


行政院環境保護署
107 年度土壤及地下水污染整治基金補助
研究與模場試驗專案

設計底泥水力漩流器分離顆粒並驗證

期末報告（定稿）

主辦單位： 行政院環境保護署
專案執行單位：中臺科技大學／環境與安全衛生工程系
專案主持人：張益國 副教授
專案執行期間：107 年 01 月 10 日起至
107 年 11 月 30 日止

中 華 民 國 107 年 12 月 印製



設計底泥水力漩流器分離顆粒並驗證

期末報告(定稿)

行政院環境保護署

專案基本資料表

專案性質		<input checked="" type="checkbox"/> 實驗性質 <input type="checkbox"/> 非實驗性質		專案類別(單選)		<input checked="" type="checkbox"/> 研究專案 <input type="checkbox"/> 模場試驗	
研究主題		<input type="checkbox"/> 調查 <input checked="" type="checkbox"/> 整治 <input type="checkbox"/> 其他					
申請機構系所		中臺科技大學／環境與安全衛生工程系					
機構地址		40601 台中市北屯區廬子路 666 號					
專案主持人		張 益 國		職等／職稱		副 教 授	
協同主持人		徐 一 量		職等／職稱		副 教 授	
專案名稱	中文	設計底泥水力漩流器分離顆粒並驗證					
	英文	Designed hydrocyclone for sediments separation and the performance validation					
	關鍵字	底泥、水力漩流、分離					
執行期程		自 民 國 1 0 7 年 1 月 1 0 日 起 至 民 國 1 0 7 年 1 1 月 3 0 日 止					
專案主持人		姓名：張益國 E-mail：ykchang@ctust.edu.tw				專線：0422391647 轉 6856 手機：0937365778	
專任助理		姓名： E-mail：				專線： 手機：	
經費分析總表	專 案 預 估 總 經 費		第一年 申請金額		第二年 申請金額		編列說明
	1.	人事費用	386,800				(1~5 項相加之 50%為限)
	2.	貴重儀器使用含維護費	58,000				(與計畫實驗相關)
	3.	消耗性器材與主要費用	395,168				(與計畫主體相關)
	4.	其它研究相關費用	25,832				(差旅與租賃費用)
	5.	雜項費用	35,000				(1~6 項相加之 5%為限)
	6.	行政管理費	69,200				(1~5 項相加之 10%為限)
	專案計畫申請總金額		970,000				總金額：970,000

說明：

1. 本署以部份補助為原則，得指定不補助項目，不補助項目應為自籌款項，應自行核銷不得申請。
2. 非實驗性質之專案，若第一項費用編列金額超出比率，須於申請時向本署專簽說明，俾利審查。
3. 補助專案經費編列自申請起經專案核准後，經費編列中各項費用單價與需求只可減少與下修。

專案主持人： 張益國 (簽名及蓋章) 日期： 107.12.11

研究成果中英文摘要

(一) 中文部分：

在河川或港區底泥疏濬過程中，受污染底泥實屬關注之焦點。近年來有許多處理方法被提出用於處理、再利用河川或港區底泥。而污染物經常附著於底泥細小顆粒(如黏土及矽土)表面上，在此一情形下，應可利用物理分離技術，先將大顆粒物質先予分離，可減容降低待處理污染底泥之體積。本研究搭配三維流場模擬軟體 FLUENT 進行模擬，設計水力漩流分離設備及操作條件，促進粗細顆粒分離，選取適當之粒徑(例如目標粒徑 $63\mu\text{m}$ 設計達 80% 以上分離效率)，驗證實際效能與設計值差異。

經 FLUENT 模擬，水力漩流器最適設計條件為：管徑 156mm；入口直徑 75mm、底部出口直徑 33mm；入口進流速度 4m/s。於此條件下，模擬出 $63\mu\text{m}$ 顆粒可達 82.1% 分離效率。再經實驗驗證，台中灌溉渠道底泥小於 $63\mu\text{m}$ 顆粒分離效率為 78.0%，略低於設計分離效率；高雄港浚泥小於 $63\mu\text{m}$ 顆粒分離效率為 82.3%，接近設計分離效率。整體而言，本研究設計底泥水力漩流器可有效分離粗細顆粒，達分級效果。

關鍵詞：底泥、水力漩流、分離

(二) Abstract :

Contaminated sediments in the river or harbor remain being significant issues during dredging operations. Numerous methods have been suggested in recent years for remove, treating and beneficial uses of river/harbor sediments. In this research, the basic characteristics and the geochemistry of the sediments were studied. The content of heavy metals contaminants might be primarily governed by the grain size. The optimum separation process was approached through hydrocyclone separation, which is designed to separate coarse and fine-grained particles by high settling velocity of particles. Furthermore, the FLUENT flow simulations are helping to calculate the cut-off size and fractional efficiencies in hydrocyclone separators. The designed hydrocyclone performance validations are achieved by comparing the results from experiments with simulating results predicted by the FLUENT. The validation was set on target particle (63 μm fine particle) could reached separation efficiency better than 80%.

Results from the FLUENT simulation showed that the optimum designed hydrocyclone parameters were nominal diameter of hydrocyclone of 156mm, inlet pipe diameter of 75mm, splitoff diameter of 33mm, inlet velocity 4m/s. Under upon conditions, a separation rate 82.1% for 63 μm particle (fine particle) was calculated by FLUENT. Furthermore, hydrocyclone separation experiments were conducted, and the results showed that the 63 μm particle separation efficiency were 78.0% for Taichung irrigation canal sediments, and 82.3% for Kaohsiung harbor sediments. It is concluded that comparing FLUENT simulation and experimental data, the designed hydrocyclone were effective in fine particles capture (63 μm) for sediments. The coarse and fine-grained particles could be separated well by hydrocyclone operation.

Keywords: Sediment, Hydrocyclone, Separation

目錄

專案基本資料表

研究成果中英文摘要

第一章 前言	1
第二章 研究目的	3
2-1 河川底泥顆粒分離	3
2-2 分離可再利用之乾淨港池浚泥	6
第三章 文獻探討	7
3-1 河川底泥	7
3-1-1 重金屬污染種類及特性	7
3-1-2 重金屬污染底泥途徑	8
3-2 港池浚泥	11
3-2-1 港池浚泥特性	11
3-2-2 高雄港及碼頭現況概述	13
3-2-3 高雄港浚泥重金屬濃度分布	14
3-3 分離減積技術	17
3-3-1 分離技術介紹	17
3-3-3 水力漩流器設計影響因子說明	20
3-4 FLUENT 流況模擬	24
第四章 研究方法與過程	27
4-1 研究流程	27
4-2 實驗方法與步驟進行	28
4-2-1 底泥/浚泥採樣	28
4-2-2 設計水力漩流分離器	31
4-3 分析比較現行既有技術能力、專利、產品市場需求及競爭力評估	34
4-4 執行成果貢獻及成果效益	35
4-5 工作進度甘特圖	36
第五章 結果與討論	37
5-1 採樣	37
5-2 基本特性分析	39
5-2-1 pH 值	39
5-2-2 物理/化學特性	39
5-3 水力漩流分離粗細顆粒物質	43
5-3-1 流況模擬	43
5-3-2 水力漩流分離試驗模擬結果	45

5-3-3 水力漩流器分離試驗驗證	62
5-3-4 小結	72
5-4 結論與建議	75
5-4-1 結論	75
5-4-2 建議	76
參考文獻	77
107 年度專案成果績效自評表	82

附件一 計畫書審查意見回覆對照表

附件二 期中報告審查意見回覆對照表

附件三 期末報告審查意見回覆對照表

附件四 研討會發表佐證

圖次

圖 3-1 德國漢堡港及艾比河浚泥中 Zn、Cd 及有機物於各粒徑之分布百分比	12
圖 3-2 高雄港示意圖	13
圖 3-3 KH17-KH20 樣本粒徑分布曲線圖	14
圖 3-4 ARCADIS 公司採行之土壤清洗技術操作流程圖	18
圖 3-5 水力漩流分離器 (Hydrocyclone) 示意圖	19
圖 3-6 水力漩流分離器之結構與流場	21
圖 3-7 水力漩流分離器(a)流場模擬模型及(b)流場路徑圖	24
圖 4-1 研究流程圖	27
圖 4-2 水力漩流分離器之網格建構	32
圖 4-3 模擬流場內壓力	32
圖 5-1 台中農田灌溉渠道底泥	37
圖 5-2 彰化農田灌溉渠道底泥	37
圖 5-3 高雄港航道浚泥及碼頭浚泥	38
圖 5-4 建構模型	43
圖 5-5 建立網格	43
圖 5-6 模擬顆粒運動	44
圖 5-7 水力漩流模擬流速 1m/s，63 μm 顆粒於(a)原樣進流(b)細顆粒出流(c)粗顆粒出流顆粒分佈情況	45
圖 5-8 水力漩流模擬流速 1m/s，100 μm 顆粒於(a)原樣進流(b)細顆粒出流(c)粗顆粒出流顆粒分佈情況	46
圖 5-9 水力漩流模擬流速 1m/s，200 μm 顆粒於(a)原樣進流(b)細顆粒出流(c)粗顆粒出流顆粒分佈情況	47
圖 5-10 水力漩流模擬流速 1m/s，300 μm 顆粒於(a)原樣進流(b)細顆粒出流(c)粗顆粒出流顆粒分佈情況	48
圖 5-11 水力漩流模擬流速 2m/s，63 μm 顆粒於(a)原樣進流(b)細顆粒出流(c)粗顆粒出流顆粒分佈情況	49
圖 5-12 水力漩流模擬流速 2m/s，100 μm 顆粒於(a)原樣進流(b)細顆粒出流(c)粗顆粒出流顆粒分佈情況	50
圖 5-13 水力漩流模擬流速 3m/s，200 μm 顆粒於(a)原樣進流(b)細顆粒出流(c)粗顆粒出流顆粒分佈情況	51
圖 5-14 水力漩流模擬流速 3m/s，300 μm 顆粒於(a)原樣進流(b)細顆粒出流(c)粗顆粒出流顆粒分佈情況	52

圖 5-15 水力漩流模擬流速 3m/s，63 μm 顆粒於(a)原樣進流(b)細顆粒出流(c)粗顆粒出流顆粒分佈情況	53
圖 5-16 水力漩流模擬流速 3m/s，100 μm 顆粒於(a)原樣進流(b)細顆粒出流(c)粗顆粒出流顆粒分佈情況	54
圖 5-17 水力漩流模擬流速 3m/s，200 μm 顆粒於(a)原樣進流(b)細顆粒出流(c)粗顆粒出流顆粒分佈情況	55
圖 5-18 水力漩流模擬流速 3m/s，300 μm 顆粒於(a)原樣進流(b)細顆粒出流(c)粗顆粒出流顆粒分佈情況	56
圖 5-19 水力漩流模擬流速 4m/s，63 μm 顆粒於(a)原樣進流(b)細顆粒出流(c)粗顆粒出流顆粒分佈情況	57
圖 5-20 水力漩流模擬流速 4m/s，100 μm 顆粒於(a)原樣進流(b)細顆粒出流(c)粗顆粒出流顆粒分佈情況	58
圖 5-21 水力漩流模擬流速 4m/s，200 μm 顆粒於(a)原樣進流(b)細顆粒出流(c)粗顆粒出流顆粒分佈情況	59
圖 5-22 水力漩流模擬流速 4m/s，300 μm 顆粒於(a)原樣進流(b)細顆粒出流(c)粗顆粒出流顆粒分佈情況	60
圖 5-23 最佳模擬條件下水力漩流器圖	61
圖 5-24 台中灌溉渠道底泥於入口速度 4m/s 條件下分離之(a)原樣(b)underflow(c)overflow 雷射粒徑分析	62
圖 5-25 最佳模擬條件下，台中灌溉渠道底泥中不同粒徑顆粒分離效率模擬值與實際值	63
圖 5-26 彰化灌溉渠道底泥於入口速度 4m/s 條件下分離之(a)原樣(b)underflow(c)overflow 雷射粒徑分析	65
圖 5-27 高雄港航道浚泥於入口速度 4m/s 條件下分離之(a)原樣(b)underflow(c)overflow 雷射粒徑分析	68
圖 5-28 高雄港碼頭浚泥於入口速度 4m/s 條件下分離之(a)原樣(b)underflow(c)overflow 雷射粒徑分析	69
圖 5-29 高雄港浚泥於入口速度 4m/s 條件下分離之(a)原樣(b)underflow(c)overflow 雷射粒徑分析	70
圖 5-30 最佳模擬條下，高雄港浚泥中不同粒徑顆粒分離效率模擬值與實際值	71

表次

表 2-1 農地污染場址公告情形（面積單位：平方公尺）	4
表 2-2 台灣地區土壤重金屬污染來源	5
表 3-1 西班牙沉積物品質規範	11
表 3-2 德國漢堡港及艾比河浚泥中重金屬含量	12
表 3-3 高雄港粒徑分析與有機碳含量結果	15
表 3-4 高雄港底泥污染濃度與品質指標比較	16
表 5-1 河川底泥/港池浚泥樣本 pH 值	39
表 5-2 河川底泥/港池浚泥樣本粒徑、含水率、TCLP 及總量分析結果	40
表 5-3 河川底泥/港池浚泥樣本經 X 光螢光分析(XRF)結果	41
表 5-4 最佳模擬條件下，不同粒徑顆粒分離效能	61
表 5-5 台中灌溉渠道底泥入口速度 4m/s 條件下分離之(a)原樣 (b)underflow(c)overflow 之 XRF 分析	64
表 5-6 彰化灌溉渠道底泥入口速度 4m/s 條件下分離之(a)原樣 (b)underflow(c)overflow 之 XRF 分析	67

第一章 前言

灌溉水藉由河川、渠道配水至各灌區農田的過程中，污染物亦藉由各種物理、化學與生物作用累積於河川、渠道底部形成沈積物（底泥），若遇驟雨水量激增時，河川、渠道底部之沈積物亦受到擾動而隨著水流進入農田中，以致農田土壤遭污染。為了解西部農地重金屬污染嚴重性，環保署曾針對桃園、新竹、台中及彰化四縣市進行農地河川灌溉水重金屬檢測，高達 41.3%底泥污染嚴重、13.2%灌溉水質超出標準，另外 18.8%農地土壤超出標準。隨後再根據底泥污染水渠流經區域，進一步進行「高污染潛勢監視點」（重金屬污染高風險地區）面積估計，桃園蘆竹鄉有 78 公頃、台中大里有 97 公頃、彰化包括和美及花壇共 472 公頃，合計 647 公頃，其中 13 公頃為風險最高地區。環保署耗費上億經費整治彰化縣兩百多公頃鎘污染農地，但灌溉系統沿線部份五金與電鍍工廠，依然經常偷排有毒廢水，和美與花壇共計有兩百多公頃農地，因長期引用遭電鍍、五金廢水污染的水資源進行灌溉，引發遭受鎘鎳等重金屬污染事件，因此整治農地只能治標，應該同時進行治本的灌排系統分離及河川底泥、農地土壤進行整治。

另外，隨著經濟的迅速發展及工業的密集發展，重金屬污染物在進入自然環境水體後，最終將藉由河川流動運行進入海洋，造成附近海域及港灣沉積物的重金屬富集，亦導致河川流速緩慢區段、港口區域經常成為重金屬在環境移動中之最終目的地，因此在人口密集地方之港灣、河口、沿岸地區經常可發現其沉積物中出現較高含量之重金屬。商港普遍受沿岸漂沙或河川溪流、區域排水道排入的影響，造成港池淤積，為確保航道的安全需要不定期疏濬淤積泥沙，而目前針對濬渫之底泥係主要採養灘或海洋棄置等處理方式，至於其棄置底泥之品質要求，主要以毒性特性溶出程序（TCLP）進行驗證。上述含重金屬之港灣沉積物，若經研究分析判定未超過有害認定標準而屬無害特性，可進行海洋棄置或陸上最終處置。惟目前經研究發現，部分河川底泥及港灣浚泥有時會超過「底泥品質指標之分類管理及用途限制辦法」。港灣浚泥雖非屬應定期檢測底泥品質狀況之水體目的事業主管機關，但若超過上述品質指標，於土地利用上可能面臨較嚴苛挑戰。為降低港池浚泥污染及減少海洋棄置數量，如何進行顆粒分離，俾利部分港灣浚泥再利用，亦將是本研究重點。

然而大部分有機/無機污染物常附著於細小顆粒(如黏土及矽土)表面上，在此一情形下，則可利用物理分離技術，先將大顆粒物質先予分離，可大大降低待處理污染沉積物之體積。本研究遂設計底泥水力漩流器(Hydrocyclone)分離粗細顆粒，期能分離未受重金屬污染之河川底泥，減少處理容積(減容)；以及分離可再利用之較乾淨港池浚泥，促進綠色港口發展。搭配三維流場模擬軟體 FLUENT 進行模擬，設計分離設備及操作條件，並驗證實際效能，期促進粗細顆粒分離(污染物濃淡分級)與利用。

第二章 研究目的

2-1 河川底泥顆粒分離

重金屬在進入自然環境水體後，常藉由河川流動運行，河川流速緩慢區段經常成為重金屬在環境移動中之最終目的地。而土壤經常為水體之最終承受體，因此農田灌溉用水中所含之污染物質必將進入土壤中累積，在這些污染物質中當以重金屬之累積含量為最高，影響農田土壤與作物品質。此外，灌溉水由河川、渠道配水至各灌區農田的過程中，污染物亦藉由各種物理、化學與生物作用累積於河川、渠道底部形成沈積物（底泥），若遇驟雨水量激增時，河川、渠道底部之沈積物亦受到擾動而隨著水流進入農田中，以致農田土壤遭污染。

依行政院環境署統計(行政院環境署,2016)，各縣市累計至105年3月31日止已完成2,940筆(面積約557公頃)農地污染改善工作，並依法解除公告列管；而目前公告列管的農地污染控制場址為2,639筆(約375公頃)，農地污染場址公告情形如下表2-1所示。

政府耗費上億經費整治彰化縣兩百多公頃鎘污染農地，但灌溉系統沿線部份五金與電鍍工廠，依然經常偷排有毒廢水，以彰化縣為例，和美與花壇共計有兩百多公頃農地，因長期引用遭電鍍、五金廢水污染的水資源進行灌溉，引發遭受鎘鎳等重金屬污染事件。另依中華民國環境工程學會(2008)所提，根據不同污染源及污染型態，臺灣地區最主要且最受關注的污染場址可概分為四大類，分別是農地重金屬污染、加油站及大型儲油槽污染、不明廢棄物非法棄置場址污染、工業工廠污染。其中，農地重金屬污染主因近年來工商業發達，其相關產業產生之廢棄物或廢水，或石化業及廢五金燃燒產生之排煙及落塵等問題，均可能造成土壤不同程度的重金屬污染，其可能污染土壤的重金屬主要有砷、鎘、鉻、汞、鎳、鉛、鋅及銅等八種。重金屬污染土壤後土壤中之細菌、真菌及放射菌等菌數下降，而有機氮之礦化、硝化、根瘤菌之固氮作用等亦隨之降低，因而導致農作物減量。作物對重金屬之需求不一，有些重金屬成分為植物所需，然量多時將引起毒害，且土壤中過多的重金屬將被作物吸收累積於植物體內，而含重金屬之作物經由食物鏈將影響人類食用之安全。國內外農作物遭重金屬污染事件層出不窮，主要為鎘、汞污染造成糙米中鎘、汞含量超過公告限值，而2001年於潮州崙頂段附近亦發生土壤含銅量偏高事件，顯示台灣地區農地重金屬污染已威脅到民眾之健康。

表 2-1 農地污染場址公告情形（面積單位：平方公尺）

縣市	公告列管中(改善中)		已解除列管(已完成改善)		總計	
	筆數	面積	筆數	面積	筆數	面積
基隆市	0	0	0	0	0	0
臺北市	0	0	22	48,852	22	48,852
新北市	0	0	13	37,235	13	37,235
桃園市	1,118	1,286,935	770	1,209,072	1,888	2,496,007
新竹縣	0	0	0	0	0	0
新竹市	0	0	200	359,264	200	359,264
苗栗縣	12	15,079	23	25,261	35	40,340
臺中市	132	130,112	589	731,934	721	862,046
彰化縣	1,325	2,254,958	1,160	2,750,996	2,485	5,005,954
南投縣	4	2,747	7	1,299	11	4,046
雲林縣	2	4,329	22	53,095	24	57,424
嘉義縣	0	0	2	4,741	2	4,741
嘉義市	9	21,984	10	24,052	19	46,036
臺南市	36	31,803	67	160,135	103	191,938
高雄市	0	0	49	84,948	49	84,948
屏東縣	0	0	2	73,916	2	73,916
臺東縣	0	0	0	0	0	0
花蓮縣	0	0	0	0	0	0
宜蘭縣	1	3,157	4	8,641	5	11,798
澎湖縣	0	0	0	0	0	0
金門縣	0	0	0	0	0	0
連江縣	0	0	0	0	0	0
總計	2,639	3,751,104	2,940	5,573,441	5,579	9,324,545

(摘自行政院環境署，2016)

台灣地區土壤中重金屬之主要污染來源大都來自工業、農業活動，少部分是由礦業及交通業所引起。故將台灣地區重金屬污染來源整理成表 2-2，而工業、農業上被大量使用之銅、鉻、鎘、鉛、鋅、鎳等重金屬則更應加以重視，其主要使用途徑分別敘述如下：

表 2-2 台灣地區土壤重金屬污染來源

重金屬種類	污染來源	說明
Cu	工業、農業	電線、電子、印刷電路板與金屬電鍍工業、殺蟲劑（硫酸銅、鹼性碳酸銅等無機化合物）
Cr	工業	金屬鍍鉻、顏料、染料、油漆、墨水、媒染劑、玻璃及皮革
Cd	工業、農業	電鍍材料、油漆材料、電池、汽油及輪胎、磷肥中含有鎘
Pb	工礦業、交通	開採及冶煉過程中產生、汽車燃燒排放含鉛廢氣
Zn	電鍍、印刷	鍍鋅管、油墨、油漆及影印紙等皆使用到鋅
Ni	工業	製造鋼鐵與合金，塗料、色素、化妝品及電池

資料來源：羅良慧(1997)

世界上大部分的工業國家，包括台灣地區，有許多農地及河川下游土地都受到嚴重的重金屬污染，目前已知大約有四十種元素左右。在英國本土已發現有二十萬處受重金屬污染的場址，而美國政府更估計需要花費七十一億美金，才可能清除國內所有受重金屬污染的土地。

為妥善解決受重金屬污染底泥，可用之做法為整批挖除清運，其後予以固化/穩定化處理。雖可有效解決受污染底泥問題，但是處理量龐大，經費、時間、人力均是消耗。為此，本研究即著眼於減容減量，期望藉由水力漩流系統分離粗細顆粒，將未受重金屬污染之粗顆粒底泥予以分離，減少處理容積。

2-2 分離可再利用之乾淨港池浚泥

台灣四面環海，擁有許多商港及漁港，船隻作業頻繁，由於過去相關法規管制不夠嚴格，常見泊船港池受到油污染，而許多工業活動也造成港域各式重金屬的污染。如高雄港過去拆船業及鄰近之工業區廢水注入造成底泥中累積高濃度的重金屬等污染，這些污染物會隨著船隻活動或疏濬行為等而再釋出進到水體環境中(行政院環境保護署，2014)。商港普遍受沿岸漂沙或河川溪流、區域排水道排入的影響，造成港池淤積，為確保航道的安全需要不定期疏濬淤積泥沙，而目前針對濬淤之底泥係主要採養灘或海洋棄置等處理方式，至於其棄置底泥之品質要求，主要以毒性特性溶出程序(TCLP)進行驗證。上述含重金屬之港灣沉積物，若經研究分析判定未超過有害認定標準而屬無害特性，可進行海洋棄置或陸上最終處置。惟目前經研究發現，部分河川底泥及港灣浚泥有時會超過「底泥品質指標之分類管理及用途限制辦法」。港灣浚泥雖非屬應定期檢測底泥品質狀況之水體目的事業主管機關，但若超過上述品質指標，於土地利用上可能面臨較嚴苛挑戰。

為降低港池浚泥污染及減少海洋棄置數量，如何進行顆粒分離，俾利部分港灣浚泥再利用，將是本研究重點。水力漩流分離可將底泥依粒徑大小進行分級，含重金屬的細泥可被獨立選出，而大粒徑的底泥經分離後，通常因不含有污染物質而可逕行回填或做其他再利用使用。期望設計底泥水力漩流器分離顆粒並驗證效能，達成本土化設計應用、發展適合台灣港池底泥分離之本土化技術，促進粗細顆粒分離(污染物濃淡分級)再利用。

第三章 文獻探討

3-1 河川底泥

灌溉水藉由河川、渠道配水至各灌區農田的過程中，污染物亦藉由各種物理、化學與生物作用累積於河川、渠道底部形成沈積物（底泥），若遇驟雨水量激增時，河川、渠道底部之沈積物亦受到擾動而隨著水流進入農田中，以致農田土壤遭污染。

為了解西部農地重金屬污染嚴重性，環保署曾針對桃園、新竹、台中及彰化四縣市進行農地河川灌溉水重金屬檢測，高達 41.3% 底泥污染嚴重、13.2% 灌溉水質超出標準，另外 18.8% 農地土壤超出標準。隨後再根據底泥污染水渠流經區域，進一步進行「高污染潛勢監視點」（重金屬污染高風險地區）面積估計，桃園蘆竹鄉有 78 公頃、台中大里有 97 公頃、彰化包括和美及花壇共 472 公頃，合計 647 公頃，其中 13 公頃為風險最高地區。環保署耗費上億經費整治農地，但灌溉系統沿線部份五金與電鍍工廠，依然經常偷排有毒廢水，和美與花壇共計有兩百多公頃農地，因長期引用遭電鍍、五金廢水污染的水資源進行灌溉，引發遭受鎘鎳等重金屬污染事件，因此整治農地只能治標，應該同時進行治本的灌排系統分離及河川底泥、農地土壤進行整治。

上述含重金屬之河川底泥，若經研究分析判定未超過有害認定標準而屬無害特性，可進行最終處置，但基於永續發展精神，若能減少處理量、再利用河川底泥，將可節省自然資源消耗及金錢花費，於經濟面及環境面創造雙贏契機。為此，本研究主要課題即是分離粗顆粒（重金屬含量少，可再利用）、細顆粒（重金屬含量高，需後續進一步處理處置）底泥。分離出粗顆粒底泥回填再利用，直接獲得處理減容功效。

3-1-1 重金屬污染種類及特性

重金屬之主要污染來源大都來自工業、農業活動，少部分是由礦業及交通業所引起。在各種工業中以電鍍業所使用之重金屬種類最為廣泛。以電鍍業為例，由於不同金屬之電鍍層具有附著性、均勻性、耐蝕性、抗氧化性等良好特性，甚至可由多種金屬之合金提高硬度、結合性或耐磨性，且電鍍金屬時，主要以鍍浴的方式進行（電鍍槽內通常使用高濃度之重金屬溶

液)，因此包含鎘、鉻、銅、鎳、鉛與鋅等各種重金屬被大量的使用，導致大量的低濃度重金屬廢水與廢水污泥產生。而由於其中含有重金屬成分，此類廢水與污泥屬於有害事業廢棄物，在法律規範下需經過妥善處理或清除掩埋，但廢棄物的處理會使得生產成本提高，因此少部分工廠為減少成本付出，不負責任自行排放廢水或傾棄污泥，極易造成河川、土壤及地下水之污染，農田若引入此類水源做為灌溉之用，必定會使得大量含重金屬廢水進入土壤造成污染。張尊國(2002)指出水田每公頃每年約需兩萬噸灌溉水，用量之大，若灌溉水中含有重金屬，極易將汙染物質攜入農地而累積，因此台灣受汙染之農地中超過 90% 為水田。

世界上大部分的工業國家，包括台灣地區，有許多農地及河川下游土地都受到嚴重的重金屬污染，目前已知大約有四十種元素左右。在英國本土已發現有二十萬處受重金屬污染的場址，而美國政府更估計需要花費七十一億美金，才可能清除國內所有受重金屬污染的土地。農田土壤一旦遭受重金屬污染，會嚴重危害作物的生長，如生長在含有鎘污染土壤中的水稻秧苗，其生長明顯受到抑制；除此之外，還會使稻米累積過量重金屬，危害人體健康。因此政府不得不採取強制休耕，以進行土壤復育。

3-1-2 重金屬污染底泥途徑(胡志鴻，2013)

根據環保署土壤調查與曾發生之污染個案，兩方面資料均顯示土壤污染物質之來源媒介，以經由水污染導致土壤污染之情形最為普遍，由空氣污染落塵導致者次之，其餘則係廢棄物不當棄置及農業生產資材之施用不當所致。此外，污染土壤之重金屬媒介來源不同，會直接或間接影響土壤巨、微觀之性質如質的組成、毒性、生物可利用等，就重金屬污染之來源及途徑，分為以下三項，說明如下：

1. 水體污染：

由於台灣地區許多工廠廢水的不當處理或偷排放廢水，使得廢水排入河川再經由灌溉溝渠流入農田導致土壤污染，過去環保機關濃度調查顯示出，台灣地區已確定受到重金屬汙染之地區至少已超過 506.76 公頃。由於土地規劃不良，工廠須藉由灌溉溝渠排放廢水，又因工廠集中排放廢水使得水體稀釋能力不足，進而造成農地土壤之汙染。在 Banat et al. (2007) 研究指出，因液相傳輸所造成農田之重金屬污染土壤，其中重金屬結合型態與因固相汙染之結合型態多呈可交換態 (Exchangeable) 及

碳酸鹽態 (Carbonate)，由於此兩種結合型態於環境中易釋出且高生物可利用，因此種植的作物容易受到污染。依據歷年環保署土壤重金屬含量調查顯示，受重金屬污染之河川底泥，遭受銅、鋅、鉻、鎘、鉛、汞、鎳、砷等八種重金屬污染之威脅，其主要污染來源多遭來自受工業廢水污染之灌溉水所致。例如：豬隻和家禽之糞便，常含有高量的銅和鋅，若經由灌溉傳輸系統流入水體，則會影響河域生態之平衡(Katayon et al., 2001)，以及電鍍業、電子廠、染整廠等，由於其排放水中含有多種有害金屬，皆會對流經的河川造成環境破壞。

2. 氣相污染

早期台灣地區車輛眾多，也使用含鉛的汽油使得排放的廢氣中含有鉛並造成公路兩旁的土壤含鉛量較其他地區高出很多，而國外也有類似之研究(Preciado et al., 2006)，至於其他污染來源，台灣的電力有 70% 產自火力發電廠，在產電過程中所排放含重金屬氧化物或其他物質，經大氣傳送後沉降至河川後也會對底泥造成污染。

3. 固體廢棄物污染

通常非法掩埋場址常掩埋含重金屬之有害廢棄物，例如電鍍污泥、電路板、染整廢料、廢五金等其他有害物，在(Abollino et al., 2006)的研究中以含重金屬之事業廢棄物及土壤混合物作為材料，分析重金屬 Cu、Pb 之結合型態後發現，兩者於此類污染土壤皆以有機結合態及可交換態居多，化學型態上明顯與上述液相污染情形之重金屬型態有差異。

Katasonnva et al. (2005)研究中指出土壤中重金屬之危害性程度高低，主要關鍵為其於土壤中存在之型態，而重金屬通常會以下列五種形態存在於土壤中：

- (1) 存在於土壤溶液中之自由離子及可溶性金屬錯合物。
- (2) 金屬離子佔據土壤膠體之離子交換位置，以及被吸附於土壤中無機顆粒之表面。
- (3) 金屬離子與有機物嵌合在一起。
- (4) 金屬離子以沉澱態或形成不溶之形態存在，如金屬氧化物及金屬氫氧化物等。
- (5) 存在於矽礦物中。

一般而言，因人為因素所產生之重金屬，其金屬結合型態多屬於類型 1 ~ 4 之型態，至於第 5 類型則為自然環境下所產生之金屬型態。當重金屬進入土壤後，會受周遭環境的影響進而使本身產生某些化學變化，而這些化學變化通常極為複雜，最主要的影響因子為土壤的酸鹼度與氧化還原電位，且酸鹼度的影響又較氧化還原電位的影響顯著。一般而言，正常土壤的 pH 值在 5~7 之間，氧化還原電位介於 400 至 -200 mV。大部分的金屬離子在 pH 5 以下，氧化還原電位小於 100 mV 的土壤中溶解度較高，表示不同種類的重金屬污染物與不同性質的土壤之間會因為各種不同的物理、化學、生物作用，當探討土壤的重金屬污染問題時，須對土壤與重金屬之間的吸附能力，是否容易因淋洗而移動擴散、重金屬物質的型態是否會轉變等。

3-2 港池浚泥

商港普遍受沿岸漂沙或河川溪流、區域排水道排入的影響，造成港池淤積，為確保航道的安全需要不定期疏濬淤積泥沙，而目前針對濬淤之底泥係主要採養灘或海洋棄置等處理方式，至於其棄置底泥之品質要求，主要以毒性特性溶出程序(TCLP)進行驗證。上述含重金屬之港灣沉積物，若經研究分析判定未超過有害認定標準而屬無害特性，可進行海洋棄置或陸上最終處置。惟目前經研究發現，部分港池浚泥有時會超過「底泥品質指標之分類管理及用途限制辦法」。港灣浚泥雖非屬應定期檢測底泥品質狀況之水體目的事業主管機關，但若超過上述品質指標，於土地利用上可能面臨較嚴苛挑戰。為降低港池浚泥污染及減少海洋棄置數量，如何進行粗細顆粒分離，俾利粗顆粒港池浚泥再利用，亦將是本研究另一研究重點。

3-2-1 港池浚泥特性

在台灣，港池浚泥目前無公告標準限值，常見做法為經實驗分析判定未超過有害廢棄物認定標準而屬無害特性，可進行最終處置。惟為了減少底泥棄置量，應積極著手資材化利用方案。參考先進國家如西班牙等，已有沉積物品質規範(Sediment Quality Guidelines, SQGs)（如表 3-1），界定沉積物品質及後續利用途徑。

表 3-1 西班牙沉積物品質規範 (Sediment Quality Guidelines, SQGs)
(adapted from Casado-Martínez et al., 2006)

Sediment quality guidelines for marine sediments included in this study						
	CEDEX, 1994		Long et al., 1995		Riba et al., 2004	
	AL1	AL2	ERL	ERM	V1	V2
As	80	200	8.2	70	27.4	213
Cd	1.0	5.0	1.2	9.6	0.51	0.96
Cr	200	1000	81	370	—	—
Cu	100	400	34	270	209	979
Hg	0.6	3.0	0.15	0.71	0.54	1.47
Ni	100	400	20.9	51.6	—	—
Pb	120	600	46.7	218	260	270
Zn	500	3000	150	410	513	1310
Σ_7 -PCB	30	100	22.7	180	54	254
Σ_{13} -PAHs	—	—	0.35	2.36	—	—

All values are expressed as $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ except Σ_7 -PCB expressed as $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. AL1 and AL2 are Spanish Action Levels for dredged material management; ERL and ERM are effect range low and effect range medium and V1 and V2 are sediment quality guidelines developed using data from the Atlantic coast of Spain.

