

熱脈衝流速儀應用於裂隙岩體連通性之研究

陳柏瑞¹、羅鴻傑²、周柏儀²、許世孟³

- 1.中興工程顧問社水文地質調查組 助理研究員
- 2.中興工程顧問社水文地質調查組 副研究員
- 3.中興工程顧問社水文地質調查組 高級研究員兼組長

摘 要

臺灣山區岩層長期受大地應力的作用，岩體多具有節理或裂隙，地下水主要儲蓄於破碎帶、斷層裂隙及部分孔隙中，可視為重要之替代水資源來源。裂隙為山區地下水主要流通與儲蓄的管道，透過地下岩層水力特性之調查，可有效掌握山區地下水在裂隙岩體中之流動特性及不同岩層的蓄水能力。目前地層透水性之調查以水力試驗為主，然以裂隙為主要傳輸路徑之區域，則會因水力試驗量測尺度的不同而影響裂隙傳輸能力之評估。本研究提出一調查山區裂隙含水層優勢水流路徑之方法，首先藉由音射式與光學式孔內攝影儀進行孔內裂隙影像位態調查，獲得岩層狀況、節理及裂隙分布情形，再利用熱脈衝流速儀量測井內垂直方向流速變化，藉以標定主要透水並潛在具連通性的區段，最後透過跨孔熱脈衝流速儀試驗結合單封塞水力試驗，針對裂隙分布密集的破碎帶間之連通性進行調查，建立裂隙連通路徑之概念模型。研究結果顯示，熱脈衝流速儀量測出之高透水區段與水力試驗結果吻合，且數據的精確度較高；而依據跨孔試驗結果，能有效釐清井間裂隙連通段、估算單井裂隙連通比例，並建立裂隙含水層中的優勢水流路徑。

關鍵詞：熱脈衝流速儀、導水係數、裂隙岩體、優勢水流路徑

ABSTRACT

Groundwater in the mountainous aquifer is primarily stored in fractures, joints, and cavities of the rock mass, which is an indispensable resource for life. In order to gain more insight into the fractured-aquifer hydraulic characteristics, such as fracture connectivity, preferential hydraulic pathway, as well as groundwater-storage capability, this study applies a series of borehole tests in three wells at Hoshe, Nantou. In the first stage, borehole televiewer log is conducted to obtain the fracturing degree and fracture distribution along the borehole. Packer hydraulic test is carried out to determine the rock-mass transmissivity at different depths of interest. Heat-pulse flowmeter log is adopted to identify the most permeable fracture zone. The results of flowmeter log are found highly correlated with the data obtained from the packer test. In the second stage, cross-hole flowmeter log and constant-head injection test are carried out to delineate the preferential flow paths and the connection between fractures. This experimental

methodology is capable of being applied to the investigation of fracture permeability in the mountainous area. Not only the locations of conductive fractures can be precisely determined, but also the fracture connectivity along the borehole can be quantitatively estimated. The results provide robust evidence promoting the synergistic integration of borehole-geophysics logging and aquifer testing for fractured-rock aquifer characterization.

Keywords: Heat-pulse flowmeter, transmissivity, fractured-rock mass, preferential flow path

I、緒論

台灣因板塊活動之碰撞擠壓影響，山區占全國面積的三分之二，是平原地區地下水的重要補注來源，由於山區之岩層長期受大地應力的作用，岩體多具有解理或裂隙，地下水主要儲存於山間盆地、淺層的破碎帶、斷層裂隙及部分孔隙中。其中裂隙為山區地下水主要流通與儲存的管道，山區地下岩層水力特性之調查，就是要瞭解地下水在裂隙岩體中之流動特性及不同岩層的蓄水能力。

