

水庫排砂相關用語

鍾文祥

中興工程顧問股份有限公司 水利工程部計畫主任

臺灣因地質條件欠佳，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蓄存水源的水庫嚴重淤積，在 2004 年艾莉颱風造成石門水庫嚴重淤積，產官學界更加重視水庫的排砂議題，而 2009 年莫拉克颱風也造成曾文與南化水庫產生嚴重淤積，加上近年來臺灣水庫建設趨緩，為了維持水庫的永續營運，「水庫排砂」也成為我國水庫管理的重要業務。

臺灣目前不是國際大壩委員會 (ICOLD) 的會員國，故有關「水庫排砂」的用語最為混亂，也未見統一，本文主要整理國際大壩委員會、世界銀行、日本大壩會議與大陸相關文獻，整理「水庫排砂」的臺灣用語與英文、日文與大陸用語，參見表 1 所示。

從表 1 內容可知，國內水庫排砂用語部分多數來自日本或大陸，其他英文常見排砂用語，國內也缺乏統一的翻譯。

表 1 水庫排砂中英日用語對照(水庫排砂部分)

| | 本文用語 | 對應的英文用語 | 對應的日文用語 | 對應的大陸用語 |
|-----|------|-----------------------------------|------------------------------|----------------|
| 1 | 排砂 | Sediment Releasing | 排砂 | 排沙 |
| 2 | 沖砂 | Sediment Flushing | 土砂フラッシング | 沖沙 |
| 2-1 | 空庫排砂 | Empty Flushing | 完全フラッシング | 泄空排沙 |
| 2-2 | 洩降排砂 | Drawdown Flushing | 部分フラッシング | 泄降排沙 |
| 3 | 洩砂 | Sediment Sluicing | 土砂スルーシング | 泄沙 |
| 3-1 | 洩洪排砂 | Flood Sluicing | 水位低下スルーシング | 泄洪排沙 (敞泄排沙) |
| 3-2 | 滯洪排砂 | Detention Sluicing | 滯留スルーシング | 滯洪排沙 (壅水排沙) |
| 3-3 | 自由排砂 | Uncontrolled Sluicing | 自然排砂/ 土砂スルーシング (ゲードレス) | 自由排沙 |
| 4 | 蓄清排渾 | Storing clear and Releasing muddy | 蓄清排濁 | 蓄清排渾 |
| 5 | 通砂 | Sediment Routing | 通砂 | 通沙 |

| | 本文用語 | 對應的英文用語 | 對應的日文用語 | 對應的大陸用語 |
|----|-----------------|------------------------------------------------|--------------------|---------|
| 6 | 繞庫排砂 | Sediment Bypassing | 排砂バイパス／ 迂迴排砂 | 绕库排浑 |
| 7 | 清水繞道 | Sediment-free Bypassing | 清水バイパス | |
| 8 | 異重流排砂 | Turbid Current Venting | 密度流排砂 | 异重流排沙 |
| 9 | 渾水排砂 | Turbid Water Releasing | 濁水放流 | 浑水排沙 |
| 10 | 水力排砂 | Hydraulic Desilting | 水理的排砂 | 水力排沙 |
| 11 | 機械清淤 | Mechanical Removal | 人工的排砂／ 機械力による排砂 | 机械清淤 |
| 12 | 浚渫 | Dredging | 浚渫 | 浚渫 |
| 13 | 開挖 | Excavation/ Digging/ Trucking | 掘削 | 开挖 |
| 14 | 水壓吸引排砂 | Hydrosuction | 水压吸引土砂排除 | 自压管道排沙 |
| 15 | 縱向／橫向沖 蝕強化工法 | Longitudinal or Lateral Erosion Enhancement | 縱斷／側方侵食 | 纵向／横向冲刷 |

以下針對前揭水庫排砂用語及其內容，分別說明如下：

1. 排砂(sediment releasing)

「排砂」用語，主要散見大陸、臺灣、日本、韓國等國的文獻，歐美國家則較少使用，英文用語則爰引大陸「水利水電工程技術術語標準」，稱為“sediment releasing¹”，大陸多半使用「排沙」用語，臺灣、日本、韓國文獻則使用「排砂」用語。

本文的水庫排砂所指的是水力排砂，因此排砂的範疇包括「沖砂」(sediment flushing)、「洩砂」(sediment sluicing)、「通砂」(sediment routing)，指的是利用

¹另在摩里斯與范家驊(1998)的“Reservoir Sedimentation Handbook”也提到此一用語，而國外文獻中，亦有使用 Sediment Discharge 用語，但因 Sediment Discharges 在 ICOLD 規範中另指「輸砂量」，故本計畫仍採用 Sediment Releasing。

水力方法，將水庫的來砂與淤砂排除到水庫外。

2. 沖砂(sediment flushing)

沖砂是藉由打開壩體排砂底孔，放空庫水或降低庫水位，使底孔附近之流速加快，進而使壩前淤積土砂可以重新啟動，並在庫區內沖出一條河槽或洩降錐，在洩放庫水同時，前期的淤積土砂可通過壩體底孔帶往下游，進而減少庫區內淤砂，使庫容回復，且底孔愈低愈大者的沖砂效果愈佳。而依據水庫操作的時機與庫水條件，沖砂可分為以下 2 種：

