

水庫淤泥固化製成混凝土塊之可行性評估

鍾明劍¹ 高憲彰² 邱顯晉¹ 許秀真³ 王 瑋⁴

- 1.中興工程顧問社大地工程研究中心研究員
- 2.中興工程顧問社大地工程研究中心副理
- 3.經濟部水利署北區水資源局計畫課副工程司
- 4.經濟部水利署北區水資源局經營課課長

摘 要

本研究以石門水庫淤泥為例，探討水庫淤泥固化製成混凝土塊的可行性，研究內容有(1)室內前導試驗：包含配比規劃、試體製作、抗壓試驗、浸水性試驗、抗沖刷性試驗以及溶出試驗等；(2)大型試體製作：實際以水庫淤泥製成混凝土塊及異形塊成品；(3)可行性評估：包含成本分析及建議配比等。研究成果證實水庫淤泥確實可採固化方式應用於混凝土製品，此類混凝土製品之晚期強度較 28 天齡期之強度有所提升(平均強度提升約 7~22%)，且由溶出試驗驗證此類混凝土製品符合環保法規要求。以本研究成果為例，水庫淤泥已可取代 75~85%之細骨材，約佔總重之 20~24%，對水庫淤泥處理量亦可有相當的提升，建議初期可依水庫管理單位之需求量進行試辦，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。

關鍵字：水庫淤泥、多元化處置、可行性評估、混凝土製品。

Feasibility Study of Making Concrete Products from Shihmen Reservoir Sludge

ABSTRACT

The paper takes Shihmen reservoir sludge as an example to discuss the feasibility evaluation of making concrete product from reservoir sludge. In this paper, it contents (1) pilot tests: include proportion design, sample making, cylindrical concrete strength test, water immersion test, anti-erosion test, and toxic characteristic leaching procedure (TCLP); (2) concrete product making; (3) feasibility evaluation: include cost analysis and optimal proportion. The result shows that it's workability and economy to making concrete product from Shihmen reservoir sludge. Furthermore, the later compressive strength (42-day, 56-day, 180-day, and 365-day) is more than 28-day compressive strength about 7~22%. In addition, the result of the study shows that reservoir sludge can replace fine aggregates of concrete proportion about 75~85% (about 20~24% total weight of concrete product). In conclusion, it's a feasible way to reduce reservoir sediment by making concrete products from Shihmen reservoir sludge.

Key Words: Reservoir Sludge, Multi-Treatment, Feasibility Study, Concrete Product.

一、前言

蓄水庫為台灣重要水利設施，為提供灌溉、工業、家庭日常生活等用水之主要來源，惟據經濟部水利署至民國 96 年底之統計資料顯示，全台 109 座水庫之有效容量為 209,738.1 萬立方公尺，較原設計總容量 280,581.4 萬立方公尺減少了 25.25%。有鑑於此，維護水庫蓄水容量至為重要，蓄水容量降低除影

響給水功能及水資源保育外，更將對社會安定、環境保育與經濟發展產生不利影響。然而台灣地區河川受到地形影響，河流多短且陡，暴雨時湍急水流沖擊脆弱地質，洪水挾帶大量泥砂與氾濫成災，再加上本島土地極為有限，常使淤積泥砂無處清運等因素，水庫淤積問題嚴重。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，確保水庫永續經營將為未來工作重點。

經濟部水利署北區水資源局長期以來均積極著手辦理水庫庫區與沉澱池之淤泥清運及循環利用等工作，根據「石門水庫淤泥多元化處置方案評估規劃」(中興工程顧問股份有限公司，2008)報告瞭解尋找高效益且可大量應用之多元化處置方案，有其實質必要性。其中將水庫淤泥進行資源再利用，為目前國內產官學一致認同的發展趨勢，也最符合永續經營的目的。根據以往專家學者的研究成果(財團法人中興工程顧問社，1999；蔡長泰、王文江，2000~2002；顏沛華等人，2002；顏聰、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、地工砂腸袋(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成功的事例，惟尚未見廣泛的全面推動。有鑑於此，本研究旨在探討透過固化程序將石門水庫淤泥應用於製作混凝土製品之可行性，此舉可廣泛應用於上述作為填方材料、建築骨材、人工魚礁、消波塊、護坡預鑄塊等資源再利用方式。

