簡介



我是謝詠晴，目前就讀臺南一中一年級，很榮幸有參與國際科展的機會，與更多人分享我們的研究成果且彼此切磋交流，「Life sets goals for science, and science illuminates the path of life.」希望我們的科學研究能夠為改善生活環境盡一份心力，也感謝父母、老師、教授及一路相伴我們的人，所有給予我們的建議、支持與鼓勵以及面臨挫折的應對都成為了我們最好的收穫。

我是蔡捷羽，現在就讀臺南女中一年級。國中開始做科展，從剛開始對一切的茫然，到現在能共同發表研究成果，過程中跌跌撞撞，原本表達能力較差的我，在歷經科展比賽與其他學生交流後，表達能力逐漸有所長進，感謝大會給我這個機會參加這次科學盛宴，讓我有機會透過交流繼續努力，希望這次國際科展能開拓自己的視野，讓我的高中生活更為豐富。

## 摘要

為改善水庫淤積問題，提出清除泥砂淤積與水土資源回收之解決方案，本研究採旋風吸塵器概念製作結構簡單的水力旋流分離裝置，可在水庫供水時同時排淤，並運用虹吸引水方式抽取淤泥，以高度、管徑、圓桶長度作為影響旋流分離的主因，經實驗發現，改變此三項變因可影響流速，進而影響分離率，實驗中可有效分離 99%河砂與 97.5%白河水庫淤泥。

從模擬水庫排砂的實驗中，探討淤積粒徑的分布區與不同水力排淤工法的效益，依實驗結果得到水力旋流分離適用於水庫中上游粒徑大於黏土的淤積，水庫下游可搭配排淤隧道排出較難分離的黏土淤積，兩者搭配使用清淤將可不再受天候限制，並可蓄清排淤達到節能減碳的效果，延長水庫的壽命並降低原水濁度。

## Abstract

In order to improve the siltation problem of reservoirs, the researchers propose a solution to remove sludge deposits and recover water and soil resources. In this research, the cyclone vacuum cleaner concept is adopted to make a simple hydrocyclone separation device, which can simultaneously discharge sludge and supply water in the reservoir and use siphon to extract the sludge. The height, diameter and length of the drum are the main factors affecting the cyclone separation. It is found, through experiments, that changing the three variables can affect the fluid velocity and thereby affecting the separation rate.

The experiment can effectively separate 99% of the river sand and 97.5% Baihe Reservoir sludge.

By observing the simulated experiment of sand discharge in the reservoir, this research intends to discuss the distribution of sedimentation particle size and the effect of different hydraulic desilting methods. According to the experimental results, the hydrocyclone separation is suitable for the sediment in the middle and upper reservoir which particle size is larger than the clay. The desilting tunnel discharges the clay which is difficult to separate. The use of dredging together can no longer be restricted by the weather. It can further clear the sludge to achieve the effect of energy saving and carbon reduction, prolonging the life of the reservoir, and reducing the turbidity of the raw water.

# 壹、前言

## 一、研究動機

在全球氣候暖化的影響下，各國因增加的洪水量與泥砂量，開始重視水庫淤積問題及排砂對策。臺灣雖然每年平均有二千多毫米的降雨量，但由於山高坡陡，河短流急，且豐枯期時雨量懸殊，因此需興建多座水庫以調解水量，然而常年來因水土保持不佳，使得表土沖蝕作用增強，加上颱風豪雨夾帶大量泥沙，使水庫淤積問題日益嚴重，影響水庫蓄水功能，目前水庫已有興建排淤隧道，但此法是直接將淤泥排入河道且僅能在豐水期間使用，需耗費大量水資源及經費，河道泥砂淤積也使水患發生機率上升，清淤效率遠不及淤積速度。

現今家家戶戶幾乎都有吸塵器，我們在想是否能利用旋風吸塵器以離心力分離空氣與塵土的概念來清除水庫淤泥？因此想探討以低耗能的水力旋流分離方式將水與泥沙分離的可行性，期望能幫助臺灣水庫於供應水資源的同時能順便帶走淤泥，且能回收並持續利用，讓水庫早日水清石見，遏止淤積問題的惡化。

## 二、研究目的

為了探討旋流分離對於水庫清淤的可行性，並找出適當與可行性的處理條件及對策，研究目的分述如下：

- (一)蒐集水庫淤積相關文獻資料以瞭解現況
- (二)製作旋流分離裝置
- (三)探討影響旋流分離裝置之分離效果的主要變因
  - 1.出入管的管徑對分離效果的影響
  - 2.圓筒長度對分離效果的影響
  - 3.不同高度的流速對分離效果的影響
  - 4.探討實際採用水庫淤泥進行分離的效果
- (四)利用水庫模型分析水力清淤工法的效益
- (五)探討水庫淤泥粒徑與沖積分布位置的關係

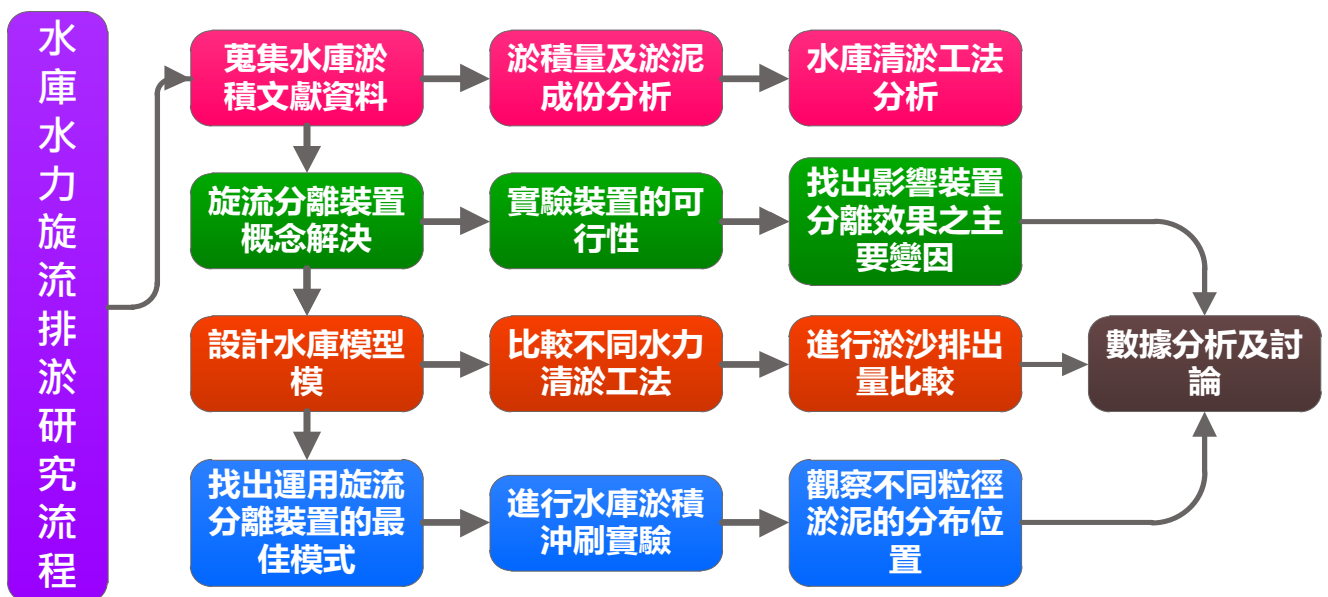
## 貳、研究設備及器材

實驗設備儀器	游標卡尺（最小刻度為 0.01mm），精密電子秤(最小刻度為 0.1g)，3D 列印機、實體顯微鏡、相機。
實驗器材	塑膠桶、PVC 塑膠管、塑膠軟管、美工器具、量尺（最小刻度為 0.5mm）、矽膠、AB 膠、電鑽、木板、防水膠帶、沉水馬達、螺桿牙條、螺帽、量杯、鋸子、寶特瓶、玻璃水槽(規格 90cm×30cm×30cm 玻璃厚 0.5cm)、塑膠桶。
實驗樣本	曾文溪沖積扇河砂、鹽水溪河岸泥土、白河水庫淤泥(由嘉南農田水利會白河管理處提供)、白色礫石、米白色極粗砂。

## 參、研究過程與方法

### 一、研究架構

本研究流程分為四個步驟，分別是文獻蒐集、實驗旋流分離裝置分離淤泥與水的可行性，並找出設計裝置的主要變因、設計水庫模型模擬不同清淤方法於供水時同時帶走淤泥的效益比較、並找出分離裝置可運用的建議模式，分項說明如下流程圖：



【圖 1】水庫水力旋流排淤研究流程圖

## 二、文獻探討

### (一)水庫淤積背景資料

#### 1.臺灣水庫淤積情形

經濟部水利署公告臺灣水庫目前有效容量的概況，中大型水庫的淤積率大部分已超過30%(如表1及圖2)，霧社水庫、白河水庫、谷關水庫及尖山埤水庫，其總淤積率和有效容量淤積率甚至超過50%，若不及早解決泥砂淤積，供水將有嚴重影響。

【表 1】臺灣中大型水庫概況（資料統計至中華民國 107 年底）

水庫名稱	設計總容量 (萬立方公尺)	設計有效容量 (萬立方公尺)	目前總容量 (萬立方公尺)	目前有效容量 (萬立方公尺)	總容量淤積率 (%)	有效容量淤積率 (%)	最近完成測量時間 (年/月)
石門水庫	30,912.0	25,188.0	20,315	19,740.0	34.3	21.6	107/11
霧社水庫	14,860.0	14,600.0	4,020.0	4,020.0	72.9	72.5	106/12
明德水庫	1,770.0	1,630.0	1,236.0	1,224.00	30.2	24.9	103/08
谷關水庫	1710.0	1250.0	459.3	459.3	73.1	63.3	107/11
曾文水庫	80364.0	68644.0	51032.6	51002.0	36.4	25.7	107/11
烏山頭水庫	15,415.0	15,415.0	7,828.0	7,828.0	49.2	49.2	104/06
南化水庫	15,805.0	14,946.0	9145.4	9,145.4	42.1	38.8	107/11
白河水庫	2,509.00	2,253.0	1,018.0	740.5	59.4	67.1	106/12
虎頭埤水庫	135.7	135.7	106.1	106.1	21.8	21.8	100/10
尖山埤水庫	698.5	633.0	150.6	150.6	78.4	76.2	101/01

(表 1 資料來源：經濟部水利署全球資訊網。107 年（修）現有水庫概況。2019 年 7 月 16 日，取自 <https://www.wra.gov.tw/media/74461/107年現有-修.pdf>)



【圖 2】現地勘查白河水庫目前淤積情形

## 2.臺灣水庫泥砂成分及粒徑分析

蒐集各重要水庫淤泥屬性的資料，分別整理於(表 2)，表中淤砂之物理特性雖可能隨時間及地點不同而有些許差異，但仍具代表性。泥砂粒徑配級之分類方法多，較為常用者為美國地球物理學會之分類法，參照該分類法的泥砂顆粒大小及級配分類，水庫淤泥的主要成份及粒徑分別為：砂土的粒徑 $>62\mu\text{m}$ 、坩土介於 $4\mu\text{m}<$ 粒徑 $<62\mu\text{m}$ 、黏土的粒徑 $<4\mu\text{m}$ （王文江，2013），且比重皆大於 2.5。

【表 2】水庫泥砂成分

水庫	水庫淤泥物理性質					水庫淤泥化學成分			
	成分 (%wt.)				顆粒 比重	SiO <sub>2</sub> (二氧化矽)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (氧化鋁)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (氧化鐵)	其他
	礫石	砂土	坩土	粘土					
霧社水庫	0	3	39	58	2.75	61.9	23.8	7.9	6.4
白河水庫	0	22	55	23	2.67	57.3	18.5	7.1	17.1
曾文水庫	0	19.3	42.8	37.9	2.64	64.9	21.6	7.0	6.5
石門水庫	0	0	18	82	2.65	59.7	18.3	6.1	15.9
明德水庫	0	6	71	23	2.71	69.1	13.4	5.2	12.3
德基水庫	0	23	46	31	2.79	74.2	16.8	5.0	4.0
虎頭埤水庫	0.3	2.4	59.7	37.6	2.73	71.5	13.8	4.3	10.5
日月潭水庫	0	13	22	65	2.73	69.3	20.7	5.9	4.0

(表 2 資料來源：顏聰、黃中和，2010。水庫淤泥之處置與資源化再利用為土木材料)

## 3.臺灣水庫目前清淤方式

水庫清淤是延長水庫壽命很重要的一環，臺灣目前主要的清淤方式如下：

- (1) 陸上機械開挖：適於在枯水季水庫水位低時實施，利用挖土設備開挖露出水面之淤積物，清淤受限水位高度，且山區交通運輸不便。
- (2) 水力抽泥：工作船上配置抽泥或挖泥設備在庫內水域進行清淤，需有適當之水深以便於靈活移運，清淤需依靠額外能源動力及耗費大量成本，排出之淤泥去化困難。
- (3) 排砂隧道：於適當時機開啟水庫洩水，利用水流挾砂將已沉積在庫底或流入庫中之泥砂排至下游河道，排淤量雖大但需等至颱風期間才能使用，且建造所需費用不貲。

