

# 山區地下水資源開發對提升 坡地防災研究

羅鴻傑\* 許世孟\*\* 徐森彥\*\*\*

## 摘 要

一般在探討坡地防災多以降雨入滲導致邊坡失穩為出發點，鮮少考量坡地因降水而提升其穩定性之效益，有鑒於近年臺灣水資源匱乏及坡地災害頻傳，本研究提出了坡地防災效益及地下水資源有效開發之雙贏策略想法，以高士崩場地為例，整合場址探勘、地質鑽探、一系列的水文地質調查及監測成果來建立崩場地之水文地質概念模型，透過地下水滲流及邊坡穩定的數值分析來探討崩場地抽水量、抽水延時與滑動面安全係數之關聯性，藉以評估山區在不同地下水開發規模下所對應之坡地穩定性提升比例，作為當地地下水開發策略之參考依據。此外，考量崩場地水文地質環境之複雜度，含水層系統易受鑽探影響而與現況悖離，本研究認為如以監測水位來劃定模式的地下水位線，有可能造成模式僅反應混同含水層之結果，故應加入地下水分層的概念進行模擬，方可更全面的評估地下水資源開發的潛能與效益，進而使山區民眾享受到資源永續且安全無虞的家園環境。

關鍵字：山區水資源開發、坡地防災、水文地質概念模式、水文地質調查

## 一、前 言

雖然臺灣年平均雨量豐沛，然因地狹人稠，河川坡陡流急，水源涵養不易、且蓄水設施不足，加上水庫淤積問題使蓄水容量逐年減少，水資源經營困難，以致每人每年所分配降雨量僅為世界平均值之五分之一。而臺灣山區占全島面積的三分之二，遠大於平原區之面積，其亦屬臺灣地區地下水資源的重要補注來源區域，近年在政府提倡多水源多系統聯合經營區域性水資源策略下，山區地下水資源不失為一重要之水資源調配

來源，加上人為活動及土地開發範圍已漸趨擴大，並往山區延伸，更彰顯出對山區地下水資源開發之重要性（中興工程顧問社，2014）。

此外，臺灣本島係由板塊擠壓形成，造就出陡峭的地形及脆弱多變的地質環境，近年來在全球氣候變遷與溫室效應加劇的情況下，更衍生出兩種嚴重之衝擊：（1）頻繁的颱風事件伴隨著極端雨量使山區發生大規模的山崩與土石流，除造成道路中斷與房舍掩埋等災害之外，亦使集水區下游易淹水地區產生水患問題；（2）溫度上升及降雨型態改變了河川流量與地下水的補注

\* 中興工程顧問社大地工程研究中心正研究員

\*\* 中興工程顧問社大地工程研究中心水文地質調查組組長

\*\*\* 聯合大學土木與防災工程系助理教授

量，導致豐枯水期的水量差異明顯增加，最終影響到水資源供應的穩定性。一般而言，降雨入滲會使坡地層間地下水位抬升，造成岩體剪力強度降低，加劇邊坡的滑動趨勢，因此在山坡地的整治工程中，除採護坡、擋土或錨定等手段外，排水工則為消弭地滑誘因之常見工法，包括地表排水溝、橫向排水管、集水井及排水廊道等，主要係藉以減少降雨入滲、加速雨水排除而降低邊坡內之地下水，進而減少豪大雨導致坡地崩滑之風險。然就保育的觀點而言，這些排除的水亦為山區水資源之重要來源，如不善加利用任其流失，殊為可惜，以梨山地區的地下排水廊道為例，其一年可達到一百萬立方公尺的排水量（行政院水保局，2011），此水量相當可提供 10,537 人/日使用（以每人 260 L/day 之用水量計算），而筆者至現地探勘則發現到早已有果農引用排水廊道之地下水作為植栽灌溉之用（如圖 1），可見果農善用資源的智慧。



圖 1 梨山地區引用排水廊道地下水情形

鑒於臺灣近年水資源不平衡及坡地災害頻傳等問題，如能透過數值模擬的手段，探討山區地下水資源開發潛能的同時又能兼顧坡地穩定性提升之效應，不失為今日防災工作之一大關鍵課題。自 1990 年代起，隨著電腦數據處理能力的提升，諸多學者開始透過數值計算來界定促使邊坡滑動的雨量警戒值（Fredlund and Rahardjo, 1994；Alonso *et al.*, 1995；Sugiyama *et al.*, 1995；Gasmó *et al.*, 2000；Rahardjo *et al.*, 2001），或是

探討不同降雨型態與邊坡穩定性之關聯性（Cascini *et al.*, 2006；Tsai, 2008；Lo *et al.*, 2010），然此類研究均係以降雨入滲導致邊坡失穩為出發點，鮮少考量坡地因降水而提升穩定性之效益。因此，本研究選定位在屏東縣之高士崩塌地，整合現場探勘、鑽探調查、一系列的水文地質試驗及監測成果來建立崩塌地之水文地質概念模型，嘗試透過數值分析來探討崩塌地抽水量、抽水延時及穩定性之關聯性，作為評估聚落地下水資源開發利用之依據，同時瞭解在不同規模地下水資源開發下對坡地穩定性提升之效益，冀能同步解決山區坡地安全與水資源匱乏等問題，進而促進山區部落及觀光地區之永續發展。

