

山區地下岩層水力特性調查

-以濁水溪與北港溪流域為例

許世孟¹ 柯建仲¹ 林燕初² 黃智昭²

¹財團法人中興工程顧問社

²經濟部中央地質調查所

摘要

由於國內山區水文地質基本調查資料相當匱乏，本研究旨在針對台灣山區各種地下岩層，進行岩層水力特性調查與評估，藉此瞭解山區地下水在地下岩層之流動特性及各種岩層之蓄水能力，期能將所獲得之水文地質資訊提供岩盤工程施工、地質災害調查或山區地下水資源潛能評估時使用。

關鍵字：水力特性、水文地質試驗、裂隙特性。

一、前言

山岳地區之地質條件因活躍的造山運動造成岩層破碎程度較高、節理弱面發達，加上台灣地區雨量充沛，故地表水易沿地質弱面滲入岩層，以致岩盤內蓄積大量地下水[1]。透過山區地下岩層水力特性之調查，可藉以瞭解地下水在裂隙岩體之流動特性及各種岩層儲水能力，對於岩盤工程施工、地質災害調查與地下水資源潛能評估等問題，提供重要之水文地質資訊。然而，目前國內山區之岩層地下水及水文地質資料甚少，歸咎其原因在於調查所需經費昂貴及工作環境惡劣，連帶國內山區相關水文調查技術發展較不普遍，尚待建立。因此，本研究提出一套山區地下岩層水力特性的調查規劃，期能透過這些技術獲得山區地下岩層的水力特性，充實台灣山區水文地質資料庫，供相關工程計畫規劃或學術研究之參考。

本研究之調查工作，首先於研究區域內挑選重要且不同地質單元進行水文地質鑽探，各鑽孔於施鑽過程中及施鑽完成後，採取岩心樣本，進行一系列室內試驗，試驗包括土壤與岩石一般物理性試驗、土壤三軸透水試驗、汞泵與氮氣孔隙率測定、氣體滲透率檢測、雷射粒徑分析試驗、X光繞射試驗以及岩象薄片分析等，於鑽探完工後再進行現場孔內水文地質試驗，包括孔內裂隙岩體位態調查、孔內井測調查、孔內波速調查、孔內攝影、孔內地下水流速及流向調查及封塞水力試驗，透過以上試驗獲取研究區域內各不同地層之水文地質特性。最後整合水文地質鑽探與試驗調查之成果，探討山區地下岩層各項水文地質參數與岩性、地質構造與地層間的關聯性，探討項目包括(1)各岩層所具備的水文地質參數特性(蓄水係數、透水係數、孔隙率、水力擴散係數)；(2)岩性與透水係數關聯性分析；(3)裂隙特性與透水係數關聯性分析。

二、研究區域概述

本研究調查範圍涵蓋濁水河流域中游段及斗六丘陵。研究區範圍東以玉山山脈向北延伸之稜線為界，其西為濁水溪沖積扇東界之丘陵地，北境為由水社大山、集集大山向西延伸而成烏溪流域之分水嶺，南以玉山、鹿林山、塔山東西延伸之高屏及曾文溪流域分水嶺為界；研究區南北長約 41.6 公里、東西寬約 35.4 公里，面積約 1577 平方公里。研究區大部份為南投縣所轄，一部份為雲林縣、彰化縣東隅以及嘉義縣北端，包括南投縣的名間鄉、竹山鎮、集集鎮、鹿谷鄉、水里鄉、魚池鄉及信義鄉，彰化縣的二水鄉，雲林縣的林內鄉、斗六市及古坑鄉，嘉義縣的大林鎮、民雄鄉、梅山鄉、竹崎鄉及阿里山鄉等 15 鄉鎮(圖 1)。此外，濁水溪自東而西貫穿本區北側，地勢大致由東南向西北遞減。區內主要地形分區，可劃分為雪山山脈(含玉山山脈)、西部衝上斷層山地及濁水溪河谷平原等[2]，以及零星的台地地形區。本研究區內之河川集水區分布主要分為濁水河流域中游段及北港河流域，濁水溪中游段之河川有陳有蘭溪、東埔蚋溪、清水溪、水里溪及日月潭等集水區；北港河流域則為虎尾溪、三疊溪。

濁水河流域內出露之地層，其生成年代由東向西逐漸年輕，流域內之主要地層及構造詳圖 2，由濁水河流域地質圖[3]可知，濁水區流域地質分區大致藉由地利斷層、陳有蘭溪斷層與水里坑斷層、車籠埔斷層與大尖山斷層此三條主要斷層線，將流域內之地層概分為四個區塊，詳細地質區分如下：

地利斷層以東地區，出露地層屬始新世至中新世地層，包括大禹嶺層、廬山層、眉溪砂岩、佳陽層、玉山主山層、達見砂岩以及十八重溪層，岩性以板劈理發達的黑灰色厚層板岩為主，夾有少量薄層變質砂岩或變質粉砂岩，眉溪砂岩與達見砂岩為其中較具厚度之變質砂岩層。