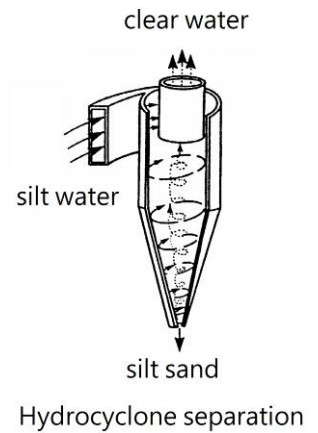
以上這些清淤方式的共同缺點為耗費時間及成本高，且須等待天候適當條件才能使用



該清淤方式。

## (二)旋風分離原理

1.水力旋流分離裝置採用旋風分離原理，流體與微粒沿切線方向進入分離器，流體在圓形容器內旋轉形成圓周運動產生離心力，使比重大的粒子被拋向器壁運動，並受重力沉降至底部進行收集，而比重小的流體則上升由中心出口排出。此原理經常利用在工業粉塵收集與家庭吸塵器，亦可將數個分離器串聯或並聯進而增加分離效率。集塵粒徑範圍 10~200 $\mu\text{m}$ ，性能較佳者可處理至 5 $\mu\text{m}$ (淡江大學化學工程與材料工程學系，2016)。大多文獻以空氣作為流體應用，本研究改採用水為流體進行探討。



2.本研究引用文獻中 Lapple 推導之公式：
$$d_{pc} = \left[ \frac{9\mu W}{2\pi N V_i (\rho_p - \rho_a)} \right]^{1/2}$$
 (如表 3)，計算可被旋風分離裝置分離之最小粒徑( $d_{pc}$ 即稱為截取直徑)，對分離裝置而言，微粒粒徑大於截取直徑時，分離效率大於 50% (中山大學環境工程研究所教材)，遂以該公式進行探討水為流體的分離泥砂的可行性。

【表 3】旋風分離裝置計算可被收集粒子的截取直徑公式說明對照表

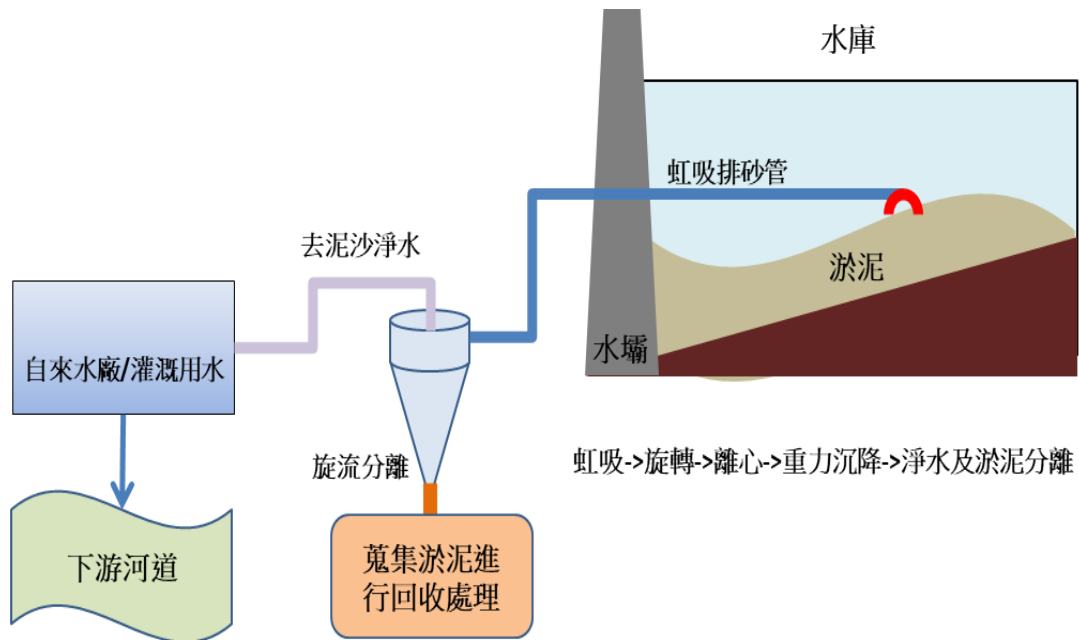
$d_{pc}$	可 50% 被分離之最小粒徑(m)	<p>備註：旋轉次數</p> $N = \frac{1}{H} (LB + \frac{Lc}{2})$
$\mu$	流體之黏度 (kg/m · s)	
$W$	流體入口寬度(m)	
$N$	流體在分離裝置內之迴旋次數(次)	
$V_i$	進入分離裝置流體之速度(m/s)	
$P_p$	粒子之密度(kg /m <sup>3</sup> )	
$P_a$	運送流體密度(kg /m <sup>3</sup> )	

## (三)研究整合構思

1.根據文獻，如排砂隧道或機械抽泥等工法，大都是直接將水庫底部淤泥、異重流等含



高濃度泥砂水排入河道中，造成河流濁度過高，導致下游淤積且浪費水資源，若在水庫中下游增設一個水力裝置（如圖 3），於淤泥處附近採用低耗能的虹吸方式，同時引水及吸進淤泥，靠重力位能與虹吸效應引動水流，進入該裝置，將水與泥砂分離，不僅水與砂石資源皆可回收利用，且藉由連通管運輸砂石到水庫外亦可節省陸運交通費用。



【圖 3】水庫水力旋流排淤的應用概念圖

2.依文獻預估清淤效益：根據經濟部水利署水資源局網站資料，目前曾文水庫短中期水力及機械清淤預計一年可清淤 232 萬立方公尺淤泥(經濟部水利署南區水資源局，2017)，僅達入庫泥砂量 41.4%(年入砂 560 萬立方公尺)，若依曾文水庫每年計畫民生及工業合計供水為 1 億 5 千萬立方公尺，如能在水庫供水同時能帶走含 5%容積淤砂，換算一年 750 萬立方公尺清淤量，將使水庫排淤量比入庫泥砂量大。長期使用可清除水庫多年淤積砂石，如此無須擔憂原水品質，無需動力與天候配合可長時間持續運作運輸與回收砂石資源。

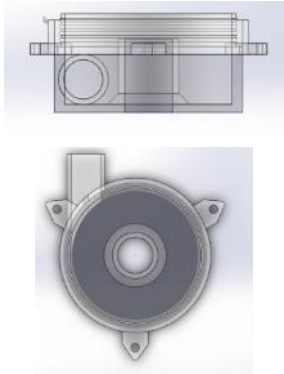
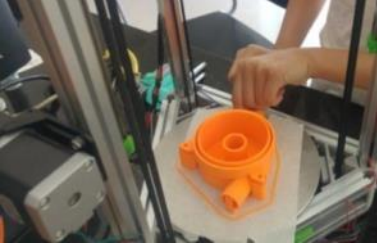




### 三、製作旋流分離裝置

#### (一)第一代裝置

##### 1.製作方法（如圖 4）

- (1)因寶特瓶易觀察、切割且耐水壓，故本研究採用寶特瓶作為裝置本體。
- (2)利用 3D 列印繪圖軟體---solidworks 設計裝置零件並列印。

- (3)切開瓶子底部、套上分離器零件，並用矽膠密封。
- (4)將木板鑽孔後，利用螺桿、牙條及螺絲固定瓶身與避免連接處壓力過大漏水。
- (5)塞入 PVC 水管作為入水與出水管，並在寶特瓶口處以水管連接另一寶特瓶以作為泥砂收集處。

		
設計分離器零件	3D 列印出分離器零件	套上零件並以矽膠密封
		
固定瓶身	塞入水管	完成第一代實驗裝置

【圖 4】第一代裝置製作方法

## 2.基礎測試：

置放泥水槽於高處 0.7 公尺，再將分離樣本(鹽水溪河岸泥土)160g 加上 10L 的水倒入泥水槽中，以虹吸模式引水至分離器觀察泥砂分離效果。

## 3.測試結果（如圖 5）：

- (1)收集瓶可收集到泥砂，證實虹吸吸力可帶動泥砂進入分離裝置中。然而，測試發現外表看似密合的 3D 列印零件，在高水壓下卻會產生滲漏，且由於入水管太薄弱出現裂痕。
- (2)又因虹吸管吸口移動吸砂時，會卡住泥砂桶底部導致流速不穩定，無法有效觀察實驗水流與分離效果。

(3)另外收集瓶分離效果雖有效，但出口水桶還是可看到一些混濁泥水，經過討論後，推測原因為鹽水溪河岸泥土成分包含有機質與植物且土石粒徑不一，導致難以判斷分離效果。

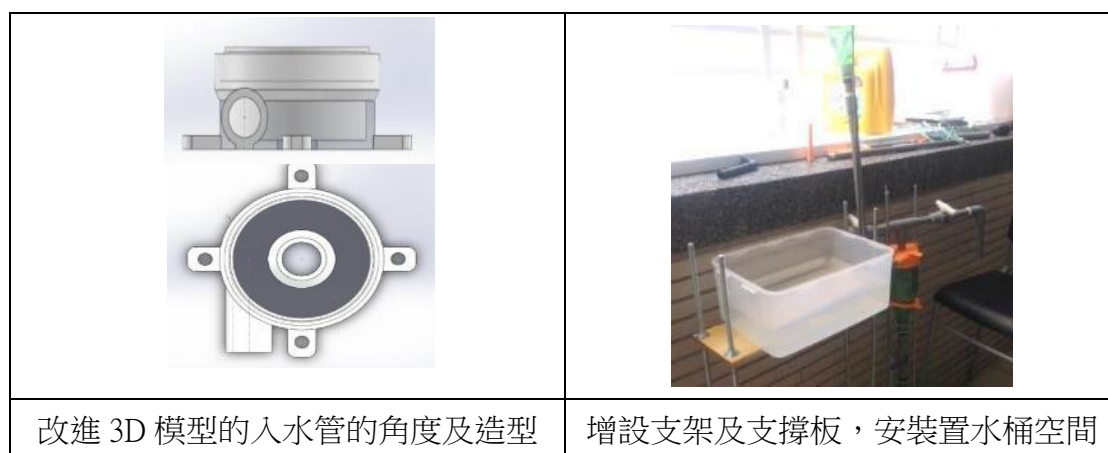


【圖 5】第一代裝置測試結果

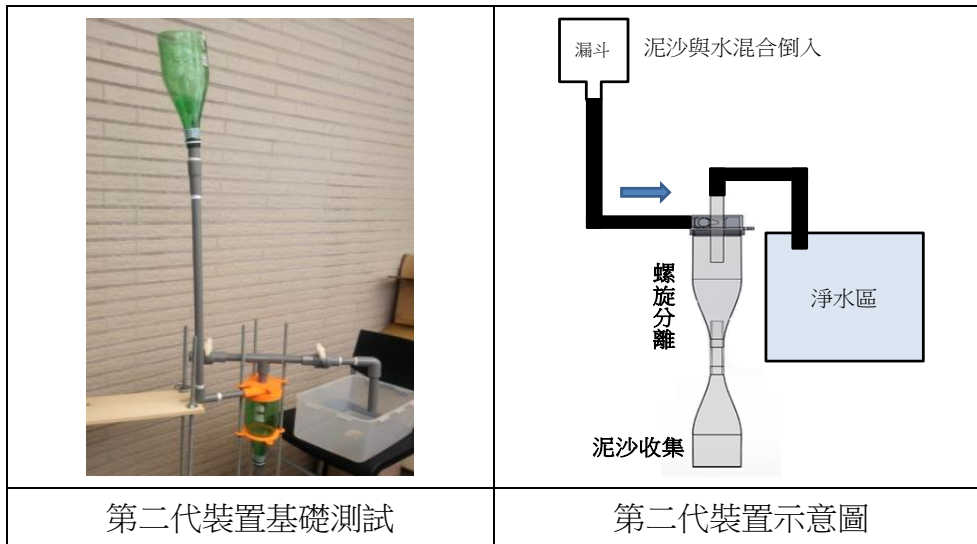
## (二)第二代裝置

### 1.改善第一代裝置缺失問題（如圖 6）及基礎測試（如圖 7）：

- (1)基於上述第一代裝置 3D 列印零件滲水問題，針對 3D 模型入水管進行外型修正。
- (2)第一代採用分離樣本因成分及土石粒徑不一，難以判斷分離效果，因此改取成分較為單純一致且沒有其他溶水物質的曾文溪沖積扇河岸粗砂(粒徑範圍  $1000\ \mu\text{m}$ - $250\ \mu\text{m}$ )與細砂(粒徑範圍  $250\ \mu\text{m}$  - $125\ \mu\text{m}$ )作為分離樣本。為簡略形容所使用的分離樣本，曾文溪沖積扇河岸粗砂與細砂將會改成河砂來表示。
- (3)基於上述第一代裝置無法準確測量分離率結果的問題，遂改以固定引水管高度的方式，從上方漏斗倒入水並同時投入定量細砂於漏斗內，混合進入分離裝置後再觀察收集瓶中的細砂收集量。



