

整合不同地下探測技術於坡地水文地質調查與案例應用

許世孟¹ 羅鴻傑² 鄭道隆² 柯建仲² 蘇泰維³ 李錦發⁴

1. 中興工程顧問社大地工程研究中心組長
2. 中興工程顧問社大地工程研究中心研究員
3. 經濟部中央地質調查所科員
4. 經濟部中央地質調查所科長

摘要

本研究主要目的是整合不同地下探測技術，進行一系列坡地水文地質調查工作，調查規劃主要是先藉由光學式與音射式孔內攝影及電井測的測錄來界定地層的岩性、貯水能力及裂隙之破碎程度與其位置，並利用地下流速儀偵測地層的透水性及確認孔內攝影破碎區段水力之連通性，進而整合上述三項調查成果提供封塞水力試驗試驗位置之規劃依據。最後根據鑽孔封塞水力試驗成果，定量上描述孔內各區段岩層之水力特性，達到坡地之水文地質特性調查之目的。藉整合以上多項試驗結果，除了能充分掌握坡地孔內裂隙的水文特性資訊外，同時提供後續坡地水文地質概念模型建置與水文地質模式模擬依據。最後，本文以一重點崩塌地水文地質調查案例進行應用說明。

關鍵字：坡地水文地質、孔內攝影、電井測、水力試驗、地下水流速儀。

Integrating Multiple Downhole Prospecting Techniques on Slope Hydrogeology Investigation

ABSTRACT

The study aims at presenting an integration of different downhole prospecting techniques for hydrogeologic investigation at an active landslide area. A series of subsurface exploration technologies was conducted, including borehole image scanning, electric logging, groundwater velocity measurements, and double packer testing. Both acoustic and optical borehole loggings as well as electric logging were applied to identify lithology, water bearing capacity and fracturing of the formation around the boring. Subsequently, borehole flow logs were used to indicate the distribution of permeability and hydraulic connectivity of fractures along the borehole. Based on the above prospecting results, test sections of hydraulic tests can be arranged from the integrated outcome. Finally, hydraulic packer tests were carried out to further characterize the hydrogeologic system of the site and quantitatively determine the hydraulic properties of major hydrogeologic units. Integrating multiple downhole prospecting techniques on slope hydrogeology investigation not only provides hydraulic properties for a study area, but also brings information to establish a hydrogeologic conceptual model and process the model simulation.

Key Words: Slope Hydrogeology, Borehole Televiwer, Electric Logging, Hydraulic Tests, groundwater flowmeter.

一、前言

台灣為一多山海島，坡地面積廣大，又因坡地開發範圍日廣，每逢暴雨及颱風侵襲，常常造成坡地災害發生。為減輕甚至防止災害發生，擬定合理而妥善

之防災對策，已刻不容緩。然而制定防災策略之前首要任務須先了解坡地災害成因與潛在發生區域，而坡地水文地質調查係充分掌握上述資訊之關鍵工作之一，因此有必要應用相關技術進行詳細坡地水文地質調查工作，藉以了解坡地水文地質特性。傳統的坡地

水文地質調查多透過呂琴試驗 (Lugeon Test)，在鑽井之過程中，於不同深度施做，以獲知地層之水力特性。惟單靠呂琴試驗，在具複雜且多變水文特性之坡地並無法提供特定地質材料及岩體裂隙之水文地質資訊(許世孟等, 2008)。為此，本研究主要目的是整合不同地下探測技術，進行一系列坡地水文地質調查工作，調查規劃主要是先藉由光學式與音射式孔內探測儀及電井測的測錄來界定地層的岩性、貯水能力及裂隙之破碎程度與其位置，並利用地下流速儀偵測地層的透水性及確認孔內攝影破碎區段水力之連通性，進而整合上述三項調查成果提供封塞水力試驗試驗位置之規劃依據。最後根據鑽孔封塞水力試驗成果，定量上描述孔內各區段岩層之水力特性，達到坡地之水文地質特性調查之目的。藉整合以上多項試驗結果，除了能充分掌握坡地孔內裂隙的水文特性資訊外，同時提供後續坡地水文地質概念模型建置與水文地質模式模擬依據。最後，本文以紅葉坪崩塌水文地質調查成果進行案例應用說明。

二、地下探測技術介紹

為提升坡地水文地質特性調查精度，本研究於崩塌地進行一系列水文地質試驗，包括孔內岩體裂隙位態調查、孔內井測、地下水流速調查及岩體透水性調查等。相關調查所需的地下探測設備說明如后。

2.1 孔內影像探測設備

山岳地區邊坡除典型圓弧型滑動破壞外，另一種常見的滑動形式是坡地內存在一透水性較佳之含水層，而此含水層上、下界夾有透水性較差的微水層(aquitard)，故常形成侷限含水層(confined aquifer)。持續降雨期間，雨水常沿著含水層露頭滲入地層內蓄積，並在較不透水層交界上形成暫棲地下水，若作用於該界面之孔隙水壓持續升高，則邊坡將易沿此界面發生崩塌。

針對上述狀況，傳統調查方式係透過岩心鑽探資料判斷可能的滑動位置及破壞型態，惟根據鑽探岩心來調查岩體弱面或潛在滑動面之可能位置仍存在以下限制：(1)當鑽探作業中，若造成岩心破碎或無法提取時，即無法了解鑽孔內之地質狀況，然而該區段往往可能是調查的重點區域；(2)不易或無法判斷岩心顯示之弱面為自然形成或為施鑽過程中之機械破壞導致之破裂；(3)對於原本存在的空穴、弱面內寬、易流失之夾心等情形，不易透過岩心檢視得知；(4)無法檢核岩心箱內鑽孔岩心有無錯置。有鑑於此，為改善上述限制並提供較佳的可能弱面研判成果，以供後續水文地質概念模式建立及模式分析之依據，本研究採用孔內影像探測設備進行孔內岩體位態調查。

孔內影像掃描係於鑽孔中置入一掃描設備，直接掃描孔壁情形，以即時研判地層狀況、節理及裂隙分布及位態等資料。其設備機型大致可分為兩種型式：光學式和音射式，光學式設備為一般孔內影像掃描所常用，主要由一組光源及一架攝影機所構成，其拍攝結果如同一般肉眼所見，精度則取決於攝影機之解析度，光學式孔內探測儀及掃描影像如圖 1 所示，然此探測儀器缺點在於若孔內地下水水質混濁時，嚴重影響攝影品質；音射式孔內掃描則以超音波為發射訊號，而非一般可見光，藉由反射訊號之強弱及走時來判讀地層狀況，由於其具有解析度高，可適應多種環

