

岩盤工址之水力特性調查與案例應用

許世孟 顧承宇 鍾明劍

中興工程顧問社大地工程研究中心

蘇泰維 李錦發

中央地質調查所

摘要

台灣地區因活躍的造山運動造成岩層之破碎度高且節理發達，伴隨充沛之雨量，以致岩盤中之地下水儲存量豐富。根據以往工程案例之經驗，岩盤內複雜之水文地質條件與不可預期之湧水常造成施工困難。另近年來，集集大地震後接續之颱風豪雨事件所引致之山崩土石流災害頻繁，亦顯示水文地質特性係影響坡地穩定之主因，有必要進行詳細之調查評估。有鑑於此，本文介紹岩盤工址水力特性之調查方法，藉由整合孔內影像探測設備及雙封塞水力試驗設備達到岩盤工址水力特性調查目的。孔內影像探測儀主要辨識鑽孔岩層狀況及裂隙分佈情形，探測影像除了補充區域地質資料外，同時提供後續裂隙岩體水力試驗規劃依據；雙封塞試驗設備則藉由封塞阻隔各種岩體裂隙構造，量測其水力特性變化。最後，本文以一岩盤工址水力特性調查案例進行應用說明。

關鍵字：岩盤、水力特性、孔內影像探測儀、雙封塞試驗。

SITE INVESTIGATION OF HYDRAULIC PROPERTIES FOR ROCK MASSES

HSU, SHIH-MENG KU, CHENG-YU CHUNG, MING-CHIEN

GEOTECHNICAL ENGINEERING RESEARCH CENTER, SINOTECH ENGINEERING CONSULTANTS, INC.

SU, TAI-WEI LEE, JIIN-FA

CENTRAL GEOLOGICAL SURVEY, MOEA

ABSTRACT

Taiwan is an active mountain belt created by the oblique collision between the northern Luzon arc and the Asian continental margin. Fissures, joints, beddings, and even faults prevail in most of mountainous areas. The geological characteristics and plentiful precipitation result in abundant groundwater stored in aquifer. According to the past engineering experiences, complex hydrogeological conditions and unexpected water inflow may cause the failure of construction. In addition, the devastating Chi-Chi earthquake and the following typhoon events have demonstrated that hydrogeological conditions are the major cause for triggering geohazards such as landslides and debris flows. It stimulated and raised the importance of the study for investigating hydraulic properties for rock masses. This paper introduces an investigation technique on the hydraulic properties of rock masses using a borehole televiewer and double packer system. The borehole televiewer can be used to identify lithology and fractures in open boreholes. The image data not only provide geological data of a study area, but also bring information to arrange test sections of hydraulic tests. The double packer system utilizes two packers to isolate a portion of borehole for identifying hydraulic properties of various geological structures. The proposed investigation technique was applied in a test borehole with the depth of 60 m to conduct hydraulic tests for characterizing the hydraulic properties of fractured rocks.

KEY WORDS : rock masses, hydraulic property, borehole televiewer, double packer test.

一、前言

台灣地區因活躍的造山運動造成岩層之破碎度高且節理發達，伴隨充沛之雨量，以致岩盤中之地下水儲存量豐富。根據以往工程案例之經驗，如雪山隧道、新永春隧道、西寶水力發電地下廠房、碧海水力發電頭水隧道、與曾文越域引水隧道等，常因岩盤中複雜之水文地質因素與不可預期之湧水造成施工困難(陳昭旭等，2001；楊豐榮等，2007)。另近年來，集集大地震後接續之颱風豪雨事件所引致之山崩土石流災害頻繁(李錦發等，2007)，亦顯示水文地質特性係影響坡地穩定之主因，有必要進行詳細之調查評估。有鑑於此，如何於規劃調查階段或是施工階段強化水文地質調查項目以提升調查精度係目前岩盤工址水文地質調查之重要議題。

由於裂隙岩體本身存在許多複雜構造及岩性差異，導致所對應的水力特性也隨之不同，此外，岩體內裂隙本身大小、密度、與連通性均會影響岩體的水力特性(Singhal et al., 1999)。故岩盤工址水文地質調查工作最重要之工作項目即為裂隙岩體之水力特性調查，以獲取岩盤工址之水文地質參數資料。惟有準確掌握水力特性，才可評估裂隙岩體內複雜多樣之地下水滲流行為，進一步減低岩盤工址工程災害之風險。

岩盤工址之水力特性多透過現地水力試驗(Hydraulic test)方式進行調查，一般水力特性調查方法多以呂琴試驗(Lugeon test)為主，該試驗係配合鑽孔深度調查不同岩體之透水性(或水密性)，惟無法提供特定深度岩體構造區段之基本資料且其分析之方法固定，對於裂隙岩體複雜多樣之含水層內地下水流動分析有相當限制。此外，裂隙性地層內水文特性會受到尺度效應(Scale effect)影響，呂琴試驗其整體試水量小且試水時間短，導致整體試水影響範圍較小，較難得到合理的大區域水文地質參數資料。為克服以上論述之困難，雙封塞水力試驗系統可以被應用來進行相關水文地質參數調查工作，且與此系統搭配試驗方法與試驗資料分析理論也較多元化(NRC, 1996)。國內應用此系統進行水文地質參數調查

工作案例有台北縣平溪鄉附近場址調查(蔣立為等人，1988)、台中大坑山區場址調查(許世孟等人，2006)、曾文越域引水隧道工址調查(Hsu et al., 2007)等，目前相關之應用仍不普遍。然而在國際上，雙封塞水力試驗系統已廣泛的應用於裂隙岩體之工址案例，以調查各種不同之地質構造下，水力特性之變化(NRC, 1996; Singhal et al., 1999)。

