

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

凝聚性沈滓水庫之排砂策略研究(III)---

子計畫六：水庫洩降排砂機制之研究(III)

A Study on Reservoir Drawdown Flushing (III)

計畫編號：NSC-89-2211-E-002-050

執行期間：88 年 8 月 1 日至 89 年 7 月 31 日

主持人：賴進松 助理研究員 台灣大學水工試驗所

一、中文摘要

水庫淤砂清除技術除了浚渫挖砂外，水力排砂技術常為世界多國所採行，其中不乏成功之案例。水力排砂以水流自身重力搬運輸送泥沙，目前現有輸砂理論及模式無法適切研析及模擬其運移之過程，希望能在適當洩降操作的時機，應用洩降排砂來排放入庫泥砂或沖刷水庫原有淤積物，以減緩水庫淤積過程，維持水庫長期有效庫容。由於台灣南部地區水庫集水區土壤地質之特性，許多水庫(如：阿公店水庫、白河水庫、尖山埤水庫等)內除了非凝聚性淤砂外，存在甚多含有相當比例凝聚性沈滓之淤積物，而凝聚性沈積物之存在使得水庫排砂較非凝聚性沈積物之排砂更為複雜。本研究將分三年依序進行，第一年已進行洩降排砂水工試驗之水槽準備工作，利用阿公店水庫淤泥進行試驗研究其沖刷時起動之機制，並建立模擬洩降排之數值模式。第二年進行沖刷漏斗試驗，又利用閘門控制從事洩降排砂試驗。第三年則進行不同淤積型態之洩降沖刷試驗，並與 Smart 輸砂公式之數值模擬做比較分析。

Abstract

Keywords : drawdown flushing, cohesive sediment.

To preserve the useful life of the reservoir, the control of reservoir sedimentation through hydraulic flushing has been successfully employed in the field. Observations in the field and in physical

model tests have shown that the reservoir water level must be drawn down to remove previous deposits or carry incoming sediment through the reservoir. In the region of the southern Taiwan, reservoir deposits (such as the A-Kung-Tien reservoir, Bai-Ho reservoir, Jansenpei reservoir, etc.) contain a great amount of cohesive materials that have entirely different behaviors from the noncohesive deposits. It is necessary to investigate the key factors influencing the effectiveness of flushing operations for further understanding of the flushing processes.

The main goals in the first year of the 3-yr project of the study on reservoir drawdown flushing was to remodel a 12m-long flume as a reservoir and to develop a one-dimensional diffusion model for predicting bed profile variations. In the third year, experiments on drawdown flushing have been conducted to obtain data for model calibration.

二、背景及目的

台灣南部地區水庫集水區土壤地質之特性，如阿公店水庫、白河水庫、尖山埤水庫等，除了非凝聚性淤砂外，存在甚多含有相當比例凝聚性沈滓之淤積物，而凝聚性沈積物之存在使得水庫洩降排砂，較非凝聚性沈積物之排砂更為複雜，且國內外少有這方面之研究。目前現有輸砂理論及模式無法適切研析及模擬其運移之過程，故應深入研究沈滓在水庫洩降排砂時之行為。

淤泥受沖刷時，作用於淤泥顆粒上的力包括水流剪切力和上舉力、顆粒自

身重力和與周圍顆粒之間的粘結力。水流冲刷時產生的剪切力和上舉力促使泥沙被帶起移動，顆粒重力和粘結力則抵抗水流的冲刷，而凝聚性淤積物的粘結力可遠大於其重力。然而，現有輸砂理論及模式無法適切研析及模擬其運移之歷程，無法對洩降排砂的影響做出較精確的定性及定量之評估。為瞭解凝聚性沈澱在水庫洩降排砂時之行為，須從水工試驗加以分析凝聚性沈澱冲刷時之物理性質，並建立數學模式來模擬洩降排砂時庫水位及庫床之變動以了解排砂之效率和出庫量[1]。

本計畫為整合型計畫「凝聚性沈澱水庫之排砂策略研究」中之一子計畫，期能深入探討水庫洩降排砂之機制，提供其他子計畫關於庫床淤泥在洩降冲刷時沈澱運移及水理特性，以獲得整合性之研究成果。本研究將分三年依序進行，第一年首先進行洩降排砂水工試驗之水槽準備工作，利用阿公店水庫淤泥進行試驗研究其冲刷時起動之機制，並建立模擬洩降排砂之數值模式；第二年利用非粘性沈澱，在水槽進行上游無來砂時，冲刷漏斗幾何形狀及洩降排砂試驗之量測，同時建立可模擬庫床水位變動之變量流動床模式，並將試驗所得數據作為數值模式測試之用；第三年則進行上游加砂時洩降排砂之試驗，考慮水庫淤砂在不同淤積型態下對洩降冲刷效果之影響，所得之數據將作為擴散模式檢定驗證之用。本研究計畫預期得到之試驗資料和建立之模式，希望能將之應用於實際水庫排砂操作中。