境等優點，然而此探測儀器在發射超音波訊號時需以地下水作為媒介，因此其最大之缺點是只能在地下水存在的區段進行調查，音射式孔內探測儀及攝影影像如圖 2 所示。此設備調查結果除了補充研究區域地質資料外，同時可提供後續裂隙岩體水力特性相關調查規劃之依據，將有利於減少水力試驗封塞放置位置之錯誤，可獲得真正欲知岩體裂隙之水力特性。

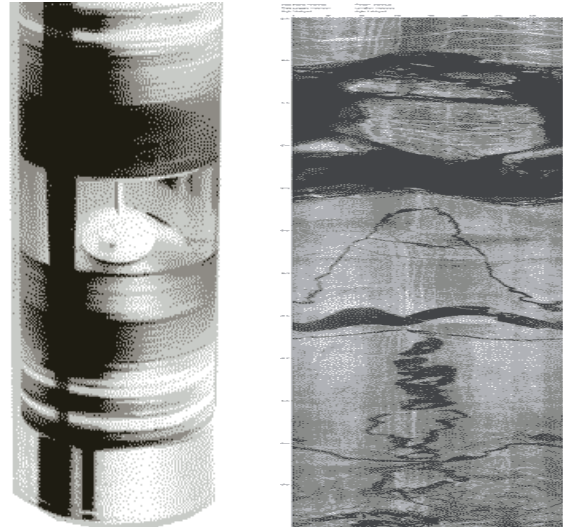


圖1 光學式孔內探測儀(左)及探測影像(右)

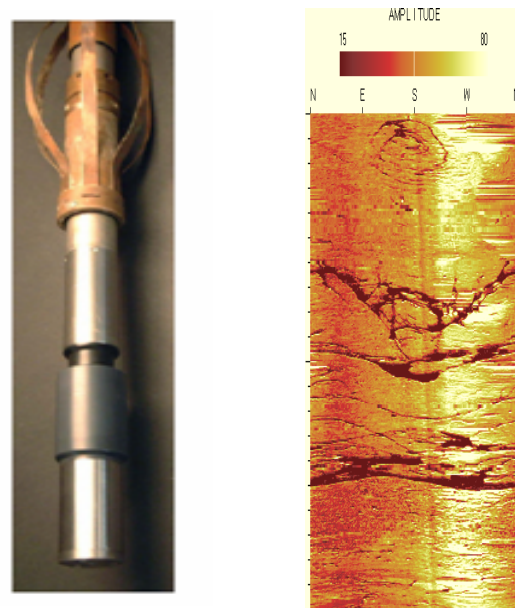


圖2 音射式孔內探測儀(左)與探測影像(右)

2.2 孔內電井測

孔內電井測調查係以地球物理探勘的方式，將各式探測儀置於鑽孔或試驗井中，並在吊放或拉升的過程測錄電阻、自然電位差、聲波速度、放射線強度等來判定地層之特性，其應用早期係以資源探勘為主，近年來，井測也陸續開始投入至地下水、工程地質及岩石力學等相關調查中。為獲得更為完整之水文地質資訊，本研究除進行孔內岩體裂隙調查外，另以電測儀(electrical log) 進行調查，其探測儀內包含正常態

電阻率 (64" and 16" normal resistivity)、單點電阻 (single-point resistance)、自然伽瑪 (γ) 射線 (natural gamma radiation)、自然電位 (spontaneous potential) 等。茲分述施測原理及資料在地質上之判釋如后。

2.2.1 自然電位差

自然電位主要是探測儀在井內測錄過程記錄地層電極與固定在地表電極間之電位差，由於地層流體中之鈉離子會由高濃度處向低濃度處擴散，當地層水的鹽分高於鑽井泥漿時，鈉離子會從高鹽度的地層水向低鹽度的鑽孔泥漿擴散而產生自然電位差之變化。自然電位差隨深度變化的曲線稱為 SP 曲線，可藉以判斷地層之岩性及滲透性。由於頁岩的滲透率低，受泥漿滲透 (浸污) 所造成的離子變化作用較低，因此電位差的變化不大，SP 曲線在測錄圖上成為一條直線，稱為頁岩基線 (shale baseline)。反之，由於砂岩較具滲透性，地層受泥漿浸污所造成的離子變化相對明顯，亦將產生較為顯著之電位差。一般而言，當地層水的鹽分濃度高於泥漿時，砂岩層相對於頁岩層較具負電位，SP 曲線的讀數會向左 (即負電位方向) 偏移。

2.2.2 電阻率

電阻率主要是利用電極使電流通過地層，測出各地層的電位差，再利用歐姆定率計算來得到電阻。本研究採用之探測儀主要可以量測正常態電阻率 (normal resistivity) 及單點式電阻 (single-point resistance)，正常態電阻率依電流與測定極間距的不同又可分為 16 英寸的正短距及 64 英寸的正長距，其中正短距是測定鑽孔橫向淺層的地層電阻率，對岩層界面或薄岩層有較佳解析力，然其所測之電阻率往往是泥漿浸污區或部分浸污區的地層電阻，較無法直接求得地層之真電阻，但可藉由地層浸污的程度來推算之；正長距的橫向測定深度較大，所測得的範圍通常可以涵蓋到泥漿未浸污區的區域，其電阻率經校正後較可代表岩層之真正電阻率，但對岩層界面或薄岩層之解析度較差。單點式電阻則是紀錄鑽孔地層中各點與地表接地間之電阻。一般而言，電阻率與地層含水量呈反比關係，高孔隙率或多裂隙含水岩層會呈現較低的電阻率；反之，低孔隙率岩層則會反應出較高之電阻率，此關係適用於判斷地層滲透或蓄水層位置。此外，電阻率與地層材料的顆粒大小呈正比關係，顆粒較粗的礫石或砂岩會呈現較高之電阻率，而顆粒較細的頁岩或泥岩則會有較低電阻率的偵測結果，此關係亦可用以界定地層的岩性分布情形。

2.2.3 自然伽瑪射線

自然伽瑪射線係以偵測鑽孔內地層釋放的自然伽瑪射線強度。一般而言，地層中的自然伽瑪放射源主要來自鉀 (K-40)、釷 (Th-232) 或鈾 (U-238) 等蛻變之放射性元素，顆粒較細的頁岩或泥岩層中之黏土因吸附較多放射性元素，所以伽瑪射線強度較高；反之，砂或礫石層吸附之放射性元素較少，伽瑪射線的強度則相對較低。此外，泥的風化程度會影響伽瑪強度，灰色新鮮泥之伽瑪強度會較黃棕色風化泥為高，而砂或礫石的成分亦會影響伽瑪強度值，板岩質砂或礫石往往會比石英質砂或礫石還要高。就水文地質觀點而言，井測之伽瑪值高表示地層含黏土量高，可判

