

三維水庫滲水與安全評估分析

—以寶二水庫為例

譚志豪* 王金山** 蔡明欣** 張玉堯*** 高憲彰**** 蔡家民*****

摘要

本文建立一套完整的三維模式分析程序，用以評估滲水成因及其對水庫安全及營運之影響程度。首先整合庫區之地形、地質、水文及地下水等資訊，建立出結合壩體、壩基及壩座山脊之三維水文地質概念模型，再透過數值程式求解模型內地下水流場之三維空間分布，藉以研判可能的滲水路徑及成因。另透過現地監測資料進行模式率定及驗證，確保模式之正確性及準確度。最終並針對滲水量對水庫安全與營運之影響進行評估。相關成果可提供各界處理類似問題時參考運用。

關鍵字：水庫、土石壩、滲水、三維滲流分析、水庫安全評估

一、前言

水庫是近代人類賴以生存不可或缺的工程結構物。一旦蓄水壩體發生破壞，勢必造成水庫下游地區極大的損失。一般而言，壩體依其構築材料及結構形式之不同，可分為土石壩、重力壩、扶壁壩、拱壩等類型。其中，因為土石壩所適用之地形、地質及氣候條件較為廣泛，且具有可就地取材與較高經濟效益之優勢，故世界各國水庫興築以土石壩最為常見。惟土石壩體畢竟是土石堆築材料，即使可藉由心層低透水性之特點降低滲水並透過分層碾壓改善填築缺陷，但壩體與基盤交界縫隙、基盤地盤缺陷處、壩內管道位置或是壩座山脊岩層面等潛在的滲水通路仍存在滲水引致管湧破壞的潛在風險。

根據國際大壩委員會調查結果指出 (ICOLD,

1973, 1983, 1988)，土石壩發生事故的主因，以洪水漫頂、滲水管湧、沿管道滲漏、邊坡滑動等破壞模式最為常見。其中，又以運轉齡期 10~20 年內的水庫發生事故之機率最大。上述破壞型態除洪水漫頂直接與外在氣候因素有關外，其餘破壞模式多與潛在異常滲水有關，因此面對滲水課題，不得不慎重考量。

水庫異常滲水所引發之災害，輕則對生態環境、水庫營運及水資源管理造成影響，重則將對下游地區居民生命財產造成極大的危害。回顧世界各國土石壩歷史，因滲水所引發的破壞案例屢見不鮮。自二十世紀後，諸如美國 Baldwin Hills 壩 (1963)、印度 Nanak Sagar 壩 (1967)、美國 Walter Bouldin 壩 (1975)、美國 Teton 壩 (1976) 及中國大陸溝後壩 (1993) 等案例，均因異常滲水問題最終導致壩體潰決 (程禹等人，2008)。

* 中興工程顧問社大地工程研究中心水文地質模擬組組長
** 中興工程顧問社大地工程研究中心研究員
*** 中興工程顧問社大地工程研究中心地工技術組組長
**** 中興工程顧問社大地工程研究中心副經理
***** 經濟部水利署北區水資源局工程員

我國水利法第四十九條明文規定：「興辦水利事業人經辦之防水、引水、蓄水、洩水之水利建造物及其附屬建造物，應維護管理、歲修養護、定期整理或改造，並應定期及不定期辦理檢查及安全評估」，立法之精神即欲透過管理維護及安全評估等手段以降低水庫發生事故之風險。因此，針對水庫滲水及可能引致之安全問題研擬一套全面有效的分析評估技術，實為當前刻不容緩之工作。

過去因電腦運算能力及分析技術之限制，水庫之地下水滲流分析多僅透過合理的假設，將土石壩壩體、壩座或壩基簡化為數個代表性剖面進行二維分析。然而，就土石壩而言，因壩體係構築於 U 型河谷上，壩的兩側殼層則分處心層之上游側與下游側，兩側壩座亦結合原始山脊地形而構築，整個壩體實為三維度之水利構造物（如圖 1 所示）。因此，若壩體幾何條件與二維平面應變之假設差距過大時，二維簡化分析將存在某種程度的模式簡化誤差（如圖 2 所示）。此外，二維分析無法充分反應沿壩軸方向之滲漏、亦無法考量壩體與壩基、壩座接合位置之滲漏（如圖 3 所示），且壩基地層不連續面位態、地層滲透異向性及非均質等條件亦無法充分反應到二維分析模式，此類問題均須透過三維分析才能解決，方可獲得較貼近真實物理環境之分析結果。

過去大壩滲流分析受限於網格生成技術及分析軟硬體之種種限制，使得滲流分析無法跳脫二維分析之窠臼。近年來，隨著分析技術及軟硬體運算能力之大幅提升，大壩三維滲流分析得以實現。本文即建立一套有效的大壩三維滲流分析技術，該技術係應用三維地下水模式分析軟體 GMS (Groundwater Modeling System)，搭配內建之 GIS 模組、CAD 模組及 Image 模組，將水庫集水區研究範圍之三維數值地形、地形等高線、衛星或航空照片等資料匯入，並結合大壩之三維幾何設計條件，透過等效孔隙介質模式，建立起

結合壩體、壩基與壩座山脊之三維水文地質概念模型，以進行三維地下水流動分析，進而針對滲水行為進行探討，並評估滲水對水庫安全及營運之影響程度，成果可供相關管理單位決策參考。

為進一步說明本文所建立之分析技術與成果，以下則以寶山第二水庫安全評估為例，詳細說明該技術應用於土石壩三維滲流分析之方法及程序，期能對提升國內大壩安全評估之技術層次有所助益。

