

變質岩之水文地質特性與實務調查分析 技術建置之研究

柯建仲* 陳柏瑞 魏倫璋
財團法人中興工程顧問社

許世孟
臺灣海洋大學河海工程系

林燕初
經濟部中央地質調查所

摘要

近年來，臺灣受氣候變遷效應影響，造成河川流量與地下水補注量改變，豐水期與枯水期的水量差異增加，造成中北部地區旱季延長與水庫缺水嚴重，而南部則是極端降雨事件增多，造成山區地質不穩定使地質災害事件發生頻率升高，均已衝擊到臺灣整體水資源供應的穩定性，為在有限資源的情況下，建立水資源有效管理與多元開發的策略來面對缺水危機，本文提出具實務性及指標性之實務探勘技術，用於瞭解變質岩含水層之優勢水流路徑，及建立小尺度三維度裂隙岩體地下水分析模型來探討其連通性。

本文選擇位於潮州層之屏東縣獅子鄉雙流森林遊樂區為研究場址，並設置井場及進行一系列現地水文地質試驗，亦建置一套複合裂隙岩體數值分析模型，探討地下水開發實務技術之適用性。透過井場之各項單孔及跨孔地下水流速試驗，可準確掌握透水裂隙間是否具連通性與其連通區段，且亦可發現優勢水流路徑與主控裂隙之位態具高度相關性。本文以美國Golder Associates發展之FracMan並結合現地水文地質試驗、露頭調查與裂隙幾何特性建立出三維度複合離散裂隙網絡/等效孔隙介質之數值模型，透過模型分析結果與現地調查結果之比對後，可發現此方法可具體分析與掌握變質岩之透水裂隙區段及其優勢水流路徑，可有效提供後續實務開發前準確的地下水資源潛能評估。

關鍵字：優勢水流路徑、複合分析模型、地下水資源潛能。

Development of Investigation Techniques and Analysis Approaches for Determination of Hydrogeological Characteristics of Metamorphic Rocks

Chien-Chung Ke* Po-Jui Chen Lung-Wei Wei
Sinotech Engineering Consultants, Inc.

Shih-Meng Hsu
National Taiwan Ocean University

Yen-Tsu Lin
Central Geological Survey, MOEA

Abstract

This paper presents a practice-oriented approach for the characterization of preferential flow path and the development of a small-scale three-dimensional fractured metamorphic aquifer model. This approach can be used to evaluate the groundwater potential for the purpose of groundwater resource planning and management. To demonstrate the effectiveness of this approach, a couple of on-site hydrogeological tests were performed and a hybrid numerical model was developed for the Shuangliou well field which is situated in the Shungliou Forest Recreation Park in southern Taiwan. The on-site experiments performed in the well field revealed that the combined downhole logging technique could successfully identify the interconnection of permeable fractures. They also proved that the preferential flow path was strongly associated with the major fracture orientation. On the other hand, the cross-borehole flowmeter test had been proven to be a useful technique to identify the preferential flow paths between boreholes.

* 通訊作者 ccke@sinotech.org.tw

The modeling software FracMan was applied to develop a 3-D hybrid Discrete Fracture Network/Equivalent Porous Media (DFN/EPM) model, in conjunction with the above field tests, outcrop data and the identified scaling properties that were based on the statistical analysis of the fractures. Additionally, the validated model was used to determine the groundwater storage in a water planning area. This study provides insight into the characterization and modelling of fractured rock aquifer, which effectively incorporate the heterogeneity of fractured rock and improve the accuracy of the groundwater storage computation.

Key Words : preferential flow path, hybrid DFN/EPM model, groundwater storage.

一、前言

近年來，水資源相關問題對社會、經濟及環境發展之影響層面愈來愈大，2002年全球永續發展高峰會議提出「No water, no future」沒有水就沒有未來的警語；另外，在2005年的世界地球日，聯合國更以「生命之水」(Water for Life)為主題，呼籲世人對於水資源相關議題投入更多的關注與努力。這些都在顯示水資源是21世紀地球上的每一個人都必須高度關注並且付諸行動去保護的寶貴資源。而其中，地下水資源更是整體水文循環中重要的一環。

臺灣近期亦因氣候異常造成地面水文環境產生了極大的變化，水資源供需失穩及豐枯水期流量差異益加明顯，每遇枯水期時常須利用地下水來因應地面水資源的不足，顯示臺灣正面臨缺水危機的嚴峻考驗，因此地下水已儼然成為政府執行水資源調配與管理策略中重要的備用及保命水源。但過去十幾年來，平原區長年過量抽取地下水，造成雲林彰化地區的地層持續下陷，近期更對高鐵行車安全造成威脅。所以除了須加強平原區的地下水管理外，平原區鄰近的山區是否有可以替代性之地下水資源是急需進行調查與研究的課題。

臺灣年平均雨量雖豐沛，但因地狹人稠，每人每年所分配降雨量僅為世界平均值之1/5，又河川坡陡流急，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，缺水危機日益嚴重。而臺灣山區佔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，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，但是對於評

估山區地下水蘊含量之現況所需地質與水文地質等基本調查資料卻相當匱乏，如何發展與使用適宜且關鍵之水文地質調查技術是此議題最重要也最急迫的研究。

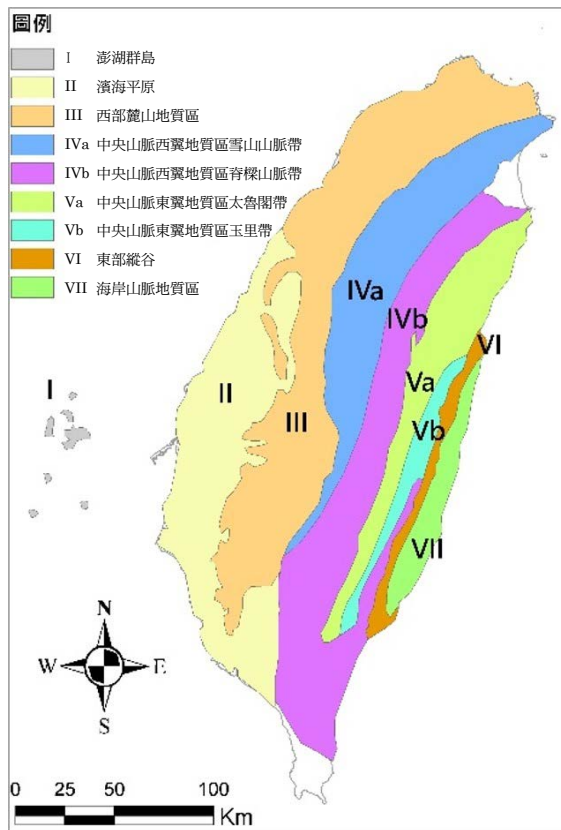
此外，南北狹長東西窄寬的臺灣，因位於複雜且多重的板塊構造運動帶上，造就山區與平原區迥異的地層環境，使得地質單元及層序的分布有所差異，而本文將針對位於臺灣「核心」的變質岩區水文地質特性及如何採取快速有效的技術手段來探查地下水資源進行成果說明與案例展示。

