



行政院環境保護署

111 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

3D 列印製做水力漩流管應用於油污染土壤處理暨後續 CLSM 再利用研究

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：111 年 9 月 1 日起至
112 年 8 月 31 日止

中華民國 112 年 8 月 印製



3D 列印製做水力漩流管應用於油污染土壤處理暨後續 CUSM 再利用研究 期末報告(定稿) 行政院環境保護署



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」

☐構想書 ☐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	111 年度	計畫類型	☐ 先導型 ☒ 研究型 ☐ 模場型
計畫類別	☐ 調查 ☒ 整治 ☐ 其他	主持人：張益國 NO：B3	
計畫名稱	3D 列印做水力漩流管應用於油污土壤處理暨後續 CLSM 再利用研究		
審查意見		執行單位回覆	
委員一 1. 本計畫結合值模式、3D 列印技術，製作小型水利漩流器，測試後作為較放大模場設備依據，再進行模場設備製作及測試，整體研究結果，具有應用潛力。 2. 建議在 4-1-1 節中，補充粒徑分析的方法、設備、及執行樣品數。例如雷射粒徑分析儀、顯微鏡、影像軟體、篩網等廠牌與型號、使用樣品重量等。 3. 表 5-1 及 5-2 為多少次樣品分析的結果？建議補充平均值及標準差。 4. 5-2 節的圖，建議可以說明 overflow 及 underflow 的平均數值，如何由圖中求的，讓讀者可以更清楚瞭解結果。 5. 建議可以補充說明實場水力漩流器尺寸及處理量。		<u>委員意見回覆：</u> 1. 謝謝委員肯定。 2. 謝謝委員建議。已依委員建議補充雷射粒徑分析儀型號、電子顯微鏡型號、軟體型號、篩網廠牌、使用樣品量等。再請委員俯閱 4-1-1 節。 3. 表 5-1 及表 5-2 為樣品重複分析結果，因此列出量測數據範圍。 4. 謝謝委員意見。已於報告中說明水力漩流分離模擬結果，將計算水力漩流器 101 ~ 150 疊代情況下，overflow/underflow 切面粒子通過平均數量，藉以計算分離結果。 5. 謝謝委員建議。已補充說明漩流管尺寸：入口直徑 36mm、底部出口直徑 30mm、管徑 80mm、管長 529mm。以流速 11m/s 計算，每小時可處理： $\pi * 0.036^2 / 4 * 11 * 60 * 60 = 40.3 \text{ m}^3$ 泥漿，固液比 1:5，乾土約可處理 6.7 噸。	



委員二 1. 報告第 56 頁表 5-3 第 2 列的 Overflow 為 0.7%是否誤植，與其他列數字差異甚大。 2. 本案以 3D 列印 ABS 材質測試，研究結論說明”分離效果尚可”，但 3D 列印成本較原預估高出一倍，此一方式是否值得推廣，建議再做補充說明。	委員意見回覆： 1. 謝謝委員意見。模擬條件：流速 2m/s；顆粒大小 150 μm，計算水力漩流器 101~150 疊代情況下，可得 overflow 通過粒子平均 7.3 顆；underflow 通過粒子平均 1104.9 顆。overflow:underflow=7.3:1104.9=0.7:99.3。 2. 謝謝委員意見。因去年撰寫計畫書時，電話詢價 3D 列印只需 2 萬；但今年列印漲到 4 萬。(4 位天平亦從去年 4 萬新台幣/部，漲到今年 8 萬/部)不鏽鋼管 8.8 萬/支。若從製造成本來看，或許不划算；但是因為 3D 列印速度快、零組件可更換，若遇處理效果不佳情況，可快速修正，可部分修改。屬客製化需求。
委員三 1. 計畫進度符合原定目標。 2. 完成 CLSM 產品製作與測試，測試結果說明清楚。 3. 專利申請情形，請於自評表備註欄內註明。 4. 期刊論文發表後，請於自評表備註欄註明。 5. 建議後續持續研究，尋求廠商合作推廣。	委員意見回覆： 1. 謝謝委員意見。 2. 謝謝委員肯定。 3. 敬依委員指示辦理。 4. 敬依委員指示辦理。 5. 謝謝委員意見。將依委員意見尋求廠商合作、推廣。
委員四 1. 本研究以電腦模擬，輔助開發 3D 列印水利漩流管，應用於油污土壤處理，期末報告成果具體，已達預期目標。 2. 土壤理化特性對篩分與去除率的影響可再深入探討，未來可針對不同	委員意見回覆： 1. 謝謝委員肯定。 2. 後續若有機會，深入探討土壤理化特性對篩分與去除率的影響。並討論不同質地、土綱、水分與 O.M%影響。 3. 謝謝委員寶貴建議。 4. 因油污染土壤採取主要靠合作公司



質地、土綱、水份與 O.M%含量進行研究。 3. 油污土壤可朝不同風化程度進行研究(自行配置污染土壤)。 4. 本研究之 TPH 油污濃度僅 1600mg/kg，未來可探討高污染濃度之土壤。	幫忙。先前已拜託公司盡量取高污染濃度土壤，但實際取得油污染土壤 TPH 偏低，雖礙於現狀，但略為可惜。將遵從委員意見，未來商請合作公司盡量保留高濃度油污染土壤，提供研究進行。謝謝委員建議。
委員五 1. 建議後續研析傳統不鏽鋼及 3D 列印漩流管，比較不同材質之設備使用損耗(率)程度。	<u>委員意見回覆：</u> 1. 謝謝委員建議。漩流管磨耗是值得注意重點，是缺點也是商機。將依委員建議，後續研析傳統不鏽鋼及 3D 列印漩流管，比較不同材質之設備使用損耗(率)程度。而目前因為操作量體不大，磨耗程度尚不明顯。



專案基本資料表

專案性質		☒ 實驗性質 ☐ 非實驗性質		專案類別(單選)		☒ 研究型 ☐ 模場型	
研究主題		☐ 調查 ☒ 整治 ☐ 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 臺中市北屯區廬子路 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	
協同主持人		施百鴻(自籌款支籌)		職等／職稱		副教授	
專案名稱	中文	3D 列印製做水力漩流管應用於油污染土壤處理暨後續 CLSM 再利用研究					
	英文	Applying 3D-printed hydrocyclone for oil-contaminated soil treatment and use of hydrocyclone underflow stream soil in CLSM					
	關鍵字	3D 列印、水力漩流、控制性低強度回填材料					
執行期程		自民國 111 年 9 月 1 日起 至民國 112 年 8 月 31 日止					
專案主持人		姓名：張益國		Email：ykchang@ctust.edu.tw		專線：04-22390168 手機：0937365778	
兼任助理		姓名：陳宥炘		Email：stl7659@gmail.com		專線：04-22390168 手機：0988417190	
經費分析總表 (僅模場試驗專案需填寫兩年度金額)	專案預估經費			第一年金額	第二年金額	編列說明	
	1.	人事費用		380,600		(1~5 項相加之 50%為限)	
	2.	貴重儀器使用含維護費		66,000		(與計畫實驗相關)	
	3.	消耗性器材與主要費用		254,700		(與計畫主體相關)	
	4.	其它研究相關費用		79,860		(含差旅與租賃費用)	
	5.	雜支費用		38,000		(1~6 項相加之 5%為限)	
	6.	行政管理費		50,840		(1~5 項相加之 10%為限)	
	7.	自籌款		100,000		裕山環境工程股份有限公司	
	申請補助金額(1~6 項)			870,000		總金額：870,000	
	計畫總金額(1~7 項)			970,000		總金額：970,000	

專案主持人(簽名及蓋章)：

日期：112.8.28

(請於空白處蓋上單位大小章)



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

111 年度專案成果績效自評表

一、專案基本資料

填表日期：112 年 8 月 28 日

專案性質	☒ 實驗性質 ☐ 非實驗性質	專案類別	☒ 研究型 ☐ 模場型
研究主題	☒ 整治 ☐ 調查 ☐ 其他		
申請機構系所	中臺科技大學 環境與安全衛生 工程系	專案主持人	張益國
專案名稱	3D 列印製做水力漩流管應用於油污染土壤處理暨後續 CLSM 再利用研究		
專案執行期程	☐ 申請階段 ☐ 期中 ☒ 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欄位中。

(一) 學術面

項目 \ 目標達成程度			申請 預估數	期中 達成數	期末 達成數	結案後半年 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		2023 土壤與 地下水研討 會- 3D 列印 製做水力漩 流管應用於 油污染土壤 分離暨後續 CLSM 再利 用研究
	2.國外投稿 (篇數)	(1)期刊論文					
		(2)國際研討會 論文發表	1	0	1		2023 AquaConSoil - Applying hydrocyclone separation for oil-contamina ted soil treatment and reutilization of underflow stream soil in controlled low strength materials



項目 \ 目標達成程度			申請 預估數	期中 達成數	期末 達成數	結案後半年 達成率	備註 (說明未達成 原因或學術產 出發表名稱)
	3.報告 (篇數)	(1)技術報告					
		(2)研究報告					
	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	0	2		
		(2)博士					
	8.研究團隊 (個數)	(1)跨領域團隊	1	0	1		航太流體
		(2)跨機構團隊	1	0	1		輔英科大
		(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	期中 達成數	期末 達成數	結案後半年 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				
			新型/設計	1	0	0	與承洋專利公司洽談及前置作業
			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)					
(2)品種/系(件數)							
C 產學研合作	6.促成合作 研究	件數	1	0	1		裕山公司
		金額(仟元)	300	0	500		
	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

目標達成程度			申請預 估數	期中 達成數	期末 達成數	結案後半年 達成率	備註 (說明未達成原 因或其他詳細資 料)
項目							
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 政策 推動	3.協助政府推動 (件數)	(1)政策					
		(2)法規					
C 技術 效益	4.整治技術提升(%)						
	5.整治成本降低(%)		10	0	10		
	6.提升能源效率(%)						
7.其他指標 (請自行命名)		(請自填)					



三、請依前述學術面、產業面、政策面等預期量化成果，具體敘明研究成果對本署政策推動之助益。(200 字為限)

學術面(如國內外研討會、期刊投稿件數、或人才培育碩博士生說明)

- 1.參與國際研討會發表論文 1 篇、參與國內研討會發表論文 1 篇。
- 2.培育 2 名碩士生。

產業面(如合作研發產業、申請專利、洽談技術移轉廠商件數說明)

1. 預估申請新型專利 1 件:應用水力漩流土壤製做 CLSM。
2. 洽談產業合作開發 1 件(可能合作對象為裕山公司，協助建立顆粒分離)，金額 50 萬元。

政策面(如整治費用降低、特定污染物整治效益提升、或提供政府作為監測/管制標準、污場址管理等政策及法規研訂之參考)

1. 務實改善油污染土壤水洗程序、增加水洗產出土方之再利用可能性，降低 10% 以上成本。
2. 去化油污染土壤水洗產出土方，增進再利用機會，對資源利用有正面的助益。



四、 主要研究人力

請依照「專案主持人」、「協同主持人」、「專任人員」、「兼任人員」及「臨時工」等類別之順序分別填寫

類別	姓名	服務機構/系所	職稱	在本研究專案內擔任之具體工作性質、項目及範圍	執行期間
專案主持人	張益國	中臺科技大學/環境與安全衛生工程系	副教授	規劃設計、採樣、實驗進行、數據討論、研究報告撰寫	111.9.1~112.8.31
協同主持人	徐一量	中臺科技大學/環境與安全衛生工程系	副教授	協助研究計畫規劃設計、基本特性分析及流況模擬進行	111.9.1~112.8.31
協同主持人	施百鴻	輔英科技大學/環境工程與科學系	教授	協助研究計畫規劃設計、基本特性分析及 CLSM 測試	111.9.1~112.8.31
兼任人員	陳宥忻	中臺科技大學/環境與安全衛生工程系	碩士生	協助樣品採集、分析	111.9.1~112.8.31
兼任人員	李易承	中臺科技大學/環境與安全衛生工程系	碩士生	協助樣品採集、分析	111.9.1~112.8.31

五、 產業界資源投入表

專案執行若有與產業界合作，請執行單位依實際量化成果填寫於欄位中。

投入資源類別	數量	說明
1.自籌款	100,000 元	裕山公司支持 100,000 自籌款及協助採樣
2.人力	6 人月	立順興公司派 6 位工程師協助測試，為期 1 個月。
3.設備	7 種以上	立順興公司混拌機、抗壓機、氣離子分析儀、天平、混凝土模具、坍度計、堆高機
4.其他資源 (請自行增列)	3	立順興公司水費、電費、場地:無償提供及使用



研究成果中英文摘要

(一) 中文部分：

本研究以電腦模擬，輔助開發 3D 列印水力漩流管，再以油污染土壤實驗驗證成效。研究結果顯示於 11 m/s 進流條件送漿入 3D 列印水力漩流管，overflow stream 中 78.7% 顆粒粒徑均在 $63\mu\text{m}$ 以下、underflow stream 中，87.6% 在 $63\mu\text{m}$ 以上。此外，製作同尺寸不鏽鋼水力漩流管裝設於實廠，於 11 m/s 流速下 underflow stream 土壤 TPH 為 575 mg/kg，underflow stream 土壤符合土壤污染管制標準。

另外，將 underflow stream 土壤 20%、50%、100% 取代天然細粒料進行控制性低強度回填材料 (CLSM) 製做。underflow stream 土壤含水率 23.0%、氯離子含量 0.011% 等尚符需求。不同摻配比例拌合之 CLSM 產品其坍流度、水溶性氯離子含量、抗壓強度、TPH 分析結果等符合控制性低強度回填材料需求，成功將經水力漩流分離 underflow stream 土壤再利用產製 CLSM 產品，創造減廢及循環經濟價值。

關鍵詞: 3D 列印、水力漩流、控制性低強度回填材料

**Abstract :**

In this work, the FLUENT flow simulations are help to calculate the cut-off size and fractional efficiencies in hydricyclone separators. The demonstration of liquid-solid flow behavior and the simulation results are feedback to the new hydrocyclone dimensions design. Furthermore, a 3D-printed hydrocyclone was made and was used for oil-contaminated soil treatment. The 3D-printed hydrocyclone performance validations are achieved by comparing the results of coarse/fine particle separations. In addition, stainless steel hydricyclone separator was manufactured with the same dimention of 3D-printed hydrocyclone and was installed in the factory. Under the flow rate of 11 m/s, the TPH of the underflow stream soil was 575 mg/kg, which could meet the TPH regulation below 1,000 mg/kg of Soil Pollution Control Standard in Taiwan.

Besides that, the soil from hydrocyclone underflow stream with low TPH-concentration was reutilized as fine aggregates used in controlled low strength materials (CLSM) manufacturing. The soil and subsequence CLSM product pass the slump flow test, water soluble chloride ion content test, compressive strength test, CLSM TPH-content test. It implied that the coarse particles from hydrocyclone separation might be an reutilization materials alternative.

Keywords: 3D printing, hydrocyclone, controlled low strength materials(CLSM)



目錄

審查意見回覆對照表

專案基本資料表

專案成果績效自評表

研究成果中英文摘要

第一章 前言	1
第二章 研究目的	4
第三章 文獻探討	7
3-1 油污染土壤	7
3-2 水力分離	9
3-3 FLUENT 流況模擬	13
3-4 3D 列印製造	18
3-4-1 3D 建模	18
3-4-2 列印技術	19
3-5 控制性低強度回填材料	21
第四章 研究方法與過程	22
4-1 土壤採樣與分析	22
4-1-1 油污染土壤採樣	22
4-1-3 實驗中所使用的儀器設備	25
4-2 水力漩流管設計	26
4-3 3D 列印製作水力漩流管	28
4-4 CLSM 再利用研究	30
4-5 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	32
4-6 執行成果及預期效益	34
4-6-1 預期完成工作項目	34
4-6-2 執行成果貢獻及預期成果效益	34
4-7 工作進度甘特圖	36
第五章 結果與討論	37
5-1-1 油污染土壤採樣	37
5-1-2 油污染土壤基本特性分析	38
5-1-2-1 油污染土壤 pH 值	38
5-1-2-2 油污染土壤物理/化學特性	38
5-1-2-3 總石油碳氫化合物分析(TPH)	39
5-1-2-4 油污染土壤顯微鏡顆粒觀察	40
5-2 水力漩流管流況模擬	42
5-3 3D 列印及水力漩流試驗	57
5-4 實廠水力漩流分離試驗	61
5-5 CLSM 試驗	64
5-5-1 試做	64



5-5-2 實廠 CLSM 試驗結果	65
5-6 小結	69
第六章 結論與建議	70
6-1 結論	70
6-2 建議	71
參考文獻	72
附件一 審查意見回覆對照表(構想書)	
審查意見回覆對照表(期中報告)	



圖次

圖 1-1 水力漩流管設計開發流程圖	3
圖 2-1 水力漩流管模擬模型及流場靜壓切面圖(自行模擬)	4
圖 3-1 水力漩流分離器之結構與組裝照	10
圖 3-2 FLUENT 流況模擬畫面	15
圖 4-3 Solidworks 進行電腦 3D 建模示意圖(摘自立體智動精密機器股份有限公司, 2022)	19
圖 4-1 實驗流程圖	23
圖 4-2 FLUNET 結合至 ANSYS 前處理器建構三維模型(團隊自行模擬)	26
圖 4-3 水力漩流管網格生成	27
圖 4-4 3D 列印機台照片及技術規格(廠商提供)	28
圖 5-1 TPH 油污染土壤採樣	37
圖 5-2 油污染土壤雷射粒徑分析	39
圖 5-3 油污染土壤原樣照片	40
圖 5-4 油污染土壤中 $>150\mu\text{m}$ 顆粒照片	40
圖 5-5 油污染土壤中 $150-63\mu\text{m}$ 顆粒照片	41
圖 5-6 油污染土壤中 $<63\mu\text{m}$ 顆粒照片	41
圖 5-7 水力漩流模擬流速 2m/s、顆粒大小 $63\mu\text{m}$ 條件下, (a)overflow 出流 (b)underflow 出流顆粒分佈情況	42
圖 5-8 水力漩流模擬流速 2m/s、顆粒大小 $150\mu\text{m}$ 條件下, (a)overflow 出流 (b)underflow 出流顆粒分佈情況	43
圖 5-9 水力漩流模擬流速 3m/s、顆粒大小 $63\mu\text{m}$ 條件下, (a)overflow 出流 (b)underflow 出流顆粒分佈情況	44
圖 5-10 水力漩流模擬流速 3m/s、顆粒大小 $150\mu\text{m}$ 條件下, (a)overflow 出流 (b)underflow 出流顆粒分佈情況	45
圖 5-11 水力漩流模擬流速 5m/s、顆粒大小 $63\mu\text{m}$ 條件下, (a)overflow 出流 (b)underflow 出流顆粒分佈情況	46
圖 5-12 水力漩流模擬流速 5m/s、顆粒大小 $150\mu\text{m}$ 條件下, (a)overflow 出流 (b)underflow 出流顆粒分佈情況	47
圖 5-13 水力漩流模擬流速 7m/s、顆粒大小 $63\mu\text{m}$ 條件下, (a)overflow 出流 (b)underflow 出流顆粒分佈情況	48
圖 5-14 水力漩流模擬流速 7m/s、顆粒大小 $150\mu\text{m}$ 條件下, (a)overflow 出流 (b)underflow 出流顆粒分佈情況	49
圖 5-15 水力漩流模擬流速 9m/s、顆粒大小 $63\mu\text{m}$ 條件下, (a)overflow 出流 (b)underflow 出流顆粒分佈情況	50
圖 5-16 水力漩流模擬流速 9m/s、顆粒大小 $150\mu\text{m}$ 條件下, (a)overflow 出流 (b)underflow 出流顆粒分佈情況	51
圖 5-17 水力漩流模擬流速 11m/s、顆粒大小 $63\mu\text{m}$ 條件下, (a)overflow 出流 (b)underflow 出流顆粒分佈情況	52



圖 5-18 水力漩流模擬流速 11m/s、顆粒大小 150 μ m 條件下，(a)overflow 出流(b)underflow 出流顆粒分佈情況	53
圖 5-19 水力漩流模擬流速 13m/s、顆粒大小 63 μ m 條件下，(a)overflow 出流(b)underflow 出流顆粒分佈情況	54
圖 5-20 水力漩流模擬流速 13m/s、顆粒大小 150 μ m 條件下，(a)overflow 出流(b)underflow 出流顆粒分佈情況	55
圖 5-21 3D 列印水力漩流管架於系統上照片	57
圖 5-22 3D 列印水力漩流管於 9 m/s 流速下之(a)overflow、(b)underflow 雷射粒徑分析圖	58
圖 5-23 3D 列印水力漩流管於 11 m/s 流速下之(a)overflow、(b)underflow 雷射粒徑分析圖	59
圖 5-24 3D 列印水力漩流管於 13 m/s 流速下之(a)overflow、(b)underflow 雷射粒徑分析圖	60
圖 5-25 實廠水力漩流分離試驗照片	61
圖 5-26 不銹鋼水力漩流管於 9 m/s 流速下之(a)overflow、(b)underflow 雷射粒徑分析圖	62
圖 5-27 不銹鋼水力漩流管於 11 m/s 流速下之(a)overflow、(b)underflow 雷射粒徑分析圖	63
圖 5-28 小拌測試	64
圖 5-29 坍流度測試	64
圖 5-30 試體製作測試	65
圖 5-31 氯離子量測過程照片	66
圖 5-32 不同摻配比例坍流度照片	67
圖 5-33 不同摻配比例落沉照片	68



表次

表 1-1 美國常見之物理分離技術(摘自陳呈芳，2007)	1
表 3-1 CLSM 之性質要求(摘自行政院公共工程委員會，2021)	21
表 5-1 油污染土壤樣本 pH 值	38
表 5-2 TPH 油污染土壤粒徑分析結果	38
表 5-3 不同入口流速條件下，不同粒徑顆粒分離效能	56
表 5-4 實廠既有配比	65
表 5-5 不同摻配比例拌合配比之坍流度、落沉及氯離子試驗分析結果	67
表 5-6 不同摻配比例拌合配比之抗壓強度及 TPH 試驗分析結果	68





第一章 前言

物理分離技術為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。陳呈芳(2007)指出，美國一般所採之物理分離技術(如表 1-1)所示，利用物理分離將污染土壤中之重金屬污染物濃縮後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。而目前國內外針對重金屬污染土壤常用的整治技術之一為土壤清洗法(Soil-washing)，其主要結合物理分離及化學萃取的方式，將土壤與重金屬污染物分離(洪振璋，2015)。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(蘇紹璋、陳尊賢，2008)。

表 1-1 美國常見之物理分離技術 (摘自陳呈芳，2007)

	粒徑分離(篩分)	水力分離(分類)	比重(重力)分離	浮除(Froth Flotation)	磁力分離
基本原理	利用不同直徑之開孔，使用不同有效力徑之顆粒通過	利用顆粒密度、大小及外觀之不同而具有不同的沉降速度	利用顆粒密度不同而分離之技術	利用顆粒表面之特性而被吸附在氣泡表面	利用顆粒之磁性不同來分離
主要優點	便宜的設備即可進行大量且連續的分離處理	便宜的設備即可進行大量且連續的分離處理	便宜的設備即可進行大量且連續的分離處理	對細顆粒特別有效	運用高磁力場梯度(high gradient fields)可廣泛回收不同物質
使用限制	篩網會被堵塞、細篩易損壞、乾篩易產生揚塵	當土壤具有高含量之黏土、砂土及腐植質時不易使用	當土壤具有高含量之黏土、砂土及腐植質時不易使用	適用於低濃度	設置及操作成本高



3D 列印製做水力漩流管應用於油污染土壤處理暨後續 CLSM 再利用研究

污染土壤整治方式中實務上分為物理、化學、生物處理方法；不同類型之整治技術又可分為：現地 (In-situ) 與離地 (Ex-situ) 兩種處理方式 (張尊國, 2002)。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 ARCADIS 全球工程顧問公司為例 (Mann, 1999)，其進行土壤清洗的方式，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力漩流分離器 (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。

執行團隊人初步掌握分離不同土壤顆粒質地使用漩流管及操作條件，惟客製化設計、人工製做漩流管花費至少一個月以上時間，並且後續尚須進行測試、修正、零件調整更動等，可能又花掉一個月時間。另如欲自動化大量製做水力漩流管使用、販售，則所需投入鑄模成本至少新台幣 200 萬元以上、設備耗材 500 萬元以上。考量水力漩流管不論是人工製做花費較長時間、機械製造花費高成本，先前投入之設計、測試成效將是重要考量因素。

本年度以「3D 列印製做水力漩流管應用於油污染土壤處理暨後續 CLSM 再利用研究」為題，擬以一系列的工程技術，電腦模擬、3D 列印試驗顆粒分離及實際製作不鏽鋼水力漩流管進行實驗，透過此種整合型的設計流程 (如圖 1-1 所示)，可有效縮短水力漩流管的開發時程 (3 天交貨，10,000 元~20,000 元/支)，並能精準修正，提升水力漩流器效能。利用 3D 列印技術與電腦模擬結合，在電腦模擬出較佳的設計後，以 3D 列印製作出模型，初步顆粒分離實驗驗證，可大幅縮減原先利用機械加工製作測試模型的時間 (45 天/支) 與費用 (85,000 元~100,000 元/支)。最後才製作不鏽鋼水力漩流管進行後續試驗。

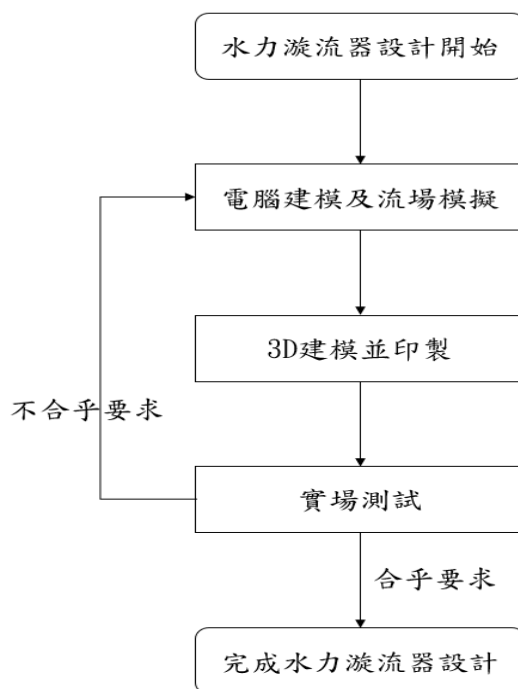


圖 1-1 水力漩流管設計開發流程圖

該不鏽鋼水力漩流管水力分離處理過後符合 $\text{TPH} \leq 1000 \text{ mg/kg}$ 土壤應有潛力當成廠內細粒料應用於控制性低強度回填材料(Controlled-Low-Strength-Materials, CLSM)。如此一來，可