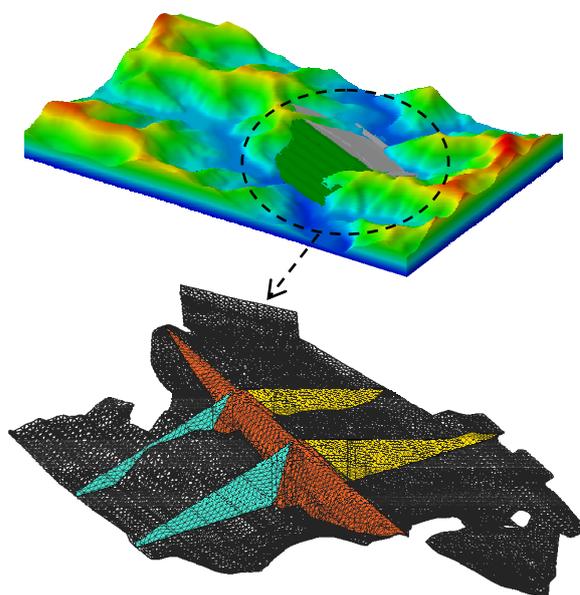
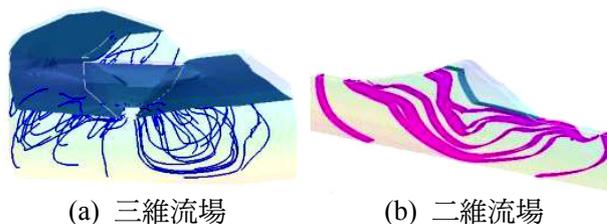
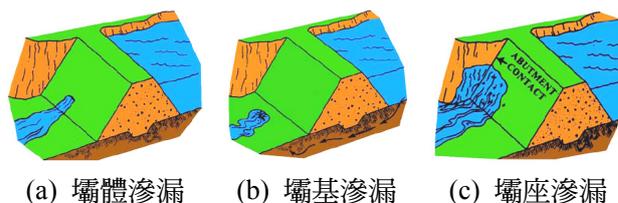


圖 1 土石壩之三維幾何條件示意圖



(a) 三維流場 (b) 二維流場

圖 2 大壩三維與二維分析之流場差異示意圖



(a) 壩體滲漏 (b) 壩基滲漏 (c) 壩座滲漏

圖 3 土石壩壩體、壩基與壩座滲漏示意圖

二、工作方法與流程

欲解決水庫滲水問題，其關鍵在於釐清水庫之滲水路徑。本文透過三維水文地質模式分析，嘗試找出水庫潛在的滲水路徑並評估其可能影響。為建立能充分代表地真實物理環境之三維水文地質概念模型，首先必須精確的掌握水庫周遭範圍內各岩層之空間分布及其水文地質特性。由於岩層存在諸多複雜構造及岩性差異，往往導致所各岩層水文地質特性也隨之不同。為確認水庫內地質狀況，本文採水庫施工期間資料、竣工後資料、地表地質調查、水文地質鑽探及孔內探測技術獲知地層分布，並透過室內岩土力學試驗輔助獲取相關力學參數。待水文地質模型建立後，透過現地檢查及監測資料進行模式率定以確保模式之正確性與精確度。最終透過模式分析找出潛在的滲水路徑，並評估滲水對水庫安全及營運之影響。後續相關改善方案亦可透過模擬分析方式予以評估。上述各項流程可參考圖 4 說明。

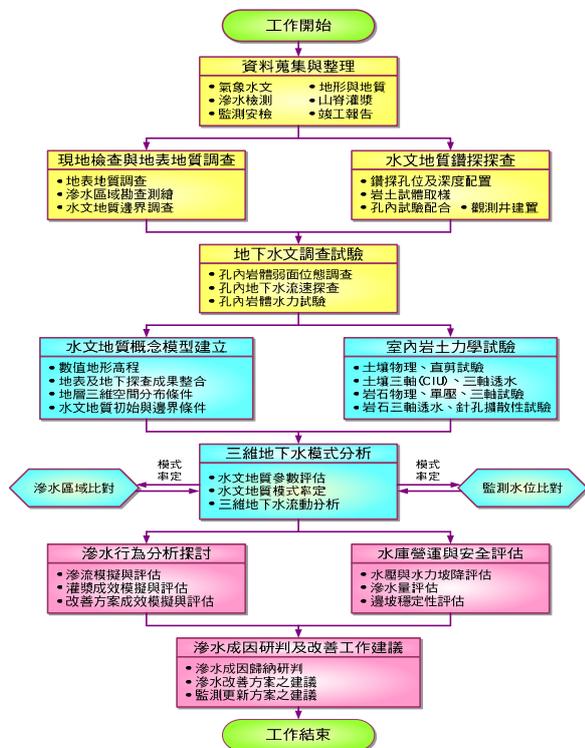


圖 4 工作方法與流程

三、水文地質模式分析

(一) 水文地質概念模型建立

水文地質概念模型係由水文地質觀點出發，透過含水層之分區、分層及地下水流動平衡等觀念，將複雜的水庫環境簡化為一理想化的三維概念模型。模型由若干個水文地層單元所組成，經劃定分析範圍後，模型內地下水之流進與流出量根據水收支平衡原理達到穩定平衡狀態。待概念模型勾勒完成後，後續再透過數值程式輸入邊界條件及初始條件求解地下水流動控制方程式，即可求得模型內地下水水頭之空間分布隨時間之變化情形。為達成此目標，需透過以下工作進行：

1. 地形資料整合

為建立研究區域之水文地質概念模型，首先需掌握地形資料，包括築壩前後之地形圖、竣工後壩體與各項設施之高程及配置圖，再根據此地形圖幅資料將山脊、壩體與各項設施數化為可用之數值高程模型 (DEM)，除可進行相關地形分析外，更能藉以評估岩體內常時地下水受重力作用所形成之三維空間分布狀態。

2. 地質資料整合

透過既有地質圖幅蒐集、既有鑽探資料、地表露頭調查及補充鑽探岩心等資料，透過數值程式將上述地質資訊數化後，推得各地層之三維空間分布狀態，據以建立三維水文地質概念模型。

3. 邊界條件與初始條件給定

水文地質概念模型內地下水之穩態流場主要由邊界條件所控制；而暫態流場則受概念模型初始條件之影響較大，但若水文事件影響範圍擴及到邊界時，則同時受邊界條件之影響。

水庫滲流分析常採用之邊界條件包括：特定水頭邊界 (Specific-head Boundary)、無流量邊界 (No-flow Boundary) 及地表水補注邊界 (Surface Recharge Boundary) 等數種。其中，水庫淹沒區