一般水文地質參數調查方法傳統上以呂琴試驗(Lugeon Test)為主，然呂琴試驗無法提供某特定深度岩體構造區段之透水性，對於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。因此目前地層透水性調查以雙封塞水力試驗為主，利用兩個或多個封塞去分離鑽孔試驗區段，藉以計算該區段之透水性。地層透水性隨不同深度以及地質材料組成的不同，其傳輸地下水的的能力亦隨著深度而有垂直方向的變化，在以裂隙為主要傳輸路徑之裂隙岩體中，水力試驗量測區段大小，會對裂隙傳輸能力評估上造成影響，由於裂隙含水層之透水性大小取決於裂隙的連通性，地層岩性所造成的影響不大，地下水的傳導主要透過裂隙而非地層，當試驗區段內透水性高的裂隙數量與寬度固定，所選取的區段越大則會越低估裂隙的透水能力，使得既有方式量測之地層透水性精準度欠佳；此外，水力試驗難以估算單一裂隙的連通性，因此光就水力試驗結果無法分析區域性的優勢水流路徑。

裂隙岩體含水層之幾何結構具高度異向性，許多獨立裂隙交錯其中構成了連通的路徑，這些水流路徑會對抽水井進行抽水時自然的水力梯度造成影響，因此調查裂隙含水層中各裂隙之水力特性並於預測其連通路徑為一重要工作(Le Borgne et al., 2006)。目前裂隙連通性調查以示蹤劑試驗(Tracer Test)為主，然此方法需要較長的試驗時間，且受到水文地質變化的影響大，加上側向延散問題造成無

法量化示蹤劑或化學藥劑於含水層之傳輸，因此得到的結果較不可靠。

本研究嘗試建立新的裂隙含水層調查技術，透過光學式以及音射式孔內攝影儀分析裂隙位態，配合熱脈衝流速儀井場現地試驗，以及封塞注水試驗等方式，探討優勢水流路徑與區域範圍內裂隙岩體之連通性，並與水力試驗結果進行比對，希望能夠建立裂隙含水層透水性之調查方法，以提供與現實狀況相近之數據。

II、文獻回顧

近年來之裂隙岩層試驗場址中，根據驗證結果顯示裂隙岩層之水力特性與裂隙幾何參數關係密切，在高透水性岩體，地下水主要沿著孔隙流動，然而過去學者亦指出若岩體存在裂隙，則此裂隙將影響高滲透性岩體之地下水流行為(Schwartz and Smith 1988; Long et al. 1985; Lee et al. 1995)。而在低透水性岩體，如結晶花崗岩或玄武岩，母岩幾乎是不透水，水流只能在裂隙之間流動，故探討地下水於裂隙岩層之流動特性，除需考慮其地下水條件，裂隙參數將為影響地下水流動最重要之參數。

目前有許多調查地下水流速及流向的方法，包括傳統透過地下水水位高程量測來建立概念流場，再繪製地下水水位等值線圖加以研判；對於裂隙岩層之地下水流而言，主要藉由裂隙所形成之水流通路流動，因此估計此類岩體之水力性質時，裂隙幾何參數如裂隙內寬(aperture)、裂隙位態(orientation)、裂隙痕跡線長度(trace length)與間距(spacing)等都將影響裂隙岩層的滲透性，為釐清裂隙連通性與區域範圍內的水力參數之間的關連，一般利用封塞將試驗井中不同的地層或是裂隙進行區隔，並在不同深度裝設壓力計監測(Day-Lewis et al. 2000; Nakao et al. 2000)，然而這些試驗與方法需要的時間較長，且有可能受到測試環境之影響而干擾量測準確度。

對於大尺度之流動區域，井孔內的水流可以透過模擬的方式來量化其水文特性(Williams and Paillet,

2002)。然於裂隙岩層中，透水係數之大小主要受裂隙本身大小、裂隙出現密度及裂隙與裂隙間之連通性所控制，然要將水流路徑的幾何形狀與水文特性相結合，並且考慮多口井之流速數據來模擬流場動態並不容易，加上井孔的邊界條件以及含水層尺度界定的問題都提高了數值模擬的難度。

