



第二十四卷第二期 2022.12

ISSN 1606-2604

行政院新聞局局版

北市誌第2415號

發行人：賴建信

發行所：中華水資源管理學會

總編輯：陳清田

副總編輯：張煜權

出版委員會委員：王藝峰、林國華
毛振泰、李丁來
張良正、林鎮洋
陳榮松、陳憲宗
林昆賢、陳榮福
陳春宏、簡昭群

本期企劃：陳憲宗、簡昭群

李丁來、簡振源

會址：408204台中市南屯區

黎明路二段501號地下室

電話：(04) 22501383

22501642

傳真電話：(04) 22501608

電子信箱：cwrms.org@gmail.com

會刊下載網址：



目錄

特別企劃

- 南化水庫邁向永續治理 1
王超儀主任、林秉學股長、黃政欽技術士

專論

- 專題1 水庫永續經營管理-以仁義潭及蘭潭水庫為例 15
吳忠澤股長
- 專題2 創新複合式水庫清淤設施-石門水庫阿姆坪防淤隧道 26
郭耀程副局長、吳建德正工程司
陳侑鳴副工程司
- 專題3 因應氣候變遷曾文水庫清淤策略 40
詹成富正工程司兼課長

其它論文

- 論文1 曾文水庫水質特性與水庫管理探討 48
陳志洋、黃君喆
- 論文2 機動式緊急淨水設備 (Qwater) 應用於枯旱時期供水實務 61
塗展臺工程員

南化水庫邁向永續治理

台灣自來水公司第六區管理處/王超儀主任

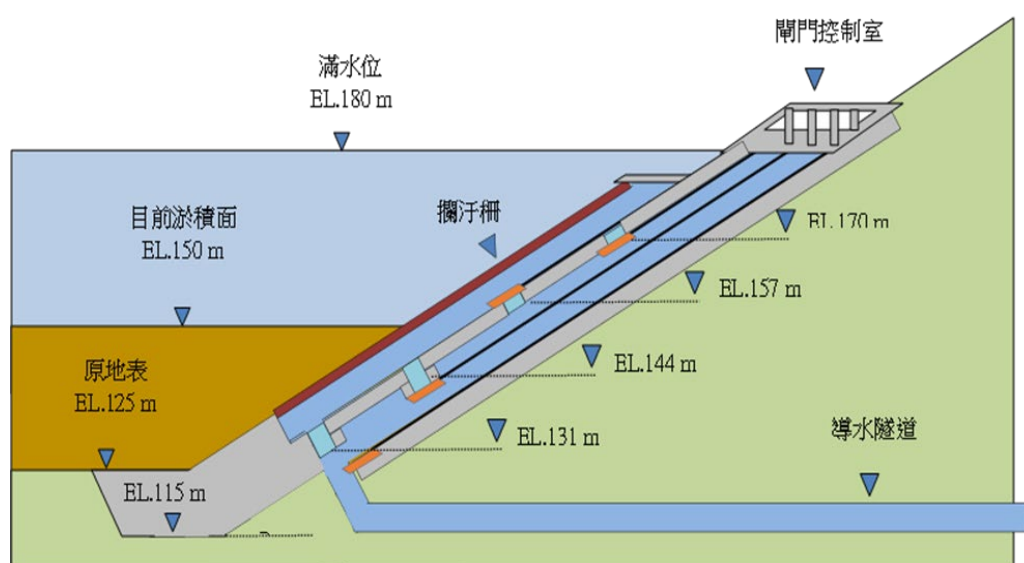
台灣自來水公司第六區管理處/林秉學股長

台灣自來水公司第六區管理處/黃政欽技術士

一、前言

南化水庫水源來自曾文溪支流後堀溪上游集水區及透過甲仙攔河堰越域引水旗山溪水源入庫蓄存，為供給民生用水單一功能的水庫。水庫集水面積 108.3 平方公里，水庫滿水位 EL. 180 公尺，原規劃總蓄水容量 1 億 5,805 萬立方公尺，目前有效蓄水容量 8,935 萬立方公尺（民國 110 年 11 月實測）。

南化水庫供應台南、高雄地區每日約 60~100 萬噸之民生用水（依豐枯水期變動），扮演台灣南部地區水資源供給非常重要之角色。但民國 97 年卡玫基及 98 年莫拉克等颱風帶來極端降雨後，水庫集水區崩塌面積暴增，伴隨著後續土壤沖蝕與崩塌土砂隨洪流入庫，衍生水庫淤積問題，目前淤積面高度已達 150 公尺（如圖一），庫容已減少約 41%，蓄水量嚴重縮減並危及取水及供水功能。因此如何全面且有效進行水庫防淤及清淤以達成增加庫容與穩定供水的目標是迫在眉睫的工作。



圖一 南化水庫取水口淤積示意圖

二、 阻止淤積的方法

為了達成防淤與清淤目標，在水庫管理上採用多元手段，由上游至下游包含集水區保育治理、防淤隧道水力排砂、水庫機械清淤及其配合之下游河道監測，以下針對這些方式介紹其作法。

(一) 集水區保育治理

1. 沿革

行政院 95 年 3 月 20 日核定之「水庫集水區保育綱要」，為水庫集水區保育的執行依據，該綱要規定水庫集水區之管理由各主管機關依現行相關法令及權責辦理。近年因全球暖化與氣候變遷使降雨集中，造成土石經洪水沖刷淤積於野溪、河道及水庫之情況，莫拉克風災後水庫淤積情形更趨嚴重。經濟部水利署 105 年 8 月經與水庫管理單位共同擬訂「水庫庫容有效維持綱要計畫」，績效指標及目標值分為短期(105~106 年)、中期(107~110 年)及長期(111~120 年)三部分，先以「整體防洪防淤策略研究規劃」提出具體之整體防洪防淤策略可行方案，執行上依水庫上中下游分為「水庫集水區保育治理」、「上游河道及蓄水範圍機械清淤」、「水力排砂設施更新改善及增設」及「土方媒合去化及水庫沈積物回歸河道」等五大策略方向，長期以水庫泥砂進出平衡，維持水庫有效庫容為目標。

2. 執行

南化水庫除蓄水域之整治由自來水公司主辦外，集水區上游之保育治理由農業委員會水土保持局(山坡地)及林務局(林班地)主政，108~110 年度共進行溪流整治及崩塌地處理 24 處，控制土砂量 63.6817 萬立方公尺。每年集水區上游崩塌地整治工程依現況需求採滾動式檢討調整辦理，近年因較無大規模颱風豪雨事件，南化水庫集水區崩塌地也因自然復育而減少，未來集水區各權責單位也會朝維持庫容政策方向及水庫泥砂進出平衡之永續利用目標邁進。

(二) 水庫清淤

1. 機械清淤方式-陸挖及抽泥

南化水庫經過 97~98 年嚴重淤積後，自 99 年開始進行機械清淤工作，包含陸挖清淤及抽泥清淤兩種方式。

(1). 陸挖清淤

陸挖清淤是將水庫上游露出水面之土砂以挖土機及砂石車等機具予以清除；此法於枯水期水位較低時施工，惟施工通達道路南市 179 線遇豪雨常有崩塌疑慮，且路寬狹窄，部分瓶頸路段只能讓一輛砂石車通過，必須交通管制單向通行，諸多問題使此工法每年最多清運 15 萬立方公尺之淤泥，難以增進效率。

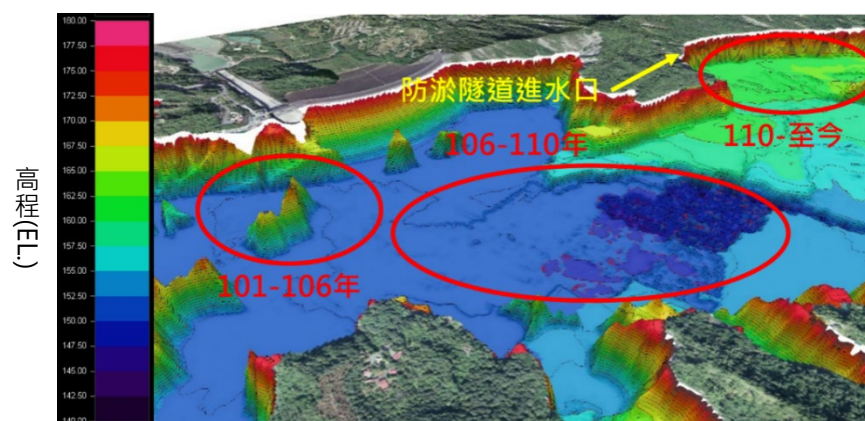
(2). 水中抽泥

水庫抽泥是以平台船及抽泥機組等設備將水庫底部之泥砂去除之工法，此法作業較不受豐枯水期限限制。初期係以暫置沉澱池收方測量，但是受限於淤泥暫置場僅 4 萬立方公尺及抽泥收方測量周期 4 個月，每年僅能清淤 12 萬立方公尺。

2. 工法演進

自 106 年起，南化水庫抽泥作業因採用濃度流量(TDR)計價，使抽出之泥砂一經計量室管線後，便馬上可統計瞬間抽出之泥砂量，比起過去須待淤泥於暫置區沉降後測量才能取得抽泥成果的方式效率倍增。另外淤泥去化方面，依據經濟部水利署之「水庫沉積物回歸河道注意事項」於下游河道築起土堤(如圖二)，將抽出之淤泥暫置於河道，待洪水來臨水庫溢洪或防淤隧道放水時再將暫置之淤泥沖至更下游之河道甚至是出海口。這種「還砂於河」的作業模式，解決了一直困擾著水庫管理單位的淤泥去化難題，亦使抽泥作業不再受腹地不足等因素限制，整年度之抽泥量可以提高，以南化水庫為例，還砂於河方式使淤泥去化量可提高將近 10 倍。此進展使抽泥廠商有更大動機發展更環保有效率之抽泥機具，不只抽泥幫浦由柴油動力改為電動，亦改善

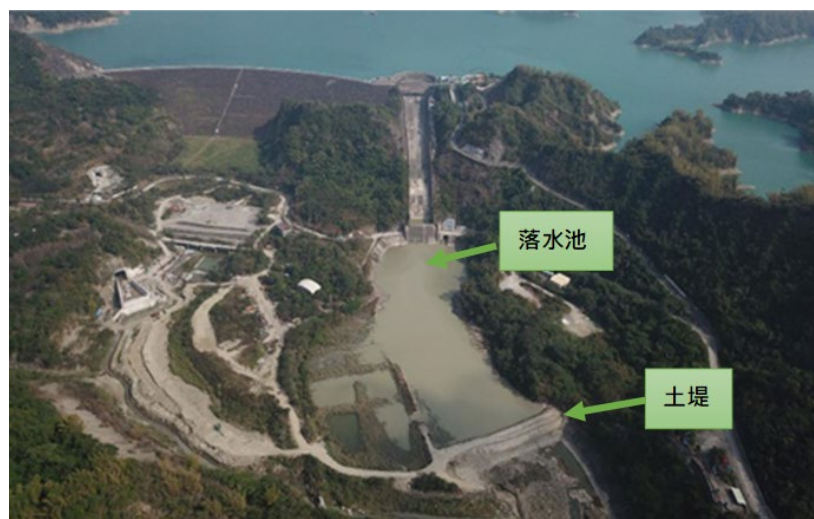
了抽砂頭的絞刀鑽掘及幫浦後送之效率，每日抽泥量由 3,000 立方公尺增加到 10,000 立方公尺，抽泥平均濃度也由 20 萬 ppm 增加到約 35 萬 ppm。上述這些公私合作的制度改良及工法進步，讓水中抽泥成為水庫清淤最有效最穩定之手段，漸漸使台灣更多水庫願意採用此方式改善淤積問題。



圖二 南化水庫淤泥暫置土堤鳥瞰圖

3. 水庫目前抽泥策略

南化水庫自 100 年開始抽泥，至今已執行 11 年，此 11 年間對於抽泥作業之位置及目的各有不同概念(如圖三)，



圖三 南化水庫庫區淤積測量 3D 地形圖(110 年 11 月實測)

105 年前主要於取水口前庭附近抽泥以避免淤積面持續升高危害取水口結構。106 年後因抽泥機組效能提升，便開始於較上游區域作業，不只抽泥效率提升，亦有阻擋洪水入庫時產生之異

重流流進取水口影響取水濁度之效果，有利於颱風豪雨期間穩定原水取水水質。配合防淤隧道的興建，為了阻擋上游異重流淤積於水庫下游，並提高防淤隧道排砂效率，於 107 年提出「囚砂導流潭」之構想，囚砂導流潭是將防淤隧道進水口往上游以水中抽泥方式挖出深 15~20M、底寬 100M 頂寬 300M、長約 1KM、容量約 300 萬立方公尺的囚砂深潭，利用高差形成的天然屏障，將颱洪期間高濃度異重流引導到開啟的防淤隧道內自然排出。自 110 年起抽泥作業便著重於防淤隧道進水口上游處，以利構築囚砂導流潭，目前已於此處抽出超過 100 萬立方公尺之淤泥，未來將持續加強抽泥量能，以作為增進防淤隧道排砂效率及阻擋泥砂入庫淤積的重要手段。

(三) 防淤隧道操作

1. 防淤隧道基本資料

南化水庫防淤隧道於民國 110 年完工，最大設計流量 1,000cms，全長 1,287M，進水口高程 EL. 135M，由一座弧形閘門及緊急維護閘門控制，詳細平面圖(如圖四)。



圖四 南化水庫防淤隧道平面圖

2. 防洪防淤操作及氣象預報

南化水庫於颱風豪雨期間運用防淤隧道放水時，需配合「南化水庫運用要點」及「水門操作規定」執行調節性放水及防洪防

淤運轉。為達成合法之防洪運轉、最大化水力排砂量與沖除抽泥作業暫置於下游河道之淤泥、提升水庫防淤效率並滿足後續供水等多項目標，需嚴密監控並適度預估氣象水情，以掌握水庫集水區逕流來水、泥砂入庫過程，預先研擬防淤隧道的啟動或關閉策略，方能即時且有效地發揮防淤隧道功能，達成防洪、防淤與蓄水利用等多目標。

略，方能即時且有效地發揮防淤隧道功能，達成防洪、防淤與蓄水利用等多目標。

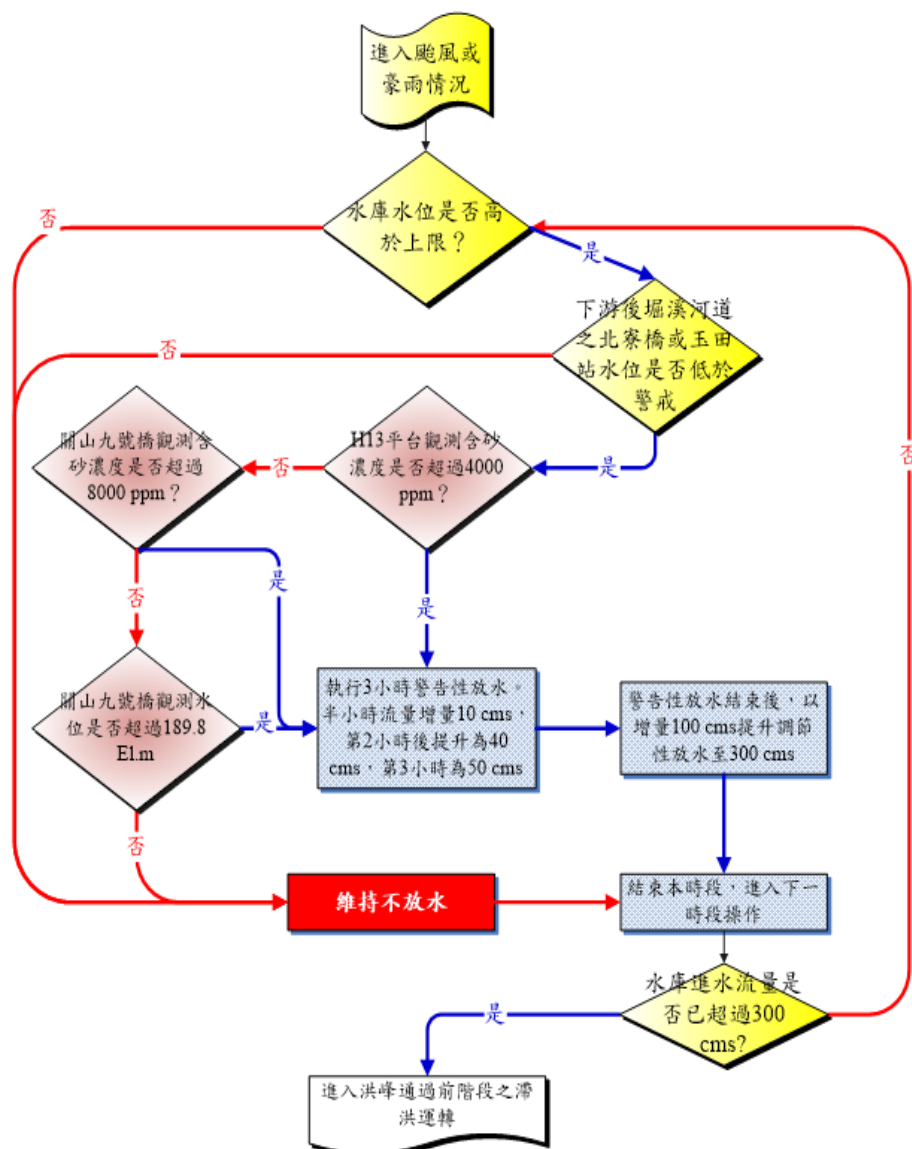
目前南化水庫已完成介接經濟部水利署水利防災中心提供水利署所轄單位介接之預報降雨，主要預報產品 WRF 模式預報集水區降雨之期程可達 3~5 日，另洪水事件期間亦綜合參考 Windy 網頁上的歐洲與美國預報模式(ECMWF 與 GFS 模式)，研判事件總降雨量的上、下限範圍，再據以研擬防淤隧道的可能運轉時機與放水策略。

表一 民國 111 年 0608 豪雨事件南化水庫集水區觀測與預報降雨比較情形

預報模式 (預報時間： 111/06/0715 時)	南化水庫集水區累積雨量 (mm)			
	未來 1 日	未來 3 日	未來 5 日	未來 10 日
QPESUMS+QPF	72	--	--	--
QPESUMS+WRF	63	79	--	--
GFS	22	58	235	479
ECMWF	29	65	103	135
實際降雨	64	114	121	123