本研究係以功能性為導向，要求淤泥固化成品須達預期設計需求，且須符合環保法規要求。故先於室內進行一系列之前導試驗，包括配比規劃、試體製作、抗壓試驗、浸水性試驗、抗沖刷性試驗以及溶出試驗等，以瞭解混凝土製品是否可添加石門水庫淤泥。完成前導試驗後即於石門水庫第七號沉澱池進行水庫淤泥固化製成混凝土塊，驗證現地實作之可行性。茲分述各階段執行成果、成本分析與可行性評估如后。

二、室內前導試驗

所謂「固化」，美國環保署曾提出如下的定義：固化係指添加固化劑於廢棄物中，使其變為不可流動性，或形成固體的過程，而不論廢棄物與固化劑之間是否產生化學結合。Krofchak(1978)曾詳細描述固化技術：若將固態或液態廢棄物矽酸化，變成類似土壤或本身就是土壤的固體，不僅得以解決環境污染問

題，固化體更可以用於填土和掩埋。(郭志成，2003)

依據固化劑種類的不同，固化技術分成五大類，分別為水泥系固化法、石灰系固化法、熱塑性固化法、有機高分子固化法和匣限化技術(Pojasek，1979)。每種方法的優、缺點因過程、固化劑種類、廢棄物本身性質、所在位置的條件和其他因素不同而異(郭志成，2003)。因此，本研究將以功能性為導向，要求淤泥固化成品須達預期設計需求，且須符合環保法規要求。水庫淤泥再利用方式甚多(中興工程顧問股份有限公司，2008)，按應用層面區分為填方材料、建築材料、水工材料、地工材料、環工材料、以及農業材料等。其中，淤泥固化則可應用在製作護坡預鑄塊、消波塊、異形塊、人工魚礁等產品。

為瞭解混凝土製品是否可添加石門水庫淤泥，本研究先於室內進行前導試驗，其流程包括配比規劃、試體製作、抗壓試驗、浸水性試驗、抗沖刷性試驗以及溶出試驗等。其中，本試驗所用之淤泥均取自於第十二號沉澱池地表下約 1.5 m 處之淤泥。

2.1 配比規劃

本研究考量不同工程對強度設計要求有所差異，如常見之消波塊多要求抗壓強度應高於 175 kgf/cm²，而結構性混凝土塊或護坡預鑄混凝土塊對強度要求較高，因此，本研究規劃三種設計強度，包括 175 kgf/cm²、210 kgf/cm²、245 kgf/cm² 等。此外，為考量淤泥添加量之多寡是否會對強度有所影響，本研究分別對 175 kgf/cm²、210 kgf/cm²、245 kgf/cm² 等設計強度規劃 2 至 3 組配比，如表 1 所示，共計 8 種配比組合。由表 1 可知淤泥(含水率為 27%)取代細骨材的比例可達 75~85%，約佔總重之 19.2~23.9%。此外，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。於實際應用時可先將此類固化劑摻入於泥漿中攪拌，拌和過程中黏稠狀的泥漿逐漸轉變為流動狀的泥水。

表 1 水庫淤泥固化混凝土配比設計總表

編號	設計強度 (kgf/cm ²)	水膠比 (W/C)	砂石比 (%)	坍度 (cm)	最大粒徑 (mm)	水泥 (kg)	爐石 (kg)	細骨材(kg)		粗骨材(kg)		水 (kg)	附加劑 (kg)	單位重 (kg/m ³)	固化劑 (淤泥 2%)	淤泥比 用量/總重 (%)
								粗砂 (比例%)	淤泥 (比例%)	粗石	細石					
175-1	175	0.63	39.2	12	25	171	209	96 (15%)	541 (85%)	552	452	232.0	7.6	2261	10.82	23.9
175-2	175	0.63	39.2	12	25	171	209	127 (20%)	510 (80%)	552	452	232.0	7.6	2261	10.20	22.6
175-3	175	0.63	39.2	12	25	171	209	159 (25%)	478 (75%)	552	452	232.0	7.6	2261	9.56	21.1
210-1	210	0.58	38.2	12	25	187	228	91 (15%)	518 (85%)	501	500	231.7	8.3	2265	10.36	22.9
210-2	210	0.58	38.2	12	25	187	228	122 (20%)	487 (80%)	501	500	231.7	8.3	2265	9.74	21.5
210-3	210	0.58	38.2	12	25	187	228	152 (25%)	457 (75%)	501	500	231.7	8.3	2265	9.14	20.2
245-1	245	0.53	37.2	12	25	203	248	87 (15%)	495 (85%)	499	498	231.0	9.0	2270	9.90	21.8
245-2	245	0.53	37.2	12	25	203	248	146 (25%)	436 (75%)	499	498	231.0	9.0	2270	8.72	19.2