- (1)降低公司購買細粒料成本、
- (2)妥適去化水力漩流 underflow stream 產出之土方、
- (3)CLSM 需要水分，土方含水率低於 60%即可使用，不必太乾，節省能源。
- (4) 水力漩流器 overflow、underflow 廢水送樣分析，TPH 為 N.D.~3 mg/l、 $\text{TOC} < 10 \text{ mg/l}$ ，適合當做 CLSM 攪拌用水，解決廢水去化並節省水資源。經水力漩流處理過後 underflow stream 土壤進行 CLSM 再利用之方式乃一舉數得，因此值得深入研究探討、並進一步商品化，此方式可提供油污染土壤熱處理或燒結製成磚品以外之再利用途徑。

立順興公司為國內大型 CLSM 製造廠，並具 CLSM 骨材及其處理方法多項專業技術。本計畫水力漩流處理產生 underflow stream 土壤應用於 CLSM，將於立順興公司實驗進行，搭配現場專業工程師、試驗器材、分析設備，應能評估歸納合適之再利用操作條件，並有很高機會商品化應用。



第二章 研究目的

許多有機/無機污染物常附著於細小土壤顆粒(如黏土及砂土)表面上，可利用物理分離技術，先將大顆粒物質予以分離，可降低待處理污染土壤之體積。為達土壤減量目的，處理程序大多有土壤分級程序，分離粗細(乾淨/受污染)土壤，達成減容目的(黃智等，2011)。

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。

本年度研究計畫「3D 列印製做水力漩流管應用於油污染土壤處理暨後續 CLSM 再利用研究」，期藉由計畫執行，裕山環境工程股份有限公司(自籌款項由裕山公司支付) 工廠儀器、設備、工程師支援及經費投入、立順興環境科技公司場地、設備及工程師投入，進行下列試驗計畫：

1.設計水力漩流管

油污染土壤經分析後，執行團隊遂以流場模擬軟體 FLUENT，結合 ANSYS 前處理器，透過 Solidworks 進行三維建模，匯入 ANSYS 建立幾何形狀及生成網格，利用三維流場模擬解析水力漩流管於不同入口速度下的流場特性，並針對水力漩流管內部壓力分佈(如圖 2-1)、速度分佈及粒子軌跡圖等進行細部流場分析，分析水力漩流管內部運動方式，做為水力漩流管設計依據。

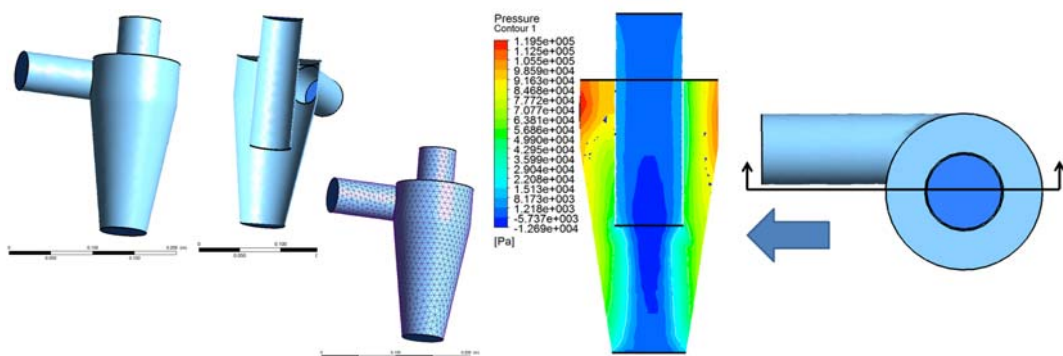


圖2-1 水力漩流管模擬模型及流場靜壓切面圖(自行模擬)



2. 3D 列印製做水力漩流管

本計畫以 Solidworks 進行電腦 3D 建模，在電腦模擬出較佳的設計後，以 3D 列印製作出模型。列印所使用光固化技術乃以液態樹脂作為原料，在樹脂槽內倒入樹脂並將列印平台浸泡其中，再以光照面板或雷射 UV 照射光束到列印平台上，受到照射的樹脂會硬化成型，藉由平台從樹脂槽中升起來層層堆疊成型。本研究之模型將以 SLA(Stereolithography)雷射光固化技術方式進行 3D 列印，但因模型尺寸大，且必須能承受流場壓力，故研究預計將所設計模型以電腦繪圖後交付專業 3D 列印廠商進行輸出製作。後續再進行實驗驗證，應可大幅縮減原先利用機械加工製作測試模型的時間與費用。後續將 3D 列印所得水力漩流管與現有設備進行組裝、測試顆粒分離。

除此之外，本研究將依 3D 列印水力漩流管設計參數，製作相同形狀、尺寸之不銹鋼材質漩流管進行雷射粒徑分析驗證。惟 1 支不銹鋼水力漩流管花費預估 85,000 元~100,000 元間，製做水力漩流管時程保守估 45~60 天，時間、經費上期能負擔。

3. CLSM 再利用研究

本計畫使用 underflow stream 土壤當再生粒料($\text{TPH} \leq 1000 \text{ mg/kg}$ 土壤)，部分取代天然細粒料進行 CLSM 製做。因為，經水力漩流分離，高濃度 TPH 土壤將建議以熱脫附處理(本研究未規劃進行熱脫附探討)。低濃度 TPH 土壤(分選後土壤 $\text{TPH} \leq 1000 \text{ mg/kg}$)，則直接適合做為 CLSM 細粒料。

小拌使用 0.03 m^3 之數量進行拌和，第 1 次小拌試驗主要檢核各配比之拌和水量是否符合坍流度之標準，同時進行單位重試驗，並依據第 1 次小拌結果調整 CLSM 配比設計。確認配比之坍流度及單位重是否符合相關規範要求。其中，

(1)坍流度(CNS 14842):量測新拌 CLSM 流動能力，合格測試在 40cm 以上。流動性為判斷 CLSM 工作性之依據，其流動性會隨著水固比增加而提高，水灰比的影響則較不明顯。

(2)氯離子(CNS 13465): CLSM 水溶性氯離子含量 $\leq 0.15 \text{ kg/m}^3$ 。

(3)抗壓強度(CNS 15865): CLSM28 天強度不超過 90 kg/cm^2 。



3D 列印製做水力漩流管應用於油污染土壤處理暨後續 CLSM 再利用研究

受污染土壤處理費用昂貴且通常量體龐大，處理花費甚鉅。本研究「3D 列印製做水力漩流管應用於油污染土壤處理暨後續 CLSM 再利用研究」，可提升技術層次及產業競爭力，有效分離粗細顆粒，達成大粒徑土壤顆粒($\text{TPH} \leq 1000 \text{ mg/kg}$ ，低於管制標準)而可再利用使用，促進本土處理業、人員之技術與經濟發展。



第三章 文獻探討

3-1 油污染土壤

近年來工商業發達，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及有機物污染。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，包括：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及工業工廠污染。其中，石油化學品貯槽洩露、油槽管線腐蝕滲漏、輸油管遭竊賊盜油破壞或是施工品質不良及人員操作管理不當等因素，所造成之油品污染土壤事件層出不窮，甚至危害地下水資源。在受油品污染土壤及地下水場址中，燃料油有其含碳數高且不易衰減及揮發之特性。因此，燃料油污染土壤及地下水之整治困難度高於受汽油及柴油污染之地下環境(高志明，2005)。

台灣中油股份有限公司(以下簡稱中油公司)高雄煉油廠(以下簡稱中油高雄廠)自 79 年起由行政院環境保護署(以下簡稱環保署)及高雄市政府環境保護局(以下簡稱環保局)，賡續執行廠區內、外之土壤及地下水污染調查，發現土壤及地下水苯、甲苯、乙苯、二甲苯，以及總石油碳氫化合物(以下簡稱 TPH)等濃度高於土壤及地下水污染管制標準，並於 93~94 年間公告中油高雄廠全廠區為土壤及地下水污染整治及控制場址。為依法管理污染場址，環保局陸續辦理相關監督計畫，包括「中油公司高雄煉油廠污染後續調查及污染改善監督工作計畫(103~105 年)」、「台塑仁武廠暨中油高煉廠污染後續調查及污染改善監督工作計畫(105~107 年)」及「中油高煉廠褐地活化示範計畫(108~110 年)」，以掌握中油高雄廠污染改善進度與成效(高雄市政府，2021)。高雄煉油廠於 104 年 12 月關廠停止運作並進行設備拆遷作業，廠內、外共計有 15 處公告污染場址。

另外，在高雄煉油廠生產系列中，中殼潤滑油基礎廠一直是個極具特徵性製程。它關鍵的溶劑萃取與溶脫蠟單元，幾乎沒有在其它傳統煉油製程陣列中出現。中殼基礎油廠的原料取自常壓塔底，經真空分餾後，蒸出部分稱做中性油(Neutral oil)。塔底油進入丙烷脫瀝青單元，利用丙烷對瀝青溶解性較低的特性，將瀝青與膠質沉澱脫除。脫瀝青油併入中性油進入溶劑萃取單元，利用糠醛對飽和烴與不飽和烴溶解度的鑑別性，脫除中性油中部分芳香烴，以提高中性油黏度指數與抗氧性，萃餘的芳香烴即



為副產品橡膠軟化油(吳堅, 2016)。中性油再進入加氫精製程序, 主要是油中的硫進行管控。後續再進入溶劑脫蠟單元, 利用丁酮/甲苯混合液, 對直鏈烷烴溶解度的鑑別性, 在低溫下將結晶析出的石蠟濾除。以提升中性油的低溫流動性, 濾渣即為副產品粗蠟。最後中性油經真空重蒸, 分餾成不同黏度的餾份, 即為基礎油成品(70P, 150SN, 500SN)。而塔底油即為亮滑油(150BS)。基礎油加入功能性添加劑的複配, 成為適用各種不同車輛與工業機械的潤滑油, 而潤滑油的性能實為基礎油與添加劑整合之體現。其中第一、二(G-I, G-II)為精煉礦物油, 第三、四、五類(G-III, G-IV, G-V)為合成油。

油品成分主要為碳氫化合物, 故土壤污染之指標成分即為總石油碳氫化合物 (Total petroleum Hydrocarbon, TPH), 此指標又分汽、柴油兩類, 亦即TPHg與TPHd。此外, 油品中苯、甲苯、乙苯、二甲苯 (Benzene、Toluene、Ethylbenzene、Xylene, BTEX) 所佔比例高, 且目前無鉛汽油中多會添加甲基第三丁基醚 (Methyl Tertiary Butyl Ether, MTBE) 以促進汽油燃燒, 上述成分亦成為重要之污染指標。油品洩漏至土壤中時, 首先會藉由重力作用沿著未飽和層土壤之孔隙向下溢散, 並由高濃度往低濃度移動。土壤若受輕質油品 (汽油、燃料油) 污染時, 因碳數較低易形成揮發性有機氣體(VOC), 此氣體不僅在土壤孔隙中傳播, 甚至浮出地表經光分解後形成有毒性之水溶性苯或二甲苯; 若受重質油品 (柴油及原油) 污染時, 會因重力而滲入土壤被吸附於土粒表面, 且隨吸附時間越長, 若油品之重量大於土壤吸附能力時, 會因脫附而流入地下水中, 造成地下水污染。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, 應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。

國內、外皆有受TPH污染之案例, 依地區土質的性質以及污染物的特性而有不同的整治方式, 常見的整治技術有土壤氣體萃取(Soil Vapor Extraction, SVE)、熱脫附 (Thermal Desorption)、固化/穩定化 (Solidification/Stabilization)、生物復育(Bioremediation)、化學氧化/還原 (Chemical Reduction/Oxidation)、土壤清洗(Soil Washing)等方法。其中土壤清洗法是使用特定的液體或清潔劑將污染物移至水相中, 再透過合適的處理加以分解或固化, 而荷蘭最早應用在環境工程上, 後續才被其他國家接受而廣泛(黃智等, 2011)。土壤清洗法的操作源自於採礦與選礦原理, 污染物通常傾向黏著或附著於顆粒較細之土壤 (如泥砂或黏土); 而較不易黏著或附著於粗顆粒的土壤 (如砂礫土壤), 故利用物理方式將污染物吸附



量較高之細顆粒土壤及較乾淨之粗顆粒土壤予以分離，以大幅降低待處理污染土方量，加速整治作業；或使用特定的液體或清洗劑，將土壤中的污染物移除或轉移至液相中；後續再透過適當處理，將污染物加以分解、移除或固定化。土壤清洗法是利用移除附著在粗顆粒土壤上的細顆粒土壤，將污染濃度較高之土壤與已符合管制標準之低污染土壤分離，得以進行污染土方減量前置作業(高雄市政府，2021)。

土壤清洗法中，水力漩流分離(Hydrocyclone Separation)方式，是將粗細顆粒經泵浦送到水力漩流器(Hydrocyclone)內進行分離，可降低二次處理量，也降低處理成本及廢棄土處理費用。水力漩流器是種通用的設備，可應用在固固分離、固液分離等單元操作，且有著占地面積小、處理量大且成本低等優點。

3-2 水力分離

在現今發展多元的污染土壤整治方式中，工程實務上主要分為物理、化學、生物、熱處理等處理方法。

常見物理分離操作單元如下分述：

(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) 水力漩流分離: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 (Hydrocyclone) 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，水力漩流分離具有高效率且操作費用低等優點。

水力漩流分離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。

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。漩渦管之作用為避免短路（Short circuit），管直徑、長度及其位置可控制粗細顆粒分離程度（水力漩流器如圖 3-1 所示）。



圖 3-1 水力漩流分離器之結構與組裝照



第三章

水力漩流分離器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。

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

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。分流比是水力漩流分離器參數之一，其定義如下式：

$$S = \frac{Q_u}{Q_o} \quad (3-2)$$

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。



總分離效率(Overall separation efficiency, downflow hydrocyclone)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：

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

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。

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 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(如圖 3-2 所示)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。

Fluent 將不同領域的計算軟體組合起來，成為 CFD，軟體間可以方便的進行數值交換，並採用統一的前後處理工具，省去在計算方法、編程、前後處理等方面投入的時間(吳光中等，2012)。

FLUENT 系列產品採用 FLUENT 公司自行研發的 Gambit 前處理軟體來建立幾何形狀及生成網格，Gambit 是一個具有超強組合、建構模型能力之前處理器，具有以下特色：

- (1) 圖形界面人性化：利用滑鼠可在視窗上自由拖曳縮放比例、旋轉視角、點選物件。
- (2) 檔案格式一般化：支援 ACIS、IGES、STL 等計算流體力學軟體檔案格式之輸入。
- (3) 模型建立簡單化：利用物件自由組合、分離功能，可迅速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。

運算核心採用多種求解方法和多重網格加速收斂技術，因而 FLUENT 軟體能達到最佳的收斂速度和求解精度，FLUENT 使用新的 NITA 運算方法來求解，大大減少求解暫態問題的所需時間。後處理器 FLUENT 的後處理可以生成有實際意義的圖片、動畫、報告，具有表面渲染、跡線追蹤等後處理功能。



其物理模型則可進行下列分析：

- (1) 穩態與暫態流分析
- (2) 可分析所有速度場(次音速、穿音速、超音速與高超音速)
- (3) 非黏滯流、層流與紊流分析
- (4) 牛頓與非牛頓流分析全領域的紊流模型：從簡單的 $k-\varepsilon$ 模型到漩渦模擬(LES)。
- (5) 熱傳分析：包括強制、自然與混合對流、共軛熱傳，以及輻射(P1 和 Rossland 模型)；基於角係數的 surface-to-surface 模型；D0 模型(Discrete ordinates)；DTRM 模型(Discrete ray tracing module)；太陽輻射模型。
- (6) 化學移動與反應：包含相同成分與不同成分的燃燒模型與表面反應、渦耗散模型、均衡混合顆粒模型，小火焰模型以及模擬大量氣體燃燒、煤燃燒、液體燃料燃燒的預混合模型，預測 NO_x 生成的模型。
- (7) 自由表面：VOF 模型(Volume of Fluid)，可以用於對界面的預測比較感興趣的自由表面流動，如海浪。
- (8) 相變模型：分析流體的融化和凝固。
- (9) 分散相模型：如質點、水滴與氣泡的 Lagrangian 軌跡計算，液滴和濕粒子的蒸發及煤的液化。
- (10) 渦流模型分析
- (11) 多孔介質模型分析
- (12) 多種參考座標與移動式網格：例如動態網格能力，處理移動中物體的流場分析。
- (13) 轉子與靜子交換作用的混合平面模型分析。
- (14) 噪音類比分析：預測流動產生的噪音。



第三章

水力漩流分離器之模型及網格建構主要利用 Ansys Fluent 進行流場建置，經過建構網格及參數設定後，找出適合之流場及分離效率。網格建構的好壞會影響最終計算結果，因此，網格建構時需注意模型是否建構完善，可將不需要的幾何刪除，只需留著重要部分即可。建構網格同時也需要注意到每個幾何連接性是否完整，有良好的網格品質，才能準確的建構出好的流場及數據結果(張又仁，2018)。

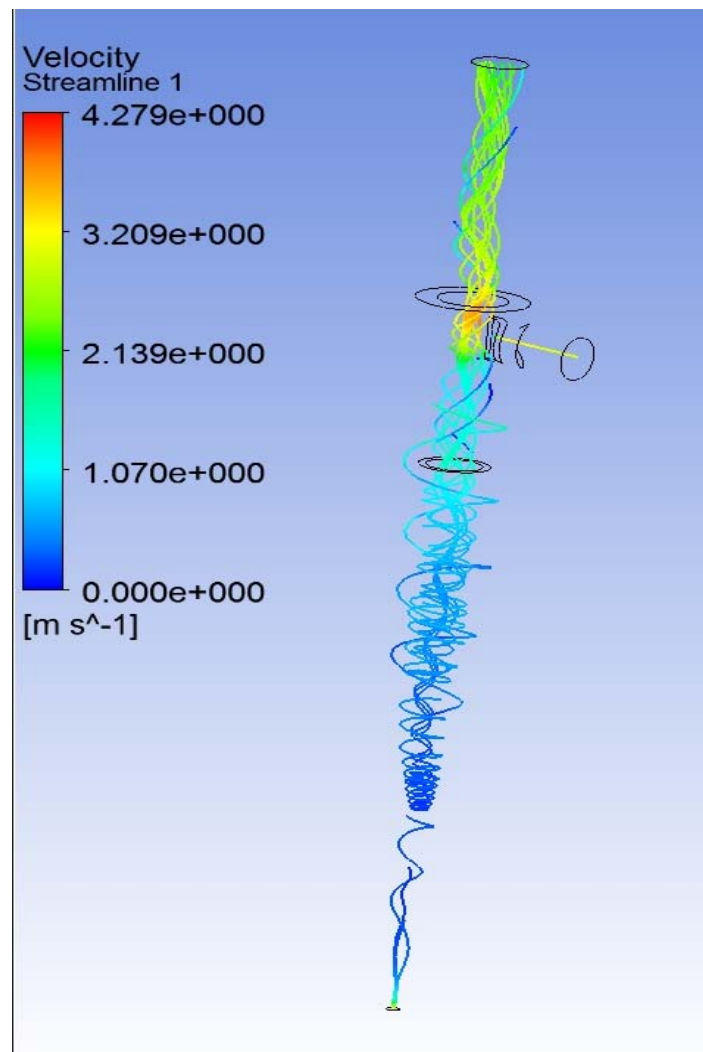


圖 3-2 FLUENT 流況模擬畫面



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。其使用方程式如下：

$$\frac{Du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + g \left(\frac{\rho_p - \rho_l}{\rho_p} \right) + F_x \quad (3-4)$$

$$F_D = \left(\frac{18\mu D_p^2}{\rho_p} \right) \left(\frac{C_D Re}{24} \right) \quad (3-5)$$

$$Re = \frac{\rho D_p (u_p - u)}{\mu} \quad (3-6)$$

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p} D_p^2 C_c \quad (3-7)$$

其中， u_p 為顆粒速度、 F_D 為牽曳力、 u 為流體速度、 ρ_p 為顆粒密度、 ρ_l 為流體密度、 F_x 為 x 方向之力、 Re 為雷諾數、 μ 黏滯度、 D_p 為顆粒直徑、 C_D 為牽曳係數、 C_c 為平均自由徑。

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，

$$Ne = \frac{1}{H} [L_b + L_c/2] \quad (3-8)$$

其中 Ne 為旋轉數； H 為流入管高度(m)；

L_b 為水力漩流器本體高度(m)； L_c 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



第三章

$$\Delta t = 2\pi R \frac{Ne}{v_i} \quad (3-9)$$

R 為水力漩流器本體半徑(m)

V_i 為進流速度(m/s)

$$V_t = \frac{d_p^2 (\rho_p - \rho_l) V_i^2}{18\mu R} \quad (3-10)$$

V_t 為終端速度(m/s)

d_p 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)

$$V_t = \frac{W}{\Delta t} \quad (3-11)$$

W 為流入管寬度(m)

結合公式 3-6~3-9 可得

$$d_p = \left[\frac{9\mu W}{\pi Ne V_i (\rho_p - \rho_l)} \right]^{1/2} \quad (3-12)$$

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 d_{pc} 計算 50%去除粒徑。



3-4 3D 列印製造

3D 列印近年來已成為蓬勃發展的科技趨勢以及熱門話題，在我們的生活中，食衣住行育樂等各方面領域都其應用。以需要開發產品的中小企業來說，「3D 列印」的確可以省下由設計圖到正式開模之間，反覆修改與重製草模所花費的時間與金錢(立體智動精密機器股份有限公司，2022)。3D 列印又稱為積層製造或加法製造，以 3D 圖檔為基礎，透過多種方式達到堆疊列印成型。隨著 3D 列印技術愈趨成熟，且能協助企業縮短產品開發流程，降低最終大量生產成本，已成為現代製造流程不可或缺的重要輔助技術。3D 列印 (3D printing) 利用數位立體 3D 模型、數位科技與特殊材料，藉由特殊機器 (3D 印表機)，以層層累積的方式，製造出各種形狀的立體物品。相較之下，傳統製造方式是從一大塊的材料，雕琢切削出可用的部分 (減法製造，subtractive manufacturing)。3D 列印的流程分別為 3D 電腦建模、轉檔、疊層製作(固化)等。

現今各種 3D 列印技術、3D 列印製程與 3D 印表機有如雨後春筍，成本大幅降低，逐漸擴展到建築、工業設計、汽車、航太、軍事、醫學、生物科技 (人體組織移植)、服裝、珠寶等領域，應用越來越廣泛，甚至被視為 21 世紀的工業革命。典型的 3D 列印過程，首先要以電腦輔助設計(CAD)軟體繪製「虛擬藍圖」，切割為一幅一幅數位剖面圖，透過 STL 檔案格式的介面，交由 3D 印表機依據指令，在支架或平台上，以層層堆疊或燒熔的方式，將液態、粉末或薄層的材料，製造成立體物品。和傳統製造方式相比，3D 列印的速度偏慢、精準度與完成度欠穩定、同時利用多種材料仍有困難，一般認為，3D 列印最適合製造產品原型，而不是工業級的產品。(郭靚德，2017)

3-4-1 3D 建模

在利用 3D 列印機進行列印之前，必須先將模型建立出 3D 的電腦模型，在輸出到列印機列印，3D 建模軟體種類十分多樣，可分為，

(1)CAD 型

CAD 型也稱為「參數式建模」的軟體，此類的軟體適合用在工業設計多，著重在於機構結構，適合進行機械的外形設計、機構設計、工程圖繪製等等複雜的流程。例如：PRO-E、Solidworks 等，本計畫將利用 Solidworks 進行電腦 3D 建模，示意圖如圖 3-3 所示。



第三章

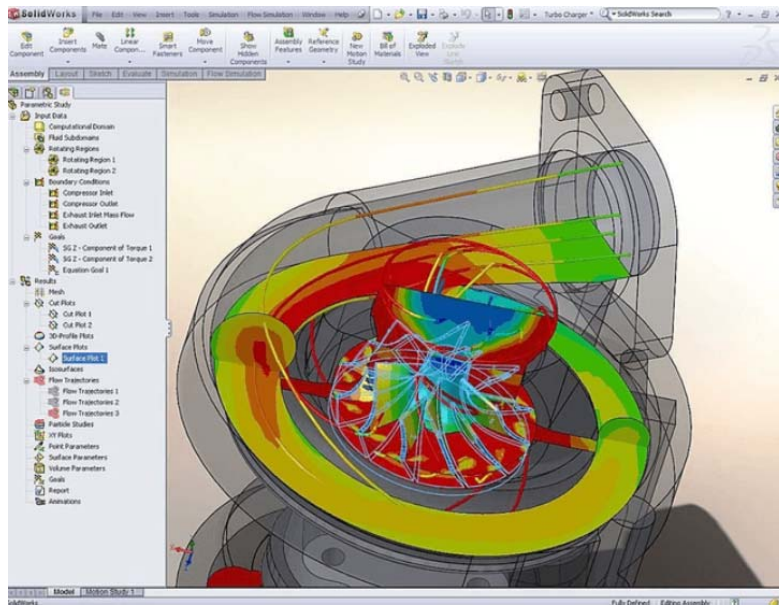


圖 3-3 Solidworks 進行電腦 3D 建模示意圖(摘自立體智動精密機器股份有限公司，2022)

(2)CAID 型

擅長處理曲面設計，建模過程中的自由度高，所以也非常適合在工業設計上，尤其需要製作車體、弧度曲面變化多的產品。而 CAID 型的軟體也能夠與 CAD 軟體互相配合進行 3D 作業。例如：Rhino、Alias 等。

(3)Polygon 型

Polygon 型亦稱為「多邊型建模」，多邊形建模的基礎原理是兩點連成一條邊，三條邊形成一個面，兩個面形成一個多邊形，多個多邊形就構成一個實體。最常被使用在動畫、人物設計方面，對工業設計類的產品比較不適合。例如：3D max、Maya、Zbrush 等。

