

應用浚渫抽泥提升防淤隧道排砂濃度之試驗研究

VENTING EFFICIENCY IMPROVEMENT OF THE DESILTING TUNNEL COMBINED
WITH HYDRAULIC DREDGING RELEASE

國立臺灣大學
生物環境系統工程學系
碩士生

邱柄榮
Ping-Jung Chiu

國立臺灣大學
水工試驗所
專案計畫助理研究員

李豐佐*
Fong-Zuo Lee

國立臺灣大學
水工試驗所研究員暨
生物環境系統工程學系
兼任教授

賴進松
Jihn-Sung Lai

國立臺灣大學
生物環境系統工程學系
教授

張倉榮
Tsang-Jung Chang

摘要

台灣境內位於板塊交錯區域，地表起伏大，河川坡陡流急，水資源難以儲蓄利用。為了供水、防洪、灌溉、發電，最直接有效之方法就是興建水壩蓄水。然而，水庫建設後必須處理泥砂淤積等問題，才能延長其使用年限。為求延長水庫壽命以及永續經營，水利署南區水資源局推動之「曾文水庫防淤隧道工程」計畫成為全球首座使用象鼻鋼管工法興建之排砂防淤隧道，大幅降低清淤經費，然而近年來水文條件不佳，水力排砂成效有效，為了加速水庫清淤效率，浚渫抽泥成為水庫主要防淤重點，因此，本研究以其新建象鼻防淤隧道為主要研究對象，探討浚渫抽泥之抽泥泵系統 (Hydraulic Dredging System) 與防淤隧道之防洪防淤操作，兩者結合下是否具備更佳之排砂濃度為研究課題。透過水槽試驗之方式，模擬抽泥船排放其抽取之淤泥至曾文水庫象鼻防淤隧道入口附近前，繼而使其以孔口吸引方式排砂，評估此一操作情境下之防淤隧道排砂濃度。試驗分析各項參數包含流量、濃度、浚渫抽泥管位置等等，進一步分析浚渫抽泥管出口泥砂濃度與防淤隧道操作情境下之排砂濃度關係。經研究結果歸納分析，得出流量、濃度及浚渫抽泥管位置等因子，建立防淤隧道出流泥沙濃度與浚渫抽泥管出口濃度關係式，以供實務上浚渫抽泥結合象鼻防淤隧道操作之參考。

關鍵詞：水庫防淤、浚渫、象鼻防淤隧道、排砂濃度。

* 通訊作者，國立臺灣大學水工試驗所專案計畫助理研究員
10617 台北市羅斯福路四段 1 號，windleft@gmail.com

VENTING EFFICIENCY IMPROVEMENT OF THE DESILTING TUNNEL COMBINED WITH HYDRAULIC DREDGING RELEASE

Ping-Jung Chiu

National Taiwan
University Department
of Bioenvironmental
Systems Engineering

Fong-Zuo Lee*

National Taiwan
University
Hydrotech Research
Institute

Jihn-Sung Lai

National Taiwan
University
Hydrotech Research
Institute

Tsang-Jung Chang

National Taiwan
University Department
of Bioenvironmental
Systems Engineering

ABSTRACT

Taiwan locates on the boundaries of two plates, resulting in the characteristics of salient relief and short rivers with steep slopes. Therefore, the water resources can hardly be stored. For water supply, flood control, irrigation, and power generation, the most direct and effective method is to build dams to store water resources. However, after constructing the reservoir, it is necessary to deal with the problems of sedimentation and other problems to extend its service life. In order to prolong the life of the reservoir and sustain its operation, the Zengwen Reservoir Desilting Tunnel Project was promoted by the Southern Region Water Resources Office, WRA, MOEA. It became the first sediment desilting tunnel constructed using the elephant-trunk steel pipe method, significantly reducing dredging costs. However, in recent years, the hydrological conditions are not good, and hydraulic sediment discharge is effective. In order to accelerate the efficiency of reservoir desiltation, mechanical dredging has become the main focus of reservoir prevention. Therefore, this study takes its newly built elephant-trunk desilting tunnel as the primary research object and explores whether the hydraulic dredging system and sedimentation prevention operation of the desilting tunnel have better drainage as a research topic. Through the tank test, the dredging pump was simulated to discharge the sediment to the vicinity of the entrance of the elephant-trunk desilting tunnel of Zengwen Reservoir. The desilting efficiency analyzes various parameters, including flow rate, concentration, the position of the dredging pipe. Further, it analyzes the relationship between the sediment concentration at the outlet of the dredging pipe and the sediment discharge concentration under the operation situation of the desilting tunnel. After the research results are summarized and analyzed, factors such as flow rate, concentration, and the position of the dredging pipe are obtained, and the relationship between the concentration of the desilting tunnel and the outlet concentration of the dredging pipe is established to provide the practical co-operation.

Keywords: Reservoir desiltation, Dredging system, Elephant-trunk desilting tunnel, Desilting efficiency.

Chiu, P.J., Lee, F.Z.*, Lai, J.S., & Chang, T.J. (2022). "Venting Efficiency Improvement of the Desilting Tunnel Combined with Hydraulic Dredging Release." *Journal of Taiwan Agricultural Engineering*, 68(2), 1-13. [https://doi.org/10.29974/JTAE.202206_68\(2\).0001](https://doi.org/10.29974/JTAE.202206_68(2).0001)

一、前言

臺灣境內位於板塊交錯區域，地勢起伏大，河川坡陡流急，一旦遇上極端降雨事件，容易造成山洪暴漲、氾濫成災，坡地大量的沖蝕崩塌也常導致土石流，尤其近年來氣候變遷促使強降雨事件頻率漸增，造成此一問題在處理上更為困難。相反的，每逢乾季集水區之河床卻又時常乾涸，水資源嚴重缺乏，難以儲蓄利用。面對如此問題，改善之道就是興築水庫，以達防洪減災、有效治水、用水之功效。然而大部分水庫庫容一旦淤積嚴重，即會對水庫功能產生直接影響，因此水庫興建後需要完善之維護及處理泥砂淤積等問題，才能延長其使用年限。根據水利署水利規劃試驗所 (2018) 指出，臺灣水庫原來總容量為 28.6 億噸，目前有效蓄水量約為 20.3 億噸，其中以霧社水庫淤積 69.81% 最為嚴重，其次為白河水庫淤積 61.34%、烏山頭水庫淤積 49.22%、南化水庫淤積 40.92%、曾文水庫淤積 39.37%，而石門水庫與明德水庫之淤積也逾三成。因此，水庫防淤以及水庫之永續發展在台灣一直是最重要的課題，需要長期之管理策略。民國 98 年 8 月 8 日，莫拉克颱風侵襲台灣時在南台灣帶來了極為嚴重之水患，其中曾文水庫受到嚴重影響，為求延長其壽命並永續經營，水利署南區水資源局於民國 100 年推動「曾文水庫防淤隧道工程」計畫，並於民國 107 年 1 月完工，成為全球首座使用象鼻鋼管工法興建之排砂防淤隧道，預估每年能有效排除曾文水庫內運移至壩前的 104 萬立方公尺淤砂，大幅降低清淤經費。

然而運移至曾文水庫壩前的淤砂粒徑大部分屬於粉土或是黏土，而此類泥砂容易於進入水庫後成為異重流或是渾水潭，過去眾多學者研究水庫異重流排砂的成果，得到此法最大的優勢為利用水庫泥砂直接傳遞至壩前之行為，在適當條件下，異重流能在沈積庫底前被排除 (Chamoun *et al.*, 2016)。近年來台灣也逐漸朝向利用異重流排砂或繞庫排砂的方式降低入庫泥砂量，且在降雨事件發生時利用水庫現有底孔出水工將異重流排除 (林志憲, 2013)。然而，若無法在異重流抵達壩前時將之透過出水孔口排除，泥砂不只會淤積於壩前底床，更容易因淤積阻擋於周遭出水工結構物前方，導致其產生磨蝕現象 (Chamoun *et al.*, 2017)。故根據前人研究以及異重流運移特性，得知最佳之排砂方法為利用底孔出水工在泥砂抵達壩前之瞬間將其排除，若無法於當下開啟排砂通道口，則在異重流抵達前提前開啟通道口之排砂方法，更勝於在異重流抵達

以後才開啟通道口 (Chamoun *et al.*, 2018)。

因此，本研究基於既有之曾文水庫相關基本資料與研究，以其新建象鼻防淤隧道為主要研究對象，進一步探討機械清淤之浚渫抽泥泵系統 (Hydraulic Dredging System) 結合防淤隧道之防洪防淤操作，提升防淤隧道之排砂濃度。研究上透過水槽試驗之方式，模擬浚渫抽泥船排放其抽取之渾水至曾文水庫象鼻防淤隧道入口附近，繼而使其以孔口吸引方式排砂，評估此一操作情境下之防淤隧道排砂濃度。

