

行政院及所屬各機關出國報告
(出國類別：研究)

水庫淤積改善計畫

服務機關：台灣電力股份有限公司

姓名職稱：葉庭恩 工程師

派赴國家：日本

出國期間：101年11月5日至101年12月28日止

報告日期：102年2月22日

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：水庫淤積改善計畫

頁數 35 含附件：是否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話

台灣電力公司/陳德隆/ (02) 2366-7685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話

葉庭恩/台灣電力公司/營建處/水理設計專員/ (02) 2366-6970

出國類別：1考察2進修3研究4實習5其他

出國期間：101年11月5日至101年12月28日 出國地區：日本

報告日期：102年2月22日

分類號/目

關鍵詞：

內容摘要：（二百至三百字）

台灣地區中大型水庫近十年來淤積速率顯著增加，水庫的有效庫容不斷地大量減少，且台灣水庫新建不易，因此，既有水庫的有效庫容更應努力維持，以確保各項用水之穩定容量。鑒於日本地理環境與台灣相似，其所面臨之淤積問題及減淤對策等經驗可提供台灣未來處理淤積問題參考，此行主要係了解日本水力排砂之繞道排砂、水力沖砂及水壓吸引排砂等各項技術、現況、成效及可能面臨之問題，藉此提供未來處理淤積問題解決對策擬定參考，以保有重要水資源。

本文電子檔已傳至出國報告資訊網 (<http://open.nat.gov.tw/reportwork>)

目 錄

一、 前言	1
二、 行程	2
三、 出國期間所遭遇之困難與特殊事項	4
四、 研習內容	5
4.1 日本水庫淤積概況	5
4.2 日本水庫排砂對策	7
4.3 繞庫排砂	8
4.3.1 日本繞庫排砂現況	9
4.3.2 美和水庫繞庫排砂系統介紹	12
4.3.2.1 美和水庫概要	12
4.3.2.2 排砂隧道規劃設計簡介	14
4.3.2.3 排砂隧道及附屬設施簡介	16
4.3.2.4 排砂運轉狀況	18
4.4 水壓吸引排砂	20
4.4.1 研發背景	20
4.4.2 空氣閘排砂設施研發成果說明(土木研究所)	23
4.4.3 潛行吸引式排砂管研發成果說明(土木研究所)	27
4.5 其他排砂方式	33
五、 心得與建議	35

表目錄

表 2-1 日本研習工作紀要表.....	2
表 4-1 日本繞庫排砂隧道一覽表.....	9
表 4-2 美和水庫諸元表.....	12
表 4-3 美和水庫貯砂堰及分派堰諸元表.....	16
表 4-4 水壓吸引式排砂工法比較表.....	21
表 4-5 潛行吸引排砂管試驗設備數據.....	29
表 4-6 置土還原一覽表.....	34

圖 目 錄

圖 4-1 日本土砂淤積調查資料.....	6
圖 4-2 土砂淤積量示意圖.....	6
圖 4-3 整體排砂對策.....	7
圖 4-4 旭水庫繞道排砂佈置圖.....	10
圖 4-5 美和水庫繞道排砂佈置圖.....	10
圖 4-6 松川水庫繞道排砂佈置圖.....	11
圖 4-7 小涉水庫繞道排砂佈置圖.....	11
圖 4-8 美和水庫地理位置圖.....	13
圖 4-9 美和水庫年入流、年來砂量及淤積量.....	13
圖 4-10 美和水庫淤積測量斷面圖.....	13
圖 4-11 美和水庫繞庫排砂設施示意圖.....	15
圖 4-12 美和水庫繞庫排砂設計年間土砂移動量.....	15
圖 4-13 美和水庫進水口附近各設施.....	16
圖 4-14 美和水庫排砂隧道三場洪水事件排砂效果.....	19
圖 4-15 美和水庫排砂隧道三場洪水事件沖瀉載排砂效果.....	19
圖 4-16 移動式水壓吸引排砂示意圖.....	22
圖 4-17 固定式水壓吸引排砂示意圖.....	22
圖 4-18 空氣閘排砂設施示意圖.....	23
圖 4-19 空氣閘排砂設施操作示意圖.....	24
圖 4-20 空氣閘排砂設施排砂濃度與時間關係圖.....	26
圖 4-21 潛行吸引排砂管示意圖.....	27
圖 4-22 潛行吸引排砂管排砂過程示意圖.....	28
圖 4-23 模型試驗小尺寸及大尺寸試驗土砂粒徑分布.....	29
圖 4-24 現地試驗土砂粒徑分布.....	30
圖 4-25 小尺寸模型試驗成果.....	32
圖 4-26 大尺寸模型試驗成果.....	32
圖 4-27 現地試驗結果濃度與時間關係.....	33

照片目錄

照片 4-1 美和水庫淤積照片	14
照片 4-2 空氣閘排砂設施模型試驗照片	25
照片 4-3 空氣閘排砂設施現地照片	26
照片 4-4 潛行吸引排砂管照片	27
照片 4-5 模型試驗設備照片	30
照片 4-6 現地試驗照片及現地試驗使用之吸引部	30
照片 4-7 現地試驗前後淤積面照片	33

一、 前言

本公司管轄之水庫近年來因颱風、豪雨加劇，且台灣本島山區邊坡陡峭，土石沖刷問題持續不斷且更益嚴重，產生大量土石崩落、土石流等問題，更造成本公司管轄之水庫土砂淤積量大增，有效庫容減少的問題日益嚴重，漸而影響本公司水力發電效益及供電穩定。以霧社水庫而言，該壩完工至今約53年，設計總庫容已由15,000萬立方公尺至民國99年底只剩5,379萬立方公尺，總容積淤積率高達60%以上，建壩迄今今年平均淤積量約186萬立方公尺，近十年年平均淤積量約建壩迄今今年平均淤積量之兩倍，其淤積情況相當嚴重。

參考各國水庫淤積處理對策及實際案例，茲因日本地理環境及水文條件與台灣較為相似，且日本為世界上工業技術先進國家之一，日本面臨之水庫淤積問題、處理對策及相關技術可作為學習之對象，其現有之水力排砂研究成果及經驗可提供本公司未來處理淤積問題對策參考，除了水力排砂之繞道排砂之規劃及運轉等實際案例將可提供本公司較經濟、安全、可靠之寶貴資料及經驗，此外，日本研發中之水壓吸引排砂之水力排砂技術，亦值得持續了解，或可作為將來解決淤積問題對策之一選項。

二、 行程

本次考察期間為 101 年 11 月 5 日至 101 年 12 月 28 日止，共計 54 日，
研習過程之參訪或研習地點與工作紀要詳如下表 2-1。

表 2-1 日本研習工作紀要表

日期	城市/機構	工 作 紀 要
101.11.5 一	台北～東京	啟程赴東京。
101.11.6 二	長野縣伊那市／國土交通省中部地方整備局・天龍川水庫統和管理事務所・美和水庫管理支所	美和水庫淤積現況及繞庫排砂隧道管理維護情形。
101.11.7 三	長野縣上伊那／國土交通省中部地方整備局・天龍川水庫統和管理事務所	小涉水庫淤積現況及繞庫排砂隧道設計施工情形。
101.11.8 四	長野縣伊那市～名古屋	交通移動及資料整理。
101.11.9 五	名古屋／國土交通省中部地方整備局 東京	天龍川流域整體治理計畫及佐久間水庫繞道排砂隧道規畫方案。 交通移動至東京。
101.11.10~ 101.11.11 六～日	東京	資料整理。
101.11.12 一	神奈川縣相模原市／神奈川縣企業廳相模川水系水庫管理事務所・相模水庫管理所 神奈川縣相模原市／國土交通省關東地方整備局・相模川水系廣域水庫管理事務所	相模水庫淤積浚碟作業方法及成效。 宮瀨水庫淤積置土對策及成效。
101.11.13 二	栃木縣那須塩原市／五洋建設株式會社 東京／日特建設株式會社	參訪該公司水壓吸引排砂技術現況成果。 參訪該公司邊坡治理工法及水庫滲漏處理工法。

101.11.14 三	東京／株式會社建築技術研究所 東京／宏和工程株式會社	參訪該公司水壓吸引排砂技術現況成果。 參訪該公司水壓吸引排砂技術現況成果。
101.11.15~ 101.11.18 四~日	東京～茨城縣筑波市	資料整理、準備資料，交通移動至茨城縣筑波市。
101.11.19~ 101.12.27	茨城縣筑波市／國土交通省獨立行政法人土木研究所 岐阜縣奧飛驒地區／現地試驗場地 富山縣／關西電力黑部川電力系統中心、富山縣／國土交通省北陸地方整備局黑部河川事務所、京都／京都大學防災研究機構	於水工研究 GROUP 水理 TEAM 研習該單位之水壓吸引排砂技術及日本國內繞道排砂規劃、設計技術。 11月28~30日由土木研究所安排前往位於岐阜縣穗高地區之ヒル谷堰堤現地試驗場地，參與水壓吸引排砂試驗。 12月19~20日由土木研究所安排前往富山縣黑部川宇奈月及出し平水庫了解排砂聯合操作及下游河道狀況，以及前往京都大學訪問角哲也教授，了解日本國內土砂淤積對策。
101.12.28 五	茨城縣筑波市～東京～台北	返抵國門。

三、 出國期間所遭遇之困難與特殊事項

本次出國得逢長官極力幫忙聯繫各單位，原聯繫關西電力公司表示有意前往該公司研習日本淤積技術，惟關西電力公司表示無法安排長期訓練課程，後經長官聯繫中興工程顧問股份有限公司協助安排，方得順利參訪各相關單位及土木研究所研習事宜，在此感謝中興工程顧問股份有限公司、亞東關係協會、駐東京辦事處、駐大阪辦事處及駐橫濱辦事處協助。另特別感謝中興工程顧問股份有限公司池田 真由美小姐的安排、陪同及多次前往日本擔任翻譯工作，使得此行更加順利。

出國期間因上述各單位的協助，行程相當順利，並無遭遇特殊困難，僅在日本新的水壓吸引式排砂技術研發資訊的取得遭遇較大的困難，主要因為該技術仍屬研發階段，且該項技術涉及專利問題，部分公司僅以簡報說明研發狀況，無法提供更詳細書面資料，此乃遺珠之憾。

四、 研習內容

本次研習為期 54 天的期間，前兩週先安排參訪日本水庫管理單位及 3 間參與研發水壓吸引排砂之建設公司，了解繞道排砂隧道規劃、設計、運作及維護情形、操作方式，以及繞道排砂隧道各項相關設施如進水口、貯砂壩、分派堰及繞道隧道下游消能工等磨損情形，置土還原處理作業方式及成果，水壓吸引排砂原理及現階段研究成果。隨後約六週時間於國土交通省獨立行政法人土木研究所研習該單位研發之水壓吸引排砂工法現階段成果及研習排砂隧道規劃及設計技術，藉由該單位研究員提供之資料及講解，了解日本繞道排砂及水壓吸引排砂之經驗，並配合該單位之安排參觀水壓吸引排砂現地試驗及前往黑部川流域了解聯繫排砂(水力沖砂)之成效及困難。

