

中華民國第 58 屆中小學科學展覽會 作品說明書

國中組 地球科學科

第一名

030509

水清石見浪淘淨—水庫水力旋流排淤之探討

學校名稱：臺南市立建興國民中學

作者： 國二 謝詠晴 國二 蔡捷羽	指導老師： 李明山
-------------------------	--------------

關鍵詞：水庫、旋流、清淤

得獎感言

回首來時路

從校內比賽，到全市，我們一路上過關斬將到今年參加全國科展，回首這一年來的參展之路，我們犧牲了寒暑假，無數的午休和假日，不斷改進我們的研究，可說是既辛苦又漫長，尤其是面對學校課業與研究實驗成果的雙重壓力下，有時累到想放棄，但很高興我們能堅持到底，當宣布得獎時，心情是激動、難以言喻的，覺得一切的努力都值得。

我們這次研究的發想主要是來自於台灣水庫的淤積問題日益嚴重，利用家中常見的吸塵器，以離心力分離塵土的概念，探討以水力旋流分離方式，將水庫的淤泥分離為水與泥沙的可行性，在研究過程中，我們查閱了很多有關水庫淤積及清淤的資料，一步步進行實驗，然而卻時常遇到瓶頸，例如有了實驗數據，卻不知如何分析，有了實驗結果卻不知該如何做解釋，這時難免會讓人很洩氣，但在與指導老師互相討論下，經過多次的修正與改良，才完成本次辛苦的結晶。

在這一段探索的過程中，我們得到許多師長的指導，學會了怎樣做好一件科學研究報告，如海報的製作、解說與應對等，在參展過程中，和評審教授兩次的面對面互動，更讓我們成長了不少，並了解到解說能力及團隊合作的重要性，感謝評審的指導及肯定，經過這次的比賽，讓我們對自己更充滿了自信！

一個成功者的背後，總是有一群默默支持的人。因此，我們要感謝我們的指導老師、家人、學校、同學以及在這段路上所有曾經幫助過我們的人，也希望我們的研究未來能對社會有所貢獻。

以下是本研究裝置實際運作影片：https://youtu.be/opSoNd_7YR8



全國科展第一天在會場布展前的留影



全國科展開放展覽時向民眾講解實驗過程



水庫實驗設計及操作情形

摘要

為改善台灣水庫淤積問題，轉變水庫泥砂淤積問題成為永續資源，使水庫產生長期效益，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。

壹、研究動機

臺灣雖然每年有颱風及梅雨季，可帶來年平均二千多毫米的雨量，但常年來因水土保持不佳加上颱風豪雨夾帶大量泥砂，造成水庫淤積情況嚴重，使得有效蓄水量減少，導致臺南地區時常發生缺水問題，而水庫興建的排淤隧道是直接將淤泥排入河道，不僅耗費大量水資源，泥砂也可能導致下游淤積水患，挖掘隧道更需大量經費，且清淤效率遠不及淤積速度，效果不盡理想。而某次在家中使用吸塵器打掃時突發奇想，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？因此我們想探討以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早日水清石見，遏止淤積問題的惡化。

貳、研究目的

為了探討臺灣缺水問題想找出水庫淤積原因並找出適當與可行性的處理對策，研究目的分述如下：

- 一、蒐集水庫淤積相關資料
- 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
 - (一)旋流分離裝置出入管的管徑對分離效果的影響
 - (二)旋流分離裝置的圓筒長度對分離效果的影響
 - (三)不同高度的流速對分離效果的影響
 - (四)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

參、研究設備及器材

一、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。

二、實驗器材

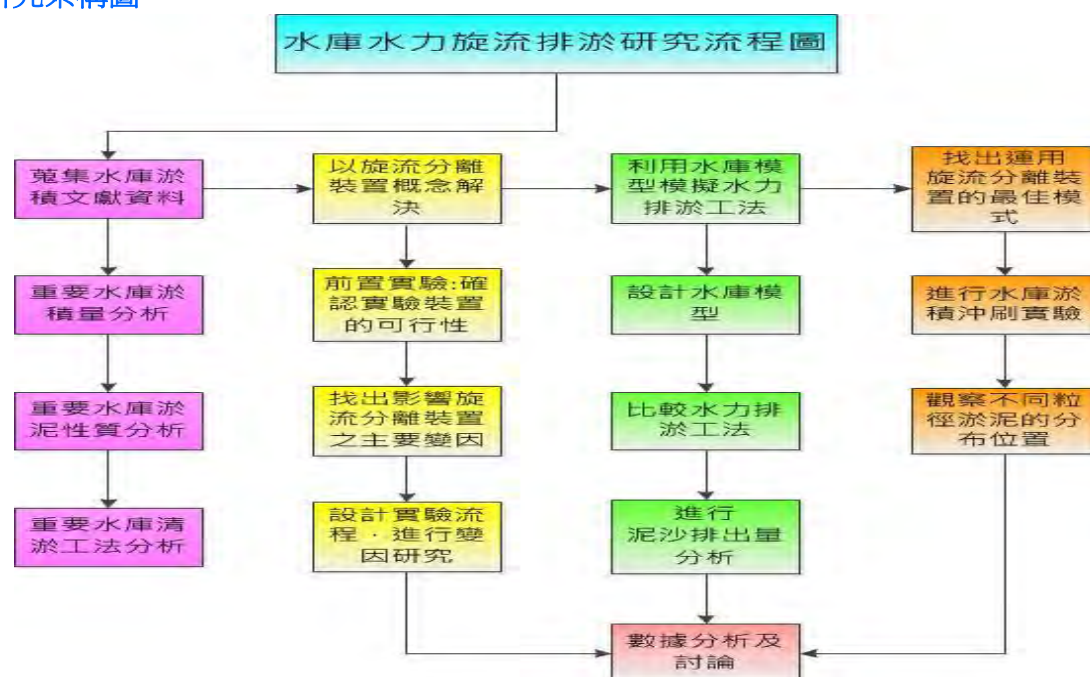
塑膠桶、PVC 塑膠管、塑膠軟管、美工器具、量尺（最小刻度為 0.5mm）、矽膠、AB 膠、電鑽、木板、防水膠帶、沉水馬達、螺桿牙條、螺帽、量杯、鋸子、寶特瓶、玻璃水槽(規格 90cm*30cm*30cm 玻璃厚 0.5cm)、塑膠桶。

三、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。

肆、研究過程與方法

一、研究架構圖



【圖 1】水庫水力旋流排淤研究流程圖

二、文獻探討

(一)臺灣主要水庫淤積現況

1.臺灣水庫現有之淤積情形

臺灣地區因地質條件及集水區保育成效等因素，造成有效庫容量逐年減少，全臺重要水庫淤積率大部分已超過 30%以上(如表 1 及圖 2)，嚴重威脅水庫之有效壽命。

【表 1】臺灣重要水庫容量及泥砂淤積分析

水庫名稱	完工當年總容量	最近年測有效容量	水庫淤積量	最近施測時間(年/月)	淤積率
尖山埤水庫	698.50	150.60	547.90	101/01	78.44%
霧社水庫	14,860.00	4,486.02	10,374.00	105/03	69.81%
白河水庫	2,509.00	1074.40	1,434.60	100/12	57.17%
烏山頭水庫	15,415.00	7,828.00	7,587.00	104/06	49.22%
德元埤水庫	385.30	229.80	154.90	104/04	40.20%
南化水庫	15,441.00	9,499.90	5,941.10	105/12	38.48%
曾文水庫	74,840.00	46,260.90	28,571.80	105/1	38.18%
石門水庫	30,912.00	19,912.00	10,441.00	105/03	33.78%
明德水庫	1,770.00	1,224.00	534.00	103/08	30.17%
德基水庫	26,220.70	14,948.20	7,080.90	104/12	27.00%
虎頭埤水庫	135.70	106.10	29.60	100/01	21.81%

(單位：萬立方公尺)



【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，分別整理於(表 2)，依統一土壤分類，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，水庫淤泥組成成份以砂土(粒徑 $>62\mu\text{m}$)、坩土($4\mu\text{m}<\text{粒徑}<62\mu\text{m}$)及黏土(粒徑 $<4\mu\text{m}$)為主，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 ₂ (二氧化矽)	Al ₂ O ₃ (氧化鋁)	Fe ₂ O ₃ (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

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，臺灣目前的清淤方式以陸上機械開挖、抽泥船、水力抽泥、排砂隧道為主，但這些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，無法達到持續清淤效果並且需要高額運作成本及興建成本，我們將這些清淤方式適合使用的時機及優缺點整理如下表(表 3)：

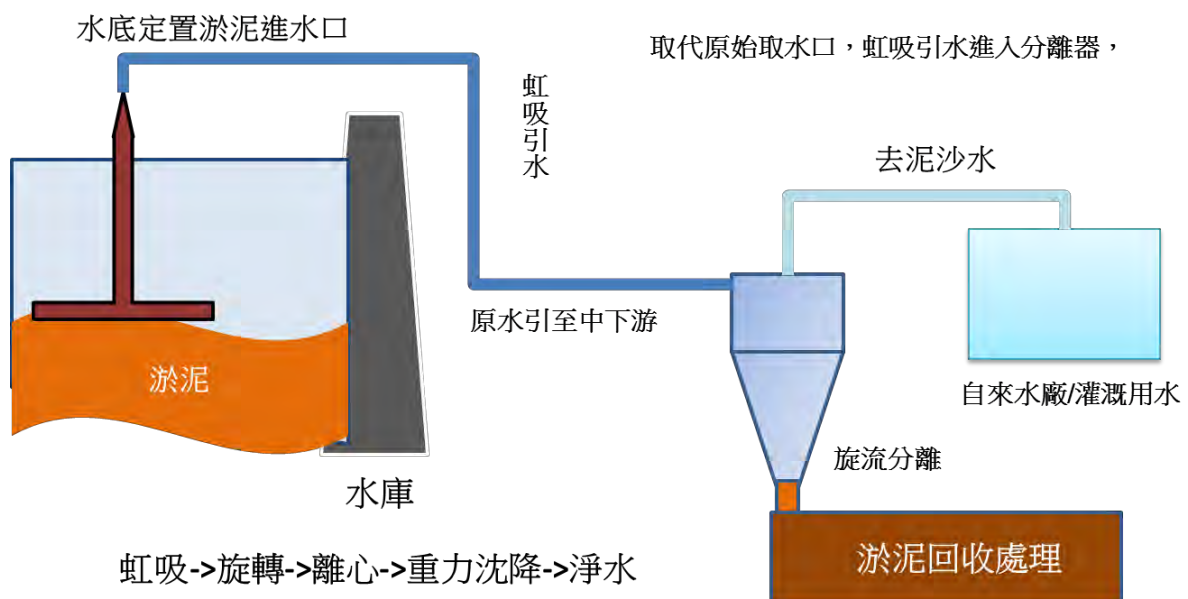
【表 3】水庫清淤方式一覽表

清淤方式	適用時機	作業方式	特性比較	清淤速度/量
陸上機械開挖 	低水位 (11-4月)	通常以挖土機開挖 露出水面之淤泥	1.地處偏遠、交通限制 2.環境衝擊、民眾抗爭 3.淤泥去化困難 4.清淤受限水位高度	較慢/較小
抽泥船水力抽泥 	可持續作業	工作船上配置抽泥 或挖泥設備來清除 庫底淤泥	1.淤泥去化困難 2.耗費大量動力及成本	較慢/較小
排砂隧道 	颱風期間	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	1.運作成本低 2.興建成本高 3.受天候限制	較快/較大

(二)原理分析及整合構思

1.整合構思說明：

根據文獻，使用排砂隧道會受天候限制，若由虹吸方式引入水庫底部淤泥、異重流等高濃度泥砂水到水庫外，此二種工法將泥砂排入河道中會造成河流濁度過高，導致下游淤積且浪費水資源，若在中下游增設一個水力裝置（如圖 3），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.旋風分離：

(1)前述水力裝置採用旋風分離原理，利用流體在圓形容器內旋轉形成圓周運動產生離心力，將比重大於流體的粒子離心分離，其原理與國中自然課本的圓周運動相同，此原理經常利用在工業粉塵收集與家庭吸塵器。集塵粒徑範圍 10~ 200 μm ，性能較佳者可處理至 5 μm 。此為以空氣為流體的應用，本研究改採用水為流體進行探討。

(2)經查詢文獻後，找到計算可被旋風分離裝置分離之最小粒徑的公式如(表 4)，此公式

是以 Stokes 定律計算 $D_{p,min} = \sqrt{\frac{9\mu B(D-B)}{u_a N \pi D(\rho_s - \rho)}}$ ，大於此粒徑之粒子集塵效率為 100%，小於此粒徑粒子則無法全部被收集。

【表 4】旋風分離裝置計算可分離最小粒徑公式說明對照表

$D_{p,min}$	可百分之百被分離之最小粒徑(μm)	
D	旋風分離器圓筒部份直徑(m)	
μ	流體之黏度 ($\text{kg/m} \cdot \text{s}$)	
B	旋風機入口之寬度(m)	
N	流體在旋風機內之迴旋次數(次)	
u_a	進入旋風分離器流體之平均速度(m/s)	
P	運送流體密度(kg / m^3)	
P_s	粒子之密度(kg / m^3)	

3.依文獻預估清淤效益：

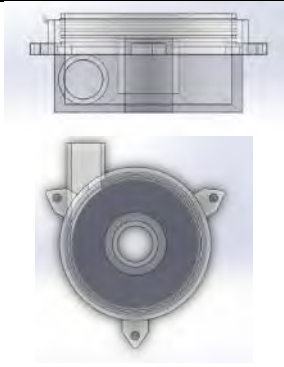
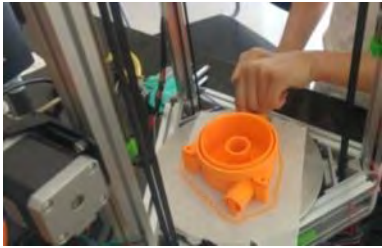




根據經濟部水利署水資源局網站資料，目前曾文水庫短中期水力及機械清淤預計一年可清淤 232 萬立方公尺淤泥，僅達入庫泥砂量 41.4%(年入砂 560 萬立方公尺)，若依曾文水庫每年計畫各類合計供水為 1 億 5 千萬立方公尺，如能在水庫供水同時能帶走含 5%容積淤砂，換算一年 750 萬立方公尺清淤量，將使水庫排淤量比入庫泥砂量大。長期使用可清除水庫多年淤積砂石，如此無須擔憂原水品質，無需動力與天候配合可長時間持續運作運輸與回收砂石資源。

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

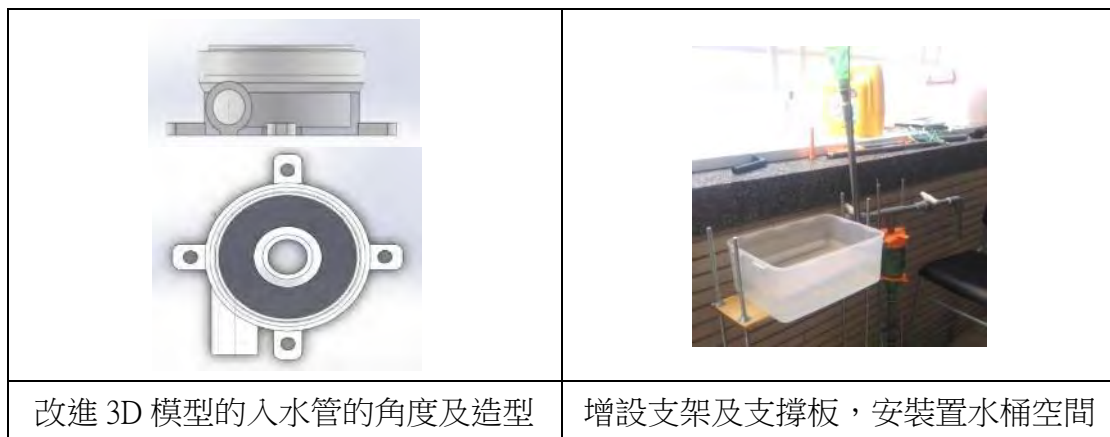
(二)第二代裝置

1.改善第一代裝置缺失問題（如圖 6）及基礎測試（如圖 7）：

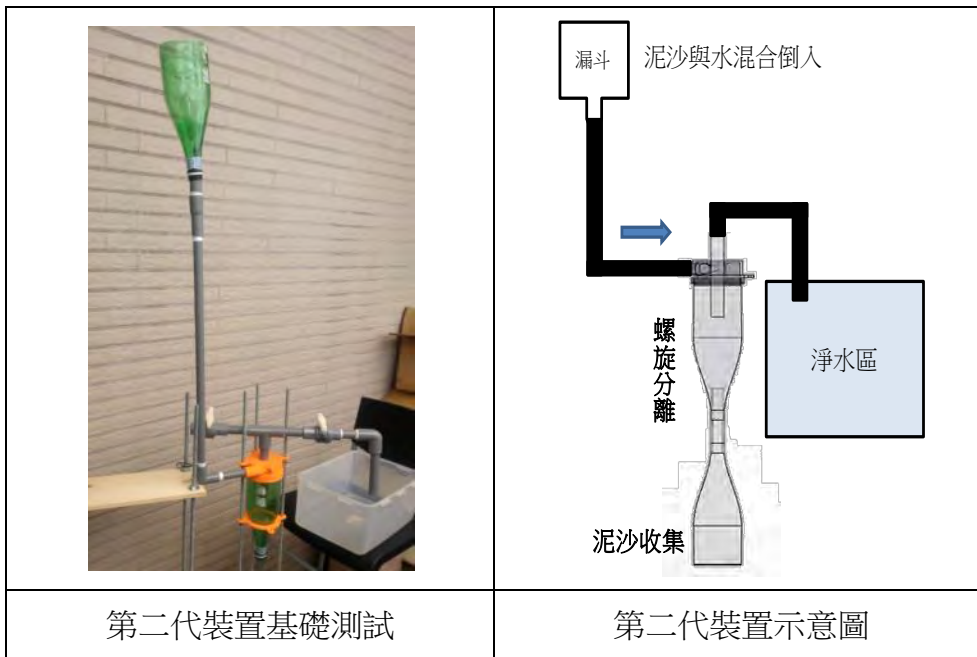
(1)基於上述第一代裝置 3D 列印零件滲水問題，針對 3D 模型入水管進行外型修正。

(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。



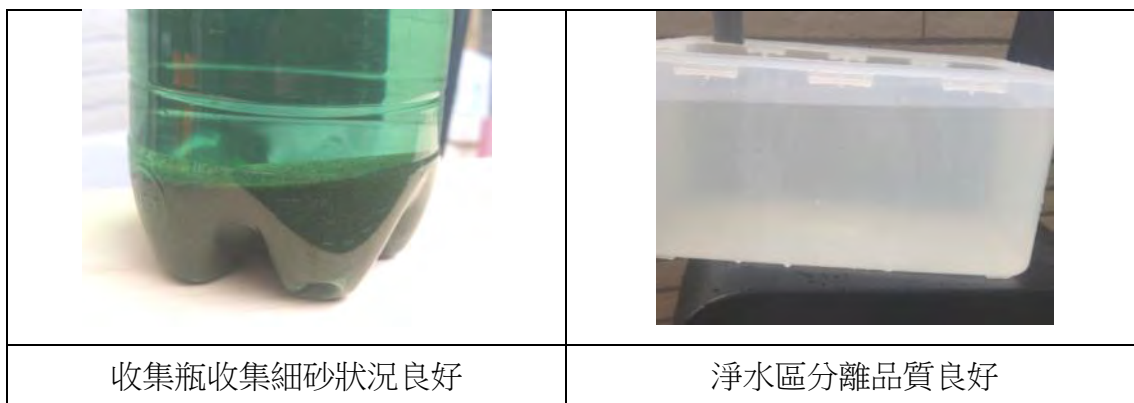
【圖 6】改善第一代裝置缺失問題



【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 $\frac{A-C}{B-C} \times 100\%$ = 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>		