地利斷層以西至水里坑斷層以東地區，出露地層包括始新世至漸新世早期之白冷層、漸新世之水長流層。白冷層主要由白色厚層中至粗粒石英砂岩所構成，內夾薄層碳質頁岩或緻密粉砂岩，大致以砂岩為主，局部地區則為變質砂岩與硬頁岩互層。水長流層整合於白冷層之上，由暗灰色或黑灰色硬頁岩為主，偶夾有薄層暗灰色細粒泥質砂岩或粉砂岩。

水里坑斷層以西至車籠埔斷層與大尖山斷層以東地區，主要出露地層包括炭寮地頁岩、石門層、樟湖坑頁岩、深坑砂岩、南莊層、桂竹林層、錦水頁岩、卓蘭層，屬西部麓山帶之中新世至更新世沉積岩地層，受斷層與褶皺影響，又可分為數個小斷塊。炭寮地頁岩、石門層僅出露於區域北側一小部份地區，由砂岩、粉砂岩、頁岩所組成；樟湖坑頁岩以頁岩夾薄層砂岩為主要組成，深坑砂岩以塊狀砂岩夾薄層砂岩為主，主要分布於集集大山向斜軸兩側地區；出露於和社背斜軸部之和社層，其地層層序可與深坑砂岩及樟湖坑頁岩相對比，其岩性以頁岩比例較高，夾有厚度不一之砂岩，因輕度變質作用致岩質較為堅緻；南莊層與桂竹林層為本區域內出露範圍較廣泛之地層，由砂岩、粉砂岩與頁岩所組成；錦水頁岩、卓蘭層與頭嵙山層分布於濁水溪南岸地區，錦水頁岩由具球狀風化之粉砂岩或頁岩所組成，卓蘭層由膠結疏鬆之泥質砂岩、泥岩、頁岩所組成。

車籠埔斷層與大尖山斷層西至流域西緣出海口地區，由強度低、膠結鬆散之上新世晚期至更新世之卓蘭層與頭嵙山層所組成，以頭嵙山層分布較廣，頭嵙山層依據岩性可細分為上下兩個岩段，下段為以疏鬆砂岩為主的頭嵙山層香山段，上段為以礫岩為主的頭嵙山層火炎山段；卓蘭層僅分布於內林背斜與水道背斜軸部附近。另於八卦台地頂部有紅土台地堆積層，由紅土化之礫石層所組成。於濁水河流域往西之出海口有少部分全新世至現代之砂丘出露。

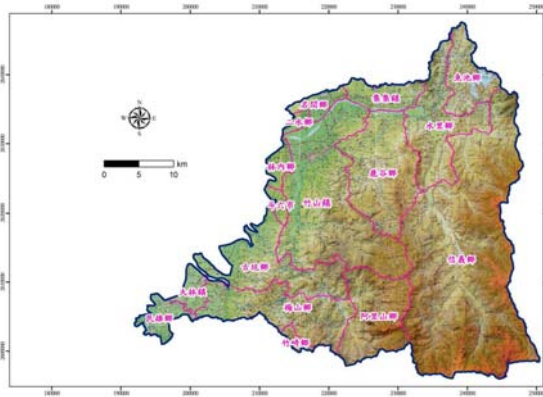


圖 1 研究區地理位置

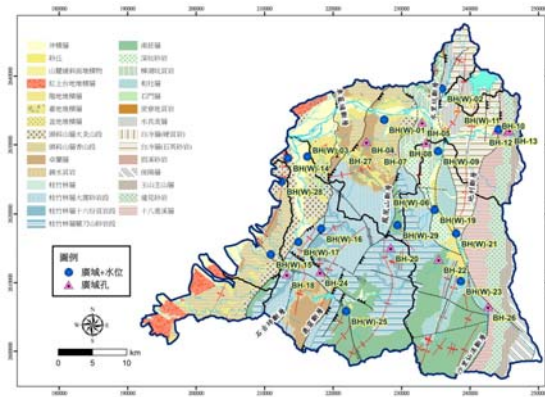


圖 2 區域地質圖[3]

三、調查方法

3.1 水文地質鑽探與鑽探布孔規劃

山區地下岩層水力特性調查首要工作即是水文地質鑽探，水文地質鑽探屬於地質鑽探的一部分，兩者差異只在鑽探場址的選擇或是後續的試驗項目，會依水文地質所需之元素納入考量。基本上，水文地質鑽探為地質調查最直接的方法，透過鑽探取樣之岩心樣本，可了解地層岩性以及不連續面分布，搭配室內試驗可獲取岩心的水文地質特性，而完成後之鑽孔，也可進行相關水文地質試驗，藉以了解地層水文地質特性，最後於孔內安裝適當監測設備，將可進行長期水文地質監測工作。