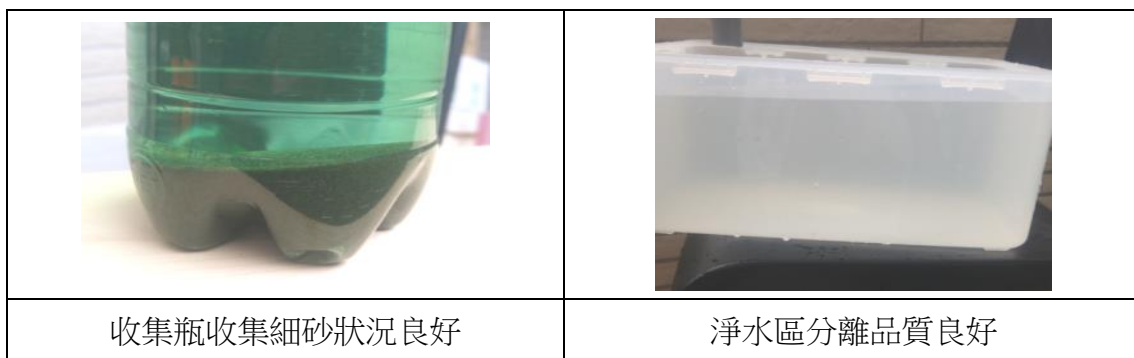
【圖 6】改善第一代裝置缺失問題



【圖 7】 第二代裝置基礎測試

## 2.測試結果:




淨水區收集桶水質清澈無太多雜質(如圖 8)，且分離裝置也無出現其他問題。



【圖 8】 第二代裝置測試結果

### (三)檢測泥沙分離率的最佳方法

為了得知裝置的分離效果，我們以比例的方法計算出分離率(如圖 9)

		
<p>實驗組(A): 過濾瓶濾出的泥沙水</p>	<p>對照組(B): 倒入 160g 的泥 沙並裝滿水-1196. 9g</p>	<p>(C): 將空瓶裝滿水-1095. 4g</p>
<p>利用 <math>\frac{A-C}{B-C} \times 100\%</math> = 分離率，以比例算出，且數值愈大，則代表分離效果愈好，不會因比重關係而使結果有誤差。</p>		

【圖 9】 以比例的方法計算分離率

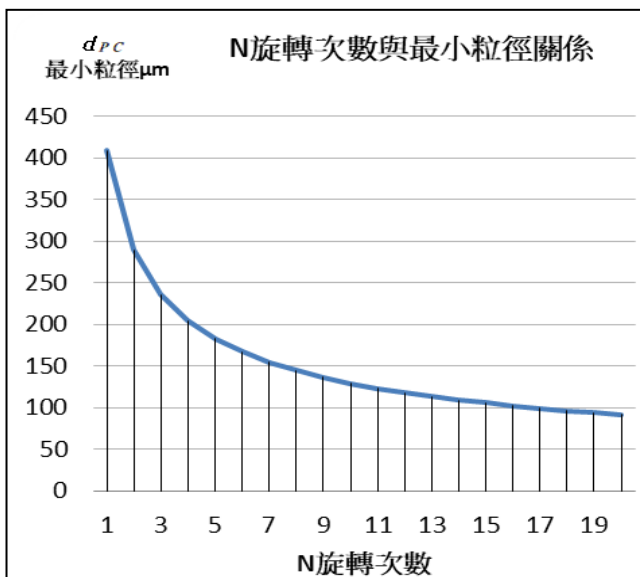
#### 四、實驗 1:探討影響旋流分離裝置之分離效果的主要變因

##### (一)公式分析

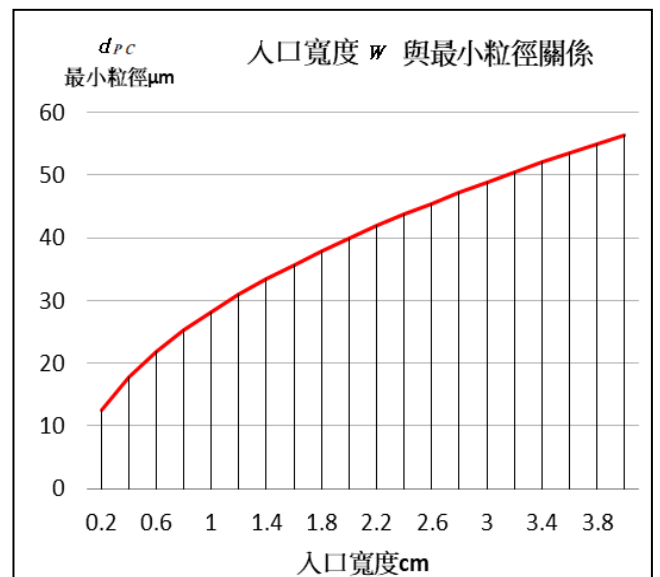
1.在透過公式與設計裝置過程中，發現入水管的管徑、旋轉次數及不同高度的流速可能對旋流分離裝置造成影響，因此我們以此三項作為實驗變因，依據文獻探討中計算可被旋流分離裝置分離之最小粒徑的公式，代入我們製作的第二代裝置之參數(如表 4)計算可被收集粒子的截取直徑數值約為  $32.06 \mu\text{m}$ ，利用 EXCEL 軟體來試算三個變因入口大小、水流旋轉次數、流速與最小粒徑關係之曲線圖(如圖 10、11、12)，希望藉由上述變因可找到影響分離裝置的關鍵點。前述文獻顆粒比重為 2.5 以上，採比重數據低者為計算參考。

【表 4】公式換算之對照表

$d_{pc} = \left[ \frac{9 \mu W}{2 \pi N V_i (\rho_p - \rho_a)} \right]^{1/2}$	可 50% 被分離之最小粒徑(m)	$d_{pc}$	$32.06 \mu\text{m}$	分離粒徑
	流體之黏度 (kg/m · s)	$\mu$	0.001	水的黏度
	入口寬度(m)	$W$	0.014	入口口徑
	流體在旋風機內之迴旋次數(次)	$N$	13	旋轉次數
	進入旋風機流體之速度(m/s)	$V_i$	1	流體速度
	粒子之密度(kg /m <sup>3</sup> )	$\rho_p$	2500	分離比重
	運送流體密度(kg /m <sup>3</sup> )	$\rho_a$	1000	流體密度

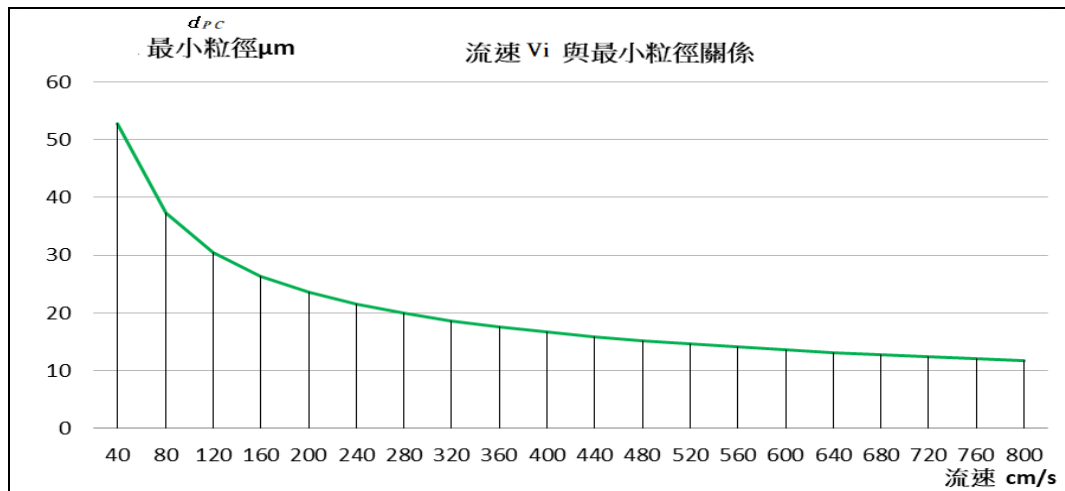


【圖 10】旋轉次數與最小粒徑關係圖



【圖 11】入口寬度 W 與最小粒徑關係圖

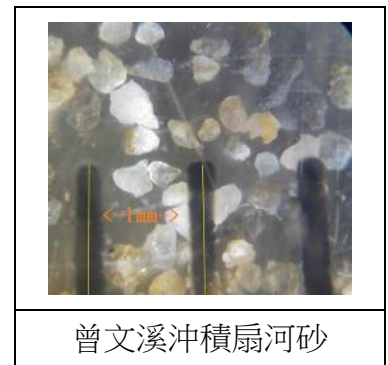




【圖 12】流速  $V_i$  與最小粒徑關係圖

2.從以上關係曲線圖得知：平均流速愈大、入口寬度  $W$  越小、增加旋轉圈數越多，則可被分離的  $d_{pc}$  粒徑愈小，分離的效率越佳。

3.將第二代裝置的參數代入公式後，得出可分離的截取直徑數值為  $32.06 \mu m$ ，但此公式所算出的結果僅為理論值，而實驗樣本河砂最小粒徑為  $252 \mu m$ - $125 \mu m$ (如圖 13)，大於計算出的理論值，河砂粒徑能 100% 被分離就可驗證將公式流體參數更改為水的可行性，為驗證實驗結果是否與上述曲線圖有對應關係遂進行下述實驗。



## (二)實驗 1 之實驗步驟

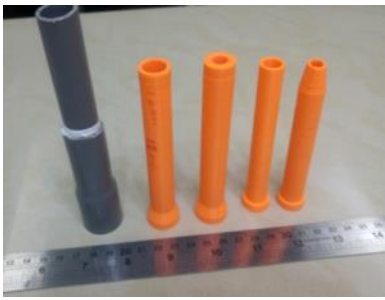


### 1. 實驗 1-1: 探討旋流分離裝置出入管的管徑對分離效果的影響

(1)固定虹吸引水管的高度為 1 公尺，利用入口管徑分別為 0.65、1.0、1.4cm，出口管徑 0.8、1.2、1.6cm，設計五種不同出入口管徑實驗組合(如表 5)進行實驗(如圖 14)。

【表 5】實驗 1-1 管徑配對表

實驗組合	入管直徑(cm)	出管直徑(cm)
1	1.4cm	0.8cm
2	1.4cm	1.2cm
3	1.4cm	1.6cm
4	1.0cm	1.6cm
5	0.65cm	1.6cm

- (2)使裝置內注滿水，將裝置空氣排出。
- (3)先放水 5 秒讓裝置產生螺旋水流之後再緩緩加入 160g 的砂土，並保持漏斗水平面至入水管底部 1 公尺的高度。
- (4)砂土放入完畢後持續放水 5 秒，使砂土完全進入分離器內，待 10 秒砂土沈澱後，關閉收集瓶閥門，並計算砂土分離率。
- (5)為了確保流速能滿足實驗所需條件，故又測量(表 6)五種配對組合之流速，先從上方漏斗注水 20 秒進入分離裝置後，秤量淨水區塑膠桶收集到的水量，並利用液體在水管內的流速公式： $V(\text{流速})=Q(\text{流量})/A(\text{管內截面積})$ ，將水量計算成流速數據。

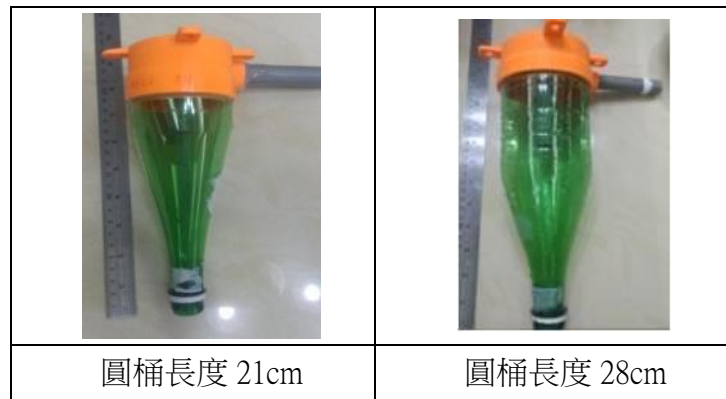
		
不同管徑大小的出入管	收集排出淨水	塞入出水管
		
改變入水管徑	砂土離心旋轉	

【圖 14】實驗 1-1 的實驗過程

## 2.實驗 1-2:探討旋流分離裝置的圓筒長度對分離效果的影響

- (1)固定虹吸引水管的高度為 1 公尺，採用入口管徑 1.4cm，出口管徑 1.6cm 的分離裝置，改變泥砂分離裝置的圓筒長度為 21cm、28cm 兩種(如圖 15)。
- (2)重複實驗 1-1 的步驟(2)~(4)。
- (3)為了確保流速能滿足實驗所需條件，故又測量圓筒長度為 21cm、28cm 之流速。測量方法同實驗 1-1 的步驟(5)。





