運用三維分析技術進行水庫滲水安全評估

王金山[1] 譚志豪[2] 高憲彰[3] 蔡明欣[1] 張玉蕣[4] 蔡家民[5]

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

摘　要

早期針對水庫安全評估所進行之大壩滲流分析，多以壩體最大斷面或代表性斷面進行二維模式分析為主。然而，傳統二維模式分析並無法有效考慮壩體與壩基、壩座接合位置之滲漏，且壩基岩層之滲透異向性與不連續面之位態亦無法充分反應到二維分析模式中。此外，河谷形狀效應亦未考量。上述問題均需透過三維分析方能解決。

有鑑於此，本研究舉寶山第二水庫右山脊滲水安全評估為例。首先進行一系列之水文地質調查、試驗、監測與分析工作，並透過水文地質特性調查成果，建立足以代表研究區域之三維水文地質概念模型。再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。最終由研究結果獲知研究區域地下水流況，並藉以評估水庫滲水路徑、出露位置及滲漏量。據以評估該滲漏量對水庫安全與營運之影響。研究成果顯示三維模式分析成果具有良好的代表性及精確度，值得各界參考運用。

關鍵詞：水庫、土石壩、滲水、安全評估、三維滲流分析。

Safety assessment of earth dam using 3-D seepage analysis

ABSTRACT

Traditionally, the two-dimensional seepage model based on the typical cross section of earth dam was used to assess the dam safety. However, the 2-D model could not effectively estimate the leakages among the dam, the foundation and the abutments. Similarly, the 2-D model could not adequately consider the heterogeneity of materials of earth dam, the valley shape effects, and the spatial distribution of geological formations of the dam foundation. Furthermore, the anisotropic permeability and discontinuity orientation of geological formations could not be considered in detail with the 2-D model either. The above problem must be solved by the three-dimensional model analysis.

The case study focused on the safety assessment of the leakages through the thin mountain ridge at the right dam abutment of Pao-Shan No.2 Reservoir. A series of hydrogeological investigations, in-site/laboratory tests, and monitorings were carried out. The investigation results were used as the input for establishing the 3-D hydrogeologic model. The study applied 3-D seepage analysis performed with the software GMS to obtain the groundwater flow field of the model. According to the results, we can find out the possible paths, the locations and the amount of leakages. Finaly, the effects of the leagakes on the dam safety and on the reservoir operation were also estimated. The results demonstrate that the 3-D model has great validity and accuracy for safety assessment of reservoirs.

Key Words: Reservior, Eateh dam, Leakage, Safety Assessment, 3-D Seepage Analysis.

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。

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)。

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。

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，建立出結合壩體、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。

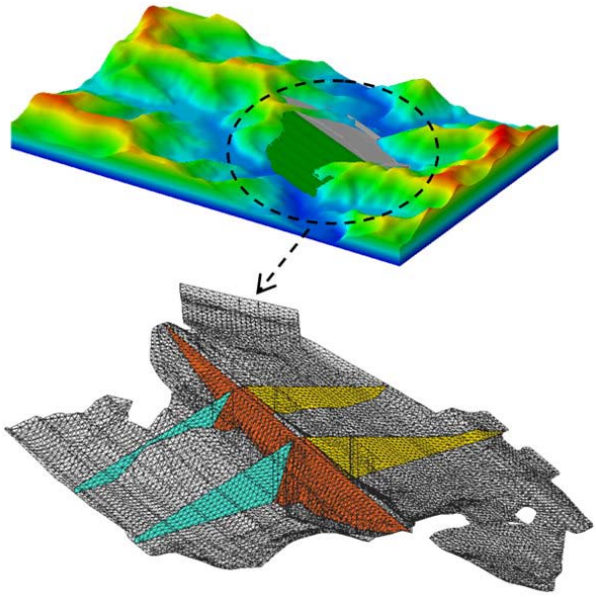
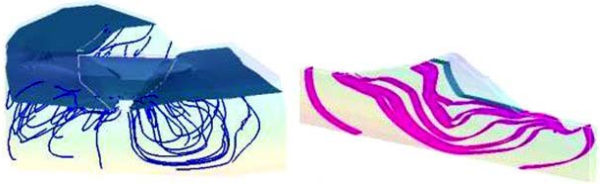
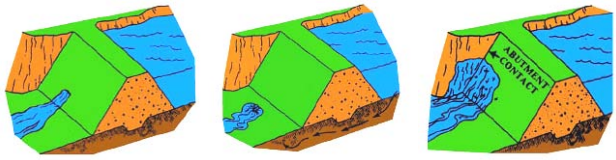


