

以灌溉放淤作為烏山頭水庫永續防淤策略之探討研究

UTILIZING IRRIGATION OPERATION AS A DESILTING STRATEGY IN
WUSHANTOU RESERVOIR FOR SUSTAINABILITY

黎明工程顧問
股份有限公司
協理

顏 呈 仰*
Cheng-Yang Yen

逢甲大學
水利工程與資源保育學系
教授

許 少 華
Shao-Hua Marko Hsu

摘 要

烏山頭水庫完工迄今，水庫總容量減少約 48%，累積淤積量約 7,432 萬立方公尺。此水庫係於日治時代所興建，當初並未規劃設置相關水庫排淤設施，同時因為水庫下游官田溪河道狹小，難以實施水庫下游河道放淤。基於水庫永續的需求，本研究針對水庫淤積浚漂、水庫減淤、排砂可行性作調查分析，經由庫容逕流比、庫容來砂比、水源利用率等指標，確定出烏山頭水庫防淤策略宜由「集水區保育」及「機械清淤」著手。並且利用烏山頭水庫每年供給灌溉用水達 7 億立方公尺之優勢，規劃出從主庫區越壩抽泥放淤至下游灌溉系統，以抽泥船設置專管越壩排放至現有烏山頭電廠尾水道下游嘉南大圳圳路，再藉由南、北幹線放淤至下游河道或灌區農田。灌溉放淤須配合全年的灌溉計畫及灌溉用水執行放淤的時機，並須預先探討灌溉圳路沿程落淤潛勢，以及抽泥放淤對水庫及圳路既有設施可能的影響共三個層面。2014 至 2015 年度以實際辦理測試放淤驗證了所研議的操作構想。統計資料顯示，自本研究研議以灌溉放淤後，烏山頭水庫年清淤量提升至新的級距，尤其以 2018 年的低水位操作放淤效果最佳，年放淤量達 19.6 萬立方公尺。透過引水減淤及灌溉放淤，年放淤目標設為 17 萬立方公尺，除使烏山頭水庫年淤積量達到平衡外，另可讓下游灌區的農田獲得水庫淤泥以滋養地力。

關鍵詞：烏山頭水庫、水庫減淤、灌溉、放淤、永續利用。

* 通訊作者，黎明工程顧問股份有限公司協理

40848 台中市南屯區大墩十七街 137 號 3 樓 · yen5492@ms7.hinet.net

UTILIZING IRRIGATION OPERATION AS A DESILTING STRATEGY IN WUSHANTOU RESERVOIR FOR SUSTAINABILITY

Cheng-Yang Yen*

Liming Engineering Consultants Co., Ltd.

Shao-Hua Marko Hsu

Department of Water Resources Engineering
and Conservation,
Feng Chia University, Taichung, Taiwan

ABSTRACT

Wushantou reservoir has been completed for almost one hundred years. Its capacity has been reduced by 74 million cubic meters due to siltation, which is approximately 48% of its initial capacity. The reservoir lacks desilting facilities, and the downstream Guantian Creek is too small to implement silt-releasing during flood periods. Under the goal of sustainable management of the reservoir, this research studied different possible desilting methods. We recommended to take the advantage of this reservoir's annual irrigation water supply of 900 million cubic meters, dilute the reservoir silt into released irrigation water, and bring those fine particles into the downstream farmland through irrigation operations. Through this operation, the reservoir can reach the goal of reducing silt by 170,000 cubic meters per year, which not only balances the reservoir capacity, but also nourishes the downstream farmland.

Keywords: Wushantou reservoir, Reservoir desilting, Irrigation, Silt-releasing, Sustainable management.

一、前言

台灣南部的水庫所在位置多位於地質年代輕且膠結不良的沉積岩地質區，因此水庫淤積問題為本區域水庫營運的嚴苛考驗，尤其在 2009 年莫拉克颱風後，南部水庫庫容受到嚴重淤積減損，政府遂推動「曾文南化烏山頭水庫治理及穩定南部地區供水特別條例」積極提升南部三大水庫的排砂減淤功能。

經過數年的努力，包含曾文水庫防淤隧道、南化水庫防淤隧道在內等十餘項水庫改造工作陸續完成，曾文與南化水庫的水力排砂減淤已可見初步成效。惟烏山頭水庫屬離槽式水庫，自身集水區洪水逕流小，缺乏水力排砂條件為其劣勢，但是每年供給大量農業用水供灌為其優勢。如何因地制宜思考適合烏山頭水庫之最佳化減淤策略為本研究之規劃重點。

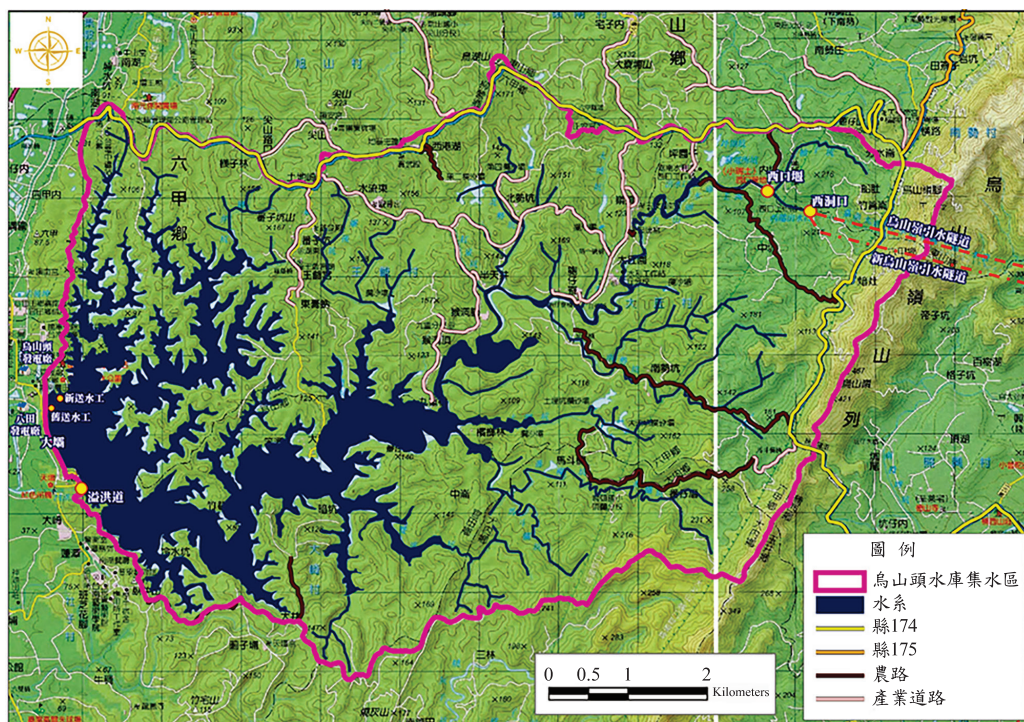
二、水庫設施及灌區概況

烏山頭水庫為曾文溪支流官田溪河道上之離槽式水庫，水庫天然集水面積 58.24 平方公里，因泥岩地質特性致使集水區內坑溝沖蝕作用發達，蓄水後密佈之蝕溝支流分布貌似珊瑚礁，故有別稱「珊瑚潭」

(圖 1)。在 1930 年完工之水庫原有設施包含：主壩、溢洪道、舊送水工及舊烏山嶺引水隧道，後續改建或增建之設施包含：西口堰、新送水工及新烏山嶺引水隧道(表 1)，其中西口堰係於水庫完工後為抑制泥岩河岸沖蝕問題，於 1947 年增建完成(表 2)，烏山頭水庫自此概分為主庫區及西口河道庫區。烏山頭水庫因離槽式水庫特性使水庫甚少有剩餘水量供洩洪排砂，統計 1986 至 2020 年期間僅發生溢洪 19 次，因此新、舊送水工雖留有閘體可操作排砂，但設施利用機會甚低。

烏山頭水庫 1930 年完工時之水源運用方式係由舊烏山嶺隧道於曾文溪流取水至水庫儲蓄後，由舊送水工放水入嘉南大圳供給灌溉用水；1974 年曾文水庫完工後乃與曾文水庫串聯運用，由曾文電廠發電放水後，再經舊烏山嶺隧道取入庫區；近年完成之新送水工及新烏山嶺隧道僅為舊設施之功能替代及備援，並未改變原有之水源運用方式。依此運用方式水庫年供水量超過 7 億立方公尺之規模，水庫運用比(放出之總水量與水庫有效容量之比)高達 9.22。