另外，參考德國漢堡港及艾比河浚泥資料（如表 3-2），其重金屬、有機物大多存在於小粒徑 $20\mu\text{m}$ 顆粒（如圖 3-1），如何將小粒徑顆粒自河川底泥中分離，實為底泥沉積物無害化處理/再利用之重要關鍵。

表 3-2 德國漢堡港及艾比河浚泥中重金屬含量（Detzner et al., 1998）

Parameter	cumulative sample	fraction $< 20\mu\text{m}$
Arsenic (mg/kg)	3.8 - 19	27 - 65
Lead (mg/kg)	29 - 120	100 - 220
Cadmium (mg/kg)	1 - 7.2	1.9 - 13
Chrome (mg/kg)	20 - 93	92 - 230
Copper (mg/kg)	18 - 130	84 - 310
Nickel (mg/kg)	11 - 49	51 - 95
Mercury (mg/kg)	0.3 - 2.9	1 - 12
Zinc (mg/kg)	190 - 1140	660 - 2400
Mineral oils (mg/kg)	10 - 424	-
Σ HCH (3) (mg/kg)	< DL	-
Σ PCB (6) (mg/kg)	< DL - 0.07	-
Σ PAH (6) (mg/kg)	0.28 - 1.74	-
Organic matter (%)	2.3 - 16.6	-

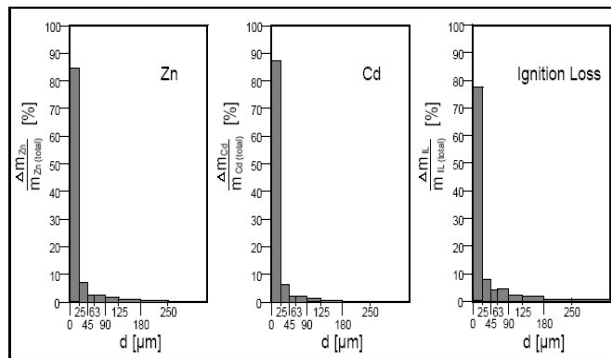


圖 3-1 德國漢堡港及艾比河浚泥中 Zn、Cd 及有機物於各粒徑之分布百分比（Detzner et al., 1998）

為降低港池浚泥污染及減少海洋棄置數量，如何分離乾淨浚泥再利用，將是本研究重點項目。本研究將以高雄港沉積物為研究標的，茲將高雄港相關背景資料敘述如後，

3-2-2 高雄港及碼頭現況概述

高雄港是台灣最大的國際港埠，位於西南海岸，扼台灣海峽與巴士海峽交匯之要衝，且港域遼闊腹地廣大，氣候溫和，臨海有狹長沙洲為港灣的天然防波堤，地理條件優良港灣形勢天成為一天然良港。1959 年後高雄港展開 12 年擴建計畫等多項措施，至 2000 年高雄港再度建成 5 個貨櫃中心，8 個新建深水碼頭。目前港區總面積 26.8 平方公里，每年進出港船舶三萬八千餘艘次。現有航道全長 18 公里，含主航道 12 公里，支航道 6 公里，碼頭合計 118 座，全長 26.6 公里。進出港航道北（第一港口）、南（第二港口）各有一出入口，第一港口水深 11 公尺，有效寬 100 公尺，航道寬 80 公尺；第二港口水深 16 公尺，有效寬 250 公尺，航道寬 140 公尺。港區示意圖如圖 3-2 所示。交通部已著手研訂上位計畫「台灣地區商港整體規劃(96-100 年)」之檢討，規劃 96 至 100 年之整體發展計畫。計畫於高雄港第二港口南側之外海區域，以填海造陸方式填築約 512.7 公頃之新生地作為「高雄港洲際貨櫃中心」開發基地。設置 5 座水深-16.5 公尺以上之深水貨櫃碼頭及後線場地 183 公頃，將可泊靠 15,000TEU 級的巨型貨櫃輪；並興建 42,000DWT 級之石化油品碼頭 8 座及石化油品卸儲中心，碼頭水深為-14 公尺。此外，並於第二港口北防波堤北側之海域填築約 322 公頃之新生地，作為貨櫃業務之長程發展基地。初步計畫興建 13 席直線型碼頭及 2 席船渠式碼頭，碼頭總長度約 6,500 公尺，水深條件在-16.5 公尺~-18 公尺。（高雄港務分公司網頁，2018）



圖 3-2 高雄港示意圖（adapted from 高雄港務分公司網頁，2018）

3-2-3 高雄港浚泥重金屬濃度分布

高雄港區主要沉積物來源分三大部分（董正鈞，2004）：一為河川溪流及排放口等注入港池帶入，二為港口外海漂沙帶入，三為港區工程施工。依 Chen et al.（2007）對高雄港區六處底泥沉積物採樣結果發現，高雄港浚港污泥含些許重金屬（Hg、Pb、Cd、Cr、Cu、Zn）。其中，Hg 0.1~8.5 mg/kg、Pb 9.5~470 mg/kg、Cd 0.1~6.8 mg/kg、Cr 0.2~900 mg/kg、Cu 5~946 mg/kg、Zn 52~1369 mg/kg，Cr、Cu、Zn 等三種金屬有略為偏高之現象。而另依高雄港 90-93 年對碼頭底泥進行分析之結果顯示，碼頭底泥 Hg 7.1~17.2 mg/kg、Pb 20.4~646 mg/kg、Cd 0.13~9.60 mg/kg、Cr 15.3~176 mg/kg、Cu 43.2~452 mg/kg、Zn 203~451 mg/kg。整體而言，碼頭底泥 Cr、Cu、Zn 等三種金屬有略為偏高。

另依環保署委託工研院之報告顯示(環保署，2014)，高雄港底泥總有機碳含量為 0.45~6.25%，有機碳含量最高測站為第五船渠出海口(KH15)；底泥質地普遍以沉泥（ML）或泥質砂土（SM）為主，零星底泥樣品為級配欠佳之砂土（SP）或泥質砂土（SM），底泥樣品之比重分佈介於 2.64~2.73。相關粒徑分布曲線如圖 3-3、粒徑分析與有機碳含量結果表 3-3。

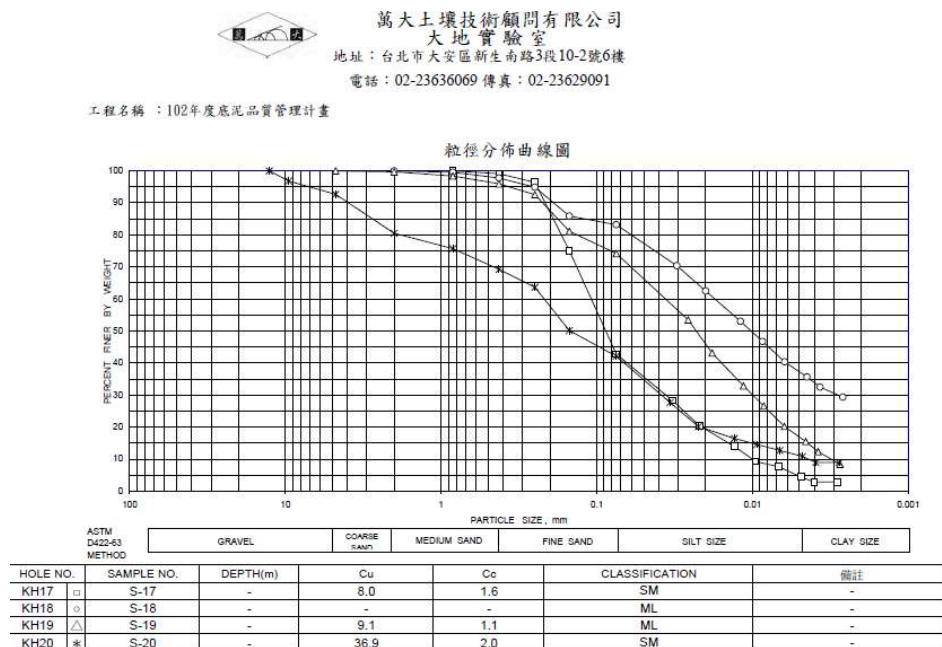


圖 3-3 KH17-KH20 樣本粒徑分布曲線圖 (摘自環保署，2014)

表 3-3 高雄港粒徑分析與有機碳含量結果 (摘自環保署, 2014)

採樣點 編號	質地 等級	粒徑分佈 (%)					比重	有機碳含 量 (%, 乾基)
		礫石	砂粒	粉粒	黏粒	粉粒與黏粒		
KH1	ML	0	19.7	43.5	36.8	80.3	2.72	1.17
KH2	ML	0	45.6	48.2	6.2	54.4	2.69	1.11
KH3	ML	0	18.3	52.8	28.9	81.7	2.72	1.60
KH4	ML	0	18.1	45.3	36.6	81.9	2.72	1.89
KH5	ML	0	14.4	43.6	42	85.6	2.72	2.29
KH6	ML	0	15.1	41.7	43.2	84.9	2.72	2.34
KH7	SM	0	66.3	29.2	4.5	33.7	2.67	1.09
KH8	ML	0	4.6	51.8	43.6	95.4	2.73	2.84
KH9	SM	0	81.8	15.3	2.9	18.2	2.65	1.06
KH10	SM	0	53	40.6	6.4	47	2.68	1.18
KH11	SM	0	71.7	23.8	4.5	28.3	2.66	1.01
KH12	ML	0	13.5	51.5	35	86.5	2.72	3.09
KH13	ML	0	22.1	50.3	27.6	77.9	2.71	3.49
KH14	ML	0	38.6	51.5	9.9	61.4	2.7	2.44
KH15	ML	0	8.5	55.2	36.3	91.5	2.73	6.25
KH16	ML	0	27.3	44	28.7	72.7	2.71	2.97
KH17	SM	0	57.2	38.2	4.6	42.8	2.68	0.74
KH18	ML	0	16.8	46.1	37.1	83.2	2.72	2.23
KH19	ML	0	25.8	57.4	16.8	74.2	2.71	4.08
KH20	SM	7.3	50.6	31	11.1	42.1	2.68	3.59
KH21	SM	0	59.2	34.5	6.3	40.8	2.68	0.73
KH22	ML	0	10.8	52.1	37.1	89.2	2.72	1.32
KH23	SP-SM	0	93.5	-	-	6.5	2.64	0.45
KH24	SM	0	87.1	11.6	1.3	12.9	2.65	0.64
KH25	SP-SM	0	91.9	-	-	8.1	2.64	0.72
CC1	ML	0	15.9	47	37.1	84.1	2.72	9.82
CC2	ML	0	6.8	61.1	32.1	93.2	2.73	10.8
CC3	ML	0	1.1	55.3	43.6	98.9	2.73	4.94
CC4	ML	0	1.9	58.8	39.3	98.1	2.73	4.80
CC5	ML	0	7.1	51.1	41.8	92.9	2.73	6.95

註：1. ML：silt，沉泥；SM：silty sand，泥質砂土；SW：well-graded clean sand，級配優良之砂土；
SP：poorly graded Sand，級配欠佳之砂土。

2. 分類系統為統一土壤分類系統。

高雄港底泥 25 個測站(編號 KH01~KH25)除了 KH17、KH21、KH233 處測站底泥重金屬污染濃度未超過底泥品質指標下限值，KH06、KH12、KH13、KH15、KH18、KH19、KH20 等 6 處測站底泥重金屬污染濃度超過底泥品質指標上限值，其餘 16 處測站則為超過底泥品質指標下限值。超過底泥品質指標上限值重金屬分別為汞、銅、鉻、鎘、鋅(詳表 3-4)。

表 3-4 高雄港底泥污染濃度與品質指標比較 (摘自環保署, 2014)

測站編號	汞	砷	銅	鉻	鎘	鉛	鋅	鎳
KH01	<u>0.268</u>	9.32	48.0	42.5	ND	26.5	<u>176</u>	<u>29.8</u>
KH02	0.157	9.00	40.6	48.2	ND	19.8	<u>148</u>	<u>29.2</u>
KH03	<u>0.578</u>	<u>11.2</u>	<u>107</u>	<u>97.0</u>	ND	36.7	<u>275</u>	<u>32.9</u>
KH04	<u>0.577</u>	<u>11.2</u>	<u>155</u>	<u>150</u>	ND	45.4	<u>333</u>	<u>35.9</u>
KH05	<u>0.357</u>	<u>11.5</u>	<u>87.8</u>	<u>106</u>	ND	35.8	<u>242</u>	<u>36.0</u>
KH06	<u>0.333</u>	<u>11.5</u>	<u>112</u>	<u>258</u>	0.58	40.9	<u>345</u>	<u>39.4</u>
KH07	ND	8.94	45.1	46.1	ND	21.9	<u>175</u>	<u>28.1</u>
KH08	<u>0.337</u>	<u>16.1</u>	<u>131</u>	<u>136</u>	<u>1.03</u>	<u>55.6</u>	<u>354</u>	<u>38.1</u>
KH09	ND	9.07	10.8	20.9	ND	ND	86.4	<u>25.6</u>
KH10	ND	8.06	34.7	32.2	ND	22.4	<u>142</u>	<u>29.3</u>
KH11	ND	8.84	40.0	27.6	ND	16.8	132	<u>27.9</u>
KH12	<u>1.34</u>	<u>14.6</u>	<u>163</u>	<u>131</u>	<u>0.65</u>	<u>59.2</u>	<u>607</u>	<u>47.0</u>
KH13	<u>4.74</u>	<u>18.8</u>	<u>189</u>	<u>102</u>	<u>1.48</u>	<u>83.8</u>	<u>912</u>	<u>45.2</u>
KH14	0.153	7.20	<u>57.6</u>	63.2	ND	31.0	<u>198</u>	<u>35.0</u>
KH15	<u>5.65</u>	<u>21.8</u>	<u>251</u>	<u>126</u>	<u>2.79</u>	<u>102</u>	<u>2,650</u>	<u>57.3</u>
KH16	<u>0.311</u>	7.45	<u>68.4</u>	<u>154</u>	ND	42.9	<u>310</u>	<u>63.2</u>
KH17	ND	9.30	9.58	19.8	ND	12.1	79.9	23.9
KH18	0.161	8.96	<u>159</u>	53.9	ND	44.0	<u>329</u>	<u>34.8</u>
KH19	0.167	8.49	<u>409</u>	<u>99.0</u>	<u>0.94</u>	<u>65.0</u>	<u>861</u>	<u>63.5</u>
KH20	<u>0.270</u>	8.12	<u>536</u>	<u>106</u>	<u>0.83</u>	<u>69.4</u>	<u>1,010</u>	<u>62.3</u>
KH21	ND	8.09	14.6	22.6	ND	14.7	100	23.9
KH22	ND	9.34	31.3	33	ND	25.5	134	<u>31.5</u>
KH23	ND	9.93	5.97	18	ND	12.1	83.8	22.9
KH24	ND	<u>12.3</u>	6.17	18.7	ND	11.1	77.7	22.7
KH25	ND	9.05	8.57	26.8	ND	17.2	112	<u>26.6</u>
CC1	<u>2.08</u>	10.7	<u>204</u>	<u>87.2</u>	<u>21.1</u>	<u>174</u>	<u>1,290</u>	<u>88.2</u>
CC2	<u>3.15</u>	<u>13.1</u>	<u>513</u>	<u>188</u>	<u>10.0</u>	<u>140</u>	<u>2,320</u>	<u>87.8</u>
CC3	<u>0.462</u>	<u>14.1</u>	<u>358</u>	<u>147</u>	<u>2.19</u>	<u>95.6</u>	<u>906</u>	<u>43.5</u>
CC4	<u>0.467</u>	<u>14.5</u>	<u>441</u>	<u>140</u>	<u>1.84</u>	<u>102</u>	<u>866</u>	<u>44.5</u>
CC5	<u>0.397</u>	<u>11.9</u>	<u>449</u>	<u>131</u>	<u>2.12</u>	<u>122</u>	<u>1,060</u>	<u>41.1</u>
底泥品質指標上限值	0.87	33	157	233	2.49	161	384	80
底泥品質指標下限值	0.23	11	50	76	0.65	48	140	24

註：1. 底泥濃度超過底泥品質指標下限值者以“xx”表示，超過底泥品質指標上限值者以“xx”表示。

2. 濃度單位為 mg/kg。

雖然高雄港浚泥部分測值超過底泥品質指標上限值，惟其毒性特性溶出試驗結果均低於有害特性認定標準值，判斷屬一般（非屬有害）特性，遂可進行海洋棄置。為了減少浚泥海洋棄置量，應積極著手浚泥廢棄減容/再利用途徑。

3-3 分離減積技術

3-3-1 分離技術介紹

美國環保署 (USEPA) 研究發現，大部分有機/無機污染物常附著於細小顆粒(如黏土及矽土)表面上，在此一情形下，則可利用物理分離技術，先將大顆粒物質先予分離，可大大降低待處理污染沉積物之體積。物理分離技術係將移除物依其物理性質(如粒徑、外觀、比重及磁性)予以分離之技術，其中部分技術為溼式分離技術。在美國，有利用物理分離技術將污染土壤中之重金屬污染物濃縮後再送到重金屬回收處理之工廠予以回收之整治案例。經分離大顆粒土壤或卵礫石上或其中之重金屬污染物去除之難易度，將會影響物理分離技術單價，如利用簡易水洗程序即可分離污染物，則可降低處理費用；如污染物非僅附於表面，則需進行破碎、研磨等程序，則處理費用將會提高。

於各物理分離技術中，各有其優缺點與應用範圍，若妥善搭配使用可有效分選出不同粒徑顆粒。以總部位在英國的 ARCADIS 全球工程顧問公司為例，其進行土壤清洗的方式如圖 3-4 所示(Mann, 1999)。首先挖掘場址重金屬污染土壤，經過旋轉式礦石篩濾除粒徑大於 5 mm 之固體粒子，其餘固體粒子由傳輸裝置送入濕篩設備，進一步濾除粒徑大於 2 mm 之固體粒子，為避免在濕篩過程中有土壤粒子膠結成大粒子而被濾除，該設備尚具有六道高壓噴水器以排除膠結粒子。所濾除之粒徑介於 2~5 mm 粒子經由分析確認符合整治目標後，再歸返回場址。所有粒徑小於 2 mm 之固體粒子則進入水旋流分離器(hydrocyclone)中接受清洗處理。清洗後，較粗粒子可維持在底端，較細粒子與酸洗液則由上端排除。前者再釋出回場址，並經由分析確認其是否符合整治目標；後者則作為廢水污泥處理，即經由聚合物添加、沉降、加壓厚實、脫水後製成污泥餅，再以合法方式送至中間處理場或最終處置場處理。針對不同的需求，該設備可調整粗、細粒子分離的切入點(cutting point)，因此可決定經過水力漩流分離器清洗後欲排除粒子之粒徑大小，提高整治效率。若土壤同時受到有機污染，則可加入適當的界面活性劑進行攪拌，降低污染物與土壤粒子間的表面張力，促使污染物與界面活性劑微胞(micelle)結合而以泡沫形式漂浮，再經由浮選槽(flotation cells)將之移除 (蘇紹瑋、陳尊賢，2008)

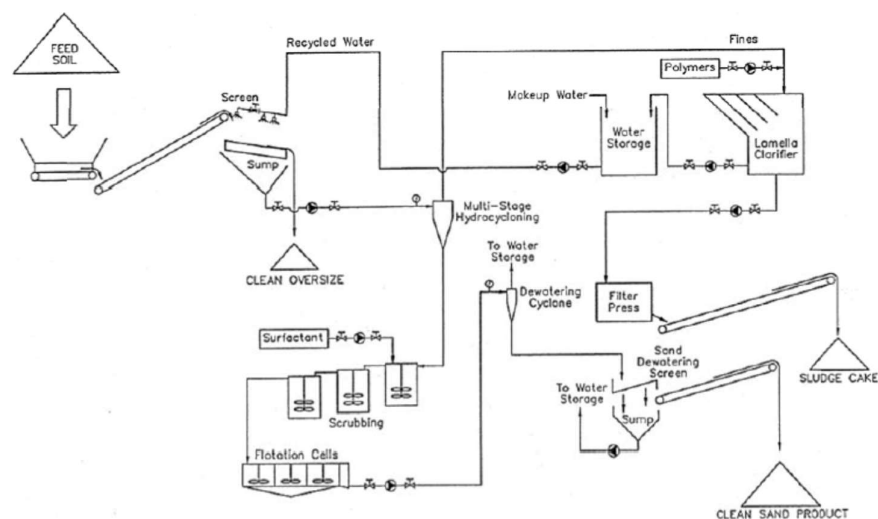


圖 3-4 ARCADIS 公司採行之土壤清洗技術操作流程圖。(adapted from Mann, 1999)

Detzner(1998)亦指出，水力漩流分離 (hydrocyclone separation) 是一個經濟可行、粒狀物分離減積的方法。水力漩流分離可依粒徑大小進行分級，含重金屬的細顆粒可被獨立選出，進行後續處理；而大粒徑的土壤經分離後，通常因污染物質含量較低，而可逕行回填或做其他再利用使用。

因此，歸納常見物理分離操作單元如下分述：(胡志鴻，2013)

(一)機械式篩分：

機械式篩分之分離機制係依照土壤顆粒的大小，將帶離的土壤固體顆粒樣本放置在標準篩號之篩網上，藉由機械式的震動或搖動來進行土壤顆粒分離，主要係提供合適粒徑利於後續處理，其常用的篩分器包含筒狀旋轉式篩分器、震動篩與旋轉篩分器等。(Kelly, 1982)於文中提出，篩分器進行顆粒分離具有不錯的效果，但是一般工業鮮少採用小於 70 mesh (210 μm) 的篩網進行分離，原因在於孔徑過小，使篩網本身會有損耗與堵塞等問題，而孔徑過小對細顆粒分選能力較孔徑大的能力低。

(二)水力式篩分：

水力式篩分之分離機制主要是藉由土壤中不同顆粒大小在液相中會有沉降速度差異之現象或因離心力的作用而達到顆粒分離的目的。一般而言水力式分離技術主要涵蓋兩個類別：

- (1) 濕式渦錐，以離心力作為土壤顆粒分離機制。
- (2) 螺旋式分級器，以機械式分級為基礎。

其中水力漩流分離技術廣泛地用在土壤篩分處理程序上，主要是利用顆粒在渦錐內所受之離心力大於重力之原理將小顆粒土壤從大顆粒的砂土中分離出來，由於重金屬常以極細顆粒型態存在(Petavy et al., 2009)，故能藉由濕式渦錐將其與大粒徑顆粒分開，達到土壤中重金屬分離之效果，也因離心力遠大於重力之緣故，故僅需很短的操作時間即可達到效果，整體而言，濕式渦錐分級器具有高效率且操作費用低等優點。

3-3-2 水力漩流分離 (Hydrocyclone) 原理與應用

水力漩流分離是藉離心力從廢水(礦漿)中分離密度不同之懸浮物質，在水力漩流分離器的離心力場，顆粒的分離速率較同樣顆粒在重力場之分離速率通常高 100 倍以上。其型式如圖 3-5 所示。其原理為使用壓力將廢水(礦漿)從給礦口 (Inlet) 注入，沿筒部 (Cylindrical section) 以切線方向給入，利用高水流切線速度產生離沉降力量，較粗及較重顆粒則由錐形尾部 (Cone Apex Opening) 排出，而較輕及較細顆粒則由漩渦管 (Vortex Finder) 上昇至頂部，由頂部開口溢流。廢水(礦漿)給入壓力通常界於 15-65 psi，視顆粒粗細及欲分離之程度而定。

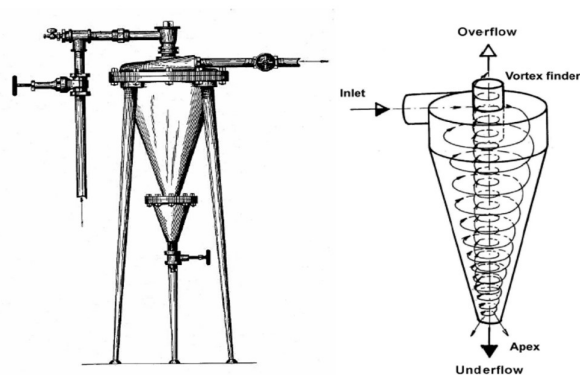


圖 3-5 水力漩流分離器 (Hydrocyclone) 示意圖 (adapted from Bergström, 2006)

影響水力漩流分離器效能之因子甚多，主要包括水力漩流分離器(1)筒部直徑、(2)錐部角度、(3)漩渦管直徑、長度及其位置、(4)離心力及廢水(礦漿)切線速度。其中，筒部直徑視處理量而定，經常採用尺寸為3-15吋；錐部角度約10-20度間。

另外，離心力可由增加轉速或縮小旋轉半徑而增加，離心力係數(Centrifugal Coefficient, G_c)為離心力加速度與重力加速度之比，它代表離心沉降之能力。

$$G_c = \frac{v^2}{gr} \quad (3-1)$$

其中， G_c 為離心力係數

V 為礦粒切線速度

g 為重力加速度

r 為旋轉半徑

將操作改變水力漩流分離器負荷能力、分離(級)粒度、產物分配、分離(級)效率，藉由水力漩流分離器形態及給礦泵選擇，控制進流速率，調整漩流器參數，分離出粗顆粒粒子。

3-3-3 水力漩流器設計影響因子說明

本研究重點在於水力漩流器設計，茲說明如下：

1. 水力漩流分離器之結構與流場運作(張又仁，2017)

水力漩流分離器如圖3-6所示，主要是由圓柱體及圓錐體連結所組成，其整體包含進料口、溢流口、溢流管、底流口，而流體部分為外部漩流及內部漩流。固體顆粒與液體混合後，一起沿切線方向進入水力漩流分離器內，混合液遇到器壁後被迫作旋轉運動，而固體顆粒則依原有的直線運動的慣性繼續向前運動，粗顆粒慣性力大能夠克服水力阻力靠近器壁而細小顆粒慣性力較小，無法靠近器壁隨混合液作旋轉運動，在後續給料的推動下混合液繼續向下和旋轉運動固體顆粒相應產生慣性離心力，於是粗顆粒繼續向器壁聚集，而細小顆粒則停留在中心區域，就發生粗細顆粒由器壁向中心的分層排列。

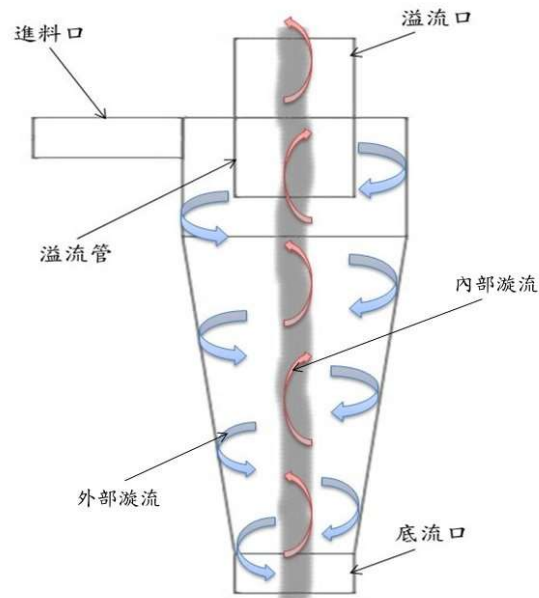


圖 3-6 水力漩流分離器之結構與流場

2. 結構對於水力漩流分離器影響(張又仁，2017)

水力漩流分離器的每個結構都會影響水旋風之分離效率，而結構是指水力漩流分離器的直徑(D_{hc})、進口端管徑(D_f)、溢流端深度(L_{hco})、溢流端管徑(D_o)、底流端管徑(D_u)、溢流端管壁厚(w)、圓柱長度(L_{hc})、圓錐角度(θ_c)、圓錐長度(L_c)這些尺寸，即為水力漩流分離器的基本結構圖。

(1) 水力漩流分離器之圓柱直徑：分離器的直徑越小，代表向心力加速度越大，在相同的顆粒密度下，代表可分出越小的顆粒。

(2) 進料口之管徑：一般來說，方形進口管會優於同截面積之圓形進料口管，對於水力漩流分離器而言，較大的進料口管徑會產生較大的壓力損耗，一般設定其面積大小約為水力漩流分離器直徑平方的百分之五。