二、模型試驗評估

本試驗主要藉由 1/1000 比尺建置曾文水庫象鼻防淤隧道模型，探討不同浚渫抽泥濃度、不同浚渫抽泥管流量、不同防淤隧道流量、以及不同防淤隧道口投放位置對曾文防淤隧道操作之排砂濃度影響。根據試驗結果歸納分析，針對曾文水庫未來利用防淤隧道搭配浚渫抽泥系統下之防洪減淤操作，建立無因次參數公式以供實務上浚渫抽泥結合象鼻防淤隧道操作之參考，得以結合「治標」之浚渫抽泥，與「治本」之孔口吸引排砂，最終以水庫通砂減淤、回復庫容及延長水庫壽命，邁向永續經營為主要目的，同時提供發電、調節性放水或是平時低濁度之渾水底孔排砂參考。

因此，本研究探討之浚渫抽泥結合曾文象鼻防淤隧道對排砂濃度之影響，即為針對曾文水庫結合浚渫抽泥及孔口吸引排砂策略下之排砂工法，且透過將浚渫抽泥管口直接放置於曾文象鼻管前方，即可設定泥砂即時抵達排砂孔口之最佳條件。此法整合機械清淤、水力排砂、硬體改造與整體策略上之調整，對於未來曾文水庫利用防淤隧道之即時防洪減淤操作，能提供立即且實用之參考價值，呼應過去學者提出之水庫泥砂治理策略。

本研究主要探討之目標為曾文水庫象鼻防淤隧道管口區域，此防淤隧道工程於 2017 年 10 月完工，利用全球首創之象鼻引水鋼管工法進行水庫防淤工作。而過去相關水工模型試驗研究中，Ramos-Villanueva (2016) 以一系列水槽試驗之方式，比較透過水庫底孔進行異重流排砂，與關閉底孔使渾水從壩體溢流之排砂方法，兩者在排砂濃度上之差異，並針對異重流運動機制、流場流速變化以及庫底淤泥濃度垂直分層現象做完整探討，試驗結果顯示異重流排砂能夠狹帶更多水庫淤砂，具備更佳排砂效果。Stephanus (2018) 透過試驗方式研究不同水深、淤積高程與不同底孔形

狀，對於沖刷錐 (scour cone) 之影響，試驗中以水平底床搭配改變四種不同形狀之底孔，並發現扁平矩形之底孔擁有顯著之排砂效果，尤其在庫底淤泥高程大於洩流底孔高程之情況。Ho *et al.* (2019) 以 1/81 之比尺之物理模型試驗，探討高水位於上游端產生異重流入庫與低水位空庫排砂時，兩種情況在使用繞庫排砂方法上排砂濃度之差異，研究結果中得知後者擁有明顯較佳之排砂效果。另外，根據水利署水利規劃試驗所 (2020)，日本朝日水庫為解決高含砂入庫水流，規劃設計繞庫排砂隧道進行水工模型試驗並評估其排砂濃度與可行性，此研究使用動床模型，考量福祿數相似律以 1/30 與 1/70 之比尺進行試驗，並透過經由此模型驗證該隧道能發揮其作用。南區水資源局 (2011, 2013) 以曾文水庫壩前庫底淤泥進行管道吸引特性試驗，結果顯示直接吸引庫底淤泥的效果有限，因黏土受凝聚力影響，難被自然水壓吸引啟動，排除量受限，需以射流擾動方式將淤泥凝聚力破壞以提升吸引效果。段鏞等 (2014) 則是針對清運水庫懸浮載上利用開口式倒虹吸管評估在不同水位時之排除懸浮載能力。Dreyer (2018) 比較不同颱風情況之排砂比，並進一步改變起始水位與入流濃度之操縱變因，旨在觀察及幫助分析異重流運移現象以提供排砂決策參考。其等比模型之比尺為 1/100，並使用壩前抽泥之原體砂為試驗用砂。因此，本研究參考上述研究與水利署南區水資源局 (2016a、2016b、2018)，規劃出以水槽試驗方式結合浚漂抽泥管與曾文象鼻管，利用浚漂抽泥將水庫底泥傳送到防淤隧道入口區域，觀察並歸納分析曾文象鼻管排砂濃度。

排砂濃度 (Venting Efficiency = VE) 之評估可以透過比較被排放泥砂質量與總入庫泥砂質量兩者來計算。因此，排砂濃度可以使用以下公式表達 (Morris and Fan, 1998 ; Lee *et al.*, 2014) :

$$VE = \frac{m_{out}}{m_{in}} = \frac{\sum_{i=0}^T (C_{out_i} \times Q_{out_i})}{\sum_{i=0}^T (C_{in_i} \times Q_{in_i})} \dots\dots\dots (1)$$

其中， m_{out} 與 m_{in} 分別表示出流泥砂質量與入流泥砂質量； C_{out_i} 與 C_{in_i} 分別表示在時間 i 之出流泥砂濃度與入流泥砂濃度； Q_{out_i} 與 Q_{in_i} 分別表示在時間 i 之入流流量與出流流量； T 則是總延時時間。

對於影響排砂濃度中最常被討論之變數包含：(1) 出流流量、(2) 排砂時機與延時、以及 (3) 出口尺寸大小與高程 (4) 入庫泥砂濃度 (5) 孔口流場影響範圍 (Morris & Fan, 1998; Yu *et al.*, 2004; Fan, 2008; Lee

et al., 2014)。李豐佐等 (2018) 曾經以水庫抽泥試驗探討 (1) 不同抽泥流量、(2) 抽泥深度與 (3) 淤泥濃度對排砂濃度之影響，試驗結果顯示淤泥濃度愈濃、出流濃度則愈濃，且浚漂抽泥管不同設計高程與有限深度影響同一淤泥濃度之出流濃度不明顯，故能設計更高流量以達更高之抽泥效率。另外，除了上述參數以外，其他地形參數包含水庫底床土壤粒徑、底床坡度，亦為評斷排砂濃度之影響變因。而最建議之水庫排砂方法為經由洩流底孔之異重流排砂，且洩流底孔建議以相對入庫流量較小之出流流量進行操作 (Chamoun *et al.*, 2016)。而針對孔口吸引排砂之研究，李鴻源等 (2019) 探討不同淤泥濃度、不同水深以及不同埋管深度之水壓吸引排砂水平式工法試驗，與不同淤泥濃度、不同水深及不同淤泥擾動情境之水壓吸引排砂垂直式工法試驗。該研究提供不同情境下之完整建議排砂方案，且由相關結論中得知：(1) 各項條件與方法下於抽泥入口進行擾動之不同影響。(2) 在抽泥入口影響範圍內，淤泥濃度對排砂量有明顯影響。然而，其並未特別探討曾文象鼻防淤隧道。此外，李鴻源等 (2019) 亦利用不同流體異重流包含鹽水、高嶺土及曾文泥砂，分別表現出不盡相同之出流濃度，並發現影響最為明顯之變因為泥砂顆粒粒徑；而在垂直式單孔底孔試驗中探討未加砂及於距抽泥中心不同距離下加入不同浚漂抽泥濃度之泥砂對排砂濃度之影響，由試驗結果得知水頭差對未加砂和有加砂之排砂濃度比並無明顯影響，試驗中亦探討浚漂抽泥管入口不同擾動條件下對排砂濃度之影響。因此，本研究嘗試針對試驗情境進行操作與分析，並參考過去相關研究設定四項變數，包含：(1) 曾文象鼻管開啟之不同出流流量、(2) 浚漂抽泥管之不同濃度、(3) 浚漂抽泥管之不同入流流量、以及(4) 浚漂抽泥管口與象鼻管口之不同距離。由於探討之位置為壩前、水域寬度較寬、淤積呈水平狀且防淤隧道入口屬於孔口壓力流流況，此外，本研究主要探討浚漂抽泥與防淤隧道之排砂效率關係，不進行底床沖淤之探討，因此本研究試驗情境設定為定床且底床為水平，透過模型比尺的理論，換算水槽水深、防淤隧道及浚漂抽泥管尺寸，以及水槽尺寸等，並以前述四項變因為主要探討目標，然而，由於本試驗係單純針對抽泥浚漂所放淤之懸浮質泥砂與防淤隧道之排砂效率進行探討，設定環境背景為非颱風豪雨時期 (其他出水工皆不開啟之條件下)，並以滿水位水資源充足以及不考量底床沖淤之前提下進行分析，因此並不考慮上游之來水來砂量。

三、模型試驗建置與流程

本試驗綜合試驗目的、範圍、水工構造物、模型用砂、相似律探討、經費、場地限制等等考量因素，使用位於台大水工試驗所建置之透明壓克力水箱為試驗模型，以整體縮尺 1/1000 評估曾文水庫象鼻管抽取情形。主要掌握福祿數相似以模型試驗數據探討現地之現象。試驗模型分別由整體水庫模型 (含象鼻防淤隧道、溢流槽及出流閥)、定水頭水箱與混合槽儲水水箱、抽水馬達、局部浚漂抽泥管，以及絞鐵支架所組成，水槽試驗示意圖如圖 1 所示。