註：水膠比定義：水佔膠結材的重量百分率；砂石比定義：砂佔全粒料的重量百分率。

2.2 試體製作流程

本試驗所用之淤泥均取自於第十二號沉澱池地表下約 1.5 m 處之淤泥，取回淤泥樣後即於協力廠商處，於本研究工作人員陪同下進行試拌製作混凝土圓柱試體，試驗的圓柱試體規格為直徑 12 cm、高度 24 cm。試體製作流程說明如后。

2.2.1 配比設計與料源準備

本研究配比設計，如表 1 所示，每種配比預計製作 12 顆試體，約需 0.04 m³ 的預拌混凝土量。因此，料源準備時，即將表 1 內各料源重量乘上 0.04 倍即為此次試拌所需之重量。

2.2.2 淤泥還原攪拌

由於表 1 配比中的淤泥含量係指含水率為 27% 的重量，因此，於準備各項材料時，需將取得淤泥攪拌均勻，如照片 1(a) 所示，並調整其含水率達 27%，方能混合攪拌所有進料。

2.2.3 淤泥內添加固化劑與附加劑

淤泥於還原攪拌完成後，隨即倒入預備之容器內，即可添加預備的固化劑與附加劑，隨即再次進行攪拌，如照片 1(b) 所示。

2.2.4 混合試拌

完成上述程序後，隨即將所有料源倒入拌合機內進行拌合，如照片 1(c) 所示。完成拌合之混凝土狀態，如照片 1(d) 所示。

2.2.5 圓柱試體成型

完成拌合之混凝土即逐一倒入預鑄模具內，經搗實、抹平後即完成圓柱試體，如照片 1(e) 所示。本次試驗共計 8 種配比，各配比均製作 12 顆混凝土圓柱試體，共計 96 顆混凝土圓柱試體，完成照片如照片 1(f) 所示。

2.2.6 養護

澆置完所有混凝土圓柱試體後，待其靜置一天具備基本強度後，即移至養護池內進行養護。



(a) 淤泥還原攪拌



(b) 淤泥內添加固化劑與附加劑



(c) 拌合機攪拌



(d) 拌合完成之混凝土狀態



(e) 混凝土圓柱試體製作



(f) 混凝土圓柱試體全數完成

照片 1 室內前導試驗-淤泥固化圓柱試體製作照片

2.3 試驗成果

本研究以功能性為導向，要求淤泥固化混凝土須達預期設計需求，且須符合環保法規要求。因此，本研究透過製作混凝土試體進行抗壓試驗，以驗證其是否符合強度要求，再從中選定固化劑含量最高之配比進行溶出試驗，以檢驗其是否符合環保法規要求。此外，為瞭解固化製品應用於水工材料時可能面臨浸水及沖刷考驗，並增做浸水性試驗及抗沖刷性試驗以供參考。茲概述各項試驗成果如后。

2.3.1 抗壓試驗

抗壓試驗的目的在於檢測固化混凝土試體之抗壓強度，以判斷經固化後的混凝土試體是否滿足設計強度要求。本研究採用三種設計強度(包含 175 kgf/cm²、210 kgf/cm²、245 kgf/cm²)實作混凝土試體(共計八種配比)，並進行各種配比於不同齡期(3 天、7 天、14 天、21 天、28 天、42 天、56 天、180 天與 365 天等九種齡期)的抗壓試驗，試驗成果彙整如表 2 所示。不同設計強度下混凝土強度隨齡期之發展行為，分別如圖 1~圖 3 所示。