(3) 溢流管之深度：溢流管有深度，主要是要讓較大顆粒避免短路流現象的發生，因此增加深度可以增加大顆粒的移除效率，卻會造成小顆粒被主要渦流帶走的機率上升。

(4) 圓柱之長度：圓柱長度通常會與水力漩流分離器之直徑相同，其功能主要為增加工作流體在水力漩流分離器內的滯留時間，並且具有提供工作流體向心力之功用。

(5) 圓錐之角度：為判斷水力漩流分離器之類型，一般而言 20° 以下是屬於長錐形水旋風分離器，多用於澄清液處理； 20° 以上則屬於短錐形水力漩流分離器，雖然分離效率降低，但對粒子形狀的選擇則會提升，多用於初級的選礦。

(6) 圓錐之長度：由水力漩流分離器之直徑與圓錐角度所控制，其主要功能與圓柱長度類似，都是增加工作流體在水力漩流分離器內的滯留時間，以提高分離的機會。

3. 操作參數對水力漩流分離器之影響

水力漩流分離器之操作，主要是控制進口流量或進口壓力，或是調整底流及溢流的分流比。而操作參數可分為：

(1) 總處理量(Total Capacity)：

因為質量不減定律，水力漩流分離器的質量平衡方程式可以表示為下式：

$$G = \dot{m}_o + \dot{m}_u = \dot{m}_f \quad (3-2)$$

式中G為水力漩流分離器的單位時間處理量， \dot{m}_o 與 \dot{m}_u 分別為溢流端即底流端的單位時間流出量，而 \dot{m}_f 為進口端的單位時間流入量。如果只考慮固體顆粒的質量平衡， $G = \dot{m}_o + \dot{m}_u = \dot{m}_f$ 可以改寫為：

$$Q_f C_f = Q_o C_o + Q_u C_u \quad (3-3)$$

其中 Q_f 、 Q_o 及 Q_u 分別為進口端、溢流端與底流端的體積流率，而 C_f 、 C_o 及 C_u 分別為進口端、溢流端與底流端的重量濃度百分比。

(2) 分流比(Split ratio)：

分流比是水力漩流分離器的重要參數之一，其定義如下式：

$$S = \frac{Q_u}{Q_o} \quad (3-4)$$

其中 Q_u 與 Q_o 分別代表了底流端及溢流端的體積流率。藉由調整底流端及溢流端的閥件閥開度，來調整制所需的分流比，而且我們可以經由實驗發現到，進口壓力也可以造成分流比的改變，通常是進口的壓力越大，水力漩流分離器的分流比會越小，由於分流比的改變會影響到內部流場的變化，因此分離效率的表現也會隨之改變。

(3)總括分離效率(Overall separation efficiency)：

總括分離效率是水力漩流分離器中最具重要性的操作參數，可同時表現出該結構參數之好壞與操作參數之優劣。下列式子為其定義：

$$E = \frac{Q_u C_u}{Q_f C_f} \quad (3-5)$$

式中 Q_f 與 Q_u 分別代表了進口端及底流端的體積流率， C_f 及 C_u 分別為進口端、底流端的重量濃度百分比。

3-4 FLUENT 流況模擬

流場電腦模擬起源於計算流體力學(Computational Fluid Dynamics, CFD)技術，將物理方程式，利用一些數學模式轉換成電腦語言，以電腦執行運算，模擬流場之流動特性，並從中擷取所需的資料，如壓力、速度、流場方向等，依據擷取的資料評估流場特性，輔助設計與效能驗證，電腦模擬可假想成在電腦內執行一個虛擬的實驗。其中 FLUENT(現已納入 ANSYS 系統)為泛用型有限體積、以壓力基準的三維計算流體力學軟體，該軟體提供了結構性網格與非結構性網格的設定，除了一般三維流體計算之外，此軟體尚還有自由液面、多相流場(如液固流計算、三相流計算)等功能。利用物件組合、分離功能，完成三維複雜幾何模型，並自動建立網格分佈及變形網格之檢驗及調適，建立流況模型(如圖 3-7)。

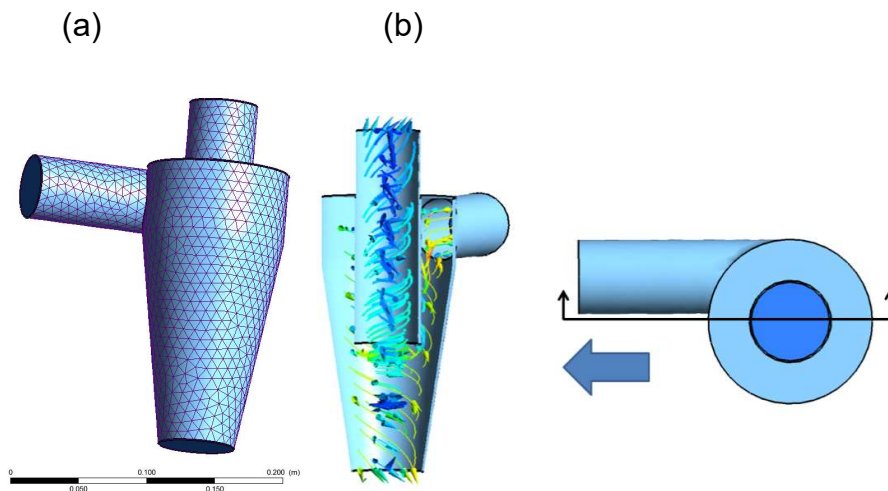


圖 3-7 水力漩流分離器(a)流場模擬模型及(b)流場路徑圖(申請人模擬結果)

Narasimha et al. (2005)曾使用 Computational Fluid Dynamics (CFD) 技術對 hydrocyclone 進行 cut size 預估，該研究以 Navier - Stokes equations (納威爾-史托克方程式)之 steady-state conservation of mass and momentum 對 hydrocyclone 進行顆粒模擬。另依據望熙榮(1998)，漩流分離器設計及效能與旋轉數 Ne 值有關，

$$Ne = \frac{1}{H} [L_b + L_c/2] \quad (3-6)$$

其中 Ne 為旋轉數；H 為流入管高度(m)；

Lb 為水力漩流器本體高度(m)；Lc 水力漩流器底部圓錐部份高度(m)

旋轉時間(顆粒於外螺旋須碰撞器壁) Δt 為

$$\Delta t = 2\pi R \frac{Ne}{v_i} \quad (3-7)$$

R 為水力漩流器本體半徑(m)

V_i 為進流速度(m/s)

$$V_t = \frac{dp^3(\rho_p - \rho_l)V_i^2}{18\mu R}$$

(3-8)

V_t 為終端速度(m/s)

dp 為顆粒直徑(m)

ρ_p 為顆粒密度(kg/m³)

ρ_l 為液體密度(kg/m³)

μ 為液體黏滯係數(kg/m-s)

$$V_t = \frac{W}{\Delta t}$$

(3-9)

W 為流入管寬度(m)

結合公式 3-6~3-9 可得

$$d_p = \left[\frac{9\mu W}{\pi N \epsilon V i (\rho_p - \rho_l)} \right]^{1/2} \quad (3-10)$$

理論上此為最小顆粒可去除粒徑，大於此粒徑顆粒(粗顆粒)均可被去除。惟上述為理論值，實際上常另外用 dpc 計算 50%去除粒徑。

本研究主要使用渦流模型分析，利用三維流場模擬軟體 FLUENT 進行水力漩流分離器流場模擬，解析水力漩流分離器於不同入口速度下的流場特性，並針對水力漩流分離器內部壓力分佈、速度分佈及粒子軌跡圖等進行細部流場分析，了解水力漩流分離器內部運動方式，生成有實際意義的圖片、動畫（如跡線追蹤等功能），後續再與實際水力漩流分離試驗之參數及結果驗證，分析泥漿在水力漩流分離器內流動傳輸情況，做為設計參考。

第四章 研究方法與過程

4-1 研究流程

本研究以『設計底泥水力漩流器分離顆粒並驗證』為主題進行研究。工作內容包含彰化地區河川底泥及高雄港區浚泥採樣、底泥/浚泥基本特性分析、重金屬含量全量分析、顆粒組成分布、水力漩流分離擷取粗顆粒物質。其執行研究流程詳圖 4-1 所示：

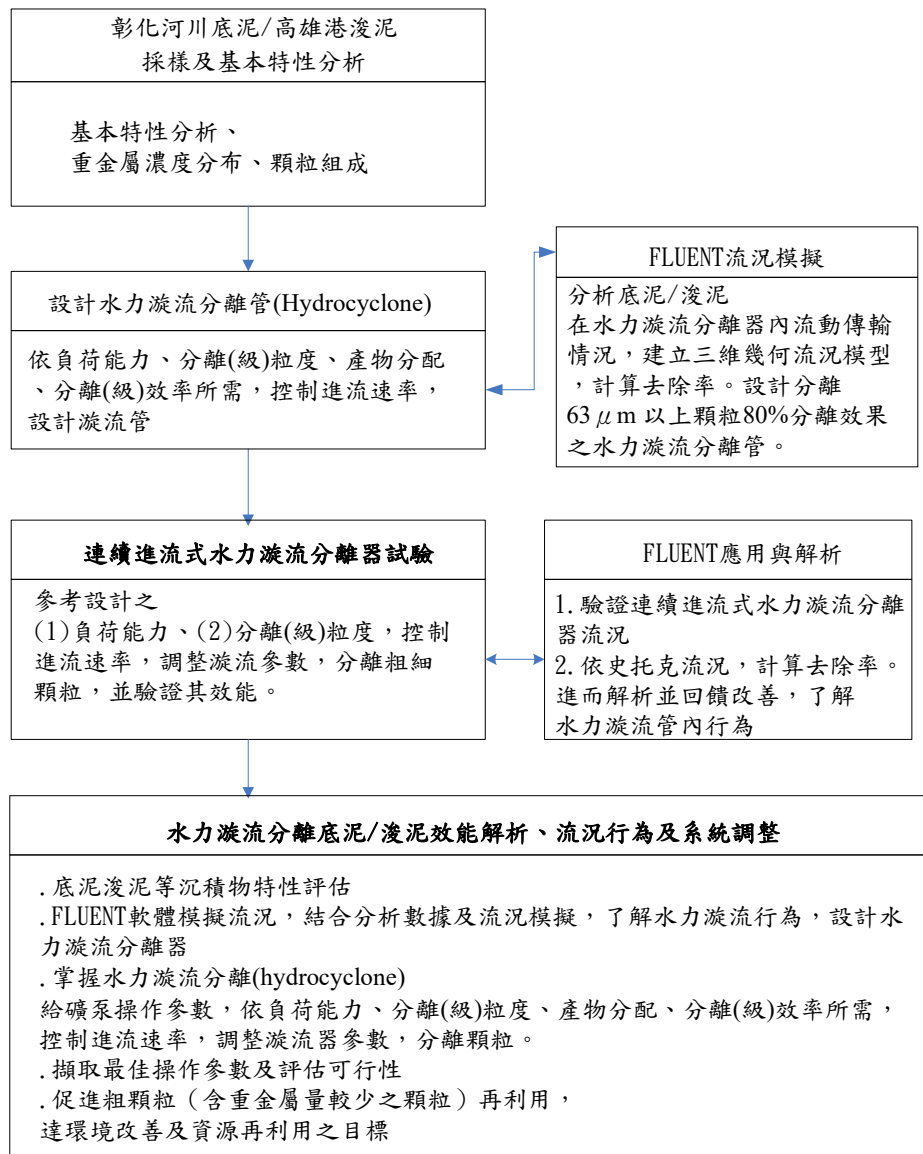


圖 4-1 研究流程圖

4-2 實驗方法與步驟進行

4-2-1 底泥/浚泥採樣

本研究欲採取之樣品，包括彰化地區河川底泥及高雄港區浚泥，說明如下：

彰化地區河川底泥主要於岸邊以採樣勺或於橋上或船舶上投擲底泥採樣器進行採樣；港灣浚泥則以船舶上投擲底泥採樣器進行採樣或由高雄港浚泥船/受泥船商取浚泥來進行採樣。基本特性分析如下：

1. 粒徑分佈

將烘乾後之底泥/浚泥秤取適當重量，置入 100、230、300、400mesh 之標準篩網內，以振動篩機進行篩分析，之後倒出各個標準篩上截留之反應灰並加以秤重，重複上一步驟，使得兩次數據的相對百分偏差小於 10%，即可求得底泥/浚泥之粒徑分佈。除此之外，進行雷射粒徑分析，其分析範圍為 0.37~2000 μm 。若樣本含有 2.0 mm 以上之顆粒則依美國篩分析法(ASTM D422)測定。

2. pH 值

根據環署檢字第 208.02C 號廢棄物(NIEA R208.02C)之氫離子濃度指數(pH 值)測定法測定底泥/浚泥之 pH 值。秤取 20g 底泥/浚泥於 50ml 之燒杯內，加入 40ml 試劑水，蓋上錶玻璃，並且持續攪拌懸浮液 5 分鐘，靜置懸浮液約 15 分鐘，使懸浮液的大部分固體沉澱，以 pH 電極測定水相層 pH 值。

3. X 光螢光分析(X-ray fluorescence spectrometer, XRF)：Spectro, XEPOS。

X 光照射樣品時所發射出的次生 X 光稱為 X 光螢光，為樣品所含元素的特性 X 光光譜線，利用偵測此 X 光螢光之波長與強度，測知物質所含元素的種類與含量。

4. 重金屬總量濃度

精秤 0.05g 底泥/浚泥，置入微波消化所使用之鐵氟龍容器中，加入 2ml HNO_3 、2ml H_3PO_4 、2ml HBF_4 ，蓋上鐵氟龍蓋及減壓閥後，放入旋轉承座中加以旋緊，將旋轉承座放入微波消化器(Milestone)中進行消化，消

化完成後待至冷卻，將消化液定量至 50ml，以感應耦合電漿發射光譜儀(ICP-OES)偵測其中重金屬等元素濃度，再由消化液體積換可得底泥/浚泥含各元素之總量。

除上述底泥/浚泥重金屬總量分析外，亦分析 100、230、300、400mesh 不同粒級之重金屬含量，了解重金屬主要分佈/濃集於粒級顆粒上，俾利後續水力漩流分離。

5. 表面形態觀察

將底泥/浚泥樣品，置於真空抽氣乾燥保存盒內抽真空乾燥後，以雙面膠固定於先後經去離子水及酒精由超音波震盪清洗過之銅製小圓柱體上，經確認不易移動或掉落之後再予真空鍍碳。鍍碳後樣品置於電子顯微鏡內真空基座上，抽真空後進行電子顯微表面型態觀察。

6. 表面元素分析

除此之外，更以掃描定點或面之二次電子，得到試樣表面之半定量元素組成，由元素分佈圖譜分析指標元素在試樣表面之分佈情形。能量散佈儀(EDX)之操作條件為：掃描能量範圍由 0 到 10.23KeV，掃間為 100 秒。

7. 毒性特性溶出程序 (TCLP)

根據環保署環境檢驗所訂定之毒性特性溶出程序(Toxicity characteristic leaching procedure, TCLP)試驗規定，先測定底泥之 pH 值，取 5.0 g 之底泥，加入 96.5 mL 之去離子水，劇烈攪拌 5 分鐘，以 pH 電極量測 pH 值，若 $\text{pH} < 5.0$ ，則使用萃取液 A(萃取液 pH 為 4.93 ± 0.05)，若 $\text{pH} > 5.0$ ，加入 1.0 N 之 HCl 3.5 mL，蓋上錶玻璃加熱至 50°C ，並持溫 10 分鐘，待冷卻於室溫後量測溶液之 pH 值，若 $\text{pH} < 5.0$ ，則使用萃取液 A(萃取液 pH 為 4.93 ± 0.05)，若 $\text{pH} > 5.0$ ，則使用萃取液 B(萃取液 pH 為 2.88 ± 0.05)。而後稱底泥 100 g 以上，加入 20 倍樣品重之萃取液，置於旋轉裝置上，旋轉頻率為 30 ± 2 rpm，旋轉時間為 18 ± 2 小時，待旋轉時間結束後，以 $0.7\mu\text{m}$ 之玻璃纖維濾紙過濾。本研究則使用感應耦合電漿發射光譜儀(ICP-OES)偵測其中 Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 等金屬濃度，了解重金屬溶出程度。

8. 其他實驗中所使用的儀器設備，說明如下：

- (1) 振動篩機：Retsch
- (2) 烘箱：Ching Ying Model C1-12E。
- (3) pH meter：Suntex Model SP-7。
- (4) 電子天平：AD，GR-200，精度小數點以下三位。
- (5) 去離子水製造機：Milli-Q R0
- (6) 微波消化器：High performance microwave digestion unit, Milestone。
- (7) 感應耦合電漿光譜分析儀(ICP)：Perkin Elmer，Optima 2000。
- (8) 薄膜濾紙：Cellulose Nitrate 材質，MFS 公司，孔徑 0.45 μ m。
- (9) 超音波震盪器：ULTRASONIC CLEANER
- (10) 真空蒸鍍機(鍍碳)：JOEL JEE-4X Vacuum Evaporator。
- (11) 掃描式電子顯微鏡(SEM)：Hitachi SEM S-2500。X 光能量散佈儀(EDX)：Kevex-ray model：3200-040。
- (12) 總有機碳分析儀 (Total organic carbon analyzer, TOC) - 用於偵測土壤中有機碳之含量：O. I. Corporation, USA, Model 700。

4-2-2 設計水力漩流分離器

流場電腦模擬起源於計算流體力學(Computational Fluid Dynamics, CFD)技術，將物理方程式，利用數學模式轉換成電腦語言，模擬流場之流動特性，並從中擷取所需的資料，如壓力、速度、流場方向等，依據擷取的資料評估流場特性，輔助設計與效能驗證。本研究利用三維流場模擬軟體 FLUENT 進行水力漩流分離器設計及流場模擬，解析水力漩流分離器於不同入口速度下的流場特性，並針對水力漩流分離器內部壓力分佈、速度分佈及粒子軌跡圖等進行細部流場分析，分析水力漩流分離器內部運動方式，做為設計參考。研究使用計算流體力學(CFD)進行渦流模型分析，其採用多重網格加速收斂技術進行設計。分析礦漿在水力漩流分離器內流動傳輸情況，進而解析並回饋改善，擷取適宜操作條件。

(1) 模型及網格建構 (張又仁, 2017)

網格建構如圖 4-2 所示，進行網格建構時，需要注意模型是否建構完善，把不需要的幾何刪除，建構同時也需要注意到每個幾何之連接性是否完整。注意網格建構品質，才能準確的建構出好的流場及數據結果。

(2) 流況模擬

圖 4-3 為模擬流場內壓力，橘色為壓力最大的地方，一開始在進料時壓力較大，而越往內側觀察，壓力逐漸減小，在藍色及青色區塊了解到為內部漩流為負壓的狀態，而顆粒大部分都是從溢流管兩側漩流出去，從流場壓力來看，區塊的分布較為工整，也顯示出，流場穩定的狀況較為順暢。

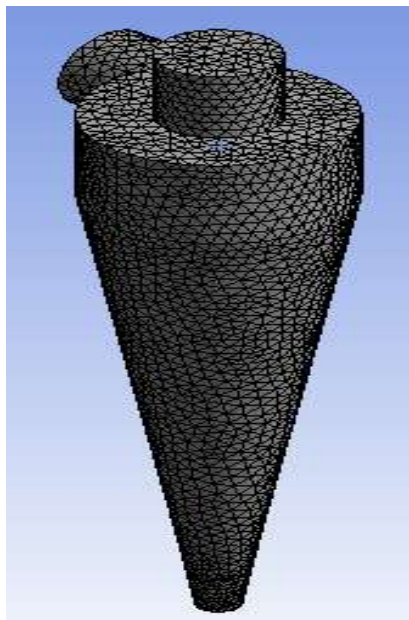


圖 4-2 水力漩流分離器之網格建構 (張又仁, 2017)

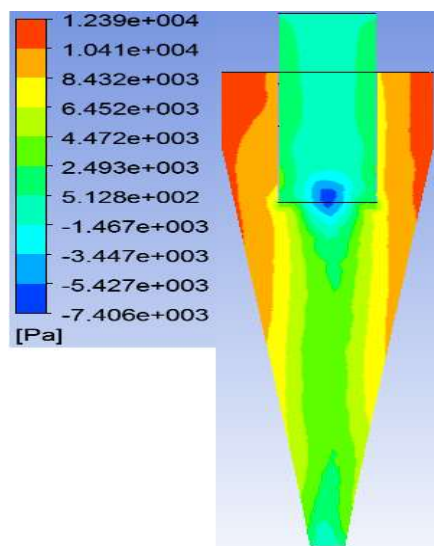


圖 4-3 模擬流場內壓力

(3) 粒徑分析效能驗證

本研究將模擬各粒徑分離效果及 overflow、underflow 比例，了解不同粒徑顆粒分離效率，進而修正水力漩流器設計，達成預設分離效果。將上述模擬結果，客制化製作水力漩流器，並實驗驗證分離效能，做為實場應用之學理依據。再以雷射粒徑分析數據佐證，研究結果預期呼應流況模擬狀態，較粗顆粒主要由錐形尾部（underflow）排出，而較輕細顆粒則由漩渦管（Vortex Finder）上昇至頂部，由頂部開口溢流（overflow）。

本研究著重於底泥/浚泥粗顆粒分離，而重金屬物質主要附著於細顆粒上。水力漩流分離可將底泥/浚泥依粒徑大小進行分級，含重金屬的細泥可被獨立選出，而大粒徑的底泥/浚泥經分離後，通常因不含有污染物或只含微量污染物而可逕行回填或再利用使用。因此，研究初步目標粒徑設計在 $63\mu\text{m}$ （粗顆粒），達成 $63\mu\text{m}$ 以上顆粒 80% 分離效果。以此效能針對底泥/浚泥客制化設計新的水力漩流器，再將設計圖交予廠商製做漩流管，最後予以實驗驗證彰化地區河川底泥及高雄港區浚泥顆粒分離效果。並結合分析數據及流況模擬，了解水力漩流行為，回饋改善操作條件。

(4) 應用情境：底泥/浚泥粗顆粒分離。

期能應用水力漩流分離器，將底泥/浚泥依粒徑大小進行分級。大粒徑的底泥/浚泥經分離後，通常因不含有污染物或只含微量污染物而可逕行回填或再利用使用。可增加底泥再利用比例，達成污染物減容效果。

操作條件：

- (i) 客制化設計可分離底泥/浚泥的水力漩流器，有別於農地土壤顆粒分離。
- (ii) 規畫水/泥比(liquid to solid ratio):3~4；流速 3~4m/s。樣本先預篩，預計用 0.5cm 篩網，將石頭、螺類、貝類去除，避免漩流管阻塞。
- (iii) 目標粒徑設計在 $63\mu\text{m}$ （粗顆粒），達成 $63\mu\text{m}$ 以上顆粒 80% 分離效果。

4-3 分析比較現行既有技術能力、專利、產品市場需求及競爭力評估

技術能力：本研究先前已自行設計組裝模廠級水力漩流系統(本土化)，並已獲有新型專利-攪拌分離裝置(鄭文良、張益國)，中華民國專利證號新第 M372209 號，2010.1-2019.4。中華民國發明專利，第 I549764 號，機動式分離含重金屬之土壤顆粒處理方法(張益國、徐一量、鄭文良、劉原宏、張裕棋、洪振瑋、盧幸成)，2016.09-2035.06。具研發及設計能力發展本土化技術。

市場需求：目前國內適合底泥/浚泥顆粒分離之設備，尚未妥適被開發應用。

目前台灣土壤地下水處理業(台境、瑞昶、業興、捷博、裕山、中聯資源等公司)中，為達土壤減量目的，大多配有水力漩流(Hydrocyclone)分離系統，初步分離乾淨/受污染土壤，達成減容目的。唯上述公司之水力漩流分離系統購入時均以土壤為標的物，對於底泥處理效果差。雖曾嘗試應用於底泥/浚泥顆粒分離，成效一直未如預期，其主要原因出在於水力漩流器之設計與條件操作。國內廠商大多直接購入國外整套分離設備，殊不知每支水力漩流器均有其適合之操作條件、顆粒分離能力及操作區間，無法單一應用於所有狀況。若更換水力漩流器，則配套之管徑、流速、處理容量亦隨之改變。遂本產品市場需求仍大。

競爭力評估：目前國內土壤污染處理業，使用水力漩流系統多為進口設備，維修成本高外，若遇不同土壤質地，則須調整水力漩流設備或參數，花費成本較高。本計畫主要優勢為本土客制化設計水力漩流分離管，應用 FLUNET 軟體模擬流況，自動化控制提升產品導向需求，減少誤差。另外，詳細瞭解水力漩流設備構造，於維修及故障排除上將更迅速確實。此外，更可促進本土處理業、人員之技術與經濟發展。

實務應用限制因子主要可能為：

- (i) 進流樣本顆粒大小：樣本需先預篩，預計用 0.5cm 篩網，將石頭、螺類、貝類去除，避免漩流管阻塞。
- (ii) 流速：目前可提供約 4 m/s 流速。實場應用需有 15-20Hp 馬達及配管。
- (iii) 添加水量及廢水處理：因為要使顆粒能分離，liquid/solid ratio = 4，要額外添加水。除此之外，衍生廢水處理或廢水回用設備應予以考量設計。

4-4 執行成果貢獻及成果效益

可能貢獻	產出技術之應用規劃	可能論文發表或專利
<p>1. 客制化設計符合底泥/浚泥顆粒分離水力漩流管</p> <p>2. 建立水力漩流分離技術條件、操作程序</p> <p>3. 針對全國性河川底泥的迫切問題提出兼具有經濟效益與可行性之技術。</p> <p>4. 符合EcoPort生態港、GreenPort綠色港口政策，有效分離回用乾淨之浚泥，達成潔淨港灣之發展目標。</p> <p>5. 參與之工作人員可獲得分析研究、分離篩選、漩流管產製、效能驗證等訓練。</p>	<p>1. 水力漩流分離技術可應用於粗細底泥/浚泥顆粒分離。目標粒徑設計在 $63\mu\text{m}$(粗顆粒)，達成 $63\mu\text{m}$ 以上顆粒 80%分離效果。</p> <p>2. 因應台灣各港口需定期疏浚、開採底泥與棄置等法規限制辦法，實務開發有效資源化港灣浚泥之技術應用。</p> <p>3. 培育提升碩士生 2 名、大專生 2 名技術知能，銜接業界應用需求人才。</p> <p>4. 輸出水力漩流系統客制化設計、製作技術，協助東南亞國家處理受污染河川底泥及港灣浚泥，達成新南向政策目標。</p> <p>可轉移技術名稱：底泥粗細顆粒分離技術。</p> <p>可能移轉對象：土壤及地下水整治業、港灣疏濬公司</p>	<p>國內或國際研討會：1 篇 專利：1 篇</p>

4-5 工作進度甘特圖

<div>年月</div> <div>工作項目</div>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	備註
文獻資料蒐集與採樣						※							
基本特性分析													
水力漩流管設計										※			
漩流管客制化製做											※		
水力漩流分離試驗與驗證												※	
處理資料與撰寫報告													
工作進度估計百分比（累積數）	3%	9%	19%	31%	44%	56%	66%	75%	84%	94%	100%		
預定查核點	期中		1. 完成採樣及基本特性分析工作 2. 設計水力漩流管										
	期末		1. 客制化製做漩流管 2. 水力漩流分離試驗與驗證										
說明：													
1、工作項目請視專案性質及需要自行訂定。預定進度以粗線表示其起迄日期。													
2、「工作進度百分比」欄係為配合管考作業所需，累積百分比請視工作性質就以下因素擇一估計訂定：（1）工作天數，（2）經費之分配，（3）工作量之比重，（4）擬達成目標之具體數字。													
3、「預定查核點」，請在條形圖上標明※符號，並在「預定查核點」欄具體註明關鍵性工作要項。													

第五章 結果與討論

5-1 採樣

為了解河川底泥/港池浚泥基本特性，本研究赴彰化農田灌溉渠道採取底泥、高雄港採取航道浚泥(含砂量較高)、碼頭浚泥(含泥量較高)。此外，更額外採取台中農田灌溉渠道底泥進行實驗。採樣過程如圖 5-1～5-3 所示。



圖 5-1 台中農田灌溉渠道底泥



圖 5-2 彰化農田灌溉渠道底泥



圖 5-3 高雄港航道浚泥及碼頭浚泥

5-2 基本特性分析

5-2-1 pH 值

根據行政院環境保護署環境檢驗所公告之氫離子濃度指數(pH 值)測定法 (NIEA R208.02C)測定土壤酸鹼值，其結果如下表 5-1 所示。

表 5-1 河川底泥/港池浚泥樣本 pH 值

地點	pH 值
台中灌溉渠道底泥	5.75±0.02
彰化灌溉渠道底泥	5.45±0.02
高雄(航道浚泥)	6.55±0.02
高雄(碼頭浚泥)	5.35±0.02

土壤酸鹼性共分為 7 級，分級指標如下：4.5 酸性極強；4.5-5.5 強酸性；5.5-6.5 酸性；6.5-7.5 中性；7.5-8.5 鹼性；8.5-9.5 強鹼性；9.5 鹼性極強。上述結果顯示，彰化灌溉渠道底泥屬強酸性、台中灌溉渠道底泥屬酸性、高雄(航道浚泥)屬中性、高雄(碼頭浚泥)屬強酸性。

5-2-2 物理/化學特性

將台中、彰化、高雄三地所採集之灌溉渠道底泥/港池浚泥進行乾篩，各標準篩階層倒出秤取重量，重複以上步驟，使得數據的相對百分比偏差小於 10%，以求得灌溉渠道底泥/港池浚泥樣本之粒徑分布。此外，亦進行 pH 2.88±0.05 及 pH 4.93±0.05 醋酸萃取液 TCLP 分析、微波消化重金屬總量濃度等分析，其結果如表 5-2 所示。

由表中乾篩分析結果可發現，台中、彰化、高雄三地灌溉渠道底泥/港池浚泥經 pH 2.88±0.05 及 pH 4.93±0.05 醋酸萃取，萃出液符合毒性特性溶出程序(TCLP)溶出標準附表四規範，非屬重金屬溶出有害特性。而主要顆粒均分布於>150 μm ，佔 73.6%-99.1%，顯示其落在極粗砂 100-200 μm 範圍。含水率則以高雄碼頭浚泥 46.4%最高、台中灌溉渠道底泥 33.6%與彰化灌溉渠道底泥 33.2%其次、高雄航道浚泥 19.1%最低。其中，臺中段、彰化段均為控制場址。經微波總量消化後所得數據大致符合所述。

表 5-2 灌溉渠道底泥/港池浚泥樣本粒徑、含水率、TCLP 及總量分析結果

檢驗項目	單位	樣品				檢驗方法
		臺中	彰化	高雄(航道浚泥)	高雄(碼頭浚泥)	
粒徑分布						
>150 μm	%	73.6	88.9	99.1	87.9	乾篩分析
63 ~150 μm	%	16.1	6.3	0.9	8.6	
37 ~ 63 μm	%	7.2	2.1	<0.05	2.7	
<37 μm	%	3.1	2.7	<0.05	0.8	
樣本含水率						
含水率	%	33.6	33.2	19.1	46.4	NIEA S280.61C
萃取液 pH 4.93±0.05						
Cd	mg/L	0.32	0.32	0.32	0.32	NIEA R201.14C
Cr	mg/L	0.49	0.49	0.49	0.51	NIEA R201.14C
Cu	mg/L	0.70	0.69	0.69	1.29	NIEA R201.14C
Ni	mg/L	0.45	0.45	0.45	2.52	NIEA R201.14C
Pb	mg/L	ND	ND	ND	ND	NIEA R201.14C
Zn	mg/L	0.52	0.41	0.41	2.65	NIEA R201.14C
As	mg/L	ND	0.011	ND	ND	NIEA R201.14C
萃取液 pH 2.88±0.05						
Cd	mg/L	0.32	0.32	0.32	0.31	NIEA R201.14C
Cr	mg/L	0.49	0.49	0.49	0.56	NIEA R201.14C
Cu	mg/L	1.16	0.70	0.70	3.47	NIEA R201.14C
Ni	mg/L	0.47	0.46	0.46	6.86	NIEA R201.14C
Pb	mg/L	ND	ND	ND	ND	NIEA R201.14C
Zn	mg/L	2.08	0.52	0.44	11.19	NIEA R201.14C
As	mg/L	ND	ND	ND	0.07	NIEA R201.14C
消化總量						
Cd	mg/kg	23.77	29.93	32.1	31.75	NIEA S301.60B
Cr	mg/kg	47.94	75.55	49.3	53.6	NIEA S301.60B
Cu	mg/kg	79.55	118.71	69.2	74.89	NIEA S301.60B
Ni	mg/kg	44.29	62.07	45.6	52.72	NIEA S301.60B
Pb	mg/kg	ND	7.83	ND	ND	NIEA S301.60B
Zn	mg/kg	55.62	144.22	41.6	51.72	NIEA S301.60B
As	mg/kg	3.9	ND	ND	ND	NIEA S301.60B

