

石門水庫淤泥再利用產業調查與探討

高憲彰¹ 邱顯晉² 鍾明劍² 黃崇仁³ 劉弘祥⁴ 許秀真⁵ 賴伯勳⁶

¹中興工程顧問社副理

²中興工程顧問社研究員

³中興工程顧問股份有限公司經理

⁴中興工程顧問股份有限公司大地工程技師

⁵經濟部水利署北區水資源局副工程司

⁶經濟部水利署北區水資源局局長

摘 要

多次豪雨引致石門水庫集水區嚴重崩塌與水庫淤積，衝擊供水品質及水庫壽命。因水庫淤泥水分和數量過多，且北台灣地狹人稠及長期缺乏最終處置場所，以致清淤效果往往受限。為探討淤泥利用之可能，本文綜整石門水庫淤泥特性，實務訪談各類可利用產業，參考自來水、石材等經驗，依市場需求、規模、單價、原料性質等，綜合探討再利用方式之市場概況及關鍵課題。經由結果可知，在既有市場上，以水泥、紅磚及園藝等較有自償能力，北台灣合計年需土量約百萬噸；在待開發市場上，如輕質骨材、陶粒版、淤泥改質等，雖具自償能力，惟產銷市場規模並未明確。再者，產業使用淤泥為原料之前提，為含水量低、均質及雜質少等，相對上，新抽取淤泥可利用機械方式獲得低含水量泥餅，藉以加速脫水減量，提高效率及業界接受度；沉澱池淤泥水分、雜質不均且非脫水設備能直接處理，市場接受度普遍不高。整體而言，因可能提高成本及經營壓力，使用淤泥對業界仍缺乏足夠吸引力，若由政策面推動市場機制來增加其通路與產品價值，方能提昇廠商使用之機會。

關鍵詞：石門水庫、水庫淤泥、再利用。

Survey and Study on the Reuse Industries of Shihmen Reservoir Sludge

ABSTRACT

Due to serious landslides and soil erosion caused by heavy rainfall in Shihmen reservoir watershed, the reservoir storage and supply capacity had been decreased by sediments. Large amounts of dredged material from Shihmen reservoir are mostly high-moisture, fine-grained and cohesive sludge. It often occurs to face the lack of the available disposal sites in densely populated northern Taiwan. Consequently, investigating the possibility of beneficial reuse of dredged reservoir sediments is important. The purpose of this study is to practicably evaluate information about the market conditions and essential topics regarding the beneficial reuse of dredged material from Shihmen reservoir. We collected the characteristics of dredged material and analyzed the information, such as the market demand, unit price, and raw material nature and so on. According to the survey results, the industries such as cement, red brick and cultivate soil have the self-liquidation/self-sufficient ability in existing market, the total treatment capacity reaches approximately 1,000,000 tons/year in northern Taiwan. The industries such as lightweight aggregate, haydite product, and organo-modified reservoir sludge also have the self-sufficient ability in potential market, but marketing market size is not explicitly. Furthermore, the import conditions, which satisfied industrial use of sludge as raw material, are low-moisture, homogeneous, and low-impurity. The mechanical equipment can dewater new dredged material; it is helpful to improve efficiency and the industry's acceptance. Conversely, the quality of sludge in sedimentation ponds is non-homogeneous, and market acceptance is generally not high. Finally, if the policy can increase the product value of reservoir sludge, the market mechanism and opportunities for reuse industries may be enhanced.

Key Words: Shihmen Reservoir, Reservoir Sludge, Beneficial Reuse.

一、前言

目前水庫淤泥最終處置方式，實務多以填方材料為主，極少再利用為資源化產品。陳昶憲等人統計[1]，全台主要水庫平均年淤積量約 1,000 萬 m³ 以上，以及石門水庫因多次嚴重崩塌產生淤積，歷年累積清淤量已達約 1,200 萬 m³ 以上，雖經管理單位積極辦理清運，但受到地狹人稠、物性及處理成本影響，使得清淤工作長期存在缺乏最終去處之根本問題，以致效果受到諸多侷限，也阻礙後續浚淤作業。未來，因應氣候變遷加劇，水庫淤積將面臨更嚴峻考驗。

水庫淤積物為天然材料，市場分為有價土石料及淤泥等無價料，淤泥類處置問題，歷年來研究甚多，惟仍缺乏對實際產業的統整調查與瞭解，包含再利用方式之產業現況、市場規模、供需料限制或產製成本等。因此，本文以石門水庫淤泥為例，實務訪談各類可利用淤泥之產業，參考自來水、石材等產業經驗，依市場需求、規模、單價、原料性質等，綜合探討市場再利用之概況及關鍵課題，俾利產業對水庫淤泥能深入瞭解，並作為解決水庫淤泥最終去處之參考。

二、淤泥特性及產業調查評估流程

2.1 石門水庫淤泥特性

淤泥物理及化學特性是影響產業資源化利用之首要因素。在結合產業利用水庫淤泥作為原料時，除含水量外，產業大多考量化學組成成分、土壤重金屬及其製品之毒性特性溶出程序(Toxicity Characteristic Leaching Procedure, 簡稱 TCLP)溶出等含量多寡，後二者可參考環保署土壤污染管制標準、有害事業廢棄物認定標準，以及內政部綠建材設計技術規範認可(第一類環保標章、綠建材標章)等要求[2-3]。

參考中興工程等研究成果[4-5]，石門水庫沉澱池淤泥多屬低塑性粘土或粉土(CL、ML)，粘土約佔 50~60%，比重約 2.73，滲透係數約 10⁻⁷ cm/sec，pH 值約 6.8~7.6。水庫淤泥經沉澱池長時間自然曝曬後，含水量由約 200%降至 40~50%左右。主要礦物包含石英(Quartz)、綠泥石(Chlorite)及伊利石(Illite)。主要化學成分為 SiO₂、Al₂O₃ 及 Fe₂O₃，各約佔 60~69%、17~24% 及 6.1~8.5%，尚有微量 CaO、MgO、Na₂O、K₂O 等，有機物含量約 2~3% 左右。金屬成分以鐵與鋁含量較高，與一般表土相仿；且重金屬含量遠低於環保署土壤污染管制標準，導電度、化學需氧量等特性呈現穩定，未有受外來污染之跡象。上述成分用途分別說明如后[4-10]：