## 二、研究區域概述與水文地質特性調查

### （一）區域現況概述

本文研究區域為隸屬屏東縣牡丹鄉，位於高士山與中港溪間之高士崩塌地，其在多年前已出現地層滑動現象，於民國 84 年開始提出遷村建議，但是一直都未獲相關單位重視。民國 94 年的海棠颱風，造成上部落發生山崩與土石流，致使產業道路一度中斷。八八風災後，位處邊坡的六、七鄰，再度因降雨入滲引致邊坡滑動與陷落，出現住宅基礎淘空、基地流失，房屋、擋土牆龜裂等災情。中興工程顧問社（2013）亦指出地表破壞最嚴重區域位置在第六鄰、七鄰，道路路面與擋土牆均已嚴重的開裂變形，而受地表破壞影響，也使得電線桿傾倒，住宅內部地面亦出現裂縫並持續擴大延伸。位於調查範圍北側的高士國小，其建物朝向下邊坡方向的牆腳亦有開裂的情形，張裂方向朝向東側下邊坡，種種跡象均顯示高士崩塌地具相當的滑動潛勢（圖 2）。

而在水資源利用方面，現調結果顯示高士崩塌地溪溝規模不算大，但在平日均有常流水，筆者至現場探勘則發現到民井抽取地下水的情形，

其井係以人工挖掘一 3.4m 深、1.6m 寬之水井作為 8 戶人家日常用水使用（如圖 3），由於該民井水位高程與地表同高，且未貫穿下方阻水層，因此研判該區域表土層具較豐富之水資源潛能。



（中興工程顧問社，2013）

圖 2 高士崩場地之破壞情形



圖 3 高士崩場地民井使用情形

## （二）孔內水文地質調查

根據中興工程顧問社（2013）現勘結果顯示，高士崩場地露頭岩性以頁岩為主，地層則屬牡丹層。本研究於崩場地共施作 7 孔地質鑽探調查（表 1），其鑽孔布置如圖 4 所示，結果顯示岩盤以砂質頁岩或砂質泥岩為主，地層傾向與地表地形坡面介於斜交坡與順向坡之間，弱面與破裂面皆十分發達。而為瞭解區域的水文地質特性，本研究另於場址規劃 3 孔孔內水文地質調查，包括孔內攝影、電測、井徑、波速井測、流速量測及封塞水力試驗，並在 B103-W07 鑽孔旁打設一孔抽水井進行抽水試驗。

表 1 高士崩場地地質鑽探資訊彙整

鑽孔編號	高程	鑽孔深度	鑽孔方向	取樣方式
QH-21*	154	70	垂直	連續取樣
QH-22*	140	70	垂直	連續取樣
QH-23	128	60	垂直	連續取樣
QH-25	110	50	垂直	連續取樣
QH-27	129	60	垂直	連續取樣
QH-29	148	60	垂直	連續取樣
B103-W07*	147	100	垂直	連續取樣

（註 \*：施作孔內水文地質調查）



圖 4 高士崩場地鑽孔布置及分析剖面

由於場址地層屬顆粒細緻且質地軟弱的頁岩或砂質頁岩，且剪裂泥充斥，導致呈現低電阻、低波速及伽瑪射線偏高的訊號反應，配合鑽探岩心判釋可將地層劃分為表土及風化岩層、剪裂泥、破碎岩層與基盤岩層等四個地質單元。而由孔內攝影及井徑結果可知在破碎岩層岩體破裂指數非常高，且岩盤受剪動的痕跡明顯。此外，流速調查結果顯示在深層岩盤有地下水補注之情形，屬於受壓含水層型態，另在破碎岩層與剪裂帶介面則有地下水流動的跡象。由於頁岩因本身異向性高，在剪裂泥充斥的條件下，導致地下水系統非常複雜，以致水力試驗在岩盤所求得之透水係數高達 4 個數量級之差異，其中破碎岩層的透水係數介於  $5.4 \times 10^{-6} \sim 1.3 \times 10^{-8}$  m/sec，剪裂泥的透水係數介於  $2.60 \times 10^{-8} \sim 1.26 \times 10^{-9}$  m/sec，基岩的透水係數最低可達  $6.7 \times 10^{-10}$  m/sec，而在上部表土層及風化岩層的透水係數較高，其透水係數介於  $2.7 \times 10^{-5} \sim 8.5 \times 10^{-6}$  m/sec。最後由抽水試驗結果



可知破碎岩層的抽水量為 1.8L/min，導水係數為  $2.87 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{min}$ ，單位洩降抽水量則為  $0.019 \text{ m}^3/\text{h}$ ，整體的供水潛能較低，本場址的水文地質特性調查成果彙整如表 2 所示。

此外，根據本場址裂隙位態投影分析可知其極點分布散亂，且地層與地形坡面傾向介於斜交坡與順向坡之間，因此研判最有可能之破壞模式為圓弧型滑動破壞 (Hoek and Bray, 1981)，尤以表土風化岩層及破碎岩層界面，及破碎岩層及基盤界面的滑動潛勢最高。