註1 N.D 表示為小於檢量線最低濃度<0.1mg/L

註2 土壤管制標準值

鎘(Cd) 20 mg/kg(食用作物農地之管制標準值為 5)；鉻(Cr) 250 mg/kg；銅(Cu)

400 mg/kg(食用作物農地之管制標準值為 200)；鎳(Ni) 200 mg/kg；鉛(Pb)

2000 mg/kg(食用作物農地之管制標準值為 500)；鋅(Zn) 2000 mg/kg(食用作物農地之管制標準值為 600)；汞(Hg)20 mg/kg(食用作物農地之管制標準值為 5)；砷(As) 60 mg/kg

再以 X 光螢光分析(X-ray fluorescence spectrometer, XRF) 台中、彰化、高雄三地灌溉渠道底泥/港池浚泥，所得數據如表 5-3 所示，

表 5-3 灌溉渠道底泥/港池浚泥樣本經 X 光螢光分析(XRF)結果

檢驗項目	單位	樣品				備註
		臺中	彰化	高雄(航道浚泥)	高雄(碼頭浚泥)	
原樣						
Cd	mg/kg	ND	ND	ND	ND	
Cr	mg/kg	58	202	50	55	
Cu	mg/kg	716	189	20	64	
Ni	mg/kg	26	321	25	21	
Pb	mg/kg	190	58	7	24	
Zn	mg/kg	1253	395	89	145	
As	mg/kg	6	10	5	7	
> 150 μm						
Cd	mg/kg	ND	ND	ND	ND	
Cr	mg/kg	62	187	53	52	
Cu	mg/kg	1748	192	19	50	
Ni	mg/kg	39	287	19	24	
Pb	mg/kg	1	60	4	11	
Zn	mg/kg	2008	399	84	130	
As	mg/kg	11	12	4	6	
63-150 μm						
Cd	mg/kg	ND	ND	ND	ND	
Cr	mg/kg	63	271	48	52	
Cu	mg/kg	870	274	24	60	
Ni	mg/kg	38	434	21	22	
Pb	mg/kg	217	67	35	31	
Zn	mg/kg	1479	504	83	169	
As	mg/kg	7	13	4	7	
37-63 μm						
Cd	mg/kg	ND	ND	ND	ND	
Cr	mg/kg	57	230	54	60	
Cu	mg/kg	523	167	54	76	
Ni	mg/kg	27	328	25	31	
Pb	mg/kg	149	60	37	54	
Zn	mg/kg	1005	349	144	167	
As	mg/kg	7	12	7	9	
< 37 μm						
Cd	mg/kg	NA	ND	NA	ND	

設計底泥水力漩流器分離顆粒並驗證

Cr	mg/kg	NA	137	NA	58	
Cu	mg/kg	NA	80	NA	133	
Ni	mg/kg	NA	178	NA	35	
Pb	mg/kg	NA	40	NA	371	
Zn	mg/kg	NA	221	NA	272	
As	mg/kg	NA	11	NA	13	

NA: not available; ND: not detected

其中，台中灌溉渠道底泥及高雄(航道浚泥)部分樣本數量不足夠，意即細顆粒少，所以無法測得數據。

5-3 水力漩流分離粗細顆粒物質

5-3-1 流況模擬

本研究利用三維流場模擬軟體 FLUENT 進行水力漩流分離器流場模擬，利用三維的流場模擬解析水力漩流分離器於不同入口速度下的流場特性，並針對水力漩流分離器內部壓力分佈、速度分佈及粒子軌跡圖等進行細部流場分析，分析水力漩流分離器內部運動方式，做為設計參考，模擬時以容積密度(bulk density)1.75 進行模擬。其過程如圖 5-4-圖 5-6 所示。

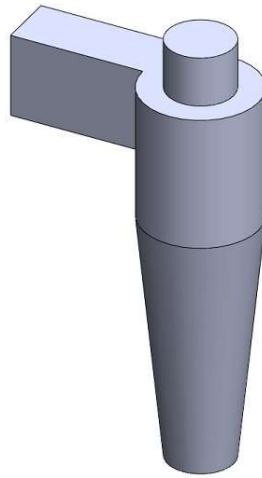


圖 5-4 建構模型

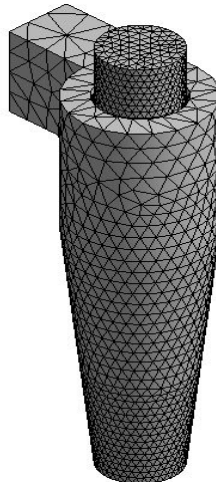


圖 5-5 建立網格

粗細分離

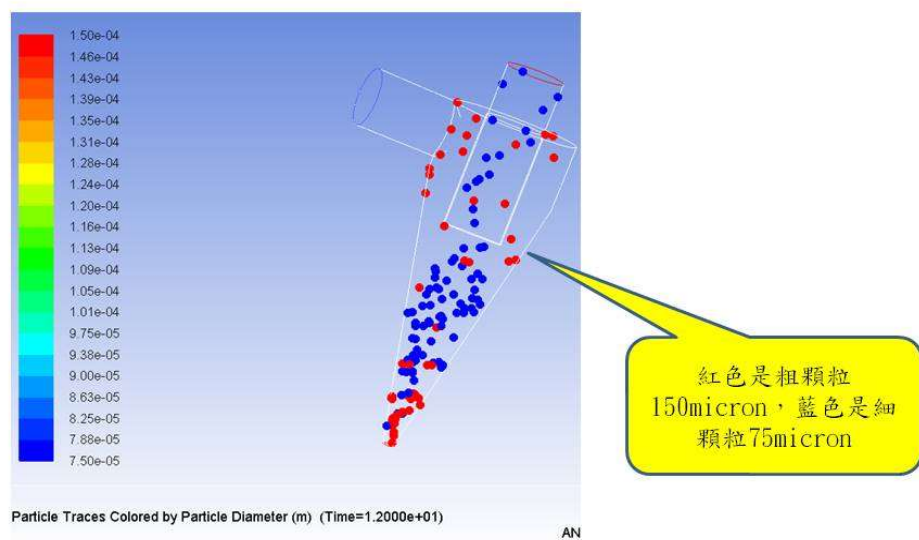


圖 5-6 模擬顆粒運動

5-3-2 水力漩流分離試驗模擬結果

本研究經 Fluent 模擬，不同粒徑顆粒於不同條件下由 overflow、underflow 流出比例，其模擬結果如圖 5-7～圖 5-22 所示。

分離效率 = $\text{overflow 積分面積} / (\text{overflow} + \text{underflow}) \text{積分面積}$

(1) 流速 1m/s 情況下

模擬條件：顆粒大小 $63\mu\text{m}$

分離效率 = $\text{overflow 積分面積} / (\text{overflow} + \text{underflow}) \text{積分面積}$

= $500 / (500 + 2350)$

= 17.5%

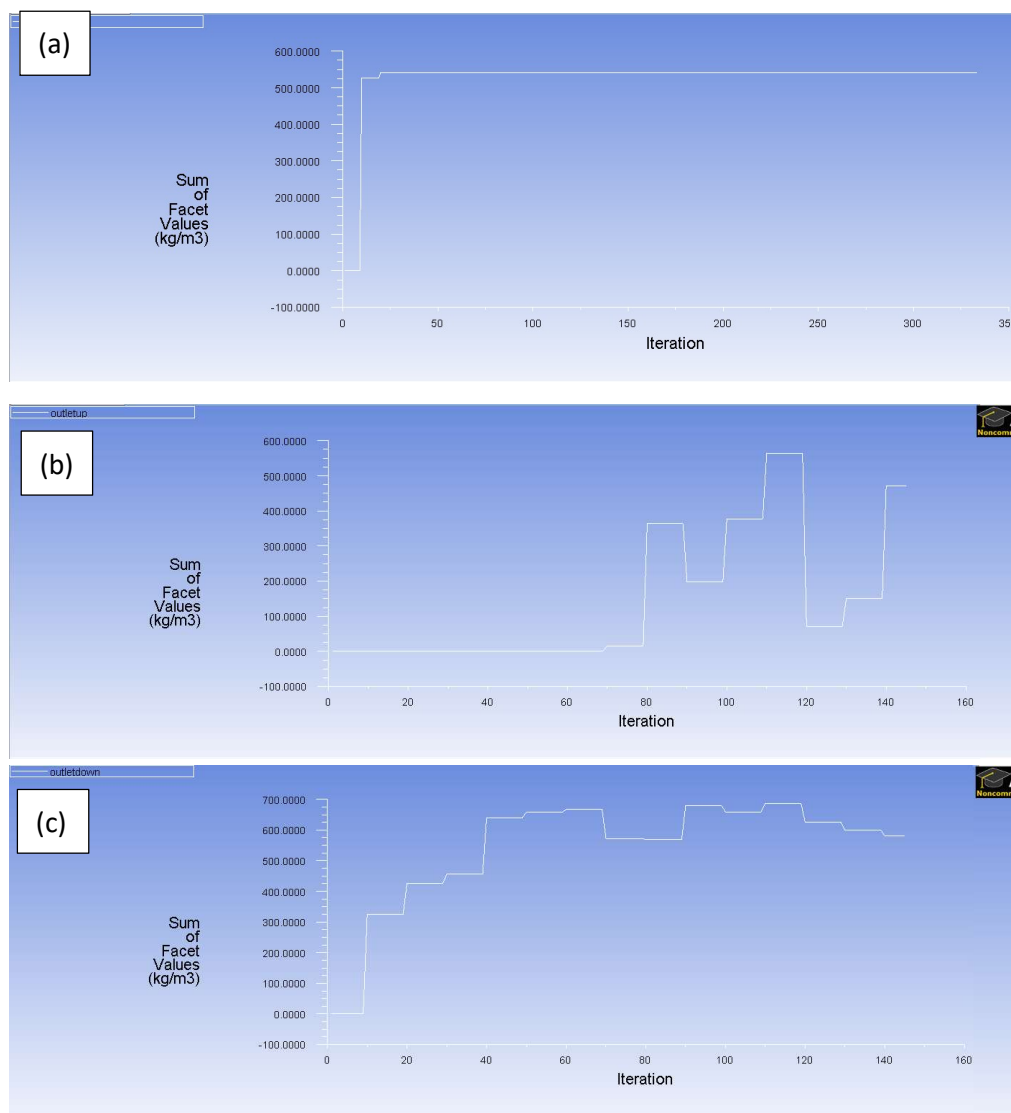


圖 5-7 水力漩流模擬流速 1m/s， $63\mu\text{m}$ 顆粒於 (a) 原樣進流
(b) 細顆粒出流 (c) 粗顆粒出流顆粒分佈情況

模擬條件：顆粒大小 $100\mu\text{m}$

分離效率 = $\text{overflow 積分面積} / (\text{overflow} + \text{underflow}) \text{積分面積}$
= $1650 / (1650 + 3100) = 34.7\%$

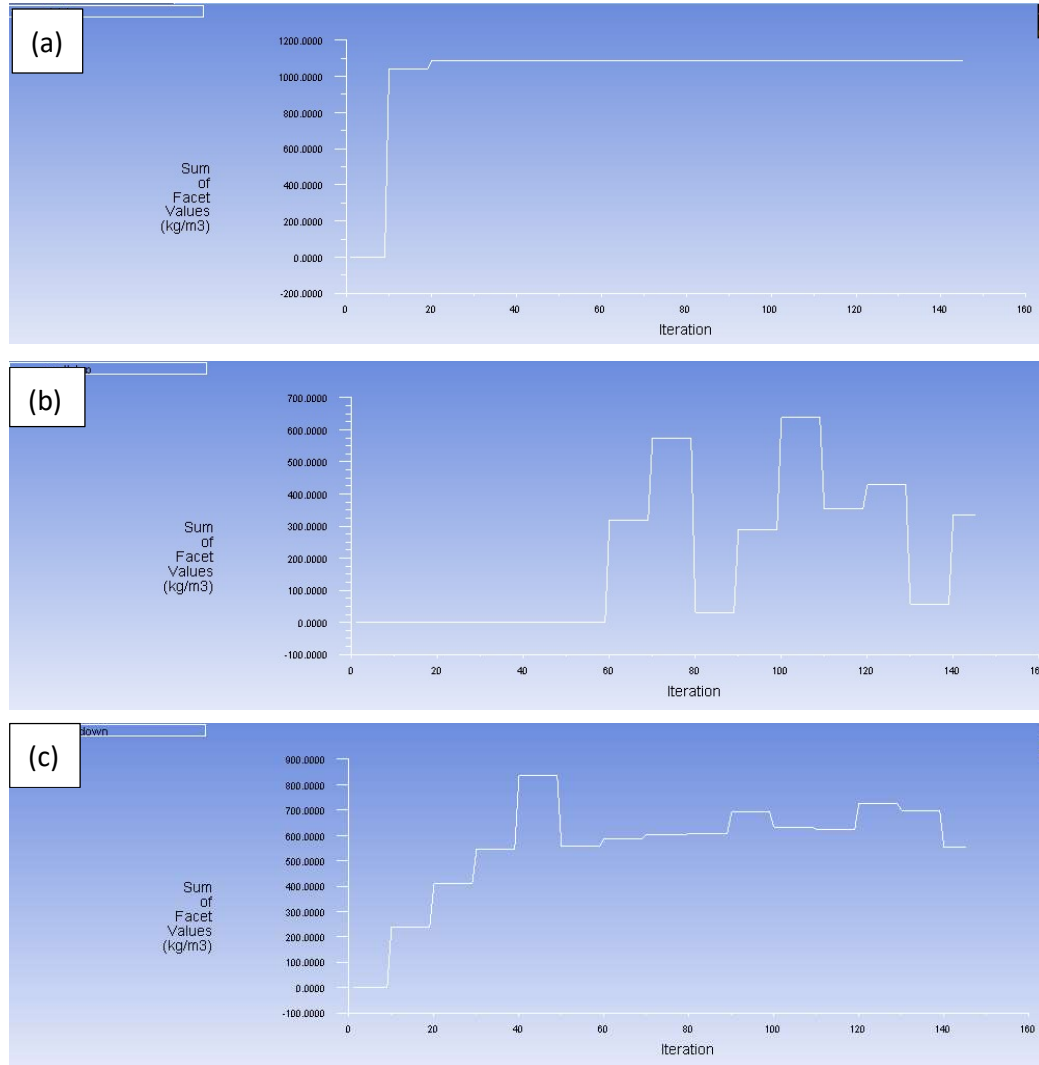


圖 5-8 水力漩流模擬流速 1m/s ， $100\mu\text{m}$ 顆粒於 (a)原樣進流
(b)細顆粒出流(c)粗顆粒出流顆粒分佈情況

模擬條件：200 μm

$$\begin{aligned} \text{分離效率} &= \text{overflow 積分面積} / (\text{overflow} + \text{underflow}) \text{積分面積} \\ &= 400 / (400 + 400) = 50.0\% \end{aligned}$$

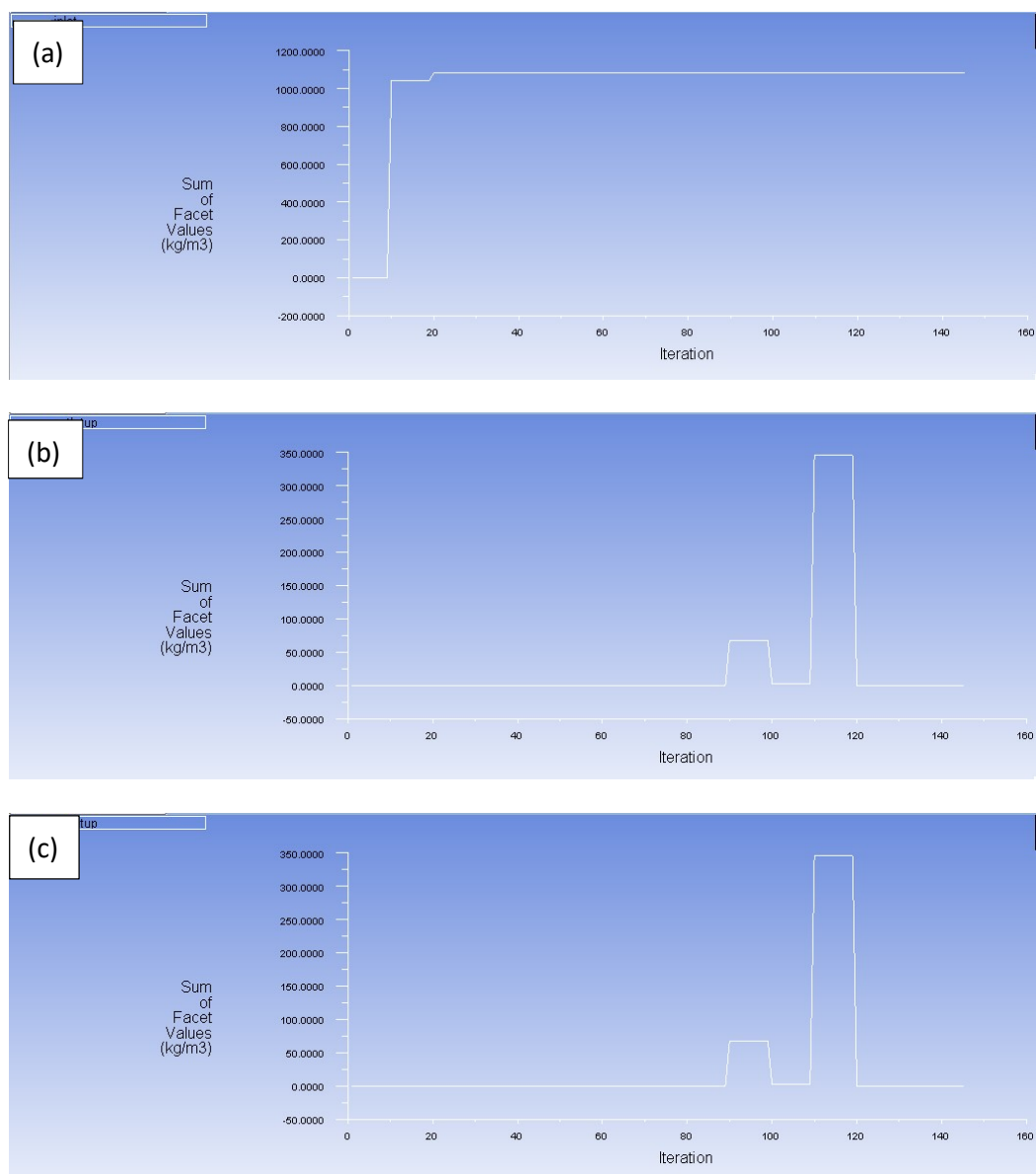


圖 5-9 水力漩流模擬流速 1m/s，200 μm 顆粒於 (a)原樣進流
(b)細顆粒出流(c)粗顆粒出流顆粒分佈情況

模擬條件：顆粒大小 $300\ \mu\text{m}$

$$\begin{aligned}\text{分離效率} &= \text{overflow 積分面積} / (\text{overflow} + \text{underflow}) \text{積分面積} \\ &= 0 / (0 + 2700) = 0\%\end{aligned}$$

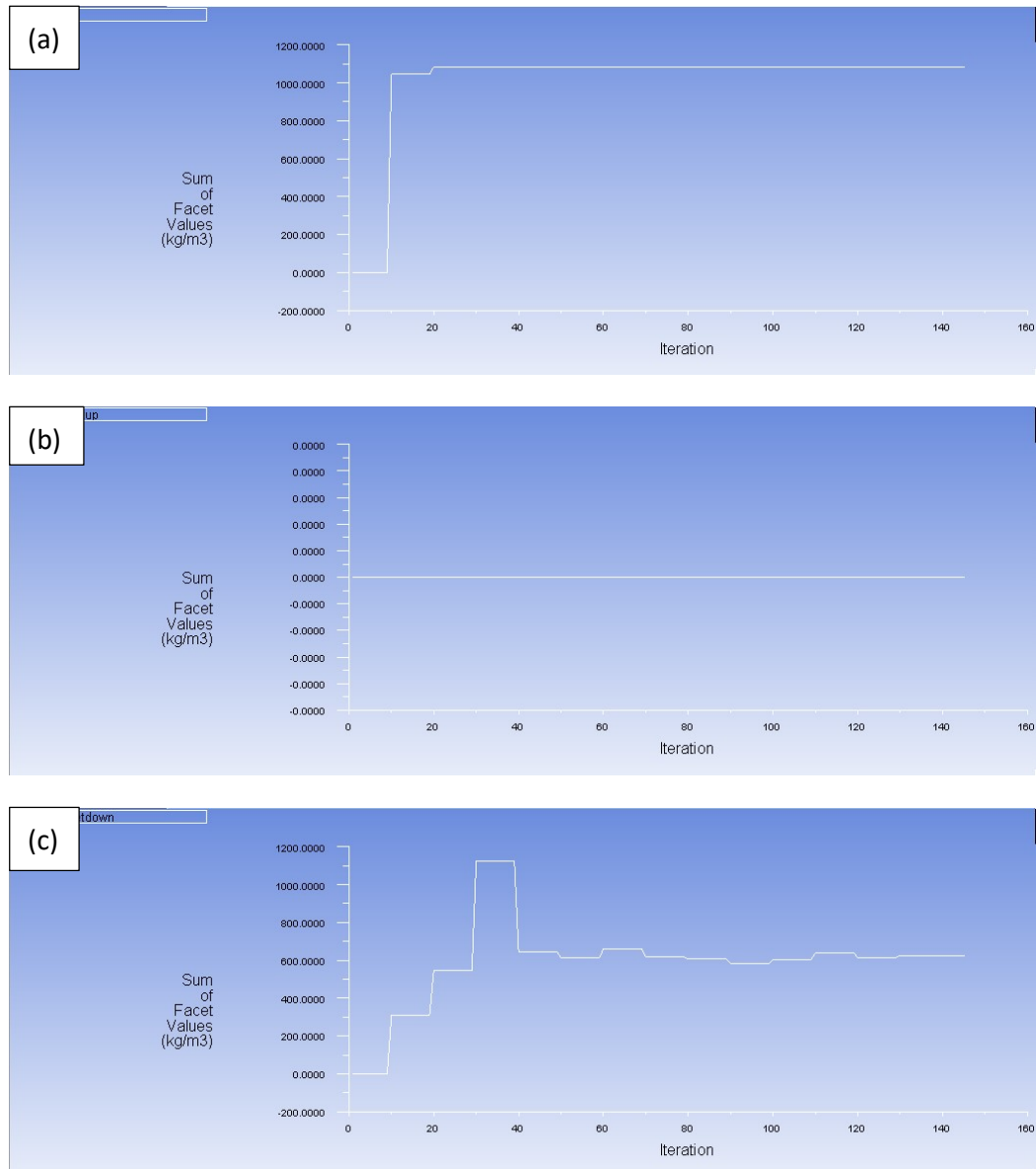


圖 5-10 水力漩流模擬流速 1m/s ， $300\ \mu\text{m}$ 顆粒於 (a)原樣進流
(b)細顆粒出流(c)粗顆粒出流顆粒分佈情況

(2) 流速 2m/s 情況下

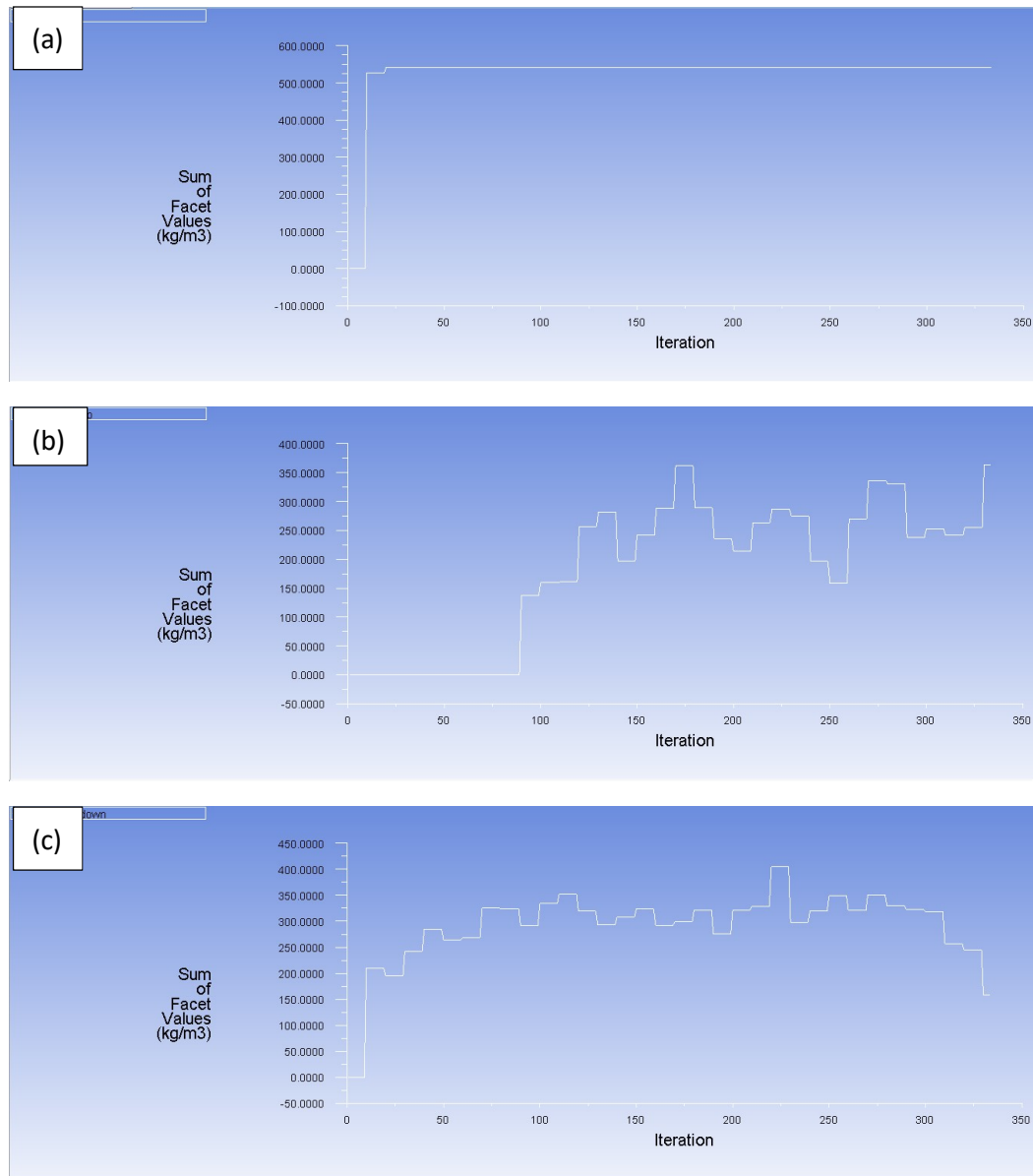
模擬條件：顆粒大小 $63\mu\text{m}$ 分離效率 = $\text{overflow 積分面積} / (\text{overflow} + \text{underflow}) \text{積分面積}$ $= 925 / (925 + 1400)$ $= 39.8\%$ 

圖 5-11 水力漩流模擬流速 2m/s， $63\mu\text{m}$ 顆粒於 (a)原樣進流
(b)細顆粒出流(c)粗顆粒出流顆粒分佈情況

模擬條件：顆粒大小 $100\ \mu\text{m}$

分離效率 = $\text{overflow 積分面積} / (\text{overflow} + \text{underflow}) \text{積分面積}$
= $850 / (850 + 1425) = 37.4\%$

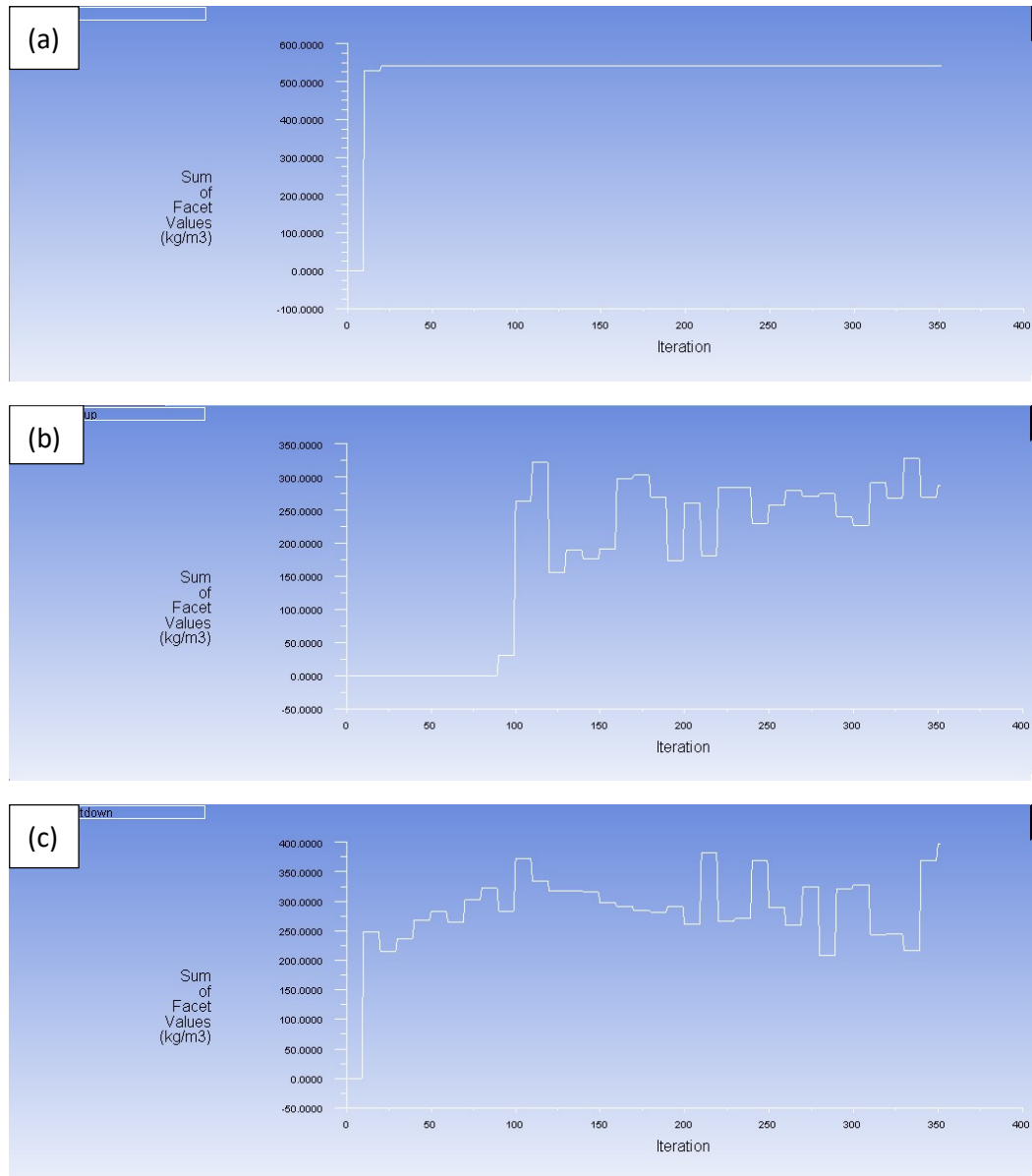


圖 5-12 水力漩流模擬流速 2m/s ，顆粒大小 $100\ \mu\text{m}$ 條件下，
(a)原樣進流(b)細顆粒出流(c)粗顆粒出流顆粒分佈情況

模擬條件：顆粒大小 $200\ \mu\text{m}$

分離效率 = $\text{overflow 積分面積} / (\text{overflow} + \text{underflow}) \text{積分面積}$
 $= 925 / (925 + 1450) = 38.9\%$

