

空庫排砂與操作排砂之排砂效率比較

Comparison of the Efficiency of Empty Storage Sediment Flushing with Operation Sediment Flushing

國立屏東科技大學
土壤與水工程國際碩士學位學程
助理教授

陳 金 諾*

Ching-Nuo Chen

成大研究發展基金會
副研究員

蔡 智 恆

Chih-Heng Tsai

國立成功大學
水利及海洋工程學系
博士班研究生

黃 智 聰

Chih-Tsung Huang

經濟部水利署南區水資源局
正工程司

鄭 仁 嶽

Jen-Yueh Cheng

摘 要

空庫排砂之排砂效率高對維持水庫庫容效果好，但消耗較多水資源，對水資源需求量較大地區，進行空庫排砂對水資源之利用較為不利。本文應用所發展之地文性土壤沖淤模式模擬空庫排砂以及不同水位蓄水之排砂操作，以降雨開始之 12 小時內進行空庫排砂，並於第 13 小時關閉閘門蓄水，達到設定之操作水位時，再開啟閘門進行排砂，操作之蓄水水位分別為 30 公尺、31 公尺及 32 公尺三種案例。研究結果顯示，經由閘門操作之排砂效率低於空庫排砂之排砂效率，蓄水水位 30 公尺、31 公尺及 32 公尺之操作排砂效率分別為 50.13%、50.02%及 50.00%，比平均空庫排砂效率(59.91%)降低 9.78%、9.89%及 9.91%，可見操作排砂效率與空庫排砂效率相差約 10%。此結果可作為將來水庫衡量水資源利用與排砂效率之排砂操作策略決策之參考。

關鍵詞：地文性土壤沖淤模式，空庫排砂，操作排砂，排砂效率。

*通訊作者，屏東科技大學土壤與水利工程碩士學位學程，91201 屏東縣內埔鄉學府 1 號，ginrochen@mail.npust.edu.tw

ABSTRACT

Flushing is most effective in preserving reservoir storage when a reservoir is completely emptied. However, large volumes of water is needed during empty sediment flushing operations, which might not be well suited in areas of high water demand. In this study, a physiographic soil erosion-deposition (PSED) model was applied to simulate reservoir operations for empty sediment flushing and reservoir desilting. The method of sediment flushing operation began with empty sediment flushing from the commencement of rain for a duration of 12 hours. The outlet gate was closed at the thirteenth hour when the water level reached 30, 31 and 32 meters, respectively. Computed results indicated that the efficiency of operation for reservoir desilting was lower than the efficiency of sediment flushing of empty flushing. The efficiency of operation for reservoir desilting when the water level reached 30, 31 and 32 meters were 50.13%, 50.02% and 50.00%, respectively. On average a sediment flushing difference of about 10% between the operation for reservoir desilting and empty sediment flushing was observed. The findings in this study are of great significance in the management of water resources and in reservoir desilting operations.

Keywords: Physiographic soil erosion-deposition (PSED) model, Empty sediment flushing, Sediment flushing operation, Efficiency of sediment flushing.

一、前 言

水庫因淤積導致水庫有效蓄水量減少，進而影響水庫之功能及水庫壽命，也降低水庫的經濟價值(Olsen, 1999)。水庫庫容因泥砂淤積而逐年減少蓄水體積，但需水量卻逐年持續增加，依據推估全球於 2030 年供水之缺口高達 1500 Bm^3 (Chaudhry et al., 2014)，要解決缺水之問題需要建構更多的水庫增加蓄水，但水庫建構後對周遭水域環境及生態之改變甚大。近年來人們對環境及生態的重視，且適合建構水庫之壩址難尋，因此需改變早年對水庫淤滿(約 50-100 年)則水庫壽命終止之水庫壽命有限之觀念，除了應保護現有水庫之庫容外，應該有永續利用之概念，更需要研究水庫永續利用之方法。

水庫永續利用首先要減少水庫淤積，而減少水庫淤積維持水庫庫容之方法包含有水庫集水區之經營管理、機械開挖或浚渫船以及水力排砂(鍾，2011)等方法。機械開挖、浚渫排砂方式的

成本較高、效率有限且有淤砂後續處置問題；水力排砂方式是藉由增加水庫內水流速度而增加擾動及輸運淤砂之能量，加速及增加淤砂由水庫排砂道排出水庫(Chaudhry et al., 2014)，將原本上游土砂回歸至下游河道。若水庫可成功利用水力排砂方式進行排砂則可降低排砂成本，然而進行水力排砂操作會消耗水庫中大量水資源。水力排砂可分為完全水位洩降排砂及部分水位下降排砂(Emamgholizadeh, et al., 2006)。完全水位洩降排砂為空庫排砂，部分水位下降排砂包含水壓吸引排砂、通砂、繞庫排砂、異重流排砂及水力沖砂等，這些排砂方式可依水庫之地形及水流條件單獨使用或結合應用(Chaudhry et al., 2007)。

維護水庫庫容較有效且成本較低之方法為水力排砂，而水力排砂效果的高低取決於水庫幾何條件、淤砂粒徑、泥砂淤積型態、水流流量及水深等。在眾多水力排砂方式中，以完全水位洩降(空庫排砂)之排砂對維持水庫庫容效果最好(Chaudhry, 2014)。空庫排砂為一種水庫水位完全

下降的排砂，完全水位下降之結果是水庫近似於河道，因排砂道高程接近河道高程因此洪水期間水位下降過程可提供足夠的水力條件進行空庫排砂。雖然空庫排砂有較高之排砂率，可減緩水庫淤積，但目前對水資源需求量較大地區，進行空庫排砂對水資源之利用較為不利，因此本文將對空庫排砂之水庫進行不同蓄水水位之排砂效率進行研究，在排砂效率減少不大的情況下同時保有部分可供利用之水資源，進而研擬最佳狀況之排砂操作。

本文以阿公店水庫為研究對象，應用所發展之地文性土壤沖淤模式模擬水庫之來水來砂量，檢討比較各種閘門操作方式之排砂效率，研擬可排除接近空庫排砂之排砂效率且增進水資源利用效益之排砂操作方式。

二、地文性土壤沖淤模式之建立

地文性土壤沖淤模式係依據流域內地形地貌及水系，利用地理資訊系統將流域劃分出數個子集水區，再將各子集水區劃分出若干格區，這些格區分成坡地格區與河流格區。模式分成漫地流演算與懸浮載輸砂演算兩部分，以下分述計算格區之漫地流演算和懸浮載輸砂演算。

2.1 漫地流演算

漫地流演算主要演算降雨逕流在集水區之傳播過程，可依據每一格區之水流連續方程式及流量律進行演算。水流連續方程式為(楊，2000; Chen *et al.*, 2006)：

$$A_{si} \frac{\partial h_i}{\partial t} = \sum_k Q_{i,k}(h_i, h_k) + P_{ei}(t) \dots\dots\dots(1)$$

t 為時間； A_{si} 為 i 格區之面積； h_i 、 h_k 分別為 i 格區與 k 格區之水位； $Q_{i,k}$ 為由與 i 格區相鄰之 k 格區流入 i 格區之流量； P_{ei} 為 i 格區每秒之有效降雨體積，等於每秒之有效降雨量與 i 格區面積之乘積。有效降雨量可以下式計算之(楊，2000)：

$$P' = (P - 0.2S)^2 / (P + 0.8S) \dots\dots\dots(2)$$

$$S = 25400 / CN - 254 \dots\dots\dots(3)$$

以上式中， P 為總降雨量(mm)； P' 為總有效降雨量(mm)； S 為潛在最大滯流量(mm)； CN 為 curve number 之值。

若格區與格區間之水流交換無局部障礙物，可應用曼寧公式計算流過兩格區交界面之流量。以 i 格區而言，由 k 格區流至 i 格區之流量為：

$$Q_{i,k} = \frac{h_k - h_i}{|h_k - h_i|} \cdot \Phi(\bar{h}_{i,k}) \cdot \sqrt{|h_k - h_i|} \quad \text{for } \frac{\partial Q_{i,k}}{\partial h_i} \leq 0 \dots(4)$$

$$Q_{i,k} = \Phi(h_k) \cdot \sqrt{|h_k - h_i|} \quad \text{for } \frac{\partial Q_{i,k}}{\partial h_i} > 0 \dots\dots\dots(5)$$

式中 $\bar{h}_{i,k}$ 為 i 格區與 k 格區交界處之水位。而 $\Phi(h)$ 為：

$$\Phi(h) = \frac{1}{n} \frac{A(h)R^{2/3}(h)}{\sqrt{\Delta x}} \dots\dots\dots(6)$$