本文主要將於第二部分簡要說明臺灣變質岩分布情形，第三部分將羅列各項目前應用於山區地下水資源調查之先進技術及其主要探測目的，並彙整變質岩類主要之水文地質特性，第四部分將展示一處具山區地下水資源潛能之變質岩場址相關開發實務技術建置流程及評估方法，最後將總結本文主要貢獻與未來期許。

二、研究場址之區域地質特性

本文主要挑選臺灣變質岩區為調研場址，而臺灣的變質岩主要分布於中央山脈一帶，包含中新世至古第三紀的硬頁岩與板岩，以及先第三紀的變質雜岩。何(1986)將臺灣分為七大地質分區(圖一)，並將中央山脈分為西翼與東翼兩個地質區，前者包含雪山山脈帶(IV_a)與脊梁山脈帶(IV_b)，後者則包含太魯閣帶(V_a)與玉里帶(V_b)。本文主要之研究場址位於脊梁山脈帶(IV_b)中，以下就此區域之地質特性簡要說明。

中央山脈西翼的脊梁山脈帶(IV_b)變質度較高，以板岩及千枚岩為主要岩性，並夾有泥灰質或石灰質的結核，部分區域具有粉砂岩、砂岩、礫岩的夾層，板岩有時和薄層至中層的石英砂岩形成互層，但未見如雪山山脈帶出露的厚層石英砂岩和炭質地層。分布於本區之地



圖一 地質分區空間分布圖(改繪自何，1986)

層由老至新主要包含畢祿山層、廬山層及潮州層。畢祿山層以板岩和千板岩為主要岩性，但是在變質的泥質岩層中夾有較厚的變質砂岩，有的為石灰質砂岩，有的為長石質砂岩，砂岩粒度由細粒至粗粒均有，其板岩時常夾有綠色至暗紅色的火山岩凸鏡體，多半已經變質。廬山層主要為黑色至深灰色的硬頁岩、板岩及千枚岩和深灰色的硬砂岩互層所組成，含有零星散布的泥灰岩團塊。潮州層以硬頁岩或板岩為主，間夾透鏡狀砂岩體，砂岩為細粒至中粒的石英砂岩，多呈現水道充填構造，厚層平行紋理和底痕沉積構造頗為發達。

三、岩層水文地質特性調查

3.1 水文地質特性調查技術

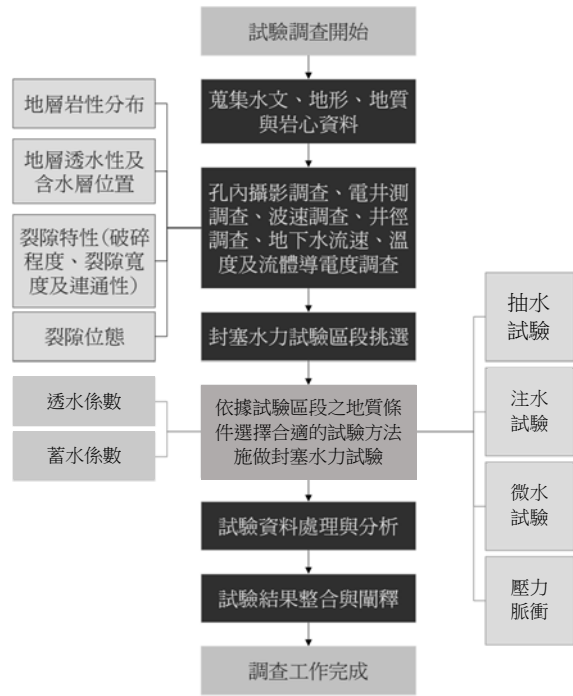
由於臺灣山區地質環境複雜，充滿許多高度變異性的岩層，其中變質岩類因熱、壓力及流體等多重且複雜之物理與化學作用，致使其地層特徵與水文地質特性之變動程度及範圍較廣，故若要能具體掌握多樣化且變動度高的水文地質特性因子，需仰賴完整且熟

稔的孔內水文地質調查技術來精準掌握，而此技術係藉由探勘與試驗方式來掌握地層之地下水流動特性、地質構造與裂隙特性及其相互間之關聯性，除可釐清不同地層之水文地質的不確定性外，對於地下水資源的探究與評估亦提供不可獲缺的資訊。傳統的水文地質調查多以岩心取樣為主，惟單就岩心樣本並無法檢核鑽探岩心錯置或進尺錯位等問題，且在複雜的岩層環境之裂隙特性的判釋(空穴、弱面內寬、角度、易流失的填充材料等)，會存有相當大的誤差；同時，透過岩心樣本僅可瞭解地層的破碎程度，並無法直接判斷地層蓄水及透水能力，以及裂隙的連通性。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，以山區地下水資源調查為例，岩體的透水性除受到裂隙破碎程度、開口寬度、密度等之影響外，裂隙本身的連通性及其內部填充材料亦扮演了不可獲缺的角色，因此如能透過孔內水文地質調查來彌補上述資訊之不足，同時獲取岩層各項水文地質參數，將可大幅增加在水資源評估上之精準度。孔內水文地質調查技術可視為地球物理探勘的一環，透過不同型式的探測裝置和試驗方法，直接或間接記錄山區地下岩層所蘊含的物理訊號及水力參數，研究人員藉由探測結果得以獲知地質構造與岩性分布特徵、量化水力傳導與蓄存能力、掌握潛在優勢地下水流路徑、檢視井體結構完整性，甚至提供鑽探記錄補遺之佐證，是山區地下水資源評估工作中相當關鍵的核心技術之一。

一般而言，孔內水文地質調查可分為孔內井測(well log)及孔內水力試驗(hydraulic test)，前者係利用各種探測儀在鑽孔吊放或拉升的情況下直接測錄地層各種地球物理訊號，並藉由這些訊號來判釋地層水文地質特性，其應用早期係以石油工業探勘為主，近年來，井測也陸續投入至地下水、工程地質及岩石力學等相關調查中。井測的調查方式眾多，往往依探測原理及調查目標而有所不同，主要包括自然電位井測(spontaneous potential)、電井測(resistivity)、自然伽瑪井測(gamma radiation)、聲波井測(sonic)、光學式孔內攝