(1) 空庫排砂(empty flushing)

本操作方式被摩里斯與范家驊 (Morris and Fan, 1998) 稱為「完全洩降水位沖砂」(complete drawdown flushing)，本操作方式通常是將水庫洩空後，不予蓄水，持續以逕流進行沖砂作業，使庫區形

成臨時性的河道水流，若庫區為狹谷地形，且來水量足夠，且有一定坡降，這時底孔上游會形成一個沖刷河槽，並造成溯源沖刷作用，減少淤積土砂，參見圖1(A)。

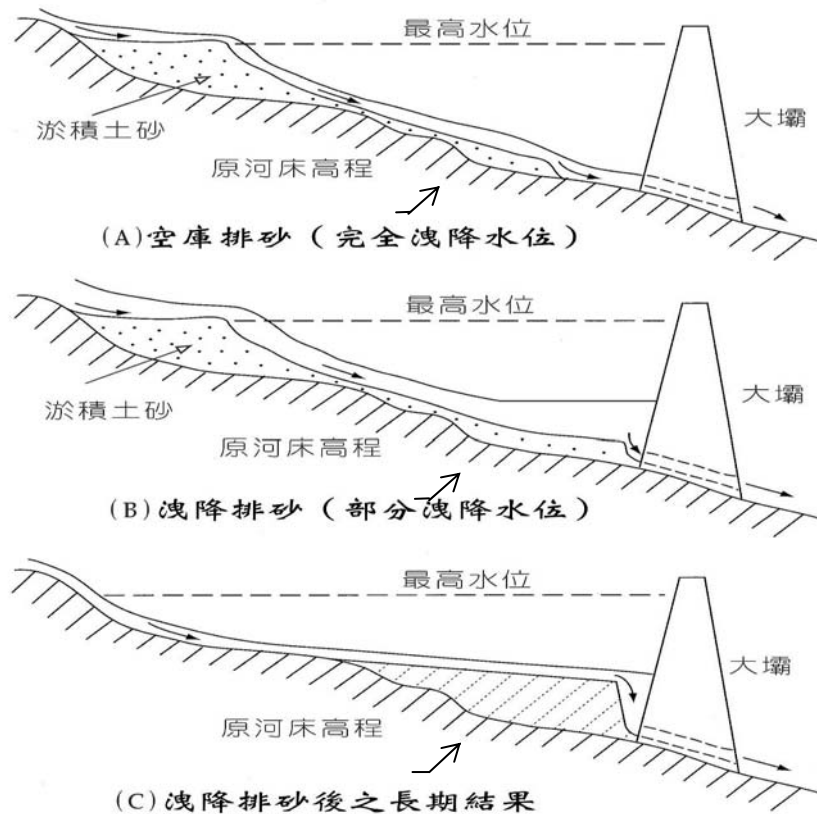
空庫排砂的水流情況是將水庫的水理調整為河川水理情況，故擁有最佳的排砂效果，但由於空庫排砂操作時，必須降低庫水位，故對於水資源運用有不利之影響，故本類型的排砂對策，多於發電、防洪或灌溉功能的水庫進行應用，水源運用功能的水庫則鮮少採取空庫排砂對策。

空庫排砂可採取多年一次實施的方

式，而達到長時期內水庫之沖淤平衡，然而空庫排砂的操作前提，必須維持一段空庫的時段，其對於水庫的水資源功能，勢必大打折扣，故並非每一個水庫都可以適用。

(2) 洩降排砂(drawdown flushing)

洩降排砂是在水庫未空庫時，利用洩降水庫水位過程中所形成的水流沖刷力量，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，其排砂效果通常有限。



Source: "Evacuation of Sediments from Reservoirs", R. White, pp.41, 2001.

圖 1 沖砂期間的縱剖面圖

當洩降沖刷之水位低於庫尾高程時，亦可增加庫尾的沖砂流速，參見圖 1(B)，當大部分淤積土砂從庫尾被沖走，再輸移至壩前，最後操作沖砂底孔，以形成沖刷錐並帶走壩前土砂，參見圖 1(C) 所示。

洩降排砂並非將庫水洩盡方休，因依賴儲水設施洩降排砂亦可視為進行空庫排砂或洩洪排砂操作的前奏，因空庫排砂必須將水庫洩空，而洩洪排砂操作則必須維持庫水於低水位。

洩降排砂雖沖刷範圍只侷限於底孔附近，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。

3. 洩砂(sediment sluicing)

洩砂通常於洪水時段操作，先洩降庫水至某一程度，使來洪在沒有壅水狀況下，維持其流速，將洪水期所挾土砂，穿過壩體底孔，排入下游河道，而此種操作方式也能將庫內部分淤砂一併排除。洩砂操作的基礎主要排除當次洪水狹帶之土砂，在未落淤前予以排除，故「洩砂」與「沖砂」最大不同處為洩砂主要針對“洪水來砂”，而沖砂則是針對“前期淤砂”，但因洩砂與沖砂的操作方式都是透過壩體底孔操作，故馬哈穆德 (K. Mahmood, 1987)、阿特金森(Atkinson, 1996)將洩砂視為沖砂操作的特殊情況。