然而進行水文地質鑽探前，鑽探場址的布置就顯得相當重要。為符合調查研究之目的與最佳化的效益，本研究提出鑽孔布置原則如下：

- (1) 鑽孔布置應以公有地為主，且需考量交通路況與動線，鑽探作業安全性，以及用地取得可行性較高等區域。
- (2) 根據地調所出版之地質圖(比例尺為五萬分之一)作為底圖，依地層與地質構造所劃分出之地質單元進行布孔，並將調查範圍內依流域集水區進行鑽孔布置，其各高程分布皆須考量。
- (3) 調查範圍內主要與分布面積較廣的地層至少布置一孔，若鑽孔數量配置仍足夠時，其涵蓋面積分布較廣者或特殊地質構造區域，可視執行之可行性，予以增設之。
- (4) 為提升布孔之最佳效益，以獲取較多的水文地質單元的參數，其場址位置選擇可能獲得較多的地層單元之區域為主。
- (5) 若有特殊且重要的斷層構造區域，其上、下盤的地層至少各布置 1 處鑽孔，以利了解斷層對地下水流動扮演之角色。
- (6) 考量研究範圍內既有鑽孔位置與相關試驗資料，以及鄰近的 GPS 位移站、河川流量站、雨量站、河川與地下水質監測站、溫泉露頭等，作為爾後延伸性研究之應用。

本研究根據上述水文地質鑽孔布置之原則，於研究區域內規劃水文地質鑽探孔數共計 29 個，各鑽孔的分布如圖 2 所示，鑽孔高程介於 142m-1658m 之間。另本研究統計鑽孔位置所在地質單元，涵蓋始新世至全新世的地層地質，共計 15 種地質單元。

3.2 現地水文地質試驗

由於山區地層存在諸多複雜構造及岩性差異，往往導致所對應的水文地質特性也隨之不同，就山區地下岩層水力特性調查的觀點而言，如能透過孔內試驗來獲取山區各項水文地質

參數，除能釐清水文地質的不確定性外，亦增加了在資料評估上的精準度。有鑒於此，本研究於每一鑽孔進行一系列孔內水文地質試驗，其調查流程如圖 3 所示，依序為(A)收集地形、地質與岩心資料；(B)進行孔內攝影調查、井測及地下水流速調查；(C)彙整井測資料設計封塞水力試驗區段；(D)試驗資料分析；(E)試驗成果整合。相關調查所需的地下探測設備說明如后。

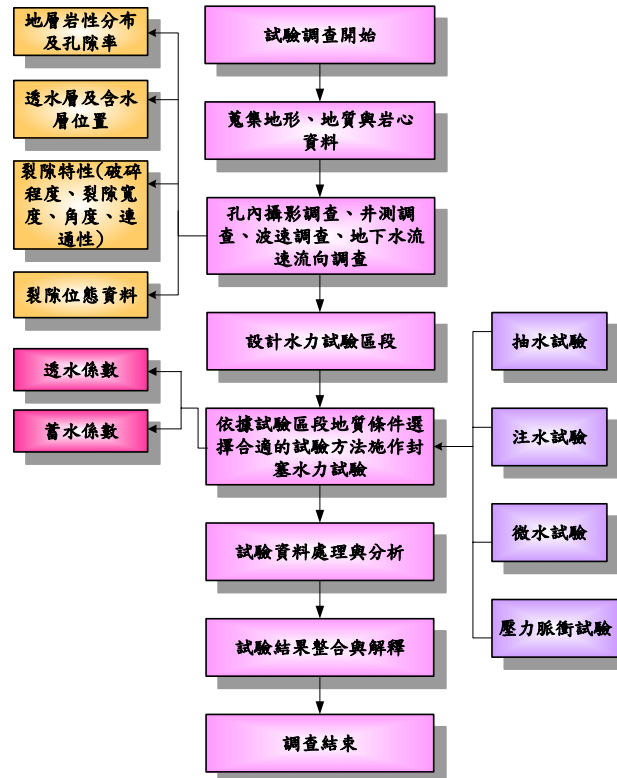


圖 3 孔內水文地質試驗調查流程

(A) 孔內井測調查：孔內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。本研究採英國 Robertson Geologging Ltd. 公司發展之電測儀 (electrical log) 及全波形聲波儀 (full waveform sonic log) 進行調查，量測訊號包含正常態電阻率 (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) 及聲波走時 (sonic travel time)。孔內井測施測原理及資料在地質上之判釋可參考中興工程顧問社「台灣山區地下水資源調查與評估技術之建立」計畫報告[4]。此外，如在岩層進行聲波井測，利用井測所測錄的走時、已知(或假設)基岩的走時及地層水走時，可推估地層的孔隙率(稱為聲波孔隙率, velocity-porosity)[5]。本研究透過上述儀器可用以界定地層岩性分布及裂隙位置、判斷地層滲透或蓄水層位置、推估地層孔隙、破碎及軟硬程度等。由於各物理訊號需藉由水做為傳遞之介質，僅能在鑽孔有地下水的條件下施測；此外，各井測方法在資料的解析上常有限制或干擾，如電阻在地層有相對極高或極低電阻出現時，電流束會偏向低電阻層流動而影響測定的電阻值[6]，故往往在調查時需透過多種資料的交互比對才能得到更為合理之結果。