Δx 為 i 、 k 兩格區之中心距； n 為兩格區間之曼寧糙率係數； A 、 R 分別為兩格區交界處之通水面積和水力半徑。

若格區與格區之間以道路、堤防、田埂或岸壁等為交界，則可將交界視為寬頂堰，以堰流公式來計算兩格區間之流量。若以 $h_k > h_i$ 之情形而言，可分為自由堰流及潛沒堰流兩種形式：

(A)自由堰流 ($h_i - h_w) < \frac{2}{3}(h_k - h_w)$ ：

$$Q_{i,k} = \mu_f b \sqrt{2g} (h_k - h_w)^{3/2} \dots\dots\dots(7)$$

(B)潛沒堰流 ($h_i - h_w) \geq \frac{2}{3}(h_k - h_w)$ ：

$$Q_{i,k} = \mu_s b \sqrt{2g} (h_i - h_w)(h_k - h_i)^{3/2} \dots\dots\dots(8)$$

以上二式中， h_w 為堰頂高程，即交界處之路面、堤頂或地面高程； b 為堰頂之有效寬度，即相鄰兩格區之交界長； g 為重力加速度； μ_f 、 μ_s 分別為自由堰流及潛沒堰流之堰流係數， $\mu_f = 0.36 \sim 0.57$ ， $\mu_s = 2.6 \mu_f$ (蔡和蔡，1997)。本文採用 $\mu_f = 0.47$ ， $\mu_s = 1.22$ 。

2.2 懸浮載輸砂演算

集水區之土壤沖淤演算，主要以懸浮載連續

方程式、底床變動連續方程式及底床載輸運公式等，演算各格區之泥砂輸運率及底床沖淤演變。以任一格區 i 而言，懸浮載連續方程式為(Chen *et al.*, 2006)：

$$\frac{\partial V_{si}}{\partial t} = \sum_k Q_{SC_{i,k}} + Q_{sei} - Q_{sdi} + R_{DTi} \dots\dots\dots(9)$$

以上式中， V_{si} 為 i 格區水體中懸浮之泥砂體積(= $A_{si} \times D_i \times C_i$ ， D 為水深， C 為懸浮載體積濃度)； $Q_{SC_{i,k}}$ 為由與 i 格區相鄰之 k 格區流入 i 格區之懸浮載流量； R_{DTi} 為 i 格區降雨分離率； Q_{sei} 為 i 格區地表土壤與河道底床之捲增率； Q_{sdi} 為 i 格區底床之沉降率。

(1)降雨分離率

降雨分離對土壤的沖蝕型態，除了受土壤種類、地表植生之影響外，地面水膜厚度亦為影響降雨分離率之主要因素。但當水膜厚度大於 3 倍雨滴粒徑時，雨滴撞擊將失去影響力，即降雨分離率可視為零(Mutchler and Young, 1975)。雨滴粒徑可由降雨強度求得，本文採用馬(1995)所推得之關係式：

$$d_{50} = 1.560I^{0.096} \dots\dots\dots(10)$$

d_{50} 為雨滴之中值粒徑(mm)； I 為降雨強度(mm/hr)。

當地面水膜厚度小於 3 倍雨滴粒徑時，格區之降雨分離率為：

$$R_{DTi} = a \cdot I^b \cdot A_{si} \dots\dots\dots(11)$$

a 、 b 為待定係數。Sharma *et al.* (1995)得出 b 值等於 1，胡等(1995)由實驗得出 a 值在 18.36 ~ 21.72 之間，而 b 值則介於 0.81 ~ 1.29 之間。本文取 a 值為 20， b 值則取為 1。

(2)底床之捲增與沉降

Itakura and Kishi (1980)提出單位面積泥砂之底床捲增率 q_{se} 為：

$$q_{se} = 0.008\sqrt{sgd} \left[0.14 \frac{\rho}{\rho_s} \left(14\sqrt{\tau_*} - \frac{0.9}{\sqrt{\tau_*}} \right) - \frac{\omega_s}{\sqrt{sgd}} \right] \dots\dots\dots(12)$$

式中 $s = (\rho_s - \rho)/\rho$ ，為有效比重係數或有效密度係數， ρ_s 、 ρ 分別為泥砂和清水之密度， d 為泥砂之

粒徑； ω_s 為泥砂之沉降速度； τ_* 為無因次底床剪應力，可表為：

$$\tau_* = u_*^2 / sgd \dots\dots\dots(13)$$

u_* 為摩擦速度。

單位面積泥砂之底床沉降率 q_{sd} 為：

$$q_{sd} = \omega_s C_a \dots\dots\dots(14)$$

C_a 為近底床處之懸浮載體積濃度，可以距底床 0.05 水深處之參考濃度(reference concentration)近似之。若假設懸浮載體積濃度之分佈可以指數律表示，則可推得(Shimizu, *etc.*, 1990)：

$$C_a = \frac{P_e}{[1 - \exp(-P_e)]} C \dots\dots\dots(15)$$

式中 P_e 為 Peclet Number，可表為 $\omega_s D / \varepsilon$ ， ε 為渦動滯性係數(= $\kappa u_* D / 6$ ， κ 為 von Karman 常數，本文取為 0.4)。

因此， i 格區底床之捲增率與沉降率即為：

$$Q_{sei} = q_{se} \cdot A_{si} \cdot c' \quad (\text{if } i \text{ 格區屬於坡地格區}) \dots\dots\dots(16.a)$$

$$Q_{sei} = q_{se} \cdot A_{si} \quad (\text{if } i \text{ 格區屬於河流格區}) \dots\dots\dots(16.b)$$

$$Q_{sdi} = q_{sd} \cdot A_{si} \dots\dots\dots(17)$$

c' 為覆蓋管理因子，與土地利用之型式有關。

(3)泥砂之沉降速度

單顆粒球體在無限靜止水體中等速下沉時，Stokes 推導出沉降速度為：

$$\omega_o = \frac{1}{18} \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \frac{gd^2}{\nu} \dots\dots\dots(18)$$

γ_s 、 γ 分別為泥砂與清水之比重； ν 為清水之運動滯度。由於泥砂之形狀並不規則，因此 Stokes 公式並不適用。張等(1998)在研究泥砂之靜水沉降時，根據阻力疊加原則，並分析大量實測資料，提出泥砂之沉降速度為：

$$w_o = \frac{1}{25.6} (s-1)g \frac{d^2}{\nu} \quad (d < 0.1mm) \dots\dots\dots(19.a)$$

$$\omega_s = \sqrt{\left(13.95 \frac{v}{d}\right)^2 + 1.09 (s-1) g d} - 13.95 \frac{v}{d} \quad (19.b)$$

(0.1 mm < d < 4 mm)

$$\omega_s = 1.044 \sqrt{(s-1) g d} \quad (d > 4 \text{ mm}) \dots (19.c)$$

Tsai and Tsai (2000)利用式(19)模擬含砂水流的懸浮載濃度剖面，與實驗結果相符。

2.3 數值方法

(1)格區水位之演算

集水區依地形地貌劃分成若干格區，每一格區可有如式(1)之水流連續方程式，格區間之交換流量則以適當之流量公式計算，如式(4)至式(8)。故需聯立求解各格區之連續方程式及格區間之流量以建立模式之水流演算。式(1)為非線性微分方程式，本文以顯式有限差分離散化式(1)，可得：

$$A_{si}^j \frac{\Delta h_i}{\Delta t} = P_{ei}^j + \Sigma Q_{i,k}^j \dots (20)$$

A_{si}^j 、 P_{ei}^j 及 $Q_{i,k}^j$ 各為 i 格區在 t^j 時間之水平面積、有效降雨體積及由 k 格區流入 i 格區之流量； Δt 為 t^j 時間至 t^{j+1} 時間之時距； Δh_i 為 i 格區在 Δt 時間中之水位增量。利用顯式差分法，以 i 格區為例，可將式(1)差分化為式(21)：

$$h_i^{m+1} = h_i^m + \frac{\left(\sum_k Q_{i,k}^m + P_{ei}^m\right)}{A_{si}} \cdot \Delta t \dots (21)$$