4.1 日本水庫淤積概況

日本自 1950 年代開始便已規定新建水庫設計時需考慮 100 年計畫淤積容量訂定水庫庫容，藉此避免因淤積問題造成水庫有效庫容損失及減少水庫壽齡，若水庫庫容訂定過小，可能易遭大型洪水挾帶大量土砂淤積無法排除影響水庫功能，若水庫庫容訂定過大，則要考慮建設成本問題，因此多數水庫採用機械開挖、水中浚渫或上游設置貯砂壩等方式保有 100 年計畫淤積容量。

近年來，日本為了解各水庫土砂淤積狀況及檢討現行處理淤積對策成效，規定日本所有水庫(約 2,900 座)中壩高高於 15 公尺且總庫容大於 100 萬立

方公尺以上的水庫(約 900 座)原則上每年需進行水庫淤積調查,根據統計資料顯示大部分的水庫年淤積量小於 10 萬立方公尺,整體而言水庫淤積問題不算嚴重。然而,中部地區及北陸地區的某一些水庫譬如宇奈月水庫、小涉水庫、矢作水庫等因位於中央構造線或系魚川靜岡構造線附近,其年淤積量大約 50 萬至 100 萬立方公尺,如圖 4-1 各地方分類統計資料顯示。雖然部分水庫之總庫容淤積率(淤積量占總庫容)僅約 20~30%,然而淤積量已占 100 年計劃淤積容量之 80%以上,其淤積量已經遠超過預估淤積速率,如圖 4-2,因此日本積極投入資源處理淤積問題,以確保水庫有效庫容。

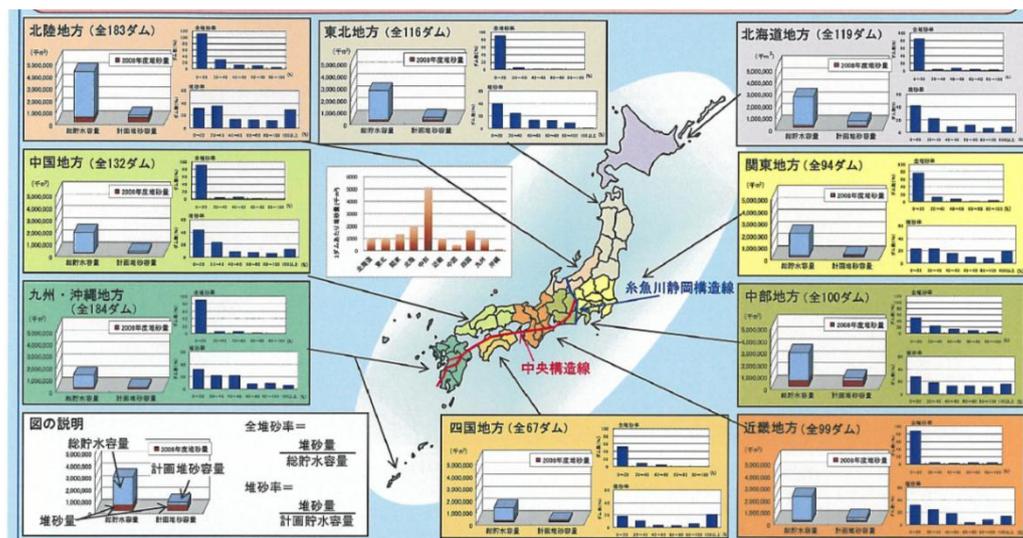


圖 4-1 日本土砂淤積調查資料
(出處：京都大學角 哲也教授簡報資料)

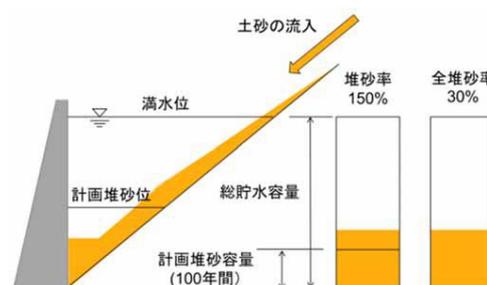


圖 4-2 土砂淤積量示意圖
(出處：京都大學角 哲也教授簡報資料)

4.2 日本水庫排砂對策

淤積處理的對策主要可以分為三個部分討論，上游來砂量的減輕對策、來砂的排除對策及淤積的清除對策，如圖4-3，針對來砂量的減輕對策而言，應針對上游集水區實施坡地整治、森林復育等減少來砂源，另可於水庫上游建設貯砂壩以減少入庫砂量；就來砂的排除對策而言，主要乃是針對上游來砂在尚未落淤於水庫內即進行排除的手法，可採用的方法諸如繞庫排砂、異重流排砂等方式；至於淤積砂石的清除對策，一般最常見的方法為機械清淤，譬如陸上開挖、水中浚渫等，或是利用水力排砂方式，譬如空庫排砂、洩降排砂等方式。



圖 4-3 整體排砂對策

(出處：京都大學角 哲也教授簡報資料)

日本另一處理水庫淤積土砂之清除方式為置土還原(Replenishing)，該方法是利用機械清淤的方式配合將土砂還原下游河道之目的，將清除之淤積土砂運至水庫下游河道內，尋找一適合地點堆置，利用自然洪水或人工洪水等方式沖刷堆置之土砂至下游，藉此方法除可解決水庫淤積問題亦可減緩下游河道沖刷問題。

水庫淤積處理的方式有好幾種，然而，各種方式有其適用條件，因此淤積處理對策的選擇須針對各項因素譬如地形、來砂量及粒徑大小分布、水庫可運用水量及操作水位，以及經濟性等因素做綜合考量，以下就日本繞庫排砂、水壓吸引排砂及置土還原逐一說明。

4.3 繞庫排砂

繞庫排砂係興建一條隧道將上游來砂直接導入隧道內，藉由洪水期間，將上游來砂輸送至下游河道內，以避免上游來砂落淤於水庫庫區。其投入成本主要與排砂隧道長度及斷面相關，雖然初期投入成本昂貴，不過繞庫排砂隧道具有多項優點，諸如興建過程及完工後無需洩降水庫水位，對於既有水庫之水位及庫容影響小，不影響水庫運用操作；排砂過程係利用洪水期間之上游來水進行排砂操作，不會對下游造成額外洪水，對環境衝擊較小。然而，安全的將來砂導入排砂隧道及隧道的磨損問題是重要的課題，因此藉由日本繞庫排砂之經驗為借鏡，提供公司未來興建排砂隧道參考。

4.3.1 日本繞庫排砂現況

繞庫排砂隧道在日本已有多個案例，主要多集中於日本本島中部地區，興建完成使用中的有關西電力所屬之旭(Asahi)水庫及國土交通省所屬之美和(Miwa)水庫，興建中的有長野縣所屬之松川(Matsukawa)水庫及國土交通省所屬之小涉(Koshibu)水庫，以上排砂隧道之詳細資料如下表 4-1，繞庫排砂佈置如圖 4-4~4-7。

表 4-1 日本繞庫排砂隧道一覽表

水庫名稱	旭水庫 Asahi	美和水庫 Miwa	松川水庫 Matsukawa	小涉水庫 Koshibu
斷面形狀	倒 D 形	馬蹄形	倒 D 形	馬蹄形
斷面尺寸	寬 3.8m 高 3.8m	2r=7.8m	寬 5.2m 高 5.2m	2r=7.9m
隧道長度	2,350m	4,300m	1,417m	3,982m
平均坡度	2.9%	1%	4%	2%
設計流量	140cms	300cms	200cms	370cms
設計流速	11.4m/s	10.8m/s	15m/s	9m/s
完工日期	1998	2004	興建中	興建中
操作頻率	13 次/年	2 次/年	—	—
對象土砂	全部流入土砂	沖瀉載	懸浮載 沖瀉載	懸浮載 沖瀉載
年排砂量 (計畫)	約 8.3 萬 m ³	約 40.0 萬 m ³	約 10.5 萬 m ³	約 25.9 萬 m ³

ダム事業者：関西電力
 1978年（昭和53年）竣工
 バイパス：1998年（平成10年）から運用



圖 4-4 旭水庫繞道排砂佈置圖
 (出處：(獨)土木研究所簡報資料)

ダム事業者：中部地整
 1959年（昭和34年）竣工
 バイパス：2005年（平成17年）から試験運用



圖 4-5 美和水庫繞道排砂佈置圖
 (出處：(獨)土木研究所簡報資料)

ダム事業者：長野県
 1974年（昭和49年）竣工
 バイパス：建設中（2012年）

（松川ダム管理所HPより）

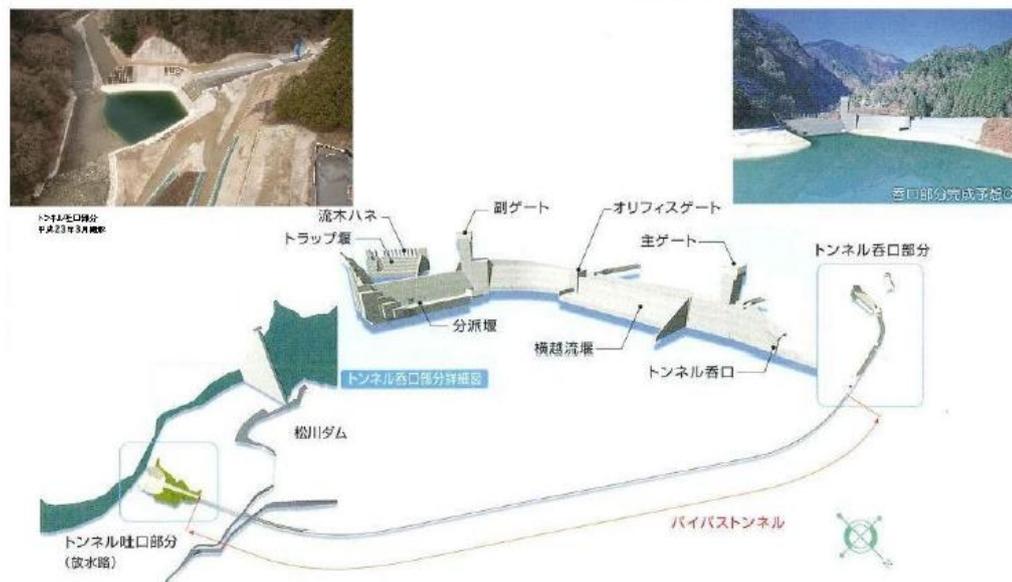


圖 4-6 松川水庫繞道排砂佈置圖
 （出處：(獨)土木研究所簡報資料）

ダム事業者：中部地整
 1969年（昭和44年）竣工
 バイパス：建設中（2012年）

（国交省中部地方整備局）

事業イメージ写真



圖 4-7 小渋水庫繞道排砂佈置圖
 （出處：(獨)土木研究所簡報資料）

4.3.2 美和水庫繞庫排砂系統介紹

4.3.2.1 美和水庫概要

美和水庫位於長野縣天龍川流域支流三峰川，為一個防洪、灌溉及發電功能之多目的水庫，由國土交通省管轄，壩高 69.1 公尺，水庫總蓄水容量為 29.95 百萬立方公尺，其設施諸元如下表 4-2 所示，地理位置如圖 4-8。