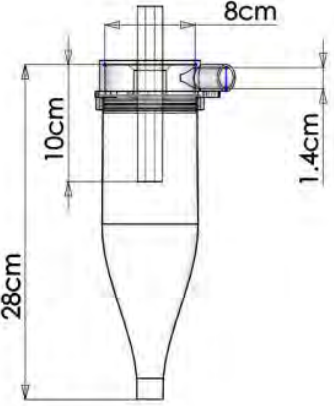
【圖 9】以比例的方法計算分離率

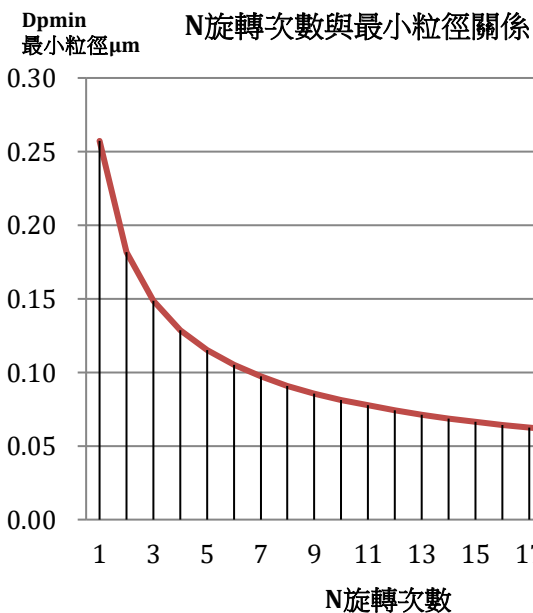
四、實驗 1:探討影響旋流分離裝置之分離效果的主要變因

(一)公式分析

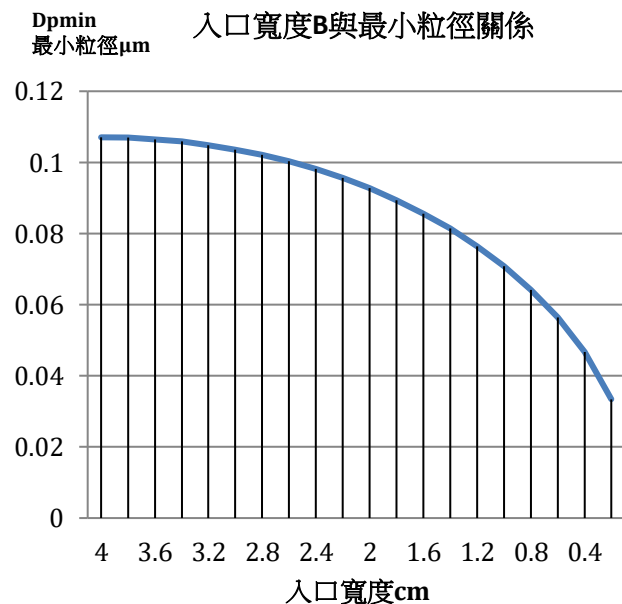
1.在透過公式與設計裝置過程中，發現入水管的管徑、旋轉次數及不同高度的流速可能對旋流分離裝置造成影響，因此我們以此三項作為實驗變因，依據文獻探討中計算可被旋流分離裝置分離之最小粒徑的公式，代入我們製作的第二代裝置之參數(如表 5)計算最小粒徑的數值為 $0.08 \mu m$ ，利用 EXCEL 軟體來試算三個變因入口大小、水流旋轉次數、流速與最小粒徑關係之曲線圖(如圖 10、11、12)，希望藉由上述變因可找到影響分離裝置的關鍵點。前述文獻顆粒比重為 2.5 以上，因乾燥河砂有顆粒空隙，比重為 1.5-1.6 之間，採比重數據低者為計算參考。

【表 5】公式換算之對照表

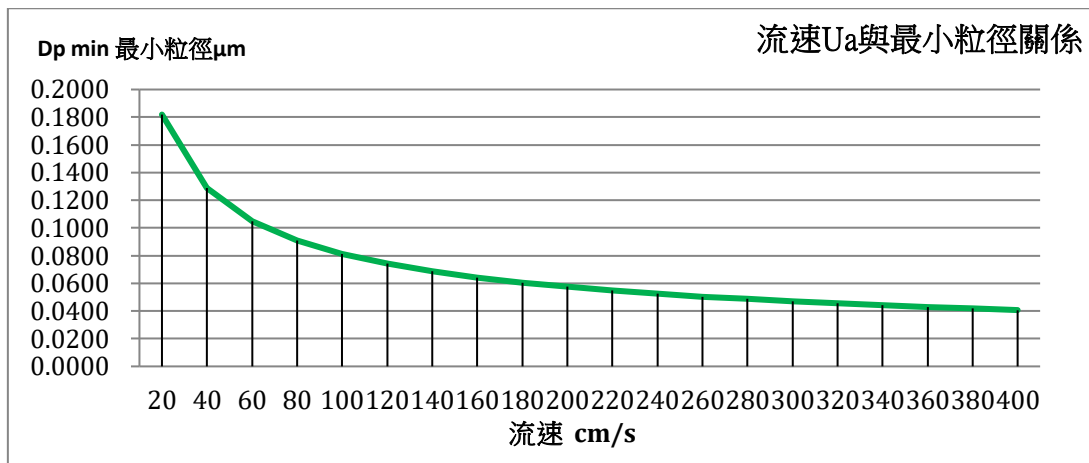
$D_{P,min} = \sqrt{\frac{9\mu B(D-B)}{u_a N \pi D(\rho_s - \rho)}}$ 	旋流分離裝置圓筒部份直徑(m)	D	0.08	桶身直徑
	流體之黏度 (kg/m · s)	μ	1	水的黏度
	旋風機入口之寬度(m)	B	0.014	入口口徑
	流體在旋風機內之迴旋次數(次)	N	10	旋轉次數
	進入分離器流體平均速度(m/s)	U_a	1	流體速度
	粒子之密度(kg /m ³)	P_s	1.5	分離比重
	運送流體密度(kg /m ³)	P	1	流體密度



【圖 10】旋轉次數與最小粒徑關係圖



【圖 11】入口寬度 B 與最小粒徑關係圖

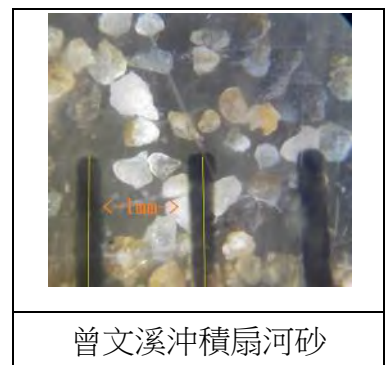


【圖 12】平均流速 U_a 與最小粒徑關係圖

2. 從以上關係曲線圖得知：

- (1) 平均流速愈大，則可被分離的 $D_{p,min}$ 粒徑愈小，分離的效率越佳。
- (2) 入口寬度 B 越小，則可被分離的 $D_{p,min}$ 粒徑越小。
- (3) 桶身越高，旋轉次數越多，則可被分離 $D_{p,min}$ 粒徑越小。

3. 將第二代裝置的參數代入公式後，得出 100% 可分離出 $D_{p,min}$ 最小粒徑數值為 $0.08 \mu m$ ，但此公式所算出的結果僅為理論值，設想粒徑 $0.08 \mu m$ 如同一個細小濾網，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。



曾文溪沖積扇河砂

【圖 13】實驗樣本河砂

(二) 實驗 1 之實驗步驟

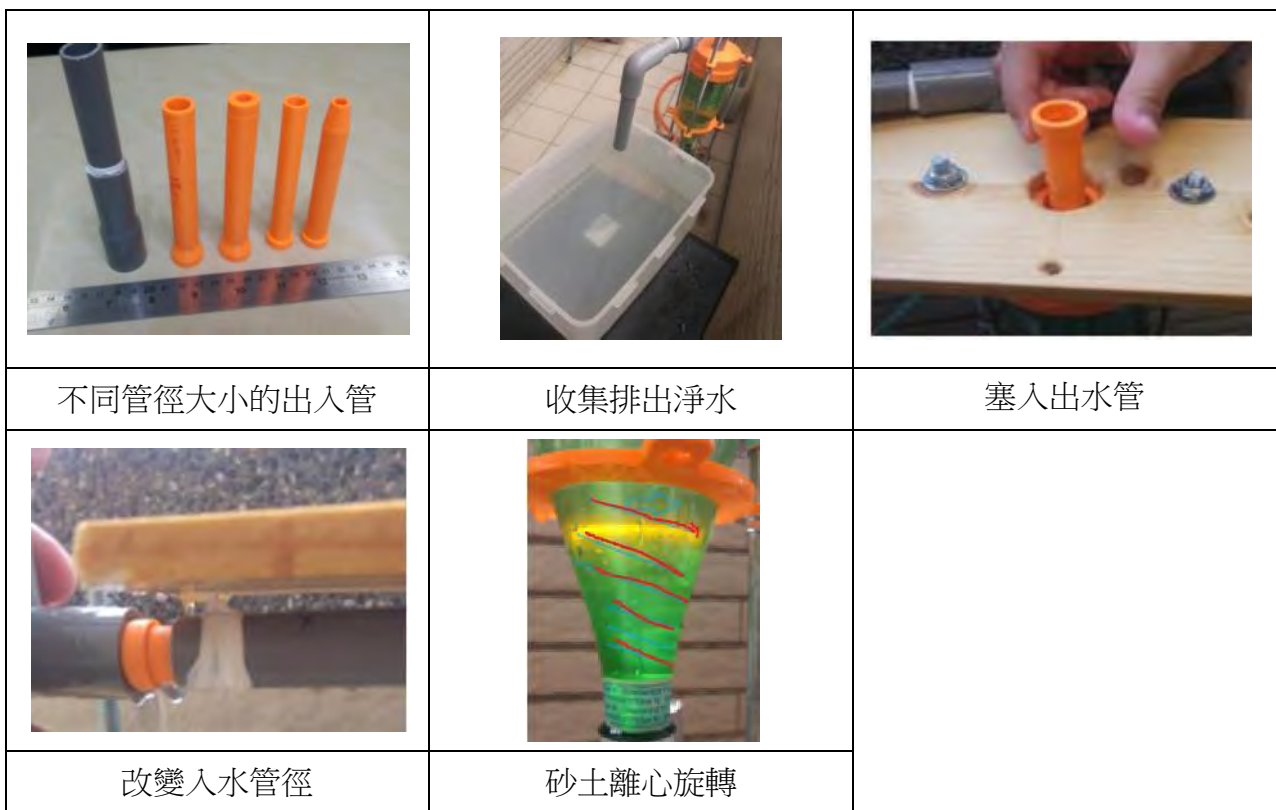
1. 實驗 1-1: 探討旋流分離裝置出入管的管徑對分離效果的影響

(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 6)進行實驗(如圖 14)。

【表 6】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

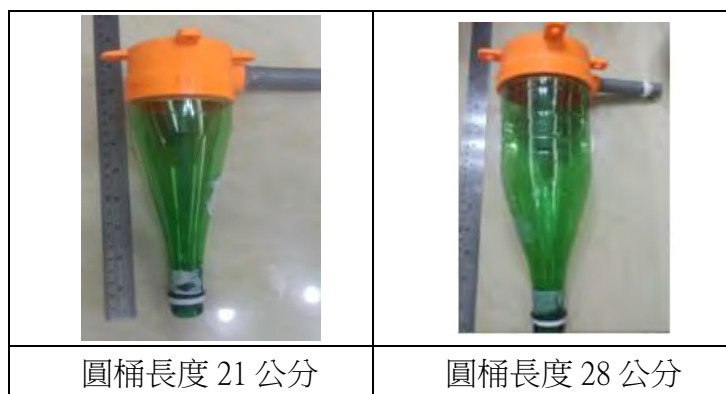
- (2)使裝置內注滿水，將裝置空氣排出。
- (3)先放水 5 秒讓裝置產生螺旋水流之後再緩緩加入 160g 的砂土，並保持漏斗水平面至入水管底部 1 公尺的高度。
- (4)砂土放入完畢後持續放水 5 秒，使砂土完全進入分離器內，待 10 秒砂土沈澱後，關閉收集瓶閥門，並計算砂土分離率。
- (5)為了確保流速能滿足實驗所需條件，故又測量(表 6)五種配對組合之流速，先從上方漏斗注水 20 秒進入分離裝置後，秤量淨水區塑膠桶收集到的水量，並利用液體在水管內的流速公式： $V(\text{流速})=Q(\text{流量})/A(\text{管內截面積})$ ，將水量計算成流速數據。



【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 7)。

【表 7】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。

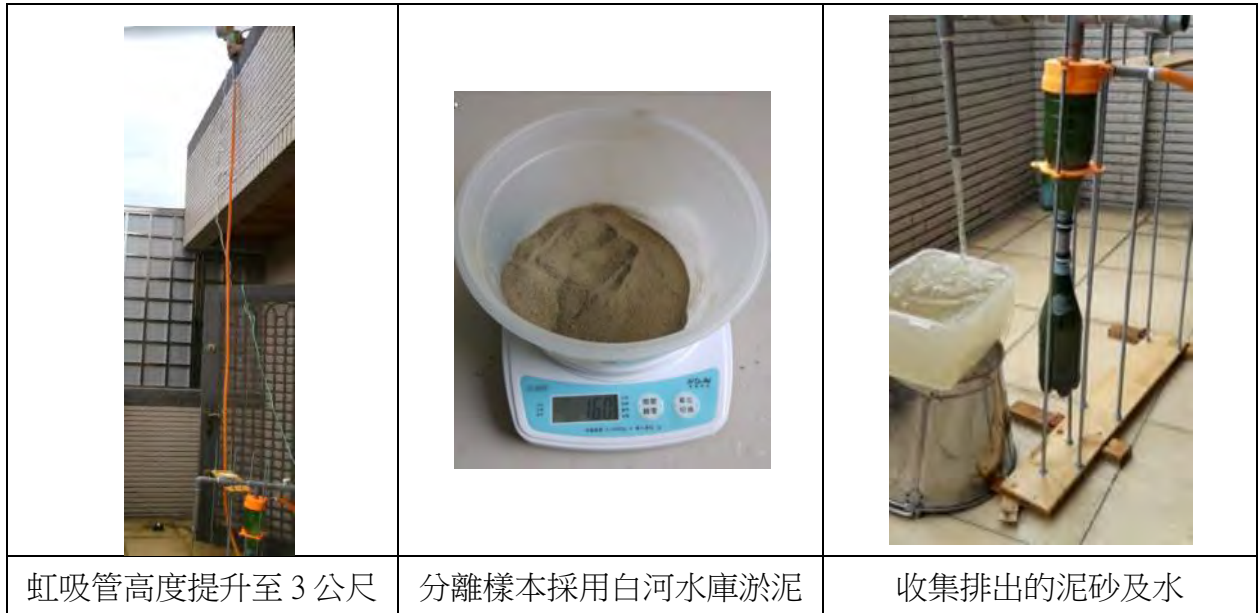
(3) 因水庫淤泥粒徑較為細小，為產生更快的流速所以提升了引水高度，但因實驗場地限制最高僅能提升至 3 公尺進行分離實驗。

(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 8)的流速，測量方法同實驗一之步驟(5)。

【表 8】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 90~102 年水庫進水量、供水量及洩洪量年平均值分別為 5,157、2,486 及 2,567 萬立方公尺，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。


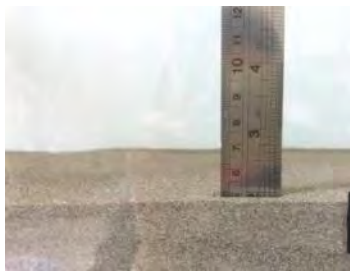

(二)實驗步驟

1.實驗 2-1:排砂隧道

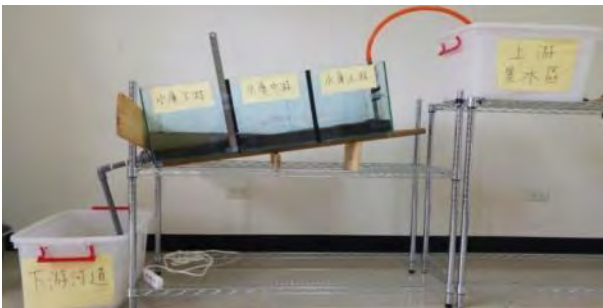

- (1)將實驗水槽擺放至斜度 11 度，裝入 5 公分高的同性質河砂，加水舖平，由上游集水區原水供應槽注入 25L 的水量（如圖 17）。
- (2)利用洪水排洪時將異重流排出，固定排砂管(管徑 2CM)在水庫模型的壩前排砂。
- (3)排出 25L 定量水後，利用沉水馬達只抽水(不抽砂)循環至上游集水區原水供應槽進

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 $25L*2=50L$)，再將水槽平放將水槽泥砂抹平測量砂土深度(淤積量)。

		
排砂隧道管擺放方式	裝入 5 公分高的河砂	水槽平放測量河砂深度




【圖 17】實驗 2-1 之實驗步驟

	
整體運作情形	水庫上游運作情形



【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 $(5L*10)$ 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)。

		
設定 9 個定位點	虹吸排砂擺放方式	抽出水量達 5L


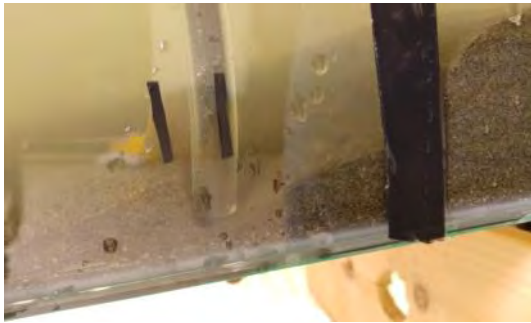
【圖 19】實驗 2-2 之實驗步驟

	
虹吸抽泥排放區	實際運作情形

【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）。

	
實際運作情形	以虹吸管進行移動式抽砂

【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:

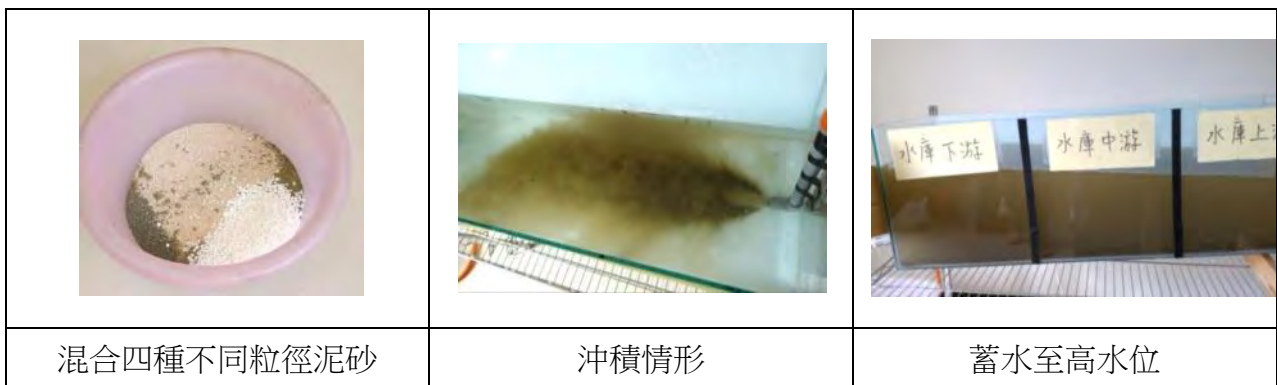
模擬水庫淤積沖積實驗，分析不同粒徑大小的淤泥在水庫中分布的位置關係，以利找出哪一位置較適合置放旋流分離裝置的引流抽砂管。

(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 9)，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 9】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

