

水庫潛在崩場地調查研究

蔡宗翰／經濟部水利署水利規劃試驗所工程師

摘要

水庫上游邊坡穩定性影響水庫安全甚鉅，本研究以規劃中之土文水庫上游側右山脊疑似潛在深層滑動（具有滑動徵兆但未全面崩壞）為案例，利用地表地質、現況調查及地物探查手段確認是否有潛在滑動可能，並利用軟體模擬各種情境下的邊坡安全係數及滑動情形，評估可能滑動破壞的機制。

關鍵字：深層滑動、邊坡穩定分析

前言

水庫上游集水區若存在深層滑動，將影響到水庫興建、營運與維護，同時未來若產生大量土體滑落庫區，亦將使水位瞬間高漲而產生溢頂破壞，因此對於臨近壩址上游附近的潛在崩場地確有其必要加以調查釐清。根據「水庫蓄水區邊坡深層滑動」報告，利用航照與數值地形，結合有利崩塌發生之各項地質及地形因子，集水區內指出離規劃中土文水庫壩址 500 公尺內存在具滑動地形特徵之潛在深層滑動區（編號：CS03），如圖 1。因此本研究以該疑似深層滑動區為例，進行細部調查研究。

基本資料蒐集與地表地質及現況調查

CS03 位處率芒溪流域，為河道凹岸側，唯一交通路線僅邊坡上下兩條產業道路，保全對象為臨近的土文四號橋。地形以 40~50 度陡坡傾向河谷，相對位置示意圖如圖 2。區域地質上，本區屬於中新世晚期的牡丹層，屬於台灣南部亞變質岩區地層，以硬頁岩與薄層變質砂岩之互層，及厚層至塊狀變質砂岩為主，如圖 3。

CS03 由於本身植生茂密，陡坡加上出露岩盤不多，地表地質初步調查以上下邊坡產業道路及臨近河

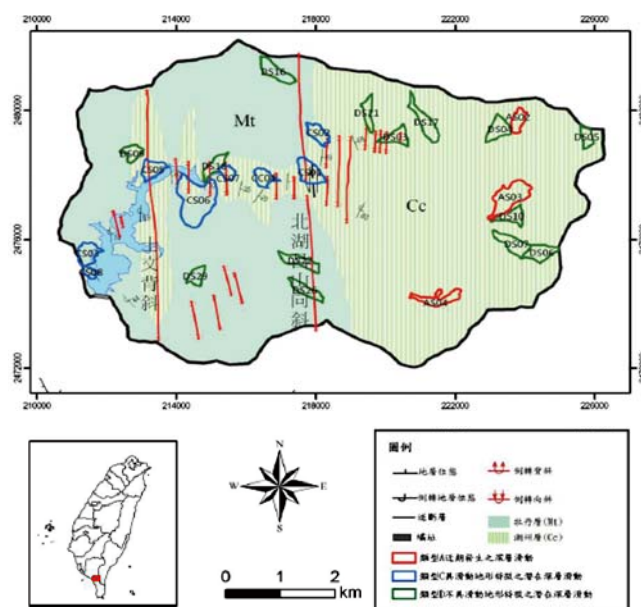


圖 1 士文水庫集水區疑似深層滑動目錄（摘自 100 年度，經濟部水利署水利規劃試驗所，「水庫蓄水區邊坡深層滑動」報告）

床為主，CS03 表土層以高風化的棕色硬頁岩崩積岩塊居多，河床出露的岩盤漸以頁岩偶夾砂岩為主。本區段主要岩性為硬頁岩，岩性受變質作用影響較為軟弱，因此表面受風化後常呈現黃棕色，層面走向變化情形大，可由上邊坡產業道路 NE 走向變化至下邊坡側 NW 走向，甚至部份岩盤伴隨出現明顯的局部小褶曲，顯示早期擠壓大、地質構造複雜且較無一致性；位態傾角約 40~50 度，高角度岩塊易產生翻倒墜落情形，同時節理面也呈現不規則分佈，無一定趨勢，調查之位態繪製與岩性說明，如圖 4 與表 1。

為瞭解崩積層厚度及岩盤位置分佈情形，進行 1 孔 30 公尺深地質鑽探及 3 條地電阻二維測線試驗，孔位及測線佈設位置如圖 4。

鑽探成果可發現，地表下 0~26 公尺以褐色粉土質



圖 2 CS03 相對位置示意圖 (底圖摘自 Google)