- (1) 培養土：石門水庫淤泥可適合植物生長，惟透水及營養源低，需摻配其他大量混合原料，並參考農委會「肥料種類品目與規格」之規範方可適用；
- (2) 紅磚：淤泥化學成分與其原料相似，符合磚瓦要求 SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ > 85%，可用於製磚；
- (3) 輕質骨材：產製需化學成分約在：SiO₂ < 68%、Al₂O₃ = 20%、Fe₂O₃ > 6%、助熔劑 > 12%，前者與後者之比值一般應控制在 3.5~10，石門水庫淤泥滿足黏土燒結中高溫可發泡膨脹的要素，並由產學界證實可用於產製輕質骨材；
- (4) 水泥：卜特蘭 I 型成分主要為 CaO、SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃，其比例約 64、21、6 及 3%。其中，水泥生

料以石灰石、粘土、矽砂、鐵渣、煤灰、高爐石等，可依水泥型別選擇不同組合。粘土佔生料約 8~15%，可由水庫淤泥提供。若產製低鹼度水泥，對黏土通常要求 Na₂O、K₂O 含量低於 3%；

- (5) 淤泥固化應用方面：中興工程曾利用石門水庫淤泥製作混凝土及消波塊(淤泥取代細骨材約佔混凝土總重 24%)，並試作管路攪拌式脫水機產製鬆散固化泥塊(淤泥佔總重約 92%)。上述試體經毒性特性溶出程序(TCLP)皆低於環保及綠建材標準，可知石門水庫淤泥可作為符合環保之原料；
- (6) 水庫新抽取淤泥之流動性高且較均質，含水量約可達 200% 左右，可利用機械脫水加速乾燥、減少容積及堆置用地；沉澱池淤泥採用長時間沉降曝曬，含水量、質地不均且非脫水設備能直接處理。二者物性不同，於再利用上仍需予以區分。

2.2 市場調查評估流程

參考 2.1 彙整淤泥特性可知，水庫淤泥經由不同中間處理，再製成磚瓦、水泥、輕質骨材、固化材料、填料等資源，歷年來研究成果已指引出多項應用之可能。惟技術面上雖可行，但受水庫淤泥數量龐大及物性影響，且被視為高水分之棄泥，實務上因產業特性、市場供需、使用規模及成本等情形不明確下，水庫淤泥再利用如何走出第一步，就面臨相當多考驗。為謀求水庫淤泥之最終去處，宜縮短理想與現實的差距，方能認知產業實際需求及關鍵問題。

因此，本研究衡量市場之實務性，首先參考與水庫淤泥特性類似的處理經驗，如自來水事業、石材產業等，再分別訪談目前曾辦理或能處理之產業，包含水泥、磚瓦、水泥製品、輕質骨材、園藝等，綜合探討再利用產業之市場需求、規模、單價、用料性質與含水率需求等概況。訪談過程中，並向產業界介紹本研究彙整之石門水庫淤泥特性，以及「經濟部水庫淤泥利用處理作業要點」[11]，讓產業界能認識水庫淤泥多元化利用之目標，藉以深入瞭解產業需求及其影響因素，綜合探討及分析評估，可助於水庫淤泥再利用之推動，調查評估架構如圖 1 所示。

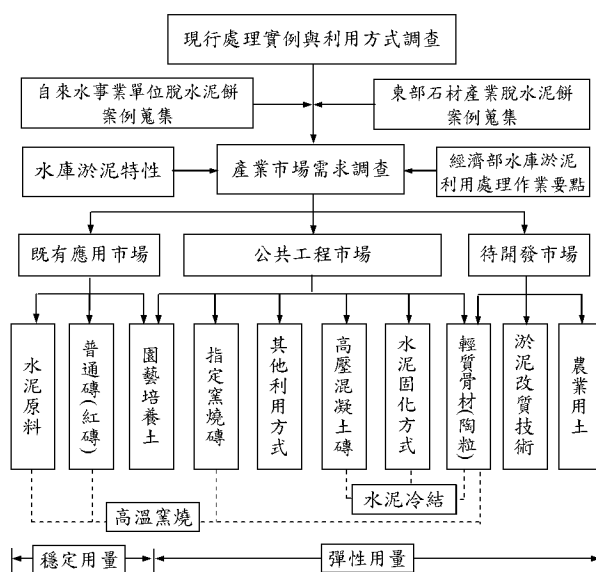


圖 1 水庫淤泥再利用產業調查評估架構

三、國內類似淤泥之應用實例

目前國內產生高含水量之泥漿土種類，包括自來水事業、石材、下水道、工業及營建工程等多種。其中，自來水事業及石材污泥之主要來源為天然地質材料，均具黏土多、水分多及顆粒細等特性，化學成分約與水庫淤泥類似，且均符合環保法規管制標準，如表 1 及表 2 所示。

表 1 水庫淤泥、自來水事業及石材污泥化學成分

| 化學成分 | 石門水庫淤泥[5] | 自來水[12] 平時污泥 | 花崗石污泥[13] | |
|--------------------------------|-----------|-----------------|-----------|-------|
| | | | 鋼砂拉鋸 | 圓盤鋸 |
| SiO ₂ | 62.17% | 52.75% | 63.9% | 71.3% |
| Al ₂ O ₃ | 18.03% | 20.15% | 12.3% | 13.1% |
| Fe ₂ O ₃ | 6.88% | 6.75% | 7.7% | 2.6% |
| CaO | 0.87% | 3.69% | 6.9% | 1.6% |
| MgO | 2.07% | 1.86% | 3.4% | 3.2% |
| K ₂ O | 2.28% | 3.69% | 4.0% | 4.7% |
| Na ₂ O | 1.15% | 0.87% | 2.7% | 3.4% |

表 2 水庫淤泥、自來水事業及石材污泥 TCLP 含量

| 溶出 (mg/L) | 環保法規 [2] | 自來水平時污泥餅 [12] | 花崗石污泥 [13] | 石門水庫淤泥 [14] |
|--------------|-------------|------------------|---------------|----------------|
| 總銅 | 15 | 0.03 | 0.003 | 0.03 |
| 總鎳 | 0.5 | N.D. | 0.019 | N.D. |
| 總鉛 | 5 | 0.029 | 0.267 | 0.07 |
| 總鉻 | 10 | 0.01 | 0.056 | N.D. |
| 總鋅 | 5 | 0.135 | 0.034 | 1.15 |

註：N.D.：Not Detected (未檢出)，低於量測極限值。

3.1 自來水事業單位產出的污泥餅

民國 96 年 6 月 6 日中央社報導[15]：「在污泥尚未製成污泥餅前，每公噸的處理費用約需 2,000 元，但污泥餅的處理費用大幅降為 500 至 700 元，大大節省台水公司的支出。如果以每年產出 14 萬公噸污泥餅推算，節省的處理費用將可超過 1 億元...。」