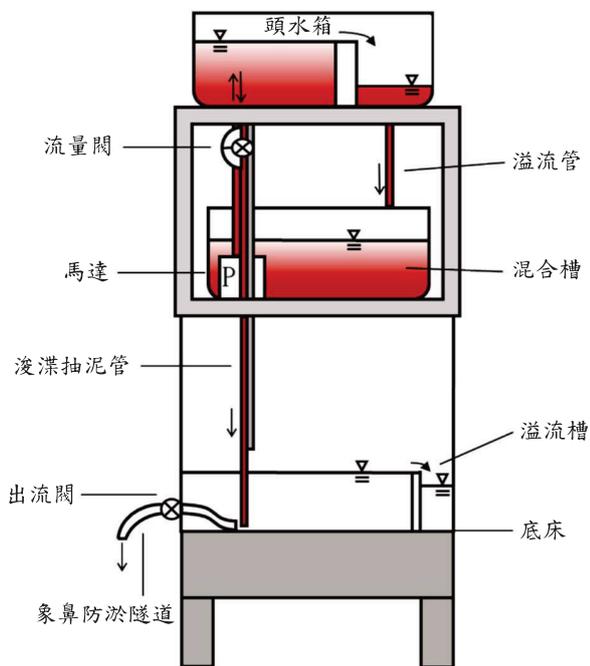


圖 1 試驗水槽側視示意圖

根據水利署南區水資源局 (2013) 於 2012 年 9 月實施之「曾文水庫庫區泥砂濃度觀測站建置及量測研判分析計畫」，得知曾文壩前抽泥取樣底床深 1 公尺範圍內之粒徑為 $7 \mu\text{m} \sim 8 \mu\text{m}$ 。另根據水利署於 2013 年 2 月執行之浚漂抽泥管取樣分析結果，指出壩前淤泥為 $5.6 \mu\text{m}$ 。兩者結果顯示淤泥粒徑小於 0.1 mm ，試驗上難以再縮小，因此本試驗中大部分組數為使用精製鹽為水庫淤砂。鹽巴完全溶於水中，不同於泥砂之絮網特性，鹽水溶液在無顆粒的情況下，亦不會沉降、落淤，此特性能使試驗時加入染劑後清晰辨識攝影機拍攝之影像，清楚顯現鹽水異重流之運移軌跡。且試驗上使用鹽水能快速、有效率進行多組數之試驗

本研究之試驗模型主體為台大水工試驗所既有之透明壓克力水槽改造而成，單一渠槽尺寸為長 30 公

分、寬 30 公分、深 50 公分，整體模型比尺為 1/1000。底床高程參考曾文水庫現地之呆水位標高 EL. 175 公尺，在地面設定為高程 EL. 0 公分之情況下，將模型底床設定為高程 EL. 58.0 公分。水體部分則參考曾文水庫之最高蓄水位高程 EL. 230 公尺，將水庫水槽之水位設定為高程 EL. 63.5 公分。在建構防淤隧道之象鼻管模型部分，依據曾文象鼻引水鋼管之總長度以及水平投影長度，做出等比象鼻管模型，總長度 6.0 公分、水平投影長度 5.45 公分之彎曲管段，高程 EL. 60.0 公分，象鼻管模型管口則與底床素材黏著貼合，高程為 EL. 58.0 公分。至於防淤隧道模型之剩餘部分，因實驗室場地限制，在設計模型上簡化防淤隧道結構，固定此簡化防淤隧道模型出水口於高程 EL. 53.5 公分，與水庫水槽之水頭高程相差 10 公分，使其具有與現地相當之高差，能有效模擬曾文新建防淤隧道之引水排砂。頭水箱包含出口、溢流口與抽水馬達，原理為透過抽水馬達送達之水量與溢流口之溢流，使定水頭箱內維持一固定水位，以提供出流時具備穩定之壓力水頭。本研究模擬抽泥船之浚漂抽泥管，試驗情境即為浚漂抽泥後將泥砂以浚漂抽泥管排放至象鼻管口吸取流場內，該壓克力管管口內徑 2 釐米、管壁厚度 1 釐米。

浚漂抽泥管與象鼻管間距 d 在本試驗中介於 0.3 cm 至 1.5 cm，相當於現場之 3 m 至 15 m；浚漂抽泥管管徑 D 則是 2 mm，相當於現場浚漂抽泥管 0.4 m；防淤隧道出流流量 Q_{out} 在本試驗中控制介於 $16.5 \text{ cm}^3/\text{s}$ 至 $28.17 \text{ cm}^3/\text{s}$ ，相當於現場之 $521.776 \text{ m}^3/\text{s}$ 至 $890.814 \text{ m}^3/\text{s}$ ；浚漂抽泥管流量 Q_m 則在試驗中控制介於 $0.58 \text{ cm}^3/\text{s}$ 至 $1.4 \text{ cm}^3/\text{s}$ ，相當於現場之 $0.328 \text{ m}^3/\text{s}$ 至 $0.792 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

試驗步驟上，試驗以預先調配鹽水濃度之方式，擬似現地浚漂抽泥所排放之渾水水體，在攪拌桶內加入各試驗濃度所需調配之清水與鹽，使用攪拌棒均勻混合鹽水溶液後，再加入食用紅色六號染劑將溶液染色以供後續攝影時清楚辨識浚漂抽泥渾水運移軌跡。溶液準備完成後，將其倒入儲水箱並安裝抽水馬達，開啟電源開關後使鹽水溶液由儲水箱經由抽水馬達傳送至頭水箱，靜待頭水箱內之鹽水溶液溢流，達成穩定循環。接著，為了讓開啟浚漂抽泥管排放淤泥的瞬間，浚漂抽泥渾水能夠被立刻排放至水庫水體中，試驗前置作業必須打開控制閥數秒，確保鹽水溶液預先充滿壓克力管，以避免開啟控制閥後發生浚漂抽泥渾水流至水庫水槽過程中之時間差。待設定好上述步驟後，將整體支架、頭水箱、儲水箱、壓克力管等等模擬浚漂抽泥船排放淤泥之試驗設備，移動至水庫水槽

內，使壓克力管管口對準該試驗項目預設之點位並固定高程。試驗開始後在第 5 秒時，開啟頭水箱之控制閥使浚漂抽泥渾水進入水庫模型水體中，模擬抽泥船利用浚漂抽泥管將泥砂放入象鼻管口前，將不同濃度鹽水加入水庫水槽中不同位置施放之過程。在開啟頭水箱控制閥之同時，以量杯於簡化防淤隧道模型出口處取樣共 5 秒。之後每 5 秒取樣一次，總共取樣 5 次，每次 5 秒，當時間到達第 30 秒時，關閉簡化防淤隧道模型控制閥、補水控制閥與頭水箱控制閥，結束試驗。此完整流程為一組試驗。以上述操作步驟實施每一組，並以 CON200 鹽度測試儀 (可測量範圍 0 ~ 260,000 ppm，解析度 100 ppm) 量測每一組試驗之 5 個取樣濃度，依據不同試驗條件，根據儀器有效測讀記錄分析試驗結果。試驗流程如圖 2 所示。

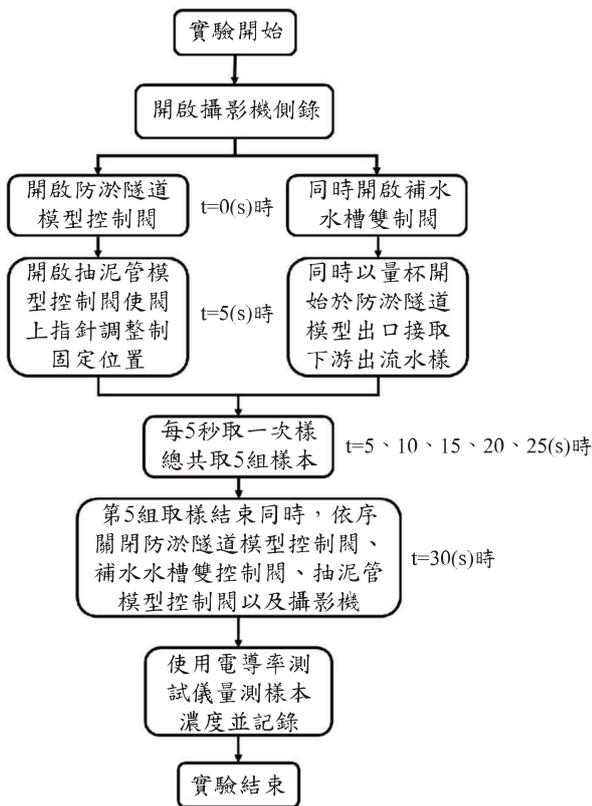


圖 2 試驗流程圖

四、試驗量測與因次分析

4.1 試驗量測項目

本試驗所有量測項目包含 (1) 防淤隧道流量與浚漂抽泥濃度、浚漂抽泥置放點影響排砂濃度試驗，以

及 (2) 浚漂抽泥流量與浚漂抽泥濃度、浚漂抽泥置放點影響排砂濃度試驗。

為探討防淤隧道開啟流量對出流泥砂濃度之影響，本試驗共取三組不同防淤隧道流量進行試驗操作，分別為 16.5 cm³/s、24.56 cm³/s、以及 28.17 cm³/s，浚漂抽泥流量固定為 0.58 cm³/s，而浚漂抽泥濃度則分別為 250 k ppm、150 k ppm、100 k ppm 及 50 k ppm，且於防淤隧道入流管口中心軸線上之六個點位置 (分別距防淤隧道入流管口中心 0.3 cm、0.5 cm、0.7 cm、1.0 cm、1.2 cm 及 1.5 cm) 放浚漂抽泥管模型管口，試驗組數總共 48 組。

