

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

「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

執行單位：中華民國節能輕質骨材混凝土推廣協會

研究主持人：顏 聰、黃兆龍

協同主持人：彭耀南、方一匡、黃玉麟、陳宗鵠、
陳豪吉、潘誠平、王和源、張明添、
張朝順、林維明、李隆盛、湯兆緯、
葉春爐

內政部建築研究所補助研究報告

中華民國九十二年十二月

摘 要

本計畫目的即為利用廢棄水庫淤泥再生為有用資源之骨材，並應用於輕質骨材混凝土及其產業化之研究，最後並完成推廣應用規範之訂定及宣導。終極目的為開發水庫淤泥輕質骨材及其混凝土之產製技術並轉移至產業界，並協助政府訂定相關規範，以打開輕質骨材混凝土市場通路。本冊內容包括：國內 15 座主要淤積水庫之集水區地質調查，完成 15 座水庫淤泥之化性分析、國內 15 座水庫淤泥燒結為輕質骨材之量產技術研發及省能源、低污染之輕質骨材燒結技術與製程研發等，預期可大量消化水庫淤泥解決水資源及環保問題外，亦可疏解天然砂石資源之不足，並借此提昇具耐震及節約能源之輕質骨材混凝土應用技術。

分項計畫一 目 錄

第一章 緒論.....	01
第一節 研究動機.....	01
第二節 研究團隊.....	03
第三節 研究目的.....	04
第四節 研究方法.....	05
第五節 研究流程.....	06
第二章 水庫集水區地質探討.....	08
第一節 前言.....	08
第二節 台灣地質概論.....	09
第三節 部分水庫地質探討.....	14
第三章 台灣北區水庫淤泥之特性分析.....	23
第一節 北區水庫概述.....	24
第二節 北區水庫淤泥之物理性質分析.....	27
第三節 北區水庫淤泥之化學成分分析.....	30
第四章 台灣中區水庫淤泥之特性分析.....	35
第一節 中區水庫概述.....	35

第二節	中區水庫淤泥之物理性質分析.....	38
第三節	中區水庫淤泥之化學成分分析.....	40
第五章	台灣南區水庫淤泥之特性分析.....	45
第一節	南區水庫概述.....	45
第二節	南區水庫淤泥之物理性質分析.....	48
第三節	南區水庫淤泥之化學成分分析.....	50
第六章	水庫淤泥輕質骨材之性質.....	55
第一節	前言.....	55
第二節	水庫淤泥輕質骨材之物理性質分析.....	56
第三節	水庫淤泥輕質骨材之力學性質分析.....	60
第七章	省能源、低污染的輕質骨材燒結製成與技術研發.....	68
第一節	前言.....	68
第二節	輕質骨材燒製技術之回顧.....	69
第三節	水庫淤泥輕質骨材之燒製研究.....	80
第八章	水庫淤泥輕質骨材混凝土之工程性質.....	92
第一節	前言.....	92

第二節	新拌混凝土性質.....	93
第三節	硬固混凝土性質.....	96
第九章	結論.....	98

第一章 緒論

第一節 研究動機

台灣西部地區之地質大都屬於軟弱的頁岩，長期受自環境風化的影響，易分解成粘土，再經菲律賓版塊及歐亞版塊碰撞，產生地震，造成土石流，遇水形成泥流進入河川或集水經沈澱形成淤泥，使水庫因淤積導致有效蓄水量逐年降低，台灣 69 座重要水庫均有淤積問題，水庫總淤積量高達 4 億 7 千萬立方公尺，已超過於一座翡翠水庫蓄水量。並且每年淤積量持續增加；另一方面，新水庫開發計畫受當地居民強烈抗爭而受阻，如美濃水庫即為一例，在水資源無法充分開發的環境下，如何進行水庫浚渫的工作以延長水庫壽命，發揮原設計蓄水、發電、觀光之多功能用途，顯得十分重要及具有急迫性。

政府有鑑於此，已訂定一套完整之水庫清淤計畫，惟清除所得之廢棄淤泥如何妥善處理，是一個重要之環保課題。睽諸國外先進國家，基於有效處理並減量控制廢棄物質，再生資源技術便成為極重要之研究領域。水庫淤砂因其質料過細且富含粘土及有機物質，不能任意棄置，以避免二次污染事件。故本計畫擬開發水庫淤泥燒結輕質骨材之產製技術，將廢棄淤泥再生資源化，降低水庫清淤成本，提高水庫運轉之經濟效益。

輕質混凝土係由輕質骨材取代傳統骨材所製成之混凝土材料，具有質輕、可隔熱、耐火性強、耐震性佳且強度夠之優點。在歐美及日本等先進國家於二十世紀初即開始生產輕質骨材，並使用於結構性工程與非結構性用途上。近年來，北歐國家更引用高性能輕質骨材混凝土之概念，將之應用於大跨度預力橋樑之興建，也獲得良好之評比[1、2、3]。位於地震帶上的台灣地區，近年來高樓及大型公共工程遽增，且因屬於亞熱帶，能源節約需求日益迫切，發展輕質混凝土取代傳統之混凝土建材，就整體經濟效益而言，具有十足之重要性與需求性。尤以近年來政府推動公共工程建設，導致台灣地區骨材來源日益缺乏；另一方面又因重視水土保持而逐步禁止河川砂石之開採，在砂石取得日益困難的情況

下，可供燒製輕質骨材的材料蘊藏豐富的台灣地區，今後開發擁有質輕、耐震佳及良好隔熱性及吸音性之輕質骨材應是可以預期的。

發展輕質骨材混凝土的基本條件，在於須要有適合燒製輕質骨材的原料。依經濟部中央地質調查所的報告[4、5]指出，台灣島上，南部有粘土，中北部有頁岩、泥岩等，均可用來燒製輕質骨材，其蘊藏量相當豐富。目前國內各水庫淤積情形嚴重，根據經濟部水資源會之統計[6]，台灣水庫每年增加之總淤積量為 1460 萬立方公尺，約為一座明德水庫之有效容積。目前政府已訂定了完善之疏浚計畫，預期逐年浚渫淤積之水庫，惟大量疏浚所得之廢棄水庫淤泥必然造成環保問題。根據一般文獻研究結果可知，水庫淤泥大致上之處理方式有四種，即掩埋或填方、拋海、農地改良及燒結固化，其中掩埋或填方因有沈陷及透水不良等工程問題，拋海則因有海洋污染之疑慮已為環保團體反對，目前則以農地改良或燒結固化為較佳處理方式。因水庫淤泥皆自水庫上游沖刷而下，必定含有大量可供燒製為輕質骨材的料源，若能有效利用這些廢棄淤泥燒結再生為輕質骨材，不失為經濟且符合環保之作法。

中興大學自 1991 年起在榮工處與內政部建研所資助下，完成頁岩及黏土人造輕質骨材之生產及輕質混凝土工業化之研究，已大致掌握台灣島內生產輕質骨材各料源區之物性。另 2000 年國科會委託之水庫淤泥製造輕質骨材研究[7]及台灣科技大學之研究報告中，已確定國內水庫之沉積淤泥具備有製造輕質骨材之條件。況且水庫淤泥在製造輕質骨材過程中，可直接造粒而省去一般頁岩碎化之過程，其製造所得之輕質骨材單價較低，具市場競爭性，是為更有利的條件。

第二節 研究團隊

本研究工作由中華民國節能輕質骨材混凝土推廣協會理事長顏聰校長擔任計畫主持人，台灣科技大學營建系材料組黃兆龍教授擔任共同主持人、並由台灣大學前教授高健章教授擔任顧問工作。

本研究工作為總計畫之第一項計畫「水庫淤泥輕質骨材產製技術研究」，本項工作分為數個子項，由黃兆龍、陳豪吉、王和源、葉春爐負責，團隊人員皆具有傑出之相關背景，以下為各子計劃之工作內容及負責人員。

子項	計 畫 名 稱	負責教授
一	台灣北區水庫淤泥化性調查及輕質骨材製成研究	黃兆龍、 葉春爐
二	台灣中區水庫淤泥化性調查及輕質骨材製成研究	陳豪吉、 葉春爐
三	台灣南區水庫淤泥化性調查及輕質骨材製成研究	王和源、 葉春爐
四	省能源、低污染的輕質骨材燒結製成與技術研發	黃兆龍、 陳豪吉、 王和源、 葉春爐

第三節 研究目的

以往，輕質骨材製造原料大多以膨脹黏土、頁岩、及板岩為主[1]。因此，原料只要證明是可以產生膨脹效果及經濟效益高的礦區，直接進行開挖即可設廠製造輕質骨材。本研究以水庫淤泥為原料，不同水庫的集水區地質並不相同，其淤積沉積物的物化性必然不同。再則，即使同一座水庫，在水庫上游、中游、下游至大壩位置及水庫低窪處，所沉積的浚渫物亦不相同。因此，以水庫淤泥作為輕質骨材的原料，必須透過更嚴謹的分析及驗證。如水庫淤泥的化學成分不僅要符合膨脹範圍內要求，而水庫淤泥的物理性質對輕質骨材的影響亦屬重要因素。尤其，傳統輕質骨材雖具質輕性能，但吸水率過高及強度差，所製造之輕質混凝土會有施工性不佳及強度較低的問題。如何透過完整的製程品管及改良燒結機具性能，將水庫淤泥製成低密度、高強度、及低吸水率的輕質骨材，亦為本文之主要目的。

第四節 研究方法

本研究實地取樣 15 座水庫（翡翠、石門、青草湖、大埔、寶山、明德、明潭、日月潭、仁義潭、鏡面、虎頭埤、白河、阿公店、鳳山、澄清湖）及蒐集相關文獻。此 15 座水庫，其中石門、明德、白河、阿公店、及澄清湖水庫等目前（92 年）正進行清除淤泥的工程；至於翡翠（灣潭段）、寶山、仁義潭、及鏡面水庫等曾於去年（91）進行水庫淤積緊急浚渫工程；而鳳山、青草湖、大埔、虎頭埤、明潭、日月潭等水庫皆為地區性的重要水庫。水庫取樣時位置靠近於水壩位，利用枯水季節於岸邊或潭中露出島利用明挖取樣，取樣最少 1 m^3 、至多取 5 m^3 ，依取樣之難易度決定。本研究將所取樣的 15 座水庫淤泥進行物理性質分析及化學成分分析，而後經造粒後，分別以商業用旋窯及實驗室程式控制電熱爐進行高溫燒結。在經一系列的輕質骨材性質試驗後，比較各水庫淤泥的物化性對所燒結的輕質骨材性質的影響，以提供作為未來大量開發及商業化的參考。

第五節 研究流程

水庫淤泥輕質骨材產製技術研究流程分述如下：

- 1.水庫集水區地質狀況調查（依水庫淤積程度，選取北中南部各 5 座水庫共 15 座水庫調查之）。
- 2.水庫淤泥取樣化性分析（同上，取國內 15 座水庫分析之，以下試驗皆同）。
- 3.評估燒結骨材之可行性以判斷是否需再配料燒結或直接燒結。
- 4.燒結骨材試驗。
- 5.骨材物性及化性分析。
- 6.依據 4,5 項結果，調整旋窯溫度、時間、轉速，重覆 4,5 步驟。
- 7.結構用及非結構用輕質骨材燒結技術評估。
- 8.省能源、低污染及燒結製程與技術研發：
 - (1)以可程式高溫電爐進行北、中、南區水庫輕質骨材試燒。
 - (2)使用實驗用旋窯（台灣科技大學）或商業運轉用旋窯（欣得股份有限公司）進行水庫輕質骨材燒結技術製程及技術開發。
- 9.試驗結果之整理分析，研擬利用量產旋窯燒結淤泥輕質骨材之最佳量產技術。

參考文獻

1. Ikeda, Shoji, "Development of Lightweight Aggregate Concrete in Japan" , International Symposium on Structural Lightweight Aggregate Concrete, June 1995, Norway.
2. Bardhan-Roy, B.K, "Lightweight Aggregate Concrete in UK", International symposium on Structural Lightweight Aggregate Concrete, June 1995, Norway.
3. Helgesen, K. Hakon, "Lightweight Aggregate Concrete in Norway", International Symposium on Structural Lightweight Aggregate Concrete, June 1995, Norway.
4. 賴典章、劉憲德, “台灣西北部之輕質骨材料源”, 營建知訊 120, 81. 9。
5. 何春蓀, “台灣地質概論”, 經濟部, 1986。
6. 經濟部水資會, “台灣地區之水資源”, 1994。
7. 陳豪吉, “以水庫淤泥製造輕質骨材及輕質混凝土之研究”, 國科會報告, 2000。

第二節 臺灣地質概論

臺灣可以大致劃分為中央山脈(I)、海岸山脈(II)、和西部麓山(III)等三個地質與構造區，其中中央山脈地質區又細分為東部亞區(IA)與西部亞區(IB)，而依據岩石地層特性，西部亞區又可再細分為雪山山脈帶(IB1)和脊梁山脈帶(IB2)，雪山山脈帶在西邊以屈尺斷層和西部麓山地質區分隔，在東邊以梨山斷層和脊梁山脈帶相隔，而且以推測的玉山橫斷層和南邊的中央山脈分隔。各地質區中同一地質時代所代表的地層岩性及其地質背景概述如下：

2.1 中央山脈地質區

中央山脈地質區包含以先第三紀變質雜岩構成的東部亞區和以第三紀變質至亞變質泥質岩層所構成的西部亞區，其中西部亞區即為台灣大部分水庫集水區的分布所在地，其地質狀況說明如下：

中央山脈西部亞區大部份是由堅硬或是經過輕度變質的第三紀巨厚泥質沉積岩構成。這個亞區包括中央山脈的脊梁山嶺和其西側的雪山山脈山地。它向南可以延伸到恒春半島而且包圍了中央山脈東側大南澳片岩帶的南端。在中央山脈東側從臺東到玉里的一條狹長板岩和千枚岩帶也屬於這一個地質亞區。

這個硬頁岩和板岩帶從臺灣東北端的三貂角開始，向南延長到恒春半島的牡丹山，全長約 350 公里，最寬部份達到 50 公里。它沿著中央山脈的脊梁部份造成一連串的高峯，和稍偏西的兩個最高山嶺：雪山山脈和玉山山脈。總計這一個泥質地帶佔了臺灣山地略小於一半的面積。這些第三紀的泥質沉積物雖然覆蓋在先第三紀基磐之上，但也曾受到相當程度的變堅和變質作用。它們是西邊盆地內時代較新地層中碎屑物質的主要來源。

在岩性上，第三紀亞變質岩的大部份沉積物為深灰或灰黑色劈理良好的硬頁岩 (argillite)、板岩 (slate)，以及千枚岩 (phyllite)；換句話說，就是經過變堅或輕度變質作用的泥質岩石。在這單調的泥質岩層

中，有時也夾有砂岩層。一般砂岩都是細粒，很堅緻，常與石英岩接近。砂岩有時和硬頁岩或板岩成為互層，也有時在泥質岩系中成為明顯不同厚度的岩層。泥質岩在西部以硬頁岩為主，向東漸漸變為板岩或千枚岩。硬頁岩的定義是變堅的頁岩，只受過極輕微的擠壓，較硬的頁岩漸變為板岩。這些泥質岩石的變質度從西部亞區的西界向東邊的先第三紀基磐或中央山脈的核心地帶逐漸增強。

白色和灰色的砂岩在這個巨厚的頁岩質岩層中構成另一個重要岩段，砂岩中通常夾有薄層或不規則凸鏡狀的石墨質煤或炭質頁岩。砂岩常成厚層塊狀，有時也夾有灰黑色硬頁岩和板岩的互層。砂岩段和頁岩段之間的地層界線是屬於漸變的。石灰質或泥灰質的凸鏡體或結核多散布在中央山脈高處的板岩中。薄而不連續的礫石層或凸鏡體出現在硬頁岩和板岩帶的東部及南部，所含的礫石部份來自變質基岩，部份來自硬頁岩和板岩。此外，玄武岩質的碎屑岩和凝灰岩是這個泥質地層中最多的火山岩，也有少許安山岩、輝綠岩、以及其他不同成份的火山碎屑岩（何春蓀，1975）。

由於第三紀亞變質岩區的岩性單調、地層層序不明、分布在不同時代中的化石有限、以及連續沉積的岩層間缺少明顯的間斷，以致對此鉅厚的硬頁岩和板岩系的詳細地層劃分仍不清楚，完整的地層層序及其總厚度目前尚無法確知，但是推估其總厚度一定在數千公尺以上。

在地層名稱上，早期是把此硬頁岩和板岩系的全部都用一個統一的岩石單位名稱稱之為「板岩系」，以後又再分為上下兩部。後來更詳細的地質調查將臺灣西北部的硬頁岩稱為烏來統（市川雄一，1929），而將臺灣東部的板岩稱為蘇澳統（小笠原美津雄，1933）。烏來統包括二個群和六個層，其上下關係如下表：

表2-2.1 烏來統岩性

統	群	層	主要岩性
烏來統	鄉雁（高岡）群	龜山層	硬頁岩和板岩及砂岩夾層
		大桶山層	硬頁岩和板岩及砂岩夾層
		粗窟砂岩	砂岩、硬頁岩和板岩
		乾溝層	硬頁岩和板岩
	梵梵（繃繃）群	四稜砂岩	白色石英岩和石墨質煤層
		西村層	板岩和千枚岩含有硬砂岩夾層

雪山山脈帶的特徵是具有炭質岩層、厚層白色石英岩、和幾乎沒有石灰質凸鏡體，其頁岩質沉積物多已經變成硬頁岩，部份變質比較強的就成為板岩，礫岩很少發現，火山碎屑岩則在這一帶的北部和中部比較多一點。雪山山脈帶中出露的岩層可以區分為兩個顯著的岩相：(1)硬頁岩及板岩相；(2)炭質砂岩相。炭質砂岩相由厚層至中層白色或灰色的砂岩作為代表，含有薄層凸鏡狀的煤層和炭質頁岩。在分層不易的泥質岩層中，這厚層的炭質砂岩提供了劃分地層的最好的岩性標誌。硬頁岩或板岩和厚砂岩層之間的分界可以成為合適的岩石地層單位的界線。因此目前把雪山山脈帶中的岩層劃分成七個岩石地層單位，由上而下為：

澳底層：炭質砂岩和黑色頁岩

大桶山層：硬頁岩和板岩及砂岩夾層

乾溝層（水長流層）：主要為硬頁岩和板岩

四稜砂岩（眉溪砂岩、白冷層）：白色石英岩和石墨質煤層

西村層（佳陽層）：板岩和千枚岩含有硬砂岩夾層

達見砂岩：厚層或塊狀白色中至粗粒變質砂岩

十八重溪層：灰黑色板岩夾灰白色石英質變質砂岩

2.2 海岸山脈地質區

海岸山脈是中央山脈東邊新第三紀優等地槽（eugeosyncline）的沉積區，以狹長的臺東裂谷和中央山脈分隔。這個位於東邊的沉積盆地現在已經成為長150公里平均寬10公里的狹長山脈。在盆地內堆積了巨厚的新第三紀岩石，但是中新世的岩層只在所有沉積地層中占了下部一半的位置。

2.3 西部麓山地質區

西部麓山帶構成中央山脈西邊的新第三紀次等地槽（miogeosyncline），中新世岩層在這一個地槽盆地內構成其東部的較高山地，也包括臺灣中南部主要的阿里山脈在內。這一地帶以屈尺斷層和中央山脈中的中新世和古第三紀變質岩層分隔。這一個由中新世地層構成的麓山帶向西漸變為上新世岩層組成的山地和丘陵，再向西則進入濱臨臺灣海峽的高台地和海岸平原。這整個地帶構成了臺灣經濟價值最高的沉積盆地，也是水庫壩址最密集的地帶。

西部麓山地質區內中新世地層的主要岩石為砂岩和頁岩的互層，局部夾有分散的石灰岩礁和凝灰岩的凸鏡體，全部最大厚度可以達到五千五百公尺左右。中新世最下部的地層只出露在臺灣北部大漢溪以北的區域，但是在臺灣中部的一些深井中也曾鑽到這較老的中新世地層。這是一個含炭質的岩層，由這個炭質地層單位開始，臺灣北部的中新世地層可以分為三個沉積循環，也就是包含三個含煤地層和三個相間的海相地層。這三個地質循環在時代上分別定為中新世的早期、中期、和晚期。每一個循環都由一個含煤地層開始，含煤地層的厚度在三百到七百公尺之間。接著沉積的是富於化石的海相碎屑沉積岩層，一般厚度為五百至七百公尺。如此一個含煤地層和一個海相地層就造成一個沉積循環。每一個沉積循環所造成的地層都形成一個羣的名稱：下部為野柳羣、中部為瑞芳羣、上部為三峽羣（何春蓀，1975）。

三個含煤地層的主要部分由白色或灰白色的正石英砂岩（orthoquartzite）及長石砂岩（arkose）、灰色的原石英砂岩（protoquartzite）、砂岩—粉砂岩—頁岩所成的薄葉層、和炭質頁岩組成。在每一個含煤地層中含有一到六可開採的煤層，各煤層的厚度平均在0.3至0.6公尺之間。含煤地層中局部含有土鐵石的結核或薄層。三個夾在含煤地層之間的海相地層的主要部分由碎屑沉積物組成，其粒度可以從頁岩、粉砂岩、到細粒或中粒的砂岩。砂岩通常構成懸崖陡壁。砂岩呈淡青灰色、局部為石灰質、屬於亞混濁砂岩（subgraywacke）或原石英砂岩類。頁岩和粉砂岩呈深灰色的薄層或塊狀，富於化石。

中新世的地層從臺灣北部逐漸向南發生變化，這由地層厚度和岩性的變化反映出來。較老的中新世地層在出露的剖面中，一個一個的由北向南逐漸消失。也就是說，愈向南中新世地層的剖面愈不完整，出露在底部的中新世地層愈向南愈年輕。每一個中新世地層的厚度似乎都向南逐漸增加。北部的三個含煤地層都在不同的地點向南逐漸轉變為海相的碎屑岩堆積。隨著含煤相的消失，北部的三個沉積循環到了中部和南部就變得無法區分了，所見到的都變成了海相岩層。其他由北而南顯著的地層變化是中新世岩層愈向南就變得更為頁岩質、更厚、粒度也更細。臺灣北部三個海相地層中的砂岩段大部份向南逐漸尖減，在不同的地點漸變為較厚的頁岩或泥質地層。

第三節 部分水庫地質探討

3.1 翡翠水庫

翡翠水庫位於台灣北部的雪山山脈西北邊緣，地質上屬雪山山脈地質亞區。水庫壩址位於北勢溪下游，距南勢溪與北勢溪匯合點約2.6公里，水庫自壩址至坪林全長23公里，兩岸均為海拔400公尺以上之山嶺，較水庫最高常水位170公尺高出甚多。北勢溪河床縱向坡度千分之五，河床堆積物以砂為主，其開採度有限，河心偶有岩盤突出之情形。

翡翠水庫集水區分布之地層包括始新世的四稜砂岩，漸新世的乾溝層、粗窟層、大桶山層及中新世的木山層等，全部厚度在二千公尺以上。各地層之厚度及一般岩性見表2-3.1。此區地層略經輕微之變質作用，岩石固結良好，岩質堅硬而緻密。

表 2-3.1 翡翠水庫附近地層與一般岩性

地質年代		層	厚 (m)	主要岩性	地層接觸關係
第四紀	現代	沖積層	0-20	砂及礫石	假整合 不整合 整合 整合 整合 假整合
	更新世	河階層	0-20	紅土、砂及礫石	
第三紀	中新世	木山層	300+	細粒砂岩夾頁岩	
	漸新世	大桶山層	600	粉砂岩與細砂岩薄互層	
		粗窟層	250	厚層細粒砂岩及粉砂岩	
		乾溝層	700	塊狀粉砂岩	
	始新世	四稜砂岩	100+	粗粒石英岩	

(1) 四稜砂岩

「四稜砂岩層」是大江二郎（1931）在繪製李棟山圖幅及說明書時首先用於台灣北部烏來統中的厚層石英岩質砂岩層；小笠原美津雄（1933）在調查雪山山脈地質時採用此地層名稱來代表第三系烏來統下部的厚層砂岩；宇佐美衛（1936）繪製的宜蘭圖幅中也以

此代表出露於蘭陽溪西北的烏來統繡繡（梵梵）群中的厚層砂岩。何春蓀（1953）則將此地層改以「四稜砂岩」稱之，也是目前廣被使用的名稱。

四稜砂岩的標準露出地點位於桃園縣北部橫貫公路上的四稜。有關其時代的研究，張麗旭（1973）曾在北部橫貫公路四稜砂岩的露頭上，發現四地點含有孔蟲化石，屬於砂質種，計10屬12種，其中有指示始新世者；鍾振東與菅野三郎（Chung and Kanno, 1975）在標準剖面的本層黑灰色頁岩中發現貝類與有孔蟲等化石；一般均認為本層的時代應為始新世至漸新世（何春蓀, 1986）。

岩性上，四稜砂岩主要是由受熱液換質作用的厚層或塊狀淺灰色到灰白色石英岩質砂岩或石英岩所構成，夾有暗灰色硬頁岩、板岩及炭質頁岩，砂岩混有及炭質頁岩時常呈現暗灰色。砂岩是中粒到粗粒，甚至可以達到礫石般大的粗粒石英岩。由於露頭不連續且受植被影響，對於四稜砂岩的厚度有不同的量測結果，大江二郎（1931）認為其厚度約500公尺；鍾振東（1973）認為總厚度約700公尺；顏滄波（Yen, 1973）認為其厚度約 600至1000公尺。