圖 3 現地露頭調查位置及現況

砂夾變質砂岩塊為主，破碎，多節理，節理內鏽染，26 公尺以下，屬於較具完整的岩層，如岩心照片及判釋之柱狀圖 (圖 5)。

地電阻成果說明如下，為瞭解深層垂直向變化，於上邊坡產業道路測線 (E1) 及下邊坡產業道路測線 (E2)，電棒採用 Pole-Pole 的排列方式進行佈設，山溝測線 (E3) 初步現場研判已接近岩盤，因此該處改以淺層解析能力較佳的 Wenner 排列方式進行，各電阻率並

以鑽探成果進行分析比較，反算結果如圖 6 至圖 8。電阻率配合鑽探成果比較，約略可以率定出 50ohm-m 以上屬於風化程度高的硬頁岩或砂岩塊所組成之崩積層，50ohm-m 以下為硬頁岩或變質砂岩為主，可視為岩盤。綜上，本區崩積層厚度由上邊坡產業道路為 26 公尺~45 公尺變化到下邊坡產業道路約 25 公尺~10 公尺，並延伸至河床，E3 測線結果大部分為岩盤，可視為崩塌範圍左邊界。

表 1 現地露頭岩性描述

露頭點編號	岩性描述
露 1	出露以黃棕色硬頁岩為主，呈現中高度風化情形，有部份岩屑堆積，有明顯岩塊出露，層面走向變化由 N4W~N14E，傾角約 50 度，該處有明顯的小褶曲出現，並伴隨錯動產生，可見早期擠壓情況大
露 2	露頭點位於上邊坡道路上，以黃棕色硬頁岩為主，主要節理位態約 N50W/N62，間距 10~30 公分，持續性不佳，現況乾燥無滲水現象
露 3	露頭點位於上邊坡道路上，以黃棕色硬頁岩為主，以中高度風化為主部份呈現岩屑崩落現象
露 4	露頭點位於下邊坡道路上，出露以灰色硬頁岩為主，層面位態約 N88E/SE46
露 5	露頭點出露於沖蝕溝上，有完整岩盤出露，以頁岩及變質砂岩為主互層為主，層面位態為 N40E/40W，且有地下水滲出現象
露 6	露頭點位於河道右岸，出露以黃棕色硬頁岩為主，層面位態約 N36W/E38，有明顯銹染痕跡
露 7	露頭點位於河道右岸，出露改以砂頁岩型態出現，層面約 N18W/W82，部份屬於膠結不佳易破碎現象