3-4-2 列印技術

依三帝瑪有限公司(2021)所提，3D 列印技術，主要包含：

(1) FDM（熱熔融層積）技術及應用

FDM 是最普遍的 3D 列印技術（或稱 FFF），其 3D 列印原料通常是在



捲軸上輸送的熱塑性聚合物，通稱為線材，透過加熱噴頭擠出。加熱噴頭安裝在移動桿上，讓噴頭的擠出材料可以在列印範圍內層層堆疊、冷卻並固化於平台上以完成物體。

（2）SLA／DLP／LCD 光固化技術及應用

光固化技術是使用液態樹脂作為原料，在樹脂槽內倒入樹脂並將列印平台浸泡其中，再以光照面板或雷射 UV 照射光束到列印平台上，受到照射的樹脂會硬化成型，藉由平台從樹脂槽中升起來層層堆疊成型。其中常因光照技術的不同而稱 SLA（雷射）、DLP（投影器）、LCD（LCD 面板）等簡稱，但技術原理大同小異；工業精度而言 SLA 高於 DLP 及 LCD。

（3）SLS（雷射粉末燒結）技術及應用

SLS 技術使用粉末聚合物作為 3D 列印的原料，將粉末倒入機器中，機器內部會將薄層粉末來回鋪平在列印範圍，再以雷射光融合材料，並透過微幅的高度升降堆疊並完成印品。SLS 技術適合設計結構複雜、可動性高且懸空細節多的作品，成品為霧面質感，不易產生堆疊紋理。在初期設置和維護方面，SLS 是三種 3D 列印技術中成本較高的，使用設備的難度和複雜性也高於前述 FDM 熱熔融層積及 SLA／DLP／LCD 光固化技術。

本計畫利用 3D 列印技術，與電腦模擬結合，在電腦模擬出較佳的設計後，以 SLA 光固化技術方式進行 3D 列印製做出模型，再以實驗驗證，可大幅縮減原先利用機械加工製作測試模型的時間與費用。



3-5 控制性低強度回填材料

依行政院公共工程委員會(2021)施工綱要規範第 03377 章(V9.0)，控制性低強度回填材料 (Controlled Low Strength Material, CLSM) 係由水泥(含水泥系處理劑)、卜作嵐摻料、粒料及水按設定比例拌和而成，必要時得依規定使用化學摻料。另根據 ACI 229R-13 (2013)得知，CLSM 的運用項目高達 10 項，諸如一般回填、結構填方、隔音及隔離式填方、隔熱、鋪面底層、管線路床、控制侵蝕、空隙填方、核能設施、橋梁箱涵部分填料。而台灣主要偏重使用於道路管線開挖之回填作業、壕溝回填工程、路面或建築物下面孔洞回填工程等項目。而除工程司依工程特殊需求，訂定特殊檢驗項目外，CLSM 應符合下表之基本性質規定。

表 3-1 CLSM 之性質要求(摘自行政院公共工程委員會，2021)

項目	試驗方法	要求
*註 ¹ 管流度 (cm)	CNS 15462	[15-20][20-30]
*註 ¹ 坍流度 (cm)	CNS 14842	[40 以上]
落沉強度試驗	CNS 15862	一般型：[12][24]小時 早強型：[3][4]小時
28 天抗壓強度 (kgf/cm ²)	CNS 15865	[90 ^{註2}]以下
氯離子含量	CNS 13465	如使用於金屬管線埋設物之回填時，須符合 CNS 3090 之規定，如使用於非金屬管線埋設物之回填時，可免辦理本項試驗

*註 1：管流度及坍流度可擇一試驗辦理。

*註 2：因應國內使用狀況，如使用工程為永久的結構回填，建議強度以不超過 90 kgf/cm² 為佳，如應用為鋪面管溝工程之回填，則建議不超過 50 kgf/cm² 為上限。

CLSM 配比設計主要從設計強度決定適當的水灰比、從工作性要求決定適當的坍度，再從粒料尺寸決定用水量、水泥用量。



第四章 研究方法與過程

4-1 土壤採樣與分析

不同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及有機物污染。臺灣地區最主要且最受關注的污染場址可概分為四大類，包括：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及工業工廠污染。今年度預計採取油污染土壤(TPH_d)進行試驗，希望先藉由模擬及3D 列印製作合適漩流管以符分離使用。製做不鏽鋼管後，更於實廠測試油污染分離成效，期將經水力漩流分離出之 underflow 土壤進一步 CLSM 再利用，並驗證公共工程委員會第03377章 V9.0 控制性低強度回填材料符合程度。實驗流程如圖4-1。茲分述如下:茲分述如下:

4-1-1 油污染土壤採樣

油污染土壤(TPH_d): 預計採集自南部某油污染土壤。主要包含下列工作進行，

(1)粒徑分佈

粒徑分析以乾篩方式進行，使用 KUANG YANG 廠牌分析篩，主要分為 150 μ m 以上、150 μ m-63 μ m、63 μ m 以下幾種，並了解 TPH 分布，每批次 200克土壤。此外，更以雷射粒徑分析儀(Bettersizer S2)其粒徑分布情況，每次送入儀器分析量約5克。

(2) 總石油碳氫化合物分析(TPH)

根據行政院環保署環境檢驗所土壤中總石油碳氫化合物檢測方法—氣相層析儀/火焰離子化偵測器法(NIEA S703.62B)，先將土壤充份混合，秤取約1 g 之土壤置入20 mL 之棕色瓶，紀錄土壤樣品重量。加入1 g 無水硫酸鈉，充份混合之。加入5 mL 正己烷與丙酮混合萃取液(1：1 v/v)。將附有鐵氟龍墊片之螺旋蓋蓋上並鎖緊，並充分震盪。經超音波萃取，濃縮定量至適當體積後，以 GC/FID 分析。



第四章

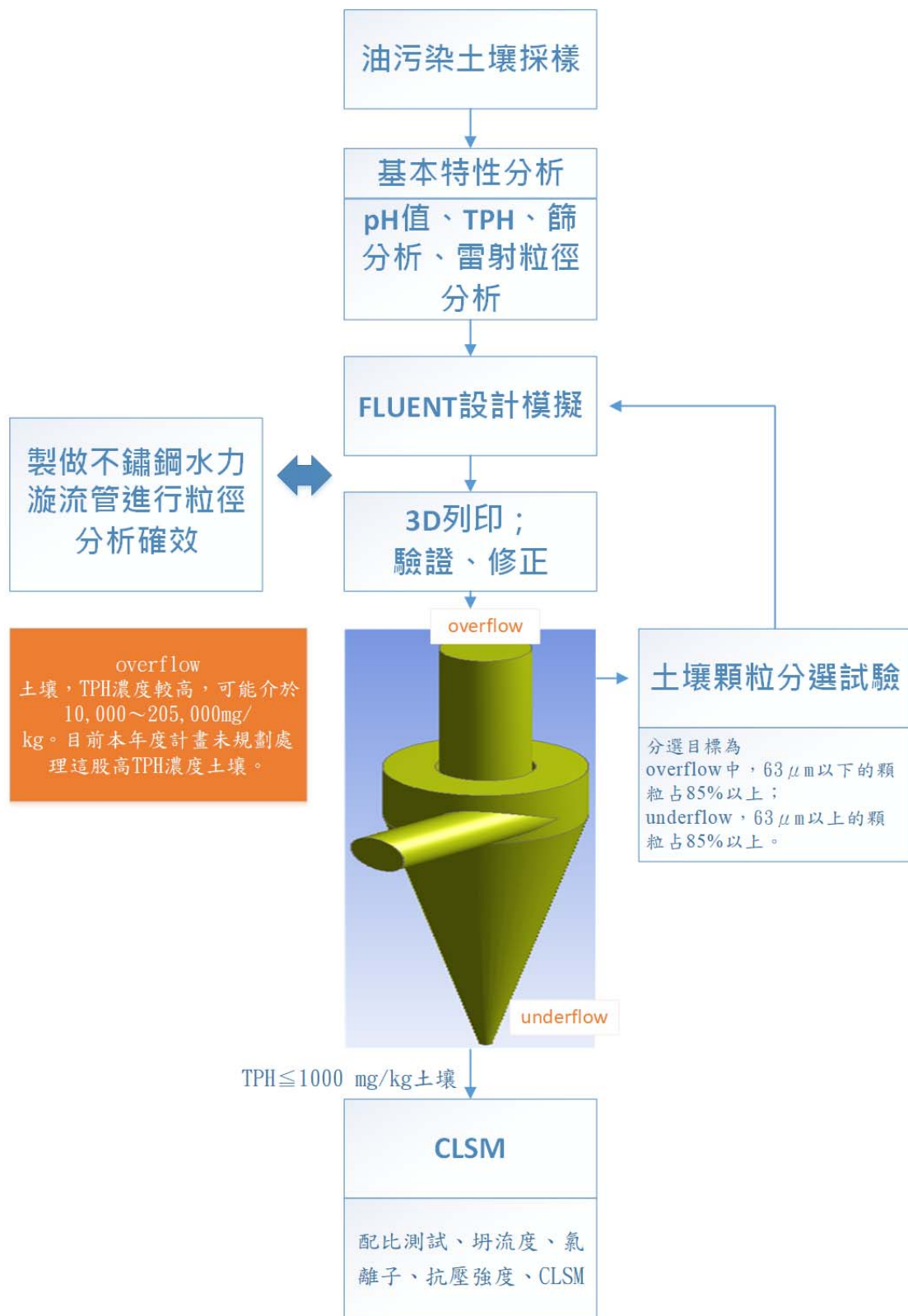


圖 4-1 實驗流程圖



(3) pH 值

根據環保署環境檢驗所土壤酸鹼值 (pH 值) 測定方法—電極法 (NIEA S410.62C) 測定土壤樣品之酸鹼值 (pH 值)。秤取 20g 土壤於 50ml 之燒杯內，加入 20 mL 試劑水蓋上錶玻璃，並且持續攪拌混合液 5 分鐘，可適度分次加入試劑水至可測量 pH 值為止。靜置混合液約 1 小時，使混合液的大部分固體沉澱，以直接、過濾、離心或利用其他方式取得水相層，測定水相層之 pH 值，並記錄溫度。

(4) 顯微鏡顆粒監測

研究主要利用顯微影像量測系統 (Dino-lite digital microscope, AM4515 series) 及顆粒分析軟體 (Dino capture 2.0)，分析顆粒粒徑型態，反饋修正處理條件。另外，亦進行雷射粒徑分析，了解顆粒分布狀態。

(5) 毒性特性溶出程序 (NIEA R201.15C)

依行政院公共工程委員會 (2021) 施工綱要規範第 03377 章 (V9.0)，CLSM 使用粒料通常會測毒性特性溶出程序 (toxicity characteristic leaching procedure, TCLP)，藉以瞭解廢棄物之重金屬溶出情形。依據環檢所公告之標準方法 NIEA R201.15 C，先將顆粒尺寸破碎至可通過 9.5 mm 之標準篩網，烘乾後秤取 100 g 之固體試樣裝入萃取瓶內，加入 2000g 之萃取溶液，萃取瓶固定於旋轉裝置上，以每分鐘 30 ± 2 次之旋轉頻率萃取 18 ± 2 小時，經 $0.7 \mu\text{m}$ 之醋酸脂纖維濾紙將固、液體分離後，即得待測濾液。此實驗藉以判定油污染土壤是否有溶出之情形。萃取過程中係以下列步驟來決定適當之萃取溶液：將樣品顆粒減小至直徑小於 1 mm，秤取固體 5.0 g，置於 500 mL 燒杯或錐形瓶中，加入 96.5 mL 之試劑水，蓋以錶玻璃，以磁攪拌器劇烈攪拌 5 分鐘，測量溶液之 pH 值並記錄之。若 $\text{pH} < 5.0$ ，則使用萃取液 A；若 $\text{pH} > 5.0$ ，則加入 1.0 N 的鹽酸溶液 3.5 mL，攪拌成均勻狀，蓋以錶玻璃，加熱至 50°C 並維持 10 分鐘，冷卻至室溫後，測量溶液之 pH 並記錄之，若 $\text{pH} < 5.0$ ，使用萃取液 A，pH 值為 4.93 ± 0.05 醋酸溶液，若 $\text{pH} > 5.0$ ，使用萃取液 B，pH 值為 2.88 ± 0.05 醋酸溶液。

試樣所需之萃取溶液量以下列公式計算：

$$\text{萃取液重量} = 20 \times \text{固體含量百分比} \times \text{樣品重量} \times 100\%$$

後續重金屬定量分析以 ICP-OES 進行分析，藉以判定重金屬溶出情形是



否超出法規標準。

(6) 氯離子濃度試驗

混凝土氯離子試驗，使用氯離子含量測定器(理研 RIKEN)，於 CLSM 澆置後繼行測定。試驗結果期望符合產品規格小於 0.15 kg/m^3 之規定。

4-1-3 實驗中所使用的儀器設備

- (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 RO
- (6) 薄膜濾紙：Cellulose Nitrate 材質，MFS 公司，孔徑 $0.45\mu\text{m}$ 。
- (7) 超音波震盪器：ULTRASONIC CLEANER
- (8) 真空蒸鍍機(鍍碳)：JOEL JEE-4X Vacuum Evaporator。
- (9) 掃描式電子顯微鏡(SEM)：Hitachi SEM S-2500。X 光能量散佈儀(EDX)。
- (10) 雷射粒徑分析儀：BetterSizer S2。
- (11) 總有機碳分析儀 (Total organic carbon analyzer, TOC) -用於偵測水中有機碳之含量。
- (12) 顯微鏡顆粒監測:主要利用顯微影像量測系統及顆粒分析軟體，分析顆粒粒徑型態，反饋修正處理條件。



4-2 水力漩流管設計

油污染土壤經分析後，研究團隊遂以流場模擬軟體 FLUENT，結合 ANSYS 前處理器，進行三維建模(如圖4-2)，匯入 ANSYS 建立幾何形狀及生成網格(如圖4-3)。再利用布林邏輯(Boolean)作運算，利用布林邏輯(Boolean)內的組件合併(Unit)將幾何作合併，在使用減去(Subtract)功能來建置流體流動之區域。

此模擬之水力漩流分離器的網格數量為48000個網格此組合、建構模型之前處理器具有以下特色：

- (1) 圖形界面人性化：利用滑鼠可在視窗上自由拖曳縮放比例、旋轉視角、點選物件。
- (2) 檔案格式一般化：支援 ACIS、IGES、STL 等計算流體力學軟體檔案格式之輸入。
- (3) 模型建立簡單化：利用物件自由組合、分離功能，可迅速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。

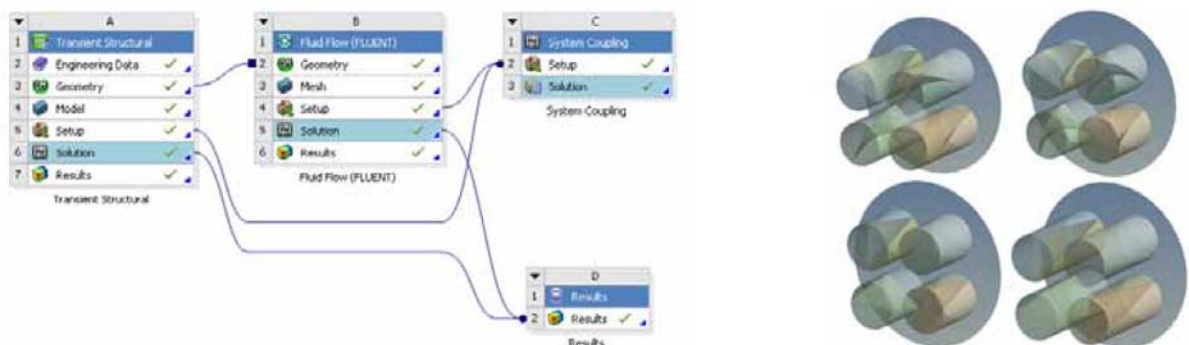


圖4-2 FLUENT 結合至 ANSYS 前處理器建構三維模型(團隊自行模擬)

運算核心採用多種求解方法和多重網格加速收斂技術，因而能達到最佳的收斂速度和求解精度，FLUENT 使用新的 NITA 運算方法來求解，大大減少求解暫態問題的所需時間。後處理器 FLUENT 的後處理可以生成有實際意義的图片、動畫、報告，具有表面渲染、跡線追蹤等後處理功能。隨後，利用三維流場模擬解析水力漩流管於不同入口速度下的流場特性，並針對水力漩流管內部壓力分佈、速度分佈及粒子軌跡圖等進行細部流場分



析，分析水力漩流管內部運動方式，做為水力漩流管設計依據。

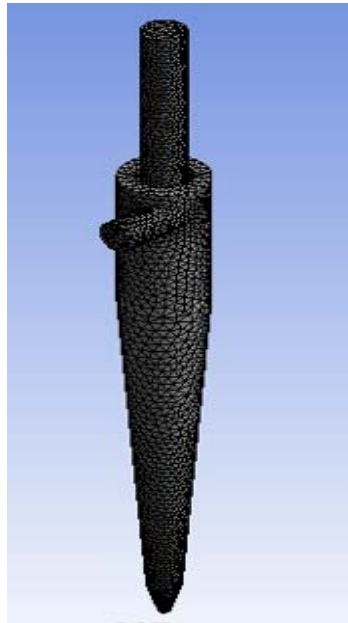


圖4-3 水力漩流管網格生成

本研究水力漩流管設計主要依據欲處理土壤不同等級顆粒(例如 $37\mu\text{m}$ 、 $63\mu\text{m}$ 、 $150\mu\text{m}$)overflow、underflow 出流比例。細顆粒如 $37\mu\text{m}$ 盡可能出現在 overflow stream 中，不要在 underflow stream 中出現；反之，粗顆粒如 $150\mu\text{m}$ ，盡可能出現在 underflow stream 中，少出現在 overflow stream 中。並以此原則，調整漩流管形狀、流速等。

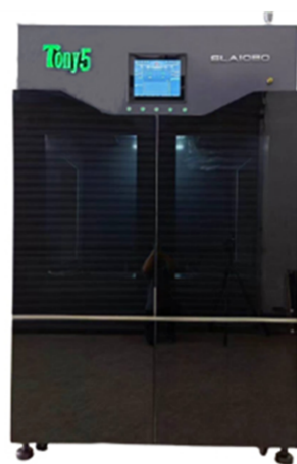
本研究設計分選目標為 overflow stream 中(細顆粒為主)， $63\mu\text{m}$ 以下的顆粒占85%以上；underflow stream 中(粗顆粒為主)， $63\mu\text{m}$ 以上的顆粒占85%以上。



4-3 3D 列印製作水力漩流管

3D 列印 (積層製造)，以3D 圖檔為基礎，透過多種方式達到堆疊列印成型，製造出各種形狀的立體物品。本計畫將以 Solidworks 進行電腦3D 建模，在電腦模擬得出較佳的設計後，以3D 列印製作出模型。列印所使用光固化技術乃以液態樹脂作為原料，在樹脂槽內倒入樹脂並將列印平台浸泡其中，再以光照面板或雷射 UV 照射光束到列印平台上，受到照射的樹脂會硬化成型，藉由平台從樹脂槽中升起來層層堆疊成型。本研究之模型將以 SLA(Stereolithography)雷射光固化技術方式進行3D 列印，但因模型尺寸大，且必須能承受流場壓力，故研究預計將所設計模型以電腦繪圖後交付專業3D 列印廠商進行輸出製作。後續再進行實驗驗證，應可大幅縮減原先利用機械加工製作測試模型的時間與費用。

本研究預計採用之3D 列印之機台及規格如下圖4-4所示。



設備技術規格	Tony5 SLA1080
設備尺寸	1680 x 1650 x 2330 mm
工作範圍	1000 x 800 x 600 mm
設備重量	1200 Kg
雷射器	Attodyne Huaray (水冷式)
振鏡	德國原裝SCANcube10 III
控制馬達	SGM7J-04AFC6S (Japan Yasuka)
液位傳感器	Panasonic
光點直徑	0.12 (Min) : 0.8 Max) 可變光斑
切層厚度	0.08~0.15 mm (正常值)
操作系統	Windows 10 / Windows 7
額定功率	3 KW

圖4-4 3D 列印機台照片及技術規格(廠商提供)

使用材料為光固型液態樹脂 ABS 樹脂材料，Tony5 SLA1080 設備最大可輸出尺寸 1000mm*800mm*600mm 以上、Tony5 SLA660 設備最大可輸出尺寸 600mm*600mm*400mm 以上大尺寸列印機台工作範圍可達 1000mm*800mm*600mm，可列印出所需之水力漩流管，進行後續顆粒分離效能測試。



後續，更將依 3D 列印水力漩流管設計參數，製作相同形狀、尺寸之不銹鋼材質漩流管進行雷射粒徑分析驗證。實驗流程為：

- (1) 5mm 初步過篩，排除石頭、紅磚等粗顆粒，再以固液比1:4以上比例混合。
- (2) 攪拌5分鐘，依油污染土壤情況而定。過程輔以空氣攪拌，空氣流量 350L/min。本研究以空氣攪拌(空氣混合)替代或增強槳翼攪拌效果，因為傳統槳板攪拌方式之顆粒易因重力作用而容易沉積，導致水力漩流器吸泥漿時無法得到較均勻狀態，剛開始會吸到濃稠泥漿，後來變稀泥漿。而當泥漿進料濃度高時，會因為粒子間的相互干擾沉降而導致分級效率降低，並且會使得部分大顆粒會因為來不及向水力漩流分離器底部下沉，而從溢流端流出。而當進料濃度低則可提高分級效率並降低分離粒徑，因為顆粒在稀物料中的向心沉降速度增大，且較少粒子間的干擾，情況與 stokes' law 較接近(吳東翰，2014)。
- (3) 進行水力漩流，輔以超音波測速儀監測或流量流速計監控流速。泥漿水進流流速分界於3 m/s ~11 m/s，並觀察耐壓能力、是否漏水等。
- (4) 擷取 overflow stream、underflow stream 土壤，分析粒徑分布，調整操作條件，達成分離目標。

分選目標: overflow stream 中(細顆粒為主)，63 μ m 以下的顆粒占 85%以上；underflow stream 中(粗顆粒為主)，63 μ m 以上的顆粒占 85%以上。



4-4 CLSM 再利用研究

控制性低強度回填材料 (CLSM) 係由水泥(含水泥系處理劑)、卜作嵐摻料、粒料及水按設定比例拌和而成，必要時得依規定使用化學摻料(行政院公共工程委員會，2021)。CLSM 使用之粒料，可為產製混凝土用粒料、現場開挖土石方、脫硫爐石粒料或再生粒料。粒料之標稱最大粒徑不得超過19mm，其中大於 No.4試驗篩4.75 mm 之粗粒料用量不得超過400 kg/m³。

本計畫使用 underflow stream 土壤當再生粒料(TPH $\leq$ 1000 mg/kg 土壤)，部分取代天然細粒料進行 CLSM 製做。因為，經水力漩流分離，高濃度 TPH 土壤將建議以熱脫附處理(本研究未規劃進行熱脫附探討，建議另案研究)。低濃度 TPH 土壤:分選後土壤 TPH $\leq$ 1000 mg/kg，則直接適合做為 CLSM 細粒料。規劃測試項目有：

1.材料部份：

粒料：依據 CNS 規範進行粒料比重、吸水率、氯離子含量及篩分析試驗。並符合毒性特行溶出程序(TCLP)測試標準。

2. CLSM 拌和試驗：

小拌測試：小拌使用0.03 m³之數量進行拌和，第1次小拌試驗主要檢核各配比之拌和水用量是否符合坍流度之標準，同時進行單位重試驗，並依據第1次小拌結果調整 CLSM 配比設計，調整配比後即進行第二次小拌，確認修改後配比之坍流度及單位重是否符合相關規範要求。其中，

(1)坍流度(CNS 14842):量測新拌 CLSM 流動能力，合格測試在40cm 以上。流動性為判斷 CLSM 工作性之依據，其流動性會隨著水固比增加而提高，水灰比的影響則較不明顯。

(2)氯離子(CNS 13465): CLSM 水溶性氯離子含量 $\leq$ 0.15kg/m³。

(3)抗壓強度(CNS 15865): CLSM 28天強度不超過90kg/cm²。

使用水力漩流分離中，underflow stream 土壤當成再生粒料取代一定比例天然粒料，其配比設計須滿足工程使用需求。配比設計方式進行如下，

(1)水固比:以水對固體粒料之重量比(W/S)控制工作性，使 CLSM 達到目標值需要之流動性(通常40cm 以上)。

(2)水灰比:以水對水泥之重量比 (W/C)控制強度，調整水灰比可確保 CLSM 達到強度及初凝時間之要求，並可考慮是否添加化學摻料。通常水泥量愈高，初凝時間愈短，而早期的抗壓強度亦較高。操作



第四章

經驗上，水灰比可能由2.5~5作為配比設計起始值，再經試拌進行後續調整，得配比設計。

- (3) 對照組：underflow stream 土壤體積取代細粒料之0%。
- (4) 試驗組：underflow stream 土壤體積取代細粒料之20%~80%間，得合適配比。



4-5 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：

本土化設計水力漩流管，經 3D 列印測試後，製造不鏽鋼水力漩流管驗證，組裝水力漩流系統。研究團隊並已掌握中華民國發明專利第 I 749436 號，利用物理特性分離油污染土壤之資源化處理方法、中華民國發明專利第 I 663002 號，反饋式水力漩流分離系統、中華民國發明專利第 I 665028 號，鐵氧化物覆膜於經水力漩流分離之土壤細顆粒殘餘物上形成再生資材吸附劑方法、中華民國發明專利第 I 549764 號，機動式分離含重金屬之土壤顆粒處理方法、中華民國專利證號新型第 M372209 號，攪拌分離裝置等。具研發及設計能力發展本土化技術。

市場需求：

國外雖已經發展成熟之 hydrocyclone 技術，但通常是廠商已做好許多商業化尺寸 cyclone，然後依買主需求選擇合適/接近之器具，組裝設備。另外後續操作若遇到土壤質地變化、買方需求改變等狀況，將出現顆粒分離效能不足情況。且欲自動化大量製做商業用水力漩流管使用、販售，則所需投入鑄模成本至少新台幣 200 萬元以上、設備耗材 500 萬元以上。考量水力漩流管不論是人工製做花費較長時間(時間:45 天/支、費用:85,000 元~100,000 元/支)、機械製造花費高成本，先前投入之設計、測試成效將是重要考量因素。

本研究期望累積經驗與技術，利用 3D 列印水力漩流管出來測試，確認效能達預期後，才正式製做不鏽鋼水力漩流管(或 PU 水力漩流管)。3D 列印之導入期望能減少前期試誤金錢及時間花費，避免直接做不鏽鋼水力漩流管但發生不符預期窘境。

