第一章　緒論

1.1 研究動機

台灣地區科技文明與經濟快速發展，使得用水需求日益增加，但水資源開發卻因生態環境保護而受阻，目前台灣地區所建立之水庫，因地質條件、氣候影響及集水區水土保持等因素影響，水庫產生泥砂淤積並造成其容量損失，因此，如何加強水庫之永續利用，將是未來水利工程之一重要課題，為解決水資源開發與生態環境的衝突，應加強推動水庫之維護與改善，並應配合水庫之疏浚工程。由於台灣地區人民對生活的需求與品質不斷地增加與提昇，但整體可用資源卻相當有限，因此台灣生態環境的永續發展正面臨嚴厲考驗，如何將水庫浚渫之淤泥做更有效之利用，建立一套淤泥資源化方式與流程，使得水庫淤泥再生利用更具有經濟效益與生態保護，如此方可減低水庫淤泥對生態環境之汙染。

1.2 研究目的

目前台灣地區之水庫總容量，因泥砂淤積之故，平均每年減少 1,425 萬立方公尺，占所有水庫完工當年之總容量 0.65%，因此浚渫水庫淤泥實為當務之急，為有效延續水庫使用壽命，清除水庫淤泥除可增加水庫有效蓄水容量，以增進水源之利用效率，並確保水庫之安全及功能，同時達成國土之永續經營與漸次恢復台灣之自然生態。

目前各先進國家環保意識高漲，對於廢棄物質的有效處理及減量

控制均十分重視，因此，水庫疏浚之淤泥資源化利用及其處理方式，實為一重要生態永續課題，若能發展適宜之水庫淤泥再生利用方法，除可減少大量廢棄物質外，亦可利用再生資源所提供之附屬經濟價值，降低水庫淤泥浚渫所需之成本，進而使淤泥資源化理想得以落實，以達到生態環境保護及水庫永續發展之目的。

1.3 研究大綱

本研究計畫首先蒐集台灣地區各重要水庫之基本特性與淤積情形，其中所調查重要水庫之概況，包括其地理位置、功能與蓄水量等，同時，蒐集重要水庫歷年淤積統計資料，以了解各重要水庫淤泥淤積之情況及趨勢。另外，由於政府近年正積極推動水庫之永續利用，因此，本研究計畫亦整理政府近年所實施之多項清淤計畫。為探討水庫淤泥之再生利用方式，將整理各重要水庫淤泥之物理特性及化學特性，並了解各水庫浚渫後淤泥之處置方式，依淤泥不同特性將有不同用途。第二部份將討論水庫淤泥資源化方式，其方式包括「農業與土地利用」、「能源化」及「材料化」等三個方向，同時探討國內外可應用之水庫淤泥再生利用方式，以期建議適宜之淤泥再生利用方式與處理流程，如此方能有益於臺灣自然生態之永續發展。

1.4 研究架構

本研究期限共計 10 個月，並區分為二個階段，第一階段進行台灣地區重要水庫淤泥利用之效益評估，包括收集現有重要水庫淤泥再利用之文獻與資料，並探討現有水庫淤泥再生利用方式之適用性及生態性。第二階段則將進行水庫淤泥之永續利用方式及推動流程，包括

評估分析水庫淤泥之資源化利用與處理，進而建議水庫淤泥永續利用之適宜推動方式。

本計畫之工作項目敘述如下：

一、收集現有水庫淤泥再利用之文獻與資料。

二、探討現有水庫淤泥再利用用途之適用性及生態性。

三、評估分析水庫淤泥營造材料與預鑄構件。

四、相關法規及未來發展整體評估。

第二章　重要水庫之淤積情形及清淤處理

2.1 重要水庫概況

臺灣地區目前具有統計資料之水庫約有四十多座，本研究計畫共蒐集二十座水庫地理位置、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，其中部份重要水庫之溪流名稱、位置、壩堰型式與功能等資料列於表 2-1 中。

2.1.1 新山水庫

新山水庫位於基隆市大武崙溪之支流新山溪，水壩標高 75 公尺，壩長 250 公尺，完工時總容量為 400 萬立方公尺，有效容量為 375 萬立方公尺，主要提供基隆地區公共用水，因應基隆地區用水量日益增加，政府於民國 82 年辦理新山水庫加高工程，工程內容包括大壩及洩洪道加高，基礎處理工程，水土保持工程，管理大樓工程及環境整理工程等，至民國 88 年 6 月完工，成為全國第一座水庫加高工程。新山水庫加高工程完成後，大壩標高 90 公尺，壩長 291 公尺，總容量增為 1,000 萬立方公尺，有效容量為 975 萬立方公尺，可供應基隆市、瑞芳鎮及萬里鄉等地區之安全用水。

2.1.2 翡翠水庫

翡翠水庫位於台北縣新店市，目前由台灣省翡翠水庫管理局管理營運，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，占淡水河流域面積百分之十一，水庫面積為 10.24 平方公里，水庫最高水位標高 170 公尺，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，與大漢溪之石門水庫同為淡水河防洪系統之重要一環。

2.1.3 石門水庫

石門水庫位於桃園縣大漢溪中游，自民國 45 年 7 月開始興建石門水庫，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，為一多目標水利工程，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、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之改良，工業之發展，人民生活水準提高，以及防止水旱災害等方面均有重大貢獻。

2.1.4 大埔水庫.

大埔水庫位苗栗縣中港溪支流峨眉溪，於民國 45 年正式動工，至民國 49 年完工，屬供應灌溉及工業用水等目標之中小型水庫，由苗栗農田水利會管理，自營運後即提供新竹縣香山、寶山及苗栗竹南地區之灌溉用水，水庫集水面積達 100 平方公里，竣工時總蓄水容量約為 900 萬立方公尺，有效蓄水容量為 788 萬立方公尺，水庫主要設

施包括混凝土重力壩、閘門溢洪道、輸水門及長達 10.9 公里之供水幹渠。

2.1.5 永和山水庫

永和山水庫位於苗栗縣頭份鎮及三灣鄉交界處，水庫大壩為滾壓式土壩，壩頂標高 89.50 公尺，水源主要引自中港溪的主、支流，主要供應苗栗濱海平原及竹南、頭份及造橋一帶石油煉解工業用水之需，並支援新竹地區公共給水，此水庫修建工程歷時 4 年，於民國 73 年 10 月竣工開始啟用，水庫集水面積為 4.8 平方公里，正常蓄水位標高 85 公尺，總蓄水量為 2958 萬立方公尺。

2.1.6 明德水庫

明德水庫位於苗栗縣頭屋鄉明德村，水源為後龍溪支流老田寮溪，水庫乃是截取天然河流築壩而成，於民國 55 至 59 年間建造，水庫集水區面積 61 平方公里，總蓄水量為 1,770 萬立方公尺，有效容量為 1,640 萬立方公尺，原設計之目標為提供後龍鎮一帶之砂丘農田灌溉及苗栗鄰近工業用水，但由於水庫蓄水量充沛，還供給竹南、頭份民生用水，除了提供灌溉與給水外，水庫廣闊之湖面與兩岸起伏之山峰，景色秀麗迷人，成為苗栗縣內之重要觀光勝地。

2.1.7 德基水庫

德基水庫又稱為達見水庫，位於台中縣和平鄉梨山村，主流為大甲溪，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，水庫工程於民國 58 年 12 月開工，民國 62 年 12 月開始蓄水，63 年 6 月首期發電，9 月全部完成，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。

2.1.8 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下游，除了以景山溪為水源外，還由士林攔河堰引水入庫，為一座離槽水庫，集水面積 53.45 平方公里，總蓄水量為 12,600 萬立方公尺。由於中部地區近年工商業進步，地方繁榮且人口增加，因此，自來水與工業用水增加，為解決中部地區之供水問題，於民國 74 年開始興建，民國 81 年底正式完工營運，使用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。

2.1.9 石岡壩水庫

石岡壩水庫位於大甲溪下游，為調節大甲溪上游各發電廠之發電尾水與河流資源，因此於民國 63 年 10 月開工，民國 66 年 10 月完工，歷時 3 年完成興建，主要目標為提共大台中地區之公共用水，同時亦提供農業灌溉及休閒觀光之功能，水庫集水面積 1,061 平方公里，總蓄水量為 338 萬立方公尺，但由於 921 大地震的影響，造成石岡壩壩體的毀損，使原本的引水及調蓄功能受損，但經水利署及中區水資源局的搶救之下，於民國 89 年底完成修復工程，更於民國 90 年完成

魚道新建工程。

2.1.10 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 月至 49 年 8 月間，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，霧社水庫下游之萬大發電廠由水庫取水引水發電，水庫集水面積為 219 平方公里，總容量為 14,600 萬立方公尺。

2.1.11 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，於民國 23 年於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，水庫引濁水溪溪水為主要水源，水庫的主要功能為發電，早已利用水庫興建水力發電廠，近年，台灣電力公司又陸續完成明湖及明潭抽蓄水力發電計畫，又因其風景優美，故具有觀光的價值。水庫集水面積約為 15 平方公里，總容量為 17,162 萬立方公尺。

2.1.12 仁義潭水庫

仁義潭水庫位於嘉義縣八掌溪上游，屬一離槽水庫，水庫於民國 69 年開始興建，民國 76 年 6 月完成開始蓄水，總容量達 2,782 萬立方公尺，滿水位面積達 2.11 平方公里，有效容量 2,585 萬立方公尺，仁義潭水庫與蘭潭水庫串聯運用，以提供嘉義市及嘉義縣沿海地區之工業區用水，且滿足公共給水及工商用水之需，除提供民生用水外，

水庫風景優美，湖光水色，為嘉義地區民眾之遊憩勝地。

2.1.13 烏山頭水庫

烏山頭水庫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，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，滿水位面積 13 平方公里，滿水位標高 58.18 公尺，呆水位標高 31.2 公尺，壩頂標高 66.66 公尺，壩身最大高度 56 公尺，壩頂長 1,273 公尺，寬 9 公尺，壩底寬 303 公尺，總容量為 15,415 萬立方公尺。

2.1.14 白河水庫

白河水庫位於台南縣白河鎮，建於急水溪支流白水溪之上游，為一輾壓式土壩，壩長 210 公尺，水庫施工期間為民國 50 至 54 年，現由嘉南農田水利會負責營運管理。水庫使用標的為提供農田灌溉、民生用水及工業用水，另與關子嶺一帶名勝合併為白河水庫風景區，水庫集水面積 26.55 平方公里，正常蓄水位標高為 109 公尺，總蓄水量為 2,509 萬立方公尺，計畫年運用水量為 4,700 萬立方公尺。

2.1.15 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所串聯之烏山頭水庫提供。由於南部地區人口成長及工商發展，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，其滿庫時間卻甚少，顯示其功能尚有再發揮與加強之空間，所以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。

2.1.16 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，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計畫，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。

2.1.17 阿公店水庫

阿公店水庫位於高雄縣燕巢鄉、岡山鎮與田寮鄉交界之阿公店溪上，水庫壩址建於旺萊溪與濁水溪會合處，為混凝土式滾壓土壩。此水庫係以防洪為主，且提供農田灌溉，而此水庫原有公共供水之功能，但由於淤積嚴重及養豬污染之緣故，已停止供應公共給水。本水庫於民國 31 年開始興建，至民國 42 年完工，其標高 26 公尺以下為備淤部分，設計水位標高 40 公尺。阿公店水庫為台灣唯一以防洪為主要標的之水庫，大壩全長 2.38 公里，為台灣地區最長者。

2.1.18 澄清湖水庫

澄清湖水庫位於高雄縣鳥松鄉高屏溪上，現由台灣省自來水公司營運管理，水庫集水面積 2.88 平方公里，正常蓄水位標高為 18 公尺，滿水位面積為 1.03 公頃，總蓄水量 500 萬立方公尺，主要計畫標的為提供高雄地區公共給水。

2.1.19 鳳山水庫

鳳山水庫位於是在高雄縣林園鄉、大寮鄉和高雄市小港區的交接處，水源來自東港溪地面水、高屏溪伏流水及林內溪上游，水庫集水區面積 2.75 平方公里，總蓄水量 920 萬立方公尺，除提供公共用水外，還供給高雄工業區用水。

2.1.20 牡丹水庫

牡丹水庫位於屏東縣牡丹鄉四重溪河谷上，水庫係汲取四重溪支流水汝仍溪和坍丹溪流域之水量。由於屏東地區雨量集中於夏季，缺乏一穩定可靠之水源，因此於民國 77 年著手推動牡丹水庫之興建，並於民國 88 年完成，其集水面積為 69.2 平方公里，總蓄水量為 3,119 萬立方公尺，主要計畫標的為公共給水及灌溉用水，水庫興建完成後，可增加約每日 10 萬噸之供水量。

2.2　重要水庫之歷年淤積情形

以下介紹台灣地區重要水庫之淤積狀況，進行其泥砂淤積量現況與趨勢之資料蒐集與分析，藉由歷年泥砂淤積量之資料，可瞭解各水庫歷年泥砂淤積變化之情形。

2.2.1 翡翠水庫

翡翠水庫自民國 75 年營運以來，為有效地監測水庫淤積情形，臺北翡翠水庫管理局於水庫內目前共設 102 個淤積控制斷面，其中主流有 73 個，支流則有 29 個淤積控制斷面，斷面與斷面之間平均距離為 370 公尺，其歷年淤積測量之蓄水呆容量、有效蓄水容量、總蓄水容量及年平均淤積量列於表 2-2 中。

2.2.2 石門水庫

石門水庫原計畫推估其每年淤砂量約為 80 萬立方公尺，但民國 52 年 5 月開始蓄水以來，於同年 9 月即遭受葛樂禮颱風之侵襲，以致洪水夾帶大量泥砂流入水庫，造成水庫集水區內嚴重沖刷與大量坍方，對水庫造成約 1,947 萬立方公尺之淤砂量，石門水庫歷年淤積測量結果列於表 2-3 中。但至今歷經多次颱風暴雨侵襲，以及其他自然人為因素之影響，造成水庫集水區內山坡地嚴重沖刷與崩塌，迄民國 73 年 11 月之水庫淤積測量結果，累積淤砂量已達 4,465 萬立方公尺，淤積面高達標高 174.5 公尺，距發電進水口底檻僅差 0.16 公尺，已威脅到發電之正常運轉，因此，歷年均辦理石門水庫之浚渫計畫，以改善水庫之淤積問題。

2.2.3 大埔水庫

由於受到集水區礦業開業之影響，大埔水庫歷年淤積測量資料如表 2-4 所示，民國 88 年淤積量測結果顯示，總蓄水容量僅存約 550 萬立方公尺，有效蓄水容量剩下約 542 萬立方公尺，水庫淤積率已達 40%，水庫淤砂使得水庫蓄水容量大幅減少，供水能力下降，由於水庫無法發揮既定功能，因此於民國 80 年後，便採取機械挖除及空庫排砂等方法解決淤積問題。大埔水庫於開工開始營運後，曾進行多次淤積量測，水庫有效容量由民國 50 年時之 778 萬立方公尺逐年下降，民國 76 時之水庫有效容量 451.2 萬立方公尺，為大埔水庫歷年來最低有效容量。

2.2.4 明德水庫

明德水庫於民國 59 年興建完成時，原設計之總容量為 1,770 萬立方公尺，依表 2-5 所列之歷次淤積測量結果顯示，水庫完工後至民國 88 年，累計淤積量約為 360 萬立方公尺，約佔水庫總容量之 21%，臺灣地區水庫清淤計畫工作[8]九十一年度已將明德水庫列入計畫中，共清淤 4.5 萬立方公尺。

2.2.5 鯉魚潭水庫

由表 2-6 鯉魚潭水庫歷年淤積測量結果，將第 5 期淤積量與其他期淤積量比較，可知第 5 期之淤積量變化相當大，年平均淤積量高達 24.22 萬立方公尺，泥砂淤積率為 1.79%，其原因可能為 921 地震造成水庫附近山坡土石崩塌及土石鬆動，再經由近年來數個颱風帶來水

庫上游豪雨，經沖刷山坡地後大量土石進入水庫，因此，造成水庫淤積量激增。

2.2.6 石岡壩水庫

石岡壩水庫設計總容積為 338 萬立方公尺，表 2-7 為此水庫於民國 66 年至民國 83 年之淤積測量結果，由於民國 71 因淤積已損失水庫 45%之原始總容積，因此，於民國 73 年開始施行為期九年之浚渫計畫，至民國 82 到期，另外，水庫於民國 85 年又重新施行浚渫計畫。

2.2.7 日月潭水庫

在日月潭水庫上池部份，由於抽蓄發電運轉水位升降頻繁，使得環繞於日月潭周圍之邊坡不穩定，邊坡之上方表土及岩塊均可能崩塌，因此，應對該區採用一般邊坡保護措施使其安定，同時對於集水區確實做好水土保持工作，可減少土石滑動進入水庫，造成水庫泥砂淤積，其中日月潭水庫於民國 77 年進行淤積測量，當時水庫總蓄水量約為 13,868 萬立方公尺，約為水庫剛完工時之 80.8%，測量結果列於表 2-8 中。

2.2.8 霧社水庫

霧社水庫自民國 46 年開始營運迄今，總共辦理 10 次水庫淤積測量，表 2-9 為各次量測結果之水庫淤積量及年平均淤積量，霧社水庫自開始蓄水至民國 80 年之總淤積量約為 4,418 萬立方公尺，故總容量減少為 10,582 萬立方公尺，全期平均之淤積量約為每年 13 萬立方

公尺。

2.2.9 烏山頭水庫

烏山頭水庫原設計有效蓄水量為 15,416 萬立方公尺，迄至民國 75 年 6 月重測，蓄水量降為 8,375 萬立方公尺，淤積量為 7,041 萬立方公尺，淤積測量結果列於表 2-10 中，而年運用水量卻由曾文水庫完成前之四億六仟餘萬立方公尺,增至曾文水庫完成後之約十億立方公尺。

2.2.10 曾文水庫

曾文水庫管理局於民國 63 年至民國 90 年,每年平均測量水庫淤積一次，測量結果如表 2-11 所示，水庫年平均淤積量為 410 萬立方公尺，較原設計預估年輸砂量少約 21.60%。但民國 85 年受賀伯颱風影響，使得集水區進水口前淤積高度急速上升，較原設計年輸砂量少約 37.78%。

2.2.11 南化水庫

南化水庫原來之設計年平均輸砂量為 156 萬立方公尺，而於民國 82 年至民國 88 年即淤積 1700 萬立方公尺，年平均淤砂量達 296 萬立方公尺，高出原設計之輸砂量，可能為 85 年賀伯颱風帶來豪雨而造成大量淤積，而南化水庫至今仍未進行清淤作業，為了水庫能有效地提供蓄水功能，應有必要在適當時間實行清淤作業，南化水庫歷次淤積測量結果列於表 2-12 中。

2.2.12 阿公店水庫

阿公店水庫因其集水區內含大量灰色質頁岩，質地鬆軟吸水易化，大量凝聚性沈滓運移入庫，歷年淤積測量結果列於表 2-13 中，自民國 42 年水庫開始運轉以來，每年約有 50 萬立方公尺之淤砂量淤積於庫底，至民國 56 年時備淤部份分即已填滿，而至民國 60 年水庫灌溉與給水容量，已因淤積減少約 800 萬立方公尺，等到民國 87 年時，蓄水容量因大量淤砂之故，已減少為原始容積之 47%。

目前阿公店水庫正進行更新改善計畫，期望進行大規模水庫淤泥浚渫，並興建越域排洪道及實施集水區養豬廢養措施，以回復原本水庫公共給水之功能，此更新改善計畫預定於民國 94 年完工。

2.3 政府近年辦理之清淤計畫

水庫上游集水區內山坡地受沖刷與崩塌，使得大量泥砂流入並蓄積於水庫而造成水庫淤積，其原因可分為自然因素及人為因素，自然因素為水庫集水區地形、地質、水文及氣象等，人為因素則於水庫集水區內濫墾、濫伐、開闢道路、不當土地利用等，但自然因素所造成之水庫淤積為不可避免之現象，因此水庫在規劃初期，除了考慮其總容量外，對水庫集水區之天然環境條件估算年淤積量，並依此預估水庫壽命，同時規劃呆容量以容納部分淤砂，而剩餘之水庫容量稱為有效容量，有效容量指能調節提供有效使用水量之部分容量，即總容量扣除呆容量後之容量。

目前台灣水庫淤積情況，可依據經濟部水利署辦理之「九十一年

水庫淤積緊急浚渫計畫」[8]中統計資料，如表 2-14 所示，統計至民國 89 年為止，已完工運轉且有營運統計資料之重要水庫共有 40 座，完工總容量為 26.96 億立方公尺，完工有效容量為 23.24 億立方公尺。水庫容量因受泥砂淤積之影響而減少，其中 40 座水庫民國 89 年量測總容量為 22.43 億立方公尺，與完工當年總容量比較後，發現水庫總容量約減少 4.14 億立方公尺，占完工總容量 15.38%，即平均每年減少約 1,425 萬立方公尺，占所有水庫完工當年總容量 0.65％。至於有效容量方面，89 年量測有效容量為 20.47 億立方公尺，較完工當年有效容量減少約 2.57 億立方公尺，占 11.05%，平均每年遞減量約為 8 百萬立方公尺，占所有水庫完工當年有效容量之 0.49%。

行政院非常重視水庫之清淤，臺灣地區水庫清淤計畫於 91 年度共辦理九座水庫，其中包括西勢、翡翠、石門、明德、馬鞍、仁義潭、白河、阿公店及鏡面水庫。根據經濟部水利署保育事業組統計共清淤 4,770,231 立方公尺，其中阿公店水庫清淤量 3,238,607 立方公尺為最多，白河水庫清淤量 745,742 立方公尺次之，歷年水庫累計之清淤量以石門水庫累計清淤量 10,644,339 立方公尺為最多，阿公店水庫累計清淤量 5,438,601 立方公尺次之，阿公店水庫於民國 87 年起即辦理水庫更新計畫，預計 94 年完成各項改善工程。另外，經濟部水資源局亦實施「九十一年度水庫淤積緊急浚渫計畫」[8]，將寶山、永和山、石門、明德、仁義潭、翡翠、白河等水庫列入緊急浚渫計畫中，此計畫乃是利用枯水期間緊急辦理上述各水庫之浚渫，合計浚渫量約為 178 萬立方公尺。

92 年度經濟部水利署辦理「水庫更新及改善計畫」，將浚渫水庫淤砂，恢復水庫容量，提昇防洪蓄水功能為計畫目標之一，因此將辦

理部份水庫之淤積浚渫，由於各水庫淤積程度不一，因此，考慮水庫淤積浚渫優先順序後，石門、霧社、烏山頭、白河、明德及大埔等六座水庫將優先實施水庫浚渫工作，預定在民國 92 至 96 年間共浚渫 574 萬立方公尺之淤砂。在此計畫中另專案辦理「澄清湖水庫底泥清除實施計畫」，澄清湖水庫底泥清除工程於民國 93 年 5 月已全部完成，總累計清運 260,106 立方公尺，另外，經濟部水利署先行辦理「青草湖水庫重生計畫」之設計規劃，預期將可恢復青草湖水庫之防洪、蓄水、生態及觀光功能。

