

曾文水庫防淤的世紀挑戰

文、攝/周子硯

前言

位於嘉義縣大埔鄉的曾文水庫，是台灣蓄水量最大的水庫，於民國62年完工，當時採用的是土石壩的設計，設有三座溢洪道閘門，水壩高度達133公尺，為全台灣第三高壩。壩身體積高達900萬立方公

尺，水庫滿水面積約為17平方公里，水庫設計容量達7億4千萬立方公尺，以上均為台灣水庫之最。

民國98年8月8日侵襲台灣的莫拉克颱風，在南台灣造成極為嚴重的水災，單是在曾文水庫中所降下的雨量高達12億噸，已遠遠超水庫規劃設計的最大容積。在這莫拉克風災發生之前，曾文水庫的溢洪道閘門從未有過三座全開的情形，而在莫拉克侵台的當夜，即便三座溢洪道閘門同時打開，進水量仍比排出的水量還要多。風災中從上游集水區所造成的土石劇烈沖刷，是導致水庫嚴重淤積的經常性問題，而莫拉克颱風所帶來的單次淤積量，就已高達9千萬立方公尺，相當於一般水庫20年的總淤積量。由此可見莫拉克颱風雨量之可怕，顯現氣候變遷大自然的反撲。





過去各水庫的清淤方式，多以陸上清淤、水下抽泥的方式來進行，但是隨著淤積量的增加，傳統方法的清淤速度已經趕不上淤泥的沉積速度，於是便導致水庫的有效蓄水量不斷地下降，逐漸開始影響到民生、工業用水。為了延長曾文水庫的壽命、同時達到永續經營的目的，經濟部水利署南區水資源局於100年開始推動「曾文水庫防淤隧道工程」的計畫，希望可以利用庫底的異重流將淤沙排出，如圖1所示，完成水庫的蓄清排渾，使曾文水庫儘速恢復正常的使用狀態。

「曾文水庫防淤隧道工程」工程是由經濟部水利署南區水資源局主辦，由聯合大地及巨廷工程顧問股份有限公司執行基本設計，中華工程及國統國際股份有限公司及黎明工程顧問公司統包工程的執行，斥資總金額41億元所進行的一項重要工程。此工程的困難度高，施工過程極具挑戰，在工程師們共同努力之下，萌生出了數項世界首創

的工法。此工程最終於民國106年10月底正式完工，到目前為止運作正常順利。此工程的成功，帶給國內隧道清淤及水庫永續經營的象徵，也替台灣水資源的永續發展，畫下重要的里程碑。有



圖1 異重流於水庫內的流動和淤積物的分布圖

了曾文水庫成功的工程經驗，白河水庫與石門水庫現已開始著手進行類似的排淤工程。

防淤隧道工程所遭遇的困難及解決方法



「曾文水庫防淤隧道工程」分為四大部分，分別為進水口區段，豎井及隧道閘室段，隧道區段，及區水口區段。而進水口區段的工程又以象鼻鋼管工法最為特殊，如圖2所示，而出水口端則以消能池的開挖及出水口的隧道設計最具特色，如圖3所示。

隧道工程的進水端和出水端施作是整個工程中最困難的地方。由於防淤隧道的進水端是在水下的關係，一般傳統多用所謂的「圍堰工法」來施作，此工法是在即將施工的隧道口附近，先施打排樁、灌漿製成圍堰，再圍堰內的水抽除，即可達到一個乾式施工的環境，此工法可以降低施工難度和危險性，但施工



圖2 象鼻鋼管於曾文水庫內組裝



圖3 曾文水庫防淤隧道出水口

點的水位不能過深，否則便無法施作。除此之外，「岩塞爆破」是另一個解決辦法，此工法是先開挖隧道，但在接近隧道口之處，預留一小段的岩塞和聚渣坑，當隧道部分施工完畢後，再利用爆破工程將這小段預留的岩塞炸碎，碎裂的岩塊同時掉入事先挖好的聚渣坑，如此方法即可將隧道打通。但此工法的先備條件在於爆破附近的岩盤需夠堅實，地質層穩定。

在進行曾文水庫防淤隧道工程過程中，最讓所有工程師苦惱的便是曾文水庫水深過高，施以圍堰工程有高度的危險性，但若採用岩塞爆破工法，則會因為水壓過高，容易在豎井處造成猛烈的井噴。後來工程師們發現，此防淤隧道預期是在豐水期的時候使用，因此隧道口可以在相對較高水位的位置施工，同時為了連接庫底由泥沙所形成的異重流，最後終於研發出象鼻鋼管的工法來連接隧道口和異重流。