(B) 地下水流速調查：地下水流速調查係用地下水流速儀來量測鑽孔內地下水流速及垂直流向

分布，可用以判定地層之滲透性、裂隙連通性及地下水的循環(補注或流出)潛勢等。流速儀須在裸孔且地下水清晰的鑽孔環境下施測，本研究採用之流速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方式的不同，熱脈衝式流速儀主要是以定點的方式量測鑽孔地下水的垂直流速及流向分布；葉片式流速儀則是連續測錄探測儀的葉片轉速。此外，流速儀的量測係為地層受鑽探解壓後各個含水單元間地下水的動態平衡(dynamic equilibrium)反應，然此是否在地層未解壓的情況下產生仍須視水力試驗結果而定。流速儀施測原理及流速流向判釋標準可參考中興工程顧問社「台灣山區地下水資源調查與評估技術之建立」計畫報告[4]。

- (C) 孔內裂隙位態調查：以往的孔內裂隙位態調查多藉由檢視鑽孔岩心以統計弱面分布與位態狀況，但岩心樣本僅能研判弱面之傾角，無法研判弱面之方位，並存在許多限制[1]。為改善人工量測限制並提供較佳的可能弱面研判成果，本研究採英國 Robertson Geologging 公司發展之音射式孔內攝影儀 (high resolution acoustic televiewer, ACTV) 搭配光學式孔內攝影儀 (optical televiewer, OPTV) 進行孔內影像裂隙位態調查，此調查主要在獲取鑽孔岩層狀況、節理及裂隙分布情形，評估岩層破碎程度與主要含水層位置，調查結果除可補充研究區域地質資料外，同時也提供後續裂隙岩體水力特性相關調查規劃之依據。兩種孔內攝影的原理可參考中興工程顧問社「台灣山區地下水資源調查與評估技術之建立」計畫報告[4]。
- (D) 封塞水力試驗：封塞水力試驗主要目的係求得求得裂隙岩體的透水係數 (hydraulic conductivity, K) 以及蓄水係數 (storativity, S)，試驗所得之水文地質參數資料，除了可以了解各種岩層及構造之水文地質特性外，也可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。過去水文地質參數調查方法以規劃 Lugeon 試驗為主，該試驗係配合鑽孔進尺調查不同深度岩體之透水性，惟無法提供某特定深度岩體構造區段之透水性，在考慮岩土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限制。為克服 Lugeon 試驗的限制，本研究配合(A)、(B)、(C)三種試驗調查成果，評估並挑選出較具代表性的岩體區段施作水力雙封塞試驗，以進行相關水文地質參數調查工作。一般單井雙封塞水力試驗有四種試驗方法：(A)定流量 (constant-flow tests)；(B)定水頭 (constant-head tests)；(C)微水試驗 (slug tests)；(D)壓力脈衝試驗 (pressure pulse tests) [7]。試驗方法之選擇則依據：(A)試驗區段的水力傳導能力 (地質條件)；(B)水文地質參數代表的岩石體積；(C)可支配時間 (計畫費用考量)；(D)儀器設備[6]。

3.3 室內試驗

鑽探所獲取之岩心除用以進行相關地質描述外，為獲取研究區域地層所屬岩性、礦物組成、物理及水力特性之基本參數，可進行進行一系列之室內試驗，試驗包括土壤與岩石一般物理性試驗、土壤三軸透水試驗、汞泵與氬氣孔隙率測定、氣體滲透率檢測、雷射粒徑分析試驗、X 光繞射試驗以、岩象薄片分析及岩石動彈性參數測定等。各項試驗的施作預定目的如表 1 所示。

表 1 室內試驗項目與施作目的

試驗項目	施作目的	試驗項目	施作目的
土壤一般物理性質試驗	量測土壤之基本物理特性，包括比重、單位重及粒徑分布等。	雷射粒徑分析試驗	利用雷射粒徑分析儀檢測未固結之大地材料 75 μ m (200 號篩)以下之粒徑分布曲線。
岩石一般物理性質試驗	量測岩石之基本物理特性，包括比重、單位重等。	X 光繞射試驗	利用 X 光繞射分析儀檢測岩體材料內微量礦物成分。
汞泵與氬氣孔隙率	利用汞泵孔隙率測定儀及氬氣	岩相薄片分析	利用偏光顯微鏡鑑定岩石薄片觀察礦

測定	孔隙率測定儀量測岩石孔隙率，提供評估地層蓄水能力。		物內部的細微結構，並藉由礦物的各種光學特性，確立地層所屬岩性之組織及所屬地層單位。
氣體滲透率檢測	利用氣體滲透率測定儀量測岩石滲透係數，評估岩層之滲透性。	岩石動彈性參數測定	為獲得基岩之壓縮波速(p 波)，藉以推估地層孔隙率。
土壤三軸透水試驗	量測土壤滲透係數。		