由 28 天齡期的抗壓強度來看，各配比之固化混凝土強度均已超過設計強度，證明各配比均高於設計配比要求。由此可知只要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，水庫淤泥同樣可以作為混凝土之填充材，並達設計強度需求。此外，各配比的晚期強度(齡期為 42 天、56 天、180 天、365 天)會隨齡期越長越趨穩定，且晚期強度確實較 28 天齡期之強度有所提升，平均而言約有 7~22% 不等之提升。

表 2 淤泥固化混凝土試體抗壓強度

編號	齡期(天) (kgf/cm ²)								
	3	7	14	21	28	42	56	180	365
175-1	71	121	191	219	236	237	251	267	278
175-2	60	138	174	188	220	228	218	218	276
175-3	66	128	170	206	229	238	238	259	273
210-1	81	170	175	225	241	269	278	277	296
210-2	75	151	188	229	229	258	277	242	305
210-3	76	152	184	229	271	284	287	324	291
245-1	92	185	243	242	247	276	276	307	325
245-2	92	160	210	250	263	285	285	341	312

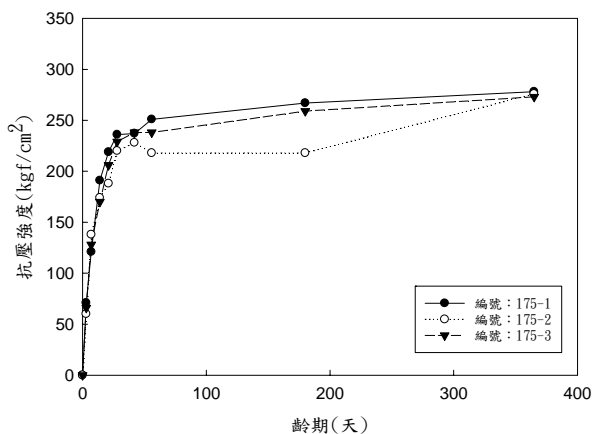


圖 1 設計強度 175 kgf/cm² 下強度隨齡期發展行為

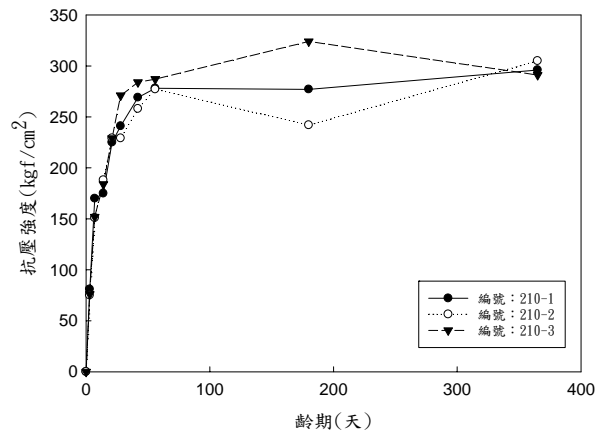


圖 2 設計強度 210 kgf/cm² 下強度隨齡期發展行為

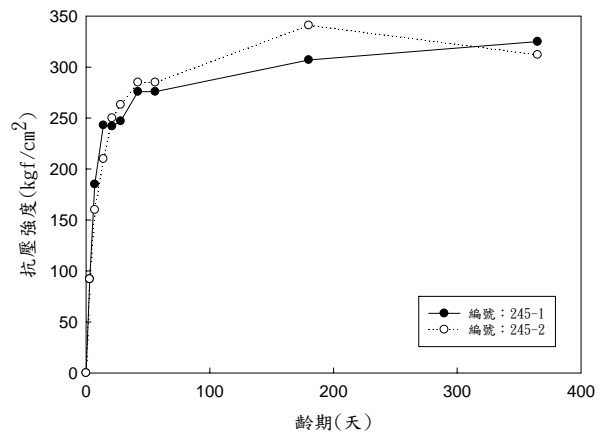


圖 3 設計強度 245 kgf/cm² 下強度隨齡期發展行為

2.3.2 浸水性試驗

浸水試驗為將試體於養護 28 天後，以兩顆試體為一組，一顆採自然放置，另一顆則浸入水槽，經過至少 30 天的浸泡後進行表面觀察及強度檢驗，以確認試體硬化後其耐水浸泡性。本研究將各配比之試體置於水中 150 天及試驗室屋頂 150 天，以檢驗淤泥固化混凝土長期浸泡於水中及反覆承受日曬雨淋之可行性，而其試驗結果，如表 3 所示。