3. 防洪防淤運轉決策

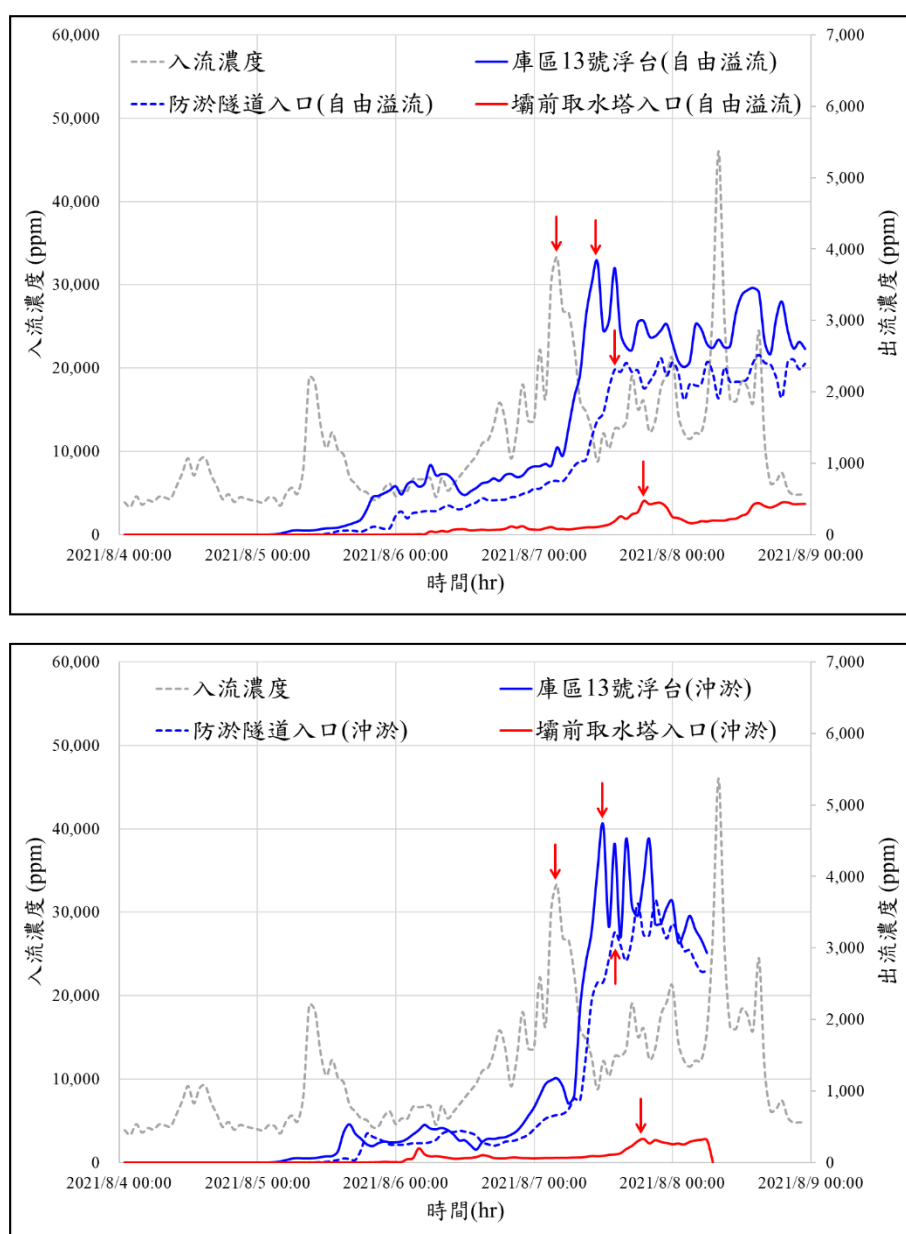
為簡易並有效地研判與預警防淤隧道開啟時機，分別建立關山九號橋位址處之河道水位-河道流量率定曲線，以及河道流量-含砂濃度率定曲線，並依據歷年泥砂觀測數據，與現地運轉的需求建立研判啟動防淤隧道放水之條件(如圖五)。

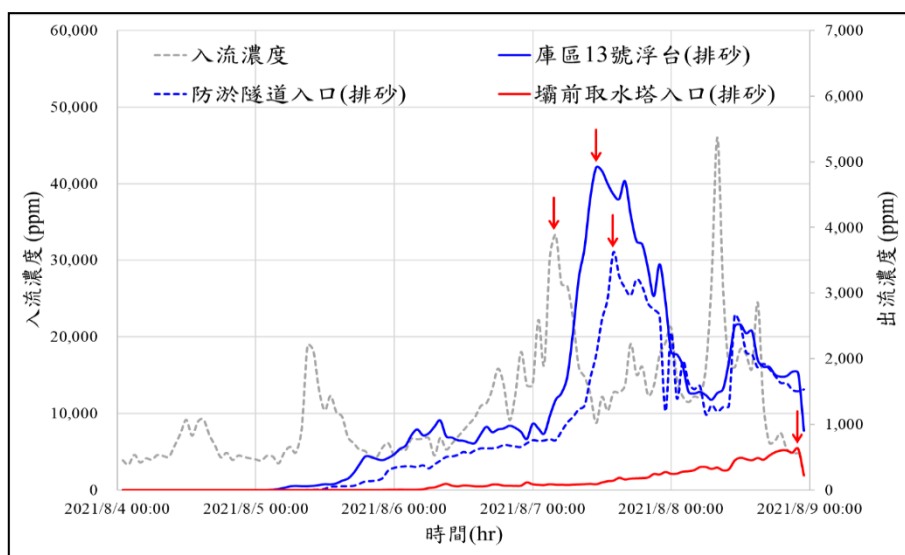


圖五 啟動防淤隧道條件流程圖

水庫放水運轉策略是為了優先達成安全與蓄水利用等主要目標，並合法、平順地釋放必要之洩放水量，再運用洩水量進行水力排砂或沖淤，因此自水庫洩放之每單位水量均有排砂或沖淤之價值。為最大化此價值，須依照不同放水目的而研擬更精緻化之放水策略。爰此，考量過去經驗及對防淤隧道功能之期待，設計了 1. 單純自由溢流、2. 以沖淤為主（最大化水庫放流+溢流量大於或等於沖淤有效流量之時數）及 3. 以排砂為主（最大化防淤隧道排砂量）（如圖六）等各類目標，以提升策略的成效並符合現地運轉所考量的事項。

為瞭解水庫內泥砂運移的狀態，以及防淤隧道操作對於排砂濃度的影響，運用水理輸砂模式建置水庫庫區內異重流運移之數值模式，並以民國 110 年盧碧颱風為案例，假設水庫自標高 175.5 公尺開始運轉，分別考慮了不同運轉目標下，模擬庫內泥砂運移狀態，顯示透過放水調控可有效促進排砂效率，未來可進一步模擬不同起始水位與不同洪水案例的組合，產出更多泥砂濃度與雨量、進水流量、水位、放水流量等資料的樣本，歸納泥砂運移特性，期防淤隧道能達成兼顧運轉合宜、對下游沖淤及排砂效率最大化與達成期末蓄水等目標。

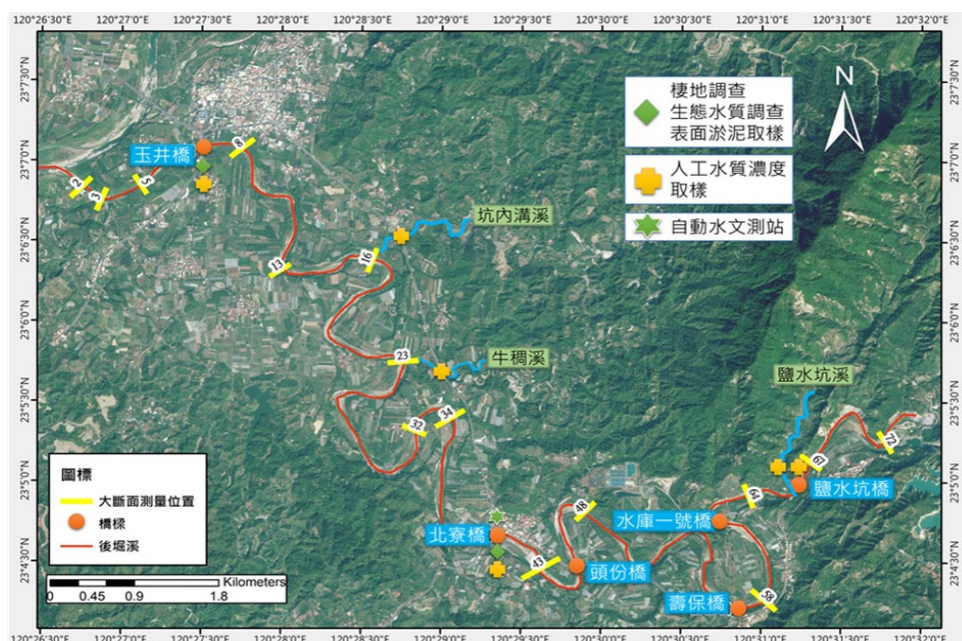




圖六 盧碧颱風各種不同情境模擬結果

(四) 下游河道監測

抽泥作業由水庫抽出之泥砂必須暫置於水庫下游河道，於豐水期時藉由水庫溢流或放流之大量川流水將暫置之泥砂帶到曾文溪出口，過程中必須對下游後堀溪河道所進行之各項監測分析，以瞭解淤泥回歸河道後對河道變遷及生態之影響，監測範圍由南化水庫大壩至曾文溪交匯處，主要調查項目為生態、水質、棲地、底泥重金屬、粒徑、大斷面測量等，後堀溪河道調查位置示(如圖七)。



圖七 南化水庫下游河道監測範圍圖

1. 水質調查

水質監測項目為流量、水質概要、水溫、流速、pH 值、溫度、氨氮、大腸桿菌數、化學需氧量、總有機碳、鎘、鉛、鉻、砷、汞、硒、總磷、溶氧、導電度及 BOD 等，調查頻度為汛期前後各一次。

2. 生態調查

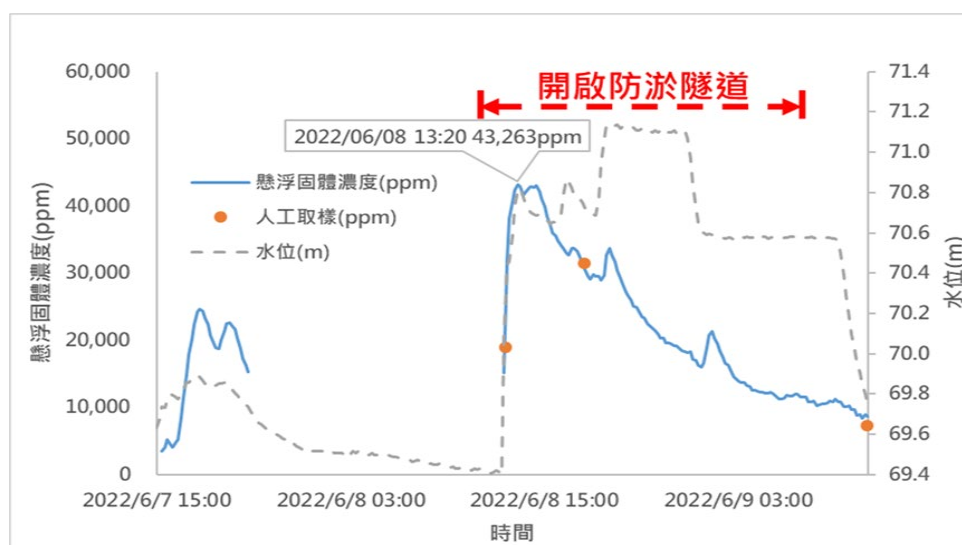
生態調查項目含動、植物生態調查，動物生態調查：含陸域及水域生態調查，調查對象為魚類、蝦蟹類、水棲昆蟲、螺貝類、環節動物、藻類、鳥類、兩生類、爬蟲類、哺乳類及昆蟲類；植物生態調查：含植被調查（含稀有植物、老樹等）、植被分布、自然度分布、樣區調查等項。

3. 底泥重金屬調查

河道淤泥取樣點為後堀溪 2 站(北寮橋及玉井橋)，取樣頻率為每年汛期後取樣 1 次。項目包含：鎘、鉻、銅、鎳、鉛、鋅、汞及砷。

4. 水質濃度取樣及自動測站監測

取樣站為後堀溪 3 站（鹽水坑橋、北寮橋及玉井橋），另外取樣後堀溪支流 3 站（鹽水坑溪、坑內溝及牛稠溪），取樣頻率為水庫放水或其他有需要之期間，每天上、下午各一次，每次執行 3 天；實際作業紀錄資料可參考(圖八)。



圖八 111 年 6 月 7 日北寮橋取樣濃度及水位圖

5. 河川型態及棲地調查

調查內容包含河川型態及潭瀨分佈比，並將調查成果標示於地形圖上（比例尺大於 1/5000），並統計潭瀨比例，每年汛期後調查 1 次。

6. 後堀溪河道測量

河道大斷面測量之施測範圍由鹽水坑橋至曾文溪匯流口，擇其中 16 處進行測量，施測頻率為每年汛期後施測 1 次，並利用每年河道大斷面成果進行比對，找出淤積區與沖刷區進行分析，研判河道沖淤及河床變化趨勢。

7. 放淤成效分析

以遙控無人載具（Unmanned Aerial Vehicle, UAV）對河道進行空拍並對河道放淤量體估算，配合國內最新影像建模/DSM 生成軟體-Pix4Dmapper 軟體進行 DSM 製作，藉由於放淤前、後影像拍攝產生 DSM 模組，以相互比較量體變化，可估算出沖刷後放淤量體變化。

8. 近年觀測結果

106 年開始對南化水庫後堀溪下游河道之調查結果顯示，不論是水質、底泥、生態、河川棲地及河道斷面等項目，抽泥放淤對其皆為暫時性影響，當年度若有殘留之淤泥沒有被沖刷，隔年洪水事件川流水皆可將河道恢復成未放淤之狀況，可證明抽泥放淤還砂於河之方法為永續可行之模式。另外，每次溢洪或放水沖淤結果，皆可透過數據分析後成為未來放水沖淤之參考，藉由防淤隧道主動控制放流量，可將沖淤效率極大化，增加放淤之空間，以利增加抽泥清淤之量能。

三、 未來展望

(一) 短期：最大化清淤量及防淤隧道精緻操作

目前水中抽泥是水庫防淤清淤策略中最能掌握的項目，自 106 年至 111 年，抽泥量便由每年 30 萬立方公尺提升到 130 萬立方公尺，若能使抽泥標案間順利銜接，配合下游河道暫置區最大化，則效果立竿見影。

防淤隧道的操作亦顯得重要，防淤隧道自 110 年 8 月正式交接給自來水公司至今約一年多，仍在累積操作經驗，但相信配合未來氣象預報、泥砂運移監測及放水模式建立及分析機制完善後，藉由經驗累積一定能使其效用更上一層樓。而且防淤隧道除可排除水庫上游之來砂，亦可作為下游河道沖淤之手段，在下游河道持續監測及累積數據後，配合水庫放水精緻化，也能更增進淤泥暫置區之「周轉率」，使抽泥量有增加之空間，減少水庫淤積。

(二) 中期：囚砂導流潭建置與利用

囚砂導流潭體積約 300 萬立方公尺，雖抽泥每年 130 萬立方公尺應能於 3 年內建置完成，但南化水庫平均每年仍可能有 150 萬到 200 萬立方公尺之來砂量，故抽泥作業必須持續進行才有機會於來砂量較少之年份順利建置囚砂導流潭，完成後便可增進防淤隧道之排砂效率，並減少水庫下游之淤積，以水庫庫容進出平衡為目標繼續前進。

(三) 長期：配合「曾文南化聯通管」之運轉可增加南化水庫防淤隧道操作空間

曾文南化聯通管為連接曾文水庫及南化給水廠之聯通管路，目前由經濟部水利署南區水資源局辦理施工中，預計 113 年底完工，

完工後可將曾文水庫水源送至「南化淨水場」及透過現有之南化高屏聯通管送至「坪頂淨水場」處理，供應大台南及高雄地區民生及工業用水，增進南部地區之供水韌性。在曾文水庫可供應南化給水廠用水的條件下，南化水庫於豐水期時比起現在更有操作放水之空間，在颱風豪雨來臨，可以考慮洩降排砂增加防淤隧道排砂量，或甚至可規劃興建潛壩，配合豐水期空庫排砂，使南化水庫更有機會達到庫容維持甚至增加之目標。

四、 結論

- (一) 南化水庫在歷經莫拉克、卡玫基等颱風事件肆虐後，嚴重造成泥砂淤積進而影響供水穩定，如何清淤防淤成為迫在眉睫的問題。為了維持有效庫容，許多方法包含集水區保育治理、水庫清淤、防淤隧道操作及下游河道監測皆應用於南化水庫，經過不斷的努力後確實可減緩水庫淤積的速度，期待在未來累積經驗及持續加強執行後能盡速達成維持庫容得目標。
- (二) 未來展望上，除了短期內持續抽泥作業及精進防淤隧道的應用，因砂導流潭及曾文南化聯通管亦為中長期有利於水庫防淤之重要設施，再加上目前推動之南化水庫溢洪道加高及第二取水工興建計畫，未來不只在水庫防淤清淤上有更多靈活工具可以應用，供水穩定及韌性上能更上一層樓，在自來水公司及水利署南區水資源局等相關單位持續努力及執行推動有助於水庫之計畫下，南部地區應可達到供水穩定的目標。

參考文獻

1. 王文江，《水庫與社會》，財團法人中興工程科技研究發展基金會，2011。
2. 台灣自來水股份有限公司，《109-111年南化水庫放淤對下游河道變遷影響監測分析 年度報告》，2021。
3. 台灣自來水股份有限公司，《110-111年南化、鏡面水庫及玉峰堰集水區保育治理 年度報告》，2021
4. 台灣自來水股份有限公司，《110-111年南化水庫防洪防淤運轉決策支援系統建置及汛期諮詢服務 年度報告》，2021
5. 台灣自來水股份有限公司，《南化水庫防洪防淤整體綱要計畫總報告》，2019
6. 台灣自來水股份有限公司，《106-107年南化水庫取水口前庭抽泥工程清淤計量及檢驗 成果報告》，2018

水庫永續經營管理-以仁義潭及蘭潭水庫為例

台灣自來水公司第五區管理處/吳忠澤股長

關鍵字：水庫永續經營、集水區保育實施計畫、水庫定期安全評估、水庫安全檢查及監測分析、水庫清淤作業

摘要

近年來受全球暖化、氣候變遷影響，水資源管理日趨不易，2020 年台灣梅雨季短且無颱風登入，導致豐水期降雨量減少，面臨 56 年來最嚴峻乾旱，故如何有效管控水資源是目前最重要的議題。自來水公司第五區管理處為提供量足、質優、永續的水資源，於仁義潭及蘭潭水庫依相關規定定期辦理集水區保育實施計畫及水庫安全評估，並每年辦理水庫安全檢查及監測分析，以能確保水庫相關設施功能正常無虞。另為延長水庫壽命，本公司每年持續辦理仁義潭水庫清淤作業，以提升水庫有效蓄水量，達到永續經營目標。

一、仁義潭及蘭潭水庫概況

仁義潭水庫為一離槽水庫，位於嘉義市東南方約 6 公里處，全區屬於嘉義縣番路鄉，民國 76 年 6 月完工，於吳鳳橋下游約 100 公尺處建造竹山攔河堰引入八掌溪之溪水，經 1.5 公里之引水道導入仁義潭水庫蓄存。水庫滿水位為 E.L.+105.0 公尺，76 年完工時總庫容約為 2,911.4 萬立方公尺，依據 110 年 10 月水庫淤積測量結果，現況滿水位面積 2.30 平方公里，總庫容 2,571.5 萬立方公尺，有效蓄水量 2,484.5 萬立方公尺。水庫每日供水量約 150,000CMD，為嘉義市及嘉義縣公共給水及工業用水之主要來源。

蘭潭水庫位於嘉義市東方約 3 公里處之丘陵區，於民國 31 年 3 月動工興建，至民國 33 年 3 月完工啟用，為一離槽水庫，水源係取自仁義潭水庫，經長約 3.8 公里之暗渠、明渠及隧道流入水庫蓄存，與仁義潭水庫串聯運用。蘭潭水庫民國 75 年總庫容為 979.6 萬立方公尺，依據 109 年 10 月水庫淤積測量結果，現況滿水位面積 0.79 平方公里，總庫容約 975.6 萬立方公尺，有效容量 923.9 萬立方公尺，每天可供應公共給水 50,000CMD 及 10,000CMD 工業用水原水。



圖 1 仁義潭及蘭潭水庫相關位置

二、仁義潭及蘭潭水庫集水區保育實施計畫

為確保量足、質優、永續的水資源，營造安全、生態、多樣的水源環境，行政院於 95 年 3 月 20 日核定「水庫集水區保育綱要」，以作為水庫集水區保育的執行依據，該綱要規定水庫集水區範圍內之水土保持工程由相關機關依業務權責及專長分工治理，水庫集水區之管理由各主管機關依現行相關法令及權責辦理，並責成經濟部整合各主管機關之治理（或改善）計畫報核。

台灣自來水公司第五區管理處於 108 年 5 月已研提「仁義潭及蘭潭水庫集水區保育實施計畫(108~111 年)」，並於 108 年 12 月 16 日奉經濟部核定在案(經授水字第 10820218751 號)。為持續推動水庫集水區保育工作，本公司爰洽請水庫集水區各權責單位包括農委會林務局嘉義林區管理處、水保局南投分局、環保署、交通部公路總局第五區養護工程處、國有財產署南區分署嘉義辦事處、農業委員會農糧署及嘉義市政府工務處、建設處及嘉義縣政府水利處等單位，依據保育計畫目標研擬相關保育治理工作事項，計畫期程自 112 年至 116 年，並經本公司綜整完成本計畫。