此外，為探討浚漂抽泥之不同排放流量對防淤隧道出流泥砂濃度之影響，本試驗共取三組不同浚漂抽泥管流量進行試驗操作，分別為 0.58 cm³/s、1.0 cm³/s、以及 1.4 cm³/s，並以浚漂抽泥管出流控制閥之刻度指針進行流量調整。試驗上模擬在簡化防淤隧道模型全開且流量為 28.17 cm³/s 之條件下，將每一種浚漂抽泥流量分為三組濃度 (250 k ppm、100 k ppm 及 50 k ppm)，且同樣於防淤隧道入流管口中心軸線上之六個點位 (分別距防淤隧道入流管口中心 0.3 cm、0.5 cm、0.7 cm、1.0 cm、1.2 cm 及 1.5 cm) 置放浚漂抽泥管模型管口，試驗組數總共 54 組。

4.2 因次分析

在浚漂抽泥結合象鼻防淤隧道之情境中，出入流濃度比受到出入口幾何形狀、流體性質、流場狀態、泥砂種類、浚漂抽泥管與象鼻管開啟延時、周邊地形因素等等所影響。因此，本試驗在固定浚漂抽泥管與象鼻管抽取延時，且地形條件固定之情況下，考慮經由浚漂抽泥管口排出後傳遞至象鼻管周邊區域並被吸取之異重流，利用白金漢 Pi (Buckingham π) 定理分析，以得到濃度比 $\frac{C_{out}}{C_{in}}$ 之關係式。相關參數包含：

- (1) 浚漂抽泥管放淤入流與防淤隧道出流之出入流濃度 C_{out} 、 C_{in} ；
- (2) 出入流速度與浚漂抽泥管口對應橫向流速 V_{out} 、 V_{in} 、 V_a ；
- (3) 出入流流量 Q_{out} 、 Q_{in} ；
- (4) 出入流流體與水密度 ρ_{out} 、 ρ_{in} 、 ρ_w ；
- (5) 浚漂抽泥管管徑大小 D ；
- (6) 象鼻管口與浚漂抽泥管口距離 d ；
- (7) 浚漂抽泥管口距底床 h ；
- 以及 (8) 動力黏滯係數 μ 與 (9) 重力加速度 g 。則防淤隧道出流濃度 C_{out} 可以寫成下列函數之形式：

$$C_{out} = f(C_{in}, V_{out}, V_{in}, V_a, Q_{out}, Q_{in}, \rho_{out}, \rho_{in}, \rho_w, D, d, h, \mu, g) \dots \dots \dots (2)$$

其中， $C_{out} = [ML^{-3}]$ 、 $C_{in} = [ML^{-3}]$ 、 $V_{out} = [LT^{-1}]$ 、 $V_{in} = [LT^{-1}]$ 、 $V_a = [LT^{-1}]$ 、 $Q_{out} = [L^3T^{-1}]$ 、 $Q_{in} = [L^3T^{-1}]$ 、 $\rho_{out} = [ML^{-3}]$ 、 $\rho_{in} = [ML^{-3}]$ 、 $\rho_w = [ML^{-3}]$ 、 $D = [L]$ 、 $d = [L]$ 、 $h = [L]$ 、 $\mu = [ML^{-1}T^{-1}]$ 、 $g = [LT^{-2}]$ ，利用 π 定理進行因次分析，若選定 $\rho_{in} = [ML^{-3}]$ 、 $V_{in} = [LT^{-1}]$ 、 $D = [L]$ 分別代表質量、時間與長度的物理特性為重複變數，最終可以得到 12 個無因次參數，因此(2)式可以重新整理為下式：

$$\frac{C_{out}}{\rho_{in}} = f\left(\frac{C_{in}}{\rho_{in}}, \frac{V_{out}}{V_{in}}, \frac{V_a}{V_{in}}, \frac{Q_{out}}{V_{in}D^2}, \frac{Q_{in}}{V_{in}D^2}, \frac{\rho_{out}}{\rho_{in}}, \frac{\rho_w}{\rho_{in}}, \frac{d}{D}, \frac{h}{D}, \frac{\mu}{\rho_{in}V_{in}D}, \frac{gD}{V_{in}^2}\right) \dots\dots\dots(3)$$

由上式中可將 $\frac{C_{out}}{\rho_{in}}$ 與 $\frac{\rho_{out}}{\rho_{in}}$ 替換為 $\frac{C_{out}}{C_{in}}$ 。將 $\frac{C_{in}}{\rho_{in}}$ 、 $\frac{Q_{in}}{V_{in}D^2}$ 兩者分子分母相同意義的項目去除。將 $\frac{V_a}{V_{in}}$ 以 $\frac{V_{out}}{V_{in}}$ 取代。 $\frac{Q_{out}}{V_{in}D^2}$ 替換為 $\frac{Q_{out}}{Q_{in}}$ 。 $\frac{\rho_w}{\rho_{in}}$ 替換為

出入流密度差比 $\frac{\Delta\rho_{out}}{\rho_w}$ 與 $\frac{\Delta\rho_{in}}{\rho_w}$ 。將 $\frac{h}{D}$ 以 $\frac{d}{D}$ 取代。 $\frac{\mu}{\rho_{in}V_{in}D}$ 替換為入流雷諾數 Re_{in} 。 $\frac{gD}{V_{in}^2}$ 則替換為無因次

之出入流福祿數 Fr_{out} 與 Fr_{in} 之倒數。 $\frac{\rho_w}{\rho_{in}}$ 、 $\frac{gD}{V_{in}^2}$ 可結合為無因次之出入流密度福祿數 $Frd_{out} = \frac{V}{\sqrt{\left(\frac{\Delta\rho_{out}}{\rho_{in}}\right)gh}}$ 與 $Frd_{in} = \frac{V}{\sqrt{\left(\frac{\Delta\rho_{in}}{\rho_{in}}\right)gh}}$ ，其中， V 為入流

平均速度； ρ_{in} 為流體密度； ρ_w 為水密度； $\Delta\rho = \rho_s - \rho_w$ ，為浚渫抽泥管放淤密度與周遭流體密度差； g 為重力加速度； h 為浚渫抽泥管口至底床的渾水厚度。

另外， $\frac{\Delta\rho}{\rho_w}$ 、 $\frac{h}{D}$ 、 $\frac{gD}{V_{in}^2}$ 可結合為無因次之理查遜數 $Ri = \frac{\Delta\rho gh}{\rho_w V^2}$ ，其中， V 為平均速度； ρ 為清水密度； ρ_w 為

水密度； g 為重力加速度。由於浚渫抽泥管出口與防淤隧道間為一橫向流場，因此浚渫抽泥管出口放淤泥沙運移過程為浮昇射流模式，可結合 $\frac{V_a}{V_{in}}$ 、 $\frac{\Delta\rho}{\rho_w}$ 、 $\frac{h}{D}$ 、 $\frac{gD}{V_{in}^2}$ 多項參數，得到 Wright (1977) 利用因次分析推導出之浮流/橫向流長度比尺 (Plume/Crossflow

length scale) $L_b = \frac{B_0}{V^3}$ 。此適用情境為浮昇射流之流況接近浮流，示意圖如圖 3 所示，亦符合本試驗操作情

境。其中， V_a 為橫向流流速； $B_0 = \frac{\pi}{4} D^2 V_{in} \Delta g$ 為射流初始浮力通量； D 為浚渫抽泥管管徑； V_{in} 為入流速度； $\Delta g = \frac{\Delta\rho_a - \rho_0}{\rho_a} g$ 為射流與周遭流體密度差異所導致之重力加速度差； ρ_a 為周遭流體之密度，即為 ρ_w ； ρ_0 為射流體初始密度，即為 ρ_{in} ； g 為重力加速度。最後，經過上述所有步驟後，可將 (3) 式再整理為下式：

$$\frac{C_{out}}{C_{in}} = f\left(\frac{d}{D}, \frac{Q_{out}}{Q_{in}}, \frac{\Delta\rho_{out}}{\rho_w}, \frac{\Delta\rho_{in}}{\rho_w}, Re_{out}, Re_{in}, Fr_{out}, Fr_{in}, Frd_{out}, Frd_{in}, Ri, L_b\right) \dots\dots\dots(4)$$

式中， $\frac{C_{out}}{C_{in}}$ 為出入流濃度比， $\frac{d}{D}$ 為距離-管徑比尺， $\frac{Q_{out}}{Q_{in}}$ 為出入流流量比， $\frac{\Delta\rho_{out}}{\rho_w}$ 、 $\frac{\Delta\rho_{in}}{\rho_w}$ 為出入流密度差比， Re_{out} 、 Re_{in} 為出入流雷諾數， Fr_{out} 、 Fr_{in} 為出入流福祿數， Frd_{out} 、 Frd_{in} 為出入流密度福祿數， Ri 為理查遜數， L_b 為浮流/橫向流長度比尺。然而，本試驗主要研究浚渫抽泥管入流與防淤隧道出流，兩者結合下之應用，試驗中並不討論浚渫抽泥管放淤後之渾水厚度，故不考慮包含渾水厚度在內之無因次參數，因此最終將 (4) 式簡化為下式：

$$\frac{C_{out}}{C_{in}} = f\left(\frac{d}{D}, \frac{Q_{out}}{Q_{in}}, \frac{\Delta\rho_{out}}{\rho_w}, \frac{\Delta\rho_{in}}{\rho_w}, Re_{out}, Re_{in}, L_b\right) \dots\dots(5)$$