本文主要目的係介紹岩盤工址水力特性之調查方法，藉由整合孔內影像探測設備及雙封塞水力試驗設備達到岩盤工址水力特性調查目的，最後並以草嶺崩場地之裂隙岩體水力特性調查進行案例應用。

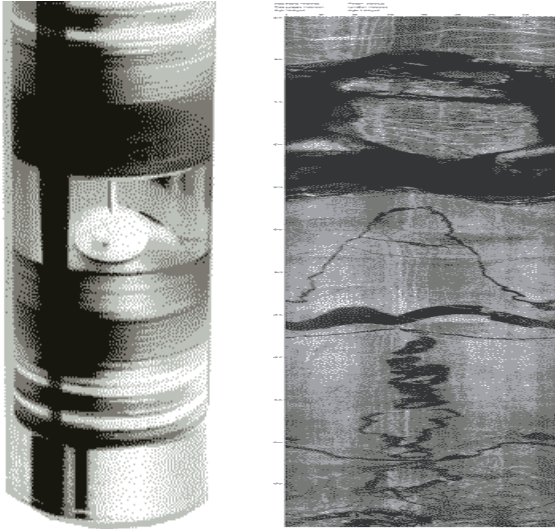
二、岩盤工址水力特性調查設備

2.1 孔內影像探測設備

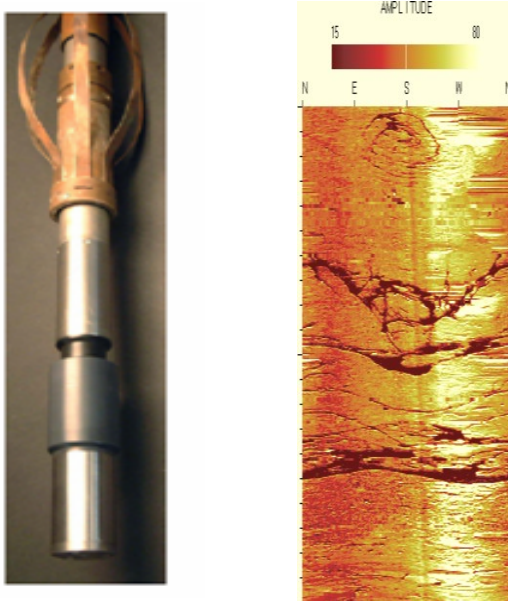
以往孔內弱面的位態調查，多藉由檢視鑽孔岩心，以統計弱面分佈、位態狀況等。但傳統岩心調查方法，存在以下之限制包含：(1)無法檢核岩心箱內鑽孔岩心錯置問題；(2)對於空穴、弱面內寬、易流失之夾心等情形，不易透過岩心檢視得知；(3)當岩心破碎或無法提取時，即無法了解地下地質狀況，然而該區段往往可能是調查的重點區域；(4)不易或無法判斷岩心顯示之弱面為原生或為施鑽過程中之機械破壞導致之破裂。為改善上述限制，本研究採用孔內影像探測設備進行孔內岩體位態調查。

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、節理及裂隙分佈及位態等資料。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一所示，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，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二所示。



圖一 光學式孔內探測儀(左)及探測影像(右)

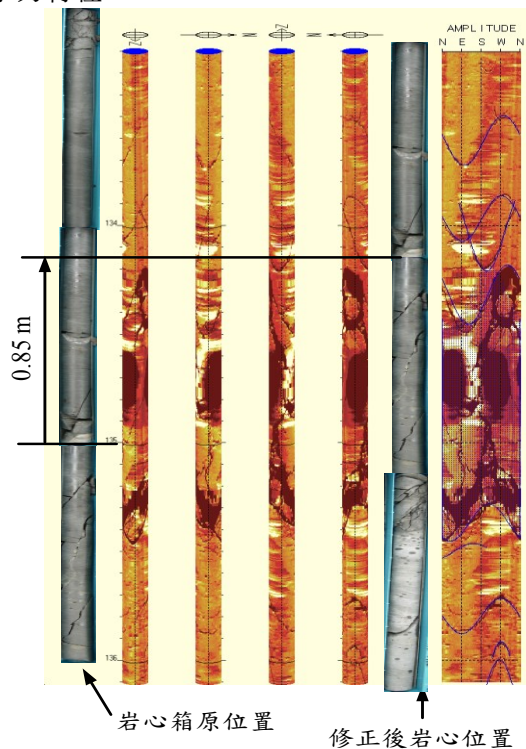


圖二 音射式孔內探測儀(左)與探測影像(右)

圖三為鑽孔岩心與孔內探測影像之比對，本鑽孔深度為250公尺，比對結果顯示鑽孔於深度133.2至136.1 m處，鑽孔岩心較孔內探測影像位置往下偏移0.85 m(中興工程顧問公司，2005)。此誤差推測可能源於鑽探岩心置入岩心箱內時，完整岩心需加以折斷再行置入岩心箱時造成

間隙，另破裂岩心取出地表解壓後弱面裂隙空間增加，常造成岩心箱鑽孔岩心之位置較實際正確岩心深度往下偏移，若鑽孔深度愈深或是地質破碎程度愈高，則岩心偏移量相對增加。如果採用孔內影像探測設備於岩心弱面的位態調查將可避免傳統岩心調查方式的缺陷。