式中，上標 m 表示 t_m 時刻之已知物理量；上標 $m+1$ 表示 t_{m+1} 時刻之未知格區水位； Δt 為演算時距。相鄰格區間之流量 $Q_{i,k}$ 與格區水位 h_i 、 h_k 之函數關係，由式(4)、式(5)或式(7)、式(8)表示。因此，利用式(21)與降雨資料並配合格區內之水文、地文資料，即可求得各格區之水位歷線，而格區之水深則為：

$$D_i = h_i - z_i \dots (22)$$

D_i 為 i 格區之水深； z_i 為 i 格區之底床高程。

(2)懸浮載體積濃度演算

對於任一格區 i 而言，以顯式差分法，可將式(9)差分化為：

$$C_i^{m+1} = \frac{\left(\sum_k Q_{SC_{i,k}}^m + Q_{sei}^m - Q_{sdi}^m + R_{DTi}^m\right)}{A_{si} D_i^{m+1}} \cdot \Delta t \dots (23)$$

相鄰格區間之懸浮載流量 $Q_{SC_{i,k}}$ 可由 $Q_{i,k}$ 之流向決定，若水流由 k 格區流進 i 格區則 $Q_{SC_{i,k}} = |Q_{i,k}| \times C_k$ ；若水流由 i 格區流進 k 格區，則 $Q_{SC_{i,k}} = -|Q_{i,k}| \times C_i$ 。而 Q_{sei} 、 Q_{sdi} 、 R_{DTi} 可分別由(16)式、(17)式及(11)式求得。 D_i 則由水流演算時之(22)式求得。

三、研究方法

3.1 研究區域

本文以阿公店水庫為研究對象，阿公店水庫集水區位於阿公店溪上游，阿公店水庫由北側之旺萊溪及南側之濁水溪兩支流匯流而成，水庫即興建於該匯合處，水庫集水面積 29.58 平方公里，其中濁水溪集水面積 12.81 平方公里，約占 43%；旺萊溪集水面積 16.77 平方公里，約占 57%。阿公店水庫集水區水系如圖 1 所示。

阿公店水庫壩頂標高為 42 公尺，滿水位標高 35.50 公尺，總蓄水容量為 45,00 萬立方公尺，係以防洪為主並兼具灌溉與給水標的之多目標水庫。水庫開始運轉至民國 80 年時，水庫淤積率已達 71%，嚴重的淤積影響水庫之各項標的功能。為了達到水庫永續經營利用之目的，水庫每年於汛期 6 月 1 日至 9 月 10 日施行空庫防淤操作，使豐水期高濃度含砂水流儘速過庫，以減少入庫泥砂落淤。9 月 11 日至翌年 5 月 31 日，為蓄水期進行蓄水，兼引旗山溪水源，蓄滿水庫提供翌年之公共給水及灌溉用水。

豎井溢洪管頂標高為 27 公尺，內徑 2.8 公尺，豎井溢洪管如圖 2 所示。依據模型試驗成果豎井溢洪管之溢洪流量公式為(經濟部水利署，2003)：

自由溢流

$$Q_{out} = 34.12(H - 27)^{1.5}, H \leq 28.57 \text{ 公尺} \dots (24)$$

滿管流

$$Q_{out} = 17.63(H - 14)^{0.5}, H > 28.57 \text{ 公尺} \dots (25)$$

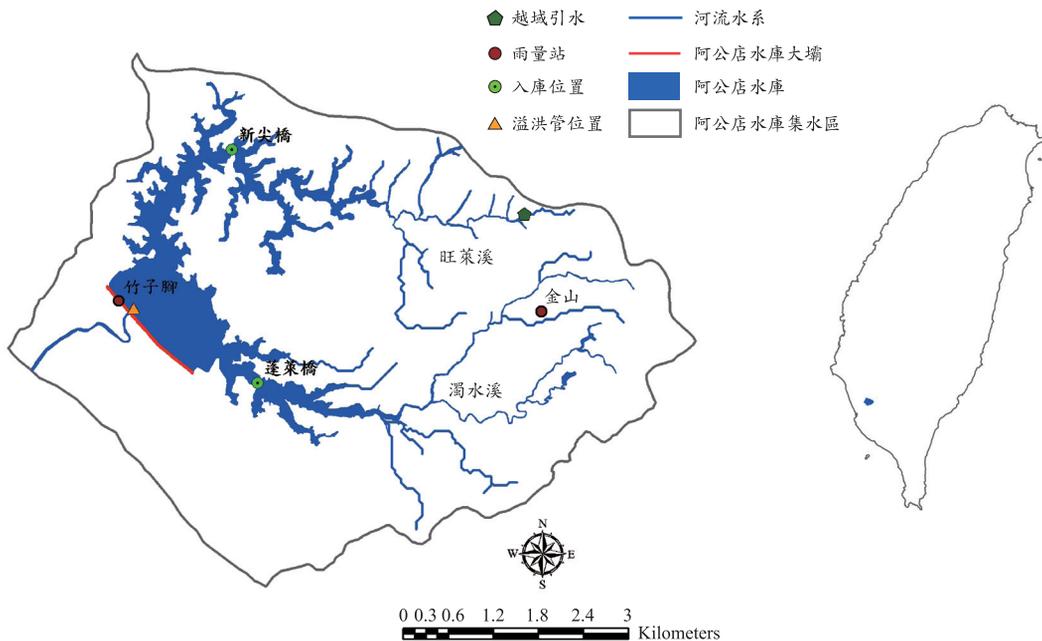


圖 1 阿公店水庫集水區水系。



圖 2 豎井溢洪管。

上式中， H 為水庫水位， Q_{out} 為溢洪流量。當水庫達到設計最高水位 40 公尺時，滿管出流量為 $89.90 \text{ m}^3/\text{sec}$ 。

3.2 計算網格建置

集水區地形、地貌、植被分佈與土地利用之不同，對降雨形成之逕流過程及因降雨與逕流所造成之沖蝕量亦有所不同，因此先將集水區依地形地貌狀況，劃分為若干計算格區。因集水區地

形地貌複雜，水文、地文資料量龐大，故本文應用地理資訊系統軟體 ArcMap 及 Arc/Info，並配合使用 ArcMap 之延伸模組(如空間分析(spatial analysis)、水文模組(hydrologic model)、3D 分析(3D Analyst)、Network Analyst 等)及其物件導向程式語言，藉由流向分析、河流線之產生，以自動化方式將集水區劃分若干個子集水區(陳等，2004)，進行子集水區自動劃分之依據為數值高程模型(DEM)。

依據河道測量結果給定河道寬度並劃分河道格區，劃分完成集水區中各大小河流之子集水區及坡地格區、河流格區後，再以地理資訊系統配合集水區內數化之土壤圖、土地利用圖等，進行套疊、運算與處理分析，即可得每一格區之水文及地文資料。將格區內之各項水文、地文資料並進一步組合成地文性土壤沖淤模式之輸入檔後，即可利用所建立之地文性土壤沖淤模式模擬集水區內水流流動及泥砂輸運之過程。