表 2 高士崩場地孔內水文地質調查結果

調查項目	水文地質特性
孔內攝影及井徑	岩體破裂指數高，井徑變動頻繁，多處夾厚度不一的剪裂泥，岩盤剪動痕跡明顯。
電測	自然伽瑪射線介於 120-160cps，整體訊號偏高且變化不大，地層以泥含量較高之砂質頁岩或剪裂泥為主。電阻率介於 15-40 OHM-M 間，整體訊號偏低，說明砂質頁岩及剪裂泥的顆粒非常細緻。
波速	介於 2500-3333 m/sec，其差異係受到層間剪裂泥含量所導致，惟整體訊號偏低，反應區域岩層膠結不佳且質地軟弱的特性。
流速	深層因含水層受壓導致地下水湧入，破碎岩層與剪裂帶介面則有流速交換情形，其他區段則因破碎帶與裂隙具剪裂泥充填，導致地下流動潛勢較低。
水力試驗	20m 以上表土層及風化岩層的透水係數較高，約在 $10^{-5}$ - $10^{-6} \text{ m/sec}$ 數量級，岩盤的透水係數則因剪裂帶之故，導致透水係數有非常大的差異，其中破碎岩層介於 $10^{-6}$ - $10^{-8} \text{ m/sec}$ 數量級；剪裂泥及基岩則介於 $10^{-8}$ - $10^{-10} \text{ m/sec}$ 數量級。
抽水試驗	破碎岩層的抽水量為 1.8L/min，導水係數為 $2.87 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{min}$ ，單位洩降抽水量則為 $0.019 \text{ m}^3/\text{h}$ ，整體的供水潛能較低。

### 三、水文地質概念模式建立與分析

本研究採用加拿大 Calgary 大學發展之 Geostudio 程式，該程式中之 SEEP/W 及 SLOPE/W 模組可整合降雨入滲-滲流-邊坡穩定性進行耦合分析 (Infiltration-Seepage-Stability)，其模式建立、參數率定與分析流程說明如后。

#### (一) 水文地質概念模式建立

高士崩場地二維剖面如圖 4 所示，其自上方稜線經 QH-21、B103-W07、QH-23、QH-25 等鑽孔至中港溪支流具常流水之溪溝為止，透過 Surfer 及 ArcGIS 程式可建立分析剖面高程，再依照鑽孔岩心及現地調查成果決定各水文地質單元及地下水位深度，由淺至深劃分為：(a) 表土及風化岩層、(b) 剪裂帶、(c) 破碎岩層、(d) 基盤岩層等，在邊界條件設定時，本研究將模型底部設定為無流量邊界 (No-Flux Boundary)；左側及右側邊界設定為定水頭邊界 (Constant Head Boundary)；坡面則設定為降雨入滲邊界 (Rainfall-Infiltration Boundary)；另於模擬降水時，則是在抽水處將定流量邊界 (Constant Flux) 設定為負值，高士崩場地的水文地質概念模型如圖 5 所示。

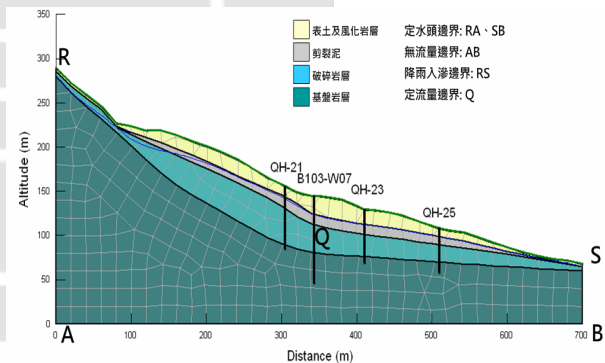


圖 5 高士崩場地水文地質概念模型

#### (二) 滲流分析及模式率定與驗證

由於模式是將現地複雜多變的水文地質條件簡化成一單純之概念模型，為使其具代表性，模式的參數率定及驗證係為不可獲缺之工作。本研究各水文地質單元的水力參數係透過現地封塞水力試驗及室內透水試驗求得，並以監測之日雨量及動態水位變化 (監測期程：2013/6/5 至 2013/10/31) 代入模式進行暫態滲流分析，同時將模擬之水位結果與鑽孔之水位監測資料進行比對，藉由反覆計算來率定模式的水力參數及邊界

條件，以減少模擬與監測水位間之誤差，其結果如圖 6 所示。

由圖 6 可知模式模擬水位與監測水位變化的趨勢相當，經計算可知兩者間之標準偏差介於 0.55~0.86% 間，顯示模式匹配成果良好。此外，由於本研究在 B103-W07 鑽孔旁建置一 15cm (6 inch) 寬、46m 深的抽水井進行抽水試驗，係將幫浦放置破碎岩層定量 (1.8 L/min) 抽水 12 小時來獲取不同的水力參數，因此可藉其結果來驗證模式的合理性，模式中同樣在 B103-W07 鑽孔旁之破碎岩層定量 (2L/min) 抽水 12 小時，計算其單位洩降出水量 (Specific Capacity)，同時比對與現場抽水試驗之差異，結果顯示模擬之單位洩降出水量為 0.010 m<sup>3</sup>/h，與實際試驗 0.019 m<sup>3</sup>/h 屬同一數量級，此亦說明了模式符合現場條件，茲將模式各地層之水文地質參數率定成果彙整如表 3 所示。