93 年度經濟部水利署將辦理「台灣地區水庫淤積浚渫計畫」，預計將辦理大埔、烏山頭、白河、中正湖、榮湖、成功、興仁及東衛等 8 座水庫，將浚渫淤砂 58.3 萬立方公尺，預期將改善水庫水質、提升各水庫之蓄水功能及延長水庫壽命。

2.4 各重要水庫之淤泥物理及化學特性

蒐集各重要水庫下游淤砂之物理及化學特性，分別整理於表 2-15 及表 2-16 中，表中淤砂之物理及化學特性雖可能隨時間及地點不同而有些許差異，但仍具代表性。水庫淤砂依統一土壤分類規定整理，統一土壤分類法最早由 Casagrande 於 1948 年提出，與美國墾物局合作後在 1952 年加以修正，目前已被廣泛應用於土壤分類，其中土壤粒徑小於 0.075mm 定義為黏土及粉土，0.075mm~4.75mm 定義為砂，土壤粒徑大於 4.75mm 則定義為礫石，至於判別黏土及粉土的界限為何，則採用 ASTM D-653 以 0.005mm 為界，當土壤粉徑小於 0.005mm 定義為黏土，而土壤粒徑於 0.005mm 至 0.075mm 則定義為粉土，各水庫淤泥組成成份大部份均為粉土及黏土，僅有部份水庫之淤泥土壤

組成含有較粗顆粒之礫石。

淤泥屬性依統一土壤分類，可區分為 CL、CL~ML、CH 及 SM，其中 CL 為低塑性黏土，CL~ML 為低塑性黏土及低塑性粉土，CH 為塑性黏土，SM 則為粉土質砂，以此分類法可得知，翡翠、石門、青草湖、明德、日月潭、明潭、鏡面、虎頭埤、白河、阿公店、澄清湖水庫淤泥為低塑性黏土(CL)，大埔水庫淤泥屬於低塑性黏土及低塑性粉土(CL~ML)，仁義潭取出之淤泥為高塑性黏土(CH)，而寶山及鳳山水庫取出之淤泥則屬於粉土質砂(SM)。

各水庫淤泥比重介於 2.24 至 2.73 間，孔隙比定義為孔隙體積與顆粒體積之比，塑性限度指土壤在塑性狀態時，含有最低水量之界限，液性限度為黏土於塑性體轉變為滯性流體之含水量，塑性指數則為液性限度與塑性限度之差。表 2-15 中以鳳山水庫淤泥之塑性指數較高，另外，寶山、白河及鳳山水庫淤泥為無塑性，可能其淤泥含較多砂土而致使其無塑性。

測量水庫淤泥的一般營養及鹽類成份，可得知其是否可應用於農業肥料之生產。重金屬成份可做為淤泥棄置時之處理及環境污染之指標，各水庫之重金屬分析結果顯示，水庫淤砂之重金屬含量低於規定管制標準，浚渫之淤砂棄土應無重金屬污染之問題。而其化學性質分析則採用藥品定量定性分析法，主要可分析得 SiO_2 、 Al_2O_3 及 Fe_2O_3 等化學成分比例，可得知各水庫淤泥的主要成份特性，依其成份含量多寡做不同之用途，再生利用包括製成土壤改良劑、水泥膠結料及燒結成輕質骨材等。

表 2-1 水庫概況

水庫名稱	溪流名稱	位置	壩堰型式	功能
新山水庫	基隆河支流大武崙溪	基隆市安樂區	土石壩	公共給水
翡翠水庫	新店溪支流北勢溪	臺北縣新店市	混凝土拱壩	公共給水、發電、防洪
石門水庫	淡水河支流大漢溪	桃園縣龍潭鄉大溪鎮復興鄉	土石壩	公共給水、灌溉、發電、 防洪、觀光
大埔水庫	中港溪支流峨眉溪	新竹縣峨眉鄉	混凝土堰+閘門	灌溉
永和山水庫	中港溪支流北坑溝、中港溪支流南庄溪(越域引水)	苗栗縣頭份鎮三灣鄉	土石壩	公共給水、灌溉
明德水庫	後龍溪支流老田寮溪	苗栗縣頭屋鄉	土壩	公共給水、灌溉、觀光
德基水庫	大甲溪、大甲溪支流志樂溪	臺中縣和平鄉	混凝土拱壩	發電、灌溉、公共給水、觀光、防洪
鯉魚潭水庫	大安溪支流景山溪、大安溪	苗栗縣三義鄉	土石壩	公共給水、灌溉、觀光、防洪
石岡壩	大甲溪	臺中縣石岡鄉	混凝土堰+閘門	灌溉、公共給水、觀光
霧社水庫	濁水溪支流霧社溪	南投縣仁愛鄉	混凝土壩	發電
日月潭水庫	濁水溪、五城溪(武界壩越域引水)、水里溪支流五城溪	南投縣魚池鄉	混凝土心牆土壩	發電、 觀光、公共給水、灌溉
仁義潭水庫	八掌溪(引水渠)	嘉義縣番路鄉	土石壩	公共給水、觀光

表 2-1 水庫概況(續)

水庫名稱	溪流名稱	位置	壩堰型式	功能
烏山頭水庫	曾文溪支流官田溪、曾文溪(越域引水)	臺南縣六甲鄉官田鄉大內鄉東山鄉	土壩	灌溉、公共給水、觀光
白河水庫	急水溪支流白水溪	臺南縣白河鎮	土壩	灌溉、防洪、公共給水、觀光
曾文水庫	曾文溪	嘉義縣大埔鄉	土石壩	發電、灌溉、公共給水、
南化水庫	曾文溪支流後堀溪、高屏溪	臺南縣南化鄉	土石壩	公共給水
阿公店水庫	阿公店溪、高屏溪支流旗山溪(越域引水)	高雄縣燕巢鄉	土壩	灌溉、防洪
澄清湖水庫	高屏溪(抽水)	高雄縣鳥松鄉	土壩	公共給水、 觀光
鳳山水庫	高屏溪及東港溪(抽水)	高雄縣林園鄉	土石壩	公共給水
牡丹水庫	四重溪支流汝仍溪	屏東縣牡丹鄉	土石壩	灌溉、公共給水

資料來源：經濟部水利署網站[1]；經濟部水利署北區水資源局網站[2]

表 2-2　翡翠水庫歷年淤積測量表

清淤期別	起訖年月	蓄水呆容量 10^3M^3 (EL110M 以下)		有效蓄水容量 10^3M^3 (EL110M 以上)		合計總蓄水容量 10^3M^3			平均淤積
		剩餘	淤積	剩餘	淤積	剩餘	淤積	累計	(年)
0	-	-	-	-	-	406000	-	-	-
1	73.07-78.03	55935	***	344093	***	400028	5972	5972	1257
2	78.04-78.12	55310	625	343697	396	399007	1021	6993	1361
3	79.01-79.12	53048	2262	344989	-1292	398037	970	7963	970
4	80.01-80.12	52688	360	344368	621	397056	981	8944	981
5	81.01-81.12	52164	524	343928	440	396092	964	9908	964
6	82.01-82.12	52009	155	343677	251	395686	405	10313	405
7	83.01-83.12	51693	316	343104	573	394797	889	11202	889
8	84.01-84.12	51302	391	343109	95	394311	486	11688	486
9	85.01-85.12	49742	1560	341093	1916	390835	3476	15164	3476
10	86.01-86.12	49226	516	340832	261	390058	777	15942	777
11	87.01-87.12	48563	663	340117	714	388680	1377	17319	1377
12	88.01-88.12	48502	61	339694	423	388196	484	17803	484
13	89.01-89.12	50452	-1950	336904	2790	387356	840	18643	840
14	90.01-90.12	50370	82	335633	1272	386003	1354	19997	1354
15	91.01-91.12	49627	743	335908	-276	385535	467	20464	467
16	92.01-92.12	49975	-348	335345	562	385320	214	20678	214
合計	-	-	5960	-	8746	-	20678	-	-
平均	-	-	-	-	-	-	-	-	1060

資料更新日期：93 年 2 月 17 日

資料來源：臺北翡翠水庫管理局網站[3]

表 2-3　石門水庫歷年淤積測量表

清淤期別	起迄年月	有效容量 10^3M^3		合　　計 10^3M^3			年平均淤積 10^3M^3	
		剩餘	淤積	剩餘	淤積	累計淤積	每期	累計
1	52.05-53.03	246,260	5,620	289,650	19,470	19,470		
2	53.03-54.04	245,660	600	288,880	770	20,240	700	10,653
3	54.04-55.05	244,810	850	286,890	1,990	22,230	1,809	7,410
4	55.05-56.05	244,250	560	284,700	2,190	24,420	2,190	6,105
5	56.05-57.06	244,890	-640	283,520	1,180	25,600	1,073	5,020
6	57.06-58.05	244,350	540	282,190	1,330	26,930	1,478	4,488
7	58.05-59.06	242,480	1,870	277,160	5,030	31,960	4,573	4,501
8	59.06-60.06	241,140	1,340	275,750	1,410	33,370	1,410	4,120
9	60.06-61.12	240,520	620	270,520	5,230	38,600	3,487	4,021
10	61.12-63.08	240,518	2	270,285	235	38,835	138	3,437
11	63.08-64.11	241,108	-590	269,985	300	39,135	250	3,131
12	64.11-65.11	238,477	2,631	267,957	2,028	41,163	2,028	3,049
13	65.11-66.11	238,730	-253	267,170	787	41,950	787	2,893
14	66.11-67.11	238,130	600	266,664	506	42,456	506	2,739
15	67.11-68.11	238,034	96	266,480	184	42,640	184	2,584
16	68.11-69.11	238,357	-323	265,653	827	43,467	827	2,484
17	69.11-70.11	238,375	-18	265,530	123	43,590	123	2,356
18	70.11-71.11	238,439	-64	264,638	892	44,482	892	2,281
19	71.11-72.11	238,986	-547	264,540	98	44,580	98	2,175
20	72.11-73.11	238,956	30	264,471	69	44,649	69	2,077
21	73.11-74.11	236,456	2,500	260,776	3,695	48,344	3,695	2,149
22	74.11-75.11	236,036	420	260,651	125	48,469	125	2,063
23	75.11-76.11	235,560	476	260,428	223	48,692	223	1,987
24	76.11-77.11	235,669	-109	260,840	-412	48,280	-412	1,893
25	77.11-78.11	235,337	332	260,667	173	48,453	173	1,828
26	78.11-79.11	235,607	-270	259,974	693	49,146	693	1,787
27	79.11-80.11	236,590	-983	261,376	-1,402	47,744	-1,402	1,675
28	80.11-81.11	236,670	-80	261,378	-2	47,742	-2	1,618
29	81.11-82.11	237,387	-717	262,359	-981	46,761	-981	1,533
30	82.11-83.11	239,075	-1,688	261,826	533	47,294	533	1,501
31	83.11-84.11	239,599	-524	261,927	-101	47,193	-101	1,452
32	84.11-85.11	234,495	5,104	253,257	8,670	55,863	8,670	1,668
33	85.11-86.11	233,826	669	251,780	1,477	57,340	1,477	1,662
34	86.11-87.11	233,086	740	250,768	1,012	58,352	1,012	1,644
35	87.11-88.11	232,766	320	250,310	458	58,810	458	1,611
36	88.11-89.11	232,560	206	250,036	274	59,084	274	1,576
37	89.11-90.11	238,251	-5,691	253,658	-3,622	55,462	-3,622	1,441
38	90.11-92.04	237,601	650	253,252	406	55,868	271	1,397
合計			14,279		55,868			
容量損失		5.67%		18.07%				

資料來源：經濟部水利署北區水資源局網站[2]

表 2-4　大埔水庫歷年淤積測量表

清淤期別	起迄年月	總容量 10^3M^3			平均淤積 10^3M^3
		剩餘	累計浚渫	累計淤積	每年
0		9,258	-	-	-
1	49~50	9,000	-	258	-
2	50~60	5,246	-	4,012	-
3	60~67	4,900	-	4,358	
4	67~70	4,750	-	4,508	-
5	70~76	4,534	-	4,724	-
6	76~86	5,499	1,379	3,758	-
7	86~88	5,505	1,463	3,752	-
合計			2,824	3,752	-
平均淤積率(民國 49 年~88 年)					134
平均淤積率(民國 49 年~60 年)					474
平均淤積率(民國 60 年~88 年)					43

資料來源：「大埔水庫更新改善規劃」，經濟部水利處中區水資源，民國九十年[5]。

表 2-5　明德水庫歷年淤積測量表

清淤期別	起迄年月	總容量 10^3M^3		
		剩餘	淤積	累計淤積
0		17,700		
1	59.07~60.07	16,900	800	800
2	60.07~62.07	15,750	1,150	1,950
3	62.07~64.07	15,490	260	2,210
4	64.07~69.07	15,690	-200	2,010
5	69.07~78.07	14,250	1,440	3,450
6	78.07~83.06	14,093	-679	3,607
7	83.06~86.04	14,438	-1,550	3,262
8	86.04~88.05	14,104	-1,550	3,596
合計			3596	

資料來源：「水庫淤砂再生資源技術研究」，經濟部水利署，民國九十一年[9]。

表 2-6　鯉魚潭水庫歷年淤積測量表

清淤期別	起迄年月	總容量 10^3M^3			平均淤積 10^3M^3
		剩餘	淤積	累計淤積	每年
0		126,069			
1	81.11~85.04	125,988	81	81	23
2	85.04~86.04	125,466	522	603	134
3	86.04~87.04	125,450	15	618	112
4	87.04~88.08	125,431	20	638	93
5	88.08~90.12	123,848	1,582	2,220	242
合計			2,220		

資料來源：「水庫淤砂再生資源技術研究」，經濟部水利署，民國九十一年[9]。

表 2-7　石岡壩水庫歷年淤積測量表

清淤期別	起迄年月	總容量 10^3M^3		
		剩餘	累計淤積	
			無浚渫	有浚渫
0		3,380		
1	66.10~71.12	1,887	1,512	1,512
2	71.12~74.06	1,687	1,692	1,804
3	74.06~75.06	1,690	1,689	1,738
4	75.06~76.06	1,567	1,812	1,945
5	76.06~77.06	1,810	1,569	1,652
6	77.06~78.04	1,555	1,824	1,937
7	78.04~81.01	1,665	1,714	-
8	81.01~83.10	1,565	1,814	-
合計			1,814	

資料來源：「水庫淤砂再生資源技術研究」，經濟部水利署，民國九十一年[9]。

表 2-8　日月潭水庫歷年淤積測量表

清淤期別	起迄年月	總容量 10^3M^3			平均淤積 10^3M^3
		剩餘	淤積	累計淤積	每年
1	~77	138,675	32,946	32,946	610.1
合計					

資料來源：「水庫淤泥固化與棄置」，財團法人中興工程顧問社，民國八十八年[4]。

表 2-9　霧社水庫歷年淤積測量表

清淤期別	起迄年月	總容量 10^3M^3			平均淤積 10^3M^3
		剩餘	淤積	累計淤積	每年
0	~46.04	150,000			
1	46.04~48.07	145,000	5,000	5,000	222
2	48.07~50.10	140,448	4,552	9,552	202
3	50.10~53.12	139,879	569	10,121	18
4	53.12~55.04	138,216	1,662	11,783	125
5	55.04~58.12	132,752	5,464	17,248	149
6	58.12~65.07	127,856	4,895	22,143	74
7	65.07~74.07	115,465	12,391	34,534	138
8	74.07~77.02	109,878	5,587	40,121	216
9	77.02~80.04	105,824	4,053	44,175	128
合計			44,175		

資料來源：「水庫淤砂再生資源技術研究」，經濟部水利署，民國九十一年[9]。

表 2-10　烏山頭水庫歷年淤積測量表

清淤期別	起迄年月	總容量 10^3M^3			平均淤積 10^3M^3
		剩餘	淤積	累計淤積	每年
0	~19	154,158			
1	19~28	137,863	16,295	16,295	1,810
2	28~33	128,013	9,850	26,145	1,867
3	33~41	119,900	8,113	34,258	1,557
4	41~49	118,160	1,740	35,998	1,199
5	49~52	113,280	4,880	40,878	1,238
6	52~61	103,930	9,350	50,228	1,168
7	62~67	95,331	8,599	58,827	1,225
8	67~71	84,500	10,831	69,658	1,339
9	71~73	84,050	450	70,108	1,298
10	73~75	83,759	291	70,399	1,257
11	75~82	94,762	-11,003	59,396	942
12	82~86	89,109	565	65,049	976
合計			65,049		

資料來源：「烏山頭水庫淤積清理規劃」，經濟部水利處，民國九十年[7]。

表 2-11　曾文水庫歷年淤積測量表

清淤期別	起迄年月	總容量 10^3M^3			年平均淤積 10^3M^3
		剩餘	淤積	累計淤積	每年
1	62.04~63.04	712,770	0	0	
2	63.05~64.06	712,183	517	517	230
3	64.07~65.06	698,599	13,624	14,141	4,351
4	65.07~66.05	693,260	5,299	19,440	4,665
5	66.06~67.05	686,702	3,558	22,998	4,451
6	67.06~68.05	684,949	2,753	25,751	4,176
7	68.06~69.04	681,328	2,673	28,424	4,012
8	69.05~70.02	681,328	2,948	31,372	3,963
9	70.03~70.12	672,176	9,152	40,524	4,631
10	71.01~71.12	669,586	2,590	43,114	4,422
11	72.01~72.12	667,663	1,923	45,307	4,189
12	73.01~73.12	665,250	2,413	47,450	4,038
13	74.01~74.12	663,926	1,324	48,774	3,825
14	75.01~75.12	662,166	1,760	50,534	3,675
15	76.01~76.12	659,952	2,214	52,748	3,576
16	77.01~77.12	654,574	5,378	58,126	3,691
17	78.01~78.12	644,203	10,371	68,497	4,089
18	79.01~79.12	641,741	2,462	70,959	3,998
19	80.01~80.12	638,972	2,769	73,728	3,932
20	81.01~81.12	637,000	1,972	75,700	3,833
21	82.01~82.12	631,497	5,503	81,203	3,913
22	83.01~83.12	630,349	1,148	82,351	3,786
23	84.01~84.12	629,461	888	83,239	3,659
24	85.01~85.12	608,256	21,205	104,444	3,397
25	86.01~86.12	611,270	-3,014	101,430	4,098
26	87.01~87.12	608,317	2,953	104,383	4,054
27	88.01~88.12	607,242	1,075	105,458	3,942
28	89.01~89.12	606,322	920	106,378	3,799
29	90.01~90.12	597,447	8,875	115,253	4,099
合計				115,253	4,099

註：86 年淤積量為負值係 85 年架伯颱風過後造成大量且高厚度之淤積，十二月測量時沈泥密度未達穩定狀態，經過一年高水位高壓力沈泥受壓密下淤積面逐漸降低，遂淤積呈負值。

資料來源：「曾文水庫淤積清理及後續處理可行性研究」，經濟部水利處南區水資源局，民國九十一年[10]。

表 2-12　南化水庫歷年淤積測量表

清淤期別	起迄年月	總容量 10^3M^3			平均淤積 10^3M^3
		剩餘	淤積	累計淤積	每年
1	~74.04	158,00	0	0	0
2	74.04~82.06	155,00	-	-	-
3	82.06~88.03	138,00	17,000	17,000	2,960
合計			17,000		

資料來源：「水庫淤砂再生資源技術研究」，經濟部水利署，民國九十一年[9]。

表 2-13　阿公店水庫歷年淤積測量表

清淤期別	起迄年月	總容量 10^3M^3			平均淤積 10^3M^3
		剩餘	淤積	累計淤積	每年
0		32,500			
1	~44.01	18,850	1,210	1,210	580
2	44.01~46.06	16,700	2,270	3,480	939
3	46.06~48.04	15,750	740	4,220	403
4	48.04~53.06	13,850	1,940	6,160	375
5	53.06~56.04	28,800	1,740	7,900	614
6	56.04~58.07	27,560	1,240	9,140	5,514
7	58.07~60.04	27,070	490	9,630	280
8	60.04~65.10	23,450	3,620	13,250	658
9	65.10~70.04	21,160	2,290	15,540	508
10	70.04~75.08	19,550	1,610	17,150	301
11	75.08~80.12	18,570	980	18,130	183
12	80.12~87.12	17,174	1,395	19,525	199
合計			19,525		
長期年淤積率(民國 42 年~民國 87 年)					424
近期年淤積率(民國 70 年~民國 87 年)					221

資料來源：「水庫淤砂再生資源技術研究」，經濟部水利署，民國九十一年[9]。

表 2-14 水庫容量及清淤量比較

區別	水庫名稱	完工當年	89 年量測	比較	平均年遞減量	容量減少率(%)	完工當年	89 年量測	比較
北部	西勢水庫	65	45	20	0.30	30.96	56	44	12
	新山水庫	1000	1000	0	0.00	0.00	975	975	0
	直潭水庫	-	-	-	-	-	-	-	-
	翡翠水庫	40,600	38,736	1864	138.10	4.59	35,007	33,690	1317
	石門水庫	30,912	25,004	5908	161.90	19.11	25,188	23,256	1932
	青草湖水庫	-	-	-	-	-	-	-	-
	寶山水庫	547	496	51	3.30	9.31	535	484	51
	大埔水庫	940	551	389	12.80	41.44	778	542	236
	劍潭水庫	-	-	-	-	-	-	-	-
中部	永和山水庫	2,958	2,822	136	8.40	4.60	2,842	2,725	117
	明德水庫	1,770	1,410	360	11.80	20.32	1,650	1,391	259
	德基水庫	25,541	23,200	2341	89.20	9.17	18,300	17,000	1300
	鯉魚潭水庫	12,607	12,543	64	7.90	0.51	11,987	11,988	-1
	谷關水庫	1320	704	616	17.70	46.67	1120	704	416
	石岡壩	270	40	230	-	-	270	40	230
	霧社水庫	14,860	9,142	5718	135.10	38.48	14,600	9,142	5458
	日月潭水庫	17,162	15,223	1939	29.00	11.30	15,112	13,835	1277
	頭社水庫	30	28	2	0.10	8.58	24	23	1

附註：部份淤積出現負值係因清淤之故。

表 2-14 水庫容量及清淤量比較(續)

		總容量(萬立方公尺)					有效容量(萬立方公			
區別	水庫名稱	完工當年	89 年量測	比較	平均年遞減量	容量減少率(%)	完工當年	89 年量測	比較	
南部	蘭潭水庫	980	948	32	1.20	3.23	900	892	8	
	仁義潭水庫	2,911	2,711	200	14.80	6.87	2,732	2,585	147	
	鏡面水庫	115	112	3	0.20	3.04	99	99	0	
	烏山頭水庫	15,416	8375	7041	99.80	45.67	15,416	8375	7041	
	白河水庫	2509	1327	1182	33.30	47.13	2509	1327	1182	
	德元埤水庫	386	178	208	4.70	53.83	386	175	211	
	虎頭埤水庫	136	84	52	0.60	38.03	136	80	56	
	鹽水埤水庫	76	26	50	1.10	66.26	76	26	50	
	內埔子水庫	-	-	-	-	-	-	-	-	
	鹿寮溪水庫	378	118	260	4.20	68.75	357	118	239	
	尖山埤水庫	699	306	393	6.30	56.18	633	306	327	
	曾文水庫	71,270	60,632	10638	384.50	14.93	59,550	56,812	2738	
	南化水庫	15,441	13,800	1641	218.80	10.63	14,433	13,455	978	
	阿公店水庫	3549	-	-	-	-	2035		-	
	澄清湖水庫	500	435	65	1.10	13.00	230	343	-113	
	鳳山水庫	920	815	105	6.60	11.44	850	780	70	
	牡丹水庫	3,118	2,940	178	32.40	5.71	3,055	2,908	147	
	龍鑾潭	376	368	8	0.20	2.26	363	352	11	