阿公店水庫集水區之數值高程資料(由南區水資源局所提供，空間解析度為 $5\text{m} \times 5\text{m}$ 之規則

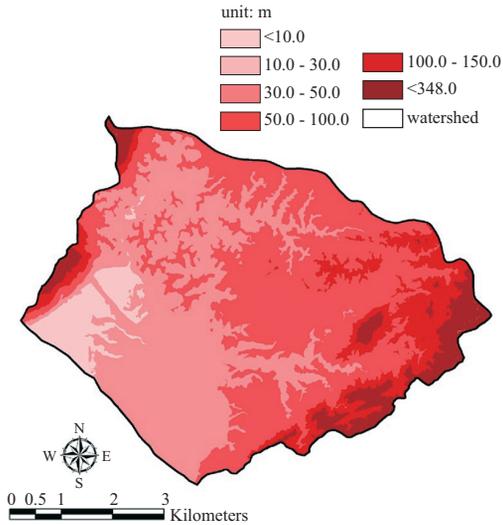


圖 3 阿公店水庫集水區之數值高程地形。

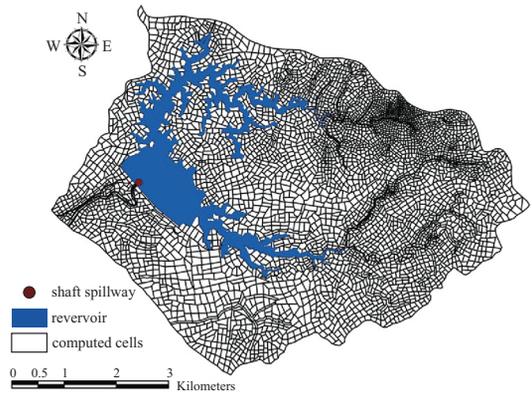


圖 4 阿公店水庫集水區之計算格網。

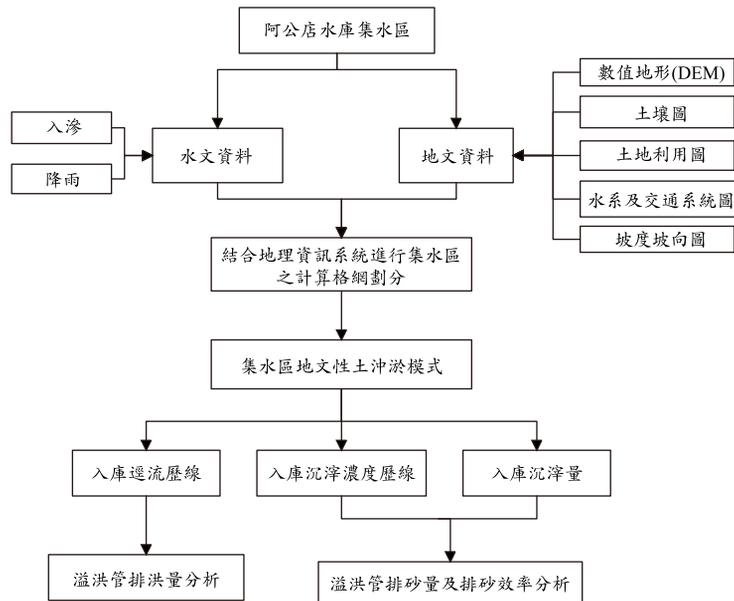


圖 5 集水區地文性土壤沖淤模式演算流程。

格網)，如圖 3 所示。依據數值高程資料、河道測量資料、數化之土壤圖、土地利用圖等集水區相關之地文資料進行計算格網劃分，研究區域之格網劃分如圖 4 所示，共 4595 個格區。

3.3 地文性土壤沖淤模式結合地理資訊系統之演算流程

將地文性土壤沖淤模式與地理資訊系統結合應用，以求得水庫集水區內入庫之流量、懸浮載濃度歷線及排砂量，演算流程如圖 5 所示，並

表 1 各土地利用下地表漫地流之曼寧糙度係數值

土地利用	曼寧 n 值	土地利用	曼寧 n 值
樹林	0.30	草地	0.25
果園	0.40	牧草地	0.35
旱作地	0.35	綠地	0.20
水田	0.10	裸露地	0.02
稀疏植物覆蓋	0.09	建築地	0.10
濃密草地	0.45	瀝青混凝土或混凝土	0.10

說明如下：

1. 將集水區劃分為若干格區，包括坡地格區、河流格區、特殊格區等。
2. 利用地理資訊系統之各項功能，整理分析並計算集水區內之各項水文、地文資料，包括降雨量、CN 值、植被狀況、土地利用狀態、格區幾何資料、格區位相資料、格區高程、堰流係數、坡地泥砂粒徑、河道泥砂粒徑、起始條件及邊界條件等。然後進行參數分析，並將結果存入資料庫中。本文泥砂平均粒徑 0.015 mm，堰流係數為 0.4，河道曼寧係數為 0.028，各土地利用下地表漫地流之曼寧糙度係數值如表 1 所示。
3. 將地文性土壤沖淤模式所需之輸入資料，與參數分析之結果，從資料庫萃取出來，並進一步加以組合建立成地文性土壤沖淤模式之輸入檔。
4. 進行水流演算。利用式(21)與式(22)得出各格區之水深。
5. 進行土壤沖淤演算。利用式(23)得出各格區之懸浮載體積濃度。重複第 4 步驟，直到完成欲模擬之降雨事件延時。

四、結果與討論

本文應用所建立之集水區地文性土壤沖淤模式(Chen, *et al.*, 2006)模擬演算 2001 至 2010 共十年 104 場降雨事件，流入阿公店水庫之逕流量與輸砂量及豎井溢洪管之排砂量，進而評估不同降雨事件空庫排砂操作與不同水位蓄水排砂操作之排砂效率。

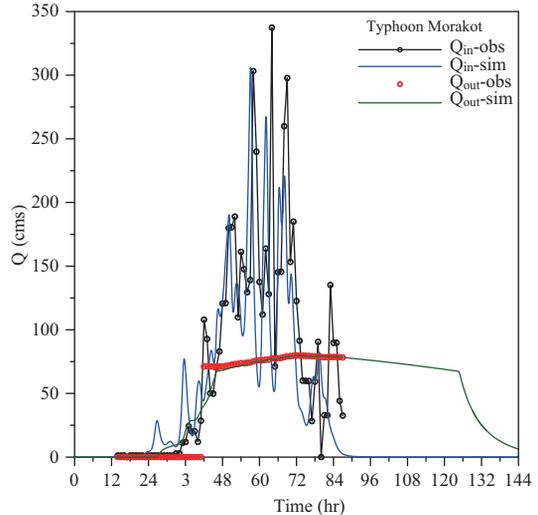


圖 6 2009 年莫拉克颱風模擬之入庫流量、溢洪管排洪量與防洪運轉記錄資料之比較。

4.1 數值模擬與淤積測量成果驗證分析

合理、即時之集水區降雨量、入庫流量及懸浮載體濃度歷線與水庫排洪量及排砂之推估，對水庫之防洪運轉策略有相當之助益。為了瞭解地文性土壤沖淤模式模擬阿公店水庫集水區逕流歷線及輸砂歷線之合理性，本文以有實測流量及含砂濃度資料之颱風事件進行模擬，並將模式演算結果與防洪運轉記錄之流量歷線資料及入庫土砂量進行比較，以驗證地文性土壤沖淤模式可合理模擬集水區之水砂歷線。

4.1.1 颱風之流量歷線驗證

本文以 2009 年的莫拉克颱風為模擬案例，模擬阿公店水庫集水區之入庫流量及溢洪管排洪量，並將模擬結果與莫拉克颱風期間，水庫防洪運轉記錄之入庫流量資料進行比較，如圖 6 所示。由圖可知，所模擬之入庫流量歷線與觀測流量歷線之洪峰流量相近，且歷線形狀大致相符，漲水和退水過程皆能充分模擬，由結果顯示模擬之最大入庫流量為 $305.80 \text{ m}^3/\text{sec}$ ，而觀測記錄(根據阿公店水庫水位容量關係)之最大入庫流量為 $337.38 \text{ m}^3/\text{sec}$ ，模擬與觀測結果之相對誤差約為 9.36%；模擬之總入庫水量為 18076869 m^3 ，觀測之總入庫水量為 20865090 m^3 ，模擬與觀測之入