四、結果與討論

本文最後整合上述水文地質鑽探與各種試驗調查之成果，探討研究區內地下岩層各項水文地質參數與岩性、地質構造與地層間的關聯性，包括(1)各岩層所具備的水文地質參數特性(蓄水係數、透水係數、水力擴散係數、孔隙率)；(2)岩性與透水係數關聯性分析；(3)裂隙特性與透水係數關聯性分析。茲將各種分析成果說明如下：

4.1 各岩層所具備的水文地質參數特性

為探討調查區域各地層單元所具備的水力傳導能力及蓄水能力，本研究將各地層單元所調查之透水係數及蓄水係數分布範圍彙整如表 2 所示。

表 2 試驗區段地層與相對應之透水係數與蓄水係數分布

地質單元名稱	透水係數 K 分布範圍 ($m\ sec^{-1}$)	蓄水係數 S 分布範圍 ($m^3\ m^{-3}$)
十八重溪層 (Sp)	$1.4 \times 10^{-4} \sim 1.3 \times 10^{-8}$	$\leq 1.5 \times 10^{-6}$
水長流層 (Sc)	$6.9 \times 10^{-8} \sim 1.5 \times 10^{-10}$	$1.9 \times 10^{-3} \sim 1.0 \times 10^{-4}$
白冷層 (Pl)	$5.6 \times 10^{-5} \sim 2.3 \times 10^{-8}$	$1.5 \times 10^{-6} \sim 9.8 \times 10^{-5}$
卓蘭層 (Cl)	$4.1 \times 10^{-5} \sim 2.0 \times 10^{-10}$	$8.6 \times 10^{-4} \sim 1.5 \times 10^{-6}$
南莊層 (Nc)	$2.9 \times 10^{-4} \sim 7.0 \times 10^{-8}$	$\leq 1.5 \times 10^{-6}$
桂竹林層大窩砂岩 (Kct)	$6.2 \times 10^{-5} \sim 4.4 \times 10^{-10}$	$4.5 \times 10^{-3} \sim 1.5 \times 10^{-6}$
桂竹林層關刀山砂岩 (Kck)	$3.5 \times 10^{-5} \sim 1.7 \times 10^{-7}$	$\leq 1.5 \times 10^{-6}$
深坑砂岩 (Sk)	$1.1 \times 10^{-4} \sim 2.1 \times 10^{-10}$	$2.6 \times 10^{-3} \sim 1.5 \times 10^{-6}$
達見砂岩 (Tc)	$5.4 \times 10^{-5} \sim 2.3 \times 10^{-8}$	$2.1 \times 10^{-6} \sim 1.0 \times 10^{-6}$
樟湖坑頁岩 (Ch)	$3.4 \times 10^{-6} \sim 1.4 \times 10^{-10}$	$3.1 \times 10^{-3} \sim 1.5 \times 10^{-6}$
頭嵙山層火炎山礫岩 (Tkh)	$7.0 \times 10^{-7} \sim 1.2 \times 10^{-8}$	$1.5 \times 10^{-4} \sim 2.0 \times 10^{-6}$
頭嵙山層香山砂岩 (Tks)	$1.7 \times 10^{-6} \sim 4.4 \times 10^{-10}$	$4.2 \times 10^{-4} \sim 1.2 \times 10^{-6}$

由各地質單元透水係數的分布可知，僅頭嵙山層火炎山礫岩層(Tkh)較具一致性，介於 $10^{-7} \sim 10^{-8}$ m/s 數量級，而其他地層透水係數的分布甚廣，皆呈現相當多數量級之差距。而為比較各地層的透水性之差異，本研究將各地質單元之透水性分布資料依據中位數(Median)由高而低排列如圖 4，從各地層與其相對應之透水係數分布範圍所示，可知各地質單元所具備之水力傳導能力依序以桂竹林層關刀山砂岩 (Kck)、白冷層 (Pl)、達見砂岩層 (Tc)、及南莊層 (Nc 為眾地層中之最，此類地層的共同特性是岩心破碎且岩盤裂隙網路(Fracture network)發達，因而具備較高的水力傳導性，使得地下水容易在裂隙網路產生流動。反觀水長流層(Sc)、頭嵙山層香山砂岩(Tks)及卓蘭層(Cl)則具較差的水力傳導能力，由於此類地層多屬於岩心破裂面少、岩盤質地軟弱且富含剪裂泥的岩層，導致裂隙連通性受到阻礙，因此地下水流動不易。