(2) 乾溝層

乾溝層是市川雄一（1932）首先提出的地層，屬於他所定的烏來統。標準露出地點在臺北縣烏來附近，主要分布範圍包括南勢溪上游地區以及沿蘭陽溪西北岸地帶。岩性上，乾溝層是以受了變堅作用成為硬頁岩或是受了變質作用成為板岩的黑色到深灰色頁岩質沉積物為主，局部夾有薄層砂岩。頁岩和板岩相當緻密，常形成陡壁，呈現清晰的木片狀破裂面。乾溝層在各地區的露出厚度不一，通常可以從六百公尺到最厚的一千二百公尺以上。而在所有乾溝層出露帶的東南部分，其板劈理（slaty cleavage）發育得特別好，許多地方的板劈理和層理並不一致。

(3) 粗窟層及大桶山層

粗窟層及大桶山層之粉砂岩均呈暗灰色、均質、緻密、硬化程

度高，無明顯層面裂開性及劈理存在；當岩石暴露於空氣受浸濕及乾燥反覆作用後，容易產生細縫，喪失強度，以致裂成小碎塊。粗窟層砂岩呈灰色、細粒、均質、緻密而堅硬，其膠結及硬化程度高，硬度、強度和抗風化力較粉砂岩大。砂岩及粉砂岩接觸帶通常呈小於數公分厚度之漸變帶，由砂岩、粉砂質砂岩，逐漸變為粉砂岩。

大桶山層之砂岩主要呈淡灰色至灰色、細粒、緻密而堅硬，並具顯著薄紋層及交錯層構造。砂岩與粉砂岩之接觸面明顯，接觸面呈不規則狀，緊密結合。

(4)木山層

木山層是以白色中粒至細粒正石英砂岩或原石英砂岩為主，多呈厚層或塊狀，有時具有明顯之交錯層構造及含有暗紅色氧化鐵結核。灰黑色頁岩為另一較發達之岩層，常與砂岩構成互層。其另一特點為白色粉砂岩或細粒砂岩與黑色頁岩所成之薄葉互層甚為顯著。本層之上部含有三個可採煤層，岩層中並含豐富之炭質物及雲母碎片。由於本層含煤層、多量粗粒碎屑物質及代表淺水沉積構造之交錯層、波痕等，故可推測木山層之沉積環境屬於沖積平原、濱海或淺海相（何春蓀，1975）。

根據岩相學分析結果，粉砂岩及砂岩所含礦物主要為石英，另含一些長石及方解石，顆粒間由粘土礦物膠結；方解石有時亦為砂岩的主要膠結礦物。膠結物經 X 光繞射鑑定為低度變質礦物絹雲母、綠泥石以及高嶺土。岩石之物理性質，見表 3-2.2。

表 2-3.2 翡翠壩址岩石材料之物理特性

物 理 特 性	砂 岩	粉 砂 岩
比 重	2.57-2.67	2.64-2.72
吸 水 率(%)	0.33	2.25
孔 隙 率(%)	1.5	5.5
硬 度	2-3	3-4
靜彈性模數 (kg/cm ²)	175,000-411,000	92,000-271,000
動彈性模數 (kg/cm ²)	462,000-661,000	442,000-557,000
包 生 比	0.15-0.28	0.20-0.41
單 壓 強 度 (kg/cm ²)	900-1,648	492-917
抗 張 強 度 (kg/cm ²)	72-145	24-112
凝 聚 力 (kg/cm ²)	168-200	58-88
內 摩 擦 角 (度)	46-62	54-64

3.2 石門水庫

石門水庫集水區地理位置居於東經 120°10'15"至 121°23'10"，北緯 24°25'45"至 24°51'20"之間，以淡水河上游之大漢溪流域為其主流，全面積廣達 763.4 平方公里。

石門水庫集水區內露出之岩層除小部分為火成岩（細碧岩）外，其餘大部分為新生代的沉積岩。依不同岩層生成之早晚，可將其劃分為古第三紀、新第三紀及第四紀等三個地質時代，其分布狀況與岩性概述如下：

(1)古第三紀岩層：

古第三紀岩層包括下部烏來群及上部烏來群，分佈於水庫集水區的山岳地帶，所佔面積最廣。下部烏來群包括西村層及四稜砂岩兩個地層，其時代為始新世。西村層是由黑色板岩、灰白色薄層砂岩、板狀石英質砂岩所構成；四稜砂岩則以白色及灰白色粗粒石英

質砂岩為主成分，間夾薄層黑色板岩及煤頁岩。上部烏來群又劃分為大桶山層及澳底層，時代推定為漸新世。大桶山層呈厚黑色板泥岩，時夾薄層灰色至淺灰色細粒砂岩及凝灰岩；澳底層是由中粒白砂岩及薄層頁岩或砂質頁岩與延展不規則之煤頁岩所構成。

(2)新第三紀岩層：

新第三紀岩層包括汐止群及三峽群，分佈於集水區之西北部丘陵地帶，所佔面積有限。汐止群包括的地層有五指山層、木山層、大寮層、石底層及鳥嘴山層等。在岩性上，五指山層之上部是以黑頁岩為主，偶而夾雜砂質頁岩；下部則為薄層灰白色硬砂岩與黑色頁岩或砂質頁岩之互層；木山層是由淺灰至白灰色細粒或中粒砂岩與深灰色頁岩及薄煤層所構成；大寮層主要岩石為黑色頁岩，間雜薄層泥質砂岩、細粒砂岩及凝灰岩與集塊岩；石底層以白灰至淺灰色砂岩為主，夾灰色頁岩、砂質頁岩及砂岩與頁岩帶狀體；鳥嘴山層由青灰至綠灰色厚砂質頁岩及灰至深灰色頁岩與粉砂岩構成。三峽群分為南莊層與桂竹林層，南莊層是由白色及灰白色中粒至粗粒砂岩、灰色頁岩、砂岩與頁岩之帶狀層、玄武岩流、及劣煤層等組成；桂竹林層則以青灰色砂岩為主，間夾綠灰色砂質頁岩或頁岩及砂頁岩互層。

(3)第四紀岩層：

第四紀之頭嵙山層分佈於石門水庫集水區之西北隅，岩層為疏鬆之薄層砂岩與泥岩之互層，砂岩為黃色、灰及青灰色，顆粒通常為中粒至細粒，所含雜質有木塊及泥炭；泥岩呈青灰色或綠灰色，層理不清晰。第四紀之堆積地層包括台地堆積、階地堆積及沖積堆積，多分佈於地形坡度較平緩之山麓、台地、溪谷三角洲、溪流內彎部份、及河床平緩地帶。此等堆積物於本集水區之西北部分布較廣，如新柑坪、百吉、三民等地區；在東南部地區則僅見於義盛、霞雲、高坡、三光、玉峰與秀巒等局部地帶。第四紀地層之組成物質包括各類岩石之碎屑、礫石、砂土等，均為雨水沖刷所帶來之沉積物。

除此之外，還有少數可能是由粗面玄武岩經細碧岩化作用而形成的細碧岩（一種基性火成岩）岩床夾於上述中新世的沉積岩地層中，並且沿著石門水庫兩岸大致向東西方向延伸。構成此細碧岩的礦物包括斜長石、綠泥石、方解石、石英，以及少量赤鐵礦、銳鈦礦和鈦鐵礦。

3.3 白河水庫

白河水庫位於台南縣白河鎮，以急水溪支流白水溪為主要水源，集水區面積約 26.55 平方公里，設計總容量為 2509 萬立方公尺。上游集水區分部的地層包括中新世的南港層與中崙層、上新世的烏嘴層與沱水溪層、以及全新世的台地堆積層等，其岩性說明如下：

(1) 南港層

南港層是何春蓀等（1964）在從事台灣煤田地質調查時所採用的地層名稱，用來代表位於南莊層以下和石底層以上的所有海相地層，相當於丹桂之助（1929）所稱的「上部海棲化石層」，也包括市川雄一（1930）所劃分的南港砂岩層（上部）與湊合層（下部）。南港層的標準露出地點在臺北市東北方的南港地區，主要分布於八堵與石底兩向斜的軸部及兩翼地帶。

由於顯著的岩相變化和所含砂岩與頁岩百分比的不同，由北到南不同地區南港層的分層和命名也各有不同，因此南港層有很多不同地方性的名稱。臺灣北部的南港層中有很顯著的厚層塊狀砂岩，而且可細分為五個段（二個塊狀砂岩段和三個砂岩及頁岩互層段）。到了臺灣中北部或中部，此五個岩段只能分為三個岩段，上下兩段以砂岩為主，中段則以頁岩為主。到了西螺溪以南，以砂岩為主的南港層就變成一個不易細分的深灰色頁岩系。

(2) 中崙層

中崙層相當於台灣中部地區的桂竹林層下段（即關刀山砂岩段）與中段（即十六份頁岩段）。桂竹林層和它的相當地層是臺灣

西部中新世最上部的地層，以淺海相的青灰色泥質砂岩及頁岩或砂質頁岩為其代表，整合在南莊層之上。桂竹林層是由烏居敬造和吉田要（1931）所命名，用在苗栗縣的出磺坑油田，其標準露出地點位於苗栗縣後龍溪南岸之桂竹林一帶，主要分布於出磺坑背斜的兩翼及三義斷層逆衝斷塊之上盤。在臺灣的中部和中南部地區，桂竹林層依岩性的不同自下而上被分為以泥質砂岩為主的關刀山砂岩段、以頁岩為主的十六份頁岩段、及以泥質砂岩為主的魚藤坪砂岩段。到了臺灣南部，這些以砂岩為主的地層又分為許多以頁岩和砂岩為主的地層單位。最後在高雄縣楠梓仙溪下游的甲仙以南地區，桂竹林層又完全變為以厚層頁岩為主的地層，這表示當桂竹林層沉積的時候，盆地的沉降率由北向南不斷的加速，桂竹林層的厚度也從北部的八百公尺增加到南部的一千五百公尺。

白河水庫上游出露的中崙層可對比於關刀山砂岩段與十六份頁岩段。關刀山砂岩段的標準露頭地點位於苗栗縣三義東南之關刀山，岩性則以青灰色至暗灰色、細粒至中粒泥質砂岩為主，局部夾有不規則凸鏡狀砂質頁岩，厚度一般在 150 至 280 公尺間。十六份頁岩段的標準露出地點在苗栗縣三義東南方約四公里之十六份（現稱勝興），主要分布在出磺坑背斜的兩翼及三義斷層東側之三義斷塊上，岩性是以暗灰至青灰色頁岩為主，其中時含由石英粒所成之砂岩碎塊，層理不顯，含海相化石甚豐，厚度約 10 至 50 公尺。

(3) 鳥嘴層

鳥嘴層主要由淡灰色至灰色的泥質細砂岩所組成，夾薄層灰色頁岩。水庫上游集水區出露的鳥嘴層可對比於桂竹林層的魚藤坪砂岩段。魚藤坪砂岩是一個以砂岩為主的地層，但含有較多頁岩的夾層。砂岩是灰色到淡灰色，細粒，厚層到中層，時常形成豬背狀山脊地形。魚藤坪砂岩的標準露出地點在苗栗縣三義以南約十公里之魚藤坪，當地岩性是以青灰色或黃灰色泥質砂岩為主，常夾頁岩或砂岩與頁岩之薄互層，偶夾有薄煤或煤粒，泥質團塊、砂棒及貝類與有孔蟲化石亦屬常見，泥質砂岩多為厚層，岩質疏鬆。魚藤坪砂

岩段富含海相化石，包括腹足類、斧足類、蟹類、海膽及有孔蟲化石。

(4) 沱水溪層

沱水溪層主要是由灰色至深灰色的頁岩與砂岩頁岩所構成，下部岩段並夾有厚約幾公尺到幾十公尺的凸鏡狀石灰岩層。頁岩具有發育良好的球狀剝離構造，通常夾有暗灰色凸鏡狀砂岩層以及粉砂岩和泥岩的薄層，局部地區頁岩的淘選度很差，並且富含泥灰岩結核。沱水溪層相當於台灣北部與中部地區的錦水頁岩，其標準露出地點在苗栗縣造橋鄉錦水村，主要分布地區則在出磺坑構造兩翼、錦水背斜軸部，以及寶山背斜軸部地區。由於錦水頁岩具有特殊的岩性和化石羣，在野外很容易辨識，因此常被當作台灣西部地層對比上的重要指準層。錦水頁岩是在淺海或較其略深的環境中沉積而成，富含各種海相生物，所含的化石包括有蟹、腹足類、斧足類、有孔蟲類、和珊瑚等。

參考文獻

1. 何春蓀（1975） 臺灣地質概論。中華民國經濟部。
2. 李錫堤（1988） 翡翠水庫計畫之地質調查及成果。中興工程，第 20 期，第 60-80 頁。
3. 楊宏儀、蕭炎宏和范明哲（1983） 臺灣北部石門水庫地區細碧岩之岩石學研究。中國地質學會專刊，第 5 號，第 97-116 頁。
4. 賴典章和劉憲德（1992） 臺灣西北部之輕質骨材料源。營建知訊，第 120 期，第 5-16 頁。

第三章 台灣北區水庫淤泥之特性分析

水庫淤泥的基本性質直接影響淤泥的再生利用及處理的方式，本研究團隊實地取樣 15 座水庫（翡翠、石門、青草湖、大埔、寶山、明德、明潭、日月潭、仁義潭、鏡面、白河、虎頭埤、阿公店、鳳山、澄清湖），及蒐集參考文獻，進行水庫淤泥的物化性分析。實地勘查 15 座水庫後（水庫位置詳圖 3-1.1），本研究將上述十五座水庫依地理位置分北區、中區及南區等區域水庫，北區水庫共有翡翠、石門、青草湖、大埔、寶山等 5 座水庫，中區水庫包含明潭、日月潭、仁義潭、明德及白河等 5 座水庫，而鏡面、虎頭埤、阿公店、鳳山、澄清湖等 5 座水庫則劃分為南區水庫。採集所有水庫淤泥，進行水庫淤泥的物理性質（比重、顆粒分佈、土壤分類）及化學成分分析（採化學藥品定量定性分析法）等，以建立水庫淤泥基本性質的資料庫。本章節針對北區水庫的概況及淤泥的物化性作探討，中、南區水庫淤泥性質則分別於第四章及第五章分析討論之。



圖 3-1.1 15 座水庫位置圖

第一節 北區水庫概況

本章節主要針對北區五座水庫的地理位置、水庫功能及使用狀況等等，依序簡述如下：

1.1 翡翠水庫

翡翠水庫位於新店溪支流北勢溪下游，行政區主要屬台北縣石碇鄉及坪林鄉，由台北市政府台北翡翠水庫管理局管理營運，為台北市最重要水源，集水區業經劃定為台北水源特定區，由經濟部台北水源特定區管理委員會管理，為台灣唯一之水源特定區。翡翠水庫主壩為雙向彎曲變厚度混凝土拱壩，於民國 68 年開始興建，76 年間完成，水庫總容量達 4 億立方公尺，為台灣北區最大者。排洪設施除壩頂溢洪道外，尚有位於右岸的排洪隧道。水庫主要功能微調蓄供應公共給水，供水量達每日 345 萬立方公尺，其水晶翡翠電廠發電後放流於下游由直潭壩、青潭壩攔引，經直潭淨水廠及長興、公館淨水廠處理利用，供水區包括台北市、台北縣之新店、中和、永和、三重、汐止等地面積 334 平方公里，人口 346 萬人。水庫蓄水量龐大具防洪功能，與大漢溪的石門水庫同為淡水河防洪系統之重要一環。但是長年的使用後，翡翠水庫之淤積情況非常嚴重，有鑑於翡翠水庫之重要性，本研究計畫將該水庫淤泥納入研究之內，望能成功地將淤積之淤泥燒成輕質骨材，以解決翡翠水庫淤積的問題[1]。

1.2 石門水庫

石門水庫位於桃園縣境淡水河最大支流大漢溪上，行政區跨大溪、龍潭、復興三鄉鎮，原建庫主要標的為灌溉與防洪，目前其調節供應公共給水之功能愈形重要，其公共給水除下游鳶山堰攔飲送板新淨水場外，另有餘大壩上游取水經石門大圳宋大楠淨水場者，每日平均由水庫調蓄之供水量約 80 萬立方公尺，主要供應台北縣、桃園縣及新竹縣餉口相之供共用水。水庫主壩原規劃為混凝土壩，基於壩基承载力考量，設計時修正為土石壩。民國 53 年完成之排洪設施只設溢洪道，於民國 52 年發生葛樂禮颱風超大洪水，經重新檢討水文後於大壩右岸山脊增設

排洪隧道兩條，民國 74 年興建完成後水庫排洪能力由每秒 10000 立方公尺提升到每秒 12400 立方公尺。大壩下游後池容量約 220 萬立方公尺，可調節石門電廠發電尾水及溢洪道與排洪隧道所排洩之洪水，後池堰左端設桃園大圳進水口，為桃園水利會灌區最重要取水點[1]。石門水庫之下游還擁有 13 座沈澱池，用以沈澱淤泥，但是所有的沈澱池目前已經堆滿由石門水庫所清出的淤泥，顯然淤泥的處置對於石門水庫而言，也是急於處理的問題。

1.3 青草湖水庫

位於新竹市南區之客雅溪上，原為一小湖，前人為求維持儲蓄水量，曾築有小壩乙座，年久失修，因新竹市南區及香山一帶農田常患旱災，新竹縣政府決意重修，完工於民國 45 年的青草湖水庫，是全台壽命最短的水庫，在民國 80 年交給新竹市政府管理時，已經是功能盡失了。青草湖水庫是在槽水庫，它到底要不要洩洪，這是由上天決定，不是由人來決定。泥沙已經淤積到與壩頂同高，上游來多少水，它就排多少水，青草湖連滯洪池的作用都沒有。被烈日曬乾的黃泥，一旦刮起大風，青草湖就會出現風飛沙的奇景。為了恢復水庫的功能，青草湖水庫重生計畫已納入中央「水庫更新改善及集水區保育計畫」，經濟部同意九十二年度先支應三千萬元，由市府辦理規劃等先期工作，九十三年度再補助七千萬元。青草湖水庫重生計畫中，首當其衝是辦理青草湖淤砂清除，希望本研究也能替青草湖水庫淤砂清除提供一解決之道[1]。

1.4 大埔水庫

大埔水庫位於新竹縣峨眉鄉中港溪支流峨眉溪下游，又稱峨眉湖。大埔水庫自民國 49 年 6 月完工至今已 40 年，由苗栗水利會管理，主要供應香山、寶山、竹南、頭份四鄉鎮 1031 公頃農業用水。水庫之集水區面積達 100 平方公里，水庫之有效蓄水容量，因受水庫完工之出受蓄水範圍坡面之不穩定及上游集水區開挖礦產之影響，目前淤積狀況甚為嚴重，有效容量已由原計劃之 816 萬立方公尺遞減為 450 萬立方公尺，因而受蓄水量之影響，每遇降雨平均 25 公厘則必須實施調節性洩洪，洩洪頻率頗高，造成水庫操作安全的威脅[1]。

1.5 寶山水庫

寶山水庫位於新竹縣寶山鄉山湖村頭前溪支流柴梳溪上，因應新竹科學園區開發及新竹地區用水成長需要而興建，主要水源為頭前溪支流上平溪之燥樹排攔河堰（上坪堰）越域引水。燥樹排攔河堰除送水至寶山水庫調蓄外，並供應新竹水利會竹東圳灌區用水及台電公司軟橋電廠發電用水，將來亦為寶山第二水庫之水源地，目前由新竹水利會及自來水公司共同成立管理小組管理。本水庫容量不大，僅約 500 萬立方公尺，為將來與寶山第二水庫聯合運用，對新竹地區用水幫助甚大[1]。

第二節 北區水庫淤泥之物理性質分析

2.1 土壤分類法概論

依土壤統一分類法 (Unified Soil Classification System) 規定，土壤粒徑為小於 0.075 mm (#200) 定義為黏土 (clay) 及粉土 (silt)，0.075 mm (#200) ~4.75 mm (#4) 定義為砂 (sand)，土壤粒徑大於 4.75 mm (#4) 以上即定義為礫石 (gravel)。至於黏土 (clay) 及粉土 (silt) 的分界為何，有些單位將黏土定義為粒徑小於 0.002 mm 之顆粒，如美國麻省理工學院 (MIT)、美國農業部 (USDA)、美國州公路及官員協會 (AASHTO) 均採用此定義。但 ASTM D-653 將粒徑介於 0.002~0.005 mm 間的顆粒也稱為黏土。本研究則參考 ASTM D-653 以 0.005 mm 為界，當土壤粒徑 > 0.005 mm 定義為粉土 (silt)，土壤粒徑 < 0.005 mm 定義為黏土 (clay)。一般而言，黏土多為雲母、黏土礦物及其他礦物之片狀細微及次細微顆粒。黏土被定義為「當與適當水混合會發展出塑性」的顆粒；粉土或沉泥是由非常小的石英粒及一些片狀雲母類礦物碎屑所組成的細微土壤；砂顆粒幾乎均由石英及長石所組成；礫石為小塊的岩石，有時含石英、長石及其他礦物的顆粒[2]。

2.2 北區水庫淤泥之土壤分類與比重分析

北區水庫所取的土樣物理性質試驗結果如表 3-2.1 所示。在土壤統一分類方面，翡翠、石門、青草湖水庫淤泥都屬於低塑性黏土 (CL)，而大埔所取出的淤泥屬性介於低塑性黏土及低塑性粉土之間 (CL~ML)，寶山所取出的淤泥則屬於粉土質砂 (SM)。在統一分類法中，CL 為無機性； $LL < 50\%$ ， $PI > 7\%$ ，繪點在 A 線上方或 A 線上。不同水庫淤泥在此範圍定義的 CL，其黏土含量相差極大，如石門水庫其黏土含量高達 60 % 以上，而翡翠水庫其黏土含量僅達 20 % 左右，預期對未來燒結輕質骨材的性質會造成相當影響。北區水庫淤泥比重試驗結果顯示，寶山水庫的比重為 2.68 左右，其餘 4 座水庫淤泥的比重皆介於 2.71~2.73 之間。在塑性指數 (PI) 方面，石門等 4 座水庫的塑性指數介於 5.0 ~ 22.9 之間，而寶山水庫淤泥因含有較高含量的砂，所以屬於無塑性土壤 (NP)。

表 3.2-1 北區水庫水庫淤泥的物理性質分析

水庫 名稱	土壤 分類	成份(%)				比重	L.L. (%)	P.I (%)	備註
		礫石	砂土	粉土	黏土				
翡翠	CL	0	8.1	71.7	20.2	2.71	40.1	11.9	
石門	CL	0	2.1	37.6	60.3	2.73	46.6	22.9	
青草湖	CL	0	9.4	61.5	29.1	2.72	34.4	9.9	
大埔	CL~ML	0	1.6	62.6	35.8	2.72	34.5	5	
寶山	SM	0	54.9	39.8	5.3	2.68	-	NP	

2.3 北區水庫淤泥之粒徑分佈

水庫淤泥的粒徑分佈與所採集位置有關，例如參考 92 經濟部水利署「石門水庫淤積浚渫處理情形」報告[3]，目前石門水庫累計淤積量高達為 5500 萬 m^3 以上，由於水庫蓄水範圍長達 17 km，造成水庫上、中、下游各段淤積物的粒徑分佈不同，故其淤積物的利用價值與開採方式不同。石門水庫上游段（復興橋附近）淤積物粒徑分佈為含有可再利用的砂石（預估年清除量 15 萬 m^3 ）；石門水庫中游段（阿姆坪附近）淤積物粒徑分佈亦為含有可再利用的砂石（預估年清除量 15 萬 m^3 ）；至於水庫下游段（大壩附近）淤積物多屬泥質（預估年清除量 25 萬 m^3 ）。

由於本研究以淤泥再生利用為目的，因此，在取樣方面盡可能以水庫下游段之淤積物為主。經本研究將所取的土樣進行篩分析試驗，北區 5 座水庫淤泥之粒徑分佈曲線如圖 3-2.1 所示。由圖中可以得知，翡翠水庫所取出之淤泥粒徑主要分佈在 0.01 ~ 0.1 mm 之間，其中以粒徑為 0.03 ~ 0.07 mm 者佔 25 % 之土樣為最大宗，石門水庫的淤泥是從沈澱池中取出，所以粒徑為北區 5 座水庫中最細的一組，粒徑小於 0.01 mm 的土樣佔了 70 % 以上，而青草湖水庫所取之淤泥粒徑以 0.01 ~ 0.03 mm 為主體，約佔整體試樣的 40 %，至於大埔水庫淤泥粒徑分佈情形，除了在 0.03 ~ 0.07 mm 停留 20 % 外，於 0.004 ~ 0.03 mm 之間的 6 個篩號皆停留約 10 %，粒徑分佈較為均勻，寶山水庫的土樣如前所述，砂含量較高，