烏山頭水庫於 1930 年完工時已於舊烏山嶺隧道東口及舊送水工設有水力發電設備，目前原有設備均已老舊未再使用，但水庫管理單位陸續於西口堰、新送水工及舊送水工另再開發西口電廠、烏山頭電廠及八田電廠，發電規模更勝以往。



資料來源：南化與烏山頭水庫坡地土砂生產調查分析成果報告，2011 年 11 月。

圖 1 烏山頭水庫集水區及重要設施位置圖

表 1 烏山頭水庫主要工程數據

項 目		概 要		
水庫	河系	主流：曾文溪 支流：官田溪		
	集水面積	77.61 km ² (包含東口堰至曾文水庫大壩)，水庫天然集水區為 58.24 km ²	滿水位面積	9.54 km ²
	正常蓄水位	EL.58.18 m	呆水位	EL.31.20 m
	總蓄水量	15,415 萬 m ³ (原設計)	有效蓄水量	7,876 萬 m ³ (108 年測)
主壩	型式	半水力淤填式土壩 (Semi-hydraulic fill dam)		
	壩頂標高	EL.66.66 m	壩頂長度	1,273 m
	壩高 (最高)	56 m	壩底寬 (最寬)	303 m
	壩頂寬度	9 m	築壩體積	5,400,000 m ³
溢洪道	型式	自然溢流式陡槽，弧型進口		
	進口寬	124 m	出口寬	18 m
	全長	636 m	側牆高	4.45 m
	溢流口標高	EL.58.18 m	設計容許流量	1,500 cms
舊送水工	送水塔	12 角型 RC 構造，塔高 14.85 m，內徑 8.48 m		
	送水隧道	馬蹄型 RC 構造，長 154.54 m，寬 7.58 m，高 7.88 m		
	放水管	送水管 2 條 (162.03 m 及 168.93 m) 鋼管內徑 2.74 m，鋼管壁厚 12.7 mm (原設計)		
	閘閥	蝶閥 2 座 (內徑 2.73 m)，遮斷閥 (含附屬旁通閥) 2 座及針閥 5 座。(最大放水量 62 cms)		
新送水工	直立式進水口	長 30 m，寬 25.4 m，高 27.5 m，上下兩層各 2 孔取水口，每孔寬 4 m，高 4.2 m。欄污柵 3 道，控制閘門 4 門、吊門機、架空吊車及操作系統設備等		
	明挖暗渠	內徑 4.1 m，長 158 m，RC 結構內襯 9 mm 厚鋼管		
	送水隧道	內徑 4.1 m，長 409.5 m，RC 結構內襯 9 mm 厚鋼管		
	壓力鋼管隧道	馬蹄型，高 5.7 m，寬 6.0 m，長 32 m。壓力鋼管直徑 4.1 m，長 32 m。三叉分歧管直徑由 4.1 漸變至 2.2 m，長 68 m (水平距)		
	送水站	長 24 m，寬 20 m，高 23.8 m 半地下式 RC 構造。水工機械含環閘閥與空注閥各 3 組。(設計流量 90 cms，常時流量 68 cms。)		
引水設施	舊烏山嶺隧道	民國 18 年完工，內徑 5.45 m 馬蹄型斷面，長 3,217 m，縱坡 1/1,200，設計流量 56 cms，設計流速 2.1 m/s，設計取水位 EL.84.96 m		
	新烏山嶺隧道	民國 109 年完工，內徑 5.4 m 馬蹄型斷面 (襯砌厚 50 cm)，長 3,431 m，縱坡 1/1,200，設計流量 56 cms，設計流速 2.9 m/s，設計取水位 EL.86.88 m，入口渠底 EL.82.30 m，出口渠底 EL.79.44 m		

資料來源：1.烏山頭水庫第五次安全評估-總報告，2019。

2.新烏山嶺引水隧道使用前安全複核-安全維護手冊，2020。

表 2 西口堰主要工程數據

項 目		概 要		
堰堤	型式	中央心層輓壓土壩		
	堤頂標高	84.78 m (原設計)	最大堰高	30 m
	最高設計洪水位	81.9 m	常水位	80.0 m
	堰堤長度	110 m	堰頂寬	6 m
	坡度	上游坡 1：3，下游坡 1：2.5。		
豎坑	型式	喇叭狀混凝土構造		
	設計流量	56 cms	入口直徑	20 m
	溢流頂頂部標高	80.5 m	豎坑深度	26.6 m
	豎管直徑	4.7 m		
豎坑隧道	型式	馬蹄型混凝土構造		
	寬度	4.55 m × 4.55 m	長度	164.53 m
	坡度 (水平段)	1：1000		
	隧道出口開渠	型式：梯型砌石護坡工，長 72 m，高 8.5 m。		
通氣管	型式	圓筒式混凝土構造		
	頂部直徑	外徑 0.9 m，內徑 0.5 m。		
	高度	2.1 m		

資料來源：烏山頭水庫第五次安全評估總報告，2019。



資料來源：烏山頭水庫灌溉用水放淤規劃，2016。

圖 2 嘉南大圳灌溉區域平面圖

水庫下游灌區由嘉南大圳供給灌溉，主要包含台南、嘉義等縣市，灌溉面積約 83,000 公頃；若加計鄰近河川、埤池取水之特別灌區，灌溉面積約 26,000 公頃，嘉南大圳總灌溉面積合計 109,000 公頃。嘉南大圳由南、北幹線及其支線構成龐大的灌溉網絡，南幹線經台南市官田區、善化區而迄於新化區，長約 10 km，起點最大輸水量 $Q = 40.8 \text{ cms}$ ，末端最小輸水量 $Q = 9.5 \text{ cms}$ ，經麻豆、善化、南幹支線等支線灌溉台南市南部區域；北幹線自台南市官田區往北迄於嘉義縣北港溪南岸，長約 47.7 km，起點最大輸水量 $Q = 66.7 \text{ cms}$ ，末端最小輸水量 $Q = 3.5 \text{ cms}$ ，經林鳳營、新營、八掌溪、朴子等支線灌溉台南市北部區域及嘉義縣轄內各鄉鎮（山區除外）。南、北幹線除支線外另有分線及中小給水路，支線和分線的長度合計約 717 公里，中小給水線路及排水渠合計約 13,712 公里。嘉南大圳灌溉區域如圖 2。