可知自來水事業利用脫水減量，可降低成本及加速清運以提昇效率。民國 92 年起陸續委託合作廠商清運及再利用處理後順利將污泥脫水清運，同時解決最終去處問題。目前，全台自來水事業脫水泥餅的年產量約 15~20 萬噸。依據歷年自來水事業網站公布得標資料，參與合作之產業多為水泥、磚窯及園藝等，在市場機制與利潤吸引下，讓民間產業習於利用後，處理成本有逐年降價之趨勢，目前市場多能接受此類泥餅資源化模式。由於各地市場性及運送距離，每公噸泥餅清運處理費約為 500~1,000 元，其脫水後之泥餅含水率約 50% 左右。

3.2 東部石材廠產出的污泥餅

郭志成指出[13]，台灣石材廠可多達約 280 家，切割加工產生的石材泥漿曾達年產百萬噸。為解決石材污泥問題，民國 83~85 年間經濟部工業局補助財團法人石材中心，利用石材污泥添加水泥及爐石固化後，實際試作於花蓮化仁海堤(目前仍極為完整)、學校籃球場及停車場，以及人工魚礁、消波塊等。

由於上述試辦經費及去化量有限，民國 89 年起，經濟部及花蓮縣政府協助下，由 81 家石材業與清運業聯合籌組「花蓮區石材資源化處理股份有限公司」，具備分類及再利用共同處理中心之功能及平台機制，如圖 2 所示。其處理模式為先由各廠自設脫水設備製成泥餅及分類後，再分別送至該公司作泥餅碎

料分離、曝曬等，最終送至台泥花蓮廠、道路填料等再利用，並研發新產品，如纖維水泥板、水泥製磚等。目前花蓮石材業泥餅主要送至台泥花蓮廠作為水泥原料及回填料，每年處理量約在 30 萬噸左右。自來水事業及東部石材處理方式之比較，如表 3 所示。

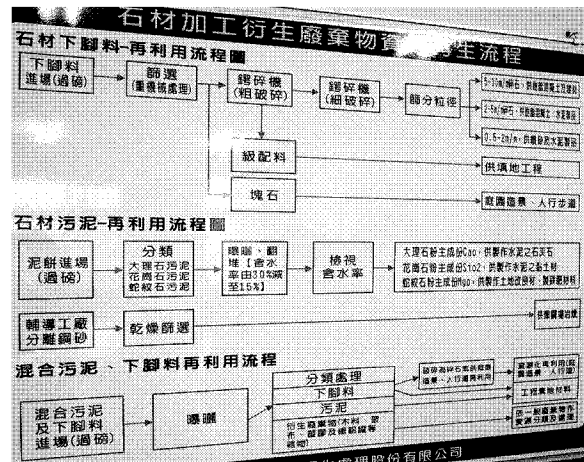


圖 2 石材資源化處理公司分類及再利用處理方式

表 3 自來水事業及東部石材處理方式之比較

| 項目 | 自來水事業單位污泥 | 東部石材污泥 |
|----------|--------------------------------|--------------------------|
| 早期可能處理方式 | 直接清運回填，費用昂貴 | 固化實作於海堤、人工魚礁、籃球場及停車場 |
| 處理現況 | | |
| 中間處理 | 各場自設脫水設備 | 石材廠自設脫水設備 |
| 年產量 | 約 20 萬噸 | 約 30 萬噸 |
| 脫水泥餅 | 含水率約 40% | 含水率約 30% 再翻曬至 15% |
| 處理方式 | 公開招標委託民間清運及再利用 | 聯合籌組「花蓮區石材資源化處理股份有限公司」辦理 |
| 處理成本 | 500 至 1,000 元/噸 | 資源化公司自負盈虧 |
| 用途 | 水泥、磚窯及園藝 | 水泥、道路填料等 |
| 備註 | 1. 計價單位採用每噸，採用含水率。2. 清運前需場地堆置。 | |

四、產業概況、需求調查及關鍵課題

4.1 水泥產業

4.1.1 調查成果概要

根據台灣區水泥工業同業公會傳真資料，民國 95 年水泥總產量約 2,000 萬噸，其中，台灣水泥公司產量約 1,000 萬噸/年，亞洲水泥約 500 萬噸/年。經本研究電話訪談台泥、亞泥、欣欣、信大、幸福等各廠後，得知曾利用泥餅及可長期與試用水庫淤泥者為台灣水泥公司，再訪談該公司後，其運作概況為：

- (1) 產製水泥原料包括石灰石 >80%、黏土 5~10%、砂砂等。此外，粘土含水率要求約 <30%；
- (2) 水泥生料(原料)約為熟料(水泥)的 1.5~1.6 倍，若年產 1,000 萬噸，估算每年約需 1,500~1,600 萬噸原料(乾基)，概估黏土質生料(乾基，低砂材料)約使用 75~160 萬噸。若以脫水泥餅(溼基，含水率約 30%)取代，則每年可使用約 100 萬噸以上；
- (3) 目前台泥蘇澳廠泥土來源，主要有自來水事業脫水泥餅(約 1.1 萬噸)及營建剩餘土方等，每年採用約 36 萬噸。若以蘇澳廠年產量 240 萬噸概估，則其可用土方最多約達 30~50 萬噸。

4.1.2 水泥產業應用之關鍵課題

- (1) 再利用模式及市場接受度：水庫淤泥作為水泥原料，具大量且直接成為資源之特性，在國家標準及品管上，可減少多次加工或堆置污染之疑慮。既有產業具成熟技術與規模，受市場波動相對不高，可供較穩定之應用面向。
- (2) 化學成分：台泥研究室曾對石門水庫沉澱池採樣分析，並經本次訪談提供的沉澱池淤泥樣品再作成份分析後，認為符合使用。
- (3) 用料要求：水泥生料係以輸送帶自動化配料，需於較低含水率下運作，要求淤泥脫水後含水率控制 20~30% 以下 (12~20% 更佳)。此外，含水率過高將提高燃料成本。
- (4) 成本考量：除含水率問題外，石門水庫位於桃園縣，運送成本為產業主要考量，依台泥蘇澳廠之初步評估，認為若可符合成本及穩定供應，該公司可參與長期合作方式。