所以在粒徑分佈方面,在取樣的 5 座水庫中粒徑最大的一組,大約有 50% 的土樣粒徑大於 0.1 mm。

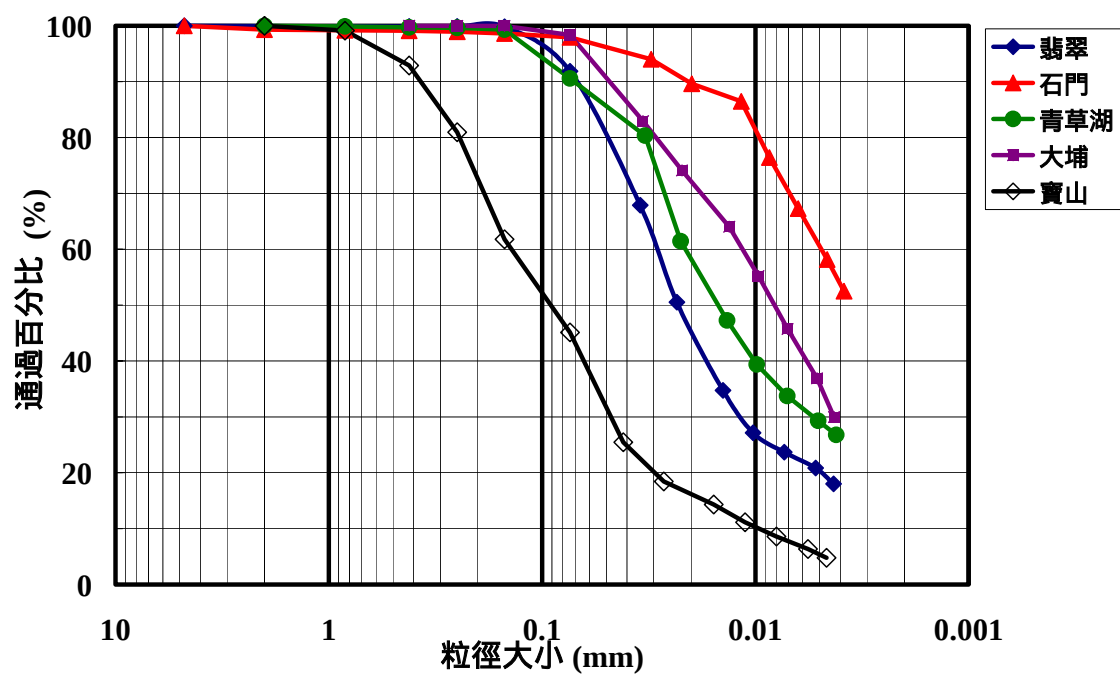


圖 3.2-1 北區水庫淤泥粒徑分佈圖

第三節 北區水庫淤泥之化學成分分析

水庫淤泥的化學性質分析乃採化學藥品定量定性分析法，主要可分析得到 SiO_2 、 Al_2O_3 及 Fe_2O_3 等化學成分比例，表 3-3.1 為台灣北區水庫淤泥化學成分分析結果，主要是二氧化矽（ SiO_2 ）為主，含量介於 59 77 %之間，三氧化二鋁（ Al_2O_3 ）約 8 18 %，三氧化二鐵（ Fe_2O_3 ）約 4 6 %。若將分析結果定位於 Riley 之可膨脹化學成分的三相圖上（[虛線範圍內](#)）[4]，如圖 3-3.1 3-3.5 所示。由於台灣水庫上游地質大多屬於沉積岩，因此，大部分水庫淤泥的化學成分皆落於 Riley [可膨脹範圍內](#)，預期可燒結成良好性質的輕質骨材，由寶山水庫淤泥之化學性質分析顯示，其 Al_2O_3 含量偏低，導致其化性分析三相圖落點未在膨脹範圍內，是否可成功燒製得輕質骨材，而其膨脹性是否足夠，得繼續進行旋窯燒製驗證之。

表 3-3.1 北區水庫水庫淤泥的化學性質分析

水庫名稱	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	其他
翡翠	68.52	15.32	4.90	11.27
石門	59.66	18.33	6.14	15.87
青草湖	74.37	11.45	4.20	9.98
大埔	73.00	12.32	4.12	10.56
寶山	77.96	8.83	4.05	9.16

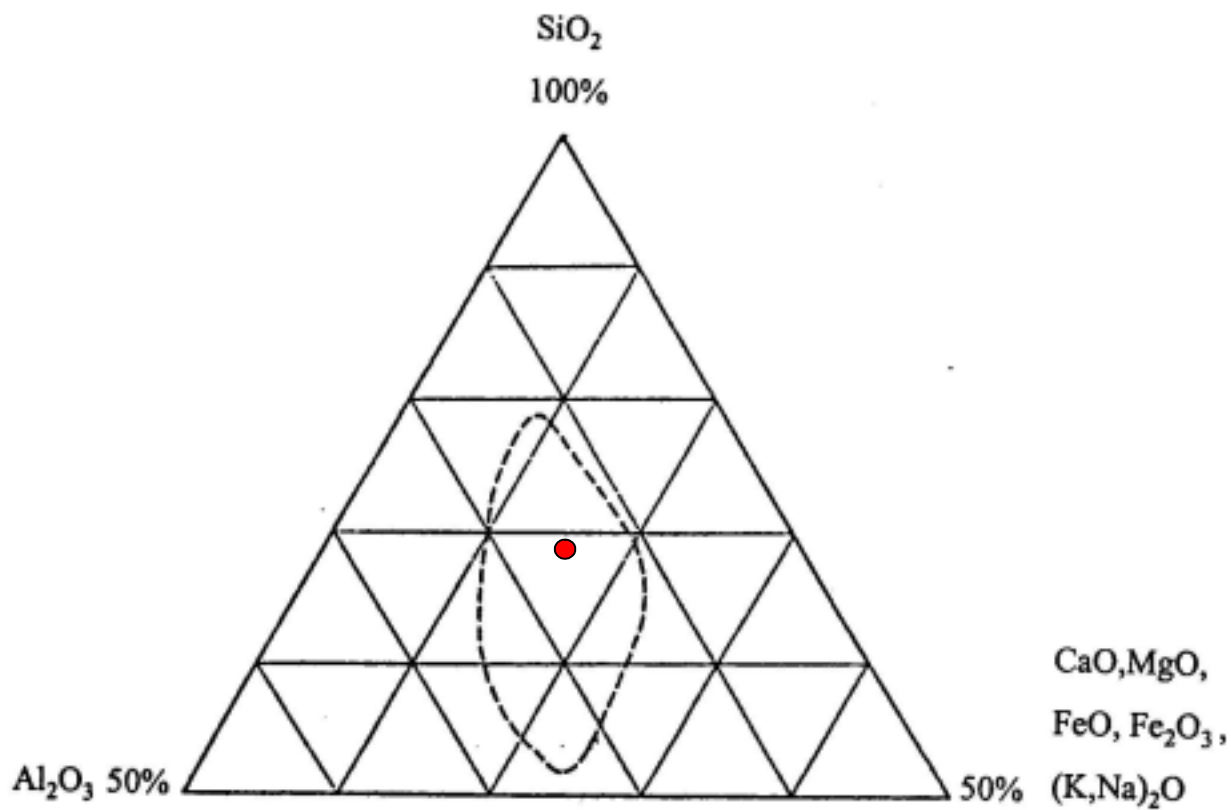


圖 3-3.1 翡翠水庫淤泥化學成分三相圖

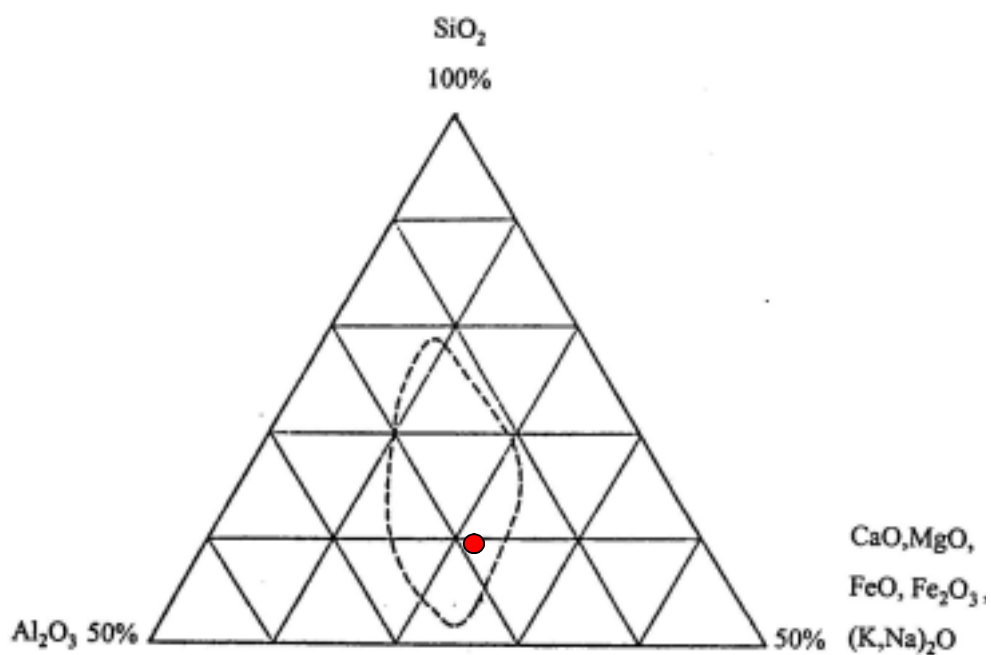


圖 3-3.2 石門水庫淤泥化學成分三相圖

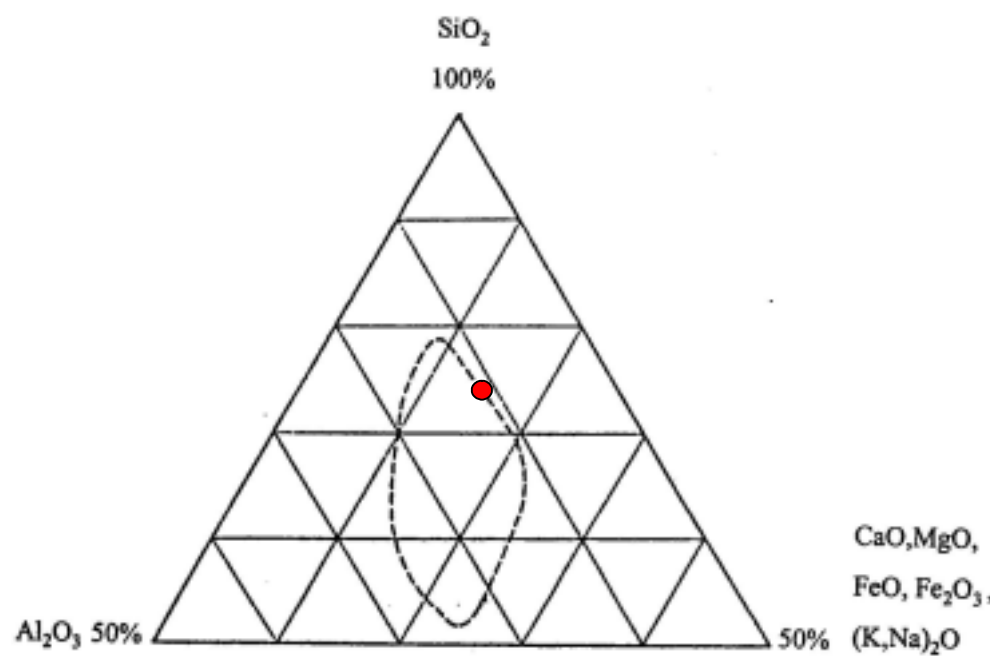


圖 3.3-3 青草湖水庫淤泥化學成分三相圖

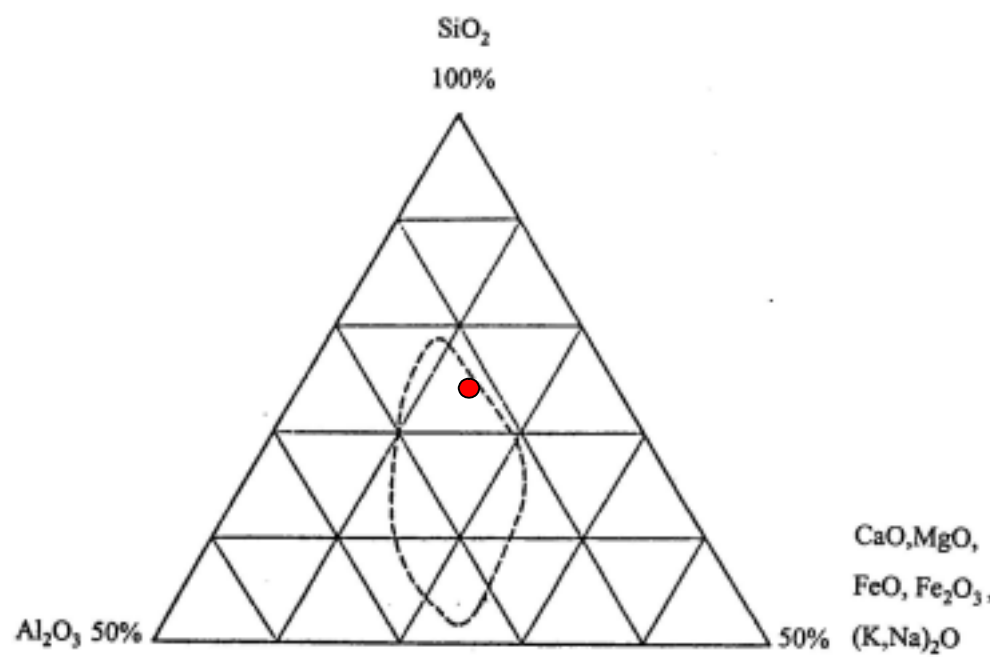


圖 3.3-4 大埔湖水庫淤泥化學成分三相圖

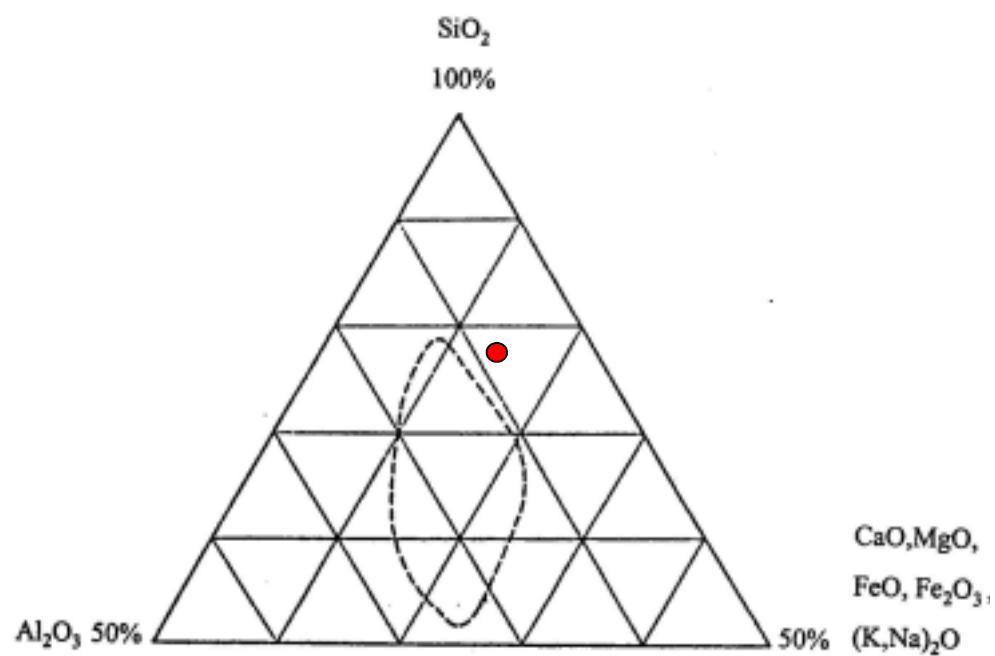


圖 3.3-5 寶山水庫淤泥化學成分三相圖

參考文獻

1. 「台灣水之源-台澎金馬水庫霸堰簡介」, 經濟部水利處, 民國 90 年 12 月。
2. Braja M. Das, “Principles of Geotechnical Engineering”, International Thomson Publishing Asia, 1995.
3. 「石門水庫淤積浚渫處理情形」, 經濟部水資源局, 2002。
4. Riley C.M., ”The Bloating of Clays”, John Wiley & Sons Inc., New York, 1990.

第四章 台灣中區水庫淤泥之特性分析

第一節 中區水庫概況

台灣水庫大多具有發電功能，尤其是在中部擁有較高的地形，更是適合發電水庫的建造，因此在大甲溪及濁水溪便有許多發電功能的水庫與河堰，其中就以明潭水庫發電量高居亞洲第一、世界第四。對發電水庫而言，發電水庫通常落差較大，水沖擊力較大，因此水中的砂石磨損較大，儘管如此由於發電水庫建造地理位置較屬河川上游，相對磨損時間較大，推估他們淤積之淤泥的粒徑分佈可能較大，可能較不利於燒製輕質骨材，因此本研究也將明潭水庫之淤泥納入考慮。而本章節主要針對中區 5 座水庫（明潭、日月潭、仁義潭、明德及白河等 5 座水庫）的地理位置、水庫功能及使用狀況等等，依序簡述如下：

1.1 明潭水庫

明潭水庫位於南投縣水里香水里溪及頭社溪會合口下游，於民國 84 年完成，混凝土重力壩（水里壩）壩高 615 公尺，有效容量約 1200 萬立方公尺，為明潭抽蓄電廠之下池，上池為日月潭。明潭抽蓄電廠裝置有可逆式法蘭西斯式水輪發電機六部，容量 160 萬千瓦，為國內裝置容量最大之水力發電場，亦名列亞洲第一、世界第四，年發電量 15 億度 [1]。明潭水庫在白天由上池（日月潭）放水發電，晚間則抽水回日月潭，週而復始地運作，經年累月運轉後亦有水庫淤積的問題，但是明潭水庫的清淤相較其他水庫方便，可利用早晨水位較低時，以大型機具開挖，取料甚為方便，若用於產製輕質骨材，將可達到降低成本之功效。

1.2 日月潭水庫

日月潭水庫位於南投縣魚池鄉，原為天然湖泊，於民國 23 年於其周圍水社、頭社兩地分築土壩而成水庫，該二壩均為混凝土心牆土壩，主要水源由五界壩所引濁水溪溪水，為一離槽水庫，溢洪道為無閘門控制喇叭口式。主要功能為供應大觀一廠、鉅工兩慣常水力發電廠及大觀二廠（明湖）、明潭抽蓄水力發電廠用水，並配合下游灌溉用水需求調節放水。另並提供自來水公司做為魚池鄉、日月潭、五登地區民生用水。

日月潭水庫總容量約 17 億立方公尺[1]，其水量來自濁水溪，年平均淤積量為 61.01 萬立方公尺，至民國 77 年止日月潭水庫之淤積量以高達 3,294.6 萬立方公尺，若持續淤積將來的淤積量將會相當可觀[2]。

1.3 仁義潭水庫

仁義潭水庫位於八掌溪北岸嘉義縣番路鄉內甕村，離蘭潭水庫約 2 公里，水源來自八掌溪吳鳳橋下游之攔河堰，由於鄰近吳鳳廟，以吳鳳「仁義」事蹟命名。仁義潭水庫容量約 3001 萬立方公尺，除供應自來水公司公園淨水場外，餘水送往蘭潭水庫調蓄，主壩長約 1500 公尺，僅次於阿公店水庫及龍鑾潭水庫。由於大壩甚長，施工時甫發現橫跨八掌溪古河道，軟弱基礎處理費時，為本水庫大壩興建最困難之處，仁義潭水庫與蘭潭水庫為全省唯一直接以隧道及管路串聯運用之水庫[1]。每年淤砂量約 20 萬立方公尺，現已有淤泥 200 萬立方公尺[2]。

1.4 明德水庫

明德水庫原名後龍水庫，位於苗栗縣頭屋鄉明德村後龍溪支流田寮溪上，主壩為土壩，壩高 355 公尺，有效蓄水量為 1470 萬立方公尺。本水庫從民國 41 年成立明德水庫設計勘測隊開始，民國 55 年月開工到民國 59 年 5 月完工，均由台灣省水利局辦理，目前由苗栗水利會管理，主要供應苗栗地區農業、工業用水，及部分民生用水[1]。明德水庫完工時的總蓄水量為 1770 萬立方公尺，有效蓄水量為 1470 萬立方公尺，於民國 78 年淤積量測，經過 19 年的使用，淤積量為 345 萬立方公尺，平均年淤積量約 18.16 萬立方公尺，2003 年估計淤積量達 600 萬立方公尺，將有二分之一的有效容量被淤泥所填滿，將會嚴重地影響水庫的功能[2]。

1.5 白河水庫

白河水庫位於台南縣白河鎮急水溪支流白水溪木屐寮河谷上，功能以灌溉為主，並兼給水及防洪。目前因淤積情況嚴重，水庫功能受相當之影響[1]。

白河水庫由前台灣省水利局規劃、設計及興建，於民國 50 年開始

施工，民國 54 年完工，壩身高 42.5 公尺，土壩頂長度 210 公尺，壩頂高度 12 公尺，壩體積 90 萬立方公尺，為輾壓式土壩，目前由嘉南農田水利會營運管理。水庫集水區面積約 26.55 平方公里，滿水位 109 公尺，滿水位面積 197 公頃，最高洪水位標高 110 公尺，呆水位標高 92 公尺，為一兼具灌溉、防洪及給水多目標功能之水庫。白河水庫之總蓄水量 2509 萬立方公尺，於民國 90 年剩餘容量為 865.6 萬立方公尺，淤積率為 65.5 %。累積淤積量為 1,182.7 萬立方公尺，淤積率為 47.1 %，若加上民國 80 年至 88 年之清淤量 196.99 萬立方公尺，則總年平均淤積量達 43 萬立方公尺，淤積情形相當嚴重，如此巨量之淤積必須長時間始能加以清除，清淤量受限於浚渫方式、土石資源場與沉積池之用地、交通運輸量、水庫正常運轉維持及淤泥之最終處置方式等。白河水庫自民國 80 年起，曾多次以水力抽泥和陸面機械開挖方式清淤，由於在白水漢進流點附近庫區已露出水面高達約 30 公頃，故以路面機械清淤，至 91 年清淤 52 萬立方公尺，總經費 6800 萬元[3]。

第二節 中區水庫淤泥之物理性質分析

2.1 中區水庫淤泥之土壤分類與比重分析

中區水庫淤泥之物理性質分析結果如表 4-2.1。在土壤統一分類方面，明潭、日月潭、明德、白河等 4 座水庫所取出的淤泥都屬於低塑性黏土 (CL)，而仁義潭所取出的淤泥屬於高塑性黏土 (CH)。雖然明潭、日月潭、明德、白河 4 座水庫均屬低塑性黏土，但是土壤成分而言，卻有不同之比例，如明潭水庫所取之淤泥其含有最多的砂土成分 (26.0%)，相對仁義潭 0.6% 的黏土含量高出許多；粉土成分最高者為明德水庫所取出之淤泥，高達 71.2%，而四座水庫淤泥的黏土成份大致在 22% 左右，唯獨明潭水庫僅有 9.8% 的黏土含量。比重試驗結果顯示，中區水庫淤泥比重大約介於 2.69~2.73 之間。在塑性指數 (PI) 方面，以仁義潭水庫的 PI 值為 30.9，在中區水庫之中最高，其中白河水庫屬於無塑性土壤。

表 4-2.1 中區水庫水庫淤泥的物理性質分析

水庫 名稱	土壤 分類	成份(%)				比重	L.L. (%)	P.I (%)	備註
		礫石	砂土	粉土	黏土				
明德	CL	0	6.30	71.2	22.5	2.73	39.9	12.0	
明潭	CL	0	26.0	64.2	9.8	2.69	48.7	25.3	
日月潭	CL	0	17.0	59.6	23.4	2.70	46.7	20.3	
白河	CL	0	22.2	55.3	22.5	2.69	-	NP	
仁義潭	CH	0	0.60	54.7	44.7	2.73	54.1	30.9	

2.2 中區水庫淤泥之粒徑分佈

本研究將所取的土樣進行粒徑分佈試驗，中區 5 座水庫淤泥之粒徑分佈曲線如圖 4-2.1 所示。由圖中可以得知，明潭水庫所取的淤泥粒徑為最大，淤泥粒徑分佈於 0.15 ~ 0.04 之間約有 50%，為主要的粒徑分佈，而中區水庫淤泥粒徑最小者為仁義潭水庫，他的最大粒徑約為 0.074

mm，而粒徑小於實驗量測之 0.004 者有 40%之多，粒徑分佈相當細緻，粒徑分佈介於明潭水庫與仁義潭水庫之間者有日月潭、明德及白河水庫，此三座水庫有近似的粒徑分佈，有 20~30%的淤泥粒徑分佈於 0.036~0.075 mm 之間，比較明潭與仁義潭兩水庫可知，水庫淤泥粒徑分佈的差異主要原因在於水庫的地理位置，越靠近下游者，淤泥的粒徑越小。