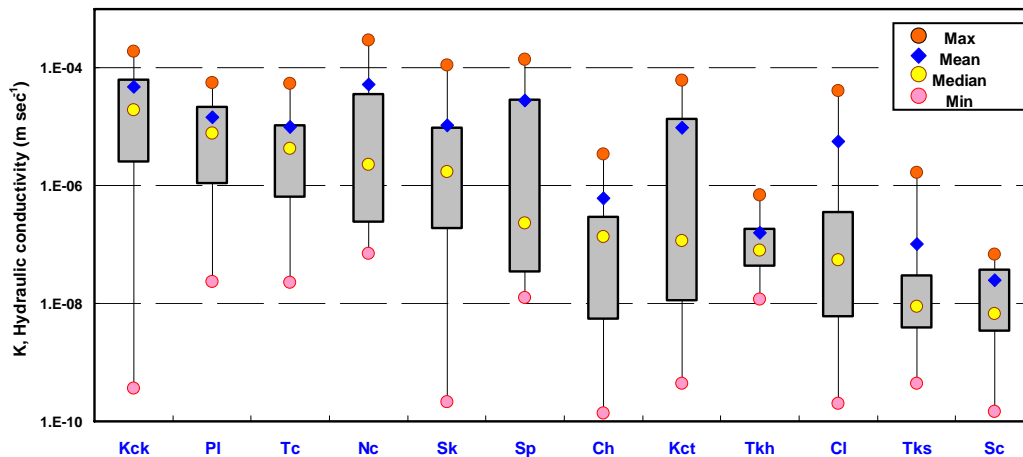


圖 4 研究區域各地層與其相對應之透水係數分布範圍

另本研究將各地質單元之蓄水特性分布資料依據中位數由低而高排列如圖 5，可知本研究區域擁有相對較高蓄水能力的地質單元為水長流層(Sc)、卓蘭層(Cl)、及頭嵛山層火炎山礫岩(Tkh)，與圖 4 所整理地質單元之透水係數分布比較，可發現這些地質單元的水力傳導能力相對較差；反之，地質單元蓄水能力相對較低者如十八重溪層(Sp)、白冷層(Pl)、南莊層(Nc)及桂竹林層關刀山砂岩(Kck)等，由於孔內攝影影像皆可在這些地質單元觀察到多處明顯破碎帶，說明其水力傳導能力較佳。

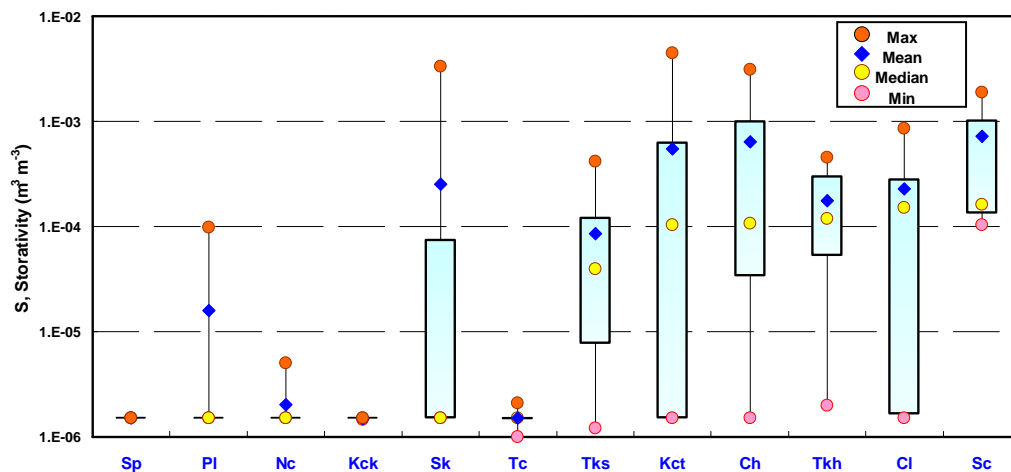


圖 5 研究區域各地層與其相對應之蓄水係數分布範圍

本研究亦嘗試整合上述透水係數與蓄水係數資料中位數，估算各地質單元之潛在水力擴散係數 ($D = K/S_s$)，並依序由高而低排列如圖 6 所示。由圖 6 可知，本研究區域地質單元的水力擴散係數分布可以 $D = 1 \text{ m}^2/\text{min}$ 為分界，顯示當單位水力梯度改變時具較佳水力擴散性的地質單元依序是桂竹林層關刀山砂岩(Kck)、白冷層(Pl)、達見砂岩(Tc)、南莊層(Nc)、深坑砂岩(Sk)和十八重溪層(Sp)，研判岩盤裂隙之連通性應較佳。