另外，經水力漩流處理過後，underflow stream 符合 $\text{TPH} \leq 1000 \text{ mg/kg}$ 土壤，有潛力當成細粒料應用於控制性低強度回填材料(Controlled-Low-Strength-Materials, CLSM)，此方式亦可提供有別於油污染土壤熱處理後續去化再利用或燒結製成磚品以外之再利用途徑。

**競爭力評估：**

受污染土壤處理費用昂貴且通常量體龐大，處理花費甚鉅。本研究「3D 列印製做水力漩流管應用於油污染土壤處理暨後續 CLSM 再利用研究」，可提升技術層次及產業競爭力，有效分離粗細顆粒，達成大粒徑土壤顆粒(若低於管制標準)而可逕行回填或再利用使用，增加土壤回用比例，達處理減容效果，提供簡單、有效處理方式。並更可促進本土處理業、人員之技術與經濟發展。



4-6 執行成果及預期效益

4-6-1 預期完成工作項目

- (1) 完成土壤採樣、檢測油污染土壤基本組成等分析資料。
- (2) 完成 150 μm 以上、150 μm -63 μm 、63 μm 以下不同粒級之 TPH 含量，了解 TPH 主要分佈/濃集於粒級顆粒上，俾利後續水力漩流分離。
- (3) 設計水力漩流管並 3D 列印輸出，進行油污染土壤測試、確效。分選目標為 overflow stream 中，63 μm 以下的顆粒占 85%以上；underflow stream 中，63 μm 以上的顆粒占 85%以上。
- (4) underflow stream 土壤取代部分細粒料進行 CLSM 產品製做與測試。粒料部分依據 CNS 規範進行粒料比重、吸水率、氯離子含量、TCLP 試驗及篩分析試驗。underflow stream 土壤則進行體積取代細粒料之 20%~80%間測試，尋得合適配比。CLSM 產品則進行坍流度、水溶性氯離子含量分析、抗壓強度及 TPH 分析。預期可成功將經水力漩流分離 underflow stream 土壤再利用產製 CLSM 產品。

4-6-2 執行成果貢獻及預期成果效益

- (1) 學術研究:計畫完成可申請新型專利 1 件，國內及國際研討會論文 1 篇。培養 2 名碩士生、1 名大學生參與計畫研究，培植土水人才。

- (2) 對產業發展:

對水力漩流管製造產業發展:引入 3D 列印產業應於水力漩流管製造，整合水力漩流管設計流程，可有效縮短開發時程，並能精準修正，提升水力漩流器效能。並大幅縮減原先利用機械加工製作測試模型的時間與費用。

對 CLSM 業者:妥適去化水力漩流 underflow stream 產出之土方，並可降低公司購買細粒料成本。水力漩流器 overflow stream、underflow stream 產出廢水亦具應用潛力當做 CLSM 攪拌用水，解決廢水去化並節省水資源。將水力漩流 underflow stream 土壤取代部分細粒料產製 CLSM 產品對業者而言一舉數得，具極高機會商品化，提高土壤再利用比例。



- (3) 國家發展方面：減少水力漩流管製備時間與花費，提升水洗土壤能力，達成油污染土壤減容減量；underflow stream 土壤取代部分細粒料產製 CLSM 則降低 CLSM 業者對天然粒料需求。對褐地重生、天然粒料資源消耗、土壤再利用有正面的助益，並增強我國技術能力及競爭力。增進業界水洗土壤能力、減容油污染土壤量，對褐地重生、地力永續有正面的助益，並提升我國技術能力及競爭力。
- (4) 務實改善油污染土壤水洗程序、增加水洗產出土方之再利用可能性，降低 10% 以上成本。增進再利用機會，對資源利用有正面的助益。



3D 列印製做水力漩流管應用於油污染土壤處理暨後續 CLSM 再利用研究

4-7 工作進度甘特圖

年月	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	備註
工作項目													
文獻資料蒐集與採樣													
基本特性分析						※							
設計水力漩流管並3D 列印輸出						※							
油污污染土壤測試、確效										※			
underflow stream 土壤 取代部分細粒料進行 CLSM 產品製做與測試											※		
效益評估、 處理資料與撰寫報告													
工作進度估計百分比 (累 積 數)	3%	9%	18%	29%	44%	56%	65%	74%	82%	91%	97%	100%	
預定查核點	期中		1. 完成基本特性分析 2. 著手進行水力漩流管設計、修正										
	期末		1. 完成水力漩流管並 3D 列印輸出、效能驗證 2. 完成 CLSM 產品製做與測試										
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 油污染土壤

5-1-1 油污染土壤採樣

本研究赴南部某油污染土壤進行採樣，採集 TPH 污染土壤，採樣過程示意如圖 5-1 所示。由於 covid-19 疫情期間，依廠方規定無法直接派員現場採，乃由廠方工作人員採樣後攜出，再由我方人員帶回。



圖 5-1 TPH 油污染土壤採樣



5-1-2 油污染土壤基本特性分析

5-1-2-1 油污染土壤 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 油污染土壤樣本 pH 值

地點	pH 值
TPH 油污染土壤	6.62~6.68

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，TPH 油污染土壤屬中性。

5-1-2-2 油污染土壤物理/化學特性

將 TPH 油污染土壤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%，以求得樣本之粒徑分布。其結果如表 5-2 所示。

表 5-2 TPH 油污染土壤粒徑分析結果

檢驗項目	單位	粒徑分布百分比
		TPH 油污染土壤
>150 μm	%	91.5~92.7
63 ~150 μm	%	5.6~5.9
< 63 μm	%	1.7~2.6



第五章

其雷射粒徑分析圖如圖 5-2 所示。

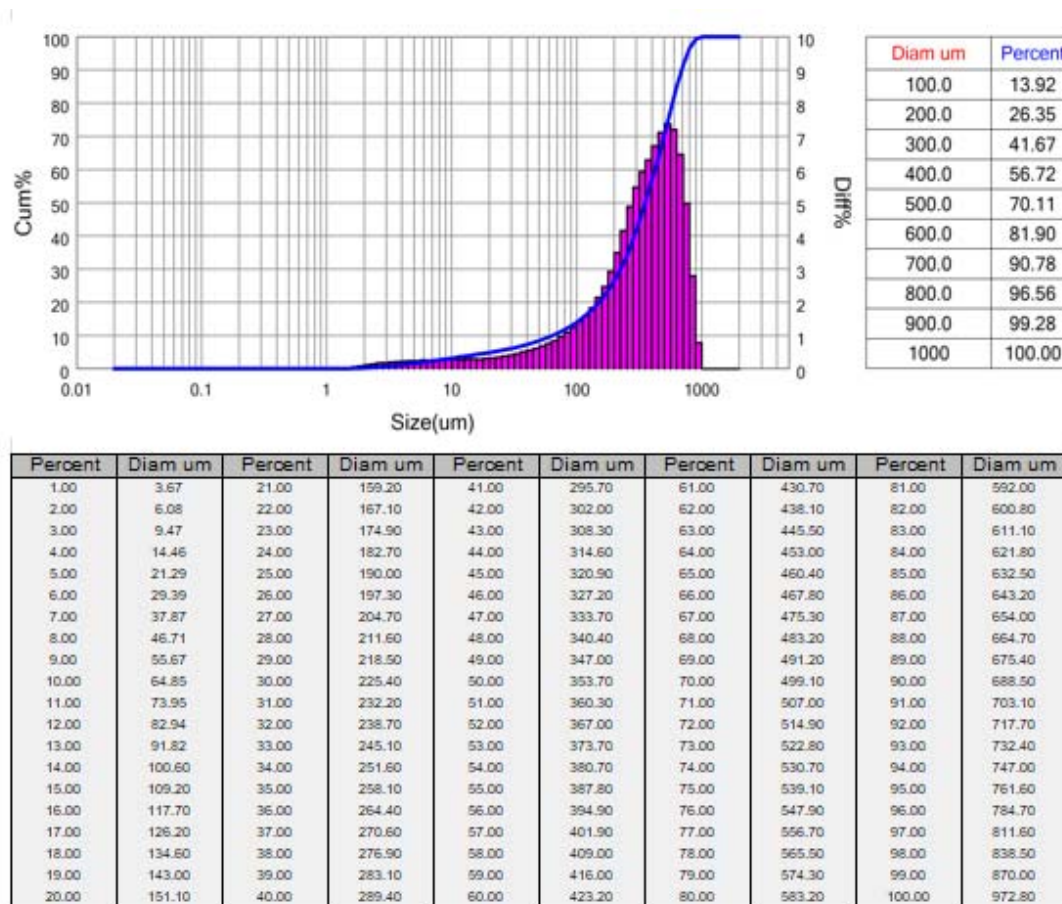


圖 5-2 油污染土壤雷射粒徑分析

5-1-2-3 總石油碳氫化合物分析(TPH)

將 TPH 油污染土壤送樣，經超音波萃取法（NIEA M167）前處理，再予濃縮定量至適當體積後，以耐 350°C 以上高溫之層析管柱，以土壤中總石油碳氫化合物檢測方法—氣相層析儀/火焰離子化偵測器法(NIEA S703.62B)進行分析。其中低碳數(如汽油類)之石油系污染分析是相當於烷類從 C₆ 到 C₉ 的範圍，高碳數(如柴油類或柴油以上)之石油系污染分析是相當於烷類從 C₁₀ 到 C₄₀ 的範圍。委外送業興環境科技股份有限公司分析，其分析結果得:>150 μm 顆粒，TPH 為 563 mg/kg；63 ~150 μm 顆粒，TPH 為 1376 mg/kg；< 63 μm 顆粒，TPH 為 1614 mg/kg。



3D 列印製做水力漩流管應用於油污染土壤處理暨後續 CLSM 再利用研究

5-1-2-4 油污染土壤顯微鏡顆粒觀察

利用顯微影像量測系統，分析顆粒型態與外觀，原樣土壤顯微影像如圖 5-3 所示。由圖中可看出，細顆粒附著於粗顆粒上。



圖 5-3 油污染土壤原樣照片

後續用乾篩分層，將原土樣分層為 $>150\mu\text{m}$ (#100 篩網)、 $150-63\mu\text{m}$ (#230 篩網)、 $<63\mu\text{m}$ (底篩) 等三層，並進行顯微影像觀察，其結果如圖 5-4~5-6 所示。



圖 5-4 油污染土壤中 $>150\mu\text{m}$ 顆粒照片



第五章



圖 5-5 油污染土壤中 150-63 μ m 顆粒照片

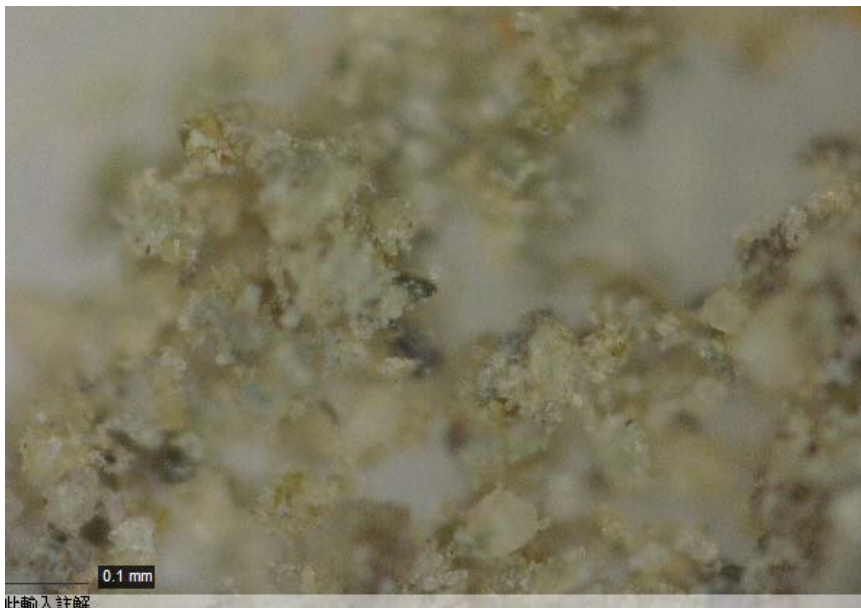


圖 5-6 油污染土壤中 < 63 μ m 顆粒照片



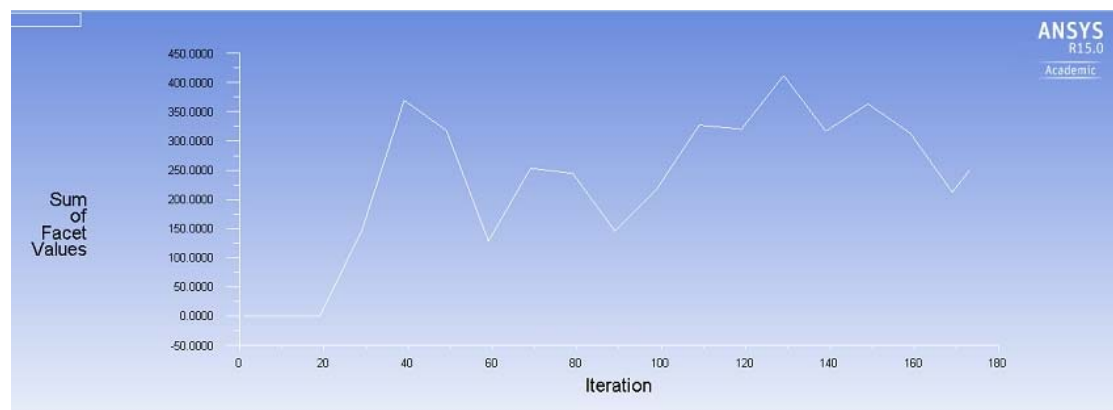
5-2 水力漩流管流況模擬

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。

水力漩流分離模擬結果，將計算水力漩流器 101~150 疊代情況下，overflow/underflow 切面粒子通過平均數量，藉以計算分離結果。以圖 5-7 為例，流速 2m/s 條件下， $63\ \mu\text{m}$ 顆粒從 overflow 切面跑出來平均為 337.3 顆，從 underflow 切面跑出來平均為 21.2 顆，總計 358.5 顆。因此，從 overflow 流出比例為 $337.3/(337.3+21.2)*100\%=94.1\%$ ；從 underflow 流出比例為 $21.2/(337.3+21.2)*100\%=5.9\%$

(1) 模擬條件：流速 2m/s；顆粒大小 $63\ \mu\text{m}$ ，可得
overflow:underflow= 337.3:21.2= 94.1:5.9。

(a)



(b)

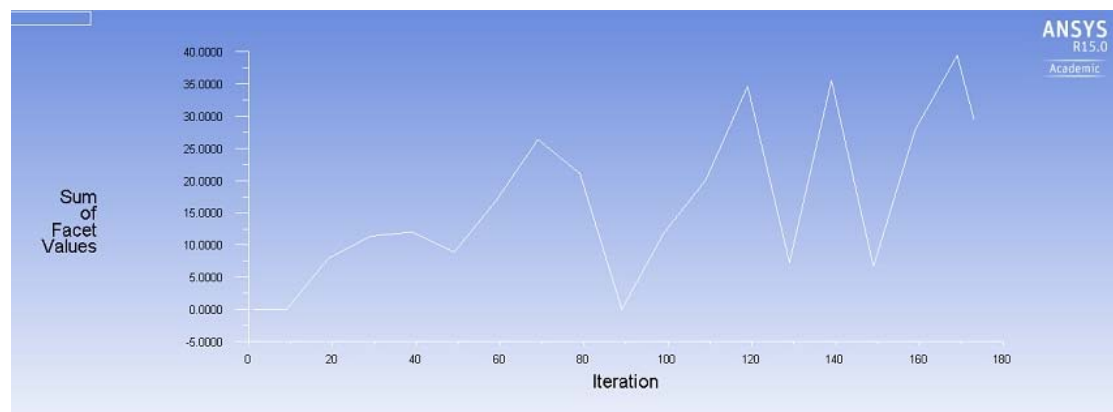


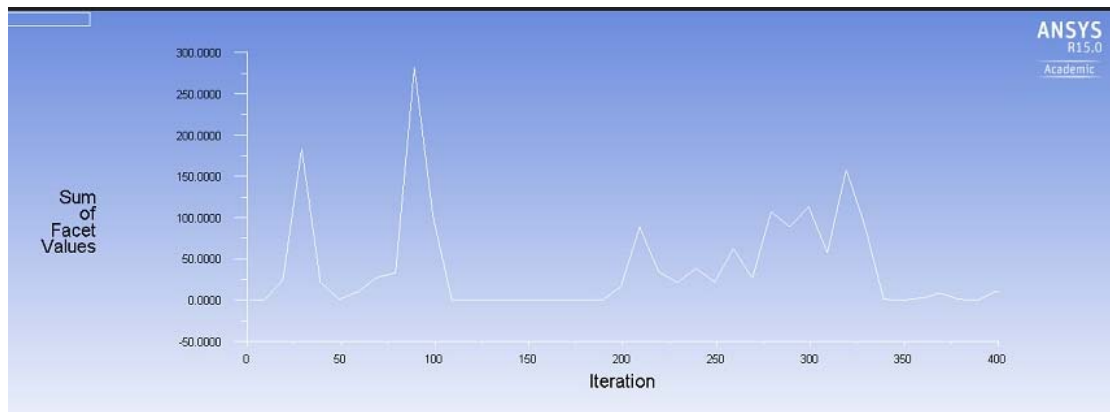
圖 5-7 水力漩流模擬流速 2m/s、顆粒大小 $63\ \mu\text{m}$ 條件下，
(a)overflow 出流(b)underflow 出流顆粒分佈情況



第五章

模擬條件：流速 2m/s；顆粒大小 $150\mu\text{m}$ ，可得
overflow:underflow=7.3:1104.9= 0.7:99.3。

(a)



(b)

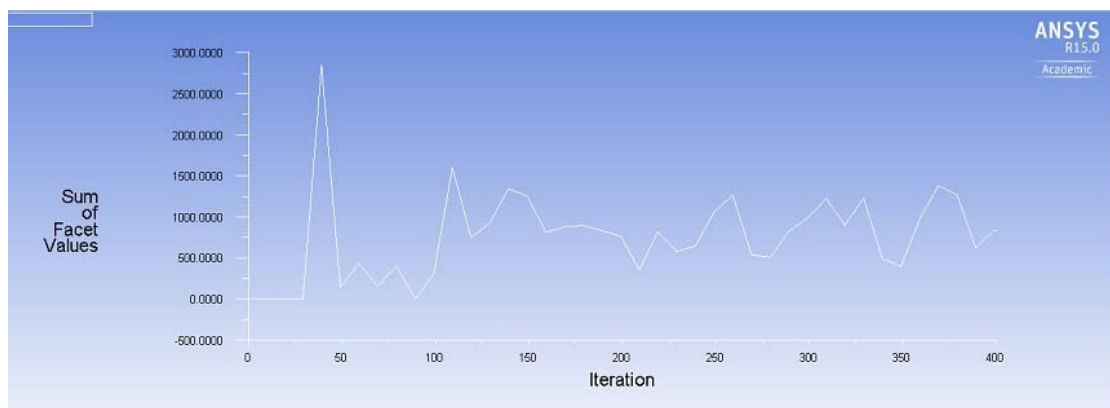


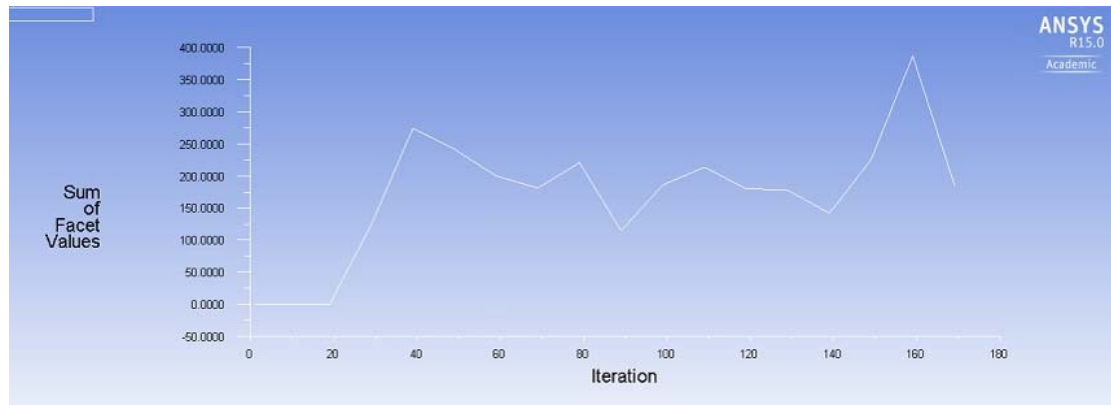
圖 5-8 水力漩流模擬流速 2m/s、顆粒大小 $150\mu\text{m}$ 條件下，
(a)overflow 出流(b)underflow 出流顆粒分佈情況



3D 列印製做水力漩流管應用於油污染土壤處理暨後續 CLSM 再利用研究

(2) 模擬條件：流速 3m/s；顆粒大小 $63\mu\text{m}$ ，可得
overflow:underflow= 185.3:15.1= 92.5:7.5。

(a)



(b)

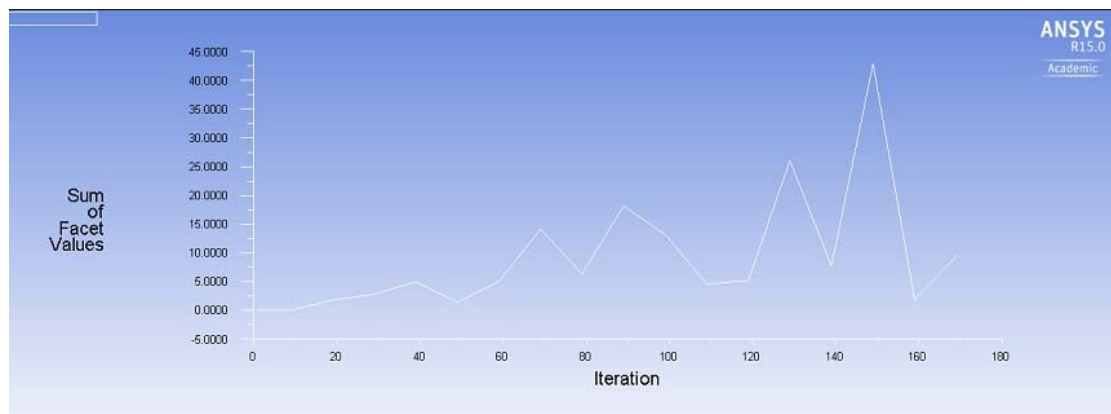
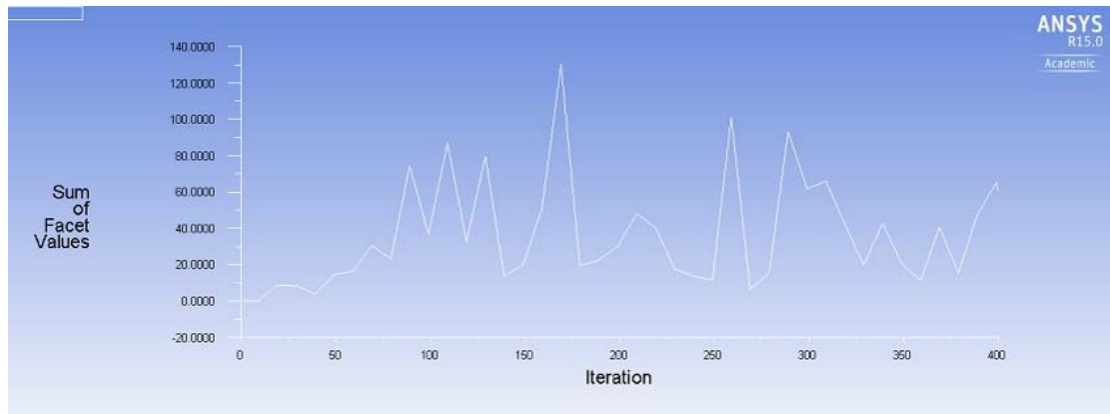


圖 5-9 水力漩流模擬流速 3m/s、顆粒大小 $63\mu\text{m}$ 條件下，
(a)overflow 出流(b)underflow 出流顆粒分佈情況



模擬條件：流速 3m/s；顆粒大小 $150\mu\text{m}$ ，可得
overflow:underflow= 47.7:537.0= 8.2:91.8。

(a)



(b)

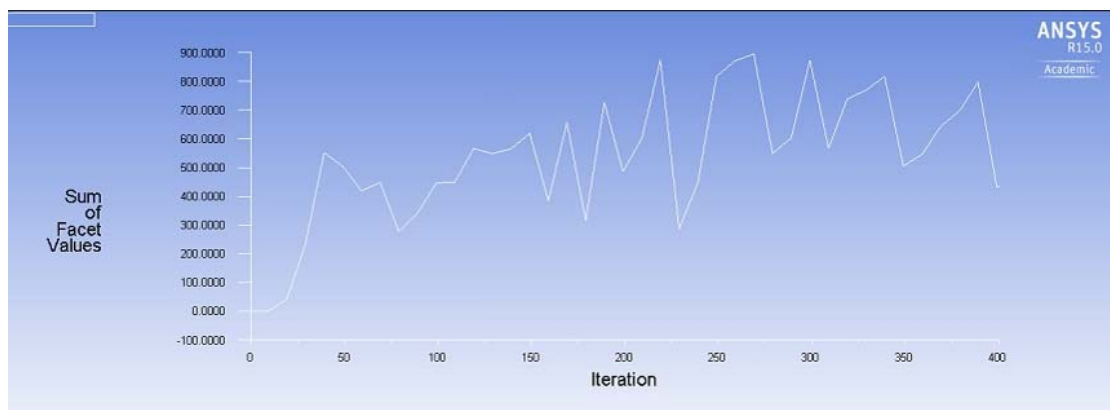


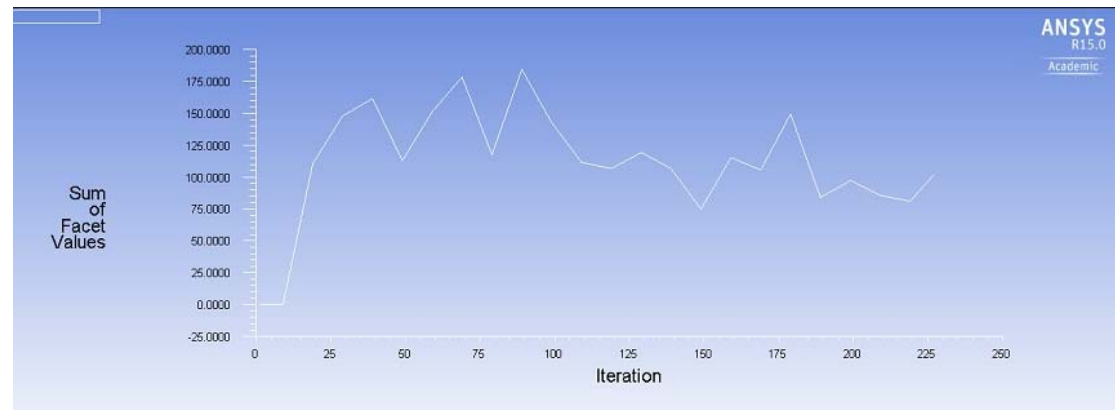
圖 5-10 水力漩流模擬流速 3m/s、顆粒大小 $150\mu\text{m}$ 條件下，
(a)overflow 出流(b)underflow 出流顆粒分佈情況