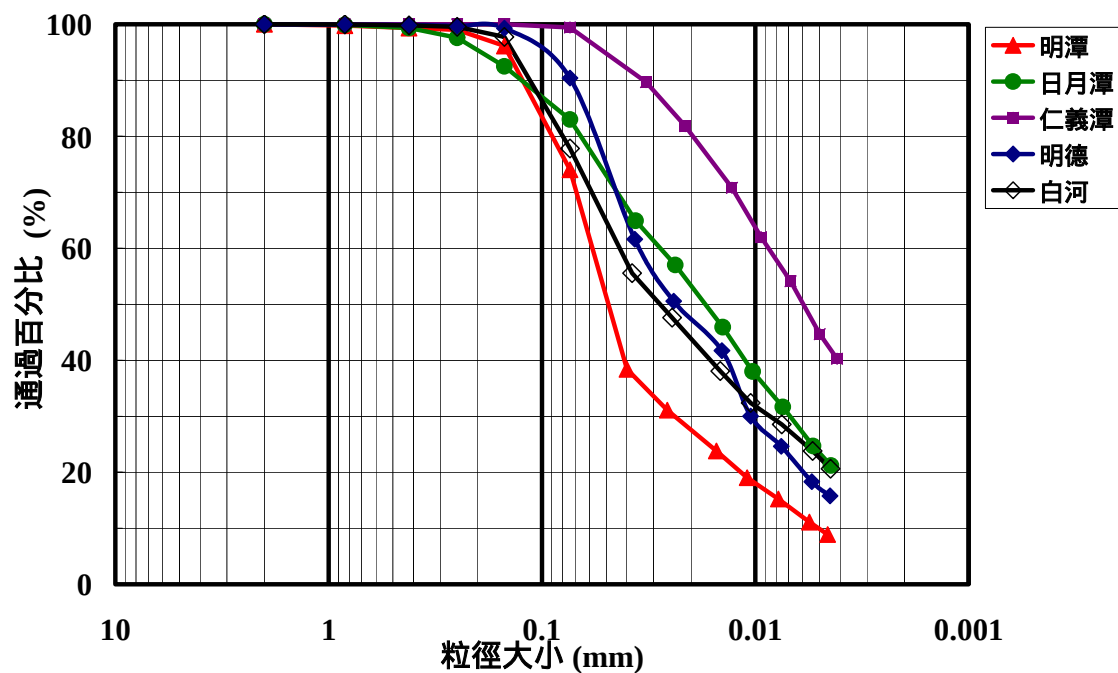


圖 4.2-1 中區水庫淤泥粒徑分佈圖

第三節 中區水庫淤泥之化學成分分析

水庫淤泥的化學性質分析乃採化學藥品定量定性分析法，主要可分析得到 SiO_2 、 Al_2O_3 及 Fe_2O_3 等化學成分比例，表 4-3.1 為台灣中區水庫淤泥化學成分分析結果，其中以二氧化矽（ SiO_2 ）為主，含量介於 57% 73% 之間，三氧化二鋁（ Al_2O_3 ）約 12% 18%，三氧化二鐵（ Fe_2O_3 ）約 3% 7%。若將分析結果定位於 Riley 之可膨脹化學成分的三相圖上，如圖 4-3.1 4-3.5 所示。由於台灣水庫上游地質大多屬於沉積岩，因此，大部分水庫淤泥的化學成分皆落於 Riley 膨脹黏土範圍內，預期可燒結成良好性質的輕質骨材。

表 4-3.1 中區水庫水庫淤泥的化學性質分析

水庫 名稱	SiO_2 %	Al_2O_3 %	Fe_2O_3 %	其他 %
明潭	72.88	12.19	3.73	11.20
日月潭	61.47	18.07	6.15	14.31
仁義潭	56.58	19.14	6.85	17.43
明德	69.13	13.41	5.21	12.25
白河	57.32	18.48	7.08	17.12

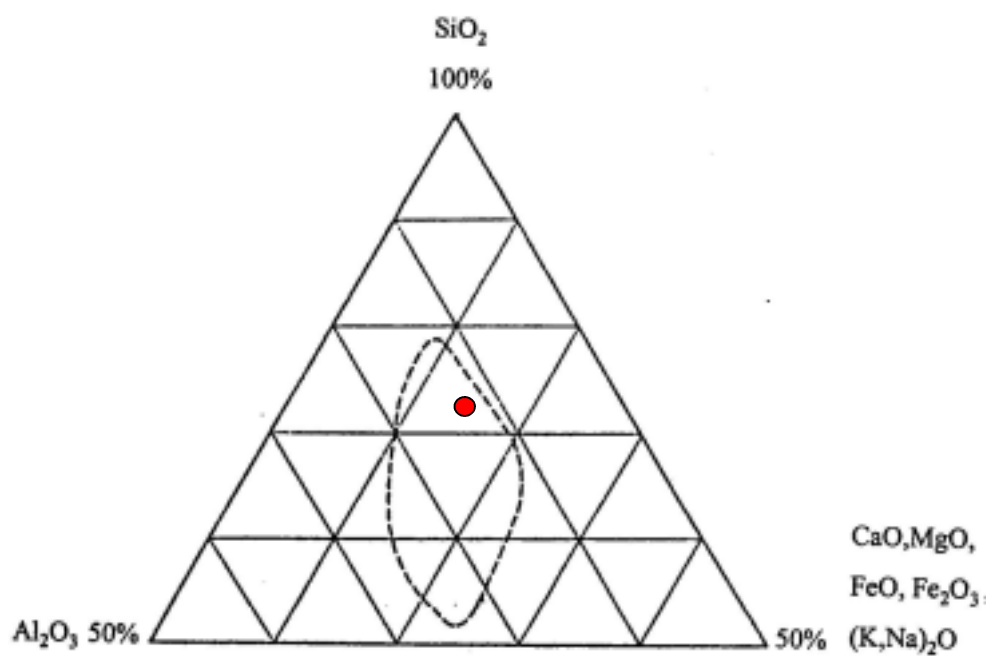


圖 4-3.1 明潭水庫淤泥化學成分三相圖

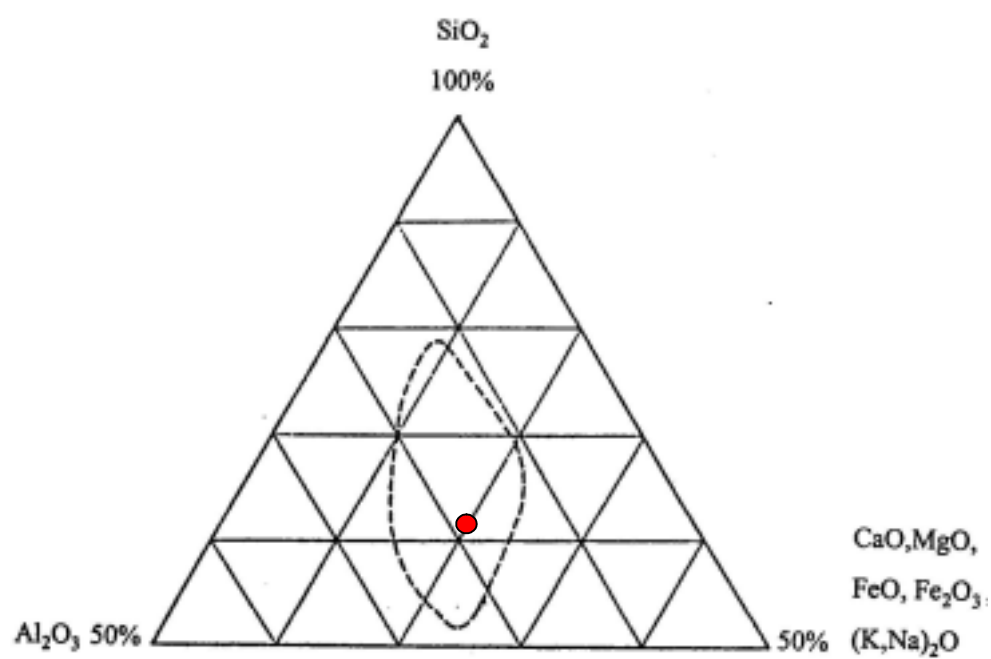


圖 4-3.2 日月潭水庫淤泥化學成分三相圖

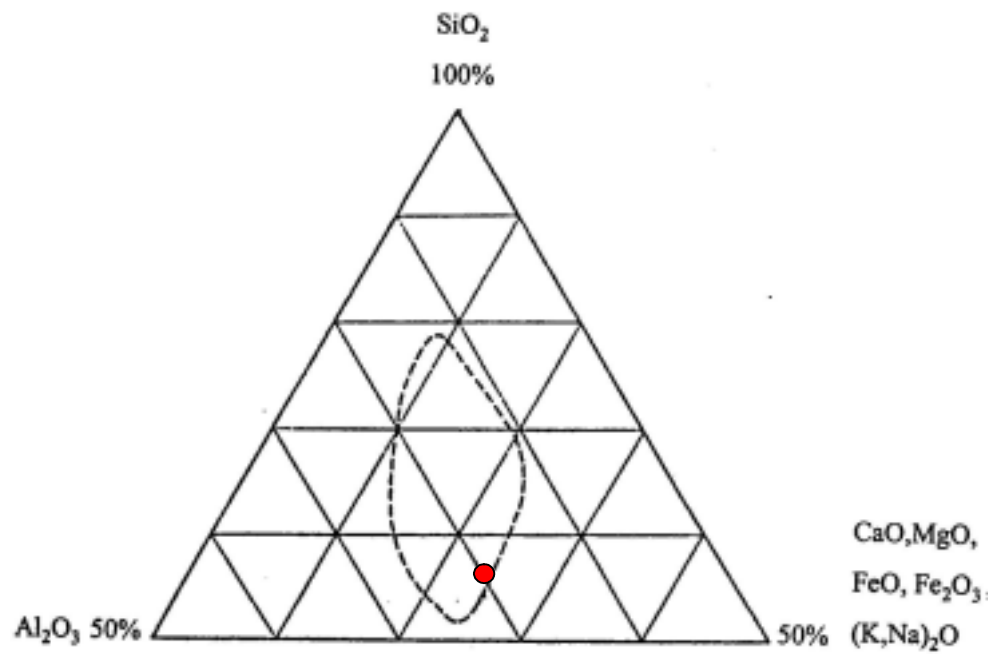


圖 4-3.3 仁義潭水庫淤泥化學成分三相圖

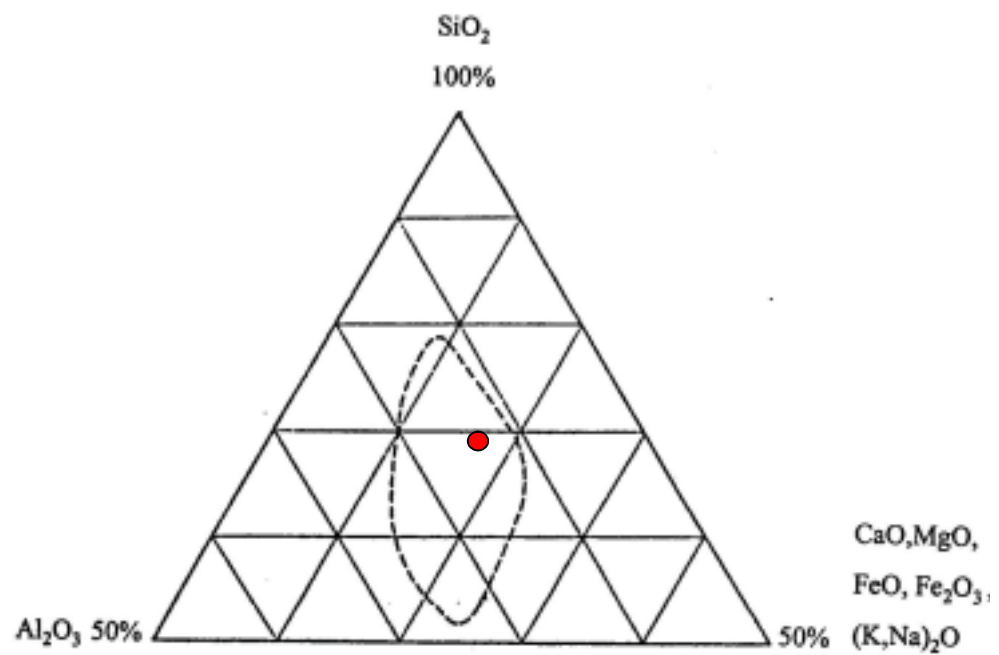


圖 4-3.4 明德水庫淤泥化學成分三相圖

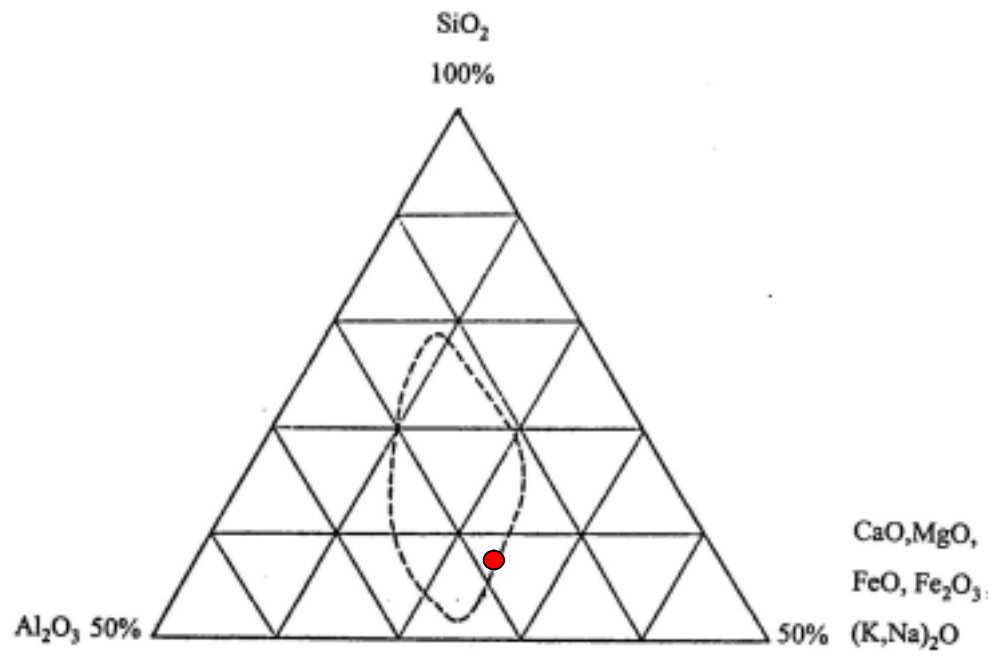


圖 4-3.5 白河水庫淤泥化學成分三相圖

參考文獻

1. 「台灣水之源-台澎金馬水庫霸堰簡介」, 經濟部水利處, 民國 90 年 12 月。
2. 林襟江「台灣地區水庫淤積面面觀」, 水庫淤積浚渫工程研討會論文集, pp.1-4, 2002。
3. 「白河水庫淤積清理規劃」, 經濟部水利署, 2001。

第五章 台灣南區水庫淤泥之特性分析

第一節 南區水庫概況

南部地區水庫淤積持續惡化，淤積嚴重影響水庫有效蓄水量，本章主要論述針對南部主要水庫的現況，包含鏡面、虎頭埤、阿公店、鳳山、澄清湖等 5 座水庫，依序分析如下：

1.1 鏡面水庫

鏡面水庫位於台南縣南化鄉曾文支流蔡寮溪上游，由台灣省水利局設計施工後交由自來水公司管理。鏡面水庫規模不大，容量約 100 萬立方公尺，主要功能為南化鄉民生用水，其淨水場在壩下游右側近處，壩型為台灣較少採用之混凝土重力壩[1]。

1.2 虎頭埤水庫

虎頭埤水庫位於台南縣新化鎮鹽水溪支流茄苳坎溪上虎頭山下，距離新化市區約 3 公里，最早興建於清道光 21 年（1841 年），幾經擴建、潰堤、修復。至民國 33 年始有今日規模，其功能主要為農田灌溉用水，觀光為輔，自台灣光復後由嘉南水利會維護管理至今，為嘉南平原大型埤塘之一[2]。目前虎頭埤水庫總容量約為 84 萬多立方公尺，滿水位面積約 27 萬多立方公尺[3]。

1.3 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，為具有混凝土心牆之滾壓式土壩，主要功能為防洪，並兼高雄農田灌溉及公共用水之多目標水庫，後因淤積嚴重及集水區養豬污染，公共給水早已停止供應，水庫興建於民國 42 年完工。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，為台灣省最長者，設計水位標高 40 公尺，壩頂標高 42 公尺，壩體積 78.8 萬立方公尺，集水面積 31.87 平方公里，總蓄水量 3,250 萬立方公尺，87 年測餘容量 1717 萬立方公尺，淤積率達 52.8 %，每年平均淤砂量達 31.69 萬立方公尺[4]。目前水庫已全面乾枯變成死庫正辦理更新計劃[5]，除進行大規模

庫底浚渫外，並興建越域引水路引旗山溪水及實施集水區養豬廢養，以增加水庫給水功能，浚渫量高達 2200 萬立方公尺，89 年度清除淤泥 80 萬立方公尺，90 年度清除淤泥 140 萬立方公尺，91 年度至少清除 140 萬立方公尺以上淤泥，清淤作業以機械挖土開挖方式進行。更新計劃並增設全省水庫唯一的越域排洪道，可將百年以上頻率洪水排放於二仁溪。更新計劃預定民國 94 年完工，完工後可供公共給水 8 萬 CMD，並提高農業灌溉用水穩定度[2]。

1.4 鳳山水庫

鳳山水庫位於高雄市小港區與高雄縣林園鄉交界處，為高雄市内唯一水庫，離高雄市中心約 22 km，其水源自東港溪及高屏溪豐水期餘水，為一離槽水庫。水庫主壩高度 39 m，壩頂長度 325 m，副壩高 29.5 m，長 211 m，壩體積 74.9 萬方公尺，為一滾壓型土壩。集水面積 3 平方公里，滿水位面積 74.9 公頃，總蓄水量 920 萬立方公尺，於民國 87 年量測剩餘容量為 814.7 萬立方公尺，淤積率為 11.4 %，年淤積量達 5 萬立方公尺[6]。

集水區治理面積 2.75 平方公里。每年流入水庫之淤泥砂量約為 4.5 萬立方公尺，從民國 68 年建造至 87 年累計淤積量約 105 萬 2 仟立方公尺。鳳山水庫自 73 年完工營運至今，因滲漏問題被限制蓄水高度，一直未曾滿庫過，如何止漏及清除庫底淤泥，為本水庫面臨之最重要的課題[2]。

1.5 澄清湖水庫

澄清湖水庫屬於離槽水庫，位於高雄縣鳥松鄉，早期原名「大埤」調解農田灌溉用水之用，後因湖中盛產蚌貝又稱「大貝湖」，民國 53 年後始稱澄清湖，其水源來自高屏溪流程約 9 公里[2]，以集水區面積約 3.58 平方公里，湖水面積 1.11 平方公里，滿水位面積 10.3 公頃，總蓄水量 500 萬立方公尺，89 年量測剩餘 435.7 萬立方公尺[7]，現以蓄水及觀光為主。

澄清湖水庫原為一低窪地區，於民國 41 年經人工整地建壩蓄水而

成。壩身高度 6m，壩頂長度 100m，壩寬 6m。本集水區內之泥砂來源除因地質脆弱容易遭受暴雨逕流沖蝕、集水區人為的擾動及道路開闢造成的表土流失外，本水庫系抽取高屏溪溪水經曹公圳引入，故水中所含之懸浮質亦為水庫砂源之一。

從 81~89 年之累積淤積量約 65 萬 3 仟立方公尺，淤積率 12.8 % 澄清湖水庫係為公共給水而設置之離槽水庫，因此集水區治理規劃應以為維護水庫原計劃之目的為其總目標，而在壩體及集水區地況不變的條件之下，為維護水庫原計劃之功能，必須減少泥砂進入，改善水質及涵養水源以其達到水庫維護及延長水庫壽命之目的[8]。

第二節 南區水庫淤泥之物理性質分析

2.1 南區水庫淤泥之土壤分類與比重分析

南區水庫淤泥之物理性質分析結果如表 5-2.1。在土壤統一分類方面，鏡面、虎頭埤、阿公店、澄清湖等 4 座水庫所取出的淤泥都屬於低塑性黏土（CL），鳳山所取出的淤泥均屬於粉土質砂（SM）。不同水庫淤泥在此範圍定義的 CL，其黏土含量相差極大，如阿公店水庫其黏土含量高達 68%，而鏡面水庫其黏土含量僅達 16% 左右，預期對未來燒結輕質骨材的性質會造成相當影響。經比重試驗結果顯示，大部分的水庫淤泥比重介於 2.70~2.72 之間，唯有鳳山水庫之比重僅有 2.66 左右。在塑性指數（PI）方面，以澄清湖水庫的 PI 值為 50 最高，而鳳山屬於 NP，此因鳳山水庫所取出的土樣中含有部分硬質黑色沉積土質，以標準的土壤試驗程序，無法將此部分硬質黑色沉積土質分解，致使歸類定義為較大粒徑的砂，實際上應屬於黏土質。

表 5-2.1、南區水庫水庫淤泥的物理性質分析

水庫 名稱	土壤 分類	成份(%)				比重	L.L. (%)	P.I (%)	備註
		礫石	砂土	粉土	黏土				
鏡面	CL	0.0	9.9	73.7	16.4	2.70	29.9	7.8	
虎頭埤	CL	0.3	2.4	59.7	37.6	2.73	37.2	19.3	
阿公店	CL	0.0	0.0	31.9	68.1	2.73	47.8	25.2	
澄清湖	CL	1.5	6.9	45.6	46.0	2.72	82.5	50.2	
鳳山	SM	5.5	81.9	11.0	1.6	2.66	-	NP	

2.2 南區水庫淤泥之粒徑分佈

南區水庫的粒徑分佈如圖 5-2.1，由圖中可以發現鳳山水庫的粒徑分佈有 70% 土樣的粒徑是大於 1 mm，較偏向細砂的分佈，相較於其他水

庫的淤泥粒徑分佈明顯地是較粗，是否對燒製輕質骨材產生影響，則需進一步作研究探討，另外，試驗結果顯示鏡面水庫淤泥的粒徑分佈也較不均勻，絕大部分的淤泥分佈於 0.038 0.074 mm，而澄清湖與虎頭埤水庫的淤泥相較前面兩水庫有較小的粒徑，各粒群分佈也較均勻。南區五座水庫中淤泥的粒徑以阿公店為最小，有 90%以上的淤泥粒徑是小於 0.020 mm，對於燒結輕質骨材的能源節省可能有正面的幫助，然而各水庫的淤泥的燒製技術，需綜合考慮各種條件作整體而詳細的分析討論。

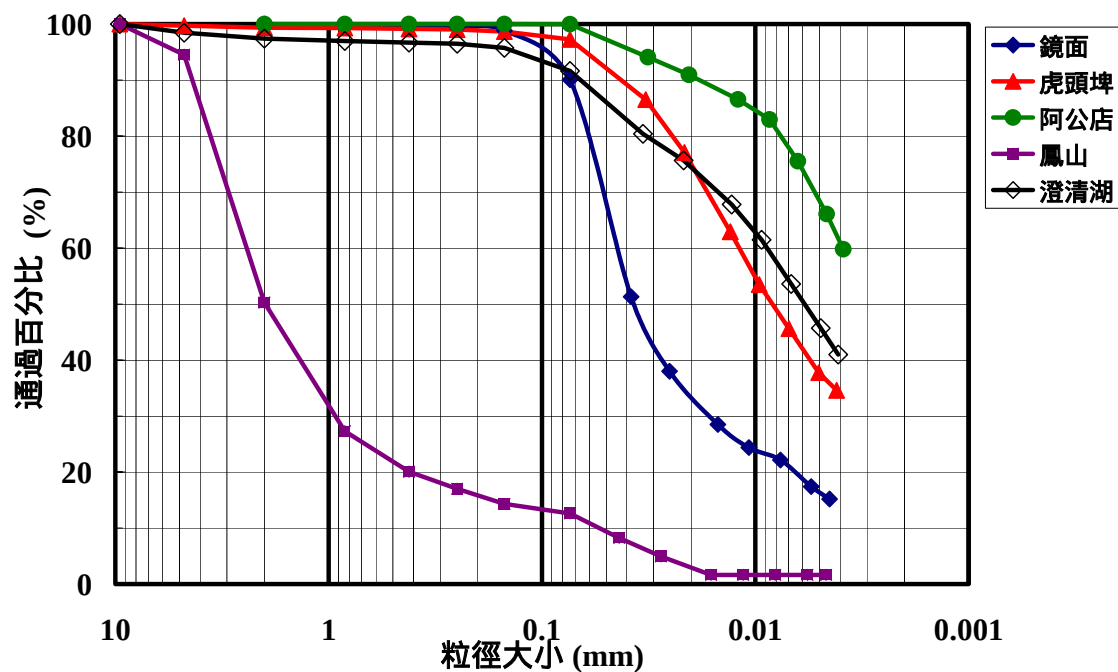


圖 5.2-1 南區水庫淤泥粒徑分佈圖

第三節 南區水庫淤泥之化學成分分析

水庫淤泥的化學性質分析乃採化學藥品定量定性分析法，主要可分析得到 SiO_2 、 Al_2O_3 及 Fe_2O_3 等化學成分比例，表 5-3.1 為台灣南區水庫淤泥化學成分分析結果，其中以二氧化矽（ SiO_2 ）為主成分，含量介於 56~72% 之間，三氧化二鋁（ Al_2O_3 ）約 8~18%，三氧化二鐵（ Fe_2O_3 ）約 4~6%。若將分析結果定位於 Riley 之可膨脹化學成分的三相圖上，如圖 5-3.1~5-3.5 所示。由圖中可知，虎頭埤及澄清湖水庫，其所取得淤泥之化性成分皆落於可膨脹之化性三相圖內，鏡面水庫及阿公店水庫淤泥之化性成分則位於三相圖之邊緣，就燒結理論可知，上述 4 座水庫所取得之淤泥，應可燒結成良好性質之輕質骨材，惟鳳山水庫取得之淤泥其 SiO_2 含量甚低，未達 50%，是否能成功燒製得輕質骨材，得需實際進行旋窯試燒方可得知。

表 5-3.1 南區水庫水庫淤泥的化學性質分析

水庫名稱	SiO_2 %	Al_2O_3 %	Fe_2O_3 %	其他 %
鏡面	74.02	10.68	4.20	11.10
虎頭埤	71.45	13.76	4.28	10.51
阿公店	53.03	22.32	8.56	16.09
鳳山	16.32	39.39	2.65	41.64
澄清湖	65.73	18.78	4.35	11.14