4.2 傳統磚瓦窯業

4.2.1 調查成果概要

依「營建剩餘土石方資訊服務中心」網站查詢結果[16]，民國 91~97 年各縣市工程出土往各類合法場所統計，北部約 157 萬 m³，桃園縣磚瓦窯場約佔 4%。訪談台灣省磚瓦公會楊丁山顧問指出：「每年黏土最大用量約為 100 萬 m³ 左右，1m³ 土約製作 400~450 塊磚，適用含水率範圍為 10~15%，原料內黏土所佔比例為 75~85%」；在原料取得方面，「北桃地區磚窯廠用地均位於山坡地，因受堆置與最大日處理能力之限制，業者寧可選擇其他替代方案，在目前土方文化下，北桃地區磚窯廠無缺土疑慮。」再參考「營建剩餘土石方資訊服務中心」資料，民國 95 年北部可供窯業用土約 950 萬 m³，遠大於窯業需土。

同時，民國 96 年 12 月經濟部「台灣北部及東部花蓮縣窯業用土資源調查規劃」成果指出[17]，北桃地區年需土量約 120 萬 m³，營運中 7 家磚窯廠分布於台北縣鶯歌及桃園縣龜山等，如圖 3 所示，其中俊行記為全台最大廠(約佔總量 10%)。北桃磚窯廠視土方品質向土方業者收取 20-100 元不等處理費，含雜質或水分高者不予收容。該調查指出，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，因此，本研究電話訪談此二家實業後，僅俊行記實業可收受水庫淤泥，並具處理能力。

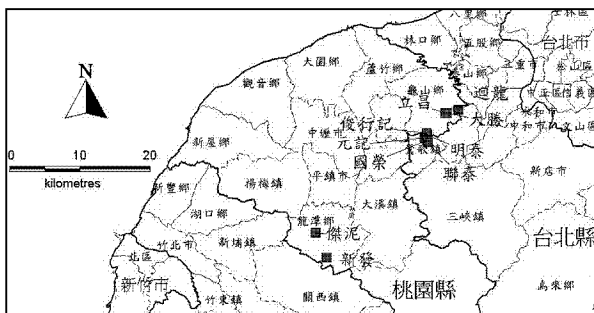


圖 3 北桃地區磚窯廠分布[15]

另外，為瞭解非紅磚類窯業者及需求，分別訪談桃園新發窯業及苗栗全盛興資源科技公司，屬於指定窯燒製品，常用材料為黏土、淤泥，利用約 1,000 度窯燒固結產製植草磚、隔熱磚、地磚、壁磚、透水磚、人行道磚及粒料等，如圖 4 所示。新發窯業表示，目

前每年水庫淤泥可用量約 1 萬噸，含水率希望在 20~30%。初估最大處理量可達 20 萬噸/年，惟若產量多且單價較高，民間市場無法消化，需採用「取之於公共工程，用之於公共工程」之策略；在全盛興公司方面表示，可利用水庫淤泥為生產各種粒料(比重約 1.6)，若採用水庫淤泥燒結粒料後，再以高壓加工製作透水磚之成本較高，宜採直接澆置透水鋪面較為可行。

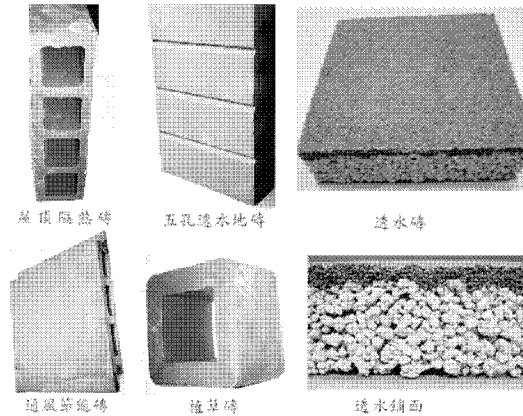


圖 4 可指定以水庫淤泥產製之磚瓦製品

4.2.2 磚瓦窯業應用之關鍵課題

- (1) 再利用模式及市場接受度：在北部土方來源充裕情形下，北桃磚窯業用料時方收受土方，一方面減少堆置、砂石車及環保問題，一方面可收取處理費用。因目前市場已習於此種模式，除有更佳利基方能導入利用水庫淤泥。
- (2) 化學成分：經濟部資料指出[17]，已有部分業者曾採用水庫淤泥，惟使用淤泥產製紅磚時，仍需添加其他土質混合，淤泥成分約佔 75~85%，可知石門水庫淤泥符合製磚。
- (3) 用料要求：因位經山坡地及聚落密集區，在清運、堆置及窯燒成本上含水率不宜過高，一般要求較佳含水率約 10~15%。再者，考量燒失量及避免裂隙，要求有機質 < 5%，以及不含樹枝、礫石、添加快乾劑等。
- (4) 成本考量：北桃磚窯產業因成本考量，可能較屬淤泥脫水後先堆置再由清運業者提供磚窯業利用，或由水利單位委託代工製造模式。在實務上，可利用委託代工方式，由政府出資民間製造，成品用於公共工程，合作解決水庫淤泥問題。

4.3 園藝農業

4.3.1 調查成果概要

根據康世芳指出[18]，日本於 1996 年污泥餅再利用率達 35%，且農業(園藝、客土)與建材(水泥、骨材)各約佔 50%；日本厚生勞動省並於 2000 年發行「淨水污泥減量及再利用手冊」。參考日本大阪市水道局網站(<http://www.city.osaka.jp/suido/>)，目前大阪市淨水污泥餅之園藝用產品「澱之土」係委託財團法人大阪市水道事業服務協會產銷，並推動產品認定制度。由於國情與土地利用特性不同，為瞭解國內市場實際情形，本研究分別電訪洽詢農委會農糧署農業資材組、桃園區農業改良場、農友種苗公司，以及自來水事業、國芳園藝社、水綠仙公司，此類產業應用之概況，

分述如下：

- (1) 農政單位表示，農業或園藝培養土針對水庫淤泥並無特別法規規定，惟需考慮排水、保水、通氣與保肥等特性，並依農作、植物種類來選定。由於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，質地太黏也不適合直接作為栽培介質。農友種苗公司表示，目前培養土採用水庫淤泥之需求並不高，水庫淤泥比重大，較不符培養土需要之輕搬運。若作成陶粒，則加工成本高，其替代品很多，如蘭花栽培可用碎磚塊、木屑等材料。
- (2) 園藝應用之經驗：根據自來水事業網站資料，園藝業曾利用其脫水泥餅，本研究分別電訪曾得標之國芳與水綠仙公司。部分業者表示，其產品為培養土、土壤改良劑、天然基底沃土等，每年泥土用量約 1.2 萬噸，係採用碳化稻殼、堆肥、椰纖、椰土等拌合，黏土約佔 30%。若利用水庫淤泥之脫水泥餅，初估成本約提高 20%，但因距離、運量、成本及非穩定取得，且底價低將影響採用。