美和水庫完工於 1959 年，完工後 1959、1961、1982 及 1983 年遭遇大型洪水夾帶大量土砂，導致水庫有效庫容大幅減少。自 1966 年開始採用開挖砂、礫石疏浚方式以保有水庫庫容，迄 1988 年以來大約共清除 532 萬立方公尺淤積土砂。如果這些淤積土砂未經開挖清除方式處理，則整體淤積量大約有 1,947 萬立方公尺，估計年平均淤積量約 47 萬立方公尺，美和水庫年入流、年來砂量及淤積量如圖 4-9，水庫淤積測量斷面圖如 4-10，水庫淤積如照片 4-1。

表 4-2 美和水庫諸元表

型式	重力式混凝土壩
壩高	69.1 m
壩長	367.5 m
壩頂標高	EL 817.6 m
集水面積	311.1 km ²
總貯水容量	29,952,000 m ³
有效貯水容量	20,745,000 m ³
防洪容量	13,400,000 m ³
計畫洪水流量	1,200 cms
計畫放流量	500 cms
洪水期限制水位	EL 808.0 m



圖 4-8 美和水庫地理位置圖
(出處：美和水庫再開發事業資料)

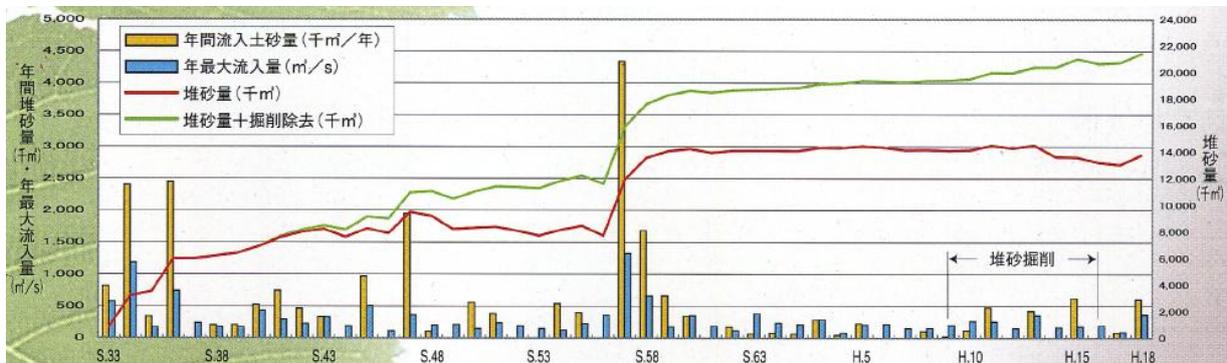


圖 4-9 美和水庫年入流、年來砂量及淤積量
(出處：三峰川總合開發事業的概要資料)

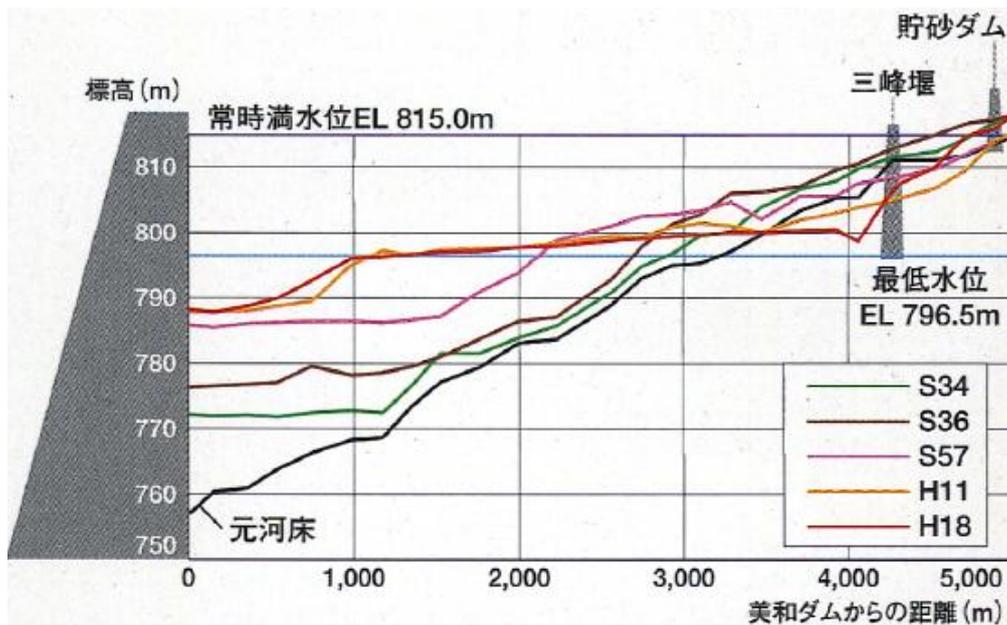


圖 4-10 美和水庫淤積測量断面圖
(出處：三峰川總合開發事業的概要資料)



照片 4-1 美和水庫淤積照片
(出處：三峰川總合開發事業的概要資料)

4.3.2.2 排砂隧道規劃設計簡介

國土交通省為解決美和水庫淤積問題，於 1987 年即著手實施美和水庫再開發事業計畫調查工作，於 1989 年著手三峰川總和開發事業的建設，2001 年進行排砂隧道主體工程，2005 年完成繞庫排砂隧道及相關設施，並於同年開始繞庫排砂隧道試運用。

依據調查工作所得之資訊，美和水庫繞庫排砂隧道設計用來排除來砂顆粒粒徑小於 $74\mu\text{m}$ 之沖瀉載，顆粒較大之懸浮載及底床載則攔蓄在排砂隧道上游之貯砂堰及分派堰，再以人工清淤之方式清除貯砂堰及分派堰之淤積，以確保貯砂堰及分派堰之庫容。根據開發計畫規劃，美和水庫排砂隧道設計排砂容量係以上游年來砂量 685,000 立方公尺規劃，其中包含 525,000 立方公尺之沖瀉載及 160,000 立方公尺之懸浮載及底床載；排砂隧道則設計排除

約占整體年來砂沖瀉載之 3/4，大約為 399,000 立方公尺之沖瀉載導入排砂隧道排除，剩下約 126,000 立方公尺之沖瀉載則會隨洪水流入美和水庫內，再透過湖內堆砂對策設施(計畫中)排除約 100,000 立方公尺，則僅剩 26,000 立方公尺土砂淤積於美和水庫庫區內，可大幅降低水庫淤積問題，美和水庫恆久湖內堆砂對策如下圖 4-11 及設計年間土砂移動量如圖 4-12 所示。

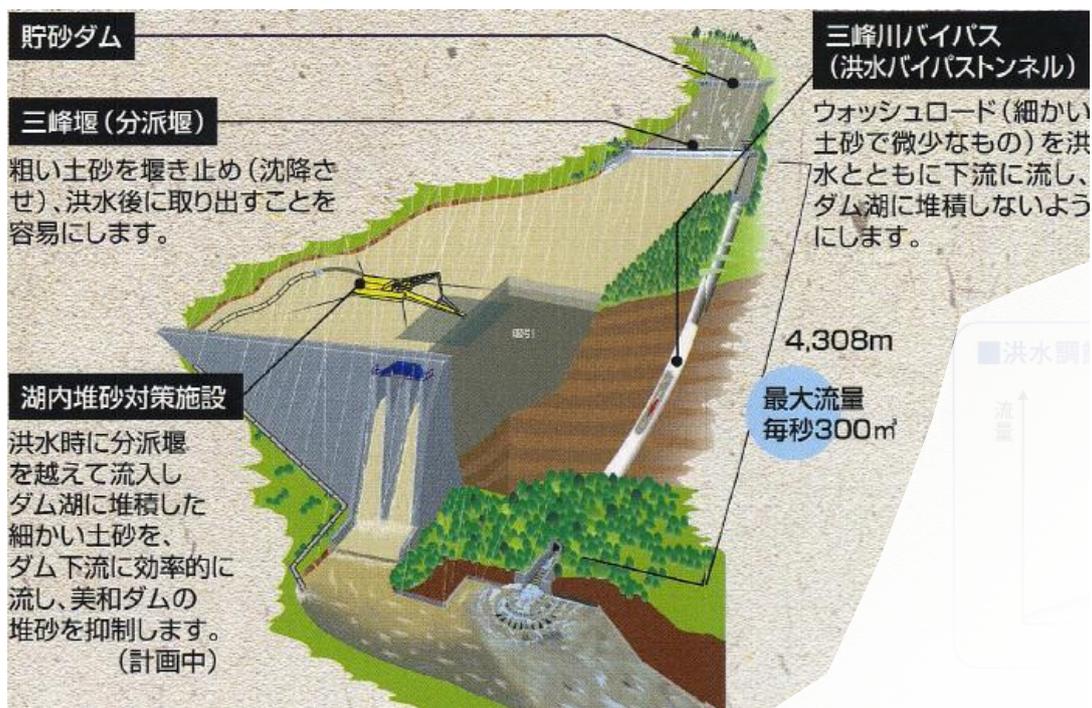


圖 4-11 美和水庫繞庫排砂設施示意圖
(出處：三峰川總合開發事業的概要資料)