三、淤積評析及防淤管理策略研議

3.1 烏山頭水庫淤積情形

烏山頭水庫淤積來源主要可以分為兩大部分，一

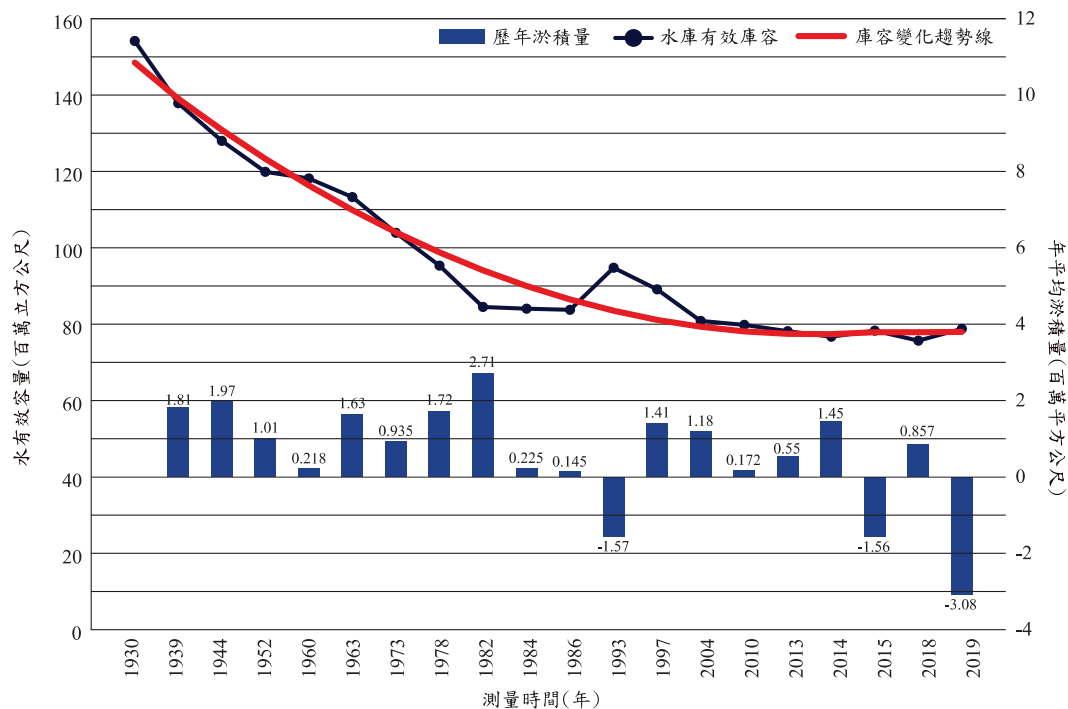
表 3 烏山頭水庫歷年容量及淤砂量關係表

年份	水庫有效容量 (百萬立方公尺)	年平均淤積量 (百萬立方公尺)	年份	水庫有效容量 (百萬立方公尺)	年平均淤積量 (百萬立方公尺)
1930	154.16	-	1986	83.76	0.15
1939	137.86	1.81	1993	94.76	-1.57
1944	128.01	1.97	1997	89.11	1.41
1952	119.90	1.01	2004	80.85	1.18
1960	118.16	0.22	2010	79.82	0.17
1963	113.28	1.63	2013	78.17	0.55
1973	103.93	0.94	2014	76.72	1.45
1978	95.33	1.72	2015	78.28	-1.56
1982	84.50	2.71	2018	75.68	0.86
1984	84.05	0.23	2019	78.76	-3.08

資料來源：108 年度烏山頭水庫淤積測量-完整成果報告，2019。

為烏山頭水庫集水區自身產出量，另一來源為從東口引水至西口堰上游河道內之淤積量。烏山頭水庫自 1930 至 2019 年共進行 20 次水庫蓄水量測量，期間亦辦理過多次清淤作業，歷次測量成果水庫容量及年平均淤砂量關係如表 3 及圖 3。

烏山頭水庫自 1930 至 1982 年水庫累積年平均淤積量約為 134.0 萬立方公尺，淤積情形嚴重；曾文水庫完工及集水區加強治理後，淤積情況有明顯趨緩，



資料來源：108 年度烏山頭水庫淤積測量-完整成果報告，2019。

圖 3 烏山頭水庫歷年容量及淤砂量關係圖

2004 至 2010 年間水庫年平均淤積量約為 17 萬立方公尺；若將統計年限延長至 2019 年，則受益於本研究完成規劃後的加強水力放淤，目前 2010 至 2019 年的年平均水庫淤積量已經下降為 10.6 萬立方公尺。

3.2 烏山頭水庫防淤管理策略探討

全世界的水庫或多或少都面臨淤積的問題，水庫的永續利用須要藉由泥砂經營管理來達成。若要有效的處理水庫淤積問題，泥砂管理的範圍就要從上游集水區、庫區、水庫下游以及河道到出海口全面的探討；在上游集水區的問題核心在於減少泥砂生產及入庫，庫區的問題核心在於如何利用防淤設施排除或減少泥砂於水庫內淤積，而水庫下游的問題核心在於操作排砂後對於河川到海口的泥砂平衡是否造成影響以及機械清淤過程對下游社區或環境的衝擊。

泥砂管理可行策略參考 Annandale *et al.* (2016) 所著《Extending the Life of Reservoirs》一書，可將水庫泥砂管理策略分為以下主要四方面：(一) 集水區保育乃針對上游集水區進行保育治理以減少入庫砂量；(二) 泥砂減淤藉由出入庫泥砂量的估算以及水砂運移特性，規劃應變的防淤策略如繞庫排砂隧道、繞庫排砂渠道、洩洪排砂、滯洪排砂及異重流排砂等；(三) 回復庫容包含以機械清淤或水力沖砂方式以回復庫

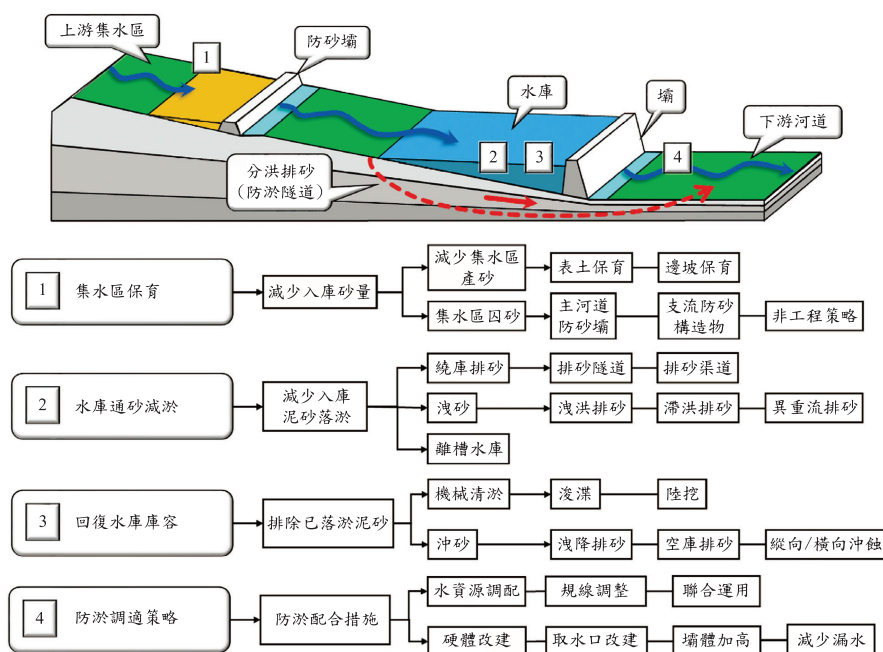
容；(四) 調適策略包含水資源調配、及硬體改建等配合措施，以提升水力排砂或機械清淤的效率，朝水庫庫容能達到永續經營之目標邁進，相關經營管理對策彙整如圖 4。而在這四大管理策略的選擇上可以透過以下幾個評估指標來衡量 (經濟部水利署，2011；水利規劃試驗所，2014)：

3.2.1 CIR 指標分析

庫容逕流比 (Reservoir capacity runoff ratio, CIR) = 總庫容與年均逕流量之比值，當庫容逕流比大於 0.4 時，因水源量少，水力排砂潛能低，僅能朝機械清淤或集水區保育訂定後續防淤策略；而庫容逕流比小於 0.04 時，水源量豐沛，水力排砂潛能高，故朝沖砂訂定後續防淤策略。庫容逕流比介於 0.04 至 0.4 時，因水源量少，較不適合進行沖砂，建議以繞庫排砂及洩砂等可控制逕流量之水力排砂方式進行。烏山頭水庫現況總庫容 7,876 萬立方公尺，集水區年均逕流量僅 9,931 萬立方公尺，庫容逕流比約為 0.8，遠大於評估指標 0.4，水力排砂潛能低。

3.2.2 CSR 指標分析

依據 CIR 指標分析，當庫容逕流比大於 0.4 時，可再利用 CSR 指標作進一步分析。庫容來砂比 (Reservoir capacity: Sediment ratio, CSR) = 總庫容與年



資料來源：水庫防淤管理與技術應用，2020。

圖 4 水庫整體防淤排砂策略

均來砂量之比值，當 CSR 超過 100，代表此水庫可容納超過土木結構物壽命的淤積年限，故水庫排砂較無急迫性；若 CSR 小於 100 的水庫，代表此水庫的排砂可能有急迫性存在，因此會以機械清淤為主要方式，但若水庫擁水力排砂設施，亦可充分利用現有的排砂設施進行洩砂或是繞庫排砂。烏山頭水庫現況 (2019 年) 總庫容 7,876 萬立方公尺，集水區年均來砂量僅 17 萬立方公尺 (2004 至 2010 年間)，庫容來砂比約為 463，遠大於評估指標 100，亦即以國際標準而言，烏山頭水庫似無辦理清淤之急迫性；但就南台灣供水潛勢之緊繃及開發新水庫之困難而言，我們似無寬裕之環境條件坐視水庫持續淤積而無作為，顯見台灣水資源環境之嚴苛。

3.3.3 WRUR 指標分析

當容量逕流比介於 0.04 至 0.4 時，可再利用 WRUR 指標作進一步分析。水源利用率 (Water Resource Utilization Rate, WRUR) 為水庫年供水量體積及年均逕流量體積的比值。水源利用率高則需節約水資源，防淤策略將以機械清淤為主。WRUR 若以 0.4 和 0.7 為分界點，0.4 以下代表水庫供水量少，可進行沖砂操作，0.4 至 0.7 間水源利用稍微緊繃，可主要利用洩砂與繞庫排砂的方式排砂，大於 0.7 則表示水源利用緊繃，沒有多餘水源作水力排砂，故只能作機械清淤。烏山頭水庫集水區年均逕流量僅 9,931 萬立方公尺，年供水量卻達 7 億立方公尺 (主要來自於

