

行政院國家科學委員會補助  
大專學生參與專題研究計畫研究成果報告

\* \*\*\*\*\*  
\* 計 畫  
\* : 水庫淤泥有效再利用與混凝土之最佳組合  
\* 名 稱  
\* \*\*\*\*\*

執行計畫學生： 莊子賢  
學生計畫編號： NSC 99-2815-C-216-004-E  
研究期間： 99年07月01日至100年02月28日止，計8個月  
指導教授： 吳淵洵

處理方式： 本計畫可公開查詢

執行單位： 中華大學土木工程學系

中華民國 100年03月09日

## 摘要

由於全球暖化、氣候異常之影響，近年來頻頻發生極端暴雨或乾旱之狀況。台灣地形陡峭，河川短小流急，必須依賴水庫有效發揮攔截蓄水之功能，方可避免用水量之缺乏。根據經濟部水利署之統計，本國營運中之水庫共計51座，平均約有43.14%之容量已被水庫淤泥佔據，平均每年減少 $16,100,000\text{m}^3$ 之蓄水量，有些水庫淤積量甚至高達76%，顯見水庫淤泥為扼殺水庫蓄水量的頭號問題。又因為新開發水庫壩址難尋，再加上環境保育、生態永續意識抬頭，尋覓新壩址之議題，常造成當地民眾與環保團體的嚴重抗爭。因此，加強水庫清淤工作，為未來政府部門處理水資源永續利用問題之主要方向。水庫清淤確實可以減緩現有水庫淤積之速率，唯若僅止於淤泥的清除，而未將之做妥善的處理，不僅會影響市容，亦會對環境產生二次公害。

本研究為期能將水庫淤泥資源化再利用，嘗試以水庫淤泥取代部分混凝土骨材，並以不同的配比設計，製作試體，進行抗壓強度、彈性模數與超音波波速等試驗。目的在於能夠製備非結構性混凝土之複合物，期能有效增加淤泥資源化之應用，減少混凝土骨材之用量，不僅能降低工程材料之成本，亦能紓解淤泥儲存之困境，具有廢棄物減量、資源再利用及環境保護之重大意義。

研究結果顯示，水固比0.5之配比試樣，同時具有強度發展適中，符合流填料再開挖性之規範，且其淤泥使用量上為水泥用量之兩倍，兼顧流填料之適用性與成本效益之優點，而使用水固比/灰水比 = 0.5 / 0.7之配比設計，其強度表現與同配比之水泥砂漿相當，故應用水庫淤泥取代細質骨材之提議，實屬可行。且本材料為一低滲透性材料，適用於一般地下儲油槽及大樓基地開挖之防水回填料應用。

# 目 錄

摘要 .....	I
表目錄 .....	VI
圖目錄 .....	VIII
<b>第一章 緒論</b>	
1.1 研究背景 .....	1
1.2 研究動機 .....	2
1.3 研究目的 .....	2
1.4 專題製作流程 .....	3
1.5 報告架構 .....	3
<b>第二章 文獻回顧</b>	
2.1 臺灣水庫淤積現況 .....	5
2.2 石門水庫淤泥之清除 .....	9
2.3 水庫淤泥之資源化 .....	14
2.4 流填料 (CLSM) .....	17
2.4.1 流填料的特性 .....	18
2.4.2 流填料之材料組成 .....	20
2.4.3 流填料的應用 .....	22

### 第三章 石門水庫地理環境與地質狀況

3.1 位置與功能 .....	24
3.2 地形 .....	28
3.3 地質 .....	31
3.4 土壤 .....	36
3.5 氣象與水文 .....	38
3.6 造成水庫濁度升高之原因 .....	40
3.7 水庫淤積原因及淤泥來源 .....	42
3.7.1 自然因素 .....	42
3.7.2 人為因素 .....	44

### 第四章 研究方法與流程

4.1 研究計畫 .....	45
4.2 研究方法 .....	45
4.3 養護條件 .....	46
4.4 試驗材料 .....	46
4.5 基本物理性質試驗 .....	48
4.5.1 比重試驗 .....	48
4.5.2 液性限度試驗 .....	49
4.5.3 塑性限度試驗 .....	50

4.5.4	粒徑分析試驗 .....	52
4.6	基本化學性質試驗 .....	54
4.6.1	氯離子含量檢測 .....	54
4.6.2	TCLP 毒物特性溶出試驗 .....	59
4.6.2.1	鎘、鉛(根據規範 NIEA R201.14C) .....	59
4.6.2.2	汞(根據規範 R314.12C) .....	66
4.6.3	化學元素檢測試驗 .....	74
4.7	淤泥混凝土工程性質試驗 .....	75
4.7.1	變水頭試驗 .....	75
4.7.2	淤泥混凝土之配比設計 .....	77
<b>第五章 研究結果分析</b>		
5.1	物理性質試驗結果 .....	79
5.1.1	比重試驗成果 .....	79
5.1.2	液性限度試驗成果 .....	80
5.1.3	塑性限度試驗成果 .....	81
5.1.4	粒徑分析試驗成果 .....	82
5.2	化學性質試驗結果	
5.2.1	氯離子含量檢測 .....	84
5.2.2	TCLP 毒物特性溶出試驗 .....	85

5.2.3 化學元素檢測試驗 .....	85
5.3 淤泥混凝土工程性質試驗結果 .....	86
5.3.1 配比試驗成果 .....	86
5.3.2 單軸壓密試驗成果 .....	90
5.3.3 變水頭試驗成果 .....	95
5.3.4 乾縮裂縫觀察試驗成果 .....	97
 <b>第六章 結果與建議</b>	
6.1 結論 .....	103
6.2 建議 .....	105

## 參考文獻

## 表目錄

表 2.1	台灣前十大水庫淤積情形 .....	5
表 2.2	石門水庫淤泥礦物質檢定結果(%) .....	10
表 3.1	石門水庫基本資料彙編表 .....	26
表 3.2	地層表性特徵表 .....	31
表 3.3	石門水庫集水地區地質構造分布情形 .....	35
表 4.1	卜特蘭第一型水泥與飛灰之化學成分及物理性質 .....	47
表 4.2	細骨材篩分析表 .....	47
表 4.3	細骨材之物理性質 .....	48
表 4.4	七種陰離子配製儲備標準溶液其乾燥試藥之取用量 .....	59
表 4.5	揮發性待測物 .....	65
表 5.1	氯離子含量檢測分析表 .....	84
表 5.2	TCLP 毒物特性溶出試驗分析表 .....	85
表 5.3	化學元素檢測試驗分析表 .....	85
表 5.4	淤泥混凝土：水固比/灰水比 = 0.3 / 0.5(0.7、0.9) .....	86
表 5.5	淤泥混凝土：水固比/灰水比 = 0.5 / 0.5(0.7、0.9) .....	87
表 5.6	淤泥混凝土：水固比/灰水比 = 0.7 / 0.5(0.7、0.9) .....	88
表 5.7	水泥砂漿：水固比/灰水比 = 0.5 / 0.5(0.7、0.9) .....	89
表 5.8	淤泥混凝土：水固比/灰水比 = 0.5 / 0.5 .....	97

表 5.9	淤泥混凝土：水固比/灰水比 = 0.5 / 0.7 .....	98
表 5.10	淤泥混凝土：水固比/灰水比 = 0.5 / 0.9 .....	99
表 5.11	淤泥混凝土：水固比 /灰水比 = 0.7 / 0.9 .....	100
表 5.12	水泥砂漿：水固比/灰水比 = 0.5 / 0.5 .....	101
表 5.13	水庫淤泥：水固比/灰水比 = 0.5 / 0.5 .....	102

## 圖目錄

圖 1.1	臺灣降雨分布圖 .....	1
圖 1.2	專題製作流程示意圖 .....	4
圖 2.1	水庫淤泥資源化處理過程 .....	11
圖 2.2	淤泥資源化技術運用 .....	12
圖 2.3	淤泥處理三階段流程 .....	13
圖 2.4	CLSM 應用於管溝回填之施工過程 .....	23
圖 3.1	石門水庫地理位置圖 .....	25
圖 3.2	石門水庫集水區地形水系圖 .....	29
圖 3.3	石門水庫集水區地質圖 .....	34
圖 3.4	石門水庫淤積情況示意圖 .....	40
圖 4.1	石門水庫淤泥現地取樣照 .....	46
圖 4.2	液限試驗用儀器及試驗示意圖 .....	50
圖 4.3	液限試驗結果 .....	50
圖 4.4	塑限試驗用儀器及試驗結果示意圖 .....	51
圖 4.5	旋轉裝置 .....	63
圖 4.6	零空間萃取器(ZHE) .....	63
圖 4.7	TCLP 流程圖 .....	64
圖 4.8	批次式汞冷蒸氣系統(a 為密閉系統 b 、c 為開放系統) ...	72

圖 4.9	連續式汞冷蒸氣系統(a:連續產生系統 b:流動注入系統)	73
圖 4.10	事業廢棄物萃出液中汞檢測方法流程圖 .....	74
圖 4.11	室內透水試驗裝置圖 .....	76
圖 4.12	變水頭裝置示意圖 .....	77
圖 5.1	液性限度試驗成果 .....	81
圖 5.2	塑性圖 .....	82
圖 5.3	-#200 粒徑分佈曲線 .....	83
圖 5.4	淤泥混凝土試體 7 天試驗強度柱狀圖 .....	90
圖 5.5	淤泥混凝土試體 28 天試驗強度柱狀圖 .....	91
圖 5.6	淤泥混凝土試體 56 天試驗強度柱狀圖 .....	91
圖 5.7	水泥砂漿試體 7 天試驗強度柱狀圖 .....	92
圖 5.8	水泥砂漿試體 28 天試驗強度柱狀圖 .....	93
圖 5.9	水泥砂漿與淤泥混凝土 7 天強度比較圖 .....	94
圖 5.10	水泥砂漿與淤泥混凝土 28 天強度比較圖 .....	94
圖 5.11	淤泥混凝土：水固比/灰水比 = 0.5 / 0.5 變水頭試驗成果	95
圖 5.12	淤泥混凝土：水固比/灰水比 = 0.5 / 0.7 變水頭試驗成果	95
圖 5.13	淤泥混凝土：水固比/灰水比 = 0.5 / 0.9 變水頭試驗成果	96
圖 5.14	淤泥混凝土：水固比/灰水比 = 0.7 / 0.9 變水頭試驗成果	96

# 第一章 緒論

## 1.1 研究背景

臺灣平均年雨量為兩千多毫米，雖為世界平均年雨量的三倍，但實際上每人每年實際分配到可利用水量只及世界平均值的 1/6，按目前世界標準，四面環海的寶島台灣，仍屬於缺水地區！參閱圖 2.1，這是因為臺灣山坡陡峻，大部分的降雨量皆迅速流入海洋；此外，由於降雨量在地域、季節分佈極不平均，所以也容易造成乾旱的現象；所以水資源的用量與調節為台灣的重大問題，其解決方法之一是興建水庫。

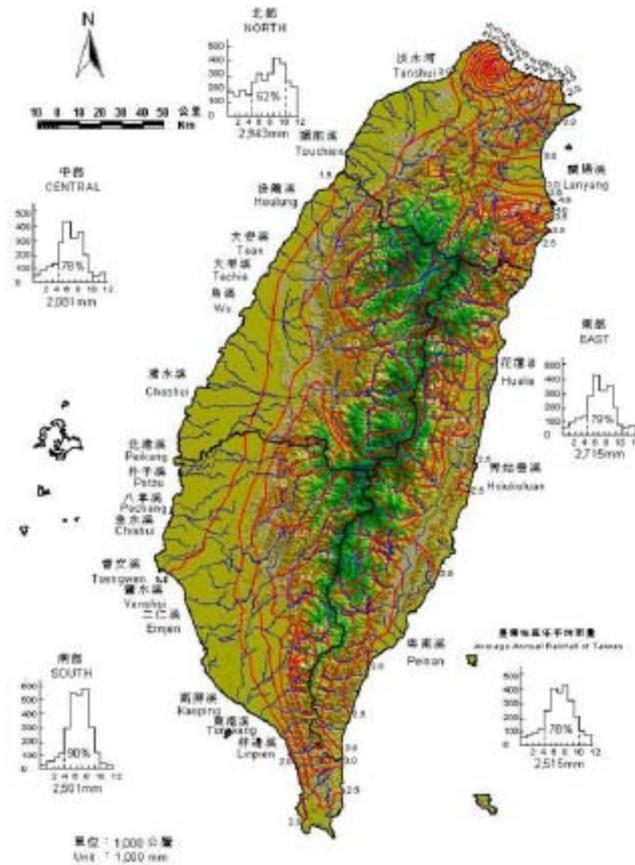


圖 1.1 臺灣降雨分布圖 (地下水觀測網, 2002)

另一方面，又因為臺灣山坡地的過度開發與使用造成水土保持不佳，每逢豪雨造成大量的泥沙沖刷進入水庫。淤積的泥沙不但減少水庫的蓄水量，也造成水庫的原水濁度過高，導致自來水廠淨水作業能力降低，造成缺水或是需分區供水的社會問題，故水庫淤泥的處理至為重要。

## 1.2 研究動機

由於臺灣水庫平均每年總淤積量高達 1547 萬立方公尺，嚴重導致蓄水量不足，也因此常面臨無水可用的窘境；因此，如何加強水庫之永續利用，將是未來水利工程之一個重要課題(彭元俊，2004)。水庫淤泥的處理是水庫浚渫作業的主要工作，而要使水庫永續發展最重要就是減少淤泥，並使淤泥能廢物利用變成寶貴的資源。例如張孟弘(2004)研究發現水庫淤泥中含有大量的  $\text{SiO}_2$  與  $\text{Al}_2\text{O}_3$  成分(約為水庫淤泥含量的 88%)，此二元素與卜特嵐水泥成份相近，而可考慮再利用為混凝土骨材，以達到廢棄物減量與資源再利用之目標。

## 1.3 研究目的

在臺灣，水庫淤積現象以桃園的石門水庫最為嚴重，其主要供應大台北及桃園地區水源，所以政府得提撥大量經費幫忙清淤。但是由於石門水庫的淤泥沉澱池都已滿載，所以本研究希望可以為石門水庫淤泥找到一個用途，以幫助解決淤泥的後續問題，避免因為淤泥的亂棄而造成二次污染。即將水庫淤泥與卜特嵐水泥混和，成為提升混凝土工作性之工程摻料；並且在兼具考量環保、經濟及可行性之條件下，有效的利用混合後之產物，以達減少混凝土骨材用量之效益。

## 1.4 研究流程

圖 1.2 為本研究流程圖，即採用石門水庫淤泥為試驗材料，在對淤泥進行 TGA 試驗，得知該水庫淤泥之物理及化學性質後，並進行各項室內試驗。

茲將本研究區分為三個階段：

第一階段：台灣地區重要水庫淤泥利用之效益評估

包括蒐集現有重要水庫淤泥再利用之文獻資料，並探討現有水庫淤泥再生利用方式之適用性及生態性。

第二階段：進行水庫淤泥之化性改質試驗

包括添加不同比例之化學摻料，以不同之配比，灌注成圓柱試體，並探討各項實驗數據與配比之相對關係，對水庫淤泥性質之影響，目的在於能夠取代現有混凝土骨材之用量，並大幅降低工程成本。

第三階段：研究數據與圖表的整理

包括以文字、圖片、表格等方式呈現此研究的結果，並為此研究成果定下結論與建議，為往後研究者之參考。

## 1.5 報告架構

本文共分七個章節來說明，其內容略述如下：

(1)前言：說明研究背景、動機及目的，介紹本研究之試驗流程，並清楚說明本文架構。

(2)文獻回顧：介紹台灣地區當前水庫淤積狀況，水庫淤泥的物理性質與化學特性及浚渫流程與資源化再利用的效益。

(3) 石門水庫地理環境與地質狀況：

內容包含石門水庫基本資料、計畫功能、地理位置、地形、地質、土壤、氣象、水文、雨量、濁度、淤積來源等相關資料概述。

- (4) 試驗方法及步驟：介紹試驗場地、設備及試驗相關儀器，並說明試驗場地的佈置情形，及實驗流程與步驟。
- (5) 結果與討論：針對實驗結果，逐一的分析與討論。
- (6) 結論與建議：歸納實驗結果的重點，給予後續研究者一些建議與研究方向。

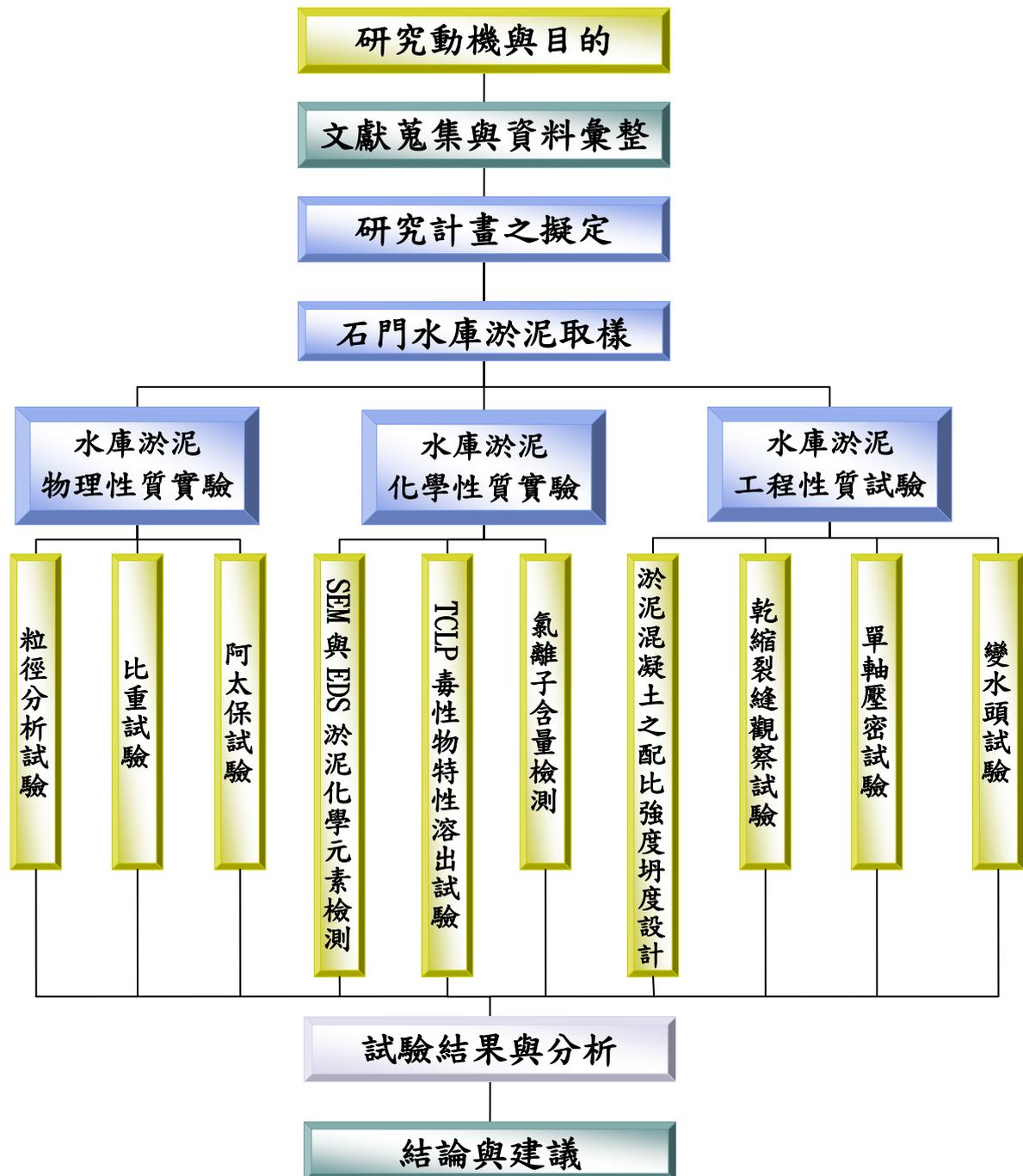


圖 1.2 研究流程圖

## 第二章 文獻回顧

### 2.1 臺灣水庫淤積現況

台灣西岸地質係以第三紀海相沉積層為主體，地層多呈狹長帶狀分布，大致與島軸平行，地質大多屬於軟弱的頁岩、泥岩。由於長期受到自然環境風化的影響，使岩石成為較小的礫石或砂土，經由雨水的沖刷形成泥流，流進水庫內，沉澱即為淤泥，使水庫有效蓄水量逐年降低。如表 2.1 所示，台灣地區營運中之水庫共計 51 座，平均約有 43.14% 之容量被水庫淤泥所佔據，嚴重影響水庫營運功能及使用壽命。

表 2.1 台灣前十大水庫淤積情形 (經濟部水利署，2010)

完工年分	水庫名稱	有效容量	淤積量	統計淤積年	淤積率%
1973	曾文	49059	37087	2010	75.60
1987	翡翠	33582	6368	2010	18.96
1964	石門	20969	712	2010	3.40
1974	德基	15596	1155	2010	7.41
1992	鯉魚潭	11600	3723	2010	32.09
1993	南化	9681	5704	2010	58.91
1930	烏山頭	8085	1826	2010	22.59
1934	日月潭	7700	220	2010	2.86
1959	霧社	5439	1426	2010	26.22
2006	寶山第二	3134	200	2010	6.38

單位：萬立方公尺

本研究收集了台灣容積前十大水庫的地理位置、壩體資料、蓄水容量及計畫目標等，以了解各重要水庫之基本性質與相關蓄水資料，以便了解水庫淤積時影響民眾的範圍(經濟部水利署，2010)。

## 一、南化水庫

南化水庫位於台南縣南化鄉曾文溪支流後堀溪上，本水庫在規劃時以後堀溪命名為後堀水庫，核定實施時即改採所在南化鄉為名。水庫完成於民國82年，水庫集水區面積104平方公里，水庫容量15,805萬立方公尺，為台灣地區以公共給水為目標之最大水庫，其水源除本身集水區外，另由高屏溪支流旗山溪的甲仙攔河堰越域引水，此外，為應付嘉義、台南及高雄等地區龐大民生用水，於民國90年開始進行南化水庫與高屏溪攔河堰聯通管線畫，將南化水庫的水量輸送到大樹自來水淨水廠，以提供南部地區之公共用水(黃忠信等人，2005)。

## 二、曾文水庫

曾文水庫位於嘉義縣曾文溪主流上游，總容量達70,000萬立方公尺，為全省容量最大之水庫，湖面面積達17平方公里，曾文水庫直接效益為發電及防洪，其給水與灌溉效益則由烏山頭水庫提供。由於南部地區人口成長及工商業發展，使得本水庫原先占小比例的給水功能益形重要，惟因水文條件限制，水庫容量雖夠大，其滿水位時間卻甚少，顯示其功能尚有再發揮與加強之空間，故水利署提出曾文越域引水之構想，計畫將高屏溪支流荖濃溪或旗山溪的水經隧道導引入庫調蓄。

## 三、烏山頭水庫

烏山頭水庫，舊稱烏山頭貯水池。位於曾文水庫支流官田溪上游，為半水力淤填式土壩，行政區位於台南縣官田、六甲、東山、大內等鄉鎮，水庫於民國9年開始施工，民國19年完工，是台灣早期的水庫系統之一，主由日本的水利工程師八田與一規劃完成。現由嘉南農田水利會營運管理。主要用途為灌溉、給水，水庫集水區面積為58平方公里，另由曾文溪引水入庫，總容量為15,415萬立方公尺。

#### 四、日月潭水庫

日月潭水庫位於南投縣魚池鄉，主要水源為水里溪支流五城溪及濁水溪。為一離槽水庫，溢洪道為無閘門控制喇叭口式。於民國23年自水社及頭社兩地建築土壩而成水庫，該壩為混凝土心牆土壩。其水源雖來自濁水溪，年平均淤積量卻僅30萬立方公尺，為台灣地區淤積情形甚輕微者。水庫的主要功能為發電，又因其風景優美，故具有觀光的價值，惟九二一大地震後，光華島、涵碧樓等受損嚴重，觀光業一落千丈。水庫集水面積約為15平方公里，總容量為17,162萬立方公尺。

#### 五、霧社水庫

霧社水庫位於南投縣仁愛鄉，主要水源來自於濁水溪支流霧社溪，興建於民國42年5月，並於49年8月完工。霧社水庫屬於日月潭水力發電系統之一，因此其主要的功能效益為發電，水庫集水面積為219平方公里，總容量為14,600萬立方公尺。

#### 六、德基水庫

德基水庫位於台中縣和平鄉梨山村大甲溪上游，又稱為達見水庫，隸屬於台灣電力公司的一個高山型水庫，係我國首座雙曲線薄型拱壩。於民國58年12月開工，民國62年12月開始蓄水，民國63年6月首期發電，完工時，由當時的總統 蔣中正命名為「德基水庫」。主要計畫標的為發電，亦具有灌溉、公共給水、觀光與防洪之效益，為大甲溪重要之水力資源，其集水面積為592平方公里，總蓄水量為23,200萬立方公尺。

## 七、鯉魚潭水庫

鯉魚潭水庫位於苗栗縣三義鄉大安溪支流景山溪上游，庫區涵蓋三義、卓蘭及大湖三個鄉鎮。除了以景山溪為水源外，並由大安溪主流士林攔河堰引水入庫，為一座離槽水庫，具有台灣地區唯一的鋸齒堰溢洪道。集水面積53.45平方公里，總蓄水量為12,600萬立方公尺。於民國74年開始興建，民國81年底正式完工營運，主要計畫標的為供應苗栗縣及大台中地區的公共給水，計畫每年運用水量可達70,000萬立方公尺，同時具有觀光、灌溉、防洪、發電等四大功能。

## 八、翡翠水庫

翡翠水庫位於台北縣新店市(新店溪支流北勢溪下游)，目前由台灣省翡翠水庫管理局管理運，為台北市最重要之供水來源，翡翠水庫為台北區自來水第四期建設計畫中之水源工程，供水區域包括台北縣三重、新店、永和、中和、淡水、三芝等地區，興建完成於民國76年6月，集水面積為303平方公里，占淡水河流域面積11%，水庫面積為10.24平方公里，水庫最高水位標高170尺，總容量為46,000萬立方公尺，水庫容量為台灣北部最大者，水庫主要功能除供應公共給水外，還利用其水力作為發電之用，同時水庫龐大之蓄水量亦提供防洪功能，與大漢溪的石門水庫同為淡水河防洪系統之重要一環。

## 九、寶山第二水庫

新竹地區工商業快速發展，公共及工業用水量日與俱增，經濟部水利署為增進新竹地區水源調度與供應能力，於86年4月開始實施，至95年6月正式完工。寶山第二水庫位於新竹縣寶山鄉山湖村，屬中港溪水系峨眉溪支流石井溪上游，總有效蓄水量3,218萬噸，為經濟部水利署北區水資源局管理。

## 十、石門水庫

石門水庫位於桃園縣大漢溪中游，自民國45年7月開始興建，並於53年6月完工，水庫集水區面積763.4平方公里，總容量約30,912萬立方公尺，為一具多目標之水利工程，主要目的包括灌溉、發電、給水、防洪與觀光等，為台灣光復初期所完成之大型水庫，目前由經濟部水利署北區水資源局負責水庫安全及營運管理。水庫主要工程可分為大壩、溢洪道、排洪隧道、發電廠、後池及後池堰、石門大圳及桃園大圳進水口等結構物，自完工營運以來，對北部地區農業生產，工業發展，人民生活水準提高及防止水旱災害等方面均有重大貢獻。

### 2.2 石門水庫淤泥之清除

石門水庫集水面積約763平方公里，長年因受颱風、豪雨影響，導致集水區表土沖刷流入水庫情形嚴重，影響水庫容量與運轉，以下為其清淤方式(經濟部水資源局，2010)：

1. 水庫上游集水區疏浚：如攔砂壩上游，材質多為可供建材之粒石，以陸挖浚漂辦理。
2. 水庫蓄水範圍上游浚漂：如羅浮橋河段，材質多為可供建材之細砂，以陸挖浚漂辦理。
3. 水庫蓄水範圍下游浚漂：指石門水庫大壩附近，材質為利用性甚低之淤泥，以抽泥船浚漂抽至大壩下游沉澱池靜置沉澱；另經沉澱池靜置沉澱後之淤土，則以降水浚挖外運至土方收容場收容或再利用。
4. 水力排淤：藉由水庫既有放流設施如溢洪道、排洪隧道、電廠、退水路等，排放水庫淤積物。

石門水庫浚渫淤泥之沉澱池處理情形如下述：

1. 抽泥堆置場有十三座沉澱池，其貯存之淤泥經多年沉積約計242萬立方公尺，為配合水庫抽泥作業，以招商清除現有沉澱池內之淤泥約150萬立方公尺(約計十個池)，為期七年。
2. 沉澱池內淤泥處理方法，須降低含水量或將淤泥固化或脫水後清運至合法使用之場地，最終不得發生二次公害為宜。
3. 由於合法棄土場所取得不易，復以沉澱池大量淤泥以廢棄土處置，殊為困難，如能有效開發研究，朝資源再利用方向研發，勢將能使廢土變黑金，亦可增加國內資源之開發，目前有業者正朝製磚、有機培養土、砂腸袋、農地改良、輕質骨材等資源再利用方式處理。

石門水庫淤泥組成大部分為粉土及黏土，少部分含有大的顆粒礫石，水庫淤泥依統一土壤分類法可分為低塑性黏土、低塑性粉土、高塑性粉土和粉土質砂(黃忠信等，2004)。如表 2.2 所示，水庫淤泥化學成分主要為  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  及  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ，三者涵蓋淤泥之成分約 90%，剩下的 10% 為有機鹽以及重金屬(葉樺姿，2006)。

表 2.2 石門水庫淤泥礦物質檢定結果(%) (張孟弘，2004)