定為低透水性之頁岩或泥岩層；相反的，伽瑪值低表示地層含黏土量少，可能為透水性較佳之砂岩層。因此根據自然伽瑪射線的偵測結果，可用以界定砂岩及頁岩層之分布並進而判定地層之透水性。

探測成果圖可用以分析地層之細部構造、判斷地層滲透或蓄水層位置、推估地層孔隙及其強度、界定地層岩性及裂縫位置等。而進行多孔調查時，更可透過各鑽孔探測之綜合成果，描繪分層剖面。此外，各井測方法在資料的解析上常有限制，故往往在調查時需透過多種資料交互比對的判釋才能得到更為合理之結果。

2.3 孔內流速儀

孔內攝影破碎區段水力之連通性，往往無法由孔內影像探測或是電井測成果獲知，孔內流速儀提供一個選擇，藉由量測鑽孔內地下水流速及垂直流向，可用以判定地層之透水性及地下水流速之分布情形，間接了解裂隙區段水連通性調查，結果除能提供後續裂隙岩體水力特性試驗規劃依據外，亦可回饋後續水文地質概念模式之建立。

流速儀須在鑽孔為裸孔且有水的條件下施測，本研究所採用之流速探測儀包括熱脈衝式流速儀 (heatpulse flowmeter) 及葉片式流速儀 (impeller flowmeter)，兩者的區別主要在於量測流速規模的不同，熱脈衝式流速儀適用於低流速的探測，主要是以定點的方式量測鑽孔內地下水的流速及垂直流向；葉片式流速儀則適用於高流速的探測，主要是以連續測錄的方式，量測探測儀在鑽孔吊放或拉升過程中葉片的轉速，並用以推估地下水流速分布情形。茲分述流速儀施測原理及流向判釋標準如后。

2.3.1 熱脈衝式流速儀

熱脈衝式流速儀係利用內部之柵狀發熱線圈發熱以加熱附近流體，由於流體的流動帶動熱產生一向上或向下的運動，而發電圈上下方之熱感應器可偵測其溫度之差異，並以熱脈衝曲線顯示。若熱脈衝曲線朝上方改變，反應上方熱感應器感應到溫度上升，表示流體向上方流動，反之，若熱脈衝曲線向下方改變，則代表流體向下方流動 (詳見圖 3)，透過溫度差異的傳導時間，藉以計算流速。

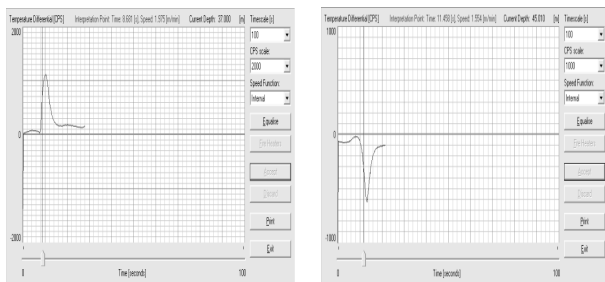
由於儀器的吊放會在量測區段的水體中產生亂流，因此在量測前需先將探測儀靜置一段時間，待水流穩定、熱感應器與周遭流體溫度達到平衡後方可進行施測；此外，部份流體可能會繞過感應器 (bypass flow effect) 造成量測流速被低估，在孔壁不完整之鑽孔或多裂隙等條件下施測應將此影響加以考量。

2.3.2 葉片式流速儀

葉片式流速儀係利用流速儀在鑽孔吊放過程中水流流經葉片推動葉片轉動之轉速來推求流速，適用於高流速之地下水量測。由於葉片轉速與儀器的吊放速度成一正比關係，吊放速度越快，葉片的轉速越高。而測錄過程在無地下水流條件下之葉片轉速，乃是因儀器本身吊放速度帶動之逆向水流而產生，探測儀向下測錄時所帶動之向上水流使葉片向逆時針方向旋轉 (負轉速)，反之向上測錄時所帶動之向下水流則會使葉片向順時針方向旋轉 (正轉速)。而當地下水存在時，逆向的水流驅使葉片產生更大的轉速，同

向的水流則會減緩葉片轉速甚至迫使葉片產生反向的旋轉，因此藉由葉片轉速的大小及轉動方向，可研判鑽孔地下水之流速分布及流向。

葉片式流速儀需在固定之吊放速度下測錄，其試驗速度快，可彌補熱脈衝流速儀試驗時間較長之缺憾，在進行流量量測時可先以葉片式流速儀量測地層透水變化趨勢，再利用熱脈衝式流速儀針對流速較大的區段做定點式的量測。此外，葉片式流速儀的測錄結果易受諸多因素影響，包括葉片磨擦的延遲效應、流體之黏滯性、儀器吊放所產生之亂流、儀器未妥善置中及鑽孔岩屑坍塌造成葉片堵塞等，因此在資料的判讀上應與其他井測試結果交互比對之。



(a)熱脈衝曲線(水流向上) (b)熱脈衝曲線(水流向下)

圖3 孔內熱脈衝式流速儀調查結果

2.4 雙封塞設備

裂隙岩體水力試驗，主要目的係求得裂隙岩體的透水係數(K, hydraulic conductivity)以及貯水係數(S, storativity)，試驗所得之水文地質參數資料，將作為水文地質概念模式之建立及地下水流場模擬分析之主要依據。一般水文地質參數調查方法傳統上以 Lugeon 試驗為主，該試驗必須配合鑽探作業的鑽孔進尺(而且試驗或督導人員必須隨時在旁待命)，以調查不同深度岩體之透水性，但是無法提供某特定深度岩體構造區段之透水性，在考慮弱面夾層或特定破碎含水層等裂隙岩體內複雜多樣的地下水流動分析有相當大的限制。為克服 Lugeon 試驗的限制及進一步調查崩塌地特性構造之水力特性，本研究採用雙封塞試驗進行裂隙岩體水力特性調查，如圖 4 所示。在每一次進行試驗前，可以配合孔內岩體裂隙位態調查成果及孔內井測與地下水流速儀調查成果，先行評估並挑選鑽孔內較具代表性之岩體區段與深度加以施作，如此可完全改善鑽探取樣之岩心位置與實際鑽孔內的位置之差異(試驗區段之岩體位置誤差)以及提供某特定深度岩體構造區段之透水性。