由於孔內影像掃描設備主要提供孔內岩體位態調查，目的在獲取鑽孔岩層狀況，節理及裂隙分佈情形。因此，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。結合孔內影像探測設備於雙封塞水力試驗，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。

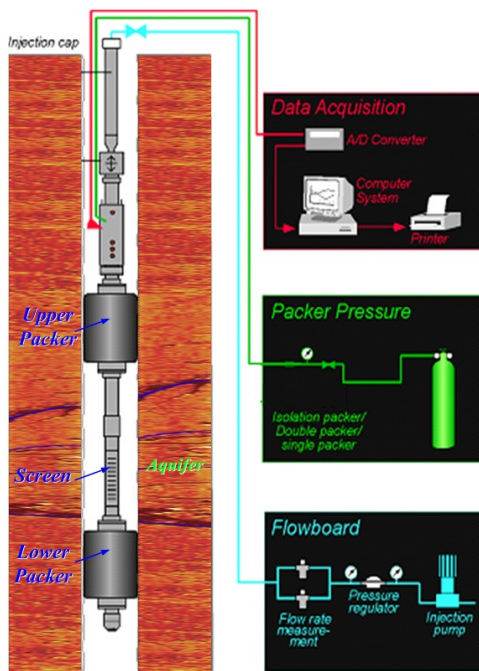


圖三 孔內攝影影像與鑽孔岩心比對結果

2.2 雙封塞設備

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。

圖四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、高壓閥門及高壓充氣管；(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。

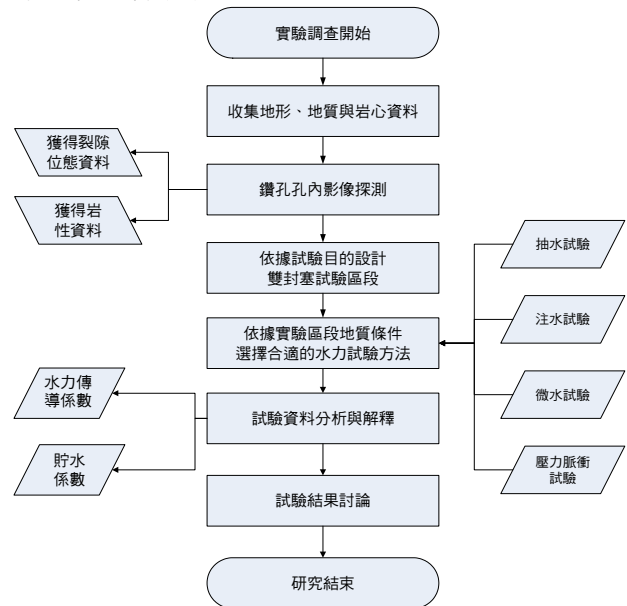


圖四 雙封塞水力試驗設備示意圖

三、岩盤工址水力試驗與參數評估

岩盤工址水力試驗主要在調查裂隙岩體的水文地質參數，透過該試驗了解裂隙岩體之水力特性，如能準確掌握其特性，對於面對岩盤相關

工程問題時，將可降低水文地質不確定性，以利後續水文地質分析評估之準確度。進行水文地質參數調查工作時，其調查流程為(1)收集地形、地質與岩心資料；(2)進行孔內影像探測；(3)設計雙封塞試驗區段；(4)依據封塞試驗區段挑選合適的試驗方法；(5)試驗資料分析；(6)結果討論，試驗參數調查流程如圖五所示。本節將針對試驗目標規劃、鑽孔內水力試驗及水力地質參數分析等內容進行說明。



圖五 水文地質參數調查流程圖

3.1 岩盤工址水力試驗規劃與設計

岩盤工址水力試驗主要目的係推求裂隙岩體的水力傳導係數 (Hydraulic conductivity, K)，試驗所得之水文地質參數資料，將作為評估裂隙岩體內複雜多樣之地下水滲流行為之主要依據。規劃試驗之前，必須確認計畫目的及計畫區域的狀況，瞭解計畫目的可初步規劃水力試驗調查方向；計畫區域的狀況可知研究區域的地質條件，並從中獲知水力試驗的困難度，在規劃之前可提前準備相關因應措施。

一個完整的試驗規劃包括：(1)收集計畫區域及現存鑽孔的地質及水文條件：瞭解地下岩體的岩性及含水層的幾何形狀以協助試驗資料的分析與解釋；(2)鑽孔孔內影像探測：透過孔內影像探測獲取鑽孔岩層狀況，節理及裂隙分佈之確切位置，以利後續鑽孔水力試驗位置規劃；(3)試驗

位置的選擇：依據實驗目的從孔內攝影影像來挑選試驗位置，例如試驗目的是獲取主要含水層之岩體透水性，則須選擇多裂隙區段進行雙封塞水力試驗；(4)試驗方法的選擇主要依據以下三原則行之，分別為試驗經費、試驗場址地質條件及試驗方法，於試驗方法之選擇上儘量使所獲取之現地試驗水力傳導係數可代表較大區域之岩盤工址水文地質特性。此外，如地質條件允許執行抽水試驗情況下，必須同時選定一個合適的抽水速率進行抽水試驗；(5)試驗時間：試水時間必須足夠，以抽水試驗為例，Hamill and Bell (1986)和Kruseman and de Ridder (2000)曾對抽水試驗提出不同含水層類型所需試驗時間，例如侷限含水層、滲漏含水層與非侷限含水層分別為24小時、48小時及72小時，在低滲透性裂隙岩體則為10至15小時。