表 4 防淤策略評估指標表

指標	關係式	分界點
庫容逕流比(CIR)	$\frac{\text{總庫容}}{\text{年均逕流量}}$	0.04, 0.4
庫容來砂比(CSR)	$\frac{\text{總庫容}}{\text{年均來砂量}}$	100
水源利用率(WRUR)	$\frac{\text{水庫年供水量體積}}{\text{年均逕流量體積}}$	0.4, 0.7

資料來源：水庫防淤管理與技術應用，2020。

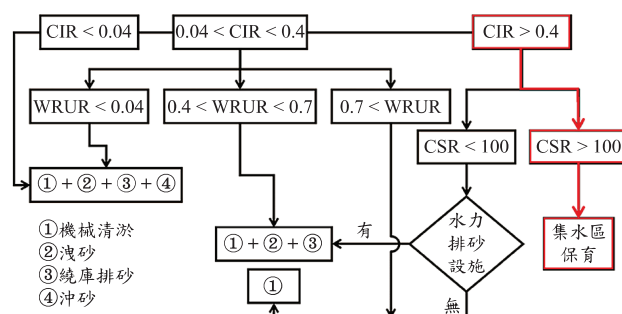
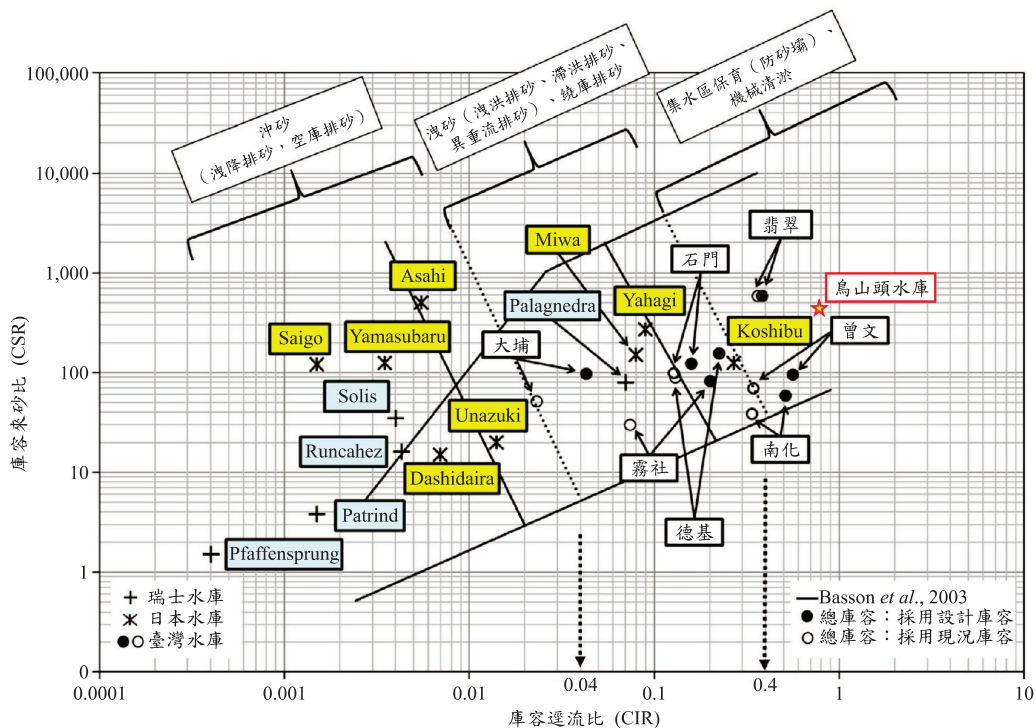


圖 5 水庫防淤排砂策略分析流程圖

曾文水庫串聯運用引水量)，WRUR 指標值 7.05 遠大於評估指標 0.7；當年均逕流量納入曾文水庫引水量，WRUR 指標值為 0.876。年均逕流量不論是僅考量烏山頭水庫或曾文水庫與烏山頭水庫串聯運用，WRUR 之指標值皆大於評估指標 0.7，可見烏山頭水庫水源利用情勢之緊繃。

由前述評估指標與分析流程 (表 4 及圖 5) 可知烏



資料來源：水庫防淤管理與技術應用，2020。

圖 6 水庫防淤排砂策略分析比較

山頭水庫年均逕流量與年均來砂量小，但供水量大且水源利用非常緊繃；將以上評估指標繪入國際上各水庫防淤排砂策略分析比較圖中（圖 6），即可清楚比較出烏山頭水庫防淤策略宜由「集水區保育」及「機械清淤」著手。

首先就烏山頭水庫的集水區保育成效略作說明，由歷次測量成果水庫容量及年平均淤砂量關係（圖 3）可知，烏山頭水庫自 1930 年代年均淤積量超過 180 萬立方公尺逐步下降至 2000 年之後年均淤積量已小於 17 萬立方公尺，所憑藉的即是近百年來努力不懈的集水區保育。水庫管理單位從日治時期即於管理處設有造林股以及集水區內設有工作站，如西口、重橋、大崎工作站，所職司工作即為集水區內造林、集水區保育、泥砂攔截等工作；烏山頭水庫囿於泥岩地質條件惡劣，從日治時期即設專責單位造林及保育，可謂在集水區保育上投注百年心力並卓然有成。

然單純依賴集水區治理並不能讓水庫泥砂獲得平衡，剩餘的年均淤積量 17 萬立方公尺必須依靠機械清淤的方式加以處理。水庫常見機械清淤方式包括：水力浚渫及陸挖等方式；本研究針對烏山頭水庫地理環境分別就西口河道、主庫區及水庫下游灌溉系統可能的機械清淤方式加以評析（表 5）。具體而言，烏山頭水庫機械清淤遭遇的主要困難為：(1)無長期、穩定的土方最終收容處所供水庫淤泥作永久堆置；(2)

官田溪河道狹小且天然逕流少，無法作為水力放淤的通道。因此，綜合檢討後建議烏山頭水庫可以辦理機械清淤作業的方式應該朝以下兩個方向努力：

1. 從西口河道抽泥回放曾文溪河道放淤：

利用新烏山嶺隧道完工後，舊烏山嶺隧道轉換為備援功能之角色，於舊隧道內架設（或埋設）輸泥管，從西口抽泥回放至曾文溪河道，配合曾文水庫排砂操作一併放淤。

事實上，自曾文水庫原水挾帶而來的渾水顆粒，因西口堰蓄水之緣故多落淤於西口河道，而且受近年曾文水庫加強水力排砂之故，此類淤積有加重的現象，西口河道近 10 年內已淤積達 30 萬立方公尺。

西口抽泥回放至曾文溪河道之作業經與經濟部水利署南區水資源局協調後已有初步共識，處理目標以原水挾帶入庫顆粒回歸曾文溪為原則，初期以恢復西口河道庫容 30 萬立方公尺為目標，管理機關已於 2020 年度進行工程規劃設計，短期將以每年抽取 10 萬立方公尺淤泥回放曾文溪河道放淤，長期就水庫清淤成效再做滾動式檢討。