此關係式表示本試驗情境中出入流濃度比與上述 7 項參數有關，後續亦將進一步探討根據試驗數據回歸分析結果，最終選定影響濃度比之參數以及對應之關係式。

五、模型試驗結果與分析

本試驗研究透過整體 1/1000 水槽模型，評估應用浚渫抽泥提升防淤隧道排砂濃度之試驗，並針對前述因次分析參數探討 (1) 曾文象鼻防淤隧道開啟不同出流流量以及 (2) 浚渫抽泥管不同入流流量之影響，在上述兩項試驗條件下亦均同時探討浚渫抽泥管管口與曾文象鼻防淤隧道管口之不同距離，以及不同浚渫抽泥濃度之情境，以下分別陳述這兩種條件下之試驗成果。

5.1 曾文象鼻防淤隧道出流流量之影響

本試驗項目在控制浚渫抽泥流量為 0.58 cm³/s 之

情況下，以不同浚渫抽泥濃度、浚渫抽泥管管口與曾文象鼻防淤隧道管口之不同距離與不同防淤隧道流量，依照試驗步驟依序進行操作，觀察並分析防淤隧道排砂濃度之變化。試驗結果顯示在設定條件下將浚渫抽泥管模型放置於象鼻象鼻防淤隧道中心軸線上各六個不同位置，其中每一個點位在取樣 30 秒延時內濃度變化之曲線，試驗數據與影像成果如圖 3~圖 5 所示。根據試驗結果得知，在出入流流量控制為上述條件時，每條曲線隨時間的變化上，呈現 30 秒內五個時間點之出流泥砂濃度取樣中，除了第一個時間點出流濃度取樣最低之外，浚渫抽泥管在任何一個置放位置之濃度曲線最終均呈現微幅下降趨勢，但整體而言，於第 20 秒左右以後均達到相對平衡的狀態，其中，第一組取樣濃度最低之原因，主要原因在於浚渫抽泥的泥砂尚未完全運移至防淤隧道前所致，另外，由於每條曲線的歷程均都在第 20 秒左右以後均達到相對平衡的狀態且變化差異不明顯，因此，在後續分析排砂濃度以及排砂濃度上，主要係採用每一個曲線之

濃度最大值做為分析值。

至於曲線間之關係，可以透過數據圖成果發現，隨著浚渫抽泥濃度下降，重合的線段愈來愈多，其擴散現象愈不顯著。由試驗側視影像圖中，針對觀察防淤隧道流量對於出流泥砂濃度之影響，在 25 萬 ppm 與 10 萬 ppm 中，肉眼能判斷的其實並不顯著，但 5 萬 ppm 之試驗中，能在影像圖中看出色階上的差異，防淤隧道流量較大者，出流水體色階顏色較淡的現象亦較明顯，亦即出流泥砂濃度較低，由圖 3(a)及圖 5(a)各曲線間出流泥砂濃度差異程度即可看出此一現象，此外，防淤隧道流量越大，其流場影響範圍越廣，浚渫抽泥管置放位置不同所造成的影響就會越小，換言之，在同樣浚渫抽泥濃度之條件下，當防淤隧道流量愈大時，被防淤隧道吸入之水庫內清水量亦隨之愈多，因此取樣濃度與隧道流量呈反比，此外，浚渫抽泥濃度愈大，各曲線間防淤隧道出流泥砂濃度值的差異亦越大。

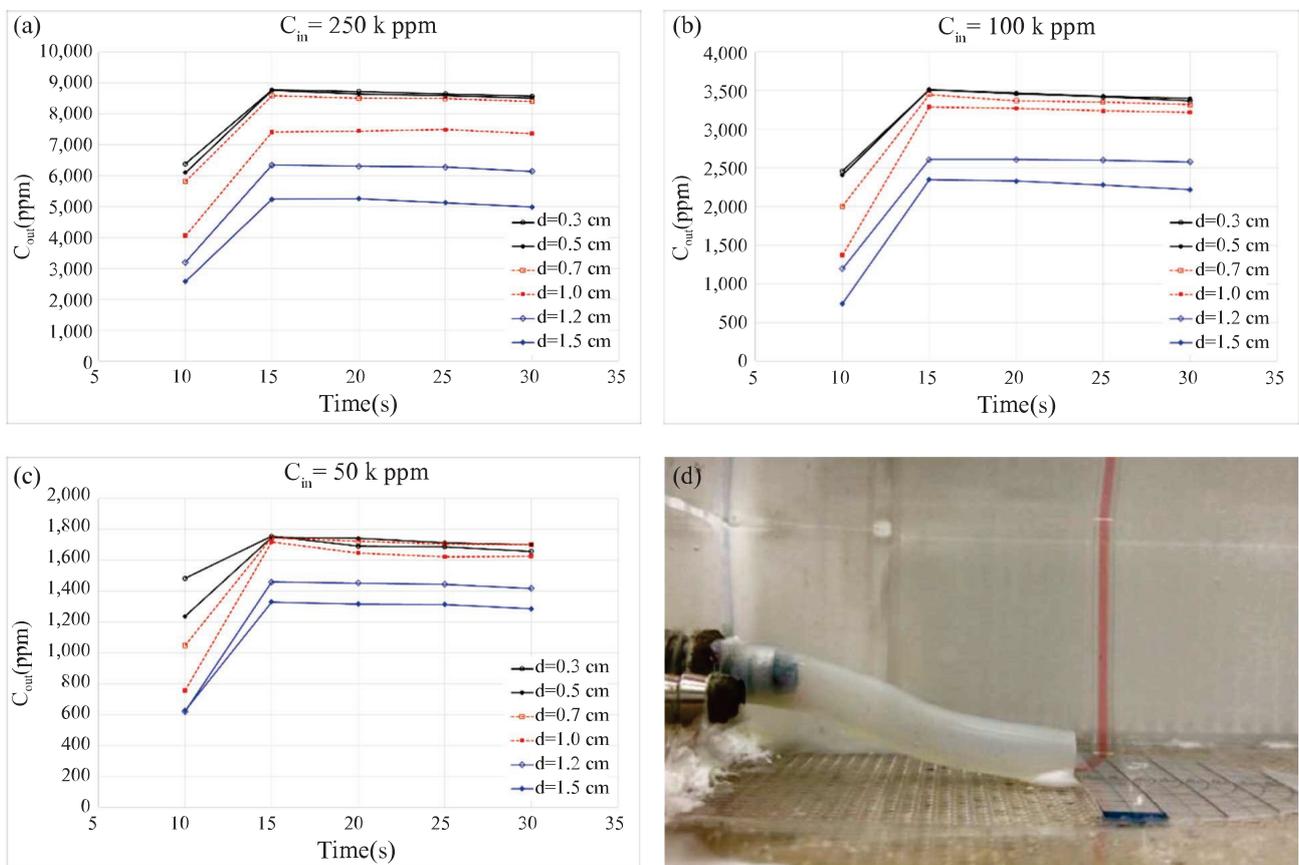


圖 3 防淤隧道流量 $16.5 \text{ cm}^3/\text{s}$ 及浚渫抽泥流量 $0.58 \text{ cm}^3/\text{s}$ 情境下出流泥砂濃度 (a) $Q_{in} = 250 \text{ k ppm}$; (b) $Q_{in} = 100 \text{ k ppm}$; (c) $Q_{in} = 50 \text{ k ppm}$; (d) $Q_{in} = 50 \text{ k ppm}$, $d = 0.5 \text{ cm}$ 及 $t = 30 \text{ sec}$ 之試驗側視圖