	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{CaO}$	$\text{MgO}$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}$
一號池	61.56	17.80	6.43	0.62	1.77	1.24	3.15
二號池	61.64	16.66	6.82	0.74	1.81	1.31	2.86
三號池	59.64	17.98	6.55	0.63	1.82	1.21	3.35

參閱圖2.1、圖2.2，水庫淤泥的處理主要應以「安定化」、「減量化」、「無害化」及「資源化」為原則，其中「資源化」更將成為未來處理淤泥的趨勢；水庫淤泥之資源化處理流程可以分成「浚渫處理」、「中間處理」及「最終處置」(彭元俊，2004)。

**浚渫處理：**利用機械或水力的方式浚渫水庫淤泥，其處理方法大致可分為：「陸面機械開挖」、「機械浚渫」、「水力排砂」(參閱圖 2.3)。

**中間處理：**目前浚渫物之處理以沉澱池內之淤泥為主要對象，以工法而言，大致可分為：「化學固化處理」、「壓縮脫水處理」、「離心機脫水處理法」、「一般挖掘沉澱處理法」。

**最終處置：**為一將水庫淤泥資源化的最後程序。現行資源化的方式有「農業與土地利用」、「能源化」及「材料化」等。

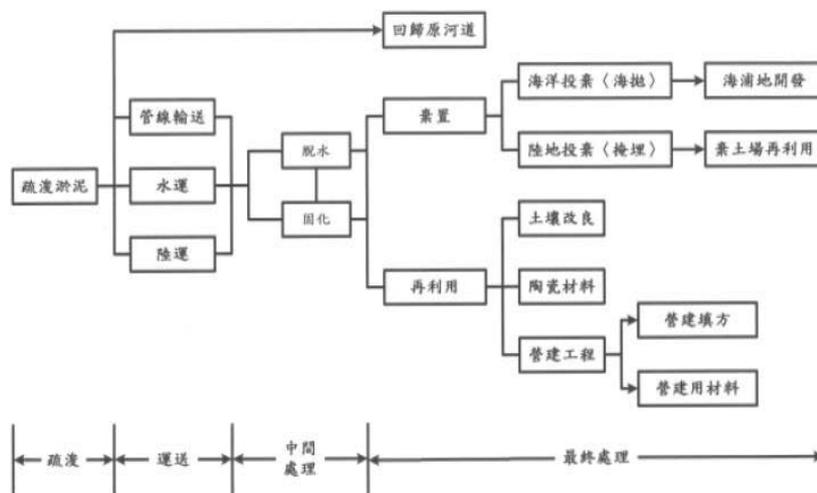


圖 2.1 水庫淤泥資源化處理過程(黃忠信等，2005)

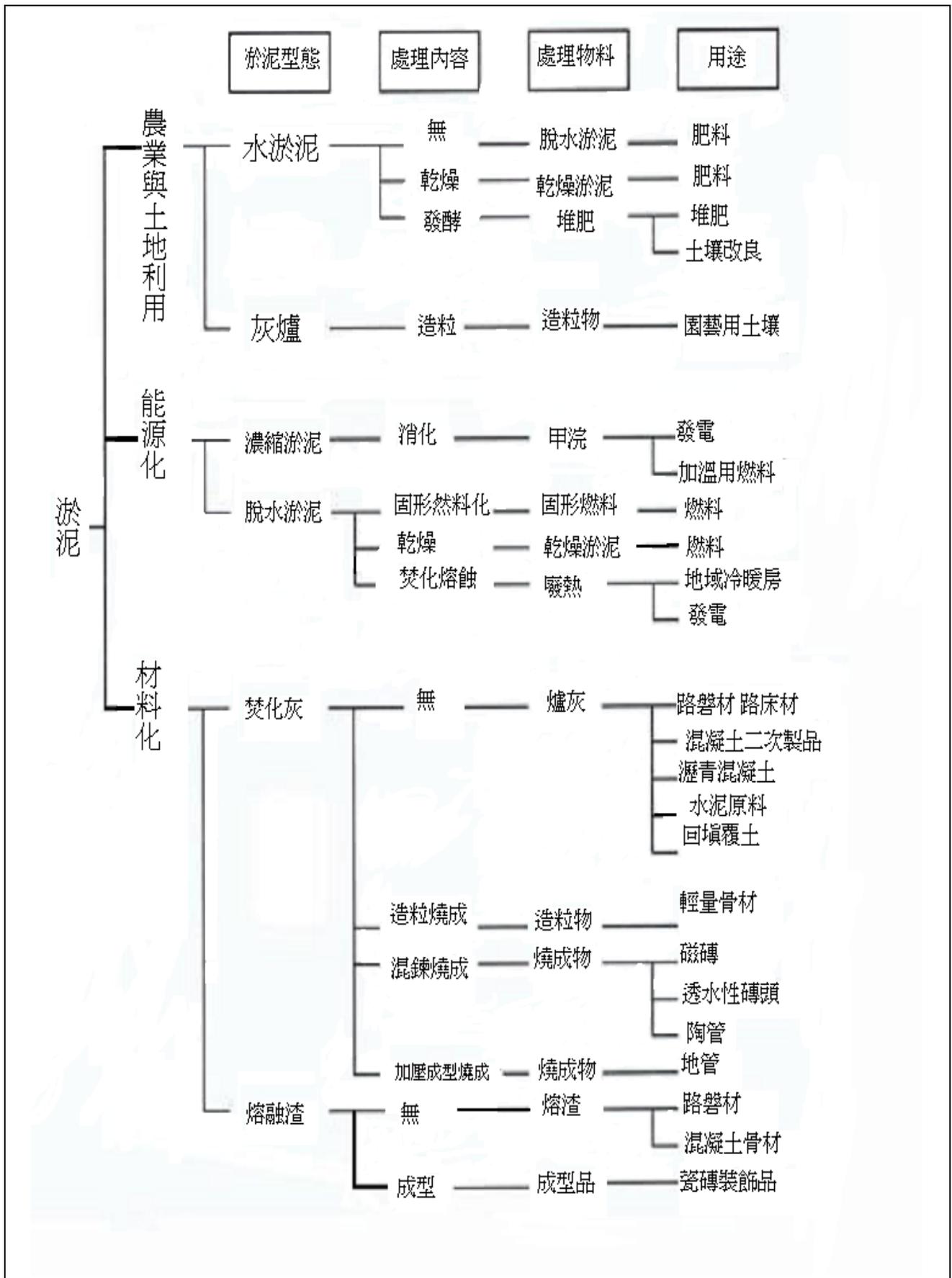


圖 2.2 淤泥資源化技術運用(黃忠信等人, 2005)

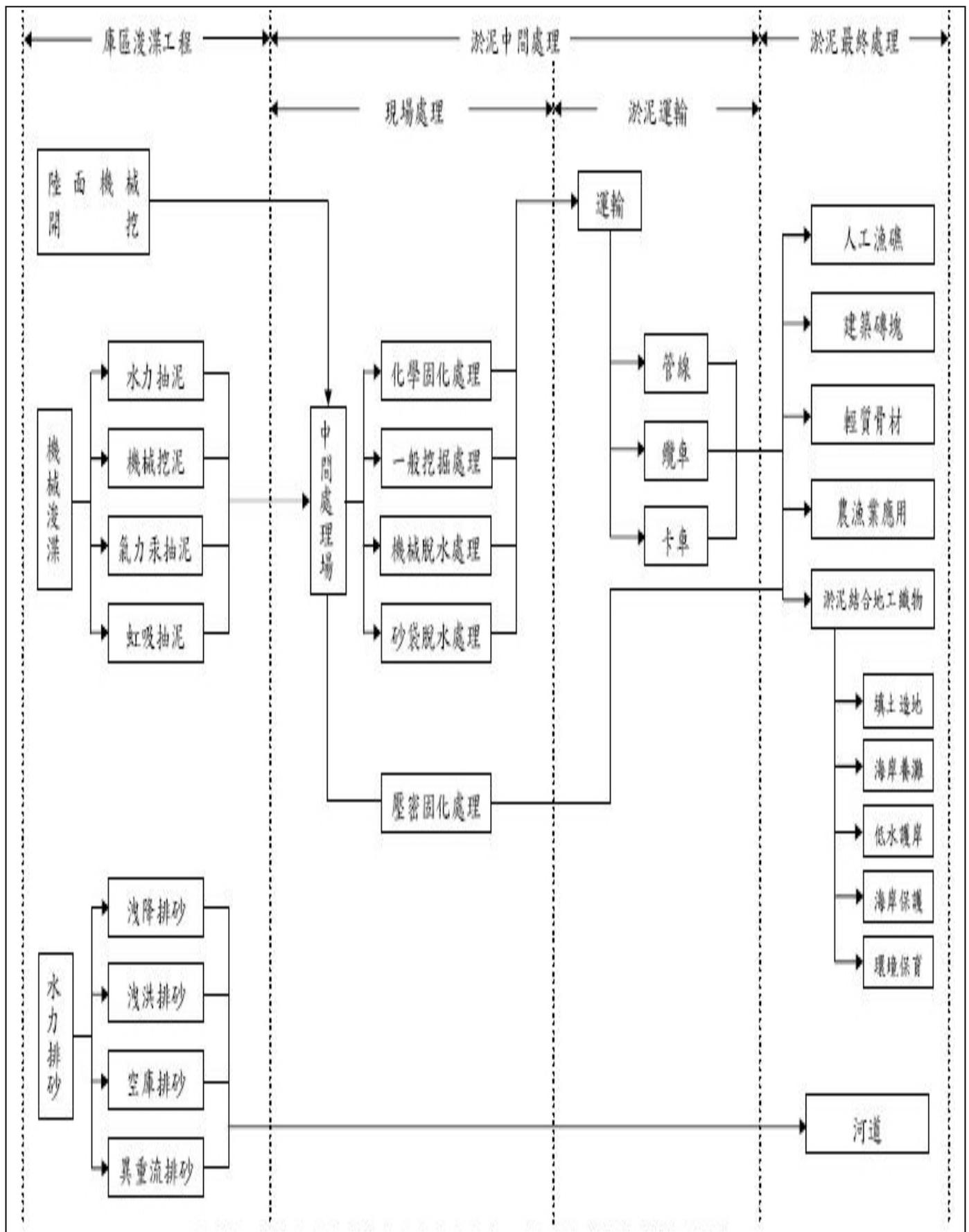


圖 2.3 淤泥處理三階段流程(葉樺姿，2006)

## 2.3 水庫淤泥之資源化

經堆肥化處理之淤泥加工後，未來可以做為有機肥料應用於農地、公園綠地、高速公路綠地及高爾夫球場地使用，並提供為垃圾掩埋場覆土、礦坑回填土、污染地區復育土及公共工程路基等材料。淤泥含有高熱值，經由直接焚化可產生蒸氣、電力等不同型式之再生能源。利用厭氧消化或熱解方式，可將淤泥之有機質分解，產生淤泥衍生燃料，如甲烷、燃油等，可用於推動內燃機。另外，淤泥在消化過程中會產生瓦斯，亦可供做為發電之電源。

以下續對水庫淤泥之材料化說明：

### 一、輕質骨材製作

根據經濟部中央地質調查所指出，台灣地區土質蘊含豐富的輕質骨材料源。由水庫淤泥製成之輕質骨材，外殼堅硬內含孔隙，質輕且具適當強度，先進國家多已大量應用輕質骨材混凝土於非結構性之隔間牆、房屋外牆及帷幕牆等。若使用無細料混凝土之方式，則可製成透水磚，應用於滲透式人行道鋪面。國內外輕質骨材應用實例，如紐約雙子星大樓、臺北國際金融中心、國道六號南投支線等工程(黃忠信等人，2005)。

## 二、壓密燒結磚瓦製品

壓密燒結製磚之方法，係將飛灰與水庫淤泥拌合後壓實，經高溫燒製成不同用途之磚材。磚材可以不同強度分為中低強度之植草磚、灘地生態工程材料、園藝工材等。高強度則可作為灘地護岸砌石材料、行道磚、蛇籠塊石、仿岩預鑄疊塊磚等(黃忠信等人，2005)。

## 三、回填或人工漁礁製作

浚渫後水庫淤泥可用於海埔地之填置，或製成足夠強度之消波塊，拋置於河堤或海岸線，亦可製作成人工漁礁，提供海中動植物良好的棲息場所等。唯需注意的是，水庫淤泥在進行海拋之前，必須進行固化處理，以防有機物或有害物質釋出汙染水源(黃忠信等人，2005)。

## 四、地工織管製作

地工織管係將地工織物縫成管狀，應用其本身高張力之特性，擠壓充填於其內之內容物，使其脫水並固化之地工類產品。目前此地工產品已商業化並大量應用於護岸及環境保育方面。水庫淤泥浚渫之後，將之充填於地工織管內，運送至指定地點有效的資源化再利用(陳志榮，2005)。

## 五、水泥砂漿之取代物

Lisk(1989)利用不同比例之下水道淤泥焚化灰，製作混凝土試體。發現隨添加量增加，試體28天抗壓強度有下降趨勢，添加10%淤泥灰試體之抗壓強度可達27MPa以上。Monzo(1999)則發現，在3~28天養護齡期內，並不會對水泥砂漿強度造成重大影響；在早期養護齡期內，若與添加飛灰比較，添加淤泥灰有較佳之水泥砂漿強度，但隨齡期增加此結果則會相反。Pandey及Sharma(2000)將石灰淤泥與水泥混合製成水泥砂漿，量測其孔隙率和抗壓強度，結果顯示石灰淤泥會促進一般水泥漿之強度發展(黃忠信等人，2005)。

## 六、卜作嵐材料之添加物

鑑於水庫淤泥之  $\text{SiO}_2$  與  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量與 CMP 混合污泥類似，因此以其應用於混凝土，推測應能夠產生相同功能，不僅節省工程成本，減少混凝土使用之骨材需求，亦能紓解水庫淤泥儲存之窘境，成為一兼具環保與綠能之混凝土替代材料。蘇訊緯、林郭港(2009)之研究指出，國內半導體產業於晶圓製造加工時，由於化學機械研磨與濕式酸洗會產生化學機械研磨液污泥(CMP 污泥)及氫氟酸污泥(HF 污泥)，兩者混合後會衍生 CMP 混合污泥。鑑於 CMP 混合污泥中含有大量  $\text{SiO}_2$  與  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ，將之當作卜作嵐材料添加於混凝土中，可提升混凝土強度約 120%~140%(蘇訊緯、林郭港，2009)。

## 七、流填料之組成料

所謂流填料 CLSM 係具流動性、再開挖性及低密度等之混凝土，在能降低成本或達到特定目的需求前提下，其所組成材料不一定需符合規範對各項組成材料之規定；其主要原始材料為飛灰、其他回收材料、少許之砂石與水泥等，為一具有自硬性之可膠結材料。CLSM (Controlled Low Strength Material) 中文直譯名稱為「控制性低強度材料」；依據美國混凝土協會(ACI)之定義，為一種具備自我充填，用以替代優良級配的新興材料；其定義相當廣泛，舉凡可流動性的回填料、低收縮性的可控制性低密度回填料、可流動性漿體、可塑性之泥土水泥質材料、泥土水泥質泥漿等，皆可為廣泛定義為 CLSM。國內流填料大多用於地下管線工程如自來水、下水道、電信、電力、石油、天然氣等回填上，使用量大。

### 2.4 流填料 (CLSM)

以混凝土的觀點而言，CLSM 為一種 28 天抗壓強度不超過 1200 psi (約 84 kg/cm<sup>2</sup>) 的混凝土，以膠結料、水、砂、石，透過配比技術，使之具有一定強度。CLSM 又可便利將來以人工或機具方式再開挖的超低強度水泥質材料，其組成材料與混凝土相類似，但對於組成材料的要求，卻無製造混凝土材料般的嚴苛規定（營建署，CLSM 製成及使用手冊）。

### 2.4.1 流填料的特性

根據柴希文、謝佩昌(2000)之整理，CLSM 為依據有自硬性可膠結材料，主要用途為取代傳統夯實填方材料。CLSM 具自流动性、不需夯實，適用於狹小空間或機具無法進入之施工場所，用以替代土石回填料。

CLSM 相關之工程特性詳列於下：

#### 一、流動性

CLSM 具有良好的流動性，不需藉由機具震動夯實，於拌合及澆置時，能流入充填任何孔隙。因此可用於回填開挖後之坍塌空隙，且可解決狹窄管溝夯實機械無法充分使用之作業困擾，且在塑性狀態時又能具有與混凝土相同的性質，具一定強度與穩定性等優點。

#### 二、抗析離性

為使 CLSM 達到工程上所需之流動性，常須添加拌合水來提高水灰比值，達到高流動性之需，但亦造成析離現象。為解決此現象，可添加特殊參料如氯化鈣、發泡劑或添加適量的細粒料(如飛灰等)，以提供足夠的凝聚性且不產生析離的現象。

### 三、滲透性

一般而言，滲透性約在  $10^{-4}$ ~ $10^{-5}$  cm/sec，具較高強度或細骨材料添加量較高之 CLSM，滲透係數將會降低至  $10^{-7}$  cm/sec。另外，為降低其滲透性而使用具膨脹性的黏土或矽藻土為回填料時，則會影響其他性質，故須特別注意各工程 CLSM 之適用性。

### 四、硬固時間

所謂的硬固時間為至塑性狀態至硬固狀態所須的時間，期間常會受釋放出的泌水量及速率影響，一般而言，硬固時間會受粘結材的種類及使用量、周圍土壤之滲透性及飽和度、流動性與配比成份、拌合料溫度及室溫、回填深度等因素影響；一般硬固時間約需半天至數天。

### 五、沉陷性

CLSM 發生沉陷的原因在於體積的減少及壓密作用的增加，而產生水分的喪失或空氣的排出，超過水化作用所需的用水量，而在表面屢生密水現象。亦部分的沉陷狀況發生於澆置階段，使用較低含水量的配比，可降低甚至可杜絕沉陷的發生。

### 六、再開挖性

CLSM 與傳統混凝土材料最大的差別，就是具有再開挖性，通常抗壓強度低於 50psi ( $3.5\text{kg/cm}^2$ )，僅需以人工方式即可完成開挖。

## 七、抗壓強度

無圍抗壓強度一般被當作 CLSM 承载力重要指標。一般抗壓強度在 50~100psi (3.5~7.0 kg/cm<sup>2</sup>) 之 CLSM，與具優良夯實性的土壤抗壓強度相當，一般低抗壓強度需求主要視將來目標再開挖性程度差異性而定，如以管線工程，一般以 20~70kg/cm<sup>2</sup> 最為適當。

## 八、密度

一般在澆製時，CLSM 密度約為 1844~2325kg/cm<sup>3</sup>，與夯實完全的回填料相較為高，如僅使用飛灰（爐石灰）、水泥及水為拌合材料時，測得密度則會降至 1442~1602 kg/cm<sup>3</sup>。欲達到密度更低的 CLSM，可考慮使用輕質骨材或提高輸氣含量，來達到預期效果（陳惠琳，2003）。

### 2.4.2 流填料之材料組成

CLSM 與一般混凝土使用材料相似，係由水泥、水、粗細骨材所組成。一般混凝土使用較高粗細骨材比例，用減水劑維持良好工作性以減少拌和水量，降低水灰比，使用較多水泥量等，以達到高抗壓強度之目標。CLSM 使用少量水泥、大量細骨材與拌和水形成鬆散低強度構造，與一般混凝土強度越高越佳思維不同，CLSM 強度不可過高，過高則不符合使用需求。

以下簡介 CLSM 各項組成材料：

1. 水泥：水泥能提供 CLSM 凝聚性與強度。卜特蘭第一型與第二型水泥需符合 ASTM C 規定。
2. 飛灰：飛灰通常用來改善流動性，使用飛灰可增加抗壓強度、降低泌水乾縮及滲透性。
3. 化學添加料：輸氣劑可使在 CLSM 之組成材料中，增加孔隙間距及改善流動性，也增加隔離性，降低單位重，亦可降低 CLSM 之抗壓強度。減水劑使用係為降低使用水量以及加速凝結時間。
4. 水：水泥混凝土使用之水均可使用於 CLSM。
5. 骨材：骨材為組成 CLSM 配比中主要成分。其種類、級配、和形狀皆會影響 CLSM 物理性質。通常使用於 CLSM 配比之骨材包括：
  - (1) 符合 ASTM C33 規定之骨材。
  - (2) 具較小粒徑粗骨材混合之粗細骨材。
  - (3) 不大於 3/4in，骨材所混合之粗細骨材。
  - (4) 通過#200 篩，粒徑大於 10%之天然砂質土壤。
6. 非標準之材料：可利用更經濟之非標準材料，根據計畫需求也可用於 CLSM 之配比，但在使用前須先進行試驗，能符合需求方能使用。

(白智榮，2003)

### 2.4.3 流填料的應用

潘昌林等人(2000)指出，國內工程單位對管線工程之施工品質並未重視，僅要求管線之功能性，至於開挖施工中對交通之衝擊、環境之汙染、噪音之製造等較力有未逮，尤其施工回填後常發生沉陷與孔洞，回填後之路面更是無法保證其平整度。國內於管線回填工程中使用之材料大致為原有之土壤或級配砂石料，若回填時未予有效壓實，將不可避免地造成路面沉陷，對市容及行車安全皆有不良影響。

應用 CLSM 於管溝回填可解決管線挖掘埋設後，人工夯實不足引致之道路路面下陷、龜裂以及路面剝落等缺失，並減少人工夯實之成本。此經濟、簡易且有效的工料及工法，除減少優良砂石級配的使用外，配比可使用廢鑄砂、再生骨材、飛灰、爐渣的特性，更使之具廢棄物再生利用的特色而兼具環保功效。且此管溝回填料的制式化，減化回填夯實工作與監督，對於施工單位之自主品質與監造之工程驗收，皆具甚大助益。

國內對 CLSM 之研發與應用，最終目的是促進回填工程品質提升，施工速率提高，促使廢棄物回收，並可縮短對道路交通與民生管線之影響。圖 2.4 為 CLSM 於台北市區管溝回填應用案例，顯示以 CLSM 回填的管溝，其路面平整度優於以傳統碎石級配料回填者，不僅可簡化施工流程及減少施工誤差，亦可提升市區道路品質。



(1) 管溝開挖完成



(2) 開挖完成後，於管溝內安裝管線



(3) 由預拌混凝土車直接澆置 CLSM 回填料



(4) CLSM 澆置入管溝(不須搗實)把平後，鋪放警示帶



(5) 待 CLSM 凝結後，鋪築面層瀝青混凝土



(6) 完工後，路面現況全景圖

圖 2.4 CLSM 應用於管溝回填之施工過程(台灣營建研究院，2002)

## 第三章 石門水庫地理環境與地質狀況

### 3.1 位置及功能

依據經濟部水利署北區水資源局資料顯示，石門水庫之興建主要係因為大漢溪上游陡峻，無法涵蓄水源，延及下游各地區常遭水旱之苦；政府為解決民困、發展農業、興修水利，自民國四十五年七月展開興建石門水庫工作，並於五十三年六月完工，歷時八載，建設經費約達新台幣三十二億元，水庫總長度為十六·五公里，滿水位面積八平方公里，有效水量約二億九百七十萬立方公尺，為一多目標水利工程，具有灌溉、發電、給水、防洪、觀光等效益。

如圖3.1所示，石門水庫集水區位於大漢溪上游，石門大壩以上之集水區面積約為75,633公頃，東鄰臺北、宜蘭兩縣，南接臺中縣，西南與苗栗縣，西屬桃園、新竹兩縣。集水區北接大漢溪下游集水區，東與新店溪、蘭陽溪上游集水區為鄰，南邊為德基水庫上游集水區，西南連大安溪集水區，西為靠頭前溪集水區，西北邊與鳳山溪集水區為鄰。行政區域分屬宜蘭縣大同鄉，新竹縣五峰鄉、關西鎮與尖石鄉，以及桃園縣大溪鎮、龍潭鄉與復興鄉。全集水區由泰岡溪、白石溪、三光溪、卡拉溪、比亞溪、雪霧鬧溪、高坡溪、義盛溪、霞雲溪、奎輝溪、三民溪、高遠溪、浦仔溝溪等支流匯合而成，支流總數有64條之多，流路呈不規則樹枝狀，總長約352公里。



圖 3.1 石門水庫地理位置圖 (行政院農委會水保局，2006)

以下列出石門水庫基本資料，包含水源、位置、功能、相關設施等，詳細請見表 3.1：

表 3.1 石門水庫基本資料彙編表 (經濟部水利署北區水資源局)

標 題	說 明		
水源	淡水河支流大漢溪		
位置	桃園縣龍潭鄉、大溪鎮、復興鄉		
興建機關	石門水庫建設委員會	興建經費	31.83 億元
管理機關	經濟部水利署北區水資源管理局		
興建時間	民國 47 年 7 月至 53 年 6 月，民國 73 年，滯洪隧道		
功能效益	灌 溉	桃園。石門大圳灌區 36,500 公頃	
	給 水	桃園、台北、新竹三縣。32 鄉鎮每日 80 萬立方公尺。{板新、大溪、石門、平鎮、龍潭淨水廠}	
	發 電	年發電量 2.3 億度。	
	滯洪、觀光		
水 庫	集水區面積	763.4 平方公里	
	滿水位面積	8 平方公里	
	滿水位標高	245 公尺	
	總容量	2 億 5178 萬立方公尺 (86 年測)	
	有效容量	2 億 969 萬立方公尺 (99 年測)	
主要建築物	主 壩	型式：分層滾壓土石壩 壩頂標高：252.1 公尺 壩高：133.1 公尺 壩長：380 公尺 壩體積：706 萬立方公尺	
	滯洪道	型式：閘門控制溢流量 弧形閘門：6 門，寬 14×高 10.6 溢洪頂標高：235 公尺 溢洪量：10,000 立方公尺/秒	
	滯洪隧道	進口底標高：220 公尺 隧道溢洪閘門：2×2 門，寬 4.3×高 5.7 隧道：(1 號)內徑 9 公尺，長度 248 公尺 (2 號)內徑 9 公尺，長度 255 公尺 最大溢洪量：2×1,200 立方公尺/秒	

石門水庫為一具有多重效益的多目標水利工程，提供灌溉、發電、給水、防洪、觀光等功能，以供應台北、桃園等地區達 180 萬人口之公共給水為最重要。茲就石門水庫五大功能概述如下：

### 一、 灌溉運用

石門水庫灌溉區域包括桃園、新竹、台北等三縣，石門大圳灌溉渠道包括幹渠長 27.34 公哩，支渠 18 條，長 9,749 公里，分渠 44 條，原計畫灌溉面積 53,661 公頃。近年來由於工業迅速發展，農業經營成本提高，且因工廠、社區、國際機場、高速公路等之興建，使原有水田逐年減少，目前灌溉面積僅約 36,500 公頃(兩期作物)。

### 二、 發電運用

石門發電廠裝置發電機兩組，每組容量 45,000 瓩，委託台灣電力公司營運管理，其每日發電量，視水庫水位情況，若水位於上、下限之間，則正常運轉；倘若水位在下限與嚴重下限之間，保證月份期別以不低於每日四小時尖峰運用；而水位低於嚴重下限时，則會嚴格依照下游灌溉與公共給水用水量發電。所發電力全部由台電公司統籌調度供售，年平均發電量約兩億度。

### 三、 給水運用

石門水庫之公共給水由台灣自來水公司經營管理，目前所供應的公共給水及工業用水原水，每日已增至七十萬公噸，供應範圍計有三十二地區，飲用人數多達一百八十萬人以及多處工業區工業用水。

#### 四、 防洪運用

石門水庫之防洪功能主要在攔蓄調節大漢溪上游之洪水，延緩洪峰到達台北地區的時間，使與新店溪、基隆河之洪峰錯開，以降低下游洪峰，減輕台北地區水患。但由於水庫防洪容量有限，對於較大颱風洪水之防洪功效不彰。

#### 五、 觀光

石門水庫風景優美，交通便利，為台灣北部地區觀光勝地，每年觀光人數平均約為 130 餘萬人，觀光收入每年平均約 7 千餘萬元。

### 3.2 地形

石門水庫集水區域內之地形地勢除羅浮西北端為較低緩之丘陵地外，大部分均為山岳地帶，地勢起伏由海拔 135 公尺(石門水庫壩址)變化至 3,500 公尺之間，以南端之品田山 3,529 公尺為最高，全區地形自東南向西北傾斜，而呈南北向之狹長腰形。

依據水土保持技術規劃之坡度分類，坡度小於 30%之緩坡地約佔集水區之 10.2%，坡度 30~55%之約佔集水區之 29.3%，而集水區內多為坡度大於 55%，約佔集水區之 60.5%(林昭遠，2004)。

集水區內地形坡度大於 30 度以上佔總面積的 56%以上，以 93 年艾莉颱風為例，其崩塌地主要集中在坡度 30 度以上的陡坡，約佔總崩塌面積的 78%。

總體而言，石門水庫集水區上游，多屬於坡度陡峭地區，其坡度大於風化材料之安息角，因此容易於颱風豪雨時造成崩塌。集水區內之坡向則是影響其受雨量多寡的重要因素。由多次災害的經驗中得知，雨量多寡是影響崩塌的最大誘因。在石門水庫集水區內有兩大地形區，分別是雪山山脈及西部麓山帶地形區，兩地形區以屈尺斷層為界，在計畫區域內則由水車寮至復興延至阿姆坪一線為分界。