影(optical televiewer)、音射式孔內攝影(acoustic televiewer)、井徑(caliper)、溫度(temperature)、導電度(conductivity)及地下水流速流向量測(flowmeter)，茲將上述井測主要調查方式與調查目標彙整如表一所示，其調查流程如圖二所示。

而關於地下岩層水力特性評估則需透過封塞水力試驗的方式，其目的則是為了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，將作為山區地下水流動特性、水資源開發潛勢評估及水文地質概念模式之建立之主要依據。過去水文地質參數調查方法以規劃呂琴(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，為克服呂琴試驗的限制，本文配合孔內岩體裂隙位態調



圖二 孔內水文地質調查流程

表一 孔內各類水文地質試驗項目、調查目的與應用說明(經濟部中央地質調查所，2019)

試驗項目與調查目的	應 用					
	檢視鑽探岩心品質	裂隙位態投影分析	觀測井分層位置	提供岩層水文地質參數分析之依據	提供地下水潛能場址水文地質特性評估之依據	提供地下水動態行為評估
孔內攝影調查						
→利用孔內攝影設備調查岩層破碎程度、裂隙位態分布、地層細部構造、鑽孔變形預估	✓	✓	✓	✓	✓	✓
孔內電井測調查						
→利用井測儀測錄得的物理訊號(自然電位、電阻率、自然伽瑪射線)調查地層岩性分布、地層破碎程度、地層材料強度、透水性及含水層位置			✓	✓	✓	
孔內井徑調查						
→利用井徑儀量測鑽孔孔徑變化調查地層岩性分布、破碎及膠結程度、協助孔內攝影調查界定破碎帶及空穴位置			✓	✓		
孔內波速調查						
→利用波速儀測錄得的波速推估地層岩性分布、地層材料強度及彈性常數、並換算地層之孔隙率，評估地層蓄水能力			✓	✓	✓	✓
孔內地下水流速及流向調查						
→利用流速儀量測鑽孔流速及流向分布來推估地層滲透性、裂隙連通性，瞭解地下水循環潛勢及地下水主要滲流路徑			✓		✓	✓
孔內地下水溫度與流體導電度調查						
→利用溫度與導電度量測設備來調查孔內水位面以下之地下水溫度與導電度變化趨勢，協助流速調查判釋地下水主要流進流出區段			✓		✓	✓
封塞水力試驗						
→利用單封塞及雙封塞水力試驗調查鑽孔內地層之裂隙岩體透水係數，瞭解地層的透水能力及蓄水能力			✓	✓	✓	✓
呂琴試驗						
→於鑽探過程利用呂琴試驗調查鑽孔地層透水係數，瞭解岩層層的透水能力			✓	✓	✓	✓

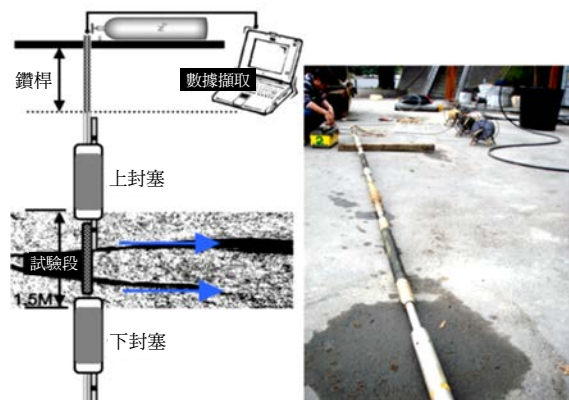
表二 水力試驗方法簡介及優缺點比較(經濟部中央地質調查所，2008)

方法種類	方法簡介	方法優缺點比較	
		優點	缺點
定流量試驗	將抽水馬達置入試驗區段，在定量流下將水從試驗區抽出	所得透水係數可代表較大的試驗岩體	需知抽水量；在低滲透性岩體，實驗易失敗
定水頭試驗	在固定水頭下，從測試區間注水	井徑大小的效應不太影響試驗結果	所得透水係數代表較小的試驗岩體
微水試驗	快速的抬升或降低套管的水位，然後觀測水位之恢復行為直到水位到達平衡	試驗時間短	所得透水係數代表較小的試驗岩體；如低滲透性岩體及大管徑都導致試驗時間冗長
壓力脈衝試驗	快速注入一定量水，並施加一額外水壓，然後觀測水位恢復直到水位到達平衡位置	縮短試驗時間，取代微水試驗	所得透水係數代表較小的試驗岩體

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(詳見圖三)，以進行相關水文地質參數調查工作。單井封塞試驗係以在試驗過程中利用兩個或多個封塞去分離孔井試驗區段，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。一般單井雙封塞水力試驗有四種試驗方法：1. 定流量(constant-flow tests)；2. 定水頭(constant-head tests)；3. 微水試驗(slug tests)；4. 壓力脈衝試驗(pressure pulse tests) (National Research Council, 1996; Singhal and Gupta, 2010; National Academies of Sciences Engineering and Medicine, 2015)。綜觀四種單井水力試驗方法，本文整理各種方法的優缺點比較，如表二，同時整理出各種試驗各自適合施作的地質條件狀況，如表三所示。

透過各種孔內探測技術來獲取地層的物理訊號及水文參數，探測結果將作為地層水文地質特性判定之重要依據，雖然各項探測結果會因調查目標而有所不同，然透過最終資料的比對與整合，可對鑽孔特定區段特性作更細緻的描述；此外，探測所得之各項參數亦可作為後續供水潛能場址評估與地下水資源開發實務技術建置之依據。

根據本研究過去於臺灣中段及南段山區所進行之一系列孔內水文地質調查工作，已可掌握主要變質岩類之地球物理訊號(如表四)與透水係數分布範圍(如表五)，而對於地下水資源探勘領域，岩層特性及水文地質特性為首要需收集的重要資訊。在地球物理訊號中，電阻率分布、自然伽瑪及波速與岩性有關，一般未風化之變質岩之電阻率約為1,000-10,000 Ω.m之間，但因地下岩層包含風化破碎帶、裂隙發達區段及剪裂帶，故電阻率分布較完整岩



圖三 單井雙封塞水力試驗設備示意圖

表三 單井水力試驗適合施作之地質條件(經濟部中央地質調查所，2008)

方法種類	水力試驗合適之地質狀況
定流量試驗	高滲透性含水層
定水頭試驗	最適低滲透性含水層，其他亦可
微水試驗	中及低滲透性含水層
壓力脈衝試驗	非常低滲透性的含水層