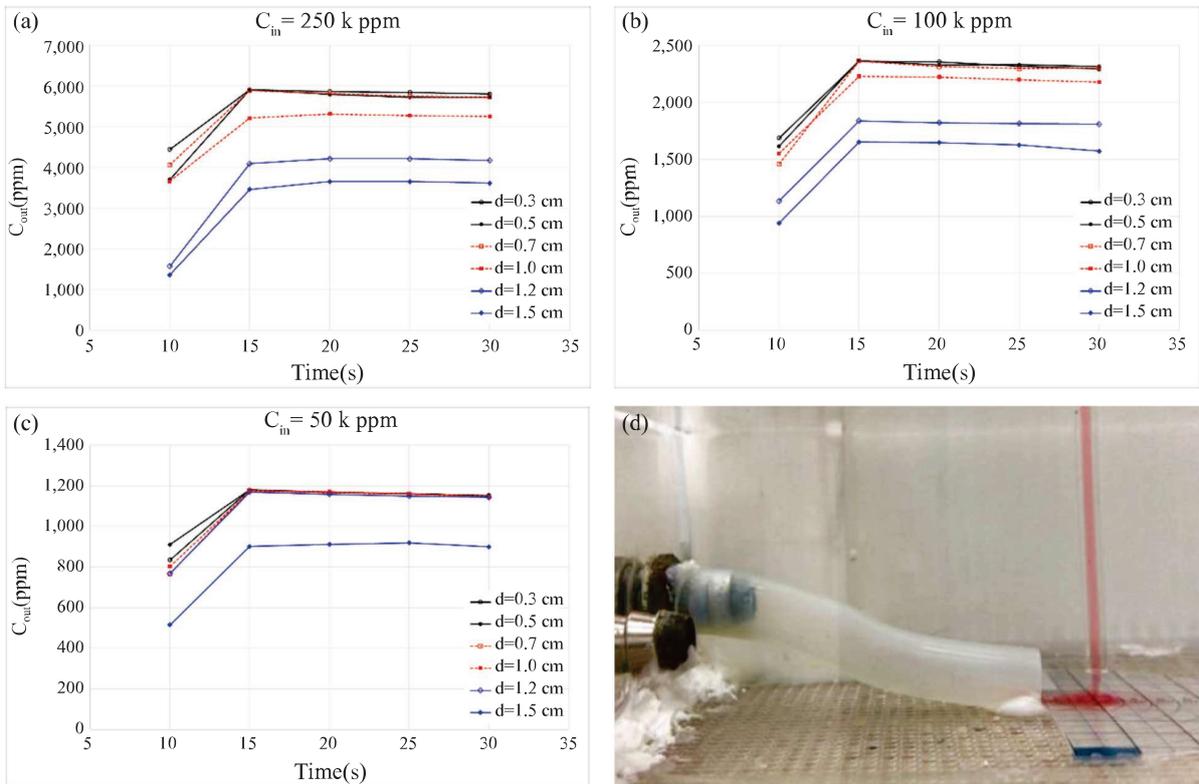


圖 4 防淤隧道流量 $24.56 \text{ cm}^3/\text{s}$ 及浚淤抽泥流量 $0.58 \text{ cm}^3/\text{s}$ 情境下出流泥砂濃度 (a) $Q_{in}=250$ k ppm; (b) $Q_{in} = 100$ k ppm; (c) $Q_{in} = 50$ k ppm; (d) $Q_{in} = 50$ k ppm, $d = 1.0$ cm 及 $t = 30$ sec 之試驗側視圖

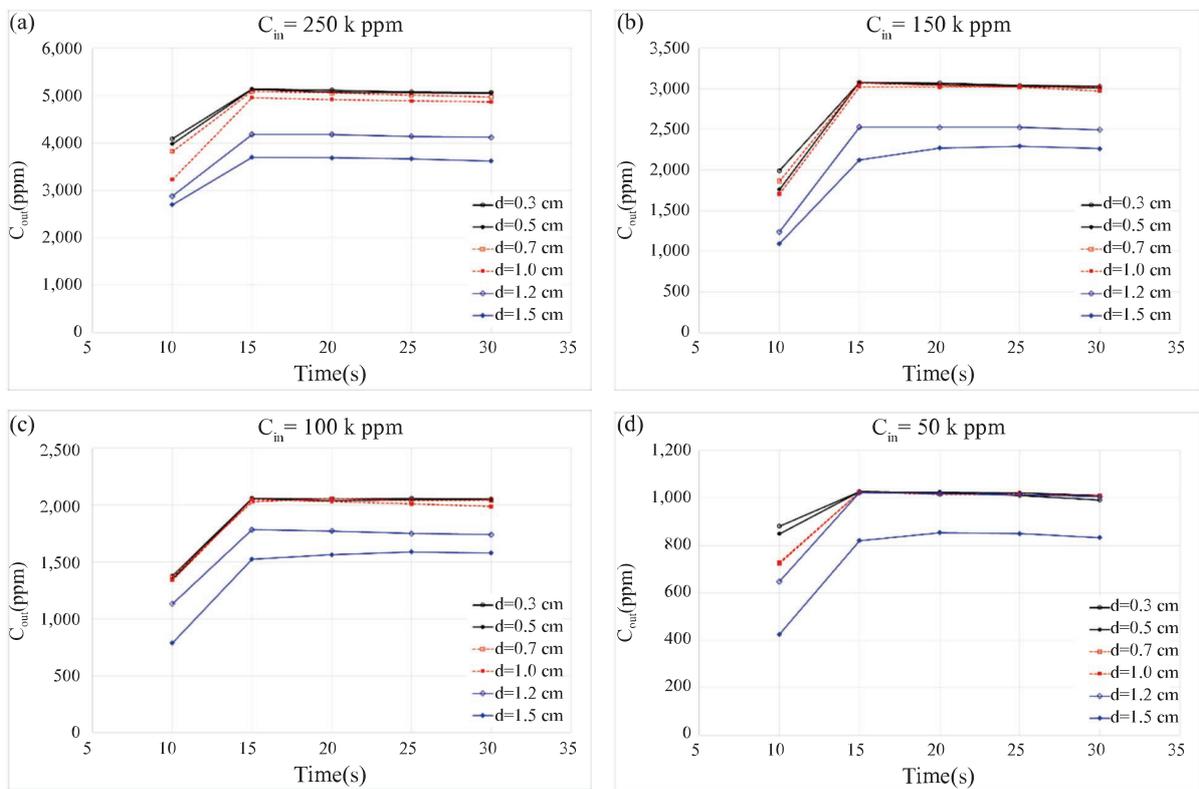


圖 5 防淤隧道流量 $28.17 \text{ cm}^3/\text{s}$ 及浚淤抽泥流量 $0.58 \text{ cm}^3/\text{s}$ 情境下出流泥砂濃度 (a) $Q_{in} = 250$ k ppm; (b) $Q_{in} = 150$ k ppm; (c) $Q_{in} = 100$ k ppm; (d) $Q_{in} = 50$ k ppm

5.2 浚漂抽泥流量之影響

本試驗項目在控制隧道流量為 $28.17 \text{ cm}^3/\text{s}$ 之情況下，以不同浚漂抽泥濃度與不同浚漂抽泥流量依照試驗步驟依序進行操作，觀察並分析其排砂濃度結果之差異。試驗結果顯示在設定條件下將浚漂抽泥管模型放置於象鼻防淤隧道中心軸線上各六個不同位置，其中每一個點位在取樣 30 秒延時內濃度變化之曲線，試驗數據與影像成果如圖 6 及圖 7 所示。根據試驗結果得知，在出入流流量控制為上述條件時，在浚漂抽泥流量 $1.0 \text{ cm}^3/\text{s}$ 之情況下，每條曲線隨時間的變化上，呈現 30 秒內五個時間點之出流泥砂濃度取樣中，第一組濃度最低，主要原因還是在於浚漂抽泥的泥砂尚未完全運移至防淤隧道前所致；而當浚漂抽泥管放置於第四 ($d = 1.0 \text{ cm}$) ~ 六 ($d = 1. \text{ cm}$) 個距離時，由於浚漂抽泥泥砂逐漸運移至防淤隧道前，因此出流濃度有緩慢提升之趨勢，然而在 20 秒延時內，亦逐漸達到相對平衡的出流泥砂濃度值。而在浚漂抽

泥流量 $1.4 \text{ cm}^3/\text{s}$ 之情況下，其出流濃度趨勢與浚漂抽泥流量 $1.0 \text{ cm}^3/\text{s}$ 之情況相同，均會在浚漂抽泥管模型與防淤隧道管口距離增加後，出現出流濃度持續提升之現象，然而在 20 秒延時內，亦逐漸達到相對平衡的出流泥砂濃度值。

至於各曲線間之關係，可以透過數據圖觀測發現，當浚漂抽泥管放置於六個設定距離中前三 ($d = 0.7 \text{ cm}$) ~ 四 ($d = 1.0 \text{ cm}$) 個距離後，各曲線間出流濃度開始呈現下降之趨勢，主要在於浚漂抽泥管口距離防淤隧道越遠，當抽泥漂抽泥砂運移至防淤隧道前的過程，受到清水水體稀釋之現象越明顯所致；而隨著浚漂抽泥流量增加，同樣濃度下，重合的線段愈來愈少，代表其擴散現象愈顯著。而由試驗影像圖中亦可以觀察出浚漂抽泥流量的改變對防淤隧道出流泥砂濃度亦有影響，隨著浚漂抽泥流量愈大，其浚漂抽泥泥砂運移至防淤隧道口的過程中，擴散現象愈顯著，且同樣浚漂抽泥流量之條件下，浚漂抽泥濃度愈大，擴散現象亦愈顯著。