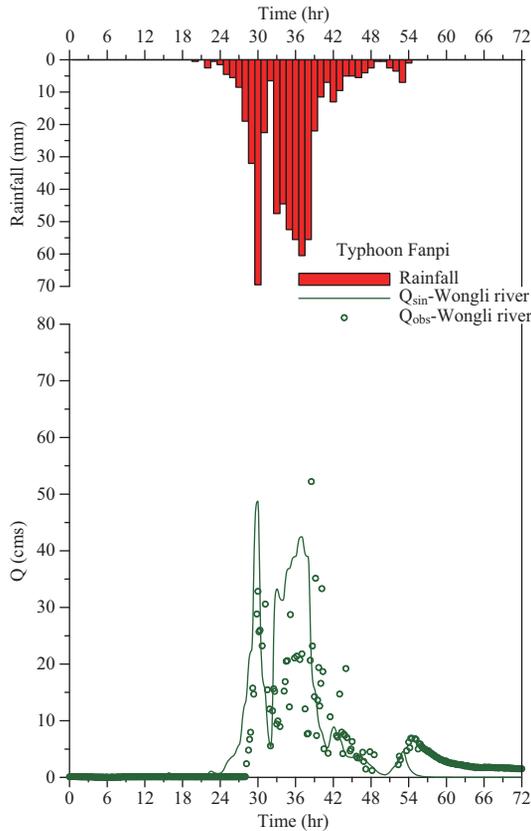


圖 7 2010 年凡那比颱風旺萊溪模擬流量與斗姥廟水文站實測流量之比較。

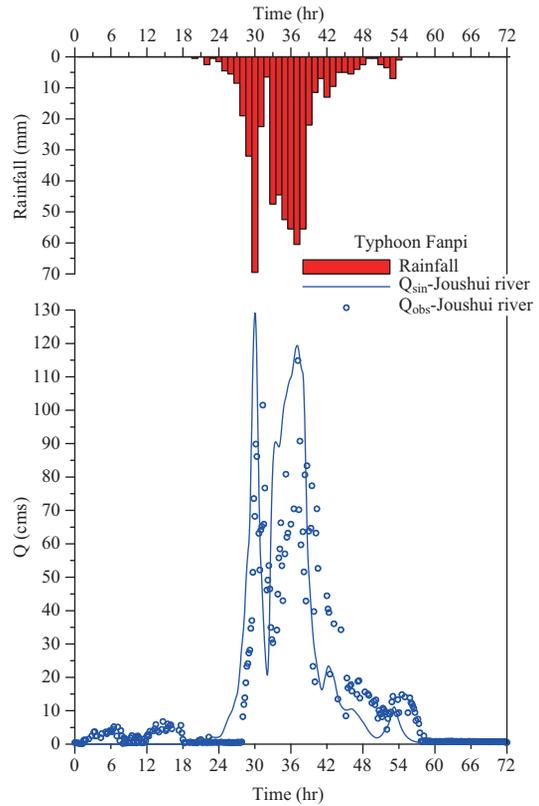


圖 8 2010 年凡那比颱風濁水溪模擬流量與白嶺箱涵水文站實測流量。

庫總水量之相對誤差約為 13.36%，顯示地文性土壤沖淤模式可合理描述降雨與逕流之間的關係。

2010 年阿公店水庫管理中心於阿公店水庫上游之旺萊溪及濁水溪設置二水文站，分別為旺萊溪之斗姥廟以及濁水溪之白嶺箱涵。本文模擬 2010 年引發南台灣(高雄市及屏東縣)嚴重淹水之凡那比(Fanpi)颱風，凡那比颱風模擬演算時間為 9 月 18 日 8 時至 9 月 21 日 7 時止共 3 日。將所模擬之阿公店水庫上游旺萊溪及濁水溪流量與斗姥廟及白嶺箱涵之水文站實測流量(南區水資源局，2011)進行比較，凡那比颱風洪之模擬與實測流量比較如圖 7 至圖 8 所示。由圖 7 至圖 8 可知，所模擬旺萊溪及濁水溪之流量歷線與觀測流量歷線之洪峰流量相近。凡那比颱風期間旺萊溪斗姥廟及濁水溪白嶺箱涵模擬之最大流量分別為 $42.5 \text{ m}^3/\text{sec}$ (尖峰時刻為 9 月 19 日 20 時)及 119.4

m^3/sec (尖峰時刻為 9 月 19 日 21 時)，而斗姥廟水文站實測之流量最大流量為 $52.2 \text{ m}^3/\text{sec}$ (尖峰時刻為 9 月 19 日 21 時 30 分)，白嶺箱涵水文站實測之流量最大流量為 $114.9 \text{ m}^3/\text{sec}$ (尖峰時刻為 9 月 19 日 20 時 10 分)。濁水溪洪峰流量模擬與觀測結果之相對誤差約為 3.92%，旺萊溪洪峰流量模擬與觀測結果之相對誤差約為 22.82%，顯示地文性土壤沖淤模式可合理描述集水區降雨與逕流之間的關係。

4.1.2 數值模擬與模型試驗空庫排砂效率分析驗證

應用所建立之地文性土壤沖淤模式(PSED-model)進行入庫沉淤量之模擬演算，依據重現期距 2 年、5 年、10 年、20 年、50 年、100 年及 200 年之一日及二日暴雨設計雨量資料進行地文性土壤沖淤模式演算，可求得入庫之輸砂量歷

表 2 一日暴雨各重現期距年水庫集水區之土壤沖蝕量及產砂量

各重現期距年	水庫集水區沖蝕量(m ³)	入庫砂量(m ³)			集水區入庫砂量百分比(%)		濁水溪與旺萊溪集水區產砂量比
		旺萊溪新尖橋	濁水溪蓬萊橋	總入庫砂量	旺萊溪新尖橋	濁水溪蓬萊橋	
2 年	273693	25466	61290	86756	29.35	70.65	2.41
5 年	345673	35733	85382	121115	29.50	70.50	2.39
10 年	389478	42375	100253	142628	29.71	70.29	2.06
25 年	430723	48587	113072	161658	30.06	69.94	2.33
50 年	485181	56305	127685	183990	30.60	69.40	2.27
100 年	524436	61991	138057	200048	30.99	69.01	2.23
200 年	562666	67808	147250	215058	31.53	68.47	2.17

表 3 二日暴雨各重現期距年水庫集水區之土壤沖蝕量及產砂量

各重現期距年	水庫集水區沖蝕量(m ³)	入庫砂量(m ³)			集水區入庫砂量百分比(%)		濁水溪與旺萊溪集水區產砂量比
		旺萊溪新尖橋	濁水溪蓬萊橋	總入庫砂量	旺萊溪新尖橋	濁水溪蓬萊橋	
2 年	443955	37269	91929	129199	28.85	71.15	2.47
5 年	557444	52963	127535	180498	29.34	70.66	2.41
10 年	627812	63045	151082	214128	29.44	70.56	2.40
25 年	701289	72652	173346	245998	29.53	70.47	2.39
50 年	793946	84612	199903	284515	29.74	70.26	2.36
100 年	862089	94171	224686	318857	29.53	70.47	2.39
200 年	918677	102636	249963	352599	29.11	70.89	2.43

線、水庫集水區之土壤沖蝕量及產砂量。演算入庫砂量與水庫集水區之土壤沖蝕量及產砂量如表 2 及表 3 所示。

由產砂量之結果顯示，濁水溪水系集水區之產砂量較旺萊溪水系集水區之產砂量為高，濁水溪之各重現期距年平均產砂量約為旺萊溪的 2.31 倍。根據「阿公店水庫防淤操作模型試驗及檢討計畫報告」(2003)之研究結果，濁水溪來砂量約為 72%，旺萊溪來砂量約為 28%。本研究之模擬結果，一日暴雨濁水溪來砂量約為 69.75%，旺萊溪來砂量約為 30.25%，二日暴雨濁水溪來砂量約為 70.64%，旺萊溪來砂量約為 29.36%，無論是一日暴雨或二日暴雨之演算結果，皆顯示模擬結果與研究報告之分析結果接近。

由於阿公店水庫缺乏逐時及全洪程之泥砂觀測資料，無法直接驗證入流泥砂總量或是入流泥砂濃度歷線。阿公店水庫每年均進行水庫地形測量，因此可利用前後年地形測量結果推估年淤砂量。本研究模擬演算凡那比颱風入庫之淤砂量

約 46.4 萬立方公尺(以淤泥比重 1.2 計算)。水庫管理局於凡那比颱風前(2010.06)與凡那比颱風後(2010.10)均有進行水庫淤積測量，應用颱風前後淤積測量結果推估水庫淤積量約為 58.3 萬立方公尺，略大於模擬值。但由於 2010 年 7 月仍有一場降雨事件發生，故實際測量之 58.3 萬立方公尺的水庫淤積量並非全由凡那比颱風所造成，故本研究模擬之凡那比颱風入庫淤砂量略小於實際測量值仍屬合理而正確。

4.2 水庫空庫排砂之排砂效率評估

由於各場降雨事件之降雨量、降雨強度、降雨延時、降雨型態等皆有所差異，因此本文收集水庫集水區 10 年(2001 ~ 2010)所有降雨量大於 30 mm 之降雨事件，共 104 場。利用所發展完成之地文性土壤沖淤模式進行之空庫排砂操作之排砂效率演算，模擬演算此 104 場降雨事件所造成之水庫入砂量與豎井溢洪管排砂量，模擬結果以較大的 11 場颱風降雨事件為例，如表 4 及表 5 所示。

表 4 十年來最大 11 場降雨事件之降雨特性資料

編號	颱洪事件 起訖時間	降雨延時 (hr)	最大降雨強度 (mm/hr)	最大降雨強度發生時間 (hr)	累積雨量 (mm)
1	2005/06/12~2005/06/16	120	73.22	33	831.38
2	2005/07/1~2005/07/21 (海棠颱風)	96	70.53	63	951.49
3	2006/06/09~2006/06/11	72	61.77	29	497.80
4	2006/07/13~2006/07/16 (碧利斯颱風)	96	46.39	43	461.97
5	2007/08/08~2007/07/15 (帕布、梧提颱風)	192	38.84	83	708.45
6	2007/08/18~2007/08/22 (聖帕颱風)	120	34.11	19	545.24
7	2008/06/14~2008/06/17	96	28.35	67	421.49
8	2008/07/17~2008/07/19 (卡攻基颱風)	72	108.53	17	636.25
9	2009/08/06~2009/08/10 (莫拉克颱風)	120	50.45	56	879.62
10	2010/07/26~2010/07/30	120	46.23	22	438.64
11	2010/09/18~2010/09/21 (凡那比颱風)	48	69.50	30	579.38