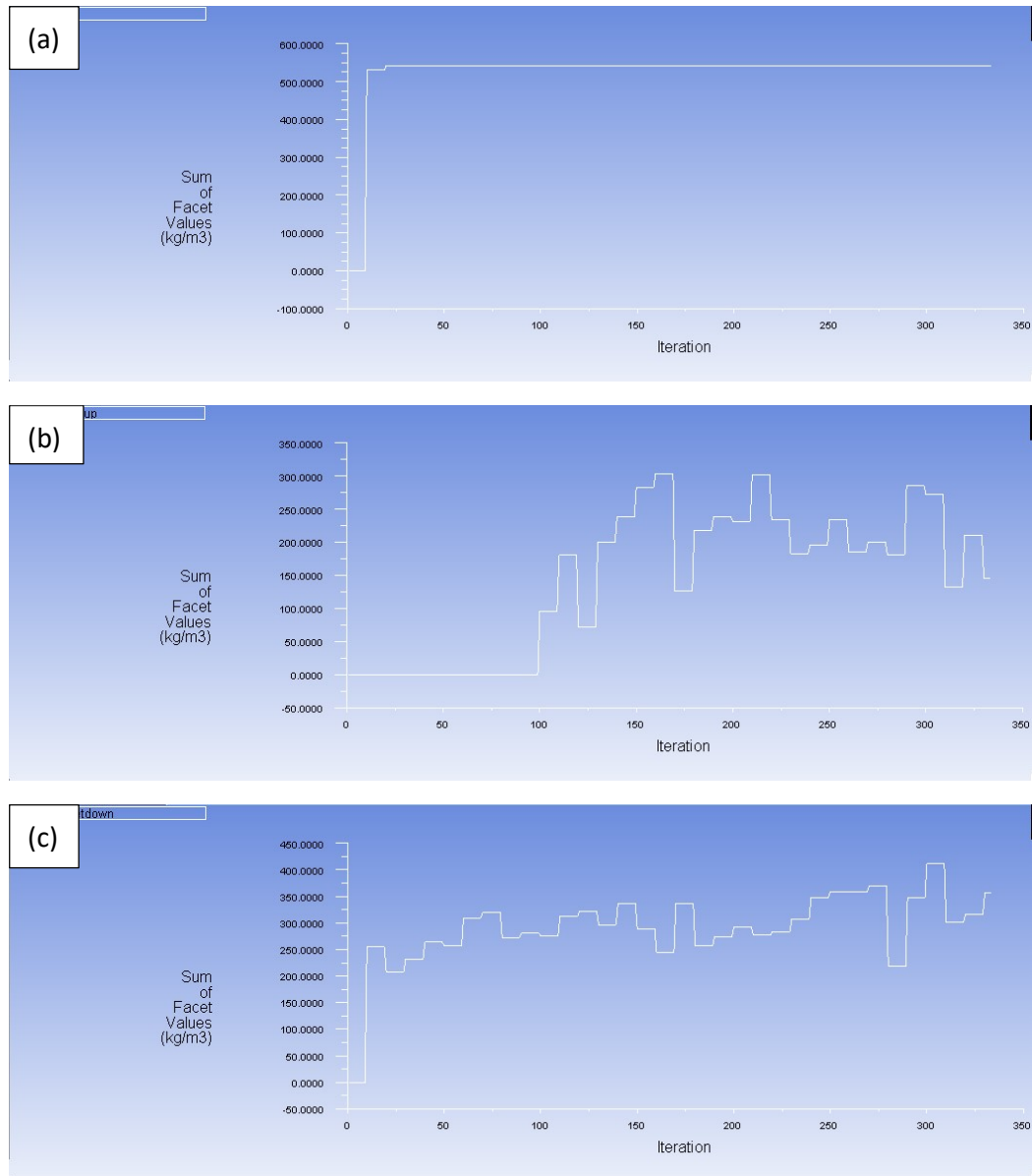


圖 5-13 水力漩流模擬流速 2m/s ， $200\ \mu\text{m}$ 顆粒於 (a)原樣進流
 (b)細顆粒出流(c)粗顆粒出流顆粒分佈情況

模擬條件：顆粒大小 $300\ \mu\text{m}$

$$\begin{aligned}\text{分離效率} &= \text{overflow 積分面積} / (\text{overflow} + \text{underflow}) \text{積分面積} \\ &= 925 / (925 + 1300) = 41.6\%\end{aligned}$$

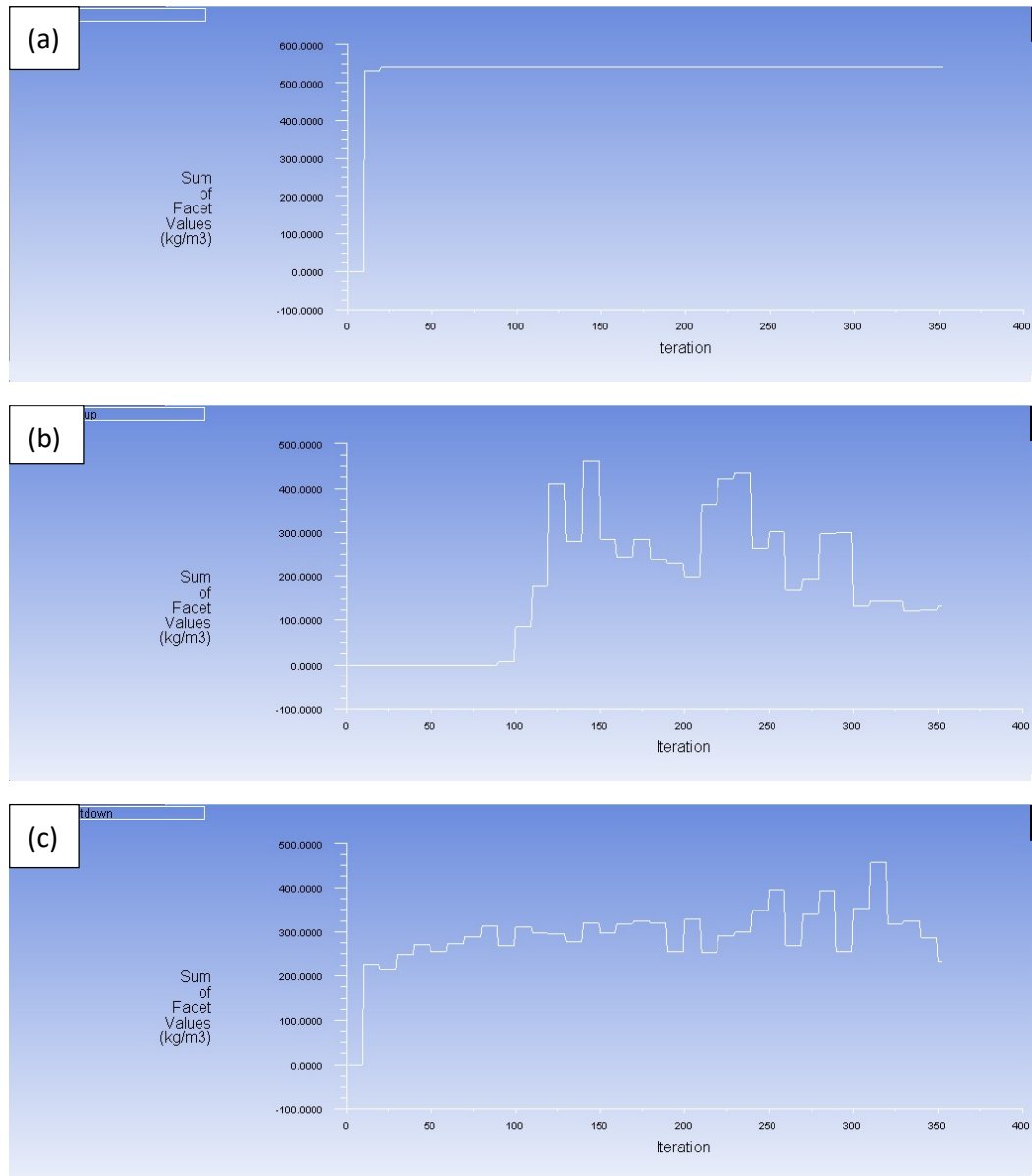


圖 5-14 水力漩流模擬流速 2m/s ， $300\ \mu\text{m}$ 顆粒於 (a)原樣進流
(b)細顆粒出流(c)粗顆粒出流顆粒分佈情況

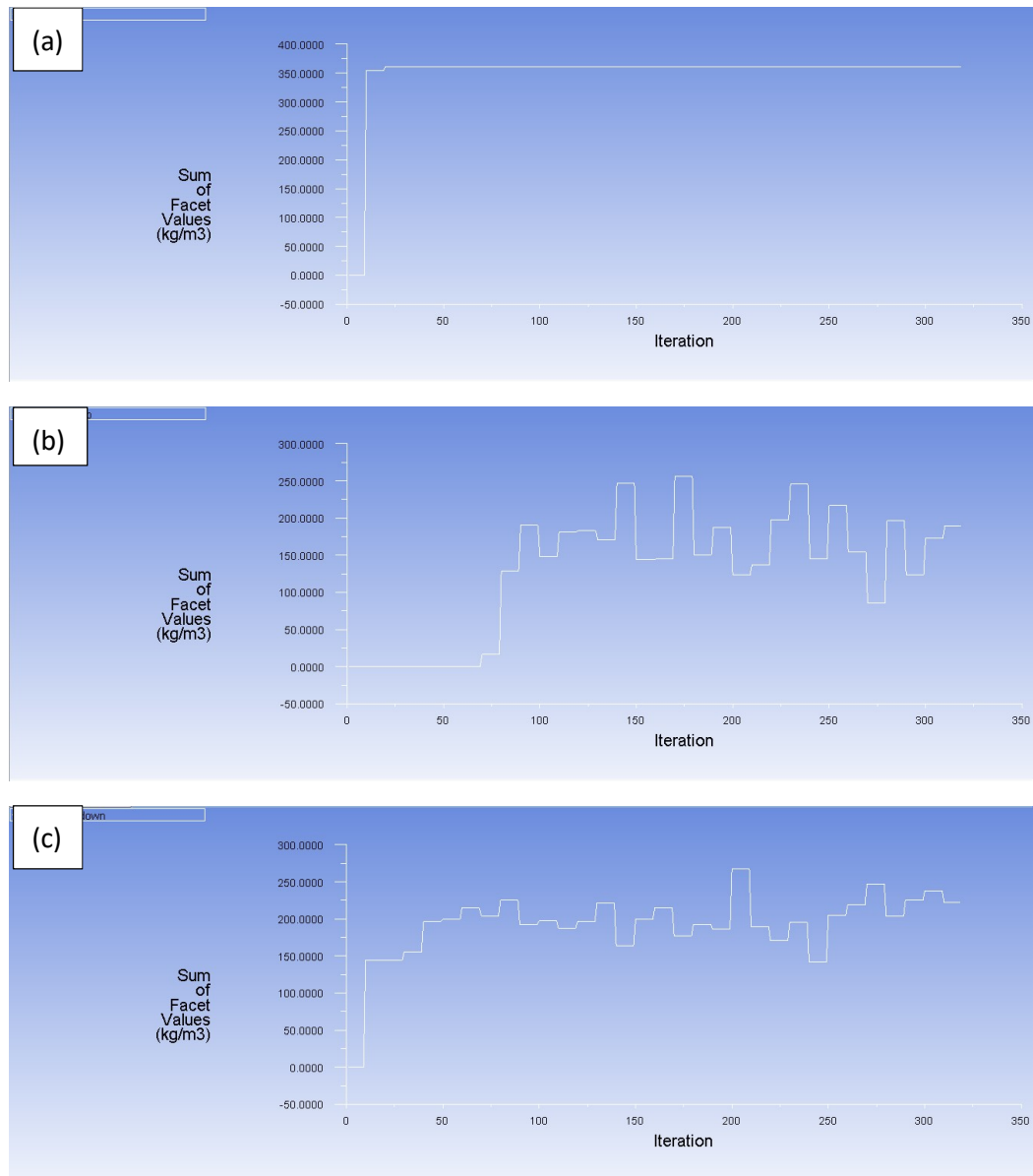
(3) 流速 3m/s 情況下模擬條件：顆粒大小 $63\mu\text{m}$ 分離效率 = $\text{overflow 積分面積} / (\text{overflow} + \text{underflow}) \text{積分面積}$ $= 650 / (650 + 825)$ $= 44\%$ 

圖 5-15 水力漩流模擬流速 3m/s， $63\mu\text{m}$ 顆粒於 (a)原樣進流
(b)細顆粒出流(c)粗顆粒出流顆粒分佈情況

模擬條件：顆粒大小 $100\ \mu\text{m}$

分離效率 = $\text{overflow 積分面積} / (\text{overflow} + \text{underflow}) \text{積分面積}$
= $825 / (825 + 900) = 47.8\%$

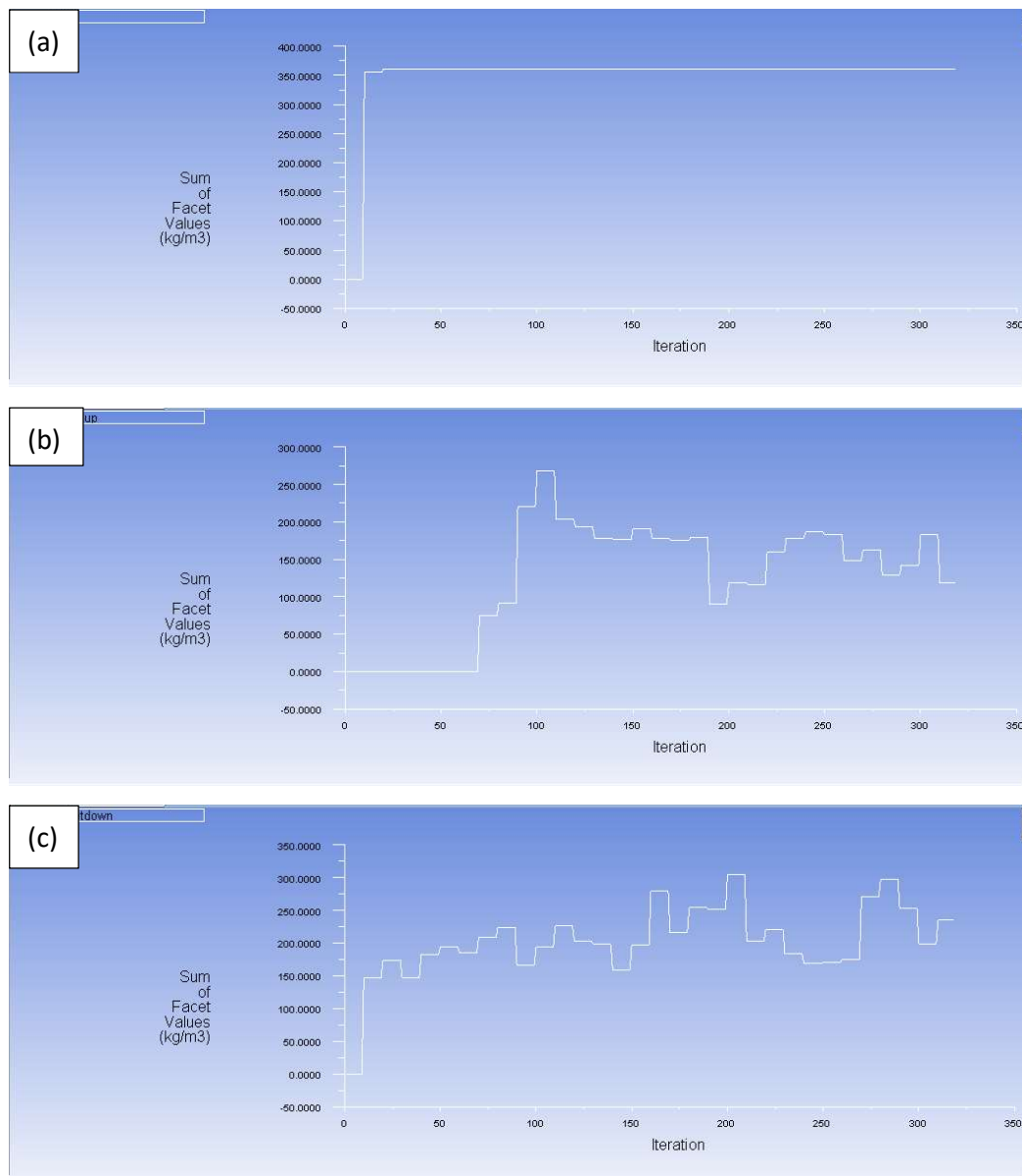


圖 5-16 水力漩流模擬流速 3m/s ， $100\ \mu\text{m}$ 顆粒於(a)原樣進流
(b)細顆粒出流(c)粗顆粒出流顆粒分佈情況

模擬條件：顆粒大小 $200\ \mu\text{m}$

分離效率 = $\text{overflow 積分面積} / (\text{overflow} + \text{underflow}) \text{積分面積}$
 $= 725 / (725 + 1275) = 36.3\%$

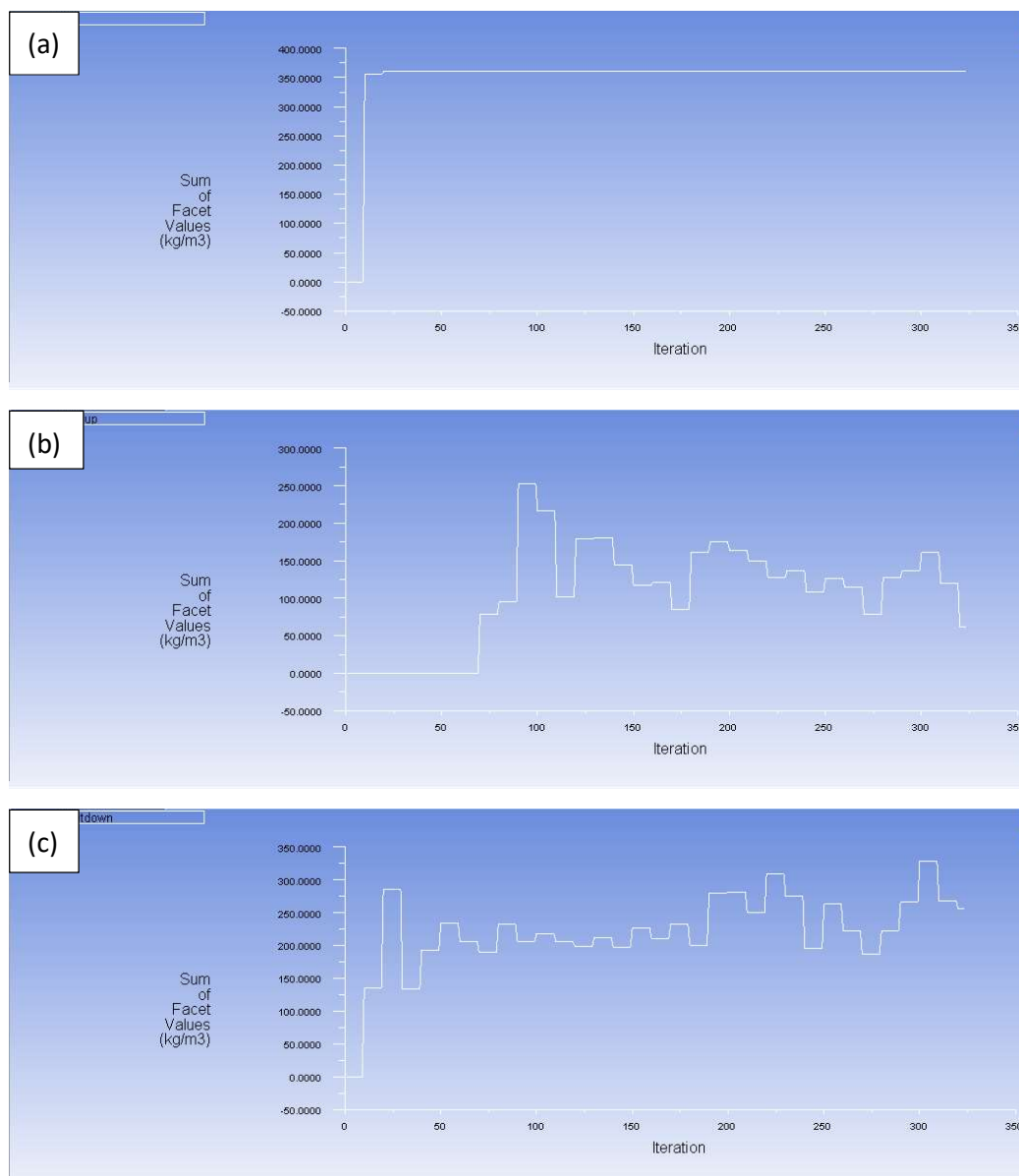


圖 5-17 水力漩流模擬流速 3m/s ， $200\ \mu\text{m}$ 顆粒於 (a)原樣進流
 (b)細顆粒出流(c)粗顆粒出流顆粒分佈情況

模擬條件：顆粒大小 $300\ \mu\text{m}$

分離效率 = $\text{overflow 積分面積} / (\text{overflow} + \text{underflow}) \text{積分面積}$
= $575 / (575 + 1250) = 31.5\%$

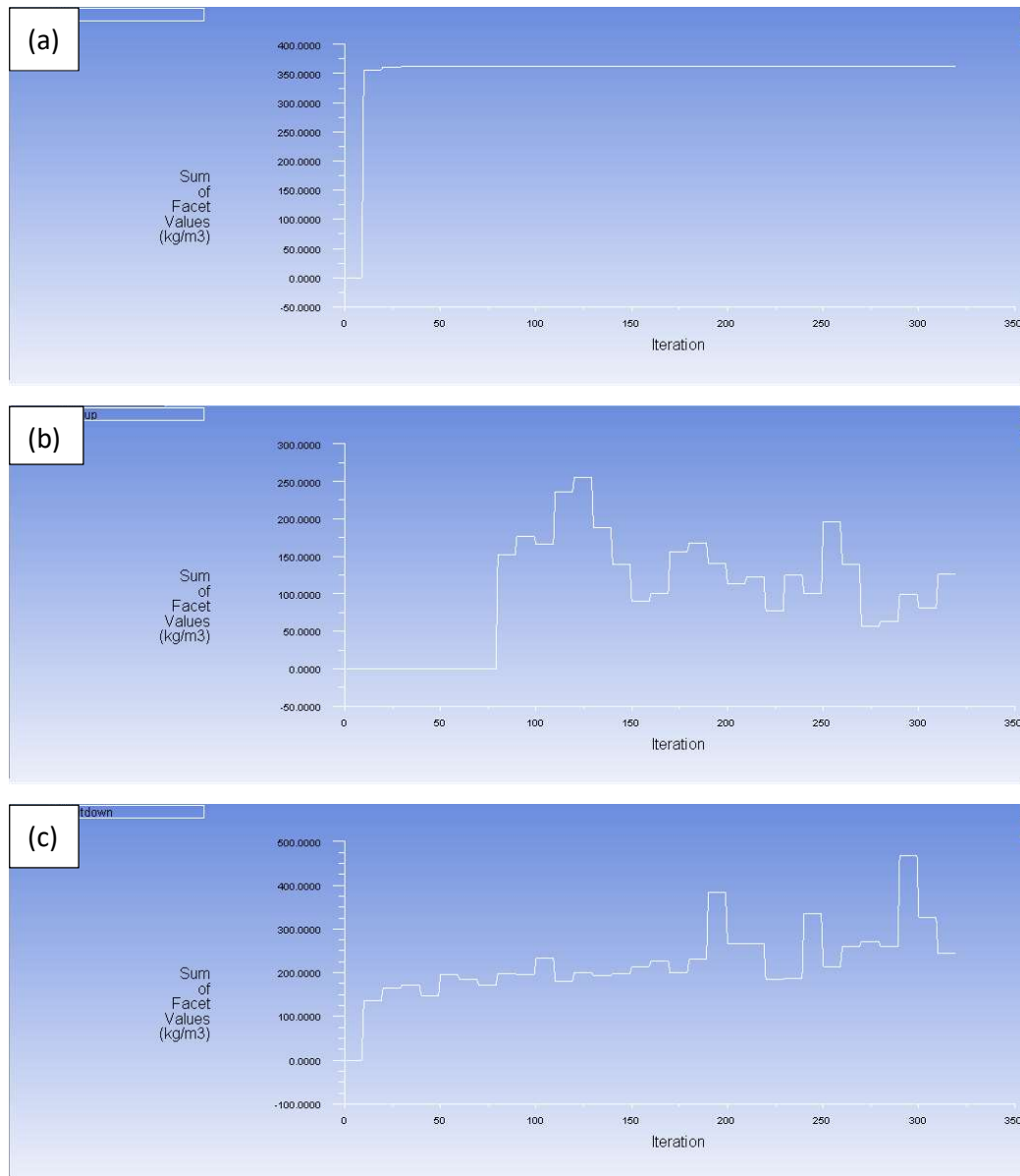


圖 5-18 水力漩流模擬流速 3m/s ， $300\ \mu\text{m}$ 顆粒於 (a)原樣進流
(b)細顆粒出流(c)粗顆粒出流顆粒分佈情況

(4) 流速 4m/s 情況下

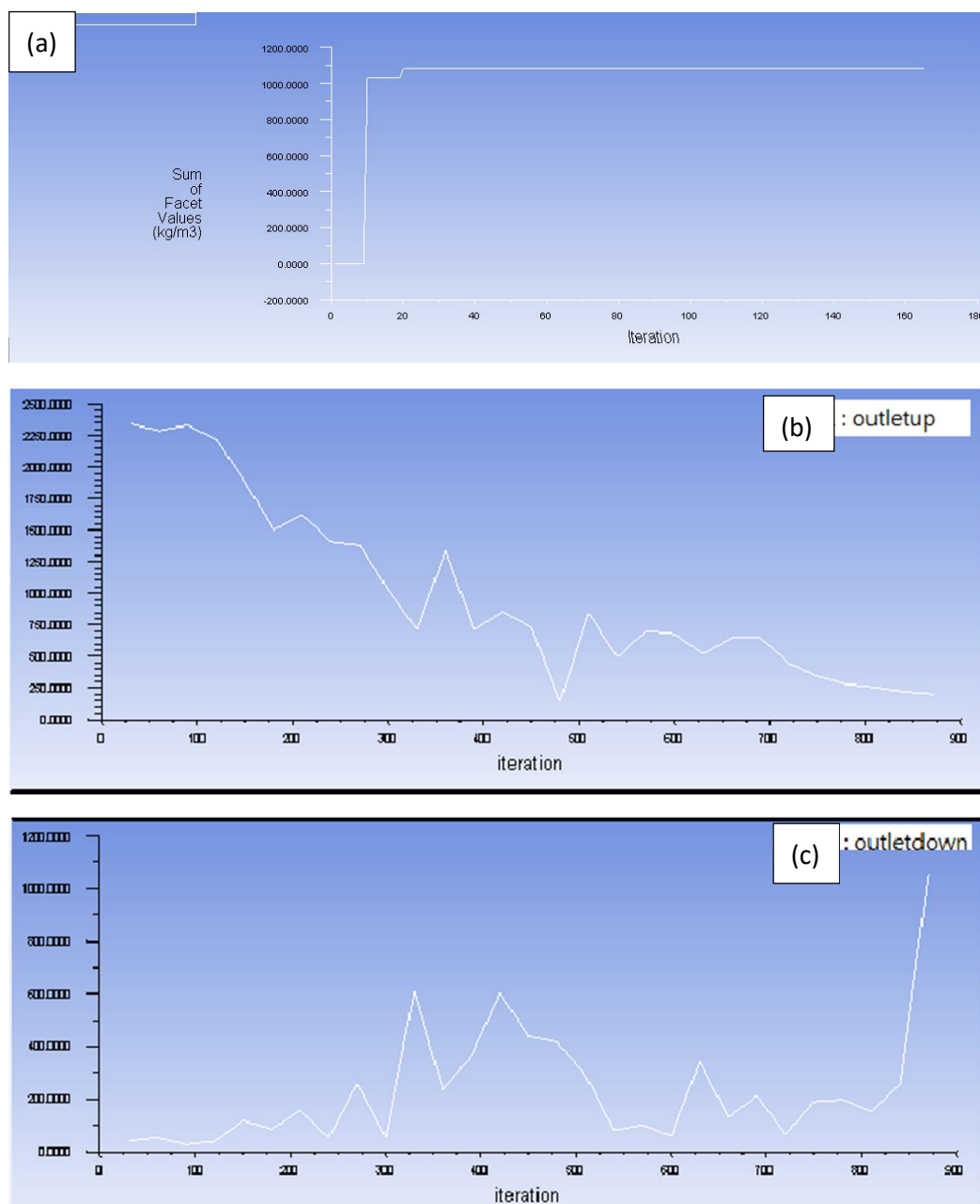
模擬條件：顆粒大小 $63\mu\text{m}$ 分離效率 = $\text{overflow 積分面積} / (\text{overflow} + \text{underflow}) \text{積分面積}$ $= 6900 / (6900 + 1500)$ $= 82.1\%$ 

圖 5-19 水力漩流模擬流速 4m/s， $63\mu\text{m}$ 顆粒於 (a)原樣進流
(b)細顆粒出流(c)粗顆粒出流顆粒分佈情況

模擬條件：顆粒大小 $100\mu\text{m}$

分離效率 = $\frac{\text{overflow 積分面積}}{(\text{overflow} + \text{underflow}) \text{積分面積}}$
= $\frac{600}{(600+165)} = 78.4\%$