圖 1　土石壩之三維幾何條件示意圖



(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。為建立能充分代表現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。

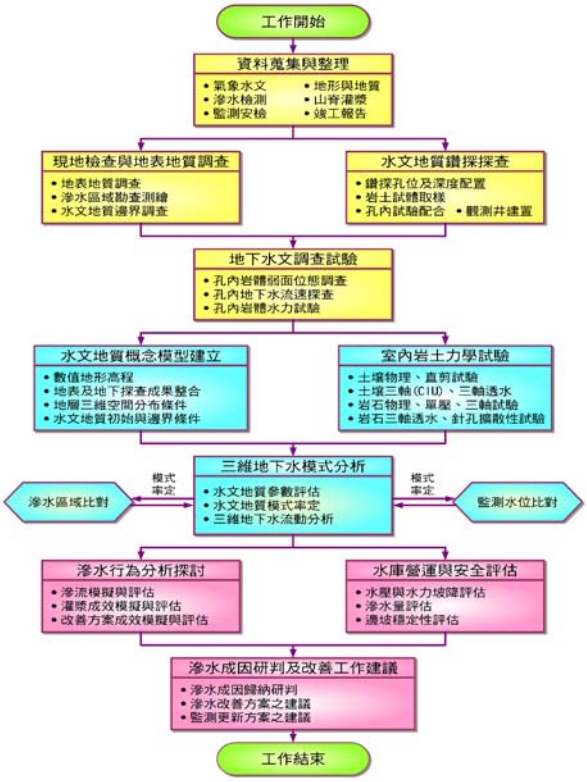


圖 4　工作方法與流程

三、資料蒐集整理及水文地質調查試驗

(一) 資料蒐集及整理

針對水庫施工期間及竣工後之相關資料進行蒐集及整理，包括：築壩前後之地形圖與衛星影像、竣工後壩體與各項設施之高程及配置圖、既有地質圖幅蒐集、既有鑽探資料及地表露頭調查等資料。以求掌握研究區域整體之地層屬性、地質構造、水文特性及相關力學參數。

(二) 水文地質調查及試驗

為充分瞭解滲水區域水文地質相關特性，提供後續分析及滲水成因研判。現場可進行之水文地質調查與試驗項目包括：(1)現地檢查、地表地質調查及水文地質邊界調查；(2)現地光達測量；(3)紅外線熱影像調查；(4)鑽孔調查；(5)地下水文調查試驗(岩體裂隙位態調查、地下水流速探查及裂隙岩體水力試驗等)。

室內試驗則包括：(1)室內土壤與岩石力學試驗(基本物理性質、滲透性質及強度性質試驗)及(2)針孔擴散試驗。各項調查工作之目的與用途如表1所示。

四、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，除前述之資料蒐集、整理及水文地質調查、試驗工作外，需透過以下工作進行：

1. 地形及地質資料整合

根據前述蒐集整理之地形及地質資料將山脊、壩體與各項設施數化為可用之數值高程模型 (DEM)，藉以評估岩體內常時地下水之三維空間分布，並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。

2. 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含水層之補注邊界機制。

3. 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。

數值模型網格之轉換及後續地下水流動分析工作可利用三維地下水模式分析程式GMS (Groundwater Modeling System) 進行。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 5.0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，可將前述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。GMS分析程式可採用「自動參數估計法」率定模式中各參數，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。

