

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

凝聚性沉澱水庫之排砂策略研究(二)

A Study on Cohesive Sediment Sluicing Strategy for Reservoir(II)

計畫編號：NSC 88-2218-E-009-032

執行期限：87年08月01日至88年07月31日

主持人：楊錦釗 教授

研究助理：謝德勇、陳弘翰

E-mail：jcyang@cc.nctu.edu.tw

執行機構：國立交通大學土木工程學系

一、中文摘要

鑑於台灣之水庫淤積情況均甚為嚴重，且其沉澱多為凝聚性沉澱之分佈，在現有輸砂理論及模式均無法適切研析及模擬其運移之歷程下，實無法對其影響作出定性及定量之評估。本整合型計畫主要目的乃擬藉著凝聚性沉澱之相關特性之分析，率定凝聚性沉澱之輸送經驗參數，並同時發展數值模式，針對凝聚性沉澱在水庫內之淤積、運移行為、排砂操作策略及水庫排砂其對下游河道之影響，本研究群組將分別加以研析(詳細內容請參閱各子畫之成果報告)。本計畫除負責此整合型計畫之聯絡與整合之工作，同時負責執行子計畫三，該子計畫之主要目的乃擬發展一二維深度平均數值模式，用以模擬水庫內凝聚性沉澱之沉淤及排砂歷程時之傳輸行為。本研究將分三年依序進行，本年度的之預定進度係完成水理模式之建構與測試。

關鍵詞：凝聚性沉澱、水庫、排砂、模式

Abstract

Due to the fact that the soil surrounding the watershed of reservoirs in Taiwan is composed by cohesive sediment, there exists

no sediment transport theories and models available to properly simulate the procedure of the transportation in Taiwan. The main purpose of this project is to rate out some empirical sediment transport formulas and develop numerical models applicable to reservoirs by the analysis of the characteristic of cohesive soil. This project not only takes on the job of integration and communication but also holds the responsibility of execution of one subprogram. This subprogram aims at developing a numerical model which is capable of simulating transportation phenomena of cohesive sediment during depositing and sluicing in the reservoir.

The project will be executed in three years. The main goal in the first year is to develop and test the flow model in depth-averaged approach.

Keywords: Cohesive sediment, Reservoir, Sluicing, Model

二、緣由與目的

台灣地區地形陡峭、地形脆弱、土質鬆軟、河短流急，造成山洪自上游挾帶大量土石流泥砂奔馳而下，淤積於水庫，造成水庫在蓄水的同時也兼蓄砂，就台灣地區而言，目前所有水庫每年之淤積總量相

當於一座明德水庫之計劃有效容量。而探究台灣水庫集水區內土壤質地多屬凝聚性沉澱範疇，其物理現象較粗顆粒土壤之輸砂更為複雜。其主要原因在於凝聚性沉澱具有之凝聚結合力性質，使其與其它顆粒產生碰撞而結合，或因重力效應而沈澱，或因底床剪應力效應分解而懸浮[2,5,7]。在如此持續之動態過程中，很難再用以往粗顆粒輸砂方程式來適切描述此物理現象。為具體解決台灣水庫所遭遇之問題，針對凝聚性沉澱之特性研究，探討凝聚性沉澱在水庫內之淤積、輸送行為及水庫清淤排放之策略研究，乃為當前最重要之課題之一。

本整合型計畫共包含七個子計畫，預定分三年進行，其主要目的乃擬整合國內與本計畫相關領域的學者，針對凝聚性沉澱之特性分析，探討凝聚性沉澱之沉降特性與流變關係，進而率定台灣地區凝聚性沉澱之輸送經驗參數，並同時發展數值模式，針對凝聚性沉澱在水庫內之淤積、運移行為，清淤方法之選擇、排砂操作策略及水庫排砂對下游河道之影響，本研究將分別加以研析與探討。

三、整合計畫之各子計畫執行情形與成果

整合型計畫之主要工作乃負責協調溝通使各子計畫能充份瞭解彼此之進度與成果，使其最後之總成果得以彰顯。本計畫在本年度3月10日假水利處水利試驗所召開討論會，邀集各子計畫主持人與專家學者共同參與，以釐定本計畫之研究方向，並隨時提供相關人員資訊交流與成果互享之需。茲將各子計畫之名稱與主持人分述如下：

計畫名稱	主持人
一、水庫沉澱沉降行為之研究	李鴻源
二、水庫凝聚性沉澱之流變關係研究	謝正倫
三、水庫內凝聚性沉澱淤積行為	楊錦釗

之模擬	
四、水庫清淤與水資源利用之互動關係	周乃昉
五、微粒懸浮沉澱之孔口排放行為模擬	許少華
六、水庫洩降排砂機制之研究	賴進松
七、水庫排放凝聚性沉澱對下游河道之影響研究	葉克家