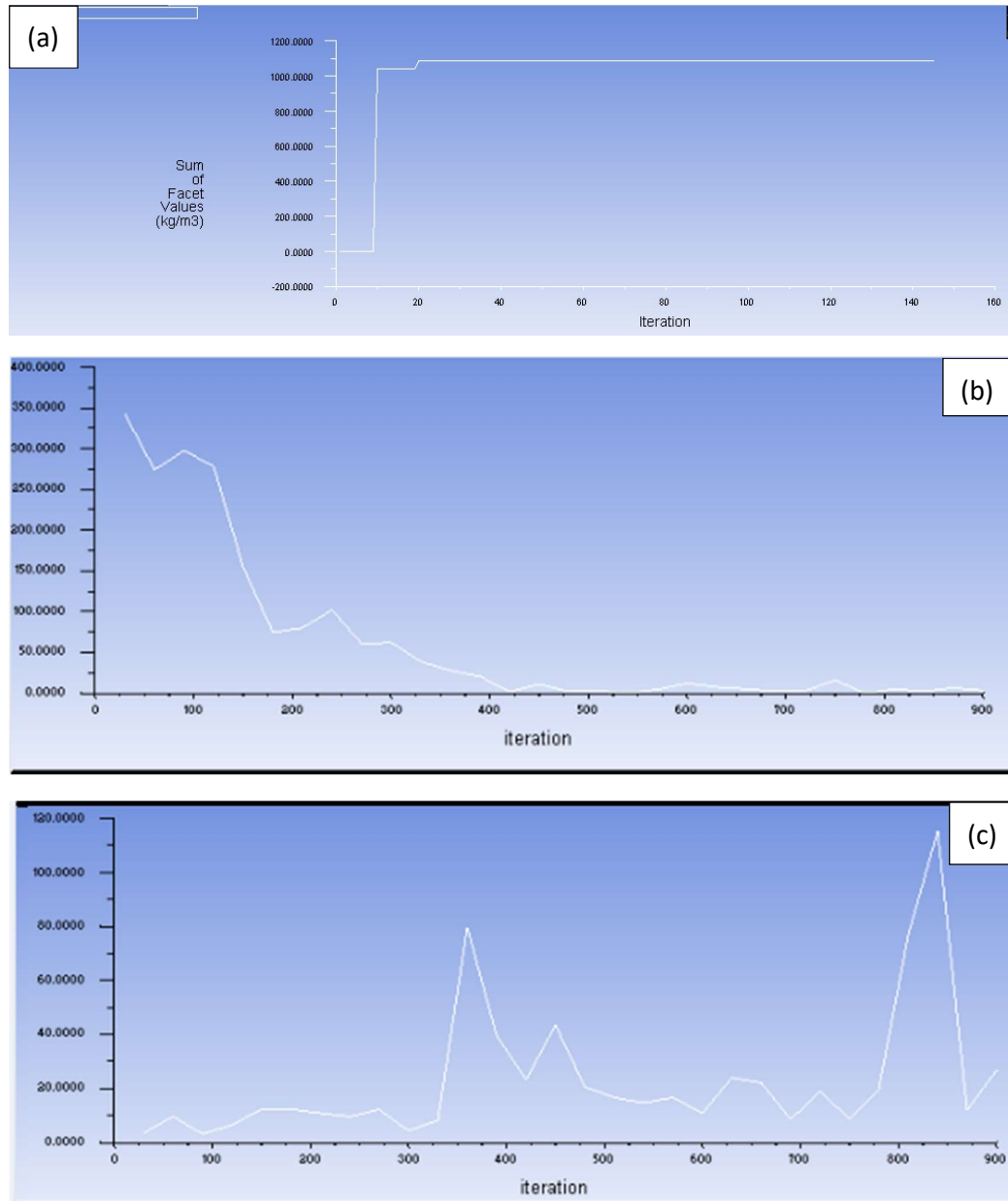


圖 5-20 水力漩流模擬流速 4m/s ， $100\mu\text{m}$ 顆粒於 (a)原樣進流
(b)細顆粒出流(c)粗顆粒出流顆粒分佈情況

模擬條件：顆粒大小 $200\mu\text{m}$

分離效率 = $\text{overflow 積分面積} / (\text{overflow} + \text{underflow}) \text{積分面積}$
 $= 2700 / (2700 + 1600) = 62.8\%$

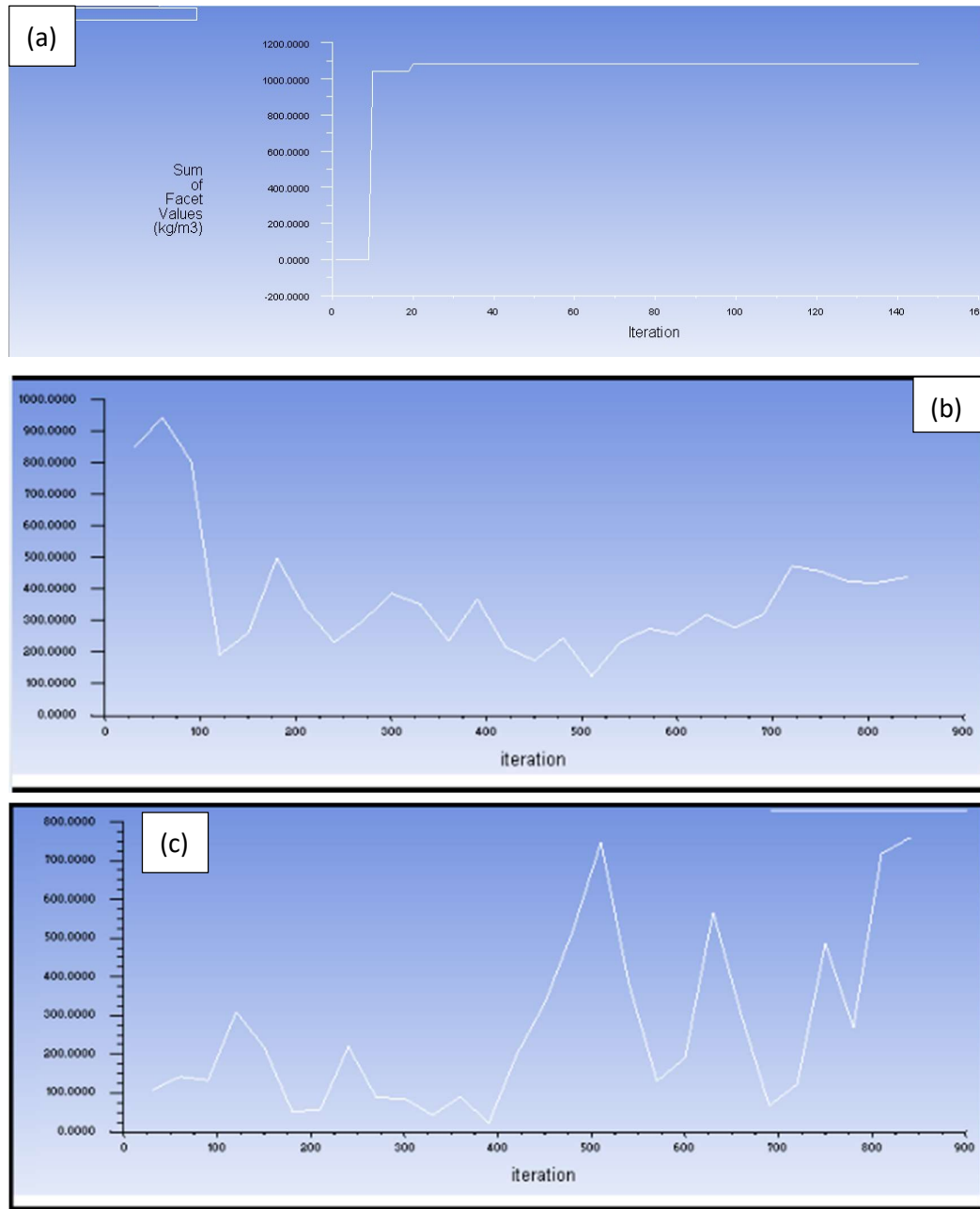


圖 5-21 水力漩流模擬流速 4m/s ， $200\mu\text{m}$ 顆粒於 (a) 原樣進流
 (b) 細顆粒出流 (c) 粗顆粒出流顆粒分佈情況

模擬條件：顆粒大小 $300\mu\text{m}$

分離效率 = $\text{overflow 積分面積} / (\text{overflow} + \text{underflow}) \text{積分面積}$

= $2500 / (2500 + 1350) = 64.9\%$

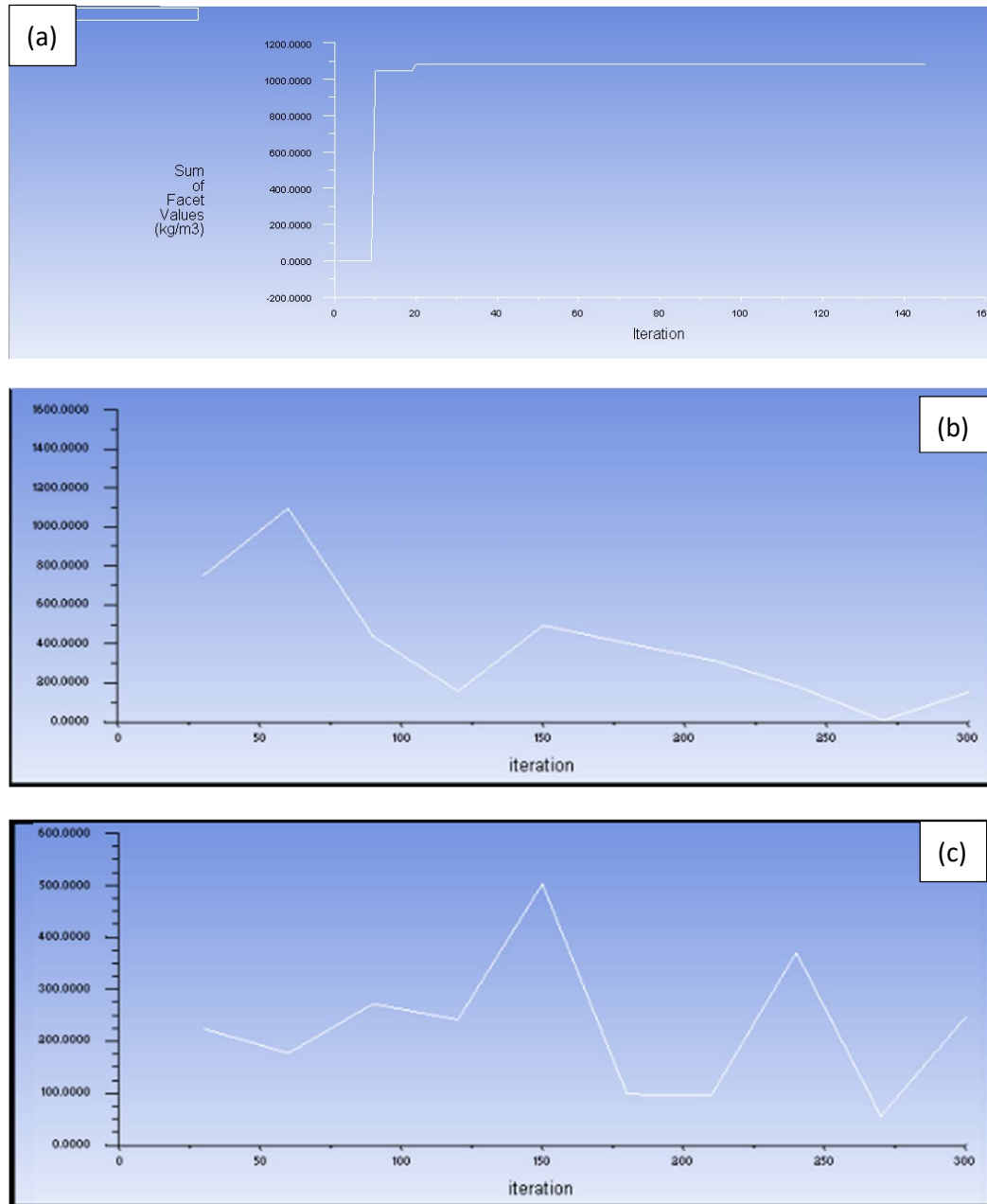


圖 5-22 水力漩流模擬流速 4m/s ， $300\mu\text{m}$ 顆粒於 (a)原樣進流
(b)細顆粒出流(c)粗顆粒出流顆粒分佈情況

(5) 最佳模擬條件

歷經數十次模擬，改變水力漩流器入口直徑、入口速度、底部出口直徑、管徑、下部管長等條件，得到可分離 $63\mu\text{m}$ 顆粒最佳模擬條件為：

- 入口直徑 75mm(3inch)
- 入口速度 4m/s
- 底部出口直徑 33mm
- 管徑 156mm
- 下部管長 440mm

外觀如圖 5-23；不同粒徑顆粒分離效能如表 5-4 所示。

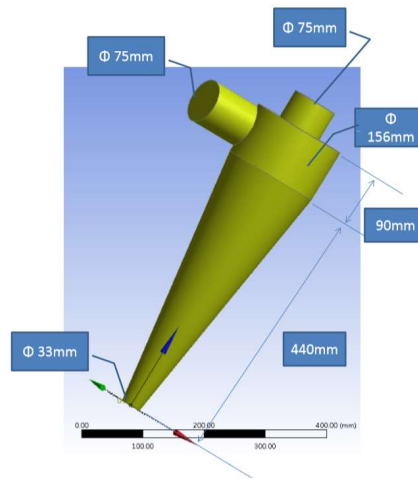


圖 5-23 最佳模擬條件下水力漩流器圖

表 5-4 最佳模擬條件下，不同粒徑顆粒分離效能

粒徑 (μm)	入口速度 (m/s)	Overflow Underflow 出流比例	備註
63	4	6900/8400=82.1% 1500/8400=17.9%	
100	4	600/765=78.4% 165/765=21.6%	
200	4	2700/4300=62.8% 1600/4300=37.2%	
300	4	2500/3850=64.9% 1350/3850=35.1	

遂以此為設計基準，以不鏽鋼材質製作水力漩流管，並進行後續驗證試驗。

5-3-3 水力漩流器分離試驗驗證

(1) 台中灌溉渠道底泥

台中灌溉渠道底泥，於入口速度 4m/s 條件下進行水力漩流分離；overflow 所得乾泥重 10.57 kg，underflow 所得乾泥重 15.24 kg。雷射粒徑分析如圖 5-24 所示。

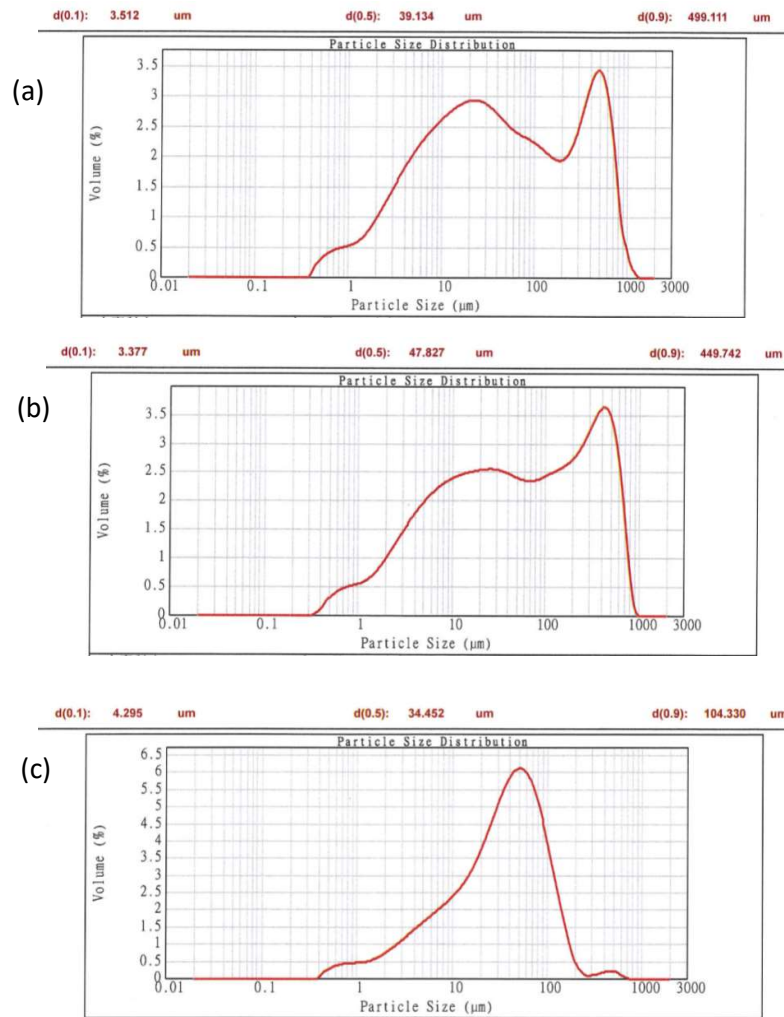


圖 5-24 台中灌溉渠道底泥於入口速度 4m/s 條件下分離之(a)原樣 (b)underflow (c) overflow 雷射粒徑分析

由圖中可發現，台中灌溉渠道底泥經 4m/s 流速條件分離，於 overflow 中大顆粒所佔比例非常低，計算各粒徑分離效率如下，

a. 小於 63 μm 顆粒分離效率 = $\text{overflow}/(\text{overflow} + \text{underflow})$

$$= \frac{275.6}{770.8} \times 10.57\text{kg} / \left(\frac{275.6}{770.8} \times 10.57\text{kg} + \frac{145.8}{2286.9} \times 15.24\text{kg} \right) \times 100\%$$

$$= 78.0\%$$

接近設計值 63 μm 顆粒 80% 分離效率。貼近實場處理上，先將細顆粒 (63 μm 以下 或 75 μm 以下) 分離出來之所需。

b. 小於 100 μm 顆粒分離效率 = $\text{overflow}/(\text{overflow} + \text{underflow})$

$$= \frac{513.1}{770.8} \times 10.57\text{kg} / \left(\frac{513.1}{770.8} \times 10.57\text{kg} + \frac{259.1}{2286.9} \times 15.24\text{kg} \right) \times 100\%$$

$$= 80.3\%$$

c. 小於 200 μm 顆粒分離效率 = $\text{overflow}/(\text{overflow} + \text{underflow})$

$$= \frac{693.5}{770.8} \times 10.57\text{kg} / \left(\frac{693.5}{770.8} \times 10.57\text{kg} + \frac{534.1}{2286.9} \times 15.24\text{kg} \right) \times 100\%$$

$$= 72.6\%$$

d. 小於 300 μm 顆粒分離效率 = $\text{overflow}/(\text{overflow} + \text{underflow})$

$$= \frac{709.8}{770.8} \times 10.57\text{kg} / \left(\frac{709.8}{770.8} \times 10.57\text{kg} + \frac{870.3}{2286.9} \times 15.24\text{kg} \right) \times 100\%$$

$$= 62.7\%$$

將模擬值與實驗所得分離效率製圖如圖 5-25，可發現除 200 μm 顆粒外，分離效率接近。

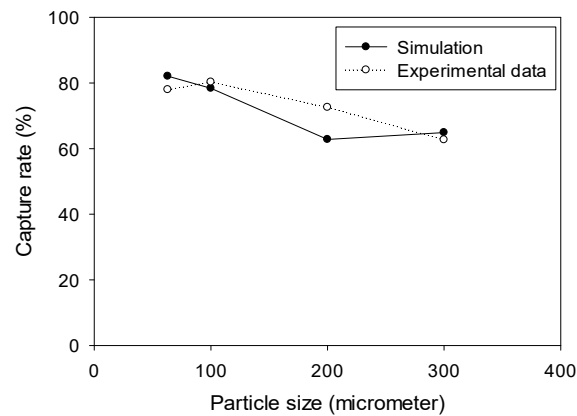


圖 5-25 最佳模擬條件下，台中灌溉渠道底泥中不同粒徑顆粒分離效率模擬值與實驗值

再將經水力漩流分離之台中灌溉渠道底泥進行重金屬 XRF 分析，其結果如下表 5-5 所示，

表 5-5 台中灌溉渠道底泥於入口速度 4m/s 條件下分離之(a)原樣 (b)underflow (c) overflow 之 XRF 分析

檢驗項目	單位	樣品		
		原樣	underflow	overflow
Cd	mg/kg	ND	ND	ND
Cr	mg/kg	80	85	71
Cu	mg/kg	598	651	727
Ni	mg/kg	17	15	13
Pb	mg/kg	180	182	206
Zn	mg/kg	1008	1095	1146
As	mg/kg	14.3	11.9	12.3

Cd ND < 4.6 mg/kg

由表中可看出，overflow 細顆粒約略較 underflow 粗顆粒含略高量重金屬。

(2) 彰化灌溉渠道底泥

彰化灌溉渠道底泥，於入口速度 4m/s 條件下進行分離；overflow 所得乾泥重 6.38 kg，underflow 所得乾泥重 19.07 kg。雷射粒徑分析如圖 5-26 所示。

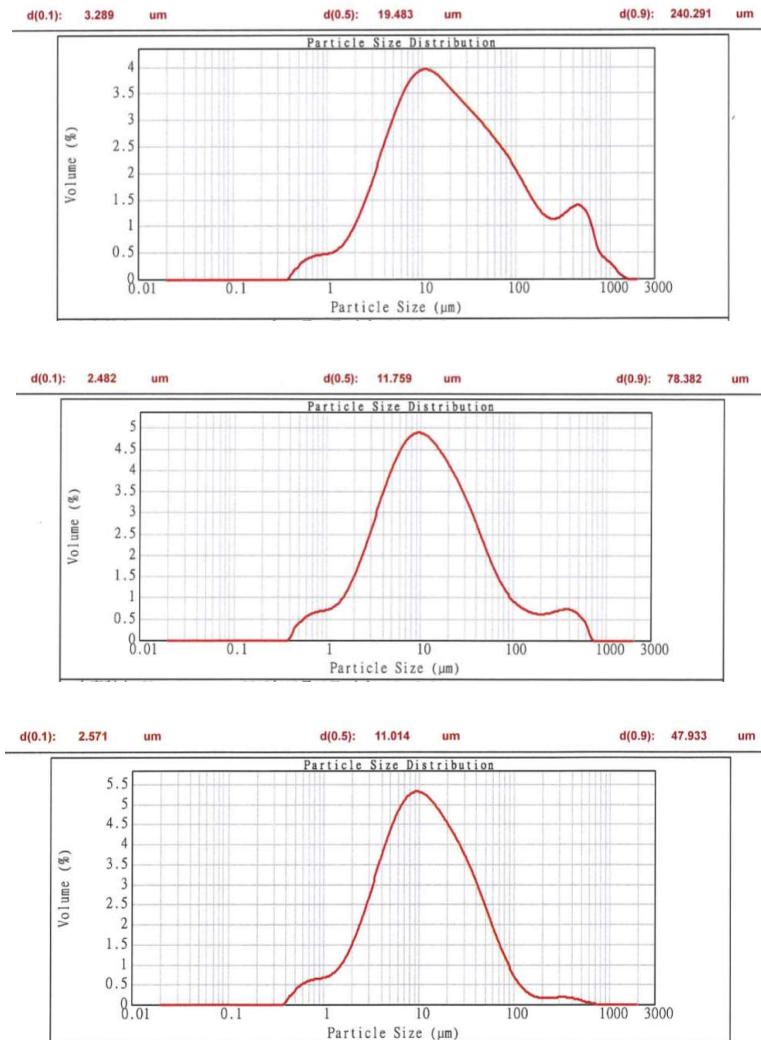


圖 5-26 彰化灌溉渠道底泥於入口速度 4m/s 條件下分離之(a)原樣 (b)underflow (c) overflow 雷射粒徑分析

計算其分離效率如下，

$$\begin{aligned}
 & \text{a. 小於 } 63\mu\text{m 顆粒分離效率} = \text{overflow} / (\text{overflow} + \text{underflow}) \\
 & = \frac{202.5}{340.1} \times 6.38\text{kg} / \left(\frac{202.5}{340.1} \times 6.38\text{kg} + \frac{198.7}{621.8} \times 19.07\text{kg} \right) \times 100\% \\
 & = 38.4\%
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{b. 小於 } 100\mu\text{m 顆粒分離效率} = \text{overflow}/(\text{overflow} + \text{underflow}) \\ & = \frac{255.5}{340.1} \times 6.38\text{kg} / \left(\frac{255.5}{340.1} \times 6.38\text{kg} + \frac{255.1}{621.8} \times 19.07\text{kg} \right) \times 100\% \\ & = 38.0\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{c. 小於 } 200\mu\text{m 顆粒分離效率} = \text{overflow}/(\text{overflow} + \text{underflow}) \\ & = \frac{285.3}{340.1} \times 6.38\text{kg} / \left(\frac{285.3}{340.1} \times 6.38\text{kg} + \frac{329.8}{621.8} \times 19.07\text{kg} \right) \times 100\% \\ & = 34.6\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{d. 小於 } 300\mu\text{m 顆粒分離效率} = \text{overflow}/(\text{overflow} + \text{underflow}) \\ & = \frac{303.0}{340.1} \times 6.38\text{kg} / \left(\frac{303.0}{340.1} \times 6.38\text{kg} + \frac{402.4}{621.8} \times 19.07\text{kg} \right) \times 100\% \\ & = 31.6\% \end{aligned}$$

不同粒徑分離效率均介於 31.6%~38.4%。分離效率低的原因主要因為 overflow/underflow 分流重量比為 25.1%/74.9%，導致細顆粒雖然可被分離，但質量偏低，所以分離效率差。

若只單純分析 overflow 中不同粒徑所佔比例，

- (i) 小於 $63\mu\text{m}$ 顆粒所佔比例 $= \frac{202.5}{340.1} \times 100\% = 59.5\%$
- (ii) 小於 $100\mu\text{m}$ 顆粒所佔比例 $= \frac{255.5}{340.1} \times 100\% = 75.1\%$
- (iii) 小於 $200\mu\text{m}$ 顆粒所佔比例 $= \frac{285.3}{340.1} \times 100\% = 83.9\%$
- (iv) 小於 $300\mu\text{m}$ 顆粒所佔比例 $= \frac{303.0}{340.1} \times 100\% = 89.1\%$

顯示經水力漩流處理後，仍具一定之粗細顆粒分離能力。對此現象，建議可用 underflow 迴流再次水力分離來提升細顆粒分離效率。

再將經水力漩流分離之彰化灌溉渠道底泥進行重金屬 XRF 分析，其結果如下表 5-6 所示，

表 5-6 彰化灌溉渠道底泥於入口速度 4m/s 條件下分離之(a)原樣
(b)underflow (c) overflow 之 XRF 分析

檢驗項目	單位	樣品		
		原樣	underflow	overflow
Cd	mg/kg	ND	ND	ND
Cr	mg/kg	202	182	196
Cu	mg/kg	189	194	200
Ni	mg/kg	321	297	320
Pb	mg/kg	57.9	59.5	56.4
Zn	mg/kg	395	382	382
As	mg/kg	9.8	11.3	11.4

Cd ND < 4.6 mg/kg

由表中可看出，overflow 細顆粒與 underflow 粗顆粒重金屬含量未有明顯差異。

(3)高雄港航道浚泥

高雄港航道浚泥，於入口速度 4m/s 條件下進行分離；overflow 所得乾泥重 15.36 kg，underflow 所得乾泥重 9.67 kg。雷射粒徑分析如圖 5-27 所示。

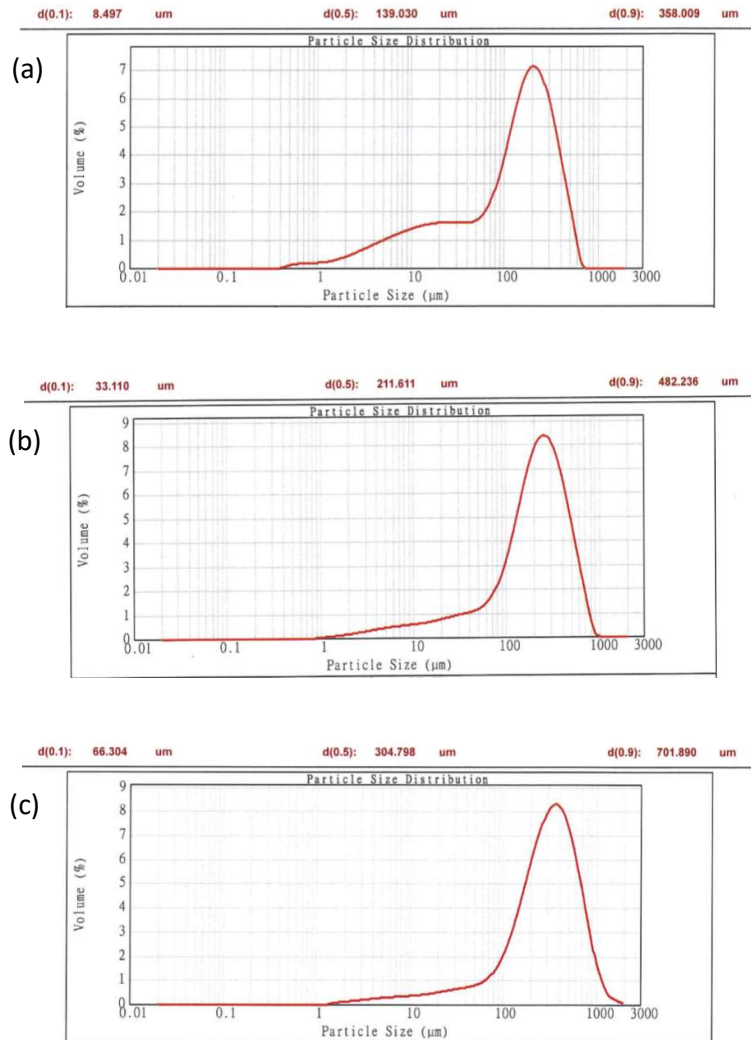


圖 5-27 高雄港航道浚泥於入口速度 4m/s 條件下分離之(a)原樣
(b)underflow (c) overflow 雷射粒徑分析

由圖中可發現，航道浚泥顆粒較大，非屬本研究欲分離 63 μm 細泥所設計最佳模擬條件之操作範圍，故幾乎無分離效果。

(4)高雄港碼頭浚泥

高雄港碼頭浚泥，於入口速度 4m/s 條件下進行分離；overflow 所得乾泥重 12.19 kg，underflow 所得乾泥重 13.28 kg。雷射粒徑分析如圖 5-28 所示。

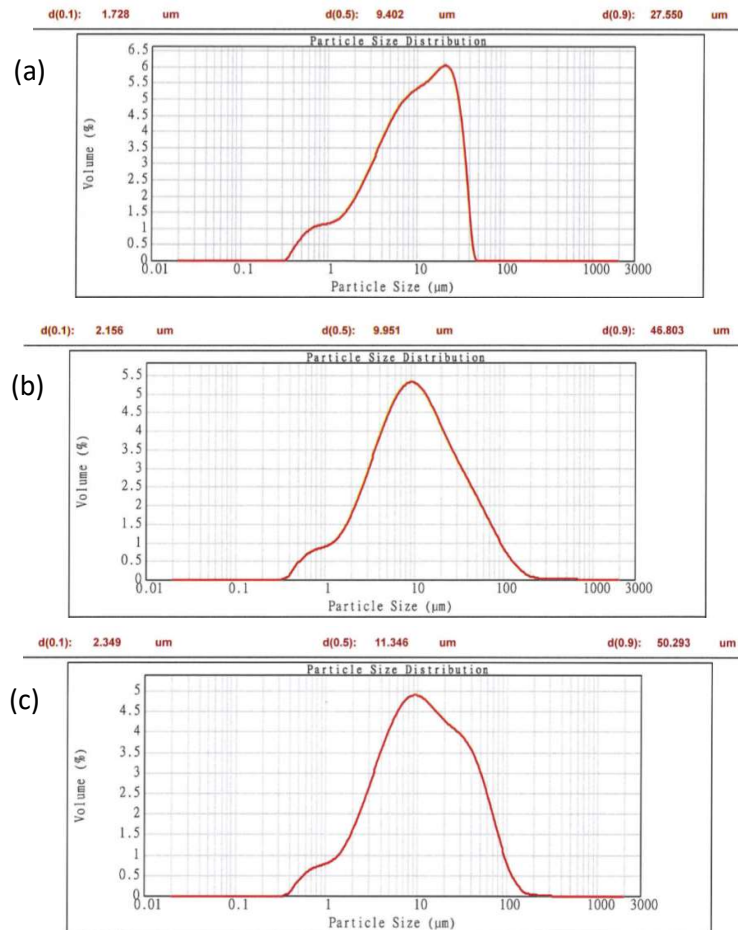


圖 5-28 高雄港碼頭浚泥於入口速度 4m/s 條件下分離之(a)原樣
(b)underflow (c) overflow 雷射粒徑分析

由圖中可發現，碼頭浚泥顆粒偏小，原樣 $d_{90}=27.55\mu\text{m}$ 、underflow $d_{90}=46.80\mu\text{m}$ 、overflow $d_{90}=50.29\mu\text{m}$ 。實非屬本研究欲分離 $63\mu\text{m}$ 細泥所設計最佳模擬條件之操作範圍，故幾乎無分離效果。

(5)高雄港浚泥

高雄港浚泥，於入口速度 4m/s 條件下進行分離；overflow 所得乾泥重 14.81 kg，underflow 所得乾泥重 10.74 kg。雷射粒徑分析如圖 5-29 所示。