表1　水文地質調查、試驗工作之目的與用途說明

調查項目	目的	用途
現地檢查、 地表地質調查及 水文地質邊界調查	調查研究區域內之滲水狀況、地形表徵與地質露頭。	1. 瞭解研究範圍之滲水位置及區域範圍； 2. 調查研究範圍地形表徵，掌握坡面變動狀況； 3. 掌握研究範圍露頭分佈及位態，推估範圍內之地質構造。 4. 提供研究範圍之水文地質模型邊界條件設定參考。
紅外線熱影像調查	透過量測物體表面之溫度調查現場滲水之區域範圍。	輔助現場檢查工作，以確實掌握研究區域之滲水範圍。
現地光達測量	取得詳細且高精度之地形資料。	1. 輔助航照所產製之 DEM 資料，提高水文地質模型之精度。
鑽探調查	調查研究範圍內地層與地質構造之空間分布及其力學特性。	1. 提供研究範圍水文地質及穩定分析所需之基本參數； 2. 瞭解研究範圍地層之破碎程度； 3. 提供研究範圍可能滑動面深度及可能滑動位置。
岩體裂隙位態調查	調查岩層破碎程度、主要含水層可能之位置。	1. 評估裂隙岩體水力試驗之深度位置； 2. 掌握鑽孔岩心之精確位置，檢核鑽探品質； 3. 釐清可能潛在滑動面之範圍。
地下水流速探查	調查鑽孔內地層之地下水流向及流速。	1. 評估山脊主要滲流(或滲漏)途徑。 2. 估算透水性質，作為地下水分析之參考。
裂隙岩體水力試驗	調查鑽孔內地層之裂隙岩體透水係數。	1. 評估研究範圍之水文地質特性； 2. 評估研究範圍之含水層位置與型態； 3. 提供研究範圍水文地質及穩定分析所需之透水係數。
孔內電井測調查	調查鑽孔內地層之電阻率、自然電位、放射線強度等訊號。	1. 評估鑽孔內地層之岩性、細部構造及地層滲透性； 2. 評估研究範圍之含水層位置與型態； 3. 提供研究範圍水文地質及穩定分析所需之孔隙率及強度參數。
土壤與岩石力學試驗	利用現地鑽探與調查取得的岩心試體或土壤試樣進行各項室內試驗，以求得分析所需之基本參數。	提供研究範圍水文地質分析及穩定分析所需之基本參數。
針孔擴散試驗		瞭解岩石擴散特性與能力，作為管湧潛勢評估之參考。

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及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：

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

……(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；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)，可透過指定水文地質網格單元、變更材料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。

五、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 km^2，蓄水容量3,218萬m^3，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，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。此問題需賴三維分析方得以解決。鑑此，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。