3D 列印製做水力漩流管應用於油污染土壤處理暨後續 CLSM 再利用研究

(3) 模擬條件：流速 5m/s；顆粒大小 $63\mu\text{m}$ ，可得
 $\text{overflow}:\text{underflow} = 108.7:8.2 = 93.0:7.0$ 。

(a)



(b)

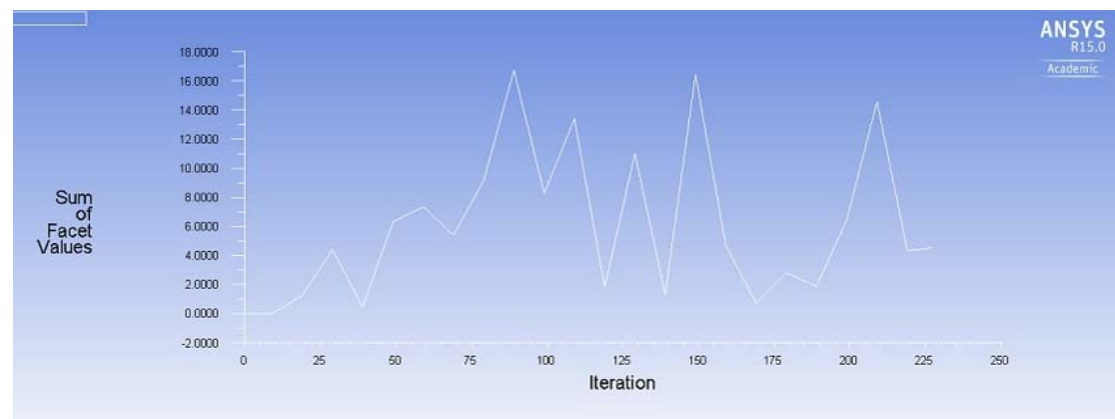


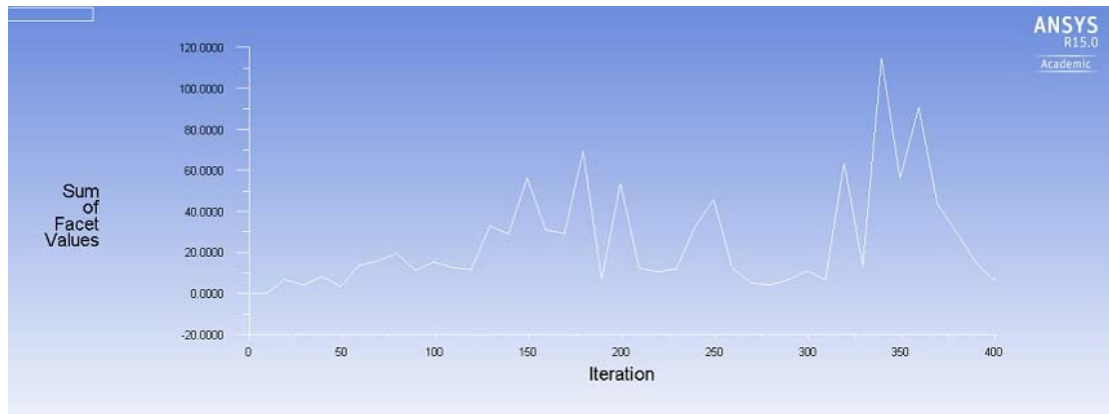
圖 5-11 水力漩流模擬流速 5m/s、顆粒大小 $63\mu\text{m}$ 條件下，
 (a) overflow 出流 (b) underflow 顆粒分佈情況



第五章

模擬條件：流速 5m/s；顆粒大小 $150\mu\text{m}$ ，可得
overflow:underflow=25.6:296.6= 7.9:92.1。

(a)



(b)

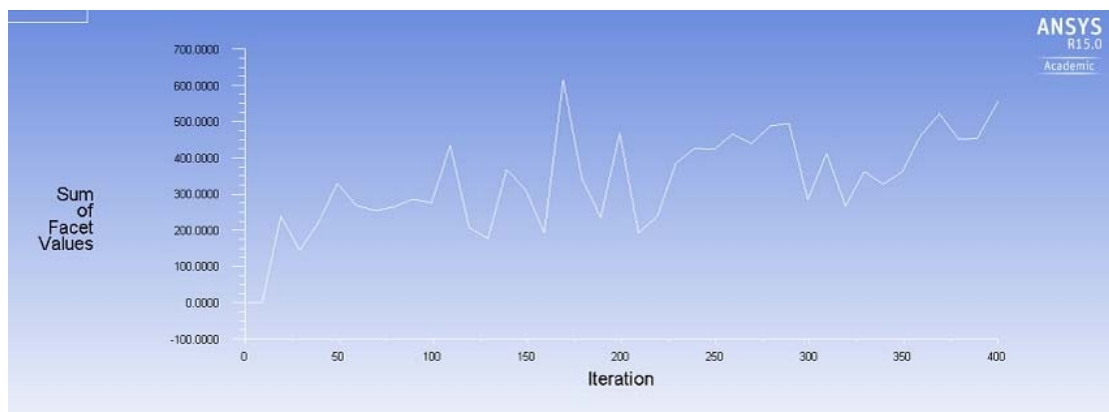


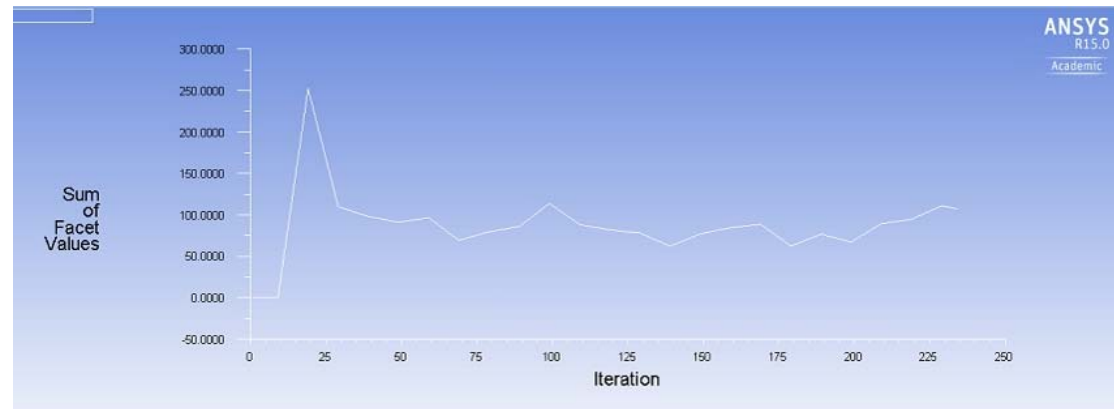
圖 5-12 水力漩流模擬流速 5m/s、顆粒大小 $150\mu\text{m}$ 條件下，
(a)overflow 出流(b)underflow 出流顆粒分佈情況



3D 列印製做水力漩流管應用於油污染土壤處理暨後續 CLSM 再利用研究

(4) 模擬條件：流速 7m/s；顆粒大小 $63\mu\text{m}$ ，可得
 $\text{overflow}:\text{underflow}=80.1:8.6= 90.3:9.7$ 。

(a)



(b)

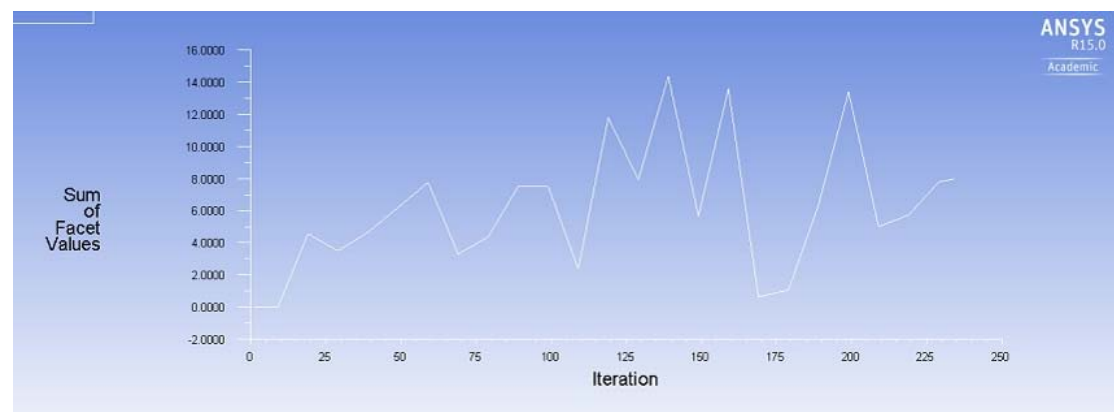


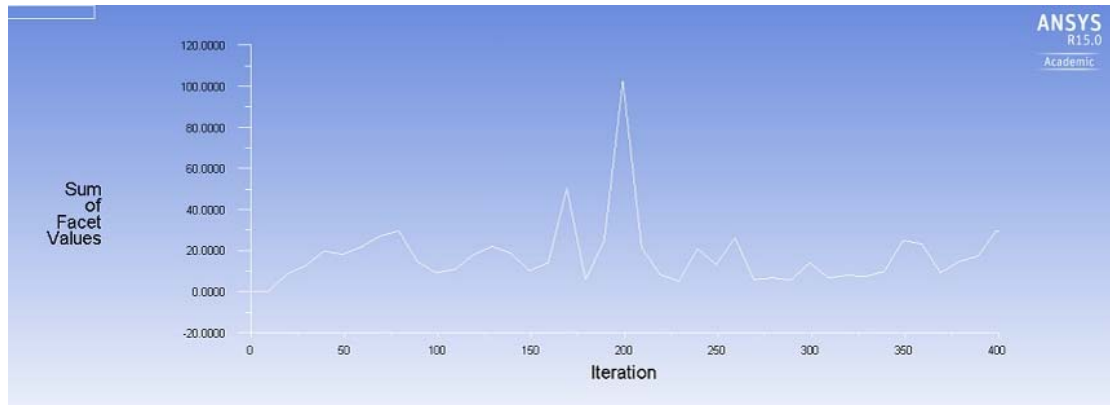
圖 5-13 水力漩流模擬流速 7m/s、顆粒大小 $63\mu\text{m}$ 條件下，
 (b)(a)overflow 出流(b)underflow 出流顆粒分佈情況



第五章

模擬條件：流速 7m/s；顆粒大小 $150\mu\text{m}$ ，可得
overflow:underflow=15.9:189.2= 7.8:92.2。

(a)



(b)

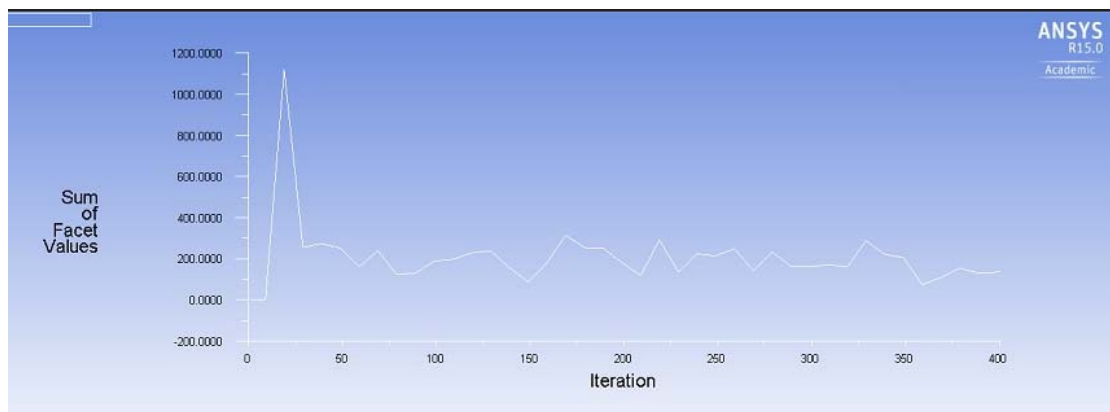


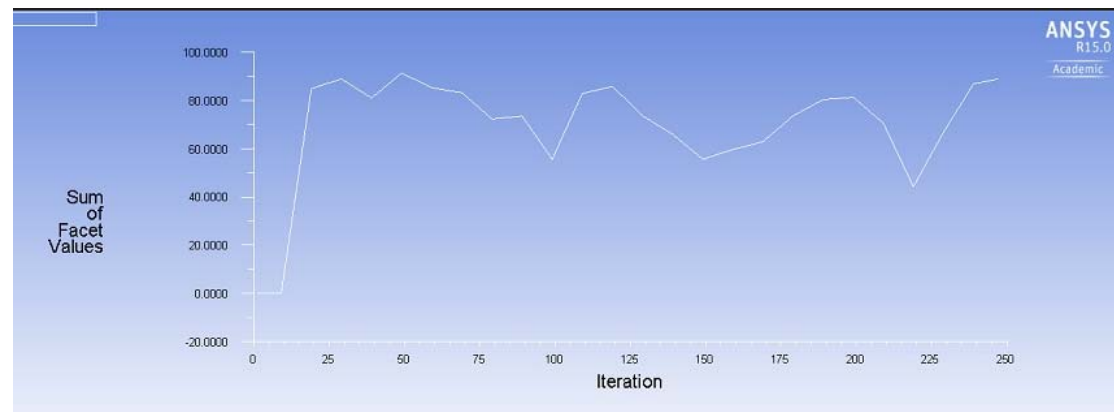
圖 5-14 水力漩流模擬流速 7m/s、顆粒大小 $150\mu\text{m}$ 條件下，
(a)overflow 出流(b)underflow 出流顆粒分佈情況



3D 列印製做水力漩流管應用於油污染土壤處理暨後續 CLSM 再利用研究

(5) 模擬條件：流速 9m/s；顆粒大小 $63\mu\text{m}$ ，可得
overflow:underflow=72.8:4.9= 93.6:6.4。

(a)



(b)

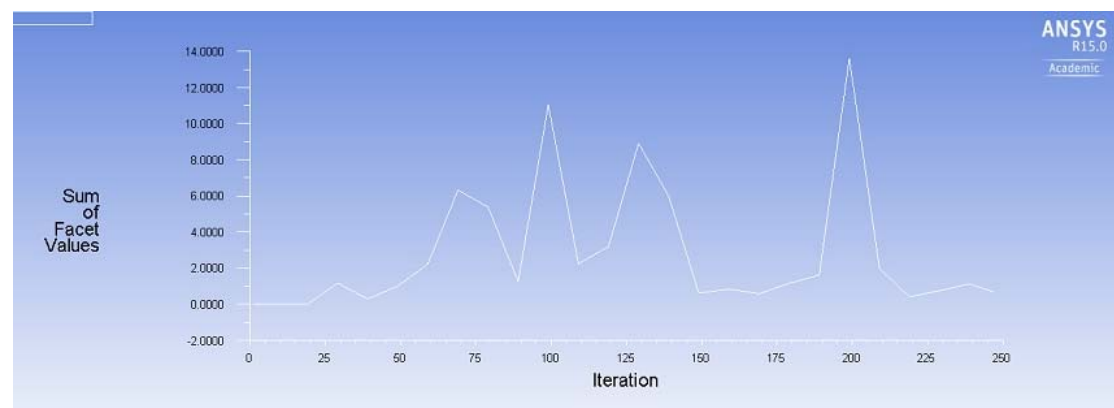
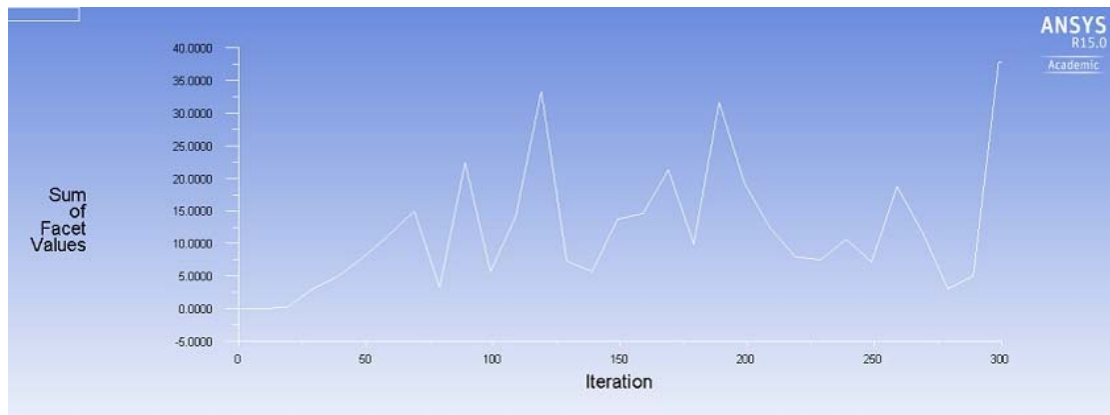


圖 5-15 水力漩流模擬流速 9m/s、顆粒大小 $63\mu\text{m}$ 條件下，
(a)overflow 出流(b)underflow 出流顆粒分佈情況



模擬條件：流速 9m/s；顆粒大小 $150\mu\text{m}$ ，可得
overflow:underflow=14.3:152.1=8.6:91.4。

(a)



(b)

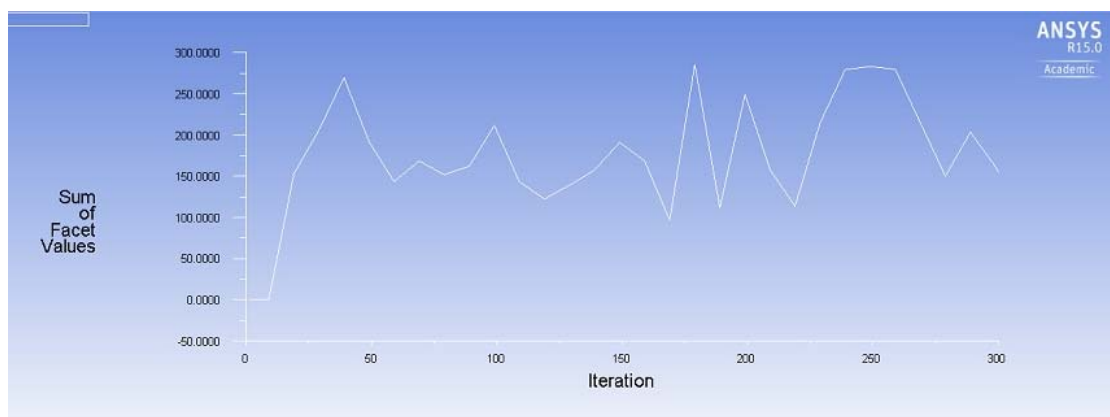
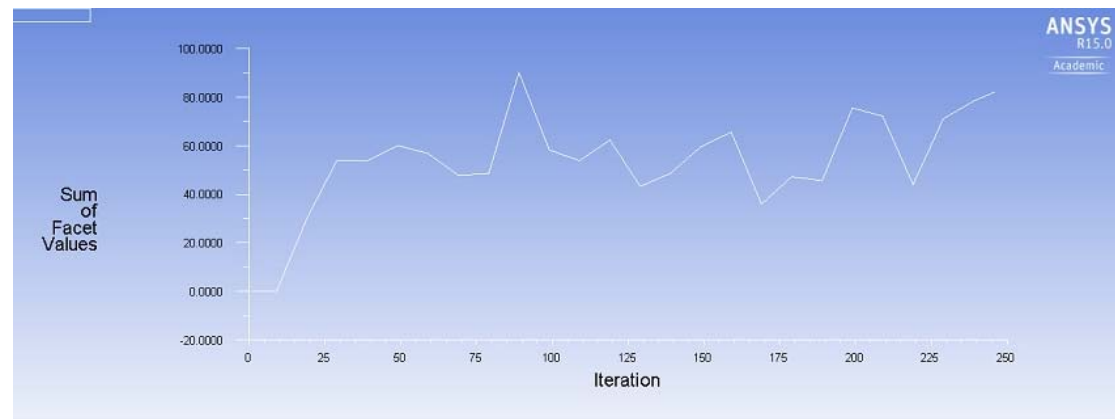


圖 5-16 水力漩流模擬流速 9m/s、顆粒大小 $150\mu\text{m}$ 條件下，
(a)overflow 出流(b)underflow 出流顆粒分佈情況



(6) 模擬條件：流速 11m/s；顆粒大小 $63\mu\text{m}$ ，可得
 $\text{overflow}:\text{underflow}=53.5:4.1=92.8:7.2$ 。

(a)



(b)

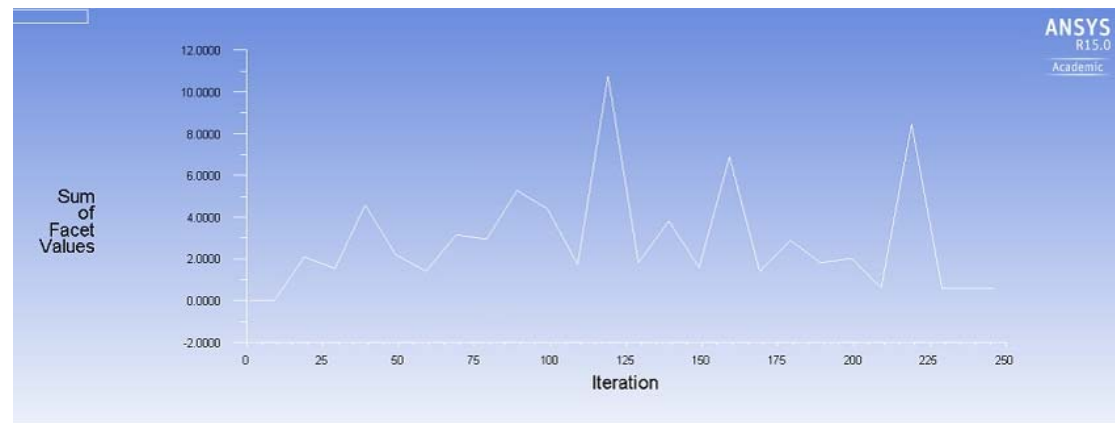


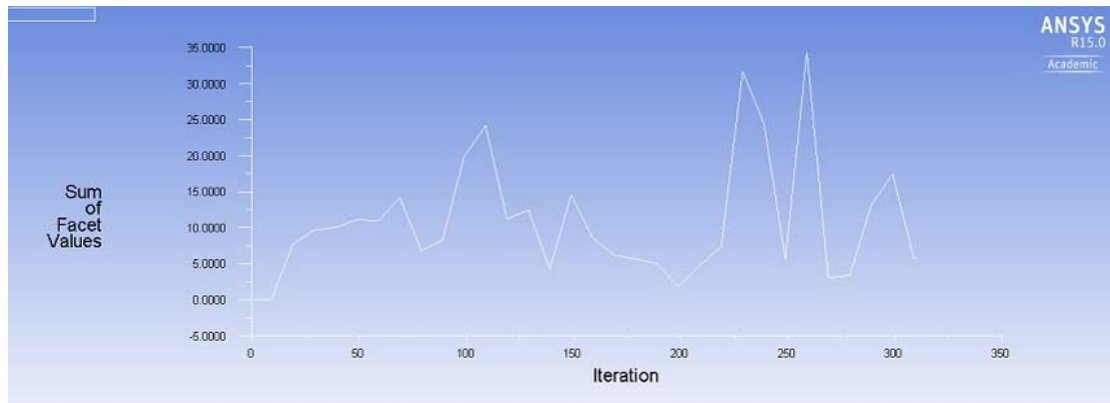
圖 5-17 水力漩流模擬流速 11m/s、顆粒大小 $63\mu\text{m}$ 條件下，
 (a)overflow 出流(b)underflow 出流顆粒分佈情況



第五章

模擬條件：流速 11m/s；顆粒大小 $150\mu\text{m}$ ，可得
overflow:underflow=13.7:132.6=9.4:90.6。

(a)



(b)

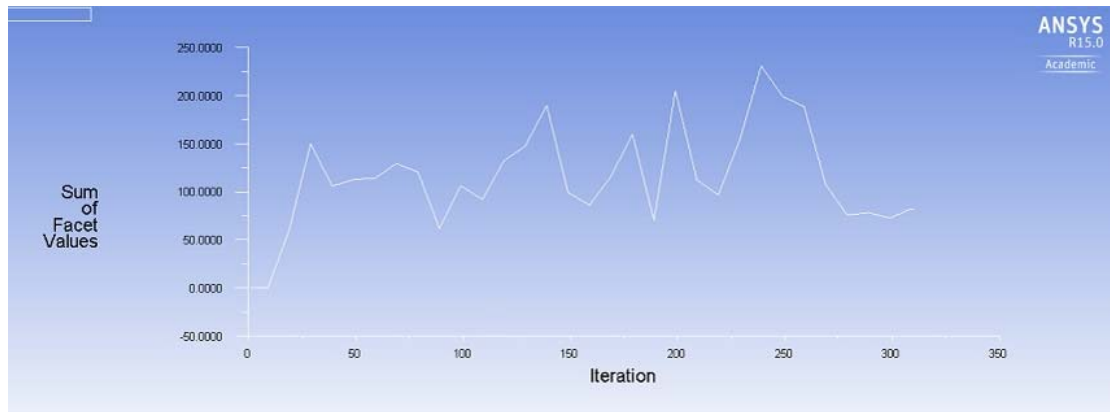
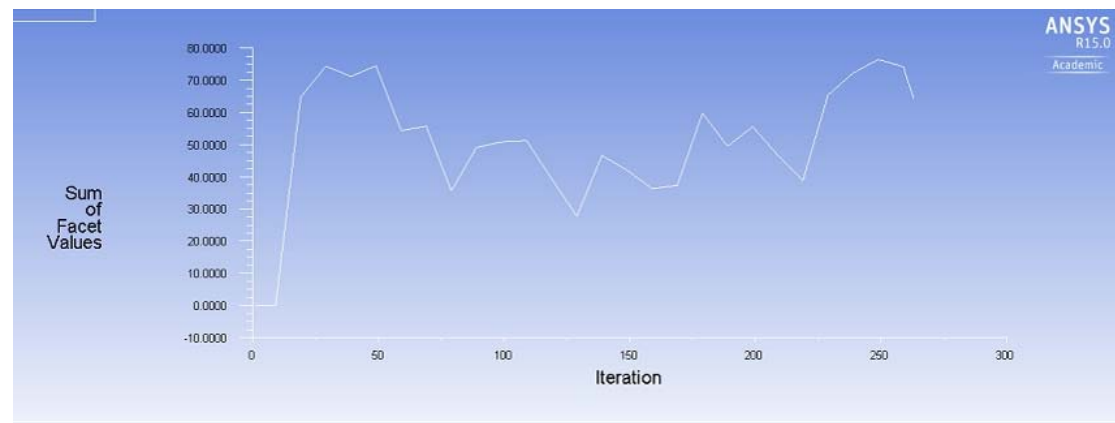