3.2 單井水力試驗種類與試驗步驟

雙封塞試驗可分單井及複井水力試驗，因本文之主題著重在岩盤工址之水文地質試驗，研究區域有著工作環境險惡與調查經費昂貴之特性，故一般而言，調查方式多選擇單井的水力試驗為主，雖然單井水力試驗並無法像複井水力試驗得到較多含水層相關資料，但它有著可行性較佳、經濟、及實驗時間短之優勢。

一般單井雙封塞水力試驗有四種試驗方法：(A)定流量(Constant flow test)；(B)定水頭(Constant head test)；(C)微水試驗(Slug test)；(D)壓力脈衝試驗(Pressure pulse test)。傳統上，試驗方法的選擇是依據(1)試驗區段的水力傳導能力(地質條件)；(2)水文地質參數所代表的岩體區域；(3)可支配時間(計畫費用考量)；(4)儀器設備。以下分別敘述各種方法操作流程及適用性，並比較各種方法的優缺點。

(1)定流量試驗

定流量試驗即所謂抽水試驗，係指利用抽水泵浦將地下水由含水層汲取至抽水井中，再揚昇至地表，並觀測水壓洩降情形之試驗。抽水期間，地下水水壓面(Piezometric surface)將形成一個以抽水井為中心之三維洩降錐。抽水試驗可以全井抽水或針對某一區段進行雙封塞試驗，在

進行區段封塞試驗時，試驗者需特別注意封塞段的地質狀況，如該試驗段為低滲透性岩體，即可能面臨無水可抽的狀況發生，導致試驗失敗，因此在進行水力試驗前，需先透過岩心資料或孔內影像探測結果，評估封塞段的岩體滲透性，以便選擇合適的試驗方法進行水力參數調查。

(2)定水頭試驗

定水頭試驗也稱定水頭注水試驗，在固定水頭下，由地表將水注入於井中，水開始慢慢滲入周圍岩體，紀錄水滲入岩體之流量隨時間的變化，此結果可反求含水層的水文地質參數。注水試驗施作時，可採用雙封塞設備，在鑽孔中封住一試驗段，以探討特定區段之水力性質。本試驗方法適合於低滲透性岩盤區段，但所得的水力傳導係數相對於抽水試驗代表較小區域的試驗岩盤。

(3)微水試驗

微水試驗係指將一定體積之水量灌入(Inject)或抽出(Withdraw)井中，使井管內水位上升或下降，進而升高或降低周圍含水層之水壓，藉由記錄水壓回復至初始狀態之過程，求取含水層水文地質參數之試驗。微水試驗注入或移出之水量不需過大，惟所求取之參數由於水位變動範圍小，故僅能代表井體周圍局部範圍內之含水層特性，而該含水層特性易受井體施工擾動之影響，故使用微水試驗結果時需評估其代表性。對於超低滲透性岩體，微水試驗卻有試驗時間過長的缺點。

(4)壓力脈衝試驗

壓力脈衝試驗類似微水試驗，惟一不同是快速施加一額外水壓，然後關掉流量控制閥，直接觀測該額外壓力恢復狀況。試驗所需時間是取決於試驗區段岩體的傳導性及該系統壓縮性，其中系統壓縮性與流體壓縮性及封塞材料降伏性有關(Neuzil, 1982)，因為試驗過程中水頭壓的恢復是由系統壓縮效應所控制，而非套管中的液體實際進入岩體所造成，所以壓力脈衝試驗所需時間會比微水試驗所花時間較短。然而，由壓力脈衝試驗獲得的水力傳導係數所代表試驗岩盤體積會比微水試驗來得小，雖然這是此方法缺點，但在超低滲透性的含水層中，壓力脈衝試驗會是

一個較經濟、高效率的方法。

依據上述四種單井水力試驗方法及其優點，為能使現地試驗之水力傳導係數能代表較大區域之試驗岩盤，試驗規劃應以抽水試驗為主，當地層緊密遭遇無水可抽情況，改以注水為主；當雙封塞設備中流量計量測不到流量變化時，即無法偵測流量進入岩體情況下，則以微水試驗為主；如微水試驗過程中水位洩降很慢，則代表試驗區段岩盤之滲透性相當低，則採壓力脈衝試驗完成現地水力試驗調查工作。

整合上述試驗方法可歸納現地試驗之步驟如下：

(a) 利用壓力脈衝試驗方法，以額外施加壓力(P_0)之恢復時間長短測試試驗區段岩盤透水性；

1. 當流量閥門關閉後，如果 P_0 瞬間恢復至零，代表岩盤滲透性良好，可採用抽(注)水試驗方法；

2. 如果 P_0 恢復時間在2至5分鐘內(依據本研究的經驗所定義)，代表岩盤滲透性較差，可先採用注水試驗，如果流量計讀取不到注水流量下，再採用微水試驗完成試驗；

3. 如果 P_0 恢復時間相當緩慢，代表岩盤滲透性非常低，則採用壓力脈衝試驗方法；

(b) 依據步驟(a)岩盤滲透性診斷試驗結果，選定合適水力試驗方法，進行水力試驗工作，相關試驗方法可參考上述試驗方法論述內容；

(c) 紀錄水位洩降對時間關係(抽水試驗)；流量隨時間關係(注水試驗)；水頭壓力對時間關係(微水試驗及壓力脈衝試驗)。

此外，雙封塞水力試驗成功與否之重要的關鍵在於試驗過程中封塞與孔壁是否有滲漏發生，一但有滲漏但未察覺，利用此實驗數據進行水文地質參數分析，所得的結果將不可靠。為確保每組雙封塞水力試驗資料的正確性，在試驗過程中可採取兩個方式進行檢驗，一是試驗過程中觀測地下水水位是否從孔口溢出；二是觀測上封塞水壓計與下封塞水壓計是否有異常，通常如果封塞未封住孔壁，壓力計之壓力會產生隨時間上升之情形。試驗過程中一旦有任一檢驗點未通過時，需立刻停止試驗，檢討滲漏原因及檢查設備，直到發現解決方式後，才開始進行試驗。