三、水庫洩降冲刷試驗

為明瞭壩前水位藉由排砂閘門控制時，不同淤積型態與初始底床坡度，對洩降冲刷過程之影響，本研究乃從事三組試驗，加以探討與分析。第一組試驗(R1)首先進行淤積型態為三角洲淤積時，閘門依定率開啟後之洩降冲刷試驗；第二組試驗(R2)進行水庫淤積型態為錐狀淤

積時，閘門驟開後洩降冲刷情形，以分析洩降冲刷過程之輸砂及水理特性；第三組試驗(R3)亦具有錐狀淤積之初始底床淤積情形，所不同的乃是將底床坡度調整為 1%，用以瞭解坡度因子對冲刷情形之影響大小。各組洩降冲刷試驗之砂床鋪設情形，如圖 1 所示。以下首先說明試驗設備與步驟。

3.1 試驗設備與材料

本試驗使用位於台灣大學水工試驗所舊館中長 12m、寬 0.3m、高 0.6m 之水槽，進行水庫洩降冲刷試驗。水槽兩邊壁由長 3.0m、高 0.6m、厚 0.02m 之強化玻璃相銜接而成，底床則由不銹鋼鋼板所製。水槽的底床坡度可由電動昇降桿操作調整，供水則由一高 5.3m 混凝土之頭水箱提供定壓力水頭，並由一設有微刻度之控制閥調節入流量(供水最大流量為 $0.04\text{m}^3/\text{s}$)；水流由微調控制閥經管線流入前，流過整流柵穩流後，再進入玻璃水槽。試驗水槽下游端設有一電動閘門及手動尾水板，以控制下游水位；水流經尾水板跌水後流入沉砂池(沉砂池兼蓄水功能，可用以流量率定)，再經管線流入蓄水池，以供抽水馬達將水抽回至頭水箱，而形成一循環水槽系統。

本試驗之試驗用砂，經篩分析後，將累積粒徑分佈曲線示於圖 2 中，其中值粒徑(d_{50})為 0.27mm，而沈澱粒徑幾何標準偏差($\sigma = \sqrt{d_{84.1}/d_{15.9}}$)為 1.58，孔隙率(p)為 0.407。

3.2 試驗結果與分析

試驗 R1 開始進行之前，根據試驗步驟所述，將所需之試驗砂床鋪設完成後，蓄水達初始水位 0.25m，並使入流量等於出流量，此時水槽下游排砂閘門開口前之淤積底床，在閘門開啟之瞬間，即開始冲刷淤積物，並形成一穩定型態之冲刷漏斗(此時並無泥砂運移現象)。隨著水流達穩定狀態後，試驗開始並將閘門開啟，以每分鐘開啟 1 公分，開度至 4

公分。於所設定時刻，將各量測位置的水位高度與砂面高度記錄下來。圖 3 與圖 4 分別為第一組試驗(R1)所記錄的水位線高度與砂面高度資料，經點繪後的結果。

四、擴散模式之建立與模擬

在洩降冲刷過程中，底床變動及出庫排砂量的推估計算是相當重要的分析對象。除了試驗及實測資料建立之經驗關係用來推估洩降冲刷特性外，建立數學模式求得解析理論解或數值解，模擬庫區在洩降冲刷過程時底床變動及出庫排砂量等，亦有助於現象之瞭解與實務之應用。

4.1 模式之建立

水流連續方程式與動量方程式分別如下所示：

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2 + \frac{gh^2}{2})}{\partial x} = gh(S_0 - S_f) \quad (2)$$

式中 h 為水深； t 為時間； u 為主流向之流速； x 為主流向之距離(從開門算起)； S_0 為底床坡降； S_f 則為摩擦坡降[2]。

泥砂連續方程式則可表為：

$$(1-p)\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial q_s}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