4.3.2 園藝農業應用之關鍵課題

- (1) 再利用模式及市場接受度：培養土加工成本、門檻並不高，日本因政府政策上大力推動，及民間接受度較高，用於培養土之可行性較高。但國內農業園藝在水庫淤泥之利用上，較缺乏農業資源上之協助，此類產業利用仍有一段距離。
- (2) 化學成分：園藝農業之首要在於土壤肥力，水庫淤泥之土壤重金屬含量雖低於土壤污染管制標準，但有機質含量少、重量重，粘粒多使得排水及透氣性不佳，仍需大量混合其他原料。
- (3) 用料要求：此類產業因其加工方式對於含水量不若其他產業嚴格，主要考量可清運條件，因此，含水量可約 50% 左右。惟對雜質含量上，要求不添加化學藥物及卵礫石等雜質。
- (4) 成本考量：目前培養土業者並不多見，較無應用統計數據可查，其市場不明確且缺乏水庫淤泥之利用經驗。再者，栽培介質使用材料種類多，市場供應相對便宜材料。在公園造景、綠地植栽及客土，並未有優先採用水庫淤泥之措施，若屬公共工程用土，在實際上可能無法讓民間業者獲得水庫淤泥利用之獎勵措施。

4.4 水泥固化產業

4.4.1 調查成果概要

水庫淤泥在土木水利及建材等產業利用上，可藉由水泥、化學摻料等(統稱固化劑)固化方式來加以利用。此類製品種類多，通常可針對公共工程需要，產製所需規格。較常採用或可採用之類別分述如下：

- (1) 混凝土人行步道(高壓混凝土磚或透水鋪面)：生產坦克磚之民峰企業訪談表示，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。此外，在透水鋪面利用方面，目前人行道多採用不透水鋪面，雨水無法滲入地

表，增加排水設施負擔，為改善積水及暖化、涵養地下水等，透水鋪面已成市場採用之趨勢。經訪談全盛興公司及久工實業測試成果，透水性預拌混凝土鋪面係先將水庫淤泥約以 950℃ 燒結成粒料，佔整體用料約 65~75%，搭配一般預拌設備可直接於現場大面積施作。惟用淤泥取代砂石作為人行步道，需經水泥膠結或燒結粒料等固化技術，不含擴充新生產線及原料補助，業者概估初期成本提高約 30%，目前評估之成本尚無法與市售相比。

- (2) 纖維水泥板：陳清齊指出[18]，此產品以矽砂(SiO₂)為材料(約佔總量 50%)，估算氧化矽粉體年用量達 15 萬噸，並以花崗石污泥取代矽砂之性能均能符合要求。國內針對再生纖維水泥板制定 CNS 14890 規範，屬於耐燃一級的防火建材。原有材料由水泥、矽砂、纖維及添加劑，經過抄造成型、高溫高壓蒸氣養生而成，常用於輕隔間牆，並可填充輕質骨材砂漿。惟訪談曾協助工研院及石材業研發的大倡公司後瞭解，雖利用上技術可行，但在實務上並無廠商使用，最大原因在於儲料及配料係採乾粉。惠普公司指出，此類氧化矽結晶體多從國外而來，成本較高(約每噸 3~4 千元)，水庫泥餅並非不能用，但可能需新建生產線，再者，國內輕質骨材業者如能生產輕質填充料，這樣利用市場方能擴大。
- (3) 其他水泥固化方式：利用水泥、卜作嵐材料或固化劑等水化反應，以淤泥取代細骨材，拌合水、砂石等特定配比而成，其成本隨所需強度性能及添加固化劑而不同，分別能滿足非建築主結構物之需求。惟目前民間較無此類市場實際需求及規模，大都需政府委託製造。淤泥可應用方向包含淤泥混凝土(消波塊、人工魚礁等)、控制性低強度材料(CLSM)、固化土(含預拌土壤材料 RMSM)、海堤填築、冷結粒料等再利用方式。上述再利用方式之需求、單位用量及單價方面，本文彙整如表 4 所示。

表 4 淤泥混凝土、CLSM 及固化土之利用比較

| 項目 | 用料需求 | 淤泥用量 | 單價(不含施工) | 一般市價 |
|-------|----------------------------------|--|--|--|
| 淤泥混凝土 | 淤泥中粗石尺寸應小於 2cm，有機質含量應小於規範要求之 5% | 175-245kgf/cm ² 設計強度之單位體積淤泥用量約 430-450 kg/m ³ (乾重) | 175-245kgf/cm ² 設計強度之淤泥混凝土單價為 1,700 元/m ³ ，附加劑依廠牌不同。 | 175-245kgf/cm ² 設計強度之一般混凝土單價 2,000 ~ 2,300 元/m ³ |
| CLSM | 淤泥中粗石尺寸應小於 2cm，有機質含量應小於規範要求之 10% | 單位體積淤泥使用量概估約 500kg(乾重)之 CLSM 初凝時間約為 8hr | 依初凝時間與材料不同，單價約 1,000 ~ 1,500 元/m ³ ，初凝時間越短，淤泥用量越低，藥劑用量越高 | 依初凝時間之需求與使用材料不同，CLSM 單價約 1000 ~ 2500 元/m ³ |
| 固化土 | 依淤泥性質選擇固化劑種類，一般對淤泥性質無嚴格要求 | 得完全使用淤泥配合固化劑泥拌後形成固化土 | 單價依廠牌不同，固化劑約 2-300 元/kg 不等，破碎後取代填方粒料，具有回填土、級配料價值 30-600 元/m ³ | 一般級配骨材 600-900 元/m ³ |

在淤泥混凝土方面，經訪談龍形企業及麗普化工之評估，可知淤泥混凝土約可節省 75~85% 的細砂費用，淤泥約佔總重 20~25%，若不含增修預拌設備、前處理費(如抽泥、攪拌等)等，單價與一般混凝土相似，當市場骨材上漲時，其成效則會隨之提高。惟使用粘土質淤泥無法符合現行混凝土技術規範，初期宜設立專用之規範，優先用於水利設施。在控制性低強

度材料(CLSM)方面,經訪談立順興資源科技公司及明氏公司,水庫淤泥可佔 CLSM 細骨材的 100%,約佔總重 27%。配比材料包括水泥、爐石、粗細骨材、水及 MC 減水早強劑,單價可與一般 CLSM 相似。