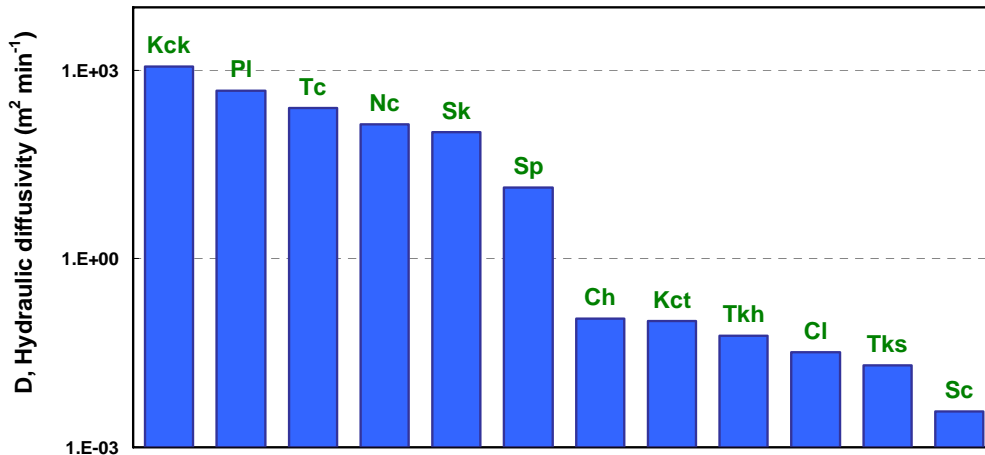


圖 6 研究區域各地層與其相對應之水力擴散係數

從鑽探岩心之孔隙率測定成果顯示，各地層之孔隙率大致約為：十八重溪層約在 0.33~1.39% 之間；水長流層約在 3.33~4.09% 之間；白冷層約在 0.05~1.71% 之間；卓蘭層約在 2.59~18.11% 之間；南莊層約在 2.7~10.94% 之間；桂竹林層大窩砂岩約在 3.11~19.61% 之間；桂竹林層關刀山砂岩約在 2.78~15.01% 之間；深坑砂岩約在 0.31~21.18% 之間；達見砂岩約在 0.24~3.24% 之間；樟湖坑頁岩約在 2.83~10.97% 之間；頭嵙山層香山砂岩約在 5.49~27.43% 之間。由於各地層組成之岩性與粒度皆有不同，以至於孔隙率分布極大，但整體來說，變質度較高之地層孔隙率較低，而頭嵙山層香山砂岩整體有著較高之孔隙率。另綜合露頭、鑽孔岩心及現地孔內不同尺度推估之孔隙率結果，顯示現地孔內推估結果因包含岩體裂隙明顯最大，而露頭採樣因解壓風化因素，其氣體孔隙率大致較鑽孔岩心之氣體孔隙率偏大。

4.2 岩性與透水係數關聯性分析

本研究針對不同岩性之透水係數分布進行統計如圖 7 所示，依據中位數之比較得知在固結岩盤中以變質岩及石英岩最高，研判此類地層在岩盤破碎且裂隙網路(fracture network)發達時具備較佳的水力傳導性，使得地下水容易在裂隙網路產生流動；砂岩的透水係數次之，其透水係數分布甚廣，相形之下砂頁岩互層、頁岩及泥岩的透水係數則較低；此外，由各岩層的分布可知岩性並非唯一控制透水性之因素，其受裂隙特性控制之潛在影響亦不可忽視。

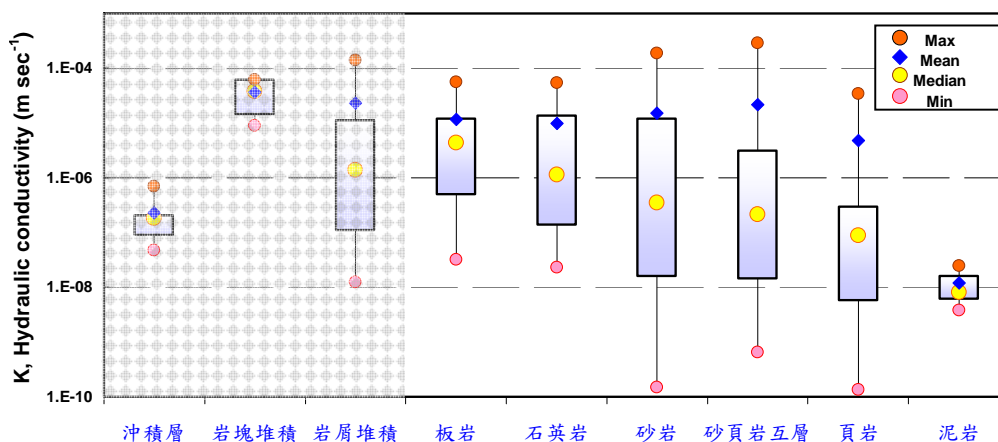


圖 7 不同岩性之透水係數分布統計

4.3 裂隙特性與透水係數關聯性分析

誠如前述，在固結岩盤中岩性並非唯一控制岩層透水性之因素，有鑑於此，本研究進而將 29 孔內攝影的分析結果，包括裂隙內寬(fracture aperture)、裂隙頻率(fracture frequency)與裂隙角度(fracture angle)等，與其對應水力試驗區段之透水係數進行關聯性分析，探討岩盤裂隙特性(fracture characteristics)與透水性之關聯性。而本研究整理出之裂隙內寬大致可概分為兩大類，一是明顯破碎帶(fracture zone)，另一則為不易計算寬度的不連續面(discontinuous)，包括開口裂隙(open-fracture)、髮線裂隙(hairline-fracture)及層面(bedding)等。統計本研究調查結果可知其中有 63 組水力試驗區段位於明顯破碎帶，岩性則以砂岩為主，頁岩與石英岩次之。茲將破碎帶寬(La)與封塞試驗區段長度(L)比之立方和透水係數進行關聯性分析，其兩者相關係數(correlation coefficient)為 0.817，符合破裂岩體滲流之立方律理論(Cubic law)。然而，若嘗試以裂隙頻率(即試驗區段裂隙數量與整孔裂隙總數之比例)與裂隙角度來探討和透水係數之關聯性，則發現兩者並無明顯相關性。