象鼻鋼管的施工概念似乎可用來解決進水口工程的難題，但象鼻鋼管的製作和組裝卻是接下來的一大考驗。由於鋼管口徑大、重量大，要如何將製成的象鼻鋼管運送到施工地點，並且順利連接上隧道口，卻是實際執行上的一大考驗。為了克服上述難題，工程師們將整個象鼻鋼管分節製作，每一節都是由雙層管的形式所構成，層與層間是封閉隔艙，因此在水中可因浮力作用漂浮在水面上。只要將分節的象鼻鋼管利用拖運船拖運到施工現場，最後巧妙的利用浮力將每一節的鋼管在水中組裝完成，姿勢彎曲成正確的形狀後，再移動至隧道進水口的位置，最後再用螺絲將鋼管和進水口法蘭聯結，完成這一獨步全球的工法。

台灣在於隧道開挖上已經具備一定的經驗，如水力發電廠，類似的山體內開挖已經非難事，但此工程另一個具挑戰性的地方，

便是在靠近邊坡處開挖巨大坑室也就是「消能池」的開挖，消能池為此工程的另一大特點，當消能隧道運作時，隧道出水口附近之河道必定是要承受從水庫接出來的大量異重流，若不經過消能的步驟，原曾文溪狹窄的河道必定會遭受到強烈的侵蝕，河防安全必定受到考驗，由於出水口端曾文溪河道狹窄，只能進行山體內消能，但消能池段的山體內洞穴其位置靠近邊坡，將遭遇到山體偏壓作用的考驗，加上邊坡端的覆蓋層過薄，隧道口可能無法形成拱作用而造成坍塌，無法形成穩定的結構，因此出水口端必須先進行培厚的動作，而坑室的開挖也採取先保護後開挖的方式，而出水口也縮短開挖斷面，改由雙洞口出水，來降低崩坍的風險，出水洞口使用「香菇頭工法」維持其隧道的穩定性，如圖4所示。

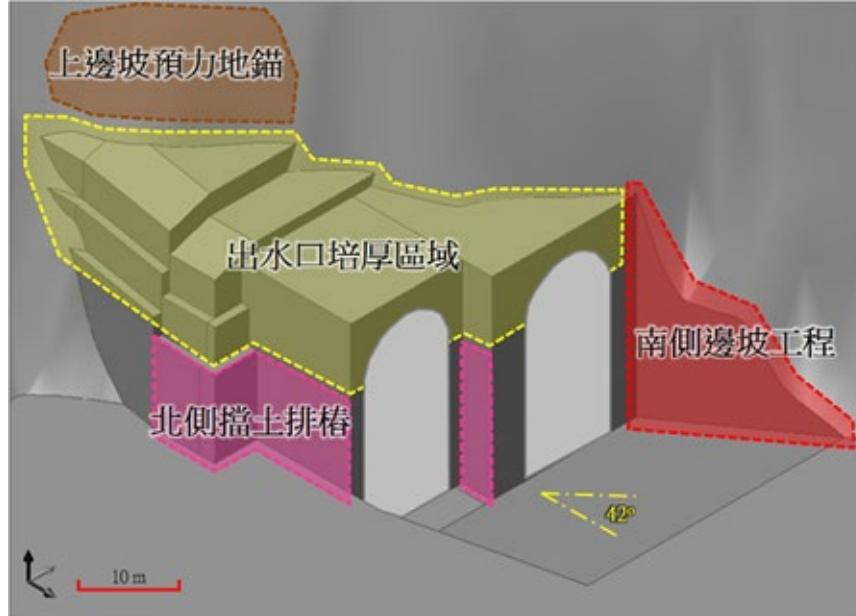


圖4 護坡結構加強示意圖

所有工程的各種工法都是將安全至上的考量來設計，兼具維持河道生態維持及整體環境保護為先決目標來進行設計，並以創新的工法克服種種難關，充分表現出大地工程「天人共存」的精神。防淤隧道工程有著複雜施工過程和方法，去解決許多面臨到的困難，例如隧道的應力分布所造成位移的影響，和附近地層的強弱度和湧水的考量，還有更多的細節值得我們去深入了解和學習，這也說明了台灣對於隧道和水壩的知識和工程的純熟度是能夠與國際並駕齊驅並值得國人驕傲的地方。