4.4.2 水泥固化產業應用之關鍵課題

- (1)再利用率及市場接受度:此類產品在技術上大多能開發利用,既有市場上有類似之營運模式。但再生材料種類多,民間市場上並非必需採用水庫淤泥作為替代材料,若無政府協助或公共工程採用,產業及民間市場之接受度相對偏低。
- (2)化學成分:淤泥用於水泥固化產業,主要取代逐漸昂貴的砂石原料。由於淤泥成分來自天然礦物,含有大量矽砂(SiO_2)成分,經利用水泥等固化劑後可固結,惟淤泥顆粒細、化學成分間鍵結較差,不若原始砂石強度,影響固化後之利用範圍。
- (3)用料要求:含水率要求範圍較大,需考慮用途及固化方式。其中水泥纖維版要求為乾燥土粉,如需先清運至製造地點,含水率以 20~30%較佳,但若在沉澱池現地固化則無此要求。在雜質限制性也不同,若要加工為磚、版等水泥製品,均以不含雜質為佳,而固化填料則要求少。
- (4)成本考量:與現有市場比較,使用水庫淤泥製品並不具有需求及特殊性,初期設備或改變製程之成本較高,在銷售或產業習性上仍相對弱勢。因此,政府協助或公共工程採用扮演重要角色,有助於未來市場供應鏈之形成。
- (5)政府支持度與認證標章:水庫淤泥並不屬於中央環保主管機關及目的事業主管機關依「資源回收再利用法」中可再利用、再生或環保材料[2],無「環保標章」等獎勵措施。部分業者反映標章規定,若採用水庫淤泥,可能對既有產品標章產生排擠之顧慮。在此情形下,因再生材料用量百分比之限制,間接影響水泥製品採用水庫淤泥。
- (6)國家標準與施工規範:現行國家標準或施工規範對於混凝土粒料之要求,根據 CNS 1240 規定,大多限制小於 200 號篩($75 \mu\text{m}$)的黏土含量必須小於 3~5%。使得淤泥混凝土不符合一般混凝土準則,所以無法在一般市場上推廣。因此,公共工程將在採用上,可能需另訂規範及辦法。

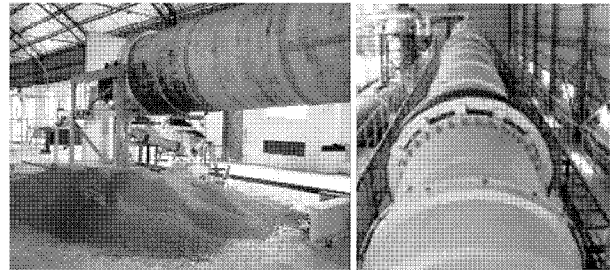
4.5 輕質骨材產業

4.5.1 調查成果概要

輕質骨材有冷結、燒結及天然等種類,為輕型構件之重要材料。經過學術及產業多年投入研究、開發與測試後,已可將水庫淤泥化為高價值之材料,中興大學團隊曾以此獲「台灣工業銀行 WeWin 創業大賽」第八屆冠軍。訪談輕質骨材協會王順元先生,目前市場採用輕質骨材及輕質隔間板代工之用量,每年約 20~50 萬 m^3 ,初估潛在市場每年約在 50 萬 m^3 以上。惟市面多數輕質骨材(陶粒)約有超過九成採用大陸生產,建材用市場之銷售單價約 2,000~3,000 元/ m^3 。

本研究現地訪談以水庫淤泥生產輕質陶粒的台南縣金碩實業公司,其銷售單價約 2,000 元/ m^3 ,如圖 5 所示,以及利用陶粒生產輕質隔間牆(陶粒板)的桃園縣金鼎防火建材公司。目前陶粒再製品市場有不同品牌名稱,如陶粒板、萊特板、威利牆、特耐牆、陶粒

磚、中空陶粒牆板等。其中,以輕質隔間之應用最為廣泛與純熟,如台北 101 大樓、南科、中正機場一期、長庚醫院、台中榮總等。一般常用的 8cm 厚板陶粒板售價約 800~850 元,採用陶粒:水泥:砂用量體積比約 6:3:1(陶粒約佔 60%),並可產製各種規格及樣式。另座落於石門水庫 5 號沉澱池旁的三奕科技公司,多年研發石門水庫淤泥燒製輕質骨材,於 97 年 8 月間完成試車作業,如圖 5 所示。



金碩實業生產線 三奕科技生產線
圖 5 水庫淤泥輕質骨材實作生產線

4.5.2 輕質骨材產業應用之關鍵課題

- (1)再利用率及市場接受度:目前建築業使用輕質骨材逐漸廣泛,可用於廠房、高樓及輕質牆版,取代傳統磚牆及降低鋼骨成本,市場接受度頗高。此外,廠房需要較多場地堆放輕質骨材成品,期待水庫產出的泥餅能先設立臨時堆置區,再分批提供給所需產業利用。
- (2)化學成份:如 2.1 節所述石門水庫淤泥確可用於輕質骨材。
- (3)含水率及雜質:因造粒、高溫處理需要含水率約在 15~25%之間,高含水率將影響其燃料成本。另因考慮造粒及燒失量,需要有機物約在 1%以下,以及不含礫石或草樹等雜質。
- (4)成本考量:因製程技術性高,初期投資建置成本較高,再加上研發、燃料、堆置、處置等後續花費,若無法打開行銷通路及解決庫存,可能導致經營問題。目前民間生產線似仍處市場擴展與試車階段,自產自銷市場不明確,且投資產製者為數偏少。

4.6 其他待開發市場之產品

此類再利用將水庫淤泥改質為高附加價值的利用方式具有願景,惟潛在市場面及規模極待突破。公共工程如能帶頭利用,含有指標與鼓勵作用,不但能降低產業初期經營成本,也能帶動水庫淤泥新產品之研發。「水庫淤泥改質技術」是成功大學投入研究、開發與測試後之具體成果,獲得「台灣工業銀行 WeWin 創業大賽」第七屆亞軍,利用水泥砂漿添加少量改質水庫淤泥,試體內外具防水性能,足見水庫淤泥也能「點泥成金」。民國 97 年 11 月成功大學宣布成立第一家衍生公司「昶閣科技」,98 年量產「樂土 LOTOS」防水隔熱透氣系列產品(資料來源:<http://www.techome.com.tw>),第一年產量 240 公噸,年產值約 2 千多萬元。本研究訪談該公司郭文毅博士,指出用料需求與磚廠相同,淤泥佔總重約 95%,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。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,基本產製成本每噸約 5~6 萬多元,

經營經銷價每噸約 10~12 萬元(不含施作)，添加量為水泥用量的 10~20%，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，可提供潮濕的屋舍、地下廠房及隧道等更多防水選擇。