各子計畫執行情形與成果分述如下：

	執行情形	成果
一	本年度完成多顆非凝聚性顆粒沉降行為探討，本計畫執行成果與預期達成目標相符。	如參考文獻[5]
二	本年度完成阿公店水庫現場凝聚性土壤之水平式旋轉流變試驗並與毛管式流變計之結果比對，得到流變特性之初步成果，研究成果與進度相符	整理中
三	考量本計畫發展的數值模式在實際應用面的貢獻價值，本計畫調整第二年與第三年的研究進度。本年度完成二維深度平均凝聚性沉澱模式之建立與測試工作，研究成果與第三年度之進度相符。	整理中
四	本年度針對水資源耗損量之限制下，研擬水庫最佳之防淤策略，並得初步成果，研究成果與進度相符。	整理中
五	本年度完成孔口流試驗，得到初步成果，研究成果與進度相符。	如參考文獻[1][2][3]
六	本年度進行沖刷漏斗試驗，又利用閘門控制從事水槽洩降排砂試驗，並與數值模式進行比較分析，研究成果與進度相符。	整理中
七	本年度將無黏性沉澱動床模式擴充至黏性沉澱動床模	整理中

式，成果與進度相符。

四、子計畫三執行情形與成果

目前國內許多地區河川、水庫的沉澱多屬凝聚性沉澱的範疇，但能適切描述凝聚性沉澱運移行為的模式並不普遍。考量本計畫發展的數值模式在實際應用面的貢獻價值，本計畫調整第二年與第三年的研究進度，先發展二維凝聚性沉澱數值模式，第三年再發展擬似三維分層模式。茲將本年度的研究成果敘述如下。

4.1 控制方程式(僅列輸砂部分)

某粒徑懸浮載之質量守恆方程式

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot (C\vec{v}) = -\frac{1}{\rho_s} \nabla \cdot \vec{q} \quad (1)$$

某粒徑於作用層內之質量守恆方程式

$$\rho_s(1-p)\frac{\partial(\beta E_m)}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{q}_b + S - S_f = 0 \quad (2)$$

整體河床輸砂之質量守恆方程式

$$\rho_s(1-p)\frac{\partial z_b}{\partial t} + \sum(\nabla \cdot \vec{q}_b + S) = 0 \quad (3)$$

上式諸式中， \vec{v} ：速度向量； t ：時間； \vec{F} ：微體力； C ：懸浮質濃度； $\nabla \cdot \vec{q}$ ：包含擴散通量及重力作用下之通量； ρ_s ：泥砂密度； β ：某一粒徑之百分比； E_m ：作用層厚度； $\nabla \cdot \vec{q}_b$ ：某一粒徑之河床載通量； S ：懸浮載源； S_f ：作用層源；

z_b ：河床高程； p ：孔隙率。

將三維度之水理及輸砂方程式在正交曲線座標系統展開後，再進行深度平均後，即可得正交曲線座標、二維深度平均控制方程式。

4.2 輔助方程式

(1) 河床載通量 (bedload flux) q_b

當凝聚性沈澱以絮狀物落淤後，絮狀物彼此間膠結成黏性的底床，並不會產生顆粒跳動而沿底床運移的行為，因此在凝聚性沈澱的模擬可不考慮河床載通量。

(2) 懸浮載源 (S)

懸浮質向下之通量與底床亂流剪力作

用產生河床質向上之通量交互作用之結果。所以對某一粒徑 k 而言，可表為：

$$S = \beta_1 S_o - S_d \quad (4)$$

β_1 為底床粒徑 k 的百分組成； S_o 為沖刷懸浮載源； S_d 則為沈澱懸浮載源。

為深入探討凝聚性沉澱的沉積與沖刷行為，本研究採用文獻中不同的傳輸經驗式來加以分析探討。沉積經驗式採用 Migniot(1988)、Ziegler(1994)、Shrestha(1996)、Mehta&Partheniades(1975) 四種。沖刷經驗式採用 Partheniades(1962)、Mehta&Partheniades(1979)、Ariathurai(1974) 三種。

(3) 土壤壓密機制

凝聚性沉澱與非凝聚性沉澱最大的不同在於前者具有壓密的特性，即底床沉積土會隨沉積時間愈久而愈緊密結合，使抗剪應力增強。本研究在模式中將底床分成數層，分別設定其抗剪應力，以適切地反應凝聚性土壤壓密之現象。

4.3 數值方法

水理模式請參照第一年度之報告。

輸砂部分的處理簡述如下。(1)式為延散方程式，解此方程如同解水流運動方程式，可分成下列二個步驟：

移流及反應(advection-reaction)步驟

$$\left(\frac{\partial C}{\partial t}\right)^a + \nabla \cdot (C\vec{v}) = 0 \quad (5)$$