雙封塞試驗是在試驗過程中，利用兩個或多個封塞去分離鑽孔試驗區段，試驗區段的長度會依據不同試驗目的而不同，封塞可以阻隔一個裂隙或是多個裂隙，甚至整個岩體結構。藉由試驗的結果，可以描述裂隙岩體中在不同地質構造下，水力特性的變化。

圖 4 是本研究所採用之雙封塞水力試驗設備，其中本系統包含(1)兩組封塞：分離鑽孔試驗區段；(2)鑽孔下關閉閥：主要控制試驗區與鑽桿間水力之連通性；(3)離心式抽水幫浦：抽取試驗區段之地下水；(4)三組水壓計：量測試區段水壓、上封塞以上區段水壓及下封塞以下區段水壓；(5)流量計：量測試區段注入岩體之水量；(6)封塞及鑽孔下關閉閥充氣裝置：包

含氮氣及鋼瓶、高壓氣管調整器、氣體流量計、高壓閘門及高壓充氣管；(7)注水用馬達：為沉水離心式馬達，用於注水試驗；(8)自動資料收集處理器：自動資料收集處理器之程式執行速度最高可達 100Hz，輸入埠包含 24 只 SE 及 4 組 plus 訊號輸入，可與電腦直接連線，具 100 萬筆資料儲存功能；(9)捲揚系統：主要將雙封塞系統置入擬試驗區段，包括捲揚機、三角架、滑輪、吊頭、不銹鋼連接管及管鉗。

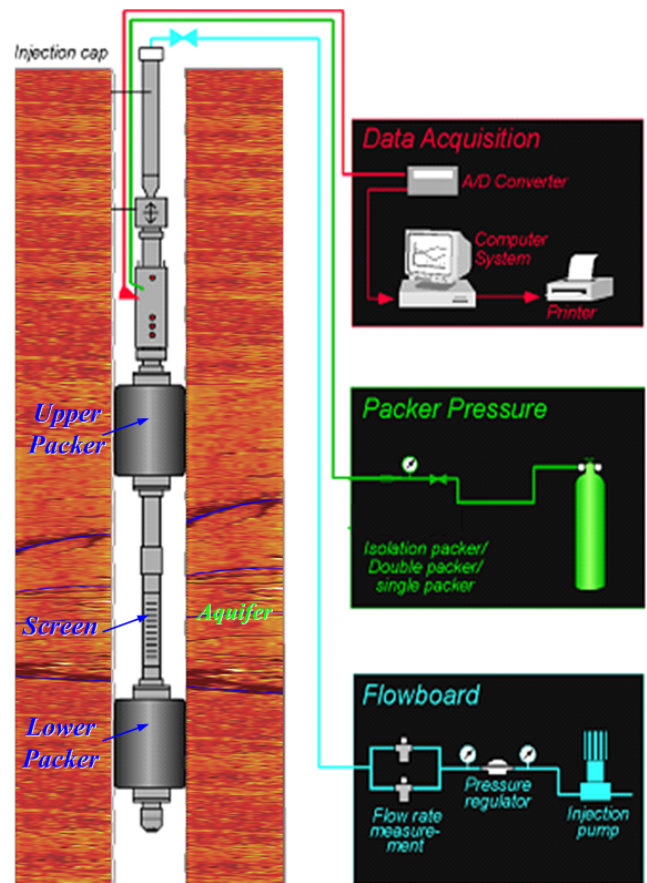


圖4 雙封塞水力試驗設備示意圖

三、坡地水文地質調查案例應用

3.1 坡地試驗場址描述

1999 年集集地震，造成紅葉坪地區發生涵蓋範圍約 88.6 公頃之地滑，崩塌地坡面略朝西北。李錦發等人 (2004)發現紅葉坪崩塌地具有多項地滑證據，包括地表張力裂隙、地面落差、滑動崖、地面擠壓以及趾部擠壓崩塌等，其它如檳榔樹的傾斜方向等，亦明顯的指出該地區在集集地震後確實有大範圍地表滑動發生。但是因崩動體本身受到較少的擾動並保持原先的地貌，僅由航照色調變化判釋，並無法窺其地滑之全貌。因此該崩塌現象除了地表上某些特徵可提供辨別外，滑動塊體的邊界並不易清楚界定。經濟部中央地質調查所為瞭解紅葉坪地區滑動機制以及後續此一邊坡之穩定性，於紅葉坪地區進行為期兩年的調查與監測計畫 (黃安斌等人, 2005,2006)。調查項目包括：遙測影像判釋與分析、地表地質調查、地電阻探測、鑽探以及室內試驗，並進行邊坡穩定分析。調查結果發現紅葉坪地區廣佈巨厚之崩積層，崩

積層顆粒粒徑大小差異甚巨，有的崩積物屬於沉泥至黏土，厚度可達數十公尺，質地相當緻密；有的崩積物為粒徑超過 1 公尺的砂岩塊，粒徑不同之崩積層呈層狀分布。根據地表地質調查以及鑽孔岩心判釋，此一區域岩盤節理發達，且有多處剪裂帶，構造複雜。

為與過去計畫調查範圍區別，以下統一用「紅菜坪崩塌地」泛指過去研究圈劃全區紅菜坪崩塌地之統稱，另用「紅菜坪調查範圍」代表本文所選取紅菜坪崩塌地內靠永祿溪之坡址部分作為監測及研究範圍。選擇此處場址之主因為其坡址部分崩積層土石鬆散並受永祿溪長期侵蝕，發生崩滑機率相對較高，故從地形上圈繪此崩塌地之崩崖以及崩滑範圍。紅菜坪調查範圍詳細地理位置可參考圖 5，圖 6 則為此崩塌地之遙測影像。

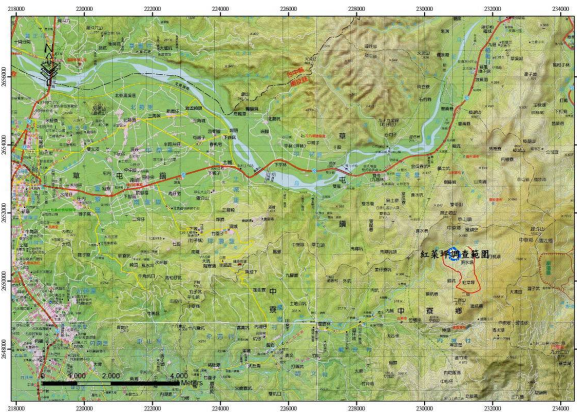


圖 5 紅菜坪崩塌地及本文調查範圍之地理位置



圖 6 紅菜坪調查範圍遙測影像與崩塌區域圈繪

本案例於紅菜坪調查範圍內共施鑽 EH-01 (深度 50 公尺)、EH-03 (深度 10 公尺)、EH-05 (深度 80 公尺)、EH-07 (深度 50 公尺)、EH-09 (深度 10 公尺)、EH-11 (深度 50 公尺) 等 6 個地質鑽孔(如圖 7 所示)，總進尺達 250 公尺。由地質圖可研判紅菜坪調查範圍出露地層主要以大坑層炭寮地段為岩性主體，而於此地層上部有厚度不等的水裡坑層石門段岩性所形成之崩積層覆蓋其上，兩者年代皆為第三紀中新世尚屬年輕之地層。前者炭寮地段岩性以深灰色或黑灰色塊狀緻密頁岩或砂質頁岩，夾薄層灰色細粒砂岩。有時砂岩與頁岩成薄互層或混層，在弱面或混層處並夾土鐵石結核，局部富含海綠石，底部夾有厚層砂岩；後者石門段岩性以三層堅緻白灰至淺灰色細至中粒厚