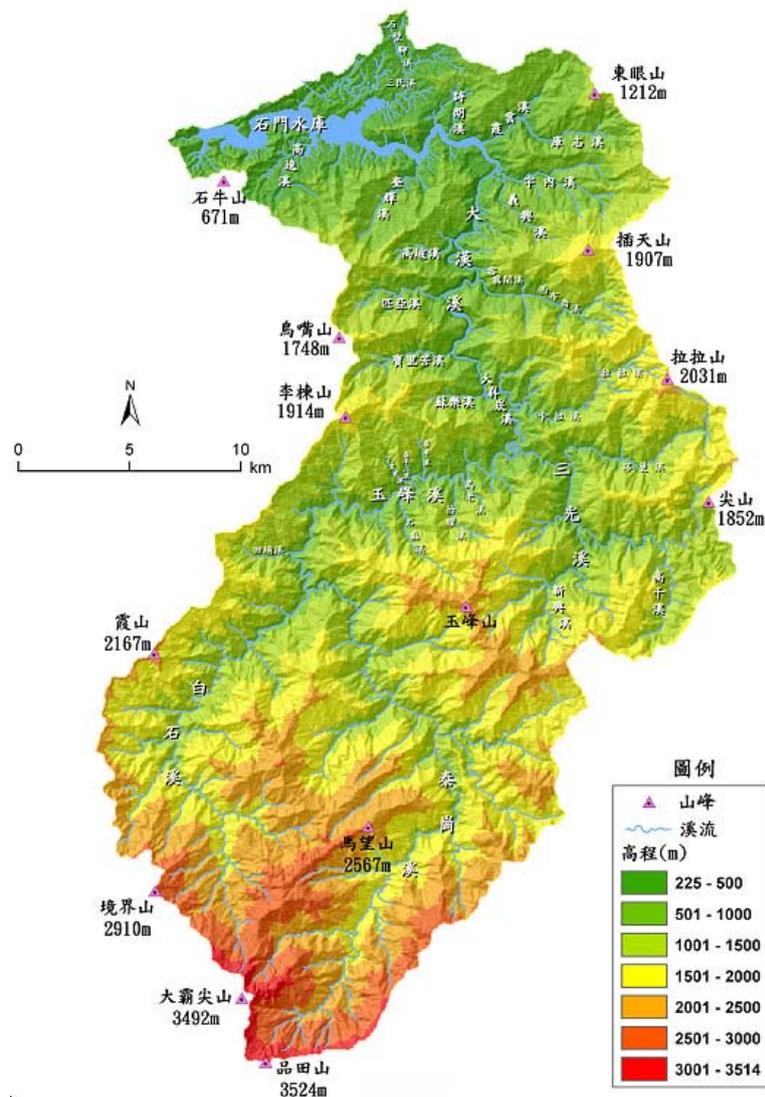


圖 3.2 石門水庫集水區地形水系圖 (行政院農委會水保局，2006)

## A. 雪山山脈

集水區南側地形屬雪山山脈，位於中央山脈之西側呈東北-西南走向，構成岩層均以板岩、硬頁岩、石英岩為主。本區地層經過地殼變動後造成反覆的褶皺，中間為若干斷層所分隔，因此地形受地質條件所支配甚為明顯，東北-西南向之山脊及後成河流集發達。本山塊東側即為中央山脈板岩山塊，西側與西部麓山帶（覆瓦狀斷層山塊）相接。在本集水區內，雪山山脈帶地形區占全區面積約三分之二，地形南高向北下降，由最南端品田山分東西兩山稜向北環繞成集水區，品田山沿集水區邊境向東蜿蜒延伸。

## B. 西部麓山帶

集水區南側地形屬雪山山脈以西之麓山地帶，其標高均在 2,000 公尺以下，由未變質之新第三紀砂岩與頁岩互層夾少量石灰岩體和凝灰岩凸鏡體組成，地貌上概屬壯年期，地勢東高西低且顯得平緩寬闊。本地形區於更新世地殼變動時，受到來自東方之橫壓力，而造成一連串南北縱向斷面而向東傾斜，成一系列雁行排列之覆瓦狀斷層 (imbricate fault) 系統。出露岩層均屬未變質之新第三紀地層，其與板岩區接觸，係為台灣主要之縱向構造線之一，稱為屈尺斷層。本地形區西側與西部諸丘陵或台地相鄰接。地形上除山稜環繞河谷外，在河谷兩旁有河階台地發育，此處為區內地形最為平坦之處。

### 3.3 地質

依其所處地質區位區分，集水區內以漸新世板岩與硬頁岩為主，與變質砂岩夾層組成之大桶山層(50.7%)，始新世堅硬塊狀變質砂岩間夾硬頁岩與板岩組成之四稜砂岩(15.3%)，中新世下部及中部以厚層至塊狀砂岩夾頁岩為主之大寮層與木山層(14.8%)及南港層與石底層(13.4%)，其餘河階台地與年輕地層所佔之比例均極有限。主要之結構線，如斷層線、褶皺軸、岩層走向及劈理等，其延展方位向東北，另有甚多縱橫小斷裂參雜其間。區內一般岩石之情況多屬脆弱、劈理、節理及裂隙發達，經地殼變動，強力擠壓破壞，加上地形陡峻，雨水充沛，岩石重力滾落及沖蝕現象特別顯著。集水區內有二條主要斷層及三條褶皺軸通過，造成岩盤破碎帶，容易形成崩塌滑動。該區地質狀況由老至新依序整理如表 3.3。

表 3.2 地層表性特徵表 (行政院農委會水保局，2006)

地質年代	地層名稱	岩層性質
始—漸新世	西村層(Sc)	以粉砂岩質硬頁岩與細粒變質砂岩的互層、厚層硬頁岩或板岩偶夾薄層變質砂岩為主。
漸新世	四稜砂岩(Sl)	以灰色或灰白色中粒至粗粒或礫質之厚層變質砂岩為主，偶夾薄層之板岩或硬頁岩。
漸新世	乾溝層(Kk)	主要是由黑色硬頁岩夾有灰黑色泥質緻密細粒變質砂岩組成，硬頁岩一般呈厚層狀，且節理發達，常為石英脈或方解石脈充填，風化後呈現木片狀破裂面。
漸新世	大桶山層	以黑色硬頁岩為主，夾有灰至灰黑色細粒泥

	(Tt)	質變質砂岩，本層所夾之變質砂岩較乾溝層為多，層厚大多為 10 公分至 3 公尺堅硬緻密之變質泥質砂岩抗蝕力頗強，常在河谷中形成陡壁，硬頁岩之節理發達，風化後呈現之地層之層理較乾溝層明顯。
中—漸新世	木山層(Ms)	以厚層之白灰色、黃灰色及白色，細粒至粗粒砂岩為主，夾有灰色頁岩，或細粒砂岩及頁岩之互層，偶夾有薄煤層，於清水坑背斜一帶則夾有極粗粒之疏鬆砂岩。
中新世	大寮層(Tl)	以深灰色至黑色頁岩為主，本層中段夾有厚約一公尺之灰色細粒泥質砂岩。
中新世	石底層(St)	以厚層或中厚層，淡灰色或黃灰色細粒至中粒砂岩為主，夾有薄層頁岩及砂、頁岩互層，常夾黑色頁岩之薄葉層而呈條紋狀構造，以及含有煤層。
中新世	南港層(Nk)	本層主要可分為三段，最下段以青灰色及淡灰色厚層塊狀，細粒至中粒，鈣質或泥質之砂岩為主，夾有深灰色頁岩，偶夾薄層砂岩。本層之中段則以深灰色頁岩為主，夾有砂質頁岩及泥質或鈣質細粒砂岩。本層之上段以厚層之細粒至中粒砂岩間夾頁岩及砂岩之薄互層組成。
中新世	南莊層(Nc)	以白色及白灰色層狀細粒至粗粒砂岩及砂岩和頁岩之薄葉狀互層為主，夾有深灰色頁岩及煤層。凝灰岩(tu)：在南莊層內夾雜之凝灰岩，主要火山作用發生在復興鄉一帶，凝灰岩體長達數十公里，可分為數層斷續相接，而與地層層面大致平行。
上—中新世	桂竹林層(Kc)	可分為上下兩段，上段以淡灰色細粒鬆砂岩為主，夾有深灰色頁岩，下段則以青灰色細粒塊狀砂岩為主，夾有砂質頁岩。
全新世	台地堆積層(t)	分佈於大漢溪及其支流之河岸兩側，由礫石、砂、泥等無膠結堆積而成，高出河道數公尺至數十公尺不等。

參考中央地質調查所「桃園圖幅-地質說明書」資料顯示，本地區之地質構造複雜，包括許多大小不等之褶皺及斷層，各構造大致均呈東北—西南走向，褶曲不完整，大多受到斷層之切割，由力學原理來看，垂直於最大主應力軸方向會造成主要之斷層，而地層在持續的受力時，岩層因累積壓縮之力超過岩層彈性強度範圍，會產生二組與最大主應力軸成  $30^\circ$  交角之剪裂面，其中以右移為主，本地區之構造即有此現象。

在更新世的蓬萊運動影響之下，本地區各地層受到東南方向之推擠，形成東北走向之褶皺及逆斷層，再發生東西向之平移斷層，並截切褶皺。地殼的變動強度由東向西逐漸減弱，因而產生之褶皺，多數是不對稱的，由於推擠持續增強，地層斷裂，斷面以上的岩層向西北逆衝，造成許多低角度逆斷層，而成為顯著之覆瓦狀斷層系統。

參考中央地質調查所之「桃園圖幅」、「台灣地質全圖」及工研院能資所之「石門水庫、大灣坪、大溪坪、長興、復興、羅浮、小烏來等環境地質圖幅」等相關地質資料，石門水庫集水地區地質構造包括有新店斷層、金山向斜、屈尺斷層、尖石向斜、石槽斷層、烏嘴斷層、插天山向斜、插天山斷層、水流東斷層、尖石向斜、火燒樟斷層如圖 3.3，其分布情形與特性詳述於表 3.3。

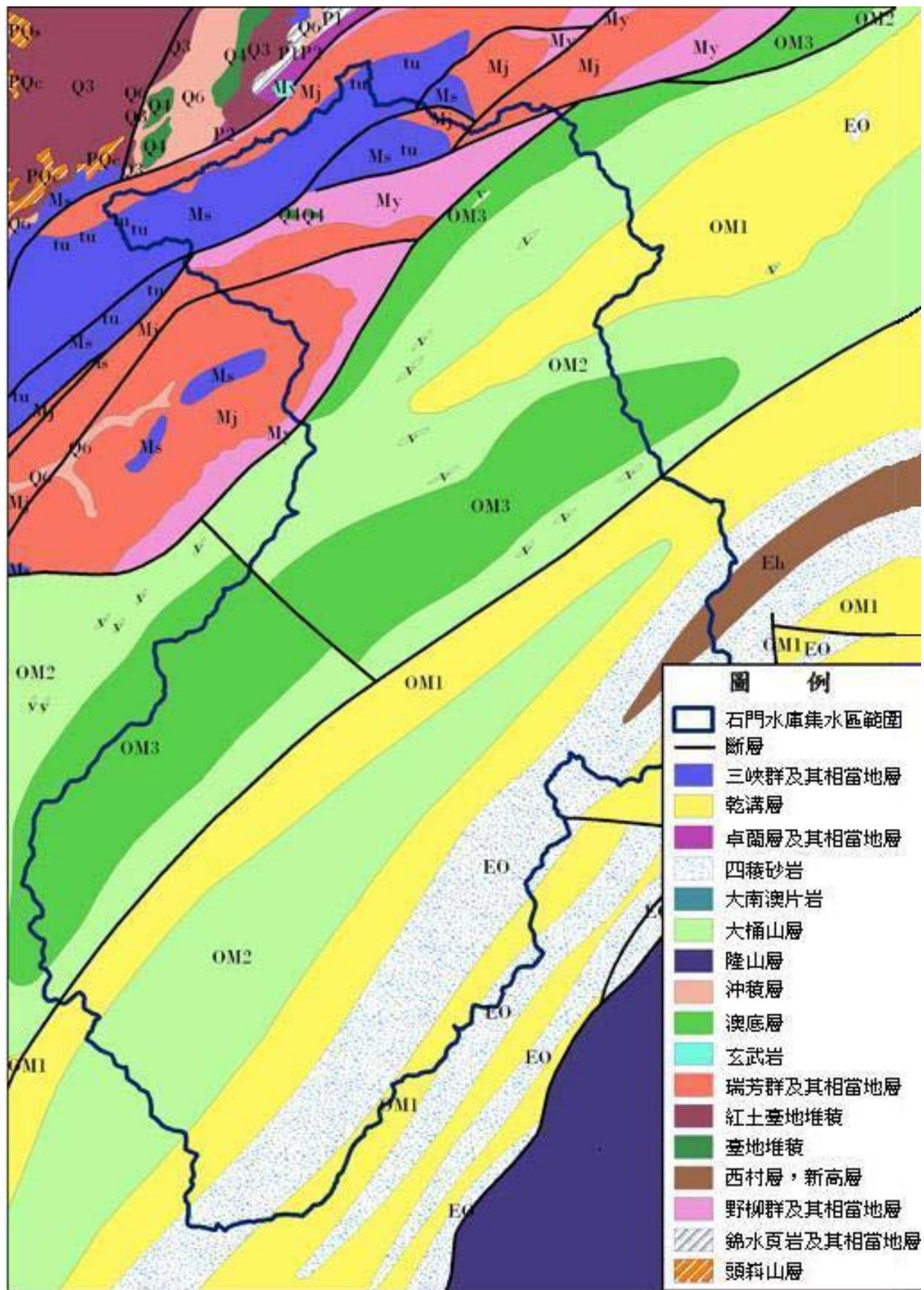


圖 3.3 石門水庫集水區地質圖 (行政院農委會水保局, 2006)

表 3.3 石門水庫集水地區地質構造分布情形

(行政院農委會水保局，2006)

構造名稱	區位	特 性
新店斷層	通過 石門水庫 大壩的北側	為台灣北部之主要逆斷層，西至石門水庫大壩之北，以近東北之走向，經頭寮—慈湖區，草嶺山、錐子頭、白雞、大寮地、安坑，過大粗坑往北延伸達 30km 以上，本斷層線之西北為桂竹林層，其地層之傾角為 20~40 度，傾向東南，多為低緩之山丘，而斷層線之東南，露出者為早期中新世之地層，多為高峻之山嶺。本斷層之層位落差約為 700~3000m，斷層面傾向東南，傾角約 60~70 度，構成明顯之斷層崖。
金山向斜	通過 阿姆坪& 谷倉角一帶	本向斜位於喜龍、圓山、經石門水庫至阿姆坪一帶，向東則逐漸傾沒。軸部最新地層為桂竹林層，其西北翼地層之傾斜約為 45~60 度，東南翼地層出露甚少，大部份被位於其東南方之屈尺斷層所截切。
屈尺斷層	通過 阿姆坪& 高遙坪一帶	本斷層大致呈東北—西南走向，自高遠經石門水庫上游、復興、樂樂谷、熊空、江南腳山至廣興而出本區範圍，斷層線長達 30km，其層位落差於復興附近最大，約達 4000m，向南則漸小，至高遠一帶則降為 700m，其地面之斷層面傾角約為 50~80 度，傾向東南。
尖石向斜	通過 復興橋附近	軸部以東北—西南之走向，向東北逐漸傾沒，向西南翼傾角 50~70 度間，為一不對稱之向斜，本區軸部最新之地層為南港層之上段，向東北之地層依次為石底層、大寮層及木山層。
石槽斷層	通過 羅浮村一帶	以東西之走向貫穿約達 30km，西自尖石向斜之西北翼，向東經羅浮至加母山 (1582m) 之北延伸，係一右移斷層，錯移龜山向斜及插天山背斜，其地表斷層面之傾角約為 70~80 度傾向東南。

鳥嘴斷層	通過 良羽烏山一帶	為一逆斷層，斷層東側為木山層，西側為木山層、大寮層、石底層。
插天山背斜	通過榮華、雪 霧鬧一帶	大致呈對稱背斜，兩翼地層傾斜約20~60°，軸部最老地層為乾溝層，以略近於插天山(1907m)高山區。
插天山斷層	通過榮華、雪 霧鬧一帶	本斷層大致以北30°東之走向，將插天山背斜截切錯移，斷層往北則被石槽斷層截切向右錯移，再往北被屈尺斷層截失，本斷層面之地面傾角約為80°，傾向東南。
水流東斷層	通過 三民一帶	為一逆斷層，斷層東側為南莊層及桂竹林層，西側為南莊層。
火燒樟斷層	通過 拉拉溪& 三光一帶	本斷層以北北東之走向，出露於本圖幅之東南角，為高角之逆斷層。

### 3.4 土壤

本集水區蓋屬高溫多濕地區，雨季甚長，乾濕季節不明顯。冷濕之廣大山區，最適於土壤灰化作用之進行，為因地勢陡峭，又多風雨，表層沖蝕劇烈，區內大部分山地土壤成石質土。僅鳥嘴上、高波、金面山、奎輝、長興等山岳、丘陵交界區，化育層紅黃色準灰壤，各河岸段丘面及山谷緩坡，則多屬沖積土，至於黑色基性岩土，僅見於玄武岩所組成之陡坡，各類土壤分部敘述如後：

#### A. 黃棕色紅壤

由砂頁岩風化而成，土壤深度在50~100公分間，黃棕色，團粒結構鬆弱，呈強酸性，有機質略低，又可分為新城系、九讚頭系、新埔系。

## **B. 紅黃色準灰壤**

母質為較堅緻沙頁岩互層，全面具含礫石，土層較薄，約介於30~60公分間，表土為礫砂粘壤土，有機質少，結構鬆脆，呈強酸反應，暗棕色，僅五指山礫砂粘壤土一種，散佈金平山、角板山、那結山一帶。

## **C. 黑色基性岩土**

分布於角板山附近，母質為玄武岩，土粒結構較為密實，土層淺薄，土色暗，常含礫石，呈中酸性，見於陡坡，為圓子山系-圓子山粒砂粘壤土。於緩坡區，則化育成紅壤，土色紅，土壤較深，屬草嶺山系-草嶺山砂質粘壤土，但其面積甚微小。

## **D. 沖積土**

由大漢溪早期沖積而成，分部於大漢溪主流沿岸之段丘群及沖積台地，可分為角板山系、大溪礫質砂壤土、橫山系等三系。

## **E. 灰化紅黃壤**

本土壤發育趨向依灰化方向進行，具有淺薄之有機質層淺薄腐質質土壤層，略為淡色之淋溶層、及黃棕色較為密實之沉積層，分部於角板山海拔1000m左右之山區地帶，由中新世砂岩頁岩所形成，土壤淺薄，約介於30~60公分間，質地細但多含石片，一般表土暗棕色，底土黃棕色，表土屑粒構造，心土中核粒構造，結構鬆，強酸性反應。

## F. 石質土

高山峻峭地區，岩石位移甚烈，沖蝕亦較嚴重，土壤難於化育，大多成岩石與碎片、暴露於地面之石質土，本及水區山岳地帶幾權屬之，可分為油羅山系、控溪系、署光系、雁鳴系。

### 3.5 氣象與水文

石門水庫集水區氣象資料相當完備，關於氣候資料的來源，主要為北區水資源局所設置之氣象觀測站及雨量站。氣象觀測站以觀測大氣之溫度、濕度、氣壓、蒸發量、降雨量、風向、風力等為工作，目前集水區內觀測站類別分述如下：

- 微電腦綜合氣象觀測站：石門、復興、霞雲、高義、巴陵、玉峰、十一份、三光、秀巒、鎮西堡等共十站。
- 無線電遙報雨量站：水庫集水區設有十六處雨量站，其中霞雲、高義、巴陵、玉峰、嘎拉賀、鎮西堡、池端、西丘斯山、白石等九站。
- 自記雨量站：石門、十一份、長興、復興、三光、鞍部、秀巒等七站。

水庫集水區屬於亞熱帶海洋季風氣候，因此冬夏季溫差極大。集水區內之氣溫，由於受到海拔高度之影響，各地氣溫變化較大，全年氣溫溫差約在 12°C~26°C 間，年平均溫度約為 20°C，以每年元月氣溫為低，約在 12°C 左右，七、八月份最熱，氣溫可達 24°C~26°C；在濕度方面集水區內各月份之平均濕度約在 80%~88%，年平均濕度約在 84%，故集水區內之乾濕季節變化不甚明顯。而經由歷年觀測資料得知集水區內年平均降雨量約為 2350mm，多集中在夏季，自二月開始增加，至十月達到最高，而十一月至翌年一月為乾燥季節。

石門水庫管理中心於集水區內另設置水位流量站五處，水文觀測站以觀測地面上之水文動態，包括水位、流速、流量、含砂量為主，各站每月施測二至三次(全年施測三十次)為原則。

- 霞雲站：流域面積 622.83 平方公里
- 高義站：流域面積 542.03 平方公里
- 玉峰站：流域面積 335.29 平方公里
- 稜角站：流域面積 107.76 平方公里
- 秀巒站：流域面積 115.93 平方公里

其中霞雲站及玉峰站設有無線電遙報系統，每小時由無線電傳回水位資料。

### 3.6 造成水庫濁度升高之原因

颱風期間的豪雨，使得原本地質就非常脆弱的石門水庫集水區邊坡發生大量的崩塌等坡地災害，造成土砂沖落下邊坡至溪流及水庫，由於瞬間的砂石量太大，導致水庫的自淨功能無法即時發揮效果，水庫的水質也因此產生嚴重的混濁情況，使得一向依靠石門水庫供水的臺北和桃園地區因而缺水；而泥砂大量沉澱入庫，也將使水庫須額外增加了清淤費用，其影響力可見一般。以下共分四點造成濁度升高之主因，分別論述之：

- A. 伴隨地表沖蝕作用而隨地表逕流進入水庫之沉積物。
- B. 崩塌與土石流作用進入主河道與水庫集水區之沉積物。
- C. 集水區內河道因其土石被沖刷後，於大雨期間河床原本安定堆積之細粒沉積物再次被攪動搬運。
- D. 堆積之細粒沉積物因暴雨洪峰期受擾動侵蝕。

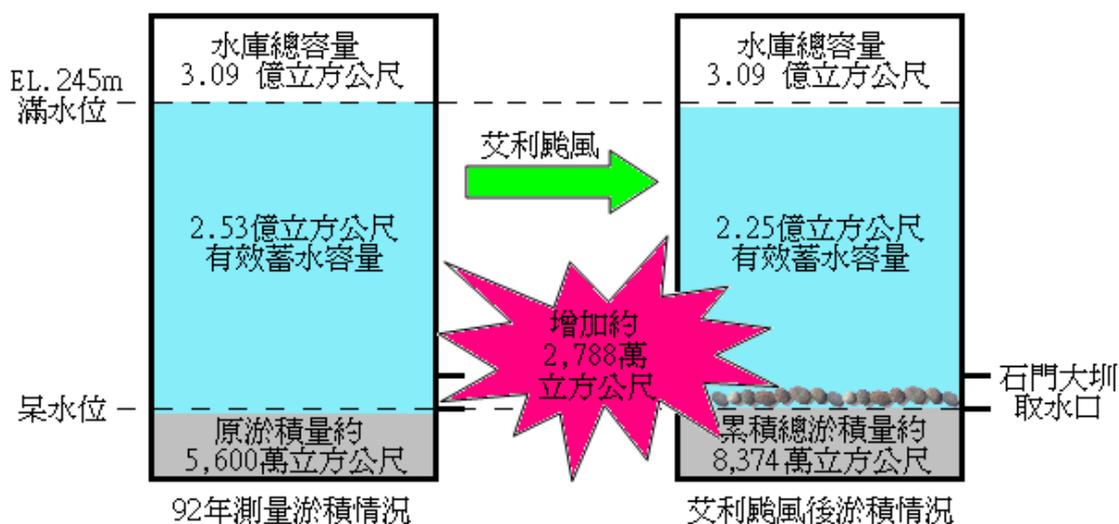


圖3.4 石門水庫淤積情況示意圖 (鍾朝恭、劉家盛，2005)

以上四種類型之泥砂來源，其泥砂粒徑之大小受其出露地區岩性與坡度之控制。

位於頁岩、硬頁岩與板岩出露之地區，因受長期風化作用之影響，地形坡度較緩，如地形坡度小於或接近 $30^{\circ}$ 時，因小於或接近風化材料之安息角，此時會有較厚風化土層之堆積，且因岩性之影響，風化土層會含有較多細顆粒之黏土。

位於厚層變質砂岩與砂岩出露地區，岩石抗風化能力較強，易形成坡度陡峭之地形，如其超過疏鬆材料之安息角，則不一定有厚層鬆散之沉積物堆積，且受岩性之影響，其風化材料含有較少之細顆粒黏土，而以較粗粒之土砂為主。

石門水庫集水區因颱風豪雨造成崩塌及水質濁度變化，不但影響水庫的供水量，也嚴重破壞集水區生物的生活空間。

根據中央社指出，施工達3年的石門水庫分層取水工程，已於2009年年底完工。將可透過豎井抽取原水供淨水場使用，解決颱風來襲時原水濁度升高，影響桃園、新竹及台北縣部分地區供水不足的窘境。北水局表示，分層取水工程主要取水豎井深40公尺，約13層樓高，取水口位於水位標高236、228、220公尺，水庫透過豎井抽取最乾淨的原水，供下游淨水場使用。每天可提供140萬噸原水，對民生與發電都是一大助益。

### 3.7 水庫淤積原因及淤泥來源

引致坡地災害的原因，可分為大自然與人為兩大因素。

大自然條件是發生坡地災害的背景因素，當不利的大自然因素存在時，則坡地發生災害的機率，大幅增加；自然界因天然條件不佳，常有山崩、地滑及土石流的現象，可視為正常的地質現象；另外，水庫上游的土壤會因集水區地形、地質、氣象等天然因素，亦會造成不同程度的崩塌。

當人們在山坡地進行開發及利用時，則必須以工程技術進行周延的調查及設計、嚴謹的施工及良好的管理維護，才能使山坡地在安全的狀況下，合理的利用。但對於高風險的大型崩塌地或斷層帶，應盡量避免開發利用，且亦應減少山坡地濫墾、濫伐、開闢道路、不當土地利用等人為原因，使山坡地保持穩固且安全。以下就造成坡地災害重要的兩大因素分別就細項加以說明：

#### 3.7.1 自然因素

##### (1) 山崩

山崩係指斜坡上不穩定土體或岩塊，快速向下移動的地質災害。山崩的災害規模一班較小，但破壞時位移速度甚快，山崩一破壞面形狀或破壞機制的不同，可將其分為平面破壞、楔型破壞、傾倒破壞及落石四類，其中落石規模雖小，但因常無明顯預警現象，危害度最大。

## (2)地滑

地滑係指斜坡上不穩定之土體緩慢向下移動，「地滑區」在工程上又稱為「崩塌地」，俗稱「走山」。通常面積較大，小至一公頃，大致上百公頃，滑動深度約10到100米不等，當滑動規模較大，越不容易處理。台灣的山坡地有許多大小不等的大型地滑區，嚴重威脅道路或建築之安全。

地滑區的邊坡位移速率，在初期通常較緩慢，甚至走走停停，顧很容易被忽略，但如果沒有適當處理，外在條件會日漸惡化，在破壞前，邊坡會明顯加速位移，進而導致大規模破壞，由於地滑的規模通常較大，若僅憑經驗，進行表面的補強即改善，成功的機率不大。地滑區每年都會重複發生邊坡滑移及下陷現象，直到某一豪大雨時，加速破壞。當災害規模越大，則所需處理費用越高，故地滑區是否有必要治理，宜就其危害性及保全對象審慎評估後，再行評估。

## (3)土石流

土石流係為河道或斜坡上堆積鬆散之土石，在豪大雨時土石中之含水量逐漸飽和，當土石飽和時，土石與水流相伴，如流體一樣快速向下流動而致災害。土石流災害之發生，係因泥砂、礫石等地質材料與水混合後，受重力作用產生流動所造成之災害。其發生包括了三個要件：（1）充足的水量；（2）足夠的土方；（3）有效的河床坡度。

### **3.7.2 人為因素**

#### **(1)不當或不合理的利用**

山坡地相對於平地風險較高，山坡地若未經詳細調查，則無法了解工紙的地質，及週遭的的不利環境因素，若未經調查及規劃，即在山坡地貿然進行挖填；整地及利用，則其風險自然大增。

#### **(2)未規劃合理的擋土護坡或排水設施**

擋土護波抗滑能力不足或地表排水系統不佳等，往往是造成坡地災害的主要原因。

#### **(3)山坡地的施工品質不佳**

山坡地開發利用時，初期須進行整地，以創造出可供建築或道路的平地，而在整地時，須先進行表面草木之移除，並設置地下排水設施，導引地下水排出。對於大規模之填方邊坡，若未分層夯實滾壓或原有坡面之草木未清除，易造成填土邊坡滑動或大量沉陷。

#### **(4)不重視坡地之管理維護**

山坡地的安全需要長期的維護及監測，部分坡地社區長輕忽管理維護的重要性，使不應有災害的工址，產生小災害，或小災害釀成大災害，尤其老舊山坡地社區或山區聚落，土石災害發生的機率，明顯較經開發許可及高度管理的山坡地社區為高。

## 第四章 研究方法

### 4.1 研究計畫

本研究所進行之試驗計畫，為石門水庫淤泥之最佳配比及其應用。其目的在於利用石門水庫淤泥取代細骨材，製作兼具環保綠能之混凝土產品。探討其滲透性及單軸壓縮強度之變化，驗證淤泥應用於實務工程上之可行性。

### 4.2 研究方法

本研究以石門水庫淤泥為研究對象，依據實驗了解淤泥混凝土應用於工程上之可行性，觀察不同配比之淤泥混凝土試體其工程性質之變化，探討此種材料做為工程實務上之適用性，並提出最佳建議配比。

上述研究試驗之詳細項目及試驗方法說明如下：

1. 基本物理性質試驗：首先進行石門水庫淤泥之基本物理性質試驗，包括比重試驗(ASTM D854)，阿太保限度試驗(ASTM D4138)，粒徑分析試驗(ASTM D422)等。
2. 淤泥化學性質試驗：本計畫化學性質試驗委託清華科技檢驗股份有限公司進行，包括氯離子含量檢測、TCLP毒物特性溶出試驗、化學元素檢測試驗等。