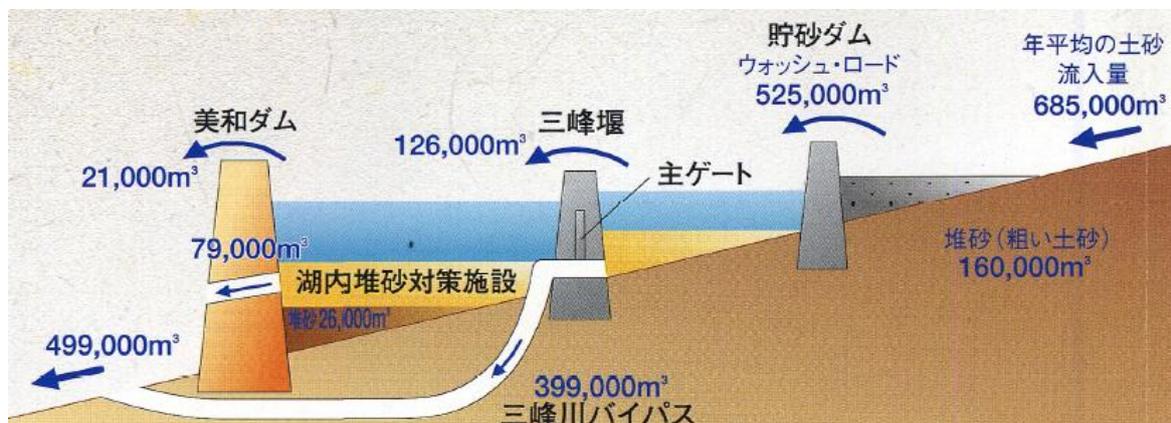


圖 4-12 美和水庫繞庫排砂設計年間土砂移動量
(出處：三峰川總合開發事業的概要資料)

4.3.2.3 排砂隧道及附屬設施簡介

美和水庫繞庫排砂隧道系統包括貯砂堰、導流工、攔砂潛堰、攔流木工、分派堰(三峰堰)、排砂隧道進水口、隧道進水口主副閘門與橫越流堤、排砂隧道出水口消能工及魚道等設施，貯砂堰、分派堰設施諸元如下表 4-3，其佈置如圖 4-11 及下圖 4-13，以下將逐項簡介各設施功能。

表 4-3 美和水庫貯砂堰及分派堰諸元表

貯砂堰	
堰高	10.2 m
堰頂長	144.4 m
堆砂容量	20 萬 m ³ (水平堆砂時)
分派堰	
堰高	20.5 m
堰頂長	244.5 m
堆砂容量	52 萬 m ³ (水平堆砂時)

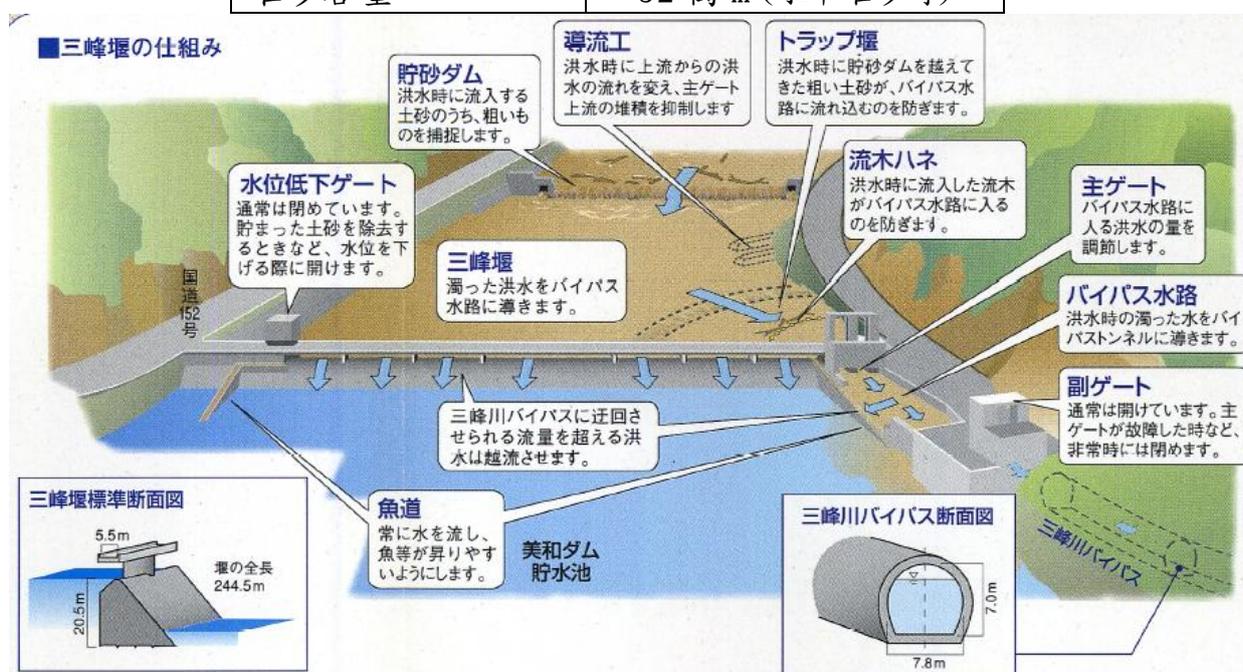


圖 4-13 美和水庫進水口附近各設施
(出處：三峰川總合開發事業的概要資料)

- 貯砂堰

因美和水庫排砂隧道設計僅排除沖瀉載，故於水庫庫區最上游設置貯砂堰，主要目的為捕捉上游來砂中的粗顆粒土砂，以避免粗顆粒土砂進入排砂隧道內，其設計堆砂容量約 20 萬立方公尺，為確保貯砂堰的堆砂容量，管理單位需定期清除堆積於貯砂堰之粗顆粒土砂。

- 導流工

為避免洪水挾帶大量土砂直接沖向排砂隧道進水口，導致進水口附近堆積大量土砂而影響進水口流況及主閘門操作，因此設置導流工改變流向。

- 攔砂潛堰

雖然水庫上游已有設置貯砂堰攔阻大顆粒之土砂，惟為避免較小粒徑之土砂越過貯砂堰隨洪水流入排砂隧道，造成嚴重磨損問題，因此在進水口前端設置攔砂潛堰。

- 攔流木工

攔流木工主要功能為避免洪水挾帶流木進入隧道內，除因流木碰撞破壞隧道安全外，也可避免流木卡在隧道內，造成阻塞問題。

- 分派堰(三峰堰)

分派堰設置於排砂隧道進水口前端，利用分派堰的水位低下閘門操作控制，非洪水期間閘門開啟，使河水流入美和水庫庫區蓄存利用，洪水期間將閘門關閉，引導水流流入排砂隧道進水口，藉以分流洪水。

- 隧道進水口主副閘門與橫越流堤

隧道進水口主閘門非洪水期間關閉，洪水期間全開使水流流入排砂隧道；副閘門係為緊急措施，當主閘門無法操作時利用副閘門關閉，避免水流繼續流入排砂隧道。另進水口開渠設置橫越流堤(側溢流道)，當水量超過 300cms 時利用橫越流堤自然溢流，以確保流入排砂隧道的水量不會超過設計流量 300cms。

- 排砂隧道出水口消能工

為避免泥砂堆積於排砂隧道內，導致隧道內淤積減少通水斷面，一般排砂隧道流速多設計在 10 秒立方公尺，為避免隧道出水口附近沖刷問題，美和水庫排砂隧道在出口處設置一環形消能工，以減低高流速水流對河道沖刷問題。

4.3.2.4 排砂運轉狀況

美和水庫排砂隧道完工後即開始試驗運用，在 2006 年 7 月、2007 年 7 月及 2007 年 9 月的三場洪水期間實施排砂運用操作，根據觀測資料得知，三場洪水期間共挾帶約 118 萬立方公尺的土砂，其中約 52 萬立方公尺堆積於貯砂堰及分派堰庫區，約 32 萬立方公尺土砂由排砂隧道排除，僅約 34 萬立方公尺流入美和水庫，約占總來砂量的 29%，換言之，美和水庫繞庫排砂系統利用貯砂堰、分派堰攔蓄及排砂隧道排除共約 71%，已可大量減少泥砂進入水庫庫區，減低淤積速率，三場洪水排砂效果如圖 4-14。

若僅考慮沖瀉載的排砂效率問題，針對這三場洪水事件之沖瀉載來砂及排砂資料統計如圖 4-15，排砂隧道原設計時規畫利用排砂隧道排除占總沖瀉載來砂量的 3/4，惟此三場洪水事件之總流入三峰堰沖瀉載為 70.5 萬立方公尺，藉由排砂隧道排除之沖瀉載約為 31.9 萬立方公尺，僅占總沖瀉載量之 45%，仍有約 38.6 萬立方公尺之沖瀉載流入美和水庫庫區，與原設計有差異。



圖 4-14 美和水庫排砂隧道三場洪水事件排砂效果
 (出處：美和水庫恆久堆砂対策設施調查結果資料)

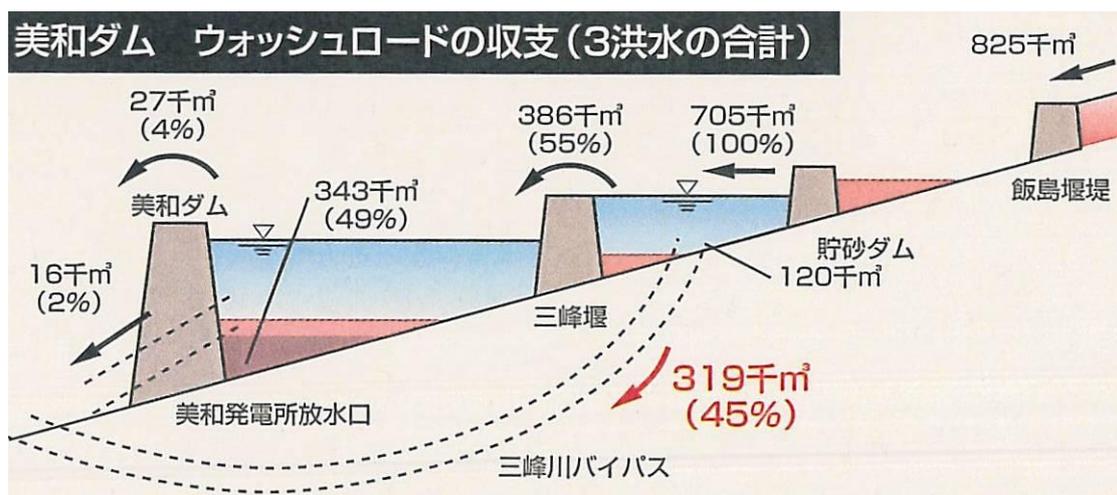


圖 4-15 美和水庫排砂隧道三場洪水事件沖瀉載排砂效果
 (出處：美和水庫恆久堆砂対策設施調查結果資料)