表 5 最大 11 場颱洪事件庫區之進砂量、淤砂量、溢洪管排砂量及空庫排砂率

颱洪事件	總降雨量(mm)		入庫砂量 (m^3)	空庫排砂量 (m^3)	空庫排砂效率 (%)
	尖山	竹子腳			
2005/06/12~2005/06/16	844.5	790.5	391803	220846	56.37
2005/07/1~2005/07/21 (海棠颱風)	964.0	912.5	478412	299809	62.67
2006/06/09~2006/06/11	499.5	492.5	241930	135741	56.11
2006/07/13~2006/07/16 (碧利斯颱風)	461.0	465.0	212081	115472	54.45
2007/08/08~2007/07/15 (帕布、梧提颱風)	702.5	727.0	325951	208097	63.84
2007/08/18~2007/08/22 (聖帕颱風)	553.5	519.5	287051	174392	60.75
2008/06/14~2008/06/17	425.5	409.0	201633	122410	60.71
2008/07/17~2008/07/19 (卡攻基颱風)	640.5	623.0	181154	111058	61.41
2009/08/06~2009/08/10 (莫拉克颱風)	862.5	933.0	514079	329610	64.12
2010/07/26~2010/07/30	439.0	437.5	291992	167718	57.44
2010/09/18~2010/09/21 (凡那比颱風)	558.0	646.0	205509	103094	50.17

表 4 為十年中最大 11 場颱風事件(極端洪水事件)，由表 4 可知 11 場颱風事件之降雨特性不同，但由表 5 之演算結果可知，11 場颱風事件模擬之空庫排砂率介於 50.17% ~ 64.12%間，平均之空庫排砂率為 58.90%。依據 104 場降雨事件空庫排砂效率之統計結果可知，空庫排砂效率最低為 50.17% (凡那比颱風)、最高為 65.22% (20060805 降雨)，平均空庫排砂效率為 59.91%。將所模擬各洪水事件之空庫排砂效率之平均排砂效率與水工模型試驗之結果(65.34%，含灌溉管輔助排淤)比較，由研究結果顯示，模式模擬之空庫排砂效率值合理。

4.3 不同水位排砂操作方式之排砂效率分析

由各降雨事件之所演算之入庫懸浮載輸砂歷程可知，各降雨事件之入庫輸砂歷程中，從降雨開始之 12 小時內，均會有一入砂高峰，若能排出降雨初期含砂濃度較大的渾水，將有助於水庫排砂效率的提升。因此本文以此為依據，進行降雨開始之 12 小時內空庫排砂，並於第 13 小時開始關閉閘門蓄水，再依不同的蓄水水位進行排砂操作。

本文蓄水排砂操作是以降雨開始之 12 小時內空庫排砂，即是降雨開始後連續排水 12 小時，並於第 13 小時關閉閘門蓄水，達到設定之操作水位時再開啟閘門進行排砂，操作之蓄水水位分別為 30 公尺、31 公尺及 32 公尺三種案例。空庫排砂與各操作排砂之排砂效率演算結果比較，如表 6 至表 15 所示。

表 6 2001 年降雨事件之空庫排砂與操作排砂之排砂效率比較

降雨場次	總降雨量(mm)		水庫入砂量 (m ³)	空庫排砂量 (m ³)	空庫排砂效率 (%)	操作排砂率(%)		
	尖山	竹仔腳				(30m)	(31m)	(32m)
20010519-20	226	265.5	125,287	73,862	58.95	54.89	54.85	54.85
20010522	118	106.5	110,466	68,551	62.06	55.09	55.09	55.09
20010528-31	340.5	355.5	218,079	129,793	59.52	41.12	41.05	41.05
20010613-14	151	158	48,408	28,517	58.91	40.13	40.03	40.03
20010615	51.5	70.5	41,040	25,749	62.74	62.74	62.74	62.74
20010623-24 奇比颱風	115.5	117.5	37,179	22,366	60.16	44.10	44.08	44.08
20010711-12 譚美颱風	262	232	109,000	65,747	60.32	55.50	55.50	55.50
20010725	37	29.5	25,177	14,646	58.17	54.95	54.95	54.95
20010726	78.5	73.5	63,322	40,190	63.47	63.47	63.47	63.47
20010830	38	33	26,635	14,698	55.18	54.93	54.93	54.93
20010905-06	150.5	142.5	1,812,671	112,958	62.32	31.05	30.81	30.81
20010918-19 納莉颱風	329.5	339	128,034	78,092	60.99	54.95	54.92	54.92

表 7 2002 年降雨事件之空庫排砂與操作排砂之排砂效率比較

降雨場次	總降雨量(mm)		水庫入砂量 (m ³)	空庫排砂量 (m ³)	空庫排砂效率 (%)	操作排砂率(%)		
	尖山	竹仔腳				(30m)	(31m)	(32m)
20020517	59.5	50	27,365	16,229	59.30	53.70	53.70	53.70
20020522-23	68.5	74.5	47,455	28,926	60.96	44.45	44.45	44.45
20020531	44.5	56	27,765	16,293	58.68	58.53	58.53	58.53
20020709-12 娜克莉颱風	242	255	121,825	76,104	62.47	24.07	23.97	23.96
20020804-06	199.5	184	75,817	42,158	55.61	51.60	51.52	51.52

表 8 2003 年降雨事件之空庫排砂與操作排砂之排砂效率比較

降雨場次	總降雨量(mm)		水庫入砂量 (m ³)	空庫排砂量 (m ³)	空庫排砂效率 (%)	操作排砂率(%) (30m)	操作排砂率(%) (31m)	操作排砂率(%) (32m)
	尖山	竹仔腳						
20030408	64.5	64	37,543	21,334	56.83	56.57	56.57	56.57
20030518	61	54	93,459	59,304	63.45	63.44	63.44	63.44
20030606-07	211	203	105,877	63,942	60.39	54.47	54.36	54.35
20030612-13	165.5	157	126,443	79,813	63.12	40.52	40.45	40.44
20030626	61	44	72,300	46,537	64.37	57.95	57.95	57.95
20030804 莫拉克颱風	202	171	84,090	49,973	59.43	59.41	59.41	59.41
20030819 梵高颱風	67	35	51,859	32,267	62.22	62.22	62.22	62.22
20030920	30.5	28.5	19,590	10,852	55.40	55.40	55.40	55.40

表 9 2004 年降雨事件之空庫排砂與操作排砂之排砂效率比較

降雨場次	總降雨量(mm)		水庫入砂量 (m ³)	空庫排砂量 (m ³)	空庫排砂效率 (%)	操作排砂率(%) (30m)	操作排砂率(%) (31m)	操作排砂率(%) (32m)
	尖山	竹仔腳						
20040520-22	169	148	141,882	86,309	60.83	37.33	37.29	37.29
20040702-03 敏督利颱風	354.5	363.5	184,307	118,834	64.48	55.79	55.71	55.71
20040718	41.5	39.5	29,363	17,170	58.48	58.37	58.37	58.37
20040828	38.5	39	24,134	13,361	55.36	53.44	53.44	53.44
20040910-11 海馬颱風	243.5	245.5	118,109	69,078	58.49	38.32	38.27	38.27
20041203-04 南瑪都颱風	108.5	101	55,577	35,157	63.26	45.80	45.63	45.63

表 10 2005 年降雨事件之空庫排砂與操作排砂之排砂效率比較

降雨場次	總降雨量(mm)		水庫入砂量 (m ³)	空庫排砂量 (m ³)	空庫排砂效率 (%)	操作排砂率(%) (30m)	操作排砂率(%) (31m)	操作排砂率(%) (32m)
	尖山	竹仔腳						
20050327	104	101.5	102,029	55,462	54.36	54.36	54.36	54.36
20050509-10	70	61	20,472	10,828	52.89	47.35	47.35	47.35
20050512-13	39	39.5	11,971	6,334	52.94	47.87	47.87	47.87
20050601	44.5	42.5	64,508	40,342	62.54	62.53	62.53	62.53
20050602-03	210.5	204.5	115,349	66,483	57.64	41.94	41.80	41.80
20050612-16	844.5	790.5	391,803	220,846	56.37	36.42	36.36	36.35
20050623	47.5	51	48,973	26,977	55.09	51.82	51.82	51.82
20050625	76	69.5	67,527	43,497	64.41	64.40	64.40	64.40
20050627-28	39.5	46	9,441	5,379	56.98	52.58	52.58	52.58
20050718-21 海棠颱風	964	912.5	478,412	299,809	62.67	59.50	59.48	59.48
20050814	48.5	43	37,073	23,003	62.05	60.30	60.30	60.30
20050816	38	49.5	24,584	14,900	60.61	60.61	60.61	60.61
20050818-19	76.5	76	16,715	9,922	59.36	49.41	49.41	49.41
20050820	53.5	47.5	36,732	22,107	60.18	56.46	56.46	56.46
20050901 泰利颱風	189.5	188	116,386	69,597	59.80	59.80	59.79	59.79
20051002 龍王颱風	62.5	65	27,401	16,150	58.94	54.09	54.09	54.09
20050327	104	101.5	102,029	55,462	54.36	54.36	54.36	54.36