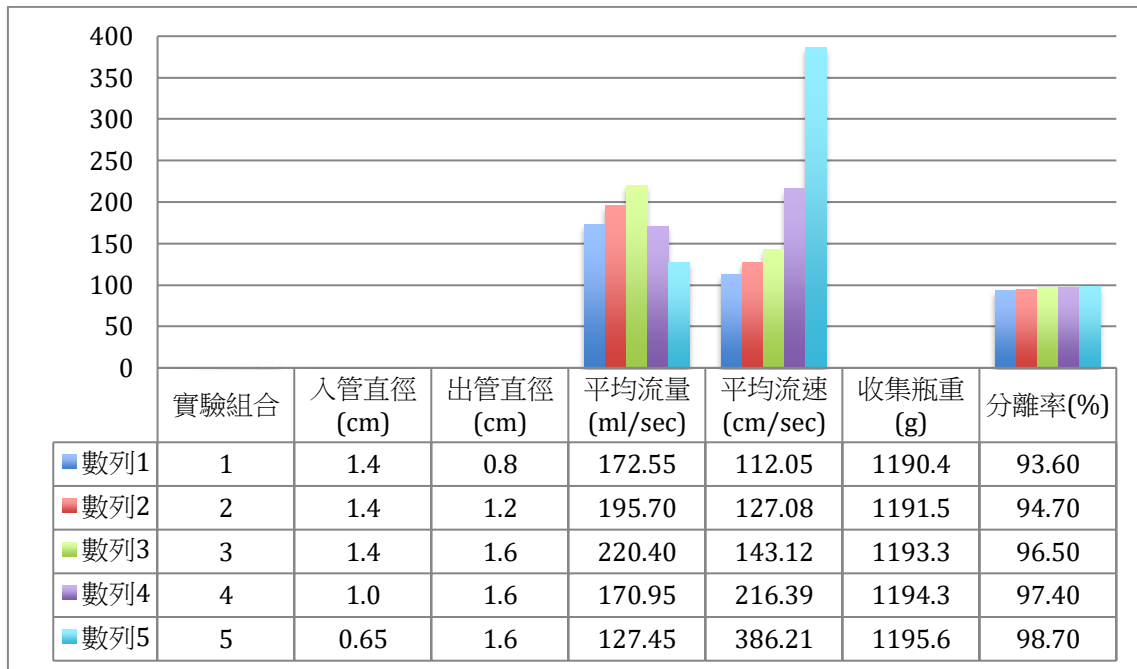
伍、研究結果

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 10)。

【表 10】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：

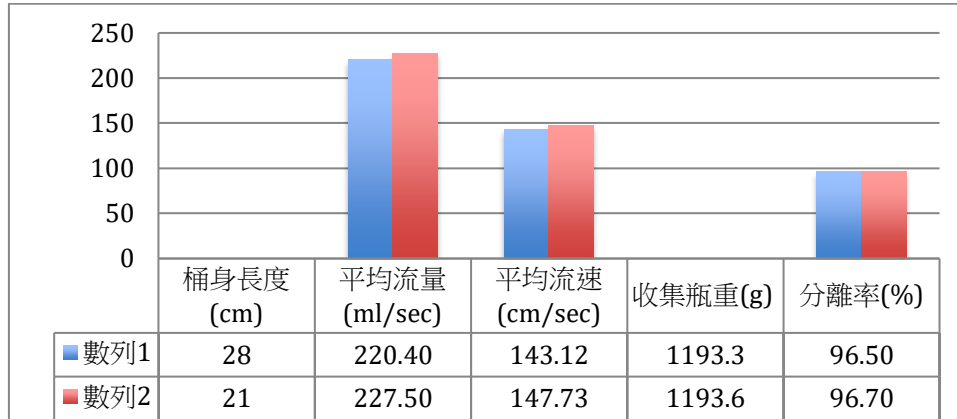
- (1)五種組合的分離率幾乎都達 93.6%以上，其中實驗組合 5 流速最快，分離率最好。
- (2)實驗組合 1 至 3 發現，入口管徑固定，出口管徑擴大時，流速及分離率都隨之提升。
- (3)從實驗組合 3 至 5 發現，出口管徑固定，入口管徑縮小，流速及分離率都隨之提升，且流速的提升幅度較擴大出口管徑時明顯。
- (4)從實驗組合 1 及 4 發現，兩者流量相近但流速卻相差近 1 倍，而流速高者分離率較高。

(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 11)：

【表 11】實驗 1-2 不同圓筒長度之分離效果



2. 實驗結果：

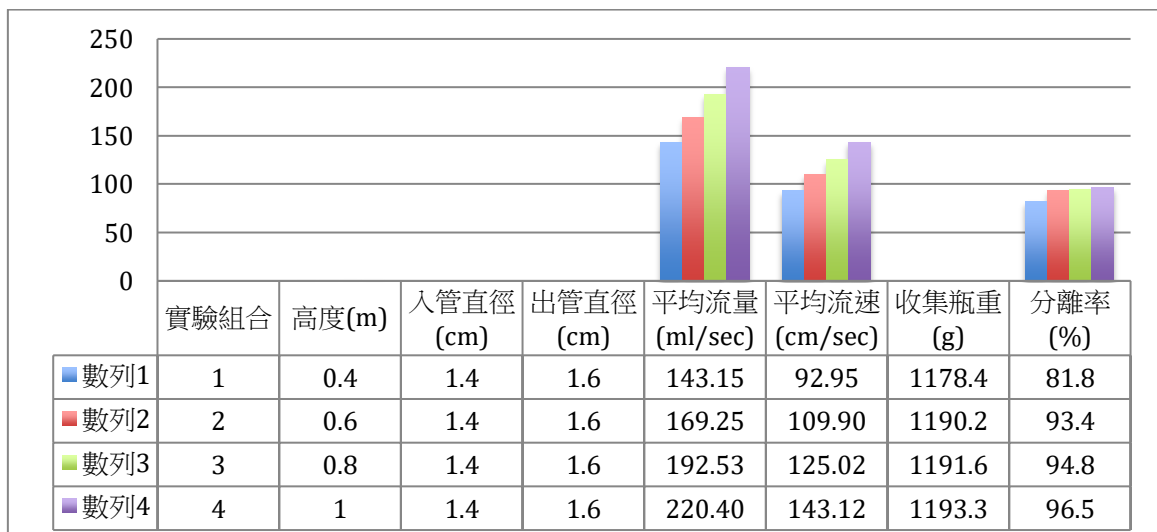
1. 在本實驗中固定相同入出口管徑，透過改變寶特瓶的圓筒長度來影響流體旋轉次數，發現二種不同桶身長度，所測出的平均流速差異不大，且分離效果也大致相同。
2. 實驗過程中，21cm 短瓶身寶特瓶所做的分離裝置，以相機攝影慢速播放觀察旋轉次數至少有五、六次，而 28cm 長瓶身寶特瓶所做的分離裝置，旋轉次數至少有六、七次，對照前述【圖 10 旋轉次數與最小粒徑關係圖】，當旋轉次數高於五次以上時，可分離最小粒徑之差異也變小，觀察旋轉次數多寡發現流速、粒子比重與粒子離心沉降所需時間有關，且旋流離心沉降主要作用於圓錐處，本實驗採寶特瓶其圓錐長度固定長度導致旋轉次數接近，觀察到的差異不明顯。

(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 14mm，出口管徑 16mm，改變虹吸引水管的高度，比較分離效果的結果(如表 12)：

【表 12】實驗 1-3 不同高度之分離效果



2.實驗結果：

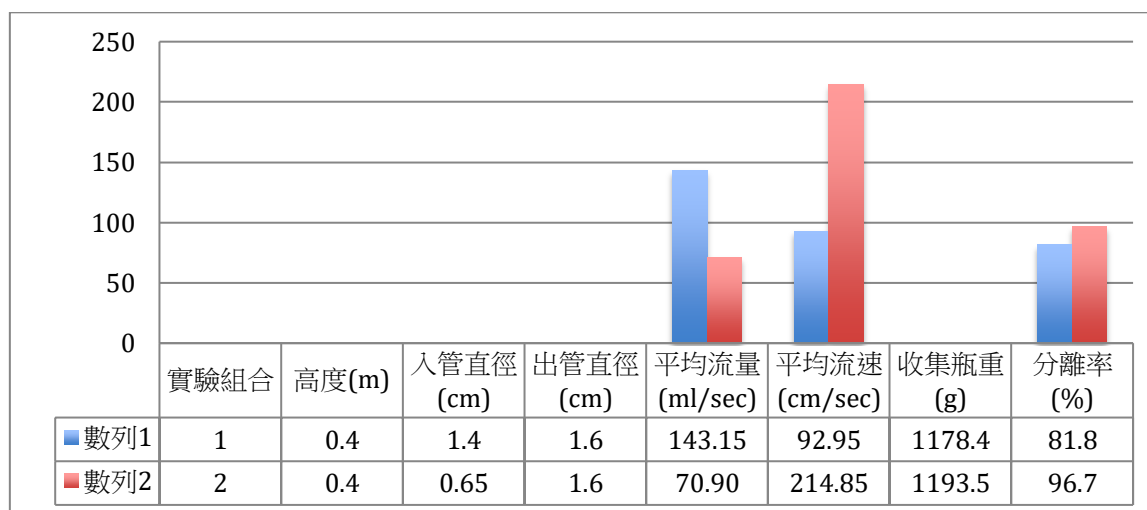
- (1)實驗組合 1 因管內平均流速低於 100 cm/sec，導致分離率與其他實驗組合有顯著差異，驗證了前述【圖 12 流速 U_a 與最小粒徑關係】，流速在 100 cm/sec 以上差異較小的曲線關係。
- (2)在本實驗中發現，因引水管的高度愈高與出水口位能壓力差越大，使水管內流速變快，所以當管內的水開始流動後，位能轉換成動能，故水流旋流泥砂分離裝置的流速也隨之升高，所獲得之分離效果便會提高。

(四) 實驗 1-3 之延伸實驗

1.實驗數據比較：

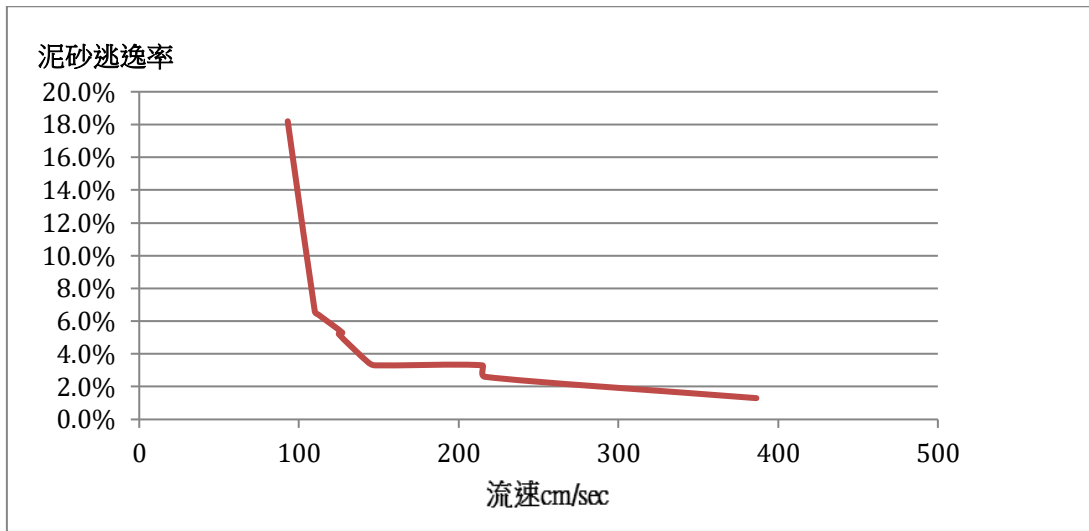
固定引水管高度 0.4m，設計兩種不同入口管徑組合，比較分離效果的結果(如表 13)：

【表 13】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 13 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 10 的實驗組合 2 與表 12 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 U_a 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。

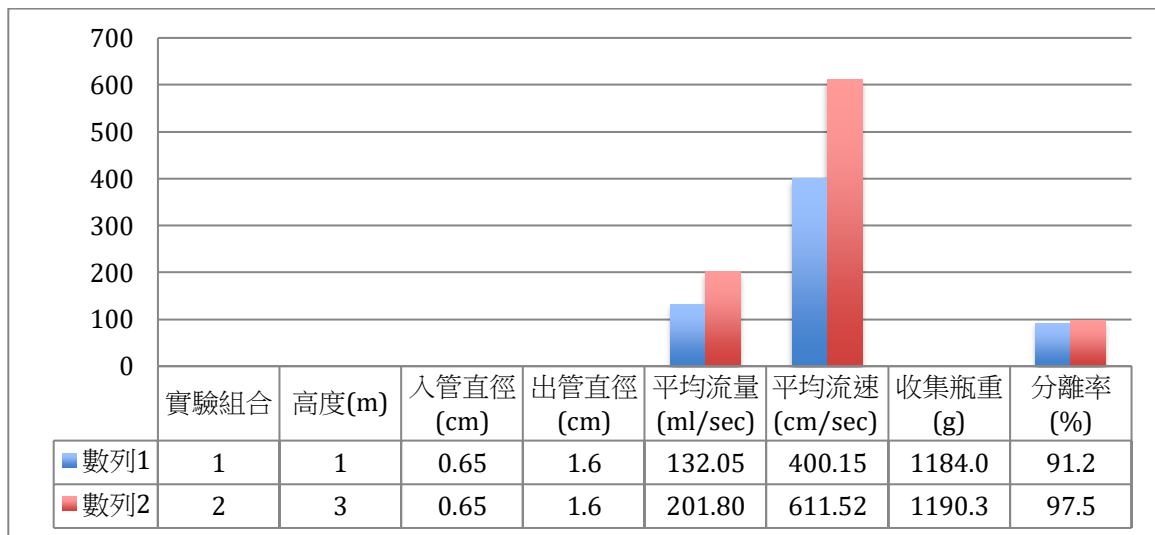


【圖 23】泥砂逃逸率與實驗流速關係圖

(五) 實驗 1-4: 探討實際採用水庫淤泥進行分離的效果

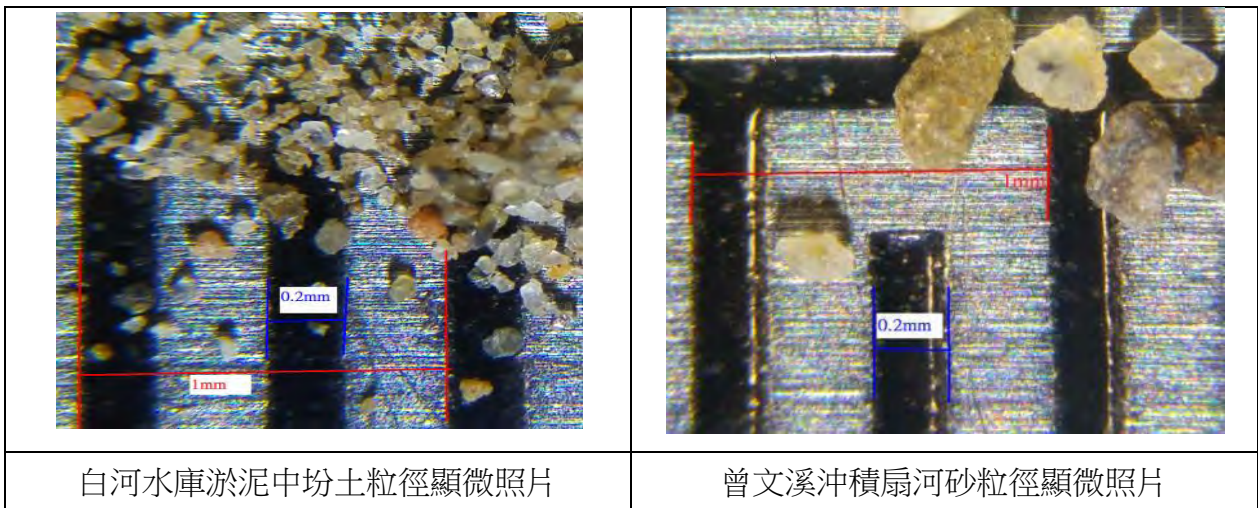
1. 實驗數據比較：

【表 14】實驗 1-4 不同高度分離水庫淤泥的效果



2. 實驗結果：

- 比較表 14 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。
- 由表 14 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

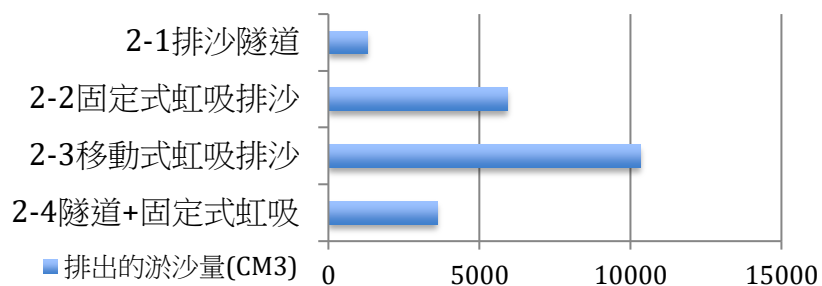
二、實驗 2:利用水庫模型分析水力清淤工法的效益

(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 15、圖 25)：

【表 15】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 ³	5936.3CM ³	10324CM ³	3613.4CM ³
圖片				



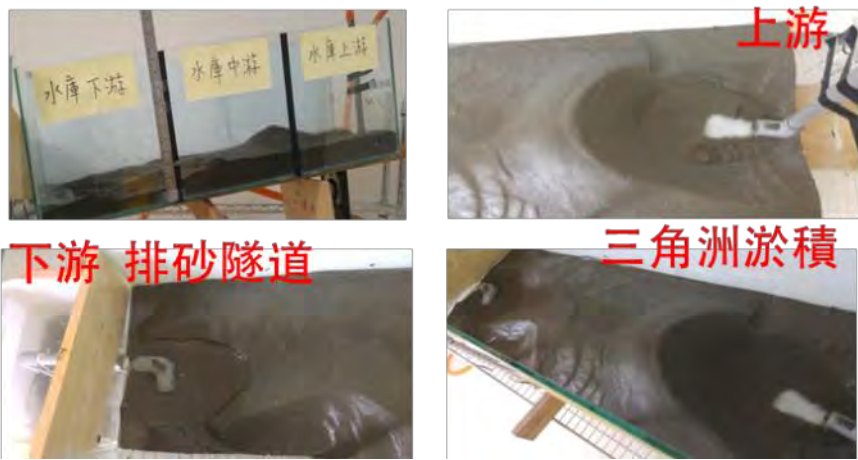
【圖 25】實驗二實驗結果比較圖

(二)實驗結果（如表 16 至 19）：


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 16】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冲刷成三角洲淤積，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 17】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 18】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 19】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 20 至 22)：









【圖 26】坡度 5 度時頂坡距水槽右側 33cm




【表 20】沖積坡度 5 度的分布情形

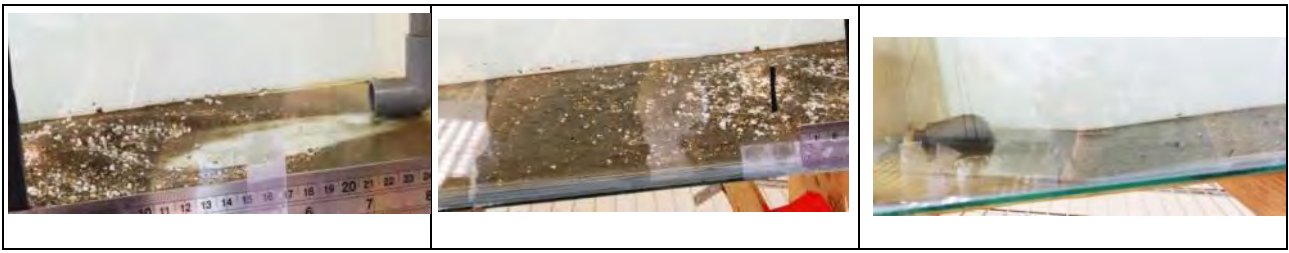
實驗組合 1	5 度	三角洲淤積頂坡距水槽右側 33cm
上游	中游	下游
		
		