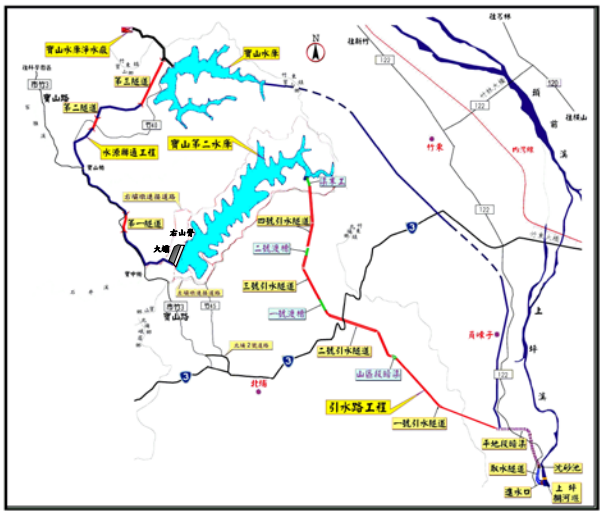


圖 5　研究區域地理位置

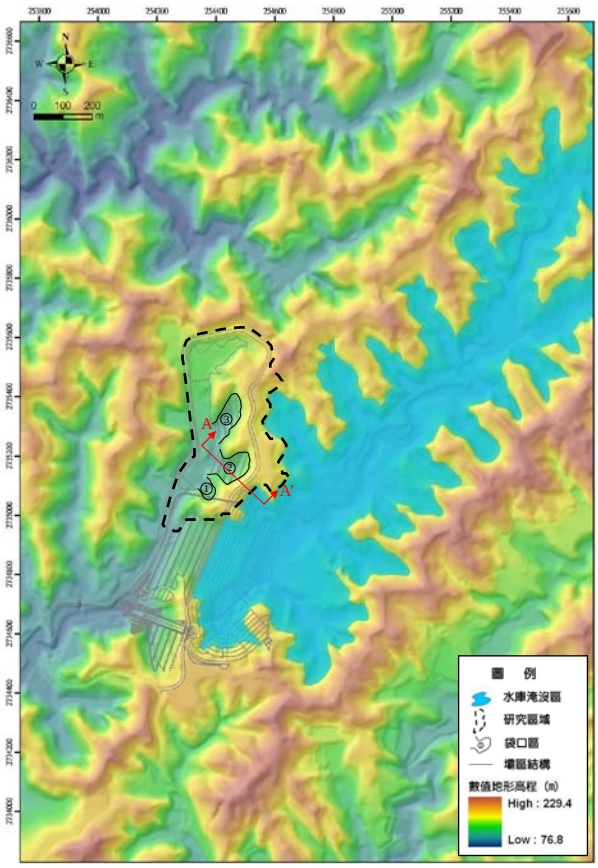


圖 6　滲水區域 (右山脊袋口區)

(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。

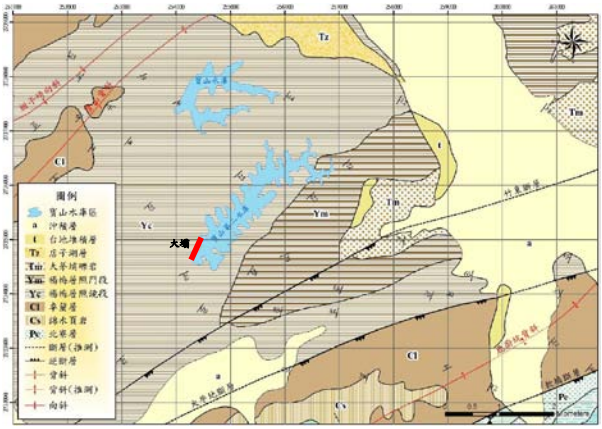


圖 7　寶二水庫鄰近區域之區域地質圖

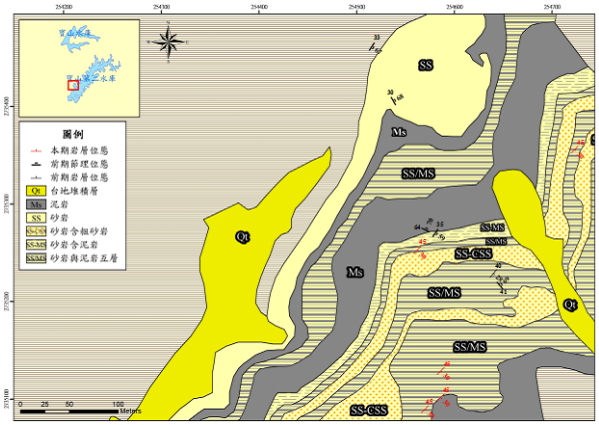


圖 8　寶二水庫右山脊區域之地層岩性分布圖

(四) 水文地質調查及試驗

1. 現地檢查、地表地質及水文地質邊界調查

為瞭解寶二水庫右山脊區域滲水區域範圍及狀況，以界定現場地表地質調查範圍及後續地質鑽孔調查的佈置。現地透過現場人員目視檢查以進行地表面之滲水範圍圈繪。除此之外，本文尚利用紅外線熱影調查進行地表下滲水狀況之判釋，以補充肉眼無法觀察淺層土壤內之滲水情形，成果如圖9所示。

2. 現地光達測量

本文除透過築壩前後之地形圖、竣工後壩體與各項設施之高程及配置圖蒐集，以取得研究區域之地形外。並針對滲水區域進行地面光達(LiDAR)測量藉以獲得精度較高的地形資料，以提高後續水文地質概念模型之精度，成果如圖10所示。

3. 鑽孔調查

為深入瞭解大壩右山脊地質狀況，除蒐集寶二水庫前期地質資料外，針對滲水區域新增地質鑽探6孔，總長度250 m，鑽孔布置如圖16及表2所示。鑽孔布置原則係採兩條十字剖面線方式布設，兩剖面分別平行可能滲水砂岩層走向及垂直右山脊第二袋口區坡面。