水庫回春新工法-排砂隧道

文/汪世輝、李權仁

臺灣地區山高坡陡，河短流急且地質條件欠佳，山區地質鬆軟，近年每逢颱風暴雨來襲，坡地往往產生大量沖蝕崩塌，進而流入水庫集水區導致水庫嚴重淤積，影響供水功能。為此，在有限水資源條件下，欲滿足現況及因應未來用水持續成長情境，除須持續開發可利用水源外，現有水庫功能之維持也同等重要，因此如何使水庫能永續利用成為一關鍵課題。現有水庫防淤工作以多元方案為水庫延壽，而水力排砂為經濟可行方案之一，相關分類如圖1所示。其中「水力排砂隧道」更成為近年台灣水庫防防洪防淤新工法。

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需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：



圖1 水力排砂類型

(1)空庫排砂：為洩空水庫後，繼續以上游逕流(基流或小洪水)利用底孔進行較長期間沖刷淤泥之一種水力排砂方式。其基本應用條件也需具備上述水力排砂之基本條件，但底孔洩流能力可以較低，尤其對峽谷型水庫較為有效。然而，空庫排砂的操作前提，必須維持一段空庫的時段，勢必對水庫供水功能有所影響，故並非每一個水庫都可以適用。

(2)洩降排砂：為在不完全性的降低水庫水位情況下洩流，其壩體底孔打開時，洞口附近會造成局部沖刷力量，來攪揚水庫內淤積土砂，其與空庫排砂相同處為同樣利用壩體底孔來沖刷淤砂。然因洩降排砂操作過程屬於孔口流狀態，其有效沖刷範圍僅侷限於底孔附近，但許多水庫之底孔附近往往配置重要的進水口，故洩降排砂仍可作為維護進水口正常操作的主要對策。洩降排砂有時可視為洩洪或空庫排砂之前奏階段。

(3)洩洪排砂：為在洪水時段，開啟洩流設施洩放水庫儲水以降低水位，使來洪在沒有壅水之情況下，維持較高流速，將所挾帶之泥砂，穿過水庫，排入下游河道。其基本應用條件必須有充分洩流能力之底孔與適當水庫地形相配合。相關排砂操作範例流程如圖2所示。



通砂中の出し平ダム (H18)



通砂中の宇奈月ダム (H18)

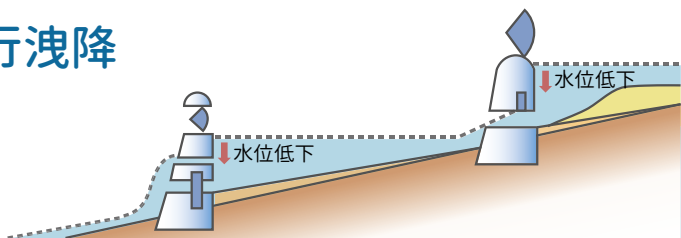
圖2(a) 排砂操作範例流程

(修改自國土交通省北陸地方整備局，2008)

1 排砂時，水位先行洩降

用意：將庫水水理轉為川流的水理。

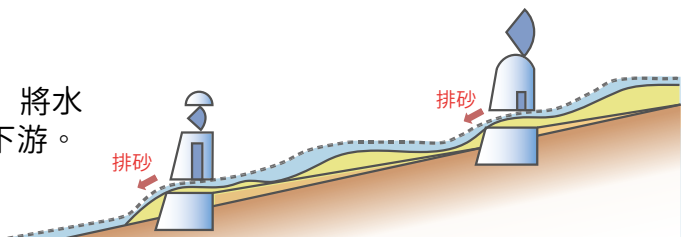
排砂、通砂的準備階段



2 低水位排砂

用意：利用河川的力量，將水與土砂排往水庫下游。

排砂、通砂的運轉階段



3 清水冲刷

用意：排砂後期洩放清水，將淤在下游河床的細粒土砂沖至下游。

排砂、通砂的收尾階段

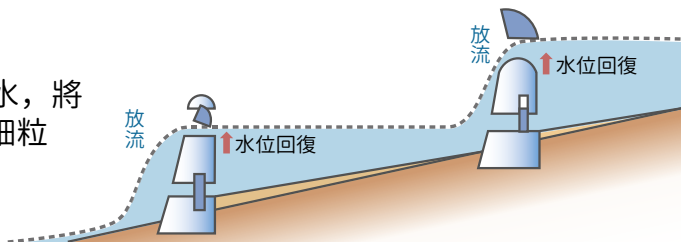


圖2(b) 排砂操作範例流程 (修改自國土交通省北陸地方整備局，2008)