利用高解析度的熱脈衝流速儀量測，可以得到孔內垂直方向的流速變化，並計算各深度流出或補注井孔內流量(Molz et al., 1994)。針對調查裂隙含水層中的優勢水流路徑而言，跨孔的流速儀量測試驗(或許加個專有名詞)被視為一種有效的方法(Le Borgne et al., 2006)。跨孔流速儀為近年來發展相當快速的技術(Paillet, 1993)，其原理為當抽水速率改變，含水層中各裂隙所反應出的壓力水頭變化也所不同，於觀測井中就可以量測到垂直方向的暫態流場變化。此試驗可提供的資訊相當有用，特別是在山區裂隙岩體中，裂隙網絡的聯通性對於井抽水量有直接的影響，不同於單井流速儀試驗所獲得的部分裂隙訊息，其往往只能代表鑽孔附近範圍的狀況，而跨孔流速儀量測試驗則可以提供兩口井之間大尺度區域範圍的含水層資訊，並藉由定性的方式分析因抽水所導致觀測井中水流改變的情況(Paillet, 1993)，是一相當突破性的嘗試。

III、試驗技術介紹

為提升裂隙岩體水文地質特性調查精度，本研究於現地進行一系列水文地質試驗，包括孔內岩體裂隙位態調查、地下水流速調查及岩體透水性調查等。相關調查所需的探測設備說明如后。

3.1 熱脈衝流速儀

熱脈衝式流速儀係運用急速加熱配合熱感應之原理來量測地下水流速變化，其量測機制可以圖 1 說明。圖中圓點 A 為溫度感測器，L 為加熱線圈(wire)至溫度感測器之距離， μ 為流速而箭頭方向為流向。操作時首先使內部柵狀加熱線圈升溫來加熱附近流體，由於流體的流勢將帶動熱源產生沿著 μ 軸的熱對流，藉由溫度感測器偵測溫度差異隨時間之變化，亦即熱脈衝曲線，即可換算偵測區段的地下水流速。如圖 2 所示，當熱脈衝曲線波峰向上，代表位於加熱線圈上方的熱感測器接收到溫升的訊號，代表孔內地下水朝上流動；反之，若熱脈衝曲線向下，則代表流體向下方流動。

熱脈衝流速儀會受到孔徑的大小、流體黏滯性、水質以及溫度等影響，量測時需於探測儀裝置中器使其保持於井孔中央，以避免偏向井壁所造成的誤差；另流體繞過感應器亦會造成流速被低估(bypass flow effect)，因此應透過特殊裝置使地下水

強破流入感應器，以將繞流的效應降至最低。此外，考慮上述流體黏滯與水質問題，熱脈衝流速儀應在裝設濾水管井徑固定且水質清澈的環境下施測為佳。

透過孔內流速儀的量測可判定地層之滲透性、裂隙連通性及地下水的循環勢等，然單井的井測調查所得參數相對來說較為區域性，欲分析區域範圍內裂隙岩體的連通性，必須透過跨孔的熱脈衝流速儀量測試驗，才能建立完整的流場關係。

3.2 孔內裂隙位態調查

孔內攝影儀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。孔內攝影儀依訊號原理不同可區分兩種型式，包括音射式孔內攝影儀(high resolution acoustic televiewer, ACTV)及光學式孔內攝影儀(optical televiewer, OPTV) 如圖 3、圖 4 所示，其中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，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，藉由反射訊號之振幅及走時來轉換地層影像，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，如欲克服以上限制，應採兩種探測儀併行測錄的方式來得到最完整的調查結果。孔內攝影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試驗規劃之依據，將有利於減少試驗設計區段之偏差，以獲得真正欲知岩體裂隙之水力特性。

透過後處理程式的計算，可同時獲取裂隙內寬、裂隙角度及裂隙數量等資料，這些資訊除可輔助研判裂隙含水層的透水性及連通性外，亦可做為探討裂隙特性與水力特性相互關係之依據。此外，藉由投影分析方法，可進而針對不同層面、節理或破碎帶來判定其主要位態方向，對於區域地質特性提供非常重要資訊。