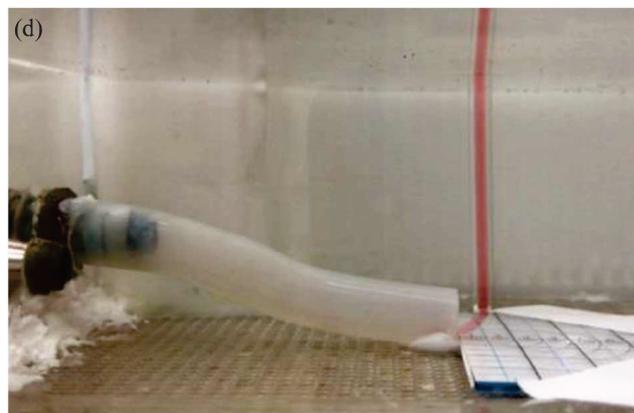
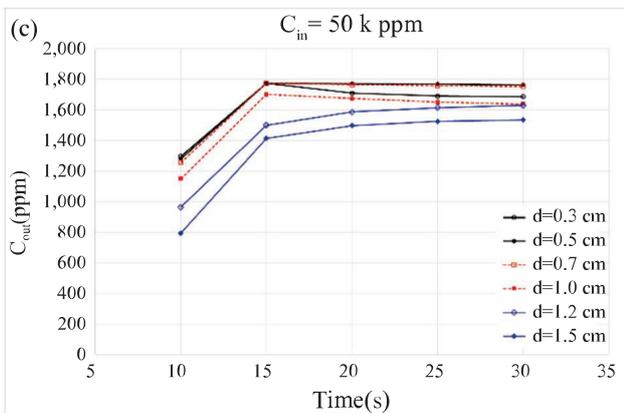
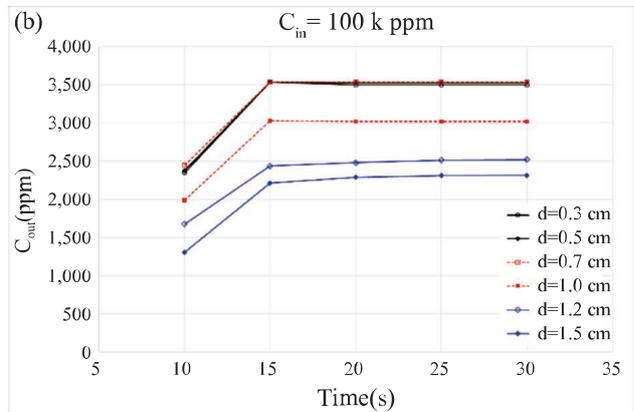
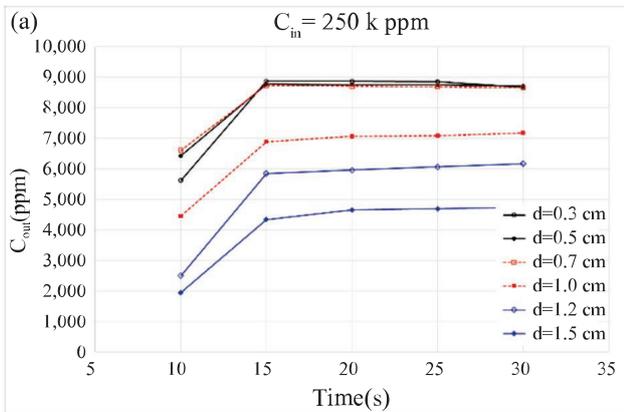


圖 6 防淤隧道流量 $28.17 \text{ cm}^3/\text{s}$ 及浚漂抽泥流量 $1.0 \text{ cm}^3/\text{s}$ 情境下出流泥砂濃度 (a) $Q_{in} = 250 \text{ k ppm}$; (b) $Q_{in} = 100 \text{ k ppm}$; (c) $Q_{in} = 50 \text{ k ppm}$; (d) $Q_{in} = 50 \text{ k ppm}$, $d = 0.5 \text{ cm}$ 及 $t = 30 \text{ sec}$ 之試驗側視圖

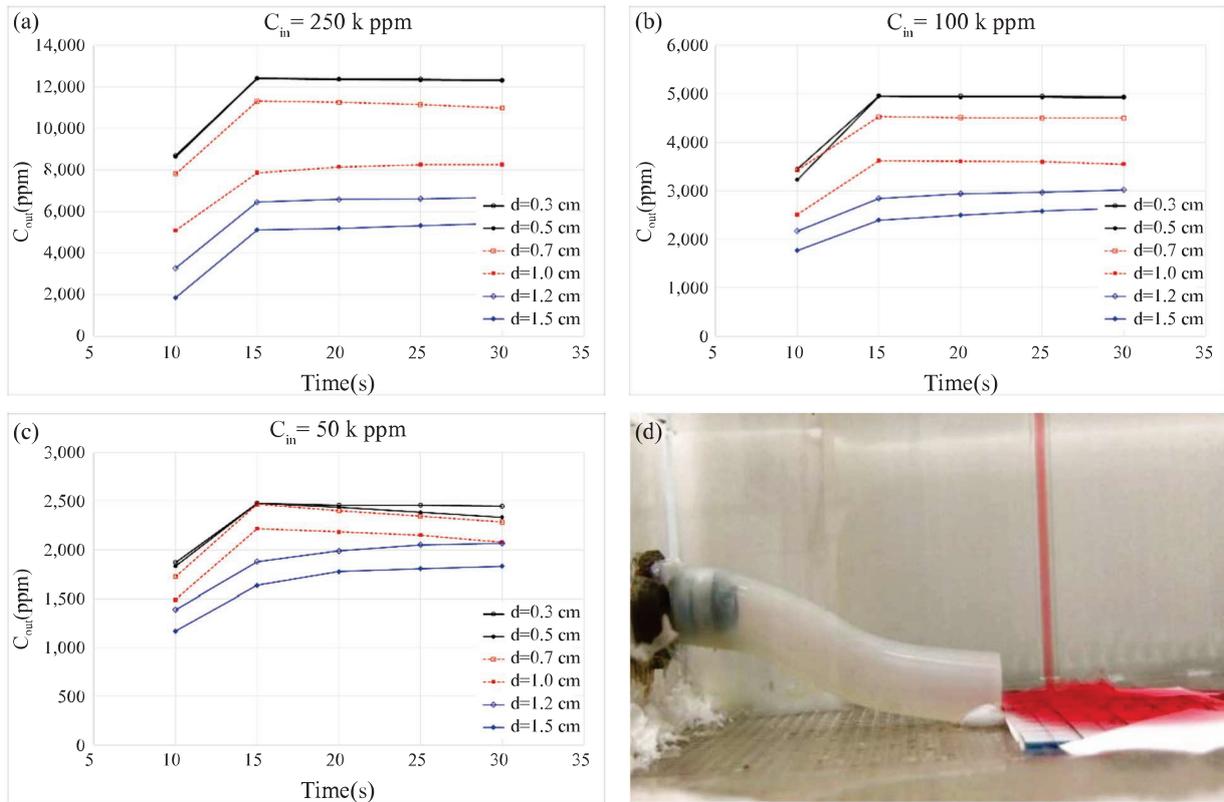


圖 7 防淤隧道流量 $28.17 \text{ cm}^3/\text{s}$ 及浚淤抽泥流量 $1.4 \text{ cm}^3/\text{s}$ 情境下出流泥砂濃度 (a) $Q_{in} = 250 \text{ k ppm}$; (b) $Q_{in} = 100 \text{ k ppm}$; (c) $Q_{in} = 50 \text{ k ppm}$; (d) $Q_{in} = 50 \text{ k ppm}$, $d = 1.0 \text{ cm}$ 及 $t = 30 \text{ sec}$ 之試驗側視圖

5.3 迴歸分析防淤隧道排砂濃度

為了瞭解因為距離、流量或是濃度等因素導致防淤隧道出流排砂濃度少於 100% 之影響，本研究根據上述防淤隧道流量及浚淤抽泥流量的試驗結果，利用防淤隧道排砂濃度下降段之數據進行無因次分析。而在參數最終選定部分，根據出入流濃度比無因次分析結果，由 (5) 式得知本試驗情境之出入流濃度比 $\frac{C_{out}}{C_{in}}$ 與距離-管徑比尺 $\frac{d}{D}$ 、出入流流量比 $\frac{Q_{out}}{Q_{in}}$ 、出流濃度密度差比 $\frac{\Delta\rho_{out}}{\rho_w}$ 、入流濃度密度差比 $\frac{\Delta\rho_{in}}{\rho_w}$ 、出流雷諾數 Re_{out} 、入流雷諾數 Re_{in} 、浮流/橫向流長度比尺 L_b 等 7 項無因次參數較為相關，但經出入流濃度比 $\frac{C_{out}}{C_{in}}$ 與各參數分別進行相關性分析後，剔除幕次方小於 0.1 影響較小之參數後，並將距離-管徑比尺 $\frac{d}{D}$ 考量 100% 排砂濃度之距離 d_c (d_c =影響半徑)，修正本項參數為 $\frac{d-d_c}{D}$ ，歸納上述相關性較高之無因次參數組合後，可得下式：

$$\frac{C_{out}}{C_{in}} = f\left(\frac{d-d_c}{D}, \frac{Q_{out}}{Q_{in}}, Re_{in}\right) \dots\dots\dots(6)$$

由此可知，出入流濃度比 $\frac{C_{out}}{C_{in}}$ 主要受有效距離-管徑比尺 $\frac{d-d_c}{D}$ 、出入流流量比 $\frac{Q_{out}}{Q_{in}}$ 及入流雷諾數 Re_{in} 等三項無因次參數影響。而根據試驗數據結果代入上述三項無因次參數進行迴歸分析，可得迴歸式如下：

$$\frac{C_{out}}{C_{in}} = 0.0194\left[\frac{(d-d_c)}{D}\right]^{-0.44}\left(\frac{Q_{out}}{Q_{in}}\right)^{-0.42}Re_{in}^{0.29} + 0.0044, R^2 = 0.72 \dots\dots\dots(7)$$