圖 4 露頭位態及鑽探孔位與試驗測線分佈圖

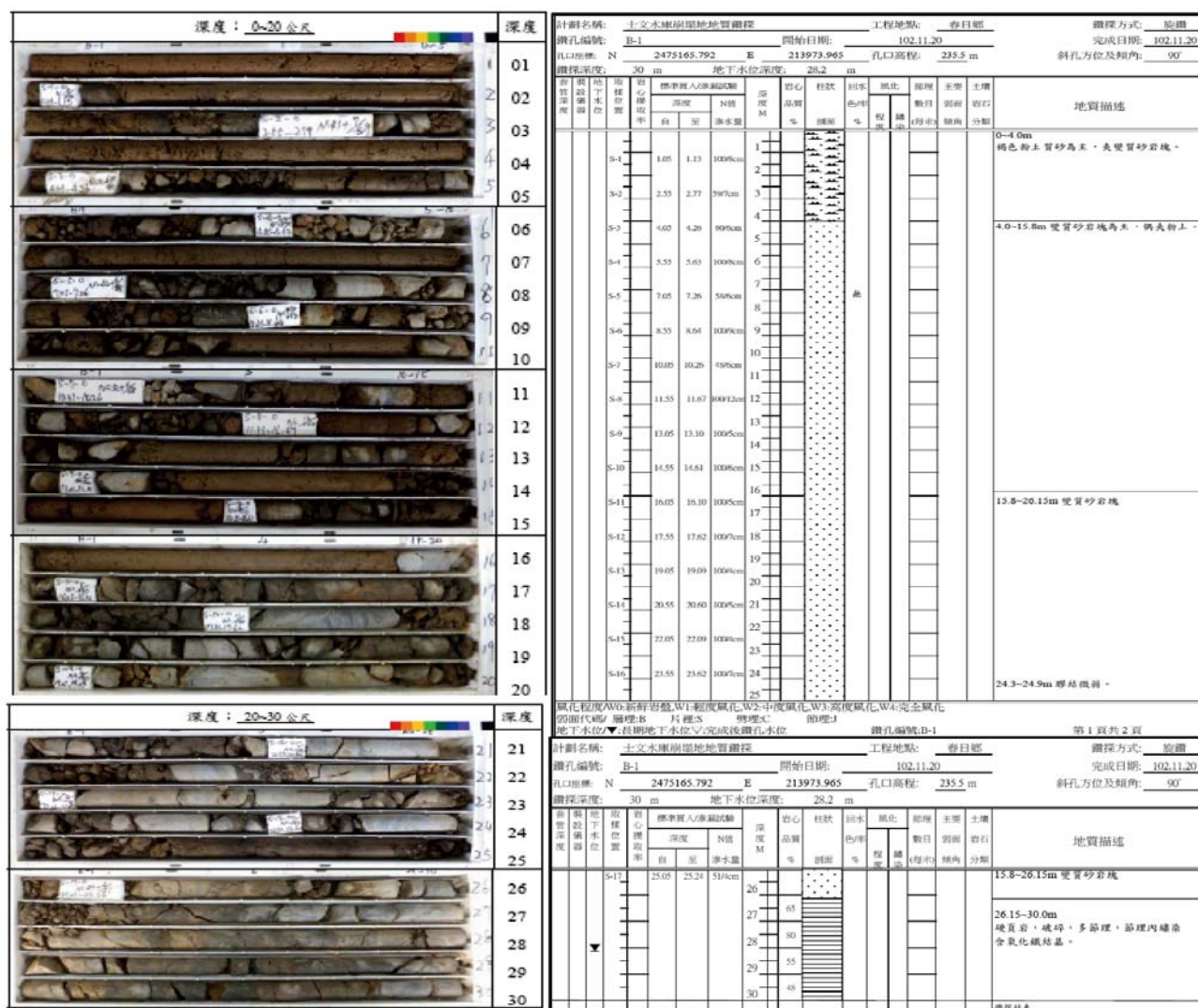


圖 5 地質鑽探岩心照片及柱狀圖

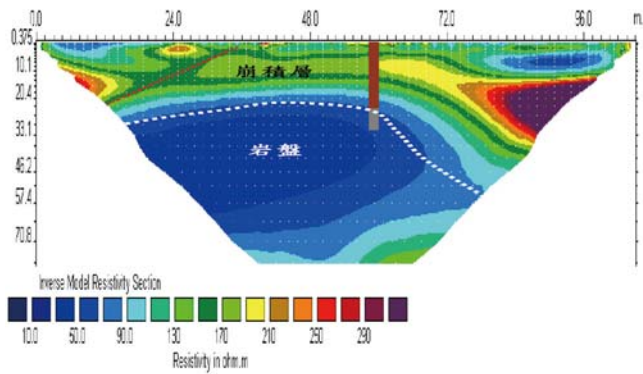


圖 6 上邊坡產業道路 (E1) 地物成果圖

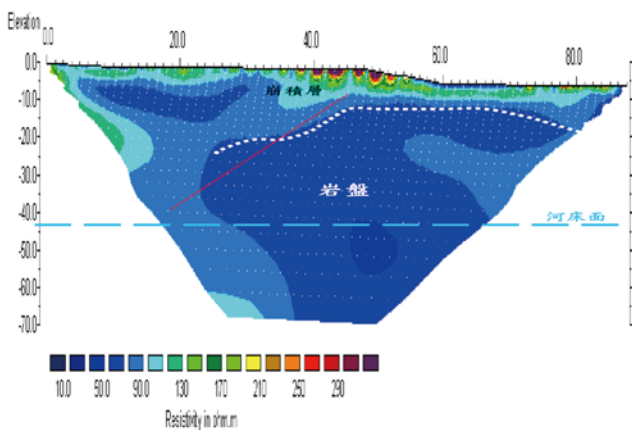


圖 7 下邊坡產業道路 (E2) 地物成果圖

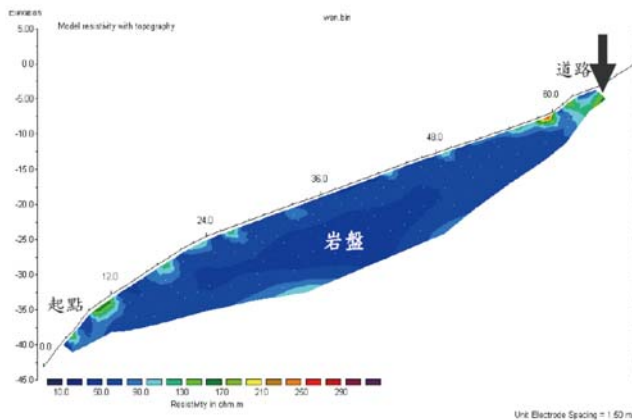


圖 8 山溝測線 (E3) 地物成果圖

數值穩定分析模擬

本區研究範圍由現地調查，可能滑動機制屬於淺層崩積層之潛移 (creep)、滑移 (slide) 導致翻落 (toppling) 為主，為進一步確認崩塌地滑動潛能與滑動破壞面，遂邊坡穩定性分析。參考該範圍內高精度數值地形模型 DEM 及配合現況調查，圈繪可能較具

滑動潛勢的滑動體位置 (如圖 9 紅線位置)，遂選擇以 A-A 剖面線進行分析 (如圖 9 黃線位置)。考量現場地形坡度及植生關係，無法全斷面於 A-A 剖面線上進行相關試驗佈設以了解其分層狀況，因此在既有的條件下，邊坡幾何及材料特性之假設說明如下。

