



水庫淤泥資源再利用與市場評估-以石門水庫為例

Feasibility Study and Market Assessment for the Resource

Reuse of Shihmen Reservoir Sludge

高憲彰、鍾明劍、邱顯晉*

許秀真、王璋**

財團法人中興工程顧問社*

水利署北區水資源局**

摘 要

水庫淤積物為天然材料資源，市場區分為有價砂石料及淤泥等無價料。水庫淤泥因水分和數量極多，常缺乏最終收容場所，其再利用的處理能力與市場接受度並不明確。本文以資源利用之概念，先對缺乏淤泥利用市場之混凝土，以石門水庫淤泥實作，包含前導試驗之性能測試、毒性溶出及大型混凝土塊等，並補充調查現有市場再利用情形，分別以技術、經濟及法規等面向，綜合評估水庫淤泥資源再利用之可行性。研究成果發現，水庫淤泥確實可採固化方式應用於混凝土製品，約可取代 75~85% 之細骨材，約佔總重之 20~24%。於再利用市場評估方面，產業採用淤泥之技術確實可行，惟較多有低含水量及雜質少等考量；在經濟上，業者衡量供需鏈、經營成本及市場願景等仍有疑慮，使產業趨向保守，若欲推動市場再利用，宜以合理利潤鼓勵參與或委託代工，再擴展應用面；法規方面，現行國家標準規範、環保標章或綠建材標章，多未將水庫淤泥納入資源，間接侷限水庫淤泥之利用，未來可能需另訂使用規範或法規，提昇公共工程及市場應用，以達到水庫永續經營之目標。

關鍵字：水庫淤泥、混凝土製品、資源再利用

一、前言

台灣地區重要水庫因地質、地震及豪雨等因素，年平均淤積量約 1 千 8 百萬 m^3 。受到土地資源及經費之限制，目前每年平均清淤量約 450 萬 m^3 左右，總清淤土石方已多達約 4 千萬 m^3 ，幾乎為 2 座白河水庫有效容量。若未持續清淤情形下，未來供水品質將受庫容減少及氣候變遷加劇所影響，足見浚渫物最終處置及維持水庫健全已成為必要課題。經濟部水利署於民國 96 年訂定「經濟部水庫淤泥利用處理作業要點」，期能推動水庫浚渫淤泥之資源利用及處置，加速水庫清淤及達成水庫永續經營之目標。因此，

尋找可大量應用之多元化處置有其實質需要，將水庫淤泥資源再利用，為國內產官學一致認同的趨勢，也符合永續經營之目標。本文以功能性及實用性為導向，基於水庫淤泥資源利用之概念，以石門水庫為例，分別探討淤泥應用固化技術於混凝土製品，以及補充調查現有產業市場情形，實際瞭解再利用概況、物料需求、成本及經營等課題，再分別以技術、經濟及法規等面向，綜合評估水庫淤泥資源再利用之可行性。

二、水庫淤泥與處置方式概述

2.1 石門水庫淤泥概況

賴伯勳等人(2006)指出，目前桃園民生及工業用水每日約需 105 萬噸，每年各類用水需求量約需 9.3 億 m^3 ，為石門水庫總蓄水量的 4 倍以上，水庫運轉負荷十分繁重，未來為滿足桃園高科技群聚效應及產業轉型需求，至民國 110 年總需水量將成長至 12 億 m^3 以上。除了用水量激增外，因石門水庫集水區多次遭遇颱風豪雨挾帶大量土石淤積於庫區，以致水庫原水濁度飆高，引發大桃園地區數次停水或供水問題。

依據石門水庫歷年資料，民國 52 至 61 年之平均年淤積量，高達 402 萬 m^3 ，自民國 61 年開始實施四期治理工作，於民國 74 年底年平均淤積量降至 75 萬 m^3 。因上游防砂壩陸續淤滿，「水庫淤砂研究課題規劃」(1996)推估民國 77 年量測水庫容量為 2.36 億 m^3 ，為水庫完工時之 76.2%。有鑑淤積問題，自民國 74 年起水庫管理單位積極辦理水庫浚渫計畫，興建面積約 70 公頃的 13 處沉澱池於下游處，採用深水浚渫船抽取淤泥，再以管線輸送至沉澱池內存放，至民國 84 年共約 10 年時間，已讓壩前淤積面由標高 174.55m 降至標高 163.7m。因民國 85 年賀伯颱風，民國 87 至 93 年再辦理第二次浚渫作業期間抽除 150 萬 m^3 淤泥。但民國 93、94 年遇艾利颱風及馬莎颱風後，水庫容量減少為 2.14 億 m^3 ，平均年淤積量約 200 萬 m^3 ，庫容減少 30% 以上。由歷年經驗可知：(1) 水庫大量淤積現象多由颱風引致；(2) 施行清淤措施確實能減緩淤積速度。

因用水負荷劇增、大量淤積使得水庫庫容減少，已直接威脅石門水庫之永續經營，未來也可能面臨供水質量將有所不足。其現有沉澱池容量約有 380 萬 m^3 ，沉澱池淤泥缺乏大量市場利用及回填場地，以及交通運輸等因素，使得沉澱池容積約有 85% 無法有效利用，影響庫區後續清淤之浚渫作業。其中最嚴峻的，台灣北部地區地狹人稠，長期缺乏淤泥最終處置場所，且淤泥量眾多，數次填滿沉澱池，雖經管理單位積極辦理浚渫，清運效果往往受到諸多侷限。故如何加強推動水庫清淤工程，改善水庫有效蓄水空間，延長水庫使用壽命以確保水庫永續經營，將為未來工作重點。

2.2 清淤處置方式概述

由以往各項研究可知，水庫淤泥大多不含有害物質，其可行之處理流程分為「淤泥浚渫」、「運輸」、「中間處理」及「最終處置」四個階段，如圖 1 所示。在中間處理方面，因水庫新抽取淤泥與現有沉澱池淤泥之處理方式略有不同，新抽取淤泥的流動性高，含水量可達 200% 左右，機械脫水可直接處理；沉澱池淤泥採用長時間曝曬方式，含水量

不均且非脫水設備能直接處理，二者水庫淤泥中間處理可能方案如圖 2 所示。在水庫淤泥最終處置方面，則可再概分為再利用、陸地投棄(掩埋)、海洋投棄(海拋)以及回歸河道等方法，各處理方式之條件及限制概述如下。