「沖砂」(sediment flushing)與「洩砂」(sediment sluicing) 通常都是利用壩體的底孔進行操作，圖 2 為日本黑部川水系的「宇奈月壩」與「出し平壩」兩座串

聯水庫的「沖砂」(日本原文稱「排砂」)與洩砂(日本原文稱「通砂」)的操作示意圖，由上可知，沖砂的主要對象是水庫的前期淤砂，而洩砂的主要對象則是當場洪水的來砂。

「洩砂」操作時，會因來洪條件與水庫臨前條件的不同，會出現以下幾種情況：

(1) 洩洪排砂(flood sluicing)²

當洪水來臨時，先洩降庫水至一定程度(洩降排砂)，透過底孔進行洩洪與洩砂，此種洩砂方式多於洪水來臨洩洪時操作，故王文江(1996)稱此方式為「洩洪排砂」，大陸學者韓其為(2003)在「水庫淤積」一書中，稱此種操作為「敞泄排砂」³。

(2) 滯洪排砂(detention sluicing)

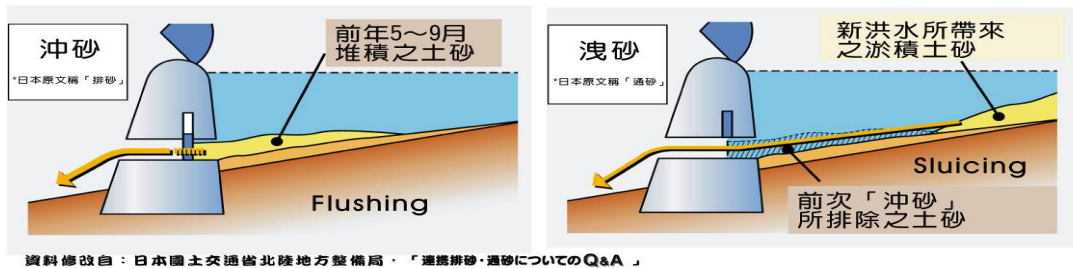
當洪水來量大於壩體底孔洩洪量時，洪水必須於庫區內調滯，且此時庫水產生壅水現象。陝西省水利水土保持廳(1989)，則稱此操作為「滯洪排砂」⁴，另大陸學者韓其為(2003)則稱此種操作為「壅水排砂」⁵，而該作者亦提及受到水庫洪水臨前狀況與壅水作用，滯洪排砂過程亦有可能出現異重流情況。

²Flood Sluicing 出自美國農業部 1943 年的 “The Control of Reservoir Silting” 一書中。

³該書中提到「行洪排沙」(洩洪排砂)用語，目前大陸的「泥沙設計手冊」亦收錄「敞泄排沙」用語。

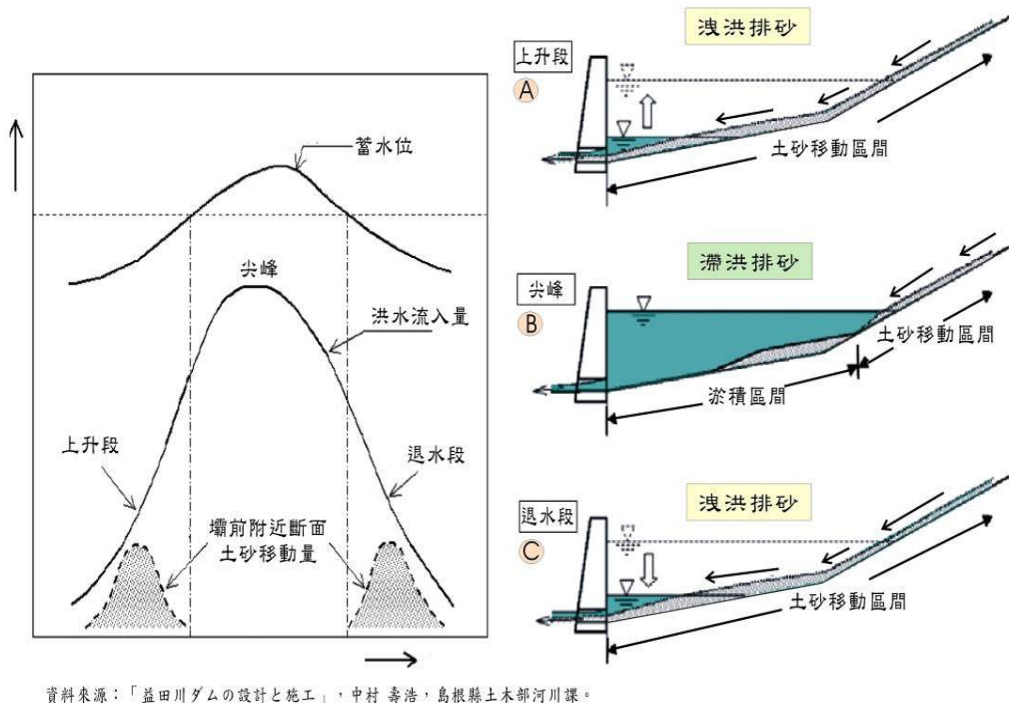
⁴「滯洪排砂」另一出處為 1962 年黃委會宣布，黃河三門峽水庫從「蓄水攔沙」改為「滯洪排沙」的操作而得名。