表 11 2006 年降雨事件之空庫排砂與操作排砂之排砂效率比較

降雨場次	總降雨量(mm)		水庫入砂量 (m ³)	空庫排砂量 (m ³)	空庫排砂效率 (%)	操作排砂率(%)(30m)	操作排砂率(%)(31m)	操作排砂率(%)(32m)
	尖山	竹仔腳						
20060413	73	86	57,149	30,626	53.59	53.59	53.59	53.59
20060415-16	44.5	49.5	10,200	6,614	64.85	59.05	59.05	59.05
20060529	78	65.5	56,695	35,357	62.36	62.24	62.24	62.24
20060602	54.5	49.5	33,049	20,140	60.94	56.44	56.44	56.44
20060603	41	52.5	32,687	19,167	58.64	57.64	57.64	57.64
20060609-11	499.5	492.5	241,930	135,741	56.11	41.17	41.12	41.11
20060708-09 艾維尼颱風	137	143.5	50,915	31,559	61.98	45.65	45.65	45.65
20060713-16 碧利斯颱風	461	465	212,081	115,472	54.45	14.53	14.45	14.44
20060725-26 凱米颱風	196.5	194	99,197	60,460	60.95	45.06	45.00	45.00
20060803	43.5	63.5	42,943	25,271	58.85	58.85	58.85	58.85
20060805	67.5	55	52,528	34,261	65.22	65.22	65.22	65.22
20060818	133.5	101.5	104,035	60,942	58.58	58.58	58.58	58.58
20060913	41	17.5	30,571	18,176	59.46	59.46	59.46	59.46

表 12 2007 年降雨事件之空庫排砂與操作排砂之排砂效率比較

降雨場次	總降雨量(mm)		水庫入砂量 (m ³)	空庫排砂量 (m ³)	空庫排砂效率 (%)	操作排砂率(%)(30m)	操作排砂率(%)(31m)	操作排砂率(%)(32m)
	尖山	竹仔腳						
20070520	65.5	66.5	23,995	14,455	60.24	46.53	46.53	46.53
20070606	43.5	50.5	12,240	7,349	60.04	53.87	53.87	53.87
20070608-09	53	52.5	19,278	10,868	56.38	48.36	48.36	48.36
20070612	43.5	42.5	16,027	9,250	57.72	41.86	41.86	41.86
20070715	118.5	106	98,061	63,627	64.88	56.66	56.66	56.66
20070716	44	44	34,425	19,132	55.57	55.54	55.54	55.54
20070808-15 帕布颱風、 梧提颱風	702.5	727	325,951	208,097	63.84	31.63	31.54	31.53
20070818-22 聖帕颱風	553.5	519.5	287,051	174,392	60.75	21.04	20.90	20.90
20070924	116.5	128	203,012	110,110	54.24	29.62	30.43	30.43
20071006-07 柯羅莎颱風	167	156	54,957	33,787	61.48	36.37	36.23	36.23

表 13 2008 年降雨事件之空庫排砂與操作排砂之排砂效率比較

降雨場次	總降雨量(mm)		水庫入砂量 (m ³)	空庫排砂量 (m ³)	空庫排砂效率 (%)	操作排砂率 (%) (30m)	操作排砂率 (%) (31m)	操作排砂率(%) (32m)
	尖山	竹仔腳						
20080529-30	56.5	40	33,212	20,429	61.51	49.62	49.62	49.62
20080602-05	287	278.5	123,204	74,338	60.34	25.56	25.50	25.50
20080614-17	425.5	409	201,633	122,410	60.71	25.21	25.11	25.11
20080626-28	290.5	261	180,811	106,071	58.66	24.58	24.50	24.49
20080709-10	64	63.5	43,202	27,935	64.66	61.46	61.46	61.46
20080717-19 卡攻基颱風	640.5	623	326,565	200,555	61.41	61.41	61.41	61.41
20080728-29 鳳凰颱風	235	227	110,780	70,421	63.57	47.01	46.94	46.93
20080828	65	36	52,467	30,360	57.86	57.86	57.86	57.86
20080914 辛樂克颱風	114	108	38,748	22,555	58.21	44.75	44.67	44.67
20080928-29 薔蜜颱風	190	189	74,719	45,992	61.55	54.68	54.62	54.61
20081017	38	67	43,529	25,574	58.75	58.75	58.75	58.75

表 14 2009 年降雨事件之空庫排砂與操作排砂之排砂效率比較

降雨場次	總降雨量(mm)		水庫入砂量 (m ³)	空庫排砂量 (m ³)	空庫排砂效率 (%)	操作排砂率(%) (30m)	操作排砂率 (%) (31m)	操作排砂率(%) (32m)
	尖山	竹仔腳						
20090422	54	66.5	74,224	46,592	62.77	62.76	62.76	62.76
20090604	46	48	21,762	12,679	58.26	41.38	41.38	41.38
20090611-13	118.5	117	71,089	41,081	57.79	34.13	34.11	34.11
20090618	63	26	101,285	63,225	62.42	62.42	62.42	62.42
20090621-22 蓮花颱風	81	84.5	46,208	27,695	59.94	53.74	53.74	53.74
20090713	56.5	62	26,595	15,591	58.62	49.44	49.44	49.44
20090716	88.5	98.5	63,179	33,465	52.97	52.97	52.97	52.97
20090725	60.5	66.5	54,706	34,807	63.63	63.59	63.59	63.59
20090806-10 莫拉克颱風	862.5	933	514,079	329,610	64.12	41.21	41.20	41.20
20090816	36	31.5	28,785	16,932	58.82	58.82	58.82	58.82
20090905-06	108	98	65,728	40,581	61.74	12.51	12.44	12.44

表 15 2010 年降雨事件之空庫排砂與操作排砂之排砂效率比較

降雨場次	總降雨量(mm)		水庫入砂量 (m ³)	空庫排砂量 (m ³)	空庫排砂效率 (%)	操作排砂率(% (30m)	操作排砂率 (%) (31m)	操作排砂率(% (32m)
	尖山	竹仔腳						
20100423	48	44.5	35,068	21,683	61.83	61.54	61.54	61.54
20100523	100	104.5	78,840	50,606	64.19	64.19	64.19	64.19
20100528-29	54.5	60	15,432	9,568	62.00	44.57	44.57	44.57
20100613-14	93	97.5	40,592	22,335	55.02	46.43	46.43	46.43
20100625	57	51.5	29,813	19173	64.31	63.82	63.82	63.82
20100715	70	50	54,420	34,408	63.23	63.23	63.23	63.23
20100721	33	37	20,378	13,167	64.61	64.61	64.61	64.61
20100724	43	28.5	51,164	32,373	63.27	63.27	63.27	63.27
20100726-30	439	437.5	291,992	167,718	57.44	24.72	24.64	24.63
20100901-02 萊羅克颱風	122	109.5	67,186	40,492	60.27	44.87	44.81	44.81
20100909-10 莫蘭蒂颱風	131	135.5	57,589	36,157	62.78	49.51	49.47	49.47
20100919-20 凡那比颱風	558	646	205,509	103,094	50.17	35.75	26.11	25.48

由表 6 至表 15 可知，經由閘門操作之排砂效率低於空庫排砂之排砂效率。相較於空庫排砂，閘門操作之排砂效率之降低量與水庫集水區之降雨特性(降雨延時與降雨分布)有關，若降雨延時較長或降雨初期開始連續排 12 小時的雨量遠小於降雨中、後期，則閘門操作之排砂效率會較小。

本文所模擬的三種排砂操作皆是開始下雨後，連續排 12 小時，然後開始蓄水，直至蓄水高度分別達 30 公尺、31 公尺及 32 公尺後再重新開啟閘門排砂。在 104 場颱風降雨中，有 68 場降雨事件(約佔 65.38%)蓄水後庫區水位皆未達 30 公尺，以至閘門不再開啟排砂，且 30 公尺、31 公尺與 32 公尺之操作排砂效率會一致。有 25 場降雨事件(約佔 24.04%)蓄水後庫區水位曾超過 30 公尺但未達 31 公尺，故 31 公尺與 32 公尺之操作排砂效率會一致，且都略低於 30 公尺之操作排砂效率。有 11 場降雨事件(約佔 10.58%)蓄水後庫區水位曾超過 31 公尺，故 32 公尺之操作排砂略小於 31 公尺之操作排砂效率。