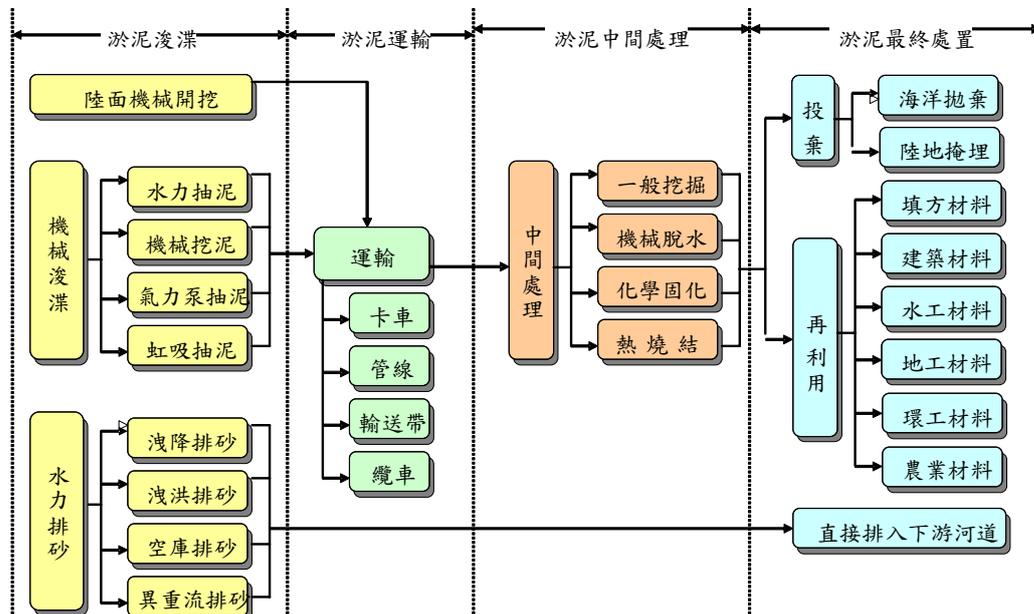


圖 1 水庫清淤暨淤泥處理方式流程圖

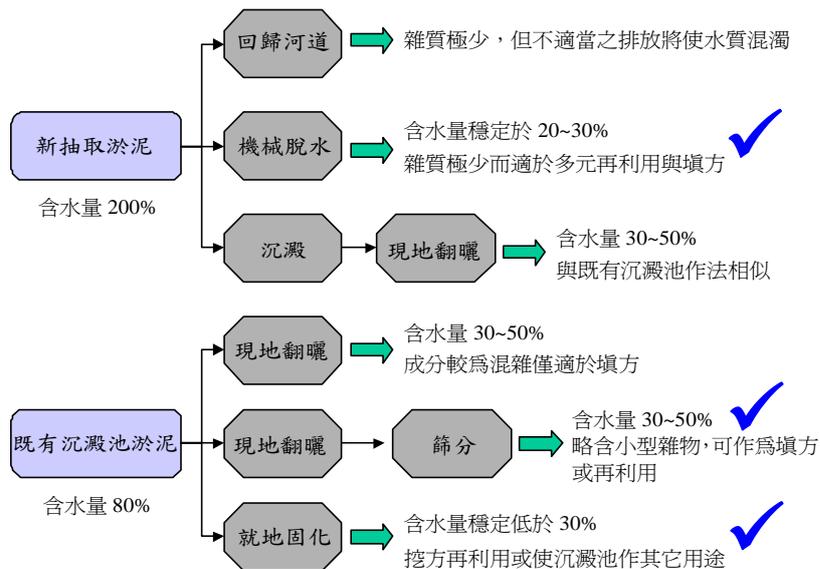


圖 2 水庫淤泥中間處理可能方案

1. 陸地掩埋：水庫淤泥經浚漂後，可選定水庫附近之低窪地點或合格之堆置場，予以掩埋處理。當使用此法處理淤泥時，須同時考慮(1)鄰近地區是否有適當之堆置場地；(2)技術可行性；(3)無造成環境污染之虞等因素。雖然陸地投棄在技術上應無問題，惟與海洋投棄相似，選定之堆置場地易受當地民眾之抗爭。以掩埋作為最終處置方式，除必須選擇適當之地點以外，仍須避免運輸過程中造成二次公害。

2. 海洋投棄(海拋)：海洋投棄係將淤泥視為廢棄物，將淤泥以排放管或船隻運送至外海棄置。當今國內環保意識高漲，規劃海洋投棄淤泥時，需同時辦理環境影響評估，惟過程極為繁複、耗時且阻力多。海拋水庫淤泥須經過處理，以防污染海域，在運輸過

程須避免造成二次公害。此外，浚淤淤泥可填置海埔新生地或製成足夠強度之塊狀物，拋於海堤或海中。

3. 回歸河道：當水庫放水或河道中流量變大時，淤泥被運送移至下游河道或河口處，此方法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，影響下游水質。水庫淤泥回歸河道，在社會層面上有待相關單位之配合；在技術層面上，則需水文分析及輸砂分析，以確保河道輸砂平衡；從生態層面來看，水庫大量泥砂進入河道後將改變河川生態，將影響河道輸送泥砂及河川物理與化學性質。

4. 資源再利用：根據以往專家學者的研究(中興工程顧問社, 1999; 蔡長泰與王文江, 2000~2002; 顏沛華等人, 2002; 顏聰與黃兆龍, 2003; 財團法人工業技術研究院, 2005; 葉春爐, 2007), 資源再利用的方式包括：作為填方材料、土工砂袋(管)工法、作為建築骨材、水泥原料、製磚原料、輕質骨材、人工魚礁、消波塊、護坡預鑄塊、噴漿砂料、濾料、客土法、農業用土壤、土壤改良劑等，上述再利用方法皆已有類似研究成果，惟尚未見廣泛的市場需求及全面應用。本文彙整水庫淤泥可採用之再利用方式如表 1。