(一)計畫目標

「水庫發展永續化」、「水源環境生態化」、「災害防治整體化」、「經營管理社區化」四項目標為我國在新世紀為水庫集水區整體保育計畫工作所做的期許與承諾。以全面性辦理水庫集水區內的水土保持與水質改善等工作，並配合水質、淤砂監測管理計畫，以期有效保育水土資源、保障人民安全、增進水源涵養、減少水庫淤積與改善水體水質，並秉持資源永續利用的理念，積極推廣生態工法與親水觀念，加強水資源保育及宣導，推動集水區社區總體營造，致力於土地合理開發，經營與保育工作並重，以維護自然生態的平衡發展，提升親水環境與生活品質，有效管理自然水土資源，使水庫集水區成為兼顧生活、生態及保育的開放空間，永續經營，生生不息。

本計畫執行期間以達成集水區土砂減量入庫，維護水源水質，以確保穩定供水及水資源永續利用之目標，因此依循經濟部水利署 105 年 8 月「水庫庫容有效維持綱要計畫」及行政院環保署「全國水庫水質治理前瞻綜合管理計畫-水庫水質治理策略」之設定目標為基礎，並配合水利署 111 年 3 月 23 日召開 13 座重要水庫集水區控制土砂量目標值研商會議之決議進行調整，說明如下：

- 1.集水區土砂有效減量：加速崩塌復育穩定林地邊坡，營造土砂蓄容空間，適時實施防災清淤，減緩洪水及土砂災害，強化水庫集水區保土蓄水之公益功能。依據經濟部水利署 13 座重點控管水庫子集水區崩塌地計畫，仁義潭水庫土砂治理目標值係依保育實施計畫提報量管控。依此指導原則，農業委員會水保局及林務局以近庫、近岸或近路崩塌區位為優先處理對象，以期減少土石下滑達到保育減淤之目標，本計畫集水區預計每年保育減淤量為 0.7 萬立方公尺，合計 3.5 萬立方公尺。
- 2.改善水源水質：針對水庫集水區進行污染源處理改善，努力恢復集水區自淨功能，減輕水質污染，提供潔淨水源，增加飲用水安全。仁義潭及蘭潭水庫水體水質處於普養狀態，根據「全國水庫水質治理前瞻綜合管理計畫-水庫水質治理策略」，普養水庫應持續改善至貧養狀態。竹山堰河川水質多為未/稍受污染及輕度污染間，唯總磷濃度水質達成率甚低，本計畫以合理化施肥、土地利用型態轉變及民眾教育提昇等，優先以源頭管理的方法進行污染削減，期使總磷濃度達成率能夠提升。

三、仁義潭及蘭潭水庫定期安全評估

依據經濟部「水利建造物檢查及安全評估辦法」第 17 條之水利建造物安全評估分類，水庫於正常使用營運期間一定周期辦理之整體評估為定期評估，同條第 2 項規定定期評估之一定周期為 5 年。本公司依上述之規定針對水庫之現況進行全面性之調查與評估，並提出必要之改善措施與建議，辦理安全評估檢查，以維護水庫安全。

安全評估計畫範圍包括仁義潭及蘭潭水庫之主壩、副壩、排洪設施、取水設施、監測設施、蓄水範圍、下游放水路與竹山攔河堰等。主要工作項目為：

(一)歷次安全評估內容執行之檢討與分析

依據歷次安全評估之建議改善事項、相關調查研究案，整理相關內容，以及其執行後迄今與水庫安全相關事項辦理情形之檢討，必要時分析對水庫安全之影響，並提出建議及解決方案。

(二)水庫基本資料之補充蒐集、複核與評估

資料蒐集、複核與評估之內容依據「水利建造物檢查及安全評估技術規範蓄水與引水篇」辦理；蒐集之安全資料包括以往既有資料及新增資料，以利與現行分析方法、規範或標準進行複核。安全資料蒐集、複核之項目應包括：1.氣象、水文及洪水演算資料 2.地質資料 3.地震資料 4.蓄水範圍及集水區概況 5.結構物水理分析 6.壩資料及壩址滲透調查分析 7.附屬結構物資料 8.壩基座及蓄水庫周邊邊坡資料 9.水工機械及機電設備 10.施工資料 11.監測系統及觀測資料 12.蓄水庫淤積資料 13.蓄水庫操作運轉系統與紀錄資料 14.洩洪警報系統與警報紀錄 15.蓄水庫營運管理及維護改善資料 16.潰壩演算及緊急應變計畫資料 17.資訊安全 18.遙感探測資料。

(三)水庫基本資料補充建檔

主要補充上次安全評估迄今之水庫基本資料，並依照「水利建造物檢查及安全評估技術規範蓄水與引水篇」，將蒐集之安全資料（包括以往既有資料及新增資料）彙整建立書面（冊）及電子檔案。

(四)現地檢查與評估

現地檢查前應先瞭解水庫定期安全檢查辦理情形，並就各檢查標的之檢查方法、使用儀器及設備、所需時間、期程等經機關協調相關調配水及安全事宜後始得執行。現地檢查與評估項目如下：1.地質 2.土壩壩體及竹山攔河堰 3.附屬結構物(溢洪道、送水閘門等) 4.壩基座及蓄水庫周邊邊坡 5.監測

系統及觀測 6.蓄水庫周邊環境 7.蓄水庫操作系統 8.水工機械及機電設備。

(五)補充調查及試驗

1. 針對仁義潭及蘭潭水庫壩體辦理表面波頻譜法試驗，求得壩體材料參數現況。
2. 為持續追蹤仁義潭及蘭潭水庫溢洪道混凝土底板下方基礎狀況，針對底板辦理透地雷達探測。
3. 仁義潭水庫閘門非破壞檢驗，針對既有可施測閘門，以超音波測厚儀檢測閘門厚度。

(六)校核分析與評估

係以各項蓄水庫安全資料及現地檢查成果評核各設施功能、結構及管理機制等之妥適性，並應含設計、施工紀錄與結構物實體現況等之複核，以確認蓄水庫之整體安全。本計畫須辦理校核、分析與評估之項目，列舉如下：

- 1.校核地震評析 2.校核洪水評析 3.結構物水理評析 4.蓄水庫淤積評析 5.排洪設施之排洪能力評析 6.壩體出水高度之評析 7.壩體之結構安全評析 8.附屬結構物安全評析 9.壩基及蓄水庫周邊邊坡安定評析 10.監測儀器觀測資料評析 11. 水工機械評析。

(七)潰壩演算急災損分析

依據最新之庫容與評析之設計洪水結果重新辦理潰壩演算，並據以修訂緊急應變計畫。

(八)綜合評估

(九)結論與改善事項

仁義潭與蘭潭水庫分別於民國 108 年及 110 年完成第三次及第四次安全評估工作，依「水利建造物檢查及安全評估辦法」第 21 條規定，仁義潭水庫已屆辦理安全評估之期程，考量蘭潭及仁義潭水庫為串聯運用，故計畫一併辦理蘭潭水庫第五次定期安全評估，針對二座水庫現況進行全面性之調查，以維兩水庫安全。

四、仁義潭及蘭潭水庫安全檢查及監測分析

近年來台灣南部地區陸續遭受超大豪雨(莫拉克颱風)及強震侵襲，為期掌握超大豪雨及強震後之大壩狀況，確保下游居民生命安全。為維護水庫之安全，落實「水利建造物檢查及安全評估辦法」有關定期檢查及特別檢查之規定，以及回應經濟部水利建造物檢查及安全評估小組對於仁義潭及蘭潭

水庫年度安全複查結論中有關水庫監測資料評析應用之寶貴意見及具體建議，本公司已於 102~110 年期間辦理各年度「仁義潭及蘭潭水庫安全檢查及監測分析」計畫案，借重民間顧問機構專業技術人力辦理，並進行專業教育訓練與技術轉移等工作，以掌控水庫現況確保安全及達成永續利用目標。

(一)安全檢查

1. 辦理仁義潭水庫定期檢查及特別(不定期)檢查；仁義潭水庫檢查範圍包括大壩、溢洪道、出水工、配水工、潛堰、竹山攔河堰及相關設施(進水口、沈砂池及引水路)、道路等土木建築物、蓄水範圍周邊環境檢查；及溢洪道傾倒式閘門、出水工高壓閘門及配水工高壓閘門等水工機械及電氣控制設備。
2. 辦理蘭潭水庫定期檢查及特別(不定期)檢查；蘭潭水庫土木設施包括：大壩、第一副壩、第二副壩、溢洪道、出水工、道路等土木建築物、蓄水範圍周邊環境檢查；及出水工閘閥、電動附手動螺桿式吊門機等水工機械及電氣控制設備。
3. 每次安全檢查時，須檢視以往之安全檢查維護資料，包括：平時例行性之檢查維護資料，依其結論建議事項有需要改善部份是否已確實執行，俾與現狀作比對，供安全維護評估參考，並評估其處理成效。
4. 施行工作時先檢查目前操作手冊或維護準則及操作準則是否依最新法令編訂及修訂，然後據以研判各項定期或特別(不定期)檢查紀錄及操作紀錄是否符合規定、水工機械項目之維修與保養是否依規定辦理、閘門啟閉是否按規定操作、檢查各項運轉紀錄或報告是否依規定辦理等，如有不符合之處，應以列出。
5. 兩水庫土木結構及水工機械安全維護定期檢查。

(二)安全監測分析

1.安全監測資料分析及警戒管理值檢討修訂

- (1)監測儀器測讀：依本公司提供的測讀儀器，按規定的頻率測讀現有的水庫監測儀器設備。如讀值有異必需立即再分析研判加以確認原因。
- (2)監測資料整理分析與評估：將儀器測讀的數據，轉入本公司提供的監測電腦系統的資料庫內，並評估大壩及附屬結構物的安全、建議監測後所需變更及補救辦法，視需要提出改善方案報告。

(3) 監測資料警戒管理值檢討修訂：前已訂定各種監測資料警戒管理值，本計畫將持續分析仁義潭及蘭潭水庫目前仍正常運作之監測儀器，包括孔隙水壓計、層別沉陷計、傾斜變位計、位移觀測點(表面沉陷點)、量水堰、水位觀測計等之年度監測資料，並參考國內外水庫警戒管理值訂定之成果，檢討修訂監測儀器之警戒管理值。

(4) 監測儀器保養及維護：工作期限內，廠商負責保管及保養機關提供之測讀儀器，且需於工作期間視工作狀況將儀器至少送校正一次。

2. 強震儀維護及觀測分析

(1) 地震資料蒐錄、整理、分析評估：水庫強震儀之地動資料讀取頻率為每個月一次、建檔分析繪圖，提出分析成果與建議，並視需要提出改善方案報告。將收集之地震資料必須計算其傅式振幅譜(Fourier amplitude spectrum)及反應譜(response spectrum)，並以繪圖呈示。

(2) 強震儀保養與維護：工作期限內廠商負責保養及維護機關提供之地震監測設備含傳訊儀器(含警報型地震儀耗材更換)，維護頻率平時每個月一次，如水庫地震(自由場)測站測得地震震度達四級以上或強震儀觸發頻率明顯不合理時，則需加密維護一次，機關並得依地震實際發生次數予以增加。

(三) 蓄水庫淤積測量及評析

淤積測量包括兩水庫，必須採多音束水深測量，覆蓋率 110% 以上，包含陸地測量及水中測量二部份，所有測量儀器均應經檢測方可使用。測量成果應採二度分帶(97 座標)系統為準，其成果應詳列蓄水量及蓄水面積之計算公式及過程。測量成果應繪製水庫之 H-A-V 曲線，並依歷年測量成果分析研判淤積趨勢，推估水庫有效壽齡，提出清淤方式建議。

(四) 專業教育訓練與技術轉移

針對仁義潭及蘭潭水庫，廠商須選訂水庫相關議題並於計畫執行期間每年辦理 1 次專業教育訓練及技術轉移課程，每次時數 12 小時。



圖 3 仁義潭水庫監測儀器平面配置圖

五、仁義潭清淤作業

(一)計畫目標

仁義潭水庫為一離槽式水庫，為嘉義縣市主要自來水水源，水源來自八掌溪竹山攔河堰，由引水隧道經過沉砂池後引入水庫，水庫淤積情形不甚嚴重，淤積區域主要集中於引水路圳末工下游處。

水庫庫容有效維持綱要計畫為一長程計畫，績效指標及目標值分為短期(105~106 年)、中期(107~110 年)及長期(111~120 年)三部分，先以「整體防洪防淤策略研究規劃」提出具體之整體防洪防淤策略可行方案，執行上依水庫上中下游分為「水庫集水區保育治理」、「上游河道及蓄水範圍機械清淤」、「水力排砂設施更新改善及增設」及「土方媒合去化及水庫沈積物回歸河道」等五大策略方向，長期以水庫泥砂進出平衡，維持水庫有效庫容為目標。

水庫清淤使用之方法包括陸挖、抽泥及水力排砂等型式，大面積陸挖一般位於水庫庫區上游，水庫庫區下游以抽泥為宜，其清淤成本最低且效率最高。仁義潭及蘭潭水庫水源雖然串聯運用，可相互替代水源之水庫，然而兩水庫肩負嘉義地區最重要之水源供應，枯水期時穩定供水更加重要，其清淤

無法於枯水期或乾早期在不影響水庫正常蓄水之條件下進行，若水庫水位較高或因蓄水操作需要維持較高水位之蓄水狀態，則清淤時機有限。本公司進行之仁義潭水庫陸挖及抽泥計畫，於河道放淤同時也需考量八掌溪下游河道淤積及生態環境的影響，能在減輕對環境的影響下操作。

本公司為達成仁義潭水庫泥砂進出平衡、延長水庫壽命及永續經營，庫區清淤工作乃依循水利署設定目標，路挖部分視每年水情及天候狀況，枯水期固定於庫區潛堰處辦理陸挖清淤，每年辦理庫區陸挖清淤計 2.5 萬立方公尺。抽泥部份惟目前八掌溪較易淤積以致無法放淤，故規劃將放置暫置場堆置，朝最大量能辦理，預計每年 15.5 萬立方公尺。

為延長水庫壽命及永續經營，並依循水利署「水庫庫容有效維持綱要計畫」之長期目標，本公司進行仁義潭水庫陸挖及抽泥計畫，並增加沉砂池排渾或清淤頻率，預估每年清淤量約 17.5 萬立方公尺，來達成水庫泥砂進出平衡，維持水庫有效庫容為目標。

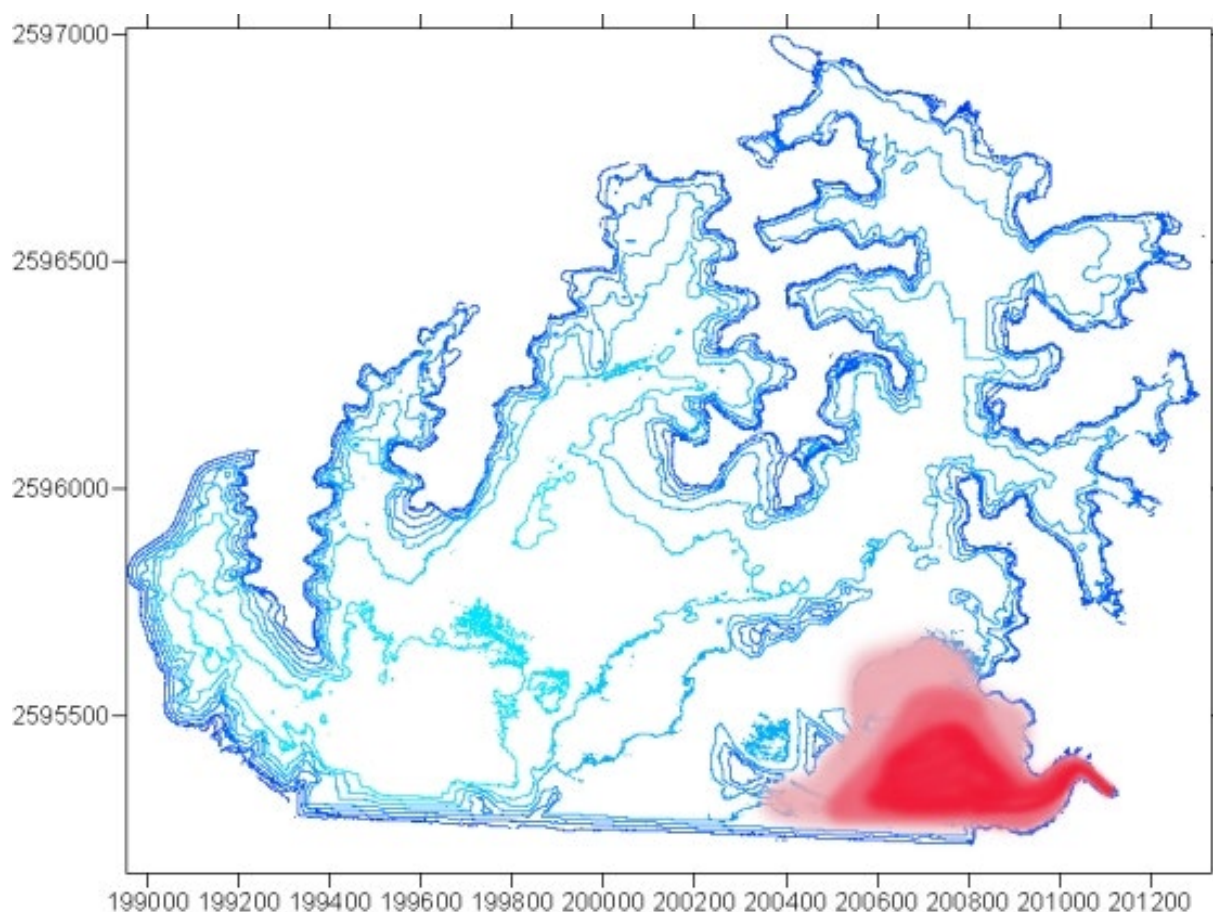


圖 4 仁義潭水庫淤積區域圖

六、結語

仁義潭及蘭潭水庫為嘉義地區重要公共給水水庫，水庫能否發揮穩定供水功能，攸關民生、工業、國防關係甚鉅。為能永續經營，本公司將依相關規定定期辦理各項安全評估及檢監測作業，並每年持續辦理仁義潭水庫清淤作業，以提升水庫有效蓄水量。水庫集水區因極端氣候變化趨勢造成之土石崩落部分，則採用「順應自然」的治理與復育作為，結合適當的工法，於颱風豪雨季節來臨前，加速實施有效、合理的整治措施，減低災害的發生機率及規模，將能有效降低災害所造成的損失及達成環境永續利用。

七、參考文獻

1. 自來水公司第五區管理處，112-116 年仁義潭及蘭潭水庫集水區保育實施計畫，2022 年。
2. 自來水公司第五區管理處，仁義潭水庫第四次及蘭潭水庫第五次定期安全評估委託技術服務說明書，2022 年。
3. 自來水公司第五區管理處，111 及 112 年度仁義潭及蘭潭水庫安全檢查及監測分析委託技術服務說明書，2022 年。

創新複合式水庫清淤設施-石門水庫阿姆坪防淤隧道

經濟部南區水資源局/郭耀程 副 局 長

經濟部南區水資源局/吳建德 正工程司

經濟部南區水資源局/陳儉鳴 副工程司

摘要

石門水庫營運已經將近 60 年，因集水區地質條件及歷年颱風侵襲，目前庫容已經淤積約 1/3，過去雖持續進行減淤、清淤作業，但仍需研議新的清淤方法來降低淤積量，以求減淤延壽。石門水庫新完工之阿姆坪防淤隧道工程，設計為多功能隧道，可提供排洪沖淤、輸泥管道、清淤車輛通行等多功能運用，具有提升年清淤量 64 萬 m^3 以及增加 600 CMS 的排洪能力，有助於水庫延壽及提升防洪安全效益。

一、前言

近年來，氣候變遷引起的異常水文活動，引發頻繁的極端降雨，短延時強降雨發生頻率趨勢越來越明顯。台灣豐水年的年降水量達 3,568 mm，是枯水年 (1,572 mm) 的兩倍以上，同時颱風豪大雨災害所造成大量沖刷、坍滑之泥砂入庫，更是影響水庫庫容關鍵因素。從(圖1)的水庫庫容變化可見，颱風對明顯影響庫容變化。尤其，建壩初期的葛樂禮颱風及 93 年的艾利颱風，二場颱風就使水庫庫容減少約 4800 萬 m^3 。