3.3 資料分析方法

現地水力試驗所得資料可利用現有理論方法(Dawson et al., 1991; Kruseman et al., 2000; ASTM制定現地水力試驗標準分析方法)解釋現地試驗所紀錄之試驗資料，藉以推估裂隙岩體含水層水文地質參數。每種理論模式代表水力試驗過程中在某種地質構造條件下可能出現之地下水流動行為，綜觀目前理論模式包含的含水層型態除裂隙含水層外，尚有侷限、非侷限、滲漏含水層等型態。此外，試驗資料可能隱含孔徑(Well-bore)、孔壁(Skin)和邊界效應之影響，在模式選擇上必須一併考慮，因此試驗資料分析重點在辨識含水層型態及孔徑、孔壁和邊界等效應存在與否。

基於地質之不確定性，僅採用單一的理論模式分析現地水力試驗資料潛藏許多之不確定性，考量含水層的異質性及非等向性，應從試驗所得結果透過各種不同之分析模式以進行資料定量和定性之分析。定量分析可得水文地質之參數值，而定性分析可藉由理論模式以解釋目前試驗含水層的型態(侷限、非侷限、滲漏或是裂隙含水層等)及試驗過程中孔徑、孔壁和邊界效應存在與否之辨識，以推估最符合岩盤工址之水文地質參數。

現地水力試驗所獲得之試驗資料，可以理論模式進行手動之圖解法解算或採既有之數值分析程式，如AQTESOLV(Duffield, 2004)等進行自動匹配，匹配過程係找出某一理論模式與觀測資料具最小誤差，求解過程以自動化行之，故可迅速利用不同之解析解得到對應水力參數值，取代傳統利用手動之圖解法。

四、現地岩盤水力試驗案例應用

4.1 試驗場址描述

本文之案例應用係以位於雲林縣古坑鄉的草嶺崩場地進行說明，草嶺崩場地過去曾發生多次崩塌，均為地震或豪雨引致之滑移，崩塌土石亦多次阻塞河道形成堰塞湖。本區域屬大型順向坡，且清水溪向下刷深造成坡腳見光，而層面控

制歷次大崩塌的滑動面(經濟部水利署，2000)。由於草嶺大崩山邊坡目前仍有數處坡度甚陡之崩崖，崩崖高度約為25~35 m，除最上方之崩崖為殘留之堀番山頭南緣外，其餘之崩崖坡頂即為平整裸露之岩坡，坡頂斷裂之岩板常有地面水積蓄流動，由於各段岩坡之坡腳已成見光現象，未來均有向下坍塌潛勢，故該地區之地滑機制及地滑潛勢仍值得持續進行調查與研究。因草嶺大崩山的範圍甚廣，故本研究僅針對局部區域進行調查與分析，圖六為其範圍圈劃與地質鑽孔佈置圖。



圖六 試驗場址範圍圈劃及地質鑽孔佈置圖

本案例於試驗場址內共施鑽CH-02(60 m)、CH-04(120 m)、CH-06(50 m)等3個地質調查孔。由區域地質圖初步可研判草嶺崩塌地出露地層由老而新分別為：中新世晚期之十六份頁岩與大窩砂岩、上新世錦水頁岩與卓蘭層、更新世階地堆積層，以及全新世之沖積層與崩積層等。錦水頁岩主要由青灰色純淨之頁岩、砂質頁岩或粉砂岩所構成，偶夾薄層砂岩；卓蘭層為山崩區主要出露岩層，由厚層之淡灰色泥質砂岩，間夾厚薄不等之灰色頁岩或粉砂岩所組成。

4.2 孔內岩體裂隙位態調查與水力試驗區段規劃

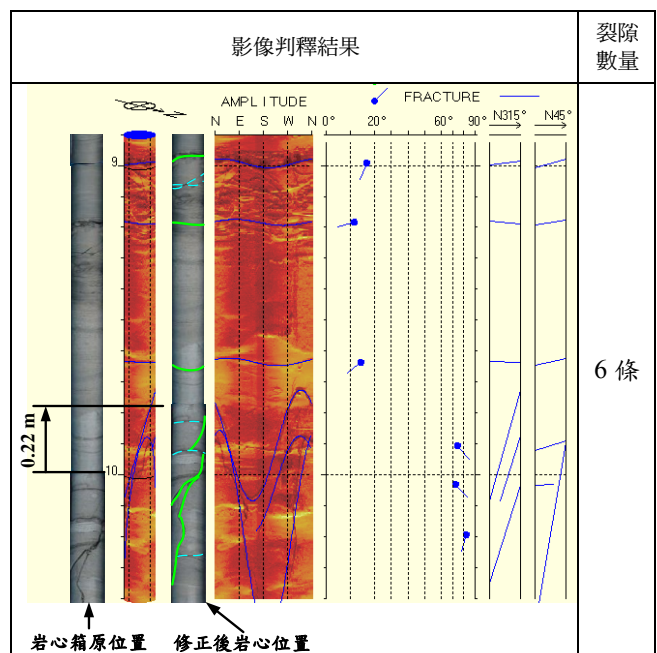
孔內岩體裂隙位態調查採音射式孔內影像探測儀進行，超音波探測需藉由液體(如地下水)作為傳遞媒介(可藉由迴水暫時提高地下水位)，因此，各鑽探孔的實際有效攝影範圍會受限於地下水位高程及套管理設深度。孔內岩體裂隙位態調查結果將用於研判岩層狀況，提供節理及裂隙