表 1 水庫淤泥再利用方式及其製程

類別	再利用方式	製程方式
填方材料	直接作為填方材料	可採 1.自然曝曬；2.沉積壓密；3.脫水；4.固化等方式，降低淤泥之含水量，以有效提升其強度。
	土工砂袋(管)	利用高強度土工織物製成一大型之密閉結構，內部填充淤泥製成土工砂袋(管)，應用其材料之高張力特性及填充物本身自重，擠壓其內容物，使其脫水固結。
建築材料	直接作為骨材	透過篩分方式，選出合適粒徑之水庫沉積物做為建築骨材。
	水泥製品	藉由添加固化劑，減少黏土所帶之表面水，脫除溶於表面水中之有機物，形成較大顆粒，此時黏土將可與水泥中鈣離子直接反應。
	製磚原料	以燒結方式製作磚類產品。
	輕質骨材	將淤泥以造粒法結合成圓形粒，在 800~1,000°C 高溫燒結成緻密具有強度之顆粒；或在 1,100~1,250°C 下，使原料膨脹或發泡，形成發泡型輕質骨材。
水工材料	人工魚礁	可採 1.進行淤泥固化處理；2.以淤泥取代部分細粒料，或將淤泥燒結成輕質骨材取代粗、細骨材後，再按混凝土配比製成混凝土塊。
	消波塊	
土工材料	護坡預鑄塊	以 1:1 或 1:2 濃度之泥水比製成泥漿，噴至砂丘地表層形成護甲層。
	砂丘噴漿砂料	
	透水性預拌混凝土鋪面	
環工材料	濾料	以淤泥燒結成輕質骨材，採用堆疊方式構成濾床。
	客土法	將淤泥與受污染之重金屬土壤加以混合，再採用酸洗法將受污染土壤中之重金屬溶出而去除，因淤泥本身具備氮磷等營養鹽，仍可保留土壤肥力。
農業材料	農業用土壤	脫水並添加泥炭土及蛭石後，加工利用為農業用土壤或養殖土。
	土壤改良劑	清淤後排出之泥水，經由灌溉渠道導入農田與田土犁耕混合，以作土壤改良劑。
	培養土	與其他營養源及資材混合候做為園藝、公園草皮填土之用。
	植栽用介質	利用低溫燒結作用，將水庫淤泥與可資源化物料燒結成高吸水率(>30%)的農業用無機性保水材料。

綜合言之，水庫淤泥問題係水庫於生命週期內不可避免的嚴肅課題，終須尋求可行且能長期清理淤泥的方案，以增加水庫的使用年限。目前咸認為並無單一方法可完全解決水庫淤積問題，必須配套多元化清淤方式，如颱風帶來充沛水量及大量土砂時可採水力排砂，惟因水力排砂並不能將所有泥砂全部排除，必須搭配機械挖除或浚淤等方式來清除庫底淤積，因此如何研訂資源化利用來處理大量之淤泥即成為一重要課題。此外，

推動水庫淤泥再利用時，首先面臨有沒有待解套或窒礙難行的法規，仍需一併考慮之。

三、水庫淤泥混凝土製品之評估

3.1 評估方法

目前固化技術常為土壤整治及事業污泥處置所採用，惟極少利用水庫淤泥為混凝土材料。本研究評估方法以功能性為主，要求淤泥混凝土須達預期設計需求，且須符合環保法規等要求。並為瞭解混凝土製品是否可添加石門水庫淤泥，先於室內前導試驗，其流程包括配比規劃、試體製作、抗壓試驗、浸水性試驗、曝曬測試以及毒性溶出試驗等。其中，室內試驗所用之淤泥取自於石門水庫第 12 號沉澱池地表下約 1.5m 處，其物性及化學成分如表 2 及表 3 所示，土壤分類為低塑性粘土(CL)，化學成分以 SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃ 為主。完成室內前導試驗後再於石門水庫第 7 號沉澱池將水庫淤泥固化製成大型混凝土塊及消波塊，以驗證現地實作之可行性。

表 2 石門水庫 12 號沉澱池淤泥一般物理性質

深度 (m)	比重 Gs	單位重 (t/m ³)	含水量 (%)	液性限度	塑性指數	砂含量 (%)	粉土含量 (%)	黏土含量 (%)	土壤分類
1.0~1.6	2.73	1.78	44.5	43	19	1.31	49.79	48.90	CL
2.5~3.1	2.72	1.72	45.0	43	18	0.22	53.09	46.69	CL
4.4~5.0	2.73	1.74	40.5	37	13	0.16	57.19	42.65	CL

表 3 石門水庫 12 號沉澱池淤泥之化學成分

深度 (m)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	K ₂ O (%)	Na ₂ O (%)	有機質 (%)	其他 (%)
1.0~1.6	62.41	17.75	6.83	0.87	2.08	2.29	1.17	1.31	5.29
2.5~3.1	61.29	18.64	6.90	0.87	2.07	2.35	1.17	2.11	4.60
4.4~5.0	62.78	17.78	6.84	0.87	2.01	2.32	1.18	2.14	4.08

3.2 室內測試

本研究規劃包括 175、210、245 kgf/cm² 等三種設計強度，為評估淤泥含量對強度之影響，分別對上述設計強度規劃 2 至 3 組配比，共 8 種組合，如表 4 所示。表 4 的原料包含水泥、爐石粉、淤泥、砂石及強塑劑等，每種配比製作 12 顆 12 cm ϕ、24 cm 高之圓柱試體。淤泥含水率為 27%(相當含水量 37%)，在與其他材料混合前需將淤泥攪拌均勻。此外，混凝土強度受水灰比及拌合均勻度所控制，因水庫淤泥含水量高且變化大，如何控制水灰比及避免形成黏土塊，使淤泥能與其他材料充分且均勻拌合，為品質控制之主要考量，因此所採用之固化劑需能滿足上述之需求。本研究所使用之固化劑係由麗普化工股份有限公司提供，其固化劑係由數種材料拌和而成，外觀呈黑色粉末狀，使用量約為淤泥重量之 2%。於實際應用時可先將此類固化劑摻入淤泥漿中攪拌，拌和過程中黏稠狀的泥漿逐漸轉變為流動狀的泥漿(如圖 3 所示)。澆置完所有混凝土試體後，待放置一天具備基本強度後，即移至養護池內養護。由表 4 可知淤泥取代細骨材的比例約達 75~85%，佔總重約 20~24%。



(a)淤泥塊原狀 (b)淤泥攪拌 (c)加入固化劑及強塑劑 (d)再攪拌均勻

圖 3 水庫淤泥與水泥、砂石等混合前先轉變為流動狀的泥漿

在混凝土圓柱試體抗壓試驗方面，分別採用上述各種配比不同齡期(3、7、14、21、28、42、56 及 180 天等八種齡期)，試驗成果彙整如表 5 所示。不同設計強度下混凝土強度隨齡期之發展行為，如圖 4 所示。由 28 天的抗壓強度來看，各配比之混凝土強度均已超過設計強度。再者，齡期 42、56 及 180 天的晚期強度會隨齡期越長略呈穩定，且較齡期 28 天強度有所提升。由此可知，透過合宜的預攪拌機制將水庫淤泥摻入並拌合均勻，再透過適當之配比設計，水庫淤泥可達設計強度需求。在水庫淤泥含量影響抗壓強度方面，如圖 5 所示，水庫淤泥含量在此區間時，整體強度發展在 28 及 180 天隨淤泥含量越多略有稍少趨勢，於較低設計強度 175 kgf/cm^2 則差別並不大。