3. 淤泥混凝土配比設計：參考葉樺姿(2007)研究之建議，以單軸壓縮強度為控制變數，選擇各種不同參數如灰水比(水泥與水之重量比，C/W)、水固比(水與固體粒料之比，W/S)等，依不同配比拌合，製作成10cm( $\phi$ )\*20cm(H)之圓柱試體。

#### 4.3 養護條件(Curing Condition)

於室溫(約20°C~25°C)下進行養護，並分別配合7、28、56天的混凝土齡期，觀察混凝土齡期對淤泥混凝土強度變化之相對應關係。

#### 4.4 試驗材料

##### 一、水庫淤泥：

材料取自石門水庫管理局第13號沉澱池之水庫淤泥，試樣顏色呈灰黑色黏稠狀，烘乾後則呈灰色具團塊之狀態。



圖 4.1 石門水庫淤泥現地取樣照

##### 二、水泥：

使用亞洲水泥公司的第一型卜特蘭水泥。為避免受潮，水泥放置於棧板上，並以塑膠袋封裝。水泥的物理、化學成分如表4.1所示。

表 4.1 卜特蘭第一型水泥之化學成分及物理性質(亞洲水泥公司提供)

試驗材料		卜特蘭第一型水泥	
		規 範	亞 泥
化 學 成 分 (%)	SiO <sub>2</sub>	---	20.49
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	---	6.57
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	---	3.27
	CaO	---	62.4
	MgO	Max:6.0	1.91
	SO <sub>3</sub>	Max:3.5	2.2
	燒失量	Max:3.0	1.57
	不溶物	Max:0.75	0.09
	C <sub>3</sub> S	50	39.27
	C <sub>2</sub> S	25	29.11
	C <sub>3</sub> A	12	11.75
	C <sub>4</sub> AF	8	9.96
	CSH <sub>2</sub>	5	4.73
物理性質	細度(cm <sup>2</sup> /g)	Min:2800	3013
	比 重	---	3.14

三、細骨材：

採自大安溪。物理特性與篩分析結果見表4.2及表4.3。

表 4.2 細骨材篩分析表

篩號	篩孔徑 ( mm )	個別留篩重量 ( g )	留篩百分率 (%)		累積過篩百分率 (%)
			個別	累積	
4	4.76	1.2	0.120	0.12	99.88
10	2	38.3	3.842	3.96	96.04
20	0.84	115	11.537	15.499	84.501
40	0.42	197.1	19.773	35.272	64.728
60	0.25	295.5	29.645	64.917	35.083
100	0.15	283.5	28.441	93.358	6.642
200	0.07	61.2	6.140	99.498	0.502
PAN	0	5	0.502	100	0
總重		1000	F.M.	2.13	

表 4.3 細骨材之物理性質

各項試驗	細骨材
比重	2.63
單位重( $t/m^3$ )	1.688
空隙率(%)	35.8
細度模數	2.131

四、水：

本試驗採用一般的純淨自來水為拌和水。

## 4.5 基本物理性質試驗

### 4.5.1 比重試驗

本試驗遵照 ASTM D854 比重試驗規範施作。

A. 實驗目的： 求石門水庫淤泥的比重Gs

B. 試驗儀器：

比重瓶、小漏斗、酒精燈、三角鐵架、石棉板、烘箱、電子秤。

C. 實驗流程步驟：

1. 取通過 10 號篩的氣乾土裝入比重瓶，加水約 2/3 滿。
2. 將比重瓶移至酒精燈上加熱，經常搖動以便趕出土壤中所有的氣泡。自沸騰時起算繼續加熱約十五分鐘(保證氣泡趕出)。
3. 煮沸後之比重瓶置於桌面待冷卻至室溫後，再加滿水並秤重量。

D. 試驗結果及處理：

比重瓶同時試驗，其結果相差不得超過 0.03，否則作廢重作。

#### 4.5.2 液性限度試驗

本試驗所依據之準則為美國 ASTM D4318-83。

A. 實驗目的：求石門水庫淤泥的液性限度LL。

B. 實驗原理：

土壤的液限為土壤介於液態與塑性態的臨界含水量，一般以一特定之擾動作用下，會發生流動之最小含水量。

C. 試驗儀器：

1. 液限儀、刮刀、藥刀、蒸發皿、烘箱、電子秤。
2. 平光玻璃板、燒杯、吸管、蒸餾水。
3. 密閉容器：玻璃罐、塑膠罐或其他密閉容器皆可。

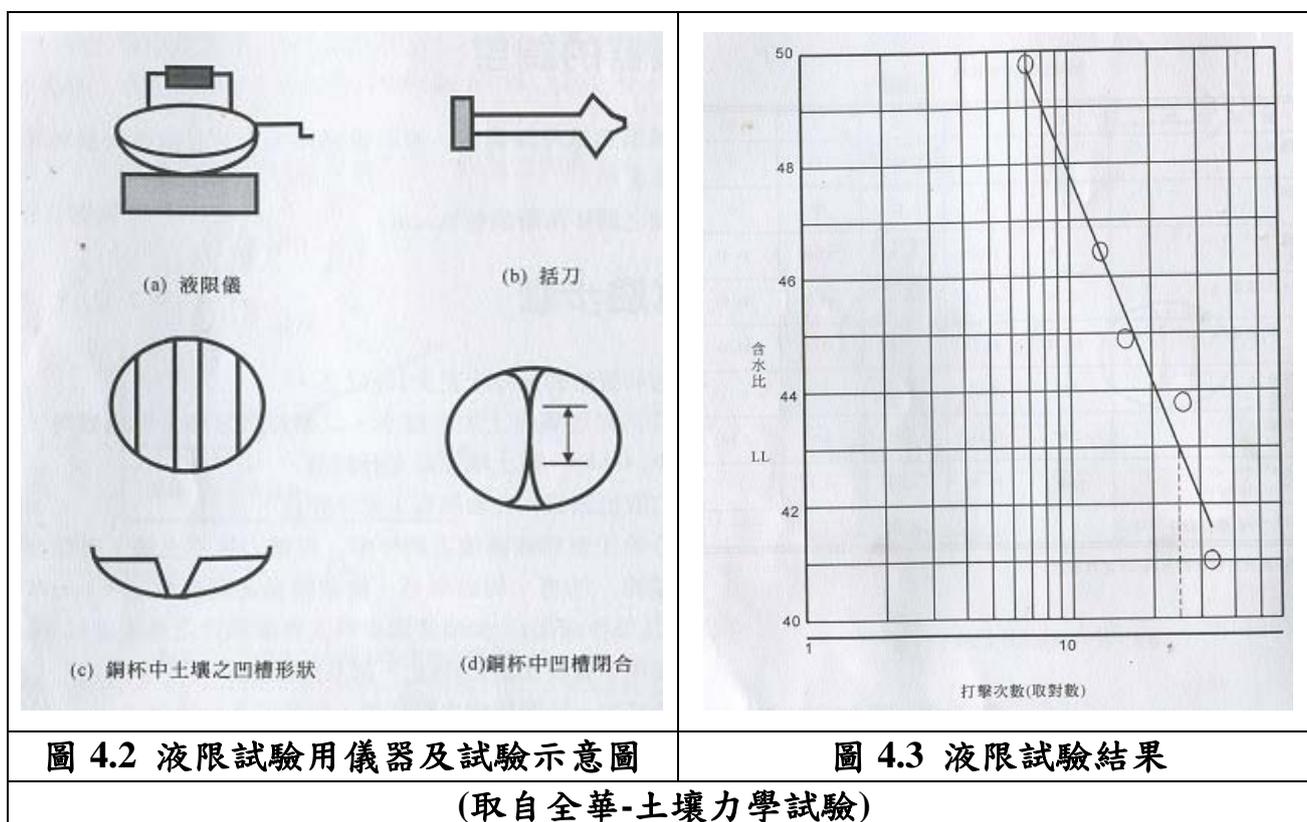
D. 實驗流程步驟：

1. 取通過40號篩的氣乾土加蒸餾水，調勻後移入玻璃罐內，加蓋後靜至少24小時，充分潤濕。
2. 取部份的土置於液限儀之銅杯中，以藥刀抹平土壤。以刮刀畫凹槽，轉動橫柄，進行敲擊(頻率為每秒兩次)，閉合之長度達12.5mm時為止。記其打擊數N。
3. 以藥刀挖取鋼杯中少許的濕土，移至蒸發皿中求含水比。
4. 重複2.與3.的步驟，求流性曲線(flow curve)圖。
5. 試驗儀器及試驗結果如圖4.2所示。

### E. 試驗結果的處理：

1.將試驗結果繪於流性曲線圖中，該座標係以含水比為縱軸座標，而以液限擊數(對數尺度)為橫軸座標，將各點以直線迴歸之，該直線即為流性曲線，如圖 4.3 所示。

2.相對於流性曲線上， $N=25$  擊數處之含水比即為液限。唯需注意的是：當  $N < 10$  or  $N > 50$  之試驗結果應做廢，因為流性曲線在  $N=10\sim 50$  之間才是呈現直線關係。



### 4.5.3 塑性限度試驗

本試驗所依據之準則為美國 ASTM D427-83。

A. 實驗目的：求石門水庫淤泥的塑性限度PL。

## B. 實驗原理：

塑性限度 PL 為土壤介於塑性與半固體狀態之臨界含水量。一般以土壤能被搓成 3.2mm 直徑之土條而能均勻龜裂時的含水量。而塑性指數  $PI = \text{液限 } LL - \text{塑限 } PL$ 。

## C. 試驗儀器：

1. 平光玻璃板、藥刀、鉛線、烘箱、電子秤。
2. 密閉容器：玻璃罐、塑膠罐或其他密閉容器皆可。

## D. 實驗流程步驟：

1. 取通過40號篩的氣乾土加蒸餾水，調勻後移入玻璃罐內，加蓋後靜至少24小時，充分潤濕。
2. 試驗前取出土球，置玻璃板上用手掌搓成直徑約3mm的土條，且正好均勻斷裂成數段為止，直徑3mm之鉛線可作為土條直徑之比對用，如圖4.4所示。
3. 將均勻斷裂的土條放入蒸發皿中，進行含水比試驗。
4. 至少須有兩組以上結果相似的試驗，其含水比的平均數即為塑限。

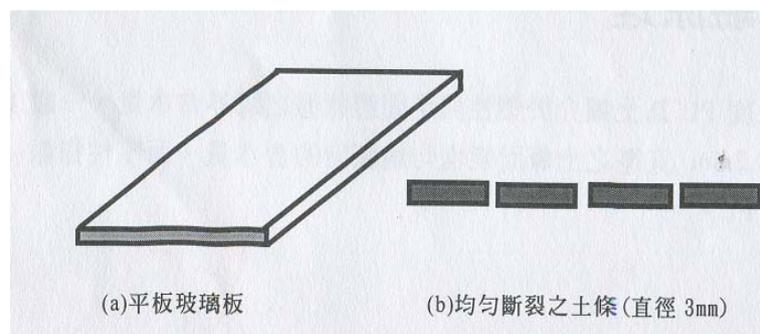


圖4.4 塑限試驗用儀器及試驗結果示意圖 (取自全華-土壤力學試驗)

## E. 相關工程性質

1. PC未壓密黏土  $LI > 1$ ， NC正常壓密黏土  $0.6 < LI < 1$ ，

OC過壓密黏土  $LI < 0.6$ 。

2. LL值愈高則壓縮性增加。

3. LI值愈低則黏土愈硬則壓縮性愈低。

4. PI值愈高則吸附水層愈厚則K(滲透係數)愈低。

5. PI值愈高則不排水剪力強度 $S_u$ 增加。

6. 建立塑性圖表，作為細粒土壤分類依據。

7. 活性 $A = PI/\text{黏土成分百分比}$ ，用以判斷土壤之膨脹性。

8. 估算不排水剪力強度 $S_u$ ---Skempton1957。

$S_u/\sigma' = 0.11 + 0.0037PI$ ， $\sigma' =$  有效覆土壓應力。

9. 估算壓縮性指數  $C_c$  --- for NC clay =  $0.009(LL-10)$ 。

### **4.5.4 粒徑分析試驗**

篩分析依據：ASTM D452-80。

比重計分析依據：ASTM D422-63。

A. 實驗目的： 求的淤泥粒徑分佈圖

B. 實驗原理：

當土壤的粒徑大於#200 篩則是用篩分析，粒徑小於#200 篩則適合以比重計分析之。

篩網直徑較#200 篩小時，其孔徑甚小，土壤顆粒欲順利通過並不容易，此時雖然可以「水洗法」代替，即將篩網及土壤置於水中，以毛刷刷之，可使較篩網孔徑還小的土壤顆粒通過，但此法較費時，故常以比重計分析，應用不同粒徑大小的顆粒在水中沉澱速度不同的原理，測量較小顆粒間的大小分佈狀況。

#### C. 試驗儀器:

1. 比重計、量筒、ASTM 標準篩一組、搖篩機、烘箱、電子秤。
2. 攪拌機一套、計時器、毛刷、溫度計、沖洗瓶、計時器。

#### D. 比重計分析之準備工作

1. 將通過 200 號篩的土樣放入容量為 250cc 之燒杯中，加入濃度約 4% 之分散劑 100c.c 攪拌均勻，再靜置 18 小時以上。
2. 將燒杯中的混合液洗入攪拌杯中，加水至 6~7 分滿。開動攪拌機約 5 分鐘(砂質土)或 15 分鐘(黏土)，使黏土顆粒完全分散。

#### E. 試驗步驟 (比重計分析試驗)

1. 將攪拌杯中的混合液洗入大量筒中，加入蒸餾水至 1000cc 刻度。
2. 以手掌或軟膠蓋壓緊量筒，上下翻動約一分鐘，使混合液混合均勻。
3. 迅速將大量筒置於固定桌面，同時啟動計時器，視沈澱試驗為“開始時間”，隨即迅速小心的放入比重計。
4. 自“開始時間”起算，於歷時 1/4、1/2、1、2、5、15、30、60、250 與 1440 分鐘之時，計測不同時間之比重計讀數。

5. 於計測兩分鐘讀數後，取出比重計，放入另一裝蒸餾水之大量筒中。

爾後於每一讀數之前 30 秒，才將此比重計移入混合液中讀數。

#### F. 試驗步驟 (水洗法)

完成比重計試驗後，將量筒內土液完全洗入#200 篩內，並以蒸發皿接取所得土液，並於烘乾後量測土樣重量，該重量與原土樣重之比值，即為通過#200 號篩之過篩率。

## 4.6 基本化學性質試驗

### 4.6.1 氯離子含量檢測

本試驗所依據之準則為離子層析法。

#### A. 方法概要：

水樣中之待測陰離子，隨碳酸鈉及碳酸氫鈉流，使洗液流經一系列之離子交換層析管時，即因其與低容量之強鹼性陰離子交換樹脂間親和力之不同而被分離。分離後待測陰離子再流經一高容量的陽離子交換樹脂之抑制裝置，而被轉換成具高導電度酸之形態，移動相溶液則轉換成低導電度之碳酸。經轉換後之待測陰離子再流經電導度偵測器，即可依其滯留時間及波峰面積、高度或感應強度予以定性及定量。

#### B. 適用範圍：

本方法適用於放流水、地面水體（不包括海水）、飲用水及地下水體中陰離子如： $F^-$ ， $Br^-$ ， $Cl^-$ ， $PO_4^{3-}$ ， $SO_4^{2-}$ ， $NO_2^-$ 及 $NO_3^-$ 之檢測（其陰離子檢測結果，若經換算亦可得 $NO_2^- - N$ 、 $NO_3^- - N$ 及

$\text{PO}_4^{3-}$  -P 之值)。本方法偵測極限與樣品注入體積及導電度偵測器之設定有關，對於使用 100  $\mu\text{L}$  樣品迴路及 10  $\mu\text{s} / \text{cm}$  全比例(Full - scale)導電度偵測器，偵測極限可達 0.1 mg / L。

### C. 設備及材料：

#### (一) 離子層析儀：

包括注入閥、樣品迴路、保護管、離子層析管、抑制裝置、具溫度補償之電導度偵測器及搭配數據輸出之印表機、紀錄器或積分儀等，且可提供 1 至 5 mL / min 移動相溶液流量及 1400 至 6900 kPa 的壓力或適用於各廠牌儀器之特殊規定。

#### (二) 陰離子層析管柱：

具苯乙烯-二乙烯基苯(Styrene divinyl benzene-based)之低容量層析管柱或類似材質之層析管柱，對  $\text{F}^-$ ， $\text{Br}^-$ ， $\text{Cl}^-$ ， $\text{PO}_4^{3-}$ ， $\text{SO}_4^{2-}$ ， $\text{NO}_2^-$  及  $\text{NO}_3^-$  有良好之分離效果者。

#### (三) 保護管柱：

與層析管柱具有相同材質；用以保護層析管柱避免污染或損壞。

#### (四) 抑制裝置：

具陽離子交換樹脂薄膜或纖維，能連續將待測物及流洗液轉換成酸的型態，或其它類似有效的背景抑制裝置。

#### (五) 濾膜： 0.2 或 0.22 $\mu\text{m}$ 孔徑。

#### (六) 天平：可精秤至 0.1 mg 者。

#### D. 試劑：

##### (一) 試劑水：

去離子水或蒸餾水，並經 0.2 或 0.22  $\mu\text{m}$  孔徑濾膜過濾，以避免堵塞管柱，導電度應在 0.1  $\mu\text{S/cm}$  以下者。

##### (二) 移動相溶液，0.0017 M $\text{NaHCO}_3$ —0.0018 M $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ：

溶解 0.5712 g 之  $\text{NaHCO}_3$  及 0.7632 g 之  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  於試劑水中，並稀釋至 4 L，或依各廠牌儀器分離管柱之特殊規定配製。

##### (三) 再生溶液，0.025 N：

稀釋 2.8 mL 濃硫酸至 4 L 或依各廠牌儀器之特殊規定配製。

##### (四) 標準儲備溶液，1000 mg/L：

取表 4.4 中所列之標準品，於 105  $^{\circ}\text{C}$  乾燥隔夜後，依表列之量分別溶解於試劑水中，並稀釋至 1 L，再裝入塑膠瓶於冰箱中保存，此溶液應可穩定保存至少 1 個月以上；或購買經濃度確認並附保存期限說明之市售標準儲備溶液。

##### (五) 混合標準中間溶液

分別取  $\text{F}^-$ 、 $\text{NO}_2^-$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{HPO}_4^{2-}$  及  $\text{Br}^-$  之標準儲備溶液各 12 mL， $\text{Cl}^-$  標準儲備溶液 20 mL 及  $\text{SO}_4^{2-}$  標準儲備溶液 80 mL，混合後，以試劑水稀釋至 1000 mL。此溶液分別含有 12 mg/L 之  $\text{F}^-$ 、 $\text{NO}_2^-$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{HPO}_4^{2-}$  及  $\text{Br}^-$ ，20 mg/L 之  $\text{Cl}^-$  及 80 mg/L 之  $\text{SO}_4^{2-}$ （此溶液須每日配製，因含  $\text{NO}_2^-$  及  $\text{PO}_4^{3-}$  之稀釋液須每日配製）。或依導電度偵測器之設定，配製適當之單一或混合標準中間溶液，分別各取標準

儲備溶液 10 mL，至 100 mL 量瓶內，配製成單一或混合標準中間溶液（100 mg/L）。

#### （六）混合標準工作溶液

取 25 mL 之混合標準中間溶液，以試劑水稀釋至 100 mL，此溶液分別含有 3 mg/L 之  $F^-$ 、 $NO_2^-$ 、 $NO_3^-$ 、 $HPO_4^{2-}$ ，及  $Br^-$ ，5 mg/L 之  $Cl^-$  及 20 mg/L 之  $SO_4^{2-}$ （此溶液須每日配製，因含  $NO_2^-$  及  $PO_4^{3-}$  之稀釋液須每日配製）。或分別各取混合標準中間溶液 10 mL，至 100 mL 量瓶內，配製成單一或混合標準工作溶液（10 mg/L）。

#### E. 步驟：

##### （一）儀器準備

- 1、打開離子層析儀電源，並調整移動相溶液流量（約 1.5 mL/min 或依各別儀器建議值），使之具有較佳的分離效果。
- 2、依樣品來源或濃度之不同，調整導電度偵測器之值（Full - scale），通常設定在 3 至 30  $\mu s$  之間或選擇其他適當的範圍或依各別儀器之自動設定。使儀器溫機約 15 至 20 min，觀察偵測器之圖譜基線，俟其達到平穩後，將偵測器之偏位歸零。
- 3、調整抑制管再生溶液流量約 2.5 至 3 mL/min（或依各儀器建議值）。

##### （二）檢量線製備

- 1、注入含有單一或混合化合物之標準溶液，在特定實驗條件下，各離子的滯留時間為一定值，則可依其滯留時間，予以定性。

2、精取適當之標準工作溶液，使每一種待測陰離子皆由高濃度至低濃度序列稀釋成至少五組不同濃度（不包含空白）之單一或混合檢量線製備用溶液，如：0.05，0.10，0.20，0.30，0.50 mg/L，或其他適當之序列濃度。並依檢測結果之波峰面積、高度或感應強度與注入濃度的關係，製作各別待測陰離子之檢量線（如檢測器條件、移動相溶液或試劑改變時，均應重新校正儀器）。

### （三）樣品檢測

如有需要先將樣品通過 0.2 或 0.22  $\mu\text{m}$  之濾膜過濾後，以去除樣品中的微粒。選擇適當體積之樣品迴路(Sample loop)，用乾淨之注射針筒將樣品以手動方式注入樣品迴路，並確實使樣品迴路充滿樣品，打開注入樣品迴路開關，使樣品隨移動相溶液流入離子層析儀中（亦可依個別儀器的自動化樣品注入設備操作），並依波峰面積、高度或感應強度，由檢量線求得樣品中陰離子之濃度。

### F. 結果處理：

（一）由樣品溶液測得之波峰面積、高度或感應強度，代入檢量線可求得溶液中各個陰離子之濃度(mg/L)，再依下式計算樣品中各個陰離子之濃度(mg/L)。

$$A = A' \times F$$

A：樣品中各陰離子之濃度(mg/L)

A'：由檢量線求得樣品溶液中各陰離子之濃度(mg/L)

F：稀釋倍數。

(二) 由上述(一)陰離子檢測結果，經換算得  $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$  及  $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$  之濃度(mg/L)。

$$\text{NO}_2^- \quad (\text{mg/L}) \times 0.304 = \text{NO}_2^- - \text{N} \quad (\text{mg/L})$$

$$\text{NO}_3^- \quad (\text{mg/L}) \times 0.226 = \text{NO}_3^- - \text{N} \quad (\text{mg/L})$$

$$\text{PO}_4^{3-} \quad (\text{mg/L}) \times 0.326 = \text{PO}_4^{3-} - \text{P} \quad (\text{mg/L})$$

表 4.4 七種陰離子配製儲備標準溶液其乾燥試藥之取用量

陰離子	標準品	取用量(g/L)
$\text{F}^-$	NaF	2.210
$\text{Cl}^-$	NaCl	1.6485
$\text{Br}^-$	NaBr	1.2876
$\text{NO}_3^-$	$\text{NaNO}_3$	1.3707
$\text{NO}_2^-$	$\text{NaNO}_2$	1.4998
$\text{PO}_4^{3-}$	$\text{KH}_2\text{PO}_4$	1.4330
$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{K}_2\text{SO}_4$	1.8141

置於乾燥器中乾燥至恆重，勿在烘箱內乾燥。

#### 4.6.2 TCLP毒物特性溶出試驗

本試驗所依據之準則為NIEA R201.14C、M104.01C、R314.12C。

##### 4.6.2.1 鎘、鉛NIEA R201.14C、M104.01C

###### A. 方法概要：

(一) 本溶出程序係為配合「有害事業廢棄物認定標準」附表四之毒性特性溶出程序(Toxicity Characteristic Leaching Procedure, TCLP)溶出標準所訂程序，若事業廢棄物經總量分析顯示其中不含待測物或待測物之濃度低於溶出標準，則不必操作本溶出程序；操作步驟中任

一部分萃出液任一待測物之濃度高於此標準，或以瓶式萃取所得之任一揮發性成分濃度高於此標準時，則不須繼續進行其他萃取步驟或萃出液分析。

(二) 乾固體含量小於 0.5% 之液體廢棄物，經由 0.6~0.8  $\mu\text{m}$  之玻璃纖維濾紙過濾所得之濾液，即視為 TCLP 之萃出液，俟分析後得待測物之濃度。

(三) 含液相之廢棄物，其乾固體含量大於或等於 0.5% 時，將廢棄物過濾分離後，濾液部分視為 TCLP 之萃出液，保存待分析；固相則視需要將顆粒減小後，以 20 倍重的萃取液萃取；萃取液之選擇依廢棄物固相酸鹼性而定，測試揮發性待測物（表 4.5）時，須使用特殊的萃取容器。萃取後以 0.6~0.8  $\mu\text{m}$  之玻璃纖維濾紙過濾，濾液視為 TCLP 之萃出液。

(四) 固相廢棄物經萃取所得之萃出液與液相濾液若無任一待測物濃度超過溶出標準時，則個別分析後，將結果以體積權重計算平均濃度，得待測物之濃度。

#### B. 適用範圍：

本溶出試驗方法係用於測試固相、液相或多層相之廢棄物中有機、無機待測物之移動性（Mobility）。

#### C. 設備：

(一) 旋轉裝置：如圖 4.5 所示。

## (二) 萃取容器

1. 零空間萃取容器 (Zero-Headspace Extraction Vessel, ZHE): 如圖 4.6 所示。
2. 瓶式萃取容器(Bottle Extraction Vessel): 欲測試廢棄物中非揮發性成分時，需使用足以容納樣品及萃取液之瓶罐。

## (三) 過濾裝置 (過濾宜在煙櫥中進行)

1. ZHE: 欲測試廢棄物中揮發性成分時，使用此種容器過濾，其必須能使用玻璃纖維濾紙，並能承受過濾所需的壓力 (50 psi)。
2. 過濾器: 測試非揮發性成分時，不論簡單真空單元或複雜的系統，需使用能支撐玻璃纖維濾紙且能承受過濾所需壓力 (達 50 psi 或以上) 之過濾器。
3. 過濾裝置之材質應為惰性且不溶出或吸附待測物。

## (四) 濾紙、磁攪拌器、粉碎機、pH 計

### (五) ZHE 萃出液收集裝置:

使用 泰勒 (Tedlar) 袋或以玻璃、不銹鋼、鐵氟龍製之氣密式注射器 (Syringe)，以收集濾液或萃出液，或用以混和濾液及萃出液。

### (六) ZHE 萃取液傳送裝置:

任何可以傳送萃取液而不改變其性質之裝置皆可 (如正推量或蠕動泵浦、氣密式注射器、加壓過濾器或其他零空間萃取的裝置)。

## (七) 天平、燒杯或錐形瓶、錶玻璃、烘箱

## D. 試劑：

### (一) 試劑水

#### 一般試劑水：

適用於重金屬及一般檢測分析。通常將自來水先經過初濾及去離子樹脂處理，再經全套玻璃蒸餾器處理或逆滲透膜處理，以避免蒸餾器或滲透膜污染。

### (二) 所有測試中所用的藥品純度必須至少為分析級試藥。

#### 1. 硝酸 ( $\text{HNO}_3$ ) 溶液，1 N：

將 64 mL 濃硝酸緩慢加入約 800 mL 試劑水中，定容至 1 L。

#### 2. 氫氧化鈉 ( $\text{NaOH}$ ) 溶液，1 N：

溶解 40 g 氫氧化鈉於適量試劑水中，再定容至 1 L。

#### 3. 鹽酸 ( $\text{HCl}$ ) 溶液，1.0 N：

將 83 mL 濃鹽酸緩慢加入約 800 mL 試劑水中，定容至 1 L。

#### 4. 冰醋酸 ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ )：分析級試藥。

#### 5. 濃硝酸：分析級試藥。

### (三) 萃取液

#### 1. 萃取液 A：

在 1 L 量瓶中，將 5.7 mL 冰醋酸加入 500 mL 試劑水中，再加入 64.3 mL 1 N 氫氧化鈉溶液，稀釋至刻度。此溶液之 pH 為  $4.93 \pm 0.05$ ，使用前檢查 pH 值。

## 2. 萃取液 B：

在 1 L 量瓶中，將 5.7 mL 冰醋酸加入試劑水中，稀釋至刻度。

此溶液之 pH 為  $2.88 \pm 0.05$ ，使用前檢查 pH 值。

3. 應經常檢查萃取液是否有不純物造成干擾，若發現有不純物或 pH 不符上述規範，則應重新配製。

### E. 步驟：

操作流程如圖 4.7。

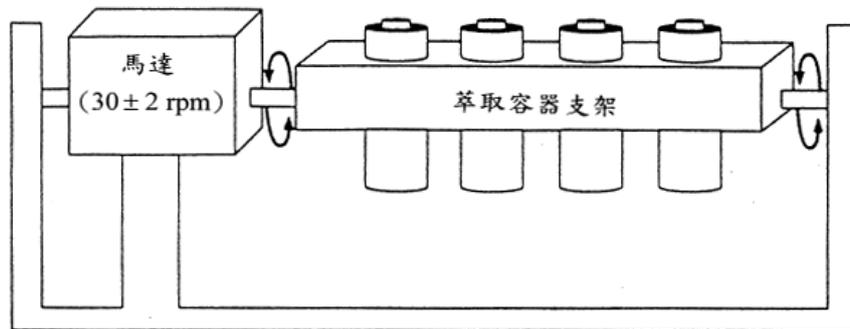


圖 4.5 旋轉裝置 (行政院環境保護署環境檢驗所，2009)