擴散(diffusion)步驟

$$\left(\frac{\partial C}{\partial t}\right)^d - \left(\frac{\partial C}{\partial t}\right)^a = -\frac{1}{\rho_s} \nabla \cdot \vec{q} \quad (6)$$

因此，先聯立求解(2)、(3)及(5)式；然後，所求得各變數之中間值再與(6)式反覆疊代至收斂為止。

4.4 結果與討論

為檢測凝聚性沉澱傳輸機制，本研究假設一矩形河道長 8000 公尺，渠寬 100 公尺，河床坡度為 0.0005，曼寧係數為 0.03。取三種不同凝聚性沈澱粒徑模擬，分別為 0.001mm(黏土)、0.05mm(坩土)、0.01mm(介於黏土與坩土範圍的交界處)，河道泥砂起始濃度為 0，底床粒徑百分組成各為 1/3。

數值參數分別為 $\Delta x = 200m$ 、 $\Delta y = 20m$ 、 $\Delta t = 600sec$ ，下游邊界固定水深 4.5 公尺，總模擬時間共 6 天。基本案例上游單位寬度入流為 0.24 cms/m，臨界沉積剪應力為 $0.06 N/m^2$ ，入流濃度 2000 ppm。

4.4.1 沉積模擬

共設計十個案例分別探討流速（案例 1~案例 4，入流量 0.02、0.08、0.16、0.24 cms/m）、臨界沉積剪應力（案例 4~案例 7，臨界沉積剪應力 0.10、0.40、1.10N/m²）、及濃度（案例 8~案例 10，濃度 4000、6000、10000ppm）對沉積速率的影響。模擬分析結果則如表 1 所示。

表 1 沉積模擬分析比較表

類別	Migniot	Ziegler	Shrestha	Mehta
基本機制	1. 當底床剪應力大於臨界沉積剪應力時則沈澱不會落淤 2. 以修正沈降速度的方式來表示，並配合 Krone (1962) 之經驗式。	1. 當底床剪應力大於臨界沈澱剪應力時則沈澱不會落淤 2. 以修正沈降速度的方式來表示，並配合 Krone (1962) 之經驗式。	1. 當底床剪應力大於臨界沈澱剪應力時則沈澱不會落淤 2. 利用剪力速率的概念來表示沈澱之落淤能力 經驗式中的參數亦可看成沈降速度因子，整個經驗式很類似 Krone 之經驗式	當底床剪應力大於臨界沈澱剪應力時則仍有沈澱會落淤。
考量因素	沈降速度主要考量粒徑大小	沈降速度考量絮狀物大小及濃度影響	沈降速度修正考量濃度影響	以統計之方法來分析其沈澱沈積機制
模擬結果	當入流濃度較大時會低估沈降速度。	考量濃度的結果相當合理。	考量濃度的結果相當合理。	下游端之落淤量相當小，其原因在於統計因子之設定仍需再考量

適用範圍及模式可用度	當入流濃度小時，此經驗仍可使用，而當入流濃度大時，則會產生沈降速度低估的現象。		臨界沈積剪應力不能太大，以本模式模擬而言，其值 0.1 時當屬正常，而其值為 0.4 以上時，則出現不正常落淤。	1. 底床剪應力除以臨界沈澱剪應力小於 0.25 時出現極大的標準偏差。 2. 目前尚不能使用於模式模擬上。
------------	-----------------------------------------	--	----------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------

4.4.2 沖刷模擬

本研究採用四種不同方法模擬，1. Partheniades (1962) 提出之表層沖刷經驗式；2. Partheniades (1962) 提出之表層沖刷經驗式加上底床壓密 3. 同時考量表層沖刷及塊狀剝蝕 (Partheniades (1962) 提出之表層沖刷經驗式配合 Ariathurai (1974) 提出之塊狀剝蝕經驗式) 再加上壓密機制；4. Mehta & Partheniades (1979) 之近似壓密考量之沖刷經驗式。本章節之目的，乃在於逐步地突顯需將表層沖刷、塊狀沖蝕、及壓密機制完全予以考量，方為完整的沖刷機制。模擬分析結果如表 2 所示。

表 2 沖刷模擬分析比較表

類別	1	2	3	4
基本機制	此沖刷經驗式僅考量表層沖刷，不考慮底床壓密的情況，當底床剪應力大於臨界沖刷應力時，則底床開始沖刷，反之則不產生沖刷。	因凝聚性具有特沉澱壓密性，愈下層愈重，即被沖刷。本式即除沖刷外，考慮土壤的性質。	除了壓密考量外，底床剪應力大於臨界沖刷力時，發生沖刷，而當底床剪應力更大過臨界塊狀剝蝕沖刷剪應力時則發生塊狀剝蝕，	經驗式與底床剪應力及時間有關，經驗式中的時間是從沈澱開始沈降時開起算，這表示底床沈積愈久而愈不易沖刷，即壓密現象之考量。
模擬結果	在固定條件且底床	在固定條件下，底床	流速小時只發生表	沖刷深度與時間呈