附註：部份淤積出現負值係因清淤之故。

表 2-14 水庫容量及清淤量比較(續)

		總容量(萬立方公尺)					有效容量(萬立方公			
區別	水庫名稱	完工當年	89 年量測	比較	平均年遞減量	容量減少率(%)	完工當年	89 年量測	比較	
其他地區	馬鞍水庫	-	-	-	-	-	-	-	-	
	成功水庫	108	107	1	0.10	1.48	104	105	-1	
	東衛水庫	19	16		0.10	14.66	19	16	3	
	興仁水庫	68	74	-6	-0.30	-8.68	64	69	-5	
	西安水庫	24	24	0	0.00	0.00	24	24	0	
	七美	23	23	0	0.00	0.00	23	23	0	

附註：部份淤積出現負值係因清淤之故。

來源資料：經濟部水利署保育事業組[1]。

水庫淤積緊急浚渫計畫，經濟部水資源局，民國九十一年[8]。

表 2-15 水庫淤泥物理性質

		土壤組成成份(%)				物理性質							
區別	水庫名稱	礫石	砂土	粉土	黏土	比重		孔隙比(%)	液性限度(%)		塑性限度(%)	塑性指數(	
北區	翡翠水庫	0	8.1	71.7	20.2	2.71		-	40.1	40.1	-	11.9	
	石門水庫	0	2.1	37.6	60.3	2.73		0.867	49.67	46.6	29.55	20.12	2
	青草湖水庫	0	9.4	61.5	29.1	2.72		-	34.4	-	9.9	9.9	
	寶山水庫	0	54.9	39.8	5.3	2.68		-	-		-	NP	
	大埔水庫	0	1.6	62.6	35.8	2.65	2.72	2.63	43.1	34.5	24.4	18.7	
中區	明德水庫	0	6.3	71.2	22.5	2.68	2.73	2.96	56.6	39.9	31.5	25	1
	石岡壩	-	-	-	-	-		-	-		-	-	
	明潭水庫	0	26.0	64.2	9.8	2.69		-	48.7		-	25.3	
南區	仁義潭水庫	0	0.6	54.7	44.7	2.73		1.77	29.55	54.1	3.64	3.64	3
	烏山頭水庫	-	-	-	-	-		-	-	-	-	-	
	白河水庫	0	22.1	55.3	22.5	2.72	2.69	1.54	46.06	46.06	19.4	26.66	N
	虎頭埤水庫	0.3	2.4	59.7	37.6	2.73		-	37.2	37.2	-	19.3	
	阿公店水庫	0	0	31.9	68.1	2.7	2.73	1.78	50	47.8	24.7	24.3	2
	澄清湖水庫	1.5	6.9	45.6	46	2.45	2.72	-	53	82.5	-	26	5
	鳳山水庫	5.5	81.9	11	1.6	2.24	2.66	-	58	58	-	23	N

註： NP 為無塑性。

來源資料：「水庫淤砂再生資源技術研究」，經濟部水利署，民國九十一年[9]。

「水庫淤砂輕質骨材產製及輕質骨材混凝土應用與推廣」，內政部建築研究所，民國九十二年[11]。

表 2-16 水庫淤泥化學性質

		一般營養及鹽類成份				重金屬成份				
區別	水庫名稱	PH	有機質 C (%)	總氮 (mg / kg)	總磷 (mg / kg)	鉛 Pb (mg / kg)	鎘 Cd (mg / kg)	鉻 Cr (mg / kg)	銅 Cu (mg / kg)	鋅 Zn (mg / kg)
	翡翠水庫	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	石門水庫	6.82	66.96	71.6		28.23	-	16.35	27.04	132.04
	青草湖水庫	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	寶山水庫	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	大埔水庫	-	-	-	-	-	-		-	-
	明德水庫	7.45	7.3	516	420	5.04	3.04	0.262	3.31	-
	石岡壩	7.21	0.218	213	278	9.36	-	14.75	6.48	-
	日月潭水庫	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	明潭水庫	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	仁義潭水庫	7.11	2.25	74.08		14.07	-	-	25.13	103.6
	鏡面水庫	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	烏山頭水庫	7.43	0.713	668	622	18.07	ND	32.13	15.68	-
	白河水庫	6.96	3.1	83.41		24.17	ND	13.74	8.99	71.25
	德元埤水庫	-	-	1094	890	-	-	-	-	-
	虎頭埤水庫	7.09	0.464	409	366	5.14	-	12.53	6.52	-
	阿公店水庫	-	-	-	-	4.459	0.067	3.369	3.162	14.46
	澄清湖水庫	-	-	0.79	0.37	0.35	0.09	0.07	0.19	0.79
	鳳山水庫	-	-	1.93	0.879	2.22	1.66	0.8	15.3	34.2

註：ND 為 not detected，因濃度過低而無法量測。

來源資料：「水庫淤砂再生資源技術研究」，經濟部水利署，民國九十一年[9]。

「水庫淤砂輕質骨材產製及輕質骨材混凝土應用與推廣」，內政部建築研究所，民國九十二年[11]

第三章 國內外水庫淤泥資源化利用現況

下水道、事業廢棄淤泥及水庫淤泥等廣義淤泥廢棄物之處理與處置，須符合「減量化」、「資源化」、「無害化」及「安定化」等原則。傳統棄置掩埋之方式，因土地徵收不易而逐漸式微，如何將淤泥廢資材資源化且開展資源化途徑，已成為國內產官學界重視之研究目標。然而不同類別之淤泥，或是相同類別於不同產區之淤泥，其所含化學成分差異甚大，造成資源化處理方式有多元化之發展。根據國內外眾多研究報告之探討，如圖 3-1 所示，大致可將淤泥資源化方式歸納成「農業與土地利用」、「能源化」及「材料化」等三個利用方向。

3.1 淤泥資源化處理

3.1.1 農業及土地利用

淤泥之土地利用是因為農林及畜牧業對有機肥料之需求，早期台灣農業社會利用動物糞尿做為有機肥料加以使用，而後化學肥料逐漸取代傳統有機肥料。但是長期過度使用化學肥料，造成土壤急速酸化、土質變硬及腐植質含有率降低，且對綠農地的有機物或微量元素供給量減低，土壤緩衝能力下降，導致病蟲害頻發，因此有機農業漸獲重視。經堆肥化處理之淤泥，可將淤泥安定化、減少臭味產生，且於堆肥過程中產生約60~70℃以上溫度，可將大部份的病原菌及寄生蟲殺死，減少對人體健康之危害。加工製成之堆肥，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。日本於1996 年已有約半數都市使用淤

泥堆肥技術，施用於農地與牧草地的土壤還原，並使用在果樹園、高爾夫球場及公園等方面[13]。其他也可應用於礦區復育，或將其經過減毒、堆肥再處理程序，製成肥料或土壤改良劑等有用物質。

3.1.2 能源化

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。在歐美，利用消化瓦斯發電已行之多年。

3.1.3 材料化

經焚化後下水淤泥脫水之淤泥餅，所得之灰渣供作建築材料利用，國外已有相當程度之研究。一般將焚化灰渣或熔融熔渣當成原料，經加工成形、燒成等程序，做成輕質骨材、混凝土管、路面磚、壁材、磚瓦、裝飾品等建築材料，亦有將其與碎石混合做為道路基礎等應用。國外採用下水淤泥灰以製造營建材料之相關研究已相當多，以下則針對材料化之方法加以分類，包括以製成骨材，磚瓦及水泥砂漿等製品，並針對各文獻之研究成果加以彙整，如表3-1~ 3-3所列。

3.1.3.1 一般燒製之骨材

國外利用淤泥灰燒製骨材或輕質骨材，並運用於土建工程上已極為普遍。Enviroscience公司[32]於1982年提出使用淤泥灰於混凝土中，可取代水

泥至5%以上，或以2%重量取代細骨材，而不會對其力學性質造成任何不良之影響。

Bhatty與Reid [33]於1989年使用美國明尼蘇達州聖保羅市之焚化廠所產出之淤泥灰，以不同比例的淤泥灰，並以石灰替代水泥，研究淤泥灰對卜作嵐活性之影響。研究結果顯示，由於淤泥灰本身之細度及多孔性，儘管具有高矽、鋁、鈣含量，但仍缺少卜作嵐活性，因此，使用淤泥灰大量取代細骨材製成水泥砂漿之可能性不高。

1995年，Khanbilvardi 及Afshari [34]等使用淤泥灰製成混凝土細骨材，發現隨淤泥灰添加量增加，混凝土強度有降低之趨勢，造成強度降低之原因，為淤泥灰具較高之吸水特性。實用上，混凝土配比中淤泥灰可取代細骨材量達30%以上，此時混凝土強度較控制組強度低約20%，但仍在ACI 之設計範圍內。

3.1.3.2 輕質骨材

淤泥灰人造輕質骨材已有多位學者研究，1984年Kato及Takesue [35]將淤泥先焚化處理後粉碎，再與水及酒廠廢液混合，混合料製成圓球形後，以1050℃燒製粉碎淤泥灰製成人造輕質細骨材，骨材製品比傳統人造輕質細骨材具有較低之比重，而其強度僅稍低於傳統輕質骨材。

1985及1986年間，Elins [36]與George [37] 等人研究指出淤泥和黏土混合可用於製成輕質骨材，將廢水處理廠之民生廢水、黏土、明礬和Polyacrlic acid 混合，然後膠羽和絮凝。當沉澱槽的淤泥累積到約45%固體物厚度，將此固體物與黏土混合，製成圓球形顆粒在1070℃~1095℃間燒結，燒成體

做為輕質混凝土塊，具有類似陶瓷材料之強度。

Tay及Yip [38]，於1989年利用磚窯，以1050℃將脫水消化淤泥燒製成輕質粗細骨材製品，其實驗結果顯示，這些混凝土產品符合單位重、強度、隔熱性質和耐火的規範，且由淤泥灰所製成之輕質混凝土，具有較低之熱傳導率(0.27W/m-^{o}K) 與高度之耐火能力，因此，適合應用於絕熱和防火用途之材料。

1990年時，Yip及Tay [39]針對脫水化淤泥，以1050℃利用磚窯製成輕質粗細骨材製品，研究結果顯示，低熱傳導及高耐火之淤泥灰骨材適用於絕緣耐火混凝土，且其28天強度與其他商業化輕質骨材相當。

Bhatty及Reid [40, 41]亦曾研究輕質淤泥灰骨材之性質，利用1050℃至1110℃燒成圓球或版狀的淤泥灰輕質粗骨材，其比重為0.8~1.4g/cm^3，且圓球形試體有較佳之強度及較低之吸水特性，有些燒結骨材強度，甚至比用傳統膨脹性黏土所製之輕質骨材強度為高，達到中等強度混凝土規格，可應用於非結構性構材，或不需要高強度骨材之其他用途。

Tay及Show [42]於1991年將脫水消化淤泥與黏土混合，於1050~1080℃之磚窯內燒製，隨著黏土使用量增加，骨材強度亦隨之增加，其所製成之混凝土強度，可符合BS 8110 規範對輕質骨材混凝土最低強度之要求，因此，乾燥淤泥與黏土混合料，具有製成混凝土輕質骨材之潛力。

2001年Wainwriht及Cresswell [43]，利用下水淤泥與黏土混合物經過旋轉窯在1090℃下可製成輕質骨材，而其取代自然骨材之混凝土強度可達到35MPa，且密度為600~650kg/m^3，吸水率為7%，故由淤泥灰製造之成品性

質與其他商業用輕質骨材類似，具有製成結構材料之潛力。

3.1.3.3　燒製磚瓦製品

Shaw於1989年提出利用下水淤泥混合製磚，在當年已獲得英國專利[44]。而Tay 陸續於1984、1985及1987年提出，廢水淤泥與黏土混拌之混合料可燒製成磚 [45~47]。Alleman [48]和Slim [49]分別於1984及1991發表，利用淤泥與黏土及頁岩混合製成生物磚(biobricks)。1991年時，Truaner [50]表示淤泥灰可製成良好黏結磚之最大使用量分別30%~50%；Tay 表示添加淤泥灰所燒製出之紅磚，比添加乾淤泥所燒製成之磚具有較高強度，且其強度可與紅磚相似。

Trauner又利用淤泥灰以四種不同比例(0%、10%、20%、30%)與黏土混合燒製成磚，探討分別在1040℃與1120℃的燒製溫度下，試體之重量改變、乾縮、密度、抗壓強度、吸水率等變化。研究結果顯示，所有試體之乾縮量與控制組相似，而添加30%淤泥灰之抗壓強度達控制組之75%以上，但最終密度及吸水率則較低。

1996年間，Anderson等[51]利用流體化床焚化爐焚化之下水淤泥灰，添加於一般市售黏土磚，以下水淤泥灰替代砂石添加於紅磚，比較以980℃、1057℃、1087℃、1094℃、1130℃焚燒之前後差異。測試結果顯示，含淤泥灰之實驗性配比，無論有無焚燒的條件下，對控制組製品的陶瓷性質具有正面的貢獻。下水淤泥焚化灰已被適度使用於黏土磚而不會造成損害，因此具有價值性[51]。

在德國已有不少人研究使用下水淤泥焚化灰，應用於製磚與花磚工業

之可能性，而不同的下水淤泥處理程序將會對成品產生不同影響，例如使用沉降劑的污泥，其淤泥灰中將會有較高的鐵含量。Wiebusch 與 Seyfired [52] 於1997年採取四個不同廠區的淤泥灰進行研究。研究發現，淤泥焚化灰可作為一種助熔劑，在與黏土之混合材料中，淤泥焚化灰可降低燒結溫度，當添加10%淤泥灰時，會增加燒結試體強度，而添加量持續增加時，則燒結強度會降低。

3.1.3.4　部分取代水泥所製成之水泥砂漿材料

Tay [53, 54]於1987年時曾嘗試將淤泥以550℃燒製成灰後，以不同之重量比取代水泥，再與砂、粗骨材拌合後製成混凝土試體，發現當淤泥灰用量增加，混凝土破壞強度有下降之趨勢，而10%取代量之試體強度與控制組相當，故淤泥灰可用以取代水泥。

1989年時， Lisk [55]利用下水淤泥焚化灰，以10%、20%、30%之重量比，與波特蘭I型水泥及標準砂，加水充份拌合後製成砂漿，灌注在50mm 立方體模具中，實驗結果發現隨淤泥灰添加量增加，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27 MPa以上。

1994年，Pinarli 及Emre [56]研究指出將下水淤泥焚化後磨成粉末，可添加於卜特蘭水泥中製成水泥砂漿。Monzo、Paya、Borrachero 及Corcoles 等 [57]則利用下水淤泥焚化灰，以不同粒徑大小與水泥混合製成水泥砂漿，研究發現當添加量為15%時，粒徑越小之淤泥灰，因表面吸收水分子，造成自由水份減少，進而降低工作性；但其28天抗壓強度比純水泥漿體增加8~15%，而抗彎強度則增加3~5%。

其他研究顯示，脫水消化淤泥亦可做為水泥生料，將淤泥烘乾並以不同比例之石灰粉末混合，將混合料研磨並在可控制之高溫爐內，以不同溫度及時間焚燒，選用粒徑小於80 μm的灰進行各項性質測試。研究發現淤泥灰添加量為50%，並以1000℃燒結4小時，所得污泥灰水泥有較佳之抗壓強度。結果顯示混合成份、燒結溫度、燒結時間和養護狀態皆會對淤泥灰水泥之強度造成影響[58]。

Monzo等[59]於1999年使用淤泥灰，以15%及30%取代量部分取代水泥製成砂漿，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，如與添加飛灰比較，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。

2000年，Pandey及Sharma[60]將石灰淤泥混合水泥製成水泥砂漿，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。一般添加礦物於水泥砂漿中，會增加早期水化作用期間漿體之總孔隙率，因此，強度會隨孔隙率增加而減弱；然而添加石灰淤泥並不影響孔隙率與平均孔隙直徑。

3.1.3.5　使用於其他用途

日本將下水淤泥以熔融方式處理可做為土木材料，如道路之路基層、副基層或路床材等用途。Okoli 及 Balafoutas [61]利用乾淤泥餅底灰替代黏土材料做為掩埋層或襯裡材料，測試能否使用在於粒徑分佈、阿太堡限度、壓實特性、水力傳輸性與剪力強度等參數；乾淤泥餅底灰在乾燥與凍融作用下測試水力傳輸性，結果顯示適當壓實與穩定化之乾淤泥餅底灰可當做掩埋層或襯裡，乾污泥餅底灰之低水力傳輸性(1.15×10^{-7}m/s)可壓實成緊密

體，被壓實之乾淤泥餅底灰，相較於其他被壓實之黏土，在乾燥與凍融作用下具有較好之水力傳輸阻抗，同時被壓實乾污泥餅底灰比傳統壓實黏土具有較大之剪力強度，其維持穩定性之能力可利用於掩埋場邊坡設計上。

世界各國目前皆有焚化灰渣再利用之實例，法國巴黎有80%之灰渣利用於道路興建，主要做為交通流量較低道路之基層(Sub-base Course)材料；於西德約有80~90%之焚化灰渣被再利用當作土壤改良劑、隔音填充材及停車場或臨時道路之基材；而荷蘭在1985年以灰渣建造一條約100公尺之測試道路，其舒適性與一般道路相同[62, 63]。

3.2 水庫淤泥資源化處理情形

與一般下水淤泥及事業廢棄淤泥比較，水庫淤泥所含有機質比較少，且不易含有害物質，其處理成本較低，且再生利用方面應該更寬廣可行。水庫淤泥之資源化處理，分成「浚渫處理」、「中間處理」及「最終處置」三個階段，如圖 3-2 所示。浚渫後之淤泥先將有害及無害物質分離，不含有害物質之淤泥可經管線、水運或陸運方式運送到中間處理地點；浚渫後之兩階段後續處理中，中間處理作業之目的，在於脫除水庫淤泥之高含水量已利外運最終處置，因此，水庫淤泥資源化利用係於此兩階段中，研擬符合經濟性及可行性之技術。

3.2.1 中間處理

目前淤泥浚渫物之處理以沉澱池內淤泥為主要對象，大致可分為脫水及化學固化處理兩大類。

3.2.1.1 脫水處理

一、沉澱池曝曬脫水

大部分水庫浚泥皆採用此種方式，將水庫浚泥經輸泥管線抽到沉澱池，利用陽光曝曬將浚泥蒸發脫水，然而此方式需要較大面積之處理場，才可使處理時間縮短。

二、壓縮脫水

將淤泥攪拌成泥漿後，用高壓泵注入壓縮機或真空乾燥脫水機，經壓縮過濾等過程，將淤泥分離成水及泥餅。此固化品無抗壓強度，可作為窪地填土或堆置於永久棄土場。

三、離心機脫水

此法將淤泥沉澱物大致區隔土、砂及石子後，最後之淤泥粒狀沉澱物，經調整槽送至離心分離機分離出沉澱物，部分無法分離者，再經第二次離心並回歸原河道，除分離出之淤泥沉澱物外，其剩餘部份透過澄清淨化槽加以澄清，澄清物可再送離心機處理，或排放至衛生排水溝渠。

四、地工砂袋脫水

利用地工織物之材料特性及淤泥本身之自重，可將淤泥快速脫水固化，可縮短脫水時間及不需棄土場空間，對於含水量高之水庫淤泥具有較大之應用性。

3.2.1.2 化學固化處理

係將固化劑、皂土及水泥等化學藥劑於處理過程中加入，使淤泥加速凝固乾燥。經處理之淤泥可增加抗壓強度，易於搬運，不產生二次公害為其優點，缺點是固化劑成本高。台灣目前常用之固化劑產品有，多機能硬化劑、CTG 固化劑、URRICHEM 固化劑、田口固化劑、SF 固化劑、SST 固化劑及 CHEMFIX 安定劑等。

3.2.2 最終處置

水庫淤泥視其成分及粒徑大小，有不同之最終處置方式，回歸河道、淤泥棄置與回收再利用為傳統常見的方法。

淤泥回歸河道係將疏浚之水庫淤泥暫時棄置於水庫下游之河道中，俟水庫放水或河道中流量變大時，將淤泥運送移至下游河道或河口處，此舉可恢復建壩後下游河道及河口沖淤之平衡，但下游水流之含泥砂濃度將增加，可能影響下游取水口之水質。技術層面上，需進行水文分析與輸砂之分析，以確保河道輸砂之平衡。

淤泥棄置分為海洋投棄(海拋)與陸地投棄(掩埋)二項。將疏浚之淤泥以排放管或船隻運送至外海處置，各國基於海洋生態保育與海洋災害防治，大多已立法禁止廢棄物海拋行為。而選定水庫附近之低窪地點，將淤泥予以掩埋處理。以掩埋作為最終處理方式，必須選定適當地點。台灣地區地狹人稠，掩埋場址因地價高及附近居民反對，而面臨愈發難尋之問題，故淤泥應朝向資源再利用之方式發展。

無機淤泥可用為磚材，製成骨材，或經固化處理，作為路基、路面、人工魚礁、河川堤岸護坡及消波塊等；砂及礫石可直接供建材或骨材之用。

有機淤泥則經中間處理後，作為植生之用途，如土壤改良劑及養蝦池之底泥，以上皆為回收再利用之方式。綜觀目前台灣水庫淤泥之資源化利用，主要以「農業及土地利用」及「材料化」之技術為主。

3.2.2.1 農業及土地利用

水庫淤泥之來源為集水區之表土層，若浚泥形成的過程未受到污染，經過脫水後可加工形成農業土壤，掩埋與淤灌在台灣較為常見。浚渫後之水庫淤泥，於水庫附近之低窪地區進行掩埋，掩埋淤砂需先做適度固化，以利掩埋後之土地可供農耕、植生或其他用途。淤灌係將水庫清淤排出之泥水經由灌溉渠道導入農田，如此可解決浚泥外，亦可同時改良農地土質，以淤泥所含養分提高農田之肥力。再者，加工過之水庫淤泥可供農民從事「有機農業」之利用，提高農產品之價值，以因應加入 WTO 後對傳統產業之衝擊。

3.2.2.2 材料化應用

近年來，水庫淤泥資源化之相關研究眾多，依國內外相關文獻，可分為下列幾類：輕質骨材製作、燒結及壓密固結製磚、海拋或人工魚礁製作、地工織管製作及其他應用等。相關之文獻彙整於表 3-4 中。

3.2.2.2.1 輕質骨材製作

近年來台灣經濟發展迅速，許多公共建設大量興建造成砂石供應缺乏，天然骨材日益枯竭，而建地有限亦形成建築物高層化發展，因此建材輕質化成為研究之趨勢。政府於民國 84 年 7 月 19 日發佈鼓勵廢棄物之資