在所演算的 104 場降雨事件中，蓄水至 30 公尺、31 公尺與 32 公尺再排砂之平均排砂效率分別為 50.13%、50.02%及 50.00%只比平均空庫排砂效率(59.91%)降低 9.78%、9.89%及 9.91%，顯示大多數降雨事件之操作排砂效率低於空庫排砂效率約 10%。至於操作排砂效率等於空庫排砂效率之情形，乃因第 13 小時應該關閉閘門蓄水時，水位超過 30 公尺，故仍開啟閘門排砂，以至於此操作規則相當於空庫排砂。值得注意的是，此 104 場降雨事件只演算至降雨終止，實際上空庫排砂在雨停後仍會繼續進行空庫排砂，而操作排砂將在操作水位低於 30 公尺、31 公尺與 32 公尺關閉閘門蓄水，故操作排砂效率仍會低於空庫排砂效率。

由 104 場降雨事件演算結果，操作之排砂效率低於空庫之排砂效率約 5% ~ 30%，造成此排砂效率降低之原因為降雨開始之 12 小時內有一含砂量高峰，但並不一定是含砂量最高峰，或於降雨開始 12 小時之後又發生另一含砂量最高峰，而降雨開始 12 小時後且水庫水位未達 30 公

尺時，閘門是關閉的狀態，因此泥砂入庫後會因流速驟減而開始落淤，待水庫水位達 30 公尺再開啟閘門排洪排砂，無法將落淤於水庫之泥砂全部排出。

五、結論

本文應用所發展完成之地文性土壤沖淤模式進行不同降雨量、降雨強度、降雨延時、降雨型態降雨事件空庫排砂操作之排砂效率演算，依據 104 場降雨事件空庫排砂效率之統計結果可知，空庫排砂效率最低為 50.17%、最高為 65.22%，平均空庫排砂效率為 59.91%，此與水工模型試驗之結果相符。進一步進行不同水位蓄水之排砂操作，以降雨開始之 12 小時內空庫排砂，並於第 13 小時關閉閘門蓄水，達到設定之操作水位時再開啟閘門進行排砂，操作之蓄水水位分別為 30 公尺、31 公尺及 32 公尺三種案例。104 場降雨事件中，經由閘門操作之排砂效率低於空庫排砂之排砂效率。降雨開始 12 小時內空庫排砂，蓄水至 30 公尺、31 公尺與 32 公尺再排砂之平均排砂效率分別為 50.13%、50.02% 及 50.00% 比平均空庫排砂效率(59.91%)降低 9.78%、9.89% 及 9.91%，顯示大多數降雨事件之操作排砂效率與空庫排砂效率僅相差約 10%。造成此操作排砂效率降低之原因為降雨開始之 12 小時內有一含砂量高峰，但並不一定是含砂量最高峰，或於降雨開始 12 小時之後又發生另一含砂量最高峰，而降雨開始 12 小時後且水庫水位未達 30 公尺時，閘門是關閉的狀態，因此泥砂入庫後會因流速驟減而開始落淤，待水庫水位達 30 公尺再開啟閘門排洪排砂，無法將落淤於水庫之泥砂全部排出。操作排砂效率與空庫排砂效率僅相差約 10%之結果可作為水庫擬定排砂操作策略時之決策參考。

致 謝

本文承蒙經濟部水利署南區水資源局計畫之支持，及水利規劃試驗所於研究進行中資料之提供，研究得以順利完成，在此一併致謝。

參考文獻

1. Chaudhry, M. A., "Numerical Simulation for Sediment Flushing in Reservoir," Ph.D. Thesis. Department of Civil Engineering, University of Engineering and Technology Lahore, Pakistan, 2014.
2. Chaudhry, M. A., Habib-ur-Rehman M., "Approaches to Enhance the Life of Reservoirs," International Conference and Expo of Water Technologies, pp. 3-13, Lahore Pakistan, 2007.
3. Chaudhry, M. A., Habib-ur-Rehman M., Akhtar, M. N., Hashmi, H. N., "Modeling Sediment Deposition and Sediment Flushing Through Reservoirs Using 1-D Numerical Model," Arabian Journal for Science and Engineering, Vol. 39, pp. 647-658, 2014.
4. Chen, C.N., Tsai, C.H., and Tsai, C.T., "Simulation of Sediment Yield from Watershed by Physiographic Soil Erosion-Deposition Model," Journal of Hydrology, Vol. 327, pp. 293-303 2006.
5. Emamgholizadeh, S., Bian, M., Fathi-Moghadam, M., and Ghometshi, M., "Investigation and Evaluation of The Pressure Flushing Through Storage Reservoir," ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences., Vol.1, No.4, pp.7-16, 2006.
6. Itakura, T., and Kishi, T., "Open Channel Flow With Suspended Sediments," Journal of the Hydraulic Division, ASCE, Vol. 106, No. HY8, pp. 1325-1343, 1980.
7. Laws, J. O. and Parsons, D. A. "The Relation of Rain Drop Size to Intensity," Transactions, American Geophysical Union, Vol. 24, pp. 452-460, 1943.
8. Meyer, L. D. and Wischmeier, W. H., "Mathematical Simulation of The Process of Soil Erosion by Water," Transactions, ASAE, Vol. 12, No. 6, pp. 754-762, 1969.

9. Meyer, L. D., "How Rain Intensity Affects Interrill Erosion," Transactions, ASAE, pp. 1472-1475, 1981.
10. Meyer, L. D., and Monke, E. J., "Mechanics of Soil Erosion by Rainfall and Overland Flow," Transactions, ASAE, Vol. 8, No. 4, pp. 572-577, 1965.
11. Mutchler, C.K., and Young, R.A., "Soil Detachment by Raindrops," Proceedings of sediment-yield workshop, ARS-S-40, USDA 1975.
12. Olsen, R. B., "Two-Dimensional Numerical Modelling of Flushing Processes in Water Reservoirs," Journal of Hydraulic Research, Vol. 37, No. 1, pp. 3-16, 1999.
13. Sharma, P.P., Gupta, S.C., and Foster, G.R., "Raindrop-induced soil detachment and sediment transport from interrill areas," Soil Science Society America Journal, Vol. 59, pp. 727-734, 1995.
14. Shimizu, Y., Yamaguchi, H., and Itakura, T., "Three-Dimensional Computation of Flow and Bed Deformation," Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 116, No. 9, pp. 1090-1108, 1990.
15. Tasi, C. H. and Tasi, C. T., "Velocity and Concentration Distributions of Sediment-Laden Open Channel Flow," Journal of the American Water Resources Association, Vol. 36, No. 5, pp. 1075-1086, 2000.
16. 胡蘇澄、盧昭堯、吳益裕、陳台芳，「台灣中部蓮華池地區高黏土含量土壤之紋溝間沖蝕率」，林業試驗所研究報告季刊，第十卷，第一期，pp. 33-40，1995。
17. 馬明明，「台灣中部與台北地區降雨特性及沖蝕性關係之研究」，碩士論文，國立中興大學土木工程研究所，台中，1995。
18. 張瑞瑾、謝鑒衡、王明甫、黃金堂，河流泥沙動力學，水利電力出版社，武漢水利電力學院，1988。
19. 陳蕃諾、蔡智恆、蔡長泰，「集水區地文性土壤沖淤模式與地理資訊系統結合應用之研究」，中國土木水利工程學刊，第十六卷，第三期，pp.379-391，2004。
20. 楊昌儒，「地文性淹水預報系統建構之研究」，博士論文，國立成功大學水利及海洋工程研究所，台南，2000。
21. 蔡長泰、蔡智恆，「梯形寬頂堰堰流公式適用性之研究」，台灣水利季刊，第四十五卷，第二期，pp. 29-45，1997。
22. 經濟部水利處水利規劃試驗所，「阿公店水庫防淤操作模型試驗及檢討計畫報告（總報告）」，2003。
23. 經濟部水利署南區水資源局，「阿公店水庫旺來溪及濁水溪河道治理規劃」，2009。
24. 經濟部水利署南區水資源局，「100年度阿公店水庫空庫防淤泥砂觀測及成效評估」，2011。
25. 鍾文祥，「水庫排砂相關用語」，水利土木科技資訊季刊，第 54 期，pp. 9-20，2011。

收稿日期：民國 105 年 9 月 26 日
 修正日期：民國 105 年 11 月 30 日
 接受日期：民國 105 年 12 月 5 日