2. 從主庫區越壩抽泥放淤至下游灌溉系統：

以抽泥船設置專管越壩排放至現有烏山頭電廠尾水道下游嘉南大圳圳路，再藉由南、北幹線放淤至下游河道或灌區農田。

主庫區所淤積為水庫集水區自身產出的泥砂，經

表 5 烏山頭水庫可能機械清淤方式評估表

	地點	可能清淤方法	初步對策	評估	是否採行
一	西口河道	1.抽泥至鄰近河谷暫置後再外運	西口河道發電所坑等合適坑谷，以陸挖或抽泥方式清淤堆置，瀝乾後外運至公共工程交換媒合地點處置	1.合適坑谷庫容過小且淤泥瀝乾時間長，未能有效執行 2.公共工程媒合數量不穩定，難長期執行	
		2.抽泥回送至曾文溪放淤	從舊烏山嶺隧道架設輸泥管，從西口抽泥放淤至曾文溪	藉由曾文水庫執行中河道放淤計畫處裡	是
		3.抽泥至烏山頭水庫	從西口豎井抽泥放淤至烏山頭水庫	僅降低西口電廠運轉風險，未解決淤積問題	
		4.利用現有土方暫置場瀝乾後外運	1.利用新烏山嶺引水隧道之施工道路及土方暫置區作清淤道路及暫置場 2.瀝乾後外運至公共工程土方交換媒合地點永久處置	1.土方暫置場庫容過小且淤泥瀝乾時間長，未能有效執行 2.公共工程媒合數量不穩定，難長期執行	
二	主庫區	1.抽泥至鄰近河谷暫置後再外運	1.上游馬斗欄及南勢坑子集水區（水庫上游近九芎橋之區域）以陸挖或抽泥方式清淤堆置，瀝乾後外運至公共工程交換媒合地點處置 2.必須規劃專案運輸道路	1.合適坑谷庫容過小且淤泥瀝乾時間長，未能有效執行 2.公共工程媒合數量不穩定，難長期執行 3.缺乏運輸道路	
		2.下游官田溪舊河道瀝乾後外運	1.利用浚渫船，配合專管，將新舊送水工附近淤泥抽至下游沉澱池。沉澱水排入官田溪 2.初步規劃於官田溪舊河道（舊送水工排泥管出口）設置四座大型沉澱池，淤泥瀝乾後外運	1.抽泥至沉澱池係參考石門水庫下游段浚渫案例 2.公共工程媒合數量不穩定，難長期執行	
		3.設置排泥專管放淤至官田溪放淤	1.藉由專管排砂方式從舊送水工引管排淤至官田溪暫置 2.溢洪道洩洪時，沖砂入曾文溪主流河道入海	1.參考曾文水庫河道放淤構想 2.烏山頭水庫洩洪次數及溢流量不足以執行水力排砂	
三	水庫下游灌溉系統	1.放淤至南北幹線沿程的河道	1.可在圳路設制水門，上游設分水門排至河道 2.初步檢討南幹線官田溪、曾文溪，北幹線龜重溪、急水溪皆可列入放淤	1.需檢討現有圳路輸砂能力足以輸泥進入灌區而非中途落淤 2.南北幹線現有自來水取水設施需協調配合放淤時期調配用水或加強水質處理	是
		2.放淤至下游灌區農田	1.利用嘉南大圳年灌溉量 7 億立方公尺水量挾帶些微濃度之渾水進入灌區農田 2.水庫淤泥對提升農田地力實有助益		

長年的集水區治理，水庫集水區產出泥砂淤積已逐年趨緩，截至本研究當時統計至 2010 年資料後發現，當時主庫區年均淤積量已下降至每年 17 萬立方公尺。

雖然水庫所在的官田溪河道狹小且天然逕流少，因此無法利用天然河道作水力放淤，但是烏山頭水庫卻擁有全國獨有的水利特性優勢，即是農業灌溉水量遠超全國甚至世界水準。曾文與烏山頭水庫每年 11.6 億立方公尺與 9,931 萬立方公尺天然逕流量透過兩水庫蓄存後完全由嘉南大圳配送出去，嘉南大圳每年供水超過 7 億立方公尺僅 23% 為民生及工業用水，絕多數為農業灌溉使用。而農業用水的特性則是對原水濁度的容忍性高，甚至原水內的懸浮固體物若為天然、有機的黏土顆粒則在根本上是受到農地的田主所喜愛的，因此具有大量灌溉用水可透過圳路放淤就成為烏山頭水庫獨有的清淤條件。

綜合以上評析，瞭解烏山頭水庫的水利特性為天然逕流量少但水源利用率極高，從特性上水庫防淤的管理策略要從「集水區保育」與「機械清淤」著手，而烏山頭水庫的集水區保育工作從日治時期即長期持

續不懈的進行，目前需加強的是以機械清淤達到水庫庫容平衡。以機械清淤方式從西口河道回送曾文溪放淤已有曾文水庫放淤計畫推動執行，而從主庫區抽泥放淤到下游灌溉系統，則需本研究針對可能影響進一步加以探討。

四、利用灌溉用水抽泥放淤至嘉南大圳下游灌溉系統研究與檢討

預計以機械清淤方式將烏山頭水庫主庫區淤泥抽泥放淤至嘉南大圳灌溉系統必須對以下三個層面分別探討：

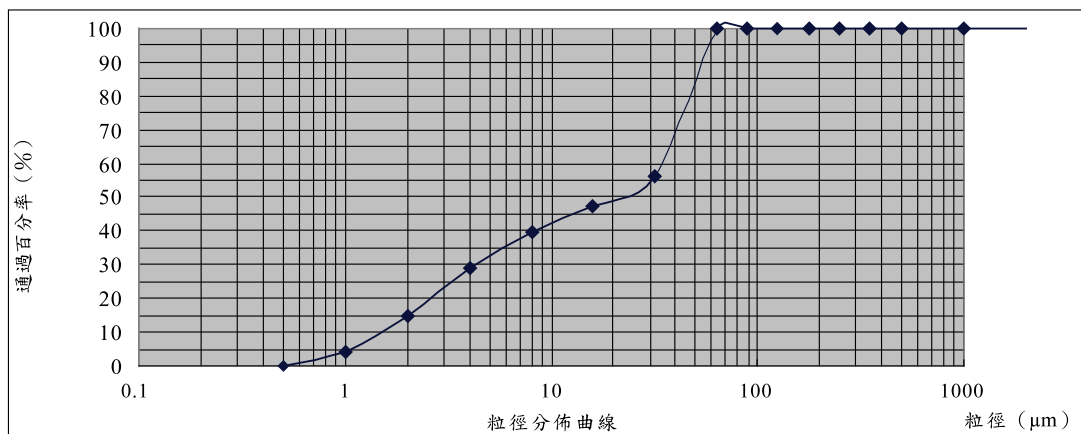
4.1 配合灌溉計畫及灌溉用水執行放淤的時機：

以灌溉圳路輸送淤泥的首要因子為圳路內水量的充足與否，根據嘉南大圳的灌溉計畫，以 2014 水文年度為例 (表 6)，水庫下游灌溉呈現雙峰的現象，主

表 6 曾文、烏山頭水庫系統灌區 103 水文年度灌溉計畫用水統計表

類別	灌溉區域	灌溉面積	灌溉日期	灌溉水量
夏秋季中間作及二期作水稻灌溉	三年二作田輪值區、單期作田、雙期作田、併用區單、雙期作田等	41,464 公頃	6 月 6 日至 10 月 30 日	50,507 萬噸
秋季甘蔗灌溉	三年二作田輪值小區及連植甘蔗輪值區	16,390 公頃	10 月 11 日至 10 月 25 日	1,138 萬噸
冬季甘蔗雜作灌溉	三年二作田、蔗作田、單期作田及部分雙期作田輪值之該當小區	32,691 公頃	11 月 11 日至 11 月 25 日	5,879 萬噸
第一期作水稻灌溉	輪灌區雙期作田及併用區雙期作田	16,567 公頃	1 月 21 日至 5 月 20 日	23,567 萬噸
春季第一次甘蔗雜作灌溉	三年二作田、蔗作田輪值小區及單期作田	43,109 公頃	2 月 11 日至 3 月 2 日	7,094 萬噸
春季第二次甘蔗雜作灌溉	同上	45,452 公頃	3 月 27 日至 4 月 15 日	7,152 萬噸
春季第三次甘蔗灌溉	三年二作田、蔗作田輪值小區	16,327 公頃	5 月 6 日至 5 月 20 日	3,284 萬噸

資料來源：烏山頭水庫灌溉用水放淤規劃，2016。



資料來源：烏山頭水庫灌溉用水放淤規劃，2016。

圖 7 烏山頭庫底淤泥土壤顆粒分析曲線

要在每年 1/21 ~ 5/20 的一期稻作與 6/6 ~ 10/30 的二期稻作會大量供水灌溉，在兩次稻作供水尖峰外另有秋冬季與春季的蔗雜作灌溉，本研究優先選定兩次稻作灌溉用水高峰作為操作抽泥放淤的時機，根據灌溉計畫統計一期稻作與二期稻作的尖峰灌溉水量分別達到 27.9 cms 及 36.2 cms。

4.2 灌溉圳路沿程落淤潛勢探討：

泥砂於灌溉圳路內運移若遇流速平緩區段而落淤於渠道內除了對灌區管理人員造成負擔外，若淤積嚴重造成溢流則衍生額外的災損，因此以灌溉圳路執行水庫淤泥放淤必須檢討防止泥砂沉澱的最小流速，並且標示可能落淤的高潛勢區段供管理人員參考。