圖 5-18 水力漩流模擬流速 11m/s、顆粒大小 $150\mu\text{m}$ 條件下，
(a)overflow 出流(b)underflow 出流顆粒分佈情況



(7) 模擬條件：流速 13m/s；顆粒大小 $63\mu\text{m}$ ，可得
overflow:underflow=42.0:2.0=95.4:4.6。

(a)



(b)

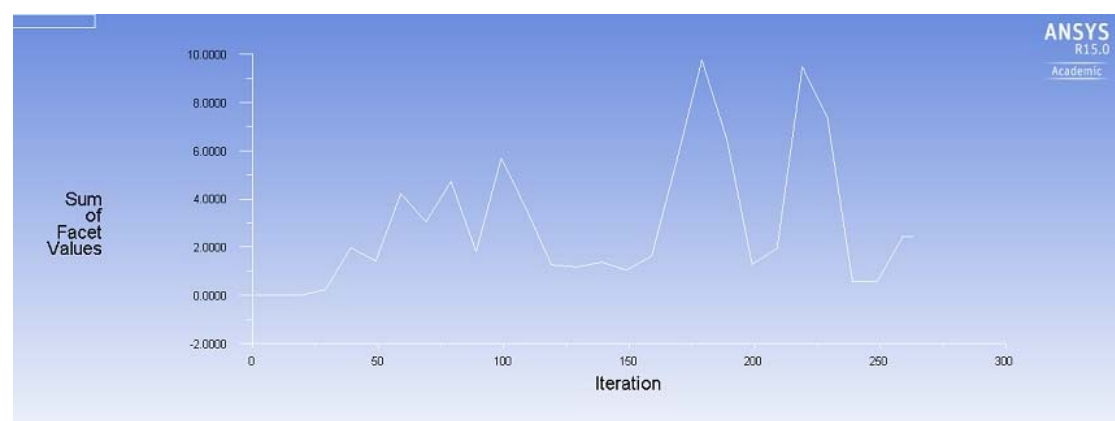


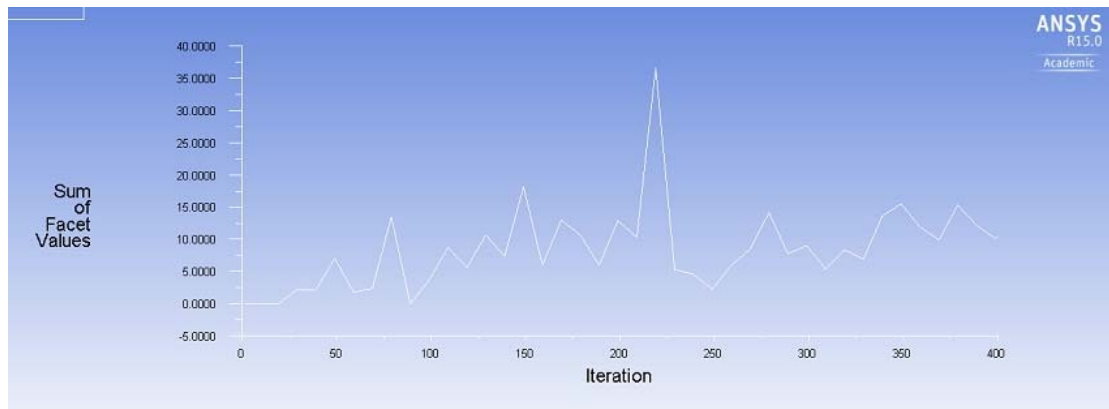
圖 5-19 水力漩流模擬流速 13m/s、顆粒大小 $63\mu\text{m}$ 條件下，
(a)overflow 出流(b)underflow 出流顆粒分佈情況



第五章

模擬條件：流速 13m/s；顆粒大小 $150\mu\text{m}$ ，可得
overflow:underflow=9.1:93.1=8.9:91.1。

(a)



(b)

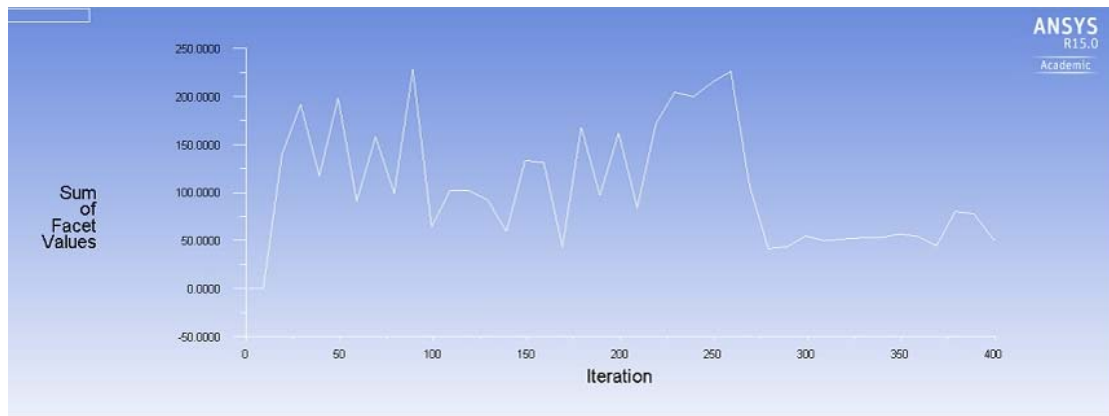


圖 5-20 水力漩流模擬流速 13m/s、顆粒大小 $150\mu\text{m}$ 條件下，
(a)overflow 出流(b)underflow 出流顆粒分佈情況



3D 列印製做水力漩流管應用於油污染土壤處理暨後續 CLSM 再利用研究

現階段較佳模擬條件

當漩流管尺寸為：

- (1) 入口直徑 36mm
- (2) 入口速度 2m/s
- (3) 底部出口直徑 30mm
- (4) 管徑 80mm
- (5) 管長 529mm

不同粒徑顆粒分離效能，得到較佳模擬條件如表 5-3 所示。

表 5-3 不同入口流速條件下，不同粒徑顆粒分離效能

入口速度	粒徑(μm)	Overflow:underflow 比率
2m/s	63	94.1%:5.9%
2m/s	150	0.7%:99.3%
3m/s	63	92.5%:7.5%
3m/s	150	8.2%:91.8%
5m/s	63	93.0%:7.0%
5m/s	150	7.9%:92.1%
7m/s	63	90.3%:9.7%
7m/s	150	7.8%:92.2%
9m/s	63	93.6%:6.4%
9m/s	150	8.6%:91.4%
11m/s	63	92.8%:7.2%
11m/s	150	9.4%:90.6%
13m/s	63	95.4%:4.6%
13m/s	150	8.9%:91.1%

遂以此漩流管尺寸為設計基準，準備進行水力漩流器 3D 列印製作。



5-3 3D 列印及水力漩流試驗

以漩流管尺寸，入口直徑 36mm、入口速度 2m/s、底部出口直徑 30mm、管徑 80mm、管長 529mm 條件請台南大進理化儀器公司進行 3D 列印，材質選用 ABS(Acrylonitrile Butadiene Styrene 丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物)樹脂。ABS 屬易加工成型的熱塑型高分子材料，具有強度高、韌性強；抗酸、鹼、鹽腐蝕能力佳，也能一定程度耐受有機溶劑溶解等優點。3D 列印水力漩流管 40,000 元/支，略高於原預估 10,000~20,000 元/支。

將 3D 列印水力漩流管架於實驗室水力漩流系統上，如圖 5-21 所示。



圖 5-21 3D 列印水力漩流管架於系統上照片

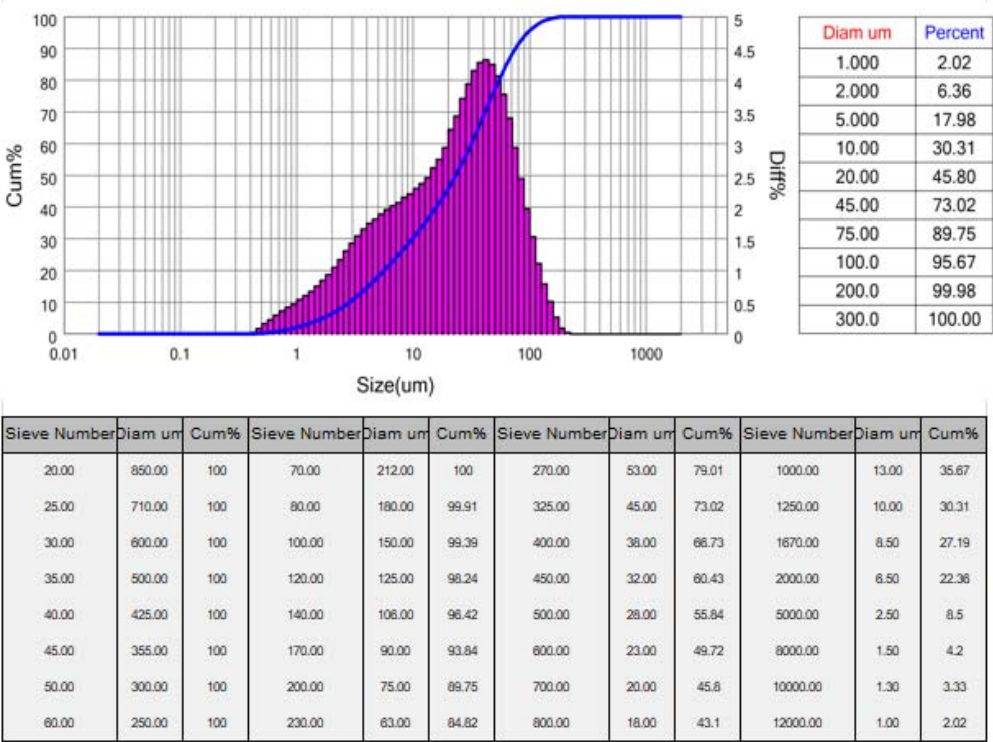
經水力漩流改變不同流速試驗，進流流速 2m/s、3 m/s 因抽吸動力不足，無法試驗；7m/s 泥水抽吸亦顯不足，遂本研究以 9 m/s、11 m/s、13 m/s 為主進行研究。

以固液比 1:4 配置泥漿，經充分攪拌後，以進流流速 9 m/s 送漿入 3D 列印水力漩流管，再將 overflow、underflow 泥漿經乾燥後，進行雷射粒徑分析，其結果如圖 5-22 所示。由實驗結果可看出，overflow 中主要以細顆粒為主，84.8%顆粒粒徑均在 63 μ m 以下， d_{50} 為 23.2 μ m；underflow 中(應以粗顆粒為主)則夾雜些許細顆粒，24.3%顆粒在 63 μ m 以下、75.7%在 63 μ m 以上， d_{50} 為 250.9 μ m。



3D 列印製做水力漩流管應用於油污染土壤處理暨後續 CLSM 再利用研究

(a)overflow



(b)underflow

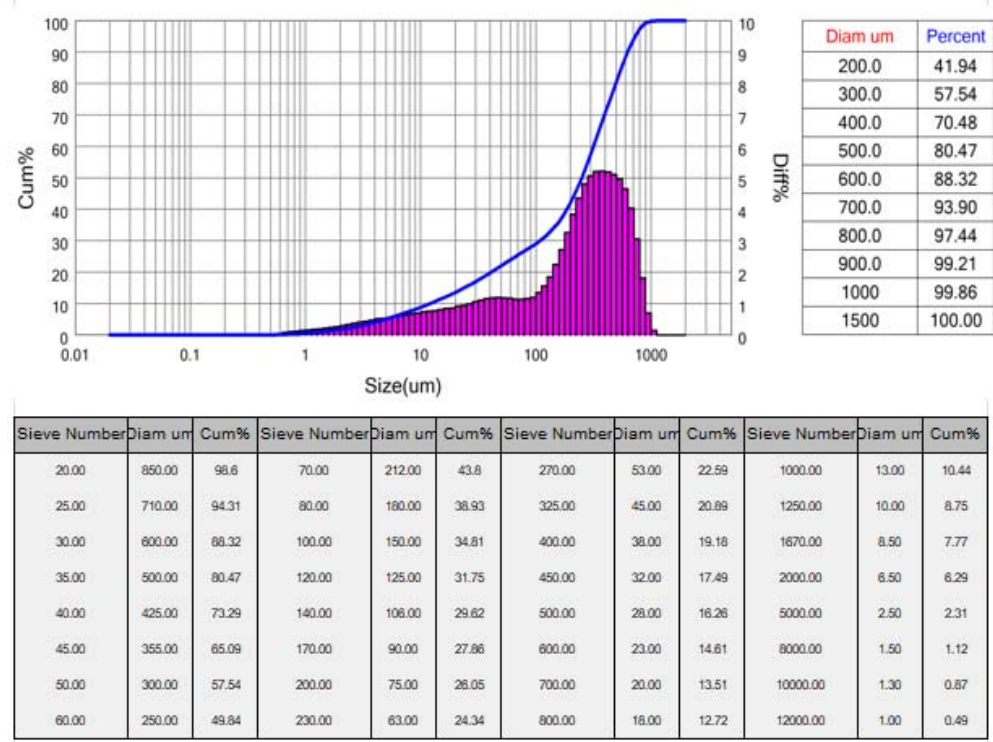


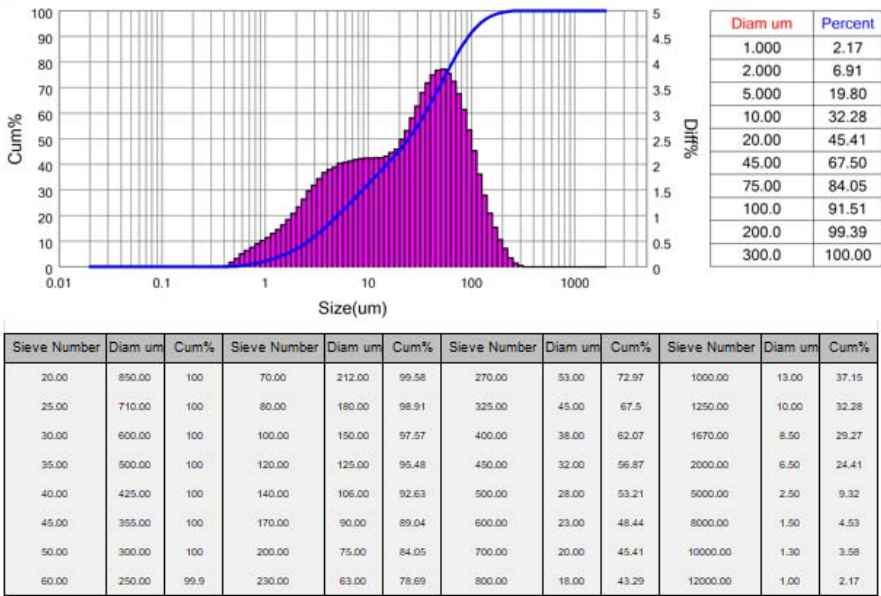
圖 5-22 3D 列印水力漩流管於 9 m/s 流速下之(a)overflow、
(b)underflow 雷射粒徑分析圖



第五章

以固液比 1:4 配置泥漿，經充分攪拌後，以進流流速 11 m/s 送漿入 3D 列印水力漩流管，再將 overflow、underflow 泥漿經乾燥後，進行雷射粒徑分析，其結果如圖 5-23 所示。由實驗結果可看出，overflow 中主要以細顆粒為主，78.7%顆粒粒徑均在 63 μ m 以下， d_{50} 為 24.6 μ m；underflow 中(應以粗顆粒為主)則夾雜些許細顆粒，12.4%顆粒在 63 μ m 以下、87.6%在 63 μ m 以上， d_{50} 為 351.7 μ m。

(a)overflow



(b)underflow

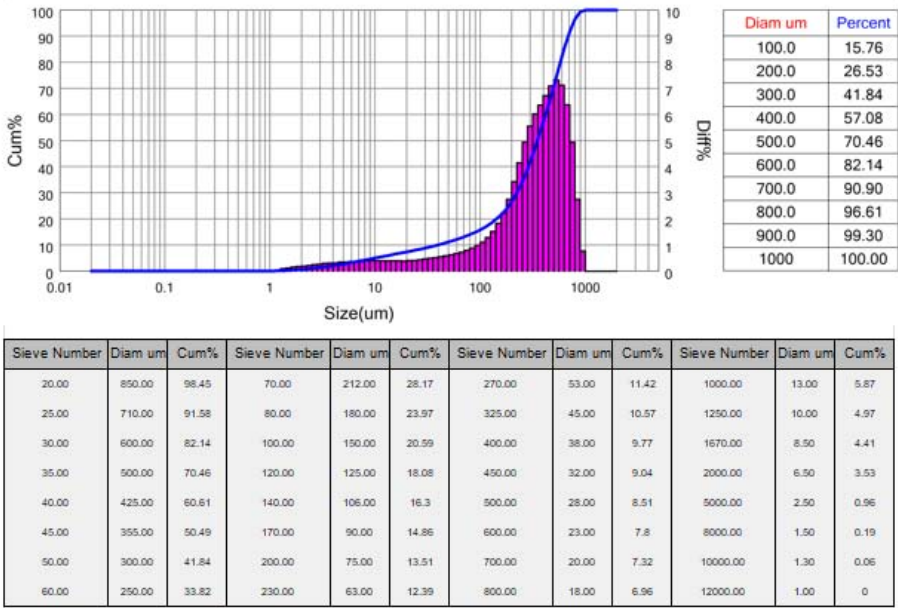


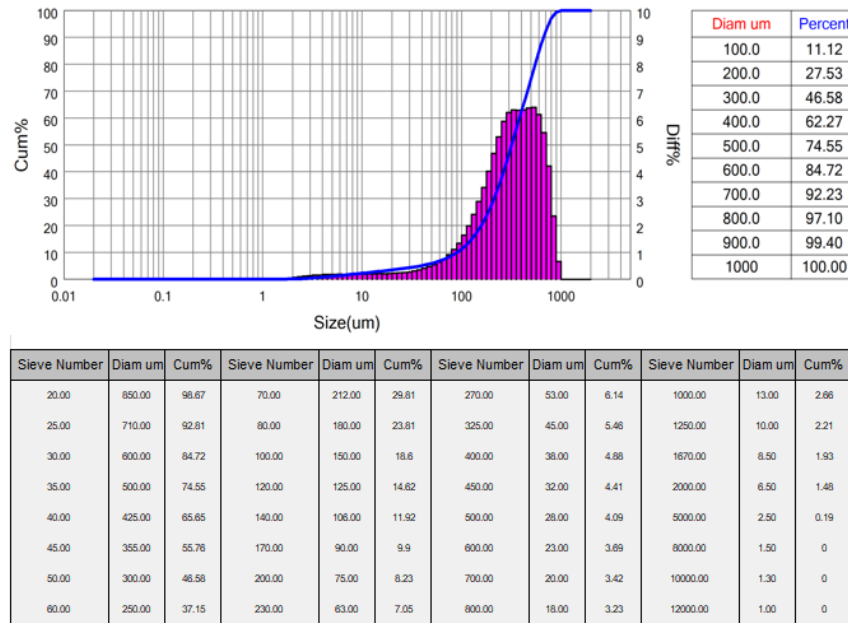
圖 5-23 3D 列印水力漩流管於 11 m/s 流速下之(a)overflow、(b)underflow 雷射粒徑分析圖



3D 列印製做水力漩流管應用於油污土壤處理暨後續 CLSM 再利用研究

以固液比 1:4 配置泥漿，經充分攪拌後，以進流流速 13 m/s 送漿入 3D 列印水力漩流管，再將 overflow、underflow 泥漿經乾燥後，進行雷射粒徑分析，其結果如圖 5-24 所示。由實驗結果可看出，流速太高，overflow、underflow 粗細顆粒已分離不開。

(a)overflow



(b)underflow

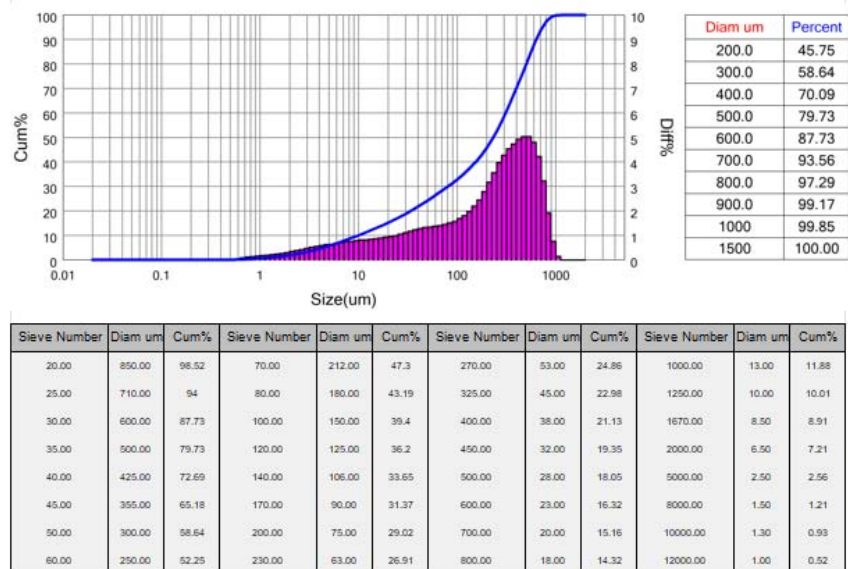


圖 5-24 3D 列印水力漩流管於 13 m/s 流速下之(a)overflow、(b)underflow 雷射粒徑分析圖



5-4 實廠水力漩流分離試驗

以上述 3D 列印水力漩流管尺寸製做不銹鋼管水力漩流管，並攜帶入口直徑 36mm、底部出口直徑 30mm、管徑 80mm、管長 529mm 不銹鋼管水力漩流管至立順興資源科技股份有限公司進行水力漩流試驗，試驗過程如圖 5-25 所示。依據前述實驗室經驗，以 9 m/s、11 m/s 為主進行研究。經固液比 1:4 配置泥漿，可能是攪拌桶量體大，攪拌動力不足，無法充分攪拌，遂將固液比改為 1:5 後，改善這問題。以進流流速 9 m/s 送漿入不銹鋼水力漩流管，再將 overflow、underflow 泥漿經乾燥後，進行雷射粒徑分析，其結果如圖 5-26 所示。由實驗結果可看出，overflow 中主要以細顆粒為主，93.9% 顆粒粒徑均在 63 μ m 以下， d_{50} 為 11.1 μ m；underflow 中，19.8% 顆粒在 63 μ m 以下、80.2% 在 63 μ m 以上， d_{50} 為 210.3 μ m。

(1) 若以 9 m/s 計算，每小時可處理：

$\pi * 0.036^2 / 4 * 9 * 60 * 60 = 33.0 \text{ m}^3$ 泥漿，固液比 1:5，乾土約可處理 5.5 噸。

(1) 若以 11 m/s 計算，每小時可處理：

$\pi * 0.036^2 / 4 * 11 * 60 * 60 = 40.3 \text{ m}^3$ 泥漿，固液比 1:5，乾土約可處理 6.7 噸。



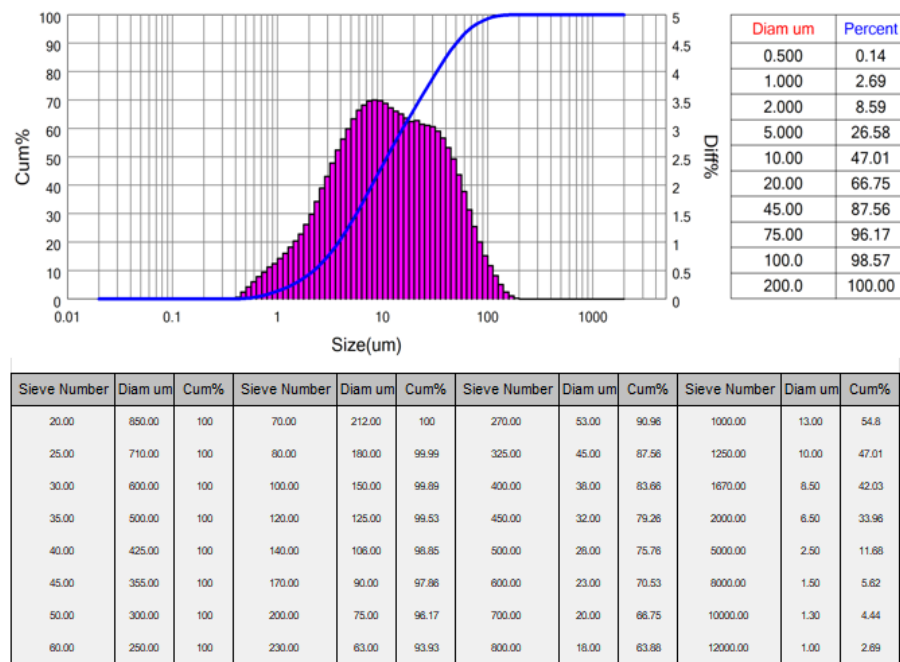
圖 5-25 實廠水力漩流分離試驗照片

進一步送樣業興環境科技股份有限公司進行 TPH 分析，經 GC-FID 分析結果，overflow 土壤 TPH 濃度高達 9,717 mg/kg；underflow 土壤則有 306 mg/kg，underflow 土壤符合土壤污染管制標準 $\text{TPH} \leq 1,000 \text{ mg/kg}$ 。