【表 21】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 22】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 20 至 22 可得知: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。

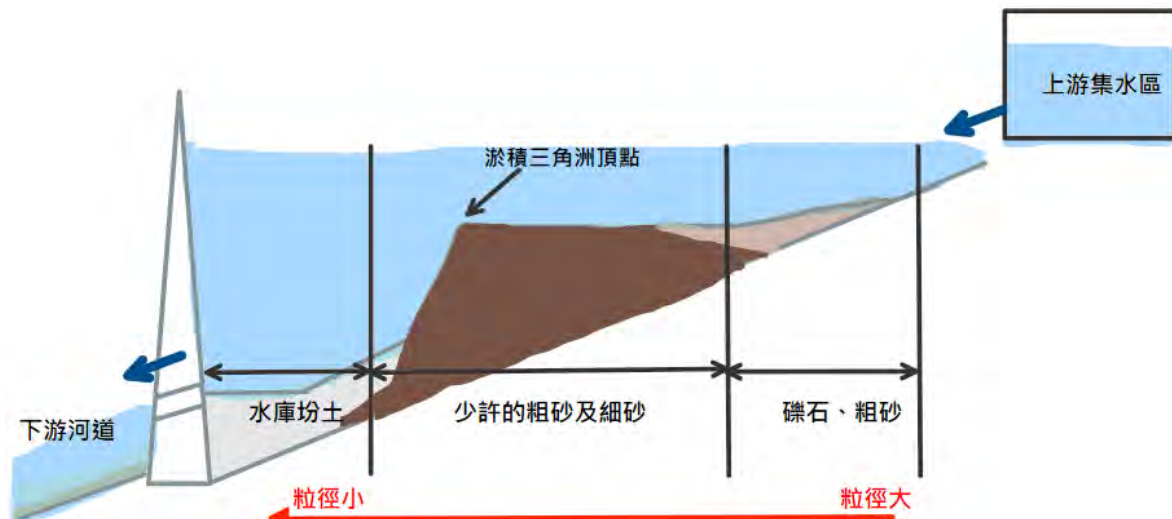
2.不同粒徑之淤砂在水庫分布位置

(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

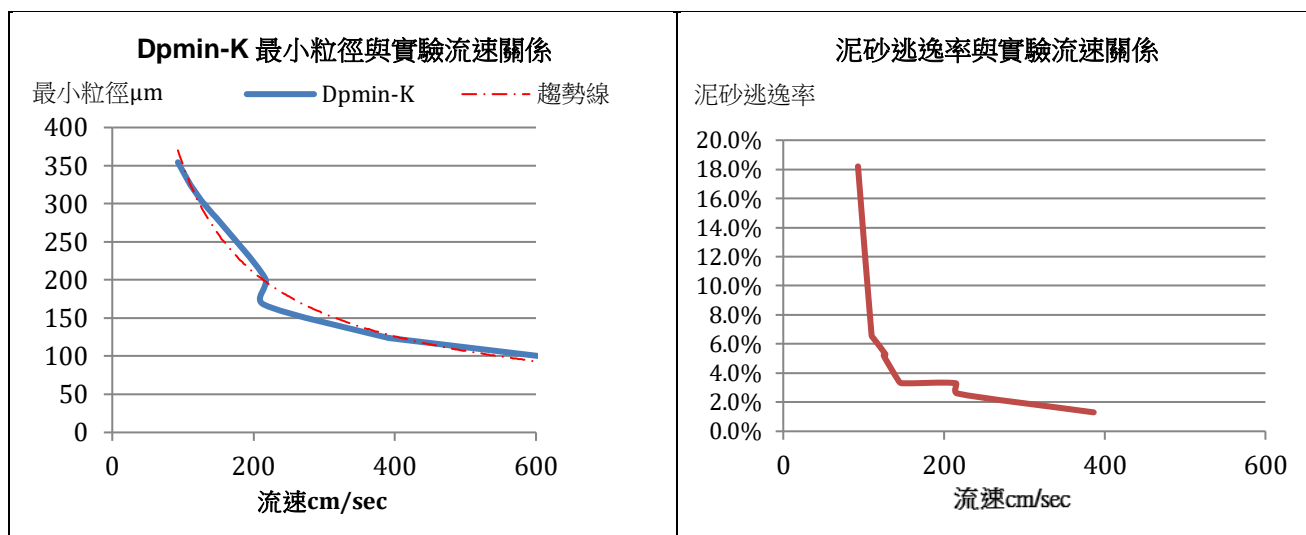
陸、討論

一、理論公式與分離效益討論

(一) 實際分離粒徑大小與理論公式的常數關係

將本研究實驗中全部流速(U_a)數據與實驗條件:入管口徑(B)、迴旋次數(N)、粒子比重 2.5，套入 Stokes 公式計算得出最小粒徑 D_{p-min} ，發現實驗與計算值存有明顯差異，因此

以實驗 1-1 實驗組合五的數據結果(分離最小粒徑 $125 \mu m$ 的河砂可達 98.7%分離率)為計算標準，計算得出修正常數(K)為 6507，再將公式加入修正常數(K=6507)重新計算各實驗最小粒徑 D_{pmin-K} ，並將其繪製成關係曲線圖與實驗中的流速與河沙逃逸率關係圖進行對比，發現兩者呈現相似線型關係，故證實流速與泥砂分離品質成正比關係。



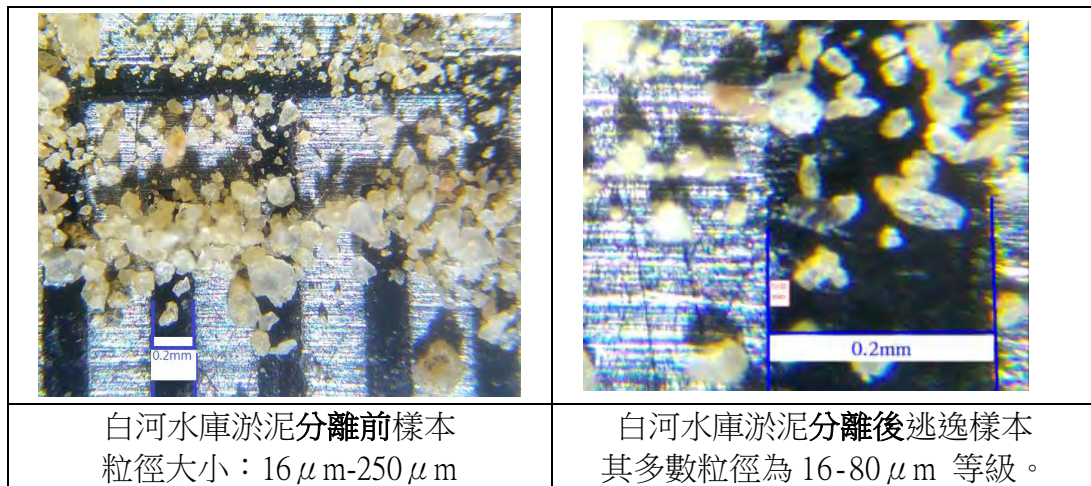
【圖 28】 D_{pmin-K} 最小粒徑與實驗流速關係與泥砂逃逸率比較圖

(二) 分離加入修正常數後最小粒徑與流速關係

將公式加入修正常數(K=6507)計算實驗中 D_{pmin-K} 最小粒徑與實驗粒徑(如表 23)，將流速換算 D_{pmin-K} 粒徑，其中以流速 611.50cm/sec 分離白河水庫後的逃逸泥砂樣本，經檢查可觀察到其粒徑範圍屬 $16-80 \mu m$ 屬於中坩土等級粒徑(如圖 29)，與修正常數所得出的計算值是相符的(小於 $99.3 \mu m$)，雖效果無法達到百分之百，但仍可有效分離 97.5%的淤泥。

【表 23】理論公式與實驗樣本可分離最小粒徑與修正常數計算表

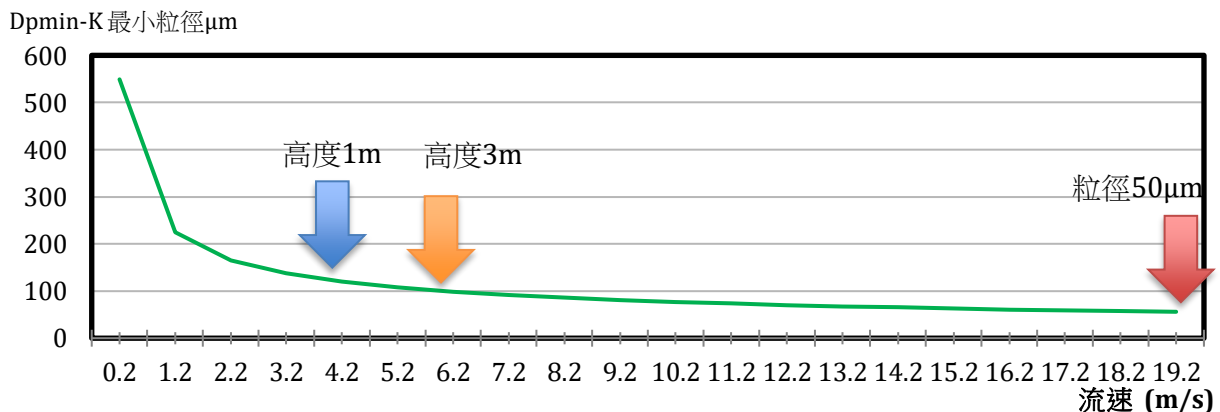
流速 (cm/sec)	原理論公式 最小粒徑	加入修正常數 D_{pmin-k} 最小粒徑	實驗樣本 粒徑範圍	逃逸泥砂 粒徑範圍	分離率
386.36	$0.01920945 \mu m$	$125 \mu m$	河砂 $125-1000 \mu m$	$16-110 \mu m$	98.7%
400.15	$0.018875559 \mu m$	$122.8 \mu m$	水庫淤泥 $16-250 \mu m$	$16-110 \mu m$	91.2%
611.50	$0.01526908 \mu m$	$99.3 \mu m$	水庫淤泥 $16-250 \mu m$	$16-80 \mu m$	97.5%



【圖 29】白河水庫淤泥分離前後粒徑大小的比較

二、旋流泥砂分離設計與理論公式的關係

在實驗分離白河水庫淤泥實測中，引水管高度由 1 公尺提高 3 倍至 3 公尺，但流速只增加 0.5 倍，實際分離率從 91.2% 提升 97.5%，效果提升 6%。對照【圖 28】 D_{pmin-K} 最小粒徑與實驗流速關係圖顯示推判：當分離裝置在流速 6M/sec 以上的條件下，若要降低 D_{pmin-k} 最小粒徑以達更佳分離效果，所需的流速條件數值需數倍，且儘管再提高 3 倍的流速，最小粒徑亦僅能降至 50 μm (約降 1/2 倍)，仍無法將粉土粒徑以下的淤積全部分離(如下圖)。



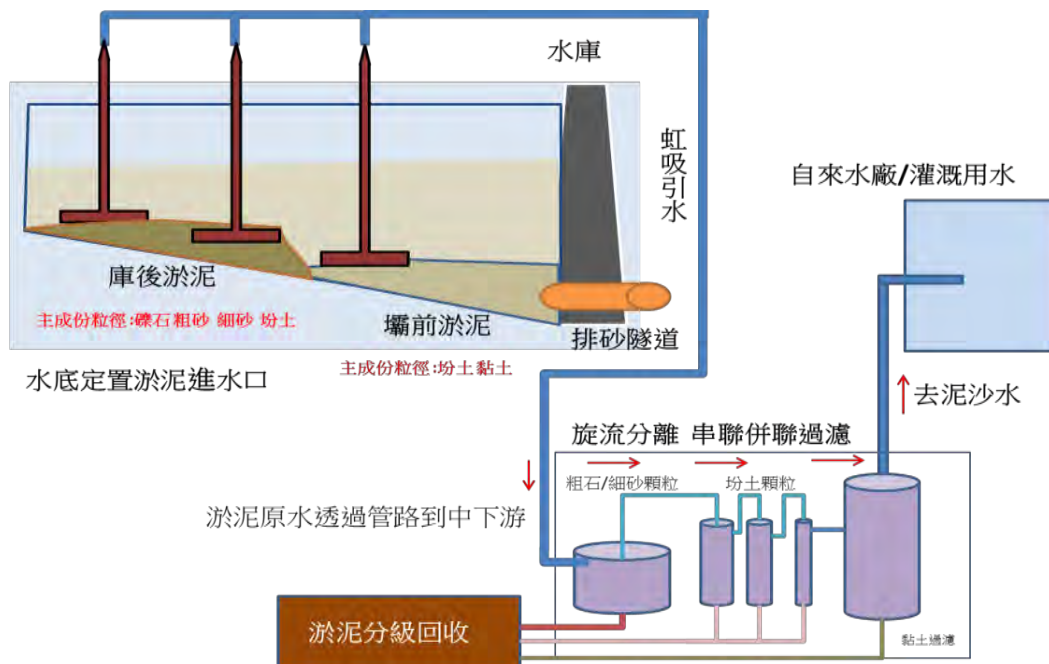
【圖 30】代入修正常數 D_{pmin-K} 與流速 u_a 試算圖

因此，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最小粒徑關係圖得知旋轉次數越多，則可被分離 D_{pmin} 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_{pmin} 最小粒徑，但旋轉次數超過 20 次以上效果逐漸降低。
- (二)雖然入口管徑越小，可被分離的 D_{pmin} 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、粉土的分離效率與品質且有利砂土分級回收。

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，下游淤泥成份粒徑小，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，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份（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

柒、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。
- 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即可分離泥砂，所需分離時間極短。
- 三、以氣體旋風可百分之百分離最小粒徑公式算出的理論值與改以水為流體實驗結果雖有相似線型關係，其中高度、入管徑、旋轉次數(桶身高度)對於分離品質都有不同程度的影響，但存有差異常數關係，需再另行探究。
- 四、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。

- 五、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，可依照水庫淤積成份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份，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。
- 六、實驗虹吸水力排砂工法搭配旋流分離概念的設計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低耗能達到節能減碳的效果，水與砂石資源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。

捌、參考資料及其他

- 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
- 三、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>
- 四、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。取自 www.wrasb.gov.tw/Uploads/pi/曾文水庫防洪防淤策略.pdf
- 五、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工程材料，p24。取自 https://www.pcc.gov.tw/epaper/9910/download/reader_1.pdf
- 六、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/>
- 七、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
- 八、經濟部水利署南區水資源局 (2014)。白河水庫壩體改善工程規劃報告。取自 [www.wrasb.gov.tw/Uploads/Download/白河水庫壩體改善工程規劃報告\(定稿本\).pdf](http://www.wrasb.gov.tw/Uploads/Download/白河水庫壩體改善工程規劃報告(定稿本).pdf)

【評語】 030509

1. 以虹吸方式來進行水庫淤泥的排除工作，主題相當清楚，並且具有創意及可行性。
2. 排淤的構思很完整具有邏輯。規劃的旋流分離裝置相當創新。而且試驗的步驟簡潔而縝密，令人一目了然。
3. 各種不同排淤工法之效益評估比較，具有實用價值，及工程治理上的可行性，對社會及經濟會產生正面的影響。
4. 鉅細靡遺的試驗步驟闡述的非常清楚，各個試驗結果具有實用上的意義，對於未來水庫的排砂工作，會產生一定程度的貢獻。

摘要

為改善台灣水庫淤積問題，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、圓筒長度**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。

壹、研究動機

臺灣雖然每年有颱風及梅雨季，可帶來年平均二千多毫米的雨量，但常年來因水土保持不佳加上颱風豪雨夾帶大量泥砂，造成水庫**淤積情況嚴重**，使得有效蓄水量減少，導致臺南地區時常發生**缺水問題**，而水庫興建的排淤隧道是直接將淤泥排入河道，不僅耗費大量水資源，泥砂也可能導致下游淤積水患，挖掘隧道更需大量經費，且清淤效率遠不及淤積速度，效果不盡理想。而某次在家中使用吸塵器打掃時突發奇想，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？因此我們想探討以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早日水清石見，遏止淤積問題的惡化。