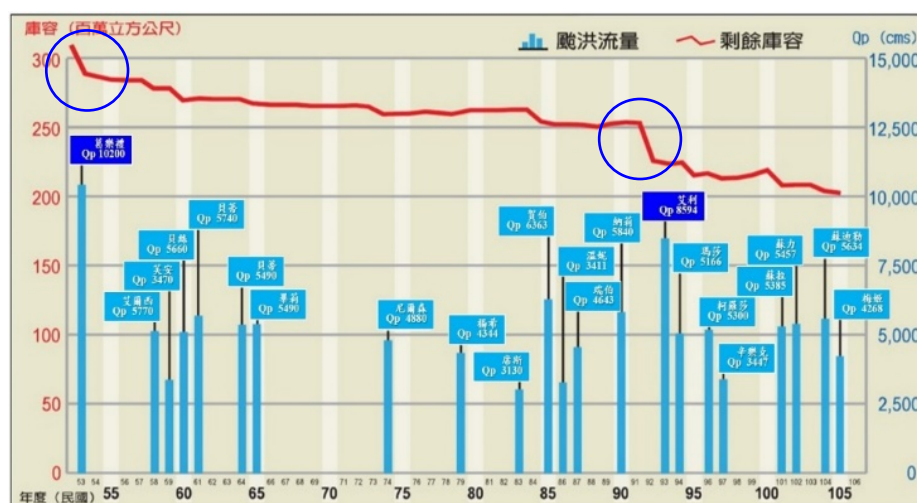


圖 1. 歷次颱風水庫庫容變化

石門水庫集水區範圍 763.4 km²，且集水區地質條件不佳（詳圖 2），所以颱風、強降雨時，易有大量泥砂伴隨洪水進入水庫。依據泥砂調查評估之結果，平均每年有 342 萬 m³ 的淤泥進入水庫，使目前水庫庫容由 3.09 億 m³ 減少至約 2.05 億 m³（2022 年），僅剩原蓄水量的 66%（詳圖 3）。

經濟部水利署北區水資源局(以下簡稱北水局)為完善處理石門水庫泥砂問題，經檢討水庫清淤作業所遭遇問題，考量水庫營運及隧道施工技術，以及淤積泥砂性質差異，希望以新方案突破過去清淤瓶頸。阿姆坪防淤隧道經評估具可行性，竣工後可提升石門水庫防洪及防淤能力，減少水庫泥砂淤積，具有庫容回復正面效益。

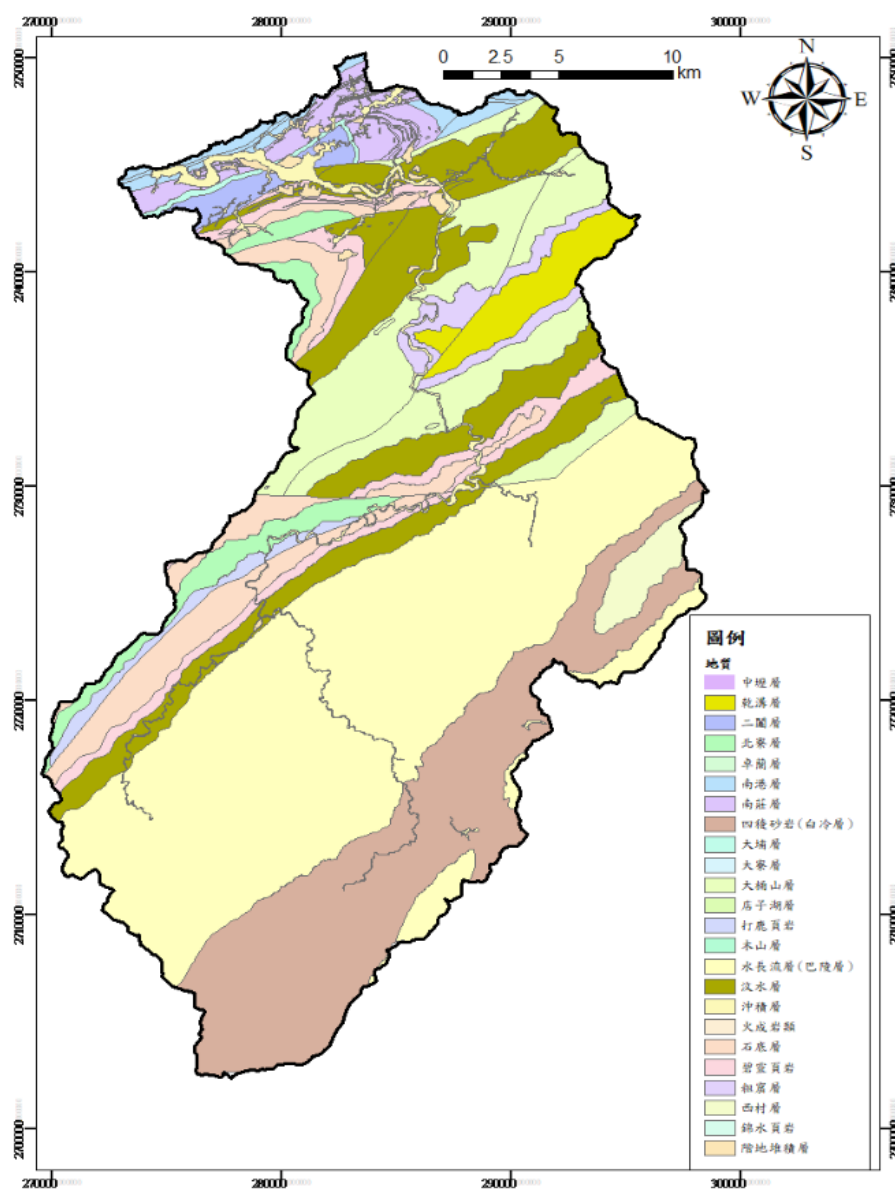


圖 2 石門水庫積水區地質圖

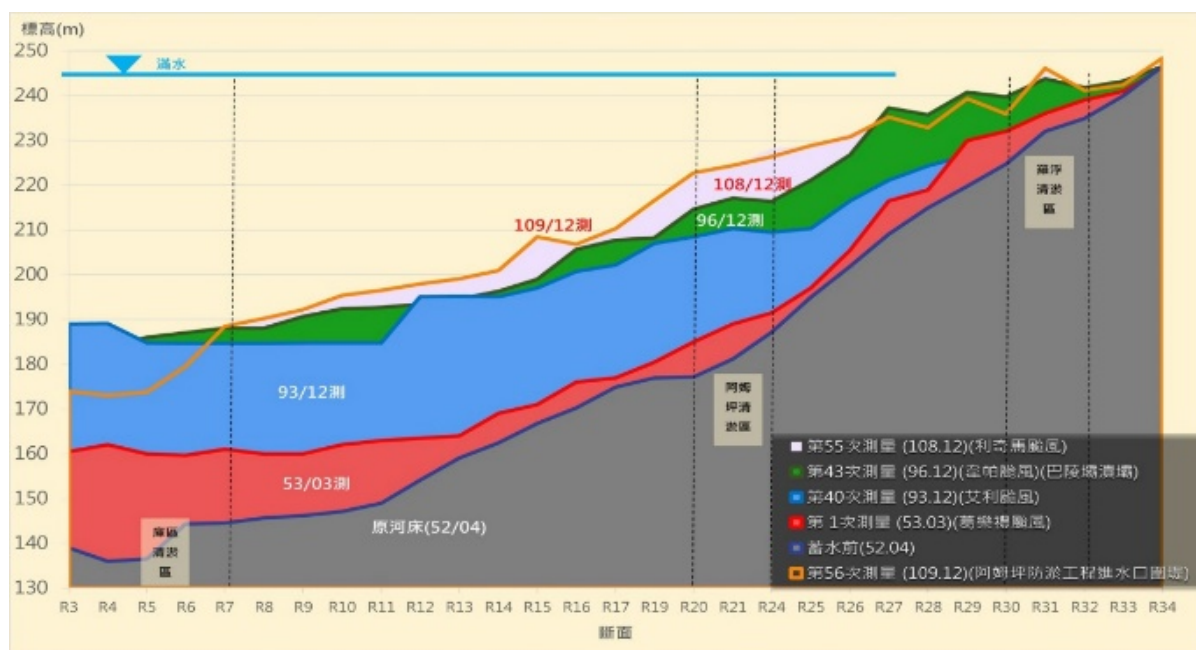


圖 3 石門水庫淤積測量斷面圖

二、設計理念

(一)現行清淤方案檢討

一般而言，水庫防淤管理主要採集水區治理及水土保持、水力排砂及庫區清淤等三種方式，然而為加強維持庫容，有必要結合實施多元措施(詳圖 4)，俾求積極見效。

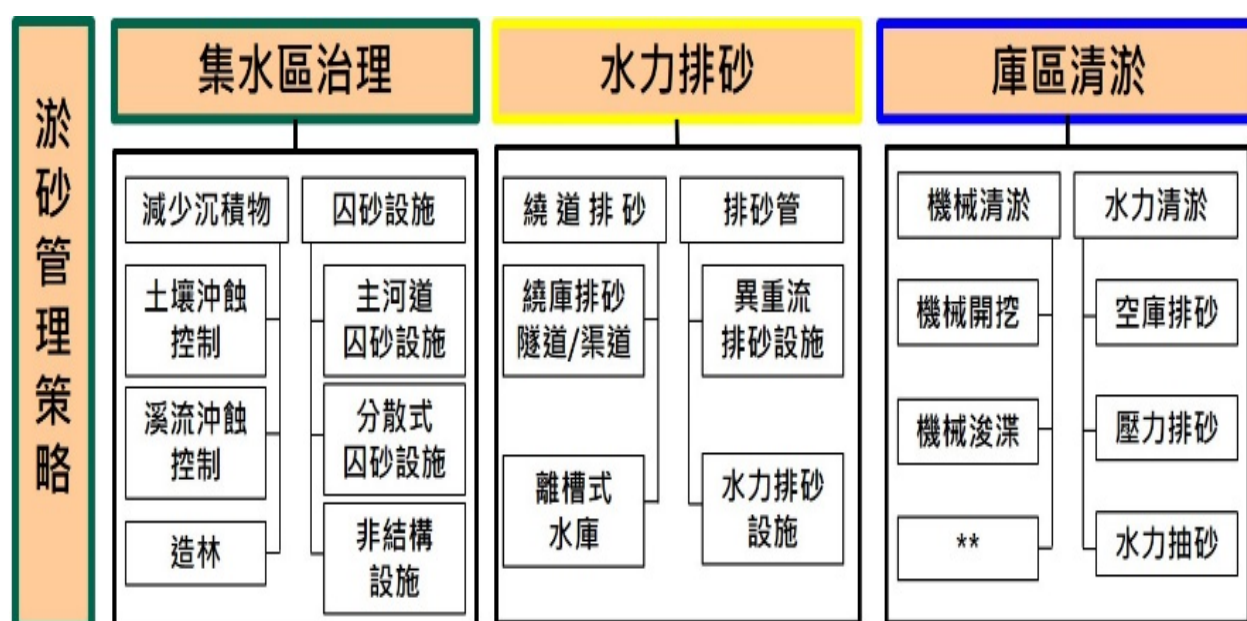


圖 4 淤砂管理策略

北水局就石門水庫淤積問題係採多管齊下方式進行，包括集水區治理、機械清淤、抽泥浚渫、淤泥翻曬後轉運填海造地、水力排砂(排除異重流)等多種措施。除集水區治理減少入庫砂量外，入庫泥砂處理方式主要分為三種(詳圖 5)：A、在水庫上游範圍羅浮及義興採陸挖清運--因本區淤積物多為可再利用建築材料，故採標售方式去化，其收入可挹注水庫營管所需。但因清淤區域位於水庫蓄水範圍上游，運距長且對沿線居民生活品質衝擊大，在交通運輸能量受限下，清淤量不易提升。B、水庫抽泥浚渫、沉澱與翻曬及轉運台北港—作業方式係採抽泥船進行清淤，其相對陸挖清淤對環境影響較小，但因抽取的都是無法再利用的淤積細泥，所以必須放置水庫下游沉澱池靜置及翻曬後，才能再轉運至台北港填海去化，不僅耗時，且因僅有台北港願意收受填海，成本高又運輸過程產生大量碳排放量。C、洪水期間進行異重流水力排砂-石門電廠原有#2 發電鋼管已改建為排砂隧道，當異重流入庫時，可藉由排砂隧道排除約 40%的入庫泥沙，是水庫防淤最經濟的方法，但會受限於各水庫現地條件與颱風強度，並非每年均能有機會進行水力排砂(如 109 年無颱風侵台)，即使有颱風事件發生，也代表將帶來更多泥砂於庫區落淤，故此方法雖可減緩淤積增加速度，但無法完全使庫容淤積減量。

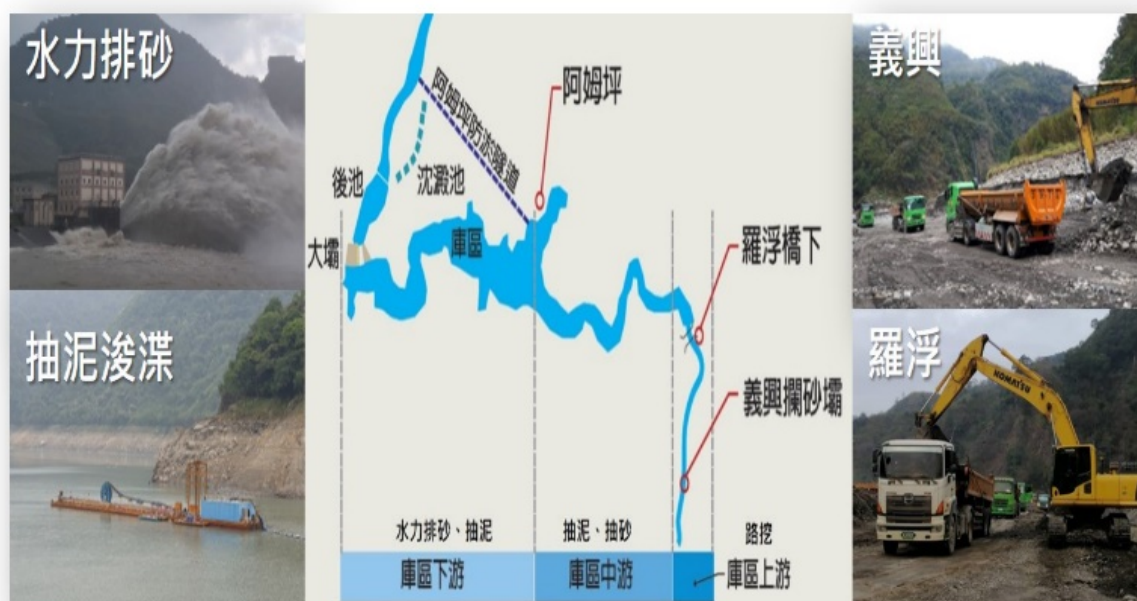


圖 5 石門水庫清淤處理方式

(二)新闢防淤隧道

北水局為了持續擴大水庫清淤量，經評估決定推動阿姆坪防淤隧道工程計畫，且經檢討過往各項清淤措施所遭遇到的問題後，設定此防淤隧道目標為 A.每年平均清淤量能穩定達成，不受當年颱風降雨、水位條件等限制，B.無水庫淤積物去化困擾，C.降低清淤交通衝擊及碳排放量至最少。

因此，阿姆坪防淤隧道規劃清淤作業方式如下：平時抽泥船即持續進行抽泥作業，所抽淤積物經由隧道直接送往下游泥砂篩分設施，並進行淤積物篩分作業，粗砂料標售再利用，細泥料送至沖淤池堆置，待颱風期間利用排洪水量進行沖淤操作，將可沖淤料回歸河道與大海。乾旱時期抽泥船無法運作時，隧道可改供機械清淤卡車通行，以降低清淤對交通的影響（詳圖 6）。

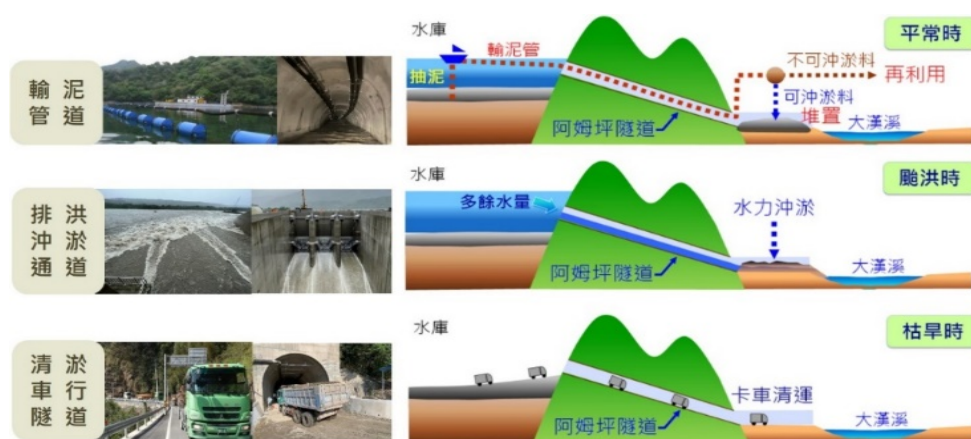


圖 6 多功能防淤隧道

為確認阿姆坪水域淤積物抽取再利用之構想可行，規劃階段亦針對抽泥船可作業區域之淤積物進行鑽探調查，調查結果顯示，若抽泥船每年抽砂量達 64 萬 m^3 ，則 21~31 斷面淤積量可供抽取 50 年，可再利用之土石比例達 41.7%，總體積約為 1,549.2 萬 m^3 。爰此，推論該水域淤積砂泥再利用具可行性，抽泥浚漂作業位置規劃於 24~31 斷面（詳圖 7）。



圖 7 淤積性質調查結果

（資料來源：北水局，2014 阿姆坪防淤隧道淤砂清運模式可行性評估成果報告）

三、工程概要

(一) 防淤隧道

防淤隧道由石門水庫阿姆坪台地經溪州山至大漢溪，設施總長度約 4,486.30 m(不含橫坑)，主要設施包含進水口與通達道路、防淤隧道與橫坑、出水口與沖淤池與大漢溪護岸、淤泥貯留設施及其他附屬設施。其防淤隧道全長約 4,008.76 m (含橫坑 306.56M、主隧道 3702.2m)，施工開挖採新奧地利工法(NATM)。隧道前 210 m 為倒 D 型漸變段，自 0K+200 起至隧道出口為倒 D 型標準段，其隧道斷面寬 8 m×高 7 m，選擇倒 D 型的目的是將來可提供車輛通行，詳(圖 8)及(圖 9)。隧道縱坡由 10% 逐漸降至 2.86%，隧道內最大流速達 20.2 m/sec，設計流量為 600 CMS，容許最大流量為 700 CMS。



圖8 防淤隧道平面與縱斷面布置圖

(資料來源：北水局，2016阿姆坪防淤隧道工程—基本設計報告)

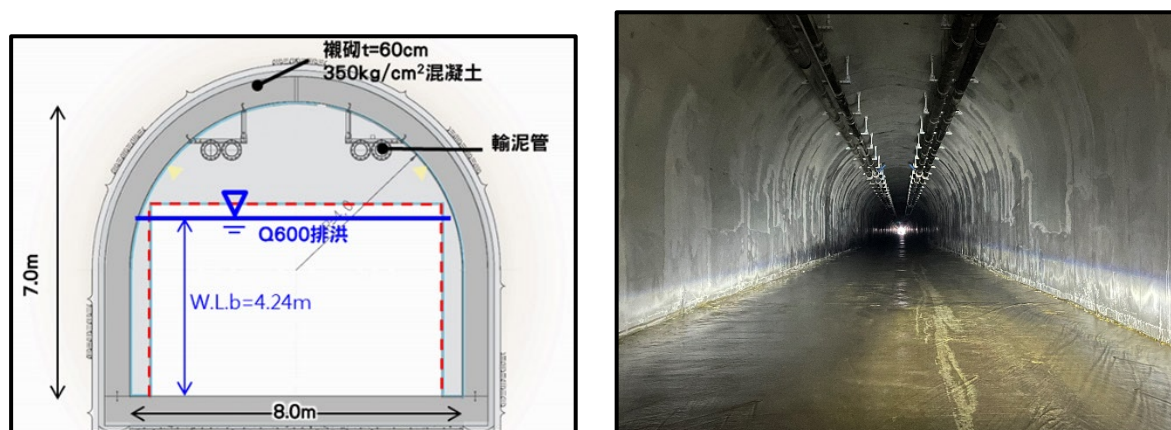


圖9. 防淤隧道縱斷面布置與現場完成圖

(資料來源：北水局，2016阿姆坪防淤隧道工程—基本設計報告)