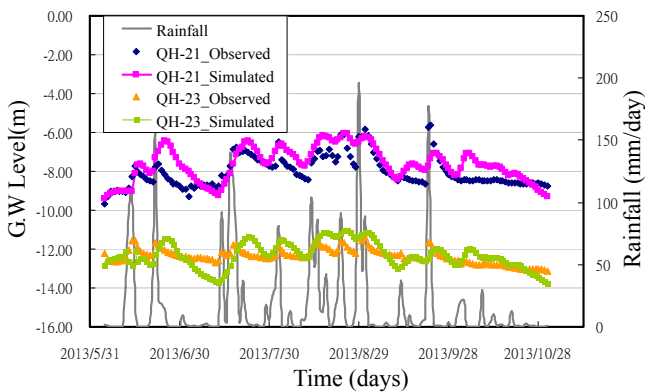


圖 6 模式參數率定後常時模擬水位與監測水位比對結果

岩層界面雖在地下水水位面之上，然在豪雨期間水位全面抬升之情況下其滑動潛勢亦不容忽視。深層滑動面安全係數模擬結果如圖 7 所示，可知其在常時約介於 1.38~1.42 間，已低於常時安全係數要求高於 1.5 之規定，說明崩場地於常時情況下即處於較不穩定的狀態。

表 3 模式水文地質參數率定結果

地層 參數	表土及 風化層	剪裂帶	破碎 岩層	新鮮 岩盤
水力傳導 係數, $K$ (m/sec)	$2.80 \times 10^{-5}$	$5.79 \times 10^{-8}$	$6.37 \times 10^{-6}$	$1.01 \times 10^{-7}$
飽和體積 含水量, $\omega$ (%)	27	10	10	2
單位重, $\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	21.3	24.5	26.2	26.2
凝聚力, $C$ (kPa)	10	50	207	703
摩擦角, $\phi$ (deg)	16	22	19.2	27.7

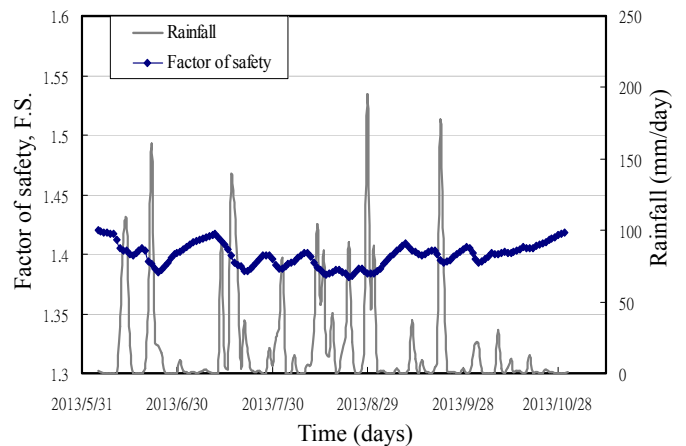


圖 7 滑動面安全係數常時模擬結果

### (三) 邊坡穩定分析

邊坡穩定分析係依鑽探及試驗調查成果確立可能滑動面位置，並將其指定於模式的剖面中，而力學參數則採室內一般物理性試驗、三軸壓縮試驗及弱面直剪試驗結果 (表 3)。綜觀調查結果研判高土崩場地滑動面較有可能沿深層破碎岩層及基盤界面滑動，另淺層表土風化岩層及破碎

## 四、抽水量與安全係數之關聯性探討

為瞭解崩場地抽水與坡地穩定性關係，本研究分別模擬崩場地在不同抽水量下所造成之水位洩降及其安全係數、以及在不同抽水量下所需之抽水延時及其安全係數，並嘗試建立相互間之關聯性以作為當地水資源開發及坡地防災之參考。

(一) 既有抽水井之現況模擬

由於本研究已在崩場地進行定量抽水試驗，因此在完成模式的率定及驗證後，以試驗之抽水量及洩降規模為基準，並於模式中逐步提升抽水量來進行滲流-邊坡穩定耦合分析，其關聯性分析結果說明如后。

1. 抽水量與水位洩降及安全係數之關連性

模擬條件係假定在常時水位於 B103-W07 鑽孔之破碎岩層抽水，計算在不同抽水量下抽水 24 小時後之水位洩降及深層滑動面安全係數，模擬之最大水位洩降則設為破碎岩層之厚度。此現況係模擬坡地在短期使水位急洩降之成效，並探討在該抽水量下之洩降規模及安全係數提升比例，其分析結果如圖 8 所示，可知抽水量與水位洩降及安全係數都呈現良好的正相關，亦即抽水量越大、水位洩降越大、安全係數提升的比例也越高。在抽水量 5L/min、抽水 24 小時的情況下，水位洩降為 43.8m，已達到最大水位洩降規模（水位已近乎破碎岩層底端），所對應之坡地穩定性最大可提升至 23.7%；而相較於當地民井地下水之使用量 4.33L/min（供 8 戶人家使用，以每戶 3 人，每人需 260 L/day 計算），模擬之抽水量已符合民井之所需，茲將關聯性分析結果彙整如表 4 所示。