4.7 調查成果分類及彙整

經上述產業市場初步調查與評估結果，綜整產業概況如用料性質、需求量、廠商概估處理成本、關鍵課題摘要列表，詳如表 5 所示。若考量後續再利用之規模與處理量，再以「新抽取淤泥」及「沉澱池淤泥」特性及市場需求區分：既有市場屬於較需要「新抽取淤泥」脫水泥餅之「穩定處理量」；公共工程市場可使用「新抽取淤泥」及「沉澱池淤泥」之「彈性處理量」；及待開發市場較需要「新抽取淤泥」脫水泥餅之「彈性處理量」。再利用市場需求淤泥來源、應用市場等分類，如表 6 所示。

表 5 產業再利用市場概況、需求及關鍵課題

| 用途 | 淤泥含量% | 淤泥用料性質 | | 概估年處理能力(萬噸) | 廠商概估處理成本 | 關鍵課題 |
|------------|--------|--------|--------------|-------------|------------------------------------|--|
| | | 含水量% | 其他 | | | |
| 水泥 | 5-10 | 15-25 | 雜質低 | 約 30 | 約 300-500 元/噸，受燃料影響 | ①台泥願協助處理，惟距離影響清運成本 ②自來水泥餅單價高有排擠效應 |
| 普通紅磚 | 75-85 | 10-20 | 不含快乾劑、雜質 | 北桃約 100 | 約 400 元/噸(約 1.2-1.5 元/塊)受燃料影響 | ①多位於山坡地及北桃僅 2 家設土質場 ②除土充裕及自來水泥餅單價高有排擠效應 |
| 指定窯燒製品 | 50-100 | 25-40 | 不含樹枝雜質 | 依業主需要 | 受燃料價格影響 | ①成本高、需代工 ②WTO 市場壓力 |
| 園藝用土 | 30 | 40-100 | 無化學藥物 | 不明確 | 約 650-? 元/噸，受加工種類影響 | ①有機物少、排水及通氣不佳，需加工改良 ②自來水泥餅單價高有排擠效應 |
| 混凝土磚 | 20-30 | 25-40 | 不含雜質 | 依業主需要 | 約 1,800 元/噸(550 元/m ²) | ①淤泥非必須採用材料，且需更改製程 ②需公共工程指定 |
| 透水性鋪面 | 50-60 | 25-40 | — | 北桃約 25 | 約 800-900 元/噸 | ①淤泥需燒結成粒料 ②需公共工程指定 |
| 纖維水泥板 | 10 | 1 | 過 200 號篩 | 約 15 | 不確定 | ①目前儲料及配料需採乾粉狀原料 ②技術高，需開發 |
| 淤泥混凝土等水泥固化 | 20-25 | 0-100 | 參照規範 | 依業主需要 | 隨固化劑種類、用量變動(詳如表 4) | ①混凝土國家標準或規範，限制小於 200 號篩含量須小於 3-5% ②需大量堆置場所 ③缺乏銷售市場 |
| 燒結輕質骨材 | 100 | 15-30 | 有機物 <1%，不含雜質 | 初期約 5-10 | 約 250-300 元/噸，受燃料及種類影響 | ①市場不缺陶粒料源 ②設廠及初期成本高 ③目前僅 1-2 家業者，仍待輔導協助 |
| 防水材(淤泥改質) | 95 | 10-20 | 同紅磚 | 0.5 | 約 5,500 元/噸 | ①目前僅 1 家業者，仍待輔導協助 |

表 6 再利用市場需求淤泥來源、應用市場分類

| 市場分類 | 既有市場 | 公共工程及待開發 | 公共工程及待開發 |
|------|-------|---------------------------|------------------------|
| 用途 | 水泥、紅磚 | 輕質骨材、製磚、鋪面粒料、水泥固化製品、固化填料等 | 委託製磚、鋪面粒料、水泥固化製品、填充材料等 |
| 淤泥來源 | 新抽取淤泥 | 新抽取淤泥 | 沉澱池淤泥 |
| 中間處理 | 脫水泥餅 | 脫水泥餅 | 化學固化或排水處理 |
| 規模屬性 | 穩定處理量 | 彈性處理量 | 彈性處理量 |

五、影響產業利用之因素與綜合討論

本文綜合調查及訪談各類產業再利用傾向及其影響因素等，主要可歸納臚列如下。

5.1 料源供需及估算單位方面

- (1)影響各類產業再利用之最大因素，為水庫淤泥之含水率及雜質含量，係考量清運、處理、堆置、環保及窯燒或加工等技術與成本。另外，若添加化學藥劑或含有樹枝、礫石等，也影響產業利用。
- (2)沉澱池淤泥利用長時間自然沉降及曝曬，因水分與雜質不均，與產業用料要求仍有差距，民間市場接受度不高。
- (3)新抽取淤泥若採用脫水泥餅之中間處理，除能加速脫水、減少容積及提昇清運效率，且可能較符合多數產業之需要。
- (4)產業較常用重量計算，與「經濟部水庫淤泥利用處理作業要點」以體積不同。若以單位重約 1.75 噸/m³ 換算，處理 1m³ 約為 1 公噸的 1.75 倍。再者，建材領域常用含水率，土工土壤常用含水量。因此，未來在淤泥處理量，宜能事先訂定計算單位，提供產業參考或可避免混淆。

5.2 再利用規模與處理能力

根據初步調查評估結果，水庫淤泥利用市場，可概分為既有市場、公共工程市場及待開發市場等三大類，利用規模宜分為穩定處理量及彈性處理量。

- (1)既有市場上，以窯燒之水泥原料及建築用普通磚，以及園藝用土等較具自償能力。前二者處理量較大且穩定，分別可達每年數十萬噸級以上。但北桃地區傳統磚窯的特性，對清運、堆置水庫淤泥之需求相對不高。作為水泥原料，可收容的處理量較高，惟需考慮運距是否合乎成本，也會與北市脫水泥餅產生比價效應。在農業園藝方面，其市場規模較不明確，且此方面研究並不多見，初估每年用量約在萬噸左右。
- (2)公共工程市場上，以委託製磚、水泥固化製品或填充材料較明確。人行步道、植草磚、水泥固化製品等技術雖可行，但需公共工程委託代工，並需有適當最終堆置場所。再者，若可應用於海岸防護之水利工程，則有相輔相成之效用，而此類市場屬於公共工程用量規模屬於彈性處理量。
- (3)待開發市場方面，如利用於輕質骨材(陶粒)或樂土 LOTOS 多效能防水粉等產品，雖具有自償能力，但因此部分市場仍待推展，利用規模較未明確，且目前民間經營製造業者極為有限，但可暫歸為彈性處理量，可視民間需求供應之。
- (4)石門水庫淤泥由於數量龐大、顆粒細及水分多，經本文訪談瞭解，再利用方式所能處理能力仍屬有限，且再利用產業存在市場經營壓力及不確定，考量清運交通條件，若要維持淤泥清運穩定性及持續性，宜尋求可能大量堆置場地或排淤方式，以降低淤泥最終去處之壓力。