分佈之確切位置，並供雙封塞水力試驗挑選試驗區段之用。本次試驗目的為獲取主要含水帶之岩體透水性，因此試驗區段挑選時，主要以多裂隙區段為主，再輔以完整岩心段進行比對。受限於篇幅，本文僅以CH-02鑽孔為例，說明孔內岩體裂隙位態調查成果與水力試驗區段規劃考量。

表一 草嶺CH-02鑽孔岩心地質描述及弱面分佈狀況

深度(m)	岩性描述	弱面數量
00.0 - 00.5	回填崩積層，灰色粉土夾岩塊。	-
00.5 - 04.0	輕微風化棕灰色砂岩，多處有銹染，富砂棒、貝屑及生物擾動痕。	1
04.0 - 19.0	灰色砂岩偶夾頁岩，質地中等堅實，偶有貝屑生物擾動痕跡，有一組高角度節理，節理面有銹染，局部呈現輕微擠壓破碎帶。	8
19.0 - 31.6	灰色砂頁岩互層，質地中等堅實，岩心完整，偶有層間破碎弱面夾少量泥縫。	12
31.6 - 35.8	灰色頁岩間夾砂岩，質地中等堅實，岩心完整，偶有層間破碎弱面夾少量泥縫。	1
35.8 - 38.0	灰色頁岩間夾砂岩，質地中等堅實，岩心完整，層理分明，部份呈紋層狀。	0
38.0 - 46.2	灰色頁岩偶夾砂岩，質地中等堅實，岩心完整，與砂岩層理分明，少部呈紋層狀，層間偶有破碎夾泥縫。	2
46.2 - 56.8	灰色頁岩偶夾砂岩，質地中等堅實，岩心完整，局部破碎，偶有高角度節理，節理面夾有薄泥。	22
56.8 - 58.1	灰色頁岩偶夾砂岩，岩心多處呈輕微破碎狀，節理面夾有層縫泥。	10
58.1 - 60.0	灰色頁岩，岩心完整，質地中等堅實新鮮。	1

表二 雙封塞水力試驗區段範圍及影像判釋結果(試驗區段：8.9-10.4m)



經由音射式孔內影像探測儀所擷取之影像，須先進行影像處理以確保資料之可靠度。影像處理流程包含磁性異常區域判斷及修正、鑽孔軸偏角修正、振幅影像偏心化修正等。待完成上述三項影像處理修正後，可進一步進行地質構造判斷及標示，即可瞭解弱面深度分佈情形。CH-02的鑽孔岩心地質描述及弱面分佈狀況詳列如表一，由地質鑽探成果可知CH-02鑽孔地表下20 m內多為卓蘭層砂岩，地表下20至30 m間為砂頁岩互層的漸變區，地表下30至60 m以錦水層頁岩為主。在挑選試驗區段時，主要係考量地層岩性的不同與裂隙數量的多寡。本試驗規劃分別於地表下8.9至10.4 m、22.2至23.7 m、26.5至28.0 m、53.3至54.8 m區段進行雙封塞水力試驗。此外，因CH-02內之裂隙多集中於地表下40至60 m，故另於地表下41.6至60.0 m進行一組單封塞水力試驗，求取該區段之水力特性。表二係以地表下8.9至10.4 m為例，展示其影像判釋結果。

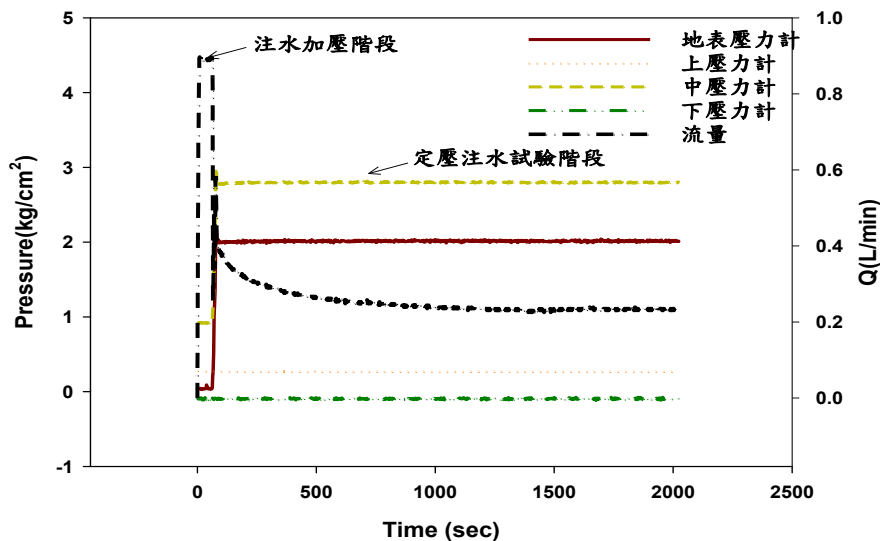
4.3 水力試驗結果與討論

圖七顯示本雙封塞系統利用上、下水壓計檢驗封塞與孔壁滲漏發生與否實例，此試驗案例位置是在草嶺崩場地之CH-02鑽孔，試驗區段為8.9至10.4 m之間所進行的一組雙封塞定水頭注水試驗之過程，圖中顯示不同位置壓力計與流量計