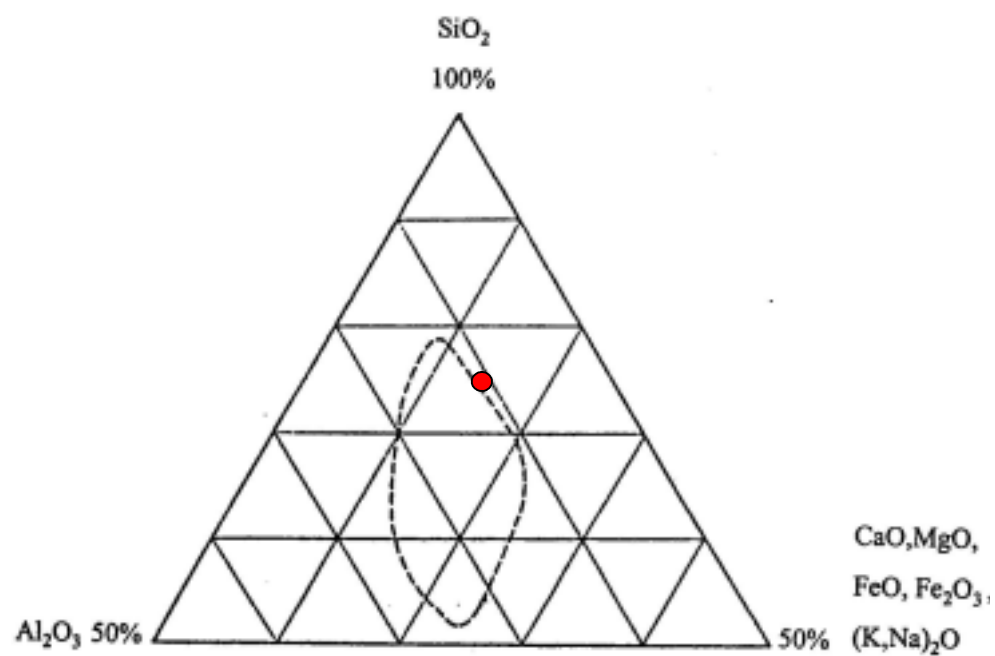


圖 5-3.1 鏡面水庫淤泥化學成分三相圖

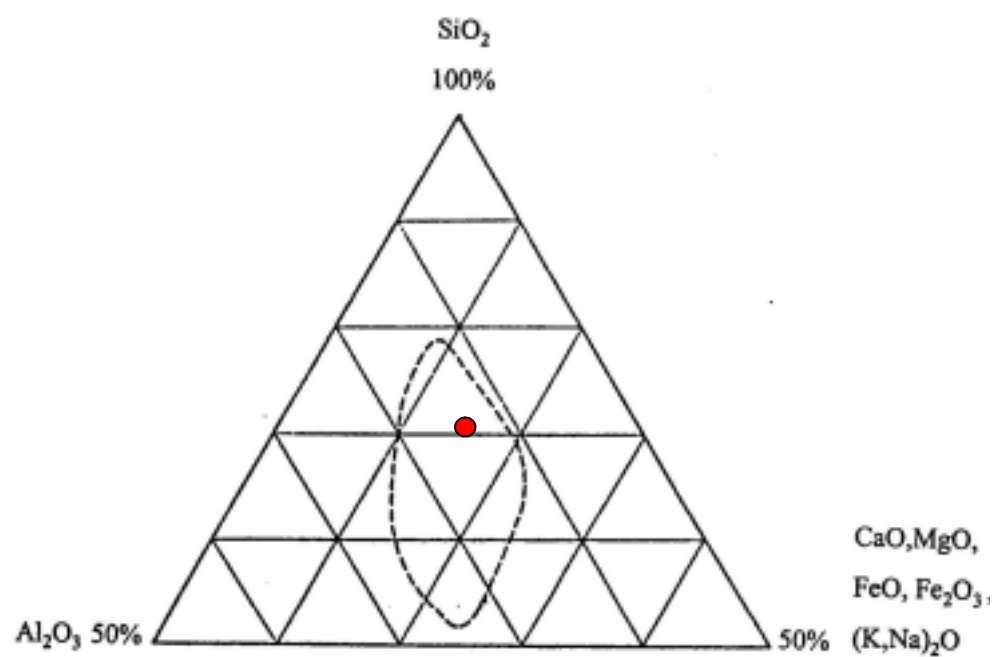


圖 5-3.2 虎頭埤水庫淤泥化學成分三相圖

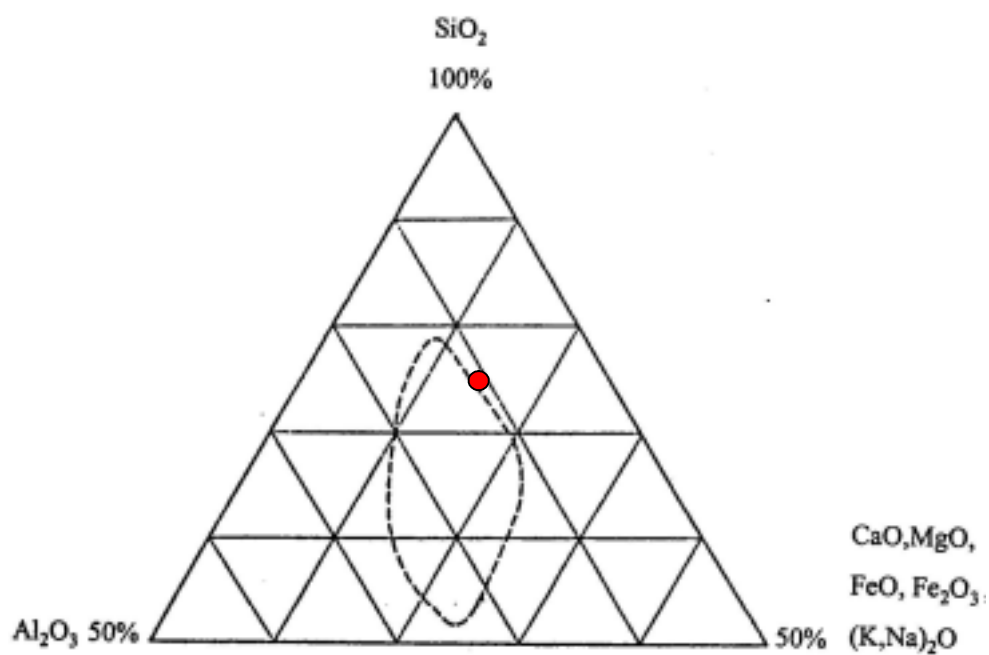


圖 5-3.3 阿公店水庫淤泥化學成分三相圖

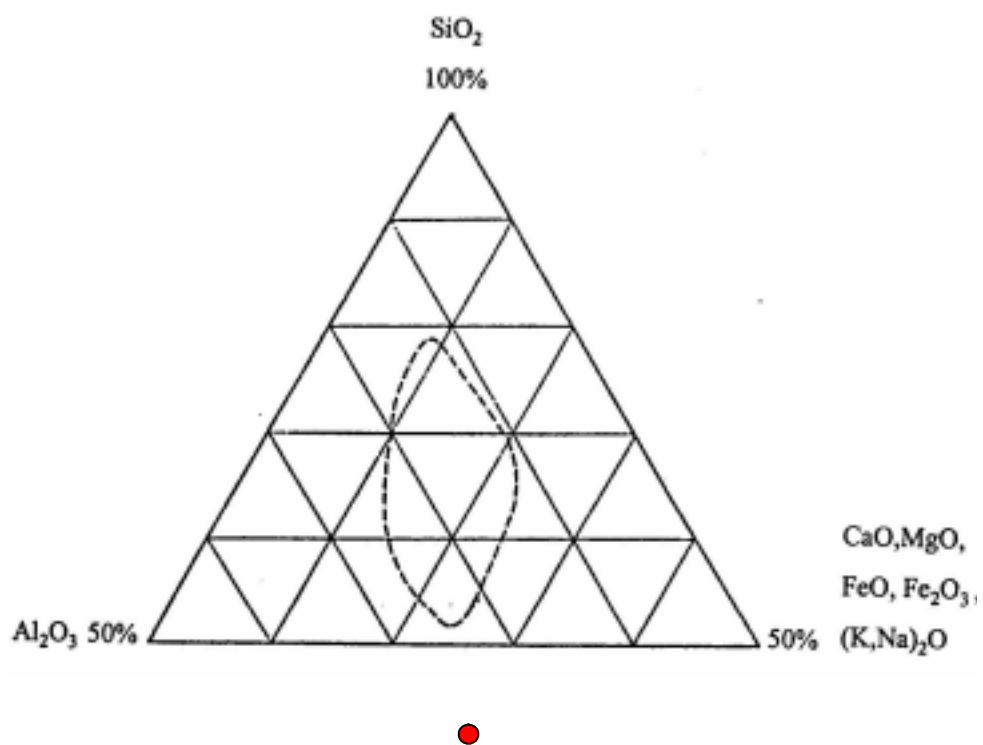


圖 5-3.4 鳳山水庫淤泥化學成分三相圖

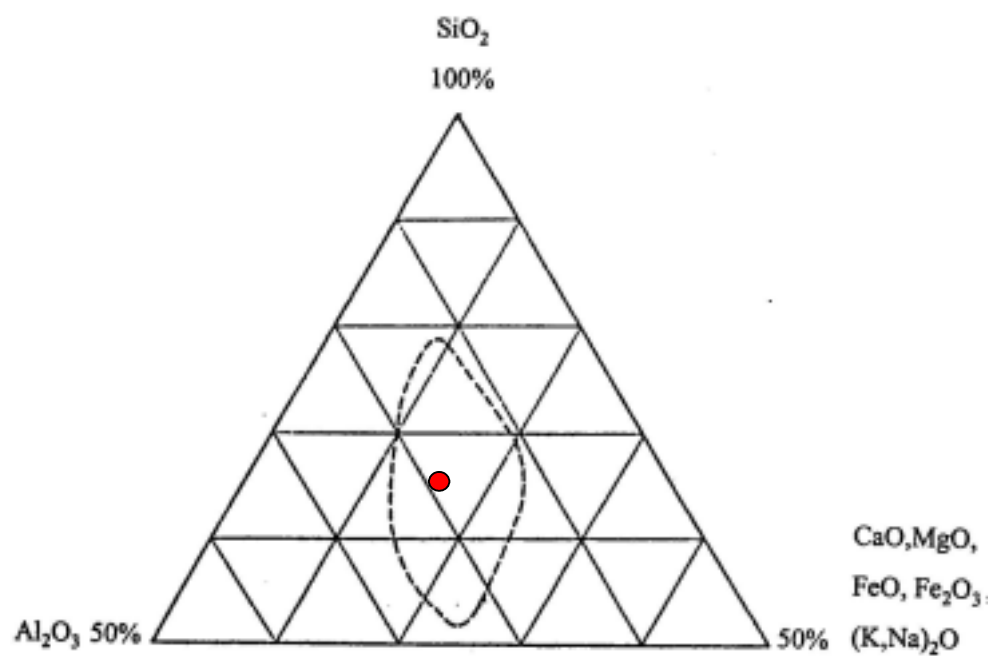


圖 5-3.5 澄清湖水庫淤泥化學成分三相圖

參考文獻

1. 「台灣水之源-台澎金馬水庫霸堰簡介」, 經濟部水利處, 民國 90 年 12 月。
2. 楊豐榮, 「台灣南部水資源開發利用」, 土木水利, 第三十卷, 第二期, 第 26-33 頁, 2003。
3. 「虎頭埤、鹽水埤、德元埤、內埔子水庫第二次安全評估計劃總報告」, 台灣省農田水利會, 1998。
4. 楊錦釧, 阿公店水庫更新對阿公店溪含砂濃度之影響, 曹公農業水利研究發展基金會研究報告, 新竹, 1998。
5. 「阿公店水庫更新改善計劃先期作業規劃專題報告」, 台灣省水利局, 1990。
6. 許盈松等, 「水庫淤泥再生資源技術研究(1/4)」, 經濟部水利署, 2002。
7. 「澄清湖水庫集水區調查治理規劃報告」, 台灣省自來水公司, 1993。
8. 台灣自來水有限公司, 「大高雄地區飲用水改善相關計劃-澄清湖及鳳山水庫淤泥清淤規劃」, 黎明工程顧問公司執行 (1995)。

第六章 水庫淤泥輕質骨材之性質

第一節 前言

本研究針對 15 座水庫淤泥，經試驗室程式控制電爐及商業用旋窯所製造的不同輕質骨材，進行顆粒密度（比重）與吸水率等物理性質試驗，及所燒結骨材表面狀況的探討，皆於第二節中作詳細的分析比較，另外骨材的單顆粒抗壓強度及筒壓強度等力學性質試驗，則論述於第三節之中。

日前學者一致認為燒製人工輕質骨材最佳溫度介於 1100~1250 之間，因此本研究燒結時的溫度則採用 1200℃，經過台灣科技大學試驗室之程式控制電爐作初步測試，結果顯示大部份之水庫淤泥均可燒結成輕質骨材，但由於燒結時間受限於實驗室電熱爐升溫的速度，導致燒結時間長達 1 天。為求大量產製，本研究另外使用欣得股份有限公司所提供之旋窯燒製骨材，並根據實驗室燒結經驗，燒製溫度設定為 1210℃，旋窯轉速固定在每分鐘 4 圈，燒結時間大約 30 分鐘左右，成功地將 15 座水庫淤泥燒結為輕質骨材。本章則進行骨材的工程性質試驗及試驗分析。

第二節 水庫淤泥輕質骨材之物理性質分析

2.1 輕質骨材表殼狀況

輕質骨材組織方面最大的特點在於材質中含有相當比例的孔隙。骨材組織中的孔隙可分為表面孔隙與內部孔隙兩種。表面孔隙的存在，會增加骨材吸水率、降低骨材強度和硬度，所以對混凝土工作性不利，但是反而會增加骨材與水泥漿握裹強度，耐久性則不佳。內部孔隙則對吸水率較不會有影響，但具有降低骨材單位重之效果。

本研究由不同水庫淤泥輕質骨材表面狀況，可區別黏土含量的高低（15 座水庫淤泥輕質骨材照片如第七章）。如比較石門水庫及翡翠水庫兩座淤泥，雖然在土壤統一分類法均定義為『CL』，但因石門水庫淤泥的黏土含量較高，具有較高的 PI 值，於高溫燒結後，可在輕質骨材表面形成光滑狀的玻璃相外殼，顏色為紅褐色；至於翡翠水庫淤泥的黏土含量較低，具有較低的 PI 值，於高溫燒結後，可在輕質骨材表面形成較粗糙的外殼，顏色為淺紅褐色。此即為黏土含量高低所造成的影響。

2.2 顆粒密度（比重）

比重為輕質骨材最重要的物理性質，一般常重骨材比重約為 2.4~2.7 之間，常重混凝土單位重則為 $2300\sim2400\text{kg/m}^3$ 左右。而輕質骨材可依用途有不同比重需求，輕質骨材混凝土一般要求單位重低於 2000kg/m^3 ，相對應之輕質骨材比重大約須低於 1.7~1.8；若應用於非結構輕質骨材混凝土或隔熱輕質骨材混凝土方面，則輕質骨材比重甚至低於 1.0，亦即比水的比重小，全部都會浮在水面上。

本研究由程式控制電爐及商業用旋窯所燒製的 15 座輕質骨材，程式控制電爐燒結溫度為 1200，旋窯燒結溫度為 1210 及旋窯轉速為 4 轉/min。試驗結果如圖 6-2.1 所示。顯示以程式控制電爐燒製的輕質骨材，在相同燒結條件下，以澄清湖及鳳山水庫淤泥所燒製的輕質骨材，其比重較小約在 1.1~1.2 之間；其次為仁義潭、阿公店、石門、大埔等水庫淤泥所燒製的輕質骨材比重為 1.3~1.5 之間；其餘水庫如翡翠、青

草湖、寶山、明德、明潭、日月潭、鏡面、虎頭埤、白河等水庫淤泥所燒製的輕質骨材比重為 2.0~2.2 之間，已不滿足輕質骨材比重之要求。至於，透過旋窯燒製的輕質骨材，在相同燒結條件下，以澄清湖水庫淤泥所燒製的輕質骨材比重為 0.7 最低；其次為仁義潭、阿公店、石門、鳳山、明德、寶山、日月潭等水庫淤泥所燒製的輕質骨材比重為 1~1.3 之間；明潭、白河等水庫淤泥所燒製的輕質骨材比重為 1.5~1.7 之間；其餘水庫如翡翠、青草湖、大埔、鏡面、虎頭埤等水庫淤泥所燒製的輕質骨材比重為 1.7~2.1 之間。由此顯示在相同燒結情況下，不同水庫淤泥所燒製的輕質骨材比重並不相同，而且由旋窯所燒製得知輕質骨材，由於溫度歷程控制較容易，因此燒結所得之輕質骨材比重亦較實驗室電熱爐為低。在物理性質分析方面，可由黏土含量與 PI 值分析之。如圖 6-2.2 及圖 6-2.3 所示，以程式控制電爐燒製的輕質骨材，不同水庫淤泥所含得黏土含量愈高，則輕質骨材的比重愈小；相同地，不同水庫淤泥的 PI 值愈高，則輕質骨材的比重亦愈小。顯示在水庫淤泥的黏土含量與 PI 值可作為判斷所燒製輕質骨材的比重的大小。

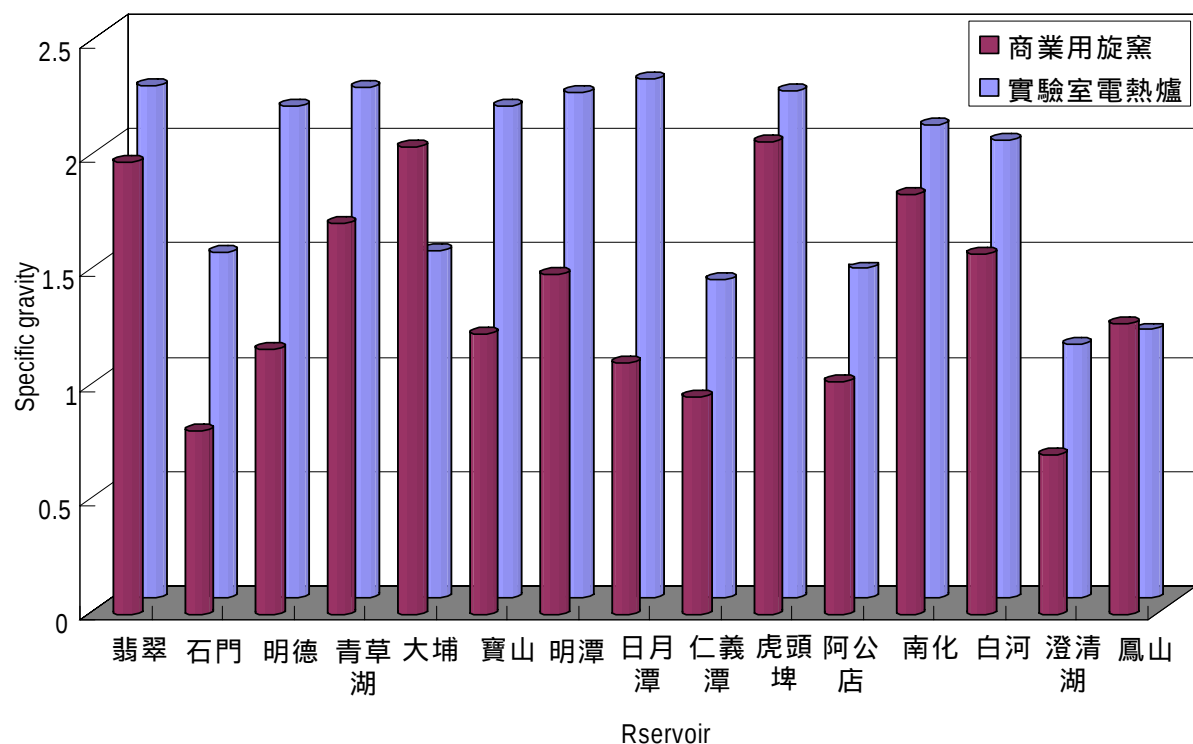


圖 6-2.1 不同水庫淤泥於 1200 高溫燒結顆粒輕質骨材比重的比較

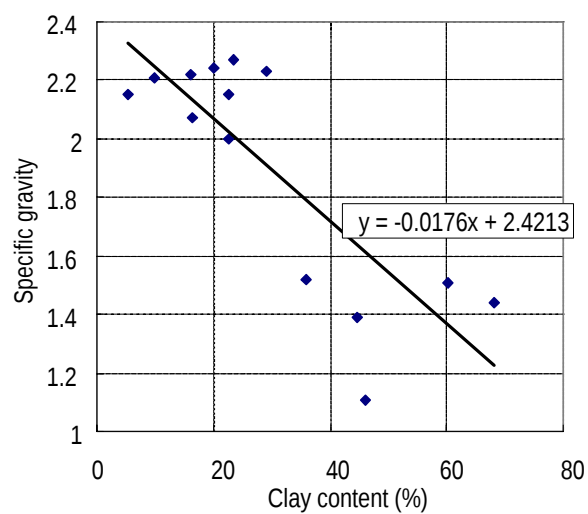


圖 6-2.2 黏土含量與比重關係圖
(電熱爐 1200 燒結)

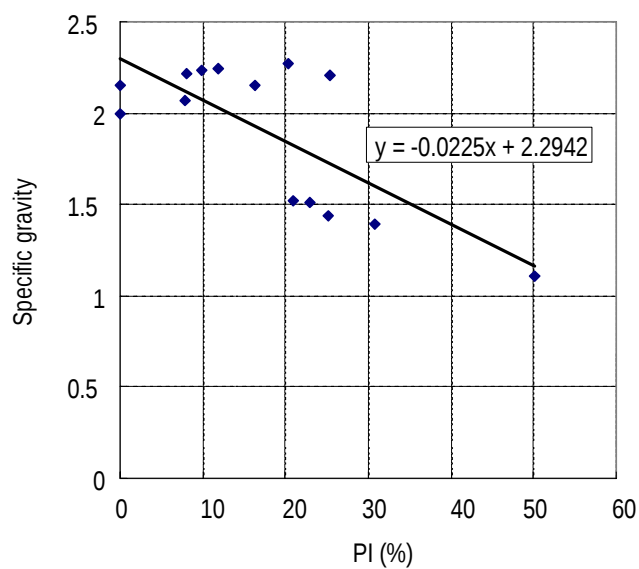


圖 6-2.3 塑性指數與比重關係圖
(電熱爐 1200 燒結)

2.3 吸水率

輕質骨材會因骨材組織表面孔隙大或表層無產生玻璃化，致使骨材吸水率增大。本研究由程式控制電爐及商業用旋窯所燒製的 15 座輕質骨材吸水率均小於 10 %，如圖 6-2.4 與圖 6-2.5 所示。尤其，以程式控制電爐的輕質骨材吸水率甚至低於 1 %。因此，顯示水庫淤泥輕質骨材具有低吸水率的性質。