表四 變質岩類之地球物理井測訊號範圍(以臺灣中段及南段山區為例)(經濟部中央地質調查所，2013、2017)

井測訊號 岩性	電阻率 (Ω.m)	自然伽瑪 (cps)	P波波速 (m/s)
石英岩	90-870	60-180	3520-4920
板岩	70-1340	50-220	2240-5000
片岩	10-650	60-180	2610-4550
硬頁岩	20-260	90-180	2820-5240

表五 變質岩類之透水係數範圍(以臺灣中段及南段山區為例)(經濟部中央地質調查所，2013、2017)

岩性	透水係數(m/s)		
	最大值	幾何平均值	最小值
石英岩	1.6E-5	6.0E-8	3.1E-9
板岩	1.4E-5	4.7E-8	1.1E-9
片岩	2.1E-6	1.2E-7	7.1E-10
硬頁岩	9.2E-5	7.9E-6	9.7E-9

石低；而自然伽瑪則與含泥量多寡有關，除岩性本身為主控因子外，現地地質作用與環境亦為主因；波速部分則顯示岩體本身之結構軟硬程度，一般而言變質岩類大多屬於質地堅硬之基岩，然其受地質作用造成諸多裂隙或破碎帶，故波速分布範圍較廣。

四、變質岩場址之地下水資源開發實務技術建置

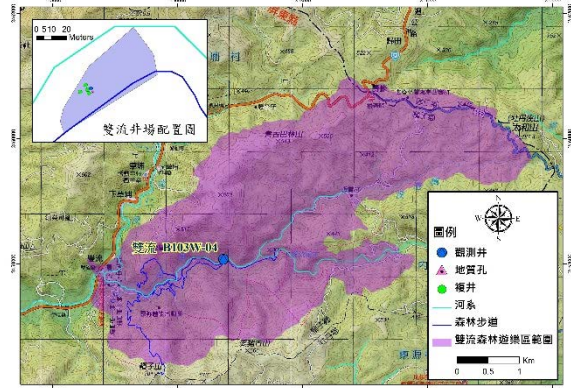
透過前述之調查技術結果可初步獲知變質岩之水文地質特性，然如何精確的在複雜的地質環境中進行地下水資源開發，乃是另一項關鍵議題。本文提出一套整合現地水文地質調查與數值分析的地下水資源開發實務技術，並在有限的調查資源下，能迅速、有效且系統化的依據場址屬性規劃出具指標意義的調查內容及分析方法。

執行變質岩區之地下水開發實務時，均需面臨如何迅速判釋鑽孔高透水區段位置及準確分析出裂隙岩體中區域優勢水流路徑之挑戰。為解決此項難題，本文嘗試透過井群(multiple well)的水文地質調查研究來尋找裂隙岩盤之優勢水流路徑，並透過單井孔內攝影與熱脈衝流速儀之數據分析，標定具高潛勢水力連通區段裂隙之位態來推估可能之地下水路徑，並依其延伸方向來設計井場之布井位置，其後井群進行跨孔流速調查試驗，確認該重點裂隙向外延伸後形成之地下水流通路徑是否符合原先預期。

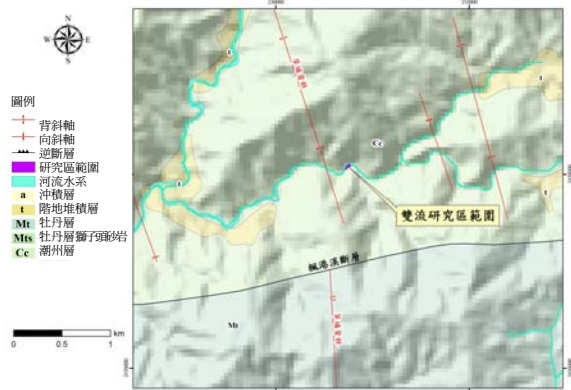
本文選擇位於潮州層之雙流森林遊樂區內規劃建置研究井場，本場址位於雙流森林遊樂區內，佔地達1587公頃，因地處楓港溪上游兩大源流的匯流點而得名，本場址位在前往雙流瀑布之步道旁空地，共規劃1孔觀測井、1孔地質井及4孔複井，詳細地理位置可參考地形圖(圖四)。根據四重溪及其鄰近流域地質圖圖幅(圖五)，本場址地質圖上為潮州層(Cc)，此場址附近有數條南北走向之褶皺軸，且在南側有一東西走向具左移性質之楓港溪斷層，但影響較劇之構造為草埔背斜，本場址位於草埔背斜東翼，但因靠近軸部，裂隙走向與軸部平行。關於鑽探所得之岩心，除表層0.0~5.16m為岩

屑層，其下則入岩至100.0m，岩盤部分整段主要為硬頁岩夾砂岩，岩體完整，岩質純淨，部分區段剪裂成泥。

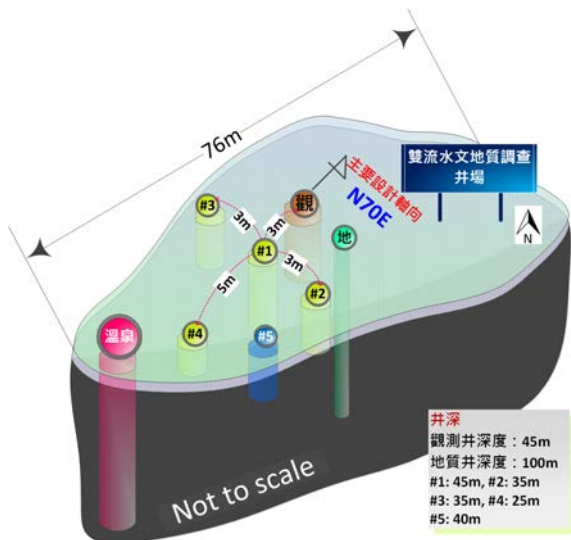
圖六為本文於潮州層之雙流森林遊樂區建置之井場，相關布孔規劃包含一孔100公尺深地質井與一孔45公尺深抽水井及五孔深度25-45公尺不等之試驗井(#1~#5)，於上述各孔