3D 列印製做水力漩流管應用於油污染土壤處理暨後續 CLSM 再利用研究

(a)overflow



(b)underflow

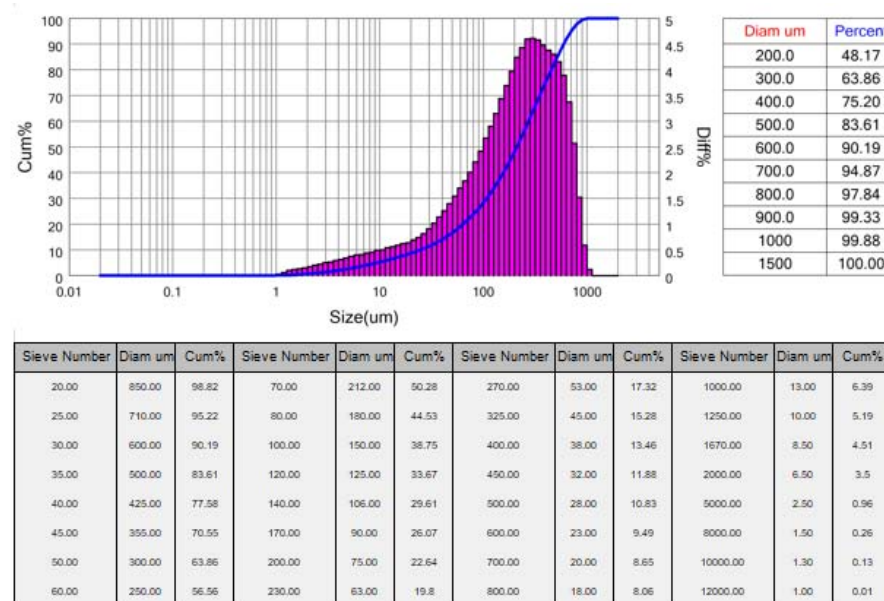


圖 5-26 不銹鋼水力漩流管於 9 m/s 流速下之(a)overflow、(b)underflow 雷射粒徑分析圖

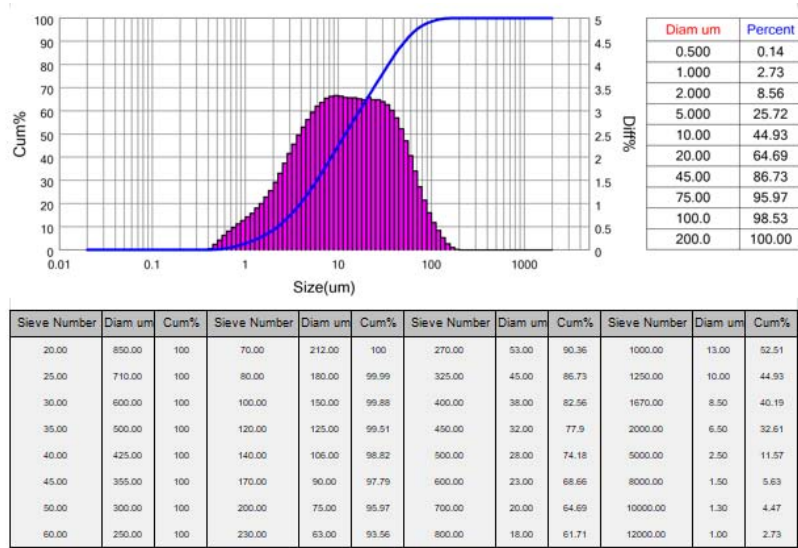
經固液比 1:5 配製泥漿，以進流流速 11 m/s 送漿入不銹鋼水力漩流管，再將 overflow、underflow 泥漿經乾燥後，進行雷射粒徑分析，其結果如圖 5-27 所示。由實驗結果可看出，overflow 中主要以細顆粒為主，93.6%顆粒粒徑均在 63 μ m 以下， d_{50} 為 11.9 μ m；underflow 中 2.3%顆粒在 63 μ m 以下、97.7%在 63 μ m 以上， d_{50} 為 425.1 μ m，顯示粗細顆粒分離效果佳，遂以本條件所得 underflow 粗顆粒進行後續 CLSM 試驗。



第五章

經業興環境科技股份有限公司 TPH 分析，overflow 土壤 TPH 濃度為 551 mg/kg；underflow 土壤 TPH 濃度為 575 mg/kg，underflow 土壤符合土壤污染管制標準 $\text{TPH} \leq 1,000 \text{ mg/kg}$ ，應可再利用。其中實驗數據不合理地方為，overflow 土壤由雷射粒徑看出 93.6% 顆粒粒徑均在 $63\mu\text{m}$ 以下， d_{50} 為 $11.9\mu\text{m}$ ，屬細顆粒，TPH 應該高才是，但分析結果 TPH 為 551 mg/kg。欲進行重複驗證，而因為所送業興公司剩餘樣品量不足，無法再次進行重複試驗；本想再次做水力漩流分離，但已無油污染土(原料)。

(a) overflow



(b) underflow

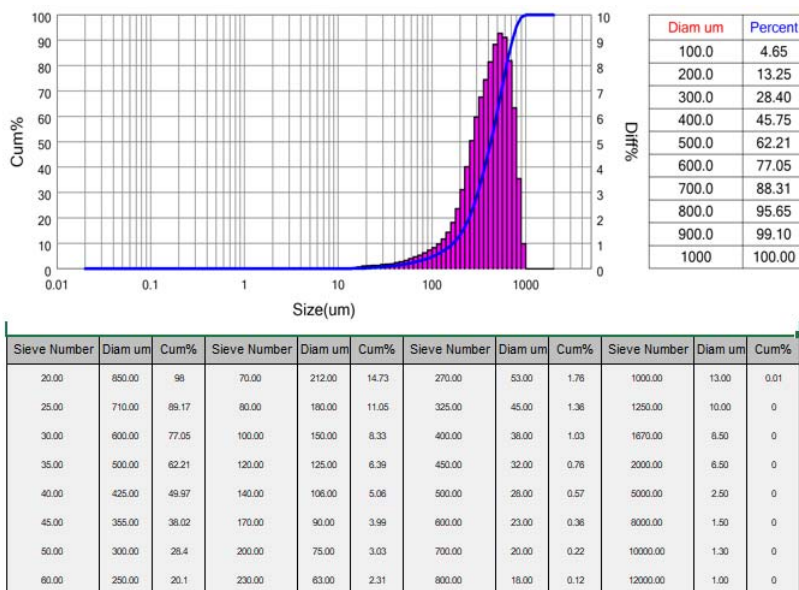


圖 5-27 不銹鋼水力漩流管於 11 m/s 流速下之(a)overflow、(b)underflow 雷射粒徑分析圖



5-5 CLSM 試驗

5-5-1 試做

將水力漩流 underflow 粗顆粒進行 CLSM 再利用研究，朝商品化邁進。為能貼近商業規格需求，遂使用立順興資源科技股份有限公司(以下簡稱立順興公司)設備、場地進行試驗。因未曾使用過經處理之油污染土進行 CLSM，於是，在後續試驗開始前，先試做以油污染土壤當部分添加粒料，熟悉 CLSM 操作步驟，試驗如圖 5-28~5-30 所示。



圖 5-28 小拌測試



圖 5-29 坍流度測試



第五章



圖 5-30 試體製作測試

5-5-2 實廠 CLSM 試驗結果

確定試拌程序可行後，接下來進行 CLSM 拌合試驗，取經水力漩流模廠處理過後之土壤樣本，以 20%、50%、100% 比例的方式取代廠內泥餅土進行拌合試驗，確認比例改變對抗壓強度影響，評估是否可以製成 CLSM。目前廠內之既有配比如下表：

表 5-4 實廠既有配比

	水泥	紅磚	泥餅土	添加劑	水	總計
重量 (kg)	100	580	850	5	260	1795
比重	2.85	2	2	2	2	
體積 (L)	35.1	290	425	2.5	130	1015.1



3D 列印製做水力漩流管應用於油污染土壤處理暨後續 CLSM 再利用研究

試驗一：

取油污染土壤(原樣)以 20%、50%、100%的比例取代配比中的泥餅土進行拌合，拌合後每個比例做成 6 個試體，養護 7 天與 28 天後測試強度，將測試完的樣品送業興公司進行 TPH 分析。

試驗二：

取經水力漩流 underflow 土壤，以 20%、50%、100%的比例取代配比中的泥餅土進行拌合，拌合後每個比例做成 6 個試體，養護 7 天與 28 天後測試強度，將測試完的樣品送業興公司進行 TPH 分析。

使用廠內的單軸式拌合機拌合，一次拌 0.03 米，所需要的各配比土量為 (1) 0%:全為泥餅土 25.5kg、樣品:0kg

(2)20%:泥餅土 20.4kg、樣品:5.1kg

(3)50%:泥餅土 12.75kg、樣品:12.75kg

(4)100%:泥餅土 0kg、樣品:25.5kg

其他:水泥 3kg、添加劑 0.15kg、紅磚 17.4kg、水 7.8kg

(i) 氯離子含量

氯離子量測過程照片如圖 5-31 所示，實驗結果顯示，油污染土壤原樣氯離子含量為 0.015%、水力漩流 underflow 土壤氯離子含量為 0.011%。



圖 5-31 氯離子量測過程照片



(ii) 含水率

油污染土壤原樣測試濕重 2006.2g，乾重為 1831.2g，含水率為 8.72%；
水力漩流 underflow 土壤測試濕重 2009.3g，乾重為 1547.8g，含水率為 23.0%

(iii) 不同摻配比例拌合配比之坍流度、落沉及氯離子試驗結果

將油污染土壤及經水力漩流之 underflow 土壤以不同摻配比例拌合，其坍流度及各配比氯離子含量如表 5-5、坍流度照片如圖 5-32、落沉照片如圖 5-32 所示。由表中可看出，對照組(油污染土壤 0%添加)之氯離子含量高，顯示 CLSM 摻料中可能泥餅土本身氯離子含量高所致。

表 5-5 不同摻配比例拌合配比之坍流度、落沉及氯離子試驗分析結果

樣本與摻配比例	坍流度	落沉	氯離子($\leq 0.15\text{kg/m}^3$)		
	x:y($\geq 40\text{cm}$)	($\leq 76\text{mm}$)	第一點	第二點	第三點
(a)對照組(油污染土壤 0%)	45*45	75	0.180	0.172	0.176
(b)油污染土壤 20%	45*45	73	0.193	0.181	0.187
(c)油污染土壤 50%	45*45	70	0.123	0.125	0.127
(d)油污染土壤 100%	45*45	65	0.079	0.081	0.085
(e)underflow 土壤 20%	44*44	70	0.081	0.083	0.082
(f)underflow 土壤 50%	44*45	65	0.040	0.042	0.039
(g)underflow 土壤 100%	70	65	0.031	0.032	0.030

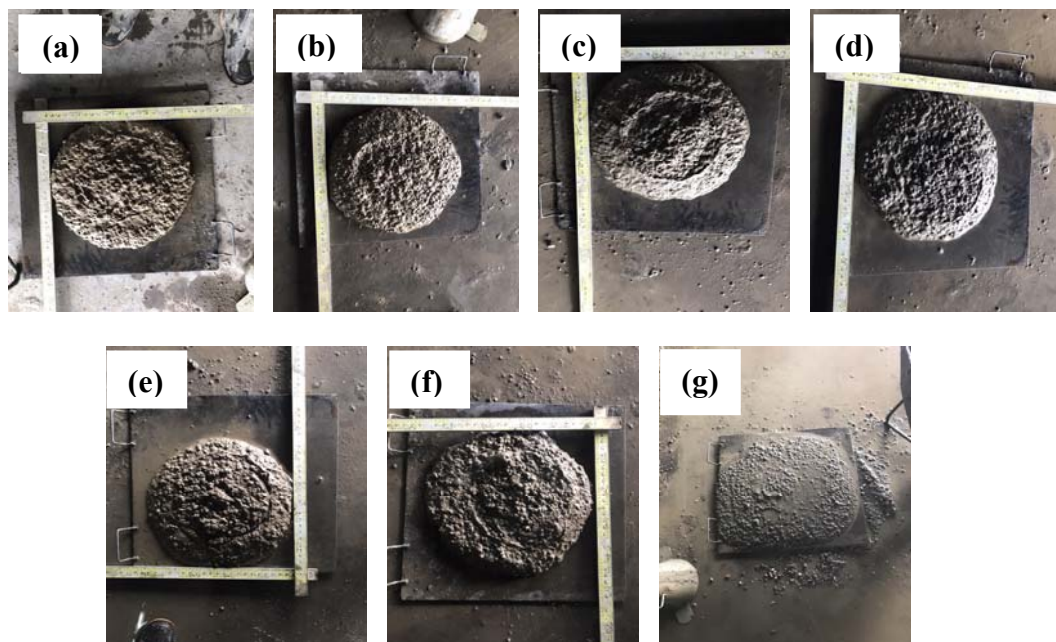


圖 5-32 不同摻配比例坍流度照片



3D 列印製做水力漩流管應用於油污染土壤處理暨後續 CLSM 再利用研究

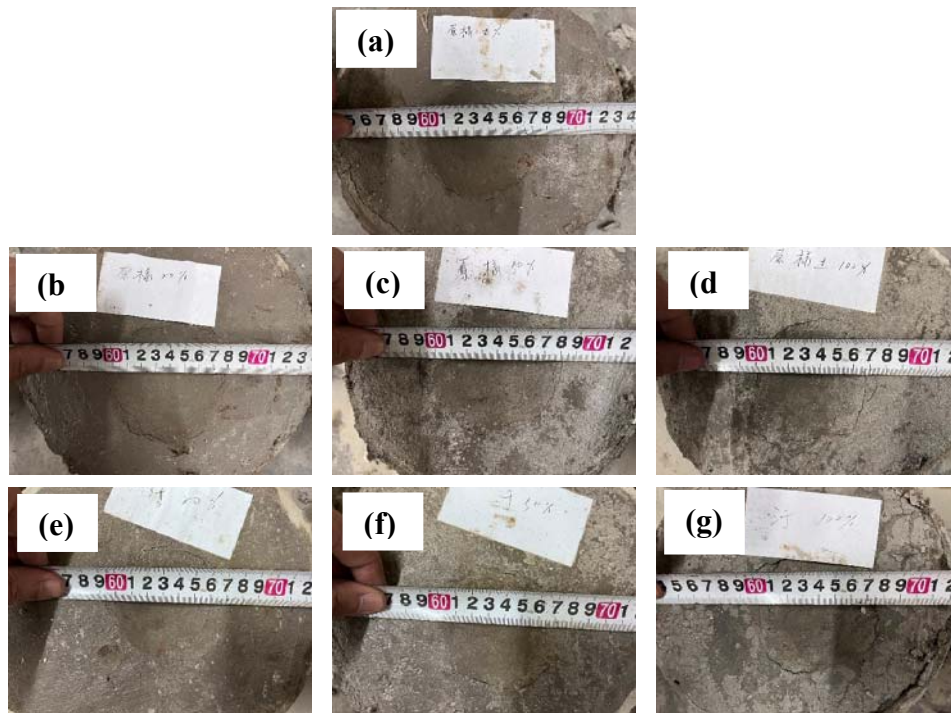


圖 5-32 不同摻配比例落沉照片

(iv) 抗壓試驗及 TPH 分析

不同摻配比例拌合之樣本於立順興資源科技股份有限公司進行抗壓強度試驗，並將壓碎試樣送業興公司進行 TPH 分析，其結果如表 5-6 所示。由表中可看出，不同配比 28 天抗壓強度落在 $9.4 \text{ kgf/cm}^2 \sim 19.0 \text{ kgf/cm}^2$ ，滿足公共工程委員會第 03377 章 V9.0 控制性低強度回填材料中 28 天抗壓強度 $\leq 90 \text{ kgf/cm}^2$ ，並且強度略大於對照組。再將壓碎試樣進行 TPH 分析，發現不同摻配比例拌合之樣本，其 TPH 均小於 1000 mg/kg 。

表 5-6 不同摻配比例拌合配比之抗壓強度及 TPH 試驗分析結果

樣本與摻配比例	抗壓強度		TPH
	7 天 (kgf/cm^2)	28 天 (kgf/cm^2)	28 天 (mg/kg)
(a)對照組(油污染土壤 0%)	7.1	12.3	70.8
(b)油污染土壤 20%	9.7	13.7	252
(c)油污染土壤 50%	7.8	11.0	293
(d)油污染土壤 100%	11.3	19.0	661
(e)underflow 土壤 20%	7.5	9.4	201
(f)underflow 土壤 50%	13.0	16.8	192
(g)underflow 土壤 100%	9.9	18.7	213



5-6 小結

- (1) 本研究設計水力漩流管並 3D 列印輸出，進行油污染土壤測試、確效。
於進流流速 9 m/s 送漿入 3D 列印水力漩流管，overflow stream 84.8% 顆粒粒徑均在 63 μ m 以下、underflow stream 75.7%在 63 μ m 以上。
於進流流速 11 m/s 送漿入 3D 列印水力漩流管，overflow stream 中 78.7%顆粒粒徑均在 63 μ m 以下、underflow stream 中，87.6%在 63 μ m 以上。惟 ABS 材質水力漩流管 3D 列印輸出費用 40,000 元/支，高於原預估 20,000 元/支(111 年 6 月廠商電聯報價)。若從製造成本來看，或許不划算；但是因為 3D 列印速度快、零組件可更換，若遇處理效果不佳情況，可快速修正，可部分修改。屬客製化需求。
- (2) 於固液比 1:5 配製泥漿，以進流流速 11 m/s 送漿入不銹鋼水力漩流管，overflow stream 中主要以細顆粒為主，93.6%顆粒粒徑均在 63 μ m 以下，；underflow stream 中 97.7%在 63 μ m 以上，粗細顆粒分離效果佳，達成分選目標:overflow stream 中，63 μ m 以下的顆粒占 85% 以上；underflow stream 中，63 μ m 以上的顆粒占 85%以上。
- (3) 考量土壤妥適利用，水力漩流 underflow stream 土壤取代部分 CLSM 細粒料進行產品製做與測試。試驗結果顯示，油污染土壤、underflow 土壤吸水率、氯離子含量等尚符需求。不同摻配比例拌合之 CLSM 產品其坍流度、水溶性氯離子含量、抗壓強度、TPH 分析結果符合公共工程委員會第 03377 章 V9.0 控制性低強度回填材料需求。預期可成功將經水力漩流分離 underflow stream 土壤再利用產製 CLSM 產品。
- (4) 水力漩流 underflow 土壤於 CLSM 應用法規適用性
若能將油污染土壤水洗、水力漩流 underflow 土壤達 TPH $\leq$ 1000 mg/kg，建議可於「土壤及地下水污染整治計畫撰寫指引 附件二、污染土壤處置計畫書」增加欄位，增加未超過土壤污染管制標準再利用流向說明，後續可當 CLSM 粒料使用。
於 CLSM 部分，未超過土壤污染管制標準 TPH $\leq$ 1000 mg/kg 土壤，則可當作公共工程委員會第 03377 章 V9.0 控制性低強度回填材料中 CLSM 使用之粒料，為產製混凝土用粒料，符合「CNS 1240 混凝土粒料」中，細粒料要求。惟 CLSM 回填材料配比設計如經核可，其材料之來源、數量、材料級配、比例等，非經依規定程序報請工程司核准，不得擅自變更。需報請核准後為之。



第六章 結論與建議

6-1 結論

- (1) 總石油碳氫化合物(TPH)油污染土壤屬中性。經乾篩試驗，乾篩分層 $> 150 \mu\text{m}$ 比例達 91.5%~92.7%，TPH 為 563 mg/kg； $63 \sim 150 \mu\text{m}$ 比例為 5.6%~5.9%，TPH 為 1376 mg/kg； $< 63 \mu\text{m}$ 比例為 1.7%~2.6%，TPH 為 1614 mg/kg。顆粒愈細，TPH 含量愈高。
- (2) 當漩流管尺寸為入口直徑 36mm、底部出口直徑 30mm、管徑 80mm、管長 529mm。2m/s~13 m/s 模擬進流流速，分離效果預期佳。3D 列印 ABS 材質水力漩流管進行測試，以進流流速 11 m/s 送漿，可得 overflow stream 中 78.7%顆粒粒徑均在 $63\mu\text{m}$ 以下、underflow stream 中，87.6% 在 $63\mu\text{m}$ 以上，分離效果尚可。惟 ABS 材質水力漩流管 3D 列印輸出費用 40,000 元/支，高於原預估 20,000 元/支。
- (3) 實廠以進流流速 11 m/s 送漿入不銹鋼水力漩流管，overflow stream 中主要以細顆粒為主，93.6%顆粒粒徑均在 $63\mu\text{m}$ 以下；underflow stream 中 97.7%在 $63\mu\text{m}$ 以上，粗細顆粒分離效果佳，達成分選目標：overflow stream 中， $63 \mu\text{m}$ 以下的顆粒占 85%以上；underflow stream 中， $63 \mu\text{m}$ 以上的顆粒占 85%以上。
- (4) 水力漩流 underflow stream 土壤取代部分 CLSM 細粒料進行產品製做。underflow 土壤吸水率、氯離子含量等尚符需求；不同摻配比例拌合之 CLSM 產品其坍流度、水溶性氯離子含量、抗壓強度、TPH 分析結果符合公共工程委員會第 03377 章 V9.0 控制性低強度回填材料需求。預期可成功將經水力漩流分離 underflow stream 土壤再利用產製 CLSM 產品。



6-2 建議

- (1) 因模廠規模狀況多，包含水、電、人、車、設備等，需多溝通、協調。
建議能利用 2~3 年時間好好建立模廠數據。
- (2) 高雄廠址發包進度略慢，後續試驗料源取得不易，相關試驗謹慎考量。
- (3) 樣本需先預篩，使用 5mm 篩網，將石頭等雜物去除，避免漩流管阻塞。



參考文獻

- American Concrete Institute, 2013. Report on Controlled Low-Strength Materials, ACI 229R-13.
- 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.
- Chang Y.K. (corresponding author), Shu Y.L., Shih P.H., Huang Z.E. and Song Y.X., DESIGNED HYDROCYCLONE FOR HARBOR SEDIMENT SEPARATION, The 9th International Conference on Marine Pollution and Ecotoxicology, Hong Kong, 2019.6.10-2.09.6.14.
- CL:AIRE technical bulletin, 2007, Understanding soil washing.
- 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.
- Feng, D., Lorenzen, L., Aldrich, C., Mare, P.W., 2001. Ex situ diesel contaminated soil washing with mechanical methods. Mineral Engineering, 14, 1093-1100.
- Gupta, R., Kaulaskar, M. D., Kumar, V., Sripriya, R., Meikap, B. C., & Chakraborty, S., 2008. Studies on the understanding mechanism of air core and vortex formation in a hydrocyclone. Chemical Engineering Journal, 144, 153-166.
- Kelly, E.G., and Spottiswood, D.J., 1982 Introduction to Mineral Processing, Wiley-Interscience, New York.
- 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.