3.3 雙封塞水力試驗

雙封塞水力試驗係在試驗過程中利用兩個封塞(packer)去分離試驗區段，而試驗區段之長度依據不同試驗目的而有所不同，封塞可以阻隔一個裂隙破裂面、或多個裂隙破裂面、甚至整個地層構造藉由試驗結果，可以進一步評估裂隙岩體中在不同地質構造下水力特性之變化，將試驗紀錄資料進行理論曲線匹配分析可獲得相關水文地質參數成果。

IV、場址描述與現地試驗

本研究嘗試整合並改進傳統優勢裂隙的調查方式，透過：(1)孔內攝影調查位態資料，(2)熱脈衝流速儀試驗，建立實際透水裂隙深度，(3)同步進行熱脈衝流速儀與封塞注水試驗等三個階段來解析完整的裂隙岩體含水層連通路徑。

4.1 試驗場址描述

本試驗場址位於南投縣信義鄉同富村和社實驗林區，座落於西部麓山帶，其地質環境屬於第三紀至中新世沈積之淺海相南莊層地層(如圖 5 所示)。根據鑽探岩心報告顯示，該處地層深度地表下 0 至 11.7m 為岩盤覆蓋層(Regolith)，除表層 2.2m 為土壤外，其餘都是崩積層，岩盤之岩性主要為極細顆粒砂岩，淘選度與膠結良好，岩質新鮮且純淨，質地堅硬，少數裂隙有石英脈充填。

如圖 6 所示，試驗場址目前共有 10 口井，其中井 1 及井 2 為深度為 100m 的觀測井，井 4 為 45m 深、井 5 以及井 6 深度為 35m，而井 1、井 2、井 3、井 7、井 8 深度則皆為 25m。此區域地下水水位約在地表下 7~9m 之間，因其高於風化層與岩石層交界面，故可經由風化層與地表自由連通。本試驗井場初始設立之目的為求得地下水在裂隙岩體之流動特性，未避免因風化層中自由連通之地下水影響於裂隙岩體所進行之試驗，是故於每口井崩積層範圍皆設有套管，以避免地下水透過非裂隙介質流動。

本文試驗調查範圍主要集中在井 4、井 5、井 6，其中井 4 與井 6 相距約 2.5m，而井 4 與井 5 相距約為 3m 如圖 6 所示。

4.2 現地試驗

4.2.1 孔內攝影調查與水力試驗

本試驗採音射式及光學式孔內攝影併行測錄方式完成井 4、井 5、井 6 的影像掃描工作，測錄範圍為自套管以下至孔底如圖 7 所示，透過孔內攝影之技術進行孔內裂隙位態調查，配合鑽探岩心的檢視，將標定之不連續面結合立體投影分析技術，可知井 4 共有 57 條裂隙，具有 3 組主控弱面，井 5 共有 46 條裂隙，具有 3 組主控弱面，而井 6 則有 35 條裂隙，具有 2 組主控弱面，上述成果整理如表 1 所示。

孔內攝影調查結果除可用於岩層狀況研判，節理及裂隙分布之確切位置提供、弱面位態統計與立體投影分析外，同時提供孔內裂隙岩體水力試驗區段之選定，根據影像可統計試驗區段裂隙、破碎帶與剪裂泥之數量，分別於井 4 選取了 11 個試驗區段，於井 5 選取了 7 個試驗區段，各試驗區段大小以及透水係數如表 2 所示。

試驗結果顯示，井 4 主要的透水區段分布於 23.5 至 25.0m、27.0 至 28.5m 以及 30.0 至 31.5m 等三個試驗範圍，其透水係數約為 7×10^{-6} m/s，而井 5 主要的透水區段落在 28.0 至 29.5m 之間，其透水係數接近 10^{-5} m/s 數量級。此水力試驗成果將作為後續熱脈衝流速儀比對之依據。