圖四 雙流井場位置圖



圖五 雙流井場區域地質圖



圖六 雙流井場井群布置圖

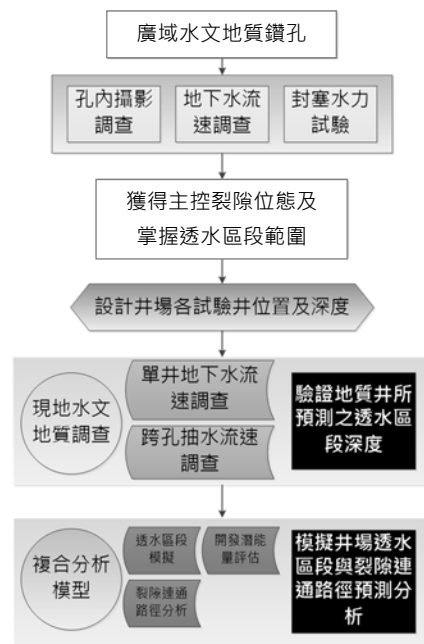
施做一系列孔內水文地質調查，如抽水狀態下之孔內地下水溫度與流體導電度調查、孔內攝影調查、孔內地下水流速調查及跨孔地下水流速調查等。

4.1 場址水文地質調查技術建置流程

本文旨在建立一套針對變質岩場址之水文地質的井群調查流程，於雙流森林遊樂區內建置井場，透過孔內攝影調查、抽水狀態下地下水溫度與流體導電度調查與孔內流速調查結果，搭配跨孔抽水之方式，冀望能突破以往單孔調查尺度來釐清裂隙網絡於山區地下水流動及蓄水扮演角色，進而達成推估透水區段的目的，試驗流程如圖七所示。而各項運用於井場之水文地質調查技術之目的與應用整理如表一所示。

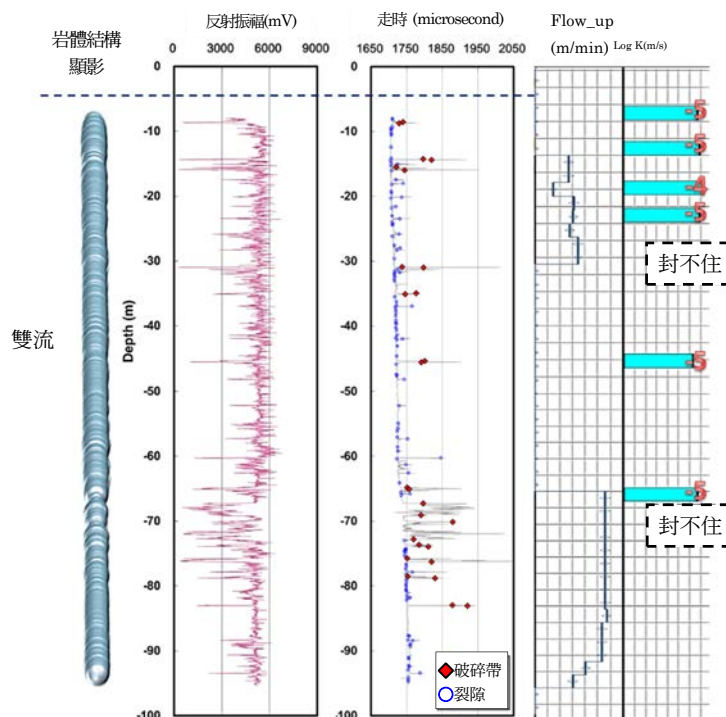
4.1.1 水文地質鑽孔

廣域水文地質鑽孔除了獲取岩心資料外，透過孔內攝影調查、地下水流速調查以及封塞水力試驗等試驗項目，綜合比對可得到詳細之透水區段參數以及裂隙位態資訊。為判斷裂隙岩體真正主導地下水流動的透水裂隙或區段，主要可分為三個步驟：1. 根據孔內地下水流速調查結果，可得到在自然環境下主要地下水



圖七 雙流井場試驗流程圖

進出的透水區段，其中上部岩盤主要地下水流入孔內深度為30~32m之間(如圖八所示)。2. 根據孔內攝影的裂隙調查結果，可分析出30~32m之間的所有裂隙數據，然而大部分裂隙僅為小區域範圍使得連通性不佳，因此透過孔內攝影所轉換出的振幅分析結果，可以清楚分辨出裂隙的實際連通程度。3. 最後將連通性最好的裂隙位態，透過孔內攝影的後處理程式找出。



圖八 地質井之孔內攝影調查與流速調查及封塞水力試驗結果

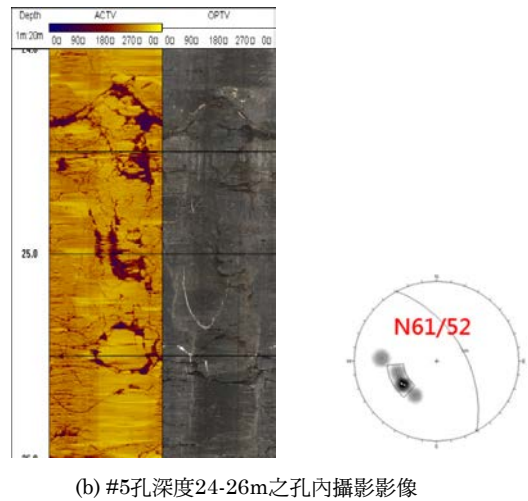
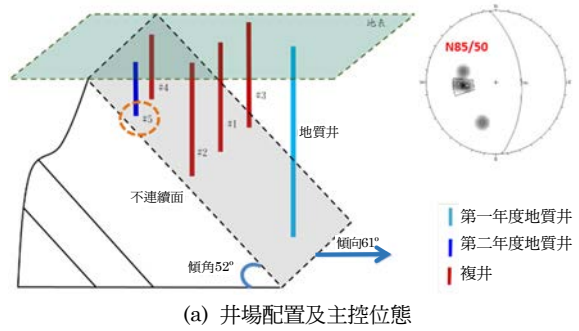
4.1.2 井場試驗井位置及深度設計

雙流井場試驗井設計的目的為：1. 透過地質井優勢水流路徑調查結果，預測導水路徑連續面之延伸情形，並透過試驗加以驗證。2. 釐清井間的優勢水流路徑，以提供模擬更全面的參考依據。因此由地質鑽探之地質井30~32m之間的透水不連續面為出發，考量四周環境與地形因素，依照不連續面位態向外延伸布置井群，不連續面的位態傾向約為85°、傾角約為50°，以該不連續面位態在空間的延伸方向計算，試驗井由一號井至四號井的規劃深度依序為45m、35m、35m與25m，其深度配置依據為與不連續面相交為主，以確保預測之透水裂隙面均能切過井群，如圖九所示。