配合鑽探孔及地電阻影像資料投影與現地出露的岩盤狀況、量測之地下水位作剖面分層模擬，A-A 剖面線之建模如圖 10。材料分為保守分為崩積層及岩盤兩層，依據歷年文獻報告取其強度參數，如表 2，其中崩積層係為模擬現地狀況，利用重模土模擬現地密度及含水量，進行直剪試驗求取強度參數；岩盤則根據該區右山脊歷年調查試驗資料，以統計機率方法求取之平均值。本研究之崩塌地類型屬於岩石坡，因此採用 FLAC^{2D} 進行模擬，該軟體採剪力強度折減方法，逐步的折減剪力強度參數 (c, ϕ) 值，直至邊坡破壞發生 (即產生大變形) 為止，因此可輸出剪應變等值區與位移向量場，明顯看出破壞區域與趨勢。

在上述假設條件下，分別針對常時、暴雨 (抬高地下水水位面) 及地震 (採用 102 年，經濟部水利署水利規劃試驗所，「土水水庫可行性規劃 - 強地動儀維

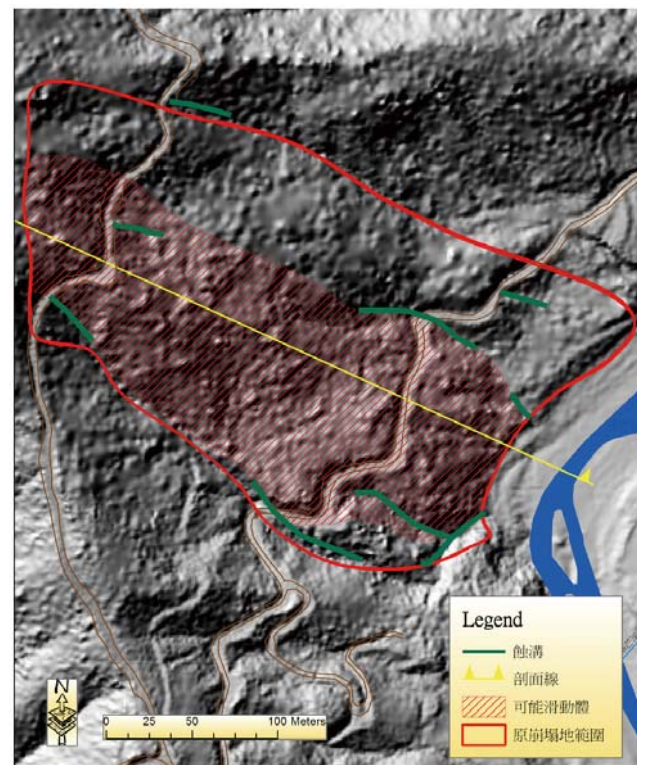


圖 9 可能滑動體位置圈繪示意圖 (陰影底圖摘自 100 年度，經濟部水利署水利規劃試驗所，水庫蓄水區邊坡深層滑動潛勢評估分析)

表 2 分層材料一般物理性質及強度參數表

分層	岩性	含水量 (%)	單位重 $\gamma_t(t/m^3)$	凝聚力 (kpa)	摩擦角 (degree)	備註
崩積土	粉土質或黏土質砂土夾變質砂岩塊	9.5	2.02	0	39.0	摘自「士文水庫上游右山脊邊坡調查」, 102 年
岩盤	硬頁岩	0.97	2.69	10200	39.5	摘自「士文水庫可行性規劃—地質(五)專題右山脊地質補充調查」, 96 年