4.2.2 單井熱脈衝流速儀試驗

在井內利用熱脈衝流速儀量測地層垂直方向透水性變化之方法已行之有年(Hess, 1986; Molz et al., 1989; Paillet et al., 1987)，透過量測井孔內垂直方向之水流速度變化，可以推算出水流進出井管的位置，因此熱脈衝流速儀試驗主要要來描述井管內水流流動之路徑。

本試驗首先針對場址內井 4 以及井 5 進行井內垂直方向水流背景值量測，在無抽水或注水干擾的環境中(ambient)，以每公尺為一量測點的間距，連續性量測井管內垂直方向的水流速度分布，結果如圖 8 和圖 9 所示。圖 8 為熱脈衝流速儀於井 4 內之流速分布，可觀察到主要的水流進出區段共有三處，由淺至深依序為 23.0~24.0m、29~30m 以及 42~43m，其中 42~43m 與 29~30m 兩處為地下水補注區段，而 23.0~24.0m 則為井內水流流出之區段；圖 9 為熱脈衝流速儀於井 5 內之流速分布，主要的水流進出區段為 22.0~23.0m 與 29.0~30.0m，其中地下水由 29.0~30.0m 區間補助入井內，從 22.0~23.0m 區間流出井管。

由單井熱脈衝流速儀試驗結果觀之，流速儀量測到水流進出的主要深度，皆對應到水力試驗結果透水係數較大的區段，相較於水力試驗儀器有試驗區段範圍上的限制，熱脈衝流速儀能提供更精細尺度的數據。對於裂隙含水層而言，裂隙連通性決定了岩層水力傳導能力，然而整個試驗區段範圍，往往僅有少數的裂隙有能力造成流量變化，水力試驗的估算有可能會低估特定裂隙的透水能力，而熱脈衝流速儀量測試驗則可以補強精確度方面的問題。

4.2.3 跨孔熱脈衝流速儀試驗

本試驗設計於井 6 藉由封塞的方式，以每分鐘 30 公升的流量大小將水注入井內，驅使井內水流經由井壁裂隙向外流出，待地下水位穩定之後，於井 4 以及井 5 進行熱脈衝流速儀量測，並將量測結果與背景值環境下(ambient)之深結果比對。圖 10 為井 4 在跨孔注水與背景值環境所量測之流速對照圖，根據注水量測結果，主要流量變化之區段同樣為三處，分別為 23.0~24.0m、29.0~30.0m 以及 42.0~43.0m，且流量變化皆為地下水經由裂隙補注至井內；圖 11 為井 5 在跨孔注水與背景值環境所量測之流速對照圖，其主要的水流進出區段為

22.0~23.0m 與 29.0~30.0m，其中地下水由 29.0~30.0m 區間補助入井內，從 22.0~23.0m 區間流出井管，此結果和背景值環境下的量測結果差異不大，惟補注區段的補注水量相較於背景值增加許多。

由試驗井場封塞注水試驗結果顯示，當井 6 以每分鐘 30 公升的流量封塞注水時，地下水由井 6 經由井 4 孔壁三處裂隙補注至井 4 的井管內，其出水量所佔的百分比為 23.0~24.0m 佔了 20%，29.0~30.0m 以及 42.0~43.0m 各佔了約 33% 左右；井 5 與封塞注水試驗時，位於 29.0~30.0m 區間的裂隙提供了所有的補注，出水量增加為背景值環境下的 6 倍左右，而向上流動的井水從 22.0~23.0m 區間的裂隙流出井管，這代表該區間並無與井 6 相連通，因此可以判定井僅於 29.0~30.0m 區間的裂隙與井 6 相連通。