⁵「壅水排砂」用語亦收錄在大陸的「泥沙設計手冊」。



資料修改自：日本國土交通省北陸地方整備局・「運搬排砂・通砂についてのQ&A」

圖 2 沖砂與洩砂示意圖



資料來源：「益田川ダムの設計と施工」，中村 壽浩，島根縣土木部河川課。

圖 3 防洪水庫自由排砂操作示意

(3) 自由排砂(uncontrolled sluicing)

本操作方式主要應用於底孔無閘門的防洪水庫，該類型水庫平時乾涸，故歐美國家慣稱為“dry dam”，其壩體底部係設置無閘門排洪底孔，其排砂過程綜合了前述洩洪排砂與滯洪排砂，參見圖 3 所

示。

由該圖可知，洪水上升段(圖 3A)在來洪量小於底孔設計排洪量時，此時會產生洩洪排砂與空庫排砂的綜合效果，除將上游來砂排除也一併沖刷前期淤積；當洪水量大於設計排洪量時(圖 3B)，則轉變

為滯洪排砂，此時細粒料會隨洪水排出，較粗粒料則落淤在三角洲頂部；當洪水消退時(圖 3C)，此時又會轉為洩洪排砂，並將上游淤砂帶往壩前。

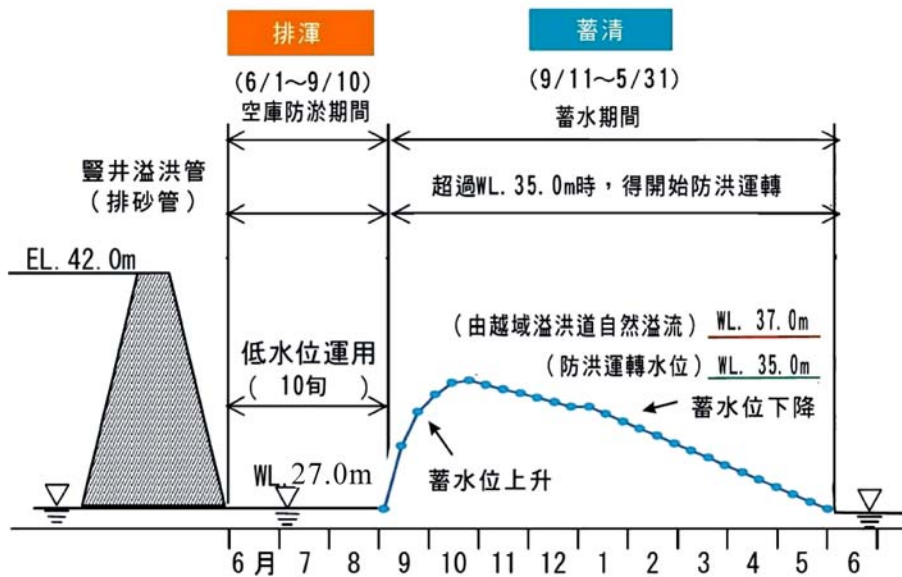
4. 蓄清排渾(storing clear and releasing muddy)

本操作方式主要須配合改變水庫的操作規線，使水庫在某一期間(通常是汛期)採取河流模式運轉(稱之為「排渾」)，而非汛期則採取蓄水模式運轉(稱之為「蓄清」)，排渾階段包括混合了前述的沖砂(sediment flushing)與洩砂(sediment sluicing)兩種類型的操作，例如高雄的阿公店水庫，每年6月1日至9月10日共10旬，採取低水位的排渾操作，其餘則為蓄清階段，參見圖4所示。

國外有許多水庫的主要功能為防洪

及河川流量調節，因此可採取蓄清排渾方式運轉，利用汛期洩洪排砂，以恢復水庫庫容，使水庫效益得以發揮，大陸黃河一般年分的汛期洪峰歷時約4~5旬，其來砂量占汛期(7~10月)之70%~80%，因此可以在汛期時採取低水位運轉，在洪水量到達一定程度時，再將全部閘門全部開啟洩洪排砂，例如黃河的三門峽水庫、萬家寨水庫、小浪底水庫，以及長江三峽水庫，都是採取「蓄清排渾」來進行調水調砂，使庫區內河道維持在沖淤平衡。

而日本的汛期洪峰歷時較短，黑部川的宇奈月與出し平壩主要於每年6~8月採取低水位運轉，而中東地區的蓄清排渾選擇於10~2月(非灌溉期)、北非地區的蓄清排渾操作，則以每年的6~9月採低水位運轉。



資料改編自：1. 角 哲也：台灣における貯水池土砂管理，ダム技術 No. 159, pp. 41-52, 1999.
2. 阿公店水庫規線圖、阿公店水庫運用要點。