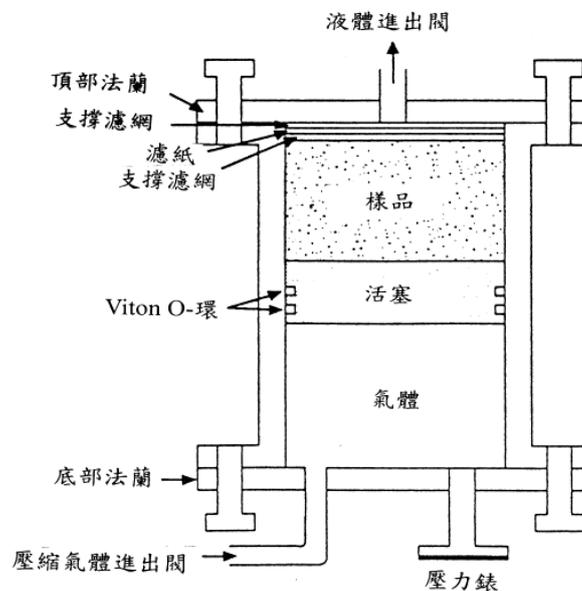


圖 4.6 零空間萃取器(ZHE) (行政院環境保護署環境檢驗所，2009)

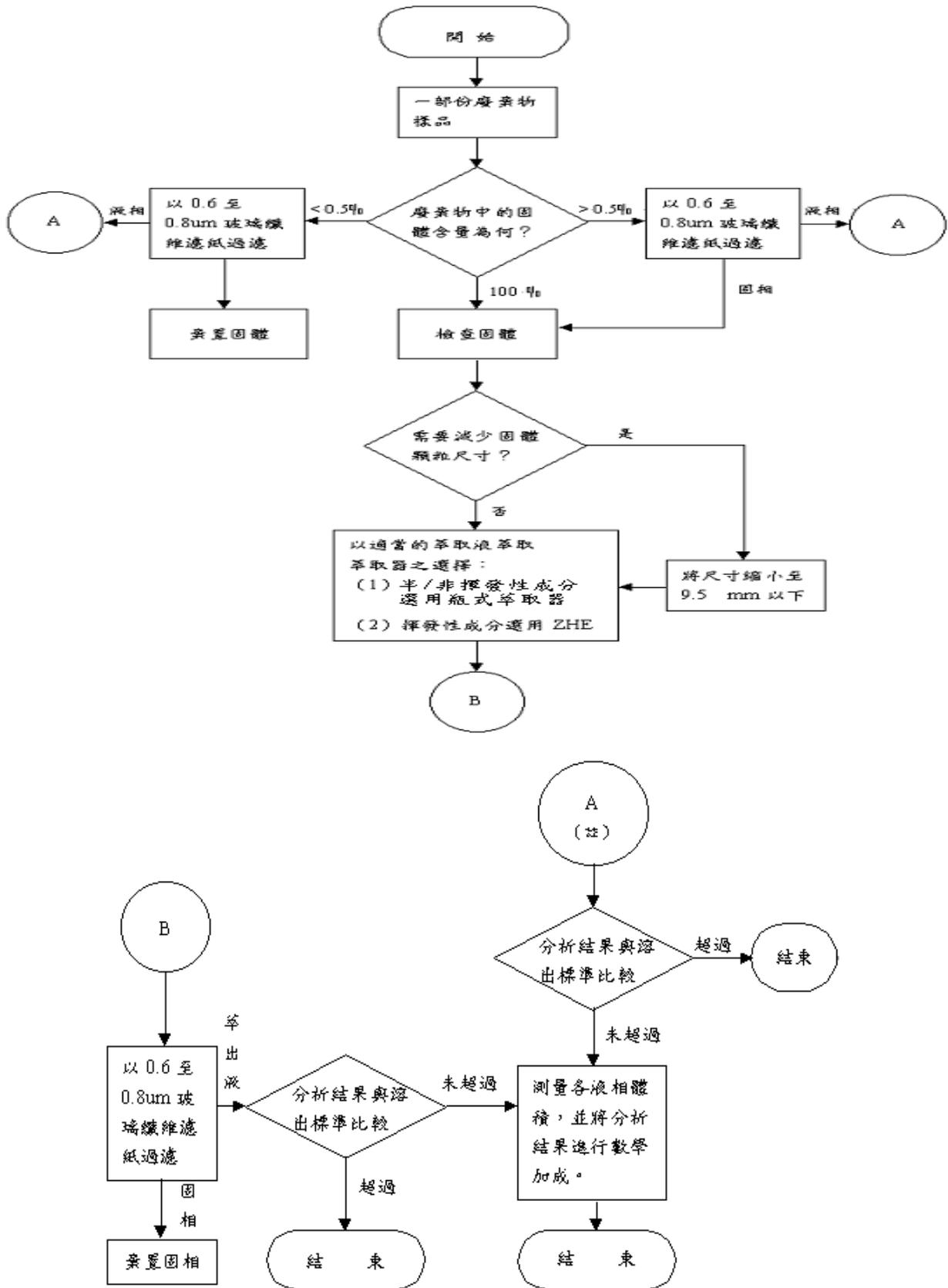


圖 4.7 TCLP 流程圖 (行政院環境保護署環境檢驗所，2009)

表 4.5 揮發性待測物 (行政院環境保護署環境檢驗所, 2009)

化 合 物	溶出標準 (mg/L)
丙酮 acetone	—
苯 benzene	0.5
正丁醇 n-butyl alcohol	—
二硫化碳 carbon disulfide	—
四氯化碳 carbon tetrachloride	0.5
氯苯 chlorobenzene	100.0
氯仿 chloroform	6.0
1,2-二氯乙烷 1,2-dichloroethane	0.5
1,1-二氯乙烯 1,1-dichloroethylene	0.7
乙酸乙酯 ethyl acetate	—
乙苯 ethyl benzene	—
二乙醚 ethyl ether	—
異丁醇 isobutanol	—
甲醇 methanol	—
二氯甲烷 methylene chloride	—
甲基乙基酮 methyl ethyl ketone	200.0
甲基異丁基酮 methyl isobutyl ketone	—
四氯乙烯 tetrachloroethylene	0.7
甲苯 toluene	—
1,1,1-三氯乙烷 1,1,1-trichloroethane	—
三氯乙烯 trichloroethylene	0.5
三氯氟甲烷 trichlorofluoromethane	—
1,1,2- 三 氯 1,2,2- 三 氟 乙 烷 1,1,2-trichloro-1,2,2-trifluoroethane	—
氯乙烯 vinyl chloride	0.2
苯乙烯 styrene	—

註 1：檢測表列中的化合物須使用零空間萃取容器。

註 2：係指「有害事業廢棄物認定標準」附表四的溶出標準。

#### 4.6.2.2 汞R314.12C

##### A. 方法概要：

事業廢棄物萃出液樣品在分析前須經過消化步驟後才能進行總汞的分析。消化後樣品溶液中汞先被還原成元素態汞再經由氣體載送進入冷蒸氣原子吸收光譜儀，在253.7 nm波長處進行偵測。

##### B. 適用範圍：

本方法適用於事業廢棄物萃出液或水溶液樣品之檢測。本方法以批次式汞冷蒸氣系統之儀器偵測極限為0.02 g。

##### C. 設備及材料：

- (一) 原子吸收光譜儀或同類型儀器。
- (二) 汞中空陰極燈管或無電極放電燈管。
- (三) 記錄器、水浴槽、量筒、分析天平。
- (四) 吸接管、空氣泵、流量計、導氣管線、乾燥管。
- (五) 汞冷蒸氣產生器：

1、批次式汞冷蒸氣系統：裝置如圖4.8，其中a為密閉系統。b、c為開放系統。

2、連續式汞冷蒸氣系統：裝置如圖4.9，其中a為連續產生系統。b為流動注入系統。連續式汞冷蒸氣儀器之定量方法為：濃度對吸收度之檢量線，在上機前樣品必須先行定容，以便換算樣品濃度。

##### D. 試劑：

所有檢測時使用的試劑化合物除非另有說明，否則必須是分析試

藥級。若須使用其他等級試藥，在使用前必須要確認該試劑的純度足夠高，使檢測結果的準確度不致降低。

(一) 試劑水：參照「事業廢棄物檢測方法總則」之規格。除非特別指定，否則本方法所指的水皆為試劑水。

(二) 濃硫酸：試藥級低汞含量。

(三) 0.5 N 硫酸：取 14.0 mL 濃硫酸稀釋至 1 L。

(四) 濃硝酸：低汞含量，若試劑空白值太高，則硝酸必須蒸餾。

(五) 還原劑

1、硫酸亞錫溶液：

加25 g硫酸亞錫於250 mL 0.5 N之硫酸，此為一懸浮溶液，使用時應持續攪拌，亦可用10 %氯化亞錫溶液代替。

2、氯化亞錫溶液：

加10 g氯化亞錫於含20 mL濃鹽酸之水中，稀釋至100 mL。

3、氫硼化鈉溶液：

以水溶解3 g氫硼化鈉與3 g氫氧化鈉，稀釋至250 mL。

註：上述兩種亞錫溶液久置易分解，應於使用前配製。若溶液有懸浮狀態形成時，於使用時應連續攪拌之。上述溶液之體積足夠供應20個樣品檢驗之所需。

(六) 氯化鈉-硫酸羥胺溶液：

以水溶解 120 g 氯化鈉 (NaCl) 與 120 g 硫酸羥胺 ((NH<sub>2</sub>OH)<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)，稀釋至 1 L。亦可使用鹽酸羥胺 (NH<sub>2</sub>OH-HCl)

取代硫酸羥胺  $(\text{NH}_2\text{OH})_2\text{-H}_2\text{SO}_4$ 。

(七) 低汞高錳酸鉀溶液，5 % (w/v)：

溶解50 g高錳酸鉀 ( $\text{KMnO}_4$ ) 於水中，稀釋至1 L。

(八) 過硫酸鉀溶液，5 % (w/v)：

溶解 50 g 過硫酸鉀 ( $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ ) 於水中，稀釋至 1 L。

(九) 汞儲備溶液：

溶解 0.1354 g 氯化汞 ( $\text{HgCl}_2$ ) 於 70 mL 水中，加入 1 mL 濃硝酸，以水稀釋體積至 100 mL ( $1.0 \text{ mL} = 1.0 \text{ mg Hg}$ )，亦可使用經確認之市售儲備溶液。

(十) 汞標準溶液：

連續稀釋汞儲備溶液製備成 0.1 g/mL 之標準溶液，此標準溶液及儲備溶液的稀釋液必須每日配製，標準溶液以硝酸酸化使含 0.15 % 硝酸，酸應於未加入任何溶液之前加入量瓶中。

#### E. 步驟：

(一) 樣品前處理：(依實驗室系統擇一處理)

##### 1. 連續式汞蒸氣系統

(1) 精取50 mL或適量之萃出液至 300 mL反應瓶（如BOD瓶）中。

(2) 加入2.5 mL 濃硫酸和 1.3 mL 濃硝酸於每個反應瓶並混合均勻。

(3) 再加 7.5 mL或適量高錳酸鉀溶液於每個反應瓶，搖勻後靜置 15 分鐘，若紫色褪色則再加高錳酸鉀溶液直至顏色不褪。空白試劑與標準溶液亦須加入等量的高錳酸鉀。

(4)再加入4 mL 過硫酸鉀溶液至每一瓶中，置於 95°C 水浴中加熱 2 小時後，取出並冷卻至室溫。

(5)加入足夠的氯化鈉-硫酸羥胺溶液於各反應瓶以還原過量之高錳酸鉀，加入時輕搖反應瓶使完全反應均勻，等候至少 30 秒直到顏色消失為止（註：因可能有氯氣會釋出，在抽氣櫃中操作此步驟）。

(6) 將溶液移入100 mL量瓶中，加試劑水至標線後，依據儀器操作說明上機分析。

## 2. 批次式汞蒸氣系統

(1)精取100 mL或適量之萃出液至 300 mL反應瓶（如BOD瓶）。

(2)加入 5 mL 濃硫酸和 2.5 mL 濃硝酸混合均勻。

(3)每個樣品中再加 15 mL 高錳酸鉀溶液，搖勻後靜置 15 分鐘，若紫色褪色則再加高錳酸鉀溶液直至顏色不褪。空白試劑與標準溶液亦須加入等量的高錳酸鉀。

(4)再加入8 mL 過硫酸鉀溶液至每一瓶中，並於 95°C 水浴中加熱 2 小時，取出並冷卻至室溫。

(5)冷卻後加入 6 mL 氯化鈉-硫酸羥胺溶液以還原過量之高錳酸鉀，加入時輕搖反應瓶使完全反應均勻，等候至少 30 秒直到顏色消失為止（註：因可能有氯氣會釋出，在抽氣櫃中操作此步驟）。

(6)在上機前再分別加入 5 mL 氯化亞錫或硫酸亞錫溶液於反應瓶，並迅速連接樣品瓶至通氣裝置。

## (二) 檢量線製備：

取適當量標準溶液，由高濃度至低濃度序列稀釋成五組不同濃度之檢量線製備用溶液(不含空白點)，分別置於300 mL反應瓶(如BOD瓶)，依E(一)之步驟進行前處理。(例如:取 0.0、0.5、1.0、2.0、5.0、10.0 mL 汞標準溶液(0.1 g/mL)置入 300 mL反應瓶(如BOD瓶)，加入水使每瓶溶液總體積為50 mL或100 mL，依前述步驟進行前處理。對連續式汞蒸氣系統其濃度為0.0、0.5、1.0、2.0、5.0、10.0 g/L

## (三) 儀器分析：依照分析儀器之操作步驟

### 1.使用批次式汞冷蒸氣系統：

靜置樣品，調整流速為 1~2 L/min 之循環幫浦持續通氣，吸收值在 30 秒內可達最大，記錄其最大值後，打開旁路並持續曝氣使吸收度降至最低。再關掉旁路，從反應瓶移開玻璃曝氣管，繼續通氣。一旦圖譜之紀錄回復至基線時，除去反應瓶之瓶塞連同所附之玻璃濾板，另以內裝 1/100 (V/V)硝酸溶液之反應瓶更替，清洗系統數秒鐘，待圖譜之紀錄回復至基線並穩定後，繼續測定其他標準溶液

### 2.連續式汞冷蒸氣系統：

上機時使用氫硼化鈉或氯化亞錫之還原劑，當吸收度穩定時即可讀取。

(四) 建立分析汞之檢量線(批次式汞冷蒸氣系統：g vs 吸收度；連續式汞冷蒸氣系統：g/L vs 吸收度)，利用未知樣品的吸收度代入檢量線以求取質量或濃度。

## F. 結果處理：

### (一) 連續式汞冷蒸氣系統

樣品中汞之濃度(mg/L)可由檢量線求得。

依下式計算樣品中汞濃度：

$$\text{樣品中汞濃度(mg/L)} = A \times V1 / (V \times 1000)$$

A：由檢量線求得之汞濃度(g/L)。

V：前處理之取樣體積 (mL)。

V1：樣品經前處理後最終定容體積。

### (二) 批次式汞冷蒸氣系統

樣品中汞之濃度(mg/L)可由檢量線求得。

依下式計算水樣品中汞濃度：

$$\text{樣品中汞濃度(mg/L)} = A / V$$

A：由檢量線求得之汞濃度(g)。

V：前處理之取樣體積 (mL)。

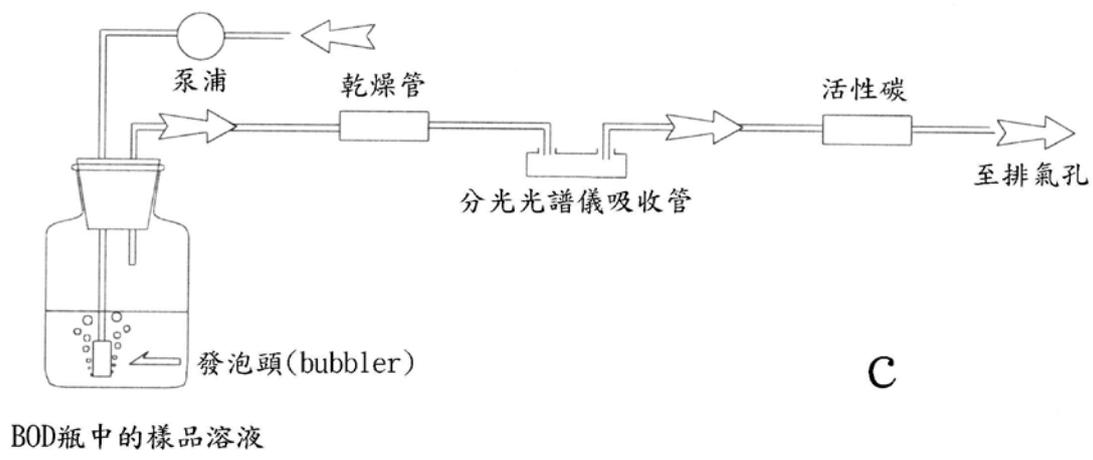
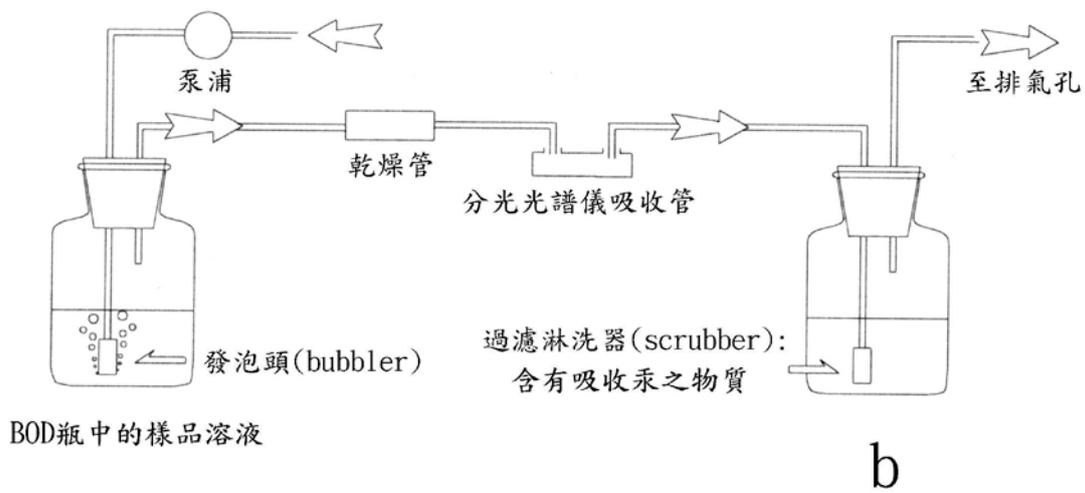
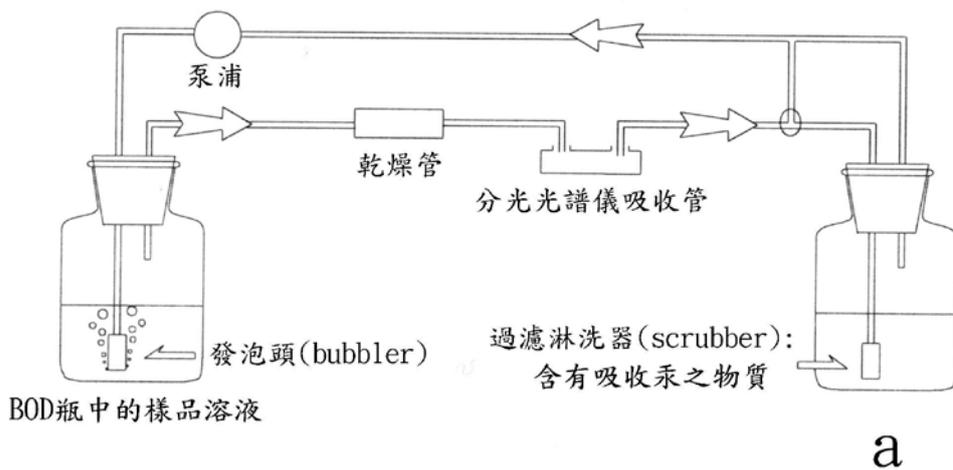
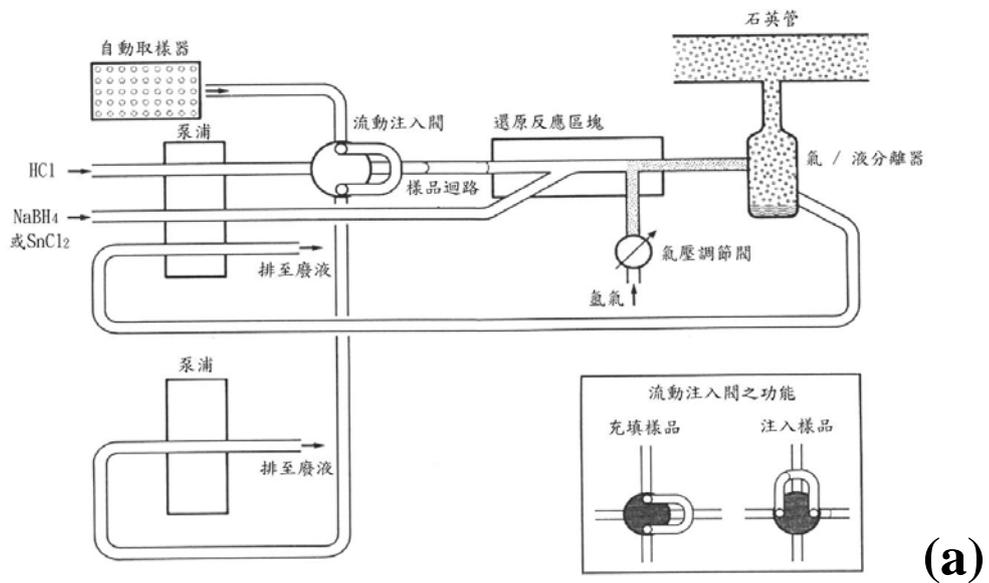
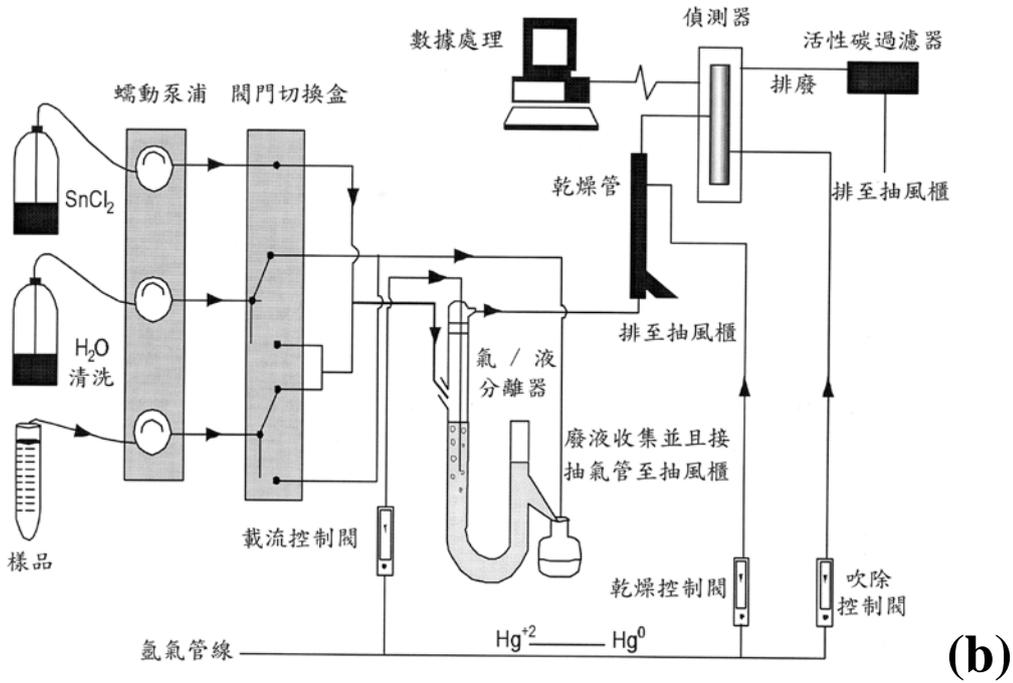


圖4.8 批次式汞冷蒸氣系統(a為密閉系統b、c為開放系統)

(行政院環境保護署環境檢驗所，2009)



(a)



(b)

圖4.9 連續式汞冷蒸氣系統(a：連續產生系統 b：流動注入系統)

(行政院環境保護署環境檢驗所，2009)

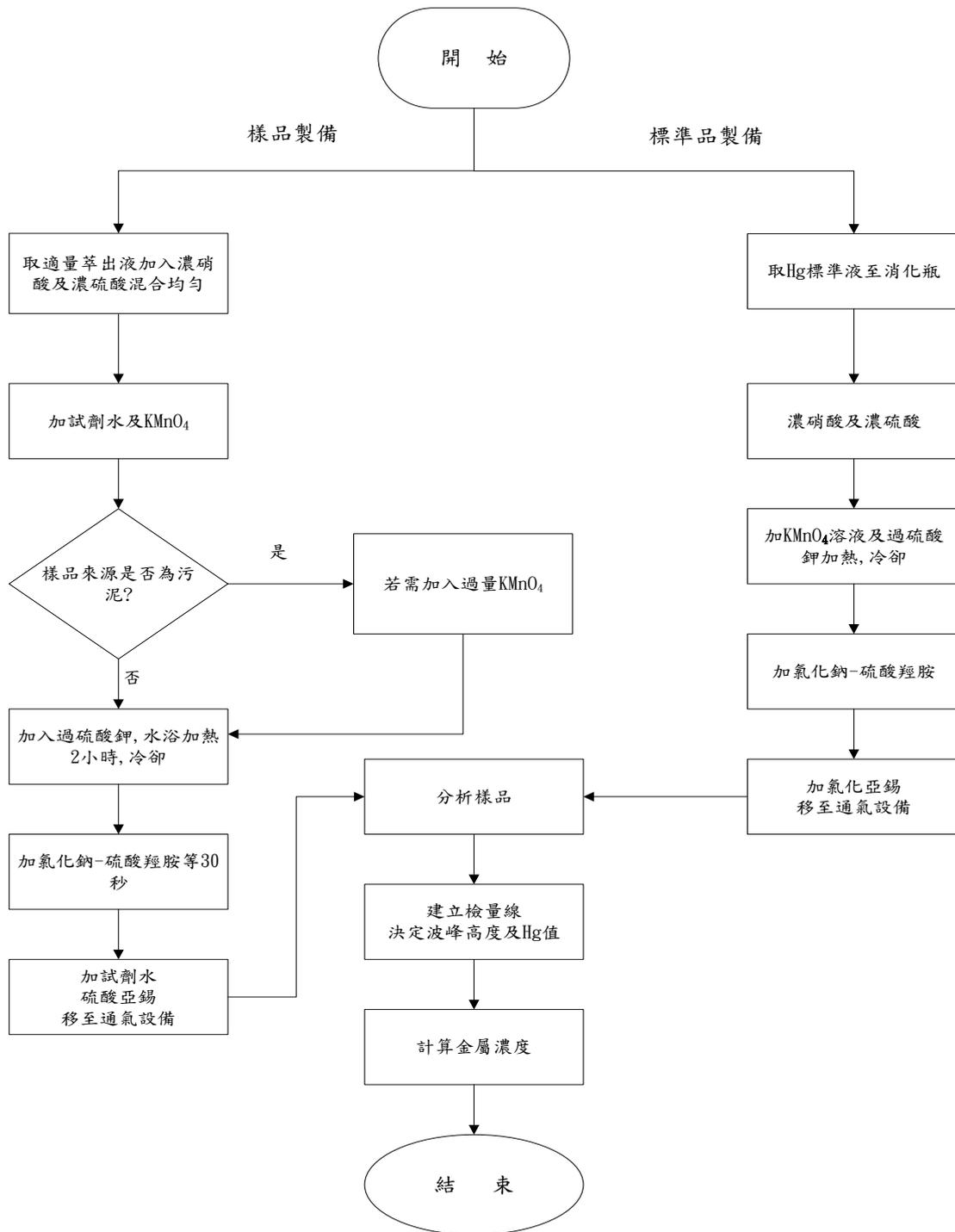


圖4.10 事業廢棄物萃出液中汞檢測方法流程圖

(行政院環境保護署環境檢驗所NIEA R314.12C, 2006)

#### 4.6.3 化學元素檢測試驗

本試驗所依據之準則為行政院環境保護署環境檢驗所 NIEA

M104.01C, 試驗步驟如前述所示。

## 4.7 淤泥混凝土工程性質試驗

### 4.7.1 變水頭試驗

本試驗所依據之準則為美國 ASTM D2434-68。

A.實驗目的：求土壤的滲透性係數K值。

B.試驗原理：有關滲透性係數或滲流量的分析或試驗，皆以達西定理

(Darcy's Law)為基準，達西定理說明如下：

$$q=AV=A(k \cdot i)=A(k \cdot \frac{h}{L}) \quad (4.7.1)$$

試中： q 為單位時間的滲流量。

A 為雨水流方向成垂直的土壤斷面積。 V 為水流速度。

k 為滲透性係數。 i 為水力坡降。

L 為水流流經土壤的長度。 h 為水頭差。

滲透試驗可分為定水頭、變水頭及壓密試驗三種，一般  $k > 10^{-4}$  m/s 者適用定水頭試驗， $10^{-7}$  m/s  $< k < 10^{-4}$  m/s 者適用變水頭試驗， $k < 10^{-7}$  m/s 者則適合以壓密試驗試驗之。

C.實驗儀器：

- 1.室內透水試驗儀一組（包含定水頭及變水頭試驗）
- 2.凡士林、藥刀、計時器、游標尺、電子秤、捲尺。

D.試體準備：

本試驗重模試體之準備步驟如下：

1. 試體底部依序置放一透水石及濾紙，圓柱壓克力模上下塗勻凡士

林以防漏水。

2. 土壤分層置放夯實並至試驗條件。
3. 土壤頂部依序放入濾紙和透水石。
4. 量測土壤的體積並秤其重量。
5. 計算土壤的單位重，若是非凝聚性土壤可量其孔隙比或相對密度。
6. 試體裝置如圖 4.11 所示。