此外，進水口及隧道在排洪沖淤時的操作需求，構造物設計重點如下：

1. 隧道設計洩洪能力為 600 CMS，但因容納操作風險，最大容許洩洪量為 700 CMS。
2. 確保隧道內所需的出水高和頂部抽泥管的安全，最大洩洪量時不可影響頂部抽泥管。
3. 為避免流量阻塞的發生，進水口形狀設計為流線型，銜接處的隧道口寬度擴大為 14.2m，使流線更平順。取水口結構如(圖 10)所示。

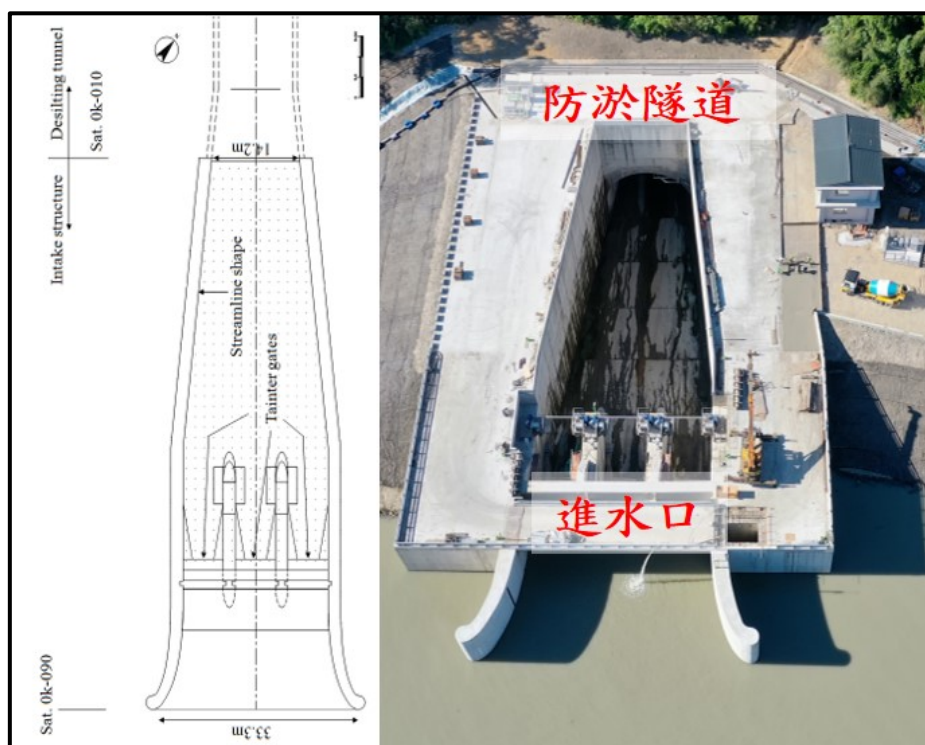


圖 10. 進水口平面配置

(二) 出水口及沖淤池

防淤隧道下游銜接出水口段及沖淤池；出水口段為長 83 m、寬 8 m、縱坡 4.22 %之明渠，下游銜接沖淤池。其功能主要是設置橫移門一座，以利後續清淤車輛由此進出隧道。另為提升沖砂效率，於規劃階段進行多種池體型式模擬，俾使池體收容量、沖淤效率取得最佳平衡，經過試驗後選擇目前之大三槽型式；沖淤池分別由漸變段、一般段及出水口段組成，全長計 619.61 m，縱坡 1%。漸變段係將池寬由 8m 等角度漸擴至 62m，於沖淤池一般段中設計 2 道中隔牆，形成 3 道寬度各為 20 m 之放淤槽體。依據水工模型試驗結果，此種大三槽型式其沖淤效率雖非最高，但因其容

量大，所產生之沖淤量為最佳(詳圖 11)。

沖淤池尾部之出水口段則設置三座弧形閘門進行控制放淤作業、沖淤操作時才開啟。特別一提的是，為配合三座沖淤槽體之設計，出水口弧型閘門為目前國內最寬(18m)的閘門；另因該閘門目的並非擋水而係擋泥，因此在結構設計上需考量擋泥之土壓力以及閘門提吊時淤泥於門扉上產生之摩擦力，其設計需考量之力學行為亦較為複雜，且製造精度要求極高(圖 12)所示。



圖 11 出水口及沖淤池配置



圖 12 沖淤池弧型閘門蓄淤現況

(三) 篩分設施

篩分設施主要係對阿姆坪地區抽取之淤積物進行篩分再利用，主要設計篩分出碎石(含碎木)、粗砂、細砂和淤泥，因為預估碎石之比例不高、且抽泥船作業將會夾雜碎木，因此並無利用價值，故主要是以篩分出粗砂和細砂等有價料，俾提供營建使用。泥砂篩分設施操作設備布置(圖 13)所示，主要設施包括有緩衝槽、振動篩、洗砂機、泥砂分離機及轉換槽等，所抽取出的泥砂粒徑分為 4 個級距：

1. 保留在 No. 4 (4.76 mm) 篩以上的礫石或木材。
2. 粗砂，通過 4 號篩保留在 18 號 (1.00mm) 篩上。
3. 細砂，通過 18 號篩保留在 200 號 (0.074mm) 篩上。
4. 淤泥，通過 200 號篩，貯存於沖淤池中。



圖 13 泥砂篩分設施操作設備布置

四、試運轉與減碳效益

(一)本工程在 111 年 6 月沖淤池完成弧型閘門無水試運轉後，就利用現有抽泥船開始進行沖淤池放淤 20 萬方，俾測試池體容量、閘門水密性等功能測試(詳圖 14)。9 月 3 及 4 日配合軒蘭諾颱風進行沖淤測試操作，除了測試出水口閘門在有泥水狀況下是否可正常操作外，進水口之弧型閘門亦進行全程有水試運轉及調校，確保進水口閘門可進行流量控制，本次沖淤現況(詳圖 15-1)及(圖 15-3)。本次沖淤操作依據規劃階段所擬定的操作原則進行，利用在洪峰來臨前之排洪操作進行沖淤(詳圖 16)。沖淤測試期間亦同步監測下游濁度變化，因本次沖淤操作時大壩排洪隧道也同時進行排洪，在大排洪水量稀釋下，全程下游濁度未超過 3000ntu，尚不影響鳶山堰取供水。但未來正式營運操作時，將可研擬搭配中庄調整池供水，俾同時進行沖淤及鳶山堰排空，有效進行防洪及水資源調度之聯合操作。



圖14 111年6月沖淤池完成放淤



圖15-1 進水口閘門放流



圖15-2 沖淤池沖淤



圖15-3 出水口閘門沖淤成果

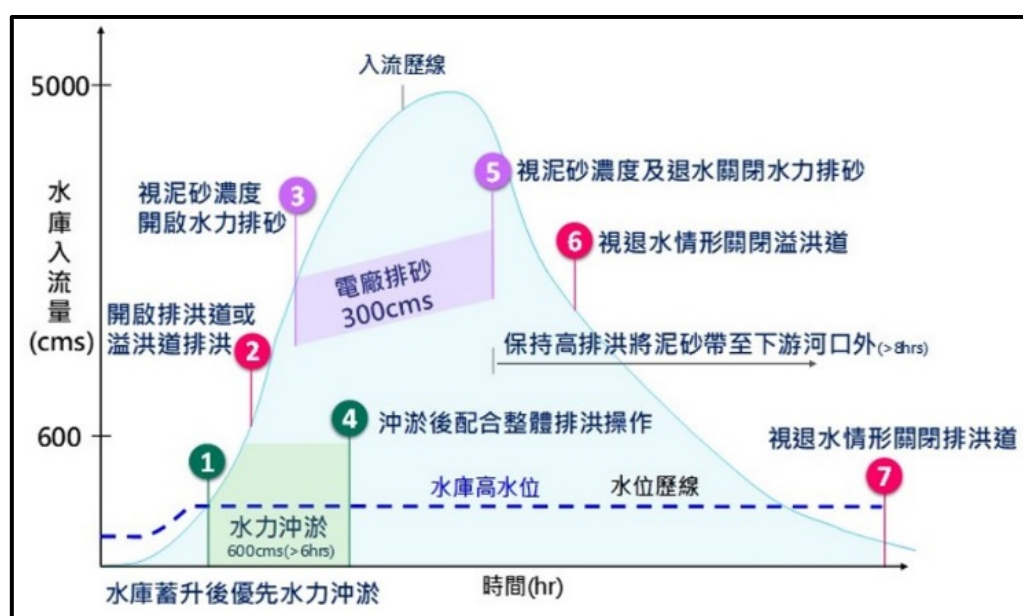


圖16 石門水庫颱風期間排洪排砂營運操作

(二) 節能減碳成效

本工程主要目的除了為了加速水庫清淤外，更希望能減輕現有清淤作業所遭遇的瓶頸。尤其是在清淤作業上的耗能與費用均希望有所突破與減省。因此也特別著重在工程本體以及未來營運如何節能減碳，其中在節能減碳的成效上，分成三大面向：

1. 規劃設計階段：採結構物優化減少隧道、沖淤池開挖面積 $235,215\text{m}^3$ ，整體混凝土用量減少 $63,356\text{m}^3$ ，合計減碳約 $23,321$ 噸，另工區內採土方挖填平衡(隧道開挖土方量共計 29 萬 m^3 ，工區內土方平衡減少運距 20

km)，估算約減少碳排約671噸。

2. 施工階段：提升混凝土配比優化，採用特殊混凝土配比，利用高爐石粉及飛灰替代水泥，減碳達約 25,673 噸，另外利用完工之隧道縮短上游至下游之土方運輸路徑（車行路徑 16km 縮至 4 km），使運輸車輛排碳減少 111 噸並降低對道路周邊居民的影響。
3. 營運階段：每年利用抽泥、篩分、水力沖淤減淤64萬 m³，與過去清淤採用車輛運輸台北港方式相較，每年可減碳5,760噸，相當於種植57.6萬顆樹，約為96座大安森林公園。

五、結論

為永續石門水庫之營運壽命與安全，解決水庫淤積問題刻不容緩。本工程嘗試採用複合式清淤的方式進行多功能防淤隧道設計，即是希望能更進一步突破目前的清淤瓶頸。本工程將於 111 年底完工，屆時不受天氣影響的清淤方式，將可使水庫淤積每年能穩定的去化，在水庫永續經營上絕對可發揮正面助益。

六、參考文獻：

1. 經濟部中央地質調查所(2014),「台灣地質圖說明書—桃園地質圖幅」。
2. 經濟部水利署水利規劃試驗所(2010),「石門水庫上游主河道分洪防淤工程初步規劃及水工模型試驗研究」。
3. 經濟部水利署水利規劃試驗所(2015),「石門水庫阿姆坪防淤隧道—水工模型試驗研究 103 年度成果報告」。
4. 經濟部水利署北區水資源局(2011),「石門水庫阿姆坪防洪防淤工程可行性規劃—地質調查專題成果報告」。
5. 經濟部水利署北區水資源局(2014),「石門水庫阿姆坪防淤隧道淤砂清運管理整體可行性規劃」。
6. 經濟部水利署北區水資源局(2014),「阿姆坪防淤隧道淤砂清運模式可行性評估成果報告」。
7. 經濟部水利署北區水資源局(2015),「石門水庫阿姆坪防淤隧道可行性規劃」。
8. 經濟部水利署北區水資源局(2016),「石門水庫防淤隧道工程計畫(第 1 階段) 阿姆坪防淤隧道工程—基本設計報告」。
9. 經濟部水利署北區水資源局(2017),「石門水庫防淤隧道工程計畫(第 1 階段)」。
10. 經濟部水利署北區水資源局(2019),「石門水庫水文化初探」。
11. 經濟部水利署北區水資源局(2021),「石門水庫防淤隧道工程計畫(第 1 階段) 阿姆坪防淤隧道工程—地球物理探測監測成果報告書」。
12. 經濟部水利署北區水資源局(2022),「石門水庫防淤隧道工程計畫(第 1 階段) 阿姆坪防淤隧道工程—計測紀實總報告」。Kondolf, G.M, Gao, Y., Annandale, G.W., Morris, G.L. Jiang, E., Zhang, J. Cao, Y., Carling, P., Fu, K, Guo, Q., Hotchkiss, R., Peteuil, C., Sumi, T., Wang, H.-W., Wang, Z., Wei, Z., Wu, B., Wu, C., Yang C.T. (2014)。
13. 水庫和受管制河流的可持續沉積物管理：來自五大洲的經驗。 Earth's Future, 2(5), 256–280 Author Surname C. 和 Author Surname D. 會議論文。 在會議記錄中，第 12-34 頁，澳大利亞悉尼，2014 年。

因應氣候變遷曾文水庫清淤策略

經濟部水利署南區水資源局/詹成富正工程司兼課長

曾文水庫的重要性

曾文水庫於 1973 年建成啟用，位於曾文溪流域上游，集水區面積約 481 平方公里，於完工時總蓄水量約 7 億立方公尺，為嘉南地區農業用水、發電、防洪及民生用水等需求提供水資源的重要基礎設施。

於水資源利用上，除民生用水外，曾文水庫目前以供給農業用水為大宗。供水方式係以發電放水後，透過曾文溪河道放流至下游東口堰，進入烏山嶺隧道後轉蓄烏山頭水庫，作為嘉南平原農業灌溉之主要水源，可供應嘉南地區第一、二期稻作，及春冬季甘蔗雜作等用水。特別是秋冬季節，因降雨少，農業灌溉仍須仰仗水庫供水。故水庫可蓄積多少水量進入枯水期，則是影響後續嘉南地區 85,424 公頃農作物生長的重要因素。

氣候變遷造成水庫之困境

然而，臺灣屬島國地形、南北狹長，主要山脈呈現南北走向，而源自山區的河流則成東西分流，礙於地勢的陡峭、季節性之雨量豐枯分佈不均勻，造成水資源蓄積不易，導致臺灣是全世界先進經濟體中，水資源可利用率最低的國家之一。

氣候變遷造成水庫營運的困境主要可由兩方面討論：

一、降雨集中，於豐水期時降雨過劇，水庫可蓄積之容量有限：

經統計，自 1949 年至 2020 年平均降雨量約為 2,507mm/年，此降雨量約為世界平均降雨量 973mm/年之 2.6 倍。但是，台灣每人平均分配用水量約為 4,074m³/年，此為世界人均年用水量 21,796m³/年的 1/5 不到。倘水庫庫容得以提升，相信經由適當的水資源存蓄與調度，可以有效提升台灣的年均用水量。

另一個降雨集中問題，則是短期間的強降雨，易造成集水區地層無法及時宣洩，使得孔隙水壓上升，在集水區地形陡峭之條件下，容易誘發土石流、坡地崩滑等地質事件。此類地質事件，往往將大量土沙往集水區及水庫前庭輸送，造成水庫淤積，減少庫容，進而降低枯水期水資源調度的餘裕。經統計，曾文水庫目前有效庫容約 5.1 億立方公尺，而水庫常態性年入砂量約為 510 萬立方公尺，為讓水庫能夠持續達到穩定供水之狀態，如何達到土砂進出平衡是當前重要課題之一。

二、枯旱期越來越長，有限的水庫庫容，需撐過比以往更長久的時間：

受到氣候變遷影響，自 2011 年至 2021 年以曾文溪馬頭山雨量站統計，月累計雨量超過 200mm 之月數，每年未超過 3 個月，表示近年降雨皆集中於某幾個月。另外，由月累積降雨分布圖可知，於 2017 年以後，月累積雨量未超果 200mm 之時間越來越長，也就是說，水庫在水源進帳有限的情況下還要因應更長的枯水期供水，這些都是增加水庫水資源調度的困難度。

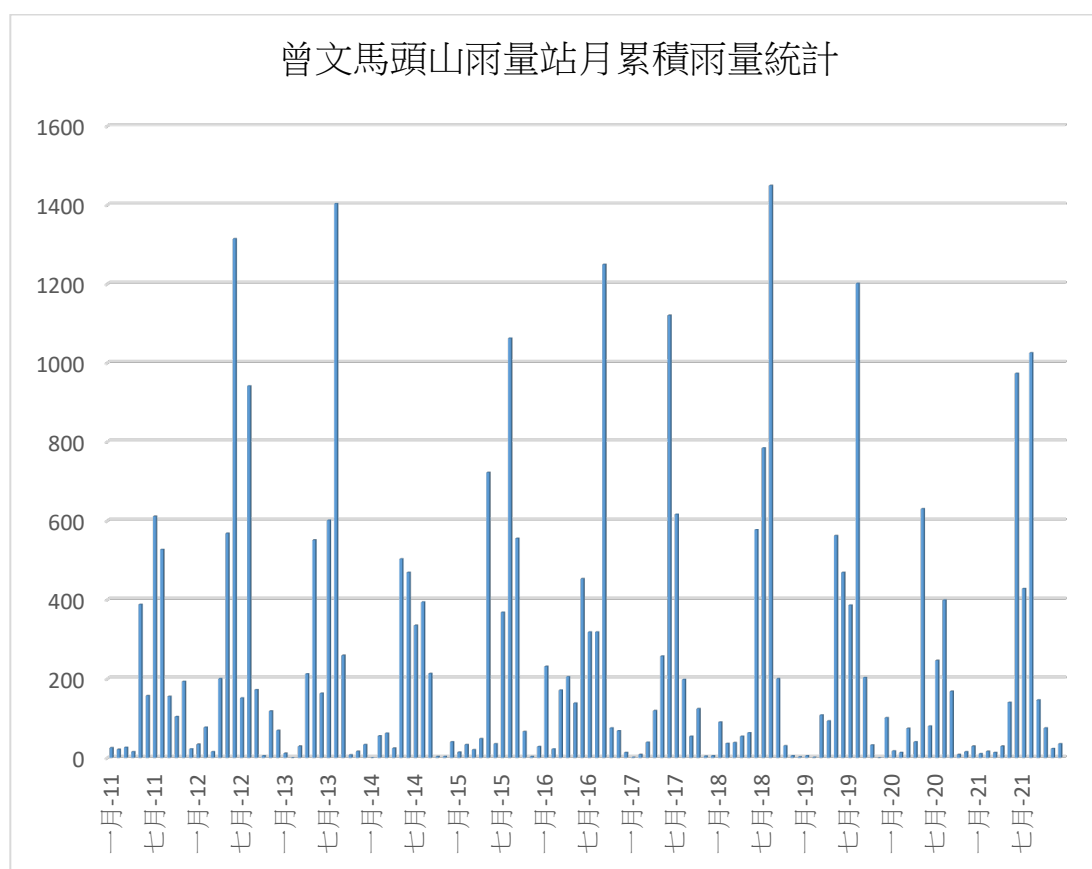


圖 1. 曾文水庫上游馬頭山雨量站月累積雨量統計圖

因應氣候變遷影響，可以預見未來水庫操作及水資源調度的困難度將越來越高。除了更精緻的水資源調度策略外，維持水庫庫容也是重要的工作。以目前曾文水庫有效庫容約 5.1 億立方公尺，若降雨情況許可，每年約有 1.4 次左右的操作空間，若要確保未來曾文水庫可持續穩定供水，有幾個問題必須面對，包括水庫每年持續入砂量約 510 萬立方公尺、嘉南地區持續增加的用水需求，以及持續降雨時間縮短等挑戰。