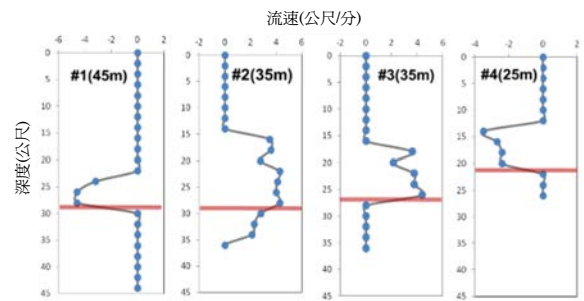
4.2 透水區段預測及跨孔地下水流速分析

4.2.1 試驗井透水區段預測

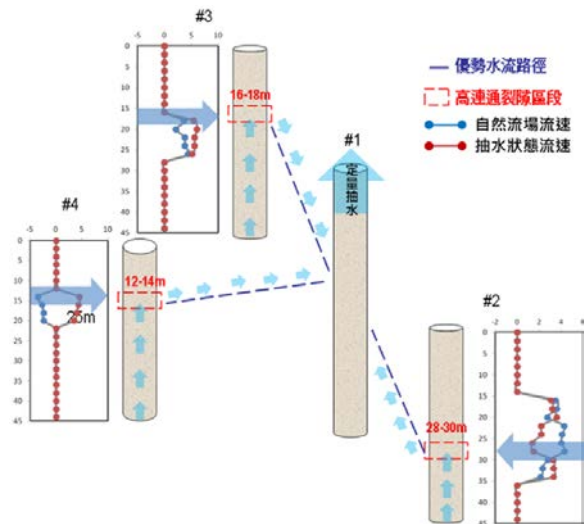
根據雙流井場地質井的不連續面位態調查結果，以及各試驗井與廣域地質井的相對位置，可推算出不連續面通過各井體的深度，以通過地質井深度30~32m區段的透水不連續面為例，預估通過1號井的區段為深度27~29m，通過2號井的區段為深度28~30m，通過3號井的區段為深度26~28m，而通過4號井的區段為深度21~23m。利用熱脈衝流速儀實際於各試驗井量測後，所得到於自然流場狀態(ambient flow)下孔內水流變化情形如圖十所示，根據1~4號井流速調查結果可知，預估不連續面切過的深度，其孔內流速皆有產生速差變化，代表於該區段內地層與孔內地下水有流動的情形，此結果與預測的透水區段完全吻合，亦證明了本場址之地下水水流路徑與裂隙位態有著密不可分的關係。為能完整描述井場合水層水文特性，並獲得更多場址水文地質參數的空間分布狀況，本試驗規劃於1號井設置抽水機以每分鐘20公升的抽水量進行長時間的定量抽水，待地下水位達到穩定之後，於2號井、3號井以及4號井內分別進行抽水狀態下的流速量測。根據量測結果，2號井的連通區段為深度28~30m，3號井的連通區段為深度16~18m，而4號井的連通區段為深度12~14m，此結果可透過日後不同井中抽水量測結果交叉比對，本文所探測之井間優勢水流路徑如圖十一所示。



圖九 雙流井場配置與不連續面示意圖



圖十 雙流井場井群於自然流場下之流速量測結果



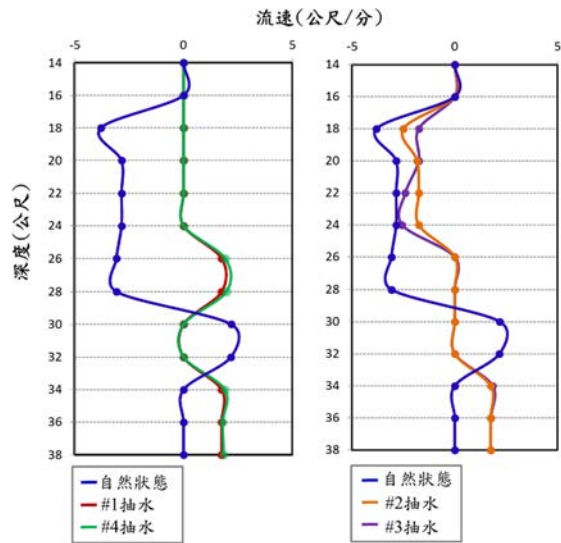
圖十一 雙流井場優勢水流路徑示意圖

根據圖十二中的流速變化情形，原本5號井孔內水流流速情況，因孔壁裂隙所連通到的水頭的改變，導致原本5號井孔內流速分布情況亦產生變化，5號井與1到4號井之間大致可分為兩種連通系統。當分別在1號井與4號井抽水時，5號井所量測到的流速分布情形相當，主要的連通裂隙區段為深度24~26m及32~34m。

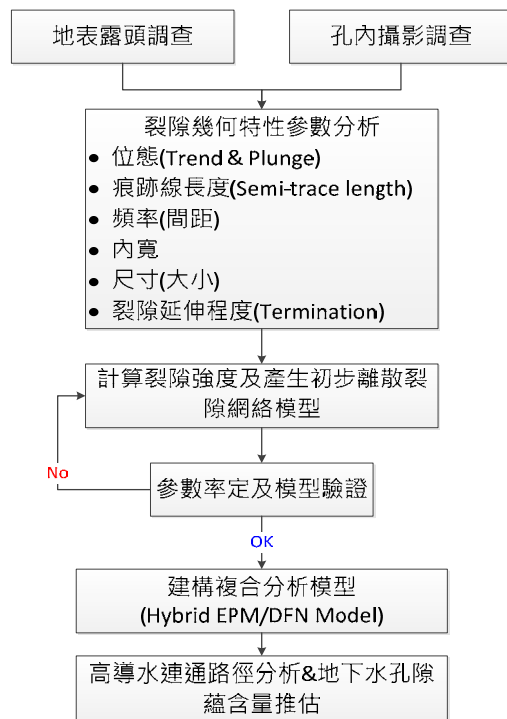
另在2號井與3號井抽水時，5號井所量測到的流速分布亦大致相同，由探測結果可知，其主要的連通裂隙區段亦為深度24~26m及32~34m，且這兩段裂隙連通區間，不論是自然流場水頭或抽水後之水位變化皆與在1號井與4號井抽水時相當(圖十二)，由此可知5號井24~26m及32~34m區間裂隙亦為井間之重要地下水路徑。而透過位態投影的分析結果顯示，第二年度新增5號井之24~26m區段的裂隙位態為N61/52，與地質井30~32m區間裂隙位態N85/50差異不大，說明透水裂隙面的預測深度與方向符合預期，此探測結果將用以回饋模式進行校正及驗證之用。