表 4 水庫淤泥固化混凝土配比

編號	設計強度 (kgf/cm^2)	水膠比 (W/C)	水泥 (kg)	爐石 (kg)	細骨材(kg)		粗骨材(kg)		水 (kg)	附加劑 (kg)	固化劑 (kg)	淤泥量/ 總重(%)
					粗砂	淤泥	粗石	細石				
175-1	175	0.63	171	209	96	541	552	452	232.0	7.6	10.82	23.9
175-2	175	0.63	171	209	127	510	552	452	232.0	7.6	10.20	22.6
175-3	175	0.63	171	209	159	478	552	452	232.0	7.6	9.56	21.1
210-1	210	0.58	187	228	91	518	501	500	231.7	8.3	10.36	22.9
210-2	210	0.58	187	228	122	487	501	500	231.7	8.3	9.74	21.5
210-3	210	0.58	187	228	152	457	501	500	231.7	8.3	9.14	20.2
245-1	245	0.53	203	248	87	495	499	498	231.0	9.0	9.90	21.8
245-2	245	0.53	203	248	146	436	499	498	231.0	9.0	8.72	19.2

註：水膠比：水佔膠結材的重量百分率。

表 5 水庫淤泥固化混凝土試體抗壓強度(kgf/cm^2)

齡期	3 天	7 天	14 天	21 天	28 天	42 天	56 天	180 天
175-1	71	121	191	219	236	237	251	267
175-2	60	138	174	188	220	228	218	218
175-3	66	128	170	206	229	238	238	259
210-1	81	170	175	225	241	269	278	277
210-2	75	151	188	229	229	258	277	242
210-3	76	152	184	229	271	284	287	324
245-1	92	185	243	242	247	276	276	307
245-2	92	160	210	250	263	285	285	341

在毒性特性溶出試驗(Toxic Characteristic Leaching Procedure, TCLP)方面，本研究參考行政院環保署所定之事業廢棄物毒性特性溶出程序 (NIEA R201.13C)之規定，挑選淤泥配比及固化劑含量最高之混凝土試體(編號 175-1)，作毒性特性溶出試驗(TCLP)，以測試淤泥混凝土是否符合環保法規要求。試驗結果，經此溶出試驗程序所萃出之重金屬銀、砷、鋇、總鉻(含六價鉻與三價鉻)、銅、鉛、硒、汞、六價鉻含量，皆遠低於法規標準限值，如表 6 所示，可知此淤泥混凝土試體溶出物含量皆符合環保法規要求。

在浸水及曝曬特性方面，本研究於試體養護 28 天後，將各配比試體分別置於水槽

及屋頂自然曝曬各 150 天，以比較淤泥混凝土長期泡水及反覆日曬雨淋之特性。其試驗結果如圖 6 所示，比較水中 150 天與 28 天抗壓強度，150 天水槽養護之強度均較 28 天高 2~32%，可知浸水對淤泥混凝土具養護效果。另比較自然曝曬 150 天與 28 天抗壓強度，經 150 天日曬雨淋下，其試體之抗壓強度仍保持於 28 天齡期之 92~109%。除抗壓強度外，自然曝曬 150 天之完整混凝土試體表面略呈龜殼紋狀，如圖 7 所示。綜合言之，經自然曝曬 150 天之淤泥混凝土強度差別並不多，可知具有一定之耐久性，惟外表微細裂紋是否會隨長期時間加深，影響混凝土強度與耐久性，則需作更長期之研究。

表 6 水庫淤泥混凝土重金屬成分 TCLP 檢出值及標準表(單位：mg/L)

項目	總汞	總鎘	鉛	砷(As)	六價鉻	總銅	總銀	鉍	總鉻	錳
淤泥混凝土	<0.01	0.002	<0.3	<0.1	<0.05	0.0125	<0.03	0.9067	0.0033	<0.5
環保署有害事業廢棄物標準	0.2	1	5	5	2.5	15	5	100	5	1
綠建材標準	0.005	0.3	0.3	0.3	1.5	0.15	0.05	—	—	—