	便量不大情況下，每個時間段之沖刷速率均相同	沖刷速率愈來愈慢且刷起的沈澱濃度亦與時間呈遞減趨勢，此為底床壓密的重要機制	層沖刷，當流速大於土壤塊狀剝蝕的臨界值後，表層沖刷與塊狀剝蝕同時發生。	遞減的情形，顯示當時間增加時，其沖刷速率產生遞減，顯示此法利用長時間變長而沖刷變小當作壓密考量。
適用範圍及模式可用度	只考慮表層沖刷，且不考慮壓密時，當水流均大於臨界沖刷剪力時，其底床將限制沖刷與現實不符。	雖然考量表層沖刷與土壤壓密現象，但並未考量塊狀剝蝕，其機制仍不夠完全。	同時考量土壤壓密現象、表層沖刷與塊狀剝蝕為目前分析凝聚性沉澱沖刷最完整的機制。	當分析沖淤互見的案例時，需注意每一層土壤所對應的 t 值，如此方能完整考量土壤壓密的現象。

五、計畫成果自評

本計畫及各子計畫第二年之報告內容完全符合預期完成之工作。整合計畫主持人能確實掌握計畫之方向與進度，堪稱成效良好。

本計畫在學術研究上之貢獻為，從基本的特性分析來分析凝聚性沉澱之性質，包含子計畫一及子計畫二，探討凝聚性沉澱之沉降行為與流變關係。再整合上述研究分析水庫庫區與下游河道之問題，利用數值模式探討凝聚性沉澱在水庫中之運移及沖淤之歷程，如子計畫三。接著針對水庫操作之關念，分析水資源利用問題，如子計畫四，並分析水庫排砂之機制，如子計畫五及子計畫六。最後針對水庫排砂後，其排放凝聚性沉澱對下游河道之影響進行評估，如子計畫七。如此可將凝聚性沉澱在運移入水庫後至排放至河口一系列的問題整合起來，提供一功能齊全之分析工具。

在工程實務之貢獻為，水利處阿公店水庫更新改善工程已經核定在案，改善工程約需五年光景。就學術之觀點而言，這是一難得的機會，以學理之研究成果作為阿公店水庫改善工程後盾，並得以藉實作之數據驗證理論之正確性。本研究將配合水利處之工程進行，在進行基礎研究之同時，並應水利處工程規劃之需，適時提供較簡化及實務面之分析結果。如此可促進學術界與工程界的交流，拉近學術界與工程界之落差。

六、參考文獻

- [1] 以平面雷射引致螢光法量測異重流濃度剖面，第九屆水利工程研討會（1998）。
- [2] 異重流流場之特徵現象與特性參數推求，第十屆水利工程研討會（1999）。
- [3] 鹽水異重流孔口排流試驗，第十屆水利工程研討會（1999）。
- [4] Ariathurai, R. (1974), "A finite Element Model for Sediment Transport in Estuaries", Ph. D. Thesis, Department of Civil Engineering, University of California, Davis.
- [5] Lee, H. Y., Lin Y. J., and Lin, C. H., "Investigations of Freely falling Process of a single sphere particle" ICHD(2000)
- [6] Mehta, A. J. and Partheniades, E. (1975), "An Investigation of The Depositional Properties of flocculated fine Sediments", Journal of Hydraulic Research, ASCE, Vol. 13, No. 4, pp. 361-381.
- [7] Mehta, A. J. and Partheniades, E. (1979), "Kaolinite resuspension properties, Technical Note, Proc.", Paper 14477, Journal of Hydraulic Division, Procs. Of the ASCE, Vol. 105, No. HY4, April, 1979.
- [8] Migniot, c. (1989), "Bedding-down and rheology of muds, Part I", La Houille Blanche, No.1, 1989, pp. 11-29. (in French)
- [9] Partheniades, E., (1965), "Erosion and Deposition of Cohesive Soils", Journal of Hydr. Div., Proc. ASCE, Vol. 91, No. HY1, Proc. Paper 4204.
- [10] Shrestha, P. L. and Orlob, G. T. (1996), "Multiphase Distribution of Cohesive Sediments and Heavy Metals in Estuarine Systems", Journal of Environmental Engineering, ASCE, Vol. 122, No. 8, pp. 730-740.
- [11] Ziegler, C. K. and Nisbet, B. S. (1994),

“Fine-Grained Sediment Transport in Pawtuxet River, Rhode Island”, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 120, No. 5, pp. 561-575.