表 3 淤泥固化混凝土試體於不同環境下之測試結果

編號	28 天強度 (kgf/cm ²)	水中 150 天強度 (kgf/cm ²)	自然環境 150 天強度 (kgf/cm ²)	沖蝕量 (g)
175-1	236	260 (110%)	224 (95%)	<0.1
175-2	220	255 (116%)	203 (92%)	<0.1
175-3	229	263 (115%)	213 (93%)	<0.1
210-1	241	291 (121%)	263 (109%)	<0.1
210-2	229	302 (132%)	246 (107%)	<0.1
210-3	271	276 (102%)	279 (103%)	<0.1
245-1	247	319 (129%)	268 (109%)	<0.1
245-2	263	295 (112%)	284 (108%)	<0.1

註：1、水中 150 天及自然環境 150 天抗壓強度後方括弧內數字代表與 28 天抗壓強度之比例。
2、水中 150 天為將試體經 28 天正常養護後，再置於靜止之純水中養護 150 天始進行試驗。
3、自然環境 150 天為將試體經 28 天正常養護後，再置於試驗室屋頂經日曬雨淋 150 天始進行試驗。

就不同環境下混凝土強度之變化而言，比較水中 150 天與 28 天之抗壓強度可知，在 150 天之純水養護下其強度均較 28 天齡期高 2~32%，如表 3 及圖 4 所示，因此可知浸水環境對水庫淤泥固化混凝土具有養護之效果，尚無一般固化材於水中會產生溶出之疑慮。另從自然環境 150 天與 28 天之抗壓強度可知，淤泥固化混凝土經 150 天之太陽曝曬與雨淋之環境下，其試體之抗壓強度仍保持於 28 天齡期之 92~109%，幾無折減之情形發生，因此可知淤泥固化混凝土在自然環境下仍可具有一定之耐久性。

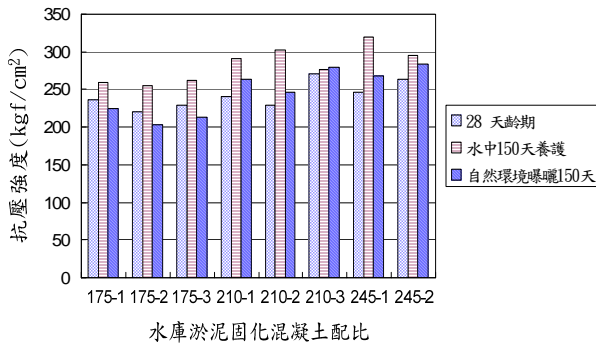


圖 4 淤泥固化混凝土試體於不同環境下之強度變化

但除抗壓強度外，觀察自然環境下 150 天之混凝土試體，其所有配比之試體外表皆已產生龜殼狀之裂紋，如照片 2 所示，由此可知，雖然於 150 天之自然曝曬雨淋下水庫淤泥固化混凝土之強度幾無折減，但混凝土外表產生之裂紋是否會因測試時間之延長而加深裂紋之深度，間接產生剝落及影響混凝土強度與耐久性之情事，則當於未來作更進一步之研究探討。



(a) 混凝土圓柱試體俯視照片



(b) 混凝土圓柱試體側視照片

照片 2 於自然環境下 150 天之試體外觀
(試體外表具龜殼狀之裂紋)

2.3.3 抗沖刷性試驗

固化後的材料應具有一定的抗沖刷性能，因此參考規範 NPDEN W. O. NO.87-C-329，將經水浸泡至少 30 天且中間預留有 3/16 in 孔洞之圓柱試體，以用流速為 4~5m/s、流量為 10 L/min 的流動水連續沖刷以測試抗沖刷性。本研究彙整各配比固化混凝土試體之抗沖刷性試驗成果，如表 3 所示。綜合表 3 可知在抗沖刷性部分，不論試體之設計配比如何，其固化混凝土試體在經過規範要求之水流沖蝕後，其殘留於#200 篩上之沖蝕量皆低於 0.1 g。因此透過此試驗結果可以確定，水庫淤泥透過固化程序後，雖然抗壓強度會隨取代之多寡而有所折減，但其固化後之混凝土試體仍具有相當好的抗沖蝕能力，故有利於水庫淤泥於水工材料之應用。