所有鑽孔均採全程取心 (HQ規格)，以瞭解工址土壤及岩盤狀況，並於鑽探過程採取銅圈土樣、薄管土樣、岩心樣品等，以進行室內岩土力學試驗；鑽孔則提供地下水文調查試驗及水位井監測裝設之用。

4. 地下水文調查試驗

地下水文調查試驗之主要目的在於透過現地試驗，掌握關鍵地層之水文地質特性，以提供水文地質模式分析及滲水成因綜合研判之參考，現地相關工作成果如表3及圖11所示。

圖 9　寶二水庫右山脊之滲水區域調查成果

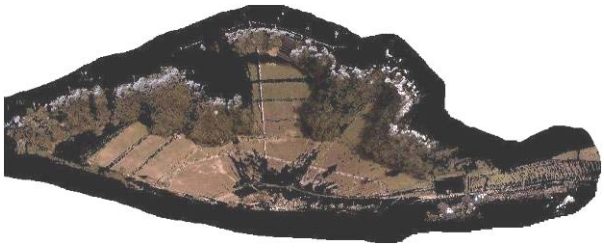


圖 10　寶二水庫右山脊之地面光達測量成果

表2　寶二水庫右山脊鑽孔數量統計表

孔號	鑽孔方向	鑽孔深度 (m)	孔口高程 (m)	二度分帶坐標 (TWD97)	
				X	Y
BH-01	垂直	40	125	254380	2735085
BH-02	垂直	40	125	254421	2735190
BH-03	垂直	40	135	254474	2735169
BH-04	垂直	70	156	254534	2735132
BH-05	垂直	30	125	254446	2735278
BH-06	垂直	30	158	254508	2735301
合計		250			

表3　寶二水庫孔內不連續面位態調查成果

孔號	實際影像攝影區段深度 (m)	弱面數量	不連續面位態 (傾向/傾角) (度)
	光學式		
BH-01	5.0 ~ 40.0	23	145 / 32
BH-02	10.7 ~ 39.6	12	144 / 30
BH-05	6.0 ~ 30.0	12	136 / 28
寶二水庫場址綜合研判		47	143 / 30

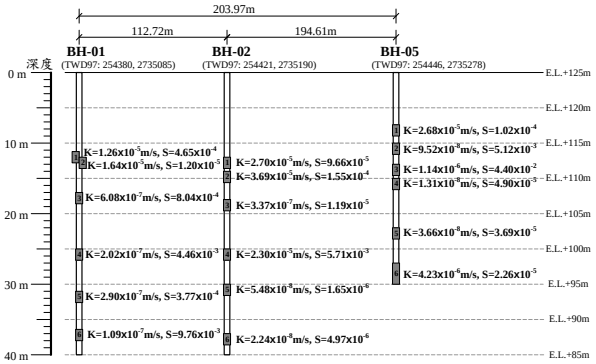


圖 11　BH-01、BH-02、BH-05 鑽孔之水力試驗參數分布

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12所示 (即圖6之AA'剖面)及代表性岩層之透水性參數值，如表4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。

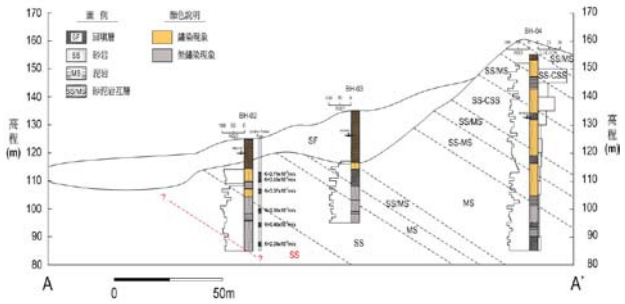


圖 12　寶二水庫右山脊區域地質剖面圖

表4　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5所示，相關監測設備之平面配置如圖13所示。

(六) 模型建置、率定及分析

1. 模型建置

水文地質概念模型之建置首先係利用前述文獻蒐集及現場測量之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5　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
	P6	第一袋口	地下水位	觀測山脊水位變化
量水堰	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