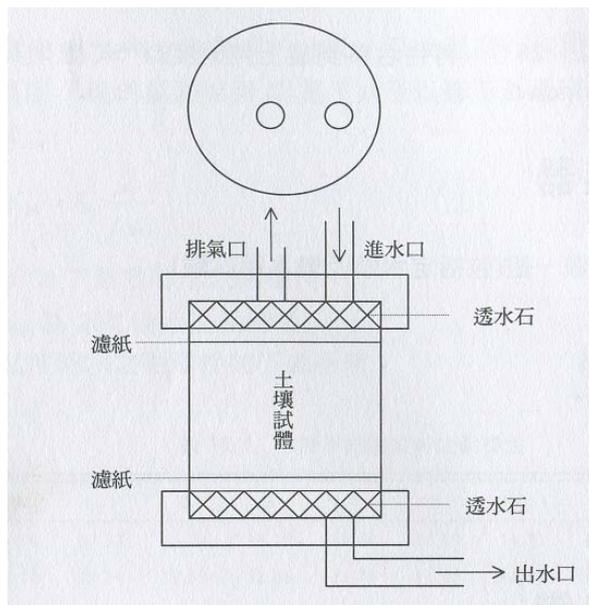


圖4.11 室內透水試驗裝置圖 (取自全華-土壤力學試驗)

#### E. 實驗步驟：

1. 將準備好之試體與透水試驗儀連接成如圖 4.12 所示
2. 量測試體的直徑  $D$ 、高度  $L$ 。
3. 打開試體室座上的排氣閥，並將入水口及出水口打開，使水流經土壤，在關閉試體底部的出水口閥門，使水充滿土壤試體，直至飽和為止，關閉排氣閥，檢查周邊是否有漏水，若無漏水則繼續下列步驟。

4.量測垂直距離  $h_1$ ，並紀錄時間  $t_1$ 。

5.打開試體上下端的進水口出水口閥門，此時水將自試體頂部流經土壤試體至底部流出，待流經一段時間後，記錄時間  $t_2$  並關閉出入口，量測水頭差  $h_2$ 。

6.計算滲透性係數：
$$K = \frac{aL}{\frac{\pi}{4}D^2(t_2 - t_1)} \ln \frac{h_1}{h_2} \quad (4.7.2)$$

試中： $a$  為豎管的斷面積。

7.重新準備試體，重複上述 1 ~ 6 步驟，至少三次。

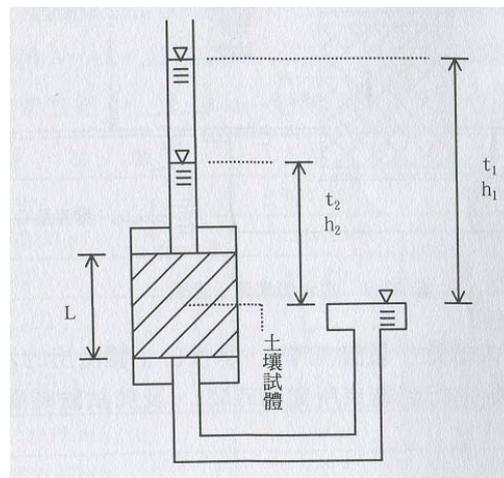


圖4.12變水頭裝置示意圖 (取自全華-土壤力學試驗)

#### 4.7.2 淤泥混凝土之配比設計

為提升淤泥最大資源化之應用，淤泥混凝土之配比設計除固化劑外，不使用其他傳統摻料。配比設計首先以單軸壓縮強度為首要考量，其次則為混凝土之工作性，以坍度試驗測定之；最後則針對淤泥混凝土代表性配比進行土木工程相關產品製作。

### ※ 配比設計之計算方式

淤泥混凝土之配比設計用量依下列公式計算：

$$\text{灰水比}(C/W) = \text{水泥重} / \text{水重} \quad (4.7.3)$$

$$\text{水固比}(W/S) = \text{水重} / \text{固體重} \quad (4.7.4)$$

$$\text{淤泥粒料重} = \text{固體重} - \text{水泥重} \quad (4.7.5)$$

各材料用量計算以下例說明：

→ 假設控制參數為  $C/W = 0.4$  ，  $W/S = 0.4$

(1) 試驗固體重假設為1,000g

(2) 將假設之固體重帶入式(4.7.4)中，可求得用水量為400g。

(3) 將用水量帶入式(4.7.3)中，可求得拌合所需水泥量為160g。

(4) 最後將水泥量160g帶入式(4.7.5)中，可得淤泥粒料重840g。

故淤泥混凝土 $C/W = 0.4$ ， $W/S = 0.4$ ，所需之各材料添加量即可求得。

## 第五章 研究成果

本研究以試驗方式探討淤泥混凝土應用於土木工程相關產品製作之可行性。為求淤泥之最大資源化再利用，本試驗係以淤泥和水泥拌合混凝土試體方式進行，著重探討淤泥混凝土之工程性質，依實際工程考量求出適當且合理之配比設計並提出相關之結論與建議。

### 5.1 物理性質試驗結果

#### 5.1.1 比重試驗成果

$$G_s = \frac{W_s}{W_s + W_{fw} - W_{fsw}}$$

A. 試驗計算：比重  $G_s$  可由下式計算得到：

試驗次數	1	2	3
比重瓶編號 (1)	①	②	③
空瓶重量 g (2)	38.32	38.51	34.95
(瓶+乾土)重量 g (3)	54.32	54.51	50.95
(乾土)重量 g (4)=(3)-(2)	16	16	16
(瓶+乾土+水)重量 g (5)	114.26	108.67	106.63
(瓶+滿水)重量 g (6)	104.54	98.94	96.89
乾土所排除水重量 g (7)=(4)+(6)-(5)	6.28	6.45	6.26
比重 $G_s$ (8)=(4)/(7)	2.55	2.55	2.56
平均比重 $G_s$ (9)=(8)平均值	2.55		

兩比重瓶同時試驗，其結果相差不超過 0.03。

## B. 試驗成果：

淤泥試樣取自石門水庫第十三號沉澱池，其比重平均值為2.55，係由比重試驗反覆實驗三次所得之平均值。由前人研究所得之石門水庫第七號沉澱池比重平均值約為2.71，與本次試驗取樣來源略有不同，故其比重試驗所得之值略有出入。

### 5.1.2 液性限度試驗成果

#### A. 試驗計算：

水 / 淤泥 (g)	15 / 50	16 / 50	17.5 / 50	19 / 50	20 / 50
打擊數 N	56	44	37	26	12
皿編號	2-2	2-8	2-5	2-7	2-6
皿重量	24.06	28.91	26.9	28.24	25.53
(濕土+皿)重量 (g)	31.87	38.93	40.1	39.16	37.1
(乾土+皿)重量 (g)	30.19	36.67	37.02	36.34	33.86
乾土重量	6.13	7.76	10.12	8.1	8.33
含水重量(g)	1.68	2.26	3.08	2.82	3.24
含水比(%)	27.41%	29.12%	30.43%	34.81%	38.90%
液限 LL	35				

#### B. 試驗成果：

由於淤泥產生來源之變異性，其細粒料組成亦因而不同。當黏土含量較多時，其液性限度為35，塑性限度22.18。當粉土含量較多時，其液性限度和塑性指數稍顯下降，其土壤分類依統一土壤分類法 (USCS)屬低塑性黏土 (CL)。

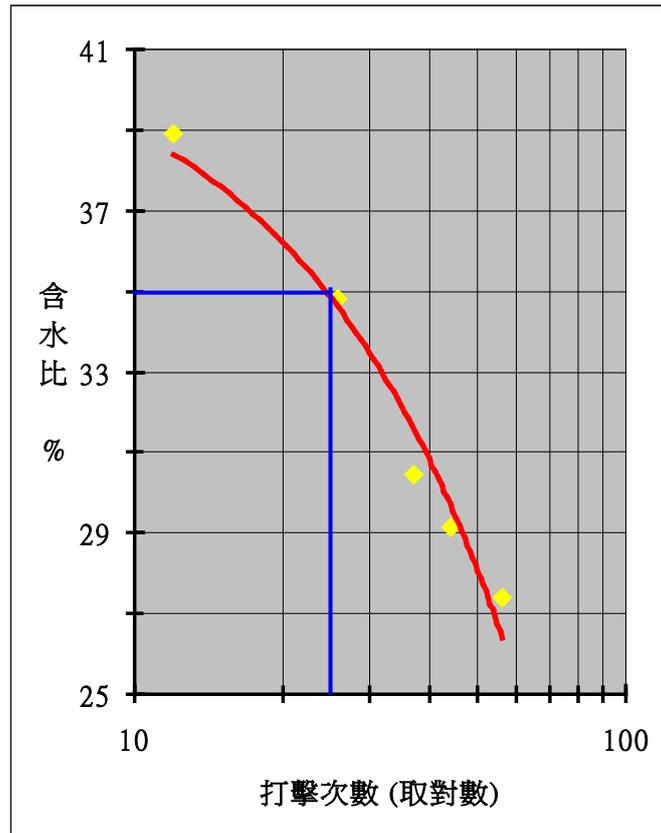


圖 5.1 液性限度試驗成果

### 5.1.3 塑性限度試驗成果

A. 試驗計算：

試驗次數	1	2	3
皿編號	3 - 4	3 - 2	3 - 3
皿重量(g)	29	30.81	28.81
(濕土+皿)重量(g)	30.06	32.75	30.82
(乾土+皿)重量(g)	29.88	32.4	30.43
乾土重量(g)	0.88	1.59	1.62
含水重量(g)	0.18	0.35	0.39
含水比(%)	20.45	22.01	24.07
塑限 pL	22.18		
塑性指數	12.82		

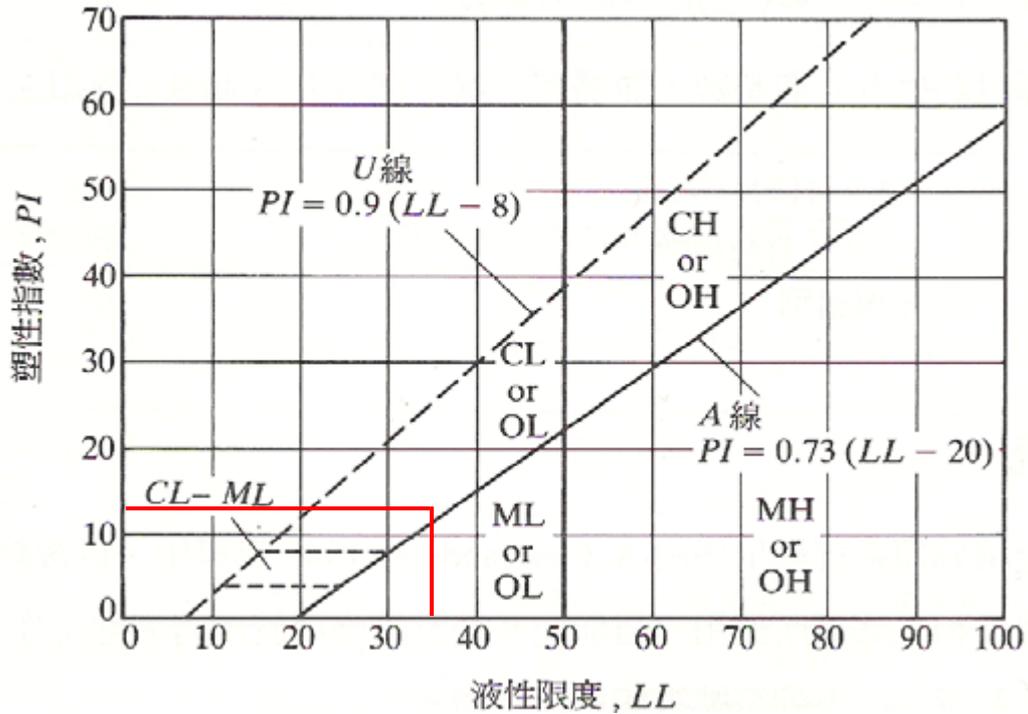


圖5.2 塑性圖 (取自全華-土壤力學試驗)

### 5.1.4 粒徑分析試驗成果

A. 試驗計算：

歷時 (min)	$\gamma$	$\gamma_w$	溫度 (°C)	$\gamma - \gamma_w$	Zr(cm)	Gs	D(mm)	N(%)
0	1.04	1	21	0.04	5.6	2.552		
0.25	1.04	1	21	0.04	5.6	2.552	0.065834	65.77
0.5	1.04	1	21	0.04	5.6	2.552	0.046552	65.77
1	1.04	1	21	0.04	5.6	2.552	0.032917	65.77
2	1.04	1	21	0.04	5.6	2.552	0.023276	65.77
5	1.04	1	21	0.04	5.6	2.552	0.014721	65.77
15	1.04	1	21	0.04	5.6	2.552	0.008499	65.77
30	1.04	1	21	0.04	5.6	2.552	0.00601	65.77
60	1.039	1	21	0.039	5.9	2.552	0.004362	64.13
250	1.03	1	21	0.03	8.4	2.552	0.00255	49.33
1440	1.02	1	21	0.02	11	2.552	0.001216	32.89

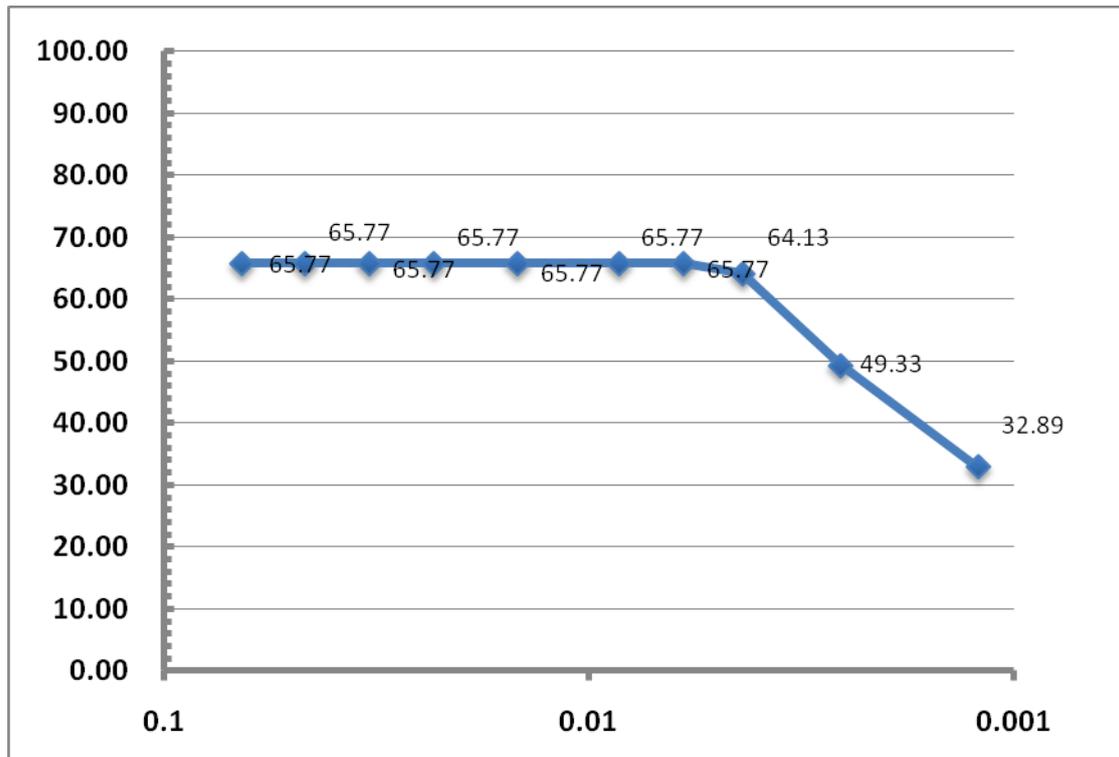


圖 5.3 -#200 粒徑分佈曲線

本處之粒徑分析試驗係使用「水洗法」進行。由於考慮淤泥烘乾後呈現龜裂塊狀分布，若採用研磨機研磨之，塊狀淤泥亦可磨碎成細粒狀，隨研磨時間增長，淤泥顆粒將呈現更細小之粉末狀，故考慮其顆粒具可磨碎性，若此用搖篩機進行粒徑分布試驗，其結果將不具代表性。

而由「水洗法」所得之試驗成果，石門水庫第十三號沉澱池之淤泥試樣全數通過 200 號篩，故粒徑分布曲線僅採用通過 200 號篩之粒徑作比重計試驗所得之粒徑。

## 5.2 化學性質試驗結果

### 5.2.1 氯離子含量檢測

依據CNS 1240 A2029「混凝土粒料」中，混凝土所使用之細粒料，其限制水溶性氯離子含量不得超出0.024%，且不得含有能與水泥中之鹼類發生反應，而使混凝土或水泥砂漿過度膨脹(即鹼骨材反應)之有害物質。而本研究所採用之石門水庫十三號沉澱池淤泥為拌合粒料，其氯離子含量為0.000738%，遠小於規範之限制，因此適合作為混凝土拌合之細粒料，其試驗分析表如表5.1所示。

表 5.1 氯離子含量檢測分析表

檢驗項目	單位	檢驗結果	檢驗方法	試驗標準	備註
氯鹽 (Cl)	mg/kg	7.38	離子層析法	—	

### 5.2.2 TCLP毒物特性溶出試驗

TCLP是依據環保署「事業廢棄物毒性特性溶出程序」(NIEA R201.11C)。其分析結果若超過法規標準者即為有害廢棄物，鉛為5.0mg/L，鎘為1.0mg/L，鉻為5.0mg/L，砷為5.0mg/L，汞為0.2mg/L。而本研究所採用之石門水庫十三號沉澱池淤泥為拌合粒料，未測出含鎘物質，且鉛及汞之含量亦遠小於規範之限制，因此適合作為混凝土拌合之細粒料，其試驗分析表如表5.2所示。

表中低於方法偵測極限之測定以「ND」表示，並註明其方法偵測極限值及單位(MDL)；高於方法偵測極限，但小於可定量極限值(QDL)時，註明可定量極限值及單位。

表 5.2 TCLP 毒物特性溶出試驗分析表

檢驗項目	單位	檢驗結果	檢驗方法	試驗標準	備註
鎘離子	mg/L	ND	NIEA R201.14C NIEA M104.01C	<1.0	MDL=0.0146
鉛離子	mg/L	<0.076	NIEA R201.14C NIEA M104.01C	<5.0	QDL=0.076
汞離子	mg/L	<0.0015	NIEA R201.14C NIEA R414.12C	<0.2	QDL=0.0015

### 5.2.3 化學元素檢測試驗

本計畫(2010)針對石門水庫十三號沉澱池淤泥進行物質檢定之結果，水庫淤泥之主要化學成分為SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 及Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>。將本試驗數據與前人張孟弘、黃忠信等之試驗數據相比較，各項化學成分比例相差懸殊，最後歸因於近年來氣候異常變化，瞬時雨量大，造就高淤積量，以及取樣的地點、試驗方式皆有所不同，因此本次試驗可提供近年水庫淤泥成分變化之參考，其確切原因仍有待深入研究。

表 5.3 化學元素檢測試驗分析表

檢驗項目	單位	檢驗結果	檢驗方法	備註
三氧化二鐵 (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	mg/kg	6.34×10 <sup>4</sup>	NIEA M104.01C	6.34 %
二氧化矽 (SiO <sub>2</sub> )	mg/kg	3.63×10 <sup>5</sup>	NIEA M104.01C	36.3 %
氧化鋁 (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	mg/kg	3.78×10 <sup>4</sup>	NIEA M104.01C	3.78 %

### 5.3 淤泥混凝土工程性質試驗結果

本試驗類別包含配比試驗、單軸壓密試驗、變水頭試驗、乾縮裂縫觀察試驗等，以下將透過各項試驗結果之展示與分析，對淤泥混凝土之產品性質與其應用面作更進一步的了解。

#### 5.3.1 配比試驗成果

##### 一、淤泥混凝土(1)

此階段係以水固比 0.3 為固定因子，並假設灰水比為自變數，分別為 0.5、0.7、0.9，觀察坍度與抗壓強度之變化狀況與水、水泥、淤泥等用量之相互關係。

表 5.1 淤泥混凝土：水固比/灰水比 = 0.3 / 0.5(0.7、0.9)

製作日期	試驗日期	養護天數	水固比 (W/S)	灰水比 (C/W)	水量 (g)	水泥量 (g)	淤泥量 (g)	坍度 (cm)	抗壓強度 (kPa)
3/25	4/1	7	0.3	0.5	6900	3450	19550	0	292.277
3/25	4/2	7	0.3	0.5	6900	3450	19550	0	304.048
3/25	4/2	7	0.3	0.5	6900	3450	19550	0	741.474
3/25	4/22	28	0.3	0.5	6900	3450	19550	0	300.226
3/25	4/22	28	0.3	0.5	6900	3450	19550	0	596.112
3/25	4/22	28	0.3	0.5	6900	3450	19550	0	460.747
3/25	5/20	56	0.3	0.5	6900	3450	19550	0	1127.363
3/25	5/20	56	0.3	0.5	6900	3450	19550	0	858.194
3/25	5/20	56	0.3	0.5	6900	3450	19550	0	6941.462
4/1	4/8	7	0.3	0.7	6900	4830	18170	0	500.222
4/1	4/8	7	0.3	0.7	6900	4830	18170	0	352.114
4/1	4/8	7	0.3	0.7	6900	4830	18170	0	489.431
4/1	4/29	28	0.3	0.7	6900	4830	18170	0	557.127
4/1	4/29	28	0.3	0.7	6900	4830	18170	0	695.892
4/1	4/29	28	0.3	0.7	6900	4830	18170	0	811.295

4/1	5/27	56	0.3	0.7	6900	4830	18170	0	1174.435
4/1	5/27	56	0.3	0.7	6900	4830	18170	0	686.798
4/1	5/27	56	0.3	0.7	6900	4830	18170	0	982.518
4/2	4/9	7	0.3	0.9	6900	6210	16790	0	625.761
4/2	4/9	7	0.3	0.9	6900	6210	16790	0	319.746
4/2	4/9	7	0.3	0.9	6900	6210	16790	0	655.182
4/2	4/30	28	0.3	0.9	6900	6210	16790	0	1103.710
4/2	4/30	28	0.3	0.9	6900	6210	16790	0	1034.296
4/2	4/30	28	0.3	0.9	6900	6210	16790	0	988.308
4/2	5/28	56	0.3	0.9	6900	6210	16790	0	1706.736
4/2	5/28	56	0.3	0.9	6900	6210	16790	0	614.376
4/2	5/28	56	0.3	0.9	6900	6210	16790	0	2905.314

## 二、淤泥混凝土(2)

此階段係以水固比 0.5 為固定因子，並假設灰水比為自變數，分別為 0.5、0.7、0.9，觀察坍度與抗壓強度之變化狀況與水、水泥、淤泥等用量之相互關係。

表 5.2 淤泥混凝土：水固比/灰水比 = 0.5 / 0.5(0.7、0.9)

製作日期	試驗日期	養護天數	水固比 (W/S)	灰水比 (C/W)	水量 (g)	水泥量 (g)	淤泥量 (g)	坍度 (cm)	抗壓強度 (kPa)
3/26	4/2	7	0.5	0.5	9966	4938	14994	4	1351.544
3/26	4/2	7	0.5	0.5	9966	4938	14994	4	2051.881
3/26	4/2	7	0.5	0.5	9966	4938	14994	4	1761.556
3/26	4/23	28	0.5	0.5	9966	4938	14994	4	1964.471
3/26	4/23	28	0.5	0.5	9966	4938	14994	4	1744.172
3/26	4/23	28	0.5	0.5	9966	4938	14994	4	
3/26	5/21	56	0.5	0.5	9966	4938	14994	4	2126.780
3/26	5/21	56	0.5	0.5	9966	4938	14994	4	2765.299
3/26	5/21	56	0.5	0.5	9966	4938	14994	4	3062.227
4/2	4/9	7	0.5	0.7	9966	6976	12956	7.4	2779.651
4/2	4/9	7	0.5	0.7	9966	6976	12956	7.4	3487.798
4/2	4/9	7	0.5	0.7	9966	6976	12956	7.4	2797.274

4/2	4/30	28	0.5	0.7	9966	6976	12956	7.4	3820.475
4/2	4/30	28	0.5	0.7	9966	6976	12956	7.4	4371.461
4/2	4/30	28	0.5	0.7	9966	6976	12956	7.4	4006.161
4/2	5/28	56	0.5	0.7	9966	6976	12956	7.4	6627.788
4/2	5/28	56	0.5	0.7	9966	6976	12956	7.4	7527.031
4/2	5/28	56	0.5	0.7	9966	6976	12956	7.4	7358.043
4/1	4/8	7	0.5	0.9	9966	8970	10963	10.2	4413.654
4/1	4/8	7	0.5	0.9	9966	8970	10963	10.2	4288.943
4/1	4/8	7	0.5	0.9	9966	8970	10963	10.2	3507.415
4/1	4/29	28	0.5	0.9	9966	8970	10963	10.2	6539.841
4/1	4/29	28	0.5	0.9	9966	8970	10963	10.2	5212.260
4/1	4/29	28	0.5	0.9	9966	8970	10963	10.2	6296.015
4/1	5/27	56	0.5	0.9	9966	8970	10963	10.2	9358.091
4/1	5/27	56	0.5	0.9	9966	8970	10963	10.2	7144.398
4/1	5/27	56	0.5	0.9	9966	8970	10963	10.2	7653.763

### 三、淤泥混凝土(3)

此階段係以水固比 0.7 為固定因子，並假設灰水比為自變數，分別為 0.5、0.7、0.9，觀察坍度與抗壓強度之變化狀況與水、水泥、淤泥等用量之相互關係。

表 5.3 淤泥混凝土：水固比/灰水比 = 0.7 / 0.5(0.7、0.9)

製作日期	試驗日期	養護天數	水固比 (W/S)	灰水比 (C/W)	水量 (g)	水泥量 (g)	淤泥量 (g)	坍度 (cm)	抗壓強度 (kPa)
3/25	4/1	7	0.7	0.5	12316.5	6155.88	11432	23	1408.456
3/25	4/2	7	0.7	0.5	12316.5	6155.88	11432	23	1778.199
3/25	4/2	7	0.7	0.5	12316.5	6155.88	11432	23	1367.263
3/25	4/22	28	0.7	0.5	12316.5	6155.88	11432	23	1778.779
3/25	4/22	28	0.7	0.5	12316.5	6155.88	11432	23	1836.049
3/25	4/22	28	0.7	0.5	12316.5	6155.88	11432	23	1940.977
3/25	5/20	56	0.7	0.5	12316.5	6155.88	11432	23	2414.055
3/25	5/20	56	0.7	0.5	12316.5	6155.88	11432	23	1782.781
3/25	5/20	56	0.7	0.5	12316.5	6155.88	11432	23	2094.191

4/2	4/9	7	0.7	0.7	12316.5	8618.24	8970	27.8	2146.031
4/2	4/9	7	0.7	0.7	12316.5	8618.24	8970	27.8	1973.414
4/2	4/9	7	0.7	0.7	12316.5	8618.24	8970	27.8	2612.892
4/2	4/30	28	0.7	0.7	12316.5	8618.24	8970	27.8	3524.589
4/2	4/30	28	0.7	0.7	12316.5	8618.24	8970	27.8	3104.621
4/2	4/30	28	0.7	0.7	12316.5	8618.24	8970	27.8	3580.989
4/2	5/28	56	0.7	0.7	12316.5	8618.24	8970	27.8	7324.633
4/2	5/28	56	0.7	0.7	12316.5	8618.24	8970	27.8	7079.731
4/2	5/28	56	0.7	0.7	12316.5	8618.24	8970	27.8	8356.735
4/2	4/9	7	0.7	0.9	12316.5	11080.59	6507.65	26.5	2805.147
4/2	4/9	7	0.7	0.9	12316.5	11080.59	6507.65	26.5	4792.292
4/2	4/9	7	0.7	0.9	12316.5	11080.59	6507.65	26.5	5010.035
4/2	4/30	28	0.7	0.9	12316.5	11080.59	6507.65	26.5	6982.365
4/2	4/30	28	0.7	0.9	12316.5	11080.59	6507.65	26.5	2179.655
4/2	4/30	28	0.7	0.9	12316.5	11080.59	6507.65	26.5	7810.151
4/2	5/28	56	0.7	0.9	12316.5	11080.59	6507.65	26.5	10854.804
4/2	5/28	56	0.7	0.9	12316.5	11080.59	6507.65	26.5	3423.663
4/2	5/28	56	0.7	0.9	12316.5	11080.59	6507.65	26.5	10305.971

#### 四、水泥砂漿

此階段係以水固比 0.5 為固定因子，並假設灰水比為自變數，分別為 0.5、0.7、0.9，觀察坍度與抗壓強度之變化狀況與水、水泥、砂等用量之相互關係。

表 5.4 水泥砂漿：水固比/灰水比 = 0.5 / 0.5(0.7、0.9)

製作日期	試驗日期	養護天數	水固比 (W/S)	灰水比 (C/W)	水量 (g)	水泥量 (g)	砂量 (g)	坍度 (cm)	抗壓強度 (kpa)
5/4	5/11	7	0.5	0.5	9966	4938	14994	>30	789.394
5/4	5/11	7	0.5	0.5	9966	4938	14994	>30	717.993
5/4	5/11	7	0.5	0.5	9966	4938	14994	>30	659.936
5/4	6/1	28	0.5	0.5	9966	4938	14994	>30	1315.733
5/4	6/1	28	0.5	0.5	9966	4938	14994	>30	1704.334
5/4	6/1	28	0.5	0.5	9966	4938	14994	>30	