4.2.2 場址優勢地下水連通路徑模擬分析

欲瞭解場址具地下水可開發潛能的熱區與評估其潛在蘊含量，需能掌握場址地下岩層的裂隙網絡型態與分布情況，本文將所獲之點狀資料透過數值模式擴展至區域尺度進行後續分析與模擬。採用美國Golder Associates發展的FracMan分析程式來建構雙流井場的複合分析模型。過去針對裂隙岩體相關研究的分析模型，往往僅採用單一型態來進行探討，然而因山區地質環境變異性及複雜度高，若僅以單一模型來分析與探討，其結果代表性有限，無法完全反映真實地質環境之水文地質特性，故在概念模式設定上，將分層使用兩種不同的分析模型並將之結合為一複合式的分析概念模型，其中將岩屑層及裂隙基岩層(fractured bedrock)分別以等效孔隙介質模型(equivalent Porous Medium, EPM)及離散裂隙網絡模型(discrete fracture network, DFN)來建構複合分析模式(hybrid approach)，最後，將藉由複合分析模式來探討井場高透水連通路徑，並將與現地調查成果進行比較驗證。相關調查成果與參數建立過程分述如下，分析流程如圖十三。



圖十二 雙流井場5號井與井1~井4間之跨孔地下水流速調查結果



圖十三 複合模型建構與分析流程圖

1. 複合分析模型建立：在真實的裂隙岩體環境中，其各種裂隙幾何特性(如：裂隙位態、間距、痕跡線長度及裂隙尺寸與內寬等等)均具有高度的不確定性，因此如何在有限的現地資料建構合理且具信賴度之裂隙網路模型為本項議題的關鍵要素，再者，要掌握優勢水流路徑需能準確模擬出井場範圍內裂隙網路的水力特性，因此本文藉由雙流站的封塞水力試驗獲得的特定區段透水係數K值，轉換成導

水係數T值後，採用OxFILET方法(Osnes et al., 1988)以最佳化的方式來推估整孔導水係數最合適分布特性及裂隙強度(Fracture intensity)，再藉由此裂隙強度來產製符合井場水力特性之離散裂隙網絡模型。

OxFILET方法係以封塞水力試驗數據搭配Osnes et al. (1988)提出的理論方法來推估導水係數累積分布函數與導水裂隙頻率。基本假設試驗段的總體導水係數等於與試驗段相交錯之各導水裂隙之導水係數的總和，如公式(1)所示。

$$T_i = \sum_{j=1}^{n_j} T_{ij} \quad (1)$$

其中 T_i 為第i個封塞試驗區段的視導水係數(Apparent transmissivity)， n_j 為在第i個區段中導水裂隙的數量，而 T_{ij} 為在第i個試驗段中第j條裂隙的導水係數。在分析過程中任一給定的試驗段，其導水裂隙數量 n_j 假設為隨機且符合波以松分布型態(Poisson distribution)(Benjamin and Cornell, 1970)：

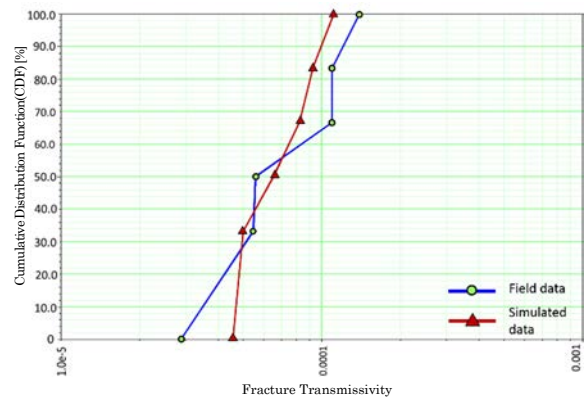
$$f_n(n) = \frac{\bar{n}^n e^{-\bar{n}}}{n!} \quad (2)$$

其中 \bar{n} 為波以松隨機過程(Poisson process)，亦等於n的期望值(Expected value)。而導水裂隙頻率則定義為 $f_n = n/L_i$ ，其中 L_i 為試驗段長度。

為檢核模式所產生的整孔導水係數分布是否具合適性，本文透過納許-史托克利夫效率係數(Nash - Sutcliffe model efficiency coefficient, E)與皮爾森相關係數(Pearson correlation coefficient, R)可檢核OxFILET方法模擬結果與現地封塞水力試驗結果之準確度，詳如圖十四及表六所示。其中，當納許-史托克利夫效率係數越接近1時，代表模式預測能力越佳，分

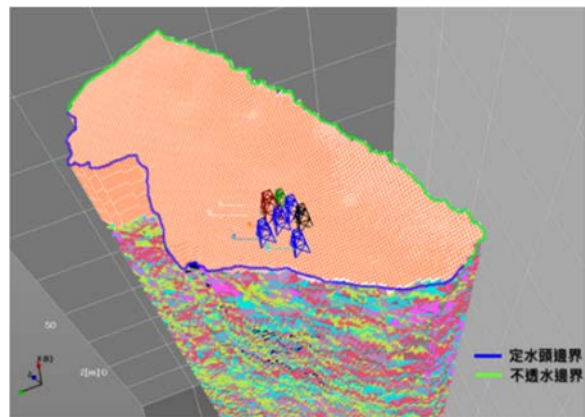
析結果發現E值為0.753且其皮爾森相關係數為0.968，顯示模式預測結果與實際值相當接近且兩者結果具高度相關性，故將採用1.159做為產生網絡模型之裂隙強度。

圖十五為利用裂隙強度P32及各露頭位態分布所產生的雙流井場複合分析模型。為檢核現地量測與程式模擬之水力特性是否具一致性，本文將封塞水力試驗結果透過OxFILET方法產生孔內攝影調查所獲之裂隙導水係數分布，其分布特性屬於對數常態分布(lognormal