渠道內泥砂不淤流速依照灌溉排水工程設計 (1978) 說明，泥砂在 0.45 ~ 0.9 m/s 的流速即可防止沉澱，但 Sir Williams willcocks 則建議在 0.7 ~ 1.0 m/s 流速以上可防止細微泥砂的沉澱，而 R.G. Kennedy 有簡易的判別式供判斷是否落淤：

$$\text{不沖不淤流速 } V_s = C \cdot D^{0.64} \dots\dots\dots(1)$$

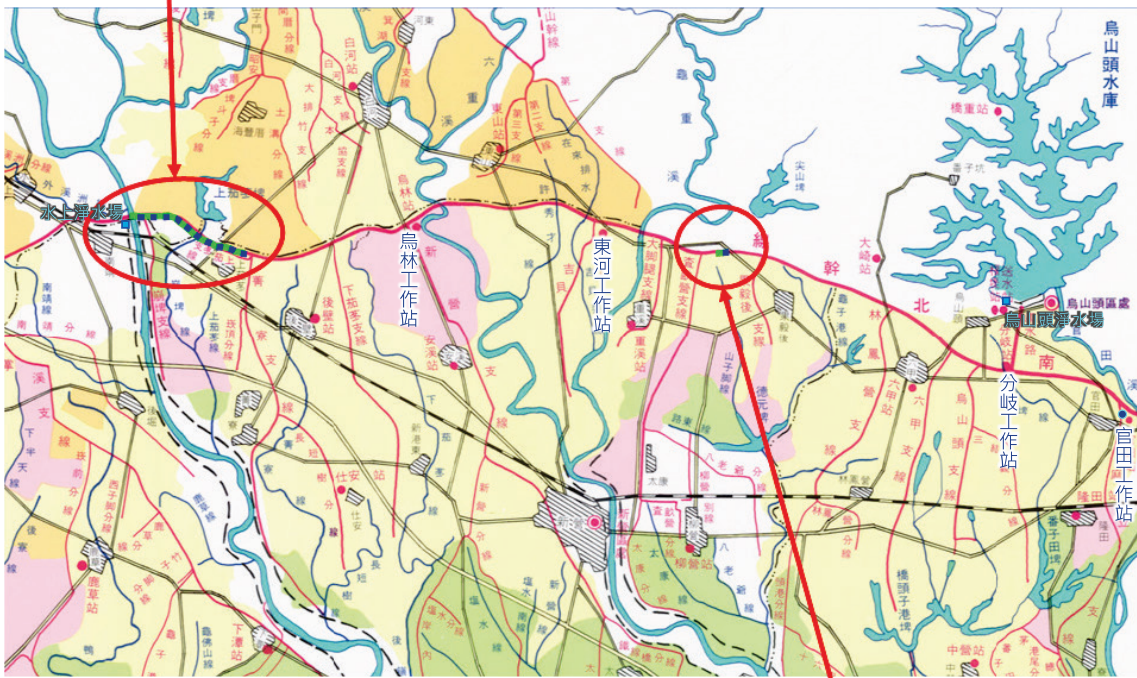
式中：D = 水深；C = 土質係數

極細輕砂質淤泥 C = 0.54；稍細輕砂質淤泥 C = 0.59

砂壤土 C = 0.65；較粗淤泥 C = 0.70

烏山頭水庫位於六雙層及二重溪層泥岩地質區，母岩組成為顆粒位極細的黏土礦物，因此淤泥組成極細，參考管理單位 2012 年水庫底泥採樣結果 (圖 7)，底泥粒徑分布 100% 通過 200 號篩 (0.075 mm)，粒徑

推測有落淤潛勢之河段22K+051.8~24K+490.5



推測有落淤潛勢之河段7K+176.9~7K+268.5

資料來源：烏山頭水庫灌溉用水放淤規劃，2016。

圖 8 推測可能落淤潛勢位置圖

分布中值約為 0.030 mm。因此，依據 R.G. Kennedy 判別式 (式 1) 應採土質係數 $C = 0.54$ 。

而嘉南大圳水利斷面分析結果，北幹線以尖峰灌溉水量 36.2 cms 計算，流速在 1.0 ~ 2.0 m/s 之間，水深在 2.5 ~ 3.0 m 左右，依 R.G. Kennedy 判別式建議流速在 1.0 m/s 以上即不發生落淤，但北幹線在里程 7K+169 ~ 268 龜重溪上游區段以及里程 22K+051 ~ 24K+490 跨越八掌溪區段因斷面縮小水位壅高，導致流速減緩有落淤潛勢 (圖 8)；南幹線以尖峰灌溉水量 27.9 cms 計算，流速在 1.0 ~ 2.0 m/s 之間，水深在 1.0 ~ 2.0 m 左右，依 R.G. Kennedy 判別式建議流速在 1.0 m/s 以上則不發生落淤，南幹線全線無落淤的高潛勢區段。另本研究再以 2010 至 2013 年二期作引水量分析離水庫最近的南幹線麻豆支線及北幹線林鳳營、新營支線水利斷面，三條支線的沿程落淤潛勢均低。

4.3 抽泥放淤對水庫及圳路既有設施可能的影響：

烏山頭水庫及嘉南大圳現有設施包含新舊放水工、烏山頭及八田電廠、圳路沿線淨水場、下游河道放水路及灌區支線等等均可能受不同方案的抽泥放淤

所影響，本研究評析後建議採用專管越壩放淤至烏山頭電廠尾水道方式對現有設施影響最小 (表 7)，各設施影響評估說明如下：

1. 供水設施：

烏山頭水庫供水系統內共有 5 處淨水場，這 5 處淨水場均無前處理設施，對於高濁度原水適應力低，原水濁度高於 1,000 NTU (1,002 ppm) 時即須減量供水。其中烏山頭淨水場於庫區內取水不受放淤影響；北幹線上的水上及新港淨水場取水位置距離水庫下游分歧工作站 30 公里以外，故受灌溉放淤輕微；南幹線上的曾文及潭頂淨水場則距離分歧工作站在 12 公里以內，將嚴重受到灌溉放淤影響。因此在放淤操作時，北幹線的水上及新港淨水場僅需於放淤期間保持聯繫，必要時通知上游端的烏林工作站將濁水引入新營支線即可因應；但南幹線的曾文及潭頂淨水場可能受放淤影響劇烈，因此擾動放淤時，應注意人為提升後之原水濁度控制在 1,000 NTU (1,002 ppm) 以下，以避免造成淨水設施降載。

2. 水庫放水設施：

烏山頭水庫放水設施除新舊送水工外，另再利用新舊送水工開發有烏山頭電廠與八田電廠；就水源操作模式上，流量 8 ~ 40 cms 由新送水工經烏山頭電廠發電放水，小於 8 cms 流量由舊送水工經八田電廠發

表 7 烏山頭水庫灌溉放淤可能影響設施評估表

	類別	影響對象		說明	影響程度	
					高	低
一	供水設施	庫區淨水場		烏山頭給水廠：輸水管線經過烏山頭大壩右壩座附近，放淤方案對其水質並無影響。		●
		幹線淨水場	北幹線	1.水上淨水場：距嘉南大圳分歧站約 30 公里，因流速緩，淤泥於上游輸水過程中發生沉降，取水處濁度已降低。 2.新港淨水場：距嘉南大圳分歧站約 70 公里，且位於北幹線末端，取水濁度影響更輕微。		●
			南幹線	1.曾文淨水場：位於台南市官田區嘉南大圳南幹線曾文溪渡槽旁，取水濁度影響最直接。 2.潭頂淨水場：取水距嘉南大圳分歧站約 12 公里，需配合麻豆支線分流，否則影響取水。	●	
二	水庫放水設施	新送水工		若採專管放淤至烏山頭電廠尾水道下游，則放淤方案對新送水工無影響。		●
		舊送水工		若採專管放淤至烏山頭電廠尾水道下游，則放淤方案對舊送水工無影響。		●
		烏山頭電廠		若採專管放淤至烏山頭電廠尾水道下游，則放淤方案對烏山頭電廠無影響。		●
		八田電廠		若採專管放淤至烏山頭電廠尾水道下游，則放淤方案對八田電廠無影響。		●
三	下游河道放水工	北幹線	龜重溪	目前已有放水路可執行放淤，且龜重溪設計洪水量 1,100cms，放淤不至造成影響。		●
			急水溪	目前已有放水路可執行放淤，且急水溪設計洪水量 1,940cms，放淤不至造成影響。		●
		南幹線	官田溪	南幹線與官田溪河道高差大，且官田溪通水斷面較小，若新設排淤口，對河道影響較大。	●	
			曾文溪	放淤曾文溪河段設計洪水量 12,450cms，故圳路放淤對該河道幾無影響。		●
四	下游灌區	北幹線灌區		1.斷面 0K+044 ~ 0K+246.8、3K+749 ~ 3K+892、7K+176.9 ~ 7K+268.5、16K+223.7 ~ 25K + 368.5 有發生淤積可能之潛勢。 2.圳路清淤較易，且支線、分線淤積量相對較小，加上現有兩處放流口，放淤不影響灌區。		●
		南幹線灌區		1.南幹線全線發生落淤之潛勢較低，其中以斷面 8K+526.4 ~ 10K+0.38 流速較低。 2.圳路清淤容易，放淤不影響灌區。		●