【圖 15】實驗 1-2 泥砂分離裝置的圓筒長度

### 3.實驗 1-3:探討不同高度的流速對分離效果的影響

(1)採用入口管徑 1.4cm，出口管徑 1.6cm，的分離裝置，並改變虹吸引水管的高度為 0.4、0.6、0.8、1 公尺，進行實驗(如表 6)。

【表 6】實驗 1-3 高度配對表

實驗組合	高度(m)	入管直徑(cm)	出管直徑(cm)
1	0.4	1.4cm	1.6cm
2	0.6	1.4cm	1.6cm
3	0.8	1.4cm	1.6cm
4	1.0	1.4cm	1.6cm

(2)重複實驗 1-1 的步驟(2)~(4)。

(3)為了確保流速能滿足實驗所需條件，故又測量(表 7)4 種配對組合之流速。測量方法同實驗 1-1 的步驟(5)。

(4)延伸實驗:因 0.4 公尺高度比較低，因此將入口管徑改為 0.65cm 進行流速及分離效果測試，改變管徑是否能提高分離率關係。

### 4.實驗 1-4:探討實際採用水庫淤泥進行分離的效果

(1)本實驗分離樣本採用臺南市淤積最嚴重的白河水庫之淤泥。

(2)採用與實驗 1-1 的實驗組合 5 相同條件，引水管高度 1 公尺及入管直徑 0.65 cm、出管直徑 1.6cm，進行分離實驗。

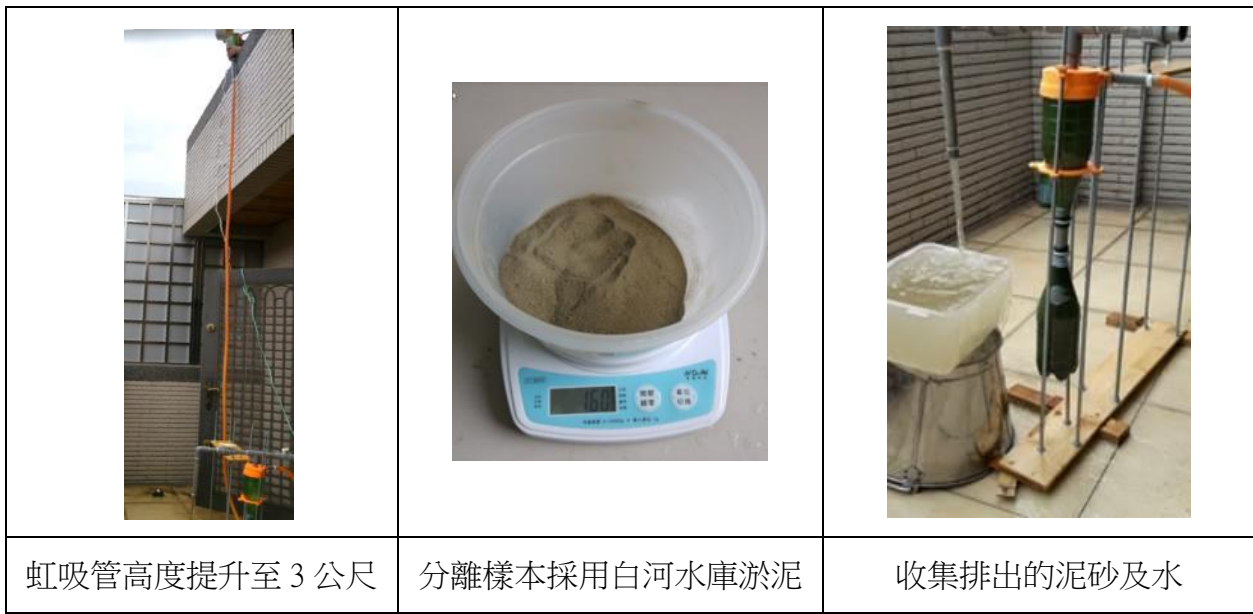
(3)因水庫淤泥粒徑較為細小，為產生更快的流速所以提升了引水高度，但因實驗場地限制最高僅能提升至 3 公尺進行分離實驗。

(4)重複實驗 1-1 之步驟(2)~(4)。

(5)為了確保流速能滿足實驗所需條件，故又測量此實驗組合（如表 7）的流速，測量方法同實驗一之步驟(5)。

【表 7】實驗 1-4 分離水庫淤泥高度配對表

實驗組合	高度(m)	入管直徑(cm)	出管直徑(cm)
1	1	0.65	1.6
2	3	0.65	1.6



【圖 16】分離白河水庫淤泥運作情形

## 五、實驗 2:利用水庫模型分析各清淤工法的效益

### (一)實驗目的: 比較水庫不同清淤工法的效益

- 1.為實驗模擬水庫不同的排淤工法，我們參考臺南淤積較嚴重的白河水庫相關文獻資料，其 90~106 年水庫進水量、供水量及洩洪量年平均值分別為 4,880、2,422 及 2,329 萬立方公尺(經濟部水利署南區水資源局，2018)，平均每年洩洪量、供水量各約佔水庫年進水量一半。
- 2.設計一組水庫模型，實驗水槽容積 89cm×29cm×29cm，並設立上游集水區原水供應槽會從水槽上方提供泥砂沖刷所需水量，其供應量為水槽排出量，模擬水庫年進水量 50L，年進水水量一半 25L 為汛期洪水排出量，剩餘 25L 為水庫年供水量。

### (二)實驗步驟

#### 1.實驗 2-1:排砂隧道

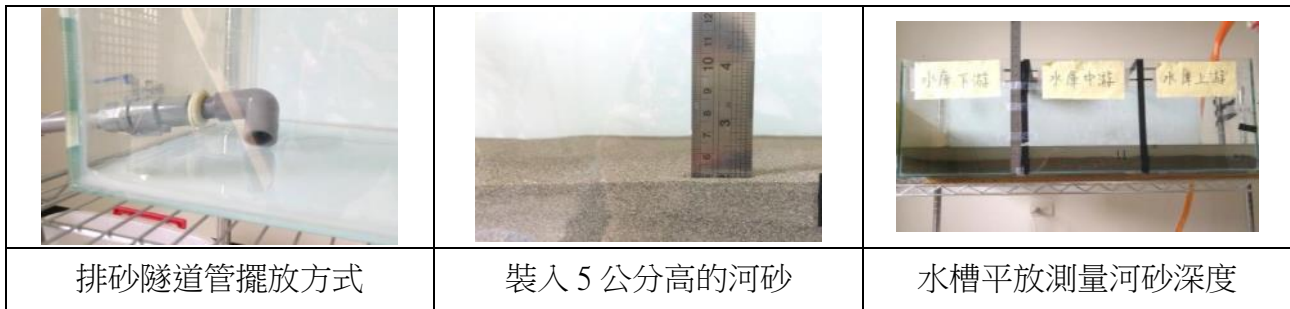
- (1)將實驗水槽擺放至斜度 11 度，裝入 5 公分高的同性質河砂，加水鋪平，由上游集水

區原水供應槽注入 25L 的水量（如圖 17）。

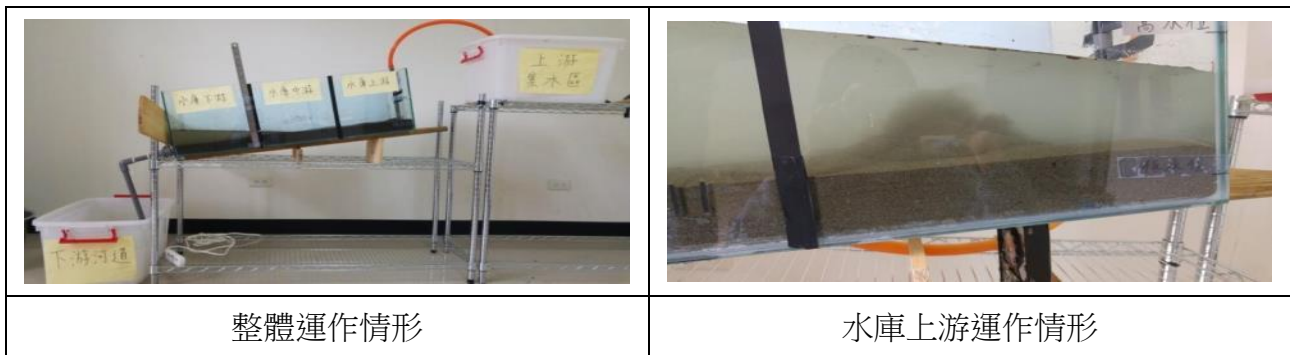
(2)利用洪水排洪時將異重流排出，固定排砂管(管徑 2cm)在水庫模型的壩前排砂。

(3)排出 25L 定量水後，利用沉水馬達只抽水(不抽砂)循環至上游集水區原水供應槽進行第 2 次注入 25L 的水量（如圖 18）。

(4)再次排出定量水後(兩次排水共排出  $25L \times 2 = 50L$ )，再將水槽平放將水槽泥砂抹平測量砂土深度(淤積量)。



【圖 17】實驗 2-1 之實驗步驟



【圖 18】排砂隧道實際運作情形

## 2.實驗 2-2:固定式虹吸排砂

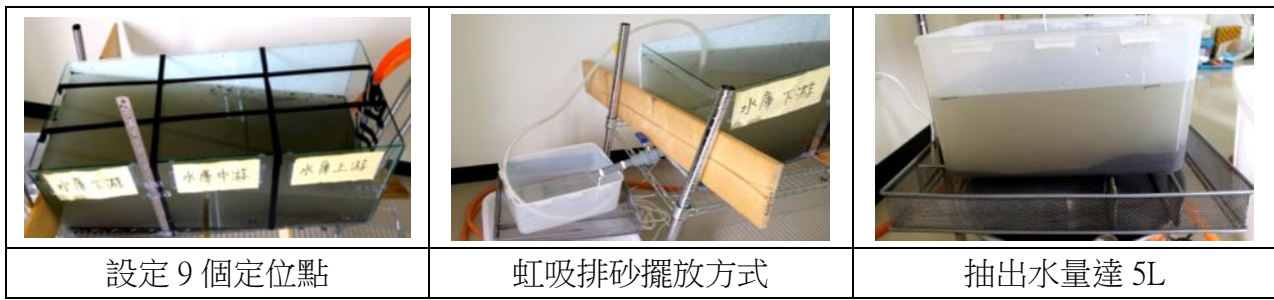
(1)重複實驗 2-1 之實驗步驟(1)。

(2)將水庫模型利用九宮格方式，設定 9 個定位點（如圖 19）。

(3)每次以虹吸排砂管(管徑 1cm)在一定定位點抽砂，當抽出水量達 5L 時即停止抽砂，並在水面快達低水位時，在上游集水區再注入水（如圖 20）。

(4)九個定位點皆完成步驟(3)後，再取一處淤砂量最多定位點抽砂，共排出  $(5L \times 10)$  水量 = 50L 水量。

(5)將水槽平放將水槽泥砂抹平測量泥砂深度(淤積量)。



【圖 19】實驗 2-2 之實驗步驟



【圖 20】固定式虹吸排砂實際運作情形

### 3. 實驗 2-3: 移動式虹吸排砂

(1) 重複實驗 2-2 之實驗步驟(1)至(5)，唯在定位點抽砂時，將虹吸排砂的活動管延伸到粒徑較大或嚴重處進行局部抽砂（如圖 21）。



【圖 21】移動式虹吸排砂實際運作情形

### 4. 實驗 2-4: 排砂隧道+固定式虹吸排砂

- (1) 重複實驗 2-1 之實驗步驟(1)。
- (2) 靠近壩前的砂以實驗 2-1 之實驗步驟(2)的方式排出。
- (3) 再次由上游集水區原水供應槽注入 25L 的水量，並取水庫中上游的 5 個定位點，利用固定式虹吸排砂方式進行抽砂。
- (4) 兩種工法各排出 25L 水量，將水槽平放將水槽泥砂抹平測量泥砂深度(淤積量)。

## 六、實驗 3: 探討水庫淤泥粒徑與沖積分布位置的關係





(一) 實驗目的:

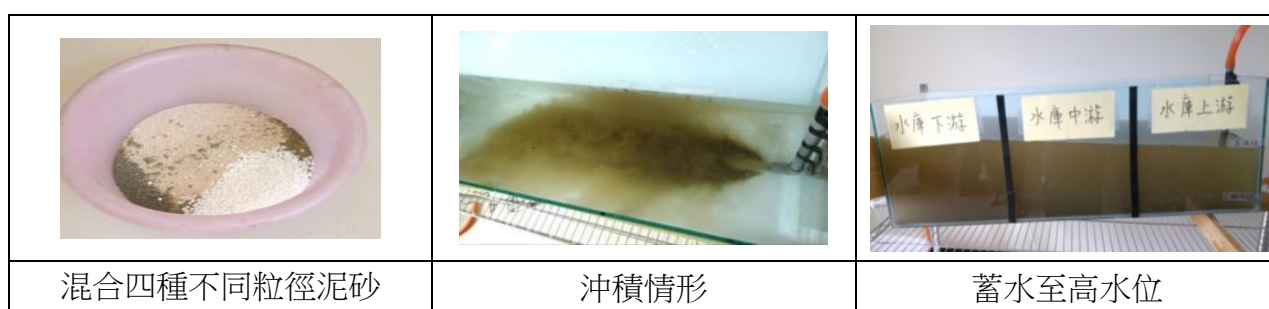
模擬水庫淤積沖積實驗，分析不同粒徑大小的淤泥在水庫中分布的位置關係，以利找出哪一位置較適合置放旋流分離裝置的引流抽砂管。

## (二)實驗步驟

- 1.依實驗水槽長度，標示水庫上游、中游、下游位置，先注入水流，讓水槽先達低水位（約 3cm 水深，滿過入水管）。
- 2.讓水產生流動後，於上游集水區依前述文獻探討水庫泥砂成分比例，倒入混合四種粒徑不同的礫石(如表 8)，進行蓄水沖積實驗，最後排空水槽並檢測淤泥分布狀況。
- 3.設計坡度分別為 5 度、8 度及 11 度，並投入定量泥砂進行實驗，觀察比較不同的坡度的沖積實驗，是否會影響淤泥粒徑大小在水庫的分布位置(如圖 22)。

【表 8】投入砂石粒徑大小及混合比例

泥砂種類	細礫石	極粗砂	河砂	水庫淤泥
				
粒徑範圍	4-2mm	2mm-1mm	1mm-0.125mm	0.250mm-0.016mm
倒入重量	100g	100g	300g	500g
混合比例	10%	10%	30%	50%



【圖 22】實驗 3 之實驗步驟圖片說明



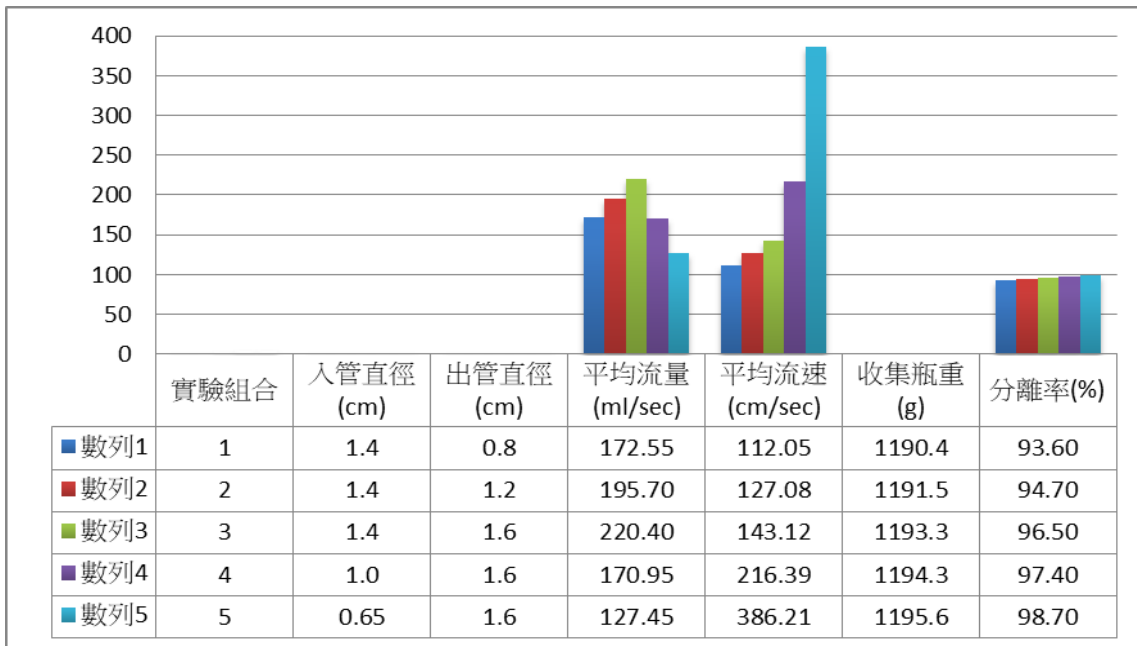
## 肆、研究結果

### 一、實驗 1:探討影響旋流分離裝置之分離效果的主要變因

#### (一) 實驗 1-1：探討旋流分離裝置出入管的管徑對分離效果的影響

1. 實驗數據比較：固定引水管高度 1 公尺，設計五種不同出入口管徑實驗組合比較分離效果的結果(如表 9)。

【表 9】實驗 1-1 不同出入管的管徑之分離效果



#### 2. 實驗結果：

由實驗我們得到以下的結果：

- (1)五種組合的分離率幾乎都達 93.6%以上，其中實驗組合 5 流速最快，分離率最好。
- (2)實驗組合 1 至 3 發現，入口管徑固定，出口管徑擴大時，流速及分離率都隨之提升。
- (3)從實驗組合 3 至 5 發現，出口管徑固定，入口管徑縮小，流速及分離率都隨之提升，且流速的提升幅度較擴大出口管徑時明顯。
- (4)從實驗組合 1 及 4 發現，兩者流量相近但流速卻相差近 1 倍，而流速高者分離率較高。

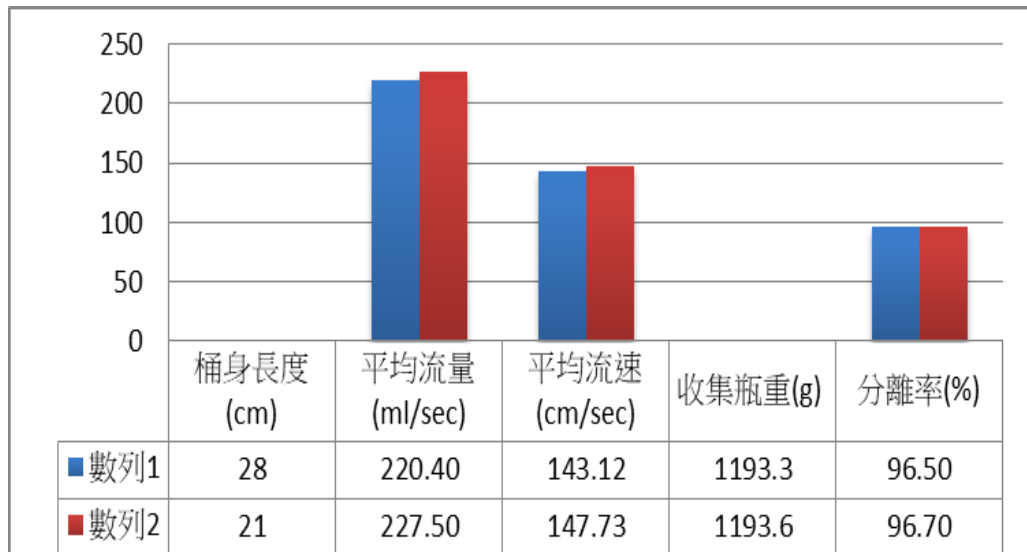
#### (二) 實驗 1-2：探討旋流分離裝置的圓筒長度分離效果的影響

##### 1. 實驗數據比較：

固定引水管高度 1 公尺、入口管徑 1.4cm 及出口管徑 1.6cm，設計 2 種不同的寶特瓶圓

筒長度，比較分離效果的結果(如表 10)：

【表 10】實驗 1-2 不同圓筒長度之分離效果



## 2.實驗結果：

- (1)在本實驗中固定相同入出口管徑，透過改變寶特瓶的圓筒長度來影響流體旋轉次數，發現二種不同桶身長度，所測出的平均流速差異不大，且分離效果也大致相同。
- (2)實驗過程中，21cm 短瓶身寶特瓶所做的分離裝置，依前述公式計算旋轉圈數為 10 次，而 28cm 長瓶身寶特瓶所做的分離裝置，旋轉圈數 13 次，對照前述【圖 10 旋轉次數與最小粒徑關係圖】，當旋轉次數高於 10 次以上時，可分離最小粒徑之差異也變小，觀察旋轉圈數多寡發現流速、粒子比重與粒子離心沉降所需時間有關，且旋流離心沉降主要作用於圓錐處，本實驗採寶特瓶其圓錐長度固定長度導致旋轉圈數接近，觀察到的差異不明顯。

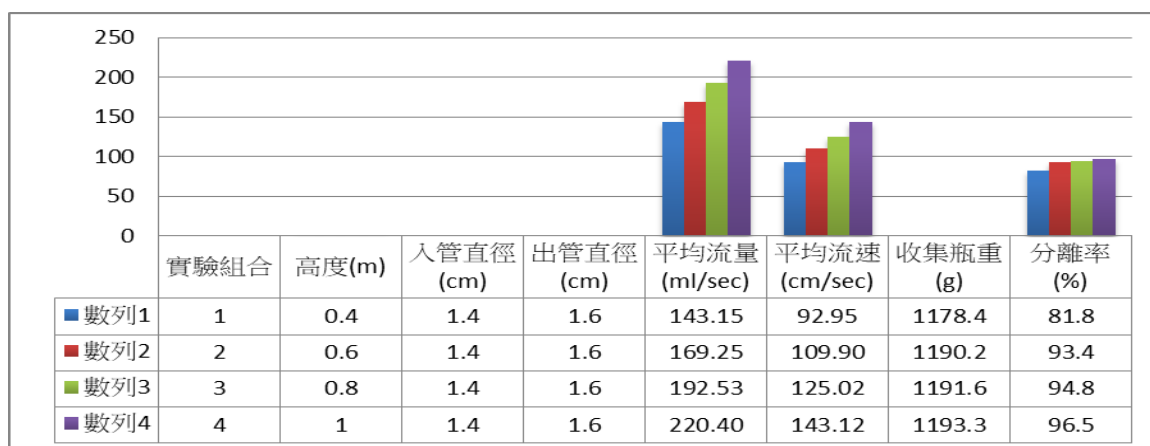
## (三) 實驗 1-3: 探討不同高度的流速對分離效果的影響

### 1.實驗數據比較：

固定分離裝置的入口管徑 1.4cm，出口管徑 1.6cm，改變虹吸引水管的高度，比較分離效果的結果(如表 11)：



【表 11】實驗 1-3 不同高度之分離效果



## 2.實驗結果：

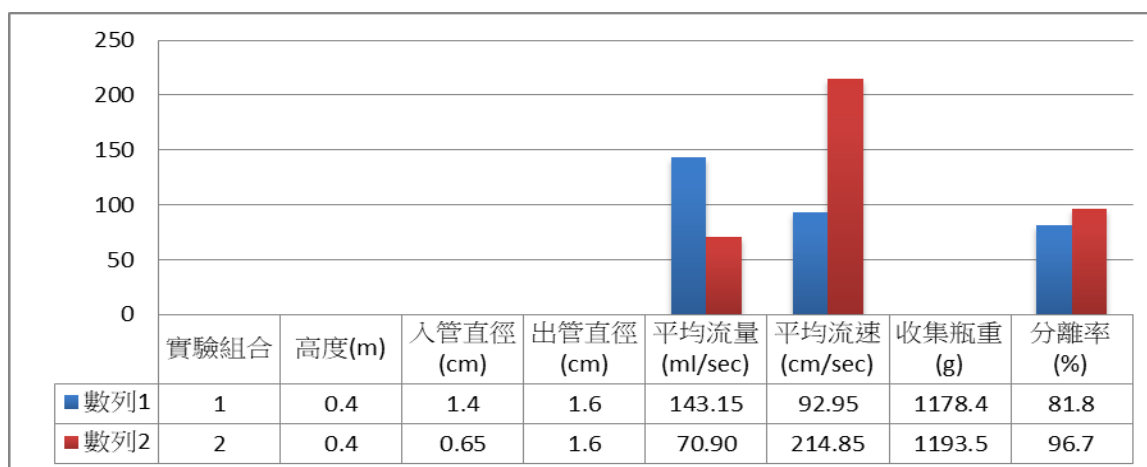
- (1)實驗組合 1 因管內平均流速低於 100 cm/sec，導致分離率與其他實驗組合有顯著差異，驗證了前述【圖 12 流速  $V_i$  與最小粒徑關係】，流速在 100 cm/sec 以上差異較小的曲線關係。
- (2)在本實驗中發現，因引水管的高度愈高與出水口位能壓力差越大，使水管內流速變快，所以當管內的水開始流動後，位能轉換成動能，故水流旋流泥砂分離裝置的流速也隨之升高，所獲得之分離效果便會提高。