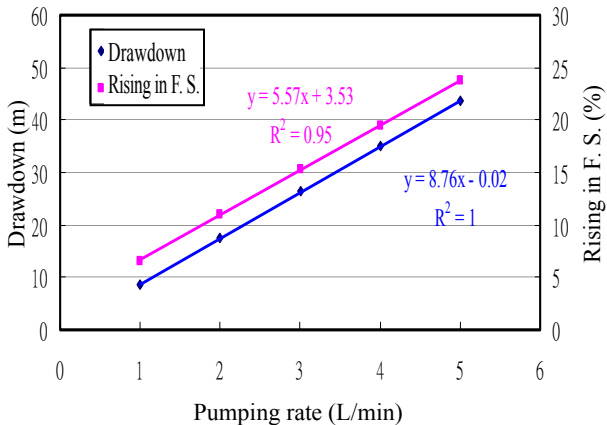


圖 8 抽水量與水位洩降及安全係數提升之關聯性

表 4 現況模擬之關聯性分析結果

抽水量 V.S. 水位洩降及安全係數			抽水量 V.S. 抽水延時及安全係數		
抽水量 (L/min)	水位洩降 (m)	安全係數提升 (%)	抽水量 (L/min)	抽水延時 (day)	安全係數提升 (%)
1	8.7	6.5	1	--	--
2	17.5	11.0	2	7.9	29.1
3	26.3	15.3	3	2.8	27.2
4	35.0	19.5	4	1.8	25.2
5	43.8	23.8	5	1.0	23.0
控制條件： 24 小時抽水 最佳迴歸式： $y=8.76x-0.02$ (x: 抽水量； y=水位洩降) $y=5.57x+3.53$ (x: 抽水量； y=安全係數提升)			控制條件： 最大洩降量 43.8m (破碎岩層底端) 最佳迴歸式： $y=25.44e^{-0.66x}$ (x: 抽水量； y=抽水延時) $y=42.25e^{-0.08x}$ (x: 抽水量； y=安全係數提升) 註：抽水量為 1L/min 時無法洩降至最大水位		

2. 抽水量與抽水延時及安全係數之關聯性

此模擬條件係假定在常時水位於 B103-W07 鑽孔之破碎岩層抽水，計算在不同抽水量下，達到最大洩降量所需之時間及深層滑動面安全係數，模擬之最大水位洩降設為破碎岩層之厚度，此現況係模擬坡地在長時穩定抽水之成效，並探討該抽水量所需之延時及安全係數提升比例，其模擬成果如圖 9 所示，可知抽水量與抽水延時呈現良好的指數負相關，當抽水量為 2L/min 時，需連續抽水 7.9 天才會達到最大洩降量，反觀當抽水量提升至 5L/min 時，僅需 1 天即可達到最大洩降量。此外，模擬結果亦顯示，雖然最終水位都達到最大洩降量，然其安全係數提升比例確與抽水量呈現負相關之趨勢，研判此係受到抽水延時之差異，導致水位洩降線之影響範圍 (Radius of Influence) 亦有所不同，亦即抽水延時越大，水位洩降的影響範圍越遠，所對應之安全係數提升率亦越高，最大安全係數可提升 29.1%，關聯性分析結果如表 4 所示。

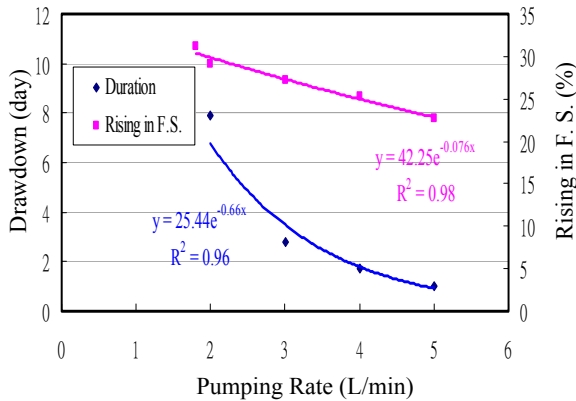
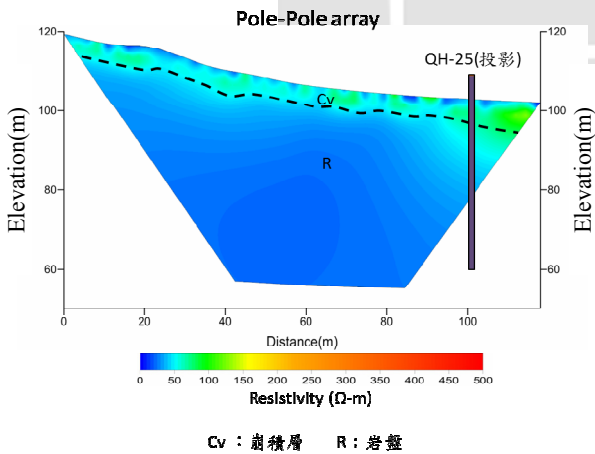


圖 9 抽水量與抽水延時及安全係數提升之關聯性

### (二) 情境模擬

由於孔內水文地質調查結果顯示本崩塌地的含水層系統甚為複雜，且根據當地民井使用現況可知當井深未貫穿阻水層時其水位面與地表同高；另透過地電阻剖面探測結果可知在表土層呈現明顯低電阻反應，研判表土層甚為濕潤（或有較高的含水量）（圖 10），故不排除場址地下水水位近乎地表的可能性。在此前提下，淺層的地下水有可能受鑽探影響與下方岩層水頭達到平衡而迫使水位降低，如模式單就監測水位來劃定地下水水位線，將反應混同含水層狀況。因此，本研究另設計了兩種情境，模擬崩塌地在含水層未貫穿條件下於表土層及破碎岩層抽水，分別探討不同地層之供水潛能、滑動潛勢及其相互之關聯性，以作為當地水資源開發及坡地防災更全面之參考。