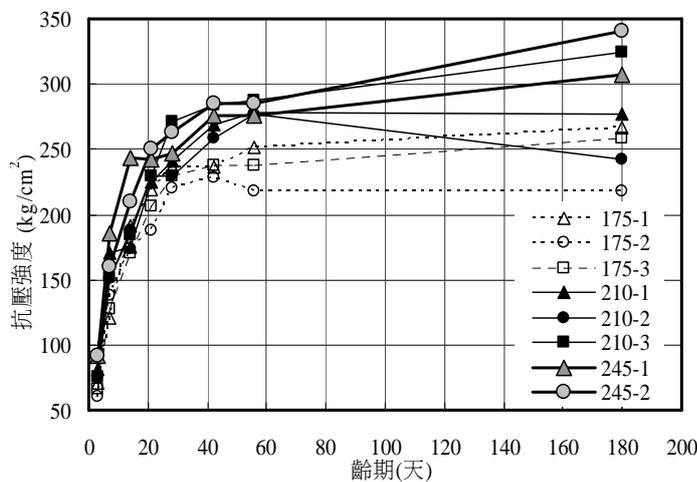


圖 4 各配比之強度隨齡期發展情形

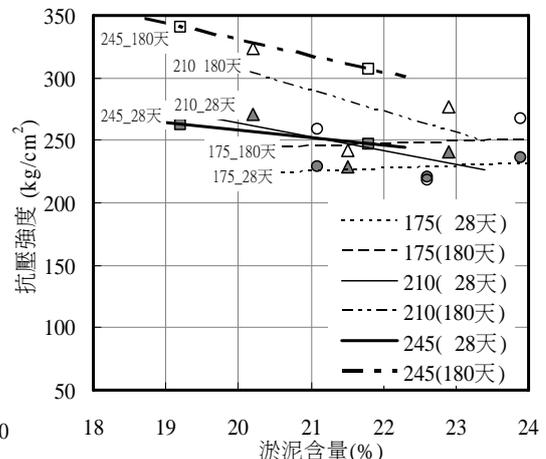


圖 5 水庫淤泥含量對抗壓強度之影響

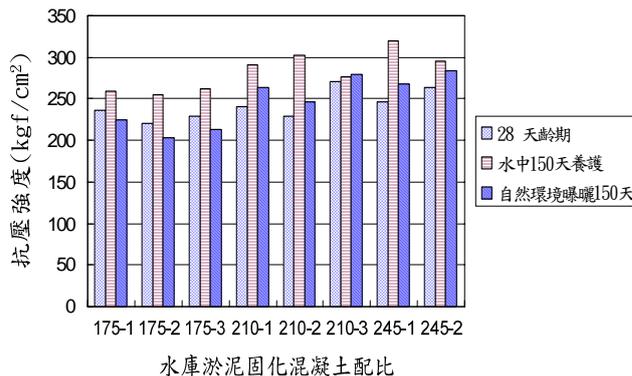


圖 6 水庫淤泥混凝土試體於不同條件下之強度



圖 7 自然曝曬 150 天之試體外表

3.3 現地大型製品實作

本研究分別採用兩種配比(消波塊：175kgf/cm²、混凝土塊：245kgf/cm²)，於第 7 號沉澱池現地將水庫淤泥固化製成混凝土塊，共現場澆置完成 5 個消波塊與 5 個長方形混凝土塊(1m 寬×3m 長×0.6m 高)，並完成養護工作，如圖 8 所示。混凝土澆置過程中，採隨機採樣製作 5 個混凝土圓柱試體，抗壓試驗成果，如表 7 所示，混凝土取樣試體於齡

期 28 天之平均強度分別為 214 及 278kgf/cm²，均可滿足之設計要求，及符合混凝土工程施工規範與解說(2005)內 17.2.2 條規定。另經曝曬雨淋於現地約 1 年後(民國 97 年 5 月~98 年 5 月)，上述大型製品仍然完好，可知水庫淤泥固化製成混凝土塊的再利用技術具有可行性。

表 7 現地大型水庫淤泥混凝土塊取樣試體之抗壓強度(單位：kgf/cm²)

項目	設計強度175kgf/cm ²					設計強度245kgf/cm ²					
	1a	2a	3a	4a	5a	1b	2b	3b	4b	5b	
齡期	28天					8天	28天				
強度	218	223	205	195	229	219	290	264	275	283	



(a) 淤泥添加固化劑及附加劑均勻攪拌



(b) 混凝土澆置及圓柱試體取樣



(c) 混凝土塊養護



(d) 消波塊養護

圖 7 淤泥混凝土現地製作成果

3.4 水庫淤泥混凝土之初步評估

1.技術可行性評析方面：經上述 8 種配比規劃及試驗，室內及現地製品之抗壓強度均可滿足強度要求，足見經由適合之原料組合後，水庫淤泥確可採固化方式應用於混凝土製品，且溶出試驗符合環保法規要求。惟淤泥混凝土製品超過一年以上之長期強度、耐候性、抗冲刷性等仍待現地測試或大量室內試驗之深入研究。

2.經濟可行性評析方面：參考公共工程委員會(第 22 期)與營建物價(2008)，每 1kg 單價為水泥 2.725 元、爐石 1.55 元、細骨材 0.72 元、粗骨材 0.67 元、附加劑 10 元 g、固化劑 35 元。若不包含抽泥攪拌、設備增修及搬運等施工費用，以表 4 的用料估算，上述三種強度之淤泥混凝土費用約 1,986、2,045 及 2,105 元，一般混凝土市售費用約 2,270、2,390 及 2,550 元。材料單價分析上，因以無須購買之淤泥取代較 75~85%細骨材，

佔總重約 20~24%，可節省大量細骨材的昂貴費用，其單價目前略低於一般混凝土。由此可知，當市場骨材價格飛漲時，淤泥用於混凝土製品的成效將隨之提高。未來若能推廣使用此類再利用方式，對淤泥處理量將有相當的提升。

3.法規評析方面：水庫淤泥含有現行混凝土技術規範限制之大量粉土及黏土，依據規定，一般混凝土之限制含量為不得大於 5%，而承受磨損混凝土則限制不得大於 3%。因此，若欲使用淤泥製成混凝土構件，尚須就法規面檢討是否有解套方案，或就此類再生利用產品制訂合宜之規範，以利水利產業之資源化利用。

3.5 研擬水庫淤泥混凝土規範

本研究經參照測試成果及一般混凝土施工規範，初步研擬「水庫淤泥混凝土」規範(草案)，說明水庫淤泥混凝土使用於消波塊、異形塊、混凝土護欄等附屬結構物方面，水庫淤泥材料與混凝土之品質規定，提供未來推動再利用之參考。主要內容說明如下。

1.水庫淤泥混凝土規格：(1)水庫淤泥混凝土之性質應符合表 8 規定；(2)每 1m³ 混凝土的水庫淤泥含量可參考如表 9 之配比。

表 8 水庫淤泥混凝土之性質要求

項目	試驗方法	要求	備註
坍度 (cm)	ASTM C143	[10~15]	
抗壓強度(kgf/cm ²)	ASTM D4832	[175~245]	28 天齡期
滲透係數(cm/s)	ASTM D5084	[5×10 ⁻⁹ 以下]	28 天齡期

表 9 水庫淤泥混凝土之參考配比

材料種類	膠結料	水庫淤泥	水	粗骨材	細粒料
每方材料重量(kg/m ³)	380~450	400~500	230	1000~1100	90~160

2.性能導向的品質管制：施工前根據表 9 之配比作試拌確認試驗，據以決定施工。如無法達到要求時，應重新配比設計及廠拌試驗等工作。試驗前須先提施作計畫；試驗合格之配比設計應經核可後方可使用。

四、再利用市場補充調查

4.1 現有產業再利用項目

依據經濟部水利署 96 年 8 月 13 日發布「經濟部水庫淤泥利用處理作業要點」，其中明示水庫淤泥利用項目有：輕質骨材、預拌土壤材料、固化混凝土、高強度土壤、磚、瓦、肥料之材料、土壤改良、填料、其他經本部公告項目等。並指出水庫淤泥處理包括淤泥脫水、粉碎、烘培、煨燒、冷卻等流程處理及製成輕質骨材、磚、瓦、高強度土壤之材料及其他有用之資源。目前水庫淤泥利用項目的研究甚多，惟尚缺乏較有系統、完整的統合與調查，包含可能的淤泥再生用途，市場規模、使用端、物料限制或品質需求等。其中，除上述固化技術利用者外，參考目前民間產業市場可再利用及已具生產線者，分別還有磚瓦、輕質骨材、培養土、水泥、淤泥改質等產業，預拌土壤材料及高強度土