曾文水庫既有防淤設施及操作策略

依據水庫清淤策略，包括集水區上游河道之攔砂、陸挖；中下游之庫區陸挖及庫區抽泥；以及利用異重流條件之水利排沙。在常態條件下，對於水庫庫容之增加，抽泥及陸挖為最直接有效的方法。曾文水庫自莫拉克風災以後，陸續完成各項防淤、清淤設施，包括上游各處攔砂壩及河道整治、攔木設施、壩前的永久河道放水道改建排淤隧道、以及防淤隧道等。庫區抽泥部分，目前已有於前庭湖域布設臨時性輸泥管以及壩前碼頭整理，以供抽泥船進行抽泥、輸泥作業，庫區陸挖則須配合水庫低水位條件才可辦理。

依據上開設施功能及清淤規劃，上游河道陸挖部分，受限於水庫水位以及地形影響，可清淤數量較難掌握，且山區環境大量土石運輸易造成環境及山區交通衝擊，而且也有成本過高問題；水庫前庭部分，目前永久河道放水道排淤操作，若水情可配合每年約可達 46 萬立方公尺之排砂量；防淤隧道部分，依據設計能力及水情條件配合，每年排砂量約 100 萬立方公尺。水庫之水力排沙，須配合高水位情境，以及異重流發生時機方有較佳之排沙效果；庫區抽泥部分，經過管理單位這幾年的努力，每年清淤量約可達 315 萬立方公尺，上游庫區機械陸挖部分每年約 50 萬立方公尺，依此估算若每年可順利操作水力排沙，則約略可以達到入砂與清淤平衡之狀態。若水情條件不佳，水力排沙無機會操作時，則每年約有 146 萬立方公尺之來沙量將持續影響水庫庫容以及挑戰水庫永續經營之目標。

放水渠道及擴大抽泥設施規劃

自 2020 年以後，水情條件持續不佳，可操作水力排沙的機會並不多見，未來若要保持維持水庫庫容，讓水庫可以用續經營，於清約策略上採受水情限制較少之擴大抽泥方式應是較為可行之方案。然而，倘若每年真得以擴大抽泥方式清出數百萬立方公尺之淤泥，則將面臨的另一個課題是水庫清出之淤泥堆置問題。以目前水庫下游河道及交通動線，若要遠距運輸至河口或其他地區堆置，受限於交通競爭、環境干擾以及鉅額運費等因素，此方案可行性較低。若改採利用大壩下游河道暫置，並俟豐水期時採用水力排沙或大壩洩洪之作用，藉由河道水力輸沙，將暫置之淤泥帶至下游補充河道及河口沙源，評估此方案之清淤成本、環境影響以及節能減碳面向考量，屬相對可行之方案。

曾文水庫規劃採用擴大抽泥方案時，則有以下幾個問題尚須解決：

一、湖域擴大抽泥電力不足問題，受限於既有配電容量，無法增加設備及擴大範圍：

曾文水庫現況抽泥範圍為取水斜塔前扇形 120° 半徑 500 公尺內為主(斷面 A-02)，以維持進水口前方足夠洩降空間後，再逐步延伸至半徑 1,000 公尺範圍。清淤系統包含抽泥泵作業浮台(含抽泥船、抽泥平台、高壓沖洗泵、抽泥泵、加壓泵等)、沉木打撈作業台(含主吊抓斗、吊車吊籠等)、水域輸泥管(與高壓電纜共構布置)及陸域輸泥管。

未來受氣候變遷影響，需要擴充水庫庫容，抽泥範圍則須再往庫區更上游延伸，由斷面 A-04 往上游延伸至斷面 A-14，初估範圍 740 公頃(如圖 2)，以因應氣候變遷、增加水庫庫容，以利於因應越來越長的枯水期。而依此需求規劃之擴大抽泥設施，以目前既有供電系統尚不足以配合運作，故須先針對湖域擴大抽泥需求之供電基礎設施改善及進行增建。

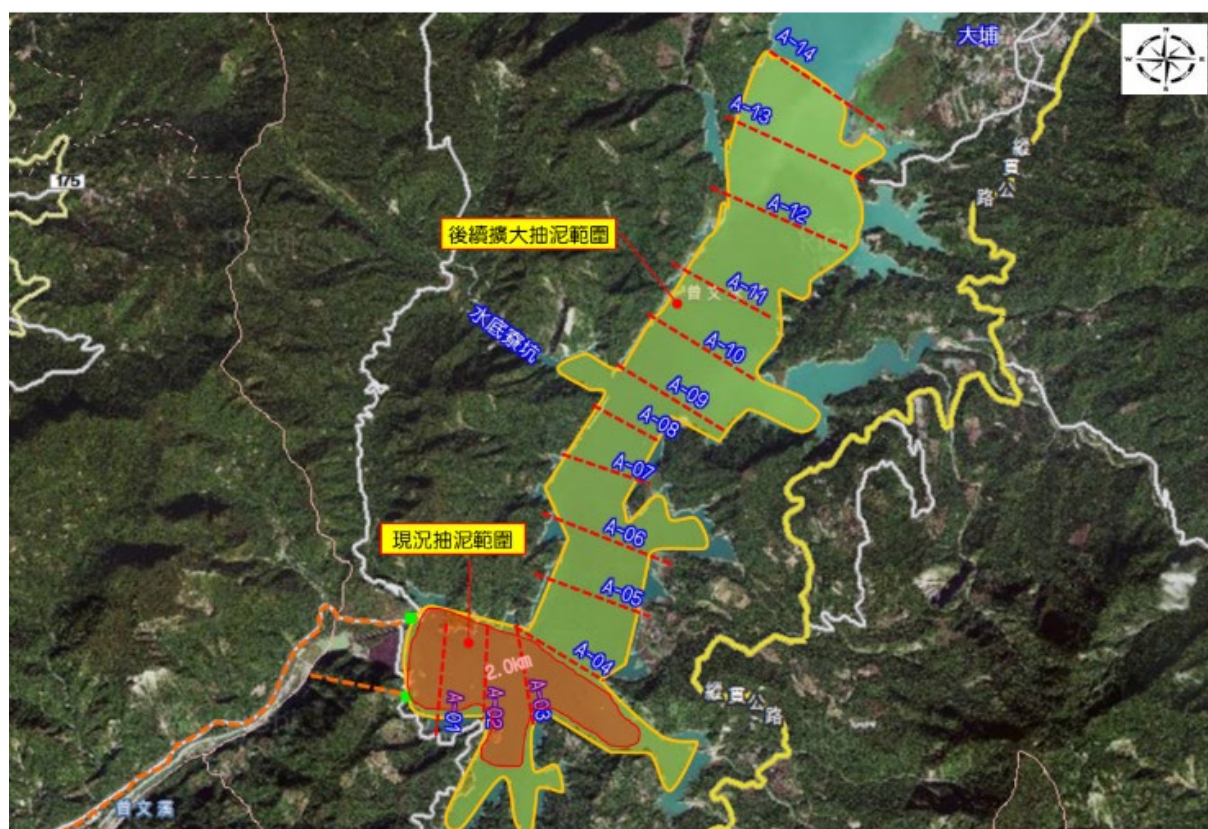


圖 2. 曾文水庫既有抽泥範圍及預定擴大抽泥範圍

二、壩前碼頭改善，延長抽泥及清淤輸泥船可靠泊時間：

曾文水庫庫區主要陸挖區域位於大埔壩下游至上外埤間，受限於淤積層出露水面時間，依往昔水庫水位變化，每年可清淤時間僅約三至四個月，每當五月水位上升至約 EL. 220m 後，即無法作業。另因 98 年後，曾文水庫庫容產生劇烈變動，長期而言平均水位介於 EL. 220m 至 EL. 190m 之間，其中每年 9 月中旬至翌年 5 月上旬為水位下降期，5 月至 7 月為水位上升期，7 月至 12 月處於豐水期及高水位期。現況船運時間受水位影響，水位低於 EL. 210m 時，在壩前碼頭使用上會有限制條件存在。若以莫拉克後各年度水庫水位歷線為標準，最短可運輸時間為一年中僅有 95 天可進行水運輸泥，期間約為 8 月至 12 月。故船運輸泥時間及受到限制，因此改善壩前碼頭，讓水庫水位於 E. L. 190m 至 E. L. 220m 間皆可使運泥船靠泊，增加每年的清淤時間。

三、淤泥堆置場域不足，及改善下游河道輸水與淤泥暫置衝突問題：

曾文水庫與烏山頭水庫聯合運用方式係透過曾文溪河道輸送發電尾水至下游東口堰，再經由烏山嶺輸水隧道送至烏山頭水庫。為因應後續庫區抽泥量增加，可規劃於壩前與烏山嶺隧道東口間之曾文溪河道建置放水專用渠道(如圖 3)，於河道內創造空間以作為淤泥暫置使用。配合每年颱風豪雨事件調節性放水 2~3 次，即可去化暫置淤泥。此方案除可解決河道淤泥堆置與輸水需求衝突問題外，另一方面也可解決既有河道輸水滲漏問題，藉由專用輸水渠道建置，降低曾文及烏山頭水庫間輸水操作之滲漏量，使得水資源能夠更有效利用。另外，藉由專用渠道與沿線設置的箱涵網絡，可再收集曾文溪河道兩側之額外水源，可少量達到開源效果。

上開專用輸水渠道建置方案，預估可增加淤泥堆置空間約 350 萬立方公尺。考量擴大抽泥需求，於東口堰往下游至曾文一號橋間亦可規劃堆泥區(如圖 4)，此區域預估可增加淤泥堆置空間約 220 萬立方公尺，使得庫區抽泥潛能，每年最大可擴增至 570 萬立方公尺，如此比對每年入庫來沙量約 510 萬立方公尺，可達水庫維持庫容、永續利用之目標。



圖 3. 堆泥場域與曾文及烏山頭水庫輸水衝突改善方案



圖 4. 淤泥堆置範圍規劃

四、降低動力輸泥及車輛輸泥規模，既有輸泥管擴充及延伸至 1 號橋：

既有輸泥管目前為 2 根 400mm 管徑，且目前僅布設至曾文 2 號橋上游側，評估跨大抽泥計畫啟動後，已難以消化未來庫區擴大抽泥之出泥量。為有效利用所規劃的淤泥堆置空間，以及能夠藉由地形條件採用重力輸泥方式，達到節能減碳效果，規劃自壩前碼頭增設兩根管徑 500mm 之輸泥管，沿著河道空間往下游布設，並延伸至曾文 1 號橋，全長約 10.5 公里。並於沿線適當位置留設數處放泥口，以提高淤泥堆置操作的彈性。

計畫效益

本計畫完成後，曾文水庫透過清淤浚漂的改善，將可延長水庫壽命。本計畫目標以維持庫容為前提，再配合庫區防洪防淤隧道聯合操作，提高整體水力排砂效率，可大幅降低清淤土方暫置與去化處理之社會成本，不僅可達成淤積零成長目標，並使水庫永續利用具可行性。

由清淤量評估，每年約可增加 306 萬立方公尺之水庫庫容空間，以曾文水庫年運用次數約為 1.4 次計算，概估每年可增加 428 萬立方公尺的可用水源。對於農業、民生及水力發電上皆可提升效益。此外，另一個計畫價值則是放水渠道的建置，可降低曾文溪河道輸水損失，部分文獻指出曾文溪河道輸水損失率最少約 5.3%，若以每年 7 億輸水量估算，渠道建成後每年可減少水資源損失約 3,700 萬噸以上。

結語

在目前難以開發新水庫的前提下，要讓既有老舊水庫維持其功能，還要面對氣候變遷所帶來水資源管理的挑戰，擴大抽泥、增加水庫庫容應該是相對正確的一個解方，若再輔以精緻的水資源調度及各水庫聯合運用，相信面對氣候變遷的挑戰，必定可以經營得更有自信。

參考資料

1. 經濟部水利署水利規劃試驗所，曾文水庫防洪防淤整體綱要計畫，2012。
2. 經濟部水利署，臺灣水文年報，2011 至 2021。
3. 經濟部水利署，曾文水庫放水渠道及擴大抽泥工程計畫，2021 年。
4. 經濟部水利署南區水資源局，曾文水庫主流河道治理減淤及庫區中上游清淤方案規劃，2018 年。
5. DPRI，28th-IHP-TC-textbook
(Integrated Basin Management under Changing Climate)，2018。

曾文水庫水質特性與水庫管理探討

經濟部南區水資源局養護課/陳志洋
國立成功大學永續環境實驗所/黃君喆

關鍵字：水質、異重流、水庫清淤管理

摘要

隨著氣候變遷趨勢，臺灣降雨型態已逐漸改變，乾旱與短期強降雨頻率皆逐年增加，在臺灣有許多水庫中都有淤泥問題，而臺灣水庫防淤技術首重異重流排砂，此篇以長期水質監測的角度來分析異重流的可行性。

曾文水庫環境簡介

1-1 地理位置

曾文水庫位於嘉義縣大埔鄉境內，壩址座落於嘉義縣大埔鄉與臺南市楠西區交界的柳藤潭谷地，詳見圖 1。曾文水庫有效容量為標高 230 公尺，有效蓄水量 50,897 萬立方公尺，為臺灣地區蓄水量最大之水庫，滿水位面積達 17.14 平方公里。集水與蓄水範圍包括嘉義縣大埔鄉、阿里山鄉、番路鄉；台南市楠西區、東山區；高雄市那瑪夏區等六個行政區，集水區面積約 481 平方公里。曾文水庫正常滿水位值，自 5 月上旬至 8 月下旬為標高 228 公尺，9 月上旬至 9 月下旬為標高 229 公尺，10 月上旬至次年 4 月下旬為標高 230 公尺。

1-2 水文環境

曾文水庫集水區以曾文溪上游為主流，貫穿集水區中央，主要支流包括長谷川溪、伊斯基安那溪、達得安溪、沙力基溪及草蘭溪等，詳見圖 2。集水區內主流長度 56.2 公里，主支流總長 213.1 公里。曾文水庫集水區內全區地勢陡急，愈往上游，地勢益增急劇傾斜，區域內除樂野、達邦、大埔等數處小型盆地外，餘均屬山地。河床亦因地勢關係，呈現陡急現象，沖蝕作用旺盛，輸砂作用強烈，使得河川懸浮固體物經常偏高。全區平均標高約

963 公尺，河源標高在 2,609 公尺，平均坡度為 54.4%，源頭附近坡降達 1/3，溪流平均坡降達 1/65，壩址附近緩為 1/186。

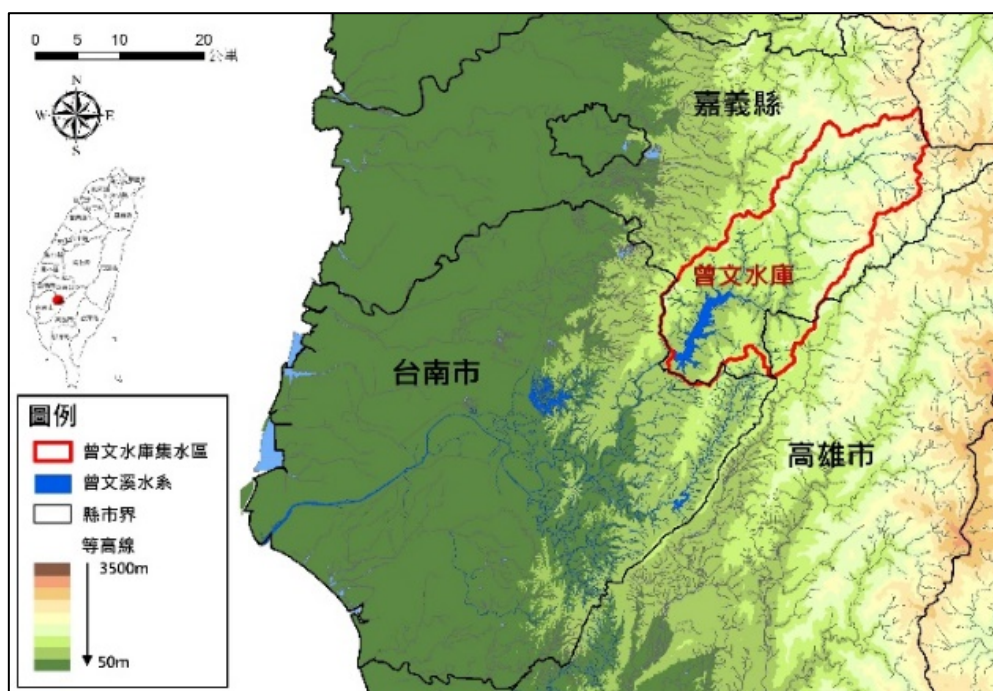


圖 1 曾文水庫地理位置

資料來源：農委會水土保持局曾文南化烏山頭水庫集水區保育治理網站

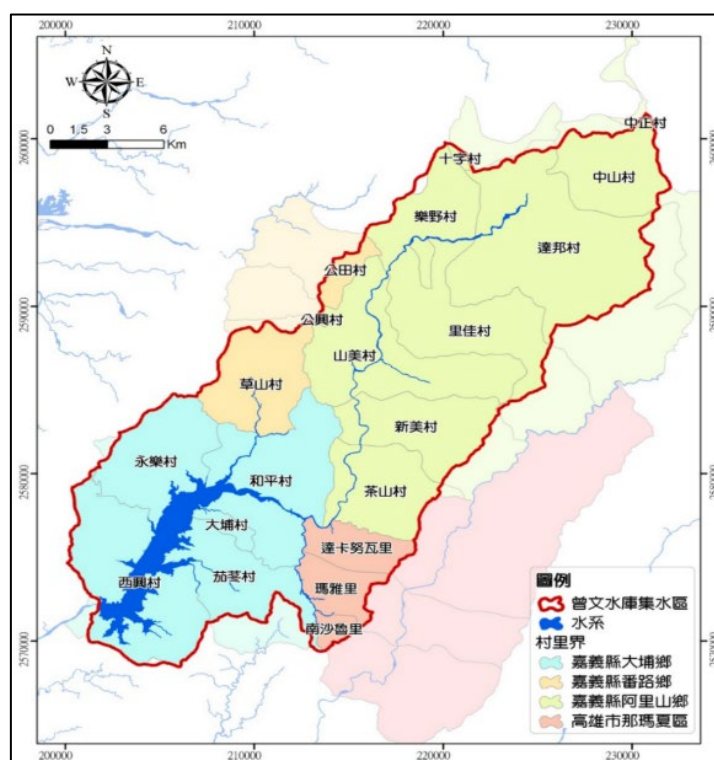


圖 2 曾文水庫集水區水系

資料來源：曾文水庫集水區多元尺度環境調查與保育治理成效評估計畫

1-3 地質土壤

曾文水庫集水區呈斜長四邊形，縱長約 41 公里。平均寬度為 8.6 公里，西南方向最寬處可達 17 公里。本集水區位於新第三紀沉積岩所組成之西部麓山帶地質區，主要地層有中新世的達邦層、中崙層與上新世的烏嘴層、澧水溪層及六重溪層。其中達邦層、中崙層、烏嘴層主要出露於中、上游集水區，庫區附近則以澧水溪層及六重溪層為主。區內之地質構造以褶皺為主，有多條背斜與向斜通過。達邦層由黑灰色堅硬頁岩組成，中崙層主要由灰黑色頁岩和砂質頁岩組成，局部夾有泥質砂岩，地面和地下剖面全後達約 500 公尺。烏嘴層由灰色砂岩和泥質砂岩組成，夾有少量頁岩和砂質頁岩，全厚為 650 公尺。澧水溪層主要頁岩，砂質頁岩夾泥質砂岩的互層與石灰岩礁凸鏡體組成，全厚為 450 公尺，六重溪層主要為砂質頁岩和泥質砂岩，全厚為 760 公尺。土壤為第三紀岩，係風化而成之定域土，僅於溪流兩岸與集水區下游地區偶有小部分崩積土和沖積土(圖 3)。由於第三紀岩質較脆弱，易於風化。因此小溪流兩陡峭處崩塌地甚多，土壤沖刷亦最劇烈，尤以暗灰色砂質頁岩為甚，故豪雨之後溪水多呈混濁之灰褐色。