2.3.4 溶出試驗

針對第十二號沉澱池地表下約 1.5 m 淤泥製成之混凝土製品，挑選固化劑含量最高配比之混凝土試體(編號 175-1)，進行毒性特性溶出試驗(TCLP)，以測試摻和淤泥的混凝土試體是否符合環保法規要求，試驗結果顯示，該混凝土試體經此溶出試驗程序所萃出之重金屬銀、砷、鉍、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 4 所示，顯示此固化試驗製成的混凝土試體溶出物含量皆符合環保法規要求。

表 4 水庫淤泥固化混凝土試體溶出試驗成果

Sample Labels	銀	砷	鉍	鎘	鉻
TCLP 濃度(mg/L)	未檢出	未檢出	0.9067	0.0020	0.0033
法規標準(mg/L)	5	5	100	1	5
Sample Labels	銅	鉛	硒	汞	六價鉻
TCLP 濃度(mg/L)	0.0125	未檢出	未檢出	未檢出	未檢出
法規標準(mg/L)	15	5	1	0.2	2.5

三、混凝土製品製作

本研究於石門水庫第七號沉澱池進行水庫淤泥固化製成混凝土塊，工作執行期間自民國 97 年 5 月 12 日至民國 97 年 6 月 18 日，共計完成 5 個方形混凝土塊(1.0 m×3.0 m×0.6 m)與 5 個消波塊(含 3 個三角鼎塊型、2 個四角角錐型)澆置，並於第七號沉澱池之混凝土平台完成養護工作。現場澆置、以及養護，如照片 3 所示。

本研究於兩種配比(混凝土塊：245 kgf/cm²、消波塊：175 kgf/cm²)的混凝土澆置過程中，採隨機採樣方式，分別於民國 97 年 5 月 14 日及 5 月 21 日各製作五個混凝土圓柱試體進行抗壓試驗，試驗成果整理，如表 5 所示。由表 5 可知，混凝土塊(245 kgf/cm²)與消波塊(175 kgf/cm²)澆置過程所取樣試體於 28 天齡期之混凝土強度均可滿足各自之設計要求，符合混凝土工程施工規範與解說(土木 402-94a, 2007)內 17.2.2 條規定。另由試體編號 245-1 的抗壓強度可知，此配比混凝土製品之早期強度已可達 219 kgf/cm²(8 天齡期)，甚至較前導試驗所得成果為佳(同配比混凝土試體於 7 天齡期之抗壓強度為 185 kgf/cm²)，證實本研究所執行水庫淤泥固化製成混凝土塊的再利用方式確實於實務上具有高度可行性。



(a) 方形混凝土塊模版組立及鋼筋綁紮



(b) 消波塊鑄模組裝



(c) 依各配比進行配料



(d) 淤泥添加固化劑及附加劑均勻攪拌



(e) 方形混凝土塊澆置



(f) 消波塊澆置



(g) 混凝土圓柱試體隨機取樣



(h) 方形混凝土塊拆模及養護



(i) 消波塊拆模及養護

照片 2 水庫淤泥製成混凝土塊及消波塊現場照片

表 5 大型混凝土試體抗壓試驗成果

試體編號	試體尺寸(cm)		材齡(天)	澆置時間	抗壓強度	
	直徑	標稱高度			kgf/cm ²	MPa
245-1	15.01	30.0	8	97/5/14	219	21.5
245-2	14.99	30.0	28	97/5/14	290	28.4
245-3	15.01	30.0	28	97/5/14	264	25.9
245-4	14.98	30.0	28	97/5/14	275	27.0
245-5	15.02	30.0	28	97/5/14	283	27.7
175-1	14.99	30.0	28	97/5/21	218	21.4
175-2	15.01	30.0	28	97/5/21	223	21.8
175-3	14.99	30.0	28	97/5/21	205	20.1
175-4	14.98	30.0	28	97/5/21	195	19.1
175-5	15.03	30.0	28	97/5/21	229	22.4