之庫水與大壩及山脊接觸之邊界，可視為地下水典型的特定水頭邊界，其值可設定為水庫蓄水高程；若僅考量重力作用對地下水流場之影響，則山脊稜線位置常視為區隔兩個地下水系統之界線，在稜線上彼此無側向流通，故山脊稜線可視為側向零流量之邊界；而地表入滲邊界條件為數值模型用來反應降雨扣除地表逕流後經由地表垂直入滲至地下水含水層之補注邊界機制。

4. 數值模型建置

根據前述之地形資料、地質圖幅、地質鑽探及現地與室內試驗等成果進行彙整，建立足以代表現地之水文地質概念模型。待水文地質概念模型勾勒完成後，即進一步透過數值化過程將其轉為數值模型網格。數值模型網格之布置原則以能精確且有效的代表計畫場址及鄰近地區之水文地質和地下水水文狀況為主要考量，同時應儘可能兼顧網格數量減少化以縮短運算時間。

本文採用三維地下水模式分析程式 GMS (Groundwater Modeling System) 進行數值模型網格之轉換及後續地下水流動分析工作。GMS 為美國 ems-i 公司所開發之三維地下水分析程式 (EMRL, 2003)。本文採用 GMS 程式內建之 MODFLOW 模組進行上述地下水控制方程式之求解工作。MODFLOW 模組為美國地質調查所 (USGS) 發展之地下水分析模組 (McDonald and Harbaugh, 1988)。該模組歷經超過 25 年持續的更新與驗證，其正確性及功能性已普遍獲世界各國產官學界之認可，為可靠的地下水模式分析工具。此外，GMS 程式亦整合 GIS、CAD 及 Image 介面，可將本計畫相關的調查成果與所蒐集的地形及地質圖資一併整合於模式分析中。

(二) 模型率定

在數值模型建立後，需進行模型率定與驗證工作，並求得模型內各項參數之優化配置，以確

保分析之正確性與準確度。本文採用「自動參數估計法」率定模式參數，其原理係透過數值程式以規則的方式反覆調整各項參數，使目標函數(例如水位誤差) 最小化，以獲得具代表性之參數，建立最符合現地地下水流場之水文地質模型。

模式率定所使用之資料乃利用現場設置監測儀器所量得之實測資料，例如：水位觀測井之地下水位或量水堰之滲流量資料等。

(三) 地下水流動分析

地下水流動分析係透過數值程式求解地下水流動控制方程式，藉以釐清水文地質概念模型內地下水之流動情形。

地下水流動控制方程式係基於多孔介質理論假設，並根據質量守恆定律與能量守恆定律，所推導出之三維地下水滲流控制方程式，即：

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \dots\dots\dots(\text{公式 1})$$

式中， K_{xx} 、 K_{yy} 、 K_{zz} 分別為多孔介質體於 x 、 y 、 z 方向之透水係數； S_s 為比貯水率； h 為水頭； W 為淨源匯量， $W > 0$ 為淨流入、 $W < 0$ 為淨流出； t 為時間。

待模式率定完成後，將前述邊界條件、水文地質參數及源匯條件等輸入模式以進行地下水流動分析，即可獲得在不同水庫蓄水高程條件下，概念模型內地下水水頭之三維空間分布隨時間之變化情形，藉以掌握模型內地下水流場並從中發現地下水流動集中之潛在路徑。

(四) 改善方案成效模擬分析

為瞭解各滲水改善方案之成效 (例如隔幕灌漿、排水溝、集水井等)，本文透過指定水文地質網格單元、變更參數及改變源匯條件等方式予以模擬，以評估其成效。相關內容詳見案例說明。

四、研究案例

(一) 研究區域概述

寶山第二水庫 (以下簡稱寶二水庫) 位處新竹縣境內，地理位置如圖 5 所示。

寶二水庫壩高 61 m，集水面積約 2.88 km²，蓄水容量 3,218 萬 m³，屬一級水庫，由經濟部水利署北區水資源局負責營運管理。民國 95 年 2 月初開始蓄水運轉，已分別於 95 年 9 月及 96 年 6 月完成初期蓄水之第一、二階段，目前為第三階段蓄水，水庫最高水位曾蓄達高程 148.5 m，距正常滿水位 150 m 僅約 1.5 m。

水庫管理單位於 96 年 5 月份例行巡檢時，發現大壩右山脊下游側之雜項填方及袋口區域景觀設施區 (如圖 6 中標示袋口區位置處) 有局部濕潤情形。之後隨水庫水位蓄升，濕潤區有擴大之現象，且滲水量約略隨水庫水位起伏變化。

滲水成因初步研判與庫水相關，至於滲水路徑及與庫水之關聯程度則待進一步評估。因滲水位置位於右山脊培厚雜項填方區，下方雖為砂岩層，但朝水庫淹沒區東南方向傾沒。因無法確認潛在滲水流向，故無法建立適當的二維分析剖面。故本文透過三維水文地質模式分析釐清滲水主要路徑與成因及其對水庫安全與營運之影響。