貳、研究目的

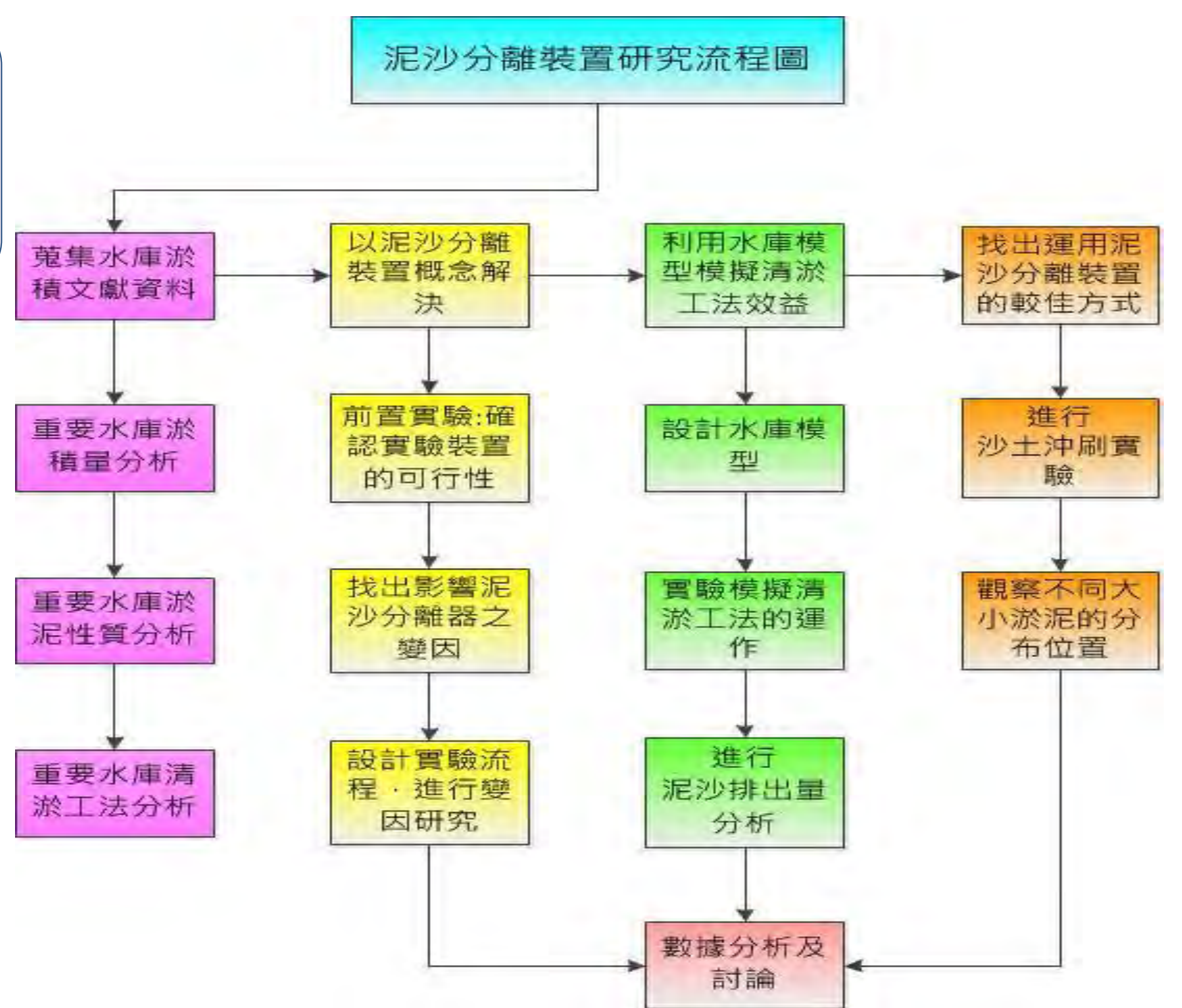
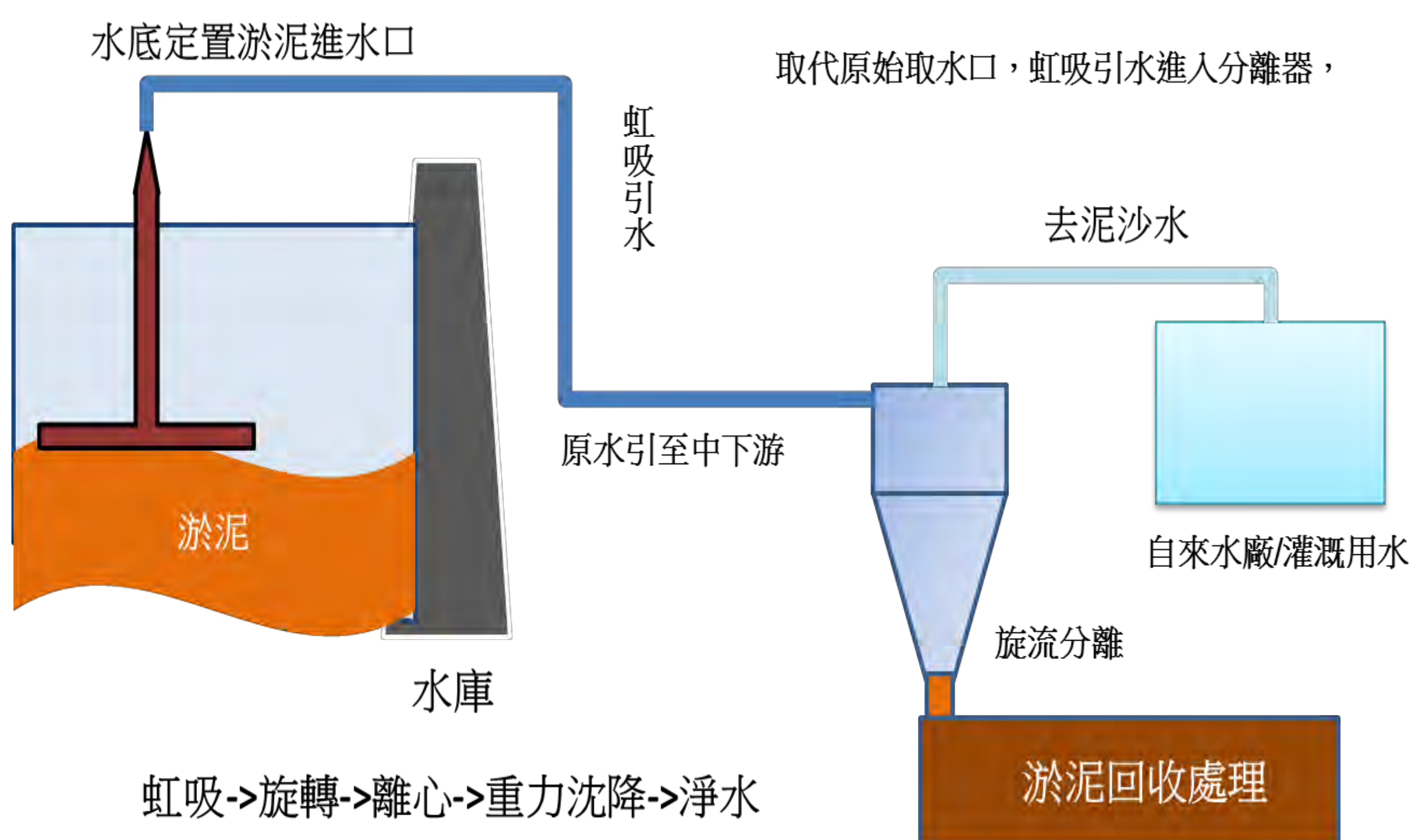
- 蒐集水庫淤積相關資料
- 製作旋流分離裝置
- 探討影響旋流分離裝置之分離效果的主要變因
 - 旋流分離裝置**出入管的管徑**對分離效果的影響
 - 旋流分離裝置的**圓筒長度**對分離效果的影響
 - 不同**高度**的流速對分離效果的影響
 - 探討實際採用**水庫淤泥**進行分離的效果
- 利用水庫模型分析**水力清淤工法的效益**
- 探討水庫淤泥粒徑與沖積**分布位置**的關係

參、研究設備及器材

游標尺	精密電子秤	3D 列印機	實體顯微鏡	塑膠桶	PVC 塑膠管
塑膠軟管	量尺	矽膠、AB膠	玻璃水槽	寶特瓶	鋸子
沉水馬達	電鑽	木板	防水膠帶	螺桿、牙條	螺帽
量杯	鋸子	曾文溪海岸沙	鹽水溪岸河泥	白河水庫淤泥	白色礫石、極粗沙

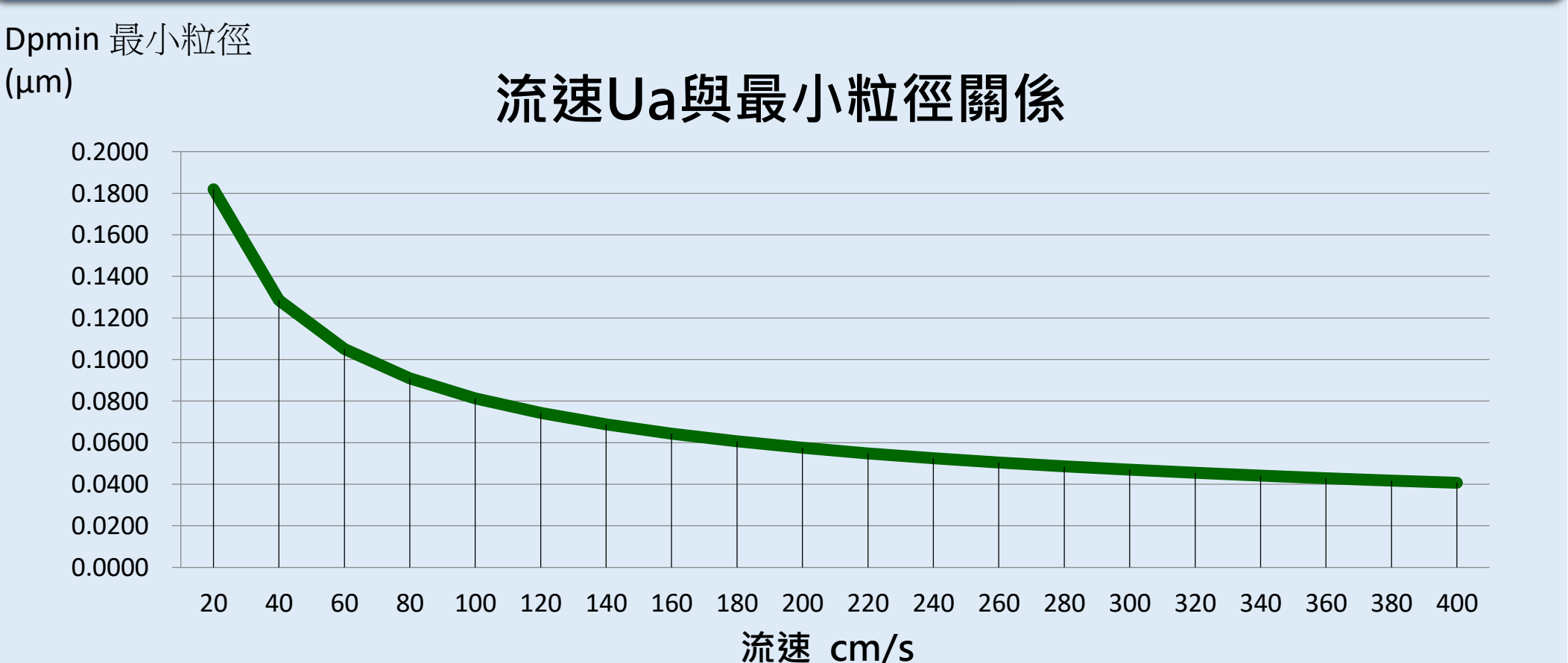
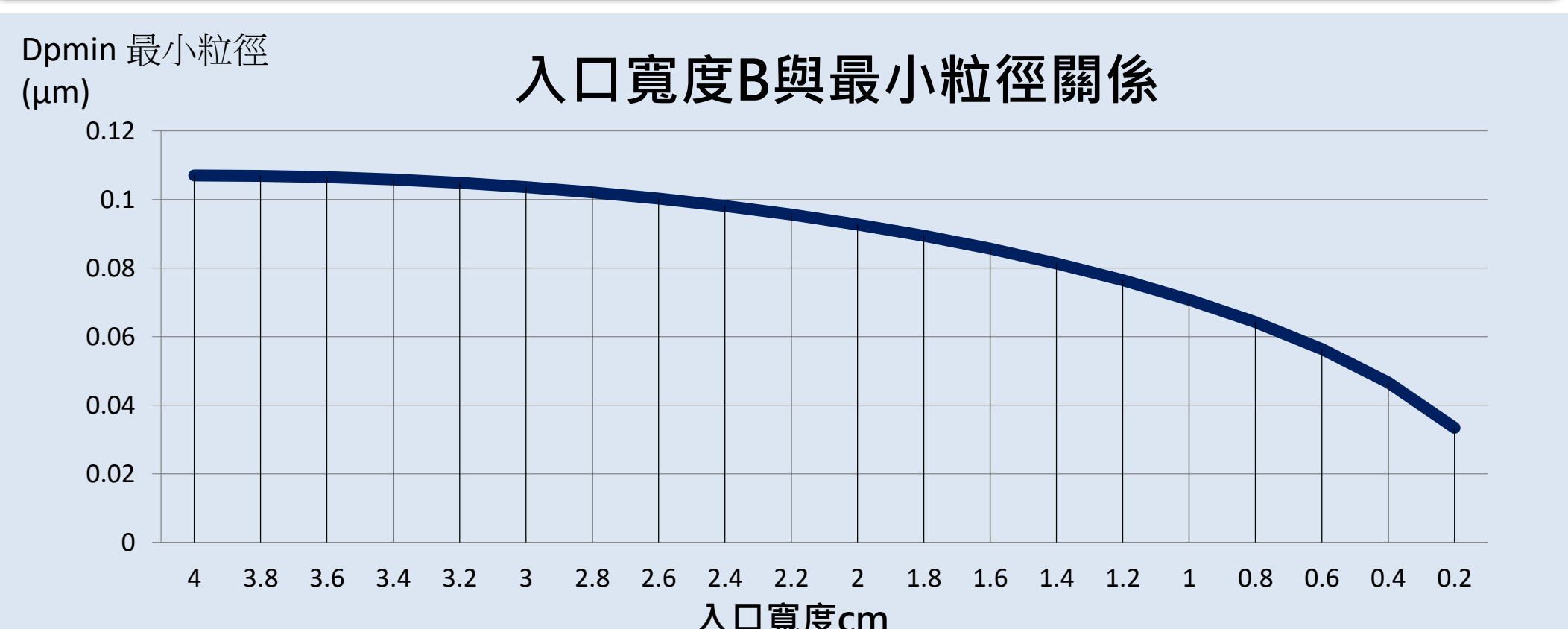
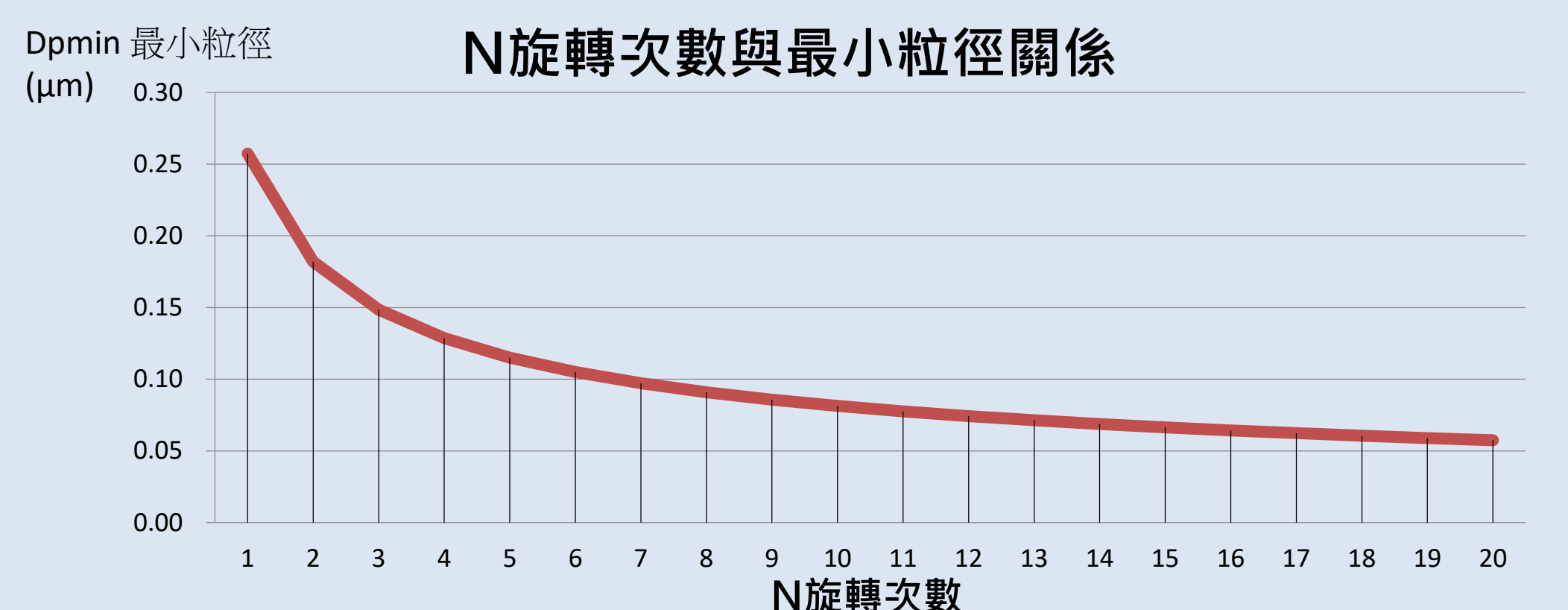
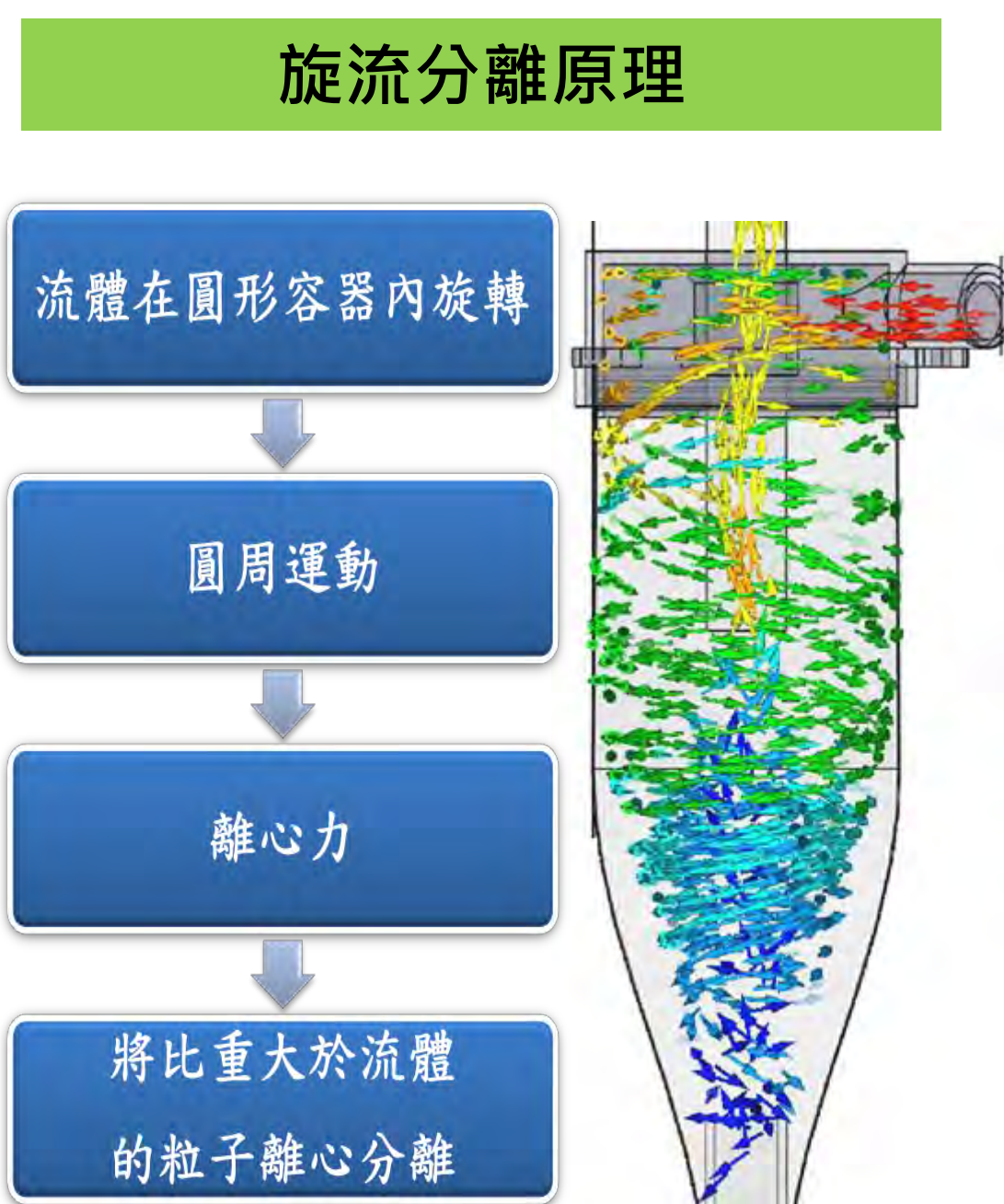
肆、研究過程與方法

根據文獻，使用**排砂隧道**會受天候限制，若由**虹吸方式**引入水庫底部淤泥、異重流等高濃度泥砂水到水庫外，此二種工法將泥砂排入河道中會造成**河流濁度過高**，導致下游淤積且浪費水資源，若在中下游**增設一個水力裝置**，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。



裝置採用旋風分離原理，利用流體在圓形容器內旋轉形成**圓周運動產生離心力**，將比重大於流體的**粒子離心分離**，其原理與國中自然課本的圓周運動相同，此原理經常利用在工業粉塵收集與家庭吸塵器。集塵粒徑範圍10~200μm，性能較佳者可處理至5μm。此為以空氣為流體的應用，本研究改採用水為流體進行探討。

水庫	水庫淤泥物理性質				顆粒比重
	礫石	砂土	坩土	粘土	
霧社水庫	0	3	39	58	2.75
白河水庫	0	22	55	23	2.67
曾文水庫	0	19.3	42.8	37.9	2.64
石門水庫	0	0	18	82	2.65
明德水庫	0	6	71	23	2.71
德基水庫	0	23	46	31	2.79
虎頭埤水庫	0.3	2.4	59.7	37.6	2.73
日月潭水庫	0	13	22	65	2.73