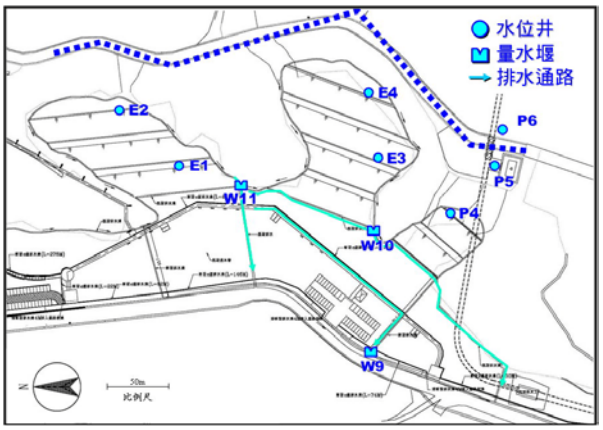


圖 13　寶二水庫右山脊既有監測儀器裝設位置

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×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14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15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。

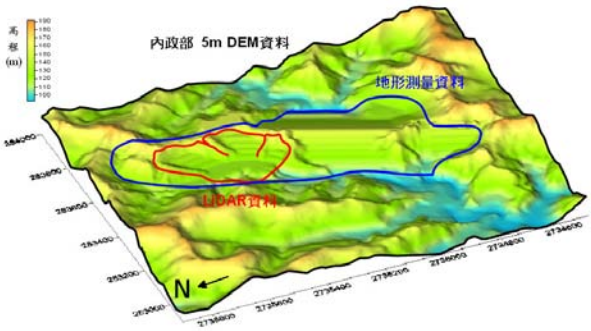


圖 14　寶二水庫研究範圍之地形資料整合成果

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16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17所示，圖18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19所示，成果顯示右山脊各地下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6所示。

表6 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)
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}