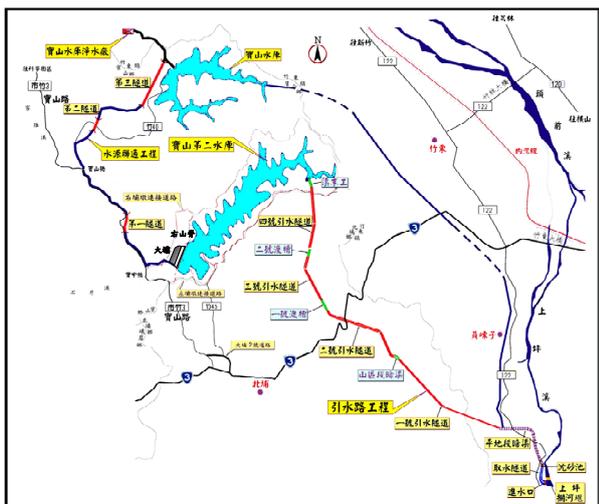


圖 5 研究區域地理位置

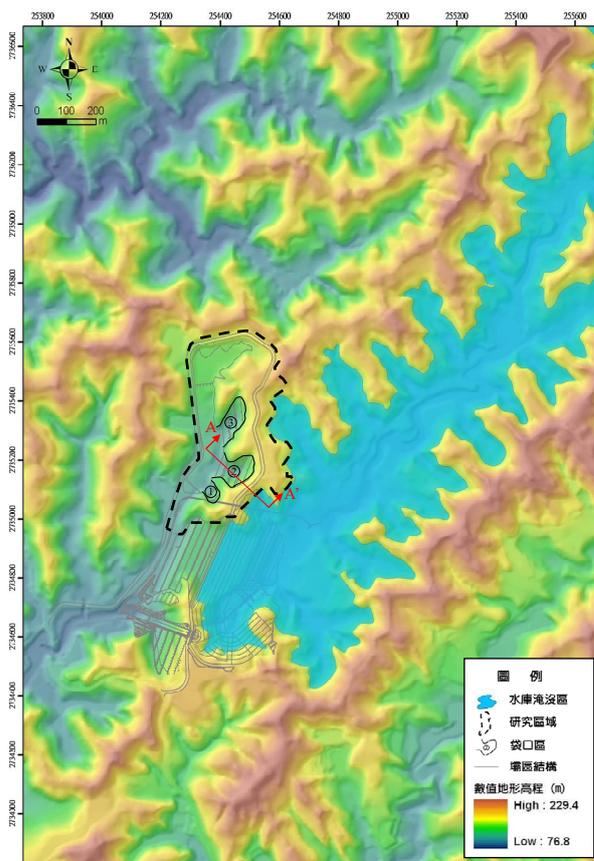


圖 6 滲水區域 (右山脊袋口區)

(二) 地形及水文概述

寶二水庫所在位置屬於台灣西部麓山帶西側之丘陵地帶，位於竹東丘陵區內，地形起伏不大，海拔高度均在 300 m 以下，水庫周緣山脊標高約在 160~240 m 之間。集水區內石井溪主河道河谷與岩層走向大致平行，呈東北-西南走向。主流兩側之支流與主流河道多成正交，為典型的格子狀水系。大壩座落於水庫蓄水區之西南側，壩座兩側山脊較薄，約呈東北西南走向。其中，右山脊高度僅較壩頂高約 10 m，山脊厚度略與壩體寬度相當，為庫區周圍最薄的山脊。

寶二水庫位於中港溪河系峨嵋溪之支流石井溪上游，其水源係引用頭前溪支流上坪溪 (上坪攔河堰) 之餘水調節運用，總有效蓄水量 3,218 萬噸，為一離槽式水庫。根據經濟部水利署水文年報所載資料，寶二水庫地區之年平均降雨量約介於 2,000~2,200 mm 間。

由河川基流分析成果(財團法人中興工程顧問社, 2008)顯示中港溪流域內之穩定基流指數介於 8.04%至 19.68%。對應寶二水庫所處位置屬平安橋流量站範圍, 其穩定基流指數為 8.04%, 可作為地下水補注量推估之參考。

(三) 地質及地下水概述

根據經濟部中央地質調查所五萬分之一地質圖幅資料, 寶二水庫鄰近區域出露之地層由老至新依序為西部麓山帶中新世之北寮層、上新世至更新世之卓蘭層、更新世之楊梅層及大茅埔礫岩、和全新世之紅土礫石層、階地堆積層及沖積層, 如圖 7 所示。附近出露之地質構造線由東南往西北依次為軟橋斷層、鹿廚坑背斜、大平地斷層、竹東斷層和寶山背斜。

另根據文獻資料、現地地表地質調查及鑽探調查結果, 可知研究區域位處楊梅層照鏡段, 依岩性區分, 大壩右山脊典型的岩層剖面計有砂岩(SS)、泥岩(MS)、砂岩與泥岩互層(SS/MS)、砂岩夾泥岩(SS-MS)、砂岩含粗砂岩(SS-CSS)等地層。岩層未見明顯節理組發育, 且壩址區無斷層構造存在。層理位態相當一致, 走向約為北偏東 45 度, 向東南傾斜約 30 度, 向庫區傾斜。

右山脊區域大比例尺之岩性分布圖如圖 8 所示。壩區出露砂岩之膠結能力及抗蝕能力方面皆不佳, 中至高度風化時呈黃至黃褐色, 層面局部銹染呈黃褐色, 透水性中等至高; 泥岩表面風化後呈灰白色, 膠結佳但抗風化能力差, 透水性低; 粗砂岩夾礫岩膠結疏鬆, 銹染現象嚴重, 偶含泥岩塊或礫石, 透水性高。

根據壩區及左、右山脊區域既有的地下水監測報告得知, 因觀測井皆採全井方式建置, 未設有分層觀測, 較不易觀測到含水層有明顯的受壓(Confined)現象。前期既有鑽探調查報告中曾記載部分鑽孔有湧水之現象, 惟多半集中在河谷低窪地區。