泥砂種類	細礫石	砂土	坩土	粘土
粒徑範圍	4-2mm	2mm-0.62mm	0.062-0.004mm	0.004-0.001mm

以Stokes定律推算本研究裝置可分離之最小粒徑為**0.08μm**

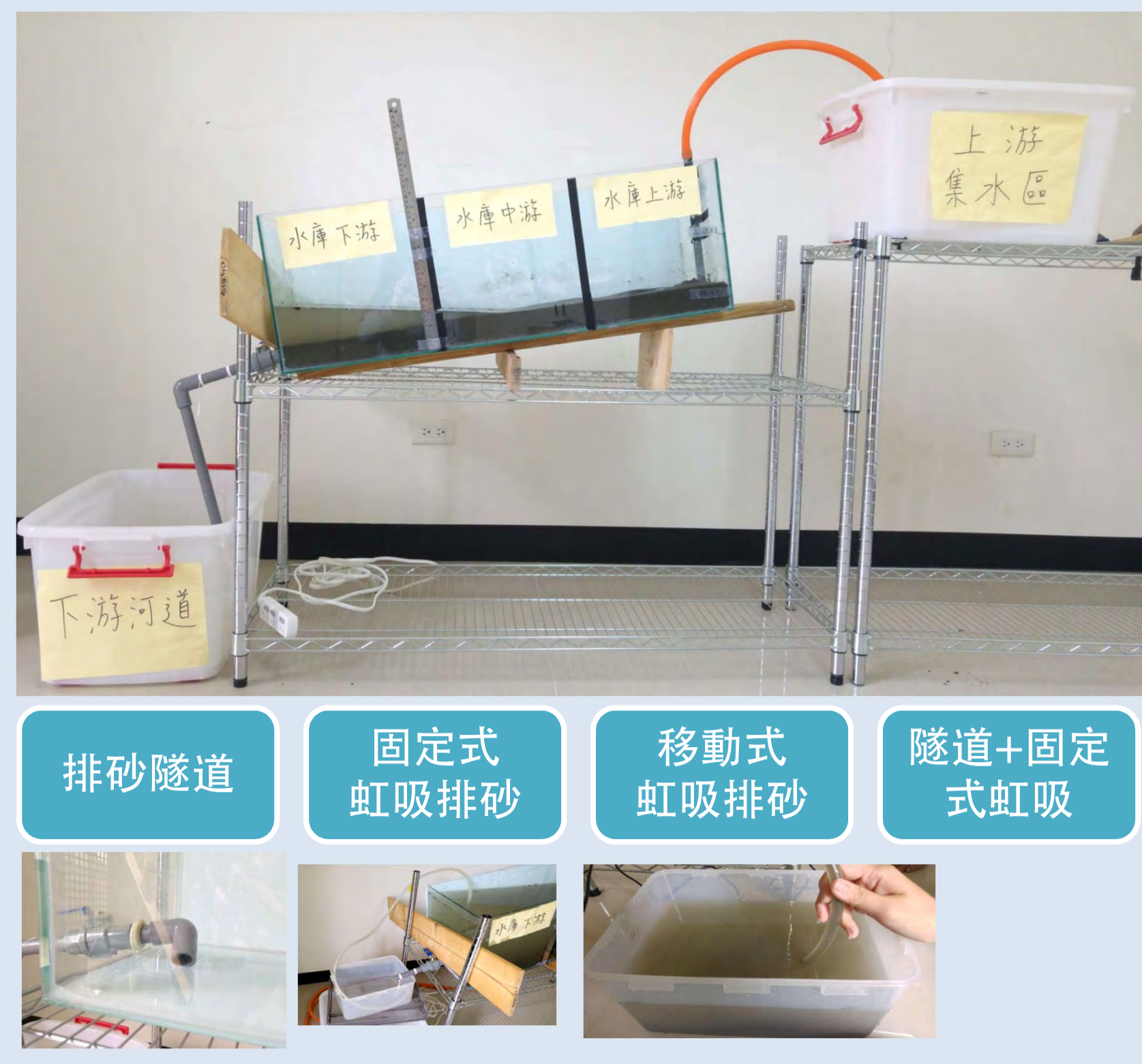
參數	符號	數值	說明
旋流分離裝置圓筒部份直徑(m)	D	0.08	桶身直徑
流體之黏度 (kg/m·s)	μ	1	水的黏度
旋風機入口之寬度(m)	B	0.014	入口口徑
流體在旋風機內之迴旋次數(次)	N	10	旋轉次數
進入分離器流體平均速度(m/s)	Ua	1	流體速度
粒子之密度(kg/m ³)	Ps	1.5	分離比重
運送流體密度(kg/m ³)	P	1	流體密度

將第二代裝置的參數代入公式後，得出100%可分離出 D_{pmin} 最小粒徑數值為**0.08μm**，此公式所算出結果僅為**理論值**，設想粒徑0.08μm如同一個細小濾網，而實驗樣本河砂粒徑為252μm-125μm，大於計算出的理論值，如河砂粒徑能**100%被分離**就可驗證將公式流體參數改為水的可行性。