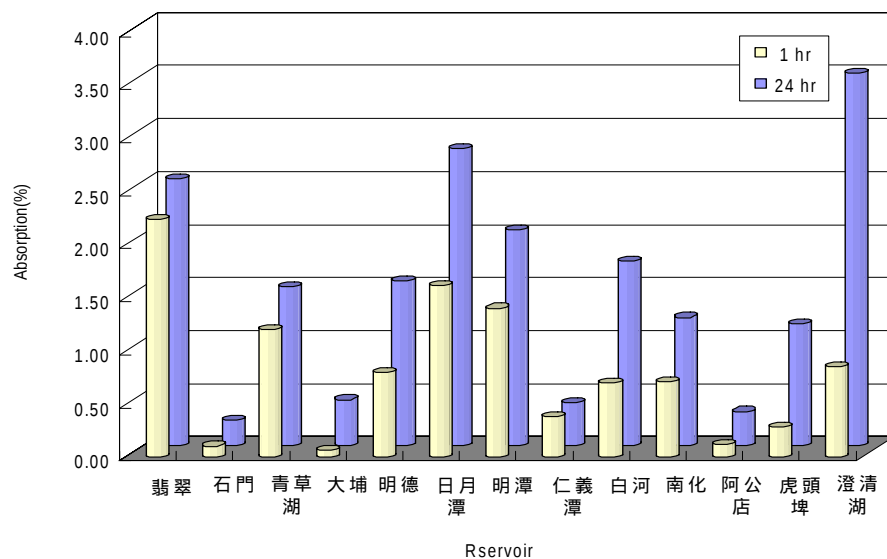


圖 6-2.4 不同水庫淤泥單顆粒吸水率比較（電熱爐 1200 燒結）

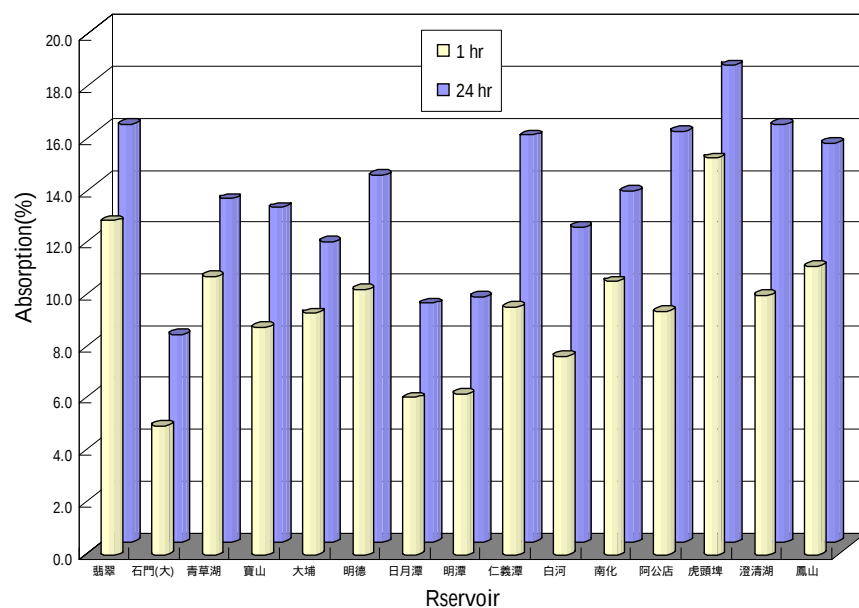


圖 6-2.5 不同水庫淤泥單顆粒吸水率比較（旋窯 1200 燒結）

第三節 水庫淤泥輕質骨材之力學性質分析

3.1 骨材顆粒抗壓強度

骨材抗壓強度與硬度為骨材主要的物理性質之一。骨材強度與硬度愈高，可提高混凝土強度與耐磨性。一般而言，在輕質骨材混凝土中，骨材強度可能大於或小於水泥砂漿強度；惟輕質骨材彈性模數大多低於水泥砂漿，在混凝土受力情況下，輕質骨材成為次要的承力系統，混凝土內之應力主要由水泥砂漿承擔，輕質骨材分擔的應力則依彈性模數值及應力分配情形而定[1,2]。當輕質骨材之彈性模數小於骨材顆粒周界水泥砂漿彈性模數時，在混凝土承受壓力負荷下，骨材顆粒上下方將產生張力場，而其兩側則形成壓力場，此與常重混凝土其骨材顆粒上下方為壓力，兩側為張力場之情況完全相反。當混凝土中張應力超過容許張應力強度時，混凝土將會產生龜裂現象，輕質骨材混凝土發生在骨材上方，至於常重混凝土張應力發生於骨材與水泥漿界面上，與負載之方向成垂直，即在骨材之左右兩側[3]。輕質骨材強度愈高，對提昇混凝土力學性質是有所幫助的。

本研究由程式控制電爐及商業用旋窯所燒製的 15 座水庫淤泥輕質骨材，其力學性質試驗顯示，以程式控制電爐燒製的輕質骨材，由於燒結較均勻，每個輕質骨材品質亦較均勻，骨材在相同燒結條件下，以澄清湖所燒製的輕質骨材顆粒抗壓強度值最低，但仍達到 40 kgf/cm^2 以上，其餘水庫淤泥介於 $100\sim 400 \text{ kgf/cm}^2$ 之間如圖 6-3.1 所示。至於，以商業用旋窯所燒製輕質骨材，由於受溫較不均勻，其輕質骨材顆粒抗壓強度變化較大，如表 6-3.1 係以石門水庫淤泥經旋窯製造輕質骨材的 30 顆顆粒抗壓強度結果，由其平均值可發現，以旋窯產製輕質骨材因比重較低，相對其顆粒抗壓強度亦較差，僅約 $20 \sim 70 \text{ kgf/cm}^2$ 之間。比較 30 顆骨材顆粒抗壓強度平均值與輕質骨材比重關係如圖 6-3.2，顯示，輕質骨材顆粒比重愈大，其顆粒抗壓強度平均值會愈大，其原因比重較大者，顆粒內部孔隙小，組織較緻密，相對地會提昇其顆粒抗壓強度。

表 6-3.1 輕質骨材顆粒抗壓強度結果 (MPa)

比重 編號	0.7	0.8	1.1	1.25	1.5
1	17.62	9.03	24.40	33.12	67.03
2	17.36	37.01	25.40	12.41	44.00
3	16.13	18.48	33.69	51.49	25.96
4	27.11	33.80	20.57	24.67	50.41
5	14.12	17.56	27.02	57.36	96.98
6	28.57	31.67	19.19	36.67	53.99
7	28.09	22.30	41.78	21.77	72.83
8	30.94	15.23	26.78	82.44	80.24
9	18.39	32.66	33.10	24.61	65.44
10	30.49	34.70	28.29	67.85	102.05
11	13.16	26.28	32.60	32.30	40.11
12	17.13	29.60	31.74	29.11	31.69
13	23.68	44.28	36.92	52.87	55.95
14	46.99	33.80	50.02	29.56	73.38
15	31.69	23.05	45.30	52.84	94.06
16	27.78	14.09	43.34	46.42	22.33
17	13.22	42.78	31.86	35.21	96.80
18	14.71	34.03	37.76	66.39	95.35
19	27.82	22.07	26.95	38.03	55.91
20	34.46	31.17	15.63	42.28	86.12
21	26.28	14.91	70.42	85.25	66.91
22	53.50	21.81	91.95	59.29	42.78
23	14.08	15.60	29.46	52.50	84.61
24	38.47	22.71	24.69	23.40	66.89
25	21.47	28.23	33.58	23.63	106.82
26	19.39	9.12	21.31	44.32	96.34
27	5.20	29.95	18.01	40.35	69.31
28	25.96	17.09	28.34	47.18	85.09
29	27.86	64.16	48.40	37.33	106.93
30	35.52	47.79	33.16	26.11	38.66
平均值	24.91	27.5	34.39	42.56	69.17

備註：淤泥取自石門水庫，以商業用旋窯燒製的輕質骨材

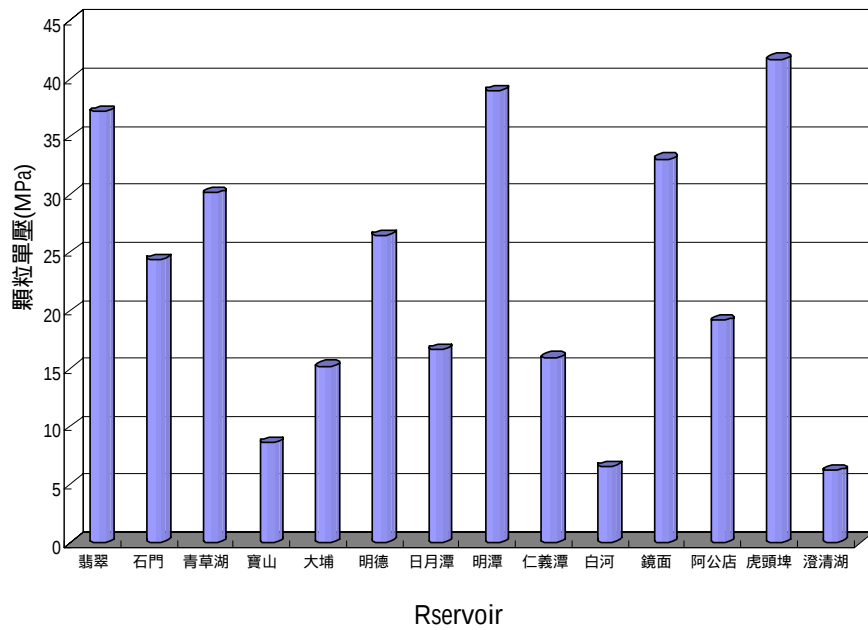


圖 6-3.1 不同水庫淤泥顆粒抗壓強度比較
(電熱爐 1200 燒結)

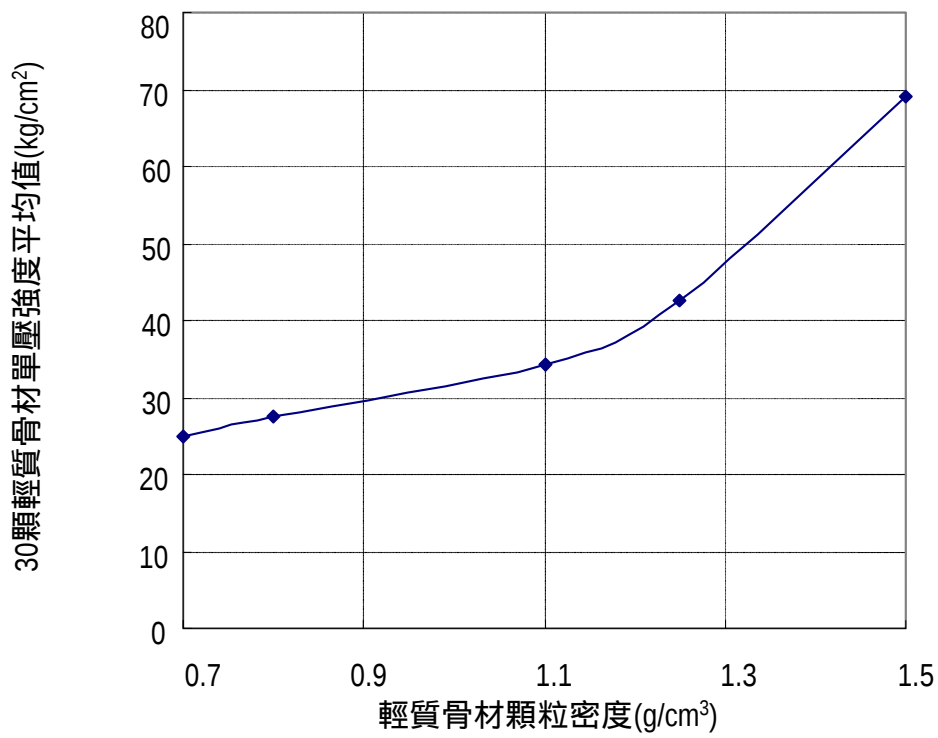


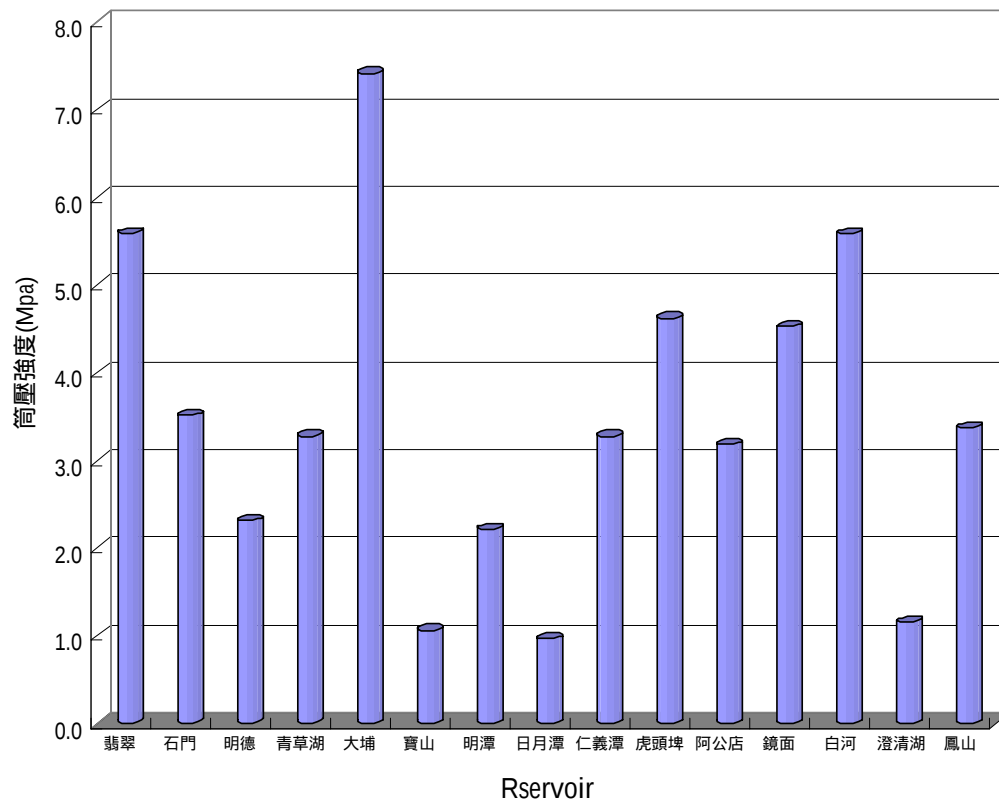
圖 6-3.2 輕質骨材顆粒強度與顆粒密度比較

3.2 筒壓強度與鬆單位重

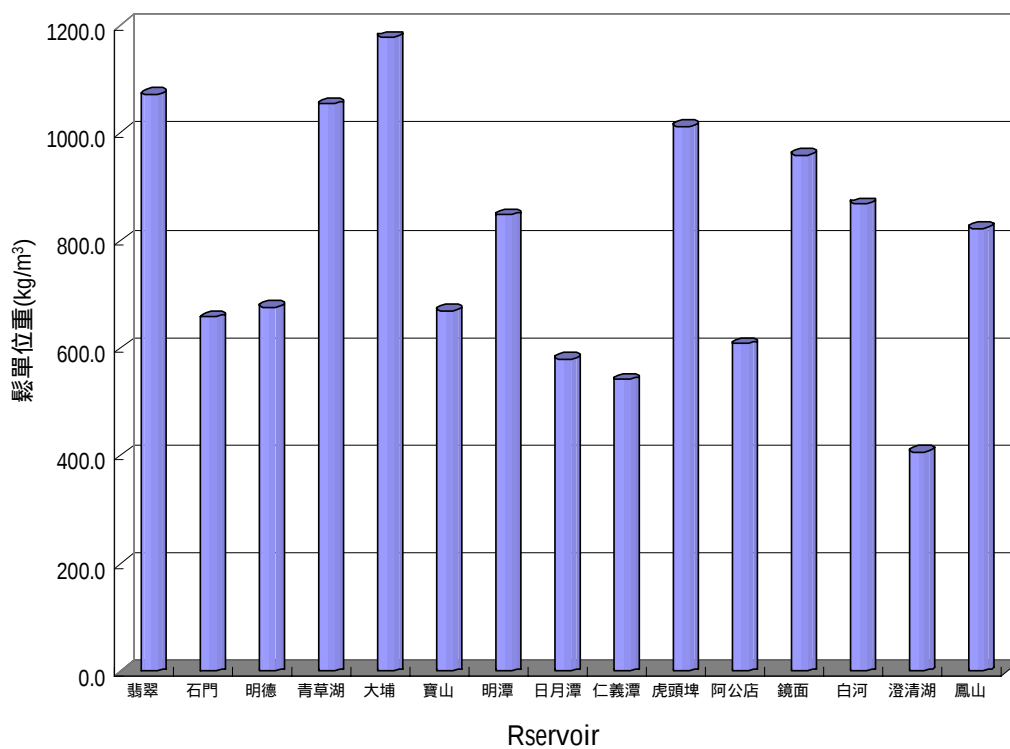
以旋窯燒製所得之水庫淤泥輕質骨材的筒壓強度如圖 6-3.3 所示，由圖中可知，筒壓強度大致介於 1.0 MPa ~ 7.5 MPa，其中以日月潭水庫淤泥所燒製之輕質骨材筒壓強度為最低，大約在 0.9 MPa 左右，大埔水庫淤泥輕質骨材的筒壓強度為 7.4 MPa，擁有最高的筒壓強度，在 15 座的水庫淤泥輕質骨材中，大部分水庫淤泥輕質骨材的筒壓強度介於 3.0 MPa ~ 4.5 MPa 之間。

水庫淤泥輕質骨材鬆單位的試驗結果如圖 6-3.4 所示，水庫淤泥輕質骨材鬆單位重約介於 400 kg/m^3 ~ 1200 kg/m^3 ，有 8 座水庫淤泥輕質骨材鬆單位重是介於 800 kg/m^3 ~ 1200 kg/m^3 ，其中大埔水庫所得之淤泥燒製成的輕質骨材擁有最高鬆單位重（約 1150 kg/m^3 ），其餘 7 座的水庫淤泥輕質骨材鬆單位重，除了澄清湖水庫是低於 400 kg/m^3 外，其他 5 座水庫淤泥輕質骨材的鬆單位重都在 600 kg/m^3 左右。

比較筒壓強度與輕質骨材鬆單位重的關係如圖 6-3.5 所示，顯示筒壓強度愈大其鬆單位重愈高，具有良好的線性關係；以及比較筒壓強度與輕質骨材顆粒抗壓強度的關係如圖 6-3.6 所示，顯示筒壓強度愈大其輕質骨材顆粒抗壓強度愈高。因此，筒壓強度可作為輕質骨材的品質參考指標之一。



6-3.3 水庫淤泥輕質骨材筒壓強度比較 (旋窯 1210 燒結)



6-3.4 水庫淤泥輕質骨材鬆單位重比較 (旋窯 1210 燒結)

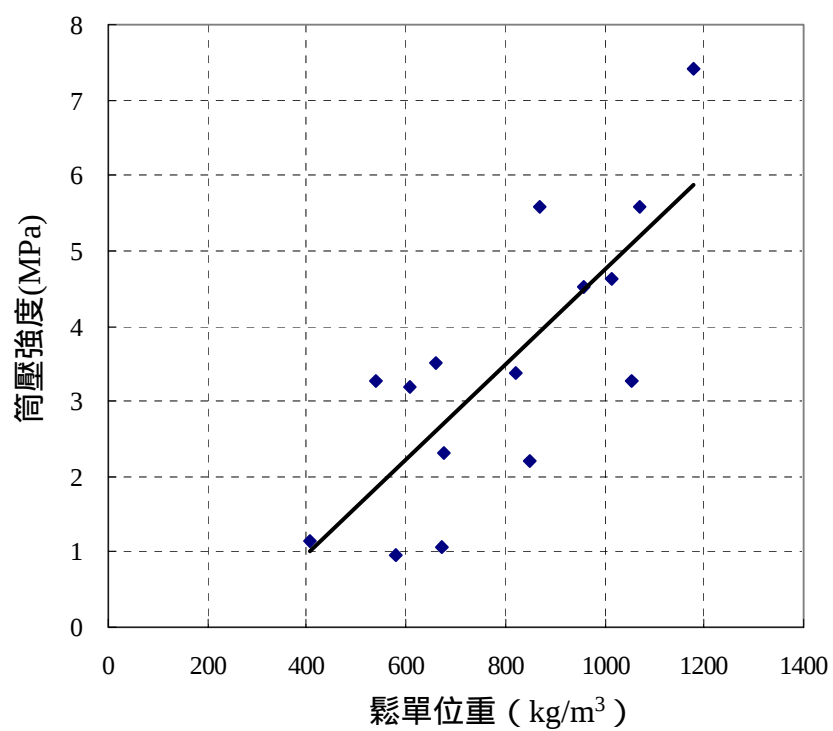


圖 6-4.5 輕質骨材鬆單位重與輕質骨材筒壓強度比較 (旋窯 1210 燒結)

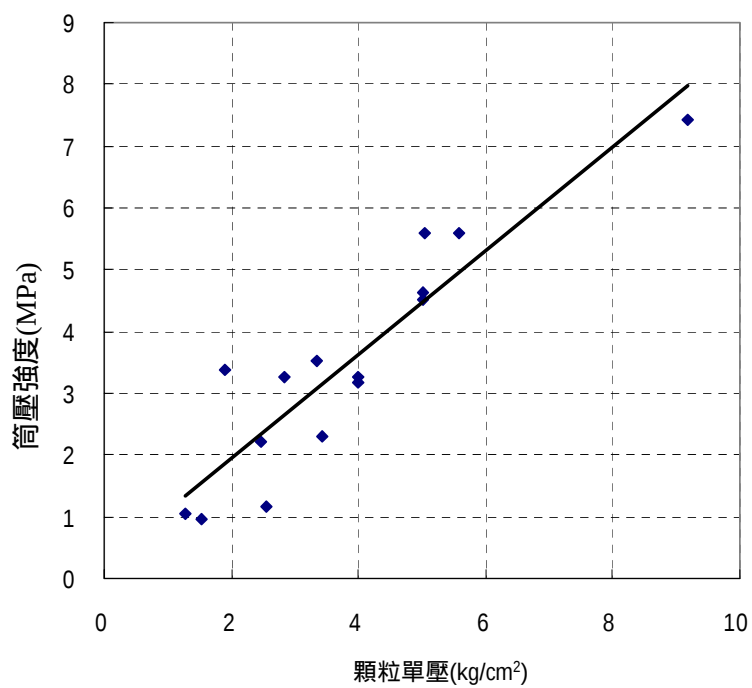


圖 6-3.6 輕質骨材顆粒抗壓強度與輕質骨材筒壓強度比較 (旋窯 1210 燒結)

3.3 燒結機具的影響

比較電熱窯及旋窯加熱的不同，由相同溫度加熱結果顯示，電熱爐係以程式控制升溫速率進行高溫加熱，在固定升溫速率為 $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ，升溫時間約為 6 小時（240min），加熱溫度至 $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，而後再維持此溫度一定時間後，再緩慢降至常溫，整個加熱歷時約為 24 小時左右。由於加熱速率降低及加熱時間較長，使輕質骨材生料由內至外均勻受熱，於燒結後，剖開輕質骨材斷面，由內至外均呈現紅褐色，具有良好的硬度及極佳強度，如輕質骨材的硬度可達 7 左右，而顆粒單壓強度最高達到 40 MPa 。至於，旋窯加熱速度較快，可在輕質骨材表面形成具有玻璃相的外殼，而因能滯含內部氣體，因此可產生體積膨脹，提高輕質骨材的經濟效益。旋窯加熱方式可分為預熱段及加熱段兩步驟，以快速加熱方式加熱，造成輕質骨材生料表面溫度較高，形成玻璃相的熔融狀。生料內部溫度較低，所逸出的氣體可由表面滯含，形成體積膨脹。由於生料內部所受溫度較低，於燒結後，剖開輕質骨材斷面，由內部呈現灰色，而外殼呈現紅褐色，具有良好的硬度及適宜的強度，如輕質骨材的硬度可達 7 左右，而顆粒抗壓強度可達到 $2\sim 6\text{ MPa}$ 左右。

參考文獻

1. Yen T, Chen H.J., Huang Y. L., and Ko. C. T.” The Dividing Strength of Light-weight Aggregate” Journal of the Chinese Institute of Engineerings, Vol.21, No5, pp.611-618, 1998.
2. Chen H.J., Yen T., Lia T.P., and Huang Y. L.,” Determination of the Dividing Strength and its Relation to the Concrete Strength in Lightweight Aggregate Concrete”, Elsevier Science Ltd., 1999.
3. 陳豪吉 (顏聰教授指導), 「以台灣地區生產之「輕質骨材探討輕質混凝土之配比、製作及強度性質」, 國立中興大學土木系博士論文, 1998。

第七章 省能源、低污染的輕質骨材燒結製成與技術研發

第一節 前言

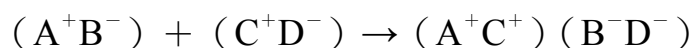
15 座水庫淤泥利用試驗室程式控制電爐及商業用旋窯，皆成功地燒製出輕質骨材，本章節針對不同水庫淤泥的化學成分及雛粒性質等先天條件與處理狀況，在相同的燒製條件下（旋窯燒結的溫度為 1210℃，旋窯轉速為每分鐘旋轉 4 圈），探討燒製輕質骨材的影響。

第二節 輕質骨材燒製技術之回顧

2.1 燒結理論

原料礦物在高溫燒結下，個別具有其固有的熱化學反應。反應生成主要為使製品成熟趨於安定化，而經過燒結的製品很難透過其他的處理方式，改變其狀態結構。由此觀之燒結技術，在輕質骨材的製造中具有格外重要的意義。

燒製輕質骨材的原料是由粉末系統所形成，經燒固而堅硬，一般稱為燒結（Sintering）。燒結的機構，是粉末顆粒在接觸點處，由顆粒所構成的離子，因熱的振動擴散使其接觸或聚合，進而間隙被排除而趨於緻密。今若以兩物質（ A^+B^- ）與（ C^+D^- ）混合加熱，並使其升溫至某度時，則彼此間的離子會在顆粒表面擴散而發生如下反應：



由此觀之顆粒接觸點愈多，亦即顆粒微細，並予以最緻密地填充時，其反應發生愈快。除以上所述外，還有其他各種機理在起作用，但主要是由某種驅動力（熱驅力），使主要成分發生轉移而導致緻密化及強度增加。

水庫淤泥燒製成為輕質骨材之原理，相似於將坯體燒結為陶品，乃將粉末原料，做初步的造粒或成形，此粒子稱為雛粒，再利用熱處理過程（即燒結技術）使其硬固，製成輕質骨材。然而燒製輕質骨材及燒製陶藝品，兩者最大相異點在於，輕質骨材除了表面要如陶藝品有光滑細緻的玻璃層外，內部還必須將燒結過程中產生的氣體，包含於外部的玻璃成內，製成內部膨脹而外部堅硬的輕質骨材，相反地品質較佳的陶藝品，則必須將所有氣體趕出，不產生膨脹現象，使其擁有光滑而細緻的陶品。

2.2 人造輕質骨材的膨脹機理

原料的發泡為輕質骨材製造上最重要的機理，於 1948 年 J.E.Conley 和 Hewitt Wilson 共同研究及 1950 年 C.M.Riley 研究均指出，原料發泡必須滿足兩種條件，第一條件為：原料被加熱到高溫時，必須生成黏性