式中 p 為泥砂孔隙率； z 為底床高程； q_s 為單位寬度之輸砂量(重量表示)。

在水流部分對於寬廣渠道而言，若假設每一計算河段中為均勻定量流況，則(1)(2)式可簡化為 $S_0 = S_f$ 。根據曼寧公式摩擦坡降 $S_f = n^2 q^{-4/3} u^{10/3}$ ，其中 n 為曼寧係數； q 為單位寬度流量($=hu$)。考慮底床坡降(即縱向變化)可表示為若 $S_0 = -\frac{\partial z}{\partial x} = S_f$ ，則 $\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} = -\frac{10}{3} \cdot \frac{n^2}{q^{4/3}} \cdot u^{7/3} \frac{\partial u}{\partial x}$ 。當假設水流為定量均勻之流況，則一維底床變化擴散方程式，根據(3)式中 $\frac{\partial q_s}{\partial x}$

轉換為 $\frac{\partial q_s}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial x}$ 後與上述之推導可得下式：

$$\frac{\partial z}{\partial t} - K \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} = 0 \quad (4)$$

式中之擴散係數

$$K = \frac{3q^{4/3}}{10(1-p)n^2 u^{7/3}} \frac{\partial q_s}{\partial u} \quad (5)$$

根據 Smart[3]陡坡推移質輸砂公式之整理，可得單位寬度輸砂量 q_s ，如下式：

$$q_s = \rho_s \cdot q_b = \rho_s k_s d \left[\left(\frac{d_{90}}{d_{30}} \right)^{0.2} S^{0.6} u \left(\frac{hS}{(s-1)d} - \theta_{cr} \right) \right] \quad (6)$$

假設(6)式中之 θ_{cr} 相對於 θ 為小可忽略，將其代入(5)式擴散係數 K 中，當 q 為常數並利用曼寧公式，經推導後可得 K 與 S 和 q 之關係式如下所示：

$$K = \frac{8\rho_s k_s}{5(1-p)(s-1)} \left(\frac{d_{90}}{d_{30}} \right)^{0.2} q S^{0.6} = E_s q S^{0.6} \quad (7)$$

式中係數 $E_s = \frac{8\rho_s k_s}{5(1-p)(s-1)} \left(\frac{d_{90}}{d_{30}} \right)^{0.2}$ 。

4.2 模式模擬之結果

經上述方式推導擴散係數，考慮在洩降冲刷過程時常伴隨著溯源冲刷，使底床坡度變化劇烈，因此利用適用於坡度較陡之 Smart 輸砂公式所推導的擴散方程式，來進行模式檢定驗證之測試，並分析比較模擬與試驗之結果。

將試驗 R1 之試驗條件包括出庫單位流量($q(t)$)、排砂開門前下游砂面邊界條件的砂面高程($z_0(t)$)、上游邊界($\frac{\partial z}{\partial x} \Big|_{x=L} = S_0$)及初始條件的砂面鋪設高程($z(x) \Big|_{t=0}$)等，作為模式之輸入條件來解得不同時刻底床變化及出庫排砂量，以檢定擴散係數中之 E_s 值。由模擬底床變動及出庫排砂量與試驗實測值比較後，發現 E_s 值取 9.4 時最接近實測數據；再以此參數大小利用試驗 R2 之試驗條件來驗證底床變動及出庫排砂量，亦得到良好的結果；接著以試驗 R3 條件進行模擬，其結果亦十分接近。將試驗 R1、R2 及 R3 之底床隨時間變動模擬結果與實測值之比較，分別繪於圖 5、圖 6 及圖 7 中。

五、參考文獻

- [1]賴進松、沈學汶，(1996)，「水庫洩降沖刷時出庫排砂量之推估」，第二屆海峽兩岸科技交流研討會，pp.339-345。
- [2]Lai, J. S. and H. W. Shen, (1996). "Flushing sediment through reservoirs," *J. Hydr. Research*, IAHR, Vol.34, No.2, pp.237-256.
- [3]Smart G. M., 1982, "Sediment transport formula for steep channels." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 110(3), pp.267-276.