壤則尚在學術單位推廣階段。本文將針對現有產業可立即運用者，補充調查產業概況、物料需求、經營成本等課題，分別說明如后。

4.2 磚瓦市場

磚瓦產業可再區分為普通建築磚(紅磚)、指定窯燒磚及高壓混凝土磚等種類。其中，普通建築磚(紅磚)屬於目前用土量最大者，根據經濟部民國 96 年 12 月「台灣北部及東部花蓮縣窯業用土資源調查規劃」成果指出，北桃地區年需土量可高達約 120 萬 m³，如表 10，並可知產業已具備技術且石門水庫淤泥符合製磚。於台北縣鶯歌及桃園縣龜山等地共有 7 家磚窯廠營運中，北桃紅磚業者用土來源大多向土方業者收取 20-100 元不等處理費，較無需收容大量土方囤置。該調查並指出，目前北桃地區僅 2 家設有合法土資場，收容量各約 36、54 萬 m³，惟本研究訪談後，其中目前僅 1 家業者願收受水庫淤泥。在用料上，使用淤泥產製紅磚時，需添加其他土質混合，淤泥成分約佔 75~85%，考量燒失量及避免裂隙，需有機質 <5%，以及不含樹枝、礫石、添加快乾劑等。

表 10 北桃地區營運中磚窯廠生產量及需土量

工廠名稱	紅磚產量(萬塊/年)		年需土量(立方公尺)		原料來源	
	目前產量	最大產能	目前產量	最大產能		
台北	迴龍磚廠	600	6,000	12,000	120,000	工程剩餘土
	元記實業	7,000	9,000	140,000	180,000	工程剩餘土
	志峻企業	5,000	6,000	100,000	120,000	工程剩餘土
	聯泰磚廠	3,300	3,600	66,000	72,000	工程剩餘土
	台北縣合計	15,900	24,600	318,000	492,000	
桃園	立昌窯業	10,000	12,000	200,000	240,000	工程剩餘土、廢玻璃容器
	大勝磚廠	6,000	7,000	120,000	140,000	水庫淤泥
	明泰磚廠	6,000	7,000	120,000	140,000	工程剩餘土
	俊行記實業	22,000	27,000	440,000	540,000	工程剩餘土、水庫淤泥、淨水廠污泥、廢玻璃容器
	傑泥環保	3,000	3,600	60,000	72,000	工程剩餘土、水庫淤泥、紡織污泥
	新發窯業	200	2,160	4,000	43,200	工程剩餘土
	桃園縣合計	47,200	58,760	944,000	1,175,200	

資料來源：摘錄自經濟部(2007)，「台灣北部及東部花蓮縣窯業用土資源調查規劃」

在指定窯燒磚方面，常用材料為粘土、淤泥，約利用 1,000 度窯燒固結產製植草磚、隔熱磚、地磚、壁磚、透水磚、人行道磚等，並可利用水庫淤泥為生產各種粒料(比重約 1.6)，採用水庫淤泥燒結粒料後，直接澆置成透水鋪面，可減輕排水設施負擔、改善人行道積水及都市暖化等功能，業者表示上述技術已可辦理。惟若淤泥製品產量多且單價較高，民間市場並無此大量需求且無法消化，產業認為需採用「取之於公共工程，用之於公共工程」之策略，經由政府委託產業代工利用之。

在高壓混凝土磚方面，民間產業高壓混凝土磚技術、製程與設備已自動化。依用途可分為地磚、引導磚、植草磚、空心磚和圍牆磚等五類，可用於花盆磚、路緣石及護坡等，並以人行步道和廣場等設施及休閒業為大宗。現行原料主要為水泥、砂和碎石等，以高壓成型方式快速製得，也可採用輕質骨材、冷結粒料為材料。惟用淤泥取代砂石作為高壓混凝土磚，需經水泥膠結或燒結粒料等固化技術，且需再經測試，不含擴充新生

產線及原料補助，業者目前評估之成本尚無法與市售相比。

4.3 輕質骨材市場

水庫淤泥應用於輕質骨材之利用，政府、學研單位投入極多的應用研究及推廣工作。目前逐步應用於超高樓層、科技廠辦及醫療院所，更具體用於橋梁結構如國道 6 號—石灼巷跨越橋之公共工程，足見淤泥在此產業技術確為可行。內政部建築研究自民國 80 年起至今長期積極推動，並已出版輕質粒料混凝土參考使用準則暨施工技術參考規範，已納入公共工程施工綱要規範中，提供設計及施工等單位作為工程規範之依循。本文訪談輕質骨材協會，得知目前市場採用輕質骨材之用量每年約 20~50 萬 m^3 ，初估潛在市場每年約在 50 萬 m^3 以上，若以骨材單位重 $600kg/m^3$ 計算，大約 $1m^3$ 的水庫淤泥將可生產 $1m^3$ 的輕質骨材，即可百分百再利用。建材用市場之銷售單價約 2,000~3,000 元/ m^3 。

惟市售多數輕質骨材(俗稱陶粒)約有超過九成非台灣本地生產，因來源多元或良窳不齊，可能間接影響品質與用途。根據中華輕質骨材協會網站(<http://www.laca.org.tw>)資料：「1999 年 5 月湧源工程股份有限公司率先提出台灣第一座輕質骨材廠設廠申請，採用石門水庫的浚淤淤泥作為原材料...計畫總產能為 $300m^3/日$...2002 年生產幾千立方米的優質輕質骨材後，因營運管理不善而被迫停產...始終無法達到原設計的產能」。可知輕質骨材在經營及市場上，仍有許多待克服之問題。據訪查目前輕質骨材產業具有實際生產線者有桃園縣的金鼎防火建材(金碩實業)及三奕科技，其中，金鼎防火建材可再利用輕質骨材作為輕質隔間牆(陶粒板)之原料，採用陶粒：水泥：砂用量體積比約 6：3：1(陶粒約佔 60%)。目前上述產業多於試車階段，其輕質骨材市場需求及自製產能仍需開拓，有待打開行銷通路及解決庫存，並提供水庫淤泥處理之去處。