層砂岩，間夾深灰色頁岩或砂頁岩薄互層所組成。



圖 7 紅菜坪調查範圍地質鑽孔佈置圖

本研究對紅菜坪調查範圍進行一系列之水文地質試驗調查，包含：(1)孔內岩體裂隙位態調查；(2)孔內電井測調查；(3)孔內流速調查；(4)孔內裂隙岩體水力試驗。上述各調查方法之目的同上所述，茲分述各試驗成果如后。

3.2 孔內岩體裂隙位態調查與分析成果

孔內裂隙岩體位態調查主要在獲得鑽孔岩層狀況、節理及裂隙分布情形，透過影像的比對可檢視鑽孔岩心在進尺上的錯位(如圖 8 所示)，而利用後處理程式進行立體投影分析可進而研判邊坡可能的破壞模式。

孔內攝影影像 (深度:25.4~26.9 m)	鑽探岩心照片 (深度25.7~27.2 m)	RQD	區段岩性 描述	深度錯位 (m)
		25~26 m: 85 26~27 m: 90	黑灰色砂質頁岩，一組低角度節理，層面傾角約 30 度	0.3

圖 8 紅菜坪調查範圍孔內攝影影像與岩心照片比對 (以EH-11 鑽孔25.4~26.9 m為例)

本文針對紅菜坪調查範圍 EH-05 鑽孔及 EH-11 鑽孔分別以音射式孔內攝影及光學式孔內攝影試驗進行岩體裂隙位態調查，光學式負責鑽孔地下水水位以上至套管理設深度間影像探測；音射式則負責地下水

位以下至鑽孔孔底之間範圍影像探測。孔內岩體裂隙位態調查成果於 EH-05 與 EH-11 鑽孔有效攝影區段內分別標定 129 與 45 條裂隙。EH-05 鑽孔立體投影分析(如圖 9 所示)顯示共有二組主控弱面，其一傾向為 53 度、傾角為 63 度，屬高角度裂隙發育，其二傾向為 32 度、傾角為 25 度，兩組弱面交線的傾向與坡面傾向相差不大，且交線傾角小於坡角，因此研判具有 Hoek & Bray 假設之楔型破壞模式，此楔型塊體可能往傾向 315 度、傾角 13 度的方向滑動。EH-11 鑽孔立體投影分析(如圖 10 所示)顯示有一組對邊坡穩定具不利因素之主控弱面，其傾向為 32 度、傾角為 53 度，屬高角度裂隙發育，惟其並不符合 Hoek & Bray 任何假設之破壞模式。

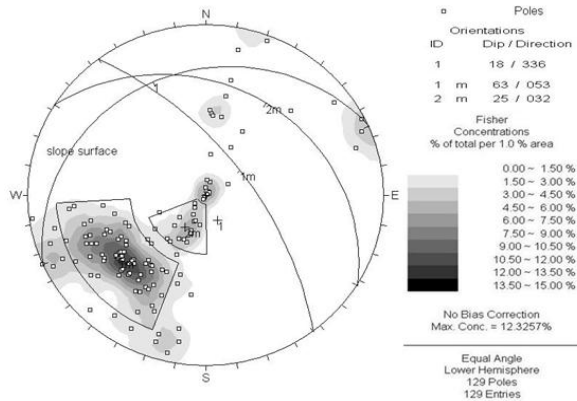


圖9 EH-05孔內裂隙位態立體投影分析圖

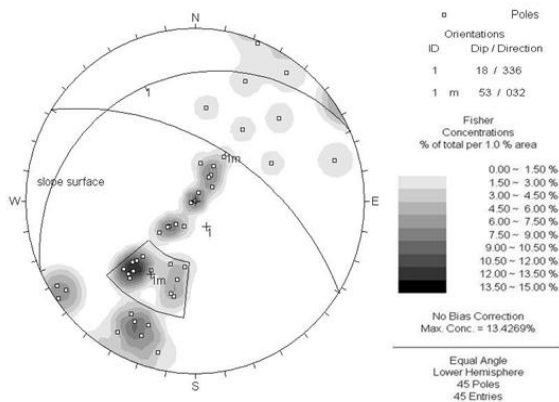


圖10 EH-11孔內裂隙位態立體投影分析圖

綜合鑽孔 EH-05 及 EH-11 孔內裂隙位態調查成果可知(如圖 11 所示)，紅菜坪調查範圍於地表下 2.2~77.6 m 間具有二組不利於邊坡穩定之弱面，其中由第一組及第二組弱面之傾角與傾向研判本崩塌地具發生楔型破壞之潛勢。惟上述資料在崩塌地邊坡穩定評估上僅可作定性上的判釋，實際的破壞模式仍需依現堪並配合水質地質調查結果而定。此外，孔內岩體裂隙位態調查結果所提供鑽孔節理及裂隙分布之確切位置，可供雙封塞水力試驗挑選試驗區段之用。