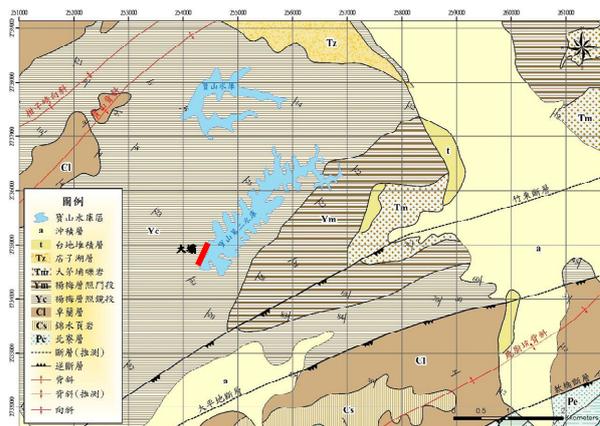


圖 7 研究案例之區域地質圖

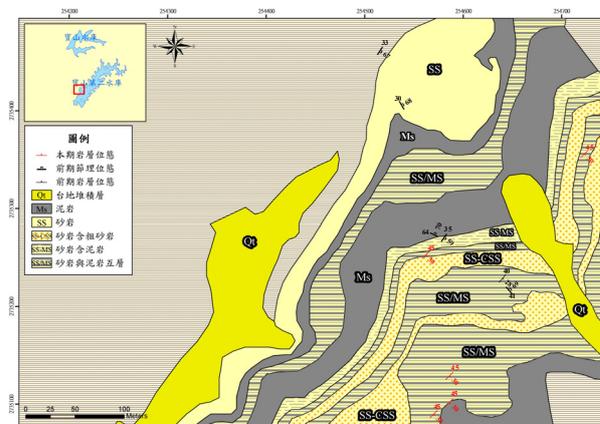


圖 8 寶二水庫右山脊區域之地層岩性分布圖

(四) 水文地質參數調查

整合場址地表地質調查、地質鑽孔、孔內調查、孔內封塞水力試驗及室內岩土試驗成果, 可推得右山脊之代表性地質剖面如圖 9 所示(即圖 6 之 AA' 剖面) 及代表性岩層之透水性參數值, 如表 1 所示。其中, 結合地表露頭位態與孔內不連續面調查成果, 可清楚研判地層之位態資訊; 另由孔內電測資訊可輔助岩心判釋砂岩、泥岩或砂泥岩互層等岩性變化之介面位置; 而孔內流速、封塞水力試驗及室內試驗成果則可評估各代表性岩層特定區段之透水程度及相關透水參數。因本文著重於三維模式分析技術之建立, 故相關現地調查及試驗內容可參考相關文獻(經濟部水利署北區水資源局, 2010)。

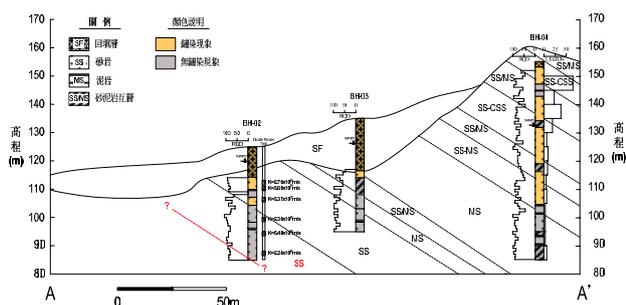


圖 9 寶二水庫右山脊區域地質剖面圖

表 1 寶二水庫右山脊代表性地層透水性參數

地層	透水係數 K (m/sec)
雜項回填料 (SF) (CL)	10^{-9}
雜項回填料 (SF) (SM)	10^{-4}
黃棕色砂岩 (SS)	$10^{-7} \sim 10^{-5}$
灰色砂岩 (SS)	$10^{-8} \sim 10^{-6}$
泥岩 (MS)	$10^{-9} \sim 10^{-7}$
砂泥岩互層 (SS/MS)	$10^{-8} \sim 10^{-6}$
砂岩夾泥岩 (SS-MS)	$10^{-8} \sim 10^{-6}$
砂岩夾粗砂岩 (SS-CSS)	$10^{-7} \sim 10^{-6}$
雜項回填料 (SF) (SM)	10^{-9}

(五) 監測資料蒐集

考量本文之研究目的，故著重於蒐集寶二水庫歷年來右山脊區域之地下水位及滲水量量測資料 (經濟部水利署北區水資源局，2006~2009)。

右山脊區域地下水位觀測井及量水堰等監測資訊如表 2 所示，相關監測設備之平面配置如圖 10 所示。

(六) 模型建置、率定及分析

1. 模型建置

為建立寶二水庫大壩右山脊鄰近區域之水文地質概念模型，本文蒐集築壩前後之地形圖、竣工後壩體與各項設施之高程及配置圖，再根據此地形圖幅資料將山脊、壩體與各項設施數化為可用之數值高程模型 (Digital Elevation Model 或簡稱 DEM)，除可進行相關地形分析外，更能藉以考量岩體內常時地下水因滲流作用所形成之三維空間分布狀態。

表 2 寶二水庫右山脊監測儀器一覽表

種類	編號	位置	監測項目	監測目的
水位觀測井	E1	第三袋口	地下水位	觀測山脊水位變化
	E2	第三袋口	地下水位	觀測山脊水位變化
	E3	第二袋口	地下水位	觀測山脊水位變化
	E4	第二袋口	地下水位	觀測山脊水位變化
	P4	第一袋口	地下水位	觀測山脊水位變化
	P5	第一袋口	地下水位	觀測山脊水位變化
量水堰	P6	第一袋口	地下水位	觀測山脊水位變化
	W-9	第二袋口	滲流量	右山脊滲水量變化
	W-10	第二袋口	滲流量	右山脊滲水量變化
	W-11	第三袋口	滲流量	右山脊滲水量變化

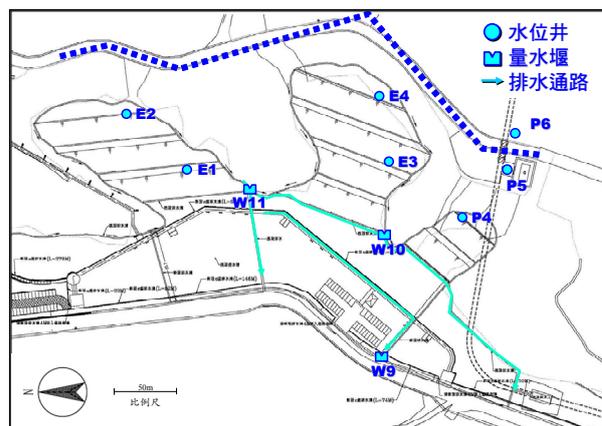


圖 10 寶二水庫右山脊既有監測儀器裝設位置

地形分析使用之數值地形底圖係採用內政部數值地形資料 (民國 91 年至 92 年間所拍攝之航空攝影立體像對，經正射後以視差法製作之 $5m \times 5m$ 精度之數值地形資料)，作為水文地質概念模型建置的藍本。至於竣工後之地形則整合寶二水庫竣工後地形圖及本文近期於水庫右山脊區域所進行之地面 LiDAR 量測成果為主。