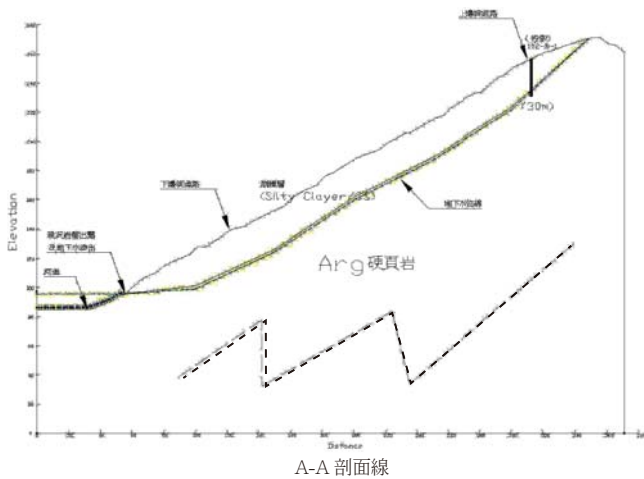


圖 10 A-A 剖面線建模示意圖

護及觀測及地震危害度分析檢討」回歸計算建議值， $K_h = 0.16$ ， $K_v = 0.11$) 情境下進行模擬，同時並針對水庫蓄水後(滿水位標高 170 公尺)進行模擬分析，分析成果之安全係數值整理如表 3，坡面破壞之形狀如圖 11 及圖 12。

綜合模擬成果發現，一般情境下(常時、暴雨及地震)主要由接近上邊坡產業道路開始向下滑動產生破壞，但整體而言，都僅是小規模局部淺層滑動，無大規模深層滑動之情形；而蓄水後則以接近臨水面位置為較脆弱之滑動區。安全係數雖一般情況之地震及蓄水後皆小於 1.0，但其影響範圍仍有限。

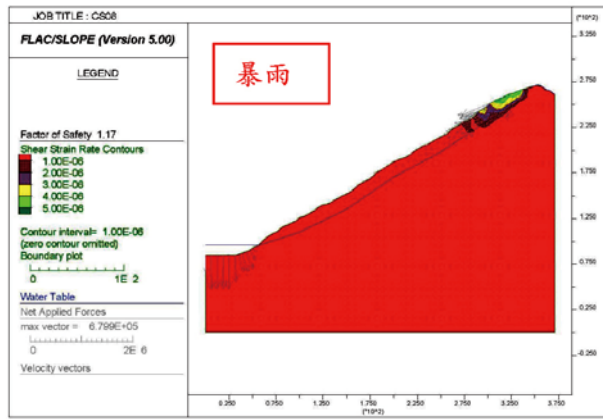
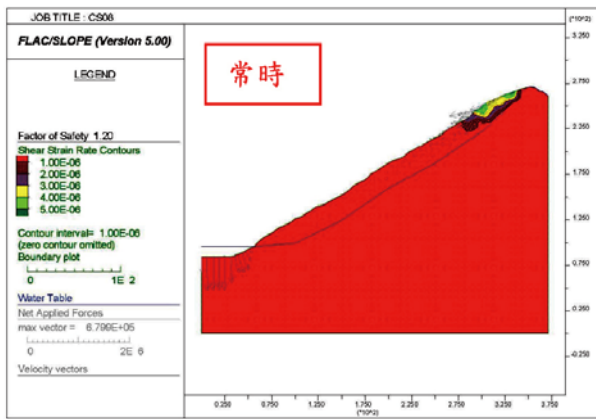