實驗1:製作旋流分離裝置



實驗2:利用水庫模型分析各清淤工法的效益



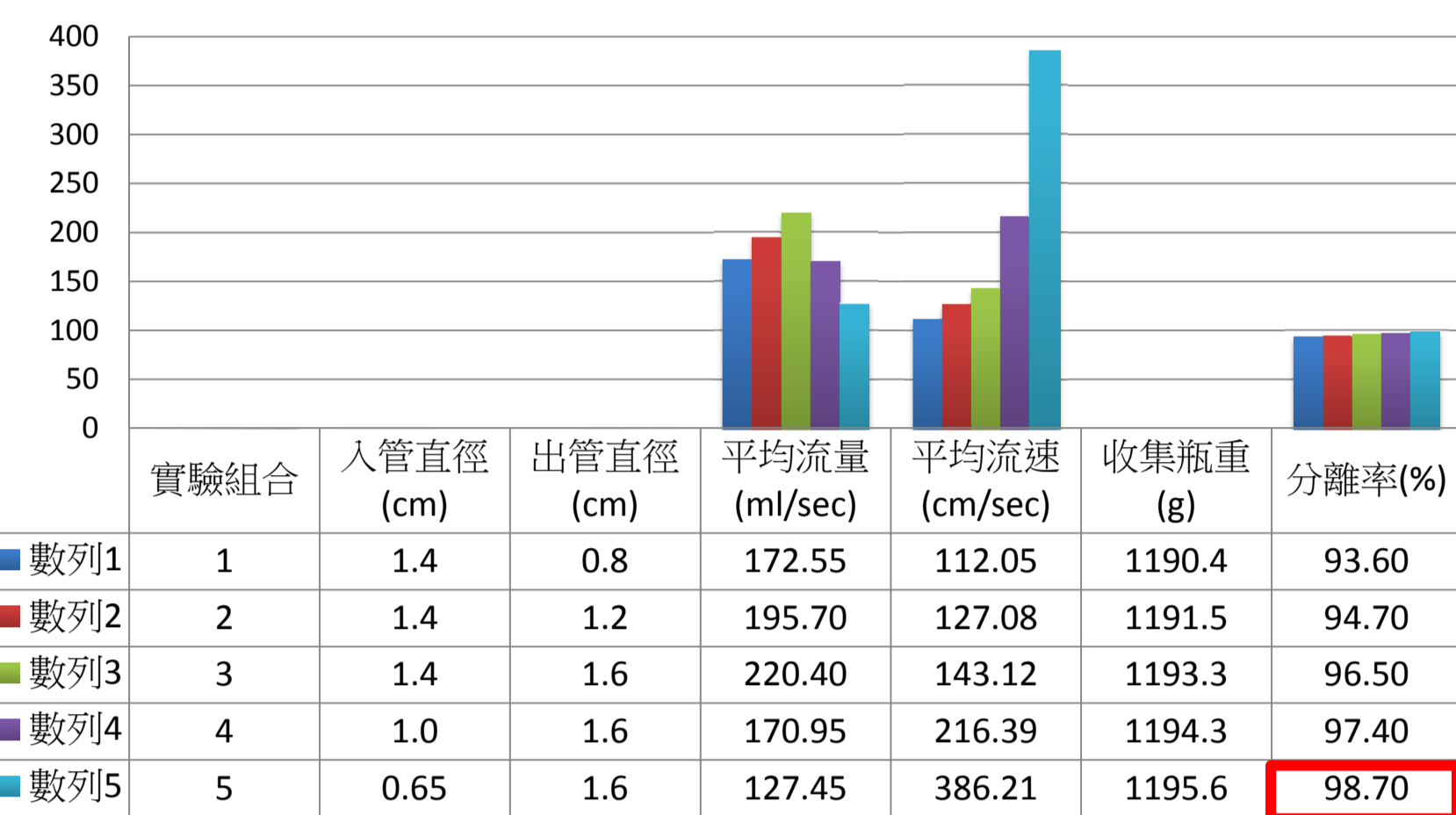
實驗3:探討水庫淤泥粒徑與沖積分布位置的關係

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%

實驗一

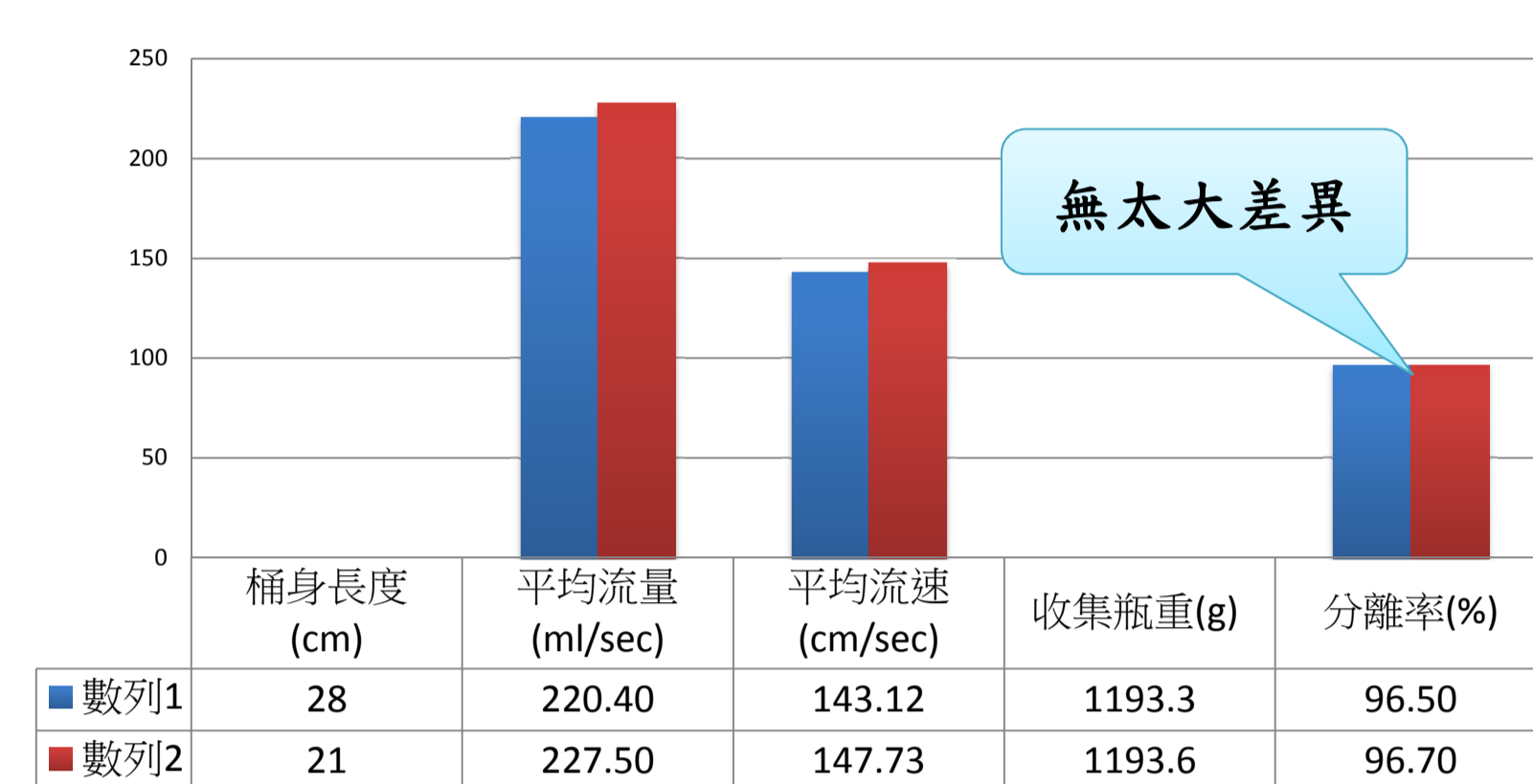
伍、研究結果

實驗1-1: 探討出入管的管徑對分離效果的影響



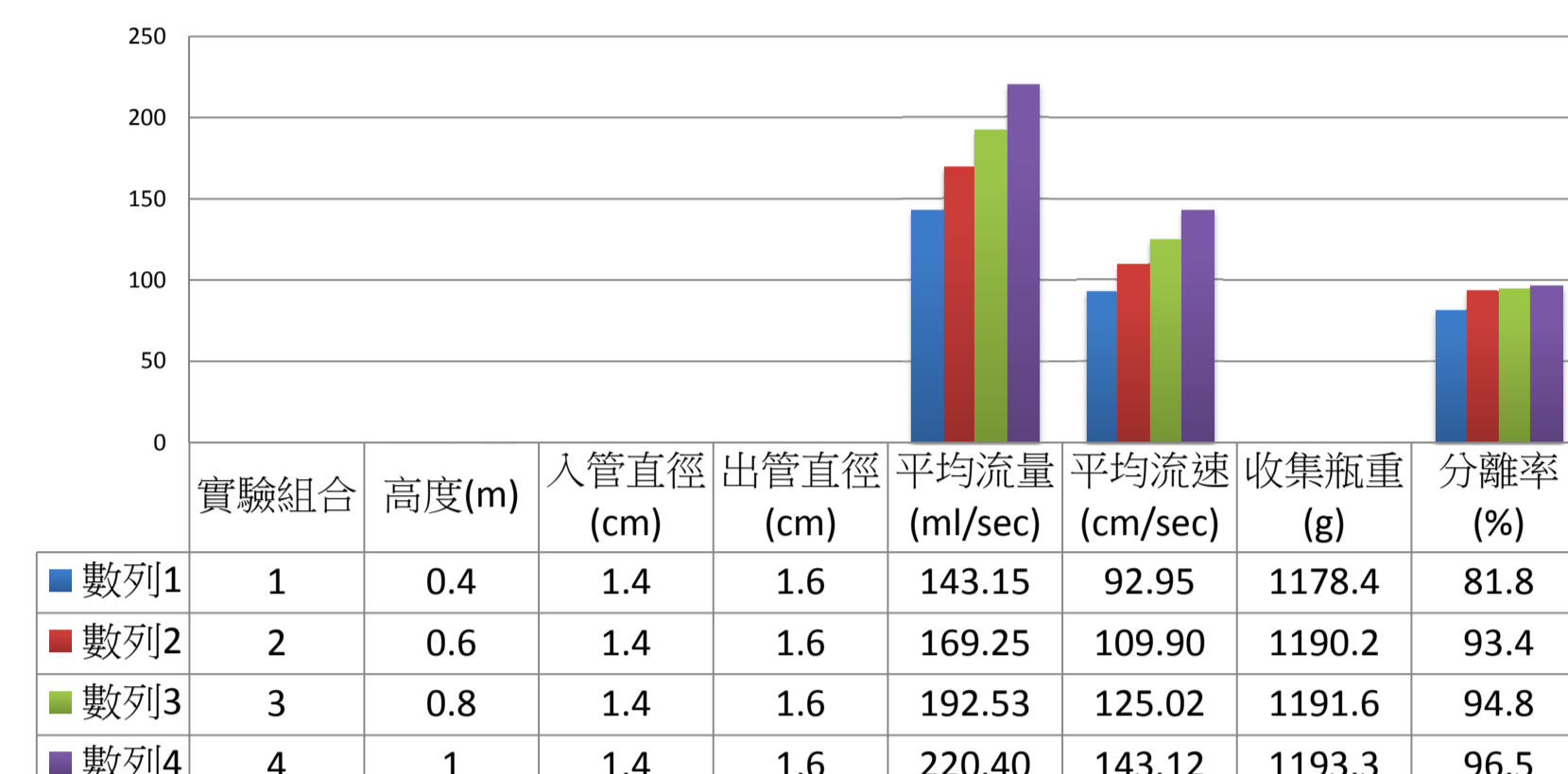
入口管徑縮小時，流速及分離率都隨之提升

實驗1-2: 探討旋流分離裝置的圓筒長度分離效果的影響



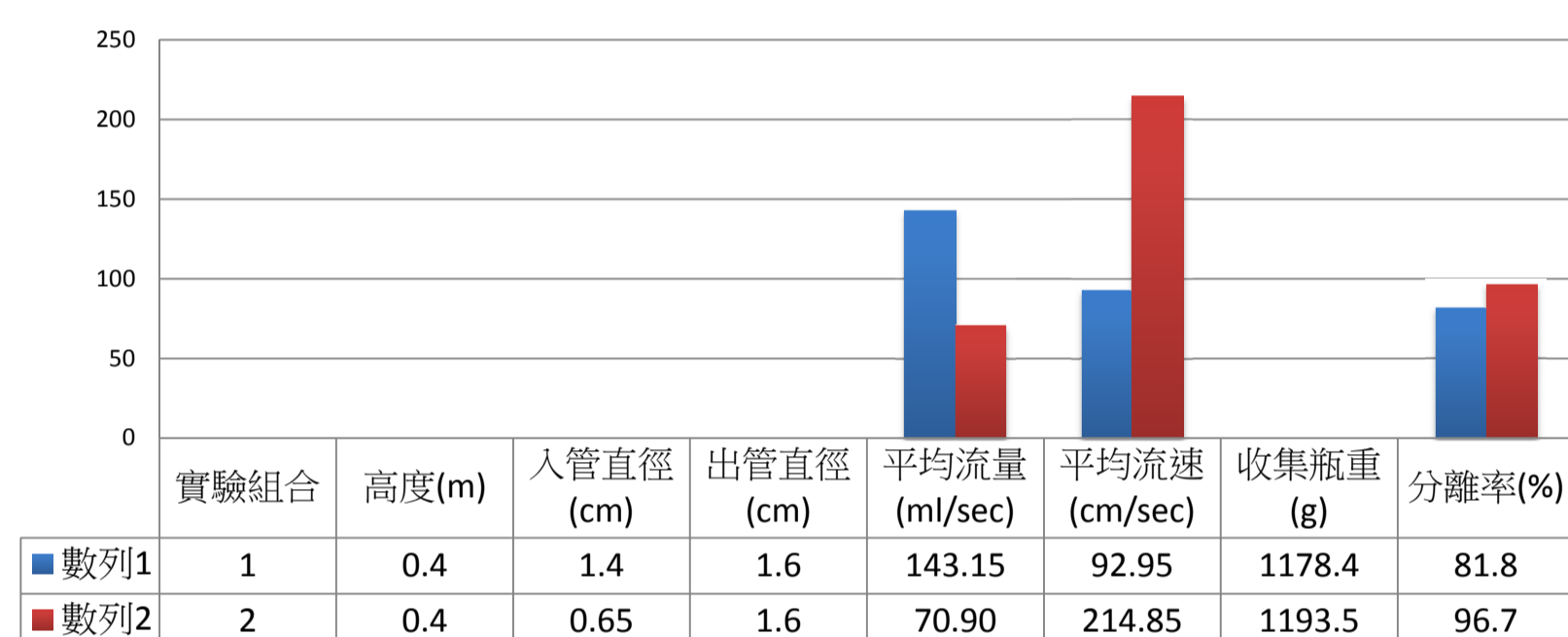
分離器圓筒長度對於細砂分離率影響甚微

實驗1-3: 探討不同高度的流速對分離效果的影響

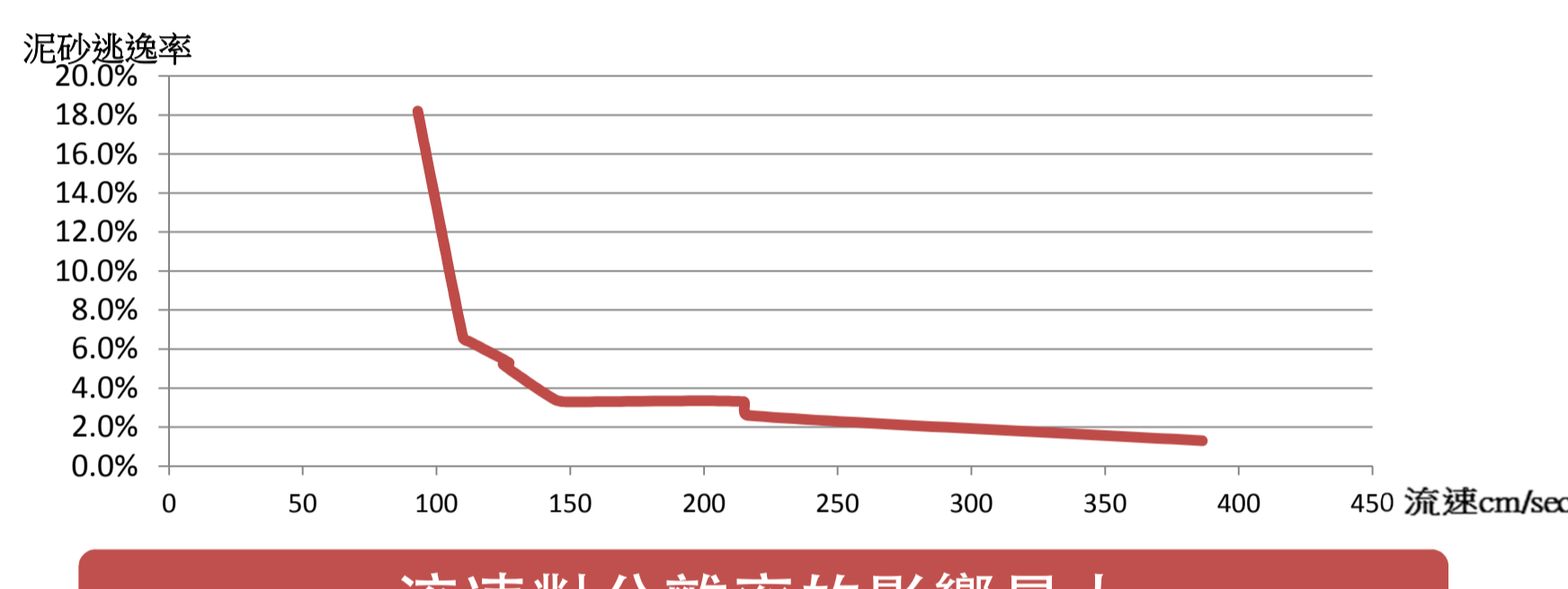


高度愈高 → 位能差愈大 → 流速變快 → 分離效果提高

實驗1-3之延伸實驗: 0.4M高度不同出入管的管徑之分離效果

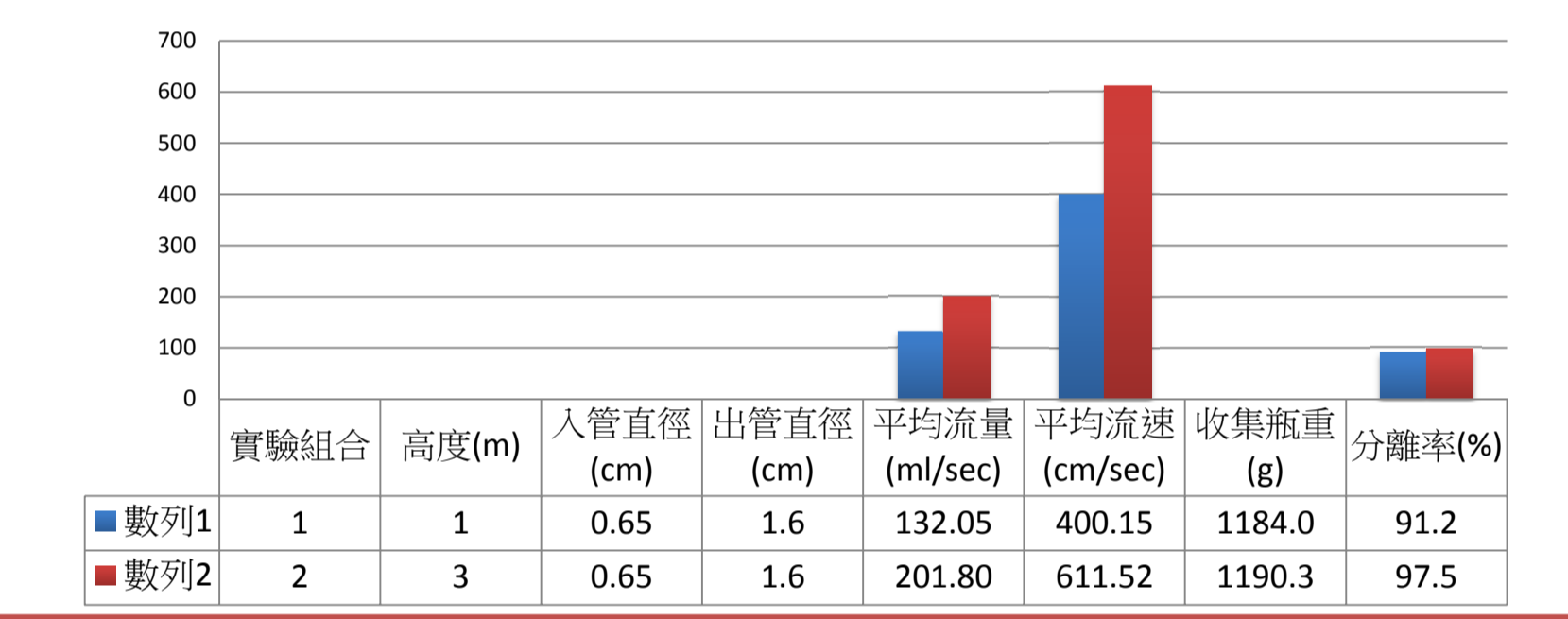


泥砂逃逸率與實驗流速關係圖



流速對分離率的影響最大

實驗1-4: 實際白河水庫淤泥進行分離的效果



提升水位高度2倍，流速增加近0.5倍，分離效果明顯提升6%

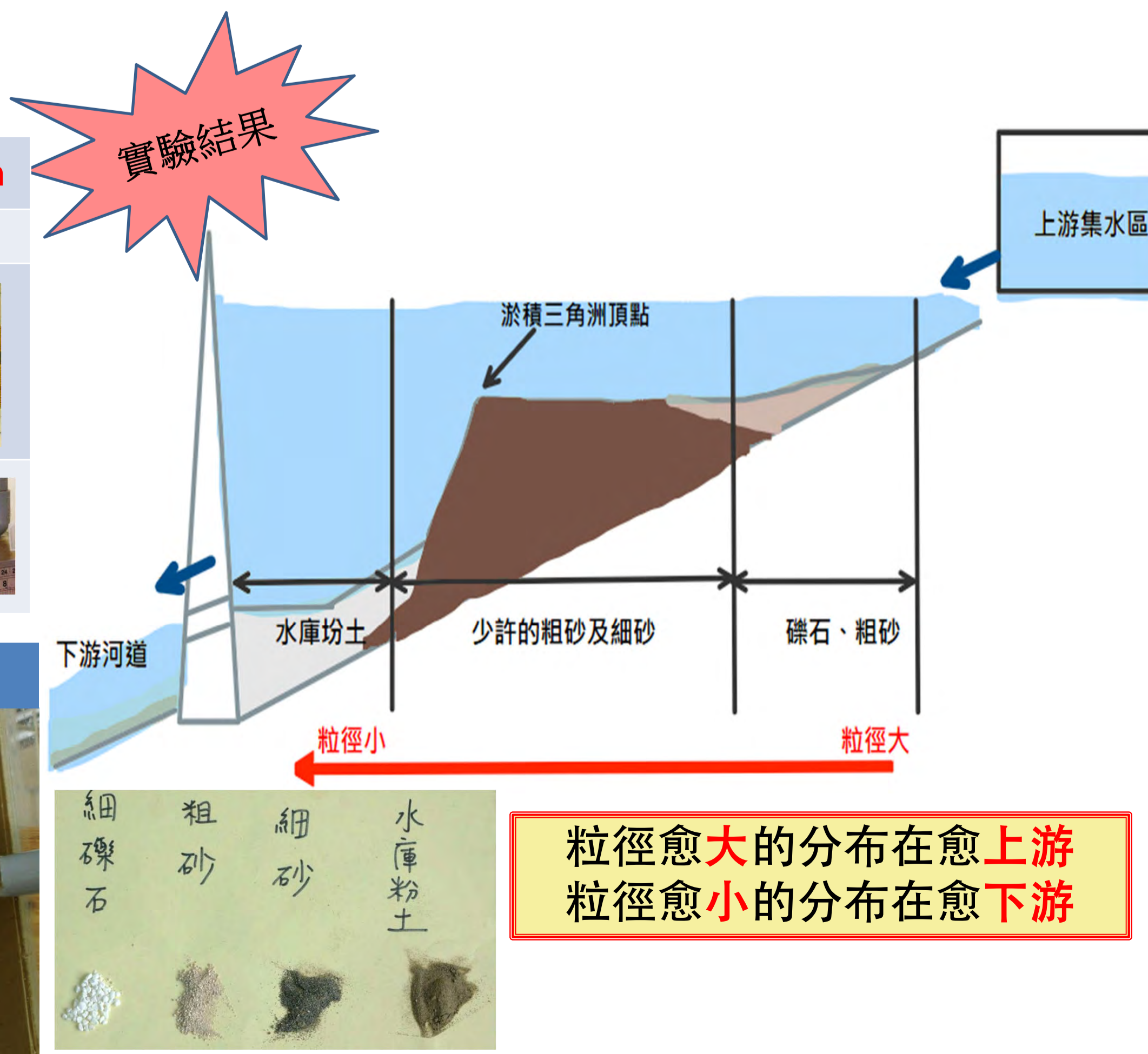
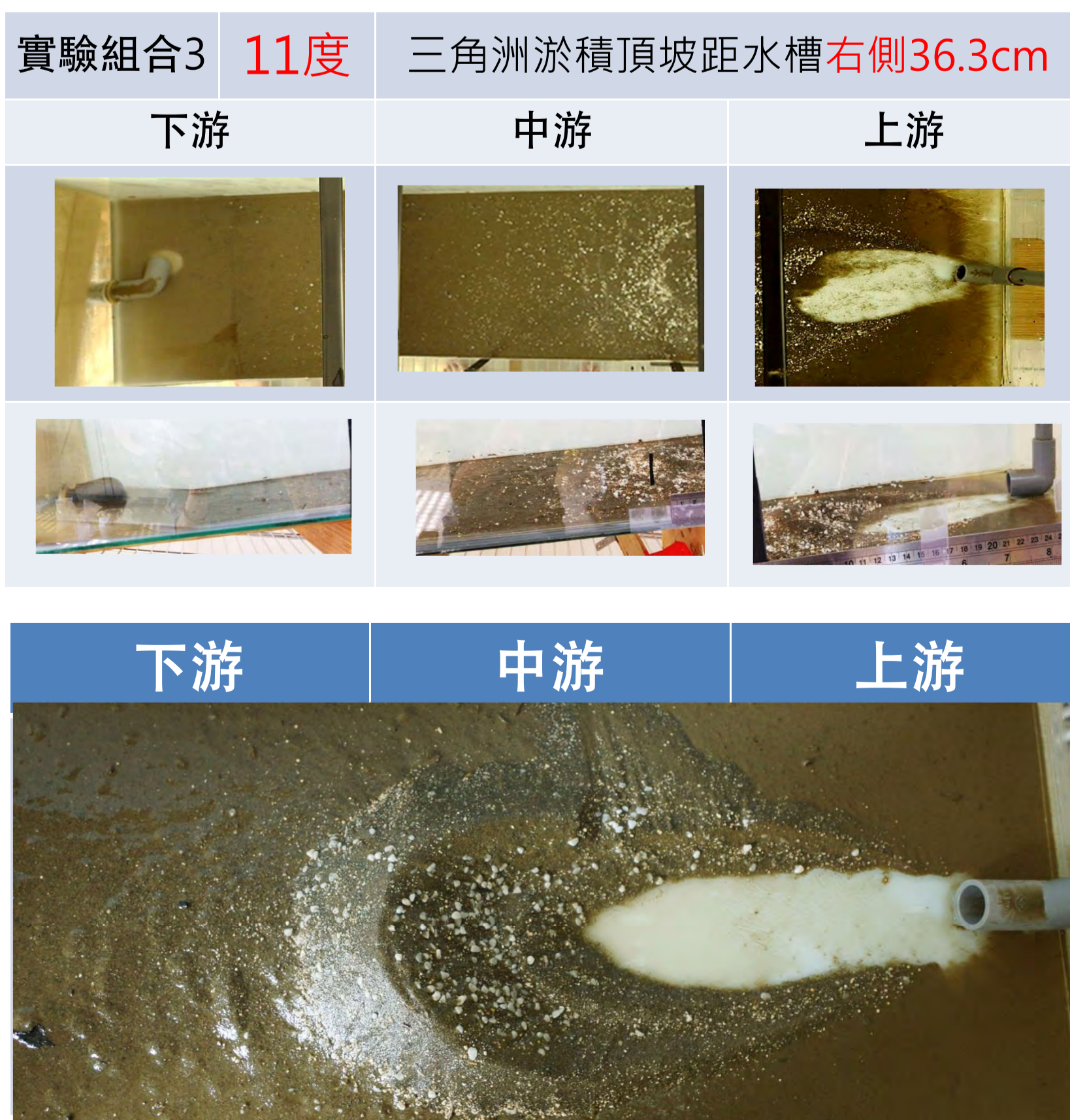
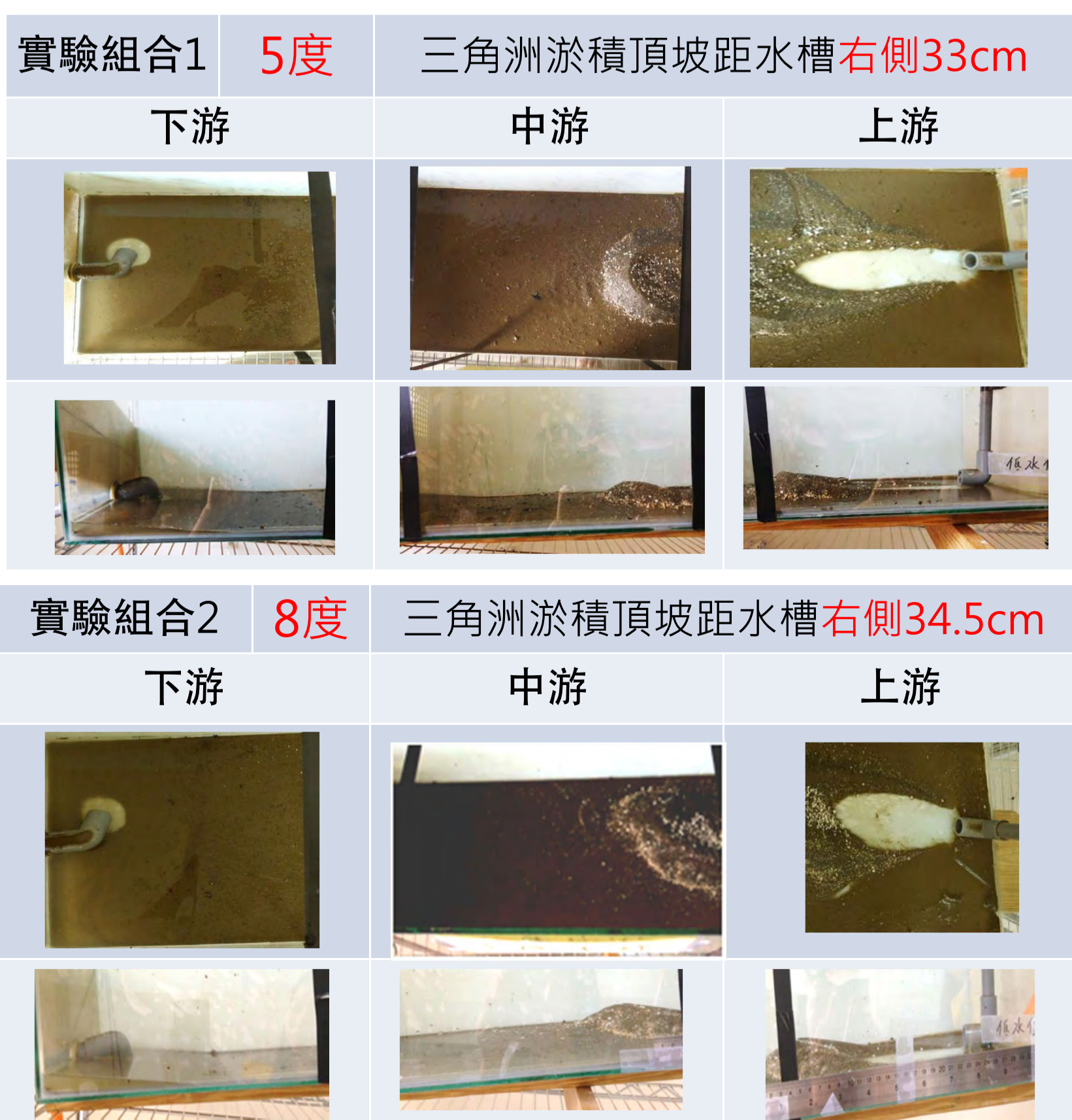
實驗二

實驗2:利用水庫模型分析各清淤工法的效益

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 排砂隧道+固定式虹吸排砂
淤砂深度	5CM	5CM	5CM	5CM
排出水量	25L*2次	5L*8次+10L*1次	5L*8次+10L*1次	排砂隧道25L\固定式虹吸排砂5L*5次
剩餘深度	4.5CM	2.7CM	1CM	3.6 CM
排出砂量	1290.5CM ³	5936.3CM ³	10324CM ³	3613.4CM ³
圖片				
排砂情形				
實驗結果	排砂管固定壩前只能排出下游壩前的砂，上游的砂會被水流冲刷成三角洲淤積，且此種工法僅限於颱風汛期使用。	水庫上、中、下游的砂皆可由虹吸管排出，定點抽砂時雖較耗時但可長時間運作，枯水及滿水期皆能使用，無受天候限制。	因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，但移動虹吸水管需要額外機具設備。	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。