## (四) 實驗 1-3 之延伸實驗

### 1.實驗數據比較：

固定引水管高度 0.4m，設計兩種不同入口管徑組合，比較分離效果的結果(如表 12)：

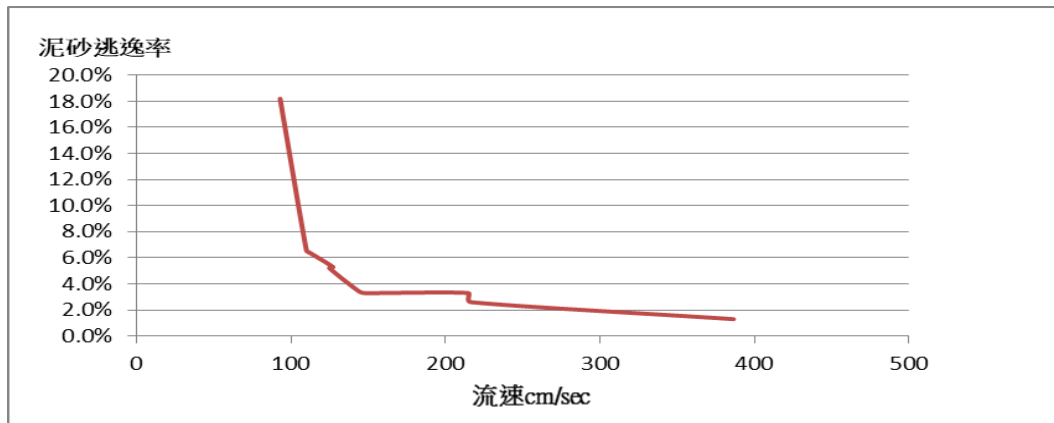
【表 12】0.4m 高度不同出入管的管徑之分離效果



## 2.實驗結果：

(1)從表 12 中，可得知在低高度的狀況下，將入口管徑縮小對於流速提升有顯著的效果，分離品質也有明顯提升。

(2)再比較表 9 的實驗組合 2 與表 11 的實驗組合 3，發現兩者流速相近且分離率也相似。我們將實驗 1-1 至 1-3 的泥砂分離率換算為為泥砂逃逸率(粒徑太小或比重過輕而無法進入收集桶的比例)，將其與實驗流速製成圖表(如圖 23)，並比對上述【圖 12 流速  $V_i$  與最小粒徑關係】，發現兩者呈現相似曲線，可推判流速是影響泥砂分離的重要因素。

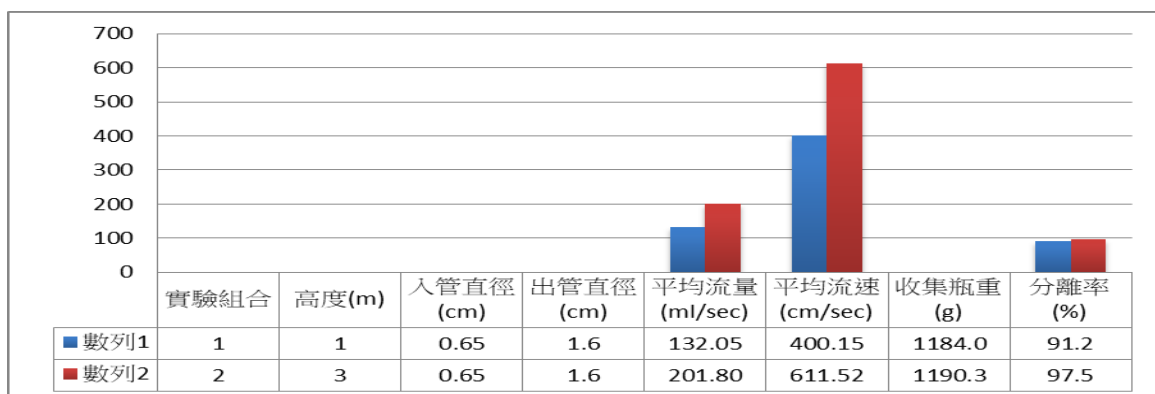


【圖 23】泥砂逃逸率與實驗流速關係圖

#### (五) 實驗 1-4: 探討實際採用水庫淤泥進行分離的效果

##### 1. 實驗數據比較：

【表 13】實驗 1-4 不同高度分離水庫淤泥的效果

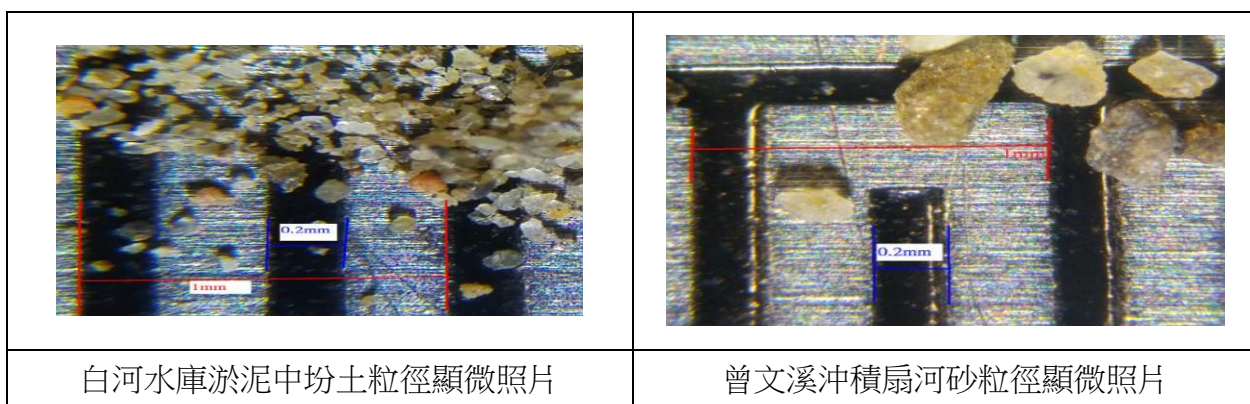


##### 2. 實驗結果：

(1)比較表 13 實驗組合 1 與表 10 實驗組合 5，可得知在同樣條件下，細砂的分離率相較水庫淤泥佳，利用顯微鏡觀察河砂及水庫淤泥的差異(如圖 24)，推判係與水庫淤泥物

性有關，粒徑較為細小，成分除了坩土外，尚有粘土，致使較難分離。

(2)由表 13 中顯示，提升水位高度 2 倍，流速增加近 0.5 倍，分離效果有明顯提升 6%，與實驗 1-3 結果相符，流速是影響分離率的主因。



【圖 24】顯微鏡觀察細砂及水庫淤泥的差異

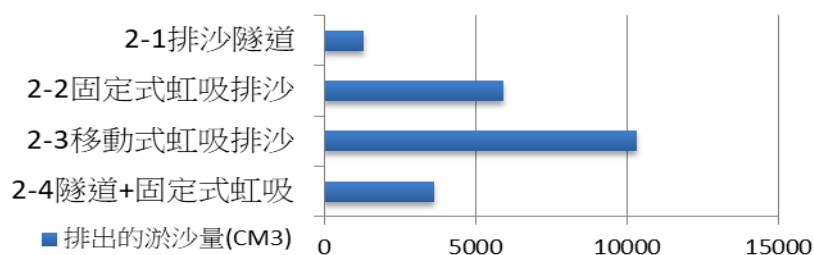
## 二、實驗 2:利用水庫模型分析水力清淤工法的效益

### (一)實驗數據比較：

進行四種清淤工法運作測試，比較水庫不同清淤工法的效益結果(如表 14、圖 25)：

【表 14】不同清淤工法之效益分析效果

清淤工法	2-1 排砂隧道	2-2 固定式虹吸排砂	2-3 移動式虹吸排砂	2-4 隧道+固定式虹吸
淤砂深度	5cm	5cm	5cm	5cm
排出水量	25L×2	5L×8+10L×1	5L×8+10L×1	排砂隧道 25L 固定式虹吸 5L×5
剩餘深度	4.5cm	2.7cm	1cm	3.6 cm
排出砂量	1290.5cm <sup>3</sup>	5936.3cm <sup>3</sup>	10324cm <sup>3</sup>	3613.4cm <sup>3</sup>
圖片				



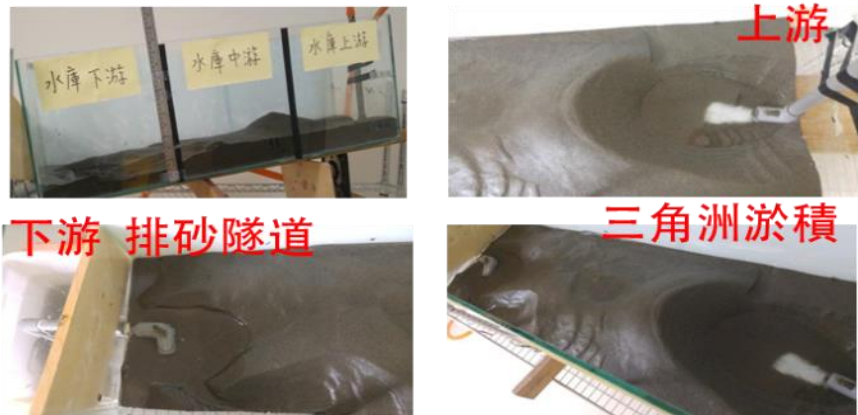
【圖 25】實驗二實驗結果比較圖

(二)實驗結果（如表 15 至 18）：


經實驗四種排砂方案運作，比較不同清淤工法之效益，排砂效果為：

移動式虹吸排砂 > 固定式虹吸排砂 > 排砂隧道+移動式虹吸排砂 > 排砂隧道


【表 15】實驗 2-1 排砂隧道實驗結果

實驗 2-1 排砂隧道	
實驗結果	此工法因排砂管固定在壩前，只能排出靠近下游壩前部分的砂，而水庫中上游的砂會被上游水流沖刷成三角洲淤積，且此種工法需大量水流推動泥砂至下游排砂處，僅限於颱風洪水滿水位期間使用，故排砂效果為四種工法中最不理想者。
排砂情形	


【表 16】實驗 2-2 固定式虹吸排砂實驗結果

實驗 2-2 固定式虹吸排砂	
實驗結果	此工法可由虹吸管在不同定點抽砂，故水庫上、中、下游的砂皆可排出，排砂效果相較排砂隧道佳，但因只在定點抽砂時能抽砂，排砂量有所限制。從圖 17 可發現，在虹吸管固定點抽砂處的淤砂呈現 V 字型，所以虹吸管抽取砂量會由多逐漸減少時需再移至另一定點進行抽砂，較耗時但可長時間運作，枯水期及滿水其皆能使用，無受天候限制。
排砂情形	

【表 17】實驗 2-3 移動式虹吸排砂

實驗 2-3 移動式虹吸排砂	
實驗結果	此工法運作方式與實驗 2-2 大致相同，唯一不同處為移動式虹吸排砂可任意在各位置抽砂，短時間內抽取的砂量較多也較濃，較為省時，因此排砂效果為四種工法中最佳者，但移動虹吸引水管需要額外機具設備。
排砂情形	

【表 18】實驗 2-4 排砂隧道+固定式虹吸排砂

實驗 2-4 排砂隧道+固定式虹吸排砂	
實驗結果	在此工法中，下游近壩前部分的砂主要由排砂隧道排出，而中上游部分的砂以固定式虹吸水力排砂為主，排砂效果介於排砂隧道與固定式虹吸排砂之間。
排砂情形	

### 三、實驗 3: 探討水庫淤泥粒徑與沖積分布位置的關係

#### (一)實驗數據比較：







設計三種不同的坡度，分別為 5 度、8 度及 11 度，定量泥砂進行實驗，觀察沖積實驗影響不同粒徑大小的淤砂在水庫的分布位置的結果(如圖 26、表 19 至 21)：






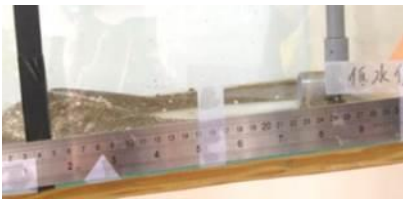


【圖 26】坡度 5 度時頂坡距水槽右側 33cm






【表 19】沖積坡度 5 度的分布情形

實驗組合 1	5 度	三角洲淤積頂坡距水槽右側 33cm
上游	中游	下游
		
		

【表 20】沖積坡度 8 度的分布情形

實驗組合 2	8 度	三角洲淤積頂坡距水槽右側 34.5cm
上游	中游	下游
		
		