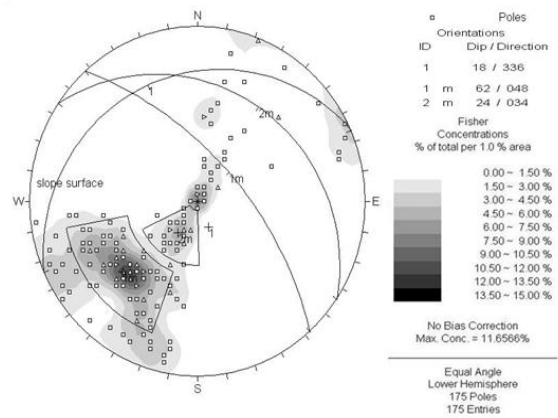


圖11 紅菜坪調查範圍孔內裂隙位態立體投影分析圖

3.3 電井測調查與分析成果

圖 12 顯示本研究針對紅菜坪調查範圍 EH-11 鑽孔進行電井測測錄結果，因地下水及套管套放位置之故，本鑽孔的實際調查範圍為 20~45 m。

由於本鑽孔全孔岩心均以砂質頁岩為主，岩性一致，故電井測的試驗結果並未呈現較為顯著的岩層分界，惟自然電位及自然伽瑪射線的測錄曲線顯示 32~33 m 及 35~38 m 的測錄值偏低，說明了此處含有顆粒較粗的砂岩，而在 20~25 m 處亦呈現偶夾砂岩之測錄結果，其餘皆以含泥量較高的頁岩為主，此結果與岩心描述一致。此外，根據電阻率的測錄結果顯示，在砂岩含量較高處偵測出較高之電阻率，說明了此層含有較低的含水量，而在頁岩層的電阻率測錄結果顯示含水量並無太大變化。

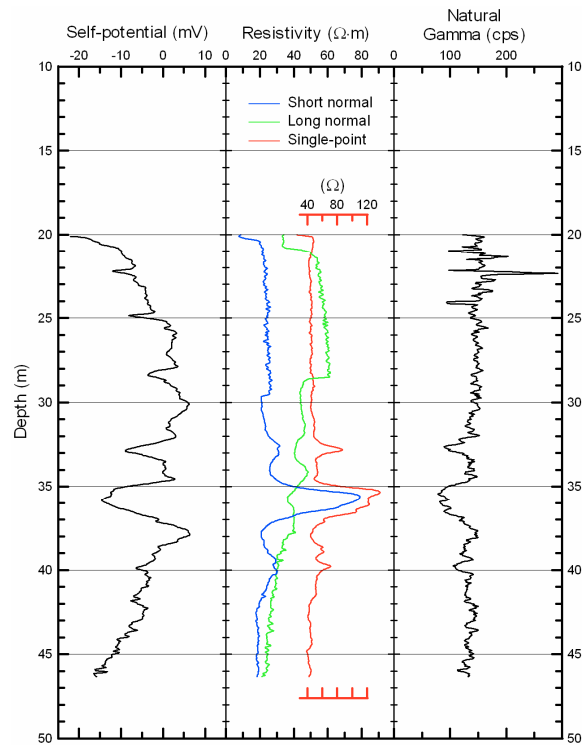


圖12 紅菜坪調查範圍EH-11孔內電井測調查結果

3.4 地下水流速調查與分析成果

本研究對紅葉坪調查範圍 EH-11 鑽孔進行流速量測，量測時先以葉片式流速儀 (impeller flowmeter) 在孔中吊放及拉升的過程中各測錄一次葉片轉速，比對量測結果並判定地層之透水變化趨勢，其後再利用熱脈衝式流速儀 (heatpulse flowmeter) 針對流速較大區段做定點式的量測。因地下水及套管套放位置之故，本鑽孔的調查範圍為 18~45 m，調查結果如圖 13 所示，惟在 18~20 m 處因探測儀吊放速度不一導致葉片轉速不穩定而不予以判釋，故本鑽孔的實際調查範圍為 20~45 m。

由於本孔岩心完整，地下水在裂隙中的流動勢能低，故葉片式流速儀的測錄結果並未呈現較為明顯的地下水流動，惟在 32~38 m 處偵測出較高的葉片轉速，說明了此處地下水有相對較高的向上流速；而熱脈衝式流速儀呈現相同的試驗結果，在 31.8~38.0 m 深處可明顯的偵測到流速，約在 0.50~1.23 m/min 之範圍，另在 19.1 m、21.4 m 及 43.8 m 處亦可量測到流速，分別為 0.16 m/min、0.50 m/min 及 0.28 m/min，其它區段則未量測到明顯的流速。

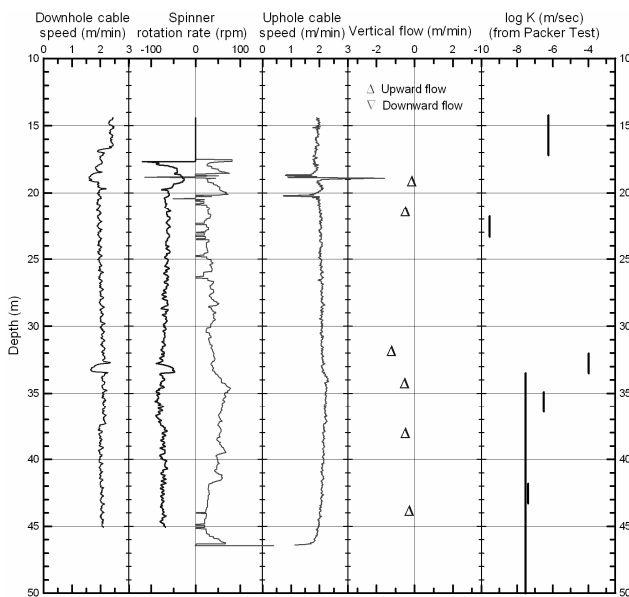


圖 13 紅葉坪調查範圍 EH-11 孔內流速調查結果

3.5 裂隙岩體水力試驗與分析成果

依據孔內攝影成果、電井測成果與地下水流速量測成果，考量地層岩性的不同與裂隙數量的多寡，本研究對 EH-05 與 EH-11 鑽孔共規劃 12 組水力試驗。表 1 與表 2 分別是紅葉坪調查範圍 EH-05 與 EH-11 鑽孔現地水力試驗成果整理，內容包括試驗區段、封塞方式、試驗長度、試驗方法、資料分析採用理論解、試驗區段含水層型態、透水係數及貯水係數，其中封塞方式分為單封塞及雙封塞，單封塞試驗目的主要大範圍調查鑽孔周圍岩盤透水性，可初步獲得各大區段岩盤之透水性，而雙封塞試驗則針對特定興趣的地質構造進行小範圍的透水係數調查。

由紅葉坪調查範圍 EH-05 鑽孔 3 個不同深度 (29.0~30.5m; 52.2~53.7 m; 70.0~71.5 m) 的雙封塞水力試驗結果得知岩盤透水性大約介於 10^{-7} ~ 10^{-8} m/s 數量級之間，依據裂隙岩體構造不同岩體透水性會有所