4.4 培養土市場

水庫淤泥作為培養土原料，為加工成本低、技術門檻並不高之再利用方式，主要可用於栽培介質。參考自來水事業網站資料，園藝業便曾多次利用其脫水泥餅作為原料。本文訪談其中產業，表示淤泥可再利用為培養土、土壤改良劑、天然基底沃土等產品，係採用碳化稻殼、堆肥、椰纖、椰土等拌合，黏土約佔 30%，每年用量約 1.2 萬噸左右。依該公司經驗，若水庫淤泥需脫水以利運送及堆置，初估成本約提高 20% 左右，但因為距離、運量與成本變動，且非固定取得，而補助偏低也會影響其採用。根據農政單位表示，農業或園藝培養土需考慮排水、保水、通氣與保肥等特性，並依農作、植物種類來選定。因水庫淤泥有機物含量少(約 2%)，遠低於所需的 30%，且排水及通氣性不佳影響植物根部，質地太黏並不適合直接作為栽培介質。部分業者也表示，目前培養土採用水庫淤泥之需求並不高，水庫淤泥比重高，較不符培養土需要之輕搬運。

相對上，國內在水庫淤泥在農業園藝之利用，需堆置加工場地，常缺乏具體規模或政府資源協助，民間業者多為小型經營，且培養土業者並不多見，此方面應用市場實際規模不明確，也缺乏利用水庫淤泥之經驗，距落實此類產業利用仍有一段距離。由於淤泥用於園藝農業之首要在於土壤肥力，而淤泥有機質含量過少、重量重，黏土成分多，使得排水及透氣性不佳，需大量加工混合其他原料後，方能加以利用。

4.5 水泥原料市場

根據台灣區水泥工業同業公會資料，民國 95 年水泥總產量約 2,000 萬噸。水泥係以石灰石、粘土(約 10%)、矽砂、鐵渣、煤灰、高爐石等原料，主要為 CaCO_3 、 SiO_2 、 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 等化學成分，經高溫旋窯設備以 $1450^\circ\text{C} \sim 1500^\circ\text{C}$ 左右之煅燒而成(製造流程圖如圖 8 所示)。由化學成分可知，石門水庫淤泥可作為水泥原料，不但具高經濟價值，並可解決淤泥問題。經本研究與國內水泥大廠訪談後，如表 10 所示，目前水泥業願採用者並不多見。再訪談台泥蘇澳廠，目前該廠水泥年產量約 240 萬噸，每年需用土約 36 萬噸，最多約達 50 萬噸。經評估訪查結果，水庫淤泥作為水泥原料，有大量成為資源之特性，在國家標準及品管上，可減少加工或堆置擔心二次污染之疑慮。既有產業具成熟技術，受市場波動相對不高，可供較穩定之應用面向。除含水量需低於 30% 外，石門水庫位於桃園縣，遠距離運送成本為產業主要考量，依業者之初步評估，認為若可符合處理成本及穩定供應，方可參與長期合作方式。

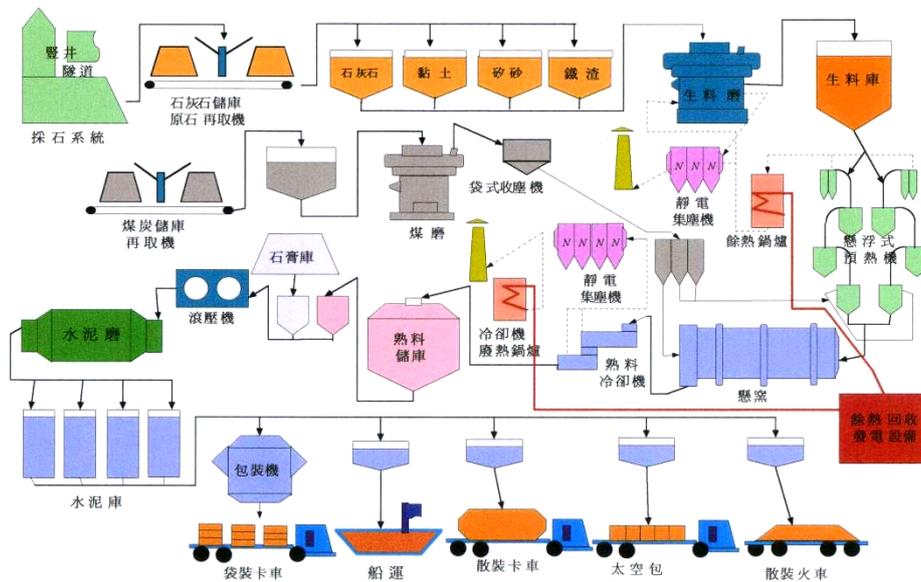


圖 8 水泥製造流程圖(台泥研究室提供)

表 10 水泥產業底泥利用概況與初步回應

公司名稱	利用概況與技術	關鍵課題	初步回應
台灣水泥蘇澳廠	可使用自來水廠泥餅；具備處理技術，曾作水庫底泥化性分析	含水量(降水及輸送成本)	可長期及試用
亞洲水泥新竹廠	可使用桃園地區自來水廠泥餅	水分或硫份、高溫降水成本及黏著皮帶	目前暫不考慮
欣欣水泥嘉義廠	可使用雲林林內或豐原地區自來水廠泥餅	開窯及運送成本較高；多外購熟料再加石膏製造水泥	目前暫不考慮
信大水泥南聖湖廠	不使用淤泥，使用工程剩餘土自配材料(碳酸鈣、細砂礦)。	評估物性不適合該廠設施；若料源性質不穩定可能影響大批連續性製程	目前暫不考慮
幸福水泥埔心廠	該廠為半成品研磨加工	—	—
幸福水泥東澳廠	無採用過泥餅經驗	運輸成本、水分及化學成分	—

4.6 淤泥改質市場

民國 97 年 11 月成功大學宣布成立第一家衍生公司「昶閱科技」，98 年量產「樂土

LOTOS」防水隔熱透氣系列產品，第一年產量 240 公噸，年產值約 2 千多萬元(資料來源：<http://www.techome.com.tw>)。本研究訪談該公司，指出用料需求與磚廠相同，目前用料可向磚廠購買或委請前處理後的淤泥，推估國內每年至少有 5,000 噸之防水市場，未來將逐步擴展市場規模。目前產品有樂土 LOTOS 多效能防水粉及防水透氣隔熱毯，防水粉每包為 25kg 裝，淤泥含量可達總重之 95%，一般施工使用量為水泥用量的 10~20%，並可添加於水泥砂漿、各種預拌砂漿及泡沫混凝土等多種用途。此類再利用將水庫淤泥改質為高附加價值的利用方式，惟潛在市場面極待突破，且對水庫淤泥之處理量可能有限。

五、淤泥資源再利用綜合評析

5.1 再利用技術可行性

1. 於再利用市場評估方面，經本文研究與訪查結果，上述產業採用淤泥之技術上多可克服及再利用，足見技術開發對淤泥再利用並非阻力，惟因處理技術衍生之處理成本與經營市場則值得重視。