4.4 水壓吸引排砂

4.4.1 研發背景

在 4.2 節已說明日本現行之水庫排砂方式，然而各項處理方式均面臨不同限制，譬如機械清淤方式，因採用大量人力、機械等方式進行淤積土砂之浚渫(Dredging)或開挖(Excavation)，需每年投入大量成本，此外，淤積土砂搬運過程對環境的影響與堆置場地不足等問題，更是能否採用機械清淤方式的關鍵；空庫排砂(Empty Flushing)或洩降排砂(Drawdown Flushing)等方式，需放空水庫或洩降水位等操作方式進行沖砂，恐浪費大量水資源，對本公司而言將減少發電收入，且若壩體本身無底孔排砂道，需進行壩體改建工程；繞庫排砂(Sediment Bypassing)需建設一條排砂隧道，初期須投入大量投資成本且隧道磨損問題恐須每年維護，增加營運成本。因此，日本研發一種新的排砂技術，其目的希望能滿足 1. 降低水庫操作運用的影響，減少水資源浪費；2. 可以有效控制排出土砂之數量與粒徑，控制水庫上下游土砂環境平衡；3. 減少初期及每年維護成本，減少投資負擔。此種新的排砂技術稱為水壓吸引排砂(Hydrosuction)，主要係利用水庫上游水位與下游河道水位的水頭差，以虹吸效應排出水庫內淤積土砂，因為此方法無須大量機械動力及興建工程，相較其他水庫排砂方式，所需之投入成本較低。

目前日本已有多家公司投入水壓吸引排砂研發，依其操作方式可分為移動式與固定式兩種：

移動式操作方式係利用操作平台或操作船移動吸引部(Suction Unit)在庫區內不同位置進行吸引排砂工作，示意圖如圖 4-16，其優點可任意移動吸引部至不同區域進行吸引排砂，相較於固定式此方法吸引範圍較具彈性；吸引部因沉木或垃圾等問題阻塞時，吸引部可以隨時吊起進行維修，平時亦容易進行維護工作；相較於固定式較易處理有黏滯性之粉土或黏土，惟其效率仍不高。其缺點為不易控制吸引部正確位置，需較精密設備控制，以正確將吸引部送達目標區；考量環境影響問題，排砂期間應於洪水期間操作，然洪水期間使用操作平台及操作船有作業安全問題。

固定式係將吸引管(Suction Pipe)或取水裝置設置於庫區內，示意圖如圖 4-17，其優點為排砂操作簡單，僅需開啟下游端控制閥即可進行排放工作，無須操作吸引部，在洪水期間無作業安全問題。其缺點為排砂範圍固定，不具彈性；對於具有黏滯性粉土或黏土，其排砂效率不佳；吸引部安裝費用相較於移動式而言，其所需成本較高，且日後遭遇沉木或垃圾等阻塞時維修不易，且平時維護困難。

目前日本研發中的水壓吸引排砂工法及研發單位如表 4-4，均屬試驗階段，尚無實際運用於水庫之案例，現階段研發成果說明如 4.4.2~4.4.3。

表 4-4 水壓吸引式排砂工法比較表

分類	移動式	固定式
操作方式	利用操作平台或操作船控制吸引部位置	吸引部須埋設於固定位置，僅需開啟下游端放水閥即可

工法名稱 (研發單位)	1. Hydro-I 工法(青木建設、宏和工程) 2. 虹吸排砂系統(水庫) 3. 木津球(東亞建設、東京電力) 4. 特殊(Hazama) 5. 多孔式排砂工法(五洋)	1. 潛行吸引式排砂管(土木研究所) 2. 空氣閘排砂設施(土木研究所) 3. Hydro-Pipe 工法(青木建設、宏和工程) 4. 鉛直二重管吸引工法(電源開發) 5. 鉛直埋設排砂工法((社)水庫水源地土砂對策技術研究會) 6. Sheet 工法(土木研究所, IHI)
----------------	---	---

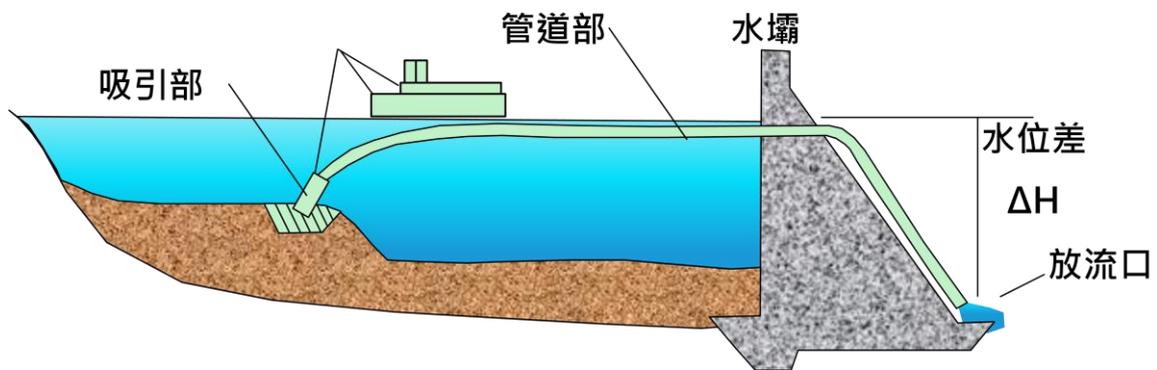


圖 4-16 移動式水壓吸引排砂示意圖

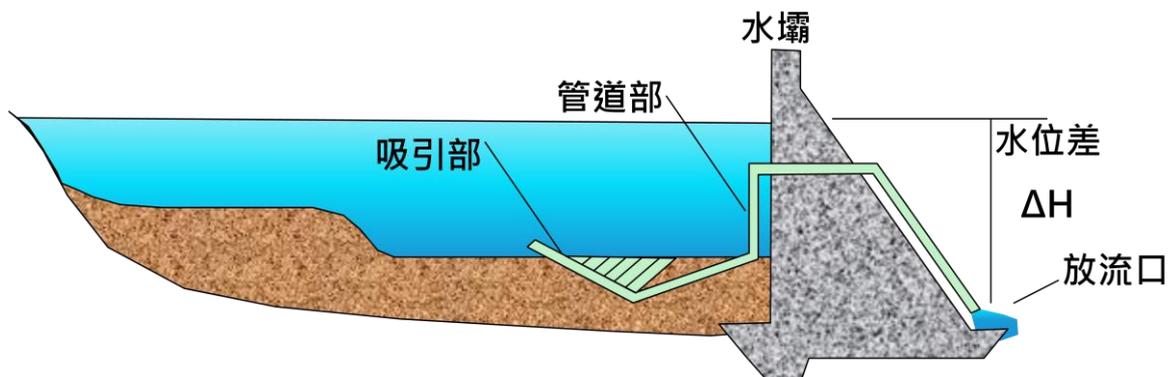


圖 4-17 固定式水壓吸引排砂示意圖

4.4.2 空氣閥排砂設施研發成果說明(土木研究所)

空氣閥排砂設施(Air Valve Sediment Discharge)是一個利用空氣栓塞效應做為閘門開關的控制方式，又稱序列式虹吸取水塔(Siphon Pipe Series Type Water Intake)，經濟部水利署相關資料稱為取水塔排砂工法，此裝置係安裝一系列倒V形的虹吸管做為虹吸進水口，利用泵浦將空氣打入倒V形虹吸管的頂端做為栓塞關閉虹吸管，當需要開啟時僅需將該管內空氣排出後，虹吸現象將會自動產生；利用空氣栓塞效應啟閉虹吸管可避免一般閘門啟閉受到淤積砂石卡住，而無法開關之問題，其示意圖如圖 4-18。

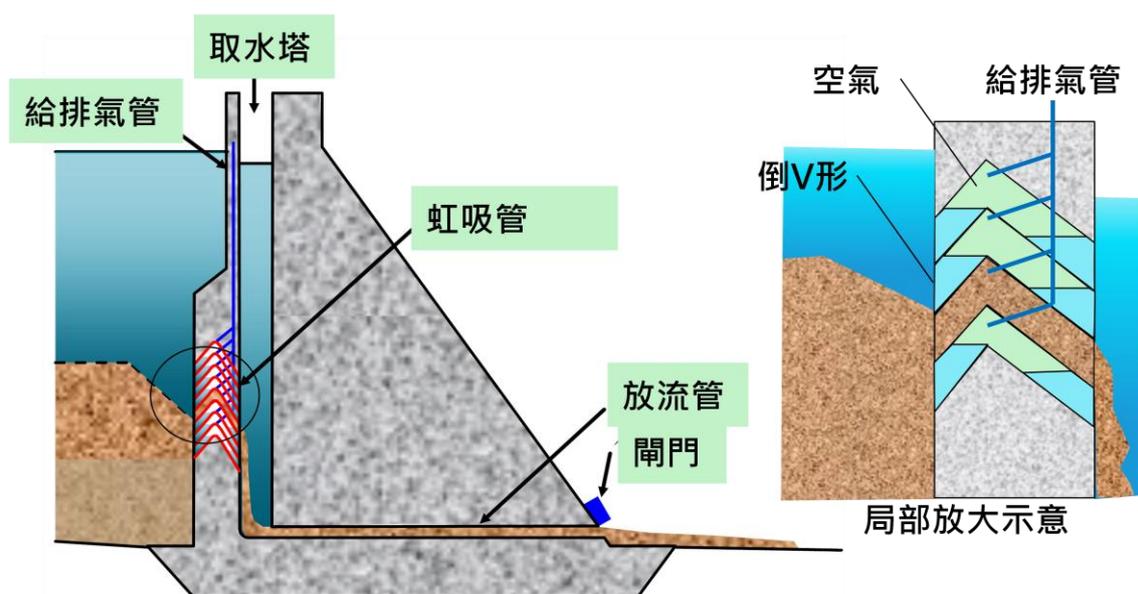


圖 4-18 空氣閥排砂設施示意圖

(出處：改繪自土木研究所台灣電力研修、吸引工法簡報資料)

其排砂操作模式係由上往下逐一啟動虹吸管，因可以選擇最靠近淤積面的虹吸管進行排砂操作，可提高排砂濃度，且不會受淤積砂石阻塞無法操作，然因此裝置屬固定式方式，其排砂範圍受到限制，僅可排除虹吸管進水口附

近淤積砂石，因此採用此設施的建議操作方式如下圖 4-19，第一階段於非洪水期間利用機械方式，將庫區內的淤積砂石搬運至進水口附近堆置，待洪水期間再開啟空氣閥排砂設施，如第二階段至第三階段，由上往下逐一開啟，利用虹吸效應排除淤積砂石，第四階段洪水期過後，進水口前淤積砂石已排除，可繼續進行機械搬運如第一階段，如此反覆操作清除水庫內淤積砂石。