5/6	5/13	7	0.5	0.7	9966	6976	12956	>30	14386.217
5/6	5/13	7	0.5	0.7	9966	6976	12956	>30	12297.614
5/6	5/13	7	0.5	0.7	9966	6976	12956	>30	12002.715
5/6	6/3	28	0.5	0.7	9966	6976	12956	>30	25434.973
5/6	6/3	28	0.5	0.7	9966	6976	12956	>30	33385.053
5/6	6/3	28	0.5	0.7	9966	6976	12956	>30	26043.871
5/6	5/13	7	0.5	0.9	9966	8970	10963	>30	2572.789
5/6	5/13	7	0.5	0.9	9966	8970	10963	>30	4302.695
5/6	5/13	7	0.5	0.9	9966	8970	10963	>30	5070.727
5/6	6/3	28	0.5	0.9	9966	8970	10963	>30	9384.075
5/6	6/3	28	0.5	0.9	9966	8970	10963	>30	8208.978
5/6	6/3	28	0.5	0.9	9966	8970	10963	>30	7635.436
5/6	5/13	7	0.7	0.9	12316.5	11080.59	6507.65	>30	6058.234
5/6	5/13	7	0.7	0.9	12316.5	11080.59	6507.65	>30	6309.532
5/6	5/13	7	0.7	0.9	12316.5	11080.59	6507.65	>30	5360.706
5/6	6/3	28	0.7	0.9	12316.5	11080.59	6507.65	>30	12086.557
5/6	6/3	28	0.7	0.9	12316.5	11080.59	6507.65	>30	12402.860
5/6	6/3	28	0.7	0.9	12316.5	11080.59	6507.65	>30	13236.822

### 5.3.2 單軸壓密試驗成果

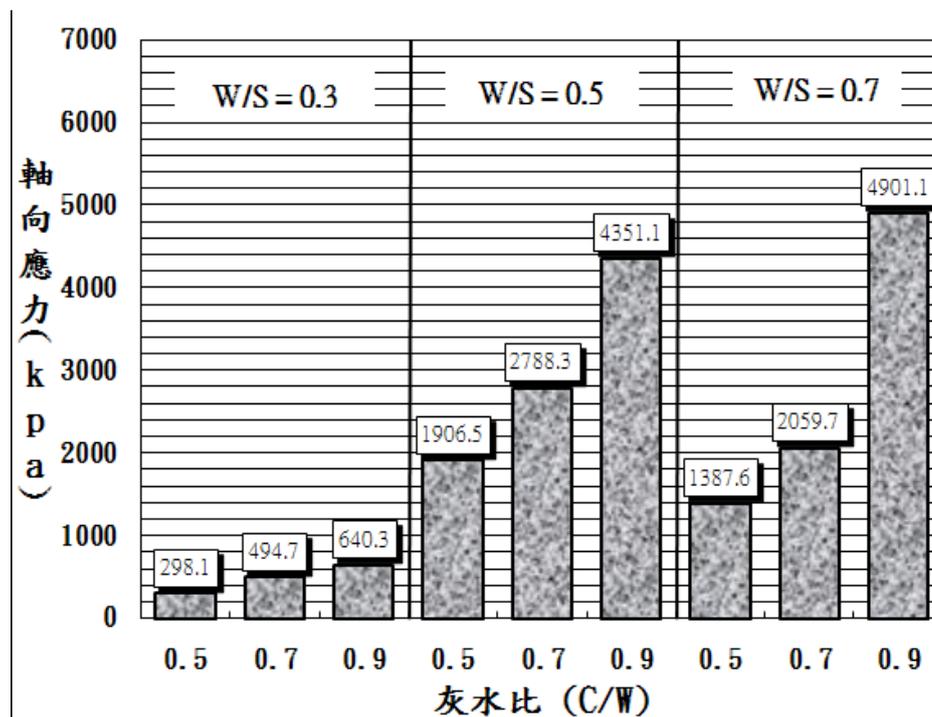


圖 5.4 淤泥混凝土試體 7 天試驗強度柱狀圖

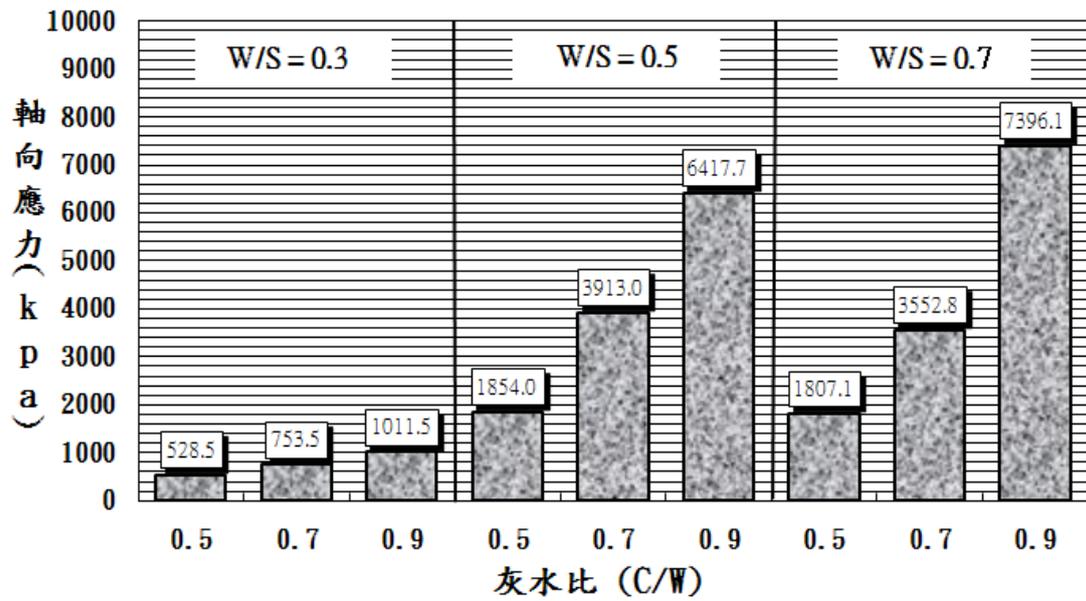


圖 5.5 淤泥混凝土試體 28 天試驗強度柱狀圖

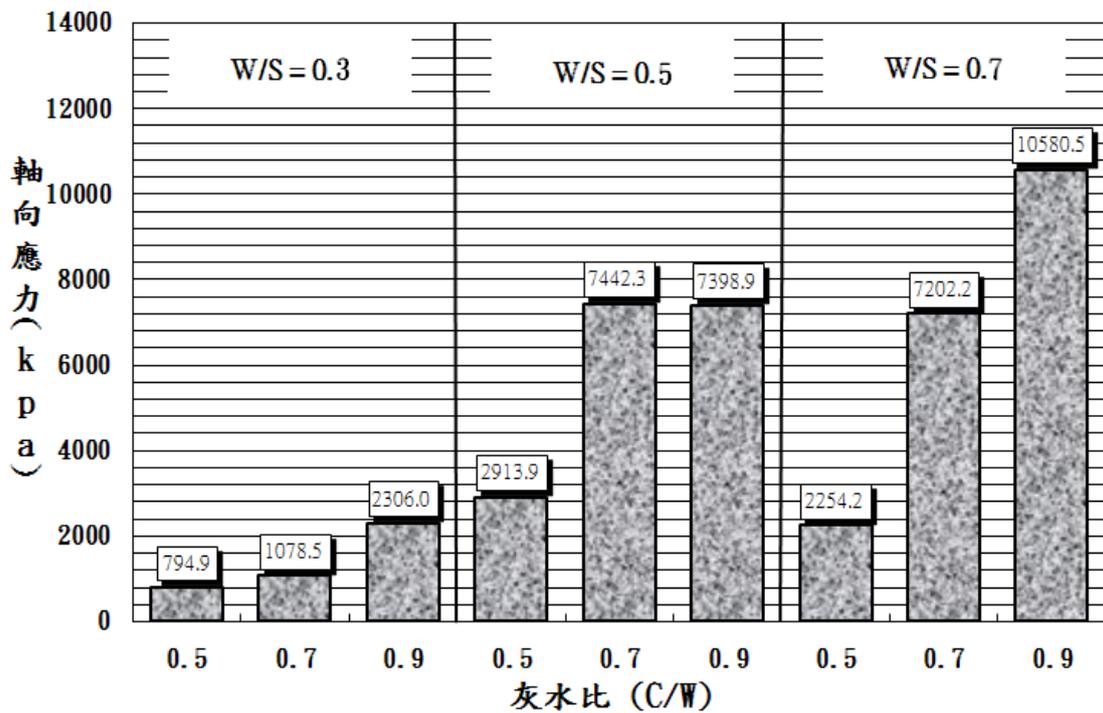


圖 5.6 淤泥混凝土試體 56 天試驗強度柱狀圖

此試驗共分為 9 種配比，觀察天數為 7 天、28 天、56 天，共製作 81 支試體。由上圖可淤泥混凝土試體強度增加之原因主要可歸類為二：(1)水泥使用量之多寡，(2)養護天數之長短。採用水固比 0.3

之試體，由於水泥含量較少，故其強度表現較顯貧乏，整體而言，淤泥混凝土強度仍隨養護天數增加而緩步上升。

另外，由圖 5.4~圖 5.6 可觀察得知，於養護天數 56 天圖中顯示：水固比/灰水比=0.5/0.7 之試體，強度表現並不尋常，有極速增加之趨勢，對此問題加以分析，此項配比試驗於 7 天、28 天時之強度表現僅為持續緩步提升，故應可排除試體製作時之試驗誤差。近一步歸納此異常原因，亦可將之分為兩大點說明之。(1)於水固比/灰水比=0.5/0.7 之試體，推測有晚強之趨勢，導致在齡期 56 天時，強度極速向上飆高。(2)以萬能試驗機施做單軸壓縮強度試驗時，可能因試體擺放誤差，或人為操作不當等因素而造成此項誤差。在後續實驗補做流程中，實有必要再次確認該配比試樣之狀況，以昭公信。

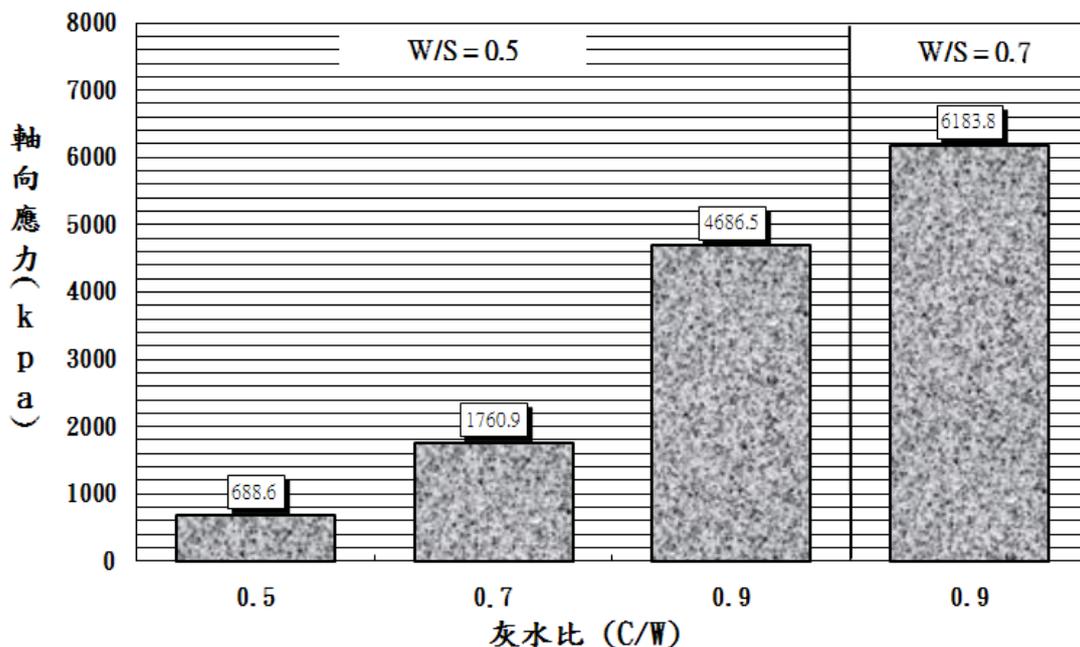


圖 5.7 水泥砂漿試體 7 天試驗強度柱狀圖

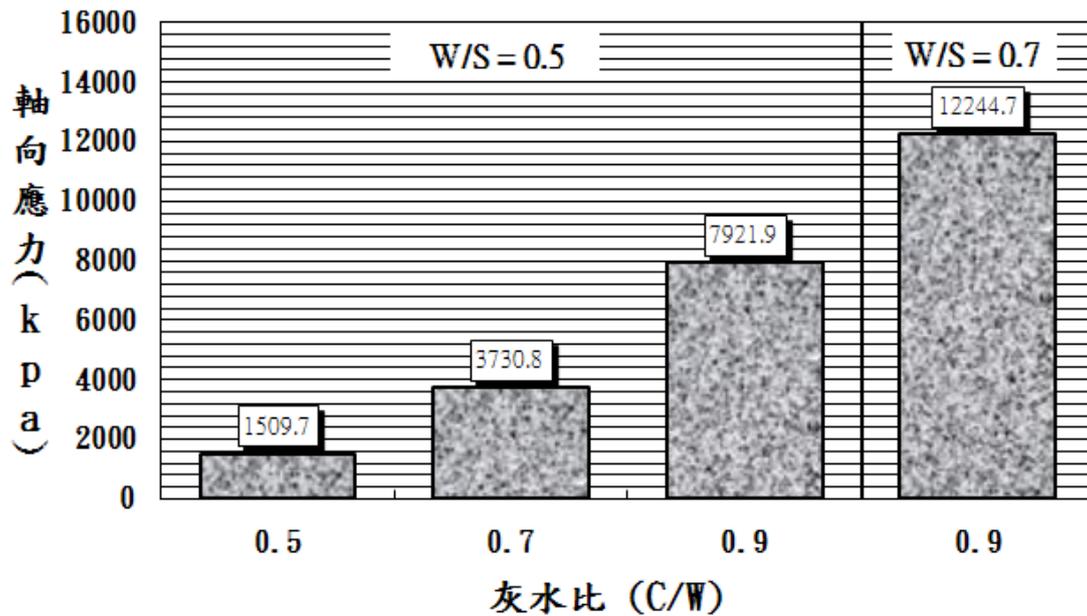


圖 5.8 水泥砂漿試體 28 天試驗強度柱狀圖

此階段之試驗與淤泥混凝土之強度相互比較，故採用一般工程上廣泛使用之水泥砂漿為對照組，分別比較其坍度與強度之相對應關係。此處僅施做四組配比，觀察養護天數分別為 7 天、28 天、56 天，共 36 支試體。由於水固比 0.3 之配比試樣，在製作過程中，淤泥極易吸收水分，導致此項配比之成果有嚴重孔洞與蜂窩現象，膠結性極差，且不符合 CLSM 之流動性規範，故捨棄該配比；而又考慮成本效益採用水固比 0.7 之配比，其因水泥含量較高，強度亦隨之增強，但由於水泥含量遠高於淤泥使用量，無法得到廣泛使用淤泥之目的，故仍建議採用水固比 0.5 之配比試樣。0.5 之配比試樣同時具有強度發展適中，符合流填料再開挖性之規範，且其淤泥使用量上為水泥用量之兩倍，兼顧流填料之適用性與成本效益之優點。

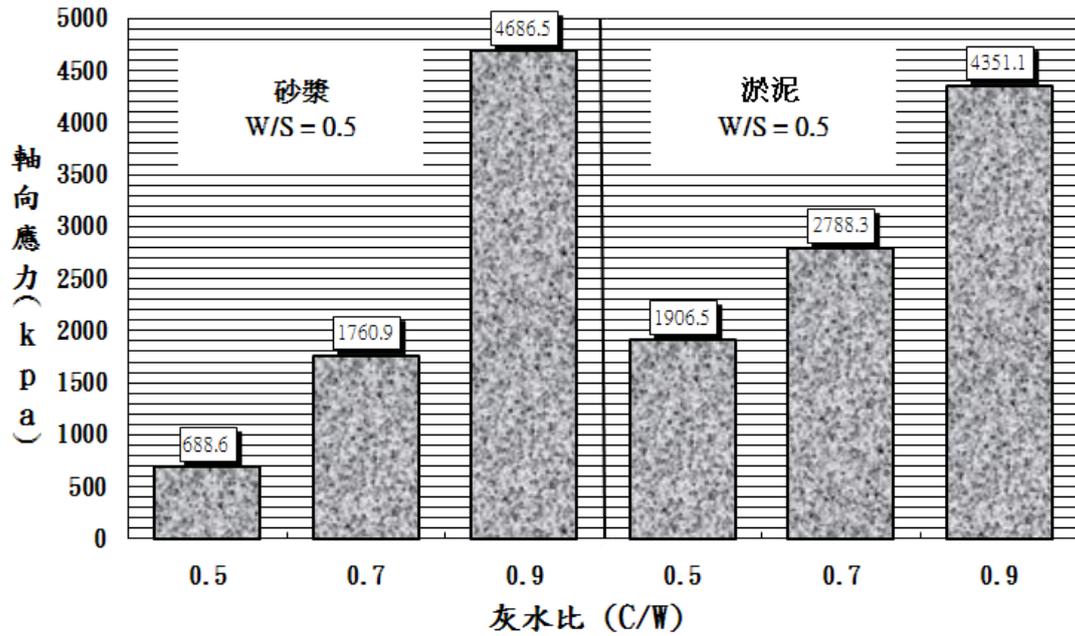


圖 5.9 水泥砂漿與淤泥混凝土 7 天強度比較圖

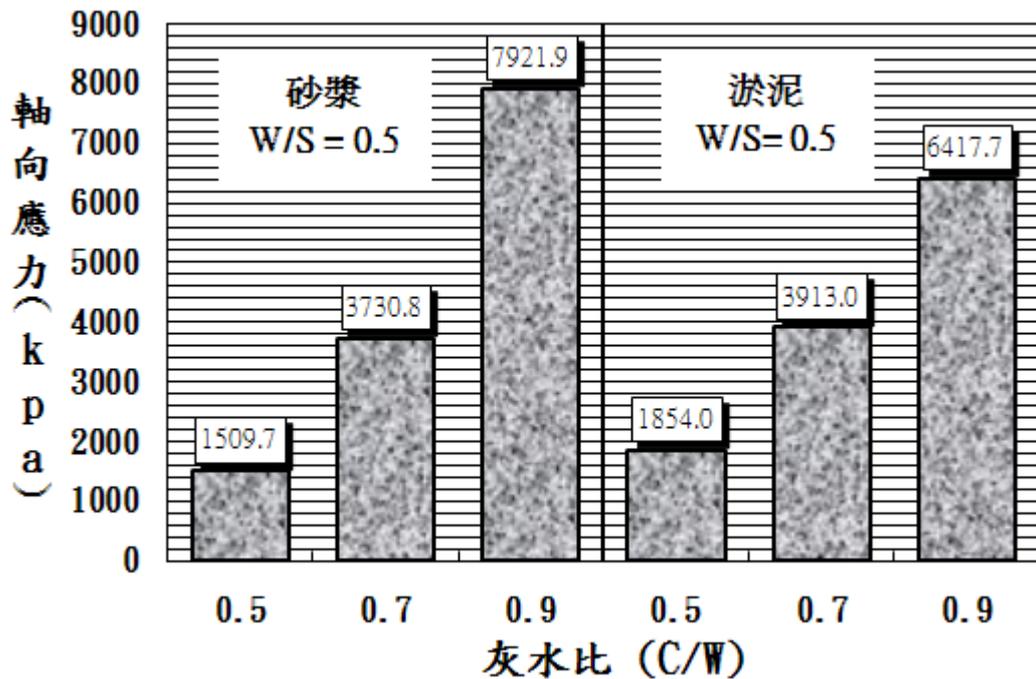


圖 5.10 水泥砂漿與淤泥混凝土 28 天強度比較圖

由上圖顯示，水固比/灰水比=0.5/0.7之配比，其強度發展與水泥砂漿試體相當類似，故若採用水庫淤泥取代部份細骨材，實屬可行。為發掘水庫淤泥之其餘優勢，故需著手進行其餘試驗，詳如下列。

### 5.3.3 變水頭試驗成果

為量測淤泥混凝土之滲透係數，本試驗考慮水庫淤泥低塑性黏土，滲透係數應小於 $k=10^{-5}$  cm/sec，且為避免採用壓密試驗間接求得k值之誤差，採用變水頭試驗求得淤泥混凝土之k值。

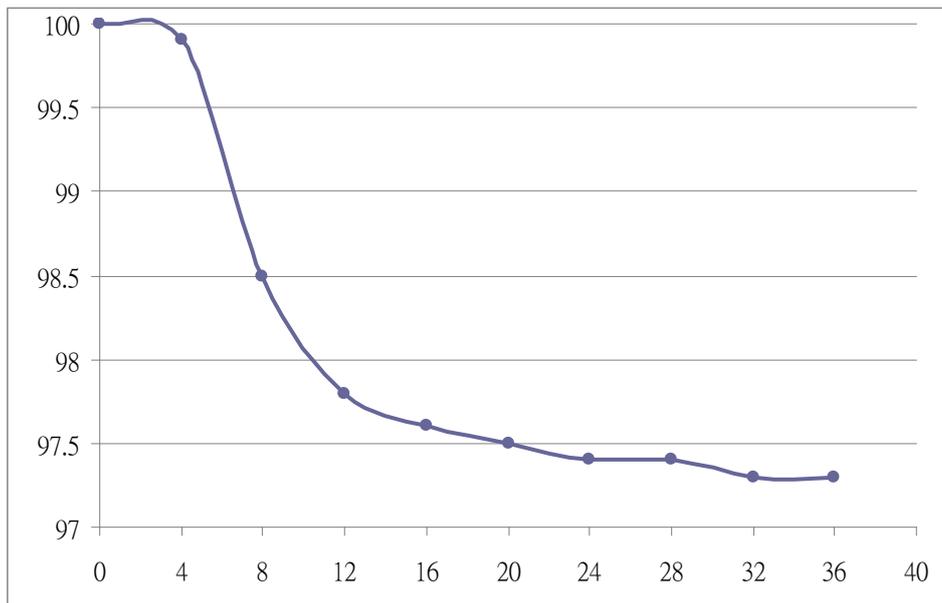


圖 5.11 淤泥混凝土：水固比/灰水比 = 0.5 / 0.5 變水頭試驗成果

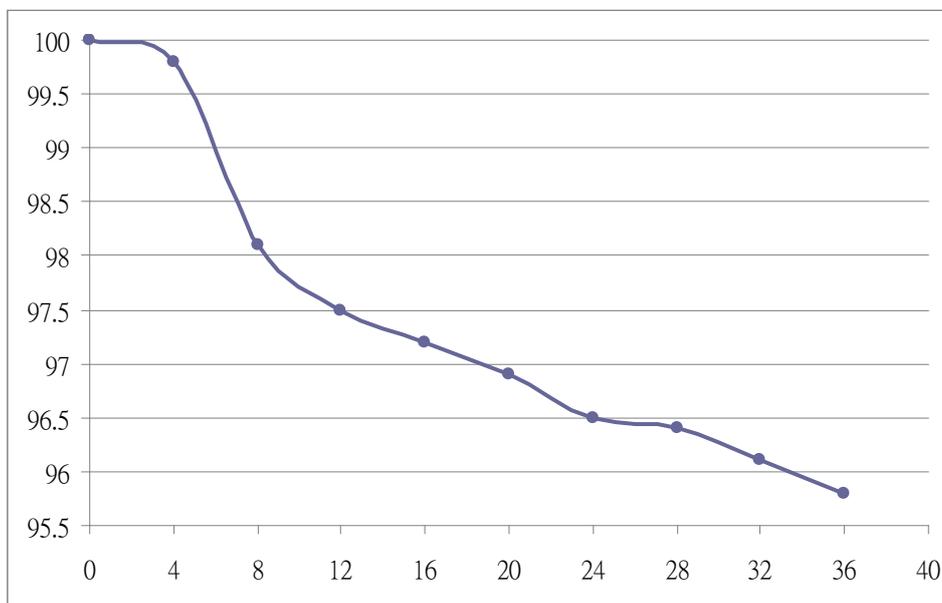


圖 5.12 淤泥混凝土：水固比/灰水比 = 0.5 / 0.7 變水頭試驗成果

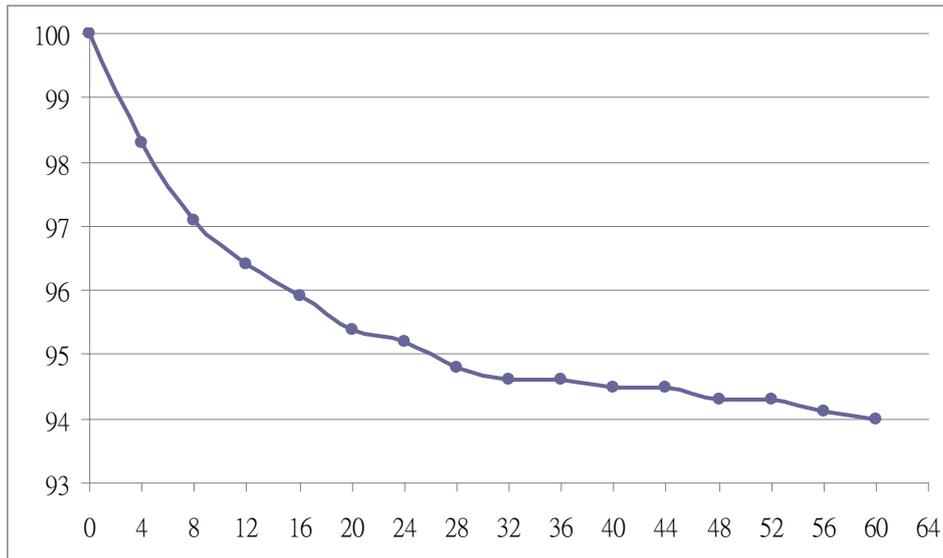


圖 5.13 淤泥混凝土：水固比/灰水比 = 0.5 / 0.9 變水頭試驗成果

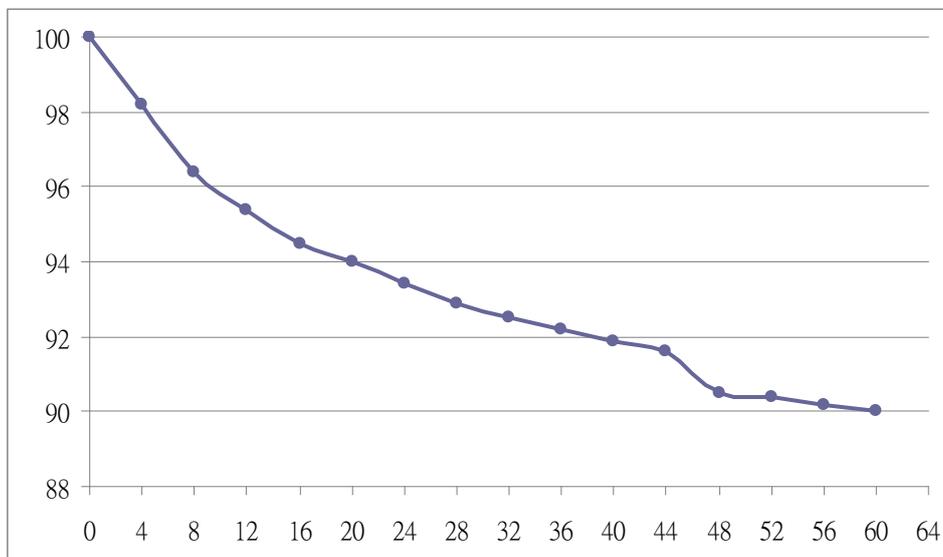


圖 5.14 淤泥混凝土：水固比/灰水比 = 0.7 / 0.9 變水頭試驗成果

澆置齡期1 天之淤泥流填料其滲透性試驗結果如上圖所示。滲透係數介於 $10^{-7}$  至 $10^{-8}$  cm/sec 之間，與黏土相當，屬低透水性材料。一般地下儲油槽之阻隔層其滲透係數須小於 $10^{-6}$  cm/sec，故淤泥流填料之低滲透性可有效應用於此種工程設施。