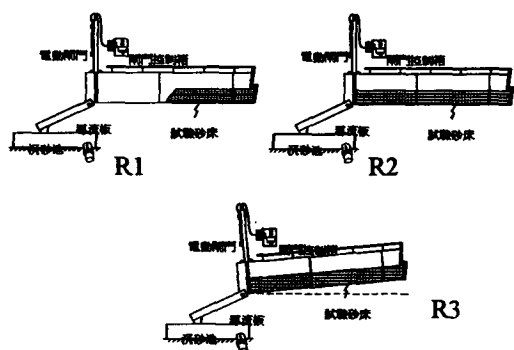


圖 1 各組試驗砂面鋪設情形示意圖

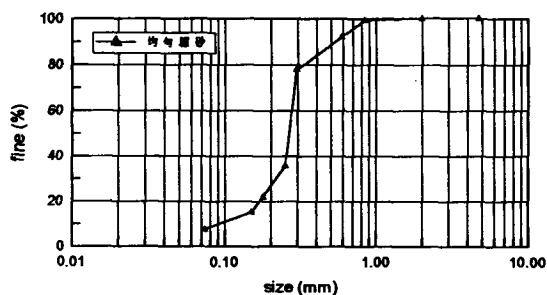


圖 2 試驗用砂之累積粒徑分佈曲線圖

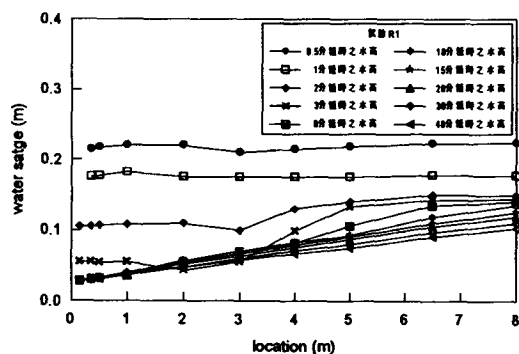


圖 3 試驗 R1 水位線高度之變化圖

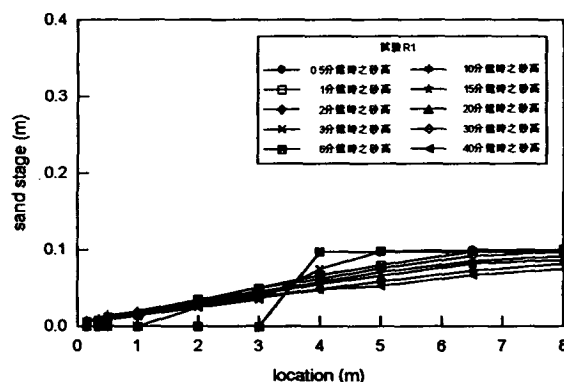


圖 4 試驗 R1 砂面線高度之變化圖

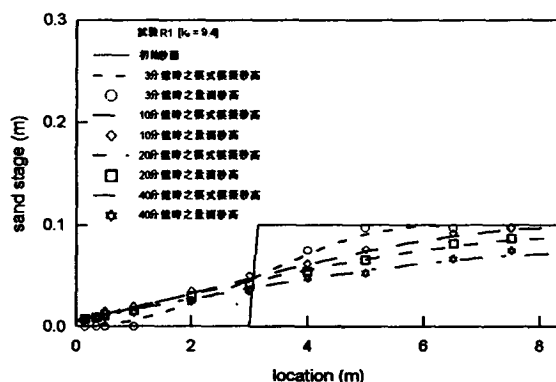


圖 5 R1 底床隨時間變化模擬與量測值之比較

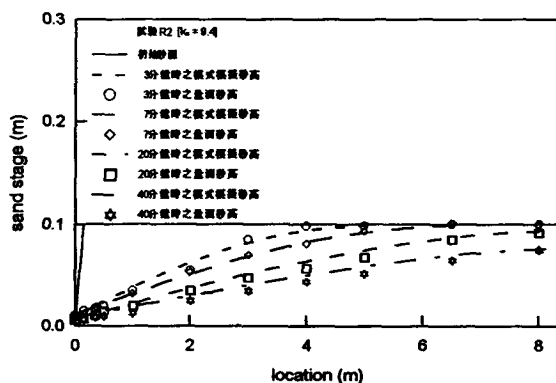


圖 6 R2 底床隨時間變化模擬與量測值之比較

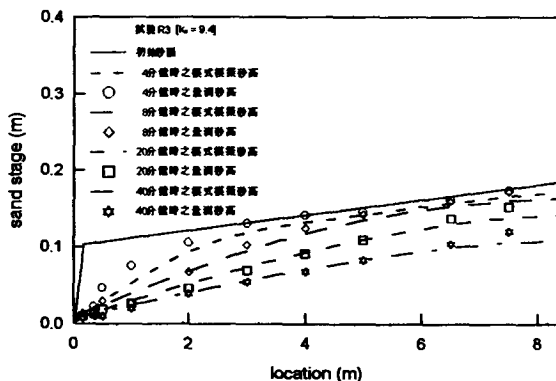


圖 7 R3 底床隨時間變化模擬與量測值之比較