註：為測試混凝土試體早期強度，故選取編號 245-1 之試體進行 8 天齡期抗壓試驗。

四、成本分析與可行性評估

4.1 成本分析

淤泥混凝土與傳統混凝土單價之比較係依據表 1 之配比所進行之分析，各進料之假設單價係參考公共工程委員會(第二十二期)與營建物價(2008)統整之營建物價，分別為(1)水泥：2.725 元/kg；(2)爐石：1.55 元/kg；(3)細骨材：0.72 元/kg；(4)粗骨材：0.67 元/kg；(5)附加劑：10 元/kg；(6)固化劑：35 元/kg。其中，各項單價係僅包含材料運輸費用，並不包含拌合及管銷費用。依據上述單價分析得知水庫淤泥固化製成混凝土製品之成本分析則彙整，如表 6 所示。須特別注意的是表 6 之費用分析並不包含淤泥前置處理費用(如抽泥、攪拌、脫水等作業)即因改用淤泥產生之設備購置或修改費用。

由表 6 可知，單就進料單價分析而言，淤泥固化混凝土費用略較一般混凝土費用為低，主因在於本配比之淤泥固化混凝土係以大量之淤泥取代細骨材(75~85%)，而淤泥係假設無須花費添購，因而節省大

量的細骨材費用，惟此類淤泥製成之混凝土須添加固化劑(約為淤泥含量之 2%)，方能減少淤泥對混凝土製品強度之影響，按此假設單價估算，兩者費用的差異不大。若就相同設計強度之配比而言，淤泥取用量越低的配比，其淤泥混凝土之費用則越高，而此現象會隨著骨材成本上升或固化劑成本下降而更加顯著。由此可知，當市場上骨材價格上漲時，淤泥應用

於混凝土製品的效益則會隨之提高。

由於近年骨材價格波動甚大，因此，詳細之成本估算應視當時之細骨材與各家固化劑價格進行計算。此外，若淤泥實際應用於混凝土製品時，尚應進一步考量淤泥前置處理費用(如抽泥、攪拌、脫水等作業)、設備購置或修改費用等。

表 6 水庫淤泥固化混凝土之成本分析表

編號	設計強度 (kgf/cm ²)	水泥 (kg)	爐石 (kg)	細骨材 (kg)		粗骨材 (kg)		水 (kg)	附加劑 (kg)	單位重 (kg/m ³)	固化劑 (淤泥 2%)	淤泥比 用量/總重 (%)	淤泥 混凝土 費用 (元)	一般 混凝土 費用 (元)	市售 混凝土 費用 (元)
				粗砂 (比例%)	淤泥 (比例%)	粗石	細石								
175-1	175	171	209	96 (15%)	541 (85%)	552	452	232.0	7.6	2261	10.82	23.9	1,986	1,997	2,270
175-2	175	171	209	127 (20%)	510 (80%)	552	452	232.0	7.6	2261	10.20	22.6	1,987	1,997	2,270
175-3	175	171	209	159 (25%)	478 (75%)	552	452	232.0	7.6	2261	9.56	21.1	1,988	1,997	2,270
210-1	210	187	228	91 (15%)	518 (85%)	501	500	231.7	8.3	2265	10.36	22.9	2,045	2,055	2,390
210-2	210	187	228	122 (20%)	487 (80%)	501	500	231.7	8.3	2265	9.74	21.5	2,045	2,055	2,390
210-3	210	187	228	152 (25%)	457 (75%)	501	500	231.7	8.3	2265	9.14	20.2	2,046	2,055	2,390
245-1	245	203	248	87 (15%)	495 (85%)	499	498	231.0	9.0	2270	9.90	21.8	2,105	2,115	2,550
245-2	245	203	248	146 (25%)	436 (75%)	499	498	231.0	9.0	2270	8.72	19.2	2,106	2,115	2,550

註：假設單價為(1)水泥：2.725 元/kg；(2)爐石：1.55 元/kg；(3)細骨材：0.72 元/kg；(4)粗骨材：0.67 元/kg；(5)附加劑：10 元/kg；(6)固化劑：35 元/kg。