源化利用，故以水庫淤泥研製輕質骨材為時勢所趨。一般淤泥研製輕質骨材可分成冷結型、燒結型及發泡型等三種。冷結型輕質骨材乃是以水泥為粘結劑，以造粒法將粉末狀之飛灰及淤泥等無機廢棄物結合成形。燃煤飛灰及造紙業汽電共生飛灰，本身雖不具膠結能力，但其富含矽、鋁氧化物可與水泥水化產物形成卜作嵐反應，於室溫下養生，可達顆粒化且具耐久性及強度之水泥產物。

燒結型輕質骨材則是以造粒方式將粉末狀之燃煤飛灰、石材污泥、紙渣淤泥及造紙業汽電共生飛灰等無機廢棄物結合成圓型粒團，因無機廢棄物中含有高燒失量及高氧化矽成分，於高溫燒結過程可產生孔洞及氧化矽結晶相，於 800℃~1000℃下，可燒結成緻密且抗壓強度高的輕質骨材。

發泡型輕質骨材以造粒法將粉末狀無機廢棄物結合成圓粒狀，經由 1100℃~1250℃高溫使原料發泡膨脹。而原料中需含有特殊成分，於玻璃相形成後能逸出氣體；且原料必須能產生高溫玻璃相，具有足夠黏滯性以滯含逸出之氣體，具備以上兩個條件才可使原料膨脹。根據 Riley 教授之研究，適合製作發泡型輕質骨材之化學成分以二氧化矽(SiO_2)為主約 55%~75%，三氧化鋁(Al_2O_3)約為 10%~25%，其餘為三氧化二鐵(Fe_2O_3)、氧化鎂(MgO)、氧化鈉(Na_2O)、氧化鉀(K_2O)、三氧化硫(S_3O)及碳(C)等所組成，圖 3-3 為 SiO_2、Al_2O_3 及助熔劑(Fe_2O_3、MgO、Na_2O、K_2O 等)之三相圖，圖中虛線區域即為滿足燒製膨脹輕質骨材之組成化學成分範圍。

以水庫淤泥製成之輕質骨材，表殼層堅硬且內部含孔隙，所以質輕且具有適當強度，由於質輕、隔熱、耐火能力強及耐震性佳等優點，先進國家已大量使用輕質骨材混凝土，工程應用包括非結構性與結構性。

非結構性應用於製作預鑄元件，如隔間牆、房屋外牆或帷幕牆等，可減少建築物自重，提高隔熱效能；使用無細混凝土方式，可製作隔熱磚供應用於隔熱工程上，或製成透水磚，以作為可滲透式人行鋪面之材料。

隨著高性能混凝土之發展，輕質骨材混凝土強度最高已可提升至60MPa，足以應用於結構性構件。利用其質輕具強度之特點，可達到縮小構件斷面，降低結構物整體自重，以提升其耐震能力。輕質骨材應用實例如紐約雙子星大樓，當初建造時使用輕質混凝土樓版，以降低結構物重量；位於地震帶之紐西蘭威靈頓運動場，採用高強度預鑄輕質混凝土建造；其他如北歐國家，將輕質混凝土應用於預力橋樑或鑽油平台之建造[64]。

對於國內利用水庫淤泥產製輕質骨材之文獻，經整理後簡述如下：

彭予柱[15]於2000年，探討輕質混凝土與重質混凝土之新拌及硬固性質。研究結果顯示，由淤泥燒製而得的輕質骨材，具有極佳工程與抗風化能力，並可減輕混凝土自重，提高建築物抗震能力，可應用於核能設施等，取代部分日益不足之砂石，對環保具有正面效益。

2001年間，王順元[16]利用石門水庫淤泥，經人工造粒並乾燥後，加熱至1,000℃、1,100℃及1,200℃燒製出單位重1,690 ~1,960kg/m^3之輕質骨材，其中1,200℃所燒製之骨材具有光滑表面，吸水率為2.7%，可作為結構用輕質骨材。再添加包括煤灰、底灰、飛灰及爐石粉工業副產品於實驗中，前三者為合適之添加物，爐石粉則具過多的鹼性物質，不適於工程利用。范國晃[17]以1,200℃燒製淤泥骨材，並拌製混凝土與輕質磚，輕質混凝土之單位重降至1,700 kg/m^3左右，28 天抗壓強度達20 MPa與40 MPa以上，顯示輕質骨材之性質良好；輕質磚之單位重較低，且28天抗壓強度可達5MPa。

蔡昌宏[18]以電子加工業污泥與水庫淤泥混配燒製輕質骨材，其輕質骨材通過TCLP 毒性溶出試驗。利用緻密配比法所設計之優生輕質混凝土，具有良好的抗腐蝕性與隔熱性能。

蔡昆城[19]於2002年，針對淤泥再生輕質骨材所拌製高性能輕質混凝土，進行相關工程性質之研究，結果發現雖然輕質骨材抗壓強度甚低，但所拌製高性能輕質混凝土之耐久性與抗蝕性皆佳

此外，於 2003 年水庫淤泥輕質混凝土產製及規範研討會[20]，顏聰詳細說明水庫淤泥使用於輕質骨材之燒製與量產；黃兆龍探討針對不同水庫淤泥如何製作輕質骨材；陳豪吉深入研究輕質骨材混凝土之產製技術；林維明則進行輕質骨材特性試驗；李隆盛對水庫淤泥輕質骨材進行品質驗證；王和源研究南部水庫淤泥特性及應用於輕質骨材混凝土性質；而張朝順對非結構性輕質預鑄混凝土技術規範之研訂加以討論。

3.2.2.2.2 燒結及壓密固結製磚

壓密固結技術係將飛灰加入水庫淤泥拌合後壓實，使水庫淤泥成為可用建材，並提供低耗能之淤泥砂混合飛灰資源化處理方法。其產品之製成可依應用方式，區分為低、中及高強度成品，根據不同工程目標區分其應用途徑如下：

一、低強度需求

材料初期具有一定強度，但經自然風化後，材料將逐漸崩解，與自然環境融合，耐候年限為一至二年。如植草磚、灘地生態工程材料、園藝工材、道路美化護坡材料及土地改良等。

二、中強度需求

材料強度比較高，耐候性亦較長為二至五年。其應用為園藝砌磚、混凝土用骨材、灘地護岸砌石材料、邊坡穩定工法、生態工法材料及蛇籠工塊石。

三、高強度要求

強度需與水泥磚同，耐候性達五年以上。應用於行道磚、蛇籠工塊石、護坡砌石、生態工材及混凝土用骨材等。

國內眾多文獻中，1998至1999年間，徐慧玲[21]與葉軍柱[22]利用不同比例之燃煤飛灰，吸收淤泥中過多的水分，製造磚之乾胚，乾胚經10小時900℃及1,000℃之燒製後，成品符合一等、二等建築用磚標準。

陳永輝[23]1999年於水庫淤泥中添加30%、40%及50%之焚化灰渣，經10小時900℃、950℃及1,000℃燒製成磚，其抗壓強度高於一級磚之標準，吸水率與一般用磚相同。

2001年時，孫國鼎[24]使用水庫淤泥燒製鋪路磚，燒結體在成型壓力550 kg/cm^2，燒結溫度1,100℃，燒結時間60分鐘時，其燒結體物性可符合鋪路磚之要求。另外，混合淨水污泥比例達到40~50％時，可有效降低燒結體之軟化，當混合污泥燒結體在成型壓力為220 kg/cm^2，燒結溫度為1,150℃，燒結時間為60分鐘時，混合污泥燒結體符合鋪路磚之規範。

3.2.2.2.3 海拋或人工魚礁製作

浚渫後淤泥可利用於海埔地填置，或製成足夠強度之塊狀物，而拋於海堤或海中。作為海拋之水庫淤泥，須經過固化處理，以防有機物及有害物質之釋出而污染海域，在運輸過程中亦須避免造成二次公害。水庫淤泥用於海埔地填置時，其抗壓強度應較掩埋時為高，因經填置之海埔地一般皆將開發利用，而作為海拋之水庫淤泥，其抗壓強度須更高，可取代混凝土之功能，目前亦有將淤泥固化後作為人工魚礁之用途。

國內台電公司以飛灰為主要材，添加石灰、廢電石渣及少量水泥為固化劑，製作邊長 30 公分正立方體四孔煤灰人工魚礁共 160 個，於民國 73 年 6 月投放於高雄縣興達港內灣。蔡長泰等[25]「水庫清淤之研究」之研究報告指出，以白河水庫底泥為主材料，添加不同比例之水淬爐石及水泥，可製成適宜強度之人工魚礁材料，其中人工魚礁固化材料強度低限值約為 2l kgf/cm^2。本應用方法對於水庫淤泥「減量化」成果顯著，但其「經濟效益」仍需進行評估。

3.2.2.2.4 地工織管製作

地工織管係將地工織布縫成管狀，應用其本身高張力之特性，擠壓充填於其中之內容物，使其脫水並固化之地工類產品。地工織管運用力學原理壓縮內容物，無化學變化產生；柔性構造，形狀可隨地形改變；機具簡便，施工快速，可大幅縮短工期；維護容易，無內部淘空之虞。造價便宜，較傳統工法節省經費一半以上。可包裹之內容物粒徑達 0．06 公厘以下。

地工織管早於 1970 年代由美國陸軍工程師團所研發完成，目前已商業化並大量應用於護岸及環境保育方面，其袋體直徑約 1 公尺，長度可視需要任意調整。在水庫淤積清理作業時可先將水庫淤泥抽(挖)至沉澱池或臨時

堆置場，再填充至地工織管內運至適當地點作資源再利用。

3.2.2.2.5 其他應用

一、控制性低強度材料

控制性低強度材料（Controlled Low Strength Materials，簡稱 CLSM）為一種具備自我充填，用以替代優良級配之新興材料，其定義相當廣泛，舉凡可流動性的回填料、低收縮性的可控制式低密度回填料、可流動性漿體、可塑性之泥土水泥質材料及泥土水泥質泥漿等，皆可為廣義之CLSM。CLSM 兼具自充填特性，施作過程毋需任何額外夯實設備便可自動填充於管線周遭，加上水泥質材料的凝結特性足以滿足鋪面基底層承載力之需求。此材料於國內開發與應用，為解決回填工程問題方法。CLSM 若以混凝土的觀點來說，為一種 28 天抗壓強度不超過 1200psi，以膠結料、水、砂、石、卜作嵐材料以及特殊摻料等，透過配比設計製成之超低強度水泥質材料。通常使用符合 ASTMC 150 規定之波特蘭 I 型水泥或其他地盤改良所使用的固化劑作為膠結料，而添加飛灰、爐石等卜作嵐材料，則是為改善流動性、降低泌水及減少成本等。根據 CLSM 之觀念，水庫淤泥亦可用於回填工程，或是利用其流動性佳且易於造型之優點，製作消波塊等非結構性構造物。

二、特殊資材化利用

所謂特殊資材化即利用淤泥所含之特殊成分或其特殊性質，製造高再生價值之材料。例如Balashov與Boronin [65]

、張鎮南[26]及羅鈞瑋[27]等人，利用物理化學等方法，自淤泥中萃取分離出有用之有機物及微生物。對於某些兼納工業廢水之都市污水廠，其淤泥含高量金屬成分，Lue等[66]將焚化後之淤泥灰渣加以熔煉，並從中回收可觀之貴重金屬。此外，Jeyaseelan與Qing[67]指出下水淤泥含有多醣類等有機成分，因此具有回收作為重金屬吸附劑之應用潛力。水庫淤泥雖然不若下水淤泥含有較多之有機物及重金屬，能有以上之應用，但其富含之黏土質成分，卻擁有獨特之陽離子交換能力，可吸附陽離子於黏土表面，利用此一特點，將黏土改質成具特殊性質之功能性材料。林其賢[28]將改質奈米黏土添加至水泥砂漿中，由於改質奈米黏土表面為親油性，所以，不會影響拌合水量及吸水膨脹，且不含鈉鉀等對耐久性有害之金屬離子；研究結果發現抗壓及抗彎等機械性質皆有相當程度改善，而且其抗滲透性質有大幅之提升。因此，要提高水庫淤泥之再生價值，特殊資材有其發展之潛力。

3.3 材料化應用之生態性與適用性

由以上幾點，可知水庫淤泥材料化應用有許多方式，各有其具備之條件、限制因素及使用效果。欲決定使用何種處理方法，相關單位必須事先通盤考量各項條件，如土壤條件、地理條件、地質條件、交通狀況、預算經費、工程技術及法令規範等等，需妥善加以評估規劃，並予以個案處理，方能收到事半功倍之效果。

一般而言，製作輕質骨材及其應用、燒結及壓密固結製磚、海拋或人

工魚礁及地工織管製作等方式，皆能達到「減量化」、「資源化」、「無害化」及「安定化」等基本原則，且符合生態性要求，自然損壞、分解後，可與自然原貌合為一體，無礙於景觀美感。然而對於各種處理方式之經濟分析及資源化技術，仍需深入探討，以期發揮最佳之經濟效益。

表 3-1 下水淤泥材料化相關文獻-燒製骨材或輕質骨材

作者	資源化用途	研究結果
Enviroscience Inc. (1982)	取代細骨材	淤泥灰可取代水泥重量比至5%以上或於混凝土中以2%取代細骨材而不會影響力學性質。
J. I. Bhatty and K. J.Reid (1989)	取代細骨材	淤泥灰本身之細度及多孔性，儘管高矽、鋁、鈣含量，仍缺少卜作嵐活性。大量使用淤泥灰取代細骨材製成水泥砂漿的可能性低。
H. Kato and M. Takesue (1984)	輕質骨材	淤泥灰與水及酒廠廢液混合，製成圓球形並以1050℃燒製，製品比傳統人造輕質細骨材有較低的比重，而其強度僅稍低於傳統輕質骨材。
B. V. Elins, G. E. Wilson and R. M. Gersberg (1985)	輕質骨材	將淤泥與黏土混合， 製成圓球形顆粒在1070℃~1095℃間燒結，製成輕質骨材被用做輕質混凝土塊，其具有類似陶瓷材料之強度。
M. St. George (1986)	輕質骨材	淤泥與黏土混合燒結可製成輕質骨材。
J. H. Tay and W. K. Yip (1989)	輕質混凝土	利用磚窯以1050℃將脫水消化淤泥燒製成輕質粗細骨材。其輕質混凝土，有較低的K值和高抗火度，可應用在絕熱和防火方面。
J. I. Bhatty and K. J. Reid (1989)	製成骨材	以1050℃~1110℃燒成圓球或版狀的淤泥灰輕質粗骨材，其比重0.8~1.4g/cm^3，圓球形試體有較佳之強度及較低之吸水。
W. K. Yip and J. H. Tay (1990)	輕質骨材	脫水消化淤泥以1050℃燒製成輕質粗細骨材，低熱傳導及高耐火淤泥灰骨材可用作絕緣耐火混凝土，28天強度與其他商業化輕質骨材相當。
J. H. Tay and K. Y. Show (1991)	輕質骨材	混凝土的強度能符合BS 8110規範對輕質骨材混凝土最低強度之要求。
J. I. Bhatty, A. Malisci, I. Iwasaki and K. J. Reid (1992)	製成骨材	燒結試體強度，達中等強度混凝土，可應用在受應力較低區域，或較不需要高強度骨材之處。
R. Khanbilvardi and S. Afshari (1995)	細骨材	取代量達30%以上的細骨材，強度較未添加強度低20%，但仍在ACI之設計範圍內，其原因為淤泥灰具較高之吸水特性，使得混凝土強度降低。
P.J. Wainwriht and D.J.F. Cresswell (2001)	輕質骨材	下水淤泥和黏土混合在1090℃下製成輕質骨材，其取代自然骨材強度可達到35MPa，而密度為600~650kg/m^3，吸水率7%，有製成結構材潛力。

表 3-2 下水淤泥材料化相關文獻-燒製磚瓦製品

作者	資源化用途	研究結果
T. Shaw (1889)	燒製成磚	提出利用淤泥混合製磚的觀念。
J. H. Tay (1984,1985,1987)	燒製成磚	乾淤泥與黏土混拌、於1080℃磚窯內燒24hr，其燒製出的紅磚表面紋理不平，主因是有機物在鍛燒過程中釋效。
J. E. Alleman and N. A. Berman (1984)	製磚	淤泥與黏土及頁岩混合製成生物磚。
J. A. Slim and R. W. Wakefield (1991)	製磚	以不同比例與黏土混合燒製成磚，所有試體之乾縮量與控制組相似，最終密度及吸水率則較低，而添加30%之抗壓強度為控制組的75%以上。
E. J. Trauner (1991)	燒製成磚	添加淤泥灰所燒製出之紅磚比添加乾淤泥所燒製成之磚有較高強度
M. Anderson , R. G. Skerratt , J. P. Thomas and S. D. Clay (1996)	燒製成磚	標準製品的焚燒後顏色變化與含下水淤泥灰試體間無法辨識，控制組試體之焚燒結果不如添加下水淤泥灰之試體，下水淤泥焚化灰有正面的貢獻，並且可持續提升一般所預期的陶瓷性質。
B. Wiebusch and C. F. Seyfired (1997)	燒製成磚	淤泥焚化灰可作為一種助熔劑，在與黏土之混合材料中，淤泥焚化灰可降低燒結溫度，當添加量持續增加時，則燒結強度會降低。

表 3-3 下水淤泥材料化相關文獻-部分取代製成水泥砂漿材料

作者	資源化用途	研究結果
J.-H. Tay (1987)	取代水泥	淤泥以550℃燒製成灰，與砂、粗骨材合後製成混凝土試體，當淤泥灰用量增加，最終強度有下降的趨勢，結果指出淤泥灰可用來取代水泥。
J.-H. Tay (1987)	取代水泥	下水淤泥灰，以10%、20%、30%之重量比，與波特蘭Ⅰ型水泥及標準砂，拌合水後製成砂漿添加10%淤泥灰試體之抗壓強度可達到27MPa以上。
D. J. Lisk (1989)	取代水泥	將淤泥烘乾並與不同比例的石灰石粉末混合製成試體。混合成份、燒結溫度、燒結時間和養護狀態皆會對淤泥灰水泥試體之強度造成影響。
V. Pinarli and N. K. Emre (1994)	取代水泥	下水淤泥灰可添加於波特蘭水泥中製成水泥砂漿。
J. Monzo, J. Paya, M.V. Borrachero and A. Corcoles (1996)	取代水泥	粒徑越小之污泥灰由於表面吸收水分子，造成自由水份減少，而降低工作性；且添加污泥灰之砂漿，其28天抗壓強度會比純水泥漿體增加8~15%。
J.H. Tay and K. Y. Show (1997)	取代水泥	淤泥灰水泥之視體密度為685kg/m^3，比重3.33。卜作嵐活性指數為67.2%，試體呈現較低卜作嵐活性現象；同時需要較高的用水量。
J. Monzo, J. Paya, M.V.Borrachero , E.Peris-Mora (1999)	取代水泥	以淤泥灰來部分取代水泥，並不會對砂漿強度造成重大的影響；在早期的養護齡期，添加淤泥灰的強度會比添加飛灰的強度要好，但隨齡期增加此結果則會相反。
S.P. Pandey ,and R.L. Sharma (2000)	取代水泥	添加礦物於OPC當中會增加早期水化作用期間漿體之總孔隙率，強度會隨孔隙率增加而減弱，而添加石灰污泥並不影響孔隙率和平均孔隙直徑。

表 3-4 水庫淤泥材料化相關文獻

作者	資源化用途	研究結果
彭予柱 (2000)	輕質骨材	輕質骨材具有極佳工程與抗風化能力，並可減輕混凝土自重
王順元 (2001)	輕質骨材	所燒製之骨材可作為結構用輕質骨材。煤灰、底灰及飛灰可作為添加物以製造輕質骨材。
范國晃 (2001)	輕質骨材 輕質磚	輕質骨材之性質良好；輕質磚具低單位重
蔡昌宏 (2001)	輕質骨材	電子加工業污泥混配燒製輕質骨材，所拌製而成之優生輕質混凝土具有良好的工作性能。
蔡昆城 (2002)	輕質骨材	輕質骨材所拌製混凝土之耐久性與抗蝕性佳。
顏聰 (2003)	輕質骨材	水庫淤泥之資源化應用-輕質骨材之燒製與量產。
黃兆龍 (2003)	輕質骨材	不同水庫淤泥製作輕質骨材之探討。
陳豪吉 (2003)	輕質骨材	輕質骨材混凝土之產製技術。
林維明 (2003)	輕質骨材	輕質骨材特性之試驗。
李隆盛 (2003)	輕質骨材	水庫淤泥輕質骨材之品質驗證。
王和源 (2003)	輕質骨材	南部水庫淤泥特性及應用於輕質骨材混凝土性質之研究。
張朝順 (2003)	輕質骨材	非結構用輕質預鑄混凝土技術規範之研訂。
徐慧玲，葉軍柱 (1998,1999)	製磚	添加不同比例之燃煤飛灰，成品符合一等、二等建築用專標準。
陳永輝 (1999)	製磚	添加不同比例之焚化灰渣，抗壓強度高於一級用磚之標準。
孫國鼎 (2001)	製鋪路磚	單純淤泥與混合淨水污泥所製成之鋪路磚可符合規範。
張鎮南，羅鈞瑋 (2000)	有機化合物	利用物理化學等方法，自淤泥中萃取分離出有用之有機物及微生物。
林其賢 (2004)	改質黏土	將改質過之奈米黏土添加至水泥砂漿中，砂漿抗壓及抗彎等機械性質皆有相當程度改善，而且其抗滲透性質有大幅之提升。