圖 4 阿公店水庫蓄清排渾操作規線圖

5. 通砂(sediment routing)

通砂主要指的是利用各種水庫操作方法，使流入水庫的土砂可通過水庫，並減少來砂在水庫落淤的一種方式，基於此點，通砂方法與清除前期淤砂的沖砂(sediment flushing)不能混為一談。

摩里斯與范家驊(1998)、帕爾邁力等人(Palmieri, 2003)將「通砂」(sediment routing)分為「通過」(“pass-through”)與「繞過」(“bypass”)兩種方式，其中「通過」包括「洩砂」(sediment sluicing)與異重流排砂(turbid current venting)等，而「繞過」則主要包括繞庫排砂與離槽水庫(將清水繞過壩區)。

而日本的相關文獻例如ダム工学会維持管理研究部會(2006)則將「繞庫排砂」、「洩砂」與「異重流排砂」列為通砂，而不包括興建離槽水庫。

6. 繞庫排砂(sediment bypassing)

繞庫排砂⁶方式為於水庫上游興建分洪堰及排砂隧道至水庫下游端，如此可將部份推移質及懸浮質經由此排砂隧道，“繞道”至水庫下游，此方式之排砂比取決於排砂道之設計流量，當入庫流量大於排砂道的排洪能力時，部份挾帶泥砂之洪水仍會流入水庫而造成水庫的淤積。有關繞庫排砂之示意可參見圖 5 所示。

7. 清水繞道(sediment-free bypassing)

本方法與繞庫排砂操作方式相反，主要

引取較清水源蓄存，如圖 6 所示，清水繞道一般需在規劃期間進行，國內之離槽水庫可以歸類為此類型。

8. 異重流排砂(turbid current venting)

異重流排砂為利用壩體底孔，將潛流至壩前的高含砂渾水(sediment-laden flow)排出庫外，異重流發生時，渾水的上層為較清的原本庫水，兩者間有一介面。渾水含砂量愈大，流速愈小，水深愈大，愈有機會形成異重流。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。有關異重流的形成機制，可參考圖 7 所示。

異重流排砂與洩砂(sediment sluicing)的運轉特點為異重流排砂不須先降水位；但異重流並非每次洪水均會發生，因此只能排出部分來砂，另外異重流所挾帶者均為細粒之懸浮質，故只能作為輔助型的排砂方法，一般水庫無法僅依賴此一方式長期維持有效庫容，須另以其他方式配合水庫排砂防淤。

9. 渾水排砂(Turbid Water Releasing)

渾水排砂與異重流排砂一樣，都是屬於輔助型的排砂方法，渾水排砂指的是異重流形成渾水潭(muddy lake)時，因渾水係由懸浮載所形成不易沉降，此時可將混濁之庫水排出，以降低渾水於壩前淤積，參見圖 8 所示。