參考文獻

- 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.
- Nielsen, A.V., Beauchamp, M.J., Nordin, G.P. and Woolley, A.T., 2020. 3D Printed Microfluidics, *Annu Rev Anal Chem (Palo Alto Calif)*. 13(1), 45–65.
- 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.
- Reynolds and Richards, 1996. Unit operations and processes in environmental engineering. PWS publishing company.
- Strazišar, J., Sešelj, A., 1999. Attrition as a process of comminution and separation. *Powder Technology*, 105, 205-209.
- USEPA SW846- METHOD 9074, 2007. Turbidimetric Screening Method for Total Recoverable Petroleum Hydrocarbons in Soil.
- Yi-Kuo Chang, Cheng-Di Dong, Chiu-Wen Chen, Chih-Feng Chen, Zhen-Wei Hong, Yi-Liang Shu, Chia-Ying Li (2015, Jun). APPLICATION OF HYDROCYCLONE SEPARATION SYSTEM FOR CONTAMINATED SOIL TREATMENT AND FLOW SIMULATION. 13th International UFZ-Deltares Conference on Sustainable Use and Management of Soil, Sediment and Water Resources, Copenhagen, Denmark.
- Yu-Chi Chang, Pai-Haung Shih, Yi-Liang Shu, You-Qian Lin, Yu-Xun Song, Yi-Kuo Chang (corresponding author), Mechanical/chemical treatments for oil contaminated soils separations, The 12th CESE Conference, Kaohsiung, Taiwan, 2019.11.3-2019.11.7.
- 三帝瑪有限公司，2021。新手入門：五種常見 3D 列印技術比較及原理，<https://3d.mart.com.tw/news/comparing-fff-sla-and-sls-technologies>。
- 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。
- 立體智動精密機器股份有限公司，2022。3D 繪圖軟體簡介，<https://3d-ula.com/3d%E7%B9%AA%E5%9C%96%E8%BB%9F%E9%AB%94%E7%B0%A1%E4%BB%8B/>。



3D 列印製做水力漩流管應用於油污染土壤處理暨後續 CLSM 再利用研究

任連城、梁政、梁利平、龍道玉，2005。過濾式水力旋流器方案設計，西南石油學院學報。

行政院公共工程委員會，2021。施工綱要規範第 03377 章 V9.0，控制性低強度回填材料。

行政院經濟部工業局，2003。工廠土壤及地下水污染整治技術手冊－石化業。

行政院經濟部標準檢驗局，2004。中華民國國家標準 CNS14842，高流動性混凝土坍流度試驗法。

行政院經濟部標準檢驗局，2014。中華民國國家標準 CNS13465，新拌混凝土中水溶性氯離子含量試驗法。

行政院經濟部標準檢驗局，2016。中華民國國家標準 CNS15865，控制性低強度材料圓柱試體之製備及試驗法。

行政院環境保護署環境檢驗所，2009。土壤酸鹼值(pH 值)測定方法－電極法(NIEA S410.62C)。

行政院環境保護署環境檢驗所，2013。土壤中總石油碳氫化合物檢測方法－氣相層析儀/火焰離子化偵測器法(NIEA S703.62B)。

行政院環境保護署環境檢驗所，2017。事業廢棄物毒性特性溶出程序 (NIEA R201.15C)。

吳弘任、鄭大偉，2012。擦洗技術應用於焚化底渣除氯之研究，2012 清潔生產暨環保技術研討會，經濟部工業局。

吳光中、宋婷婷、張毅，2012。Fluent 基礎入門與案例精通，電子工業出版社。

吳堅，2016。中殼潤滑油廠關廠與因應，煉製研究所。

<https://new.cpc.com.tw/division/lb/knowledge-text.aspx?ID=55>

周志豪，2011。複合式土壤整治技術綜合執行土壤整治之案例分析探討，社團法人台灣土壤及地下水環境保護協會簡訊，第 39 期。

洪振璋，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。

夏國芳、林金魁、陳財福、洪崑曉、高志明，2018。以電催化水處理受重油污染土壤之研究：機制及效益評估，中華民國環境工程學會 2018 土壤與地下水研討會。

高志明，2005。應用整合型復育技術處理受燃料油污染之土壤及地下水，行政院環境保護署委託研究計畫。

高雄市政府，2021。高雄市議會第 3 屆第 6 次定期大會，「中油高雄廠土地污染整治」專案報告。

張又仁，2018。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。

張美玲、廖以瑄、莊玉雯，2017。桃園市大專校院產業環保技術服務團環保簡訊，第37期。

張益國、徐一量、施百鴻、呂東璇、盧幸成、張育祺、黃子恩、鄭文良，2019。中華民國發明專利第 I 665028 號，發明名稱：鐵氧化物覆膜於經水力漩流分離之土壤細顆粒殘餘物上形成再生資材吸附劑方法。專利權期間：2019.7.11~2038.5.20。

張益國、徐一量、施百鴻、盧幸成、張育祺、黃子恩、李佳穎、林久智、鄭文良，
2019。中華民國發明專利第 I 663002 號，發明名稱：反饋式水力漩流分離系統。專
利權期間：2019.6.21~2037.10.1。

張益國、徐一量、鄭文良、劉原宏、張育祺、洪振瑋、盧幸成，2016。中華民國發明專利第 I 549764 號，發明名稱：機動式分離含重金屬之土壤顆粒處理方法。專利權期間：2016.9~2035.6。

張益國、張祖恩、林宗曾、施百鴻、盧幸成、張育祺、呂東璇、鄭文良，2019。中華民國發明專利第 I 679286 號，發明名稱：脫硫渣去除石墨亮片等物質之資源化處理系統。專利權期間：2019.12.11~2038.11.25。

張尊國，2002。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。

望熙榮，1998。空氣污染防治，中央圖書出版社。

郭靚德，2017。3D 列印造市場 醫療航太領頭羊，小世界 Newsweek。[http://shuj.shu.edu.tw/blog/2017/11/08/3d%E5%88%97%E5%8D%B0%E9%80%A0%E5%B8%82%](http://shuj.shu.edu.tw/blog/2017/11/08/3d%E5%88%97%E5%8D%B0%E9%80%A0%E5%B8%82%u)



3D 列印製做水力漩流管應用於油污染土壤處理暨後續 CLSM 再利用研究

[E5%A0%B4-%E9%86%AB%E7%99%82%E8%88%AA%E5%A4%AA%E9%A0%98%E9%A0%AD%E7%BE%8A/](#)。

陳呈芳，2007。土壤重金屬污染整治技術，台灣產業服務基金會，環保技術 e 報，第 43 期。<https://proj.ftis.org.tw/eta/epaper/PDF/ti043-1.pdf>

黃亮順，2009。擦洗技術應用於廢污中重金屬分離之研究，國立成功大學環境工程學系碩士論文。

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。

勢動科技，2021。

<https://www.acttr.com/tw/tw-faq/tw-faq-xrf/43-tw-faq-principle-xrf.html>

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。

維基百科，2019。

<https://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=%E8%B6%85%E8%81%B2%E6%B3%A2&variant=zh-hant>

劉原宏、張育祺、莊順、徐一量、洪振瑋、張益國，水力漩流分離系統適宜操作條件擷取，中華民國環境工程學會 2014 土壤與地下水研討會，中華民國 103 年 11 月 14、15 日，台中。

劉原宏、張育祺、黃子恩、徐一量、施百鴻、張益國，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，中華民國環境工程學會 2018 土壤與地下水研討會。

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。



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」

☒構想書 ☐申請計畫書

☐期中報告 ☐期末報告 審查意見回覆對照表

計畫年度	111 年度	計畫類型	☒ 研究型 ☐ 模場型
計畫類別	☒ 整治 ☐ 調查 ☐ 其它		主持人：張益國 NO：D8
計畫名稱	3D 列印製做水力漩流管應用於油污染土壤處理暨後續 CLSM 再利用研究		
委員審查意見		計畫單位回覆	
委員一： 1. 應具可行性；參數已掌握。 2. 導入整治應用限制宜檢核。		委員意見回覆： 1. 謝謝委員肯定。 2. 試驗過程將檢核可能限制因子，適度釐出應用範圍。	
委員二： 1. 以 3D 設計成本可以降低，但大規模製作的成本競爭性需做比較考量。		委員意見回覆： 1. 向委員說明，3D 列印用於水力漩流管設計後先列印出來測試，確認效能達預期後，才正式製做不鏽鋼水力漩流管(或 PU 水力漩流管)。3D 列印之導入期望能減少前期試誤金錢及時間花費，避免直接做不鏽鋼水力漩流管但發生不符預期窘境。感謝委員提議，亦將 3D 列印等成本納入考量。	
委員三： 1. 本計畫擬結合三 D 列印製作水利漩流管，以應用於汙染土壤分離、以及產製回填材料。研究專長在國內較少，過去成果佳，具有實場應用潛力。 2. 建議能結合顧問或工程公司，結合多方資源，共同投入實場應用。		委員意見回覆： 1. 謝謝委員肯定。 2. 謝謝委員建議，目前結合裕山環境工程股	



3D 列印製做水力漩流管應用於油污染土壤處理暨後續 CLSM 再利用研究

	份有限公司(自籌款出資公司)優化水力漩流管，進行 3D 列印。結合立順興資源科技股份有限公司，提供模廠試驗、CLSM 混拌、製做，期望經水力漩流產出之 underflow stream 土壤能測試 CLSM 應用，未來有機會申請再利用案，土石資源有效應用。																																		
委員四： 1.本計畫採用排土客土法，以 3D 列印製作水利漩流管，並將受油污染之土壤經分選及處理後製成 CLSM 原料，然構想書內尚未提及土壤回填之計畫以及受油污污染之土壤處理之方式，建議宜補充說明，以利相關單位查核。	委員意見回覆： 1. 謝謝委員意見。受油污染之土壤經水力漩流分選後，主要產生： (1) underflow stream 土壤，TPH 含量較低，約介於 515~2,500 mg/kg。低於 1,000 mg/kg 土壤最希望能回填，當做乾淨土方利用(因屬小規模研究，尚未考量土方回填計畫，敬請委員見諒)。本研究則思考商業化需求，土方當作細粒料製做 CLSM 再利用(本研究項目之一)，TPH 1,000 mg/kg~2500mg/kg 土壤可於水洗程序中加強擦洗、空氣攪拌等方式達成目標。本研究亦直接測試 TPH 低於 2,500 mg/kg 土壤當細粒料應用於 CLSM，能否符合公共工程委員會 03377 章標準與否。 (補充說明，109 年度計畫成果中，中殼油污染土經水力漩流 13m/s 處理，underflow stream 土壤，TPH 515 mg/kg，且分流比佔 93.5%) <table><tr><th rowspan="2">檢驗項目</th><th colspan="3">Inlet velocity: 11 m/s</th><th colspan="3">Inlet velocity: 13 m/s</th></tr><tr><th>TPH (mg/kg)</th><th>土壤分流比例</th><th>粒徑</th><th>TPH (mg/kg)</th><th>土壤分流比例</th><th>粒徑</th></tr><tr><td>原樣</td><td>15,179</td><td></td><td></td><td>15,179</td><td></td><td></td></tr><tr><td>overflow</td><td>32,855</td><td>9.0%</td><td><63 μm: 95.9% >63 μm: 4.0%</td><td>205,607</td><td>6.5%</td><td><63 μm: 94.3% ≥63 μm: 5.7%</td></tr><tr><td>underflow</td><td>1,259</td><td>91.0%</td><td><63 μm: 12.5% >63 μm: 87.5%</td><td>515</td><td>93.5%</td><td><63 μm: 10.7% >63 μm: 89.3%</td></tr></table>	檢驗項目	Inlet velocity: 11 m/s			Inlet velocity: 13 m/s			TPH (mg/kg)	土壤分流比例	粒徑	TPH (mg/kg)	土壤分流比例	粒徑	原樣	15,179			15,179			overflow	32,855	9.0%	<63 μ m: 95.9% >63 μ m: 4.0%	205,607	6.5%	<63 μ m: 94.3% ≥63 μ m: 5.7%	underflow	1,259	91.0%	<63 μ m: 12.5% >63 μ m: 87.5%	515	93.5%	<63 μ m: 10.7% >63 μ m: 89.3%
檢驗項目	Inlet velocity: 11 m/s			Inlet velocity: 13 m/s																															
	TPH (mg/kg)	土壤分流比例	粒徑	TPH (mg/kg)	土壤分流比例	粒徑																													
原樣	15,179			15,179																															
overflow	32,855	9.0%	<63 μ m: 95.9% >63 μ m: 4.0%	205,607	6.5%	<63 μ m: 94.3% ≥63 μ m: 5.7%																													
underflow	1,259	91.0%	<63 μ m: 12.5% >63 μ m: 87.5%	515	93.5%	<63 μ m: 10.7% >63 μ m: 89.3%																													



附件一

	(2) overflow stream 土壤，TPH 濃度較高，可能介於 10,000~205,000mg/kg(以往試驗經驗)。目前本年度計畫尚未能規劃處理這股高 TPH 濃度土壤。合作夥伴立順興資源科技股份有限公司雖然廠房隔壁公司即有旋轉窯，可做高溫熱脫附，亦有談論及此。但因為涉及實廠變動製程、原料，該廠廢棄物清理計畫書、空污設施/操作許可都要跟著動，因此廠方觀察中，等待商機成熟。 規劃構想中，高 TPH 土壤經高溫熱脫附後，亦可做成 CLSM。																		
委員五： 1.研究主題符合土壤及地下水污染整治基金補助精神、探討課題實際、整體研究架構明確方法可行、技術具未來應用及推廣性。	委員意見回覆： 1. 謝謝委員肯定。																		
委員六： 1.土壤水洗後 TOC 含量於用在 CLSM 原料是否有分析資料。	委員意見回覆： 1. 謝謝委員意見。目前尚未實際將土壤水洗水用在 CLSM。先前某幾批次水洗，TOC 數值如下， <table><tr><th>Rep #</th><th>Base Analysis Type</th><th>ppmC</th></tr><tr><td>1</td><td>TOC</td><td>8.8804</td></tr></table> <table><tr><th>Rep #</th><th>Base Analysis Type</th><th>ppmC</th></tr><tr><td>1</td><td>TOC</td><td>14.6850</td></tr></table> <table><tr><th>Rep #</th><th>Base Analysis Type</th><th>ppmC</th></tr><tr><td>1</td><td>TOC</td><td>18.9899</td></tr></table> 後續將洽詢立順興資源科技股份有限公司 CLSM 用水是否有限制條件，讓試驗更貼近實廠需求。	Rep #	Base Analysis Type	ppmC	1	TOC	8.8804	Rep #	Base Analysis Type	ppmC	1	TOC	14.6850	Rep #	Base Analysis Type	ppmC	1	TOC	18.9899
Rep #	Base Analysis Type	ppmC																	
1	TOC	8.8804																	
Rep #	Base Analysis Type	ppmC																	
1	TOC	14.6850																	
Rep #	Base Analysis Type	ppmC																	
1	TOC	18.9899																	



3D 列印製做水力漩流管應用於油污染土壤處理暨後續 CLSM 再利用研究

委員七

1. 本計畫擬開發油污染土壤應用於 CLSM，相關應用途徑是否有高值化之可能性？其中 CLSM 之去化用途較有疑慮。
2. 請說明水利漩流器於油污染土壤去除 TPH 之效能評估依據為何？去除 TPH 之原理為何？建議宜先釐清說明。

委員意見回覆：

1. 謝謝委員意見。其實將油污染土壤經水力漩流分離應用於 CLSM，是廠商-立順興資源科技股份有限公司提出需求。立順興公司營業項目涵蓋營建剩餘土石方回收、再生混泥土製品、混凝土塊回收、再生粗砂、爐渣再生、土壤回收、砂石回收、玻璃回收處理、再生天然砂、再生粒料再生等，一年 CLSM 出貨超過 15 萬方以上。若能將油污染土壤經顆粒分離處理應用於 CLSM，將可減少該公司細粒料購置成本。此雖非屬高值化用途，但有效去化應不是問題。再則，計畫申請人水力漩流模廠已架設於立順興公司內，可串聯水力漩流分離、產出之 underflow stream 土壤直接在公司內測試 CLSM 條件，以模廠規格測試，離商業化更接近。



2. 水力漩流器於油污染土壤去除 TPH 之效能評估依據主要取決於粗細分離能力。一般而言，土壤顆粒細，TPH 含量較高。若能充分擦洗，再將 underflow stream 土壤控制 $<63\mu\text{m}$ 顆粒(細顆粒)在 10% 內最佳。TPH 沒有被去除，主要是分配到粗細顆粒中。如要要去除 TPH，則須另輔以物理/化學程序。



附件一

				(中殼油污染土經水力漩流 13m/s 處理， underflow stream 土壤，TPH 515 mg/kg)		
檢驗項目	Inlet velocity: 11 m/s			Inlet velocity: 13 m/s		
	TPH (mg/kg)	土壤分 流比例	粒徑	TPH (mg/kg)	土壤分 流比例	粒徑
原樣	15,179			15,179		
overflow	32,855	9.0%	<63 μ m: 95.9% >63 μ m: 4.0%	205,607	6.5%	<63 μ m: 94.3% <u>>63 μm: 5.7%</u>
underflow	1,259	91.0%	<63 μ m: 12.5% >63 μ m: 87.5%	<u>515</u>	93.5%	<63 μ m: 10.7% >63 μ m: 89.3%



3D 列印製做水力漩流管應用於油污土壤處理暨後續 CLSM 再利用研究

111 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

☐構想書 ☒修正計畫書

☐期中報告 ☐期末報告

審查意見回覆對照表

計畫年度	111 年度	計畫類型	☒ 研究型 ☐ 模場型
計畫類別	☒ 整治 ☐ 調查 ☐ 其它	主持人：張益國 NO：	
計畫名稱	3D 列印做水力漩流管應用於油污土壤處理暨後續 CLSM 再利用研究		
委員審查意見		計畫單位回覆	
委員一 1. 本計畫擬以 3D 列印技術處理，可以降低前置作業處理成本，具模場實驗可行性。 2. 本計畫主持人獲得多項專利，實務經驗豐富。		委員意見回覆： 1. 謝謝委員意見，研究團隊持續努力。 2. 謝謝委員肯定。	
委員二 1. 本計畫開發本土製造水力漩流管技術，運用於汙染土壤處理，研究具實場應用潛力。 2. 計畫主持人過去在此領域已有相當經驗，預期計畫成果可以加深實場應用經驗。 3. 計畫已結合顧問公司資源投入，建議計畫執行過程中，可以深入討論實場化進行可行性。		委員意見回覆： 1. 謝謝委員肯定。 2. 謝謝委員肯定。 3. 謝謝委員意見。已與裕山環境工程公司討論，未來有機會直接架設實場試驗，現場進行操作修正。委員意見。	
委員三 1. 本計畫採用排土客土法，以 3D 列印製作水力漩流管，並將受油污染之土壤經分選及處理後製成 CLSM 原料，建議宜針對土壤回填計畫以及受油污污染土壤處理方式作補充說明，如 TPH 高濃度及低濃度土壤之後續處理規劃，並針對環境與經濟面		委員意見回覆： 1. 報告委員，此次研究主要探討經分選後土壤做為 CLSM 細粒料可行性。因屬 CLSM 再利用，目前尚未規劃回填。經水力漩流分離，高濃度 TPH 土壤將建議以熱脫附處理(本研究未規劃進行熱脫附探討)。低濃度 TPH 土壤，則分三種情況進	



附件一

向進行可行性評估，有助於強化該研究之未來發展。 2. 本計畫採用 3D 列印製作水力漩流管應用於油污染土壤進行分離處理，並將污染含量較低之土壤回填再利用，有效提升土壤回用效率，建議後續可針對 CLSM 配比設計，考量工作性質及粒料尺寸等因素，瞭解適當水灰比、坍度以及水泥用量，有助於作為後續工程設計之參考。	行：(1)若分選後土壤 $\text{TPH} \leq 1000 \text{ mg/kg}$，則直接適合做為 CLSM 細粒料；(2)若分選後 $1000 \text{ mg/kg} < \text{土壤 TPH} < 2500 \text{ mg/kg}$，則會用擦洗方式前處理至 $\text{TPH} \leq 1000 \text{ mg/kg}$ 後使用；(3) 若分選後 $1000 \text{ mg/kg} < \text{土壤 TPH} < 2500 \text{ mg/kg}$，嘗試不做任何處置，直接 CLSM 混拌，目的為了解其特性影響。環境與經濟面向評估將於試驗後綜合討論。謝謝委員意見。 2. 謝謝委員意見。將依委員意見，視 CLSM 坍流度、土壤添加比例等調整合適配比，符合工程需求。
委員四 1.研究主題符合土壤及地下水污染整治基金補助精神、探討課題新穎、整體研究架構明確方法可行、技術未來應用及推廣性應加強。	委員意見回覆： 1.謝謝委員意見。後續將加強技術應用及推廣論述。
委員五 1.本案擬以 3D 列印製做水力漩流管，並將其應用於油污染土壤處理暨後續 CLSM	委員意見回覆： 1.謝謝委員意見。



3D 列印製做水力漩流管應用於油污染土壤處理暨後續 CLSM 再利用研究

再利用研究。 2. 建議補充說明 3D 列印製做水力漩流管的相關設備及使用的材料與成本評估。 3. 建議補充說明水力漩流管的相關設計原則。 4. 建議評估土壤的質地，以確認作為 CLSM 的可行性。	2. 本案以 3D 列印製做水力漩流管，使用材料為光固型液態樹脂 ABS 樹脂材料。本研究 3D 列印製主要委外輸出，Tony5 SLA1080 設備最大可輸出尺寸 1000mm*800mm*600mm 以上、Tony5 SLA660 設備最大可輸出尺寸 600mm*600mm*400mm 以上，已補充於計畫申請書中，敬請委員參閱。另外，報價 20,000 元/支，詳情依實際尺寸、消耗光固型液態 ABS 樹脂而計。 3. 水力漩流管設計主要依據欲處理土壤不同等級顆粒(例如 37μm、63μm、150μm)overflow、underflow 出流比例。細顆粒如 37μm 盡可能出現在 overflow stream 中，不要在 underflow stream 中出現；反之，粗顆粒如 150μm，盡可能出現在 underflow stream 中，少出現在 overflow stream 中。並以此原則，調整漩流管形狀、給漿壓力(流速)等。 4. 據 CLSM 試驗合作商-立順興公司表示，63 μm 以上土壤當做 CLSM 中部分取代細粒料可行。本研究曾預先評估標的土壤雷射粒徑分布(如圖 7-2)，14.4%顆粒<63 μm、85.6%顆粒>63 μm，應有機會將粗顆粒分離出來再利用。後續將實場採樣、分析，遵照委員意見評估土壤質地，確認作為
---	--



	CLSM 之可行性
委員六 1. 本案擬將油污染土壤經水力漩流管分離成不同粒徑，再以 CLSM 為其處理之途徑，其中摻混比例為何？以及內含 TPH 之 CLSM 於環境應用時，是否有應考量或評估之事項？宜有完整之規劃與說明。尤其不宜僅以 CLSM 之規格為考量。 2. 本計畫受油污染之土壤並未去除，係僅以物理方法將粒徑分離，再以水泥穩定方式，將其製成 CLSM，未來在土污管理、資源化技術應用、社會觀感及民眾接受度，以及政策制定等層面，宜有完整之評估說明，以利技術應用與推動之參考。	委員意見回覆： 1. 舉例彰化某公司 CLSM 配比， 水泥:粗粒料:細粒料:拌合水 =200kg:300kg:1000kg:300kg 試驗細粒料取代 20%、40%、60%、80%， 意即細粒料中將有 200kg、400kg、600kg、 800kg 被水力漩流分離土壤取代。 當然試驗量體沒那麼大，將依試驗室等級設計，以相同配比等比例縮小規模。 目前找了歐盟 Construction Product Decree(CPD)、日本土壤污染對策法、日本環境基準法，尚未有對 CLSM(建設系再生資材、製品)有 TPH 等相關規範。後續將持續蒐集資料，期望更嚴謹對待。 2. 依 109 年研究結果，中殼土壤經物理擦洗、物理水力分離，可將 underflow 土壤洗至 TPH 515~1259 mg/kg。 (a) overflow  (b) underflow 



3D 列印製做水力漩流管應用於油污染土壤處理暨後續 CLSM 再利用研究

	因此，本研究經水力漩流分離之 overflow 高濃度 TPH 土壤，將建議以熱脫附處理，本研究未進行探討，敬請委員見諒。 水力漩流分離之 underflow 土壤，(1)若水力分選後土壤 $\text{TPH} \leq 1000 \text{ mg/kg}$，則直接適合做為 CLSM 細粒料取代；(2)若分選後 $1000 \text{ mg/kg} < \text{土壤 TPH} < 2500 \text{ mg/kg}$，則會用擦洗方式前處理至 $\text{TPH} \leq 1000 \text{ mg/kg}$ 後使用；另外，(3) 若分選後 $1000 \text{ mg/kg} < \text{土壤 TPH} < 2500 \text{ mg/kg}$，<u>嘗試不做任何處置，直接 CLSM 混拌，目的為了解其對 CLSM 特性影響，但現階段未考慮以此 $\text{TPH} > 1000 \text{ mg/kg}$ 土壤再利用。除非未來能發展法令值管制 CLSM(建設系再生資材、產品)之溶出量或含量，而非看混拌材料 TPH 含量。</u> 因此，現階段使用上，<u>以低於土壤管制標準 $\text{TPH} \leq 1000 \text{ mg/kg}$ 土壤製成 CLSM 製品再利用</u>，期能符合社會觀感，兼顧資源化產品需求。
委員七 1.p.47-48 耗材細項未說明單價與數量，請於計畫書修正稿中補充。	<u>委員意見回覆：</u> 1.謹遵委員意見進行修正，謝謝委員指正。



附件一

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」

■階段成果報告 □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	111 年度	計畫類型	☐ 先導型 ☒ 研究型 ☐ 模場型
計畫類別	☐ 調查 ☒ 整治 ☐ 其他		主持人：張益國
計畫名稱	3D 列印做水力漩流管應用於油污土壤處理暨後續 CLSM 再利用研究		
審查意見		執行單位回覆	
委員意見： 1. 經審閱階段成果報告已依申請計畫書定稿本執行，符合預期執行進度。		委員意見回覆： 1.謝謝委員。	



3D 列印製做水力漩流管應用於油污土壤處理暨後續 CLSM 再利用研究

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」

☐構想書 ☐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	111 年度	計畫類型	☐ 先導型 ☒ 研究型 ☐ 模場型
計畫類別	☐ 調查 ☒ 整治 ☐ 其他	主持人：張益國 NO：B3	
計畫名稱	3D 列印做水力漩流管應用於油污土壤處理暨後續 CLSM 再利用研究		
審查意見		執行單位回覆	
委員一 1. 本計畫已完成土壤特性及污染物分析，水利漩流管 Fluent 建模、及模擬，進度符合原先規劃。 2. 建議 5-2 節的討論，可以強化說明其圖形代表意義，並彙整表說明模擬結果比較。 3. 目前擬將小於 1000mg/kg 土壤應用於 CLSM，建議也應評估法規合適性。		委員意見回覆： 1. 謝謝委員。 2. 敬依委員建議補充圖形說明如 5-2 節第一段及彙整模擬結果如表 5-3。 3. 敬依委員建議於 5-6 節第(4)點，評估法規合適性。	
委員二 3. 期中報告撰寫詳細，內容豐富。 4. 報告 42~55 頁的模擬條件與出流顆粒分布情況的圖形做出綜合分析。		委員意見回覆： 1. 謝謝委員。 2. 敬依委員建議補充圖形說明如 5-2 節第一段及彙整模擬結果如表 5-3。	
委員三 1. 本研究預計結合 3D 列印技術與電腦模擬製作分離土壤顆粒之測試型水力漩流管並將分離後之粗細顆粒土壤應用於低強度回填材料的製造，研究成果可有效縮短傳統模型之製作時間並節省經費。期中報告撰述內容大致完整，研究目的具體可行，文獻資料蒐集大致完備，但欠缺整體之工作流程、工作進度甘特圖以及預定查核點		委員意見回覆： 1. 謝謝委員意見。已依委員意見補充說明工作流程說明如 4-1 節。另土壤特性分析除 pH 值、粒徑分布、TPH 含量外，亦補充分析含水率、氯離子含量於 5-5-2 節。 2. TPH 之分析方法主要採行政院環保署環境檢驗所土壤中總石油碳氫化合物檢測方法—氣相層析儀/火焰離子化偵測器法(NIEA S703.62B)，委託業	



附件一

的說明。目前完成之工作內容為水力漩流管流況模擬和不同粒徑 TPH 含量分析。實驗條件應補充所採土壤之基本理化條件以及 TPH 之分析方法(將採 U.S EPA or NIEA?), 應尋求或建立自行分析 TPH 之能力並解決 overflow(細顆粒)高污染土壤之處置方案。	興公司分析測試。後續也將逐步建立實驗室氣相層析儀/火焰離子化偵測器法分析測試能力。 3. overflow(細顆粒)高污染土壤目前想到的是熱處理法或再利用。可納入未來研究範疇，整體解決油污染土壤。
委員四 1. 期中報告符合預定期程。 2. 初步完成水力漩流器最佳模擬條件之設計。 3. 後續篩出污染土壤 TPH<1000mg/kg, 進行 CLSM 試驗時，產品 CLSM 進行測試時，請將土壤中的 TPH 濃度高低納入比較。 4. 自評表期中達成數未填。	<u>委員意見回覆:</u> 1. 謝謝委員肯定。 2. 謝謝委員。 3. 本研究篩出 $\text{TPH} \leq 1000\text{mg/kg}$ 土壤，9m/s 條件土壤濃度為 306 mg/kg、11m/s 條件土壤濃度為 575mg/kg。由實驗結果考量 11m/s 條件粗細顆粒分離效果佳，遂後續以此條件所得 underflow 粗顆粒進行 CLSM 試驗。 4. 謝謝委員提醒，將補齊填寫。
委員五 1.請依徵求書附件 12 格式補充主要研究人力、產業界資源投入表。	<u>委員意見回覆:</u> 1. 謝謝委員意見。敬依委員意見補充主要研究人力、產業界資源投入表。