V、結論與建議

本研究針對裂隙分布密集的破碎帶間之連通性進行調查，有效釐清井間裂隙連通段、估算單井裂隙連通比例，並建立裂隙含水層中的優勢水流路徑，重要研究成果如以下各點：

1. 水力試驗與單井熱脈衝流速儀試驗量測結果顯示，流速變化較大的區段與水力試驗 K 值較高之區段吻合。
2. 透過跨孔抽水或注水的方式驅動試驗井管內產生穩定水流，量測不同深度流量變化可推算出各區段裂隙所提供的出水比例。
3. 藉由封塞注水方式驅動管內水流經由優勢路徑向外流出，並將熱脈衝流速儀量測試驗結果對照背景值環境下(ambient)之數據，若流量明顯增加則反映出該深度的裂隙與注水井相連通。
4. 未來跨孔熱脈衝流速儀試驗可以搭配示蹤劑試驗進行，提供示蹤劑試驗良好的依據，並藉由試劑來量化優勢水流路徑的量測參數，有效掌握地下水在裂隙岩體之流動特性。
5. 本研究之裂隙含水層調查技術，建立井間優勢水流路徑，以及裂隙含水層的水力參數，可提供模式作為驗證。

VI、參考文獻

1. Acuna, J.A., Yortsos, Y.C., Application of fractal geometry to the study of networks of fractures and their pressure transient. *Water Resources Research* 31 (3): 527-540 (1995).
2. Day-Lewis, F.D., P.A. Hsieh, and S.M. Gorelick., Identifying fracture-zone geometry using simulated annealing and hydraulic connection data. *Water Resources Research* 36, (7): 1701-1721 (2000).
3. Gerasimos-Akis Tselentis, An investigation of the principles of operation of the heat-pulse flowmeter *Journal of Hydrology*, Volume 69, Issues 1-4, 335-349 (1984).
4. Hess, A.E., Identifying hydraulically conductive fractures with a slow velocity borehole flowmeter. *Canadian Geotechnical Journal* 23, (1): 69-78 (1986).
5. Illman, W.A., Strong evidence of directional permeability scale effect in fractured rock. *Journal of Hydrology* 319 (1-4): 227-236 (2006).
6. Kabala, Z.J., Measuring distributions of hydraulic conductivity and storativity by the double flowmeter test. *Water Resources Research* 30, (3): 685-690 (1994).
7. Lapcevic, P.A., Novakowski, K.C., Paillet, F.L., Analysis of flow in an observation well intersecting a single fracture. *Journal of Hydrology* 151: 227- 239 (1993).
8. Le Borgne, T., O. Bour, J.-R. De Dreuzy, P. Davy, and F. Touchard., Equivalent mean flow models for fractured aquifers: Insights from a pumping tests scaling interpretation. *Water Resources Research* 40, w03512, doi:10.1029/2003WR002436 (2004).
9. Le Borgne, T., Paillet, F.L., Bour, O., Caudal, J.-P., in press. Cross borehole flowmeter tests for transient heads in heterogeneous aquifers. *Ground Water* (2006).
10. Lee, C.H., Deng, B.W. and Chang, J.L., A Continuum Approach for Estimating Permeability in Naturally Fractured Rocks, *Engineering Geology*, Vol. 39, pp. 71-85 (1995).
11. Long, J.C.S., Gilmour, P. and Witherspoon, P.A., A model for steady fluid flow in random three dimensional networks of disc-shaped fractures, *Water Resources Research*, Vol. 21, (8), pp. 1105-1115 (1985).
12. Molz, F. J., Boman, G. K. Young, S. C., Waldrap, W. R., Borehole flow meters: field application and data analysis. *J. Hydrol.* 163: 347-371 (1994).
13. Molz, F.J., R.H. Morin, A.E. Hess, J.G. Melville, and O. Guven., The impeller meter for measuring aquifer permeability variations: Evaluation and comparison with other tests. *Water Resources Research* 25, (7):