藍線：現地試驗結果；紅線：OxFILET分析結果

圖十四 封塞試驗段之導水係數分布比較分析

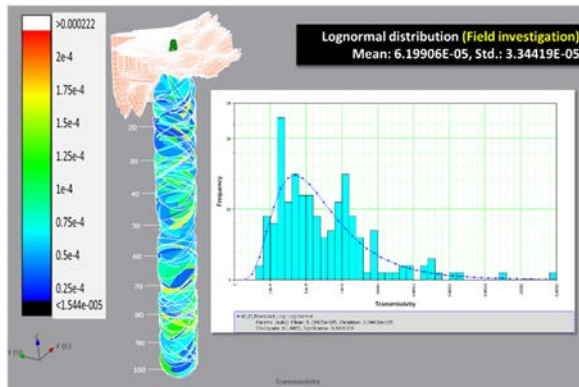


圖十五 雙流井場之地下水複合分析模型

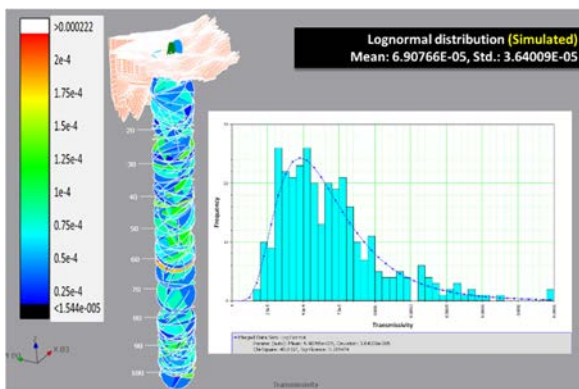
表六 OxFILET模擬結果與封塞水力試驗結果之檢核及推估之裂隙強度

OxFILET Definition File(Packer test results) (m/s)	OxFILET Definition Simulated (m/s)
2.90E-05	4.57E-05
5.50E-05	5.01E-05
5.60E-05	6.56E-05
1.10E-04	8.21E-05
1.10E-04	9.27E-05
1.4E-04	1.12E-04
Nash-Sutcliffe model efficiency coefficient, E	0.753
Pearson correlation coefficient, R	0.968
裂隙強度(Fracture Intensity, P32)	1.159

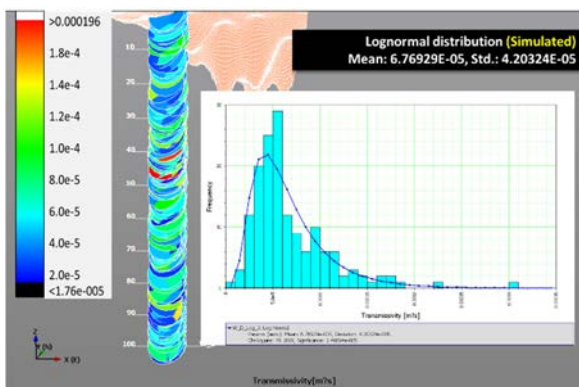
distribution), 平均值(mean value)為 $6.199 \times 10^{-5} m/s$, 如圖十六(a)所示, 接著, 分別利用第一期與第二期所建立之分析模型進行導水係數分布模擬, 如圖十六(b)與(c), 由結果可發現, 兩個年度分析之導水係數統計特性亦均屬對數常態分布且其平均值均為 10^{-5} 數量級,



(a) 孔內攝影調查(雙流站)



(b) 複合分析模型結果-雙流站(第一期)



(c) 複合分析模型結果-雙流站(第二期)

圖十六 雙流井場之裂隙導水係數分布

而第二期分析精度亦較第一期佳。故透過現地資料與模擬結果的檢核, 除可確立雙流井場複合分析模型所模擬之水力特性分布型態與現地水力特性應具有一致性外, 並能提升分析模型的準確度。

2. 地下水流路徑模擬: 在完成雙流井場地下水流複合分析模型之合適性驗證後, 本文將模擬雙流井場內各試驗井間之優勢水流路徑, 與跨孔抽水流速調查所判斷之主要透水區段進行比對。其分析成果綜整如表七, 可發現第一年度模擬結果除試驗井4號之連通區段與實際量測結果差異相對較大外, 其他2號與3號試驗井之結果與實際量測區段均相當接近。為提升連通區段掌握之準確度與可信度, 第二年度於井場內新增5號試驗井, 重新產製複合分析模型進行高導水連通路徑分析, 其中, 試驗井2號與3號之模擬結果與去年度相同, 而4號井之結果則較去年度模擬結果更接近實際量測到之透水區段。綜整來說, 透過本項議題提出的現地水文地質實務調查技術搭配複合分析模型, 已可有效掌握及評估出井場內主要透水區段及各位置可開發的區位, 此項實務技術整合分析流程將可提供未來相關單位參考使用。

五、結論

面對臺灣當前的缺水危機, 尋找合適且有效之替代水源乃是政府當務之急, 有鑑於此, 地調所於2010年度起開始推動執行山區地下水資源調查, 本團隊歷經10餘年的調查經驗, 已建立一套適用於地下水資源調查的關鍵技術來掌握變質岩區之透水裂隙區段, 且本文提出之地下水資源開發實務技術, 將有別以往採用傳統岩心樣本判釋, 或是單孔的水文地質調查, 只能進行點的推估, 無法延伸獲得真實之水流路徑之缺點。透過建立井群(multiple well)的水文地質調查方法結合變質岩場址之優勢水流路徑分析模型, 已可有效掌握及評估

表七 雙流井場透水區段調查結果與模擬結果之比較

Pumping Well: #1	Observation Well				
	#2	#3	#4	#5	
流速調查	28-30m	16-18m	12-14m	24-26m	
FracMan模擬	第1期	28-29m	19-20m	18-19m	N.A.
	第2期	28-29m	19-20m	15-16m	24-25m

出井場內主要透水區段、各位置可開發的區位與蘊含量，此項實務技術整合分析流程將可提供未來相關單位參考使用，藉以擬定適切的地下水資源開發管理方案。

誌謝

感謝財團法人中興工程顧問社大地工程研究中心羅鴻傑研究員協助進行現地水文地質調查，及黎明工程顧問公司李旺儒地質師於現地露頭調查與數值模型建立之協助，特此謝忱。

參考文獻

- 何春蓀 (1986)，「普通地質學」，五南圖書，臺北。
- 經濟部中央地質調查所 (2008)，「集水區水文地質調查評估」，財團法人中興工程顧問社。
- 經濟部中央地質調查所 (2013)，「臺灣中段山區地下岩層水力特性調查與地下水位觀測井建置(4/4)」，財團法人中興工程顧問社。
- 經濟部中央地質調查所 (2017)，「臺灣南段山區地下水位觀測與水力特性調查(4/4)」，財團法人中興工程顧問社。
- 經濟部中央地質調查所 (2019)，「水文地質調查及水位觀測井建置-北段山區及地下水補注敏感區(2/4)」，財團法人中興工程顧問社。
- Benjamin, J. R., and Cornell, C. A. (1970). "Probability, statistics and decisions for civil engineers." New York, McGraw-Hill.
- National Academies of Sciences Engineering and Medicine (2015). "Characterization, modeling, monitoring, and remediation of fractured rock." The National Academies Press, Washington, DC.
- National Research Council (1996). "Rock fractures and fluid flow: contemporary understanding and applications." National Academy Press, Washington DC, USA.
- Osnes, J. D., Winberg, A., and Andersson, J. E. (1988). "Analysis of well test data — application of probabilistic models to infer hydraulic properties of fractures." Topical Report RSI-0338. RE/SPEC INC., Rapid City.
- Singhal B. B. S., and Gupta R. P. (2010). "Applied hydrogeology of fractured rocks." 2nd edn. Springer, Berlin.