差異。而從 20.0 m 至 80.0 m 之間單封塞水力試驗結果得知，此試驗區段約 60 m 的岩盤透水性平均為 10^{-7} m/s 數量級，但從 50.0 m 至 80.0 m 之間單封塞水力試驗結果得知，此試驗區段約 30.0 m 的岩盤透水性平均為 10^{-9} m/s 數量級，比較兩個試驗成果顯示地表下 50 m 以下岩盤平均透水性較地表下 50 m 以上岩盤平均透水性較差，差異約為兩個數量級。以上試驗區段岩盤透水性與岩心資料所呈現之破碎程度成正比，此結果可從岩心資料顯示的岩盤破碎程度進而應證，地表下 50.0 m 以下之係黑色砂質頁岩偶夾薄層砂岩，岩心較完整，導致岩盤透水性達 10^{-9} m/s 數量等級。

由紅葉坪調查範圍 EH-11 鑽孔 4 處雙封塞水力試驗結果得知 17.3 m 至 43.0 m 之間岩盤透水性呈現較大變化，依據裂隙岩體構造不同岩體透水性會有所差異，其中 32.0 m 至 33.5 m 試驗區間岩盤透水性最佳，岩盤透水性為 1.1×10^{-4} m/s，從孔內攝影影像顯示此試驗區間存在 5 cm 具連通性的裂隙所致。而 21.8 m 至 23.3 m 試驗區間岩盤透水性最差，岩盤透水性為 2.81×10^{-10} m/s，其岩性係灰黑色砂質頁岩夾有層縫泥，從孔內攝影影像顯示此試驗區間存在 3 條裂隙，但裂隙內填充物夾泥不具連通性，導致岩盤透水性降低。此外，EH-11 鑽孔共完成兩處單封塞水力試驗，從 33.5 m 至 50.0 m 之間單封塞水力試驗結果得知，此試驗區段約 16.5m 的岩盤透水性平均為 3.07×10^{-8} m/s; 14.2 m 至 17.2 m 之間為厚約 3m 的灰色剪裂泥夾少量風化岩屑 (前 1 m 岩心較破碎段，後面 2 m 岩心較完整)，從單封塞的水力試驗結果顯示此區段岩盤透水性平均為 5.8×10^{-7} m/s。比較 EH-05 與 EH-11 鑽孔的岩盤透水性，兩鑽孔整體平均岩盤透水性差異不大。以上這些水力試驗成果可提供後續紅葉坪調查範圍崩塌地水文地質概念模式建構時使用。

此外，比較 EH-11 鑽孔水力試驗成果與熱脈衝式流速儀調查成果 (如圖 13 所示)，顯示滲透性較大之區段與地下水流速較大位置具一致性，證明在進行水力試驗之前如能安排地下水流速調查，將可以有效率找到透水性區段的水力傳導係數值，解決利用孔內攝影探測儀辨識透水區段之限制。

表 1 紅葉坪調查範圍 EH-05 現地水力試驗成果

試驗區段 (m)	封塞方式	試驗長度 (m)	試驗方法	理論模式	含水層型態	透水係數 K (m/s)	貯水係數 S
29.0~30.5	雙封塞	1.5	注水	Baker	Confined	7.54×10^{-8}	8.12×10^{-3}
52.2~53.7	雙封塞	1.5	注水	Baker	Confined	6.04×10^{-7}	3.70×10^{-4}
70.0~71.5	雙封塞	1.5	微水	KGS Model	Confined	1.17×10^{-7}	$< 1.0 \times 10^{-6}$
20.0~80.0	單封塞	60	注水	Hantush	Leaky	7.57×10^{-7}	2.33×10^{-5}

30.0~80.0	單封塞	50	注水	Hantush	Leaky	3.12×10^{-7}	5.82×10^{-4}
50.0~80.0	單封塞	30	注水	Baker	Confined	3.89×10^{-9}	2.33×10^{-5}

表 2 紅葉坪調查範圍 EH-11 現地水力試驗成果

試驗區段 (m)	封塞方式	試驗長度 (m)	試驗方法	理論模式	含水層型態	透水係數 K (m/s)	貯水係數 S
21.8~23.3	雙封塞	1.5	壓力脈衝	KGS Model	Confined	2.81×10^{-10}	3.54×10^{-4}
32.0~33.5	雙封塞	1.5	注水	Baker	Confined	1.10×10^{-4}	2.33×10^{-5}
34.9~36.4	雙封塞	1.5	注水	Baker	Confined	3.11×10^{-7}	9.97×10^{-3}
41.8~43.3	雙封塞	1.5	壓力脈衝	KGS Model with skin	Confined	4.16×10^{-8} (matrix)	2.16×10^{-4} (matrix)
						9.23×10^{-9} (skin)	9.76×10^{-6} (skin)
14.2~17.2	單封塞	3.0	微水	KGS Model	Confined	5.83×10^{-7}	2.73×10^{-3}
33.5~50.0	單封塞	16.5	注水	Dougherty-Babu	Confined	3.07×10^{-8}	7.28×10^{-5}

3.6 孔內水文地質試驗整合成果

為充分掌握重點崩塌地孔內裂隙的水文地質資訊，本研究針對上述一系列崩塌水文地質調查成果進行整合，調查規劃主要是先藉由孔內攝影及電井測的測錄來界定地層的岩性、貯水能力及裂隙之破碎程度與其位置，並利用流速儀偵測地層的透水性及確認孔內攝影破碎區段水力之連通性，進而整合上述三項調查成果提供封塞水力試驗試驗位置之規劃依據。最後根據崩塌地兩孔封塞水力試驗成果，定量上描述孔內各區段岩層之水力特性。茲歸納孔內水文地質試驗成果如下。

紅葉坪調查範圍共完成 EH-05 及 EH-11 鑽孔孔內攝影調查，兩鑽孔在有效攝影範圍內分別標示出 129 及 45 條裂隙，依據裂隙立體投影分析顯示紅葉坪調查範圍於地表下 2.2~77.6 m 間具有兩組弱面，其中由第一組及第二組弱面之傾角與傾向研判本崩塌地具發生楔型破壞之潛勢。此二弱面對邊坡穩定具有不利之因素，惟其資料在崩塌地邊坡穩定評估上僅可

提供定性上的判釋。

此外，紅葉坪調查範圍在 EH-11 鑽孔同時完成電井測與地下水流速量測，由於本調查範圍全孔岩心係以砂質頁岩為主，故在電井測的測錄結果並未呈現較明顯的岩性分界線，除在 32~33 m 及 35~38 m 處偵測出顆粒較粗的砂岩外，其他均以含泥量較高的頁岩為主。此外，電井測的測錄結果亦顯示在砂岩層含有較低的含水量，說明了此地層雖具較佳的導水能力，但其貯水能力則相對較差，此現象約略可在流速儀的量測結果中得到驗證，意即在砂岩處流速相對較大，然其流速規模相較於其他調查範圍則較低，而頁岩則較不易量測到流速。由孔內攝影的圖像顯示，本孔岩盤質地新鮮，除了部分區段偶見節理外，其餘皆屬完整，此可解釋為何此鑽孔內地下水的整體流動勢能較低；另從孔壁影像及流速量測的比對中亦發現在孔內的裂隙區段均可偵測到流速，其中又以 32~36 m 處最為明顯，說明了裂隙仍對本孔造成些許的補注勢能。