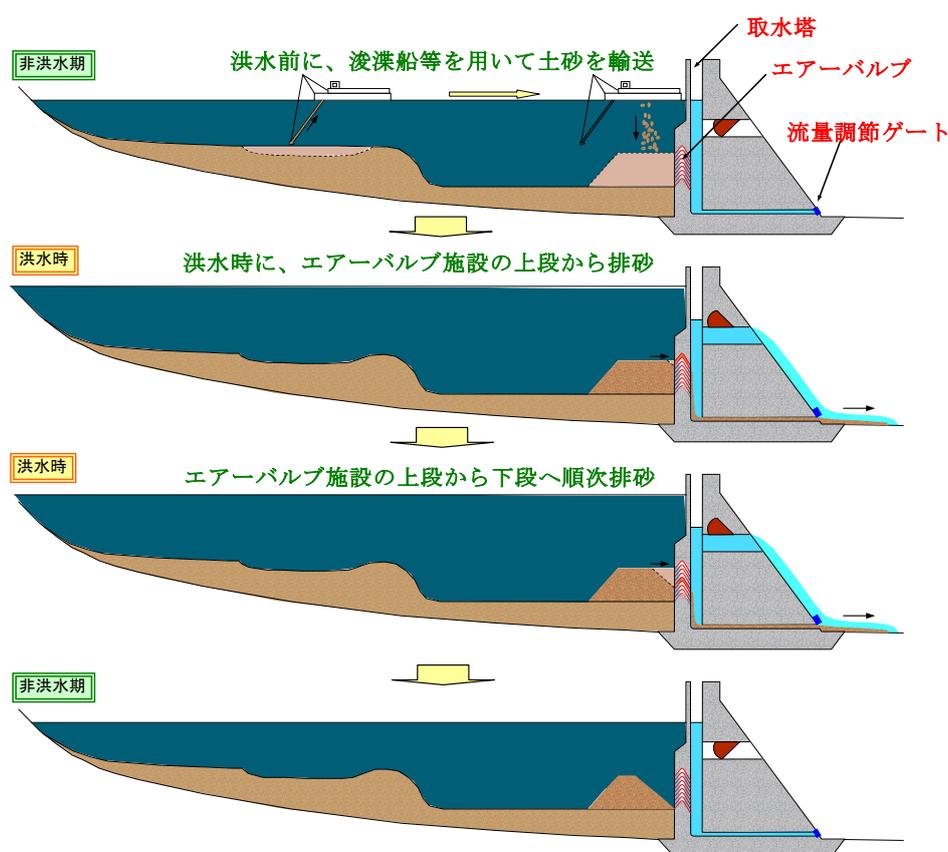
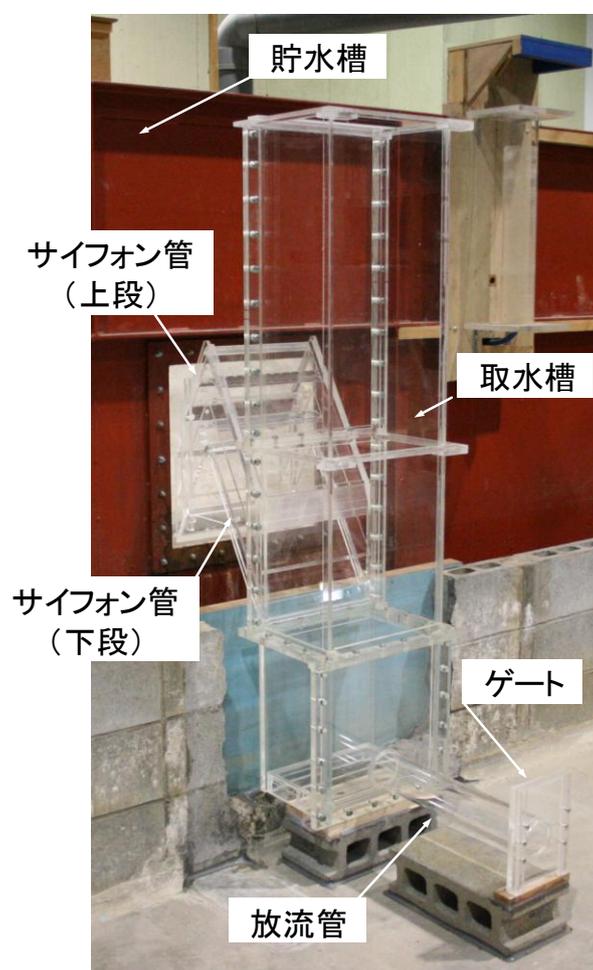


圖 4-19 空氣閥排砂設施操作示意圖
(出處：土木研究所台灣電力研修、吸引工法簡報資料)

以下係說明土木研究所模型試驗過程及成果，試驗係假定實際最大放流量 40cms、排砂時管內流速 6.0m/s、倒 V 形虹吸管每一個尺寸寬度為 6.6 公尺、高度為 1.0 公尺，試驗模型比例採用 1/20，因此試驗模型之尺寸為倒 V 形虹吸管寬 0.33 公尺、高 0.05 公尺、虹吸管上游端長度 0.26 公尺、

下游端長度為 0.41 公尺，試驗裝置如照片 4-25 所示。第一組試驗採用泥砂粒徑 1.3mm、虹吸管內流速約 1.5m/s 時，其所得平均排砂濃度約為 10%；另一組試驗採用泥砂粒徑 1.73mm、虹吸管內流速約 1.15m/s，其試驗成果排砂濃度與時間關係如圖 4-20 所示，顯示其排砂濃度在排砂初期可達到 10%以上，由試驗成果認為利用空氣閥排砂設施應可進行淤積砂石排放，且透過適當的操作，可維持較高排砂濃度。



照片 4-2 空氣閥排砂設施模型試驗照片
(出處：土木研究所台灣電力研修、吸引工法簡報資料)

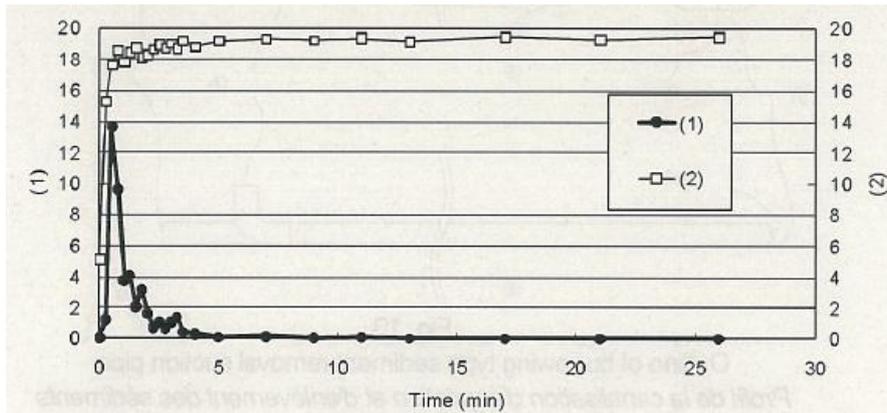


Fig. 9
Results of experiment using an air valve sediment discharge facility
Résultats de l'expérience utilisant une installation d'évacuation des sédiments à vanne d'air

- | | |
|-----------------------------|----------------------------------|
| 1 Sediment concentration(%) | 1 Concentration des sédiments(%) |
| 2 Discharge rate (L/s) | 2 Débit d'évacuation(L/s) |

圖 4-20 空氣閥排砂設施排砂濃度與時間關係圖

(出處：Present Conditions and Future Prospects of Sediment Supply from Reservoirs to Downstream Rivers, Commission Internationale Des Grands Barages)

目前日本已經有實際案例(譬如：志津見水庫 shizumi)安裝空氣閥排砂設施，惟其主要目的係利用此設施進行分層取水用途，而非排砂考量，因此尚無就排砂考量而安裝此設施之水庫，現場照片如照片 4-3。



照片 4-3 空氣閥排砂設施現地照片

左：倒 V 形虹吸管設備、右：大壩上游面照片
(出處：土木研究所台灣電力研修、吸引工法簡報資料)

4.4.3 潛行吸引式排砂管研發成果說明(土木研究所)

所謂潛行吸引式排砂管水壓吸引排砂工法(Burrowing Type Sediment Removal Suction Pipe, 以下簡稱潛行吸引排砂管)，係土木研究所改良自該所與 IHI 共同研發之 Sheet 排砂工法，經改良後可避免排砂管埋沒淤積土砂後閉塞問題。其結構主要是利用一條可撓曲軟管，彎折成 U 形，在管線的上游末端設置進水口，且在管線上游端及彎折部位的底部開孔做為土砂排放的吸引口，如圖 4-21 及照片 4-4 所示。

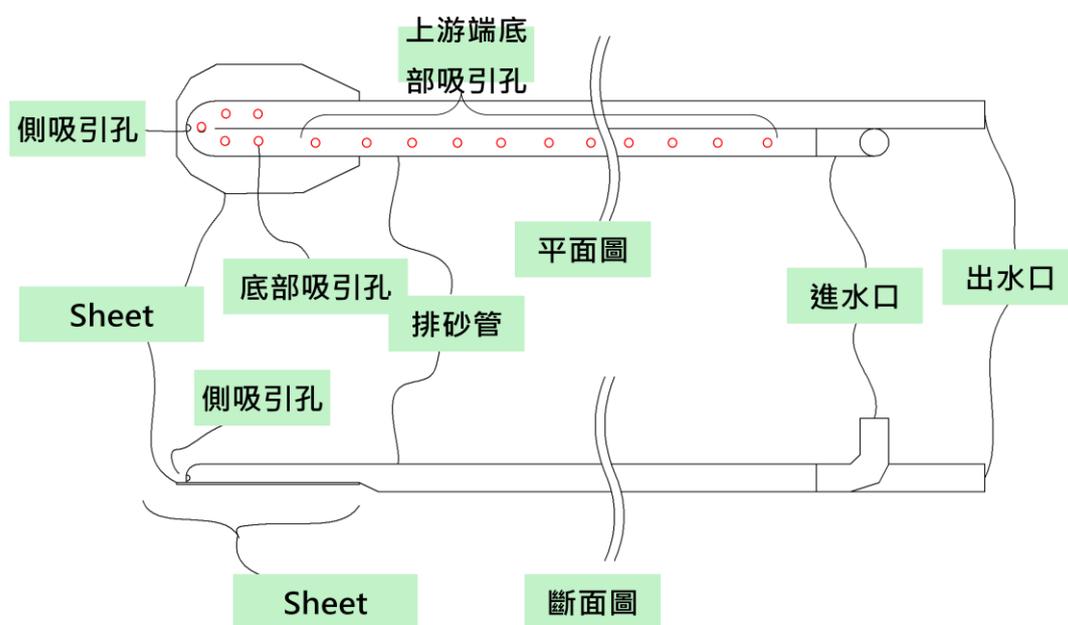


圖 4-21 潛行吸引排砂管示意圖

(出處：改繪自土木研究所台灣電力研修、吸引工法簡報資料)



照片 4-4 潛行吸引排砂管照片

(出處：土木研究所台灣電力研修、吸引工法簡報資料)