VI、圖與表

表 1 孔內攝影裂隙位態調查整理表

井號	裂隙位態	裂隙數量
4	Fracture 1 : N119° 56°	57
	Fracture 2 : N066° 62°	
	Fracture 3 : N289° 30°	
5	Fracture 1 : N125° 28°	46
	Fracture 2 : N268° 70°	
	Fracture 3 : N346° 50°	
6	Fracture 1 : N112° 56°	35
	Fracture 2 : N271° 30°	

表 2 各試驗區段透水係數整理表

井號	試驗區段 (m)	試驗長度 (m)	透水係數 K (m/s)
4	19.1-20.6	1.5	9.24×10^{-9}
	20.5-22.0	1.5	4.28×10^{-7}
	23.5-25.0	1.5	7.16×10^{-6}
	27.0-28.5	1.5	6.91×10^{-6}
	30.0-31.5	1.5	7.27×10^{-6}
	31.5-33.0	1.5	8.75×10^{-7}
	33.8-35.3	1.5	1.93×10^{-8}
	35.3-36.8	1.5	9.46×10^{-7}
	36.8 -38.3	1.5	1.60×10^{-6}
	39.0-40.5	1.5	2.06×10^{-6}
5	42.0 -45.7	3.7	5.14×10^{-6}
	24.5-26.0	1.5	1.55×10^{-6}
	26.0-27.5	1.5	6.65×10^{-7}
	28.0-29.5	1.5	8.94×10^{-6}
	29.5-31.0	1.5	7.56×10^{-7}
	30.5-32.0	1.5	3.26×10^{-6}
	31.5-33.2	1.7	1.75×10^{-6}
33.2-35.0	1.8	1.54×10^{-6}	

- 1677-1683 (1989).
- Nakao, S., J. Najita, and K. Karaski., Hydraulic well testing inversion for modeling fluid flow in fractured rocks using simulated annealing: A case study at Raymond field site, California. *Journal of Applied Geophysics* 45, (3): 203-223 (2000).
 - Paillet, F.L., Borehole flowmeter applications in irregular and large-diameter boreholes. *Journal of Applied Geophysics* 55 (1-2): 39-59 (2004).
 - Paillet, F.L., Hydraulic head applications of flow logs in the study of heterogeneous aquifers. *Ground Water* 39, (5): 667-675 (2001).
 - Paillet, F.L., A field technique for estimating aquifer parameters using flow log data. *Ground Water* 38, (4): 510-521 (2000).
 - Paillet, F.L., Flow modeling and permeability estimation using borehole flow logs in heterogeneous fractured formations. *Water Resources Research* 34, (5): 997-1010 (1998).
 - Paillet, F.L., Using borehole geophysics and crossborehole flow testing to define hydraulic connections between fracture-zones in bedrock aquifers. *Journal of Applied Geophysics* 30, (4): 261-279 (1993).
 - Paillet, F.L., Hess, A.E., Cheng, C.H., Hardin, E., Characterization of fracture permeability with high-resolution vertical flow measurements during borehole pumping. *Ground Water* 25 (1): 28-40 (1987).
 - Pedler, W.H. and Urish, D.W., Detection and characterization of hydraulically conductive fractures in a borehole: the emplacement method. *EOS, Trans. Am. Geophys. Union*, 69(44): 1186 (1988).
 - Schwartz, F.W. and Smith, L., A continuum Approach for Modeling Mass Transport in Fractured Media, *Water Resource Research*, Vol. 19, (4), pp. 959-969 (1988).
 - Vernon, J.H., Paillet, F.L., Pedler, W.H. and Griswold, W.J., Application of borehole geophysics in defining the wellhead protection area for a fractured crystalline bedrock aquifer. *The Log Analyst*, 34(1): 41-57 (1993).
 - Williams, J.H., and F.L. Paillet., Using flowmeter pulse tests to define hydraulic connections in the subsurface: A fractured shale example. *Journal of Hydrology* 265, (1-4): 100-117 (2002).