(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。台灣興建中之曾文水庫防淤隧道、南化水庫防淤隧道及白河水庫防淤隧道，即為其中例子，相關工程佈置圖分別示於圖3、圖4及圖5。

民國98年莫拉克颱風侵襲臺灣，導致南化、曾文及烏山頭等水庫集水區大量沖蝕及崩塌，水庫淤積趨勢漸增，進而影響南部地區供水的穩定性。為改善上述水庫的淤積情況，加強水庫上游集水區的保育及有效提升水源備援與常態供水能力，民國99年5月12日公布實施「曾文南化烏山頭水庫治理及穩定南部地區供水特別條例」，經濟部就依特別條例第3條規定，研提「曾文南化烏山頭水庫治理及穩定南部地區供水計畫」，並於100年5月24日奉行政院核定後實施相關改善工程計畫。於南部地區陸續推動曾文水庫防淤隧道、南化水庫防淤隧道、新烏山嶺引水隧道及白河水庫防淤隧道等工程。

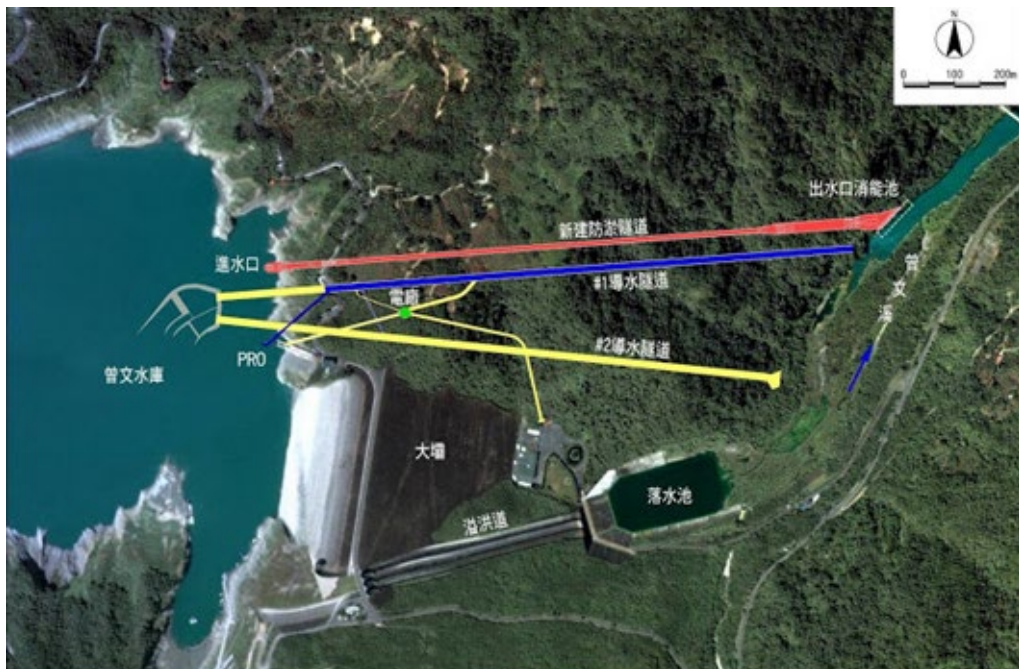


圖3 曾文水庫防淤隧道工程佈置圖(資料參考南區水區資源局)



圖4 南化水庫防淤隧道工程配置圖 (資料參考南區水區資源局)