圖 11 為整合上述地形資料所產生的壩區及右山脊之地形圖，圖幅範圍南北縱長約 1300 m，東西寬約 1000 m。至於研究區域邊界之劃定係藉由 GIS 工具針對數值地形資料 (DEM) 進行空間分析後，初步產生沿著地形稜線及河谷所定義之自然邊界，隨後再以人工目視比對地形圖以修正不合理的邊界曲線段落。修正後之分析邊界線如圖 12 所示，除定義水文地質模式分析之分析範圍外，同時亦將自然邊界條件引入水文地質模型內，除精確度較佳外，合理性亦較高。

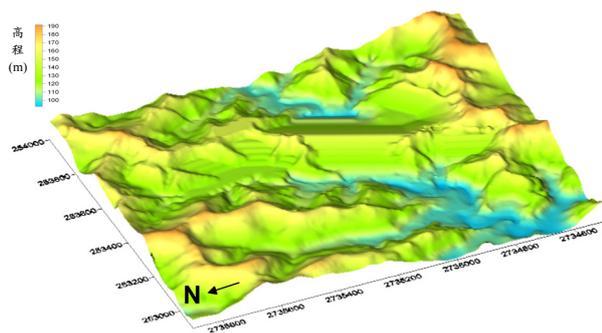


圖 11 寶二水庫研究範圍之地形資料整合成果

為考量地質條件對地下水流動之影響，建立三維水文地質概念模型時，需掌握各水文地質單元之空間分布狀態。本文蒐集民國 76 年至今之地質調查資料及鑽孔資料，以整合各地層之分布狀態，惟鑽孔分布位置多集中於壩區，大壩右山脊區域之鑽孔相對較少。利用數值程式 GMS 將庫區地層岩性分布圖及既有鑽孔資料數化，建立所有鑽孔分層資料之三維空間分布，據以建立後續三維水文地質概念模型。大壩右山脊區域既有鑽孔之位置分布如圖 13 所示。

寶二水庫右山脊之水文地質概念模型係根據前述所蒐集之地形資料、地質圖幅、地質鑽探及現地試驗等成果彙整而成。模型根據水文地質分層原則共劃分為 5 類水文地質單元，包括砂岩 (SS)、泥岩 (MS)、砂岩與泥岩互層 (SS/MS)、砂岩偶含泥岩 (SS-MS)、砂岩含粗砂岩 (SS-CSS)，三維水文地質概念模型如圖 14 所示，圖 15 則為其中既有之隔幕灌漿施作配置剖面。

2. 模型率定

本文採用 GMS 程式所提供之 MODFLOW 2000 PES 模組進行上述「自動參數估計」之率定過程，獲得具代表性之最適參數，建立最符合現地地下水流場之水文地質模型。模式率定成果如圖 16 所示，成果顯示右山脊各地下水水位觀測井所處位置之模式分析水位與實測水位相近，誤差約在 ± 1 m 內，顯示所建立之水文地質概念模型具有相當的代表性與準確度。經模式率定後之最適化參數配置如表 3 所示。

表 3 寶二水庫右山脊代表性地層透水性參數

地層	透水性係數 K (m/sec)
黃棕色砂岩 (SS)	1.0×10^{-6}
灰色砂岩 (SS)	1.0×10^{-6}
泥岩 (MS)	1.0×10^{-8}
砂泥岩互層 (SS/MS)	1.0×10^{-7}
砂岩夾泥岩 (SS-MS)	5.0×10^{-7}
砂岩夾粗砂岩 (SS-CSS)	5.0×10^{-6}