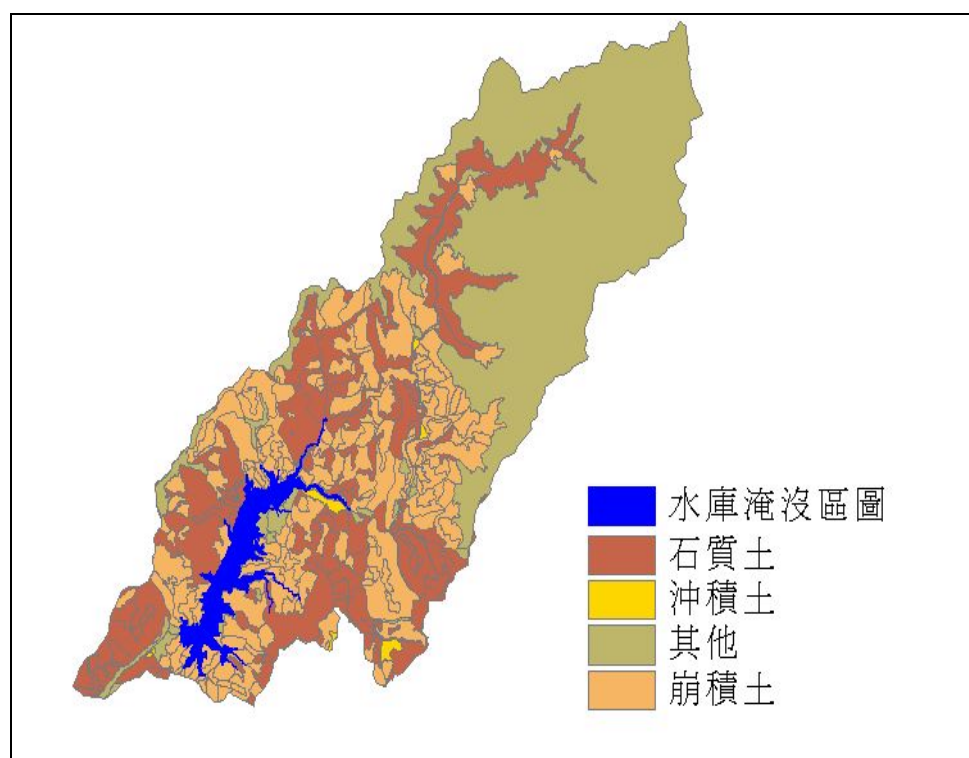


圖 3 集水區土壤分布

曾文水庫是台灣儲水量最大及樣本數量(含分層)最多的水庫，從表 2-6-1 可看出曾文水庫檢測項目中合格率皆高於 90%。最低者為懸浮固體物(SS)91.4%，SS 未符合規範皆發生於非表層及集水區測站，曾文集水區測站屬河川類型，因坡度陡急水流較強勁，河川泥沙易捲起。當流至庫區時雖有沉降效果，但同時水流引起庫區底質上揚，尤其是庫區與河川交會處最為明顯，若遇枯水期水深常僅 10 公尺以內，其懸浮固體量為庫區內監測點平均濃度最高測點。另從數據來看庫區水位越高(儲水量多)表層與底層距離加大，兩者間 SS 濃度差異越高。在表層趨勢變化，上游(河川水流入處)、中游及大埔站之表層 SS 高於壩頂附近進水口處表層，且隨著蓄水量降低差異越大，此說明曾文水庫進水口水質較不受水量影響而呈現穩定狀態。

溶氧部分，影響水體溶氧因子包含物理性(溫度、壓力、流力等)、生物性(微生物、藻類活動)，其相對應產生空間性(深度、傳輸等)的溶氧差異。曾文水庫溶氧未符合規範常出現在非表層測站，研判為季節變化上下水體產生水溫差，水體不易對流出現分層，底質有機物持續耗氧分解造成底層溶氧快速降低。

總磷係構成土壤肥分及動植物原生質之要素，隨降雨地表沖刷拌隨懸浮固體進入水中，導致水體總磷含量增加；錳為大地元素成份之一廣泛存在於土壤中，常附著於懸浮微粒上，當底泥揚起會導致錳與懸浮固體數值同步偏高。

(圖 4)為曾文水庫近 3 年之 WQI 值歷線圖，從歷年 WQI 值及等級分類可知，曾文水庫區內水質大多屬良好至優良等級，表層指標數較低者為上游站及大埔站表層；非表層指標數最低為大埔站底層，整體而言曾文水庫水質屬良好等級，集水區河川測站則屬中度至優良等級。

透過主成分分析結果，影響曾文水庫主要測項有濁度、懸浮固體、錳、總磷、鐵等項目，上述項目可再進一步歸納為沖刷性影響。集水區地質偏屬第三紀岩質，較脆弱易於風化，土壤沖刷亦最劇烈，尤以暗灰色砂質頁岩為甚，故豪雨之後溪水多呈混濁之灰褐色，此現象連帶造成錳、總磷之升高。

因此如何有效排砂降低天然淤積維持庫容是曾文水庫未來最大的挑戰。

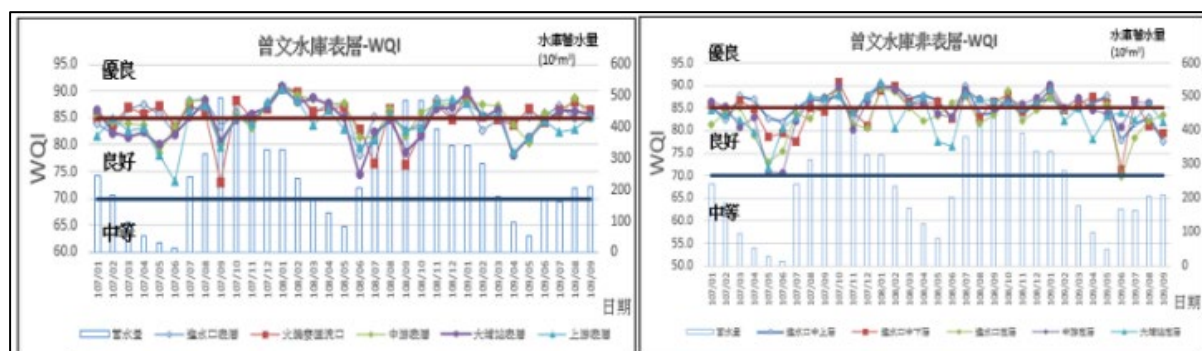


圖 4 曾文水庫近 3 年之 WQI 值歷線圖

2-1 水質特性

水溫水深分佈

在長年監測的情形下(圖 5)，團隊發現曾文水庫因水溫的關係，有潛在的溫差異重流存在，由 108~109 年數據統計 420 個採樣結果、觀察水深與溶氧的相對關係。在 1 月曾文水庫出水口屬於同溫層，溫度變化不大；5 月屬於斜溫層，溫度隨深度迅速下降；9 月屬於斜溫層，約在水下 40 米左右之深度，水溫有逆溫翻轉的現象，使溫度趨於穩定。

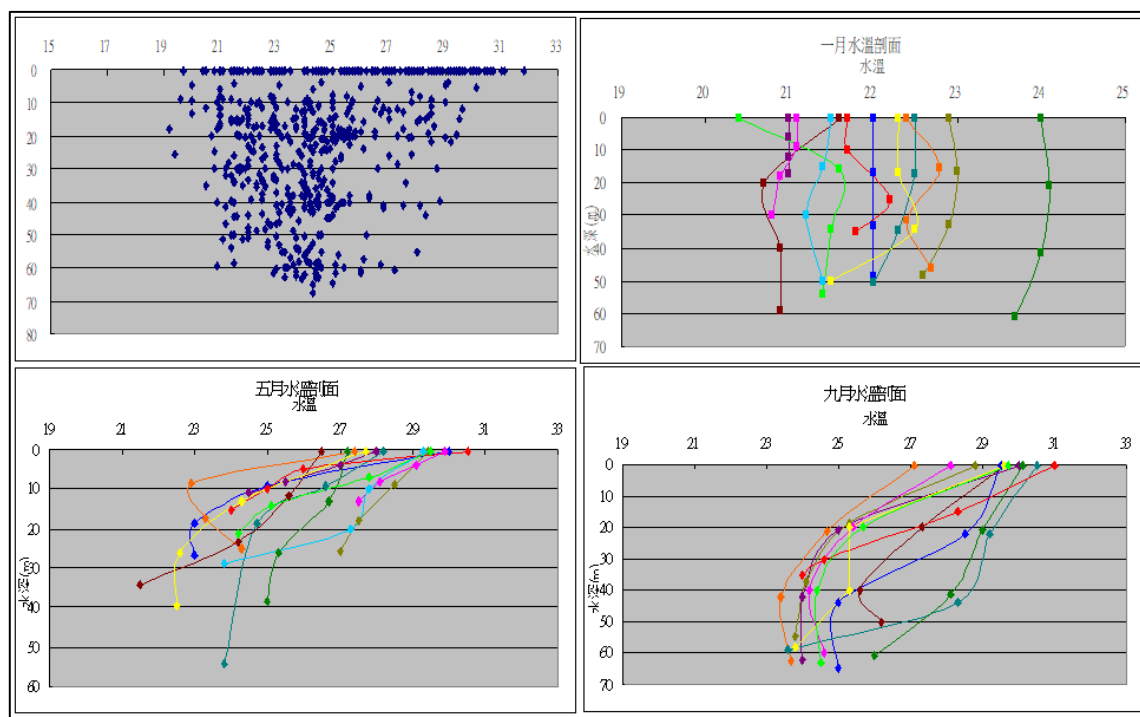


圖 5 溶氧與溫度數據統計圖

溶氧與葉綠素 a 不同水溫梯度下的不同深度變化圖中(圖 9)，逆轉層屬於平均溶氧較高，但葉綠素-a 平均濃度較低，沒有正相關。上述證明，水中溶氧產生與葉綠素-a 無明顯關係，

溶氧 mg/L		深度	1	4	2	3
		平均值	1.1m	15.7m	27.0m	39.0m
1	斜溫	7.1	7.9	4.5	4.9	5.7
2	混合	6.3	7.3	4.9	4.9	5.3
3	逆轉(翻轉)	6.8	7.1	6.5	6.7	6.9
4	同溫	5.5	6.9	6.0	5.0	5.7

葉綠素a ppb		深度	1	4	2	3
		平均值	1.1m	15.7m	27.0m	39.0m
1	斜溫	3.8	4.4	2.3	0.5	2.6
2	混合	4.2	5.0	3.2	2.5	3.9
3	逆轉(翻轉)	1.8	2.2	1.8	1.7	0.9
4	同溫	1.9	3.3	1.9	1.3	1.2

圖 9 溶氧與葉綠素-a 不同水溫梯度濃度分佈

進一步確認分析藻類的營養狀態，硝酸鹽氮與總磷不同水溫梯度下的不同深度變化(圖 10)，總磷及硝酸鹽氮在逆溫層並無明顯較高，對於藻類的維持並不顯著。

硝酸鹽氮		深度	1	4	2	3
		平均值	1.1m	15.7m	27.0m	39.0m
1	斜溫	0.578	0.529	0.782	0.738	0.391
2	混合	0.556	0.489	0.636	0.771	0.598
3	逆轉(翻轉)	0.558	0.569	0.533	0.574	0.609
4	同溫	0.767	0.535	0.780	0.815	0.896

總磷 mg/L		深度	1	4	2	3
		平均值	1.1m	15.7m	27.0m	39.0m
1	斜溫	0.030	0.030	0.028	0.040	0.021
2	混合	0.020	0.022	0.018	0.013	0.023
3	逆轉(翻轉)	0.018	0.021	0.017	0.017	0.016
4	同溫	0.024	0.020	0.030	0.022	0.017

圖 10 硝酸鹽氮與總磷不同水溫梯度濃度分佈

在多維水質模式-觀測值與模擬值的差異分析，此 40m 處溶氧會較高的現象，值得進一步的瞭解。主要因水庫內的治理十分不易，若目標為確保水庫底層的喜氧狀態，將可避免底層厭氧所造成磷酸鹽的溶出或部份污染物的釋出。

小結

平時監測即有形成所謂的異重流，並非僅止於颱風或暴雨造成。異重流可能的形成原因有上游集水區的進流水溫較低、流速快溶氧高水庫的底部的坡度所造成水深造成不同水壓的密度差異、排洪或洩水。

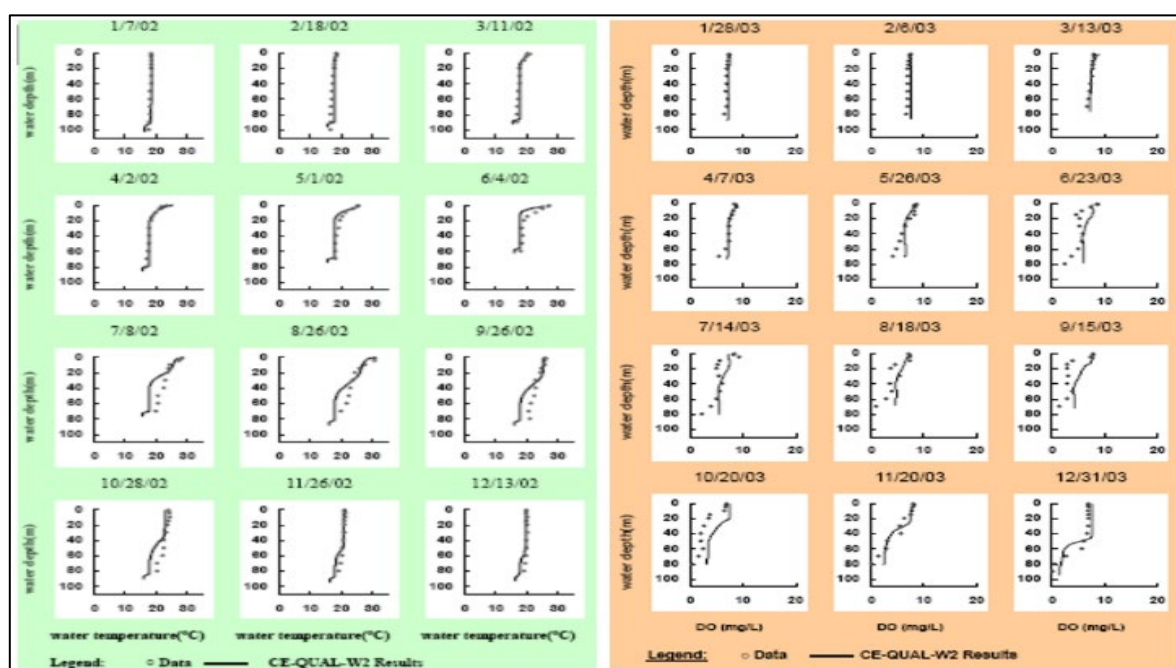


圖 11 多維水質模式-觀測值與模擬值的差異分析

2-2 水庫管理探討

考量水質特性及淤砂問題，異重流排砂已納入水庫除淤的實際用法，目前針對水庫淤泥問題，水庫清淤管理分為三個主軸，集水區治理計畫、庫區清淤計畫、下游放淤計畫。

集水區治理計畫主要水庫保育實施計畫採取「植樹防砂保土」、「監測巡查護水」、「削汙減肥保源」、「分級分區管理」四大策略，推動 16 項具體工作項目，以達成水庫淤積減量及水庫水體水質改善之目標，計畫包含集水

區治理工程生態檢核、集水區衛星影像監測暨巡查管理、水庫庫區與集水區水質檢驗分析、集水區保育治理推動綜整服務、淤積測量暨集水區主流河道斷面及地形測量工作等。



圖 12 曾文水庫主流河道陸挖清淤

資料來源：鄰波南水

109年度曾文水庫集水區主流山美段福美吊橋下游左岸河道護岸工程

榮獲

經濟部水利署

第12屆優良工程(B類)佳作

護岸以複式斷面形式設計，下層採RC護岸結構以抗水流衝擊，上層以現地採取之塊石鋪排護岸，大幅減少混凝土用量，減碳約1,070噸。

護岸背面回填河道疏通土砂，護岸基腳及護坦拋填河道篩選之塊石，除可維護河道邊坡穩定，又可減少土砂入庫，延長水庫壽命。完工後總計去化約41,000立方公尺之淤砂。

保留濱溪林帶並設置生態廊道，營造野生動物友善環境。

保留河道大石，維持河溪棲地多樣性，確保水域生物的生存空間。

採用通透性工法，營造動植物生長、棲息的環境。

完工後塊石之間的縫隙及護岸回填區已有多種原生植物自然萌發綠化，使工程融入自然景觀。

圖 13 集水區河道護岸工程

資料來源：鄰波南水

庫區清淤計畫由多項工法同時進行水庫的清淤行為，包含蓄水範圍(大埔橋下游)淤積清理作業、抽泥作業、首創象鼻引水鋼管工法放水渠道及擴大抽泥工程，在管理政策方面，配合防汛整合與防洪排砂運轉決策併行，同時兼顧曾文水庫大壩的安全。

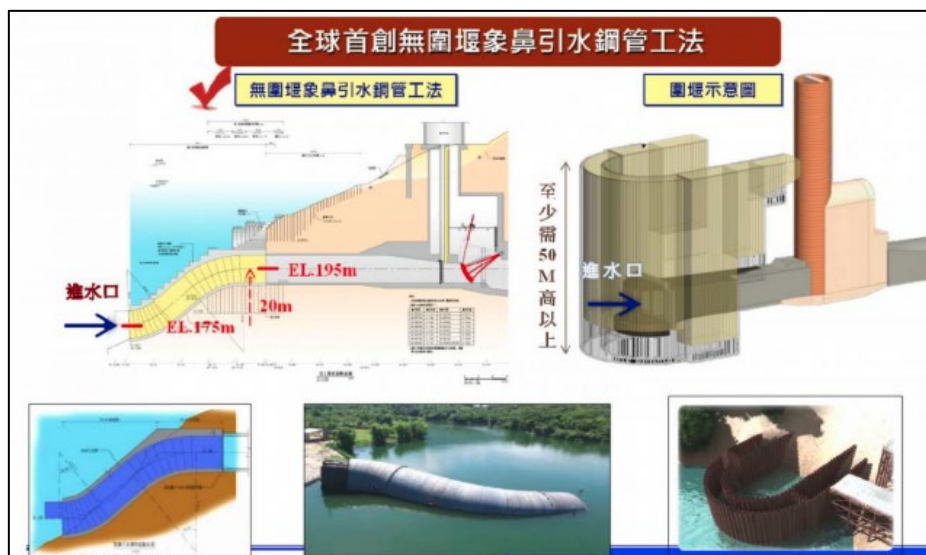


圖 14 曾文水庫象鼻引水鋼管工法



圖 15 曾文水庫抽泥作業

在曾文水庫的放淤處，重點為是否對於下游河道變遷影響，另一方面在放水的即時警報及地震監測系統有相關維護計畫。

排砂方式

水力排砂係利用水流自身的力量，將當次洪水來砂或前期淤砂排出庫外的手段。故水力排砂的優勢為不要考量淤砂的後續處置措施，以及將原本上游的土砂回歸至下游河道。水力排砂可藉由水庫操作方式(空庫排砂、洩降排砂、洩洪排砂及異重流排砂)以及工程方法(水壓吸引排砂與繞庫排砂)來達成目的，以下概述各水力排砂方式：

- 1、空庫排砂：於洪水期將庫水全部放出藉以帶走庫內之淤泥，效果甚佳，但因須空庫，隱含排水時下游淹水及庫容蓄水不足之風險。因此法將上游原屬河道內之泥砂直接帶給下游河道，對下游河道之泥砂補注及生態平衡有正面之影響。
- 2、洩降排砂、洩洪排砂：於洪水期或高水位時，開啟閘門將庫內之淤砂帶走，此方式亦甚經濟效果亦佳，但因排除已淤積之泥砂所需水量及水位甚大，必須詳細評估考量水庫本身的功能及供水標的。
- 3、繞庫排砂：於水庫上游側興建攔砂壩及排砂隧道將泥砂截至水庫下游側。此方式不須考慮水庫之高低水位，同時因將上游原屬河道內之泥砂帶回給下游河道，對下游河道之泥砂補注及生態平衡有正面之影響，除了工程設計施工技術層面較高，建設費用昂貴外，效果似乎甚佳，值得納入規劃設計探討。
- 4、異重流排砂(渾水排砂)：為利用洩流底孔將潛流至大壩前之高含砂量渾水排出水庫之一種清淤方式。若渾水含砂量愈大、流速愈小、水深愈大，便愈容易形成異重流，而異重流形成尚需有源源不斷之渾水補充，而入庫渾水一旦停止，則庫內異重流很快停止運移，而形成渾水潭。又異重流並非每次洪水均會發生，因此只能排出部份洪水之來砂，應視為一輔助性之清淤方式，無法僅依靠此一排砂方式來維持長期有效庫容。到達壩前的異重流，若不能全部排出庫外，結果在清水下面滯蓄形成渾水潭，渾水潭內的泥砂沉澱很慢，有相當長的時間保持較高的含砂濃度。因渾水係由懸移載所形成不易沉降，此時將混濁之庫水排出，可提高排砂效率，降低渾水於壩前淤積。