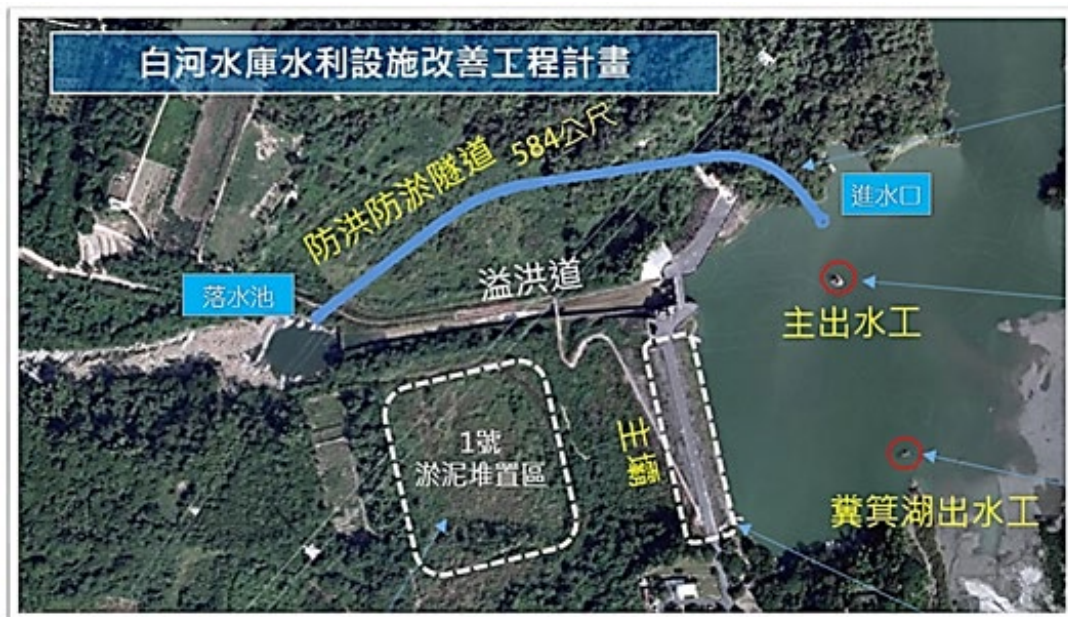


圖5 白河水庫防淤隧道工程配置圖

(5)水壓吸引排砂：本方法主要是改良自傳統機械浚渫方法中的虹吸抽泥，該法大多應用於水深足夠的壩前淤砂排除，其適用之粒徑為0.2mm以下之沖瀉載，其系統區可分成「吸引部」、「管道部」與「出口部」三個部分，其出口直接排放至下游河道而非沉澱池，簡稱排泥管工法，以與原始的虹吸抽泥工法(如圖6所示)形成區隔。本工法的排砂效率高，排砂濃度可高達10萬至20萬ppm，且可直接排放到下游河道，其整體費用相較於機械清淤便宜，且處理部分為無法作為骨材的微細粒料，對於水源運用較為吃緊的水庫，不啻是一種可嘗試的排砂對策，故目前有許多國家已開始進行研發與應用，並逐步應用在水庫的淤砂清除作業。

(6)繞庫排砂：水庫上游興建分洪堰及排砂隧道至水庫下游端，如此可將泥砂部份懸浮及推移物質經由此排砂隧道，繞道至水庫下游，預計108年底施工的白河水庫繞庫防

淤工程即是一例，其相關工程佈置圖如圖7所示。

以往隧道工程運用在傳統採礦作業、公路、鐵路及捷運等工程上，但隨著氣候變遷，災害頻傳，隧道運用在災害防治上逐年有增多趨勢。如通過大崩場地之迂迴隧道及水庫水力排砂隧道等。因此，系上礦地組之同學，不僅要學習本身系上之工程地質、岩石力學及隧道工程等學科，相關水利等延伸知識也應努力涉取，以應未來社會需求。

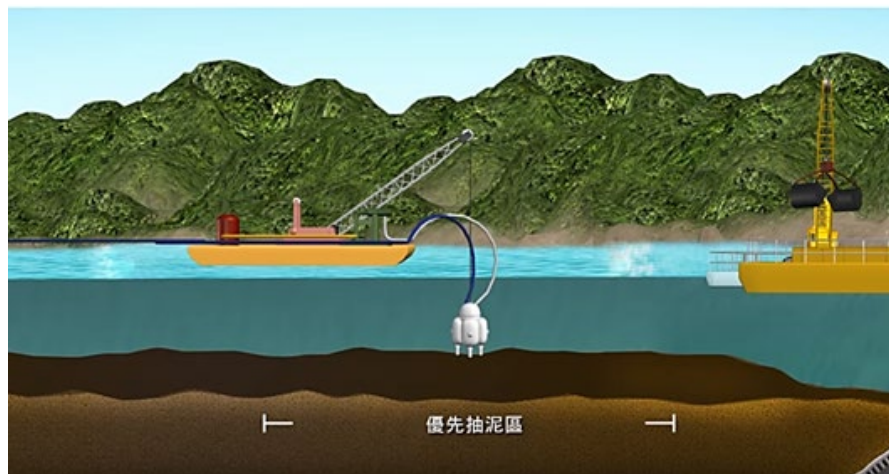


圖6 曾文水庫取水斜塔前庭清淤工程-虹吸抽泥示意圖
(資料參考南區水區資源局)



圖7 白水水庫繞庫防淤工程佈置圖