圖 11 常時及暴雨情境下穩定分析模擬成果圖

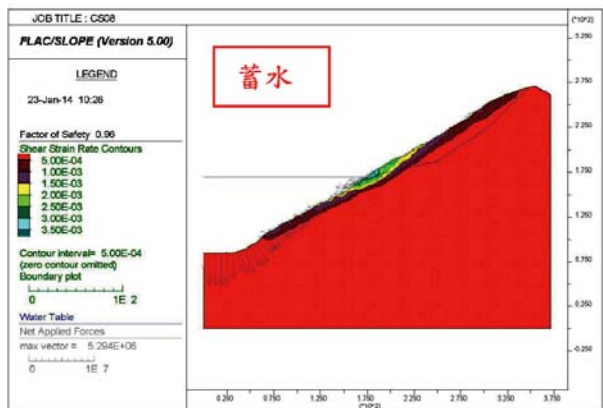
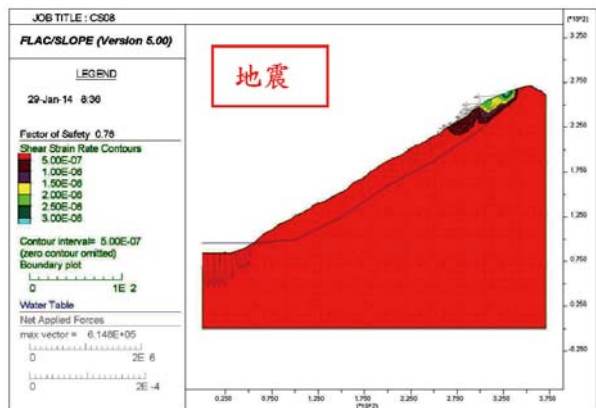


圖 12 地震及水庫蓄水情境下穩定分析模擬成果圖

表 3 不同情境下各安全係數表

不同情境	常時	暴雨	地震	水庫蓄水
安全係數值	1.20	1.17	0.76	0.96

結論

- (1) 由地地地質調查及鑽探結果，調查區域崩積層的組成為變質砂岩塊與粉土質及黏土質砂互層，多屬較破碎之岩塊，豪雨後地面滲流入滲，引起地下水位上升，易使剪力強度降低；地質層面變化情形大，顯示地質構造複雜，較無一致性；傾角約 40 ~ 50 度，高角度岩塊易產生翻倒墜落情形。
- (2) 由地電阻剖面判釋，大致以 50 ohm-m 作為沿盤與崩積層分界，電阻率值在 50 ohm-m 以上屬於風化崩積層，50 ohm-m 以下為硬頁岩所組成的岩盤為主。
- (3) 推估 CS03 崩塌地之崩積層厚度，由上邊坡厚度約為 26 公尺 ~ 45 公尺不等，往下邊坡逐漸縮減為 10 公尺 ~ 25 公尺不等，崩積層厚度漸薄，岩盤面並延伸至河谷。

- (4) 數值穩定分析結果，可能的破壞面至多位於表層的崩積層及風化破碎的岩層為主，尚不至於發生大規模深層滑動，初步建議坡頂及坡面可採取表面剝除、整坡，坡趾採培厚邊坡處理並配合適當的截水與土工方式加固，現階段建議可考慮埋設傾斜管加以定時監測。
- (5) 本次數值穩定分析為二維分析結果，分析範圍有限且受邊界效應影響較大，未來建議進一步可採用三維分析模式進行模擬分析。

參考文獻

1. 經濟部水利署水利規劃所，「土石水庫可行性規劃 — 三、地質專題（五）右山脊地質補充調查專題報告書」，2007。
2. 經濟部水利署水利規劃所，「水庫蓄水區邊坡深層滑動潛勢評估分析」，2011。
3. 經濟部水利署水利規劃所，「土石水庫可行性規劃 — 強地動儀維護及觀測及地震危害度分析檢討」，2013。
4. 經濟部水利署水利規劃所，「土石水庫上游右山脊邊坡調查」，2014。



土木水利 雙月刊

向您約稿

本刊出版有關土木水利工程之報導及論文，以知識性、報導性、及聯誼性為主要取向，為一綜合性刊物，內容分工程論著、技術報導、工程講座、特介、工程新知報導及其他各類報導性文章及專欄，歡迎賜稿，來稿請 email: service@ciche.org.tw 或寄 10055 台北市中正區仁愛路二段 1 號 4 樓，中國土木水利工程學會編輯出版委員會刊編輯小組收，刊登後將贈送每位作者一本雜誌，不再另致稿酬；歡迎以英文撰寫之國內外工程報導之文章，相關注意事項如後：

- 工程新知及技術報導，行文宜簡潔。
- 技術研究為工程實務之研究心得，工程講座為對某一問題廣泛而深入之論述與探討。工程報導為新知介紹及國內外工程之報導。
- 本刊並歡迎對已刊登文章之討論及來函。
- 工程論著及技術研究類文章，由本刊委請專家 1 ~ 2 人審查，來文請寄電子檔案，照片解析度需 300dpi 以上。
- 文章應力求精簡，並附圖表照片，所有圖表及照片務求清晰，且應附簡短說明，並均請註明製圖者及攝影者，請勿任意由網站下載圖片，以釐清版權問題。