因此，根據試驗之下降段出入流排砂濃度與無因次參數分析結果，可得其關係圖如圖 8 所示。圖中，試驗之下降段出入流濃度比介於 0.015 ~ 0.045 之間，平均值約為 0.0235，標準差為 0.0056，此外，根據試驗結果，排砂濃度影響半徑 d_c 值可由不同防淤隧道流量、浚淤抽泥流量與濃度之試驗結果 (圖 3 ~ 圖 7) 得知，由上述相關試驗可知防淤隧道出流泥砂濃度在各種試驗條件下，當浚淤抽泥放淤位置距離防淤

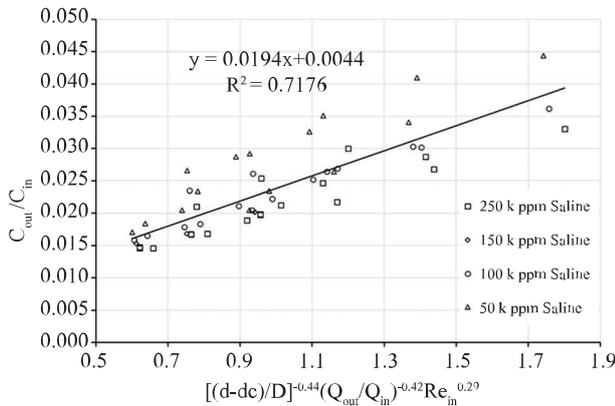


圖 8 排砂濃度比與無因次參數關係

隧道 0.7 cm 以上時，防淤隧道出流泥砂濃度開始有明顯減少之趨勢，因此本研究初步以此數值作為影響半徑，然而若是試驗條件或是環境背景改變時，則此一數值則需重新評估，本研究採用之影響半徑 d_c 為 0.7 cm。

六、結論

本研究以曾文水庫為研究區域，探討結合曾文象鼻防淤隧道與浚漂抽泥管之防淤工法，透過建構 1/1000 水槽模型並進行應用浚漂抽泥提升防淤隧道排砂濃度之試驗研究，評估此操作情境下象鼻防淤隧道出流泥砂濃度之變化，並探討不同浚漂抽泥濃度、不同浚漂抽泥管流量、不同防淤隧道流量、以及不同浚漂抽泥管投放渾水位置等四項試驗操作變因對曾文防淤隧道操作之出流排砂濃度有何影響，進一步提供此防淤工法策略上之參考，然而本試驗係單純針對抽泥浚漂所放淤之懸浮質泥砂與防淤隧道之排砂效率進行探討，設定環境背景為非颱風豪雨時期（其他出水工皆不開啟之條件下），並以滿水位水資源充足以及不考量底床沖淤之前提下進行分析，因此並不考慮上游之來水來砂量，此外，由試驗結果可知，防淤隧道出流泥砂濃度在浚漂抽泥放淤位置距離防淤隧道 0.7cm 以上時，防淤隧道出流泥砂濃度開始有明顯減少之趨勢，因此本研究初步以此數值作為影響半徑，若試驗條件或是環境背景改變時，則此一數值需重新評估。而由本研究結果可歸納出以下結論：

- (1) 在浚漂抽泥流量越大與濃度越濃條件下，防淤隧道在固定流量條件時，其排砂濃度越濃成正比；在固定浚漂抽泥流量與濃度條件下，防淤

隧道流量越大，則排出清水量增大，因此排砂濃度越低。

- (2) 排砂濃度分析中，本研究提供之無因次參數公式，適用範圍有所限制。浚漂抽泥管與象鼻管間距 d 相當於現場之 3 m 至 15 m；浚漂抽泥管管徑 D 相當於現場浚漂抽泥管 0.4 m；防淤隧道出流流量 Q_{out} 相當於現場之 521.776 m^3/s 至 890.814 m^3/s ；浚漂抽泥管流量 Q_m 相當於現場之 0.328 m^3/s 至 0.792 m^3/s ；浚漂抽泥濃度介於 25 萬 ppm 至 5 萬 ppm 之間；入流雷諾數 Re_m 控制介於 370 至 1030。
- (3) 由排砂濃度試驗結果發現有效距離-管徑比尺

$\frac{d-d_c}{D}$ 所佔影響權重最大，其次依序為出入流

量比 Q_{out}/Q_{in} 及入流雷諾數 Re_m 等無因次參數。利用上述公式，針對曾文水庫未來利用防淤隧道搭配浚漂抽泥系統下之防洪減淤操作，能提供曾文水庫實務上對於本工法之策略參考，此為本論文最主要之貢獻。

本試驗研究目前屬於前期初步之試驗成果，因此建議未來應針對上述水庫環境（不同蓄水位）、出水工（溢洪道、發電及 PRO）操作及水理影響（上游來水來砂及底床沖淤）等因子做進一步之分析。

致謝

本研究承蒙科技部計畫編號 MOST 109-2625-M-002-009、及 MOST 109-2625-M-002-001 之經費補助，國立臺灣大學生物環境系統工程學系以及國立臺灣大學水工試驗所提供場地與人力支援，使本研究得以完成，謹致謝忱。

參考文獻

1. Chamoun, S., Cesare, G. D. and Schleiss, A. J., "Experimental investigation on turbidity current venting under restrained outflow discharges," *Taylor & Francis Group*, London (2016).
2. Chamoun, S., Cesare, G. D. and Schleiss, A. J., "Influence of Operational Timing on the Efficiency of Venting Turbidity Currents" *Journal of Hydraulic Engineering*, 144(9), DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-

- 7900.0001508 (2018).
3. Chamoun, S., Cesare, G. D. and Schleiss, A. J., "Management of turbidity current venting in reservoirs under different bed slopes," *Journal of Environmental Management*, 204, 519-530 (2017).
 4. Dreyer, Jacob Stephanus, "Investigating the influence of low-level outlet shape on the scour cone formed during pressure flushing of sediments in hydropower plant reservoirs," Thesis (MEng)--Stellenbosch University, (2018).
 5. Fan, J., "Stratified flow through outlets," *Journal of Hydro-environment Research*, 2(1), 3-18 (2008).
 6. Ho, T. C., Hwang, G. J., Hwang, K. S., Hsieh, K. C. and Chen, L. W., "Experimental and numerical study on desilting efficiency of the bypassing tunnel for Nan-Hua reservoir," Retrieved from <https://scholars.lib.ntu.edu.tw/handle/123456789/41184> (April, 2019).
 7. Lee, F. Z., Lai, J. S., Tan, Y. C. and Sung, C. C., "Turbid density current venting through reservoir outlets," *Journal of Civil Engineering*, 18(2):694-705. DOI: 10.1007/s12205-014-0275-y (2014).
 8. Morris, G. L. and Fan, J., "Reservoir sedimentation handbook: design and management of dams, reservoirs, and watersheds for sustainable use," McGraw Hill Professional (1998).
 9. Ramos-Villanueva, M., "Experimental study of reservoir turbidity currents venting," Thesis for the degree of Master of Science in Civil Engineering in the Graduate College of the University of Illinois at Urbana-Champaign (2016).
 10. Wright, S. J., "Mean behavior of buoyant jets in a crossflow," *J. Hydraulics Div., ASCE*, 103(5), 499-513 (1977).
 11. Yu, W. S., Hsu, S. H. and Fan, K. L., "Experiments on selective withdrawal of a codirectional two-layer flow through a line sink," *J. Hydraulic. Eng.*, 130(12), 1156-1167 (2004).
 12. 李鴻源、林志平、譚義績、賴進松、張倉榮，「水庫庫容永續技術之研發應用」，科技部，計畫編號 MOST 105-2221-E-002 -063 -MY3，2019。
 13. 李豐佐、賴進松、王興睿、劉政其，「水庫抽泥試驗之排砂濃度研究」，農業工程研討會，高雄，2018。
 14. 林志憲，「改良開口虹吸對水庫清淤之研究」，私立中國科技大學土木與防災設計研究所碩士學位論文，2013。
 15. 段鏞、傅金城、鄧慰先，「利用開口式倒虹吸管於清運水庫懸浮載之研究」，臺灣水利，第 62 卷，第四期，7-15，2014。
 16. 水利署水利規劃試驗所，「水庫防淤管理與技術應用」，2020。
 17. 水利署水利規劃試驗所，「曾文水庫防淤隧道全域水工模型試驗-第二階段成果報告」，2018。
 18. 水利署南區水資源局，「曾文水庫沖刷漏鬥、射流排淤機制與操作策略研究」，逢甲大學，2011。
 19. 水利署南區水資源局，「曾文水庫取水斜塔前庭清淤工程第二期-永久固定輸泥管線工程基本設計報告書」，2016a。
 20. 水利署南區水資源局，「曾文水庫取水斜塔前庭清淤工程第二期-永久固定輸泥管線工程細部設計報告書」，2016b。
 21. 水利署南區水資源局，「曾文水庫抽泥作業第三期清淤計量及檢驗成果報告書」，2018。
 22. 水利署南區水資源局，「曾文水庫庫區泥砂濃度觀測站建置及量測研判分析計畫」，國立臺灣大學水工試驗所，2013。

收稿日期：民國 110 年 06 月 28 日
修改日期：民國 110 年 07 月 26 日
接受日期：民國 110 年 09 月 10 日