（中興工程顧問社，2013）

圖 10 高士崩塌地之地電阻探測剖面

### 1. 淺層抽水對淺層滑動之關聯性

此情況係假設表土及風化層在未被貫穿的情況下自成一獨立含水層，並於層間抽水，而為確保抽取之水源完全來自表土層，模式中將表土層以外之地層均視為低透水層 ( $K=1.16 \times 10^{-9}$  m/sec)，其他參數則如前述之率定成果。淺層滑動面係以參照現地鑽探及試驗成果，將其指定在模式中之表土風化層及剪裂泥界面，設定完成後即進行暫態滲流-邊坡穩定的耦合分析，嘗試建立淺層抽水對淺層崩塌之關聯性，說明如后。

#### (1) 抽水量與水位洩降及安全係數之關連性

模擬條件係假定於 B103-W07 鑽孔之表土風化層抽水，計算在不同抽水量下抽水 24 小時後之水位洩降及淺層滑動面安全係數，其分析成果如圖 11 所示，可知抽水量與水位洩降及安全係數都呈現良好的正相關，說明抽水量越大、水位洩降越大、安全係數提升的比例也越高；此外，由於表土風化層的透水係數較高 ( $K=2.80 \times 10^{-5}$  m/sec)，在水位近乎地表的情況下，最大抽水量可達 14L/min，所對應之洩降量為 16m，坡地穩定性最大則可提升至 23.9%，最大抽水量已超過民井之所需，茲將關聯性分析結果彙整如表 5 所示。

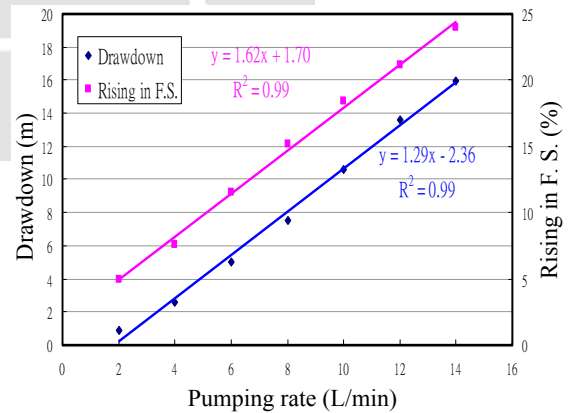


圖 11 抽水量與水位洩降及安全係數提升之關聯性－淺層抽水模擬



表 5 情境模擬之關聯性分析結果－淺層抽水

抽水量 V.S. 水位洩降及安全係數			抽水量 V.S. 抽水延時及安全係數		
抽水量 (L/min)	水位洩降 (m)	安全係數提升 (%)	抽水量 (L/min)	抽水延時 (day)	安全係數提升 (%)
2	0.9	4.9	2.2	9.0	38.9
4	2.6	7.6	4	6.5	37.5
6	5.0	11.6	6	4.5	35.3
8	7.6	15.2	8	2.6	33.1
10	10.6	18.4	10	1.8	30.7
12	13.6	21.1	12	1.3	29.2
14	15.9	23.9	14	1.0	25.3

控制條件： 24 小時抽水 最佳迴歸式： $y=1.29x-2.36$ (x：抽水量； y=水位洩降) $y=1.62x+2.70$ (x：抽水 量；y=安全係數提升)	控制條件： 最大洩降量 16m (表土風化 層底端) 最佳迴歸式： $y=13.31e^{-0.38x}$ (x：抽水量； y=抽水延時) $y=-1.12x+41.87$ (x：抽水 量；y=安全係數提升)
--	---

(2) 抽水量與抽水延時及安全係數之關連性

模擬條件係假定在 B103-W07 鑽孔之表土層抽水，計算在不同抽水量下，達到最大洩降量（約 16m，水位已近乎表土風化層底端）所需之時間及深層滑動面安全係數。其分析成果如圖 12 所示，可知抽水量與抽水延時呈現良好的指數負相關，當抽水量為 2.2L/min 時，需費時 9 天才可達到

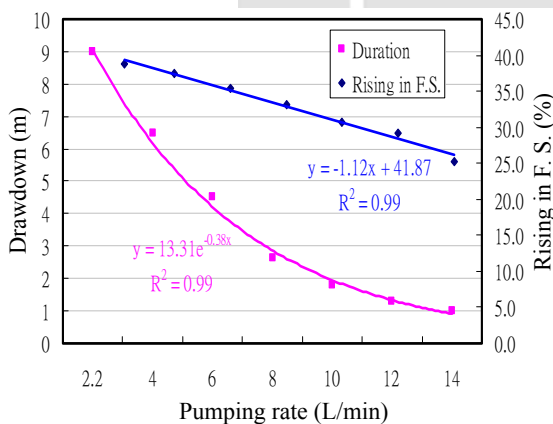


圖 12 抽水量與抽水延時及安全係數提升之關聯性－淺層抽水模擬

最大洩降量，而當抽水量提升至 14L/min 時，僅需 1 天即可達到最大洩降量。此外，模擬結果亦顯示，安全係數提升比例與抽水量呈現負相關之趨勢，研判此係因抽水延時不同，導致水位洩降的影響範圍亦有所差異，亦即在低抽水量的情況下延時越長，水位洩降的影響範圍越遠，所對應之安全係數提升率亦越高，最大安全係數可提升 38.9%，關聯性分析結果如表 5 所示。