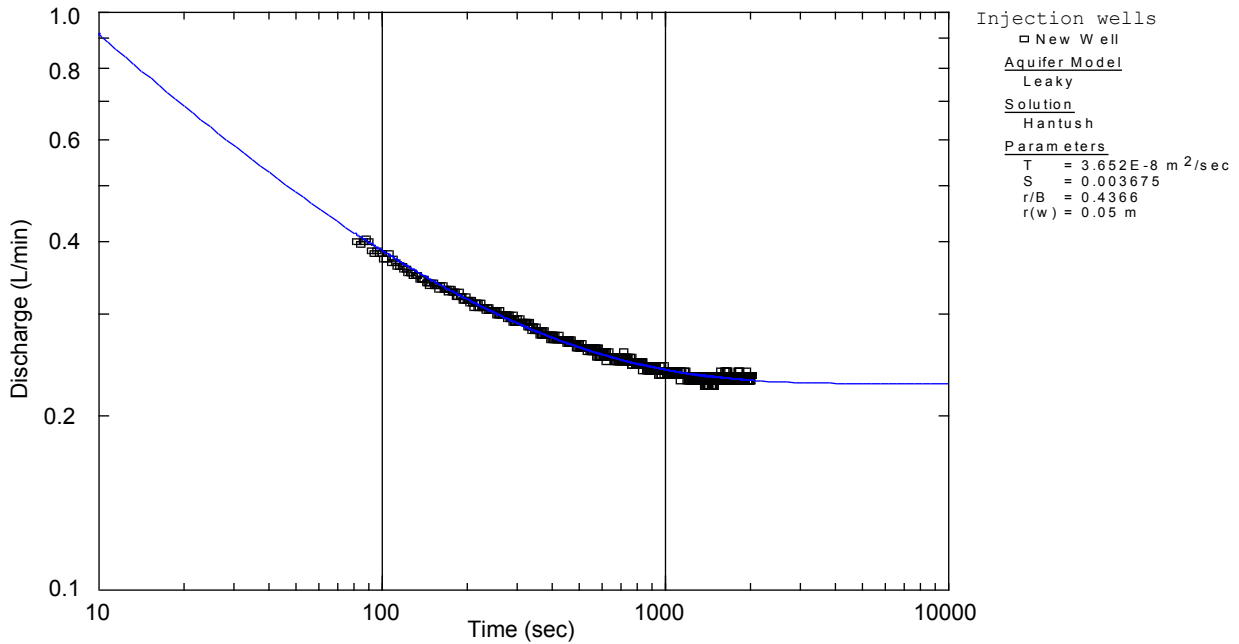
隨時間的變化，從上壓力計與下壓力計隨時間的變化結果，發現兩壓力計在試驗過程並無增加，因此我們可以判定封塞與孔壁並無滲漏發生，可視為一組成功的水力試驗。

草嶺崩場地之CH-02鑽孔共計進行四處較具代表性的岩體區段施作水力雙封塞試驗，由於本試驗的場址地質條件與地下水位兩因素，抽水試驗無法施作，故注水試驗為主，針對低滲透性岩體以微水試驗及壓力脈衝試驗為主，以下針對本次試驗成果作一說明。

圖八是在草嶺崩場地針對雙封塞試驗區段:8.9至10.4 m注水試驗所獲得之試驗資料與利用上述之水文地質參數分析流程所得的水文地質參數分析成果，從試驗資料與理論模式匹配的成果顯示理論曲線大致與量測值吻合。圖八中 r/B 定義為含水層滲漏係數； $r(w)$ 為鑽孔半徑。表三則是草嶺CH-02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、資料分析獲得理論解、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地質構造進行小範圍的水力傳導係數調查。而表中各理論模式則是間接代表各試驗區段含水層的型態及試驗過程中是否遭遇孔徑(Well-bore)、孔壁



圖七 注水試驗資料分析成果(試驗區段：8.9—10.4m)



圖八 雙封塞定水頭注水試驗之過程(試驗區段：8.9—10.4m)

表三 草嶺CH-02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	水力傳導係數 (m/s)	貯水係數
8.9-10.4	雙封塞	1.5	注水	Hantush	Leaky	2.43×10^{-8}	3.68×10^{-3}
22.2-23.7	雙封塞	1.5	注水	Baker	Confined	4.60×10^{-9}	1.50×10^{-5}
26.5-28.0	雙封塞	1.5	壓力脈衝	KGS model	Confined	6.78×10^{-10}	6.79×10^{-5}
53.3-54.8	雙封塞	1.5	壓力脈衝	KGS Model w/skin	Confined	6.75×10^{-11} (岩體, matrix)	1.05×10^{-6} (岩體, matrix)
						3.28×10^{-11} (孔壁, skin)	5.03×10^{-6} (孔壁, skin)
41.6-60.0	單封塞	18.4	微水	KGS Model w/skin	Confined	4.76×10^{-9} (岩體, matrix)	1.0×10^{-10} (岩體, matrix)
						1.02×10^{-8} (孔壁, skin)	1.04×10^{-4} (孔壁, skin)