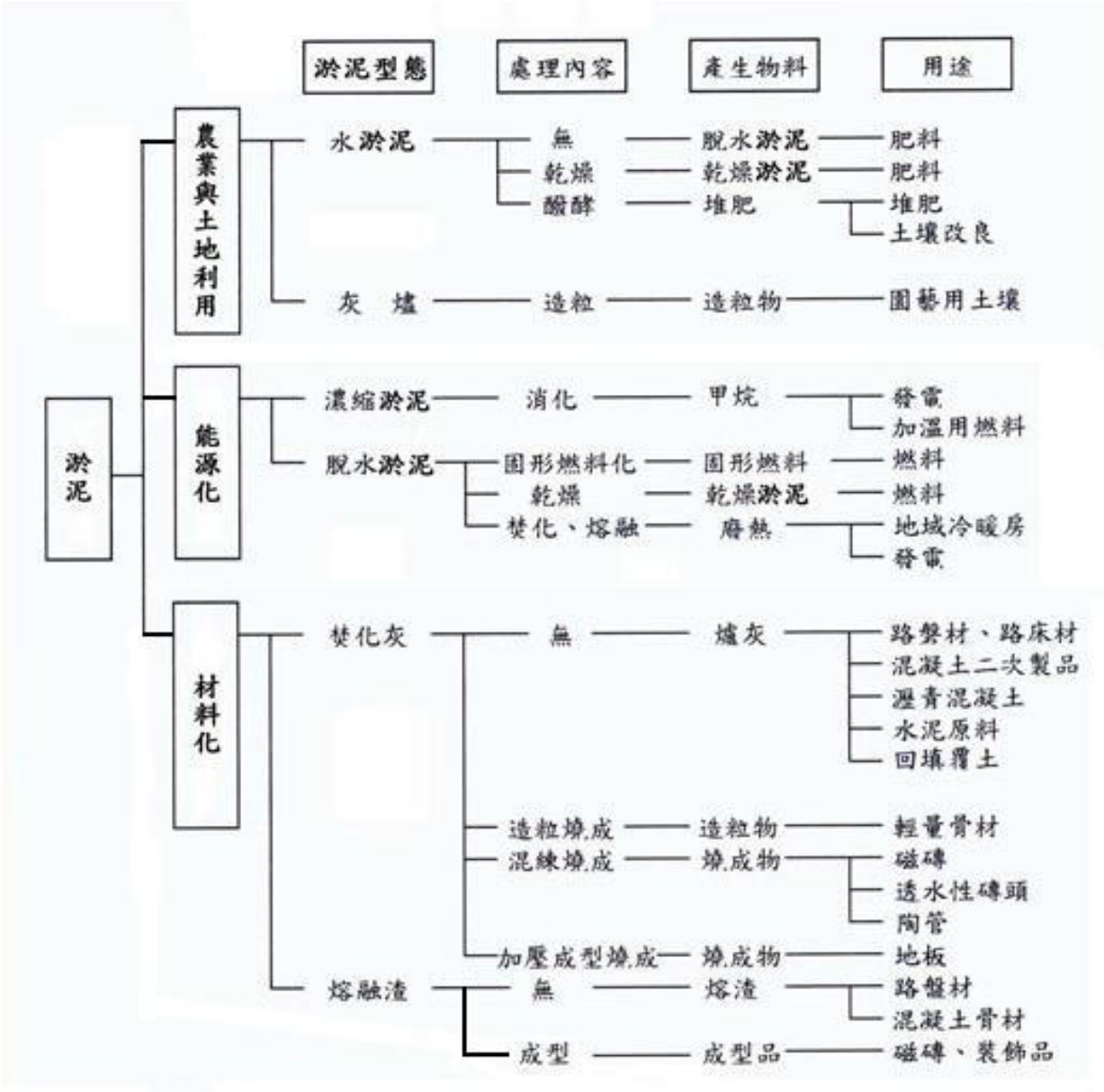

圖 3-1 淤泥資源化技術及應用

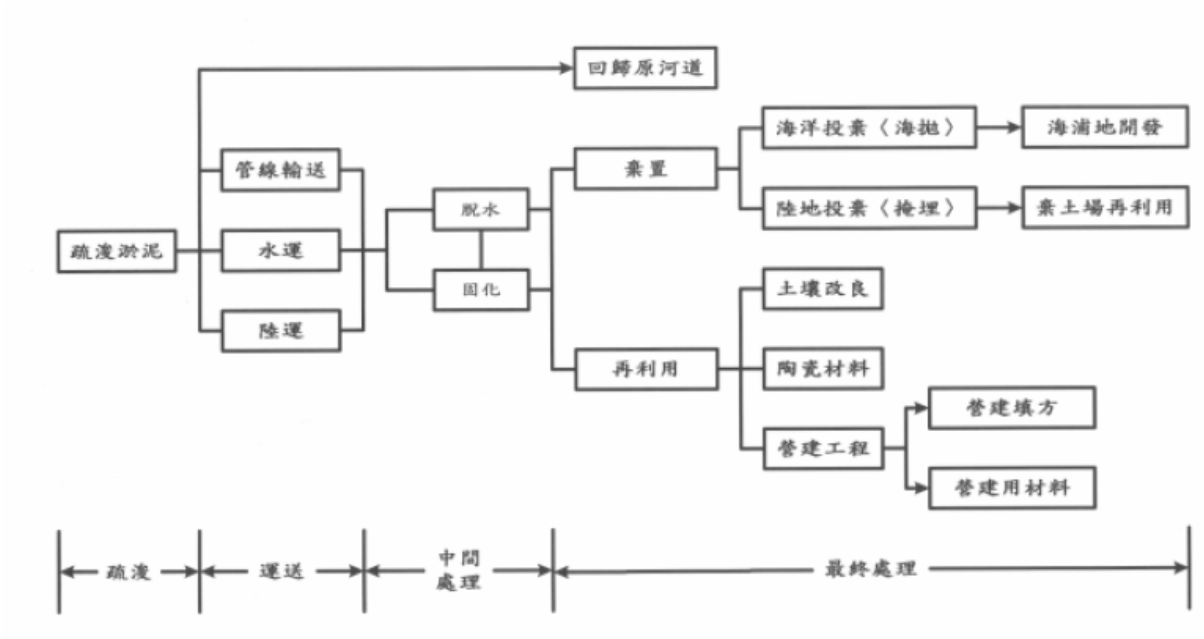

圖 3-2 水庫淤泥資源化處理流程

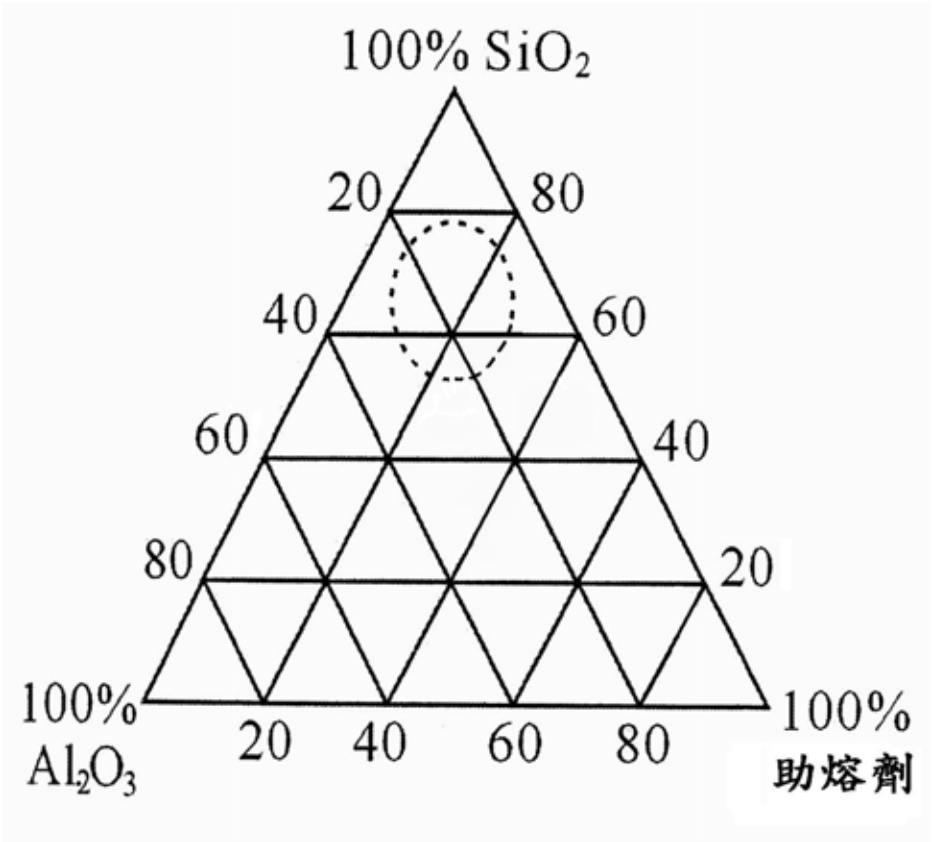

圖 3-3 原料可膨脹化學成分三相圖

第四章 輕質骨材及構件

4.1 輕質骨材

4.1.1 發展

輕質骨材在歐美國家發展較早，美國於 1917 年即開始以旋窯生產膨脹頁岩與膨脹黏土的輕質骨材。第一次世界大戰時期(1919~1927)，美國即使用大量之輕質骨材建造高層大樓，例如，位於聖路易斯的 Park Plaza Hotel 和堪薩斯市的 Bell Telephone Building。二次世界大戰前後，美國國家房屋署更大力推行輕質混凝土(Lightweight Aggregate Concrete，簡寫 LWAC)之應用。

歐洲地區最早使用人造輕質骨材完成道路橋樑之建造，其中以蘇聯對人造輕質骨材之應用較早；1950 年代，英國即陸續利用粘土燒製而成之輕質骨材，將其應用於建築物及橋樑上；挪威則於 1989 年起，陸續應用高強度輕質骨材(膨脹性粘土)混凝土於橋樑建築上；至於日本，早期由於經濟高度發展、投資建設費用巨大、天然骨材枯竭等原因，誘使其積極探究以人造輕質骨材填補天然骨材之不足，雖在第二次世界大戰以前，日本已開試使用人造輕質骨材，但仍未應用於土木工程上，直到 1968 年首次使用膨脹性頁岩燒成輕質骨材後，才引起日本土木工程界的興趣與使用。

輕質骨材強度由 9MPa、15~18MPa 提升至 22~30MPa，主要用於鐵路、道路橋樑上，也有使用於軟弱地盤上之鐵路高架橋建造，不但上部結構使用人造輕質骨材混凝土，在基腳部份也使用非造粒型膨脹性頁岩於混凝土上。台灣目

前利用水庫淤泥製成輕質骨材的技術已臻成熟，中興大學顏聰等教授由國科會補助之研究團隊，已利用產學研究成果將水庫淤泥產製輕質骨材之技術，移轉給相關廠商進行量產，計畫九十四年三月即可量產供給輕質骨材。輕質骨材具有質輕、防震、隔熱及防火的特色，因此，利用輕質骨材於越高大樓則越有利，剛完工落成的 101 大樓，即採用輕質骨材以減輕高樓之重量，且日前發包的國道六號南投支線，為國內第一個採用水庫淤泥輕質骨材混凝土的大型公共工程。

4.1.2 製程

台灣地區的水庫淤泥，具有大量足供燒製輕質骨材之化學成分，圖 4-1 所示為水庫淤泥燒製成輕質骨材的過程。由水庫淤泥所燒製成之輕質骨材，可利用其作為輕質混凝土的粗細骨材，進而應用於結構或非結構營建工程上。

輕質骨材可區分為天然和人造兩大類。天然輕質骨材大多為含有孔隙組織的火山噴出岩，乃是由火山不同深度所噴出之火山岩漿，待冷卻後成為形狀與性質差異甚多的多孔隙材料，其中實際應用的天然輕質骨材，包括浮石及泡沫火山岩等。但是，天然輕質骨材的藏量有限，品質也較不穩定，經一段時間採掘開發後，天然輕質骨材產量即漸趨於枯竭，對土木建築工程的長期應用而言，並非一理想的骨材來源。

人造的輕質骨材種類繁多，主要包括由黏土、頁岩、火山玻璃石、生雲母等燒製而成的膨脹頁岩、真珠石、蛭石等，以及由工業廢料，如爐石與飛灰等所製作成的膨脹爐石、燒結飛灰等。上述人造輕質骨材，其外形、顆粒結構及顏色等，皆有所差別，以人造輕質骨材顆粒單位重而言，其分佈範圍甚廣，介於 $100\,kg/m^3$ 到 $2000\,kg/m^3$ 之間，故工程性質差異甚大。

目前常用的人造輕質骨材大致可分為兩大類，分別為冷結型人造輕質骨材與燒結型人造輕質骨材。冷結型人造輕質骨材，大多採用工業副產品煤灰或飛灰等為其主要原料，利用水泥及石膏等膠結材料與砂互相膠結，製造過程不需加熱燃燒，僅靠膠結固化而成形，故稱之為冷結型人造輕質骨材，因煤灰與飛灰等材料本身重量輕，且於製作時顆料間將生成孔隙，所以可製成單位重較小之人造輕質骨材。燒結型人造輕質骨材，主要由黏土、頁岩及板岩等燒結而成，燒結型人造輕質骨材於製造上，最重要機理為原料之發泡行為，因發泡行為將影響燒結型人造輕質骨材燒製時的膨脹性質，發泡膨脹行為與原料的形成地質年代、礦物質及有機質含量有關。

4.1.3 成本分析

黃兆龍教授於「淤泥輕質骨材鋼筋混凝土之經濟效益分析」[31] 研究報告中，採用石門水庫之淤泥為製造輕質骨材原料及分析對象，以 10 年為設備折舊之年限，估算投資、生產及投資報酬率，以此分析料源直接、間接及利潤成本，最後，建議政府以補貼退縮方式方能達到激勵廠商投資生產水庫淤泥輕質骨材之意願。

目前台灣之輕質骨材多為外國進口，進口之輕質骨材單價高，每立方公尺約為 3000~4000 元，若以國內水庫淤泥製成輕質骨材，每立方公尺單價將低於 2000 元，假設銷售通路暢通，由於台灣營建業每年混凝土使用量大約為 3000 萬立方公尺，採用水庫淤泥每年約可生產 300 萬立方公尺之輕質骨材，佔有台灣營建業每年混凝土使用量之 10%，台灣本島又屬地震帶區，因此，可預料對輕質骨材之需求量將非常高，另外，在台灣以水庫淤泥製成輕質骨材，將可同時

解決水庫淤泥之堆置與處理問題。

水庫淤泥輕質骨材生產成本分析，包括設廠成本、人工成本、電力燃料費用、土地租金及其他等，分析結果如表 4-1 所列。於水庫附近設置輕質骨材廠，假設工廠生產量可達到每年 36 萬立方公尺，則於 10 年內平均分攤所有生產設備、人員、租金、水電等費用條件下，輕質骨材成本約為 450 元/立方公尺，此一單價之輕質骨材具有相當的競爭力，並且可提供就業機會。分析結果如下：

(a) 水庫淤泥輕質骨材生產成本分析結果顯示，以單位成本分析可知每立方公尺需要成本 450 元，若能爭取底泥棄置費 500 元/立方公尺，則純益每立方公尺為 50 元，換言之，按工程收取之棄置費，水庫淤泥輕質骨材即有 11%之利益存在。

(b) 如果以輕質骨材銷售價 1500 元／立方公尺而言，則至少投資生產輕質骨材有 1550/450=344%之投資回收利益(ROI)。當然，輕質骨材定價可訂為 2000 元／立方公尺。

(c) 建議政府於初期補助廠商清理費，然後在十年期間逐年減少補助，至第十年則開始收取採泥費用，或免費供廠商清泥及採泥，如此可減少政府水庫清淤所需預算。

4.1.4 相關規範

利用廢棄水庫淤泥再生為有用之骨材，且應用於各營建工程，其中最重的一環，乃是制訂相關輕質骨材之規範及標準，使結構設計者及材料使用者有法源依據，所以，首先需建立一套水庫淤泥輕質骨材之標準規範。內政部建築研究所於「水庫淤泥輕質骨材產製及輕質骨材混凝土應用與推廣」報告中，已研

訂相關規範，「燒結型輕質骨材」標準中包含輕質骨材之試驗方法，其試驗原理與一般常重粗細骨材相同，因此，可引用一般常重粗細骨材之測試方法，但部份試驗項目仍依其性能而加以修訂。人造或天然輕質骨材，其性質影響混凝土性能甚大，因此，其標準參酌中國國家標準、美國及英國等之相關規範後，訂定二項試驗法，並依混凝土用途分別制(修)訂輕質骨材相關標準五項，分別如下：

(1) 輕質粗粒料的顆粒筒壓強度試驗法
(2) 輕質粒料乾鬆密度及含水率試驗法
(3) 結構混凝土用輕質粒料
(4) 混凝土圬工用輕質粒料
(5) 隔熱混凝土用輕質粒料
(6) 結構輕質混凝土密度試驗法
(7) 輕質混凝土粒料中含鐵污染材料試驗法

4.2 輕質骨材混凝土

4.2.1 發展

輕質骨材混凝土係由輕質骨材取代傳統骨材所製成之混凝土材料，輕質骨材混凝土具有質輕、隔熱及強度夠等優點，世界各先進國家應用為營建材料已有多年歷史。尤其近年來，歐洲地區開始嘗試採用高強度輕質混凝土於大跨度橋梁、預力構造及軟弱地盤之高架道路興建，獲得相當好評，由於使用輕質骨材混凝土，將使橋梁上部構架呆重大幅降低，除可增大設計跨度外，亦可減少基樁設計之地基承載。台灣地區蘊藏有豐富之輕質骨材料源，在河川砂石資源

日益枯竭情況下，發展輕質骨材混凝土實為一可行方式。

4.2.2 工程性質

以水庫淤泥燒結所得之輕質骨材，內部多孔隙，表殼層堅硬，故質輕而具適當的強度，可用以取代傳統骨材以製成輕質骨材混凝土。以人造輕質骨材所拌製輕質骨材混凝土，其單位重在 $2000\,kg/m^3$ 以下，亦可利用其孔隙多及吸水率高之特性，將其應用於園藝植栽上，以無土栽培方式培育花卉及蔬果等。由於輕質骨材混凝土具有自重輕、隔熱、耐火性強、耐震性佳且強度夠等優點，其絕佳隔熱性，將可獲大幅度節約能源的效益，所以，歐美及日本等先進國家於二十世紀初，即開始研發推廣輕質骨材混凝土。輕質骨材混凝土之應用包括結構性工程與非結構性用途，茲分述如下：

(1) 輕質骨材之非結構性應用

輕質骨材混凝土具有量輕的優點，如依無細混凝土製作方式，可製成隔熱磚供隔熱建築之用。另外，也可製作非結構性預鑄元件，如帷幕牆、房屋外牆、隔間牆等應用於房屋建築上，將可降低建築物的自重，提高房屋隔熱性，減少能源消耗等益處。

(2) 輕質骨材之結構性應用

早期研究中，由於輕質混凝土的強度較普通混凝土低，只能應用於非結構性之工程上。由於高強度高性能混凝土的發展，使得輕質混凝土的強度可提升至 20~60 MPa (3000~9000 psi)，足以應用於結構構件上。應用輕質混凝土於結構

用途上，由於質輕故可降低結構物整體自重，進而減小結構物構件之斷面，增加可利用之空間，且提升結構物的耐震能力，同時由於輕質混凝土之低熱傳導率，將提高建物之隔熱性能。

輕質混凝土的應用實例，最知名乃屬美國紐約雙子星大廈，雙子星大廈於 1970 年建造時，樓版即採用 4 英吋厚的輕質混凝土版，主要目的為降低整體結構物重量。位於大洋洲的紐西蘭，與台灣同屬地震帶上的國家，結構物須採用耐震設計，威靈頓運動場即是採用高強度預鑄輕質混凝土建造，所使用的輕質混凝土單位重為 1845 kg/m^3，抗壓強度為 44MPa。另外，北歐地區多數國家更提升輕質骨材混凝土的特質，並將之應用於大跨度預力橋樑以及鑽油平台的興建。

4.2.3 相關規範

有關「輕質骨材混凝土技術規範」的制訂，由於混凝土使用規範眾多，在台灣地區，多使用美國混凝土學會的規範，但美國相關輕質骨材混凝土的規範，較適合美國地區等高吸水率的輕質骨材，對於台灣使用微細淤泥製造之表面瓷化而不吸水之輕質骨材而言，沿用「結構混凝土施工規範」(ACI)較佳，將輕質混凝土視為一般混凝土，以水膠比與抗壓強度控制輕質混凝土之品質，較能代表台灣輕質骨材混凝土之特性，且另外結合高性能混凝土，使輕質骨材混凝土成為典型易施工又耐久之混凝土，其規範內容共計九個項目如下所示：

(1) 總則與內容說明

(2) 輕質骨材混凝土材料

(3) 輕質骨材混凝土配比設計

(4) 輕質骨材混凝土拌和、產製及輸送

(5) 輕質骨材混凝土澆置及養護

(6) 輕質骨材混凝土品質管理

(7) 輕質骨材混凝土檢驗及查檢

(8) 輕質骨材混凝土施工品質之評定與認可

(9) 輕質骨材混凝土之驗收

輕質骨材的推廣與其於營建工程、橋樑工程、管道工程、鋪面工程、擋土護坡及景觀工程等用途和效益息息相關，而增加用途類別及提升使用效益最有效之方法為標準化、迅速且大量生產的預鑄流程，因此，提供業主、設計者、預鑄廠商及承攬廠商規劃設計、生產製造、施工建造與採購時，參考共同依循的準則，而訂定「結構及非結構用輕質骨材混凝土預鑄產品」之技術規範，其規範大綱如下：

(1) 研訂輕質粒料混凝土預鑄產品品質規格要項，作為產製、設計與採購的依循準則。

(2) 敘明輕質粒料混凝土預鑄產品產製技術要求，以為產製廠商研發與產製的技術規範。

(3) 訂定輕質粒料混凝土預鑄產品品質管理要項，以為產製廠商產製流程的管理準則。

(4) 說明輕質粒料混凝土預製產品產製、施工介面，以利產製廠商與承攬廠商合作契約執行的依循。

4.3 輕質磚

水庫淤泥組成多為黏土礦物，黏土礦物可做為許多產品的原料，其中以陶瓷工業原料為主，可以燒製成磚塊等陶器或是磁磚等日常用品之瓷器，水庫淤泥與紅磚黏土的成份較為接近，因此可利用此特此做水庫淤泥資源化的應用。

4.3.1 製程

水庫淤泥主要組成成份為 SiO_2、Al_2O_3 及 Fe_2O_3，以上三種成分佔總含量 85％以上，有機含量不高約 5~6％之間，目前水庫淤泥量測均顯示其為不含有害物質之無機淤泥，將水庫淤泥事先處理後，並進行相關試驗得知淤泥之性質，視需要與飛灰或焚化灰渣按照不同比例添加混合成製磚的原料，使用淤泥或飛灰、焚化灰渣製成磚之性質如表 4-2 所列。使用黏土或黏土類似物（也可使用無機非金屬材料燒結）在可塑狀態下成形，乾燥後在 540℃以上之充分高溫燒成得到必要之強度，即是燒結成瓷。磚為瓷器之一，具有多孔性、不透明，它的多孔程度則要依據瓷化程度而不同，瓷化乃指將陶瓷器的土體經熱處理，逐漸減少孔隙量之一般處理過程，一般皆小於 0.5％，而當瓷化性達到 0~0.02％時，試體將非常緻密。

燒製磚的過程，首先要使構成坯體之顆粒產生反應，利用粉碎顆粒、調整粒度到不至於分離的程度，泥漿須施作預先處理後才能壓製成形，預先處理包括篩除粗顆粒、除去可溶鹽及混合原料等步驟，預先處理結束後將泥漿加壓分離固體，再進行過濾以控制泥漿濃度及黏度，經過混合與捏練後才可進行壓製成形。成磚過程中最重要的，乃是任何部分都要具有相同填充密度，顆粒要有一定方向的排列，依照操作條件不同選擇最適合的成形法，選定成形法後便能推估燒成品的尺寸。接著將成形後的生坯乾燥除去內部所含物理水分，使之發

生收縮，一般而言，成形水分愈多乾燥收縮率愈大，坯體的燒成收縮須注意粒徑分佈、規定含水量及成形壓力，可從外觀看出其燒結程度。生坯乾燥後進入燒成程序，燒成是利用熱作用使粉末做成的坯體硬固，燒成過程中發生化學分解或生成玻璃相，同時發生轉化及轉移現象。影響燒成的因素很多，包括化學組成與礦物組成、粒度分佈、填充密度、體密度、冷卻速度、氧化、中性、還原現象、燒成溫度及時間，另根據酸鹼程度不同決定燒結加熱時所發生之化學反應，至此步驟製磚已經完成，另外，尚可視需要加以粉飾加工及上釉。使用淤泥或飛灰、焚化灰渣製成磚之抗壓強度，如圖 4-2 所列[68]。