2. 深層抽水對深層滑動之關聯性

此情況係假設抽取之水源完全來自阻水層下方之破碎岩層，因此將模式中破碎岩層以外之地層均視之為低透水層 ( $K=1.16 \times 10^{-9}$  m/sec)，其他參數及深層滑動面則如前述之率定成果，設定完成後即進行暫態滲流-邊坡穩定的耦合分析，嘗試建立淺層抽水對淺崩之關聯性，說明如后。

(1) 抽水量與水位洩降及安全係數之關連性

模擬條件係假定於 B103-W07 鑽孔之破碎岩層抽水，計算在不同抽水量下抽水 24 小時後之水位洩降及深層滑動面安全係數，其分析成果如圖 13 所示，可知抽水量與水位洩降及安全係數都呈現良好的正相關，亦即抽水量越大、水位洩降越大、安全係

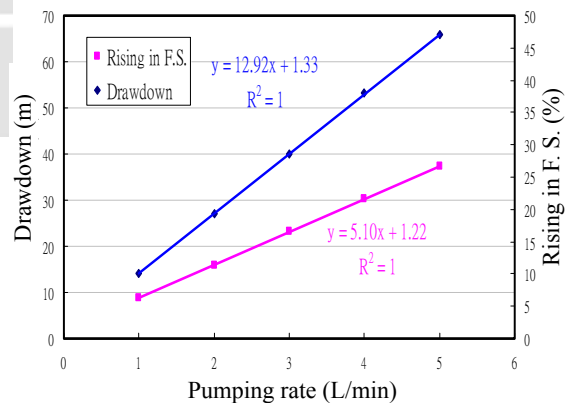


圖 13 抽水量與水位洩降及安全係數提升之關聯性－深層抽水模擬



數提升的比例也越高，此外，分析結果亦指出在抽水量 5L/min、抽水 24 小時的條件下，水位洩降為 65.8m，此洩降規模已達到最大水位洩降（水位已近乎破碎岩層底端），故所對應之坡地穩定性最大可提升至 26.7%。此抽水量及安全係數提升規模與現況相當，故可滿足當地民井地下水之需求，茲將關聯性分析結果彙整如表 6 所示。

表 6 情境模擬之關聯性分析結果－深層抽水

抽水量 V.S.水位洩降及安全係數			抽水量 V.S.抽水延時及安全係數		
抽水量 (L/min)	水位洩降 (m)	安全係數提升 (%)	抽水量 (L/min)	抽水延時 (day)	安全係數提升 (%)
1	14.2	6.3	1.5	10	42.2
2	27.2	11.4	2	5.3	38.1
3	40.1	16.5	3	2.4	34.2
4	53.1	21.6	4	1.5	29.8
5	65.8	26.7	5	1.0	25.9
控制條件： 24 小時抽水 最佳迴歸式： $y=12.92x+1.33$ (x：抽水量；y=水位洩降) $y=5.10x+1.22$ (x：抽水量；y=安全係數提升)			控制條件： 最大洩降量 65.8m (破碎岩層底端) 最佳迴歸式： $y=20.67e^{-0.64x}$ (x：抽水量；y=抽水延時) $y=-4.10x+46.34$ (x：抽水量；y=安全係數提升)		

(2) 抽水量與抽水延時及安全係數之關連性

模擬條件係假定在 B103-W07 鑽孔之破碎岩層抽水，計算在不同抽水量下，達到最大洩降量（約 65.8m，水位已近乎表土風化層底端）所需之時間及深層滑動面安全係數。其模擬成果如圖 14 所示，可知抽水量與抽水延時呈現良好的指數負相關，當抽水量為 1.5L/min 時，需費時 10 天才可達到最大洩降量，而當抽水量提升至 5L/min 時，僅需 1 天即可達到最大洩降量。此外，受到抽水延時之差異，導致水位洩降

的影響範圍有所不同，因此模擬結果顯示安全係數提升比例與抽水量呈現負相關之趨勢，亦即抽水延時越長，水位洩降的影響範圍越遠，所對應之安全係數提升率亦越高，最大安全係數可提升 42.2%，關聯性分析結果如表 6 所示。