依據孔內攝影、電井測及流速儀成果，EH-05 及 EH-11 兩鑽孔共完成 12 處水力試驗，分析結果顯示 EH-05 鑽孔岩盤透水性大約介於 $10^{-7} \sim 10^{-8}$ m/s 數量級之間，並依據裂隙岩體構造的不同而有所差異，且地表下 50 m 以下岩盤平均透水性較地表下 50 m 以上岩盤平均透水性差。而由 EH-11 鑽孔的試驗結果得知岩盤透水性變化較大，其中以 32.0 m 至 33.5 m 試驗區間岩盤透水性最佳，岩盤透水性為 1.1×10^{-4} m/s，另在 21.8 m 至 23.3 m 試驗區間岩盤則透水性則較差，岩盤透水性為 2.81×10^{-10} m/s，其餘試驗區段則介於 $10^{-7} \sim 10^{-8}$ m/s 數量級之間。此外，單封塞水力試驗成果顯示 33.5 m 至 50.0 m 之間岩盤透水性平均為 3.07×10^{-8} m/s；14.2 m 至 17.2 m 之間厚約 3 m 的灰色剪裂泥夾少量風化岩屑，岩盤透水性平均為 5.83×10^{-7} m/s。水力試驗結果與流速儀量測一致，可用以詮釋各鑽孔不同深度岩層之水力特性並作為邊坡穩定分析模式之水力參數初始給定值。

上述成果再配合地質鑽探調查、地表地質調查、雙環入滲試驗、地電阻影像調查、室內土壤與岩石試驗等成果(中興工程顧問社, 2008)，即可以建立出崩塌水文地質概念模型。此概念模型概可分為三個水文地質單元 (hydrogeologic units)，由地表而下依序為崩積層、破碎岩盤、新鮮岩盤 (如圖 14 所示)。崩積層主由粉土質沙粒、細礫至中礫岩塊、破碎岩塊等材料組成，為典型之膠結不良沉積物，具高孔隙率及良好透水性，為一絕佳之透水層，其透水係數的範圍根據現地試驗結果顯示，其範圍約在 $10^{-7} \sim 10^{-6}$ m/sec；在水文地質的概念模型分層中，崩積層之下為破碎且高風化程度之基盤岩層，為透水性非常良好之含裂隙通水網絡 (fracture network) 之含水層系統，本區基盤岩層主由頁岩及砂岩組成，層理、裂隙等不連續面發達，根據現地試驗結果顯示，此破碎岩盤帶之透水係數，依區段裂隙多寡與水力連通性與否有所差異，約在 $10^{-7} \sim 10^{-4}$ m/sec；新鮮岩盤之水文地質特性與上一帶之破碎岩盤同屬含裂隙通水網絡之含水層系統，然裂隙較不如其發達，據現地試驗結果顯示，新鮮岩盤之透水係數範圍約在 $10^{-7} \sim 10^{-10}$ m/sec。

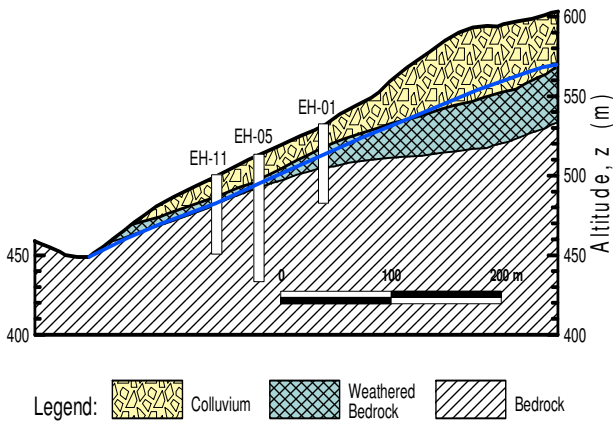


圖14 紅菜坪調查範圍水文地質概念模型剖面示意圖

四、結論

本文針對整合不同地下探測技術於坡地水文地質調查與案例應用進行探討並獲致以下結論：(1)由案例應用結果顯示，本文所提之整合光學式與音射式孔內探測儀、孔內地球物理井測、孔內地下水流速儀及雙封塞水力設備等不同地下探測技術於坡地水文地質調查應用，可獲得詳細與精緻調查成果，對於複雜多變坡地水文地質狀況較傳統的方法更能掌握，有利於坡地災害預測工作；(2)孔內影像探測儀調查確切之鑽孔孔內之弱面分佈位置與位態，如能搭配光學式與音射式探測儀一起使用，影像調查可不受鑽孔地下水位高低、水質渾濁等限制，完整進行全鑽孔影像探查；(3)孔內地下水流速調查協助解釋孔內影像探測儀成果，對於辨識具水力連通性之裂隙區有極大幫助，可加強提供雙封塞水力試驗位置規劃之依據；(4)目前台灣地區利用較先進探測技術在坡地進行詳細的水文地質參數調查甚為缺乏，惟此調查成果對坡地穩定度分析中水文地質概念模型建置，扮演關鍵角色，建議於重點崩塌地研究計畫執行時，可一併納入本文所提之地下探測技術，藉以評估坡地裂隙岩體內複雜多樣之水文地質特性資訊。

參考文獻

- [1]許世孟、顧承宇、鍾明劍、李錦發、蘇泰維 (2008)，「岩盤工址之水力特性調查與案例應用」，土工技術，第115期，第39-48頁。
- [2]李錦發、魏正岳、林明旻、黃健政 (2004)，「數值航測應用於山崩調查-以紅菜坪地滑為例」，經濟部中央地質調查所報告，台北。
- [3]黃安斌、林慶偉、林銘郎、董家鈞 (2005)，「紅菜坪地滑監測系統建立與變形機制研究(1/2)」，經濟部中央地質調查所報告，台北。
- [4]黃安斌、林慶偉、林銘郎、董家鈞 (2006)，「紅菜坪地滑監測系統建立與變形機制研究(2/2)」，經濟部中央地質調查所報告，台北。
- [5]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)」，經濟部中央地質調查所，台灣。