(Skin)和邊界等效應之影響，例如試驗區段 53.3-54.8 m及 41.6-60.0 m是受到孔壁效應之影響，其原因可能是孔壁周遭存在泥漿、或其他物質所造成。草嶺CH-02鑽孔的雙封塞水力試驗結果得知地表下9至55 m的水力傳導係數介於 10^{-8} m/s到 10^{-11} m/s數量級之間，依據裂隙岩體構造之不同而有所差異。此外，裂隙本身的連通性與裂隙中包含之材料特性也會影響水力傳導係數，例如試驗區段8.9至10.4 m與22.2至23.7 m從影像探測資料顯示在1.5 m試驗區間皆有6組裂隙，但岩體透水性差約1個數量級。從41.6至60 m單封塞水力試驗結果顯示本區段(約19 m)之岩盤透水性約為 4.76×10^{-9} m/s。

五、結論

本文針對岩盤工址之水力特性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，本文所提之岩盤工址水力調查技術，適合獲得岩體在不同地質構造下之水力特性狀況；(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，可提供雙封塞水力試驗位置規劃之依據；(3)本研究試驗結果發現，岩體中包含的裂隙越多，岩體之滲透係數有越高之趨勢，但裂隙中如含有夾泥等材料，會使岩體滲透能力減弱。此外，如裂隙之連通性不佳，同樣會使岩體滲透能力減弱；(4)目前台灣地區在裂隙岩體相關的水文地質參數調查甚為缺乏，建議於重點地區之地質鑽孔調查時，可一併納入孔內影像探測

與雙封塞水力試驗，唯有準確掌握岩盤工址之水力特性，才可評估裂隙岩體內複雜多樣之地下水滲流行為，進一步減低岩盤工址工程災害之風險。

參考文獻

- 中興工程顧問股份有限公司 (2005)，「曾文水庫越域引水工程計畫－隧道工程補充地質調查試驗及評估報告」，經濟部水利署南區水資源局，台灣。
- 中興工程顧問社 (2007)，易淹水地區上游集水區地質調查與資料庫建置第1階段實施計畫「集水區水文地質對坡地穩定性影響之調查評估期中報告」，經濟部中央地質調查所，台灣。
- 陳昭旭，李振誥 (2001)，「隧道湧水災害之水文地質調查及其防治處理措施」，地工技術，第87期，第81-92頁。
- 楊豐榮、顧承宇、譚志豪、許世孟、鍾明劍等 (2007)，「曾文越引隧道工程水文地質之調查與分析評估」，地工技術雜誌，第112期，第69-80頁。
- 中興工程顧問社 (2001)，「隧道水文地質調查準則(含解說)」，中華民國隧道協會，台北。
- 李錦發、邱禎龍、魏正岳、李彥良、蘇泰維、黃健政 (2007)，「山崩與土石流調查與山崩潛勢分析」，地質環境與資源研討會論文集，第79-86頁。
- 許世孟、翁孟嘉、曾慶恩、顧承宇、譚志豪 (2006)，「應用雙封塞水力試驗探討裂隙岩體之水力特性」，2006岩盤工程研討會論文集，199-208。
- 蔣立為、歐陽湘、杜培欣 (1988)，「地下水文地質特性參數量測－雙封塞技術之應用」，地工技術，第69期，15-24。
- 經濟部水利署 (2000)，草嶺崩塌之處理對策評估，專案研究報告，經濟部水利署，台北市。
- ASTM D 4630, "Standard Test Method for Determining Transmissivity and Storativity of Low Permeability Rocks by In Situ Measurements Using the Constant Head Injection Test," ASTM International.
- ASTM D 4631, "Standard Test Method for Determining Transmissivity and Storativity of Low Permeability Rocks by In Situ Measurements Using Pressure Pulse Techniques," ASTM International.
- ASTM D 5912, "Standard Test Method for (Analytical Procedure) Determining Hydraulic conductivity of an Unconfined aquifer by Overdamped Well Response to Instantaneous Change in Head (Slug)," ASTM International.
- ASTM D 4104, "Standard Test Method for (Analytical Procedure) Determining Transmissivity of Nonleaky Confined Aquifers by Overdamped Well Response to Instantaneous Change in Head (Slug Tests)," ASTM International.
- DAWSON, K. J. AND ISTOCK, J. D. (1991), Design and Analysis of Pumping and Slug Tests, Lewis Publishers, Michigan, USA.
- DUFFIELD, G.M. (2004), AQTESOLVE version 4 user's guide, Developer of AQTESOLV HydroDOLVE, Inc., Reston, VA, USA.
- HAMILL, L. AND BELL, F. G. (1986), Groundwater Resource Development, Butterworths, London, pp. 344.
- HSU, S. M., CHUNG, M. C., KU, C. Y., TAN, C. H., WENG, M. C. (2007), "An Application of Borehole Acoustic Televiwer and Double Packer System to The Study Hydraulic Properties of Fractured Rocks: A Case Study in Kaohsiung, Taiwan," 60th Canadian Geotechnical Conference&8th Joint CGS/IAH-CNC Groundwater Conference, Ottawa, Canada, V.1, pp. 415-422.
- KRUSEMAN, G.P. AND DE RIDDER (2000), N.A., Analysis and Evaluation of Pumping Test Data, 2nd edn, Intl. Inst. For Land Reclamation and Improvement, Publication 47, Wageningen, pp. 377.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL (NRC) (1996), Rock Fractures and Fluid Flow: Contemporary Understanding and Applications, National Academy Press, Washington DC. 551pp.
- NEUZIL, C. E. (1982), "On Conducting the Modified 'Slug' Test in Tight Formations," Water Resources Research, Vol. 18, No. 2, pp.439-441.
- SINGHAL, B. B. S., AND GUPTA, R. P. (1999), Applied Hydrogeology of Fractured Rocks, Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, pp.151-168.