潛行吸引排砂管的排砂過程如圖 4-22，排砂管首先放置於淤積土砂的表面，而後開啟下游放水口閘門，利用水庫兩側的水頭差造成之虹吸效應開始後，土砂將會由撓曲部的底孔被吸引進排砂管內而排放至下游，排砂過程完成後在撓曲部的位置土砂形成一個類似圓錐的形狀。此種潛行吸引排砂管工法雖分類於固定式，然其確介於固定式與移動式之間，其優點為無須像固定式般將排砂管理設於淤積土砂中，僅需放置於淤積土砂表面即可開始排砂操作，可減少設置成本；又無須像移動式般於洪水期間操作，產生安全問題，僅需開啟下游端閘門即可開始進行排砂；惟其排砂範圍仍受到限制，僅限於排砂管可及部分，因此若採用此種方式進行排砂操作模式仍建議比照 4.4.2 節所述，利用搬運的方式排除庫區內淤積，或當水庫水頭差足夠時，可考慮延長排砂管長度方式進行排砂操作。

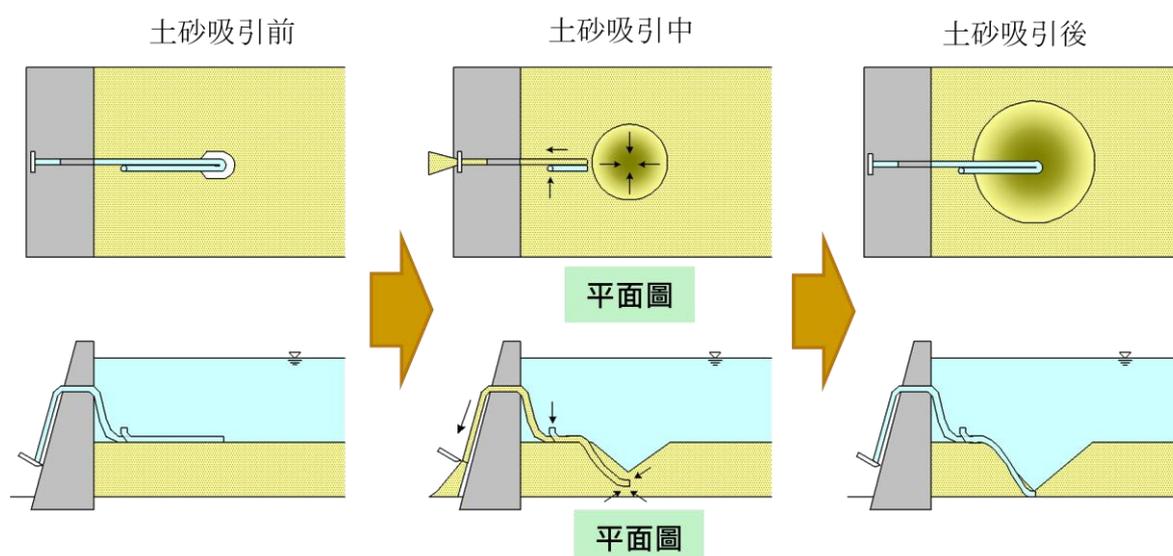


圖 4-22 潛行吸引排砂管排砂過程示意圖
(出處：土木研究所台灣電力研修、吸引工法簡報資料)

潛行吸引排砂管工法在土木研究所已進行過多次模型試驗及現地試驗，其模型試驗尺寸分別為小尺寸管徑 60.5mm、大尺寸管徑 100mm，及現地試驗尺寸管徑 200mm，相關試驗設備數據整理如表 4-5，試驗設備照片及現地試驗照片如照片 4-5~4-6。

表 4-5 潛行吸引排砂管試驗設備數據

分類	模型試驗 小尺寸	模型試驗 大尺寸	現地試驗 7 月份	現地試驗 11 月份
管徑	60.5mm	100mm	200mm	200mm
吸引 孔徑	30mm	50mm	100mm	100mm
試驗 水槽	長 4.5m 寬 2.5m 高 1.3m	長 7.5m 寬 7.5m 高 3.5m	長 14.0m 寬 6.55m 深 4.65m	長 14.0m 寬 6.55m 深 4.65m
水頭 差	1.5m	2.4m	約 3.0m	約 3.5m
土砂 平均 粒徑	0.36mm 粒徑分布詳圖 4-23 (綠色線條)	0.4mm 粒徑分布詳圖 4-23 (黑色線條)	3mm 粒徑分布詳圖 4-24	3mm 粒徑分布詳圖 4-24
模型 縮尺	1/16.5、1/8.3	1/5、1/10	1/2.5、1/5	1/2.5、1/5

註：模型縮尺係假定實際運用管徑尺寸為 0.5m 及 1.0m 分別推定。

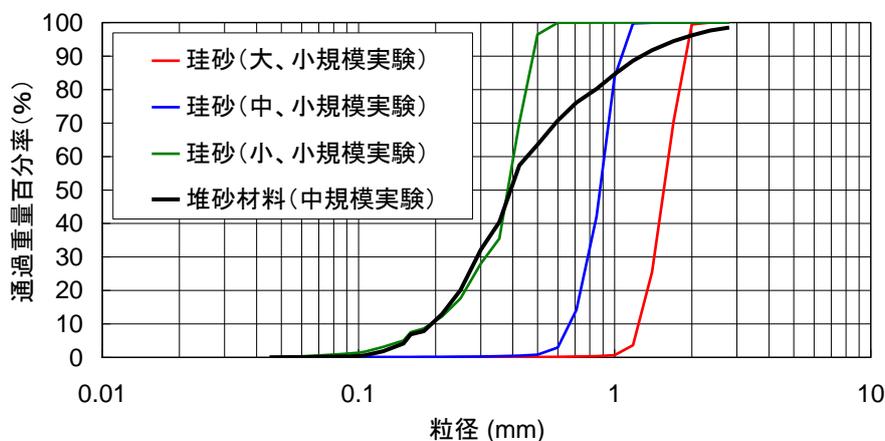


圖 4-23 模型試驗小尺寸及大尺寸試驗土砂粒徑分布
(出處：土木研究所台灣電力研修、吸引工法簡報資料)

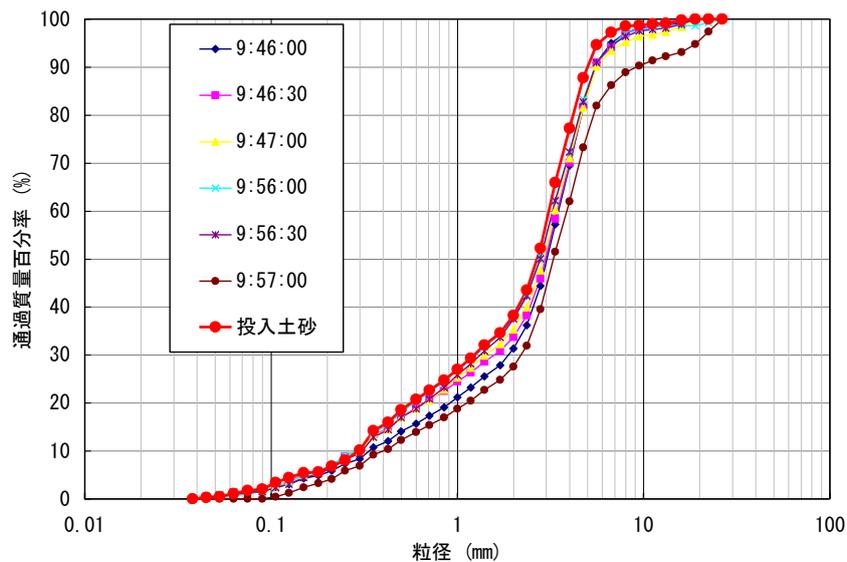


圖 4-24 現地試驗土砂粒徑分布
 (出處：土木研究所台灣電力研修、吸引工法簡報資料)



照片 4-5 模型試驗設備照片
 左：小尺寸試驗設備、右：大尺寸試驗設備
 (出處：土木研究所台灣電力研修、吸引工法簡報資料)



照片 4-6 現地試驗照片及現地試驗使用之吸引部
 (出處：11 月 29 日拍攝於試驗堰堤及土木研究所台灣電力研修、吸引工法簡報資料)

兩種尺寸的模型試驗結果如圖 4-25 及圖 4-26，該試驗係利用出水口的閘門開度改變排砂管內的流速，以獲取排砂濃度及排砂管內流速的關係，以及虹吸效應是否能利用閘門開啟而順利產生排砂效果，由試驗結果可知其排砂濃度初期均可達到 10% 左右，然而隨著吸引部(撓曲部)達到淤積土砂底部時，排砂濃度將逐漸下降直到排砂完成；藉由出口端閘門的兩次啟閉，證實排砂過程可以藉由閘門的操作中止或啟動，無須其他動力的介入；由兩次閘門開啟及關閉的操作結果顯示，排砂濃度與排砂管內的流速有一定的正相關存在，因此可藉由出口端閘門的開度，控制排砂濃度。

現地試驗的結果如圖 4-27、試驗前後如照片 4-7，結果顯示排砂濃度最高可達到約 6%，然其排砂濃度不穩定，若以整體試驗時間及排砂體積推定平均排砂濃度，7 月份的試驗結果約 0.58%、11 月份的試驗結果約 1.9%，經探討其原因可能有吸引部(撓曲部)容易受到排砂管的影響造成吸引部(撓曲部)與淤積面間有空隙產生，而降低排砂濃度，在 11 月份的試驗過程中，曾幾度修正吸引部(撓曲部)的位置使其與淤積面間無空隙產生，調整後其排砂濃度最高仍可到 3%，然隨著淤積面的改變，吸引部(撓曲部)與淤積面間又產生空隙造成排砂濃度降低，此為一待解決課題。另根據圖 4-24 土砂粒徑分布資料中，上午 9 點 46 分至上午 9 點 57 分所得之排出土砂粒徑分布顯示與投入的土砂粒徑分布接近，以現地試驗管徑 20cm、吸引孔徑 10cm，對於排出粒徑最大約 30mm 之土砂是可行的，實際應用時對於排除土砂粒徑達數