【表 21】沖積坡度 11 度的分布情形

實驗組合 3	11 度	三角洲淤積頂坡距水槽右側 36.3cm
上游	中游	下游
		



## (二)實驗結果

### 1.不同沖積坡度對淤砂分布的影響

由上表 19 至 21 得知:當沖積坡度愈斜時,水流沖刷效應越明顯,三角洲淤積愈扁平頂點愈往下游移動,原本僅分布在上游的白色粗砂在上、中、下游均可見,白色礫石從上游到中游可見。

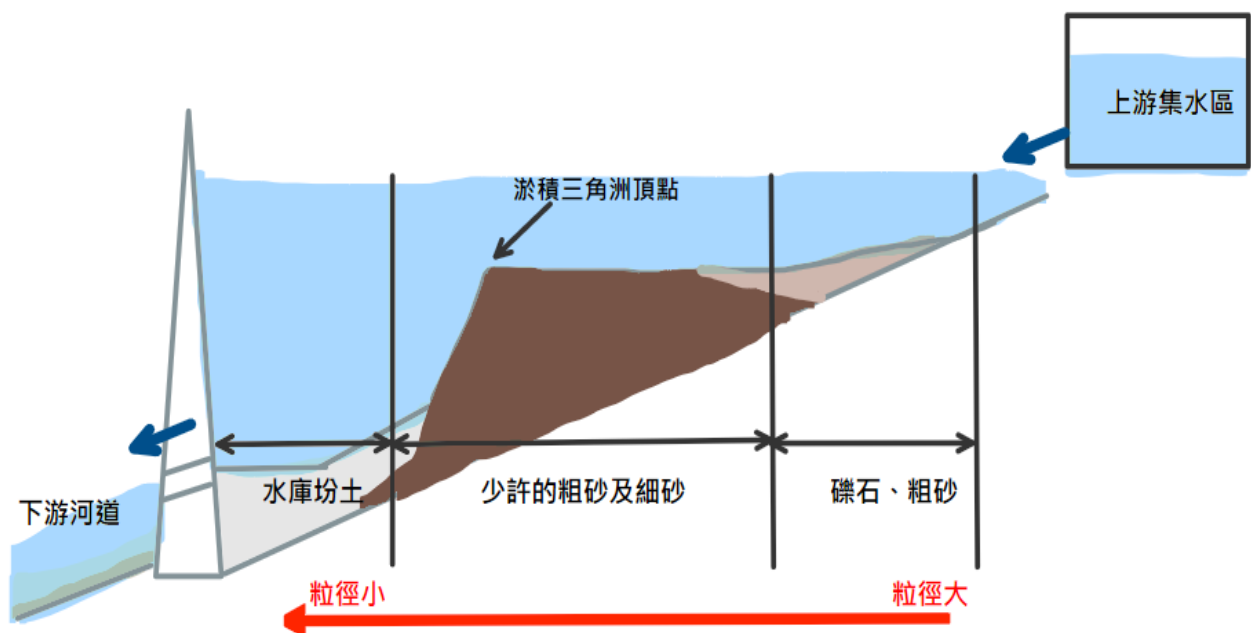
### 2.不同粒徑之淤砂在水庫分布位置

(1)水庫上游:原本淤積於集水區的泥砂將會隨著水流往下游移動,粒徑較大的礫石、粗砂通常落於水庫上游區,並形成三角洲淤積的樣貌,三角洲淤積也隨時間逐漸增高。

(2)水庫中游:多數的粗砂及細砂分布在水庫中游。

(3)水庫下游:粒徑較細的水庫坩土則在越過三角洲頂坡後揚起成為懸浮質垂直向下沈澱,並於水庫下游以異重流方式潛入水庫底層,細顆粒泥砂也藉由異重流帶入庫內至壩前。

(4)綜合上述討論得知:粒徑愈大的分布在愈上游;粒徑愈小的則分布在愈下游。



【圖 27】不同粒徑之淤砂在水庫的分布位置圖

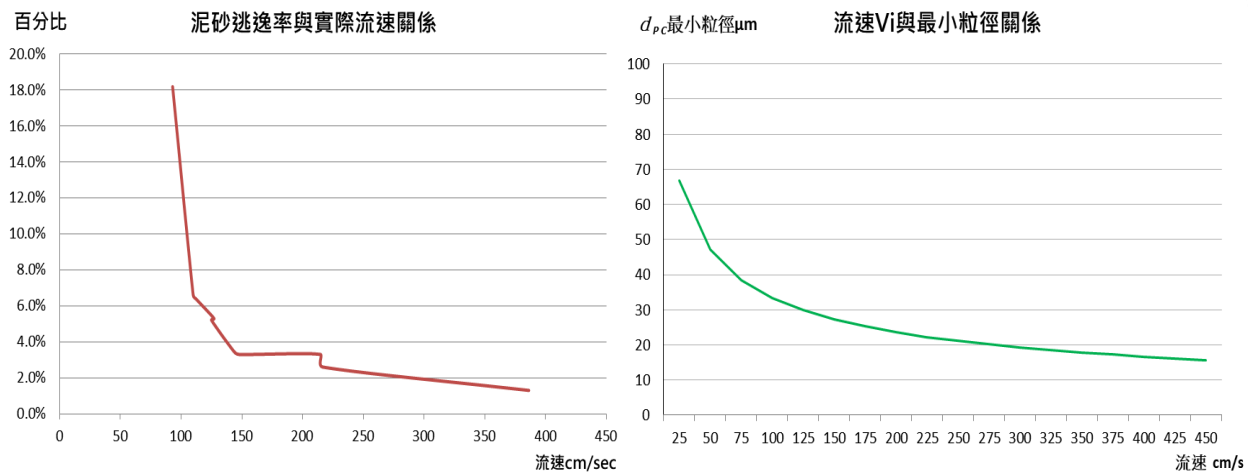


## 伍、討論

### 一、旋流泥砂分離效益與理論公式討論

#### (一)流體流速與理論公式的關係：

1.從本研究實驗中改變進水的高度或是入口管徑的實驗，可發現增加流速能提高分離率，且泥砂逃逸率與流速關係，對照理論公式所計算出的最小粒徑與流速關係，兩者均是隨著流速增加而下降，有相似的線性關係（圖 28）。



【圖 28】流體流速與理論公式相似線性關係圖

2.流速提高雖有增加分離率，惟仍有極限值。在分離白河水庫淤泥實測中可發現現象，將引水管高度由 1 公尺提高至 3 公尺，但流速只增加約 0.5 倍，實際分離率從 91.2% 提升 97.5%，效果提升 6%。對照下圖（圖 29）顯示推判：當分離裝置在流速 6M/sec 以上的條件下，流速越大，可分離  $d_{pc}$  最小粒徑的遞減率卻越小，儘管流速再提升數倍，分離效果的提升仍有其限制，無法將粉土粒徑以下 ( $<4\mu\text{m}$ ) 的淤積全部分離。

#### (二)流體黏度與理論公式的關係：

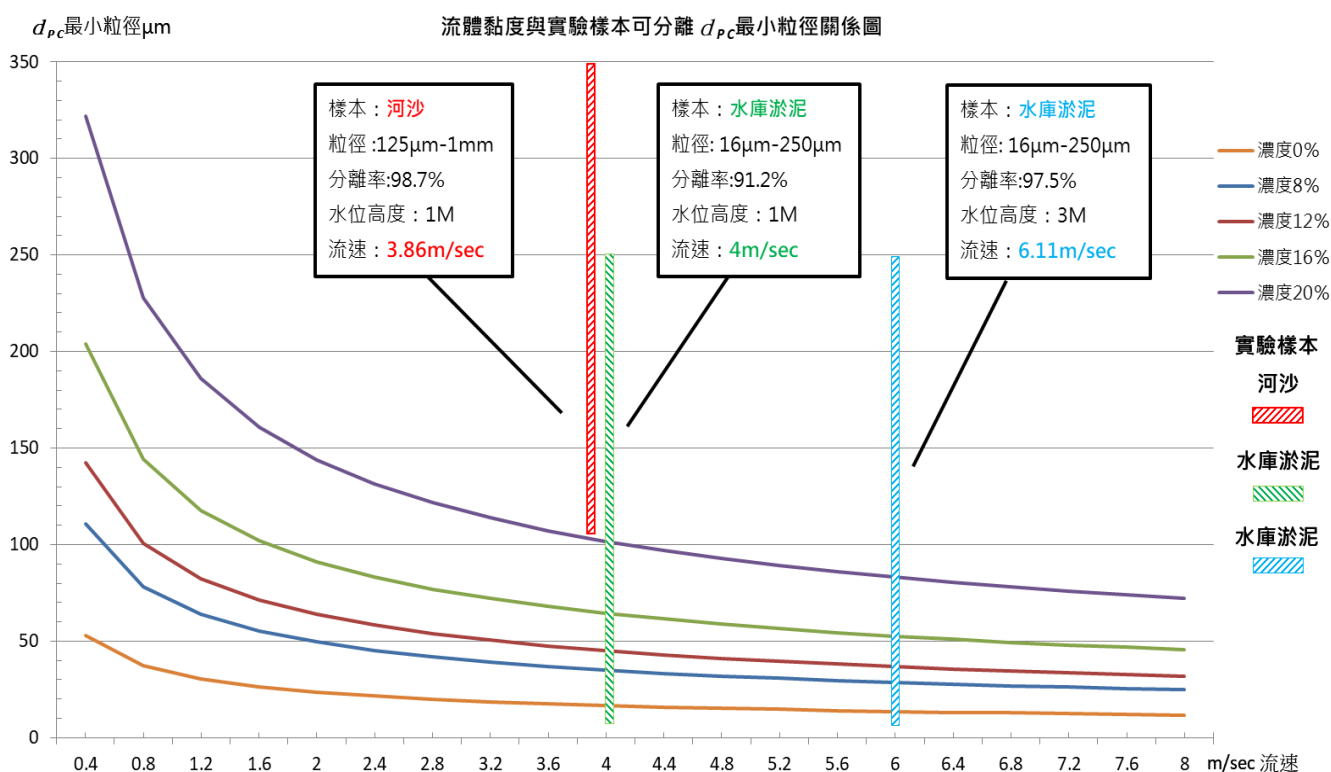
1.檢視理論公式參數與本研究的實驗樣本（曾文溪沖積扇河砂粒徑 125-1000  $\mu\text{m}$ 、白河水庫淤泥粒徑 125-1000  $\mu\text{m}$ ），發現流體在圓管中運動時會遭遇到黏度所帶的阻力而改變流速，因此流體黏度 ( $\mu$ ) 也是影響分離效果的重要因素。我們進而查詢有關水庫淤泥濃度及泥淤黏滯係數的文獻資料（鍾文祥,2013），分別以黏度 0.001 至 0.0372kg/(m·s) 【表 22】帶入理論公式由數學模型計算可分離的  $d_{pc}$  理論值，與實驗泥砂樣本粒徑做比較，在下圖(圖 29)可發現實驗樣本粒徑的落點若在各等級的黏度分離曲線以下，則

代表粒徑小於曲線以下的淤泥越難分離，檢視白河水庫淤泥分離後逃逸樣本粒徑多數為 16-80  $\mu\text{m}$  等級(圖 30)，與黏度分離曲線比對相符。惟隨著黏滯係數的提高，淤泥的分離品質會隨之下降，若以水庫供水同時能帶走含 5%的淤泥計算，建議在吸進淤泥水時能控制適當的濃度，黏滯係數為 0.0044kg/(m·s) 以下，坩土粒徑以上的淤泥可達較佳的分離效果。