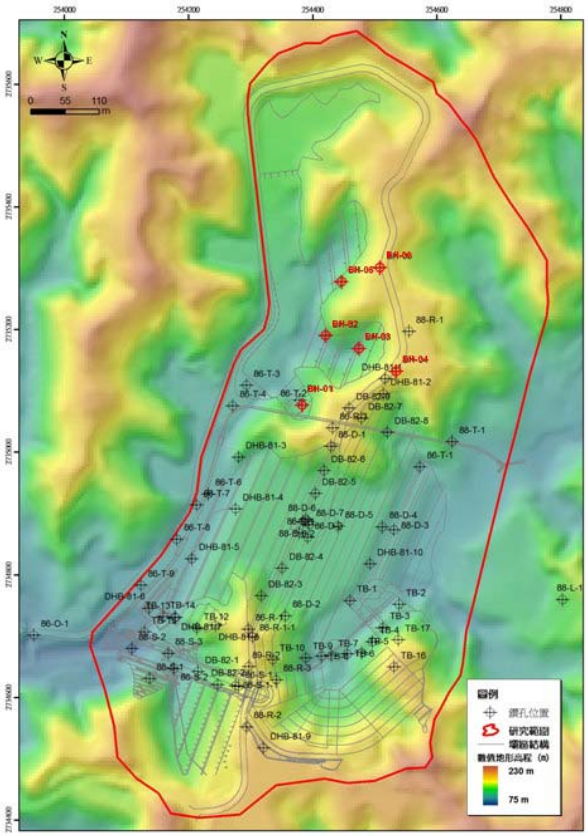


圖 16 寶二水庫研究區域既有鑽孔資料整合

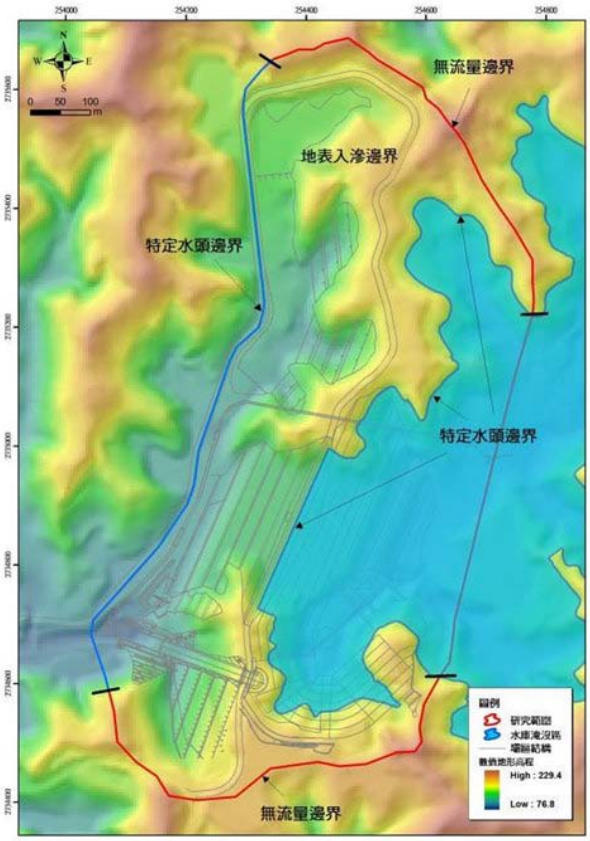


圖 15 寶二水庫研究範圍劃定及邊界條件設定

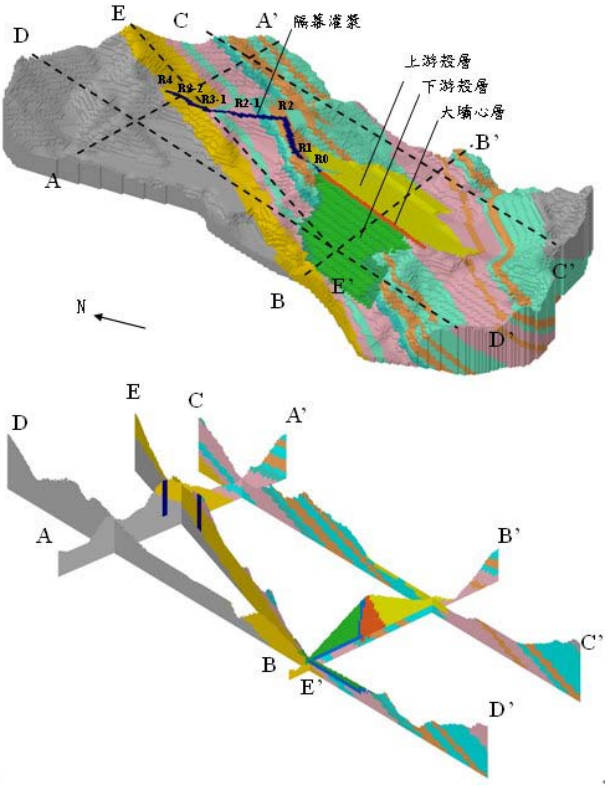


圖 17 寶二水庫三維水文地質概念模型

(a)三維模型、(b)柵狀剖面

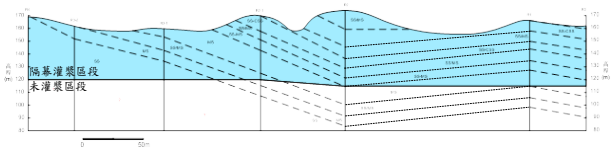


圖 18　寶二水庫右山脊隔幕灌漿剖面配置圖

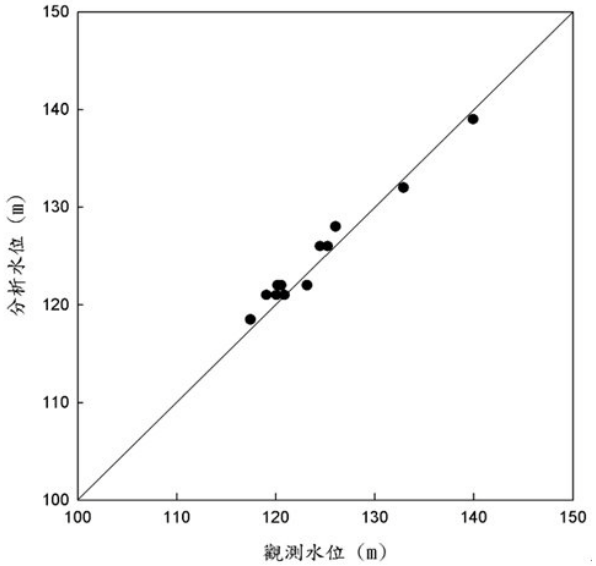


圖 19　模式分析地下水位與實測水位之比對

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20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。