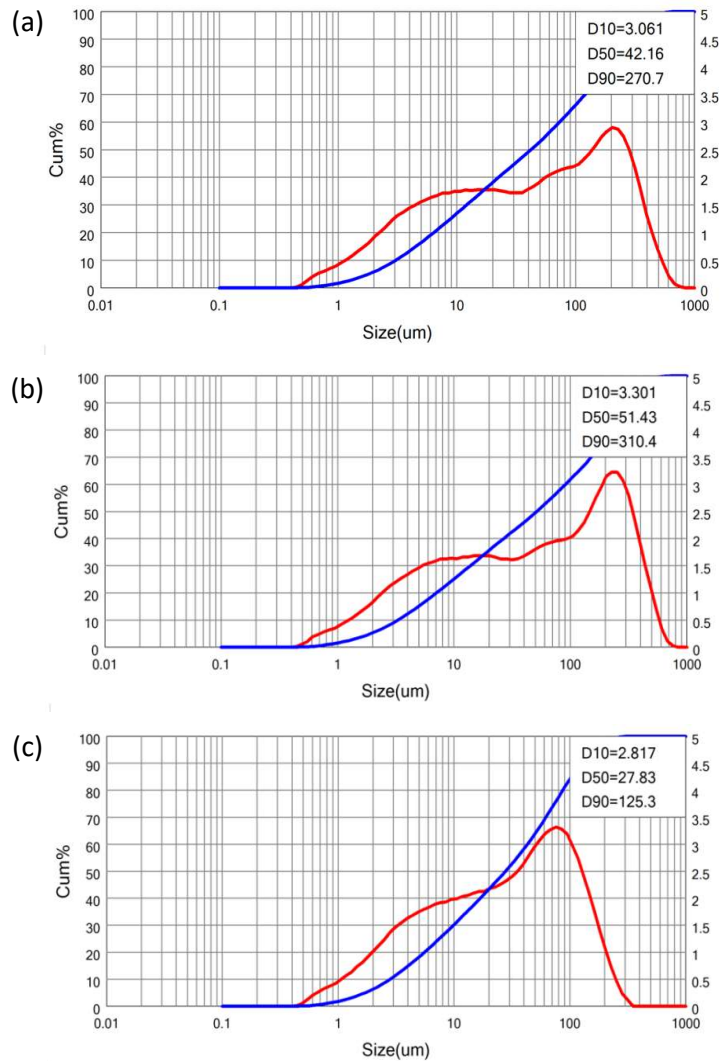


圖 5-29 高雄港浚泥於入口速度 4m/s 條件下分離之(a)原樣 (b)underflow (c) overflow 雷射粒徑分析

計算其分離效率如下，

$$\begin{aligned}
 & \text{a. 小於 } 63\mu\text{m} \text{ 顆粒分離效率} = \frac{\text{overflow}}{(\text{overflow} + \text{underflow})} \\
 &= \frac{156.4}{534.2} \times 14.81\text{kg} / \left(\frac{156.4}{534.2} \times 14.81\text{kg} + \frac{106.3}{1226.6} \times 10.74\text{kg} \right) \times 100\% \\
 &= 82.3\%
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \text{b. 小於 } 100\mu\text{m 顆粒分離效率} = \text{overflow}/(\text{overflow} + \text{underflow}) \\
 &= \frac{272.2}{534.2} \times 14.81\text{kg} / \left(\frac{272.2}{534.2} \times 14.81\text{kg} + \frac{176.1}{1226.6} \times 10.74\text{kg} \right) \times 100\% \\
 &= 83.0\%
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \text{c. 小於 } 200\mu\text{m 顆粒分離效率} = \text{overflow}/(\text{overflow} + \text{underflow}) \\
 &= \frac{469.1}{534.2} \times 14.81\text{kg} / \left(\frac{469.1}{534.2} \times 14.81\text{kg} + \frac{409.1}{1226.6} \times 10.74\text{kg} \right) \times 100\% \\
 &= 78.4\%
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \text{d. 小於 } 300\mu\text{m 顆粒分離效率} = \text{overflow}/(\text{overflow} + \text{underflow}) \\
 &= \frac{530.3}{534.2} \times 14.81\text{kg} / \left(\frac{530.3}{534.2} \times 14.81\text{kg} + \frac{745.4}{1226.6} \times 10.74\text{kg} \right) \times 100\% \\
 &= 69.3\%
 \end{aligned}$$

將模擬值與實驗所得分離效率製圖如圖 5-30，可發現實驗分離效率優於模擬值。

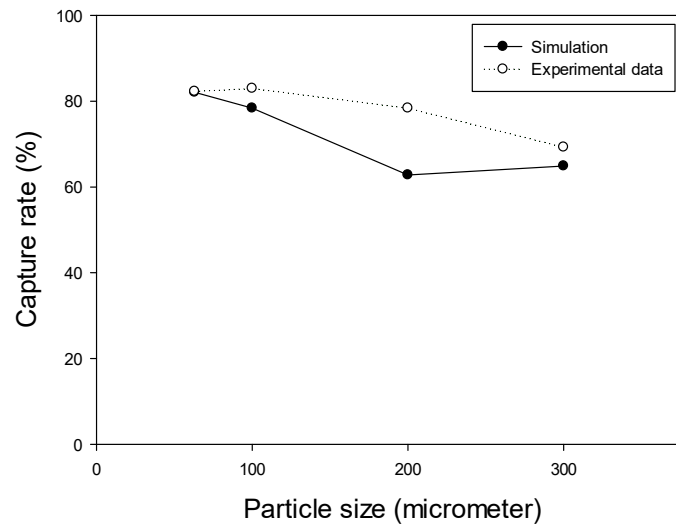


圖 5-30 最佳模擬條件下，高雄港浚泥中不同粒徑顆粒分離效率模擬值與實驗值

5-3-4 小結

本研究利用三維流場模擬軟體 FLUENT 進行水力漩流分離器流場模擬，歷經數十次模擬，得到可分離 $63\mu\text{m}$ 顆粒最佳模擬條件為：

- a. 入口直徑 75mm(3inch)
- b. 入口速度 4m/s
- c. 底部出口直徑 33mm
- d. 管徑 156mm
- e. 下部管長 440mm

以此為設計基準，以水/泥比(liquid to solid ratio)=4，進行水力漩流器製作與後續驗證試驗。

(1)顆粒分離效果

實驗結果顯示，台中灌溉渠道底泥小於 $63\mu\text{m}$ 顆粒分離效率為 78.0%，僅略低於設計分離效率；高雄港浚泥小於 $63\mu\text{m}$ 顆粒分離效率為 82.3%，接近設計分離效率。

彰化灌溉渠道底泥粗顆粒含量不高，分離效率低的原因主要因為 overflow/underflow 分流重量比為 25.1%/74.9%，導致細顆粒雖然可被分離，但質量偏低，所以分離效率差，不同粒徑分離效率均介於 31.6%~38.4%。若只單純分析 overflow 中不同粒徑所佔比例，顯示經水力漩流處理後，仍具一定之粗細顆粒分離能力。此建議可將 underflow 迴流再次水力分離來提升細顆粒分離效率。

高雄港航道浚泥顆粒較大，非屬本研究欲分離 $63\mu\text{m}$ 細泥所設計最佳模擬條件之操作範圍，分離效果差。碼頭浚泥則顆粒偏小，原樣 $d_{90}=27.55\mu\text{m}$ 、underflow $d_{90}=46.80\mu\text{m}$ 、overflow $d_{90}=50.29\mu\text{m}$ ，實非屬本研究欲分離 $63\mu\text{m}$ 細泥所設計最佳模擬條件之操作範圍。

因此，對於水力漩流分離操作做出下列建議：

(i)樣本進行雷射粒徑分析，了解粒徑分布，選擇適合對象。

(ii)樣本進行篩分及快速 XRF 分析，了解污染物富集於何種粒徑。

設計/選擇適合之水力漩流分離器進行分離，必要時進行串聯，以達顆粒分級之效。

(2)成本效益

水量消耗:

依據試驗規模為 4m/s 流速，水/泥比(liquid to solid ratio)=4
 $\pi * (0.075/2m)^2 * 4 \text{ m/s} * 60 \text{ s/min} = 1.06m^3/\text{min}$

每分鐘可處理 1.06m³ 泥漿，使用 950L 水量(可處理 237.5kg 乾泥)。

每小時可處理 1.06m³/min*60mins/hr= 63.6 m³ 泥漿。(含 14.25 公噸乾泥及 57 噸水)

每小時用水量= 0.95m³/min*60min/hr= 57m³ 水

未考慮回收水情況下，每小時花費=每度水 12.075 元*57m³= 688.3 元

電量消耗:

每小時電費= 7.46 KW(水力漩流馬達)/*(5.10*4/12+3.97*8/12)= 32.4 元

營業用夏月電價 6 月至 9 月 5.10 元/度

營業用非夏月電價 3.97 元/度

若以處理 1 萬噸乾泥、水/泥比(liquid to solid ratio)=4 計算，每小時處理能力 63.6 噸泥水，配置 1 支漩流管、1 部馬達。

1. 設備費：總計 680,000 元

(i) 漩流管 1 支 80,000 元

(ii) 馬達 1 部 100,000 元

(iii) 電磁式流量計裝 2 台 48,000*2=96,000 元

(iv) 軟管閥件 20,000 元

(v) FLUNET 軟體租用 84,000/年

(vi) 攪拌槽、攪拌機、Silo 桶等 300,000 元

2. 水費 4 萬噸水*12.075 元/噸=483,000 元

3. 電費 (10000 噸/14.25 噸/小時)*32.4 元/小時=22,737 元

4. 平均每噸水力漩流處理費=(680,000+483,000+22,737)/10,000=118.6 元/噸乾泥。

相較於現地處理或離場處理每噸至少 5,000 元(每立方米 12,000 元)價格而言，先經水力漩流分選應為經濟可行。

5. 若以水力漩流 overflow:underflow= 4:6(w/w)計，只有 overflow 4,000 噸需後續處理，underflow 6,000 噸較乾淨，可直接再利用(毋須再經其他處理程序)。
6. 未來水力漩流操作使用上，應考量水回收使用。或者於水量豐沛之港區及河川操作時，水源來源則相對容易取得且較便宜。

5-4 結論與建議

5-4-1 結論

- (1) 本研究完成臺中市、彰化縣、高雄港等三處採樣。台中、彰化、高雄三地灌溉渠道底泥/港池浚泥經 pH 2.88 ± 0.05 及 pH 4.93 ± 0.05 醋酸萃取，萃出液符合毒性特性溶出程序(TCLP)溶出標準附表四規範，非屬重金屬溶出有害特性。
- (2) 含水率則以高雄碼頭浚泥 46.4%最高、台中灌溉渠道底泥 33.6%與彰化灌溉渠道底泥 33.2%其次、高雄航道浚泥 19.1%最低。經乾篩分析，台中、彰化、高雄三地灌溉渠道底泥/港池浚泥主要顆粒均分布於 $>150 \mu\text{m}$ ，佔 73.6%-99.1%，顯示其落在極粗砂 $100-200 \mu\text{m}$ 範圍。惟經雷射粒徑分析驗證，高雄碼頭浚泥偏粉粒及黏粒性質， $d_{90}=27.55\mu\text{m}$ 。
- (3) 水力漩流器最佳模擬條件為：
 - (a)入口直徑 75mm(3inch)；
 - (b)入口速度 4m/s；
 - (c)底部出口直徑 33mm；
 - (d)管徑 156mm；
 - (e)下部管長 440mm。於此條件下，模擬出 $63 \mu\text{m}$ 顆粒可達 82.1%分離效率。經驗證，台中灌溉渠道底泥小於 $63\mu\text{m}$ 顆粒分離效率為 78.0%，略低於設計分離效率；高雄港浚泥小於 $63\mu\text{m}$ 顆粒分離效率為 82.3%，接近設計分離效率。

5-4-2 建議

- (1) 本研究介於實驗室與模場間規模，花費較多時間、經費於系統建置、特性分析。建議未來能延續研究，使整個研究更趨完整，也更貼近實廠需求。
- (2) 彰化灌溉渠道底泥之不同粒徑分離效率均介於 31.6%~38.4%，分離效率低的原因主要因為 overflow/underflow 分流重量比為 25.1%/74.9%，導致細顆粒雖然可被分離，但質量偏低，所以分離效率差。若只單純分析 overflow 中不同粒徑所佔比例，小於 63 μm 顆粒所佔比例仍有 59.5%，小於 100 μm 顆粒所佔比例有 75.1%，顯示經水力漩流處理後，仍具一定之粗細顆粒分離能力。後續建議可用 underflow 迴流再次水力分離來提升細顆粒分離效率。
- (3) 本研究可分離 63 μm 細顆粒可達 80%以上分離效率。建議未來可一併處理灌溉渠道底泥、受污染重金屬農地，將細顆粒(高污染部分)分選出來進一步處理處置。必要時可串聯不同水力漩流分離器，以達顆粒分級之效。
- (4) 建議添購/設置雷射粒徑分析儀，即時分析樣本粒徑。

參考文獻

- Abollino, O., Giacomini, A., Malandrino, M., Mentasti, E., Aceto, M., Barberis, R., 2006. Assessment of metal availability in a contaminated soil by sequential extraction. *Water, Air and Soil Pollution*, 173, 315-338.
- Banat, K. M., Howari, F. M., Tomah, M. M., 2007. Chemical fractionation and heavy metal distribution in agricultural soils, North of Jordan Valley. *Soil and Sediment Contamination*, 16, 89-107.
- Bergström, J., 2006. Flow Field and Fibre Fractionation Studies in Hydrocyclones, Ph. D. dissertation, Royal Institute of Technology School of Chemical Science and Engineering, Sweden.
- Casado-Martínez, M. C., Buceta, J. L., Belzunce, M. J. and DelValls, T. A. 2006. Using sediment quality guidelines for dredged material management in commercial ports from Spain, *Environment International*, 32, 388-396.
- CEN/TS 14429, 2006. Characterization of waste – Leaching behaviour tests: Influence of pH on leaching with initial acid/base addition.
- Chen, C. W., Kao, C. M., Chen, C. F. and Dong, C. D., 2007. Distribution and accumulation of heavy metals in the sediments of Kaohsiung Harbor, Taiwan, *Chemosphere*, 66, 1431-1440.
- CL:AIRE technical bulletin, 2007, Understanding soil washing.
- Cornell, R. M. and Giovanoli, R., 1985. Effect of Solution Condition on The Proportion and Morphology of Goethite Formed from Ferrihydrite. *Clay and Clay Miner.*, 33(5), 424-432.
- Dalton, J. L., Gardner, K. H., Seager, T. P., Weimer, M. L., Spear, J. C. M. and Magee, B. J., 2004. Properties of Portland cement made from contaminated sediments, *Resource Conservation and Recycling*, 41, 227-241.
- Detzner, H. D., Schramm, W., Döring, U. and Bode, W., 1998. New technology of mechanical treatment of dredged material from Hamburg harbour, *Water Science & Technology*, 37 (6-7), 337-343.

- Detzner, H.D., 1995. The Hamburg project METHA: Large scale separation, dewatering, and reuse of polluted sediments, *Europ. Water Pollut. Contr.* 5(5), 38-42.
- Edwards, M., and Benjamin, M. M., 1989. Adsorptive filtration using coated sand: A new approach for treatment of metal-bearing wastes. *J. Water Pollut. Control Fed.*, 61(9), 1523–1533.
- Fallman, A. -M., 2000. Leaching of chromium and barium from steel slag in laboratory and field tests-a solubility controlled process? , *Waste Management*, 20, 149-154.
- Katasonova, O. N., Fedotov, P. S., Karandashev, V. K., Spivakov, B.Y., 2005. Application of rotating coiled columns to the fractionation of soil particles and to the sequential extraction of heavy-metal species from silty, dusty, and sandy fractions. *Journal of Analytical Chemistry*, 60, 684-690.
- Katayon, S., Ahmad, I., Hishamuddin, O., Misri, K., 2001. Accumulation of heavy metals (Zn, Cu, Pb, Cd) in flat-tree oysters *Isognomon alatus* to pig farm effluent. *Toxicological and Environmental Chemistry*, 82, 45-58.
- Lo, Irene M.-C.; Yang, X.-Y., 1998. Removal and redistribution of metals from contaminated soils by a sequential extraction method, *Waste Management*, 18, 1-7.
- Long Beach Harbor Department, 2005. Green Port Policy - “White Paper”.
- Ma, M.H., Gao, H.Y., Sun, Y.B. and Huang, M.S., 2015. The adsorption and desorption of Ni(II) on Al substituted goethite, *Journal of Molecular Liquids*, 201, 30–35.
- Mainza, A., Powell, M.S., and Knopjes, B., 2004. A comparison of different cyclones in addressing challenges in the classification of the dual density UG2 platinum ore. International Platinum Conference ‘Platinum Adding Value’, The South African Institute of Mining and Metallurgy, 95-102.
- Mann, M.J. 1999. Full-scale and pilotscale soil washing, *Journal of Hazardous Materials*, 66, 119-136

- .Narasimha, M., Sripriya, R. and Banerjee, P.K., 2005. CFD modelling of hydrocyclone - prediction of cut size, *International Journal of the Mineral Processing*, 75, 53-68.
- Nystroem, G. M., Pedersen, A. J., Ottosen, L. M. and Villumsen, A., 2006. The use of desorbing agents in electrodialytic remediation of harbour sediment, *Science of the Total Environment*, 357, 25-37.
- Petavy, F., Rubana, V., Conil, P., 2009. Treatment of stormwater sediments: Efficiency of an attrition scrubber - laboratory and pilot-scale studies, *Chemical Engineering Journal*, 145, 475-482.
- Preciado,H.F., Li.Y., 2006. Evaluation of metal loadings and bioavailability in air, water and soil along two highways of British Columbia, Canada. *Water, Air, and Soil Pollution*, 172, 81-108.
- Quevauviller, Ph., van der Sloot, H. A., Ure, A., Muntau, H., Gomez, A. and Rauret, G., 1996. Conclusions of the workshop: harmonization of leaching/extraction tests for environmental risk assessment, *the Science of the Total Environment*, 178, 133-139.
- Rahimi, S. Moattari, R.M., Rajabi, L., and Derakhshan, A.A., 2015. Optimization of lead removal from aqueous solution usinggoethite/chitosan nanocomposite by response surface methodology, *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, 484, 216–225.
- Standard Practice for Use of Inorganic Process Wastes as Structural Fill, E 850-95, American Society for Testing Materials (ASTM), Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, 2000.
- Tessier A, Campbell PC, Bisson, M., 1979. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals, *Analytical Chemistry*, 51(7), 844-851.
- Theodore, L., DePaola, V., 1980. Predicting cyclone efficiency, *Journal of the air pollution control association*, 30(10), 1132-1133.
- Townsend, T., Jang, Y. C. and Tolaymat, T., 2003. A guide to the use of leaching tests in solid waste management decision making, Report # 03-01(A), University of Florida.

Wang, L.Y., Wang, S.W. and Chen, W.U., 2016. Roxarsone desorption from the surface of goethite by competitive anions, phosphate and hydroxide ions: Significance of the presence of metal ions, Chemosphere, 152, 423-430.

Yi-Kuo Chang, Juu-En Chang, Tsair-Fuh Lin, Ming-Sheng Ko, Li-Choung Chiang, Pai-Haung Shih, 2004, Applying xanthate processes to copper-containing wastestream treatment, ISEIS 2004 International Conference on Environmental Informatics.

中華民國環境工程學會，2008。土壤及地下水污染整治:原理與應用。

台灣港務公司(高雄港務分公司)網頁 www.twport.com.tw，2018。

行政院環境保護署，2001。土壤污染管制標準。

行政院環境保護署，2012。底泥品質指標之分類管理及用途限制辦法。

行政院環境保護署，2014。102年底泥品質管理計畫(EPA-102-GA11-03-A117)。

行政院環境保護署網站，2018。<http://www.epa.gov.tw>。

吳一民，1997。灰渣類廢棄物應用於廢水中有機物去除之研究，國立成功大學環境工程研究所碩士論文。

吳岱曉，2003。鹽度影響河口底泥中重金屬遷移之研究，嘉南藥理科技大學環境工程與科學系碩士論文。

李政諺，2012。沉積物重金屬特性驗證及洗淨再利用探討，碩士論文，中臺科技大學安全與防災科技研究所。

洪振瑋，2014。農地土壤重金屬特性驗證及分離程序評估，碩士論文，中臺科技大學環境與安全衛生工程系。

胡志鴻，2013。具污染潛勢河川底泥重金屬特徵分布、溶出行為及洗淨分級探討，碩士論文，中臺科技大學安全與防災科技研究所。

張又仁，2017。水力漩流分離器降低水中濁度技術開發與研究，中臺科技大學環境與安全衛生工程系碩士論文。

張益國，2011。港池沉積物重金屬溶出特性驗證、洗淨分級及資材化再利用探討計畫報告，行政院環境保護署。

張益國、徐一量、鄭文良、劉原宏、張裕棋、洪振瑋、盧幸成，2016。中華民國

發明專利，第 I549764 號，機動式分離含重金屬之土壤顆粒處理方法 (2016.09-2035.06)。

張尊國，2002。張尊國，台灣地區土壤污染現況與整治政策分析，財團法人國家政策研究基金會，永續（析） 091-021 號。

陳尊賢，2003。受重金屬污染農地土壤之整治技術與相關問題分析，台灣土壤及地下水環境保護協會，第 9 卷，第七期，第 2-9 頁。

望熙榮，1998。空氣污染防治，中央圖書出版社。

黃士澤，2012。具污染潛勢農地土壤重金屬分布及移除研究，碩士論文，中臺科技大學安全與防災科技研究所。

黃智、吳勇興、林淑滿、鐘裕仁，2011。土壤清洗技術於土壤污染整治應用，中興工程季刊，第 110 期，pp. 53-61。

經濟部工業局，2003。工廠土壤及地下水污染整治技術手冊—石化業。

經濟部工業局，2004。土壤及地下水污染防治技術手冊—評估調查及監測。

經濟部工業局。2006。重金屬土壤及地下水污染預防與整治技術手冊。

董正欽，2004。高雄港浚泥海洋棄置影響評估監測，交通部高港務局。

蔡利局、余光昌、何先聰，2002。河川底泥中碳酸鹽含量與重金屬之關係，第 27 屆廢水處理技術研討會。

羅良慧，1997。應用地理資訊系統於土壤鎘污染危害評估方法之研究，碩士論文，國立中興大學。

蘇紹瑋、陳尊賢，2008。土壤清洗法整治重金屬污染土壤國內外最新研究與整治案例之回顧，台灣土壤及地下水環境保護協會簡訊。

龔佩怡、陳淑芬、余光昌，2002。以生物淋溶法溶出二仁溪底泥各鍵結型態重金屬之研究，第二十七屆廢水處理技術研討會。

**行政院環境保護署土壤及地下水污染整治基金管理會
土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案**

107 年度專案成果績效自評表

一、專案基本資料

填表日期：107 年 12 月 11 日

專案性質	<input checked="" type="checkbox"/> 實驗性質 <input type="checkbox"/> 非實驗性質	專案類別	<input checked="" type="checkbox"/> 研究專案 <input type="checkbox"/> 模場試驗
研究主題	<input type="checkbox"/> 調查 <input checked="" type="checkbox"/> 整治 <input type="checkbox"/> 其他		
申請機構系所	中臺科技大學環境與安全衛生工程系	計畫主持人	張益國
專案名稱	設計底泥水力漩流器分離顆粒並驗證		
專案執行期程	<input type="checkbox"/> 申請階段 <input type="checkbox"/> 期中 <input checked="" type="checkbox"/> 期末		

二、成果績效自評

「計畫總預估數」應與計畫審查核定值相符，請執行單位依實際達成之量化成果填寫於「結案達成數」欄位中。(僅模場試驗類型專案需填寫工作進度達成數)

(一) 學術面

項目			目標達成程度				申請 預估數	工作進度 達成數	期中 達成數	期末 達成數	結案 達成率	備註 (說明未達成 原因或學術產 出發表名稱)
A 學術 產 出 及 活 動	1.國內投稿 (篇數)	(1)論文										
		(2)研討會論文	1		0	1	100					
	2.國外投稿 (篇數)	(1)期刊論文										
		(2)研討會論文	1		0	1	100	(國外或國內 計 1 篇)				
	3.報告 (篇數)	(1)技術報告										
		(2)研究報告	1		0	1	100					
	4.專著 (本數)											
	5.辦理學術 會議(場數)	(1)研討/說明會										
		(2)成果發表會										
		(3)論壇										
6.研發改良 技術(項數)	(1)已開發技術											
	(2)技術平台											
B 人 才 培 育	7.研發人員 (人數)	(1)碩士	2		2	2	100					
		(2)博士										
	8.研究團隊 (個數)	(1)跨領域團隊	1		1	1	100	航太流體				
		(2)跨機構團隊										
		(3)形成研究中心										
(4)形成實驗室												
9.其他指標 (請自行命名)		(請自填)										

(二) 產業面

項目			目標達成程度	申請 預估數	工作進 度達成 數	期中 達成數	期末 達成數	結案 達成率	備註 (說明未達成原因 或專利、技術轉移相 關詳細資料)
A 智慧財產權	1.專利 (件數)	已核准	發明						
			新型/設計						
			合計						
		申請中	發明	0		0	1	100	
			新型/設計	1		0	0	0	已申請發明專利並函請備查
			合計						
B 研發技術轉移	2.先期技術 成果移轉	件數							
		授權金(仟元)							
		衍生利益金(仟元)							
	3.技術移轉 (專利)	件數							
		授權金(仟元)							
		衍生利益金(仟元)							
	4.技術移轉 (應用技術)	件數							
		授權金(仟元)							
		衍生利益金(仟元)							
	5.可移轉 產業技術	(1)技術(件數)		1		0	0	0	裕山公司將可轉移技術經費轉成 108 年度土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案自籌款項
		(2)品種/系(件數)							
C 產學研合作	6.促成合作 研究	件數							
		金額(仟元)							
	7.促成投資	件數							
		投資金額(仟元)							
	8.促成取得 業界科專	件數							
		業界投資金額(仟元)							
9.其他指標 (請自行命名)		(請自填)							

(三) 政策面

項目 \ 目標達成程度		申請 預估 數	工作 進度 達成 數	期中 達成 數	期末 達成 數	結案 達成 率	備註 (說明未達成原因或 其他詳細資料)
A 服 務 便 民	1.技術服務	次數					
		收入(仟元)					
	2.諮詢服務	次數					
		收入(仟元)					
B 支 援 合 作	3.協助政府 制定 (件數)	(1)政策					
		(2)法規					
		(3)規範					
		(4)標準					
D 社 會 效 益	4.獲得認證(件數)						
	5.獲得獎項(件數)						
	6.提升能源效率(%)						
	7.節能減碳效率(%)						
8.其他指標 (請自行命名)		(請自填)					

三、請依學術成就、技術創新、經濟效益、社會影響等方面，評估研究成果對現況或本署之學術或應用價值。(簡述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性，500 字為限)

本研究設計底泥水力漩流器(Hydrocyclone)分離粗細顆粒，期能達到下面兩種功效：(1)分離未受重金屬污染之河川底泥，減少處理容積(減容)；(2)分離可再利用之乾淨港池浚泥。搭配三維流場模擬軟體 FLUENT 進行模擬，設計分離設備及操作條件，促進粗細顆粒分離(污染物濃淡分級)，選取適當之粒徑(例如 63 μ m)，驗證實際效能與設計值差異，是否在 $\pm 20\%$ 內)。改進操作條件，達成適合台灣底泥/浚泥分離之本土化設計應用，搭配成為底泥整治程序系列之一部分。

學術成就：投稿國際及國內研討會：1 篇、申請專利：1 篇。

技術創新：客製化設計適合台灣底泥/浚泥分離之水力漩流分離器，同時建立操作程序、適合條件，分離粗細顆粒，達成減容減量目標，節省經費並再利用乾淨之粗顆粒。

經濟效益：國內廠商大多直接購入國外整套分離設備，殊不知每支水力漩流器均有其適合之操作條件、顆粒分離能力及操作區間，無法單一支應用於所有狀況。若更換水力漩流器，則配套之管徑、流速、處理容量亦隨之改變。因此，目前國內適合底泥/浚泥顆粒分離之設備，尚未妥適被開發應用。本產品投入市場預估有 2 億元之綜合效應(未來如果高雄港要蓋底泥處理中心，目前高雄港底泥因應工程需求，均填海造陸)。

社會影響：加速河川底泥污染整治效能/再利用港池浚泥，提高社會觀感與信任。並可輸出水力漩流系統客制化設計、製作技術，協助東南亞國家處理受污染河川底泥及港灣浚泥，達成新南向政策目標。

計畫單位回覆行政院環境保護署土壤及地下水污染整治基金管理會

107 年度土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案

計畫書審查意見表

專案主持人：張益國	服務單位：中臺科技大學環境與安全衛生工程系	研究類 9
專案名稱：設計底泥水力漩流器分離顆粒並驗證		
委員一 1. 建議本研究結果與底泥整治之連結性仍需更多試驗強化其應用性。 2. 本研究已有相關研究基礎與相關設備，建議耗材費用宜調降。	計畫單位回覆： 1. 謹遵委員意見辦理。 2. 遵照委員建議，調降部分耗材費用。	
委員二 1. 主持人(執行團隊)的學術研究能力與技術發展能力足以勝任本計畫 2. 主持人(執行團隊)近五年研究與技術發展績效佳 3. 本專案對未來土壤及地下水污染調查及整治工作推動的貢獻仍待本計畫未來執行成果的再進一步的說明 4. 本專案預估之成果績效主要為論文發表(研討會或期刊論文)與實際模型成果 5. 本研究計畫書撰寫具體 6. 本研究計畫書所擬定的研究方法可行 7. 本研究計畫書所擬定的研究內容與所預期的研究成果，對未來土壤或地下水污染場址調查整治(或評估)的實場應用性與限制因子仍待進一步說明(計畫書中對研究成果已具初步實務應用性，相關的操作參數與應用情境&限制，建議討論)(成效提升的改進方法?) 8. 本研究計畫書的文獻蒐集尚完整，對國內外本研究領域現況了解 9. 本研究專案執行期限合理 10. 本研究計畫書中對研究的預期成果已說明，但對實務應用性的限制與操作條件的說明仍不完整 11. 本研究專案經費編列合理 12. 本計畫屬延續性計畫 13. 本研究計畫對預期成果的呈現說明以學術發表與技術開發為主，對實務應用的限制因子與適用情境的說明不具體 14. 本研究計畫已依原計畫構想書的審查意見修正	計畫單位回覆： 1. 謝謝委員肯定。 2. 謝謝委員。 3. 謹遵委員意見加強研究，期能有所貢獻。 4. 是。並且期望能技術轉移。 5. 謝謝委員肯定。 6. 謝謝委員。 7. 報告委員，預期研究成果將提供港區浚泥粗細顆粒分離及河川底泥粗細顆粒分離之工程應用參考，如能分離出無害之粗顆粒再利用，則達減容目的。 實務應用限制因子主要可能為： (1) 進流樣本顆粒大小：樣本需先預篩，預計用 0.5cm 篩網，將石頭、螺類、貝類去除，避免漩流管阻塞。 (2) 流速：目前可提供約 3 m/s 流速。未來實場應用需有 15-20Hp 馬達及配管。 (3) 添加水量及廢水處理：因為要使顆粒能分離，依以往經驗，liquid/solid ratio 約在 8-10 間，所以要額外添加水。除此之外，衍生廢水處理或廢水回用設備應予以考量設計。 8. 謝謝委員肯定。 9. 謝謝委員。 10. 報告委員，實務應用的限制因子如 4-4 節增列說明，應用情境及操作條件補充如 4.2.2 節。 11. 謝謝委員。 12. 是，委員。106 年度以農地土壤顆粒分離並製作功能性材料，今年度則設計底泥水力漩流器分離顆粒並驗證。 13. 報告委員，實務應用的限制因子如 4-4 節增列說明，應用情境及操作條件補充如 4.2.2 節。 14. 謝謝委員。	