### 5.3.4 乾縮裂縫觀察試驗成果

由於流填料之應用為大量的填方工程，且藉由水庫淤泥回填料之不透水性，可有效阻隔地下水入侵地下擋土壁體，因此必須對於回填料之裂縫進行觀察與控制。

表5.5 淤泥混凝土：水固比/灰水比 = 0.5 / 0.5

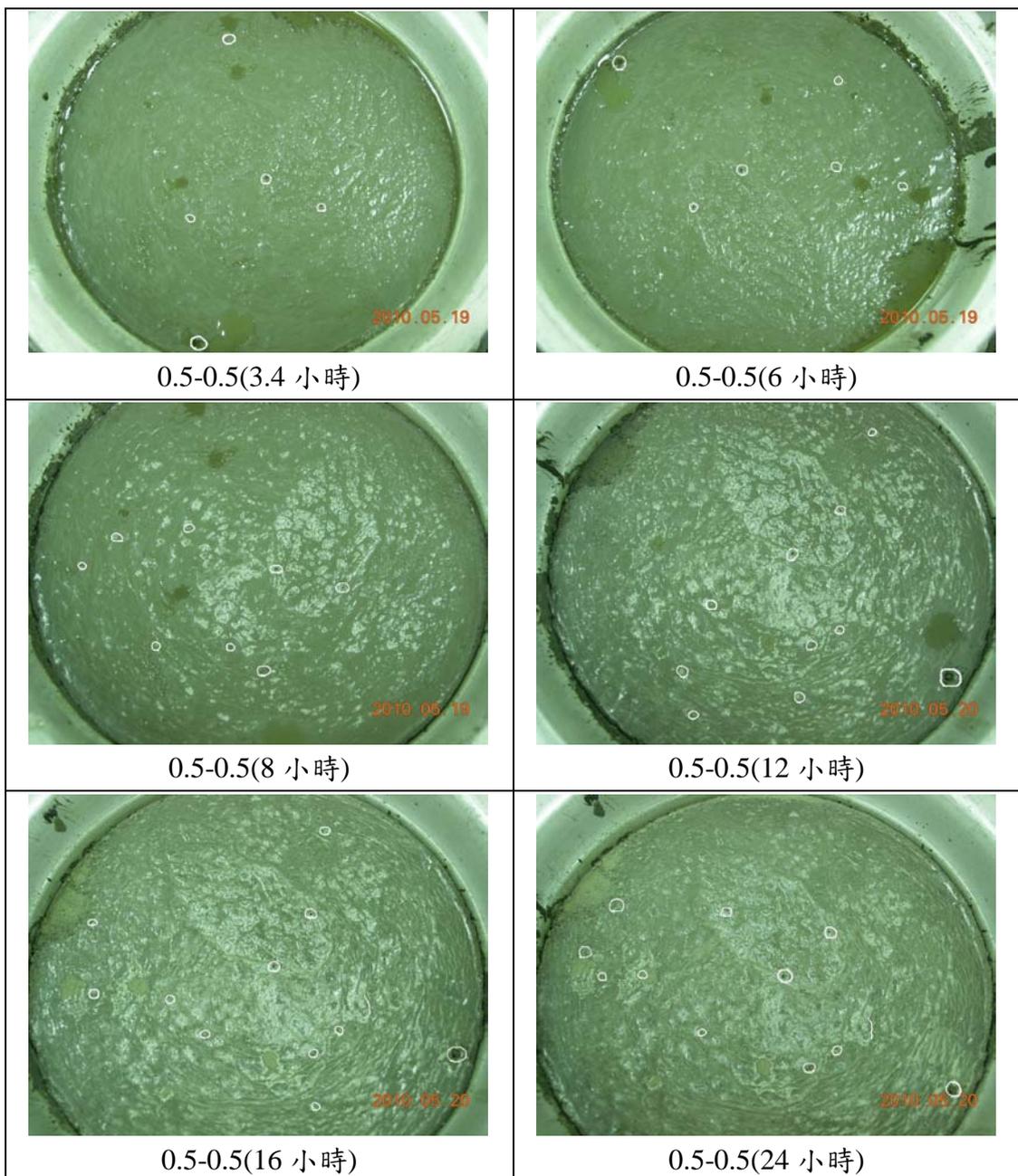
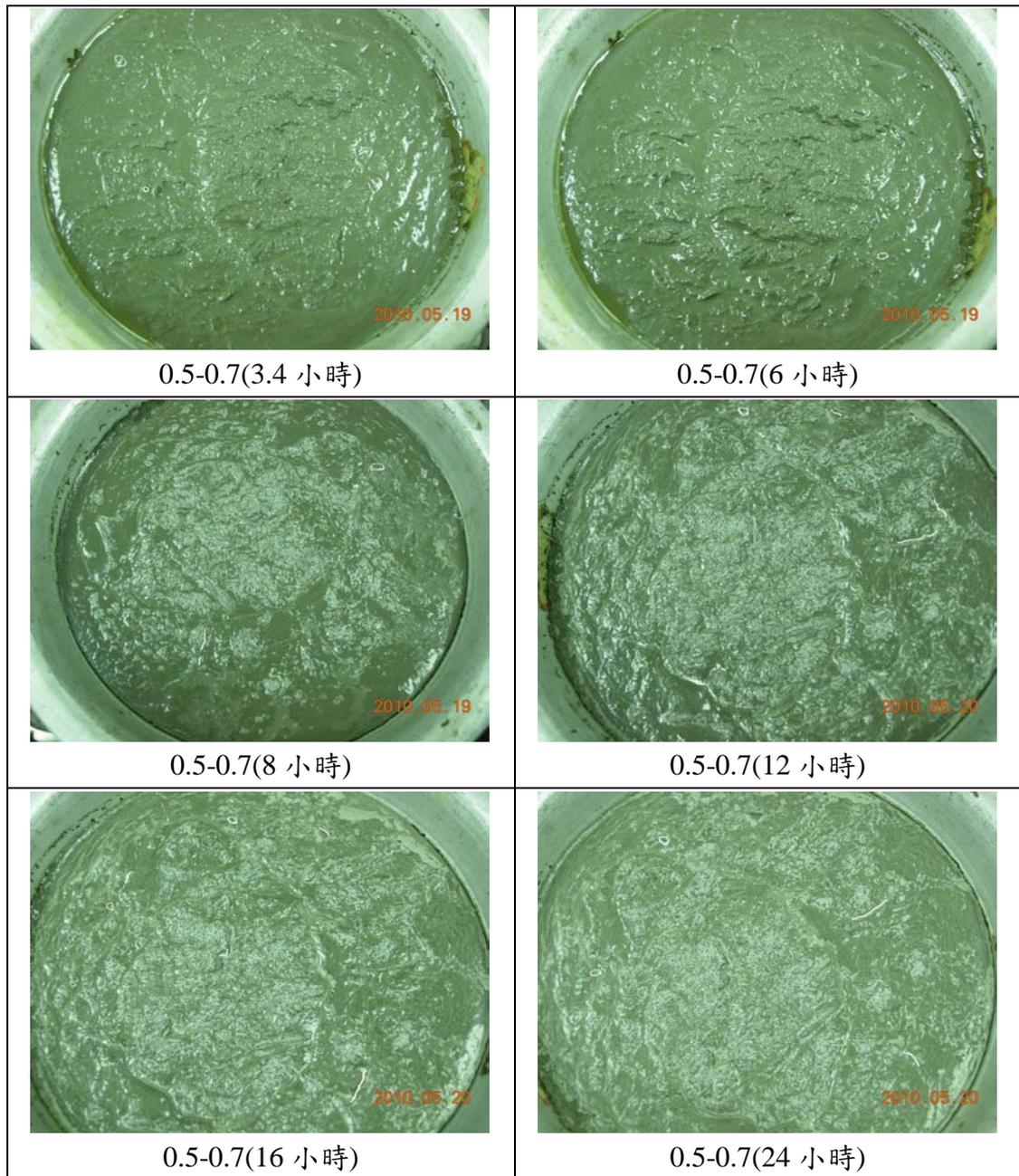
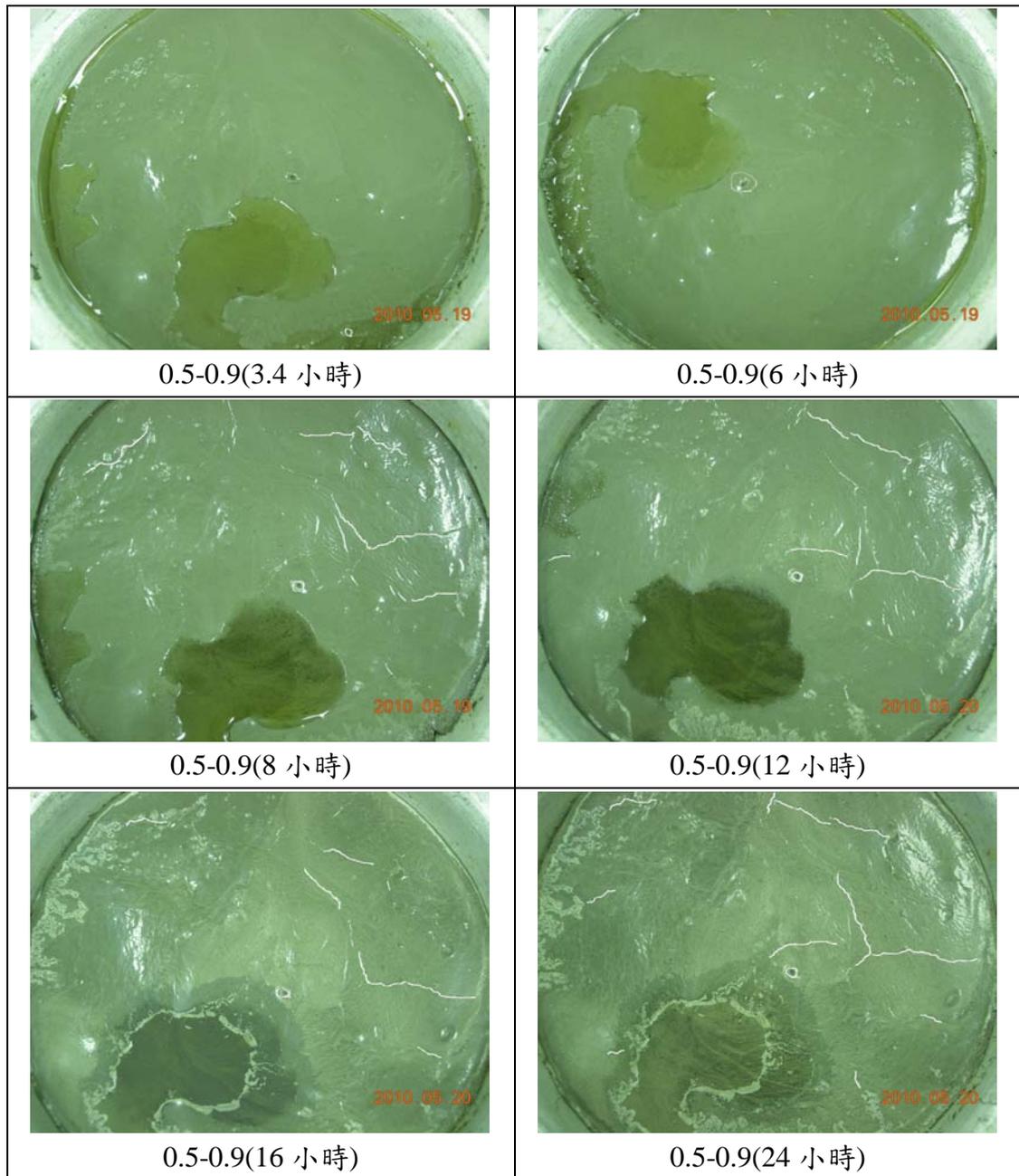


表5.6 淤泥混凝土：水固比/灰水比 = 0.5 / 0.7



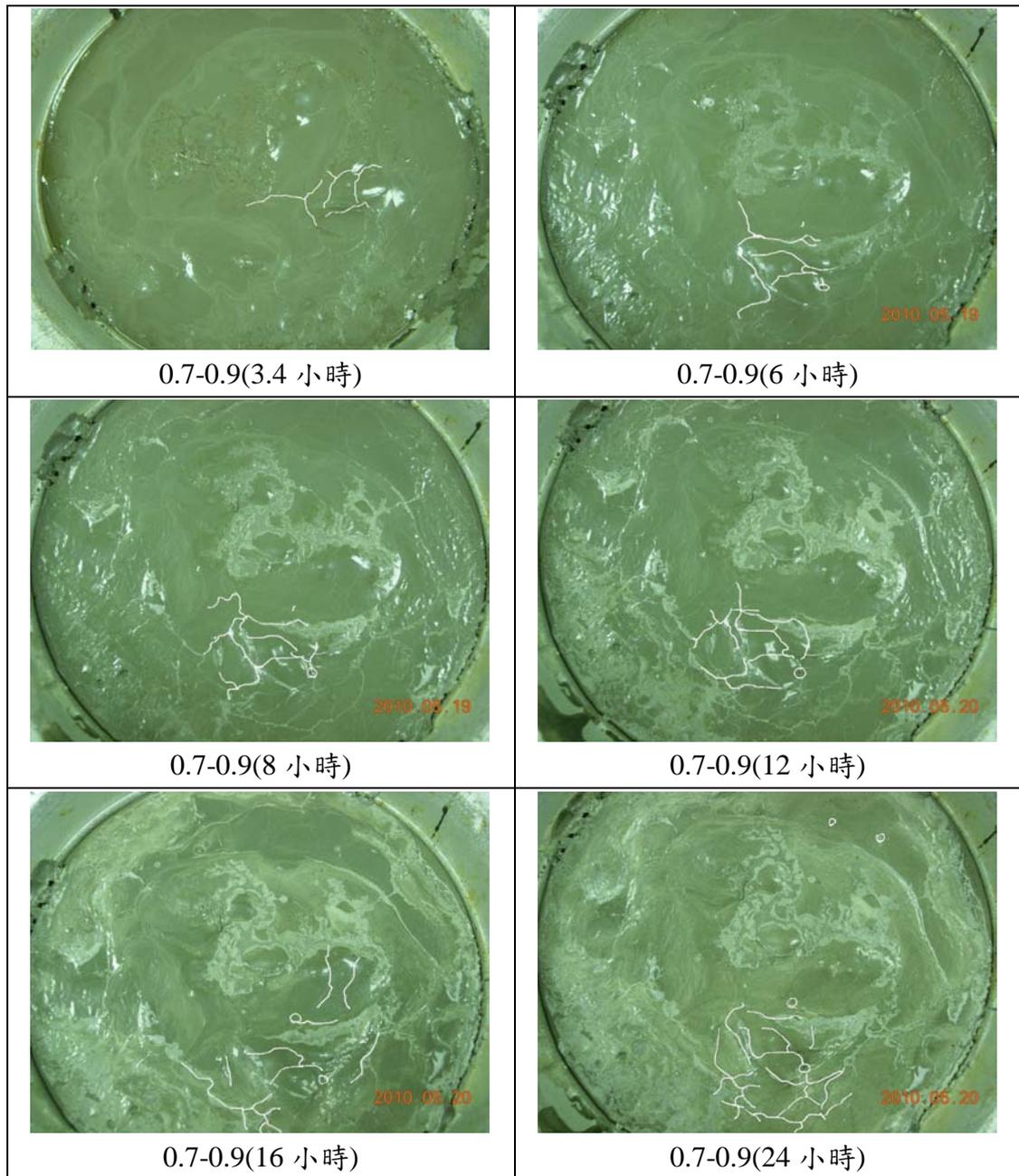
採用水固比/灰水比 = 0.5 / 0.7 之配比設計，經觀察發現此種配比裂縫發生情況最為輕微，且均為試驗震動夯實階段所產生之不平整皺摺，故應用於流填料之材料建議採用此配比，應可達到最佳之裂縫抑制效果。

表5.7 淤泥混凝土：水固比/灰水比 = 0.5 / 0.9



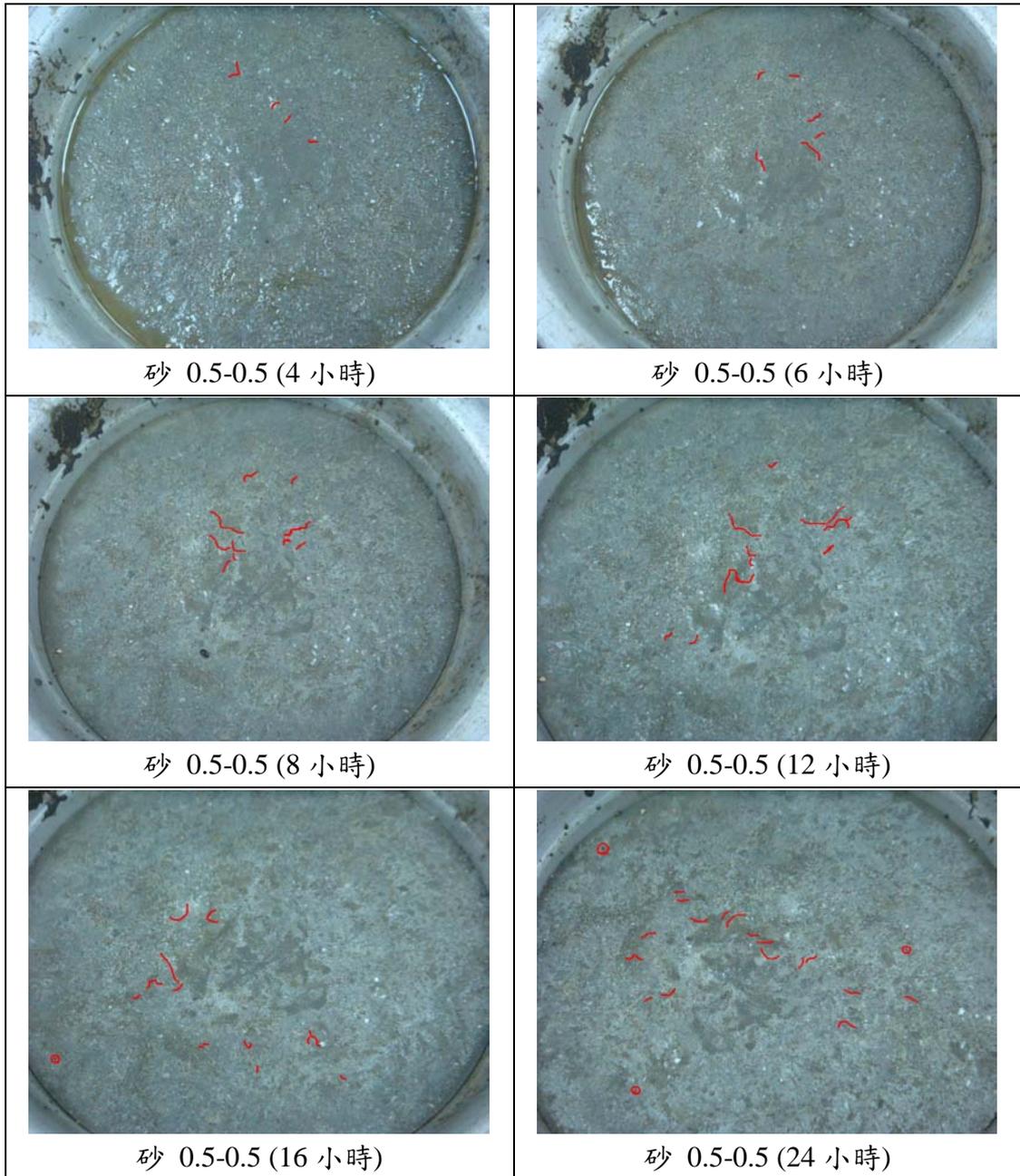
隨水泥用量之增加，觀察皿內之試體裂縫亦有明顯增加之趨勢，且於觀察皿內可清楚看到大小不依之細微孔洞，推測應為試體乾縮階段相互拉扯所形成，但若使用噴霧養護法及浸水養護法均可有效降低該裂縫發生之機率。

表5.8 淤泥混凝土：水固比/灰水比 = 0.7 / 0.9



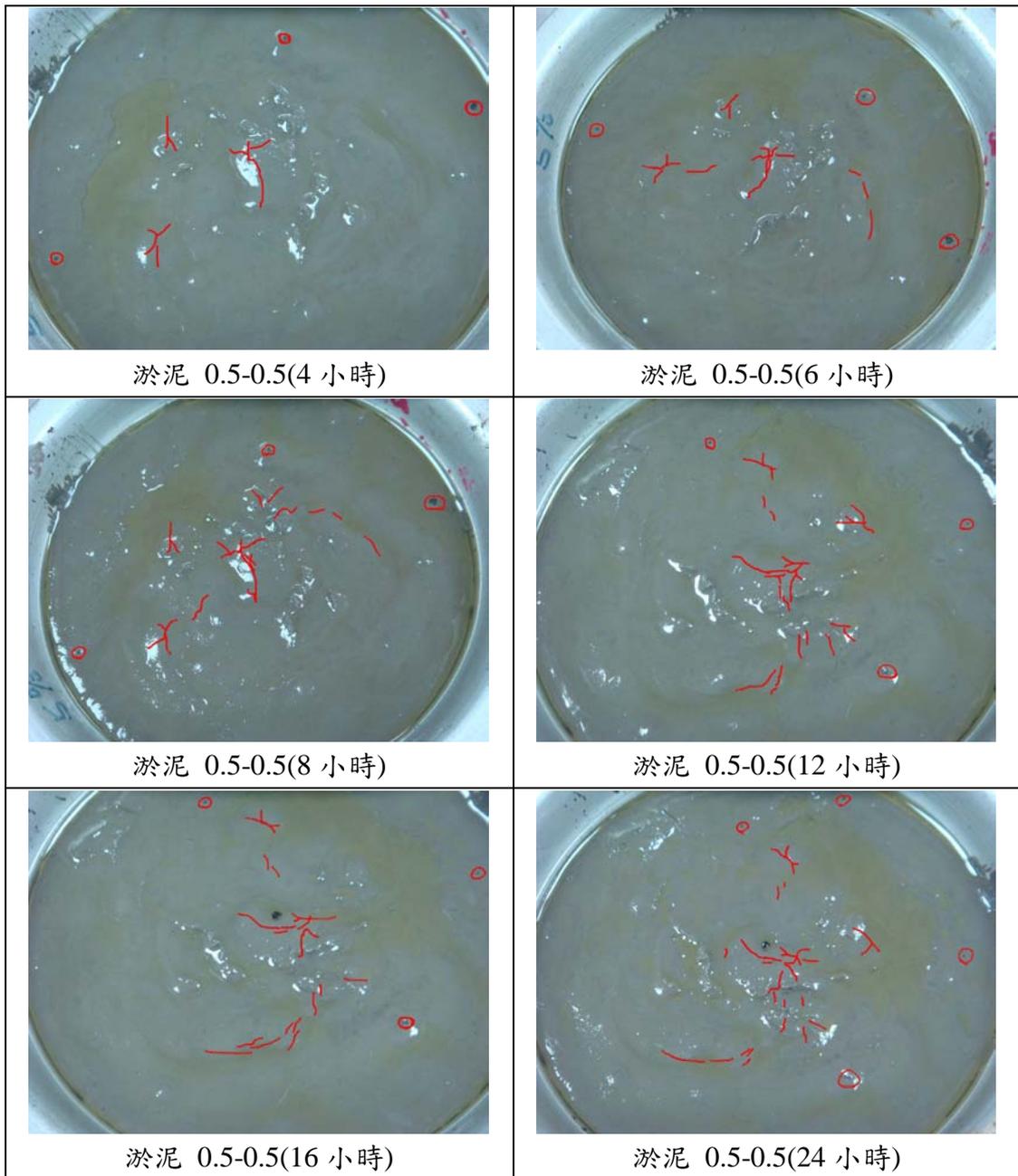
隨著水固比之增加，淤泥試體呈現濕潤狀態，待其靜置乾縮後，裂縫產生漸趨明顯，經觀察得知：此裂縫之發生僅為表皮細紋，無深入試體深處之大型裂隙，且此裂縫經優良養護過程，均可有效抑制裂縫之發生。

表 5.9 水泥砂漿：水固比/灰水比 = 0.5 / 0.5



本試驗採用水固比/灰水比 = 0.5 / 0.5，係因為水固比 0.7、0.9 之配比水量過多，使材料難以膠結，故採用此配比先行觀察，發現水泥砂漿並未發生任何乾縮之情形，亦未觀察到任何裂縫之產生，故水泥砂漿亦有其良好工程性質之優勢。

表 5.10 水庫淤泥：水固比/灰水比 = 0.5 / 0.5



由上述試驗發現，淤泥混凝土皆會產生些許乾縮裂縫，故透過純淤泥乾縮裂縫之觀察更可清楚得知：裂縫之發生係由於淤泥水分蒸發後所產生，因此若採用水泥與水庫淤泥以特定配比拌合之淤泥混凝土，可有效避免純淤泥之嚴重乾縮情形，亦可透果優良養護作業，抑制裂縫之發生。故使用淤泥取代細骨材，實屬可行之道。

## 第六章 結論與建議

本研究以試驗方式探討水庫淤泥應用於流填料之工程性質，藉以提昇淤泥資源化之再利用。研究之主要目的為評估水庫淤泥於防水回填工程應用之可行性，依實際工程考量以試驗方式求出適當且合理之配比設計，綜合試驗結果可獲得以下結論與建議：

### 6.1 結論

1. 取自石門水庫第十三號沉澱池之淤泥試樣，其比重平均值為2.55，與前人研究所得之石門水庫第七號沉澱池比重平均2.71略有不同，係因取樣來源不同，而使比重試驗所得之值略有出入。
2. 取自石門水庫第十三號沉澱池之淤泥試樣，其液性限度為35，塑性限度22.18。亦因粉土含量增加，而使液性限度和塑性指數稍顯下降，其土壤分類依統一土壤分類法(USCS)屬低塑性黏土 (CL)。
3. 粒徑分析試驗係使用「水洗法」進行，試驗成果為：石門水庫第十三號沉澱池之淤泥試樣全數通過200號篩，為極細微之粉末狀顆粒。
4. 氯離子含量檢測試驗得知：本研究所採用之石門水庫十三號沉澱池淤泥為拌合粒料，其氯離子含量為0.000738%，遠小於規範不得超出0.024%之限制，因此適合作為混凝土拌合之細粒料。

5. 由TCLP試驗得知：本研究所採用之石門水庫十三號沉澱池淤泥為拌合粒料，未測出含鎘物質，且鉛及汞之含量亦遠小於規範之限制，因此適合作為混凝土拌合之細粒料。

6 由化學成分檢測試驗得知：本計畫(2010)針對石門水庫十三號沉澱池淤泥進行物質檢定之結果，水庫淤泥之主要化學成分為 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 及 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ，其含量分別為36.3%、3.78%、6.34%。與張孟弘、黃忠信等之試驗數據相比較，各項化學成分比例相差懸殊，其確切原因仍有待深入研究。

7. 由配比試驗得知：水固比0.5之配比試樣，同時具有強度發展適中，符合流填料再開挖性之規範，且其淤泥使用量上為水泥用量之兩倍，兼顧流填料之適用性與成本效益之優點，而使用水固比/灰水比 = 0.5 / 0.7之配比設計，其強度表現與同配比之水泥砂漿相當，故應用水庫淤泥取代細質骨材之提議，實屬可行。

8. 由單軸壓密試驗得知：淤泥混凝土試體強度增加之原因主要可歸類為二：(1)水泥使用量之多寡，(2)養護天數之長短。其抗壓強度會隨水泥用量與養護天數之增加而增加。

9. 變水頭試驗結果得知：淤泥混凝土之滲透性介於 $10^{-7}$  至 $10^{-8}$  cm/sec 之間，與黏土相當，屬低透水性材料。適用於一般地下儲油槽及大樓基地開挖之防水回填料應用。
10. 由乾縮裂縫觀察試驗得知：採用水固比/灰水比 = 0.5 / 0.7之配比設計，裂縫發生情況最為輕微，且均為試驗震動夯實階段所產生之不平整皺摺，僅需透過優良養護過程，均可有效抑制裂縫之發生。

## 6.2 建議

1. 本研究僅以石門水庫淤泥為探討對象，為確認水庫淤泥應用於 CLSM 之廣泛可行性，應針對其他水庫之淤泥進行類似研究，以求普遍水庫淤泥均可應用於CLSM之領域。
2. 淤泥因來源影響，極可能具有不同性質，為使淤泥流填料之性質穩定，建議於拌製前應行充分混合，並且於粒徑分析試驗階段，應採用水洗法進行之。
2. 應再次製作：水固比/灰水比=0.5/0.7 之試體，確認淤泥混凝土是否有晚強之特性，亦或是排除人為操作之誤差。
3. 應再次進行淤泥化學成分檢測，將以下因素加以分析，並進一步將非直接相關因素予以排除，以獲得更為精確之淤泥化學成分。

## 參考文獻

林維明、洪盟峰、黃兆龍、陳宗鵠，現代營建 304，「水庫淤泥輕質骨材混凝土在橋樑及高樓綠建築上推廣應用」，2005。

范國晃，「淤泥骨材燒製及拌製混凝土之研究」，碩士論文，2001。

張孟弘，「利用水庫淤泥造粒燒製濾料之研究」，碩士論文，國立中央大學環境工程研究所，2004。

陳志鈞，「添加玻璃粉末對水庫淤泥燒製輕質骨材之影響」，碩士論文，國立成功大學資源工程研究所，2008。

陳志榮，「改質水庫淤泥對水泥砂漿工程性質之影響」，碩士論文，國立成功大學土木工程研究所，2005。

彭元俊，「淤泥壓密固結處理之研究」，碩士論文，私立逢甲大學土木工程學系，2004。

黃忠信、郭文毅、彭淑娟，「水庫淤泥生態性利用之整體研究」，行政院經濟建設委員會委託研究計畫，2004。

葉樺姿，「水庫淤泥應用於流填料之探討」，碩士論文，中華大學土木與工程資訊學系，2006。

蘇訊緯、林郭港，台灣混凝土學會第四卷第一期，「CMP 混合汙泥對混凝土力學性質之影響」，2009。

潘昌林、鄭瑞濱，「控制性低強度材料(CLSM)之工程運用」

營建署「控制性低強度材料於土木工程應用之研究」

林義堅，「淤泥流填料應用於地工砂袋之可行性研究」，2009。

陳惠琳，「應用細粒土壤於CLSM回填材料之力學行為研究」，  
2004。

白智榮，「營建剩餘土石方拌製控制性低強度材料應用於道路管  
溝回填與傳統回填工法比較之研究」，2003。

台灣營建研究院，「CLSM材料規範」，2003

D.J. Lisk， “Compressive Strength of Cement Containing Ash  
fromMunicipal Refuse or Sewage Sludge Incinerators” ，  
EnvironmentalContamination and Toxicology ， 42, pp.540-543 ， 1989 。

J. Monzo ， J. Paya ， M.V. Borrachero and E.P. Mora ， “Mechanical  
Behaviorof Mortars Containing Sewage Sludge Ash (SSA) and Portland  
Cement with Different Tricalcium Aluminate Content” ， Cement and  
Concrete Research ， 29 ， pp.87-94 ， 1999 。

S.P. Pandey and R.L. Sharma ， “The Influence of Mineral Additives  
on TheStrength and Porosity of OPC Mortar” ， Cement and Concrete  
Research ， 30 ， pp.19-23 ， 2000 。