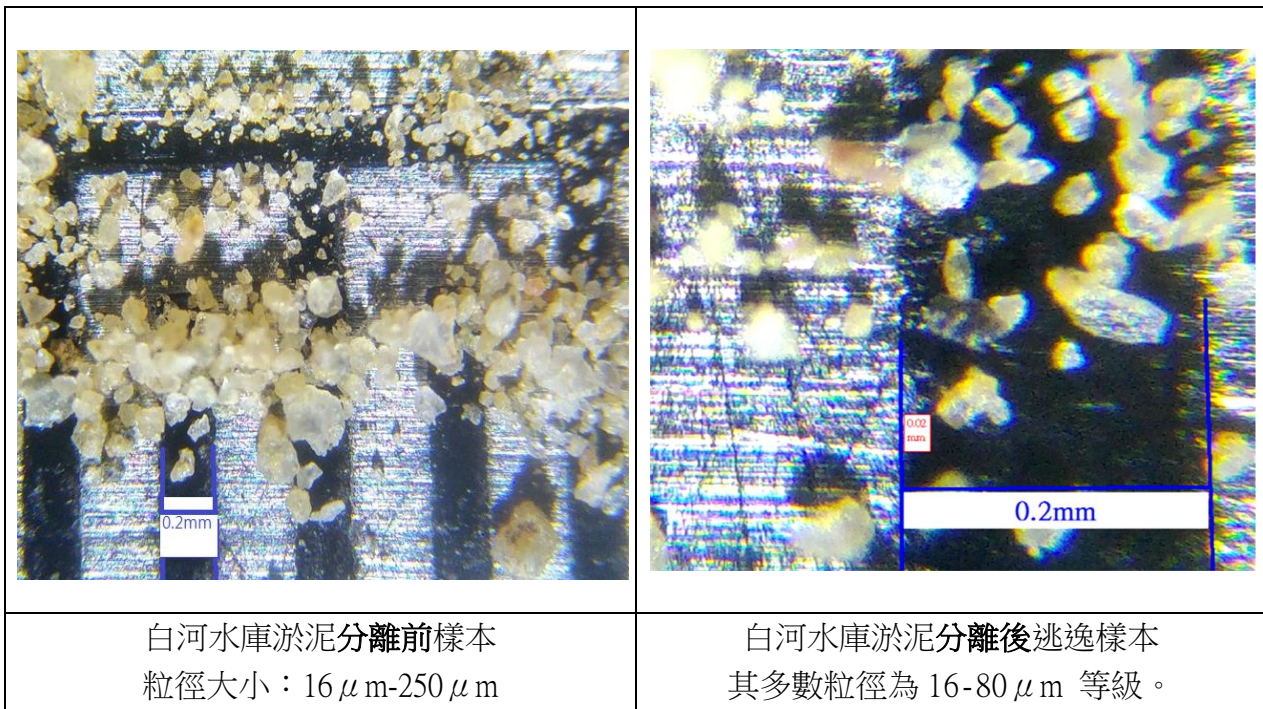
【表 22】水庫淤泥濃度及泥淤黏滯係數關係表

重量濃度 (ppm)	540,000	486,000	432,000	378,000	324,000	270,000	216,000	162,000	108,000	54,000
體積濃度 (%)	20%	18%	16%	14%	12%	10%	8%	6%	4%	2%
黏滯係數 (Kg/(m·s))	0.0372	0.0206	0.0149	0.0101	0.0073	0.0059	0.0049	0.0044	0.0039	0.0033

(表 22 資料來源：鍾文祥，2013。曾文水庫排砂規劃—防淤工程可行性研究)



【圖 29】流體黏度與實驗樣本可分離  $d_{pc}$  最小粒徑關係圖



【圖 30】白河水庫淤泥分離前後粒徑大小的比較

## 二、旋流泥砂分離裝置的設計方向

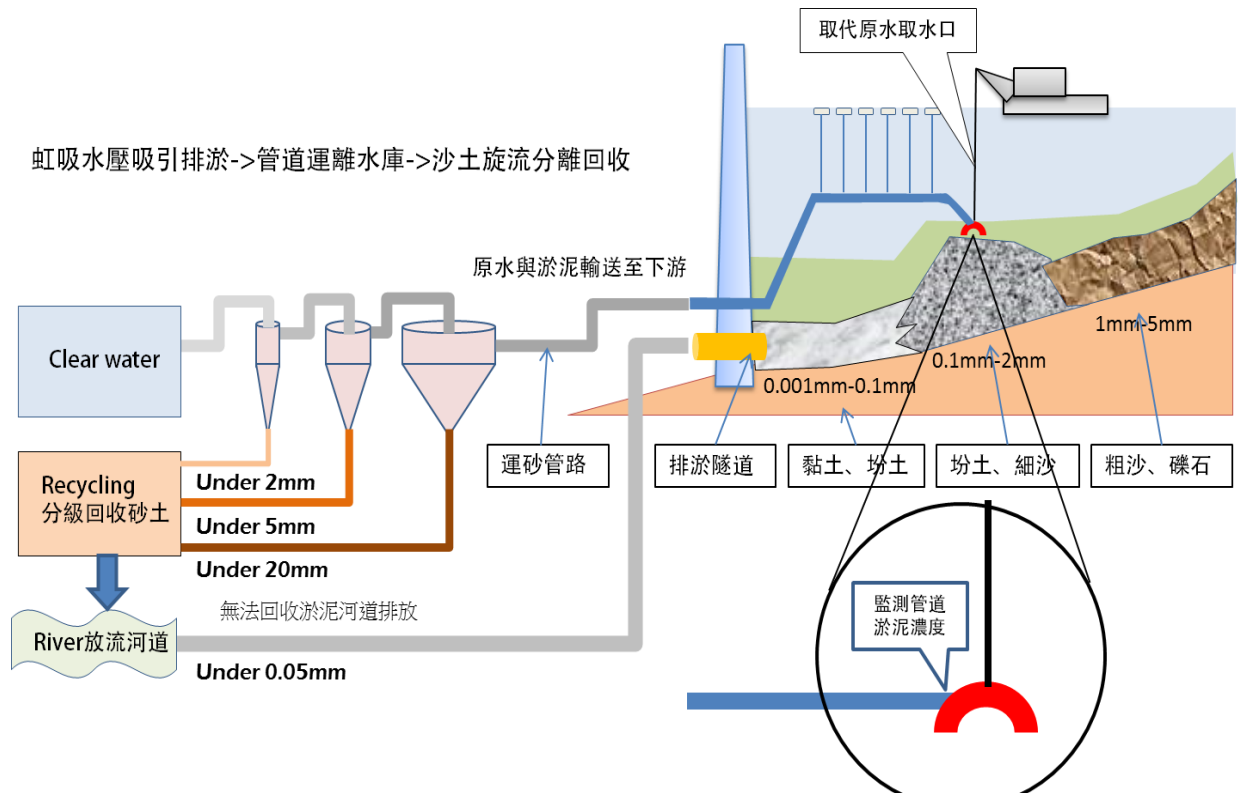
我們所設計結構簡單的旋流泥砂分離裝置，從各項的實驗操作發現，將裝置架設在固定的高度下，可有效分離 99%河砂與 97.5%白河水庫淤泥，如要達到更好分離效果，根據實驗及文獻整理出旋流分離設計的建議方向如下：

- (一)由前述理論公式的旋轉次數與  $d_{rc}$  最小粒徑關係圖得知，旋轉次數越多則可被分離的粒徑越小，建議若將分離裝置錐形部位做成細長狀，在同一流速下旋轉次數提高可分離更小的  $d_{rc}$  最小粒徑，惟當旋轉次數超過 20 次以上，可被分離之粒徑大小變化不大。
- (二)雖然入口管徑越小，可被分離的  $d_{rc}$  粒徑也會越小，但流量會大幅減少，建議可建立串聯、併聯不同規格分離桶徑的設計，進而提高水庫淤積中不同粒徑礫石、細砂、坩土的分離效率與品質且有利砂土分級回收。
- (三)進入分離裝置的流體黏滯係數會影響分離效果，建議可加裝流體濃度監測系統，調控進入裝置的流體適當濃度，以更有效的進行分離工作。

## 三、旋流泥砂分離方式運用在水庫清淤工程

由水庫粒徑分布實驗已得知，越靠近水庫上游三角沖積區粒徑越大，下游淤泥成分粒徑小，而從水庫水力排砂工法實驗比較中得出固定式虹吸排砂的效益雖為次佳，但不需額外動力，水庫排砂隧道雖耗水排砂量低但可排出富含黏土粒徑成分的異重流，結合二者

的操作優勢，利用供水時虹吸抽砂管置放在中上游淤積區，抽取淤積粒徑大於黏土的淤泥，並利用濃度監測系統，負壓調控（進水）適當濃度，將虹吸與旋流分離裝置串聯運用，可分離出可用砂石資源與水資源；而當豪雨汛期洩洪下游壩前則運用排砂隧道排出富含黏土成分的異重流，二者工法混合使用，將可排出水庫中佔大部分的淤泥成分（如圖 31）。



【圖 31】排砂隧道+固定式虹吸排砂工法混合使用示意圖

## 陸、結論與應用

### 一、結論

- (一) 在探討水力旋流分離的實驗變因中，發現流速是影響分離率的關鍵點，且將入水管徑縮小或將虹吸引水管的高度提高，可使流速變快並提高分離效果。但由數學公式推導，達極限值時，可分離最小粒徑差異不大。
- (二) 臺灣大部分水庫淤積成份超過半數為砂土、坩土，實驗採用水力旋流可分離白河水庫淤泥的效果達 97.5%，只需泥水流過旋流桶，產生離心沈降效果，即可讓泥沙與水快

速分離。

- (三) 由模擬沖積實驗得知，粒徑愈大的分布在愈上游；粒徑愈小的則分布在愈下游。虹吸抽砂管可參照不同粒徑淤泥在水庫的分布位置，抽取中上游粒徑大於黏土的淤泥，以有效進行旋流分離；而下游則可運用排砂隧道排出粒徑較小且較難分離的黏土。
- (四) 由模擬水力排砂工法得出，移動式虹吸排砂雖效果最佳但運作成本高，在平衡耗水成本與排淤效率下，可依照水庫淤積成分與其分布區進行配置虹吸排砂與排砂隧道搭配，以求排出全部水庫淤積成分，並結合旋流分離可將降低原水濁度且可回收水與砂土資源。

## 二、未來應用

- (一) 旋風分離裝置所採用之計算截取直徑公式，經本研究發現可運用在水力旋流裝置，將水與泥沙進行分離，唯實際使用時，因淤泥具較高的黏度，會影響流速及分離品質，在吸引的過程中，須考慮不可超過固定濃度的淤泥水，建議可設計濃度監測器，適時的加入水量，以避免管路阻塞或處理效率下降，導致泥砂分離率下降。
- (二) 虹吸水力排砂工法搭配旋流分離概念的設計，具有讓水庫供水時同時供水與排淤，相對其他工法能更有效排淤，且具有低耗能、操作成本低的優點，水與砂石資源也都可回收再利用且可增加水庫蓄水量，如此更有效運用於水庫排淤工程，期望藉此研究能改善臺灣水資源欠缺問題。

## 柒、參考文獻

- 一、 王文江(2014年5月1日)。中興工程科技研究發展基金會:水利工程中之泥沙問題(增訂版)，p91、p444-p447。取自 [http://www.sinotecf.org.tw/水利工程中之泥沙問題\(增訂版\).pdf](http://www.sinotecf.org.tw/水利工程中之泥沙問題(增訂版).pdf)
- 二、 淡江大學化學工程與材料工程學系(2016)。淡江大學：篩析與旋風分離教材。取自 [www.che.tku.edu.tw/files/archive/970\\_96224d68.pdf](http://www.che.tku.edu.tw/files/archive/970_96224d68.pdf)
- 三、 國立中山大學環境工程研究所。空氣污染控制與設計教材，p40-42。取自 <http://iee.nsysu.edu.tw/var/file/208/1208/img/956/a1.pdf>
- 四、 經濟部水利署(2017年5月19日)。政府資料開放平臺：水庫淤積量。取自 <https://data.gov.tw/dataset/32727>
- 五、 經濟部水利署南區水資源局(2017)。經濟部水利署南區水資源局:防洪防淤策略，P56。取自 [www.wrasb.gov.tw/Uploads/pi/曾文水庫防洪防淤策略.pdf](http://www.wrasb.gov.tw/Uploads/pi/曾文水庫防洪防淤策略.pdf)



- 六、 顏聰、黃中和(2010)。行政院公共工程委員會:水庫淤泥之處置與資源化再利用為土木材料，p24。 取自 [https://www.pcc.gov.tw/epaper/9910/download/reader\\_1.pdf](https://www.pcc.gov.tw/epaper/9910/download/reader_1.pdf)
- 七、 潘禎哲(2016)。水庫整體防淤策略與規劃 - 經濟部水利署水利規劃試驗所。取自 <https://www.wrap.gov.tw/>
- 八、 經濟部水利署南區水資源局 (2014)。曾文水庫供水計畫。取自 [http://210.69.129.209/Detail/function2\\_1?aid=48025d0311e44d158cda357fd17e8fa8](http://210.69.129.209/Detail/function2_1?aid=48025d0311e44d158cda357fd17e8fa8)
- 九、 經濟部水利署南區水資源局 (2018)。白河水庫淤積物抽取放淤工程設計-白河水庫淤積物放淤檢討與評估報告，P5。取自 <https://www.wrasb.gov.tw/Uploads/news/白河水庫淤積物抽取放淤工程設計-白河水庫淤積物放淤檢討與評估報告.pdf>
- 十、 鍾文祥 (2013 年 12 月)。曾文水庫排砂規劃—防淤工程可行性研究，P237-238。取自經濟部水利署電子書 <https://lib.wra.gov.tw/libebookFlip/2013/1010202722b/mobile/index.html>

## 【評語】 180013

水庫水力旋流排淤之探討，不論工程設計或實驗分析都相當完整，對實際水庫可能之旋流排淤也有些分析，作品具有小型水庫排淤以及偏遠山區淨化濁水具有應用性，對一些實際應用之量化分析，最佳設計以及限制等可以做進一步探討。