4.3.1 基本性質

所謂淤泥製磚就是考慮淤泥具備條件、限制因素及優缺點等加以處理，在可塑狀態下成形，乾燥後經 540℃以上充分高溫燒成得到必要之強度，利用輕質骨材所拌製成之輕質磚，則如圖 4-3 所示。

輕質磚的性質衣添加飛灰或焚化灰渣量比例或與燒結溫度及時間有關，但依據第三章的文獻顯示，利用淤泥燒結成磚可製成符合會 CNS 一等磚標準，即抗壓強度可達$150kg/cm^2$以上，且同時具有單位重小的優點。

4.3.3 製磚成本

假設磚窯場之原料來源為石門水庫之淤泥與林口發電廠之飛灰，利用淤泥及飛灰來生產紅磚，目前取用林口發電廠飛灰為有償，每噸處理費用約為 210 元，以每塊磚約 2 公斤計算，若使用 30%飛灰為配比，則製磚之原料成本每塊磚將增加約 0.12 元。此外，利用添加飛灰生產紅磚，工廠需添增一台混練機，

每月電費預估增加約 0.05 元。預估以淤泥飛灰混合製成之紅磚成本較目前一般建築用磚成本多出 0.17 元，如表 4-3 及 4-4 所示。

4.3.4 建築用普通磚之規範

依 CNS 382 R2002 普通建築用磚標準，建築磚尺寸長為 230mm、寬 110mm、高 60mm，一等磚需燒製良好，外觀平整，無彎曲裂紋、砂眼等缺點，而規範將建築磚亦區別有一等磚及二等磚，一等磚吸水率需在 15%以下，抗壓強度$150kg/cm^2$以上，二等磚吸水率需在 19%以下，抗壓強度$100kg/cm^2$以上。完成之磚體則需進行試驗，檢驗標準則依 CNS 1127 R3042 規定建築用普通磚檢驗法。

4.4 植生保水輕質無細混凝土

無細混凝土（No-fines Concrete）為一種輕質多孔隙的混凝土，乃使用單一粒徑粗骨材並且不添加任何細骨材，藉由水泥漿體微薄包覆在此單一粒徑粗骨材顆粒之外層，粗骨材間為點與點之顆粒接觸，接觸點由少量漿體黏結以提供強度。當接觸點愈多，接觸面積也相對增加，黏結效果自然較理想，但接觸總面積仍要適量，無細混凝土具有低密度(1600~2000kg/m^3)、高透水性、低成本(水泥漿量減少)、低乾縮量、低熱傳導係數(k=0.7kcal/m.hr.℃)、無析離及水毛細現象等優點，可取代既有高重量、低透水性、高施工成本之碎石級配，應用於土木建築工程之排、透水層設計。

利用輕質骨材為粗骨材製造的輕質無細混凝土，可視為製成輕質骨材磚的

設計方法之一。其設計概念為犧牲部分粗骨材強度，進一步降低無細混凝土整體密度，主要應用範圍包括：耐燃隔音之輕質隔間牆，耐燃輕質屋頂隔熱系統，擋土牆後輕質排水設計，以及運輸不易須人工運搬之土木工程排透水層設計等。楊雅雲[29]採用水庫淤泥燒結輕質骨材為粗骨材製造的無細混凝土研究結果顯示，改變此無細混凝之粗骨材與水泥漿體重量比值或組成材料比例所製作的輕質多孔隙無細混凝土試體，最低單位重約 769kg/m^3，最高達 1779 kg/m^3，所得試體抗壓強度最高可達 34MPa，透水係數至少大於 0.08cm/sec，大都介於 0.08~0.1cm/sec 之間，最高可達到 0.13cm/sec，其結果顯示以輕質骨材拌製之無細混凝土質輕，強度夠且具高透水性。

另外，因陶磁燒結輕質骨材因具高孔隙率，符合無土植栽保水性與通氣性需求，故以陶磁燒結輕質骨材為粗骨材製造的保水輕質無細混凝土，未來將可配合園藝自動控制滴灌系統設計，同時提供植物水份與養份，發展一套以植被為透水表層之生態景觀排水系統。

表 4-1　水庫淤泥輕質骨材生產成本分析

成本因素	金額(千元)	說明
一、 設廠成本		
廠房設備	11,000	面積共約為 5,000 坪，預算共需$1,100 萬元。
製程設備	298,200	預計一套成本為$9,940 萬元，三組設備需$29,820 萬元。
機械設備	24,000	6 輛土方卡車及包裝、搬運設備，預計成本為$2,400 萬元。
消防設施	5,000	
液化瓦斯槽	4,500	預計一座成本為$150 萬元，三座為$450 萬元。
動力成本	24,000	預計一套成本為$800 萬元，三組為$2,400 萬元。
二、 人工成本 (不含間接成本)	635,390	每月人力成本；$4,865 千元，每年人力成本； (12+1) x $4,865 = 63,245 千元， 11 年人力成本總共$63,539 萬元。
三、 公用設施		
電力費用	186,680	製程設備需馬力；2,500HP，製程設備需電量 2,500HP x 0.746KW/HP=1,865KW 1,865KW x 24H = 44,760KWH = 44,760 度 一年的電力費用約為$18,668 千元，10 年為$18,668 萬元。
液化瓦斯費用	349,600	窯每星期需消耗 60,000 公斤的液化瓦斯， 10 年需 30,857,148 公斤，10 年費用 349,000 千元。
維修費用	2,200	
四、 土地租金	6,875	土地每坪租金$125 元，共 5,000 坪， 1 年需$62.5 萬元，11 年共需 687.5 萬元。
五、 其他		
R&D 費用	1,000	
短途運輸成本	66,000	
其他費用 (包括推廣、保險、零用金)	6,000	
總成本 (新台幣千元)	1,619,845	
每 m^3 單位成本(元，10 年總產量 3.600 m^3)	450	預估設廠需時 1 年，共 11 年。

表 4-2　使用淤泥、飛灰、灰渣製成磚之性質

% sludge by weight	Specific gravity	Water absorption %	Loss on Ignition %	Shrinkage (%)	
				Before firing	After firing
(a) Sludge					
0.0	2.38	0.03	5.4	4.0	9.91
10.0	2.32	0.74	10.7	4.2	10.15
20.0	2.24	1.37	14.3	3.7	10.84
30.0	2.17	2.58	19.7	4.2	12.26
40.0	1.98	3.63	22.3	4.0	12.87
(b) Industrial sludge					
30	2.90	3.3	0.43	20.0	24.8
40	2.89	1.3	0.39	18.8	24.8
50	2.95	23.1	0.45	13.5	-11.2
70	3.13	1.7	0.45	16.1	46.3
80	3.14	0.9	0.45	16.5	41.1
90	3.32	1.4	0.41	13.8	43.5
100	3.34	1.5	0.32	12.0	48.4
(c) Sludge ash					
0.0	2.38	0.03	5.4	4.0	9.91
10.1	2.42	0.07	4.9	2.5	9.95
20.0	2.46	0.11	4.8	2.5	9.10
30.0	2.50	1.39	4.7	3.4	9.36
40.0	2.55	1.52	4.7	3.2	9.79
50.0	2.58	1.70	4.6	3.0	10.51

表 4-3　磚窯場生產之變動成本

項目		價格
操作成本	人事費	0.30 元/每磚
	原料費	0.10 元/每磚
	電力費	0.15 元/每磚
	燃料費	0.30 元/每磚
	其他管銷費	0.35 元/每磚
運輸成本		0.35 元/每磚
合　　計		1.30 元/每磚

苗栗以北 18 廠平均數值

表 3-4　以淤泥飛灰混合生產紅磚之變動成本

項目		價格
操作成本	人事費	0.30 元/每磚
	原料費	0.22 元/每磚
	電力費	0.20 元/每磚
	燃料費	0.30 元/每磚
	其他管銷費	0.15 元/每磚
運輸成本		0.35 元/每磚
合　　計		1.47 元/每磚

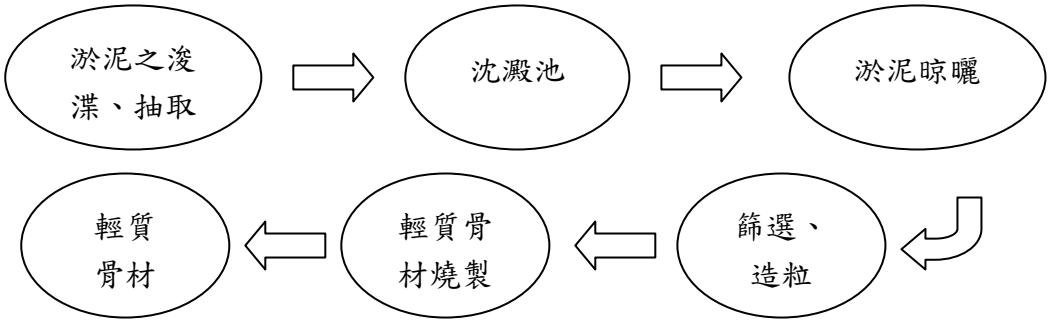

圖 4-1 水庫淤泥燒製成輕質骨材過程

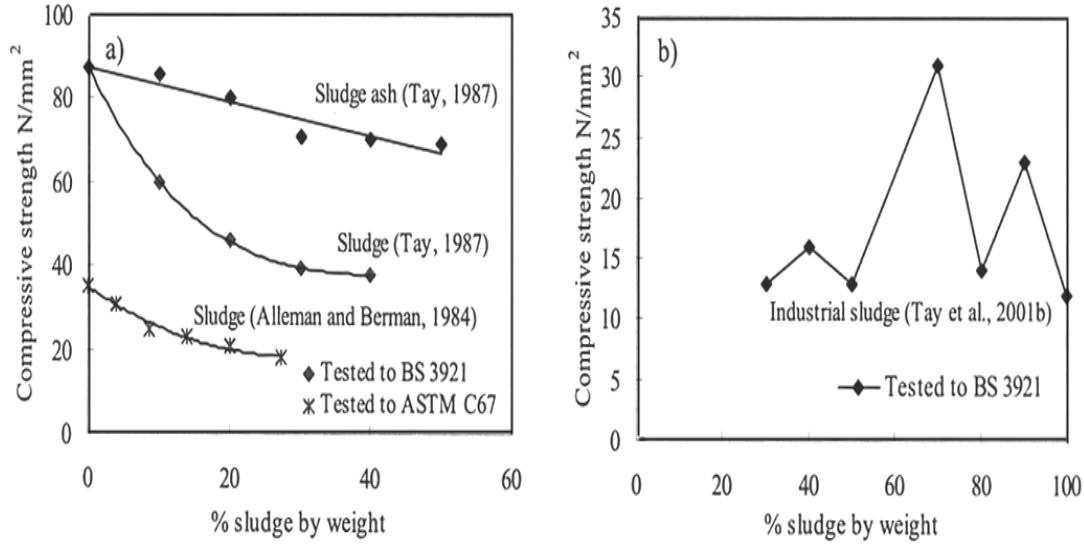

圖 4-2 使用淤泥製成磚之抗壓強度[68]。

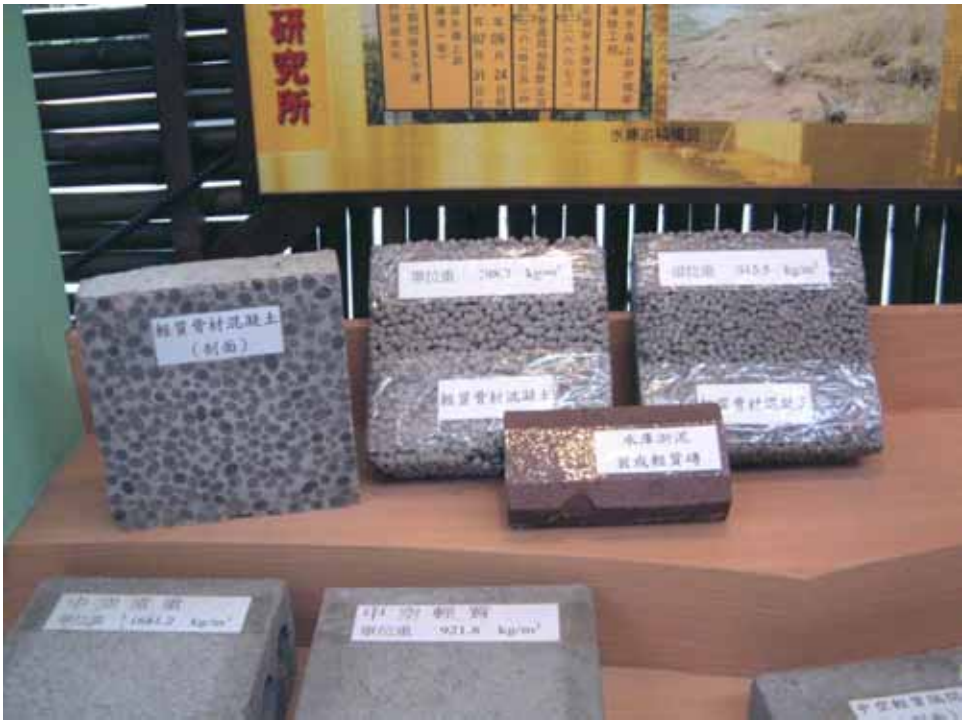

圖 4-3　輕質骨材製成磚實體照片[29]。

第五章 固化水庫淤泥之應用

固化水庫淤泥一般可使用壓縮脫水及化學固化兩種方式。經由壓縮脫水，淤泥分離成泥餅及水，但其固化物無抗壓強度，只可作為窪地填土或運至永久棄土場，其優點為處理費較低；化學固化可使淤泥加速凝固乾燥，處理過後雖可提高抗壓強度，且不產生二次公害等優點，然而固化劑成本高，故處理費較壓縮脫水方式高，同時，固化後之水庫淤泥抗壓強度仍太低。因此，目前固化水庫淤泥之上述兩種方式，各有其缺點，進而無法達成大量減量水庫淤泥之目的。為能大量消耗或應用水庫淤泥，將水庫淤泥適當改質，使其可被利用為混凝土中之細骨材，進而大量應用於混凝土工程中，實為固化水庫淤泥之一新穎應用方式，以下將針對各種不同水庫淤泥之應用，探討其工程性質、經濟性及消耗量等，以評估各種不同水庫淤泥應用之可行性。

5.1 改質水庫淤泥

黏土礦物擁有特殊之微觀結構，容易與水產生吸附行為，土木建築工程上將其視為一問題土壤，尤其是具膨脹性之黏土，吸水後可膨脹數倍，使原先團聚之黏土糰崩解，進而影響其工程性質甚鉅，故土木建築工程應用上鮮少使用黏土作為細骨材。現有文獻中，僅 Bhatty 及 Reid [33]所進行之研究，使用大量之下水淤泥灰，作為混凝土材料中之細骨材，由於下水淤泥灰具多孔結構易於吸水，其研究結果認為下水淤泥灰並不適合作為細骨材；至於水庫淤泥作為混凝土中之細骨材，就文獻搜集與整理得知，尚無任何研究成果發表。

膨脹性黏土於高溫環境下可燒製成輕質骨材，實為工程上一大福音，然而每年量產有限，對水庫淤泥應用及減量幫助不大；若能將膨脹性黏土易於吸水之表面，經由改質劑改變為厭水表面，同時除去有害於混凝土健度之陽離子，黏土將成為內部不吸水且穩定之顆粒，以取代混凝土中之細骨材，如此，將可提供另一消耗減量水庫淤泥之應用方式。黃兆龍教授[31]於 2003 年水庫淤泥輕質混凝土產製及規範研討會中，針對不同水庫淤泥化學成分所製成輕質骨材，加以探討其工程性質差異，研究發現台灣本島各水庫上游地質多屬於沉積岩，故大部分水庫淤泥之化學成分，皆落於膨脹黏土範圍內，因此，本研究採取阿公店水庫淤泥作為初期研究材料，以探討改質水庫淤泥之工程應用可行性。

首先，分別使用改質前後之水庫淤泥、石英砂、自來水及水泥為組成材料，進行流動度及抗壓強度試驗。研究結果發現，經改質之水庫淤泥由於內部不吸水，在同樣之工作性考量下，使用改質淤泥比未改質淤泥，混凝土之配比用水量減少約 40~50%，亦即於相同流動性條件下，混凝土配比水灰比可降低，故其抗壓強度將提高；然而，改質水庫淤泥磨成粉末狀後，其高比表面積加上表面微量吸水之特性，仍需高水量以維持混凝土之工作度，如此將造成混凝土抗壓強度提升有限。所以，若以改質淤泥全部取代原先配比之細骨材，將導致混凝土抗壓強度不高，但若採取部分取代細骨材之方式，則各種不同取代量與水泥砂漿抗壓強度之關係，如表 5-1 所示。

5.2 改質水庫淤泥之可能應用

表5-2所列則為各種抗壓強度之改質水庫淤泥水泥砂漿及其可能之應用，茲將分別敘述如下：

5.2.1 控制性低強度材料(CLSM)

由表5-1可知，改質水庫淤泥取代細骨材量若大於50%時，當考慮混凝土工作性之條件下，其抗壓強度小於2000psi，雖無法達到非結構混凝土應用之要求，但是，其高流動性可作為控制性低強度材料(Controlled Low Strength Material, CLSM)，將使用於開挖回填及地下管線工程，有鑒於目前工程界常因現地土壤粒徑無法符合要求，造成品管不易喪失其功能；利用水庫淤泥之小粒徑高流動性及改質後穩定之力學性質，實可提供解決CLSM品管之方法。此外，一般CLSM要求回填材料需能透水，若有施工區域需要防水層，可利用防水效果甚佳之改質水庫淤泥作為CLSM材料。

CLSM 依其製造場地差異，可分為預拌混凝土拌合廠生產以及現場棄土拌合使用等兩類。拌合廠生產之 CLSM 與一般混凝土使用生料，並無明顯不同，仍由粗、細骨材、波特蘭水泥以及水所共同組成。但由表 5-3 中可知，其單位體積粗粒料含量於 200kg ~400kg/立方公尺之間、細骨材於 1280kg ~1480kg/立方公尺之間，迥異於一般混凝土粗細骨材皆界於 700kg ~1100kg/立方公尺之含量。一般混凝土中，粗、細骨材具有健度、粒徑分佈、有機物含量等嚴格之限制，但 CLSM 對粒料之要求並無特殊限制，舉凡廢棄磚石、爐碴、鑄砂等再生粒料，亦皆為 CLSM 之理想原料。此外，現場棄土生產 CLSM 之方法，係由現場挖掘出來之棄土，透過簡易分類，運載至一簡易之拌合場地後即可進行生產。

表5-4整理傳統碎石級配回填與CLSM回填工法所使用之材料、施工所需工作人員、機具以及施工中之試驗方法等。由二者之比較可以瞭解，使

用CLSM節省人力，業主之檢、試驗規格要求明顯降低許多，CLSM工法更免除了夯實度之檢驗方式，更有利於整體工程品質掌握。對於施工單位而言，其少了施工中分層夯實、鋪設厚度檢查、壓實度計算等諸多繁瑣工作，其對工程進度之執行，應更能掌握。

傳統碎石級配回填與 CLSM 回填工法施工成本問題列於表 5-5 中。表中比較材料成本、夯壓成本以及檢、試驗費用等。由二者之比較，可以知道，CLSM 工法於材料成本上，高出約兩倍價格，似乎未具有與傳統工法競爭之優勢。但 CLSM 工法由於其水泥質材料之特性，無承載力不足問題產生，去除壓密度試驗所需開銷，且其工作性優良、充填性佳，更免除傳統工法所需之夯壓費用，其整體施工成本將較傳統工法有競爭之空間。所以，CLSM 材料運用於回填工程上有其品質及施工程序上之優勢。

若以改質水庫淤泥部分取代50%CLSM之細骨材，且保守估計目前水庫淤泥改質成本約3元/kg,根據表5-6材料成本表計算每立方公尺CLSM價格約為2700元。材料價格雖比傳統碎石回填及使用普通細骨材之CLSM回填昂貴，但其品質控制佳，且有防水功能之附加價值，實有其發展空間。

根據高雄市政府養工處八十九年度之資料顯示：從一月至十月申請開挖道路件數共計五千多件，包含電線、電纜、瓦斯及自來水管線等。其中台電、中華電信、自來水公司及欣高瓦斯等公民營機構，合計達三千零九十八件。該民生需求管溝工程之回填施工不實，形成沈陷、孔洞，造成用路人困擾、傷害、申訴或遭受政府部門處罰者，合計達一千六百零二件，佔全部案件量的 51％，此顯示回填不實問題解決之迫切與嚴重性。若以台北市為例，全市道路總面積達 2,000 萬平方公尺，最近五年因應各種管線埋

設道路挖掘總面積約 130 萬平方公尺，平均每年道路挖掘修復面積超過 26 萬平方公尺，佔全市道路面積 1.3%，管溝挖掘工程數量龐大。單以道路回填而言，保守估計全國每年約有 100 萬立方公尺之 CLSM，考慮以改質水庫淤泥取代細骨材，將可消耗約 50 萬立方公尺之淤泥。

5.2.2 其他結構與非結構混凝土之應用

表5-1中水庫淤泥取代細骨材量於40~50%之水泥砂漿，經由適當配比可提高強度至2000psi以上，可作為非結構混凝土使用，使用範圍將更廣泛，例如，消波塊、安全島、人行道及排水溝等。改質水庫淤泥取代細骨材量若小於30%，其水泥砂漿28天抗壓強度可達3000psi，已達結構混凝土之標準。因此，若能利用改質淤泥取代細骨材應用於混凝土工程，將可大量消耗水庫淤泥量。

根據初步研究顯示，利用改質水庫淤泥取代混凝土配合設計中之細骨材，取代量可達30%，若以全國每年混凝土需求量約4000萬立方公尺，且粗細骨材需求各半計算，將可消耗600萬立方公尺之水庫淤泥。由表5-6及普通混凝土配比計算，每立方公尺含30%改質水庫淤泥之混凝土單價約為1800元，雖比平均混凝土價格1500元貴，但其附加防水價值，仍有其競爭性。

表5-7為改質水庫淤泥於CLSM及非結構與結構混凝土應用之經濟性與消耗量比較。如能有效降低改質淤泥之成本，其市場競爭性將大為提升；改質淤泥作為結構混凝土之細骨材，雖無法立即解決數千萬立方公尺之淤泥，但其消耗量甚至可比製作輕質骨材大，且製程簡單不耗能源，如能與輕質骨材配合使用，將可加速水庫淤泥之消耗量。

5.3 特殊資材化之初步評估

改質水庫淤泥擁有厭水之表面性質，阻水效果極佳；本研究中，凡含有改質水庫淤泥製成之水泥砂漿試體，水可形成水珠停留於試體表面而不滲入，如圖5-1所示。因此，改質水庫淤泥可應用其他特殊功能性用途，如土木建築防水工程、高分子奈米複合材及功能性混凝土摻料等，雖然消耗淤泥量不大，但有機會創造更高之附加價值。