4.2 可行性評估

本研究分就技術、經濟可行性及法規面等部分提出初步的可行性評估如下。

4.2.1 技術可行性評析

由第二章及第三章所得結果可知，不論是室內前導試驗所規劃 8 種配比之試體或採編號 175-1 配比製作之大型混凝土塊試體，其抗壓強度均可滿足設計強度要求，且由工廠試拌及現場澆置過程均顯示其工作性甚佳，證明水庫淤泥確實可採用固化方式應用於混凝土製品，且由溶出試驗驗證本研究提出之混凝土製品符合環保法規要求。上述成果顯示水庫淤泥再生製成混凝土製品之技術確實可行，惟此類淤泥製成混凝土製品的耐候性、一年以上之長期強度發展、浸水性、抗沖刷性等均未經現地測試或大量的室內試驗驗證。此外，如何將此製程模組化進行設廠量產則不在本研究討論範圍內。

4.2.2 經濟可行性評析

單就進料單價分析而言，淤泥固化混凝土費用略較一般混凝土費用為低，若就相同設計強度之配比而言，淤泥取用量越低的配比，其淤泥混凝土之費用則越高，而此現象會隨著骨材成本上升或固化劑成本下降而更加顯著。由此可知，當市場上骨材價格上漲時，淤泥應用於混凝土製品的效益則會隨之提高。以本研究之測試為例，水庫淤泥已可取代 75~85% 之細骨材，約佔總重之 20~24%，若未來能推廣使用此類

再利用方式，即可另闢水庫淤泥去化管道，對淤泥處理量亦可有相當的提升。

4.2.3 法規評析

由於石門水庫淤泥主成分為粉土及黏土，依據現行混凝土技術規範之規定，此類材料被視為有害物質，一般混凝土之限制含量為不得大於 5%，而承受磨損之混凝土則限制含量為不得大於 3%。因此，若欲使用大量淤泥製成混凝土構件，除考慮技術及經濟性外，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。

五、結論與建議

本研究證實水庫淤泥確實可採用固化方式應用於混凝土製品，此類混凝土製品之晚期強度較 28 天齡期之強度有所提升(平均強度提升約 7~22%)，且由溶出試驗驗證此類混凝土製品符合環保法規要求。以本計畫之測試為例，水庫淤泥已可取代 75~85% 之細骨材，約佔總重之 20~24%，對水庫淤泥處理量亦可有相當的提升。惟此類淤泥製成混凝土製品的耐候性、一年以上之長期強度發展、浸水性、抗沖刷性等尚須再經現地測試或大量的室內試驗驗證。

綜上所述，淤泥再生後所製成資源化產品具有可行性，惟有關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。建議管理機關初期可依水庫管理單位之需求量進行試辦，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。

誌謝

本研究承蒙經濟部水利署北區水資源局提供經費進行「石門水庫淤泥多元化處置方案評估規劃」研究，試驗過程獲得麗普化工股份有限公司、龍形企業股份有限公司、台興科技股份有限公司等單位之協助，在此一併致上誠摯謝意。

參考文獻

- [1]中興工程顧問股份有限公司，「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委託研究報告 (2008)。
- [2]財團法人中興工程顧問社，「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)。
- [3]蔡長泰、王文江，「建立水庫高效率排砂(一)(二)(三)」，成功大學水利及海洋工程系，成果報告 (2000~2002)。
- [4]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」，財團法人成大水利海洋研究發展文教基金會，成果報告 (2002)。
- [5]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」分項計畫一：水庫淤泥輕質骨材量產技術研究，內政部建築研究所補助研究報告 (2003)。
- [6]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，內政部建築研究所補助研究報告 (2003)。
- [7]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」，經濟部 (2005)。
- [8]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 (2007)。
- [9]Krofchak, D. The Stepwise Treatment of Aqueous Wastes to Form Solid Silicates, Canadian Patent No. 1024277 (1978).
- [10]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 (2003)。
- [11]Pojasek, R.B. Solid-Waste Disposal: Solidification, *Chem. Eng.*, Vol. 86, pp. 141-145 (1979).
- [12]中國土木水利工程學會，混凝土工程施工規範與解說，土木 402-94a，科技圖書，台北 (2007)。
- [13]台灣營建研究院，營建物價，第六十四期，台北 (2008)。