⁶國內亦有使用「繞道排砂」用語，本報告參考經濟部水利署水利規劃試驗所之「石門水庫防洪防淤整體綱要計畫」之用語，採用「繞庫排砂」用語。

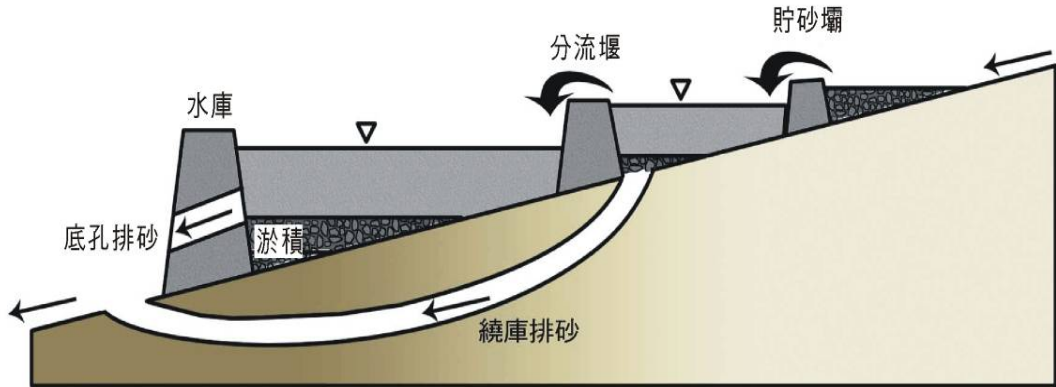


圖 5 繞庫排砂示意圖

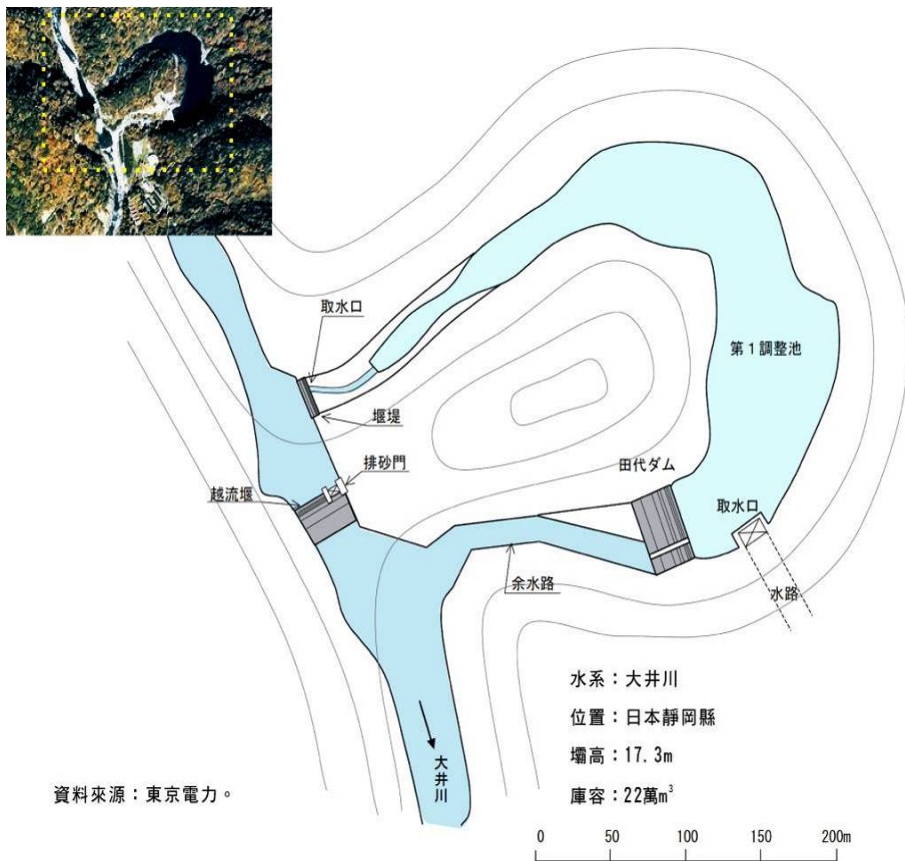
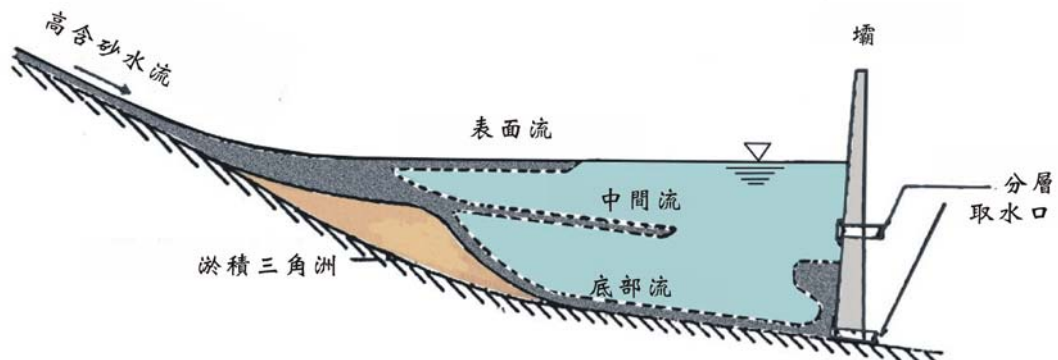
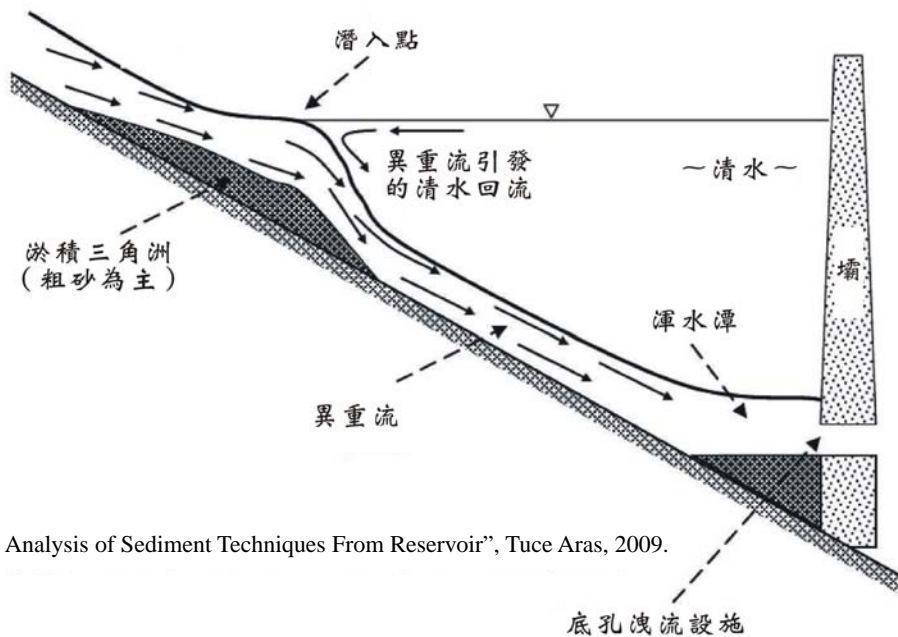


圖 6 日本清水繞道案例



資料來源：「Reservoir Sedimentation and Options for Its Regulation, an Overview」, Qazi M. Anwarul Haque, Pakistan Engineering Congress, 1994.