的玻璃相，能封密由骨材內部放出的氣體。第二條件為：於高溫下生成黏性玻璃相後，原料中必具放出氣體的物質。即原料被加熱到放出氣體前，該表層必須生成黏性的玻璃相。根據 C.M.Riley 的研究成果顯示，輕質骨材燒成溫度在 $1100\sim 1300^{\circ}\text{C}$ 範圍內，容易產生發泡的原料化學組成如圖 7-2.1，主要由 SiO_2 、 Al_2O_3 及其他成分（ CaO 、 MgO 、 FeO 、 Fe_2O_3 、 K_2O 、 Na_2O ）之三相圖內虛線範圍。至於第二條件所述的膨脹氣體發生的原因，有許多不同學者的論見。經整理相關文獻資料，顯示，膨脹原料的化學成分及礦物成分均對輕質骨材的性質產生極大的影響。

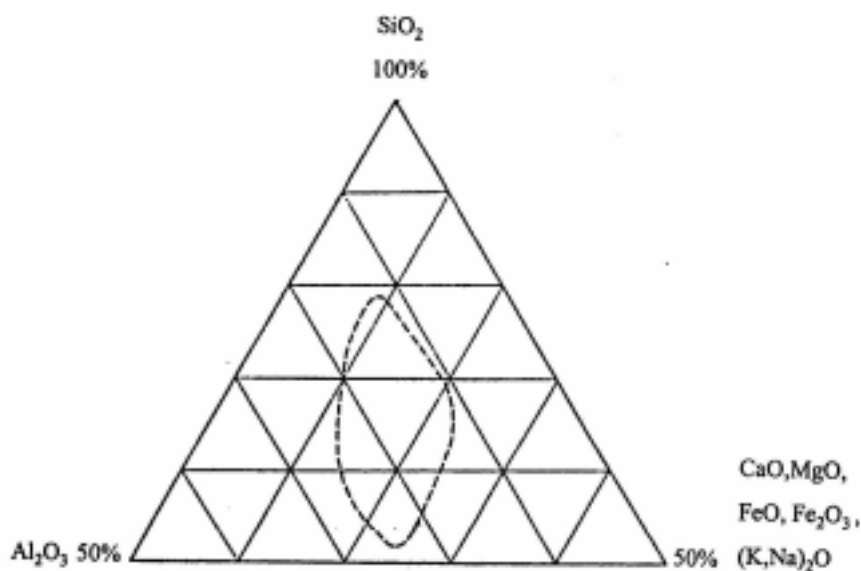


圖 7-2.1 具膨脹性黏土的化學比例分配圖

2.3 影響燒結的因素

由燒成而影響品質的因素，大致上有材料的化學成分、礦物組成、粒度分佈、填充密度及體密度、燒成溫度與時間、冷卻速度以及燒成中的氣氛等。茲將其重要項目，簡單敘述如下：

1. 材料化學

在燒結的過程中影響本質的因素，首推材料的化學組成，針對每一化學成分的影響討論如下，並整理於表 7-2.1：

- (1) SiO_2 ：在原料中最主要成分為 SiO_2 ，一般高達 50% 以上。 SiO_2 含量愈高，則高溫熔液黏度愈高，但對於輕質骨材的性質影響，增加 SiO_2 將降低輕質骨材顆粒強度。
- (2) Al_2O_3 ：增加 Al_2O_3 將增加輕質骨材顆粒強度及密度，可採用水雲母類含量較高，石英含量較少的粒土原料。
- (3) CaO 、 MgO 、 FeO 、 Fe_2O_3 、 K_2O 、 Na_2O 等助熔劑： CaO 、 MgO 、 FeO 、 Fe_2O_3 、 K_2O 、 Na_2O 等助熔劑含量愈多，其高溫溶液粘度越低，會使熔液生成的溫度提高，並且稍提高一點溫度，會使熔液量急劇增加，因此助熔劑量必須為補助及少量。
- (4) 鐵化物：增加鐵化物將增加輕質骨材顆粒強度
- (5) 礦物成分：白雲石在低溫時即放出二氧化碳，此時對膨脹沒有直接影響，需要再與其他成分作用產生碳酸鉀或碳酸鈣，於高溫再分解即可產生對膨脹有效之氣體；赤鐵礦、黃鐵礦、白雲石、方解石可作為發泡劑。在原料雖滿足第一要件，但加熱後沒有足夠氣體產生時，可加入發泡劑。
- (6) 有機質物：具有膨脹性原料一般含有機物，若因風化作用而消失，則有減低其膨脹之傾向。

表 7-2.1 原料化學成份對輕質骨材性質之影響

成份	影響性質
SiO ₂	SiO ₂ 含量愈高，高溫熔液黏度愈高。(資料來源：龔洛書、柳春圃)
CaO、 Mgo、 Feo、K ₂ O、 Na ₂ O 等助熔劑	CaO、Mgo、Feo、K ₂ O、Na ₂ O 等助熔劑含量愈多，其高溫溶液粘度越低，會使熔液生成的溫度提高，並且稍提高一點溫度，會使熔液量急劇增加，因此助熔劑量必須為補助及少量。(資料來源：龔洛書、柳春圃)
SiO ₂	增加 SiO ₂ 將降低輕質骨材顆粒強度。(資料來源：龔洛書、柳春圃)
Al ₂ O ₃	增加 Al ₂ O ₃ 將增加輕質骨材顆粒強度及密度，可採用水雲母類含量較高，石英含量較少的粒土原料。(資料來源：龔洛書、柳春圃)
鐵化物	增加鐵化物將增加輕質骨材顆粒強度 (資料來源：龔洛書、柳春圃)
SiO ₂ 、 CaO、 Mgo、 FeO、 Fe ₂ O ₃	$f_k = 1.1013 - 0.026 \text{ SiO}_2 + 0.1272 (\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}) + 0.0746 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 0.0065 \rho_a$ 式中 f_k—陶粒的筒壓強度 (MPa)； ρ_a—陶粒的堆積密度 (kg/m³)； SiO₂，Fe₂O₃，....—粘土的化學成分 (%)。 (資料來源：前蘇聯陶粒科學研究所建立之相關公式)
白雲石	在低溫時即放出二氧化碳，此時對膨脹沒有直接影響，需要再與其他成分作用產生碳酸鉀或碳酸鈣，於高溫再分解即可產生對膨脹有效之氣體 (資料來源：王櫻茂、顏聰)。
赤鐵礦、 黃鐵礦、 白雲石、 方解石	可作為發泡劑。在原料雖滿足第一要件，但加熱後沒有足夠氣體產生時，可加入發泡劑 (資料來源：王櫻茂、顏聰)。
有機質物	具有膨脹性原料一般含有機物，若因風化作用而消失，則有減低其膨脹之傾向 (資料來源：王櫻茂、顏聰)。

2. 燒脹型輕質骨材的原料礦物成份 (如表 7-2.2 所示)

一般看來，燒結溫度是由化學組成來決定，但礦物於化學組成的不均一性，對燒結有顯著的影響。有關燒脹型輕質骨材的原料礦物成份，相關文獻如下：

(1)王櫻茂及顏聰指出：以 SiO₂ 為主要成分，Al₂O₃ 10~20%，Fe₂O₃ 1~2

%， $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 約 3%~6%， SO_3 約 1~4%，碳約 1~2%。

- (2)前蘇聯陶粒科學研究所指出：原料礦物成份為不同水化雲母類蒙脫石類，高膨脹性粘土原料 $\text{SiO}_2 \leq 60\%$ ， Al_2O_3 14~20%， $\text{CaO} + \text{MgO} \leq 7\%$ ， $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}$ 6~10%， $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 3~5%
- (3)Riley 指出：認為只要其化學成分滿足 SiO_2 、 Al_2O_3 和助熔劑(CaO 、 MgO 、 FeO 、 Fe_2O_3 、 K_2O 、 Na_2O) 組成三角相圖核心區的要求的任何粘土，都是可以膨脹。
- (4)近藤指出：原料礦物成份為蒙脫士、伊利石、綠泥石、沸石等礦物，化學成分 SiO_2 60~70%， Al_2O_3 15~25%， Fe_2O_3 5~10%， $\text{CaO} + \text{MgO}$ 0~5%， $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 3~4%。
- (5)王根元指出：原料礦物成份為伊利石、蒙脫石、綠泥石，化學成分大致落在 Riley 三相圖膨脹範圍內。

表 7-2.2 燒脹型輕質骨材的原料礦物成份

研究學者 或單位	王櫻茂 顏聰	前蘇聯陶粒 科學研究所	Riley	近藤	王根元
礦物 成分	—	不同水化雲母 類蒙脫石類	—	蒙脫士、伊 利石、綠泥 石、沸石等 礦物	伊利石、 蒙脫石、 綠泥石
化學成分	以 SiO_2 為主要成分， Al_2O_3 10~20 %， Fe_2O_3 1~2 %， $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 3 % ~6 %， SO_3 約 1~4 %，碳約 1~2 %。	高膨脹性粘土原料 $\text{SiO}_2 \leq 60\%$ ， Al_2O_3 4~20%， $\text{CaO} + \text{MgO} \leq 7\%$ $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}$ 6~10 %， $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 3~5%	對大量膨脹粘土，頁岩的研究，認為只要其化學成分滿足 SiO_2 、 Al_2O_3 和助熔劑（ CaO 、 MgO 、 FeO 、 Fe_2O_3 、 K_2O 、 Na_2O ）組成三角相圖核心區的要求的任何粘土，都是可以膨脹	SiO_2 60~70% Al_2O_3 15~25% Fe_2O_3 5~10% $\text{CaO} + \text{MgO}$ 0~5% $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 3~4%	化學成分大致落在 Riley 三角相圖膨脹範圍內

3. 粒度分佈

燒結現象是從表面開始進行。表面積越大，亦即粒度越細越可改善其燒成過程。若將顆粒粉碎時，可降低燒結溫度亦節省燃料。

4. 填充密度及體密度

規定原料粉末的粒度分佈狀態，就可以使離粒得到最高的體密度。這對於燒成過程，有很大的影響。顆粒堆積越緻密越容易燒結硬固的成品。

5. 燒成溫度與時間

燒成溫度與燒成時間呈反比例關係。如欲得同一燒成狀態時，若提高燒成溫度則應縮短燒成時間。反之燒成溫度較低時，則需延長燒成時間。燒成速度與燒成時間並無比例關係，而是依指數法則。保持在一定溫度燒下成時，其燒結狀態就能保持一定值。

6. 冷卻速度

冷卻快慢對於燒成雛粒中的晶體大小，尤其是結晶的應力狀態有很大的影響。含有玻璃相的熔化骨材，冷卻的速度會對其玻璃相形成應力。故由冷卻速度的調整以調節內部應變，也就成為非常重要的問題。

7. 燒成中的氣氛

燒成中的氣氛可分為氧化、中性及還原等三種，對於淤泥的化學組成有顯著的影響。因此凡容易起氧化還原作用之氧化物原料，一旦加熱時就會起化學變化。例如含氧化物的淤泥，其若在還原的氣氛中，則有利於燒成。反之若在氧化的氣氛中燒成時，由於 Fe_2O_3 分解會釋出氧，故在粒料燒成時，幾乎同時有起泡現象產生。

2.4 人造輕質骨材膨脹原理（如表 7-2.3 所示）

有關人造輕質骨材膨脹原理，相關文獻如下：

1. 膨脹第一要件「在高溫下形成玻璃相，具有適當的黏滯性，以滯含逸出之氣體。」

相關學者論點如王櫻茂及顏聰指出：粘土若滿足膨脹兩要件，則燒成時表面展溫度升高較快，先融成膠體，再形成玻璃相表面層，此時內部因溫度升高，致使粘土粒內部產生高塑性流體，當氣體逸出時，一面受塑性流體之滯含，一方面未能穿透表面玻璃相層，而在內部形成氣泡使體積膨脹。近藤指出：認為頁岩燒成時膨脹的適宜黏度是 $10^7 \sim 10^8 \text{Pa} \cdot \text{s}$ ，膨脹時黏度高的產生細孔，黏度低的產生大泡，原料的化學成分與溶液的黏度有密切關係。Riley 指出：將 SiO_2 、 Al_2O_3 和熔劑成分的總量作為邊界成分時，在三相圖中虛線所指範圍內的成分，就是能產生膨脹良好的液相範圍。

2. 膨脹第二要件「在高溫達到具有一定粘稠度時，同時須有產生足夠的膨脹氣體」

相關學者論點如王櫻茂及顏聰指出：黏土如果膨脹良好，由熱處理，過程中觀察，最初黏土變成紅色，達到膨脹溫度後轉成暗綠-棕色，此顏色轉變，代表三價鐵離子在膨脹溫度時減價之現象。Riley 指出：鐵化物等分解出的 CO_2 ，一旦與黏土中的鹼性物質相結合，就產生 K_2CO_3 和 $3\text{K}_2\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8 \cdot 2\text{CaCO}_3$ (鈣霞石)等，這些物質在 1200°C 左右的高溫下分解出 CO_2 氣體，促使具有一定黏稠度的熔融礦物產生膨脹。近藤指出：認為，可能是存在於黏土中的含量為 0.5%~1.0% 的有機質對氧化鐵起了還原介質的作用，促使 Fe_2O_3 通過氧化—還原反應變為 FeO 時釋放出的 CO_2 使黏土熔融物膨脹。王根元指出：研究頁岩的膨脹性能，認為促使頁岩膨脹的氣體，主要是在氧化鐵的分解和有機質之間進行的氧化—還原反應的產物。同時還認為，還原介質不管是物料的內在因素還是外部因素，對氧化鐵的還原都起有效作用。如果物料的內部、外部都有還原介質，則膨脹更好。

表 7-2.3(a) 人造輕質骨材膨脹原理

膨脹要件	研究學者	論述
(一)在高溫下形成玻璃相，具有適當的黏滯性，以滯含逸出之氣體。亦即產生適當黏度的溶液（高塑性流體）	王櫻茂 顏聰	粘土若滿足膨脹兩要件，則燒成時表面展溫度升高較快，先融成膠體，再形成玻璃相表面層，此時內部因溫度升高，致使粘土粒內部產生高塑性流體，當氣體逸出時，一面受塑性流體之滯含，一方面未能穿透表面玻璃相層，而在內部形成氣泡使體積膨脹。
	近藤	認為頁岩燒成時膨脹的適宜黏度是 $10^7 \sim 10^8 \text{Pa} \cdot \text{s}$ 。膨脹時黏度高的產生細孔，黏度低的產生大泡。 原料的化學成分與熔液的黏度有密切關係。
	Riley	將 SiO_2 、 Al_2O_3 和熔劑成分的總量作為邊界成分時，在三相圖中虛線所指範圍內的成分，就是能產生膨脹良好的液相範圍。
(二)在高溫達到具有一定粘稠度時，同時須有產生足夠的膨脹氣體	王櫻茂 顏聰	反應方程式 $\text{FeS}_2 \rightarrow \text{FeS} + \text{SO}_2$ $4\text{FeS} + 7\text{O}_2 \rightarrow 2\text{Fe}_2\text{O}_3 + 4\text{SO}_3$ $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_2 \rightarrow 2\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3\text{SO}_3$ $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ $\text{MgCO}_3 \rightarrow \text{MgO} + \text{CO}_2$ $\text{FeCO}_3 + 3\text{O}_2 \rightarrow 2\text{Fe}_2\text{O}_3 + 4\text{CO}_2$ $\text{CaSO}_4 \rightarrow \text{CaO} + \text{SO}_3$ $6\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow 4\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{O}_2$
	近藤	認為膨脹時的黏度為 $10^7 \sim 10^8 \text{Pa} \cdot \text{s}$ ，使物料膨脹的必要內部氣體壓力需達到 0.5~2MPa 左右。關於產生氣體的種類，主要認為有： $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{O}_2$ ， CO_2 $\text{FeS}_2 \rightarrow \text{S}$ ， SO_2 ， SO_3 $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CO}_2$ $\text{MgCO}_3 \rightarrow \text{CO}_2$ $\text{CaSO}_4 \rightarrow \text{SO}_3$ 有機物 $\rightarrow \text{H}_2$ ， N_2 ， CO ， CO_2 黏土礦物 $\rightarrow \text{H}_2\text{O}$ 、沸石 $\rightarrow \text{H}_2\text{O}$ 不同的化學反應，產生不同的氣體 □400 左右，硫化物和有機質分解與燃燒。 □600 左右，黏土礦物放出化合物。 □900 左右，碳酸鹽分解，產生 CO_2 。 □ Fe_2O_3 在 1100 左右還原，產生 CO_2 。 在 1100 左右，黏土熔融， CO_2 氣體使黏土陶粒膨脹。

表 7-2.3(b) 人造輕質骨材膨脹原理

(二) 在高溫達到具有一定粘稠度時，同時須有產生足夠的膨脹氣體	Riley	鐵化物等分解出的 CO_2 ，一旦與黏土中的鹼性物質相結合，就產生 K_2CO_3 和 $3\text{K}_2\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8 \cdot 2\text{CaCO}_3$ (鈣霞石)等，這些物質在 1200 左右的高溫下分解出 CO_2 氣體，促使具有一定黏稠度的熔融礦物產生膨脹。
	Walden	認為，可能是存在於黏土中的含量為 0.5%~1.0%的有機質對氧化鐵起了還原介質的作用，促使 Fe_2O_3 通過氧化—還原反應變為 FeO 時釋放出的 CO_2 使黏土熔融物膨脹。
	王根元	研究頁岩的膨脹性能，認為促使頁岩膨脹的氣體，主要是在氧化鐵的分解和有機質之間進行的氧化—還原反應的產物。同時還認為，還原介質不管是物料的內在因素還是外部因素，對氧化鐵的還原都起有效作用。如果物料的內部、外部都有還原介質，則膨脹更好。
	陳烈芳	研究粉煤灰陶粒燒脹機理時認為，適宜的碳含量和碳鐵含量比值對粉煤灰陶粒的膨脹性能有著重要影響。當料球中的碳及碳鐵比 (C/Fe) 過高時，會導致物料的熔點和黏度提高，不能產生有適宜黏度的液相，雖在高溫下有足夠的氣體逸出，但陶粒仍不膨脹。當物料中的碳和碳鐵比值過低時，導致發氣反應減弱，陶粒也不能膨脹。研究結果還認為，導致粉煤灰陶粒的膨脹的發氣反應主要是碳、鐵氧化—還原反應。粉煤灰陶粒焙燒時的發氣過程是 Fe-O-C 系複雜的氧化—還原過程。如果不考慮還原過程的中間產物，主要進行以下反應： $2\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{C} \rightarrow 4\text{FeO} + \text{CO}_2 \uparrow$ $2\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3\text{C} \rightarrow 4\text{Fe} + \text{CO}_2 \uparrow$ $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{C} \rightarrow 2\text{FeO} + \text{CO} \uparrow$ $\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3\text{C} \rightarrow 2\text{Fe} + 3\text{CO} \uparrow$

2.5 人造輕質骨材燒結方法

(1)原料加工

原料燒製前的加工處理方式，依其原料種類及物理性質之不同而有

所異。加工方式大致可分為非造粒型及造粒型。非造粒型的加工方式較適於質地堅硬之原料，如頁岩、泥板岩及珍珠岩等岩礦，經由破碎機破碎後，過篩集取所需原料粒徑，再進行加熱燒製。此種方式處理之流程較為簡易、經濟，缺點是不能添加摻料調整原料之物性。

造粒型顧名思義即為雛粒粒徑、形狀可控制。原料在燒製前先以破碎、篩分析或進行摻料之混配，加工處理成組成均勻的含水物料，然後經由滾球或碾擠成球等方式，處理成顆粒大小不同的雛粒。此種方式最大優點是可配合需求，進行雛粒形狀、粒徑及物性之調整，相對也較為不經濟。

(2)熱處理

熱處理是燒結輕質骨材重要的過程，熱處理方式對輕質骨材之物性有決定性之影響。對於不同輕質骨材之物性，有不同之熱處理方式，一般可分為烘乾、預熱、焙燒及冷卻等過程。雛粒若為含水狀態下，則在燒製前先以 200 ~600 之溫度進行烘乾。此為使雛粒具有相當強度，以免進入旋窯燒結時產生破壞。

經過乾燥後之雛粒將其置入旋窯以 600 ~1000 之溫度進行預熱。此時脫水反應進一步加劇，同時雛粒中某些物質產生脫水分解並氧化排出大量氣體，在雛粒周圍形成一保護膜阻止氧氣進入，使雛粒內部形成還原條件，促使鐵化合物進行還原作用，並創造黏土礦物之液化條件。隨著溫度升高至 1000 ~1200 之溫度進行焙燒，此時所產生之黏滯性流體會將內部逸出之氣體裹覆，形成壓力促使雛粒膨脹。

焙燒過後之雛粒經由冷卻形成骨材。冷卻時須注意，於 1000 ~700 時可迅速冷卻；但在 700 ~400 時則要求緩慢冷卻，以免雛粒在液相固化和晶形轉變時刻，因迅速降溫使骨材內部和表面產生強大之溫度收縮應力，導致其產生破壞降低顆粒強度^[13]。

第三節 水庫淤泥輕質骨材之燒製研究

為評估全省各地水庫淤泥燒製輕質骨材可行性，本文僅針對不同水庫淤泥的化學成分及離粒性質等先天條件與處理狀況，在相同的燒製條件下（燒結的溫度為 1210℃，旋窯轉速為每分鐘旋轉 4 圈），對燒製輕質骨材的影響討論如下：

3.1 水庫淤泥輕質骨材膨脹探討

本計畫採用欣得有限股份公司提供之旋窯將淤泥燒製為輕質骨材，燒結的溫度為 1210℃，旋窯轉速為 4 RPM（每分鐘旋轉 4 圈），已成功地將十五座水庫淤泥燒製為輕質骨材，由燒製出之輕質骨材外觀觀察，骨材表面也生成相似玻璃相的薄殼，具有一定的強度，外觀光滑而細緻，唯獨每一水庫淤泥化學成分比例不同，在 1200℃ 溫度燒結下，骨材的膨脹程度不一，膨脹的程度由燒結前後的鬆單位比值決定，比值越小則膨脹狀況越佳，15 座水庫之中膨脹狀況較良好者共有七座水庫(如表 7-3.1 所示)，包含寶山水庫、澄清湖、日月潭、石門水庫、阿公店水庫和仁義潭水庫，水庫淤泥製成之離粒與骨材的鬆單位比值大致為 0.30～0.60 變化，另外，鳳山水庫雖然擁有較高之離粒與骨材的鬆單位比值（0.87），但膨脹情形也相當良好，主要原因在於化學成分比例的不同，使得其與其他水庫燒製情形大不相同。而青草湖水庫、明潭水庫、明德水庫、白河水庫等四座水庫淤泥的燒製骨材有稍微膨脹情形，離粒與骨材的鬆單位比值大致為 0.60～0.80 之間，膨脹狀況較差者有南化、大埔、虎頭埤、翡翠等四座水庫，離粒與骨材的鬆單位比值則介於 0.80～0.92 之間。照片 7-3.1~7-3.8 為各水庫離粒與骨材的樣品。

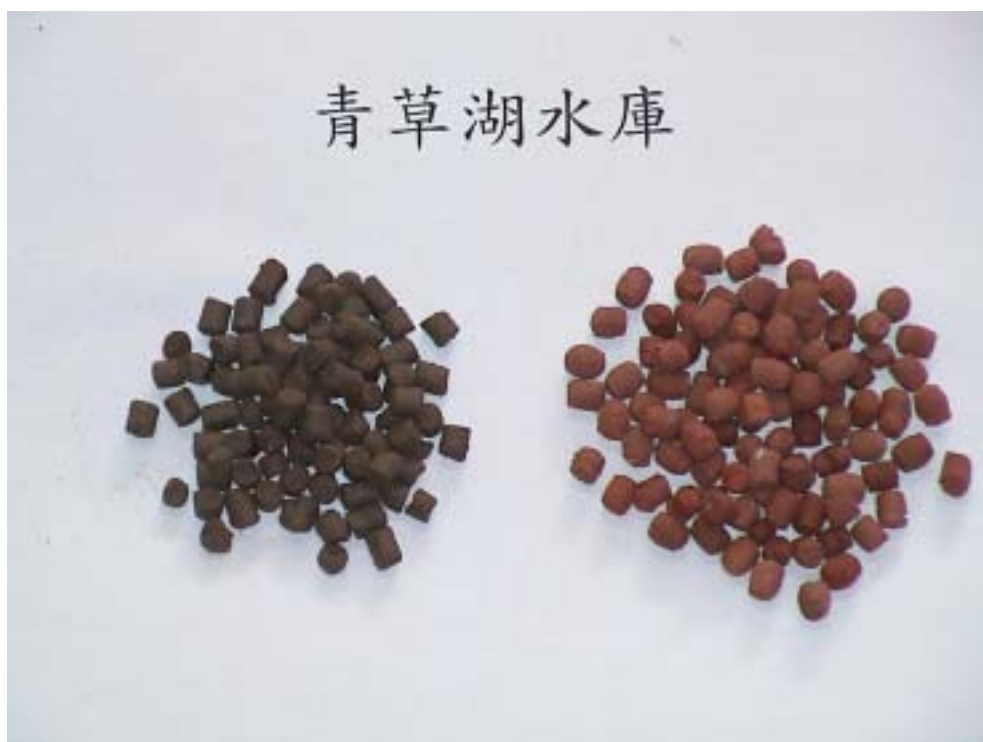
表 7-3.1 雛粒與輕質骨材之性質

水庫 名稱	雛粒 含水率	雛粒 鬆單位重	輕質骨材 鬆單位重	鬆單位重 比值	膨脹狀況
翡翠	24.0%	1119	1028	0.92	N
青草湖	15.8%	1229	921	0.75	I
石門	19.3%	1280	713	0.56	G
明德	16.7%	1243	768	0.62	I
寶山	15.0%	1202	656	0.55	G
大埔	14.4%	1227	1125	0.92	N
日月潭	18.1%	1145	549	0.48	G
明潭	20.1%	1110	843	0.76	I
仁義潭	19.8%	1170	563	0.48	G
虎頭埤	19.7%	1134	973	0.86	N
南化	16.4%	1164	963	0.83	N
阿公店	18.6%	1229	574	0.47	G
鳳山	63.8%	858	743	0.87	G
白河	12.6%	1307	865	0.66	I
澄清湖	15.4%	1267	423	0.33	G