此外，根據本研究查結果可知有 32 組水力試驗區段岩盤裂隙係以不連續面為主，其中 6 組為開口裂隙(open-fracture)、20 組為髮線裂隙(hairline-fracture)、6 組為層面(bedding)，本研究亦針對這些不連續面區段進行關聯性分析，觀察到其中僅有開口裂隙和層面的裂隙頻率與透水係數具高度相關性，其相關係數分別為 0.835 及 0.825，且具開口裂隙之岩體可展現較層面高之透水係數；反觀髮線裂隙特性與透水係數之相關性低，惟此趨勢仍待後續更多資料量輔以驗證。

五、結論與建議

綜合本研究所得之各項研究結果，茲摘要提出下列幾點結論與建議：

1. 本研究區域涵蓋 23 種地質單元，包含始新世至全新世的地層，於地層分布面積最多且最具有地下水資源蘊藏潛勢的區域，共規劃 29 處鑽探點位，其中共獲得 15 個地質單元與相關水文地質調查成果。
2. 本研究整合水文地質鑽探與試驗調查之成果，從不同岩性之透水係數分布成果可知若在未固結岩層選取試驗區段係以粗礫卵礫石沉積所構成之崩積層，因其淘選度與膠結度較差而使該區段有較高的水力傳導性；而在固結岩盤中不同岩性所呈現的水力傳導性亦不相同，所估算的透水係數範圍分布甚廣，僅泥岩的透水係數較具一致性，整體來說，沉積岩層以砂岩段之透水係數最高，砂頁岩互層與頁岩次之，泥岩段之透水係數則較低，而具變質岩性之區段其透水係數分布亦相對較高，由此可說明在固結岩盤中岩性並非唯一控制岩層透水性之因素，其受裂隙特性控制之潛在影響亦不可忽視。
3. 裂隙特性與透水係數關聯性分析顯示，開口裂隙和層面的裂隙頻率與透水係數具高度相關性；透水係數與破碎帶寬和封塞試驗長度比之立方具相當高的關聯性，符合破裂岩體滲流之立方律理論(Cubic law)原則。
4. 各地層單元所具備之水力傳導能力、蓄水能力、孔隙率及相互間之差異分析結果顯示，山區岩層的水力傳導能力與岩盤破碎程度具高度相關性，就山區水資源開發的觀點而言，岩盤裂隙的出水率遠大於孔隙，以致在裂隙網路發達、連通性高的固結岩層往往可以獲取較大的抽水量；然而對於頭嵛山層香山砂岩、卓蘭層等地層，岩體的蓄水能力高富含較多的地下水，然此類地層的水力傳導能力及裂隙連通性較差，有可能導致地下水資源開發不易。
5. 本研究由於經費限制，各岩層所獲得水力特性調查成果僅能從少數幾孔資料詮釋，建議未來持續蒐集山區各種岩層水力特性資料，並重新檢視本研究所得結論。

參考文獻

1. 許世孟、顧承宇、鍾明劍、蘇泰維、李錦發 (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 35-44 頁。
2. 林朝榮(1957), 台灣地形, 台灣省文獻委員會。
3. 經濟部中央地質調查所(2007), 易淹水地區上游集水區地質調查與資料庫建置(96 年度)－集水區水文地質對坡地穩定性影響之調查評估計畫成果報告。
4. 中興工程顧問社(2012), 台灣山區地下水資源調查與評估技術之建立計畫期中報告。
5. Keys, W., (1990). Techniques of Water-Resource Investigations of the United States Geological Survey, Chapter E2: Borehole Geophysics Applied to Ground-water Investigations, USGS.
6. 經濟部中央地質調查所(2008), 易淹水地區上游集水區地質調查與資料庫建置(97 年度)－集水區水文地質對坡地穩定性影響之調查評估計畫成果報告。
7. NATIONAL RESEARCH COUNCIL (NRC) (1996), Rock Fractures and Fluid Flow: Contemporary Understanding and Applications, National Academy Press, Washington DC. 551pp.

ABSTRACT

Owing to lack of the hydrogeologic data in mountainous areas, this study conducted a regional-scale investigation of hydraulic properties of rock formations so as to facilitate understanding of permeability and storativity of rock formations. The obtained hydrogeologic information is expected to be utilized while underground construction, geohazard investigation or assessment of groundwater resources potential in mountainous areas.

Keywords: hydraulic property, hydrogeological test, fracture characteristics.