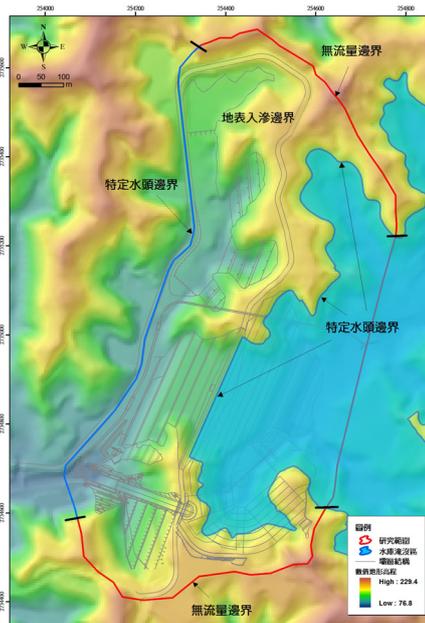


圖 12 寶二水庫研究範圍劃定及邊界條件設定

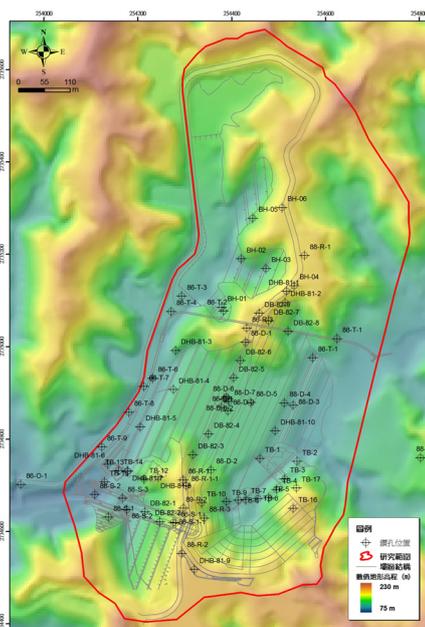


圖 13 寶二水庫研究區域既有鑽孔資料整合

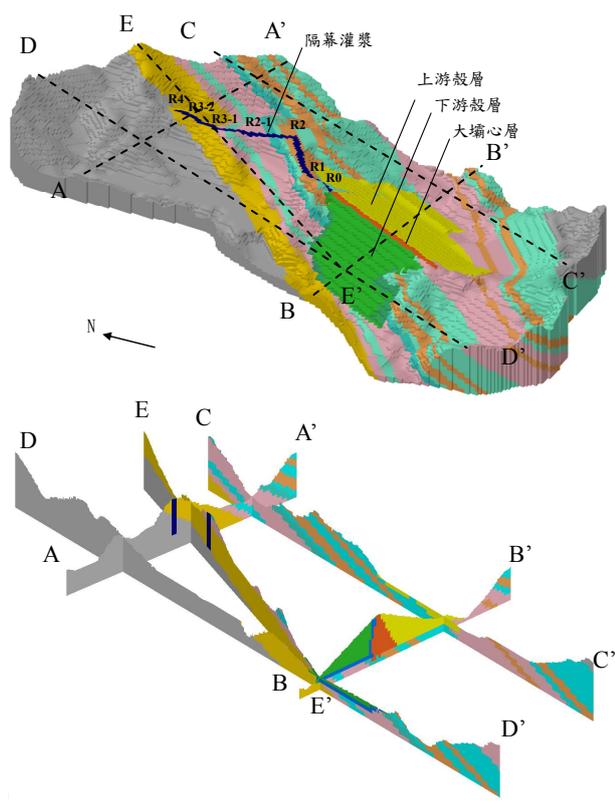


圖 14 寶二水庫三維水文地質概念模型 (a)三維模型、(b)柵狀剖面

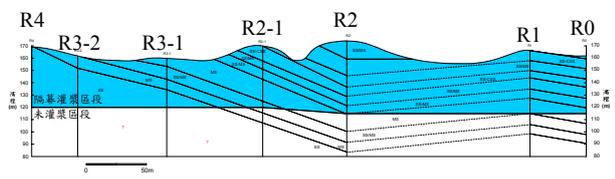


圖 15 寶二水庫右山脊隔幕灌漿剖面配置圖

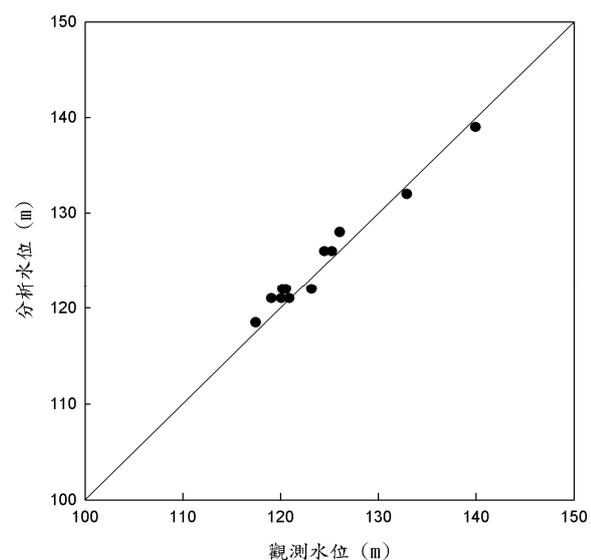


圖 16 模式分析地下水位與實測水位之比對

3. 模式分析

模式分析之特定水頭邊界條件採用水庫蓄水高程之變化範圍 (介於 135.5~148.5 m) 作為分析條件。以水庫近期最高水位 148.5 m 之分析成果為例，由研究區域內之滲流分析結果顯示地下水總水頭初始分布自庫水高程 148.5 m，先經由隔幕灌漿障壁衰減 (隔幕灌漿透水係數輸入設計值 5 Lugeon)，再流經右山脊山體後逐步降低至停車場區高程約 105~110 m。此時，主要滲水通路為水庫淹沒區出露之砂岩層 (SS)，隔幕灌漿未完全阻隔庫區滲水，部分庫水仍沿該砂岩層走向方向側向滲流，並通過山脊由袋口區雜項回填土下方出露之砂岩層滲出。

研究區域之常時滲流狀況可參考圖 17 所示 (圖中，在下游殼層處呈現流速較大之向量符號係為大壩濾層所貢獻，而非砂層滲漏所產生)。此外，亦發現壩區周緣，沿砂岩層含粗砂岩層 (SS-CSS) 亦產生較大之側向滲流量。此外，分析結果顯示，當水庫蓄水高程達 148.5 m 時，根據模型表層網格之水收支計算，可估得大壩右山脊區域內之地表滲水總量約為 68.6 CMD (或 m^3/day)，分析成果與實際佈設於右山脊區域之量水堰於連續未降雨期間之監測值 59.8~114.1 CMD (平均值 86.9 CMD) 相近，分析精度在工程可接受範圍。

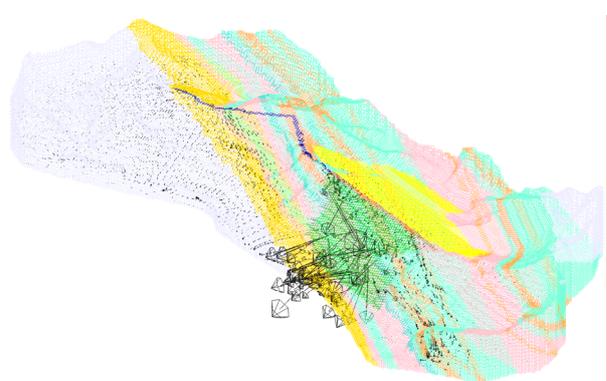


圖 17 寶二水庫右山脊之三維地下水流向分布

(七) 滲水成因評估及安全性探討

1. 滲水成因評估

由現地調查及模式分析結果研判，寶二水庫右山脊滲漏情形係庫水自庫區出露之透水性較佳砂岩層，延地層走向方向，由水頭高處向低處側向滲流所致。因此雖然在地質上，本區地層以 30 度角向東傾斜（即向水庫淹沒區傾斜之地層），但因右山脊地形因素，部份砂岩層在培厚填築區之下方出露，因此地下水易從該出露之砂岩層滲出。滲出水因未能透過濾層適當導排，故經蓄積後由地表滲出，造成培厚區產生濕潤之情形。