圖 7 異重流形成機制



資料來源：「Cost Analysis of Sediment Techniques From Reservoir」, Tuce Aras, 2009.

圖 8 異重流／渾水潭排砂機制

10. 水力排砂(hydraulic desilting)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，其水力排

砂類型可參見圖 9 所示。

由圖 9 內容可知，水力排砂包括「通砂」(以排除洪水來砂為主)，包括繞庫排砂、洩砂、異重流排砂／渾水排砂；以及「除淤」(以排除前期淤砂為主)，包括沖砂與水壓吸引排砂。

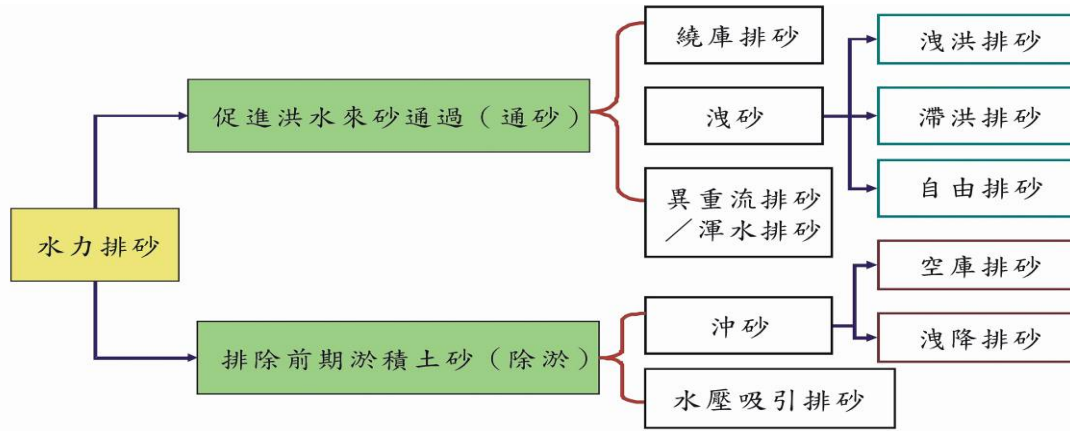


圖 9 水力排砂類型

11. 機械清淤(mechanical desilting)

機械清淤可依施作地點分為浚漂(dedredging)與開挖(excavation)兩種方式，前者主要於水面下施作，後者則主要清除露出陸面的淤砂。

12. 浚漂(dedredging)

本方法主要清除水面下之淤砂，故須於工作船上配置抽泥或挖泥設備，此方式具有機動性及不太會影響水庫正常運轉之特色。主要的浚漂工法分別說明如次，其中國內最常使用之工法為水力抽泥、機械式挖泥與氣力泵抽泥。

(1) 水力抽泥

⊙工作方式：以泥漿泵為動力，在吸沉管內形成管流，利用管流之水力完成抽泥和輸泥作業。

⊙適用情形：可在水庫正常運轉之情況下機動清除各部位淤砂，對以發電及供水為主要之水庫較佳。抽泥之含水量過高為其應用上受限之因素，如何降低含水

量達到外運之狀態為其重要工作

(2) 機械式挖泥

⊙工作方式：機械式挖泥利用抓斗在水面下直接挖泥，以進行淤泥浚漂作業。

⊙適用情形：細粒淤泥易於發生擴散，影響浚漂效率，對於清除含有污染物的淤泥和水力發電廠進水口附近之泥砂均有不利之影響。因此，機械式挖泥船較適於清除粗粒淤砂。

(3) 虹吸抽泥

⊙工作方式：虹吸抽泥利用水庫水位和輸泥管出口間之水頭差所產生之管流，以攪動、吸進淤泥，經輸泥管排出水庫。

⊙適用情形：有效浚漂區則受到大壩上下游水位落差所限制。輸泥管長度增加，排沉效率隨之降低，因此輸泥管線之長度不宜超過 400 m。虹吸抽泥具有耗能低與不影響水庫運轉之優點。虹吸抽泥較

適於中小型水庫或壩前段庫區細粒淤泥之浚渫作業。

(4) 氣力泵抽泥

⊙工作方式：氣力泵一般由三個單體泵按輻射形組合而成。每個泵體經排氣進泥、進氣、排泥三個過程，將泥漿斷續排出。空氣壓縮機為氣力泵之動力源。

⊙適用情形：氣力泵所排出之泥漿經由輸泥管送至棄土場、沉澱池或處理場如輸泥管線太長，氣力泵之輸送能力不足，則可加設中繼泵站，以利輸泥。氣力泵清淤具有機械磨損小(無與泥漿直接接觸之高速轉動部件)、排泥濃度高、運轉費用小及抽泥作業不影響水庫運轉等優點。

13. 開挖(excavation)