5.3 輔導措施、認證制度與標準規範方面

- (1)參考自來水及石材污泥、工業廢料(爐石及飛灰)處理上，可見公共工程扮演重要角色，部分更納入國家標準規範或認證標章之指定材料。因此，輔導措

施仍有許多面向可再提升。

- (2) 產業評估未來市場願景、供需鏈及經營風險等存有不確定性，甚或無法評估，使產業保守躊躇。若欲推動產業再利用，宜以合理市場利潤鼓勵參與或委託代工，先降低其初期壓力，再擴展應用面，逐步排除市場疑慮及增加產業信心，方能在市場機制下降低淤泥處理成本，以達到「取之於公共工程，用之於公共工程」。
- (3) 因淤泥為慣用名稱，民間常與污泥、廢棄物混淆，使民間心存疑慮，徒增產業阻力。並限於環保署規定，水庫淤泥並不屬廢棄物或資源回收材料，以致環保署環保標章或內政部綠建材標章多未納入，其指定材料間接侷限水庫淤泥在建材之利用。未來或可推行水利專屬認證或法規，讓水庫淤泥產品優先得到水利單位採用，期有提昇民間信心之正面效果。
- (4) 現行國家標準或施工規範，大多已將石材廢料等再生資源納入考慮，而將泥土特別排除在外，未考慮水庫淤泥可添加固化劑固結後，具有可再利用空間。再者，除高壓混凝土磚及透水性混凝土磚未特別規定外，大多要求小於 200 號篩(75 μm)的黏土含量必須小於 3%或 5%。因此，黏土含量高達 50%左右之水庫淤泥，可能需要另訂淤泥混凝土施工規範、使用手冊等準則，再使其他公共工程有所遵循，以利市場應用面之發展。

六、結論

依本文市場調查結果，石門水庫淤泥可供水泥、磚瓦、陶粒或輕質骨材、牆板等建材產業之原料。單就市場規模考量，現有產業中以水泥、紅磚及園藝等具自償能力及處理經驗，北台灣年需土量約百萬噸以上；待開發市場如輕質骨材、陶粒版、淤泥改質等，雖具自償能力，惟自製內銷市場規模並未明確。

在技術性方面之考量，使用淤泥作為再利用原料，前提為淤泥必須具有含水量低、均質及雜質少等特性，方能解決業界使用之瓶頸。據此，庫區新抽取淤泥因流動性高且較均質，可利用機械方式獲得含水量低之泥餅，藉以加速脫水減量，提高效率及業界接受度；沉澱池淤泥則因含雜質、含水量變化大且具黏稠度，非脫水設備能直接處理，市場接受度普遍不高，可朝就地處置或提供公共工程填方之用。

從經濟性方面考量，使用淤泥作為原料將提高部分產業之生產成本，並對既有之營建土方市場產生排擠效應，除非能有相應政策配合提高產品之價格，否則對業界而言仍不具足夠之吸引力。因此，短期內以政府委託代製磚、水泥製品或填料供政府單位使用較為可行。長期方面，可藉由政策面之要求及配合市場機制來提高產品價值，以提高廠商使用之機會。

參考文獻

- [1] 陳昶憲、葉昭憲、蘇惠珍，「水庫清淤之檢討與評估」，逢甲大學，經濟部水利署 (2005)。
- [2] 環保法規查詢系統，<http://ivy3.epa.gov.tw/epalaw/index.aspx>，行政院環境保護署。
- [3] 「綠建材設計技術規範」，http://www.cpami.gov.tw/web/index.php?option=com_content&task=view&id=8511&Itemid=124，內政部營建署。

- [4] 中興工程顧問社，「水庫淤泥固化與棄置」，財團法人中興工程顧問社專案研究報告 (1999)。
- [5] 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」，經濟部水利署北區水資源局 (2007)。
- [6] 「肥料種類品目與規格」，http://www.afa.gov.tw/laws_index.asp，農糧法規，行政院農業委員會。
- [7] 葉軍柱，「水庫淤泥添加燃煤飛灰燒製建築用磚之研究」，國立成功大學資源工程學系研究所，台中 (1999)。
- [8] 陶維屏，中國工業礦物和岩石，地質出版社，北京 (1987)。
- [9] 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」，內政部建築研究所 (2003)。
- [10] 陳豪吉、顏聰、彭獻生、王順元，「以水庫淤泥燒製人造輕質骨材之產業化技術研究」，兩岸營建環境及永續經營研討會，台北，第 211-222 頁 (2003)。
- [11] 「經濟部水庫淤泥利用處理作業要點」，http://www.wra.gov.tw/sp.asp?xdURL=Rules/rules_con.asp&no=3&sec_no=57&comefrom=full，經濟部水利署 (2007)。
- [12] 「97 年公館場淤泥餅清運說明書」，公館場淤泥餅清運及再利用招標附件，臺北自來水事業處 (2008)。
- [13] 郭志成，「花崗石污泥固化再利用」，2003 年資源與環境學術研討會，花蓮 (2003)。
- [14] 彭元俊，「淤泥壓密固結處理之研究」，逢甲大學土木及水工工程研究所，台中 (2004)。
- [15] 中央社，「台水公司將污泥製成污泥餅 年省處理費逾億」，<http://e-info.org.tw/taxonomy/term/7184>，台灣環境資訊協會-環境資訊中心 (2007)。
- [16] 營建剩餘土石方資訊服務中心，<http://spoil.eri.itri.org.tw/>，內政部營建署。
- [17] 經濟部，台灣北部及東部花蓮縣窯業用土資源調查規劃，經濟部 (2007)。
- [18] 康世芳，「淨水污泥餅再利用技術調查及應用於台北自來水事業處淨水場可行性評估」，台北自來水事業處委託研究計畫研究報告書，台北自來水事業處 (2001)。
- [19] 大阪水道局，<http://www.city.osaka.jp/suido/>。
- [20] 陳清齊，「再資源化水泥纖維板之研究」，國立台北科技大學材料及資源工程研究所，台北 (2003)。