2. 管湧潛勢安全評估

由地表地質調查及鑽探調查結果可知寶二水庫右山脊有部分膠結不良之砂岩出露。為瞭解出露點之滲流力是否過大（水力坡降過大）而有機會造成軟岩中之細粒料逐漸流失，形成內部滲流通道導致產生管湧潛勢，故本研究針對現場鑽探取樣之砂岩（SS）進行針孔擴散試驗（ASTM D4647），以瞭解砂岩在露頭或開挖面等出露位置上之管湧潛勢。根據試驗結果可知，無論是風化銹染之黃棕色砂岩或新鮮之灰色砂岩，其擴散等級皆在 ND1~ND2 之間，屬於非擴散性等級。

此外，由經濟部水利署中區水資源局（2002）針對寶二水庫蓄水後邊坡之穩定性研究指出：膠結不佳之砂岩（灰色泥質砂岩及黃灰色粗顆粒砂岩）若為完整岩樣則發生管湧之機會不高；另透過人工方式將砂岩進行鑽孔及切割進行試驗，結果顯示水力坡降大於 50 以上時才会有明顯之出砂量且造成試體底部產生明顯的沖蝕孔洞。

本文透過前述三維滲流分析得知右山脊下游側邊坡之最大水力坡降約為 0.6，屬於均勻緩慢之滲水狀態，產生管湧的潛勢極低。惟需注意若日後庫區巡檢發現岩樣若有明顯節理或裂面缺陷時，當水力坡降大於 50 以上時，必須特別注意

滲水是否產生細顆粒流出之現象，以避免發生岩體管湧破壞情況。

3. 水庫營運影響評估

寶二水庫自 2006 年 4 月 11 日正式開始蓄水至今，每日總出水量介於 0~447,000 m³，平均值為 80,130 m³（每日總出水量歷時曲線如圖 18 所示）。其中，總出水量包括自來水取水量、生態基本放流量、分歧管供水及緊急放水量。

若以目前量水堰所得右山脊之每日滲水量平均值 86.9 m³ 估計，約佔寶二水庫總出水量平均值之 0.1%，可知對水庫水資源整體營運調度之影響極微。

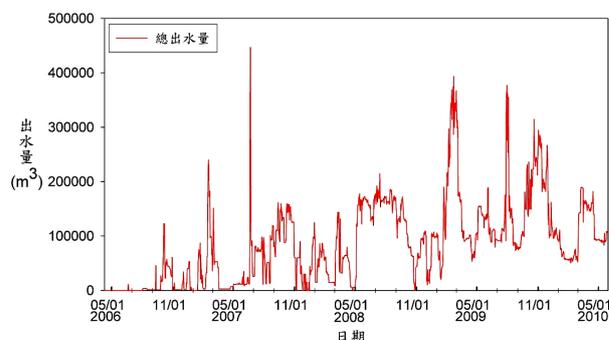


圖 18 寶二水庫每日總出水量歷時曲線

五、結論

1. 本文應用地下水分析程式 GMS 內建之 MODFLOW 模組成功建立一套三維水文地質概念模型，並透過水平衡原理及三維地下水流動控制方程式，求得模型內地下水流場之分布，並透過監測資料初步獲知大壩右山脊區域滲水之成因及其對水庫安全與營運之影響。此程序可提供各界處理類似問題時參考運用。
2. 模式針對庫區之地形、地質及水文狀況進行整合，建立具代表性之三維水文地質概念模型。透過監測資料進行模式率定與驗證，以提升後續地下水流動分析之正確性。分析結果可協助研判水庫滲水成因及主要路徑，亦可計算水力梯度據以評估管湧破壞潛勢。

3. 本文著重於三維水文地質模式分析之流程及方法之建立。所舉案例之分析內容亦偏重於評估地下水流場、研判主要滲水路徑及評估是否具管湧潛勢等課題。至於諸如壩坡穩定性及地震影響等其他安全評估項目，則礙於篇幅而省略，詳細內容可參考本計畫成果報告說明（財團法人中興工程顧問社，2010）。

專輯，中興工程科技研究發展基金會，台北市
 Environmental Modeling Research Laboratory (2003) GMS
 5.0 User's Manual, U.S.A.
 ICOLD (1973) Lessons form Dam Incidents, Reduced edition,
 Paris
 ICOLD (1983) Deterioration of Dams and Reservoirs, Paris
 ICOLD (1988) The World Register of Dams
 Mcdonald M.G. and Harbaugh A.W. (1988) A Modular
 Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow
 Model, USGS, U.S.A.

誌謝

感謝經濟部水利署北區水資源局提供計畫經費及技術協助得使本文順利完成。另感謝經濟部中央地質調查所提供地質專業協助，特此誌謝。對於參與本計畫之所有中興團隊同仁亦一併致上最深謝忱。

參考文獻

- 台灣省水利局中部水資源開發工程處 (1993) 新竹縣寶山第二水庫可行性規劃(一、工程專題 - 2.工程地質調查與評估報告)，台灣省水利局
- 台灣省水利局中部水資源開發工程處 (1993) 新竹縣寶山第二水庫可行性規劃(五、其他 - 2.壩址及區域地質鑽探補充報告)，台灣省水利局
- 台灣省水利局中部水資源開發工程處 (1993) 新竹縣寶山第二水庫可行性規劃(五、其他 - 3.地下水與基礎透水性評估報告)，台灣省水利局
- 台灣省水利規劃試驗所 (1998) 寶山第二水庫工程地質探查報告，台灣省中區水資源局
- 財團法人中興工程顧問社 (2008) 易淹水地區上游集水區地質調查與資料庫建置(第 2 期 97 年度) - 集水區水文地質對坡地穩定性影響之調查評估(1/3)，成果報告，經濟部中央地質調查所
- 財團法人中興工程顧問社 (2009) 寶山第二水庫大壩監測分析及設施檢查 - 97 年度安全監測分析報告，經濟部水利署北區水資源局
- 財團法人中興工程顧問社 (2010) 寶山第二水庫右山脊滲水調查及研究委託專業服務，成果報告，經濟部水利署北區水資源局
- 經濟部水利署中區水資源局 (2002) 寶山第二水庫蓄水後邊坡穩定性研究成果報告
- 經濟部水利署中區水資源局 (2006) 寶山第二水庫土壩工程竣工報告
- 程禹、張森源、汝乃華等人 (2008) 大壩事故-案例輯要