電放水，亦即兩放水設施均會長時間發電放水，為恐放淤泥砂磨耗水輪機葉片及零組件，本研究建議設置越壩專管放淤於烏山頭電廠尾水道下游，對現況放水設施影響最小。

3. 下游河道放水工：

嘉南大圳南北幹線橫跨北港溪到鹽水溪之間的大小河川，其中距離合宜且較大的河川有北幹線的龜重溪、急水溪，南幹線的官田溪、曾文溪；經評估除官田溪通水斷面過小外，其餘三條河川均適宜於颱風期間以放水工實施河道放淤。

4. 下游灌區：

依據灌溉圳路沿程落淤潛勢分析結果，北幹線在跨越龜重溪及八掌溪局部有流速趨緩可能落淤的高潛勢，南幹線則全線落淤潛勢偏低，同時靠近水庫的麻

豆支線、林鳳營支線、新營支線的落淤潛勢亦偏低。由於烏山頭水庫規劃放淤量僅每年 17 萬立方公尺，因此未來執行放淤可選擇龜重溪以北較接近水庫的灌區優先執行。

針對以上檢討烏山頭水庫主庫區利用灌溉用水以專管抽泥越壩放淤於嘉南大圳之操作構想研議如下：

1. 平時機械抽泥輔助放淤原則：

本階段抽泥放淤時機以二期作供灌期間為原則，初步計算若以二期作供灌期內(約 110 天，每天工作 8 小時)以 0.3 cms 濃度 20 萬 ppm 的淤泥混入 40 cms 發電灌溉放流量內，濃度稀釋 133 倍，濃度下降至 1,500 ppm，預估每年最大可放淤泥量達 17 萬立方公尺，此稀釋後濃度為放淤操作之預估值，初步評估對圳路沿程落淤影響相對小，但對下游各淨水場之取水會產生

實質的影響。因此，烏山頭水庫後續執行測試放淤工作（詳下節）來瞭解實際機械抽泥輔助放淤對於下游淨水廠之影響並作為放淤操作滾動式檢討之參考。

2. 防汛期間渾水放淤原則：

颱風期間以烏山頭水庫發生豪大雨致使壩前原水濁度達到 1,500 NTU (1,508 ppm) 為標準執行渾水放淤。放淤作業初期以原水濁度 2 萬 NTU (20,578 ppm)、溢洪道未洩洪為基準，先由烏山頭電廠以發電機組最大流量 40 cms 操作放淤；若原水濁度超過 2 萬 NTU (20,578 ppm) 或溢洪道發生洩洪，則改採新送水工放水路進行放淤，最大流量可達 89.8 cms。放淤水路於北幹線以龜重溪為主，南幹線以曾文溪為主。

五、測試放淤及實際操作成效

5.1 測試放淤作業情形

為瞭解烏山頭水庫透過嘉南大圳放淤對下游之影響，管理單位於 2014 至 2015 年度實際辦理測試放淤。測試放淤的時機與地點說明如下：

1. 平時機械抽泥輔助放淤分別於 2014 年 4/24 ~ 4/30 一期作供灌、7/11 ~ 7/14 二期作供灌及 2015 年 11/6 ~ 11/5 雜作供灌期間執行圳路測試放淤作業，測試結果如下：

- (1) 若不藉由擾動設備而僅藉由閘門操作，放淤濃度及影響範圍有限，實測原水濁度仍在背景值僅約 100 NTU (98 ppm) 左右，壩前設置抽泥擾動設備確有需要。
- (2) 透過灌溉放淤於嘉南大圳南北幹線（北幹線新營支線以南），由於放淤操作係採抽泥管將泥水混入發電尾水道，因此操作單位可現場控制泥水量以使混合後原水濁度小於 1,000 NTU (1,002 ppm)，故測試期間未發現嚴重落淤情形，且對自來水公司潭頂淨水場取水影響性低，數次放淤作業中並無發生用水單位反應濁度過高等問題，灌溉放淤應可擴大為年度定常性辦理。

2. 防汛期間渾水放淤地點：渾水放淤係利用 2014 年 9/22 鳳凰颱風豪雨造成水庫濁度提高進行放淤，放淤地點為北幹線龜重溪河道，測試結果如下：

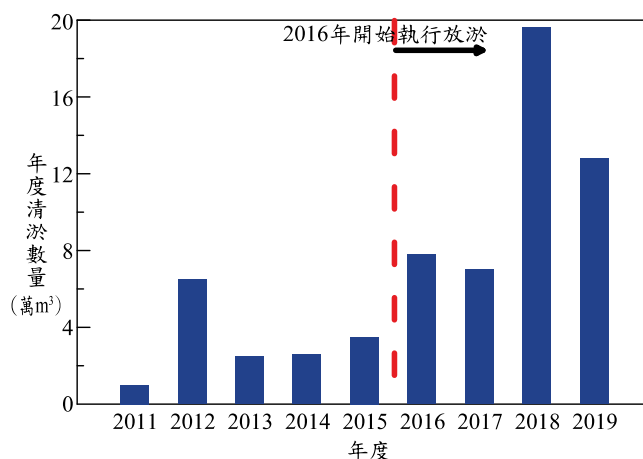
- (1) 鳳凰颱風放淤之泥砂濃度明顯高於 7 月中旬之二期作放淤，舊送水工之實測濁度可達 2,000 NTU (2,016 ppm) 以上，但圳路內之濃度監測顯示並未有明顯之泥沙運移，可能是該次颱風之降雨量小，其代表性略顯不足，但以龜重溪等

河道放水工操作放淤確屬技術可行。

- (2) 颱風期間以舊送水工放淤經測試可行，但考量日後高含砂水流放淤時可能影響老舊管路之厚度，未來水庫安全檢查時需一併檢測送水鋼管之厚度變化。

5.2 近年實際執行放淤成效

本研究於 2014 至 2015 年執行規劃與測試作業後，管理單位自 2016 年起即開始試行主庫區的壩前抽泥放淤及渾水放淤作業，由 2011 至 2019 年的清淤統計資料顯示（圖 9），烏山頭水庫在 2016 年以前由於水庫浚漂無去處堆放，年清淤量甚少超過 6 萬立方公尺，自本研究研議以灌溉放淤後，烏山頭水庫年清淤量提升至新的級距，尤其以 2018 年的低水位操作放淤為效果最佳，年放淤量達到 19.6 萬立方公尺，當年度除庫容平衡外尚可擴大庫容。在執行水力放淤同時，水庫管理單位亦於水庫下游南北幹線重要測站：烏林、茄拔及分岐工作站執行濁度監測（圖 10），根據監測資料顯示，水力放淤期間確實於南、北幹線內之原水有濁度提升的現象，根據現場執行圳路維護管養同仁回饋，的確在實施水力放淤後在水理條件不佳的部分幹線（圖 8）與支線末端或倒虹吸工設施內的淤積現象有加劇情形，但是為維持水庫永續經營，以上加強圳路維持的負擔應視為必要之管理成本。