水庫淤泥可應用於建築物之內外牆粉光打底工程，若以粉光用防水水泥砂漿每平方公尺約需100元之價格計算，水庫淤泥水泥砂漿可比防水水泥砂漿便宜，每平方公尺約為50元。此外，亦可配合活性粉混凝土(RPC)之高強度及高流動性，作為裂縫修補阻水之用途。大都會地區廣大之道路及人行道鋪面目前均不能透水，造成暴雨時增加地表逕流，易使低窪地區泛濫成災。利用可滲透式之人行鋪面施工法之觀念，可使雨水能滲入地表，減少表面逕流，但為防止路基遭沖刷，通常需要一止水層，再將水橫向排出；改質水庫淤泥水泥砂漿有足夠強度止水，因此適合作為路基之防水層。

傳統高分子材料中通常加入碳黑、玻璃纖維或黏土等，作為填充物或補強材，以降低成本或提高材料性能，例如橡膠。近年來高分子奈米複合材引起廣泛之研究，係因經改質過之黏土，如圖5-2所示，可在高分子母材中分散成奈米等級微粒，奈米黏土如同微小纖維補強高分子母材，因而大大提升高分子之機械性質。此外，黏土分散性及界面之作用力比其他材料效果佳，因此質輕、耐熱性高、表面光滑、抗撓曲性高及水氣穿透率低等優點，亦能應用於汽車零件與高阻氣性薄膜之奈米複合材。目前市面上所

使用之改質黏土單價約每公斤1500元，若改質水庫淤泥添加於高分子中，可達高純度改質黏土分散成奈米黏土之效果，改質水庫淤泥將有高附加價值。

將奈米高分子複合材料之觀念應用於混凝土工程，已經有研究發表，林其賢[28]利用高純度奈米改質黏土作為填充物，研究奈米改質黏土對水泥砂漿材質之影響，無添加及有添加奈米改質黏土水泥砂漿之微觀結構，如圖5-3及圖5-4所示，由圖5-4中可發現，適當添加量之奈米改質黏土將毛細孔通路阻斷，造成水分擴散之阻礙；反應於巨觀之機械行為，圖5-5表示添加微量之奈米改質黏土(約0.5%)，可使水泥砂漿抗壓強度比未添加時提高約35%，但隨著添加量增加，抗壓強度將急速降低，其原因為高添加量造成奈米改質黏土團聚，於水泥砂漿中形成弱面，因而降低抗壓強度。圖5-6為奈米改質黏土添加量與滲透係數之關係，滲透係數隨添加量變化之趨勢與抗壓強度相似，於低添加量(0.5%~0.75%)，滲透係數比未添加時低50倍以上，亦即抗滲透性可提高50倍以上。將奈米改質黏土單純作為填充物，只需添加少量即可提高水泥砂漿之性能，未來若能使用可改善混凝土性能之改質劑，則奈米改質黏土將是具有功能性之混凝土摻料，不僅能阻絕毛細孔，黏土表面之改質劑還能藉由擴散作用，與混凝土水化產物進行化學作用，以增強混凝土材質，實為可創造更高附加價值之再利用處理方式。

表 5-1 改質水庫淤泥取代細骨材之水泥砂漿抗壓強度

材料來源	取代細骨材量 (%)	s/c （砂、水泥比）	w/c （水灰比）	流動度 (%)	抗壓強度 (psi)
下水淤泥灰（美國MWCC Plant）	100%	2.35	2.33	12	330
水庫淤泥（阿公店水庫）	100%	2.40	2.50	105	470
改質水庫淤泥（阿公店水庫）	100%	2.40	1.25	100	800
改質水庫淤泥（阿公店水庫）	80%	2.40	1.15	95	1230
改質水庫淤泥（阿公店水庫）	50%	2.40	0.85	95	1980
改質水庫淤泥（阿公店水庫）	30%	2.40	0.65	85	3060
改質水庫淤泥（阿公店水庫）	20%	2.40	0.60	100	4150

表 5-2 改質水庫淤泥取代水泥砂漿細骨材之可能應用

材料來源	取代細骨材量 (%)	流動度 (%)	抗壓強度 (psi)	要求強度 (psi)	可能應用
水庫淤泥（阿公店水庫）	100%	105	470		控制性低強度材料（透水層）
改質水庫淤泥（阿公店水庫）	100%	100	800	80~1200	控制性低強度材料（防水層）
改質水庫淤泥（阿公店水庫）	80%	95	1230		
改質水庫淤泥（阿公店水庫）	50%	95	1980	2000-3000	非結構混凝土
改質水庫淤泥（阿公店水庫）	30%	85	3060	3000以上	結構混凝土
改質水庫淤泥（阿公店水庫）	20%	100	4150		

表5-3 控制性低強度材料與一般混凝土比較

使用原料	控制性低強度材料	一般混凝土
水泥膠結料 （kg/立方公尺）	100 - 200	250 – 450
波索蘭材料 （kg/立方公尺）	50 – 100	0 – 100
水 （kg/立方公尺）	180 – 220	180 – 220
水膠比 W/B	依配比試驗結果決定， 通常大於 1	0.4 – 0.55
粗骨材 （kg/立方公尺）	200 – 400	700 – 1100
細骨材 （kg/立方公尺）	1280 – 1480	700 – 1000
剩餘土石土 （kg/立方公尺）	-	-
摻料	速凝劑、發泡劑	減水劑、強塑劑

表5-4 CLSM與回填工法人工比較

項 目	傳統工法	CLSM 回填工法
使用材料	碎石級配料	預拌場拌合之 CLSM
施工人員	大工一人 小工若干人	小工一人
機 具	夯實機	無
施工中	是否分層夯實	工作性檢驗
	鋪設厚度檢查	初凝時間測定
檢、試驗方式	含水量	–
	壓實度試驗	–

表5-5 CLSM與回填工法成本比較

項 目	傳統工法	CLSM 回填工法 （普通細骨材）	CLSM 回填工法 （改質淤泥取代部分細骨材）
使用材料 （元/立方公尺）	300-400	1200-1500	2700
回填夯實費 （元/立方公尺）	400-600	-	-
檢、試驗費用 （元/次）	6500 （壓密度試驗/3 孔）	900 （抗壓試驗）	900 （抗壓試驗）

表5-6 主要材料價格表

項目	價格	每公斤單價（元/kg）
粗骨材	600（元/立方公尺）	0.226
細骨材	600（元/立方公尺）	0.226
水泥(散裝)	2100（元/噸）	2.1
改質水庫淤泥	–	3

表5-7 改質水庫淤泥取代部分細骨材於CLSM回填工法及混凝土工程材料價格與淤泥消耗量之比較

項 目	CLSM 回填工法（普通細骨材）	CLSM 回填工法（改質淤泥取代部分細骨材）	混凝土工程（普通細骨材）	混凝土工程（改質淤泥取代部分細骨材）
材料價格（元/立方公尺）	1200-1500	2700	1500	1800
淤泥消耗量（立方公尺/年）	–	50 萬	–	600 萬

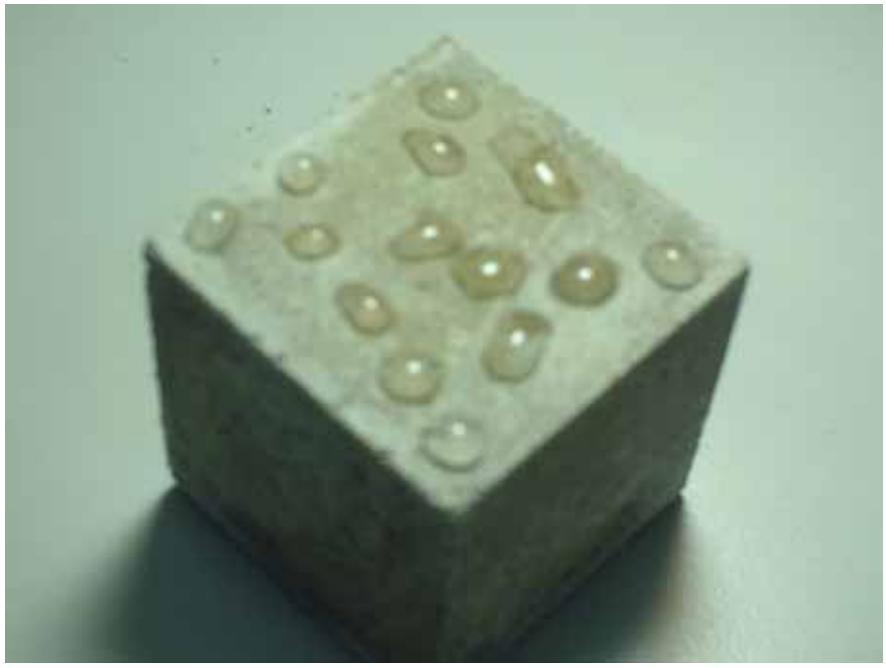

圖5-1 改質水庫淤泥水泥砂漿(取代細骨材20%)之防水效果

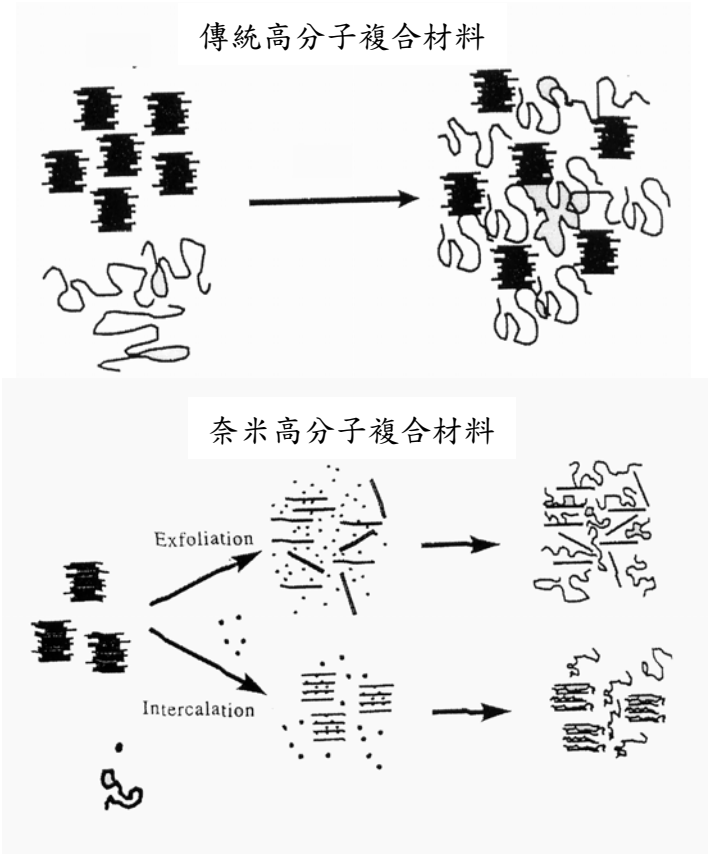

圖5-2 傳統與奈米高分子複合材料之差別[28]

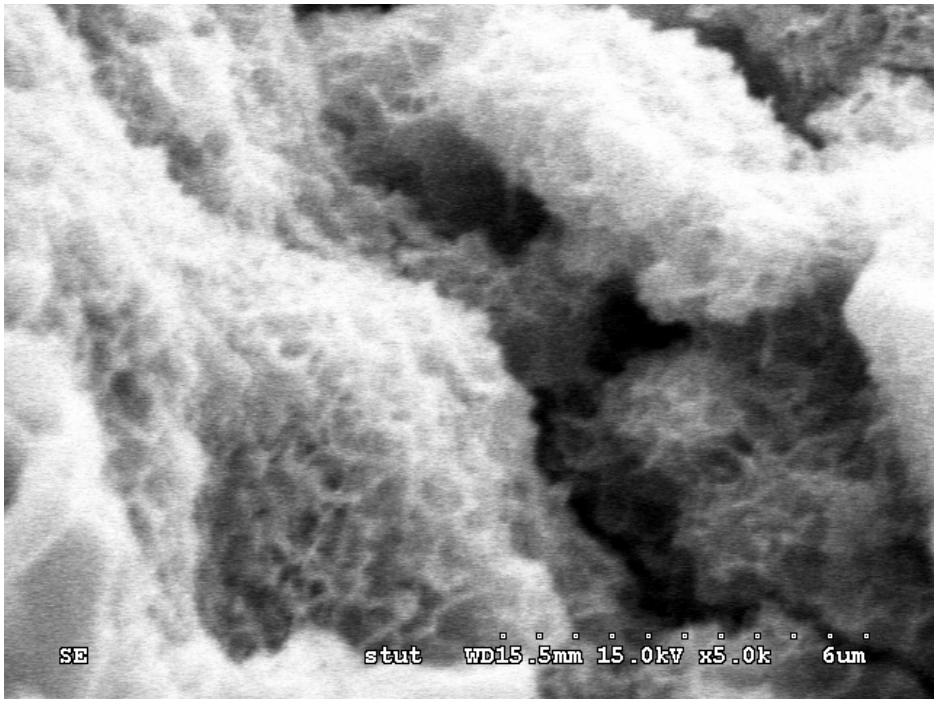

圖5-3 未添加改質黏土之水泥砂漿微結構[28]

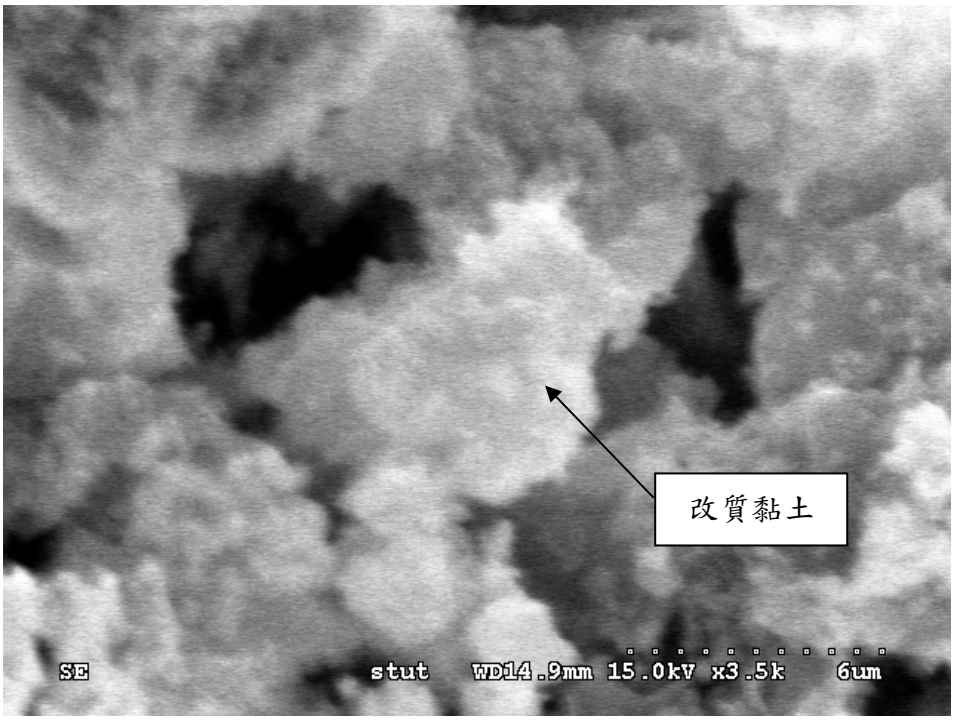

圖5-4 添加0.5%改質黏土之水泥砂漿微結構[28]

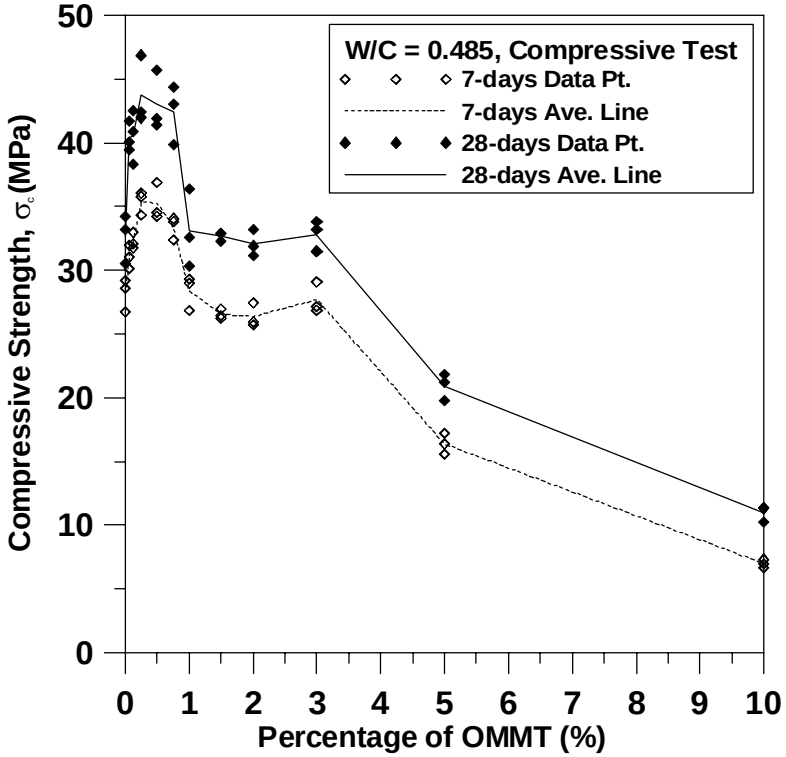

圖5-5 改質黏土添加量與水泥砂漿抗壓強度之關係圖[28]

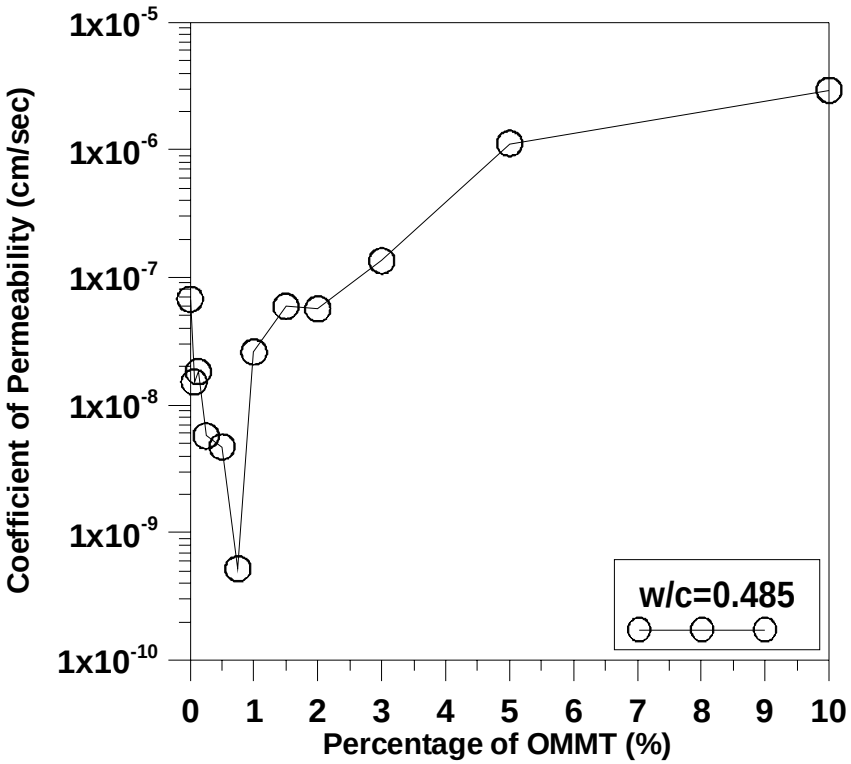

圖5-6 改質黏土添加量與水泥砂漿滲透係數之關係圖[28]

第六章 結論與建議

本計畫之研究成果、結論與建議如下：

1. 完成重要水庫基本資料之彙整，共蒐集二十座水庫地理位置、壩體資料、容量及計畫目標等，以了解各重要水庫之基本性質資料，並對重要水庫之淤積狀況，進行淤砂量現況與趨勢資料蒐集，以了解各水庫歷年泥砂淤積變化情形，探討其可能產生淤積之原因。再者，蒐集各水庫淤泥物理及化學成分特性，整理成表，以利評估各水庫淤泥適作何種資源化利用。

2. 彙整國內外水庫淤泥資源化利用之文獻，首先對於廣義淤泥之處理歸納出「農業與土地利用」、「能源化」及「材料化」等三個利用方向；關於淤泥之材料化利用方面，由眾多國外文獻中整理出燒製骨材或輕質骨材、燒製磚瓦製品、部分取代水泥製成水泥砂漿材料及使用於其他用途等四大類應用。而水庫淤泥所含有機質較其他種淤泥少，且不易含有害物質，其處理成本及再生利用方面比較寬廣，對於其資源化利用，國內目前主要以「農業及土地利用」及「材料化」之技術為主。水庫淤泥材料化應用方向大致與廣義淤泥相同，包含輕質骨材製作及燒結及壓密固結製磚，其他有海拋或人工魚礁製作、地工織管製作及其他應用等，此部分將國內文獻作一整理並彙整成表。

3. 以目前處理水庫淤泥之技術，初步評估「材料化」應用較能達到減量化、資源化之目的，且符合生態性要求；其中利用水庫淤泥製成輕質骨材，其製造技術已成熟，將於九十四年三月開始量產；此外，內政部建築研

究所已研訂相關規範，規定「燒結型輕質骨材」之試驗方法，以控制輕質骨材之品質；參照美國混凝土學會訂定之「輕質骨材混凝土技術規範」中，亦明文規定輕質混凝土之材料、配比設計、現場澆製養護及品管等事宜。輕質骨材適用於營建工程、橋樑工程、管道工程、鋪面工程、擋土護坡及景觀工程，若能大量使用，可減少天然砂石之開採，間接保護生態環境。為了增加用途類別及提升使用效益最有效之方法為標準化、迅速且大量生產之預鑄流程，訂定「結構及非結構用輕質骨材混凝土預鑄產品」技術規範，供業主、設計者、預鑄廠商及承攬廠商規劃設計、生產製造、施工建造與採購時參考依循。

4. 利用水庫淤泥製作輕質骨材，國內已擁有完備之處理技術，包括生產技術、設備以及相關規範之訂定，並且能降低砂石開採對生態環境之衝擊，實為目前解決水庫淤泥對環境生態影響之最佳處理方式；然而，依國內目前水庫淤泥製作輕質骨材之產量而言，每年僅能消耗300~400萬立方公尺之淤泥，對比於目前等待處理之數千萬、甚至億萬立方公尺之水庫淤泥，實在緩不濟急，除非中央政府強制規定土木建築工程之混凝土必須摻用輕質骨材，才有機會增加其產能，以增加淤泥消耗速率。

5. 將水庫淤泥改質後，成為內部不吸水之穩定顆粒，可取代混凝土組成材料之細骨材。利用改質水庫淤泥取代水泥砂漿細骨材之初步研究結果，改質水庫淤泥取代量高於50%時，強度達1500psi且有高流動度，可作為控制性低強度材料(CLSM)，用於開挖回填及地下管線工程，預估每年可消耗約50萬立方公尺之水庫淤泥；改質水庫淤泥取代量於40%~50%之間，可建造非結構混凝土使用，且改質淤泥取代量低於40%以下，其強度超過3000 psi，已達結構混凝土要求，用於非結構與結構混凝土之改質