實驗三

實驗3: 探討水庫淤泥粒徑與沖積分布位置的關係

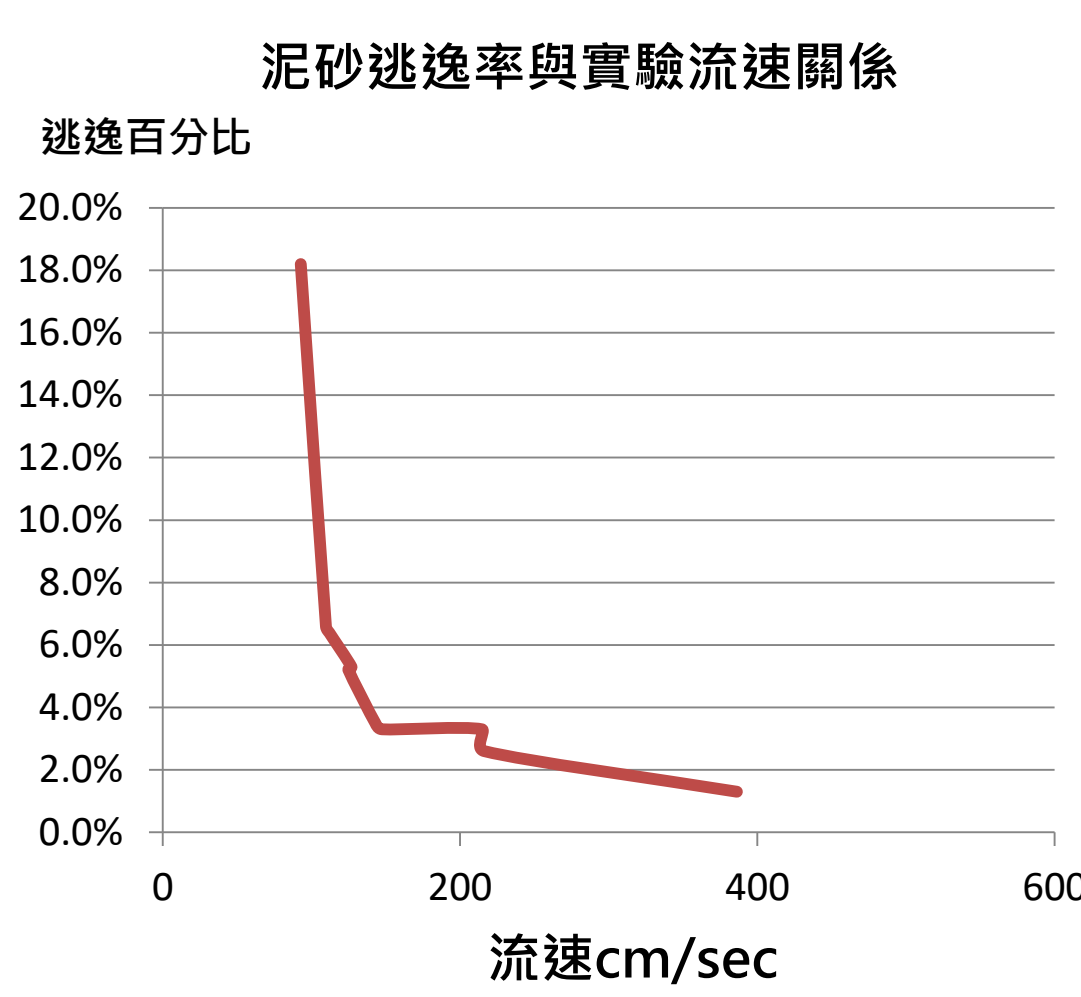
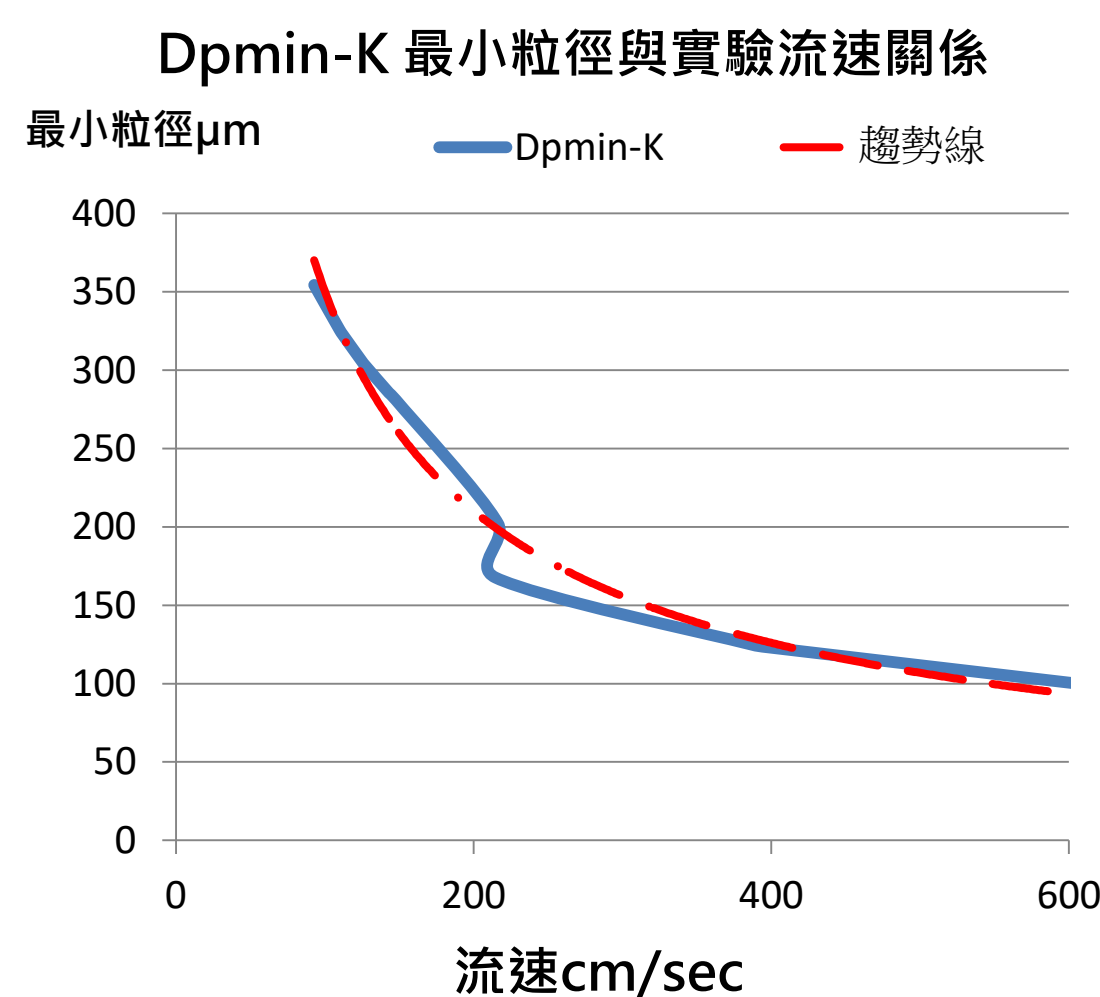


粒徑愈大的分布在愈上游
粒徑愈小的分布在愈下游

陸、研究討論

一、實際分離粒徑大小與理論公式的常數關係

將實驗中全部流速數據與實驗條件，套入Stokes公式計算得出最小粒徑 D_{p-min} ，發現實驗與理論值存有明顯差異，以實驗1-1可分離最小粒徑 $125\mu m$ 的河沙達98.7%分離率為計算標準，得出修正常數(K)為6507，再將公式加入修正常數重新計算各實驗最小粒徑 D_{pmin-K} ，發現其關係曲線圖與河沙逃逸率與實驗流速的關係圖，兩者呈現相似的線性關係，故**證實流速與泥砂分離品質成正比關係**。

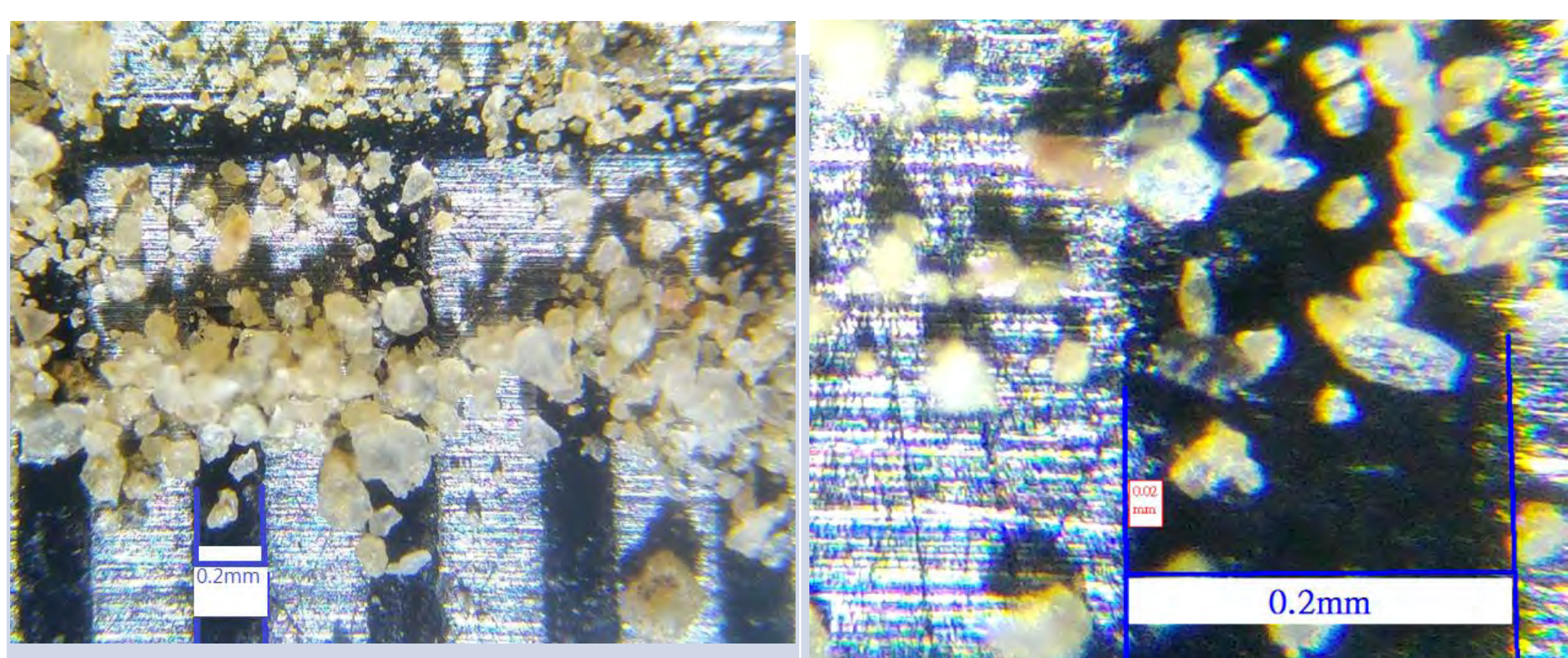


二、分離加入修正常數後最小粒徑與流速關係

將公式加入修正常數(K=6507)計算實驗中 D_{pmin-K} 最小粒徑與實驗粒徑，將流速換算 D_{pmin-K} 粒徑，其中以流速 611.50 cm/sec 分離白河水庫後的逃逸泥砂樣本，經檢查可觀察到其粒徑範圍屬 $16-80\mu m$ 屬於中坩土等級粒徑，與修正常數所得出的計算值相符(小於 $99.3\mu m$)，雖效果無法達到百分之百，但仍可有效分離97.5%的淤泥。

理論公式與實驗樣本可分離最小粒徑與修正常數計算表

流速 (cm/sec)	原理論公式最小粒徑	加入修正常數 D_{pmin-k} 最小粒徑	實驗樣本粒徑範圍	逃逸泥砂粒徑範圍	分離率
386.36	$0.01920945\mu m$	$125\mu m$	河砂 $125-1000\mu m$	$16-110\mu m$	98.7%
400.15	$0.018875559\mu m$	$122.8\mu m$	水庫淤泥 $16-250\mu m$	$16-110\mu m$	91.2%
611.50	$0.01526908\mu m$	$99.3\mu m$	水庫淤泥 $16-250\mu m$	$16-80\mu m$	97.5%



白河水庫淤泥分離前樣本粒徑大小： $16\mu m-250\mu m$

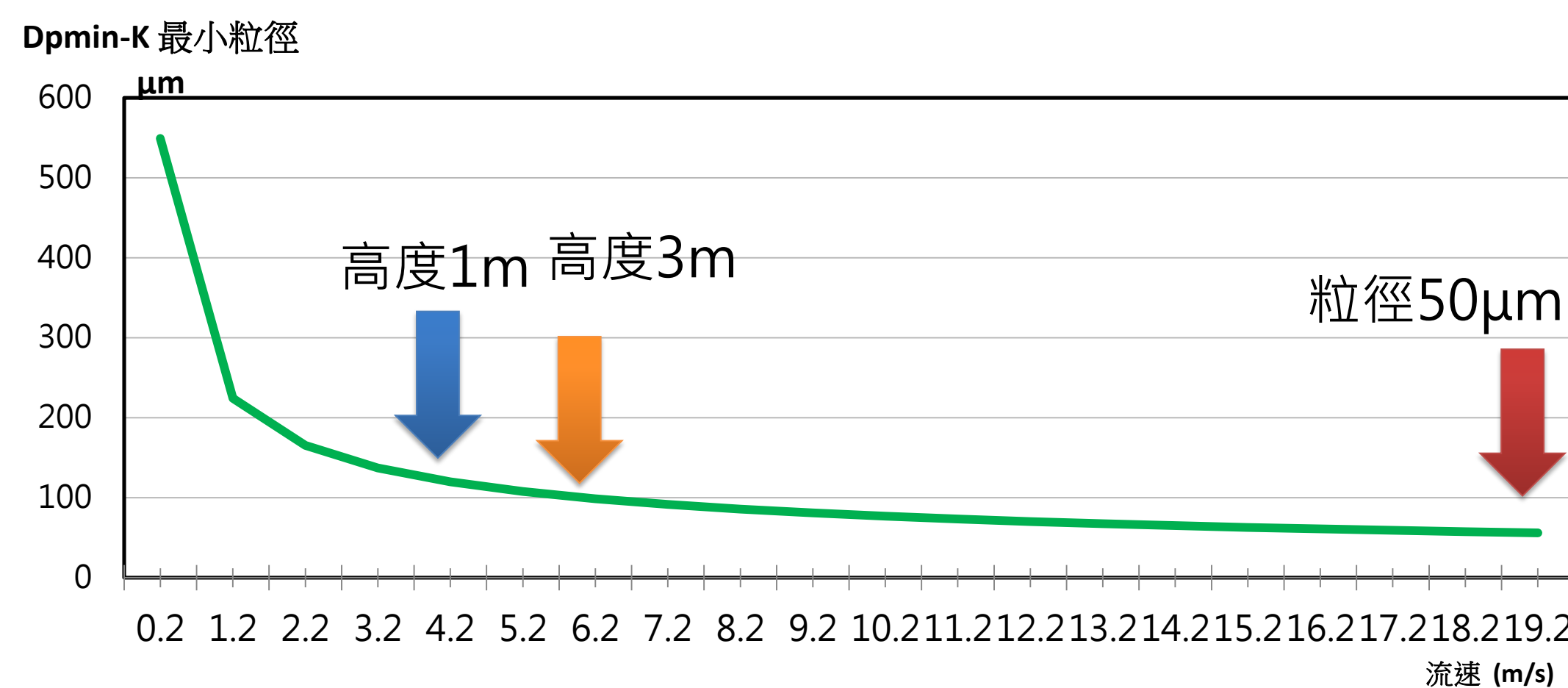
白河水庫淤泥分離後逃逸樣本粒徑大小： $16\mu m-80\mu m$

D_{pmin-K} 最小粒徑與實驗流速關係與泥砂逃逸率比較圖

三、旋流泥砂分離設計與理論公式的關係

在實驗分離白河水庫淤泥實測中，由 D_{pmin-K} 最小粒徑與實驗流速關係圖推判：在流速 6M/sec 以上的條件下，若要降低 D_{pmin-k} 最小粒徑以達更佳分離效果，儘管再提高3倍的流速，最小粒徑亦僅能降至 $50\mu m$ (約降1/2倍)，若要**提高分離效果**，旋流分離設計的建議方向如下：

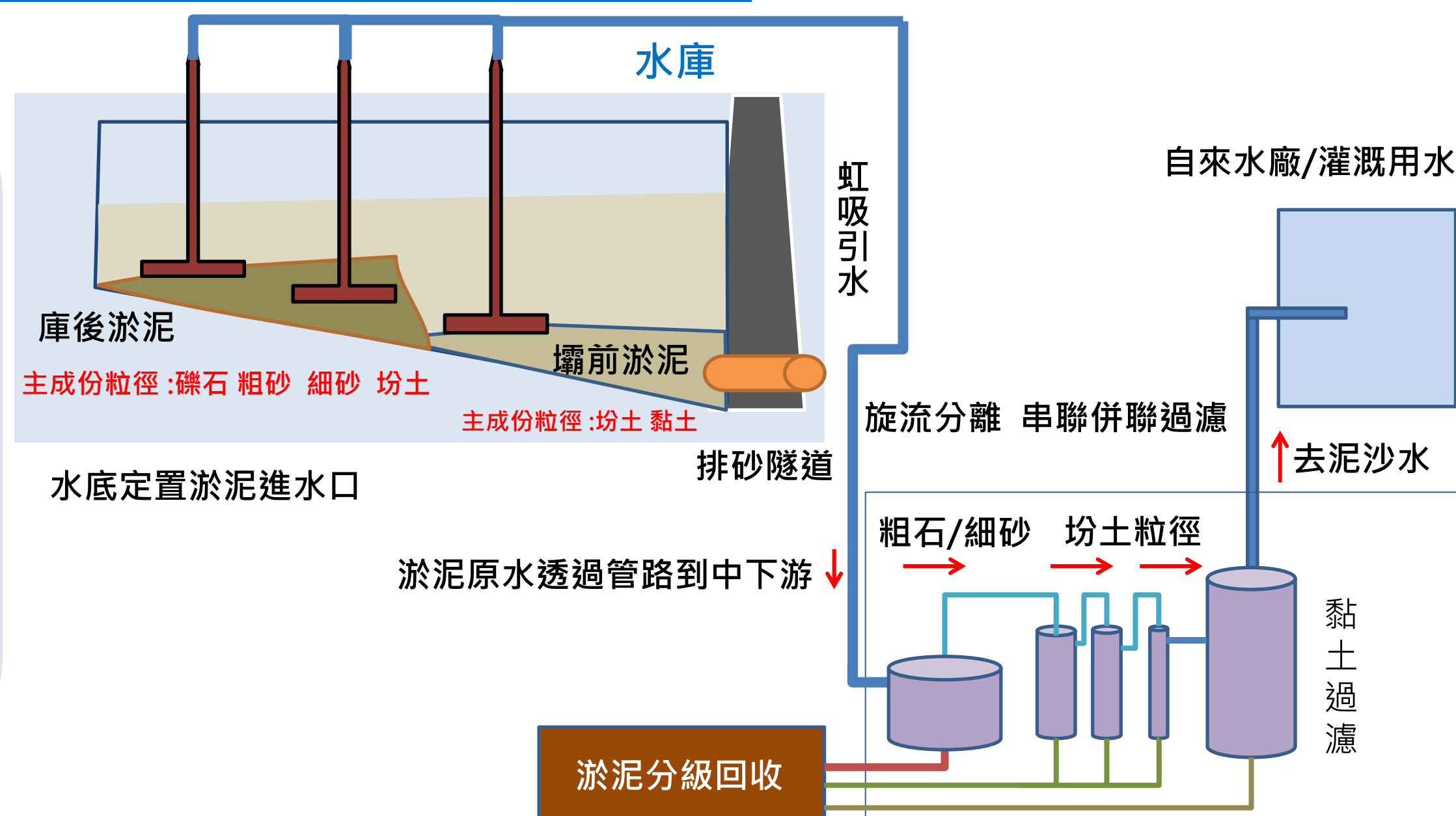
- (一)分離裝置錐形部位做成細長狀，在同一流速下旋轉次數提高可分離更小的最小粒徑。
- (二)建立串聯、併聯不同規格分離桶徑的設計，進而提高水庫淤積中不同粒徑的分離效率與品質。



分離白河水庫淤泥 D_{pmin-K} 最小粒徑與實驗流速關係圖

四、旋流泥砂分離方式運用在水庫清淤工程

由實驗得知越靠近水庫上游三角沖積區粒徑越大，下游淤泥成份粒徑小，結合**固定式虹吸排砂及排砂隧道**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，與旋流分離裝置串聯運用，分離出可用砂石與水資源；當暴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份(礫石、粗砂、細砂、坩土、黏土)。



排砂隧道+固定式虹吸排砂工法混合使用示意圖

柒、結論

1. 實驗變因中發現**流速是影響分離率的關鍵點**。
2. 實驗採用水力旋流可分離白河水庫淤泥的效果達**97.5%**。
3. 以**氣體旋風**可百分之百分離最小粒徑公式算出的**理論值**與改以**水為流體**實驗結果雖有相似線型關係，但**存有差異常數關係**，需再另行探究。
4. 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**可抽取中上游粒徑大於黏土的淤泥，**排砂隧道**排出粒徑較小且較難分離的黏土。
5. 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，**虹吸排砂與排砂隧道**二者搭配使用，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。
6. **虹吸水力排砂工法**搭配**旋流分離**概念的**設計**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低耗能達到**節能減碳**的效果，**水與砂石資源都可回收再利用且可增加水庫蓄水**。



捌、參考資料

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
三、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。取自 www.wrasb.gov.tw/Uploads/pi/曾文水庫防洪防淤策略.pdf
四、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