公分是可預期的效果，惟其與水頭差、排砂管長度及水頭損失有關，且磨損及效率問題亦需考量，因此實際應用可行與否仍待更大型的試驗才能得知。

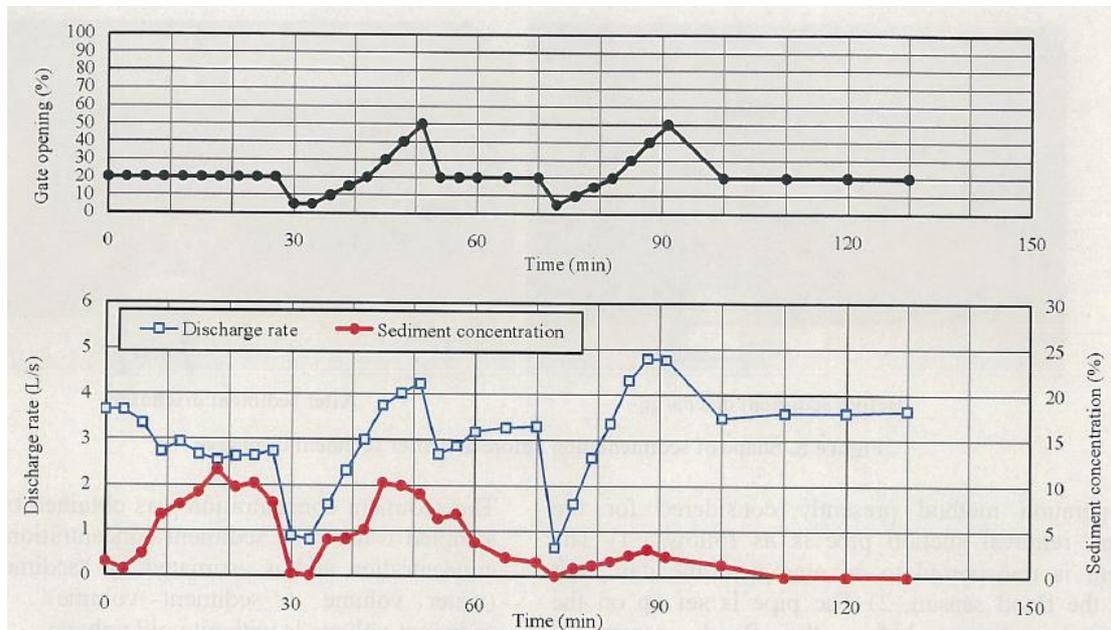


圖 4-25 小尺寸模型試驗成果

(出處：Hydraulic Characteristics of the Burrowing Type Sediment Removal Suction Pipe, ICOLD)

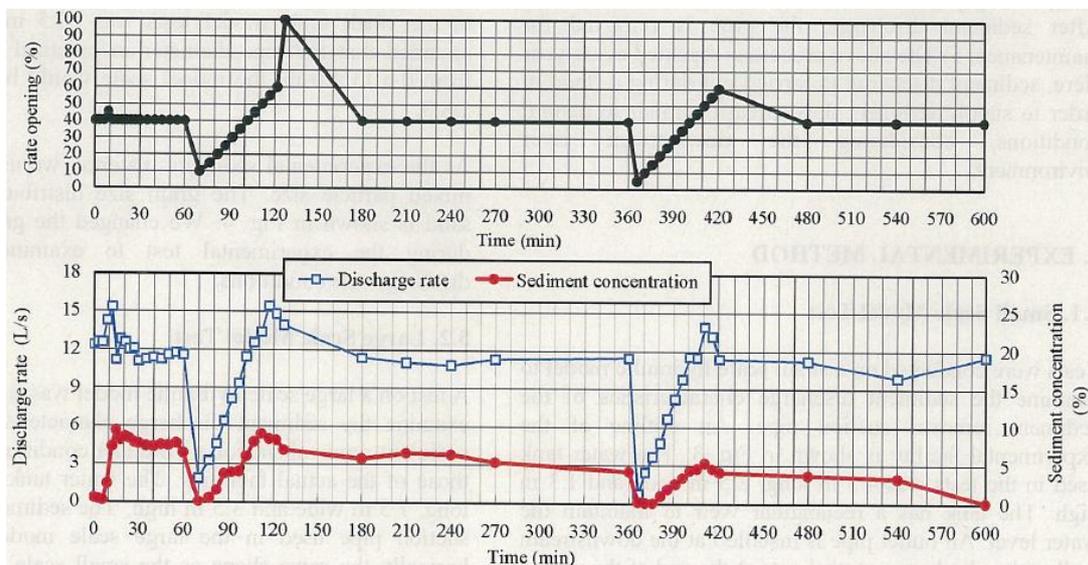


圖 4-26 大尺寸模型試驗成果

(出處：Hydraulic Characteristics of the Burrowing Type Sediment Removal Suction Pipe, ICOLD)

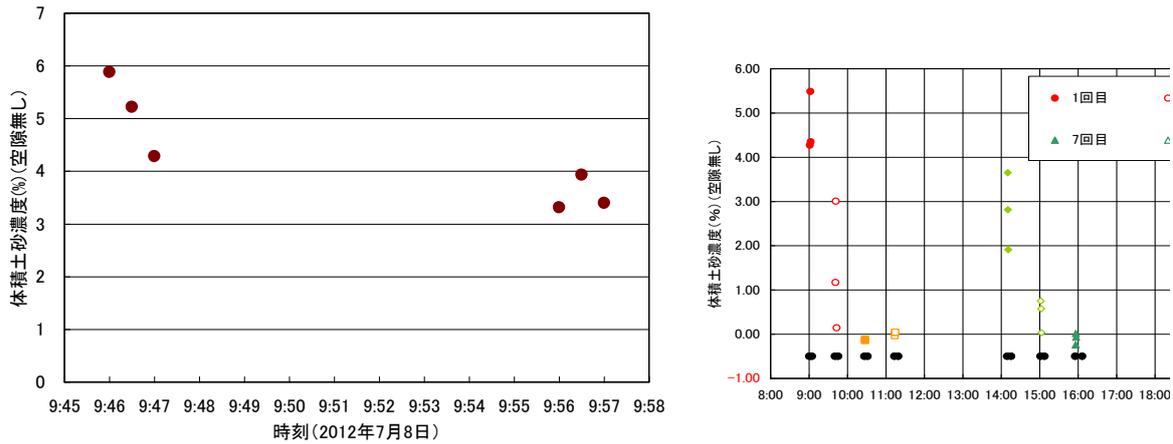


圖 4-27 現地試驗結果濃度與時間關係
 左：7 月份試驗成果、右：11 月份試驗結果
 (出處：土木研究所台灣電力研修、吸引工法簡報資料)



照片 4-7 現地試驗前後淤積面照片
 左：試驗前堆砂面、右：試驗後呈現錐狀堆砂面
 (出處：土木研究所台灣電力研修、吸引工法簡報資料)

4.5 其他排砂方式

除了前述繞庫排砂隧道及水壓吸引排砂工法外，日本考量下游河道沖刷、河口海岸線退縮及下游生態問題，採行置土還原方式，係利用浚碟或開挖作業，將水庫內之淤積土砂藉由人工搬運方式，於水庫下游河道內擇一適當地點堆置土砂，利用水庫放洪期間，將堆置之土砂沖刷帶至下游河道還原河道未建庫前來砂狀態，其置土還原水庫及堆置土砂量如下表 4-6。目前置土還

原方式堆置之土砂量不大，惟根據調查結果顯示，適當地還原土砂於下游河道可提供生態更好的棲息環境。

表 4-6 置土還原一覽表

No.	ダム名	所在地	管理者	竣工年 (年)	年間置土量(m3)									
					H12	H13	H14	H15	H16	H17	H18	H19	H20	
1	二風谷	北海道	北海道開	1997			1,100	1,400	6,000	10,000	5,000	11,000	10,000	
2	三春	福島県	東北地整	1997	1,000	1,000	2,000	2,000	2,000	7,000	5,600	7,000	1,500	
3	二瀬	埼玉県	関東地整	1961				13,300	11,700	5,400	5,300	11,600	8,100	
4	川治	栃木県	関東地整	1983		3,400								
5	相俣	群馬県	関東地整	1959						200				
6	川俣	栃木県	関東地整	1966						200	1,600		2,100	
7	宮ヶ瀬	神奈川県	関東地整	2001									200	
8	手取川	石川県	北陸地整	1979									1,000	
9	小洪	長野県	中部地整	1969									940	
10	矢作	愛知県	中部地整	1970					2,000		4,000	10,000	4,000	
11	蓮	三重県	中部地整	1991			100	1,000	500	400	2,000	2,000	2,000	
12	長島	静岡県	中部地整	2001	25,000	20,000								
13	真名川	福井県	近畿地整	1977					220	200	200	980	100	
14	土師	広島県	中国地整	1973								100	100	
15	弥栄	広島県	中国地整	1990									1,000	
16	長安口	徳島県	四国地整	1956					24,000	23,700	12,000	6,000	78,000	
17	下久保	群馬県	水機構	1968				2,000	2,000	7,600		10,600	8,400	
18	浦山	埼玉県	水機構	1999	1,000	600	700	6,900	18,700	25,100			4,000	
19	阿木川	岐阜県	水機構	1990						600	1,200	1,200	1,200	
20	室生	奈良県	水機構	1973							140	250	230	
21	布目	奈良県	水機構	1991					190	540		720	720	
22	比奈知	三重県	水機構	1998									100	
23	一庫	兵庫県	水機構	1983			190	300	600	600	1,000	2,000	2,100	
24	富郷	愛媛県	水機構	2000							500	1,000		
25	秋葉	静岡県	電源開発	1958	20,000	18,000				20,000		60,000	40,000	
26	相模	神奈川県	神奈川県	1947	4,100	2,000					4,900	5,400	5,000	
27	三保	神奈川県	神奈川県	1978	2,700	8,000	12,200	17,500	24,900	25,000	30,000	30,000		

五、心得與建議

日本全國水庫整體淤積率並不高，僅中部地區之部分水庫因地質問題導致淤積率較高，然而日本卻投入大量資源積極解決淤積問題，不論是投入大量工程成本興建排砂隧道或積極投入研究水壓吸引式排砂工法，顯見日本十分重視水庫淤積問題。反觀台灣，幾座重要大型水庫淤積問題已十分嚴重，且台灣水資源之運用更是較日本吃緊，若不能維持既有水庫之有效庫容，以台灣地區地形、氣候、地質因素，淤積問題將更加嚴重且加劇，因此，台灣應更加重視水庫淤積問題。

就水庫淤積問題之處理對策而言，上游來砂量的控制才是最根本的解決之道，惟上游邊坡的整治往往非水庫管理單位之權責，水庫管理單位能採行之方式多半為興建貯砂壩配合開挖清淤外運的方式減低土砂進入水庫，然非長久之計，因此相關主管機關應有效整治上游邊坡，減低土砂產出。

就下游河道而言，水庫興建後攔蓄原本應補充於下游河道的土砂，改變下游河道自然狀況，以日本經驗顯示，水庫新建後可能造成河道沖刷、海岸線退縮或生態棲地改變，因此，日本在水庫淤積治理對策亦有考慮改善下游河道狀況之對策。

總言之，水庫淤積問題是一整體流域治理問題，從上游邊坡整治、庫區淤積泥砂的排除到下游河道環境的改善，應全面性作一檢討，因涉及範圍廣、單位多，不宜僅由水庫管理單位獨自處理淤積問題。