委員三

1. 成果績效自評中有在產業面列出：可移轉產業技術 1 件，於計畫書內應說明技術之名稱項目，及可能之移轉對象。

委員四

1. 請補充說明底泥及污泥之採樣頻率，以及代表性樣品採集之作業準則。另相關基本特性分析項目中重金屬種類包括哪些？除總量濃度外，是否考慮其他之重金屬分析方法(如 TCLP)等？

2. 採集之樣品前處理方法為何？其中有機物含量是否宜列入考量？

3. 本計畫前期成果(科技部產學合作計畫)中，係以土壤為標的物，同樣以水力漩流分離系統，未來本計畫之應用特性及其創新或差異點為何？

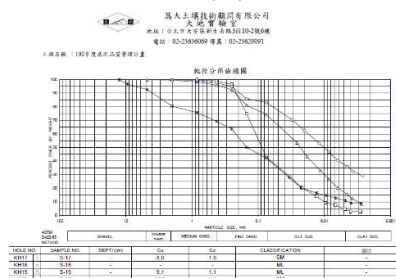
4. 本計畫對於系統開發之驗證機制，說明尚不清楚，如何能驗證達成 63 μm 以上之顆粒，達 80% 之分離效率？另 80% 之分離效率係屬良好或普通等級？

計畫單位回覆：

1. 可轉移技術名稱：底泥粗細顆粒分離技術
2. 可能移轉對象：土壤及地下水整治業、港灣疏濬公司
增列於 5-2 節，敬請委員參閱。

計畫單位回覆：

1. 目前規劃港區底泥及河川底泥各採集一次樣本。港區底泥部分，將協尋台灣港務公司協助於挖泥船或受泥船採樣；如果未獲協助，則租船進行採樣。採樣點主要選擇河川匯入高雄港之交界處。河川底泥則規劃彰化東西二圳等或重金屬污染較嚴重區域進行採樣。底泥採樣使用採樣鏟、採樣杓或抓取式採樣器採取。重金屬分析包含汞、砷、銅、鎳、鉻、鉛、鋅、鎳等。除總量分析外，依委員建議進行 TCLP 分析。
2. 採集樣本後，隨即乾燥處理測水分，樣本乾燥保存。樣本使用前，過 0.5cm 篩，篩除石頭、貝類、螺類等，進行後續水力漩流分離。標的物主要以顆粒大小及重金屬為主，有機物因學校實驗設備、經費等因素，暫未納入考量，敬請委員見諒。
3. 前期計畫以土壤為標的物。本計畫設計底泥分離系統，因為底泥粒徑比土壤小，所以水力漩流分離器形狀、條件都跟土壤不同，此為最大差異處。再則，國內土壤處理廠商現有設備並無法滿足底泥分離之需求，本計畫成果將可客制化提供廠商底泥分離之需求。
4. 以環保署(2014) 102 年底泥品質管理計畫報告中高雄港底泥為例，63 μm 以上之顆粒約佔 20%~60%，若能達 80% 分離效率，則 63 μm 以上之顆粒去除 16%~48% 以上，達成分離/減容效果。



一般而言，水力漩流分離器 80%~90% 分離效率係屬良好等級。考量本研究處理對象底泥，80% 分離效率為努力之目標。

本署意見

1. 經費編列合理。
2. 請將意見回覆表置於計畫書首頁後。

計畫單位回覆：

1. 謝謝貴署惠鑑。
2. 謹遵意見辦理。

行政院環境保護署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

☒申請計畫書 ☐期中報告 構想書階段審查意見回覆對
☐修正計畫書 ☐期末報告 照表

計畫年度	107 年度	計畫類型	<input checked="" type="checkbox"/> 研究計畫 <input type="checkbox"/> 模場試驗
計畫類別	<input type="checkbox"/> 調查 <input checked="" type="checkbox"/> 整治 <input type="checkbox"/> 其他	主持人：張益國 NO：22	
計畫名稱	設計底泥水力漩流器分離顆粒並驗證		
委員審查意見		計畫單位回覆	
委員一： 1. 建議宜將顆粒造成漩流器之耗損、故障評估。 2. 此規劃是否能調控漩流時間，以利確實分離粒徑。 3. 目前可評估運用底泥之場域？ 委員二： 1. 本計畫為延續計畫。 2. 前期的計畫已有初步成果。 3. 建議檢討前期計畫的限制與應用時的待改進之處。 4. 粒徑分離後的粒徑分佈(富集污染物的細粒徑分離成效？)(相對低濃度的粗粒徑與高濃度的細粒徑的比例？)(例如：成效評估參數為何，建議說明) 5. 是否同時配合酸洗或其他藥劑？ 委員三： 1. 本設備是否為固液分離器，抑或是可做不同粒徑之分離。 2. 對粒徑與所含毒性物質之關聯性是否為研究目標。 3. 模擬採流力渦流模型，是否會受進料濃度影響。 4. 實際分離器的尺寸如何。 委員四： 1. 水力漩流器之設計，對底泥之粒徑分佈特性之應用範圍為何？分離不同粒徑之底泥，後續應用之目的為何？ 2. 本計畫擬驗證水力漩流器之功能，驗證之功能指標為何？建議應有明確之量化指標。 3. 經篩選後之底泥或浚泥後，有關後續處理技術是否會有不同之因應對策或措施？建議應一併列入評估內容。		回覆情況： 1. 感謝委員建議。將蒐集相關資訊，進行評估。 2. 漩流時間主要由入流速度及漩流管形態所控制。初步先設計水力漩流管，並且有相對應建議流速。之後再進行流速微調。 3. 目前評估適合之場域：河川底泥可當護岸背填或高灘地種植使用。 港區浚泥可護灘、養灘、擴港等使用。減少天然資源消耗。 回覆情況： 1. 是。 2. 是。 3. 報告委員，前期計畫主要進行農地土壤分離，成效佳。惟該水力漩流管的設計對象是土壤，主要分離 150 μ m、250 μ m 顆粒。應用限制：106 年漩流管只適合粗顆粒。 遂 107 年度深入研究，挑戰更細的河川底泥/港區浚泥分離。由於顆粒性質差異，需重新應用 Fluent 軟體設計、製造符合底泥/浚泥分離之水力漩流管。 4. 106 年度計畫設計 150 μ m 顆粒於水力漩流管分離，overflow/underflow 理論計算值 13%/87%。於桃園、彰化、臺南經水力漩流處理樣本中 overflow/underflow 所佔比率，分別為 30.0%/70.0%、35.7%/64.3%、14.0%/86.0%，臺南土樣處理效果最好，且接近理論計算值 13%/87%。 本年度(107)評估成效為目標粒徑設計在 63 μ m(粗顆粒)，達成 63 μ m 以上顆粒 overflow/underflow 20%/80%分離效果。 5. 報告委員，目前先做物理顆粒分離，尚未搭配洗劑/藥劑。 回覆情況： 1. 報告委員，可做不同粒徑之分離。 2. 目前除顆粒大小外，主要以無機重金屬關連性為研究目標。 3. 流力渦流模型會受進料濃度影響。目前都設計固液比	

	<p>= 1:10 或 1:20，當做參數去模擬。</p> <p>4. 大約直徑 25cm，高 130cm 之錐體。每小時約可處理 8 噸泥水(漿體)。</p> <p>回覆情況：</p> <p>1. 本計畫目標粒徑設計在 $63\mu\text{m}$(粗顆粒)，達成 $63\mu\text{m}$ 以上顆粒 overflow/underflow 20%/80%分離效果。</p> <p>如果單純以 D_{50} 來看，應可低至 $20\mu\text{m}$。</p> <p>設計底泥水力漩流器(Hydrocyclone)分離粗細顆粒，期能達到：</p> <p>(1) 分離未受重金屬污染之河川底泥，減少處理容積(減容)</p> <p>(2) 分離可再利用之乾淨港池浚泥之研究目標。</p> <p>2. 驗證指標即將目標粒徑設計在 $63\mu\text{m}$(粗顆粒)，達成 $63\mu\text{m}$ 以上顆粒 overflow/underflow 20%/80%分離效果。進行無害之河川底泥粗顆粒分離，減少處理體積(減量)；分離粗顆粒港池浚泥再利用。</p> <p>3. 感謝委員提問建議。今年計畫暫時聚焦於顆粒物理分離，其後再搜尋文獻，了解可搭配之其他整治處理技術。</p>
本署審查意見	計畫單位回覆
<p>貴署審查意見：</p> <p>1. 請說明此項設備之動力為何？</p> <p>2. 請說明粒徑分離後之再利用方式為何？</p> <p>3. 是否可再加裝其他設備，如磁選等，加強其設備之篩選能力及功能？</p>	<p>回覆情況：</p> <p>1. 主要為抽水機/抽泥機。</p> <p>2. 計畫期能達到(1)分離未受重金屬污染之河川底泥，減少處理容積(減容)、(2)分離可再利用之乾淨港池浚泥之研究目標。再利用方式：</p> <p>河川底泥可當護岸背填或高灘地種植使用。</p> <p>港區浚泥可護灘、養灘、擴港等使用。減少天然資源消耗。</p> <p>3. 應可在泥漿混合之前加裝初篩機、磁選，先篩除雜質，泥漿混合過程加裝攪拌、超音波震盪方式，讓泥水混合更完全。</p>

行政院環境保護署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

☐申請計畫書 ☒期中報告
☐修正計畫書 ☐期末報告 審查意見回覆對照表

計畫年度	107 年度	計畫類型	<input checked="" type="checkbox"/> 研究計畫 <input type="checkbox"/> 模場試驗
計畫類別	<input type="checkbox"/> 調查 <input checked="" type="checkbox"/> 整治 <input type="checkbox"/> 其他	主持人：張益國	
計畫名稱	設計底泥水力漩流器分離顆粒並驗證		
委員審查意見		計畫單位回覆	
<p>委員一</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 期中報告對計畫執行現況、流程及方法已具體說明。 2. 本計畫無自籌款。 3. 期中報告對本計畫後續執行工作項目已說明 (p. 56 說明)。 4. 計畫執行進度與預定進度相符，並未落後。 5. 期中報告顯示計畫研究內容與原計畫目的相符。 6. 期中報告的初步成果顯示，依據原計畫設計與初步成果所提出之討論與建議合理。 (1) 本計畫為延續性計畫，前期所擬探討而卻待探討的部份應優先說明。 (2) 本期中報告與前期計畫成果之間的關係待說明(期末報告)(5.3 節似乎與前期成果類似？差異性為何？或更精進？)。 (3) 63 μm：分離此粒徑的意義待討論（為何以此粒徑為討論對象？）。 (4) p. 56 提及專利，進度？ 7. 期中報告的初步成果顯示，目前的研究成果符合原計畫書所預期的成果(與前期成果之間的關係待說明)。 8. 期中報告的初步成果顯示，本計畫已有初步研究成果，報告中說明已有二位碩士研究生助理與跨領域團隊參與試驗，培育水土整治相關人才。 9. 期中報告已有初步成果，本成果是否可獲得專利或技術轉移，尚待未來期末報告中說明。 10. 期中報告已有初步成果，本研究可提升國內土壤與地下水污染整治技術與應用，符合政策。也可提升國內水土整治事業的發展，對社會經濟發展有助益。 		<p>意見回覆：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 謝謝委員肯定。 2. 是。 3. 謝謝委員肯定。 4. 謝謝委員肯定。 5. 謝謝委員肯定。 6. 謝謝委員。委員意見回覆說明如下： <p>(1) 前期主要探討土壤，考慮實驗室動力、規模等問題，設計符合實驗室尺寸之漩流器。該漩流器經由模擬條件計算 1m/s、2m/s、3m/s 流速，因為 1m/s 與 3m/s 都不收斂，所以最後選擇 2m/s 進行模擬。經 75 μm、150 μm、250 μm、500 μm 等測試，75 μm 比較不如預期來得好。有可能是攪拌不夠均勻、有可能是流速不夠快所影響。</p> <p>本期以底泥為標的，設計放大漩流器，因為漩流器較大，進流速度較高(設計 4 m/s，但不至於亂流)應能分離細顆粒；充分攪拌均勻部分則用初期 100%迴流來改善，期望能符合預期目標。</p> <p>(2) 前期主要探討水力漩流分離不同顆粒土壤，促進粗細顆粒分離。故設計入口直徑 55mm、入口速度 2m/s，底部出口直徑 10mm 之漩流管。前期模擬如下表所示。</p> <p>今年期計畫主要分離底泥，並且考慮模廠化(實務應用)。所以設計出尺寸更大、流速更快、且效率亦佳之漩流管及條件。</p> <p>差別在於：</p> <p>(a) 本年度針對底泥設計，漩流管尺寸、條件均與前期不同。</p> <p>(b) 流速更快，搭配 3 英寸入口直徑，$\Pi \cdot 0.0375^2 \cdot 4 \cdot 60 \cdot 60 = 63.6 \text{ m}^3/\text{hr}$ 每小時可處理 63.6 噸泥漿，客制化設計製作水力漩流器，處理量為實廠規模。</p> <p>(3) 考量離心機效能與極細砂顆粒粒徑，63 μm 大概已是離心機濾網實用極限。以此當設計分野進行分離，盡量用物理水力漩流方式分離大於 63 μm 顆粒，剩下的細顆粒再交給細目脫水機或板框壓濾機，爭取處理量及時效。</p> <p>(4) 專利部分；與承洋專利事務所討論中，看是要鎖系統或底泥為目標進行專利申請。目前，承洋協助專利搜尋，閃避其他專利；本案也需要更多之數據佐證，於期末提出專利申請。</p> 7. 謝謝委員意見。 	

	<p>前期與本期主要差異為標的物(土壤、底泥)不同，客制化漩流器、操作條件亦顯著差異。</p> <p>8. 謝謝委員肯定，將繼續努力。</p> <p>9. 是，遵造委員意見辦理。</p> <p>10. 謝謝委員肯定。</p>
<p>委員二</p> <p>1. 本計畫模擬之不同條件(如流速及顆粒大小)，預測之分離效率係屬理論值，如何驗證水力漩流分離器之實際效能，應有具體之規劃與說明。</p> <p>2. 請補充說明 5-3-2 節之模擬結果，本節內容似嫌簡略，均僅附上模擬之圖示，而未見討論與說明，實不易理解工作之成果。</p>	<p>意見回覆：</p> <p>1. 謝謝委員建議。計畫以實務需求導向，主要針對目標粒徑進行分離驗證。遂本計畫主要以 $63\mu\text{m}$(離心機濾網實用極限)為界，大於 $63\mu\text{m}$ 顆粒有 80%被收集去除為主要目標。再將模擬數據與實驗數據比對，修正操作條件與參數。</p> <p>2. 謝謝委員指正。於期末報告時補充說明模擬圖結果，以及 overflow/underflow 比例。</p>
<p>委員三</p> <p>1. 水力漩流器對顆粒之分離效能除與顆粒粒徑及入口速度相關外，顆粒之密度也是重要的影響參數，表 5-4 所列之粒徑單位為何？模擬分離效率又是對應何種顆粒密度？應明確交代。</p> <p>2. 表 3-3 及表 3-4 顯示高雄港底泥重金屬污染較嚴重之 CC1- CC5 其有機碳及粉粒與黏粒之佔比也相對偏高，針對這類底泥以水力漩流器分離之效果如何？建議以模擬或進行實驗方式驗證之。</p>	<p>意見回覆：</p> <p>1. 報告委員，表 5-4 所列粒徑單位為 μm。模擬時主要以容積密度(bulk density)1.75 進行模擬。謝謝委員指正，將於期末報告撰寫列入。</p> <p>2. 報告委員，CC1- CC5 主要是前鎮漁港，所以有機物含量高。目前也正著手規劃更細顆粒(如 $37\mu\text{m}$)的去除，期望能有所突破。謝謝委員建議。</p>
<p>委員四</p> <p>1. 目前試驗結果為已對進流底泥以 0.5 cm 篩網粗篩，且液體/固體比為 8-10，與未來對實際操作實用與操作限制宜再評估之。</p> <p>2. 建議對河川底泥與港區浚泥特性不同設計其水力漩流分離之操作條件。</p>	<p>意見回覆：</p> <p>1. 謝謝委員建議。確實，泥水比 1:8 可有效攪拌，但用水量偏高。目前正規畫朝啟動初期充分迴流以調降泥水比(1:6，甚至 1:4)等做法，符合資源友善需求。</p> <p>2. 謝謝委員建議。嘗試尋找河川底泥與港區浚泥合適之操作條件，達成粗細顆粒分離目標。</p>
<p>委員五</p> <p>1. 進度符合規劃。</p> <p>2. 軟體模擬結果對 $63\mu\text{m}$ 顆粒有 79%分離效率，應有再優化的空間。</p>	<p>意見回覆：</p> <p>1. 謝謝委員。</p> <p>2. 謝謝委員建議。模擬工作未曾停歇，除目前所得最佳漩流器條件外，亦另嘗試進行細長型之漩流器模擬(主要對付細顆粒，粗顆粒不合適)，期望有時間/經費進行串聯模組化及實驗分析。</p>
<p>委員六</p> <p>1. 研究實驗過程中，是否應控制進料底泥濃度(含水率)、流速等參數，如何控制？若含水率過高，能否降低？</p> <p>2. 請說明實驗分離之底泥經檢測分析後，如何處理？</p>	<p>意見回覆：</p> <p>1. 報告委員，流速主要依模擬條件進行試驗，可藉由變頻器控制流速。含水率部分，為達充分攪拌，先前都以泥水比 1:8 控制，現嘗試 1:6，未來希望 1:4，減少水分用量。</p> <p>2. 經使用後之底泥，都經學校委由合格清運/處理廠商處理處置。</p>
<p>專案主持人：張益國 (簽名及蓋章)</p>	

行政院環境保護署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

☐申請計畫書 ☐期中報告 ☐修正計畫書 ☒期末報告 審查意見回覆對照表

計畫年度	107 年度	計畫類型	<input checked="" type="checkbox"/> 研究計畫 <input type="checkbox"/> 模場試驗
計畫類別	<input type="checkbox"/> 調查 <input checked="" type="checkbox"/> 整治 <input type="checkbox"/> 其他	主持人：張益國	
計畫名稱	設計底泥水力漩流器分離顆粒並驗證		
委員審查意見		計畫單位回覆	
委員一 1. 期末報告對研究計畫的執行現況、研究流程及方法說明具體完整。 2. 計畫後續執行工作項目及內容已於報告書中 P. 74 說明，並已提出相關建議。 3. 計畫執行進度與預定進度大致相符，計畫執行進度並無落後。 4. 期末報告所說明的研究內容與原計畫目的大致相符。 5. 根據期末報告內容所提出之討論與建議合理，具有潛在的應用價值。但 5.3.4 節的相關待改進之處，仍待後續的研究持續改善，以提升成效。 6. 期末報告所說明的整體研究成果符合預期，但工程實務的應用性(與應用對象)仍待技術轉移且於實場應用後，才會有實務上的成效驗證。但本計畫的成果具實務應用潛力。 7. 本研究計畫的學術產出及活動、人才培育符合預期。 8. 本計畫的研發成果已申請專利，且已有技術轉移，成效頗佳。實際的應用價值仍待持續評估。 9. 本計畫對國內土壤地下水污染領域的發展有所助益。		委員意見回覆： 1. 謝謝委員肯定。 2. 謝謝委員。 3. 謝謝委員。 4. 謝謝委員。 5. 謝謝委員，計畫團隊仍將繼續努力。 6. 謝謝委員肯定，後續實務應用將持續精進。 7. 謝謝委員。 8. 謝謝委員。 9. 謝謝委員。	

委員二

1. 重金屬含量及其於 underflow 及 overflow 之分布應再進一步確認，以表 5-6 所列之 As 濃度為例，原樣濃度為 9.8 mg/kg，underflow 為 11.3 mg/kg，overflow 為 11.4 mg/kg，表示經分離後總 As 含量反而上升，是否合理？其他金屬也有類似情況出現。

2. 客製化漩流管是否已經製作完成，其最佳尺寸及各部分之比例為何？材質又為何？建議補充之。

3. 以水力漩流器分離底泥顆粒是否有最佳之水/泥比(liquid to solid ratio)？其又如何影響顆粒分離效率及系統耗能？建議補充。

委員意見回覆：

1. 謝謝委員意見。As 在原樣濃度測試及不同粒徑分布測試中(表 5-3)，不同粒徑 As 含量差異不大，所以雖可用漩流分離粗細顆粒，但細顆粒富集金屬之效果不顯著。Ni 金屬則比較明顯。

2. 漩流管設計完成並製作，且進行實驗，其條件如下圖，亦置於報告中圖 5-23。材質以不鏽鋼製成。

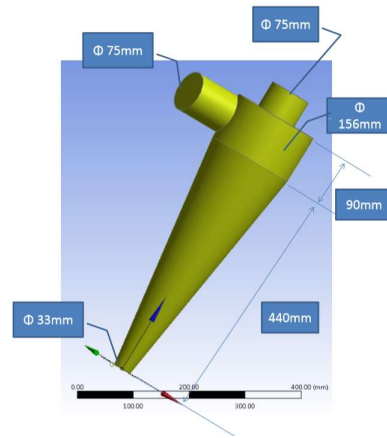


圖 5-23 最佳模擬條件下水力漩流器圖

3. 最佳之水/泥比其實考量能分離即可。水/泥比愈高，當然泥漿濃度低，顆粒較好分離，但是耗費水量及時間。以本研究而言，水泥比=4 即可獲得良好之顆粒分離效果，相較於水泥比=8 而言，節省許多水量及時間。水泥比=4，未考慮回收水情況下，以每小時操作而論，
水費 688.3 元
電費 32.4 元
(補充說明如 5-3-4 節)

水泥比=8 情況下，水費及電費加倍。

<p>委員三</p> <ol style="list-style-type: none"> 中英文摘要應具體說明本研究之成果，請重新撰寫。 請補充說明水力漩流器之設計成果，並說明試驗之規模為何？ 報告書第 5-3 節之模擬結果，似乎仍僅以模擬圖示呈現，建議應有更為詳細的討論與說明。 本計畫對於驗證效能之說明仍不夠明確，期中報告審查意見中，亦有委員二提及，如何驗證水力漩流分離器的實際效能？建議本計畫期末報告應有詳細說明，以確認本計畫的成果。 	<p>委員意見回覆：</p> <ol style="list-style-type: none"> 謹遵委員意見辦理。 水力漩流器之設計成果如 5-3-2 節最佳模擬條件設計出漩流器尺寸(修正補充如圖 5-23 所示)。試驗規模為 4m/s 流速。 $\pi * (0.075/2)^2 * 4 \text{ m/s} * 60 \text{ s/min} = 1.06 \text{ m}^3/\text{min}$ 每分鐘可處理 1.06m³ 左右泥漿。 謝謝委員建議。本研究模擬不同粒徑顆粒於不同條件下 overflow、underflow 流出比例。 分離效率 = overflow 積分面積 / (overflow + underflow) 積分面積。 補充說明如內文。 謝謝委員建議。因為當初模擬設計時，即是以 63μm 顆粒 80% 去除率進行設計水力漩流管，以此為規劃測試不同條件，最佳模擬條件為： <ol style="list-style-type: none"> 入口直徑 75mm(3inch) 入口速度 4m/s 底部出口直徑 33mm 管徑 156mm 下部管長 440mm 漩流管設計圖如圖 5-23，以此進行後續實驗，實驗驗證台中灌溉渠道底泥小於 63 μm 顆粒分離效率為 78.0%，略低於設計分離效率；高雄港浚泥小於 63 μm 顆粒分離效率為 82.3%，接近設計分離效率。
---	---

<p>委員四</p> <ol style="list-style-type: none"> 建議宜泥水比是否能有效降低 1:6 以下更能符合現地運用作可行性評估。 是否對分離後底泥分析其成份(含可能污染物)以達本計畫之目的之一。 建議以目前執行分離粒徑效應評估對受污染重金屬農地，細顆粒(高污染部分)，作粗略分選，作相關評估論述。 	<p>委員意見回覆：</p> <ol style="list-style-type: none"> 謝謝委員建議。目前泥水比 1:4，可達成分離目標。 謝謝委員建議。水力分離後底泥樣本因當初委由成功大學分析 XRF，樣本尚未寄返。待寄返後，再進行相關測試或委由成大測試。惟目前從 XRF 數據看來，本次所採集台中、彰化、高雄樣本，粗細顆粒中，重金屬濃度分布差異不顯著。 謝謝委員建議。補充於 5-4-2，提出建議未來可一併處理灌溉渠道底泥、受污染重金屬農地，將細顆粒(高污染部分)分選出來進一步處理處置。
<p>委員五</p> <ol style="list-style-type: none"> 進度符合期末報告規劃。 建議增加分離洗選與土壤現地處理之成本效益比較，以突顯本方法的優勢。 研究設定針對目標粒徑 63 μm 以上之顆粒有 80% 的分離效果，但該效能會受到土壤組成與質地的影響，是否可針對不同的土質有因應的操作調整方法？或是需要重新設計新的水力漩流分離器？此部分應補充說明，以釐清與 4-3 節所提「國外購入之整套設備有適合之操作條件與分離區間，無法單一應用於所有情況」，本方法如何克服，否則一個一方的一種土質設計一支力漩流分離器，在成本效益上不見得比較有利。 	<p>委員意見回覆：</p> <ol style="list-style-type: none"> 謝謝委員。 謝謝委員建議。補充說明並計算分離洗選處理成本於 5-3-4 節中。 謝謝委員意見，回覆如下： <ol style="list-style-type: none"> (1)水力漩流分離受土壤組成與質地影響，顆粒粒度過度集中不易分離。 (2)每支漩流器設計時，主要考量其主要去除粒徑範圍，而有不同尺寸、長度、形狀。例如報告中，高雄碼頭浚泥，顆粒偏小，原樣 $d_{90}=27.55\ \mu\text{m}$、underflow $d_{90}=46.80\ \mu\text{m}$、overflow $d_{90}=50.29\ \mu\text{m}$(百分之九十都小於該粒徑)。實非屬本研究欲分離 63 μm 細泥所設計最佳模擬條件之操作範圍，故幾乎無分離效果。欲克服上述困難，得重新設計更細長型漩流管、流速更快，分離更細顆粒。 (3)建議不同土質設計(或選用)不同漩

<p>4. 圖 5-25 為何對 200 μm 的顆粒模擬與實驗值差異最大？</p> <p>5. 表 5-6 實際分離後，underflow 與 overflow 的重金屬含量為有明顯的差異，此與「設計本水力漩流器以分離減少需處理的底泥量」相互矛盾，應思考如何驗證底泥做水力漩流分離的必要性。</p>	<p>流器，一支漩流器約 80,000 元，價格尚屬合理。</p> <p>國外購置漩流器參考欲分離土壤/泥砂質地而選擇不同漩流器。惟國外進口組件多是套裝，可調整變更部分有限，縱使更換漩流管，相對應閥件、管徑、流速、串聯/並聯調整處理量等不如本土化靈活搭配。</p> <p>4. 經與共同主持人詳細討論 200 μm 顆粒模擬與實驗值差異，推估可能原因為：FLUENT 軟體用數值方式跑模型，模擬顆粒移動，剛好 200μm 顆粒效果不佳。建議可檢視實際漩流過程，200μm 分離實驗值來修正 FLUENT 數值參數（需反饋給軟體工程師討論）。</p> <p>5. 謝謝委員意見。表 5-6 顯示彰化底泥水力漩流處理後，underflow 與 overflow 的重金屬分布結果。</p> <p>(1) 若單純只考慮粗細顆粒分離(如圖 5-26)，其實顆粒分離效果不錯。</p> <p>(2) 惟此次採樣之彰化底泥，重金屬分布並未如預期中細顆粒含較高污染量重金屬，因此減容效用未能彰顯。</p> <p>(3) 如處理細顆粒含高污染物之底泥/土壤，本研究仍具必要性。</p>
<p>委員六</p> <p>1. 本實驗最後可控制之進料底泥濃度(含水率)、流速等參數為何？</p> <p>2. 本實驗現階段結果是否可用於現地實場操作？需不需要考量改變底泥水力漩流分離器之設置方式?如何配置?以達實場操作效益。</p>	<p>委員意見回覆：</p> <p>1. 控制進料底泥濃度為泥水比 1:4 (w/w)，流速為 4m/s。</p> <p>2. 現階段設備處理能力屬模廠規模，於上述條件下，每小時可處理 60m^3 以上泥漿，已可應用於現地操作。只要能於現地有適當電源及水源，即可將實驗室設備應用於現地。</p> <p>或者例如裕山環境工程股份有限公司</p>

有移動式水力漩流設備，搭配使用合適之漩流管並適度微調管線與進料槽，提供電源及水源，即可進行現地處理。



3. 根據計畫結果與討論，針對不同地區底泥進行粗細分離，是否應優先考量其物化性質(如平均粒徑分析等)請說明之，以期達成所設計之水力漩流分離器之分離效率。

3. 謝謝委員意見。針對不同地區底泥粗細分離處理，確實需優先考量其粒徑分布特性。

(1) 建議待處理底泥 d_{50} 與水力漩流分離器設計目標值相近。

(2) 若待處理底泥 d_{10} 、 d_{50} 、 d_{90} 能各差一個 order，則水力漩流分離效率佳。

The 11th International Conference on the Challenges in Environmental Science and Engineering

CESE-2018

4-8 November, Bangkok

<http://cese-conference.org/>



15 August 2018

Paper Ref: CESE2018-8-008
Corresponding Author: Yi-Kuo Chang
Co-Authors: Zih-En Huang, Yi-Liang Shu, Pai-Huang Shih, Jhih-Hong Hu
Title of the Abstract: Designed hydrocyclone for heavy metal contaminated sediments separation in irrigation canals

Dear Authors,

It is our pleasure to inform you that the above abstract you submitted for CESE-2018 conference has been accepted for **oral presentation** based upon peer-review by the technical committee of the event. The abstract will be published in the conference Proceedings. Could you kindly reply us by return email (cese.conference@gmail.com and li.shu846@gmail.com) confirming that one of the authors of the abstract will be presenting the paper at the conference as soon as possible please?

Your paper will be recommended for publication in a special issue of the *Journal of Environmental Management* after peer review. The journal will call for papers for the CESE-2018 special issue in December and we will notify you as soon as the announcement for the call has been made by the journal. The special issue will carry only the papers that are presented at CESE-2018 by a registered participant.

Please kindly book your accommodation through CESE-2018 organisers at Sukosol Hotel (conference venue) or by your own well in advance as there will be a lot of demand for the accommodation in Bangkok around November due to various social activities. Also kindly register for the conference early (early bird deadline for registration is 15 August 2018) in order to facilitate the smooth organization of the conference.

Please send us your short biography to cese.conference@gmail.com (150 words or less) also by the 15th of August.

Look forward to meeting you in Bangkok, Thailand.

Kind regards,

Dr. Li Shu

On behalf of the CESE-2018 Organizers

(li.shu846@gmail.com; cese.conference@gmail.com)

本論文已被選退為「口頭發表」

中華民國環境工程學會研討會論文
著作權授權同意書

論文題目：土壤顆粒分離程序評估-以中部某重金屬污染農地及南部某油污染土壤為例

論文編號：S011070089

作者：劉原宏、張裕模、黃子恩、徐一曼、施百鴻、張益國

請留意今年度(107)無須回傳論文著作權授權同意書，僅需要點選【同意】鍵後即可繼續完成後續定稿作業

提醒您：今年度(107)年會為11月16日

報到時間地點為：08:30 國立成功大學環工系（台南市東區大學路1號）

作者代表人（簽名）：

身份證字號：

電話號碼：

電子郵件信箱：

戶籍地址：

日期：

~~請列印，簽名後，將正本郵寄本會(因e-mail無法完成授權)：台北市(106)大安區復興南路一段283號9樓，中華民國環境工程學會秘書處王菁蓮小姐收，TEL:02-27540326，e-mail:eienve@ms26.hinet.net，謝謝。~~