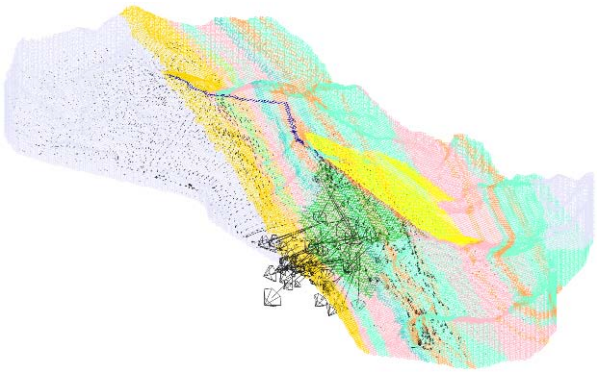


圖 20　寶二水庫右山脊之三維地下水流向分布

(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，形成內部滲流通路導致產生管湧潛勢，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以上時才會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 m^3，平均值為80,130 m^3 (每日總出水量歷時曲線如圖21所示)。其中，總出水量包括自來水取水量、生態基本放流量、分歧管供水量及緊急放水量。

若以目前量水堰所得右山脊之每日滲水量平均值86.9 m^3估計，約佔寶二水庫總出水量平均值之0.1%，可知滲水對水庫整體營運調度之影響極微。

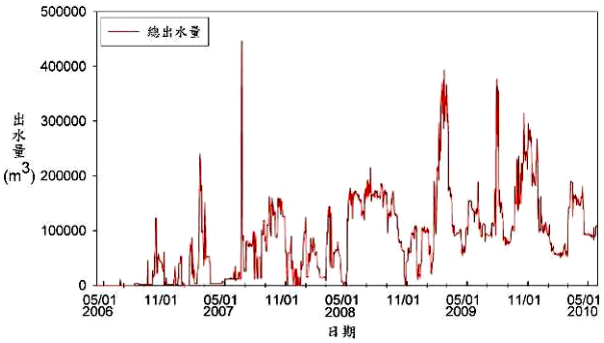


圖 21　寶二水庫每日總出水量歷時曲線

六、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。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。並據以評估滲水對水庫安全與營運之影響。
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。並透過監測資料進行模式率定與驗證，確保模式分析之正確性與準確度。
3. 本研究所建立的三維模式分析程序除可瞭解前述地下水滲水路徑及研判水庫滲水成因外，尚可進一步針對水庫滲水改善方案進行模擬分析，以評估其改良成效及工程經費。此評估程序可提供後續水庫安全評估或滲水改善工法評估之參考。
4. 國內各蓄水構造物隨其生命週期之進展，其安全性勢必隨著材料老化等因素而逐年降低。為維持其正常運作且降低破壞風險，各蓄水構造物之安全檢查、評估及監測工作，更應隨著結構物之使用年限增長而投入更多的資源及能量。此概念與人體步入老年更需要進行精密的健康檢查以延續更長久的壽命是一樣的道理。此觀念需逐步推廣至產官學界進而形成共識。屆時，本研究開發之三維模式分析技術可提供作為良好的評估工具。另搭配生命週期定期維護之理念，除可大幅降低蓄水構造物破壞機率以提升安全外，更能確保水庫周遭區域內居民之生命財產安全。

誌 謝

首先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致上最深的謝忱。

參考文獻

[1] 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。
[2] 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。
[3] 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。
[4] 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。
[5] 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。
[6] 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。
[7] 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。
[8] 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。
[9] 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。
[10] 程禹、張森源、汝乃華等人 (2008)，大壩事故-案例輯要專輯，中興工程科技研究發展基金會，台北市。
[11] Environmental Modeling Research Laboratory (2003) GMS 5.0 User's Manual, U.S.A.
[12] ICOLD (1973) Lessons form Dam Incidents, Reduced edition, Paris
[13] ICOLD (1983) Deterioration of Dams and Reservoirs, Paris
[14] 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.