G:膨脹良好，I:膨脹普通，N:膨脹較差。



A. 翡翠水庫



B. 青草湖水庫

照片 7-3.1 翡翠水庫淤泥與青草湖水庫淤泥雛料與燒結料照片之比較



A.石門水庫



B.明德水庫

照片 7-3.2 石門水庫淤泥與明德水庫淤泥雜料與燒結料照片之比較



A. 寶山水庫



B. 大埔水庫

照片 7-3.3 寶山水庫淤泥與大埔水庫淤泥雜料與燒結料照片之比較



A. 日月潭水庫



B. 明潭水庫

照片 7-3.4 日月潭水庫淤泥與明潭水庫淤泥雛料與燒結料照片之比較



A.仁義潭水庫



B.虎頭埤水庫

照片 7-3.5 仁義潭水庫淤泥與虎頭埤水庫淤泥雜料與燒結料照片之比較



A.南化水庫



B.阿公店水庫

照片 7-3.6 南化水庫淤泥與阿公店水庫淤泥雛料與燒結料照片之比較



A. 鳳山水庫



B. 白河水庫

照片 7-3.7 鳳山水庫淤泥與白河水庫淤泥雜料與燒結料照片之比較



A.澄清湖水庫

照片 7-3.8 澄清湖水庫淤泥雜料與燒結料照片之比較

3.2 化學成分

原料所含化學成分之量會影響黏土之膨脹性質與熔融溫度，歐美各國的試驗結果，對於輕質骨材燒結過程中，熔融溫度的預測已有相當的把握，影響膨脹的因素則尚未有肯定的成果，大致認為氫氧離子的濃度和氧化鐵等雜質均影響膨脹性，而影響膨脹性最大乃為化學成分的比例，已有學者提出具膨脹性黏土的化學比例分配如圖 7-2.1 的斜線範圍內，主要是以二氧化矽（ SiO_2 ）為主要成分，其他三氧化二鋁（ Al_2O_3 ）約 10~20%，三氧化二鐵（ Fe_2O_3 ）約 2~10%，氧化鎂（ MgO ）約 1~2%，氧化鈉（ Na_2O ）及氧化鉀（ K_2O ）約 3~6%，具有膨脹性的原料一般含有機物，如因風化作用而消失，則有減低膨脹之傾向。

大部分水庫淤泥的化學成分比例為，二氧化矽（ SiO_2 ）之含量介於 53~77%之間，三氧化二鋁（ Al_2O_3 ）約 8~20%，三氧化二鐵（ Fe_2O_3 ）

約 4~8%，可大致可符合容易膨脹的化學成分比例，其中鳳山水庫的化學成分比例雖然與學者建議的膨脹化學成分比例相距甚遠，但是他還是能在 1200 的燒結溫度下燒結，且有適當膨脹性，主要是它的有機含量及助熔劑充足，許多有機物在燒製過程中燒失，部分助熔劑因熱力轉化為氣體，包含於融熔的 SiO_2 中。

將水庫依照膨脹的好壞分為三群來探討，取每群中的骨材鬆單位重與化學成分比例的平均值，建立其關係圖如圖 7-3.2。從圖 7-3.2 可知，骨材鬆單位重隨二氧化矽（ SiO_2 ）百分比增加而增加，但是卻與三氧化二鋁（ Al_2O_3 ）及三氧化二鐵（ Fe_2O_3 ）成分成反比關係。由此可知骨材單位重與骨材的膨脹與否有密切關係，然而由於骨材膨脹機制較為複雜，其與材料組成之間的關聯性雖然呈現出一個定性的趨勢，單就本次試驗結果仍無法得到一個定量的成果。

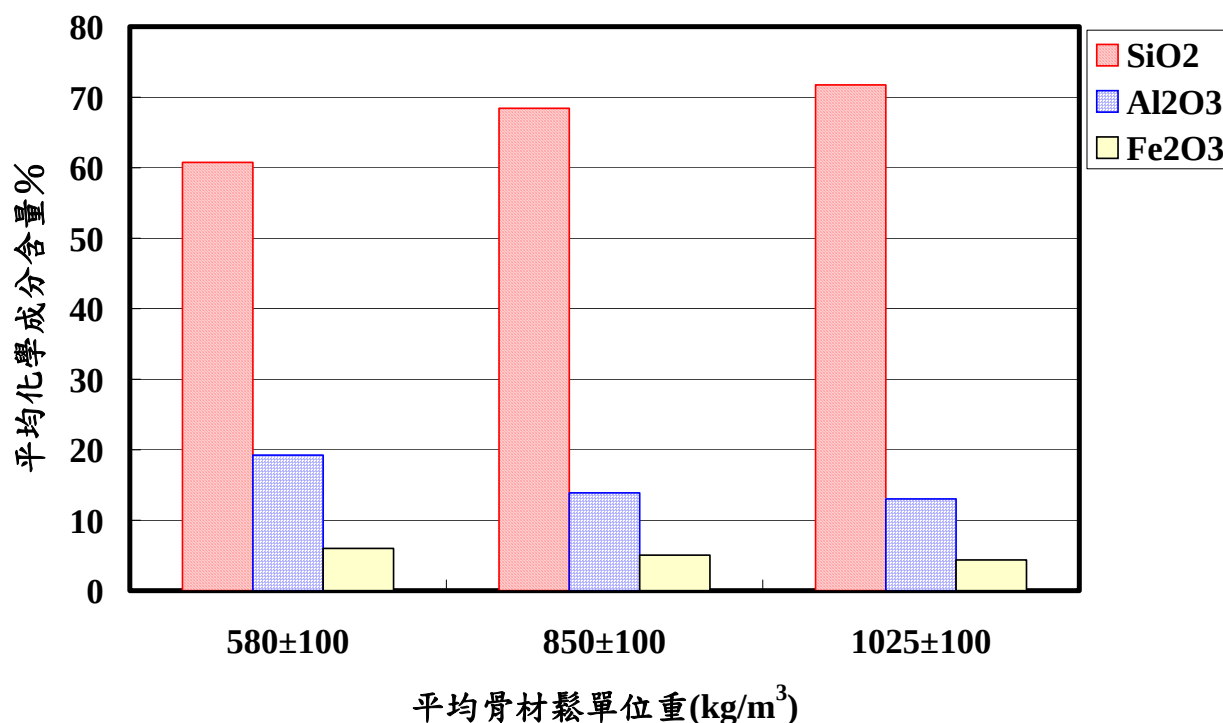


圖 7-3.2 骨材鬆單位重與化學成分含量關係圖

3.3 雛粒的含水狀態與鬆單位重

初開挖出的水庫淤泥含水量為飽和狀態，較不利於造粒，必須將淤泥作適當的脫水處理，使其含水狀態適合於造粒機造粒，造粒後的雛粒（粒徑為 5mm），其含水量及鬆單位重試驗結果如表 7-3.1 所示。試驗結果顯示，雛粒的含水率大致介於 12~24%，而鬆單位重則介於 1100~1300 kg/m³。

除了配合造粒而進行脫水處理外，雛粒中的水分会影響骨材燒製過程中體積的變化。一般而言，雛粒在燒結初期（20 到 100 間）發生膨脹，接著由於水分的去除，開始收縮。收縮的原因是包圍在粘土四周的膠膜（膠膜是提供粒料具有成形的強度）產生脫水，直到接近焙燒階段（300 附近），收縮才終止。其後因結晶水開始排出（約 400~600 ），晶體結構會發生大變化，所以有大的膨脹。假若水分的散失過於迅速且劇烈，在燒製初期雛粒的表面容易發生微小裂縫，此等裂紋對於輕質骨材的性質產生影響。

從部分學者研究中，若將粉末輕輕地填充於坩鍋中，並另取粉末加壓成形，此兩試樣在同溫度燒成後的比較時，發現前者質輕而多孔，後者則較緻密且收縮率較大，由此可推論，雛粒的密實度也間接影響骨材的膨脹狀況，雛粒內部越鬆散則燒成的骨材質量越輕而多孔隙，換言之，具有相同的化學組成與含水狀況時，雛粒的鬆單位重越小，越有利於燒製輕質骨材。比較青草湖與鏡面水庫可驗證出這樣的論點，他們雖然有相近的化學組成比例及雛粒含水率，因為雛粒鬆單位的不同（分別為 1229 kg/m³ 及 1164 kg/m³），在相同燒製條件下，卻表現出不同的骨材性質，青草湖的 921 kg/m³ 骨材鬆單位重要略輕於鏡面水庫之 963 kg/m³。

第八章 水庫淤泥輕質骨材混凝土之工程性質

第一節 前言

本研究中已成功將台灣重要的 15 座水庫淤泥燒結為輕質骨材，而水庫淤泥輕質骨材其最終的使用目的，乃為取代傳統天然骨材而摻入混凝土中拌合以產製輕質骨材混凝土，輕質骨材混凝土的性質將依不同的類型的骨材而有所差異，對於以傳統輕質骨材所拌製的混凝土性質，國內、外學者都提出不少研究成果，對於淤泥再生輕質骨材混凝土工程性質之探討則較少，本章主要以石門水庫淤泥燒結而成之輕質骨材來拌製混凝土，探討水庫淤泥輕質骨材混凝土的新拌與硬固混凝土性質，試驗結果與討論則分別陳述於第二節和第三節。

第二節 新拌混凝土性質

本研究探討之新拌混凝土性質，乃著重於工作性與新拌單位重兩方面，主要以坍度試驗來表示水庫淤泥輕質骨材混凝土之工作性能，而新拌單位重則用以提供工程人員檢核輕質骨材混凝土配比與施工時模版支撐計算載重的參考數據。為了進行混凝土性質的研究，試驗所需材料性質、設計之混凝土配比與新拌混凝土性質等陳述如后。

2.1 試驗材料與混凝土配比

水庫淤泥輕質骨材混凝土所需材料包含有台泥公司出產之 Ⅱ 型卜索蘭水泥、自來水、細骨材則使用天然河砂，而粗骨材乃採用兩種粒徑的石門水庫淤泥輕質骨材，各種材料性質如表 8.2-1 8.2-3 所示。

表 8-2.1 水泥性質

A.化學性質		
項目		含量(%)
SiO ₂		20.9
Al ₂ O ₃		5.65
Fe ₂ O ₃		3.21
CaO		63.63
MgO		2.52
SO ₃		2.16
Na ₂ O		0.10
K ₂ O		0.52
C ₃ S		48.76
C ₂ S		23.14
C ₃ A		9.54
C ₄ AF		9.77
B.物理性質		
比重		3.15
細度		344
燒失量		0.92
不溶殘渣		0.11
健度		0.055
抗壓 強度	7 天 (kgf/cm ²)	362
	28 天 (kgf/cm ²)	472

表 8-2.2 天然細骨材物理性質

容積比重	吸水率 (面乾內飽和 %)	細度模數 (F.M 值)
2.64	0.60	2.67

表 8-2.3 水庫淤泥輕質骨材物理性質

粒群	容積比重	30mins 吸水率 (%)	24hr 吸水率 (%)
1/2"~3/8"	1.38	6.6	10.4
3/8"~#4	1.23	9.5	11.3

為了探討新拌與硬固混凝土的性質，本研究採用水灰比為 0.40、0.55 及 0.70 三種不同之混凝土配比，其配比計算乃固定用水量（設定為 207 kg/m^3 ）及砂率（砂/粗骨材 = 0.52），依據絕對體積法針對不同水灰比，計算粗、細骨材單位用量，由於採絕乾輕質骨材拌合混凝土，因此於配比中再加入骨材 30 分鐘吸水量。混凝土配比計算結果陳列如表 8.2-4 所示。

表 8-2.4 混凝土配比

試驗 組別	水灰比	水泥	水	30min 吸水量	天然 細骨材	1/2"~3/8"	3/8"~ # 4
A	0.40	489	207	37.7	640	174	251
B	0.55	390	207	39.7	673	183	263
C	0.80	300	207	41.4	702	190	275

2.2 新拌混凝土性質

水庫淤泥輕質骨材混凝土的坍度與單位重試驗結果如表 8.2-5，在水灰比由 0.40 增加到 0.70 時，混凝土尚無骨材上浮析離等現象，混凝土完成拌合之初的坍度值為介於 20 cm ~ 23 cm 之間，伺 30 分鐘後的坍度則降低至 8 cm ~ 18 cm，其中坍度損失率介於 20% ~ 60%，主要是因為在拌合混凝土時加入 30 分鐘的骨材吸水量，使得輕質混凝土在初期有尚未吸入骨材的水，幫助了混凝土的工作性導致有較大的坍度。由實驗結果也可發現，坍度損失率隨著水灰比增加而遞減，主要導因於高水灰比混凝土用水

量較高，砂漿的稠度原始就較低，在加入骨材吸水量對砂漿稠度影響有限，致使坍度損失不大。

在新拌單位重方面，使用顆粒密度 1.23 與 1.38 的輕質骨材，水灰比為 0.4 0.7 的輕質骨材混凝土，其新拌單位重約介於 1720 kg/m^3 1745 kg/m^3 ，相較普通混凝土 2200 kg/m^3 2400 kg/m^3 ，單位重約降低 24%，應可適量地減少施工模版支承的數量，對於施工效率及材料成本皆有正面的影響。

表 8-2.3 新拌混凝土性質

試驗 組別	坍度		坍度損失 %	新拌單位重 (kg/m^3)
	0 分鐘	30 分鐘		
A	20	8	60%	1745
B	23	16	32%	1724
C	23	18	22%	1718

第三節 硬固混凝土性質

根據前一章節之配比澆製混凝土試體以測定混凝土之硬固性質，測定項目包括有抗壓強度、抗彎強度、單位重與熱傳導係數試驗等。試體經過標準的實驗養生，而試驗結果如表 8.3.1。

表 8-3.1 硬固混凝土性質

試驗組別	抗壓強度 (kgf/cm^2)		抗彎強度 (kgf/cm^2)	乾燥單位重 (kg/m^3)	熱傳導係數 (kcal/m.hr.)
	7 天	28 天			
A	282	327	74	1550	0.81
B	233	311	67	1544	0.78
C	166	218	55	1492	0.75

1. 抗壓強度與抗彎強度

每一配比混凝土共製作 6 個直徑 10 cm 高 20 cm 的圓柱試體，分兩批來測定 7 天與 28 天兩齡期的混凝土抗壓強度。試驗方法依照 CNS 1232『混凝土圓柱試體抗壓強度之檢驗法』之規定進行，所得試驗結果結果可繪圖如圖 8.3-1 所示。試驗結果顯示，石門水庫淤泥輕質骨材混凝土在不同的水灰比（0.4 ~ 0.7）之下，7 天抗壓強度介於 166 ~ 282 kgf/cm^2 ，28 天抗壓強度介於 218 ~ 327 kgf/cm^2 。圖中顯示水灰比越低者抗壓強度越高，亦即在水量固定下，水灰比越低者，其水泥漿體的強度愈高，因此有較好的強度發展。且水灰比約低者，越顯早強的特性。

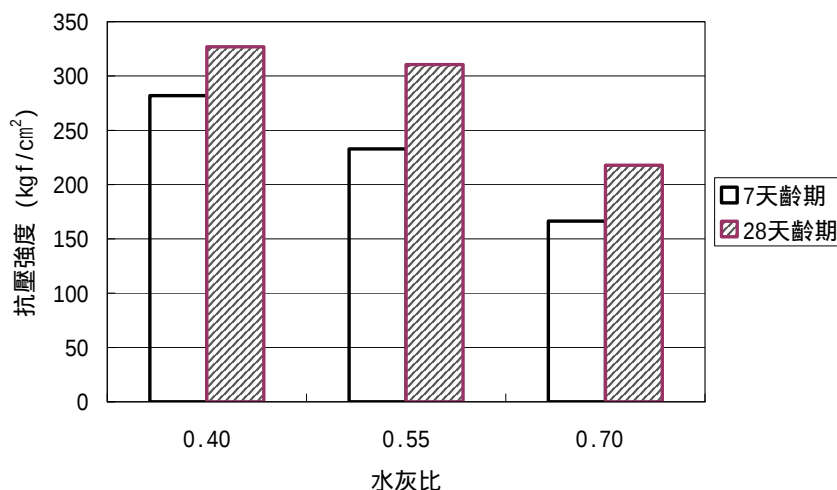


圖 8.3-1 混凝土抗壓強度與水灰比關係圖

10×12×36 cm 之混凝土試體依照 CNS 1233『混凝土抗彎強度之檢驗法』之規定進行抗彎試驗，水灰比為 0.40、0.55 及 0.70 之三種混凝土抗彎試驗值分別為 55、67 及 74 kgf/cm² 之間，如同抗壓強度的結果，隨著水灰比降低則增加了混凝土的強度性質，但是混凝土強度的增強比例未與水灰比降低比例成正比，主要是因為輕質骨材混凝土的強度受制於骨材的強度，此意味著若要再提昇輕質骨材強度必須要有更高品質的輕質骨材。

由試驗結果可知，以水庫淤泥輕質骨材所拌製而成之混凝土強度，已可輕易達到一般建築用混凝土強度要求（210 kgf/cm²），有助於使用輕質骨材混凝土於建築物結構中。由強度的觀點而言，水庫淤泥輕質骨材混凝土已符合一般結構用混凝土強度的要求。

2. 乾燥單位重

輕質骨材混凝土最大特色就是質量較輕，用於建造混凝土結構有效地減少建築物的靜載重，相對地可縮小構建的尺寸，因而減少材料用量，降低了建造成本。本研究使用顆粒密度 1.23 與 1.38 兩種水庫淤泥輕質骨材，拌製出的混凝土單位重平均值約為 1530 kg/m³，相對於常重混凝土的單位重（2300 kg/m³）降低有 33%，已有效的達到質輕的效果。

3. 熱傳導試驗

台灣地區夏季氣候炎熱，常重混凝土由於熱導係數高，導致屋內冷氣耗電量大增；使用輕質混凝土有助於降低夏季冷氣的耗電量。熱傳導係數受材料影響很大，輕質混凝土之骨材內部充滿孔洞，能有效降低混凝土的熱傳係數。材料的隔熱性質與熱傳導係數息息相關。熱傳導係數越低則隔熱性能越佳。由試驗結果可知，輕質混凝土熱傳導係數介於 0.75 ~ 0.81 kcal/m.hr. 之間，優於一般常重混凝土熱傳導係數 1.0 ~ 1.5 kcal/m.hr.。若以水庫淤泥輕質骨材混凝土取代一般混凝土外牆，將可降低建築物外殼耗能量（ENVLOAD），用於屋頂將可減少屋頂熱傳透率（U_{ar}），降低熱源進入室內，減低建築物熱負荷，對於建築物省能具有良好效益，並符合綠建築節約能源的指標。

第九章 結論

本研究針對 15 座水庫（翡翠、石門、青草湖、大埔、寶山、明德、明潭、日月潭、仁義潭、鏡面、虎頭埤、白河、阿公店、鳳山、澄清湖）及蒐集相關文獻，進行水庫集水區地質探討、水庫淤泥取樣、淤泥物理性質及化學成分分析、輕質骨材燒製（程式控制電爐及商業用旋窯）、輕質骨材性質試驗及分析等，得到結論如下：

1. 不同水庫的集水區地質並不相同，其淤積沉積物的物化性必然不同。再則，即使同一座水庫，在水庫上游、中游、下游至大壩位置及水庫低窪處，所沉積的浚渫物亦不相同。因此，以水庫淤泥作為輕質骨材的原料，必須透過更嚴謹的分析及驗證。
2. 台灣大部分水庫集水區地質大部份是由堅硬或是經過輕度變質的第三紀巨厚泥質沉積岩構成。在岩性上，第三紀亞變質岩的大部份沉積物為深灰或灰黑色劈理良好的硬頁岩（argillite）、板岩（slate），以及千枚岩（phyllite）。
3. 翡翠、石門、青草湖、明德、明潭、日月潭、鏡面、虎頭埤、白河、阿公店、澄清湖所取出的淤泥都屬於低塑性黏土（CL），而大埔所取出的淤泥屬於低塑性黏土及低塑性粉土（CL~ML），仁義潭所取出的淤泥屬於高塑性黏土（CH），寶山及鳳山所取出的淤泥均屬於粉土質砂（SM）。
4. 塑性指數（PI）方面，以澄清湖水庫的 PI 值為 50 最高。部分水庫如寶山、白河及鳳山屬於 NP。
5. 水庫淤泥的化學性質分析結果顯示台灣水庫上游地質大多屬於沉積岩，因此，大部分水庫淤泥的化學成分皆落於 Riley 膨脹黏土範圍內，預期可燒結成良好性質的輕質骨材。
6. 整理相關文獻資料，顯示膨脹原料的化學成分及礦物成分均對輕質骨材的性質產生極大的影響。
7. 以程式控制電爐燒製的輕質骨材，在相同燒結條件下（溫度

1200℃),以澄清湖及鳳山水庫淤泥所燒製的輕質骨材比重為 1.1~1.2 之間；其次為仁義潭、阿公店、石門、大埔等水庫淤泥所燒製的輕質骨材比重為 1.3~1.5 之間；其餘水庫如翡翠、青草湖、寶山、明德、明潭、日月潭、鏡面、虎頭埤、白河等水庫淤泥所燒製的輕質骨材比重為 2.0~2.2 之間。

8. 旋窯燒製的輕質骨材，在相同燒結條件下（溫度 1210℃），其比重低於以電爐燒製者。其中澄清湖水庫淤泥所燒製的輕質骨材比重為 0.7 最低；其次為仁義潭、阿公店、石門、鳳山、明德、寶山、日月潭等水庫淤泥所燒製的輕質骨材比重為 1~1.3 之間；明潭、白河等水庫淤泥所燒製的輕質骨材比重為 1.5~1.7 之間；其餘水庫如翡翠、青草湖、大埔、鏡面、虎頭埤等水庫淤泥所燒製的輕質骨材比重為 1.7~2.1 之間。
9. 程式控制電爐及商業用旋窯所燒製的 15 座輕質骨材吸水率均小於 10%。
10. 以石門水庫淤泥經旋窯製造輕質骨材的顆粒抗壓強度結果顯示，輕質骨材顆粒比重愈大，其顆粒抗壓強度平均值會愈大。
11. 筒壓強度與輕質骨材顆粒抗壓強度平均值具有良好的線性關係，筒壓強度可作為輕質骨材的品質參考指標之一。
12. 石門水庫及翡翠水庫兩座淤泥，雖然在土壤統一分類法均定義為『CL』，但因石門水庫淤泥的黏土含量較高，具有較高的 PI 值，於高溫燒結後，可在輕質骨材表面形成光滑狀的玻璃相外殼，顏色為紅褐色；至於翡翠水庫淤泥的黏土含量較低，具有較低的 PI 值，於高溫燒結後，可在輕質骨材表面形成較粗糙的外殼，顏色為淺紅褐色。此即為黏土含量高低所造成的影響。
13. 電熱窯由於加熱速率降低及加熱時間較長，使輕質骨材生料由內至外均勻受熱，於燒結後，剖開輕質骨材斷面，由內至外均呈現紅褐色，具有良好的硬度及極佳強度，如輕質骨材的硬度可達 7 左右，而顆粒單壓強度最高達到 26MPa。

14. 旋窯加熱方式可分為預熱段及加熱段兩步驟，以快速加熱方式加熱，造成輕質骨材生料表面溫度較高，可在輕質骨材表面形成具有玻璃相的外殼，形成玻璃相的熔融狀，生料內部溫度較低，所逸出的氣體可由表面滯含，形成體積膨脹，提高輕質骨材的經濟效益。
15. 旋窯加熱由於生料內部所受溫度較低，於燒結後，剖開輕質骨材斷面，由內部呈現灰色，而外殼呈現紅褐色，具有良好的硬度及適宜的強度，如輕質骨材的硬度可達 7 左右，而顆粒抗壓強度可達到 26 MPa 左右。
16. 比較筒壓強度與輕質骨材鬆單位重的關係，顯示筒壓強度愈大其鬆單位重愈高；以及比較筒壓強度與輕質骨材顆粒抗壓強度的關係，顯示筒壓強度愈大其輕質骨材顆粒抗壓強度亦愈高。因此，筒壓強度可作為輕質骨材的品質參考指標之一。
17. 水庫淤泥混凝土新拌單位重相對普通混凝土約可降低 24%，應可適量地減少施工模版支承的數量，對於施工效率及材料成本皆有正面的影響。
18. 水庫淤泥輕質骨材所拌製而成之混凝土強度，已可輕易達到一般建築用混凝土強度要求 (210 kgf/cm^2)，有助於使用輕質骨材混凝土於建築物結構中。由強度的觀點而言，水庫淤泥輕質骨材混凝土已符合一般結構用混凝土強度的要求。
19. 輕質混凝土熱傳導係數介於 $0.75 \sim 0.81 \text{ kcal/m.hr.}$ 之間，優於一般常重混凝土熱傳導係數 $1.0 \sim 1.5 \text{ kcal/m.hr.}$ 。對於建築物省能具有良好效益，並符合綠建築節約能源的指標。