2. 民間產業要求多有低含水量、均質及雜質少等考量。據此，新抽取淤泥的流動性高，利用機械脫水可處理為較均質泥餅；沉澱池淤泥採用長時間曝曬方式，均質性較不佳，較適合以固化或填料方式處理。

3. 公共工程利用上，因應使用淤泥的施工技術仍不多見，宜研擬建置各類淤泥專用之使用標準圖說及技術要求，例如：內政部建築研究所積極推動之輕質粒料混凝土參考使用準則暨施工技術參考規範，俾讓政府各級單位參用及產業有所依循。

5.2 經濟性評析

1. 民間業者衡量供需鏈、經營成本及市場願景等多存有不確定性，使產業趨向保守，若欲推動市場再利用，宜以合理利潤鼓勵參與或委託代工，先降低初期壓力，再擴展應用面。

2. 在既有市場上，以建築用普通磚(紅磚)、水泥、園藝用土、輕質骨材及淤泥改質等具有市場銷售與獲利能力。惟後三者對於水庫的處理量仍待提昇，紅磚及水泥產業雖具較大量處理能力，但因產業特性、交通運送等成本問題，並可能對既有之營建土方與北市脫水泥餅產生比價效應，除非有相應政策配合補助，否則經濟上對業界而言仍不具足夠之吸引力。

3. 在公共工程市場上，以水泥固化製品、委託製磚或填方材料較為明確。水泥固化製品，雖技術可行，但民間無法自行開拓市場。但若以政府委託代工，則可能在公共工程需求有願景，且能因量多而降低成本，讓民間業者有生存空間。若可應用於河海防護之水利工程，更有相輔相成之效用，而此類市場屬於公共工程用量規模屬於彈性處理量，可於政府水利單位於前一年度事先統計，規劃下一年度可能之需求量。

5.3 法規面評析

1. 現行國家標準規範、環保標章或綠建材標章，多未將水庫淤泥納入可用資源，間接侷限水庫淤泥之利用，未來可能需另訂使用法規，提昇公共工程及市場應用，謀求淤泥去化，以達到水庫永續經營之目標。

2. 各類水庫淤泥再利用用途之產品規範(如淤泥混凝土等)尚未齊備且未有標章制度。初期可依水庫管理單位之需求量試辦推動，中長期則應研訂水庫淤泥再利用標章制度，拓展淤泥再生資源化的出處與用途。

3. 「經濟部水庫淤泥利用處理作業要點」目前僅為原則性說明，未來宜有研擬詳細作業細則，如申請資格與條件、獎勵補助計算方式、增列作為水泥再利用項目等。

4. 水庫淤泥為可利用資源，惟營建署「營建剩餘土石方處理方案」內尚未明示水庫淤泥(脫水泥餅)，未來如該處理方案予以明確納入，可與廢棄物作明確區別。

5. 目前雖由各水庫使用管理單位(包含農田水利、地方政府、台糖、台電及自來水等)辦理清淤，惟淤泥處置及資源利用法規，仍屬於內政部及地方縣市在「營建剩餘土石方」之管理範疇，並涉及公共工程委員會、環保署、農委會及經濟部等主管單位與法規層面極為廣泛，其資源利用有待跨部會整合，以謀求各地水庫內眾多淤泥解決之道。

六、結論

本研究經由一系列取樣、試驗實作及市場訪查，評估石門水庫淤泥確實可採固化混凝土及應用於多種製品之原料。其中，淤泥混凝土製品之 1 年晚期強度較 28 天齡期之強度有所提升，且由溶出試驗驗證此類混凝土製品符合環保法規要求，水庫淤泥已可取代 75~85% 之細骨材，佔總重約 20~24%，對水庫淤泥處理量可有相當的提升。再者，補充訪查各再利用產業，處理技術純熟或可研發應用，足見目前淤泥利用有相當之應用方向。在經濟性方面，受限於產業習性、市場供需現況及處理成本等條件，若欲推動市場再利用，宜先以合理利潤鼓勵參與或委託代工，再逐步擴展應用面。於法規層次上，本研究已針對現行混凝土技術規範上初擬水庫淤泥混凝土規範草案之對策，惟其他產業利用上，若欲使用大量淤泥製成產品，除考慮技術及經濟性外，仍有賴政府跨部會協助，就法規面檢討是否有獎勵及解套方案，或就此類再生利用產品制訂合宜之規範。

誌謝

本文承蒙經濟部水利署北區水資源局經費提供「石門水庫淤泥多元化處置方案評估規劃」研究，評估過程獲得麗普化工、龍形企業、台興科技及各訪談產業等單位之協助，在此一併致上誠摯謝意。

參考文獻

賴伯勳、鍾朝恭、郭耀程，石門水庫面臨問題與因應對策，工程環境會刊，2006，第 17 期，第 1-21 頁。

經濟部水資源局，水庫淤砂研究課題規劃，1996，台北，經濟部水資源局。

中興工程顧問社，水庫淤泥固化與棄置，1999，台北，財團法人中興工程顧問社。

蔡長泰、王文江，水庫清淤之研究(一)(二)(三)，1996~1999，台南，成功大學水利及海洋工程系。

顏沛華、蔡長泰、王文江、沈為家，曾文水庫淤積清理及後續處理可行性研究，2002，台南，財團法人成大水利海洋研究發展文教基金會。

顏聰、黃兆龍，水庫淤泥輕質骨材產製及輕質骨材混凝土應用與推廣—分項計畫二：水庫淤泥輕質骨材混凝土標準規範訂定，2003，台北，內政部建築研究所。

財團法人工業技術研究院，水庫、港灣淤泥回收作為土石資源利用之研究，2005，台北，經濟部。

葉春爐，水庫淤泥回收作為土石資源利用之研究，水利產業研討會，台南：國立成功大學，2007 年 11 月 1 日至 2 日。

張煜權，利用水庫淤泥漿灌溉砂丘地之定砂技術，立德學報，2005，第 2 卷，第 2 期，第 77-86 頁。

中國土木水利工程學會混凝土工程委員會編著，混凝土工程施工規範與解說，2005，台北，科技圖書股份有限公司。

經濟部，台灣北部及東部花蓮縣窯業用土資源調查規劃，2007，台北，經濟部。

中興工程顧問有限公司，石門水庫淤泥多元化處置方案評估規劃，2007，桃園，經濟部水利署北區水資源局。