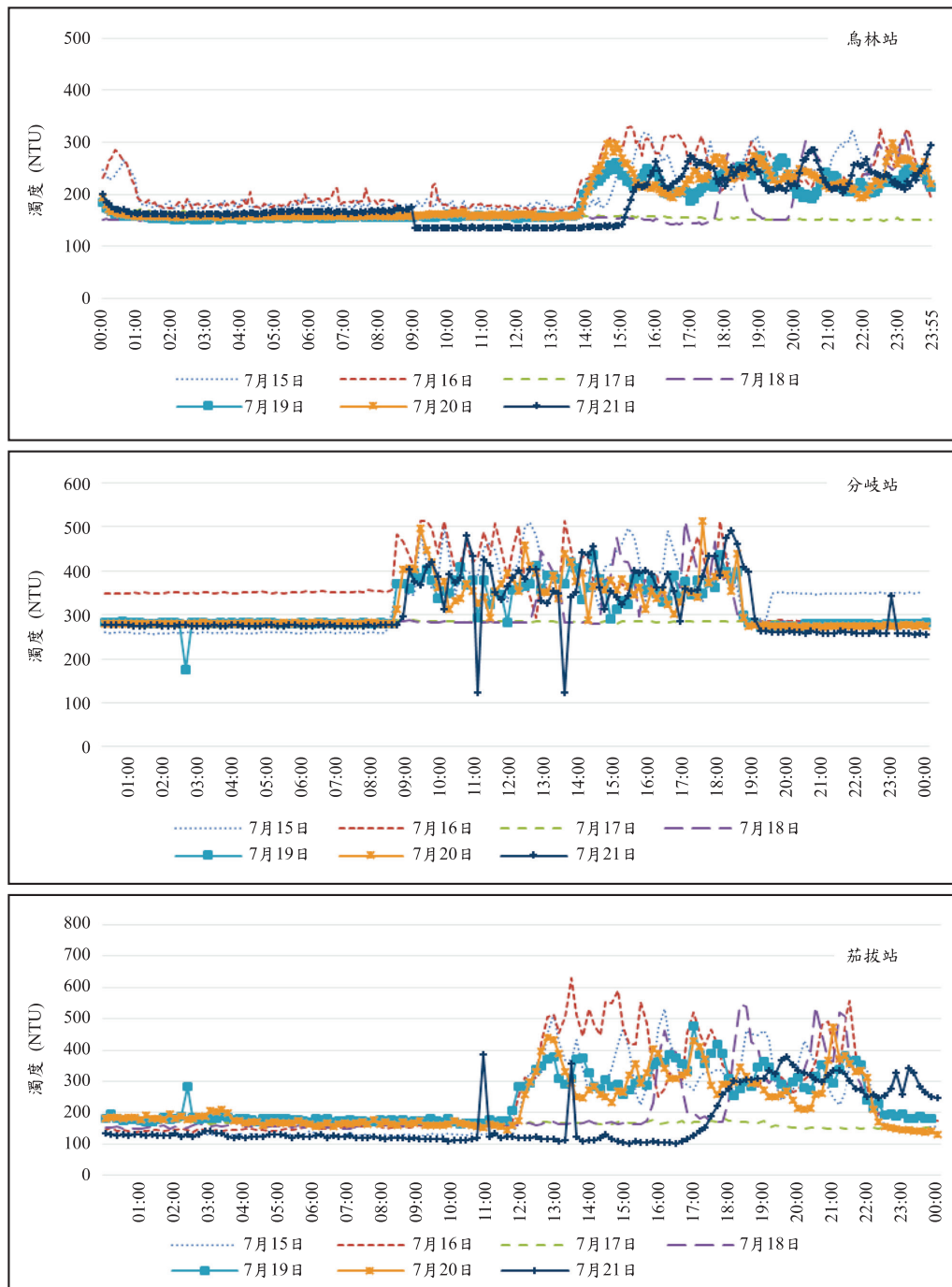


資料來源：嘉南管理處提供。

圖 9 烏山頭水庫近 10 年清淤數量統計圖

六、結論

1. 烏山頭水庫經過集水區保育後，年淤積量已逐年趨緩，根據 2004 至 2010 年測量結果推估，淤積速率



資料來源：106 年度烏山頭水庫放淤濃度監測採樣，2017。

圖 10 烏林、茄拔及分岐工作站放淤期間濁度監測圖 (2017 年)

約每年 17 萬立方公尺，以此淤積速率為目標，希望達到水庫庫容平衡。

2. 烏山頭水庫最佳化放淤對策檢討如下：(1) 西口堰上游河道：從舊烏山嶺隧道架設輸泥管，從西口抽泥放淤至東口堰配合曾文水庫排砂一併執行放淤。(2) 烏山頭主庫區：平時利用二期作供灌水量以抽泥船設置專管排放至現有烏山頭電廠尾水道下游，

再藉由南、北幹線放淤至灌區農田；防汛期間以電廠或送水工排放底層渾水藉南、北幹線放淤至龜重溪及曾文溪。

3. 綜合一、二期作放淤測試期間觀察南、北幹線濁度監測結果：(1) 若不藉由擾動設備而僅由藉由閘門操作，放淤濃度及影響範圍有限。(2) 透過擾動方式灌溉放淤於嘉南大圳南、北幹線 (北幹線新營支

線以南) 未發生嚴重落淤於渠道情形發生, 同時透過控制抽泥管泥水混入發電尾水比例使原水濁度小於淨水場可負荷之 1,000 NTU (1,002 ppm), 因此對自來水公司潭頂淨水場取水影響不如預期嚴重。

4. 完成規劃後實際執行水力放淤成效顯示, 過去由於水庫淤漂無去處堆放, 年清淤量甚少超過 6 萬立方公尺, 自本研究研議灌溉放淤後, 烏山頭水庫年清淤量有效提升, 尤其以 2018 年的低水位操作放淤為效果最佳, 年放淤量達到 19.6 萬立方公尺, 如遇無法低水位操作則採水力抽泥方式辦理。當年度除庫容平衡外尚可擴大庫容, 雖現場執行圳路維護管養同仁回饋, 在實施水力放淤後部分圳路或倒虹吸工的淤積現象有加劇情形, 但是為維持水庫永續經營, 以上加強圳路維持仍為可忍受之管理負擔。

致謝

感謝農委會農田水利署嘉南管理處各單位辛勤管理烏山頭水庫及灌溉圳路同仁, 計畫執行期間協助測試及量測作業, 計畫完成後仍持續推動烏山頭水庫水力放淤以維持水庫庫容, 本文之撰寫即因同仁日常踏實工作始有完整資料作為素材, 在此表達萬分敬意。

感謝經濟部水利署及南區水資源局, 對「烏山頭水庫灌溉用水放淤規劃」予以經費挹注及長期支持烏山頭水庫運轉及清淤作業。本文同時感謝黃金山顧問觀念上的指導與啟發。

參考文獻

1. Annandale, G.W., Morris, G.L., and Karki, P., Extending the life of reservoirs: sustainable sediment management for dams and run-of-river hydropower, World Bank Publications, Washington, D.C., 2016.
2. 水土保持局台南分局, 「南化與烏山頭水庫坡地土砂生產調查分析成果報告」, 行政院農業委員會, 台南市, 2011。
3. 水利規劃試驗所, 「永續(Sustainable)水庫規劃技術參考手冊—防淤篇」, 經濟部水利署, 2010。
4. 水利規劃試驗所, 「水庫泥砂監測技術暨防淤操作策略研究」, 經濟部水利署, 2014。
5. 中國農村復興聯合委員會特刊新二十八號, 「灌溉排水工程設計」, 上冊第四篇第一章, P198, 水利工程組, 1978。
6. 經濟部水利署, 「氣候變遷下水庫排砂對策研究」, 經濟部水利署, 2011。
7. 賴建信, 「水庫防淤管理與技術應用」, 118-123 頁, 經濟部水利署, 台中市, 2020。
8. 臺灣嘉南農田水利會, 「烏山頭水庫灌溉用水放淤規劃」, 行政院農業委員會, 台南市, 2016。
9. 臺灣嘉南農田水利會, 「106 年度烏山頭水庫放淤濃度監測採樣」, 行政院農業委員會, 台南市, 2017。
10. 臺灣嘉南農田水利會, 「烏山頭水庫第五次安全評估總報告」, 行政院農業委員會, 台南市, 2019。
11. 臺灣嘉南農田水利會, 「新烏山嶺引水隧道使用前安全複核-安全維護手冊」, 行政院農業委員會, 台南市, 2020。
12. 臺灣嘉南農田水利會, 「108 年度烏山頭水庫淤積測量-完整成果報告」, 行政院農業委員會, 台南市, 2019。

收稿日期：民國 109 年 11 月 12 日
修改日期：民國 110 年 06 月 16 日
接受日期：民國 110 年 11 月 29 日