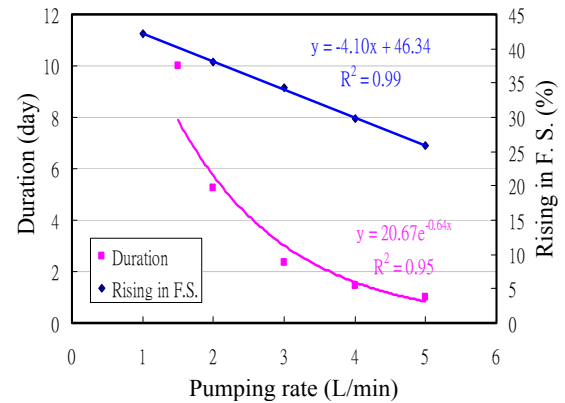


圖 14 抽水量與抽水延時及安全係數提升之關聯性－深層抽水模擬

五、結 論

有鑒於臺灣近年面臨水資源匱乏及坡地災害等問題，本研究提出了坡地防災效益提升及地下水資源有效開發之雙贏策略想法，選定高士崩場地為研究對象，透過現地水文地質調查及後續滲流與邊坡穩定數值分析來探討崩場地抽水量、抽水延時及滑動面安全係數之關聯性，藉以評估在不同地下水開發規模下對坡地穩定性提升之效益，其主要成果分述如下：

1. 本研究透過現地孔內調查結果可知，崩場地之水文地質環境具高度異向性，且含水層系統甚為複雜，有可能因鑽探將地層貫穿而與現況悖離，如以監測水位來劃定模式的地下水位線，將造成模式反應混同含水層之結果，若要有效評估出地下水資源可開發的潛能與效益，應於概念模型中加入地下水分層的概念，方可全面考量作為開發策略之依據。

## 謝 誌

本文承蒙中興社地工中心水文地質模擬組同仁協助提供高士崩場地之水文地質概念模型、鑽探及監測資料，與中央地質調查所在「臺灣南段山區地下水位觀測與水力特性調查」計畫中之經費支持，特此誌謝。

## 參考文獻

2. 為瞭解崩場地抽水與坡地穩定性關係，既有抽水井之現況模擬顯示，抽水量與水位洩降呈現良好的正相關，在抽水 24 小時的條件下，最大抽水量可達 5L/min，所對應之坡地穩定性可提升至 23.7%，而相較於當地民井地下水之使用量 4.33L/min（供 8 戶人家使用，以每戶 3 人，每人需 260 L/day 計算），模擬之抽水量已符合民井之所需；抽水量與抽水延時為負相關，且在達到相同水位洩降量時，抽水延時越長，水位洩降的影響範圍越遠，所對應之安全係數提升率亦越高，在抽水量 2L/min 時，崩場地可連續供水 7.9 天，安全係數最高可提升 29.1%。
3. 考量含水層系統甚為複雜，本研究設計兩種模擬情境，分別探討在含水層自成獨立系統下，於淺層抽水對淺層崩塌之關聯性及在深層抽水對深層滑動之關聯性，兩種情境的分析結果顯示其抽水量越大，水位洩降越大，坡地穩定性越高；抽水延時越長，坡地亦會越趨穩定，安全係數最高可提升 42.2%。此外，從水資源潛能觀點，在提升相同坡地穩定度目標下，淺層含水層可獲取更多水資源總量。
4. 本研究所提出之分析模型可因地制宜建立不同崩場地抽水量與邊坡穩定性間之關聯性，若要提升分析模型之準確度與實用性，未來則建議於現場進行分層水位監測並搭配更完整的水文地質調查技術，模擬成果冀能提供山區民眾作為地方水資源開發及災害風險評估之重要依據。

- Hoek, E. and Bray, J.W. (1981) Rock Slope Engineering, Revised 3rd edition, The Institution of Mining and Metallurgy, London, pp. 341 - 351
- Frelldund DG and Rahardjo H. (1994) Hillside Slope Stability Assessment in Unsaturated Residual Soils, IKRAM Seminar on the Geotechnical Aspects of Hillside Development, Kuala Lumpur, Malaysia, pp. 1-41
- Alonso E, Gen A, Lloret A, and Delahaye C. (1995) Effect of Rain Infiltration on the Stability of Slopes, Proceedings of the First International Conference on Unsaturated Soils, UNSAT'95, Paris, France, Vol. 1, pp. 241-249
- Sugiyama T, Okada K, and Muraish H. (1995) Statistical Rainfall Risk Estimating Method for A Deep Collapse of a Cut Slope. Soils and Foundations, 35 (4) , pp. 37-48
- Gasmo JM, Rahardjo H, and Leong EC. (2000) Infiltration Effects on Stability of a Residual Soil Slope, Computer and Geotechnics, 26, pp. 145-165
- Rahardjo H, Li XW, Toll DG, and Leong EC. (2001) The Effect of Antecedent on Slope Stability, Geotechnical and Geological Engineering, 19, pp. 371-399
- Cascini, L., Gulla, G., and Sorbino, G., (2006) Groundwater Modeling of a Weathered Gneissic Cover, Can. Geotech J., 43, pp. 1153-1156
- Tsai (2008) The Influence of Rainstorm Pattern on Shallow Landslide, Environ Geol., 53, pp. 1563-1569
- Lo, H. C., Hsu, S. M., Chi, S. Y, and Ku, C. Y. (2010) Coupled Stability Analysis of Rainfall-Induced Landslide: A Case Study in Taiwan Piedmont Area, ASCE Geotechnical Special Publication No. 204, pp. 1-8
- 行政院農業委員會水土保持局 (2011) 大梨山地區地滑地監測管理成果彙編 (100 年度)
- 中興工程顧問社 (2013) 集水區水文地質對坡地穩定性影響之調查評估 (102 年度)
- 中興工程顧問社 (2014) 臺灣南段山區地下水位觀測與水力特性調查 (103 年度)