淤泥，預估每年可達600萬立方公尺。利用改質水庫淤泥製成之CLSM、非結構與結構混凝土，其價格有市場競爭性，若能持續發展，必定有發展潛力，實為消耗水庫淤泥且能創造價值之新方式。

6. 改質水庫淤泥擁有絕佳之防水效果，可應用其他特殊功能性用途，如土木建築防水工程、高分子奈米複合材及功能性混凝土摻料等，雖然消耗淤泥量不大，但有機會創造更高之附加價值。

參考文獻

1. 經濟部水利署網站，http://www.wra.gov.tw/。

2. 經濟部水利署北區水資源局網站，http://www.wranb.gov.tw/。

3. 臺北翡翠水庫管理局網站，http://www.feitsui.gov.tw/。

4. 財團法人中興工程顧問社，「水庫淤泥固化與棄置」，1999。

5. 經濟部水利處中區水資源局，「大埔水庫更新改善規劃」，2001。

6. 經濟部水利處，「白河水庫淤積清理規劃」，2001。

7. 經濟部水利處，「烏山頭水庫淤積清理規劃」，2001。

8. 經濟部水資源局，「水庫淤積緊急浚渫計畫」，2002。

9. 經濟部水利署，「水庫淤砂再生資源技術研究」，2002。

10. 經濟部水利處南區水資源局，「曾文水庫淤積清理及後續處理可行性研究」，2002。

11. 內政部建築研究所，「水庫淤砂輕質骨材產製及輕質骨材混凝土應用與推廣」，2002。

12. 經濟部水利署北區水資源局，「石門水庫營運四十年特刊」，2003。

13. 日本下水道實務研究會，「新下水道事業」，第 6 卷，1999。

14. 廖錦聰、張蕙蘭、徐文慶、黃契儒，「垃圾焚化底渣的資源化利用」，一般廢棄物焚化灰渣資源化技術與實務研討會論文集 1996，pp.131-146。

15. 彭予柱，「骨材單位重對混凝土性質影響之探討」，碩士論文，國立台灣科技大學營建工程研究所，2000。

16. 王順元，「淤泥輕質骨材燒製研究」，碩士論文，國立中興大學土木工程研究所，2001。

17. 范國晃，「淤泥骨材燒製及拌製混凝土之研究」，碩士論文，國立中興大學土木工程研究所，2001。

18. 蔡昌宏，「燒結型輕質骨材混凝土工程性質之研究」，碩士論文，國立台灣科技大學營建工程研究所，2001。

19. 蔡昆城，「燒結型輕質骨材混凝土工程性質之研究」，碩士論文，國立台灣科技大學營建工程研究所，2001。

20. 顏聰、黃兆龍、陳豪吉、林維明、李隆盛、王和源、張朝順，「水庫淤泥輕質骨材混凝土產製及規範研討會論文集」，2003。

21. 徐慧玲，「石門水庫淤泥添加燃煤飛灰燒製建材之研究」，碩士論文，國立成功大學資源工程研究所，1998。

22. 葉軍柱，「水庫淤泥添加燃煤飛灰燒製建築用磚之研究」，碩士論文，國立成功大學資源工程研究所，1999。

23. 陳永輝，「焚化灰渣與水庫淤泥混合燒製建築用磚之研究」，碩士論文，國立成功大學資源工程研究所，1999。

24. 孫國鼎，「水庫淤泥及淨水污泥再利用製磚之研究」，碩士論文，國立交通大學環境工程研究所，2001。

25. 蔡長泰、王文江、葉茂榮、溫清光、李德河、溫紹炳、詹錢登、吳耿中，”水庫淤泥之研究(三)”，國立成功大學水利及海洋工程學系，1998。

26. 張鎮南、黃俊雄、林世祥，「應用臭氧回收廢棄污泥含碳有機物質之研究」，第 10 屆下水道技術研討會論文集，台北，pp.95-102, 2000。

27. 羅鈞瑋、張鎮南、黃俊雄，「應用化學方式加速污泥水解以回收有機成份之研究」，第 9 屆下水道技術研討會論文集，台北，pp.223-238, 1999。

28. 林其賢，「奈米改質黏土對水泥砂漿材質之影響」，碩士論文，國立成功大學土木工程研究所，2004。

29. 楊雅雲，「輕質骨材抗壓磚之透水性研究」，碩士論文，國立成功大學

土木工程研究所，2004。

30. 內政部建築研究所研究計畫成果報告，「可滲透式人行鋪面材料(無細骨材混凝土)及施工方法研究」， 2000。

31. 黃兆龍、洪盟峰、潘誠平、陳宗鵠、黃博全，「淤泥輕質骨材鋼筋混凝土之經濟效益分析」，混凝土新材料研發與再生技術研究成果發表會論文集，pp. 13-22，2003。

32. ”Analysis of Sludge Ash for Use in Asphalt Concrete, Fertilizer and Other Products”, Enviroscience Inc. Minneapolis, Publication, 12-82-103, p.3, Oct.1982.

33. J.I. Bhatty and K.J. Reid, ”Compressive Strength of Municipal Sludge Ash Mortars”, ACI Materials Journal, 86-M34, July-August, 1989.

34. R. Khanbilvardi and S. Afshari, “Sludge ash as fine aggregate for concrete mix”, J. Env Eng. Div., 121(9), pp.633-638, 1995.

35. H. Kato and M. Takesue, “Manufacture of Artificial Fine Lightweight Aggregate from Sewage Sludge by Multi-Stage Stream kiln”, Int. Conf. of Recycling, Berlin, Germany, pp.459, 1984.

36. B.V. Elins, G.E. Wilson and R.M. Gersberg, “Complete Reclamation of Wastewater and Sludge”, Water Sci. Tech., 17, pp.1453-1454, 1985.

37. M.S. George, “Concrete Aggregate from Wastewater Sludge”, J.Concrete Int., 8, pp.27-30, 1986.

38. J.H. Tay and W.K. Yip, ”Sludge Ash As Lightweight Concrete Material”, ASCE J. of Environmental Engineering, 115(1), pp.56-64, 1989.

39. W.K. Yip and J.H. Tay, “Aggregate Made from Incinerated SludgeResidue”, J. Materials in Civ. Eng., Div., 2(2), pp.84-93, 1990.

40. J.I. Bhatty and K.J. Reid, “Moderate Strength Concrete from Lightweight Sludge Ash Aggregates”, Cement Composites and Lightweight Concrete, 11, pp.179-187, 1989.

41. J.I. Bhatty, A. Malisci, I. Iwasaki and K.J. Reid, “Sludge Ash Pellets as Course Aggregates in Concrete”, Cement, Concrete and Aggregates, CCAGDP, 14(1), pp.55-61, 1992.

42. J.H. Tay and K.Y. Show, “Properties of Cement Made from Sludge”, J. Env. Eng. Iv., 117(2), pp.236-246, 1991.

43. P.J. Wainwriht and D.J.F. Cresswell, “Synthetic Aggregates from Combustion Ashes Using an Innovative Rotary Kiln”, Waste Management, 21, pp.241-246, 2001.

44. T. Shaw, “Improvement in Utilizing The Waste Produced From Sewage Words for The Manufacture of Bricks, Tiles, Quarries, Building Blocks, Slabs, and The Like”, United Kingdom Patent, 12, p.623, 1989.

45. J.H. Tay, “Sludge and Incinerator Residue as Building and Construction Materials”, Proc. Interclean ’84 Conf., Singapore, pp.252-261, 1984.

46. J.H. Tay, “Sludge as Brick Making Material”, Proc. on New Directions and Research in Waste Treatment and Residual Management, Vancouver, Canada, 2, pp.661-688, 1985.

47. J.H. Tay, “Bricks Manufactured from Sludge”, J. Env. Eng. Div., 113(2), pp.278-283, 1987.

48. J.E. Alleman and N.A. Berman, “Constructive Sludge Management: Bio-brick”, J. Env. Eng. Div., 110(2), pp.301-311, 1984.

49. J.A. Slim and R.W. Wakefield, “The Utilization of Sewage Sludge in The Manufacture of Clay Bricks”, Water Sci. Tech., 17, pp.197-202, 1991.

50. E.J. Trauner, “Sludge Ash Bricks Fired to Above and Below Ash-Vitrifying Temperature”, J. Env Eng. Div., 119(3), pp.506-519, 1991.

51. M. Anderson, R.G. Skerratt, J.P. Thomas and S.D. Clay, “Case Study Involving Using Fluidised Bed Incinerator Sludge Ash as a Partial Clay Substitute in Brick Manufacture”, Wat. Sci. Tech., 34, pp.507-515, 1996.

52. B. Wiebusch and C.F. Seyfired, “Utilization of Sewage Sludge Ashes in The Brick and Tile Industry”, Water Science Technology, 36(11), pp.251-258, 1997.

53. J.H. Tay, “Properties of Pulverized Sludge Ash Blended Cement”, ACI Material Journal, September-October, pp.358-364, 1987.

54. J.H. Tay, “Sludge Ash as Filler for Portland Cement Concrete.”, Journal of

Environmental Engineering, 113(2), pp.345-351, April, 1987.

55. D.J. Lisk, “Compressive Strength of Cement Containing Ash from Municipal Refuse or Sewage Sludge Incinerators”, Environmental Contamination and Toxicology, 42, pp.540-543, 1989.

56. V. Pinarli and N.k. Emre “Constructive Sludge Management- Reutilization of Municipal Sewage Sludge in Portland Cement Mortars”, Environ. Tech., 14, pp.833-841, 1994.

57. J. Monzo, J. Paya, M.V. Borrachero and A. Corcoles, “Use of Sewage Sludge Ash(SSA)-Cement Admixtures in Mortars”, Cement and Concrete Research, 26(9), pp.1389-1398, 1996.

58. J.H. Tay and K.Y. Show, “Properties of Cement Made from Sludge”, J. Env. Eng. Iv., 117(2), pp.236-246, 1991.

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

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

61. R.E. Okoli and G. Balafoutas, “Landfill Sealing Potentials of Bottom Ashes of Sludge Cakes”, Soil and Tillage Research, 46, pp.307~341, 1998.

62. W.K. Yip, “Aggregate Made from Incinerated Sludge Residue”, Journal of Materials in Civil Engineering, 2(2), pp.84~93, 1990.

63. J. Hsrtlen, “Utilization of Incinerator Bottom Ash-Legal, Environmental and Engineering Aspects”, Waste Materials in Construction, Elsevier Science Publishers, 1991.

64. K.H. Helgesen, “Lightweight Aggregate Concrete In Norway”, International Symposium on Structural Lightweight Aggregate Concrete, Norway, June, 1995.

65. S.V. Balashov and A.M. Boronin, “Sewage-sludge isolates decomposing sulfoaromatic compounds”, Microbiology, 65(5), pp.549-552, 1996.

66. C.H. Lue, D.R. Zenz, and R. Kuchenrither, ”Municipal Sewage Sludge Management”, Technomic Publishing, Lancaster, Pennsylvania, 1992.

67. S. Jeyaseelan and L.G. Qing, “Development of adsorbent/catalyst from municipal wastewater sludge”, Water Science Technology, 34(3-4), pp.499-505, 1996.

68. K.Y. Show and J.H. Tay, “Constructive Approach for Sludge Management – New Resource from Sludge”, Conservation and Recycling, 6, pp.191~204, 1992.

研究成果摘要

目前台灣之重要水庫共計四十餘座，水庫容量因受泥砂淤積而減少，與完工當年總容量比較，發現水庫總容量約減少 15.38%，平均每年減少約 1,425 萬立方公尺，占所有水庫完工當年總容量 0.65%。至於有效容量方面，較完工當年有效容量減少約 11.05%，平均每年減少量約為 800 萬立方公尺，占完工當年有效容量之 0.49%。因此，為有效延續水庫使用壽命，浚渫各水庫淤泥實為當務之急，清除水庫淤泥除可增加水庫有效蓄水容量，以增進水源之利用效率，同時確保水庫之安全及功能。

臺灣地區水庫清淤計畫於 91 年度共辦理九座水庫，其中包括西勢、翡翠、石門、明德、馬鞍、仁義潭、白河、阿公店及鏡面水庫，共清淤 4,770,231 立方公尺，其中阿公店水庫清淤量 3,238,607 立方公尺最多，白河水庫清淤量 745,742 立方公尺次之，歷年水庫累計之清淤量，以石門水庫累計清淤量 10,644,339 立方公尺最多，阿公店水庫累計清淤量 5,438,601 立方公尺次之。另外，經濟部水資源局亦將寶山、永和山、石門、明德、仁義潭、翡翠、白河等水庫列入緊急浚渫計畫中，此計畫乃利用枯水期間緊急辦理上列各水庫之浚渫工作，合計浚渫淤砂量約為 178 萬立方公尺。92 年度經濟部水利署辦理石門、霧社、烏山頭、白河、明德及大埔等六座水庫浚渫工作，

預計於民國 92 至 96 年間共浚渫 574 萬立方公尺之淤砂。93 年度經濟部水利署辦理大埔、烏山頭、白河、中正湖、榮湖、成功、興仁及東衛等 8 座水庫，將浚渫淤砂 58.3 萬立方公尺。

水庫淤砂之物理及化學特性，將隨採集時間及地點不同而有些許差異，水庫淤砂依土壤分類規定，粒徑小於 0.075mm 為黏土及粉土，0.075mm~4.75mm 為砂，粒徑大於 4.75mm 則為礫石，至於黏土及粉土以 0.005mm 為界，當粒徑小於 0.005mm 為黏土，而粒徑於 0.005mm 至 0.075mm 則為粉土，台灣地區各水庫淤砂大部份為粉土及黏土，僅虎頭埤、澄清湖及鳳山等少數水庫之淤砂含有較粗顆粒之礫石，經分離後可直接應用於混凝土工程中。水庫淤泥依土壤分類可得知，翡翠、石門、青草湖、明德、日月潭、明潭、鏡面、虎頭埤、白河、阿公店、澄清湖等水庫淤泥主要為低塑性黏土，大埔水庫淤泥屬於低塑性黏土及低塑性粉土，仁義潭水庫之淤泥為高塑性黏土，而寶山及鳳山水庫之淤泥則屬於粉土質砂。各水庫淤泥比重介於 2.24 至 2.73 間，以鳳山水庫淤泥之塑性指數較高，另外，寶山、白河及鳳山水庫淤泥為無塑性，可能其淤泥含較多砂土而致使其無塑性。各水庫淤砂之重金屬含量低於規定管制標準，浚渫之淤砂棄土應無重金屬污染問題。各水庫淤泥依其成份含量不同具有不同之用途，其化學成份主要為 SiO_2、Al_2O_3 及 Fe_2O_3 等，一般常見之再生利用方式，包括製成土壤改良

劑、水泥膠結料及燒結成輕質骨材等。

水庫淤泥之資源化處理，一般分成浚渫處理、中間處理及最終處置等三個階段。浚渫後之水庫淤泥先將其有害物質分離，不含有害物質之淤泥可經管線、水運或陸運方式，運送至中間處理地點。中間處理乃在脫除水庫淤泥之高含水量，已利進行最終處置，目前淤泥浚渫物之處理，以沉澱池內淤泥為主要對象，大致可分為脫水及化學固化處理兩大類。水庫淤泥依其成份及粒徑而有不同最終處置方式，回歸河道、淤泥棄置與回收再利用為傳統常見的方法，因此，水庫淤泥資源化利用，須研擬符合經濟性及可行性之處置技術。無機水庫淤泥可製作磚及骨材，或經固化處理後作為路基、路面、人工魚礁、河川堤岸護坡及消波塊等，至於砂及礫石則可直接提供建材或骨材之使用。有機水庫淤泥則經中間處理後，可作為植生之用途，如土壤改良劑及養蝦池之底泥。綜觀目前台灣水庫淤泥之資源化利用，主要以農業、土地利用及材料化之技術為主，水庫淤泥之來源為集水區之表土層，若浚泥形成過程中未受污染，經過脫水後可加工形成農業土壤，掩埋與淤灌在台灣較為常見。

浚渫後之水庫淤泥，於水庫附近之低窪地區進行掩埋，掩埋淤砂需先適度固化，以利掩埋後之土地可供農耕、植生或其他用途。淤灌係將水庫清

淤排出之泥水經由灌溉渠道導入農田，如此可解決浚泥外，亦可同時改良農地土質，以淤泥所含養分提高農田之肥力。水庫淤泥資源化之應用，包括輕質骨材製作、燒結及壓密固結製磚、海拋或人工魚礁製作、地工織管製作等，各應用方式所需具備條件、限制因素及使用效果等皆不相同，各水庫管理單位必須通盤考量各項條件，如土壤條件、地理條件、地質條件、交通狀況、預算經費、工程技術及法令規範等，需妥善加以評估規劃，方能達到事半功倍之效果。一般而言，輕質骨材、燒結及壓密固結製磚、海拋或人工魚礁及地工織管製作等應用方式，皆能達到減量化、資源化、無害化及安定化等基本原則，且符合生態性要求，然而，對各處理方式仍需深入探討，以期發揮最佳之經濟效益。

目前處理水庫淤泥之技術，材料化應用較能達到減量化、資源化之目的，且符合生態性要求。其中，利用水庫淤泥製成輕質骨材之技術已成熟，將於九十四年三月開始量產，此外，內政部建築研究所已研訂燒結型輕質骨材之相關試驗方法與規範，以控制輕質骨材之品質。輕質骨材適用於營建工程、橋樑工程、管道工程、鋪面工程、擋土護坡及景觀工程，若能大量使用，可減少天然砂石之開採，間接保護生態環境。為增加用途類別及提升使用效益，亦已訂定「結構及非結構用輕質骨材混凝土預鑄產品」技術規範，供業主、設計者、預鑄廠商及承攬廠商規劃設計、生產製造、施

工建造與採購時參考依循。所以，利用水庫淤泥製作輕質骨材，國內已擁有完備之處理技術，包括生產技術、設備以及相關規範之訂定，並且能降低砂石開採對生態環境之衝擊，實為目前解決水庫淤泥對環境生態影響之最佳處理方式，中央政府應強制規定土木建築工程之混凝土，必須大量摻用輕質骨材，方能增加輕質骨材之使用量，以促進水庫淤泥消耗速率及砂石廠商之設廠投資意願。

另外，亦可將水庫淤泥改質，使成為內部不吸水之穩定顆粒，以取代混凝土中之細骨材。如果利用改質水庫淤泥取代水泥砂漿之細骨材，當改質水庫淤泥取代量高於50%時，水泥砂漿之抗壓強度可達1500psi且具高流動度，可作為控制性低強度材料(CLSM)，應用於開挖回填及地下管線工程；當改質水庫淤泥取代量於40%~50%間，可應用於非結構混凝土工程，若改質淤泥取代量低於40%以下，其抗壓強度超過3000 psi，可應用於結構混凝土工程。利用改質水庫淤泥製成之CLSM、非結構與結構混凝土，其價格具市場競爭性，若能持續發展，實為消耗水庫淤泥且創造高附加價值之新應用方式。

最後，由於改質水庫淤泥具有絕佳之防水效果，因此可提供特殊功能性之工程應用，例如土木建築防水工程、高分子奈米複合材料及高功能性混

凝土摻料等，雖然淤泥消耗量可能不大，但是，具有創造更高附加價值之市場潛力與機會。

水庫淤泥資源化技術彙整與比較。

資源化方式	技術名稱	處理程序	技術應用	預估每年可處理淤泥量	技術比較			
					成本	成熟度	實績	生態衝擊
農業與土地利用	–	浚渫後之水庫淤泥，經適當固化後掩埋，可供農耕、植生或其他用途。 利用淤灌方式，將水庫清淤之泥水由灌溉渠道導入農田，可改良農地土質，提高農地所含養分。	有機農業。	100 萬立方公尺	低–中	實用	多	無
材料化	輕質骨材製作	輕質骨材分成冷結、燒結及發泡等三型。冷結型以水泥為粘結劑，以造粒法將粉末狀之飛灰及淤泥結合成形；燒結型以造粒方式將飛灰與淤泥等結合成圓型粒團，經高溫燒結而成；發泡型利用淤泥所含特殊成分，可於高溫玻璃相逸出氣體，使造粒後之淤泥發泡膨脹而成。	輕質骨材混凝土、隔間牆、帷幕牆、無細混凝土隔熱磚及透水磚等。	400 萬立方公尺	中	實用	少	無
	燒結及壓密固結製磚	將飛灰加入淤泥拌合後壓實，再經由高溫燒結成磚，其產品可依應用用途，製成低、中及高強度成品。	輕質磚、植草磚、園藝砌磚、蛇籠工塊石、行道磚、護坡砌石及生態工法材料等。	50 萬立方公尺	中	實用	少	無
	海拋或人工魚礁製作	浚渫後淤泥可利用於海埔地填置，或製成足夠強度之塊狀物，拋於海堤或海中。而作為海拋之水庫淤泥需經過固化處理，以防有害物質釋出污染海域。	消波塊、人工魚礁。	50 萬立方公尺	高	實用	少	無
	地工織管製	將地工織布縫成管狀，應用其本身高張力之特性，壓擠充填於其中之	地工織管。	200 萬立方公	低–中	實用	少	無

	作	水庫淤泥，柔性構造形狀可隨地形改變。		尺				
	水庫淤泥改質	將水庫淤泥與改質劑攪拌，則淤泥易於吸水之表面，經由改質劑改變為厭水表面，同時除去有害於混凝土健度之離子，成為內部不吸水且穩定之顆粒，可取代混凝土中之細骨材，或作為特殊資材。	結構及非結構混凝土工程、控制性低強度材料、建築防水材及特殊功能摻料等。	650 萬立方公尺	中-高	研發	無	無

水庫淤泥各種處理方式之工程用途、產品價格、需求量及目前淤泥年消耗量。

<table>
<tr><td>應用項目</td><td colspan="3">輕質骨材及構件</td><td colspan="3">改質水庫淤泥</td></tr>
<tr><td rowspan="2">工程用途</td><td rowspan="2">輕質骨材混凝土</td><td rowspan="2">輕質磚</td><td rowspan="2">無細混凝土</td><td rowspan="2">控制性低強度材料，於回填及地下管線工程。</td><td colspan="2">混凝土工程</td></tr>
<tr><td>非結構混凝土，作消波塊、安全島、人行道及排水溝等。</td><td>結構混凝土,作為建築物承重結構。</td></tr>
<tr><td>產品價格</td><td>1500 元/立方公尺</td><td>1.47 元/塊</td><td>500 元/立方公尺</td><td>2700 元/立方公尺</td><td>1800 元/立方公尺</td><td>1800 元/立方公尺</td></tr>
<tr><td>需求量</td><td>1000 萬立方公尺</td><td>預估 50 萬立方公尺</td><td>預估 100 萬立方公尺</td><td>預估 100 萬立方公尺</td><td colspan="2">4000 萬立方公尺</td></tr>
<tr><td>目前年產量（可消耗淤泥量）</td><td colspan="3">400 萬立方公尺
（400 萬立方公尺）</td><td>－
（50 萬立方公尺）</td><td colspan="2">－
（600 萬立方公尺）</td></tr>
</table>