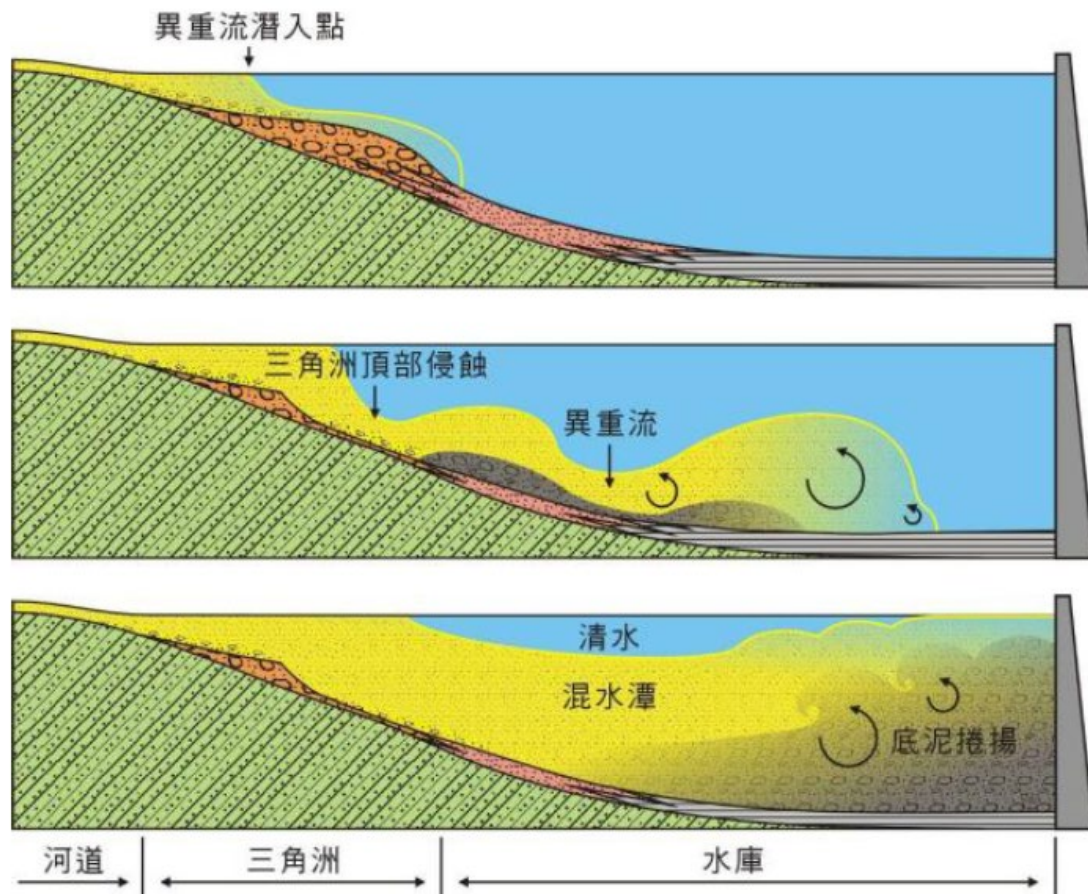


圖 16 庫區濁水形成示意圖

(摘自謝正倫等，2006)

異重流排砂使用時機：

根據異重流潛入機制分析與模擬系統研發應用(李豐佐)，根據異重流潛入點前後之清濁交界顏色不同或是利用現場漂流木聚集位置進行潛入點判定及密差福祿數計算，建構異重流模擬分析系統，結合降雨預報、入流流量與輸砂量關係式，以及異重流潛入之密差福祿數，則可利用異重流模擬系統進行異重流運移分析之預報，事先估算異重流發生潛入位置、運移速度及到達壩前時間。

而另一份研究，士文水庫排砂效率之模擬研究(林英傑)，指出需透過 FLOW-3D 之模擬可提供完整的泥砂入庫現象，能充分顯示庫區內渾水運移之過程，且可以分析庫區內各不同高程位置的，泥砂濃度歷線變化，可對於水庫排砂排砂操作之時機提供參考意見。

結論

曾文水庫長年監測結果水質維持良好穩定的主要因素可能是因地形及水溫產生密度異重流，使曾文水庫庫區由大埔橋下游至曾文取水口中下層的水質保持溶氧穩定狀態，厭氧狀態的污染物質不易釋出。

應用端方面，近年來受到極端氣候影響，暴雨及強降雨事件頻傳，加上臺灣集水區坡陡流急，使得大量水砂流入水庫造成嚴重淤積，因此如何維持現有庫容量已是刻不容緩的課題，目前對於異重流使用機制勢在必行，但如何使用及在甚麼時間點使用，才是真正的考驗。

參考文獻

1. 劉建榮、許少華、俞維昇(2009)，「低孔排渾對渾水潭交界面動水沉降特性之影響」。
2. 許少華(2008)，「異重流對黏性土捲昇之啟動條件分析」。
3. 林英傑(2013)，「士文水庫排砂效率之模擬研究」。
4. 南水局水庫庫區與集水區水質檢驗分析計畫。
5. 南水局網站：<https://www.wrasb.gov.tw/>

機動式緊急淨水設備（Qwater）應用於枯旱時期供水實務

經濟部水利署南區水資源局/塗展臺工程員

關鍵字：機動式緊急淨水設備（Qwater）、枯旱

南部地區水資源現況概述

台灣地區年平均降雨量高達 2,500mm，但豐枯懸殊，南部地區豐枯比例更高達 9：1，即 9 成降雨量集中於 5~10 月，以目前南部整體水資源條件而言，須依賴汛期間降雨蓄存水源，並以各種開源、節流、調度及備源等作為，延長供水期程，以度過枯旱期間。

南部地區其中嘉義、台南及高雄為水源聯合調度區域，嘉義、台南主要為水庫型供水型態，如蘭潭水庫、仁義潭水庫、曾文水庫、烏山頭水庫及南化水庫等，而高雄沒有大型水庫，主要水源仰賴高屏溪水系，除以高屏溪攔河堰取水外，近年更在其上、下游河段完成伏流水取水工程，並透過如湖庫水、地下水及跨區支援等水源，使水源供應來源較為多元。

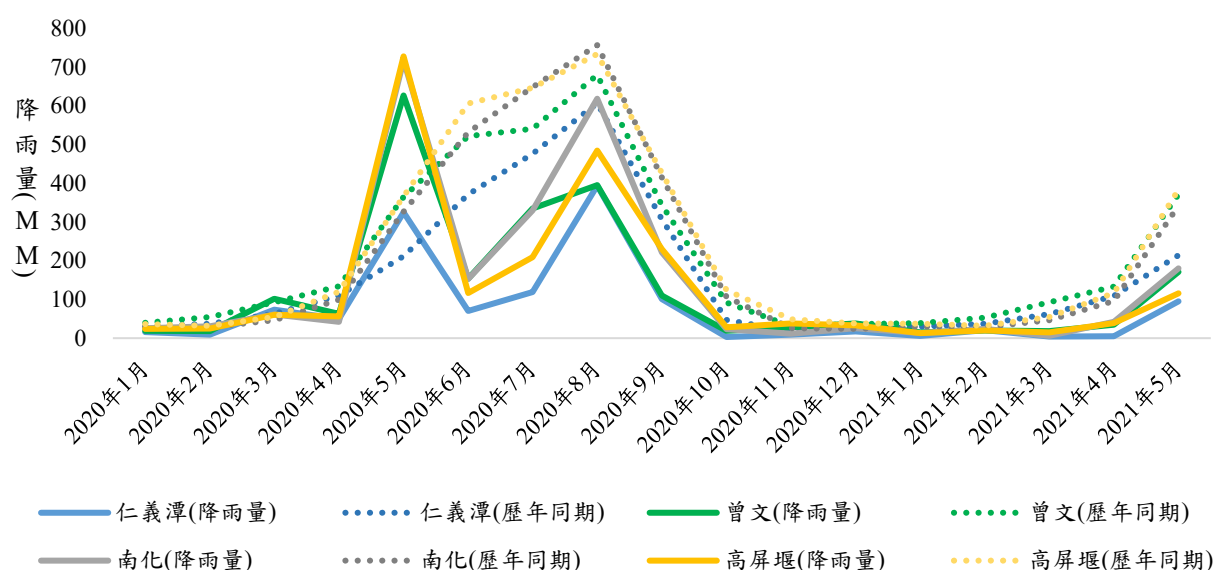


圖1、南部地區主要集水區109年1月至110年5月降雨量與歷年同期降雨量比較圖

南部地區 109-110 年枯旱情形

109 年為 56 年來唯一沒有颱風侵擾帶來降雨的一年，更是紀錄以來降雨量最少的一年，南部地區主要水庫、攔河堰集水區於豐水期間降雨量，僅 5 月份高於歷年同期平均，其餘各月約僅歷年同期平均之 2~8 成不等，曾文水庫集水區歷年平均降雨量為 2,932mm，其中豐水期歷年平均降雨量為 2,543mm，而 109 年豐水期降雨量僅 1,640mm，僅有歷年同期平均 64%，其他諸如仁義潭水庫、南化水庫、高屏溪攔河堰集水區降雨量皆為相同趨勢，豐水期僅有歷年同期平均 50~74%。

以南部地區約 9 成降雨集中於豐水期之特性，豐水期降雨不足，無法蓄滿水庫或維持水庫蓄滿時間，後續水源供應將相當嚴峻。另因高雄主要仰賴高屏溪取水，高屏溪攔河堰集水區自 109 年 5 月至 110 年 5 月止，降雨量僅有歷年同期平均 57%，使得川流量屢創新低，甚至於 109 年 4 月 14 日達歷史最低點 3.8CMS，使高雄地區供水面臨嚴峻挑戰。

表 1、南部地區主要集水區 109 年度至 110 年 5 月降雨量與歷年同期降雨量表

		單位：mm			
水庫		仁義潭	曾文	南化	高屏堰
109年5-10月 (豐水期)	降雨量	1,012	1,640	2,065	1,797
	歷年同期	2,020	2,543	2,786	2,904
	比較	50%	64%	74%	62%
109年 年度	降雨量	1,187	1,908	2,263	2,033
	歷年同期	2,305	2,932	3,040	3,234
	比較	51%	65%	74%	63%
109年 豐水期/年度比較	降雨量	85%	86%	91%	88%
	比較	88%	87%	92%	90%
109年11月-110年5月 (枯水期)	降雨量	157	325	303	274
	歷年同期	496	756	592	712
	比較	32%	43%	51%	38%
109年5月-110年5月	降雨量	1,169	1,965	2,368	2,071
	歷年同期	2,516	3,299	3,378	3,616
	比較	46%	60%	70%	57%

枯旱時期應對策略及水源狀況

面臨如此嚴峻枯旱情形，為因應旱災應變作為，節流面以水情燈號依枯旱情況，陸續宣布不同程度之燈號，透過減壓、減量及節水率等調控方式減少水源供應以拉長供水期程，並透過加強灌溉管理，節約農業灌溉用水續存於水庫，且考量曾文-烏山頭水庫合計蓄水量無法滿足 110 年一期稻作用水量，為保障公共用水僅能宣布停灌。開源面則包含強化區域調度、加強伏流水及抗旱水井開發運用、淨水場周邊水源利用、增設緊急海淡、增設淨水處理設備（如大型移動式 RO 淨水設備、Qwater 等）、建築工地地下水利用及適時動員國軍及民間支援等措施，以「多省水、多找水、多調水」方式，使公共及產業用水皆得以穩定供應。

枯旱時期水源狀況如下：

水源面：

- 一、因長期不降雨或降雨量極少，導致水源補充短缺，河川流量降低，水源逐漸乾枯。
- 二、集水區、溪流沒有充足之水源得以稀釋河川之溶解物或汙染物，如氮、磷營養鹽容易濃度較高。
- 三、流速緩慢或停滯之水源，容易孳生病媒。
- 四、抽取水池或川流水底部水源時，容易因底泥或淤泥影響水源品質。

供水面：水利署因應水情狀況，設有水情燈號及其對應措施，分別為水情提醒綠燈、減壓供水黃燈、減量供水橙燈及分區供水紅燈，當進入減壓供水黃燈時，將於離峰及特定時段降低管壓供水、減量供水橙燈將對於大用水戶減供、分區供水紅燈則分區輪流或全區定時停止供水，因此，當遭遇枯旱水情嚴峻時，為延長供水時程，管網供水無論管壓及供應量都將因應調整。

機動式緊急淨水設備（Qwater）功能設計

枯旱時期原水來源有限且供應量減少，使得多元水源利用更被重視，近年水利署考量全球極端天氣變化成災頻生且強度遠用以往，為解決災害後

原水高濁度造成停止供水或水源汙染影響用水情形，委託工業技術研究院研發機動式緊急淨水設備，或稱為「Qwater」，而其淨水原理，亦適用枯旱時期緊急供水需要，以產出乾淨之用水，其設備設計上具備三大特性：

- 一、快組 (Quick)：採套裝化、模組化開發，並具有快速組裝與高度機動性，可由 2 名民眾徒手於 20 分鐘內完成組裝。
- 二、優質 (Quality)：透過各淨水設備組合，可處理高濁度原水，且出水符合飲用水標準。
- 三、豐沛 (Quantity)：相對於傳統淨水技術，具備小型空間 (1.31 m^2) 高效出水能力，每日產水 15 立方公尺，以每日每人飲水量 3 公升計算，每日可供應 5,000 人飲用，並可並聯增加出水量。



圖 2、機動式緊急淨水設備 (Qwater)

機動式緊急淨水設備 (Qwater) 淨水能力

Qwater 之淨水單元，主要係以高濁度水源處理能力進行設計，處理順序為將水體污染物依尺寸大至小依序移除，各淨水單元介紹如下：

- 一、沉澱模組：主要針對大於 $10\mu\text{m}$ 之砂或泥沙進行固液分離，為達到小體積高效出水，且為不加藥膠凝沉澱程序，運用傾斜板沉澱池，使操作步驟簡化、技術及成本皆降低，亦減少水利停留時間，得到濁度下降目的。
- 二、BioNET 模組：主要針對大於 $1\mu\text{m}$ 之固體物，運用可壓縮的多孔性 PU 泡棉擔體，提高攔截懸浮固體物量，且其孔隙之廣大表面積可作微生物附著以去除各種污染物。
- 三、超濾膜模組：主要針對大於 $0.08\mu\text{m}$ 之固體物、細菌、腐植質等污染物進行攔截，透過超濾膜孔徑進行物質的過濾。
- 四、殺菌模組：主要針對細菌，利用短波長紫外線 (254 nm) 燈進行殺菌。

以上四個淨水模組，皆設有入水口、出水口及排泥口，模組各自獨立並可分離快拆組裝，另系統設有電路開關及控制系統，總用電量為 0.7 kW 。

各淨水單元處理高濁度原水，出水水質數值如下：

- 一、濁度：原水濁度為 $2,500\text{--}5,000\text{ NTU}$ 之間，平均值 $3,673\text{ NTU}$ 者，經處理後出水濁度小於 2 NTU 。
- 二、懸浮固體物：原水懸浮固體物濃度為 $3,340\text{--}8,930\text{ mg/L}$ 之間，平均值 $5,381\text{ mg/L}$ 者，經處理後出水濃度平均值為 259 mg/L ，去除率達 95.18% 。
- 三、顆粒粒徑分析：原水顆粒粒徑平均值 $2.8\text{ }\mu\text{m}$ 者，經處理後出水顆粒粒徑平均值為 $0.1\text{ }\mu\text{m}$ 。

細菌：原水總菌落數為 60 CFU/ml 及大腸桿菌為 $5\times 10^3\text{ CFU/ml}$ ，經處理後總菌落數 ($<2\text{ CFU/ml}$) 及大腸桿菌 ($<5\text{ CFU/ml}$) 生長結果皆符合飲用水水質標準。

表 2、Qwater 各淨水單元處理後水質表

項目	原水	傾斜板沉澱池	BioNET	UF 薄膜
濁度(NTU)	3,673	1,355	360	<2
懸浮固體物(mg/L)	5,381	511	259	
顆粒粒徑(μm)	2.84	1.49	1.12	0.103

實務應用時機

Qwater 可應用於枯旱時期，當自來水短缺導致供水中斷，亦可用於山區或偏遠地區因簡易自來水系統水源補充匱乏導致缺水情形，或作為取用區域水源時，可即時將設備運送至現場並於短時間內完成組裝緊急處理產出乾淨用水，以避免飲用罹生疾病，適用之時機與水源如下：

- 一、自來水供應補足缺口：一般公共用水主要由自來水系統供應，當遇到枯旱時，原水來源及供應量減少，且為配合水情燈號政策性之減壓、減量供水後，部分管線末端或高地區，易發生送水延遲或無法供應情形，且停復水時常因管線空氣壓力造成破管，或因管壁沖刷頻繁衍生水質異常情形，傳統之大型淨水廠有其連續性管網，較難以針對區域用水進行細微調控，往往需透過水車進行清水輸送，且原水來源不足時，供水缺口可即時取用各區域水源經由緊急淨水設備處理後進行供應，採點狀彈性運用補足管網未及之處。
- 二、地下水源處理：抗旱水井、建築工地地下水，一般而言濁度較低，但仍需進行淨水程序以達到飲用水水質標準，則可即時運用緊急淨水設備處理。另一般既有開設之地下水井亦可作為原水水源，亦可透過此淨水設備分散區域供水壓力。
- 三、既有川流、埤塘、泉水、區域水源處理：此水源通常較無濁度問題，但總菌落數及大腸桿菌及有機物通常較高，透過此淨水設備之超濾膜與殺菌模組，亦可有效處理移除影響水質物質，供應乾淨用水。

結論

面對全球氣候變遷，旱澇不均加劇且愈加頻繁，且台灣山高陡峭、河川短急，水資源開發運用本是不易，又枯豐時期分明雨量分布嚴重，更加遽水源供應穩定之困難性，未來將愈容易面臨枯旱處境，當水源短缺、水質下降，甚至面臨供水延遲、停水情境，透過機動式緊急淨水設備(Qwater)，「快組」取用區域水源，並產出「優質」且「豐沛」用水，除了緩解區域用水之燃眉之急外，尚發揮點狀機動性設置之優勢，完善供水末端最後一哩路，且供應安全無虞之水，更為普世人權之價值，減少因水源短缺而飲用不潔淨水源之情況。

參考文獻

1. 陳建宏、任維傑、周珊珊、王藝峰、楊其錚、謝明昌，快組式村落型緊急淨水系統，2011 年。
2. 陳建宏、任維傑、周珊珊、謝明昌，模組化緊急淨水設備開發與應用，2012 年。
3. 經濟部水利署，多元化水源機動式緊急淨水設備研發(2/2)，2014 年。

感謝

台灣自來水股份有限公司
行政院農業委員會農田水利署石門管理處
行政院農業委員會農田水利署宜蘭管理處
行政院農業委員會農田水利署南投管理處
行政院農業委員會農田水利署屏東管理處
行政院農業委員會農田水利署苗栗管理處
行政院農業委員會農田水利署桃園管理處
行政院農業委員會農田水利署高雄管理處
行政院農業委員會農田水利署雲林管理處
行政院農業委員會農田水利署新竹管理處
行政院農業委員會農田水利署嘉南管理處
行政院農業委員會農田水利署彰化管理處
行政院農業委員會農田水利署瑠公管理處
行政院農業委員會農田水利署臺中管理處
玖樂文創有限公司
財團法人工業技術研究院
黎明工程顧問股份有限公司
經濟部水利署
經濟部水利署水利規劃試驗所
經濟部水利署中區水資源局
經濟部水利署北區水資源局
經濟部水利署南區水資源局

(依筆畫排序)

感謝以上單位的贊助，協助本刊順利發行，特此銘謝！