本方法主要是利用挖土、裝土、運土之機具以清除露出水庫水面淤砂之一種浚渫方式。由於開挖係於陸面上施工，故本法為台灣目前最常用的水庫之清淤方式，一般而言，陸面開挖作業主要在枯水期或水庫水位低時實施，且開挖區位以庫尾區的機會較多。

14. 水壓吸引排砂(hydrosuction)

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0.2 mm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，目前國際多稱呼此法為HSRS(hydrosuction sediment-removal

systems)⁷，而美國另採用SEPS(sediment evacuation pipeline system)之稱呼，以與原始的虹吸抽泥工法形成區隔，故本計畫將之稱為「水壓吸引排砂」。

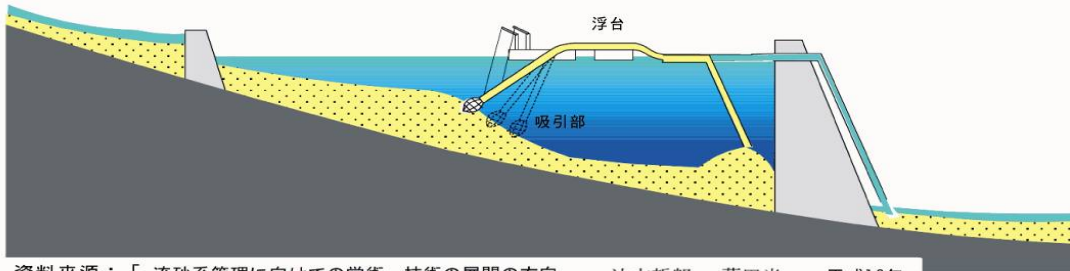
本工法的排砂效率高，排砂濃度可高達10萬~20萬ppm，且可直接排放到下游河道，其整體費用相較於機械清淤便宜，且處理部分為無法作為骨材的微細粒料，對於水源運用較為吃緊的水庫，不啻是一種可嘗試的排砂對策，故目前有許多國家已開始進行新工法研發與應用，並逐步將新工法應用在水庫的淤砂清除作業，2010年日本大壩會議土砂管理分科會將水壓吸引排砂分成三大類型，分別為「移動式」、「固定式」與「中間形式」，如圖10所示。

15. 縱向/橫向沖蝕強化工法(longitudinal or lateral erosion enhancement)

本法屬於配合沖砂(sediment flushing)的強化工法(enhancement)，當蓄水區域地形並非良好的峽谷地形，且沖砂底孔因洩量受限，所形成深槽寬度不足，此時則可配合人工方式在灘地預先挖渠並導水，使灘地受溝蝕或管湧作用，使土砂崩落於深槽內並擴大深槽寬度，來加強水庫沖砂之效果。

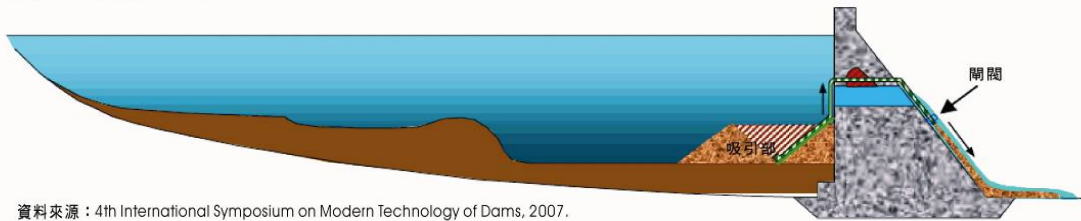
⁷出自於“Hydrosuction Sediment-Removal Systems (HSRS): Principles and Field Test”, Hotchkiss and Huang, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 121, No. 6, June 1995, pp. 479-489.

移動式吸引工法



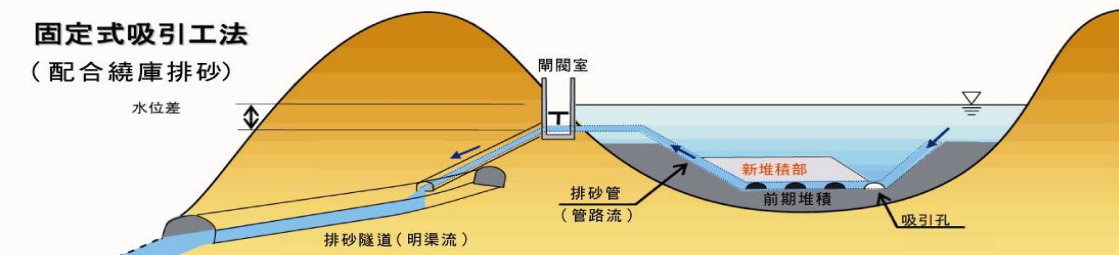
資料來源：「流砂系管理に向けての學術・技術の展開の方向」，辻本哲郎・藤田光一，平成18年。

固定式吸引工法



資料來源：4th International Symposium on Modern Technology of Dams, 2007.

固定式吸引工法 (配合繞庫排砂)



資料來源：「ダムにおける堆砂対策の現状と課題」，渡邊守・田島健，國土交通省中部地方整備局，平成20年。

圖 10 水壓吸引排砂工法概況