圖 1 熱脈衝式流速儀原理

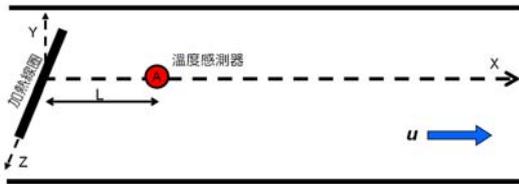
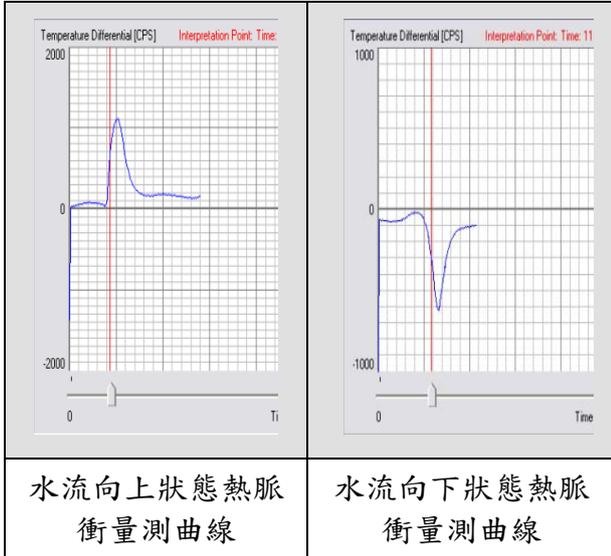


圖 2 熱脈衝式流速儀調查結果



水流向上狀態熱脈衝量測曲線

水流向下狀態熱脈衝量測曲線

圖 3 光學式孔內探測儀(左)及探測影像(右)

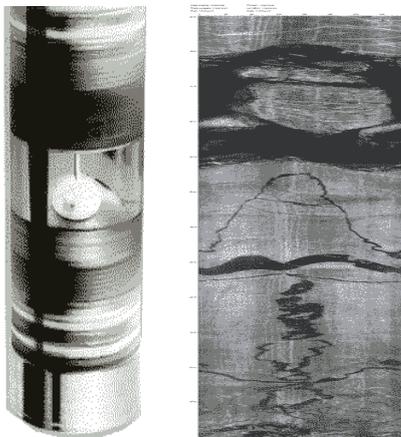


圖 4 音射式孔內探測儀(左)與探測影像(右)

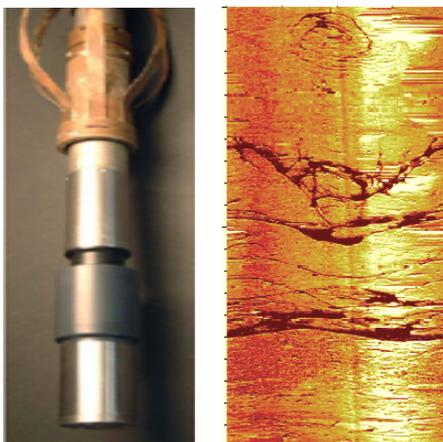


圖 5 社區地質圖

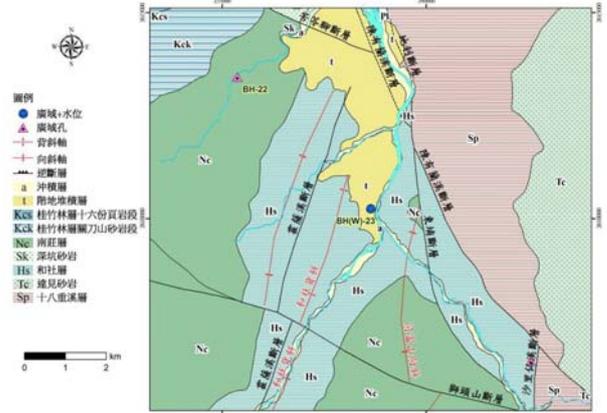


圖 6 和社井場位置分布圖

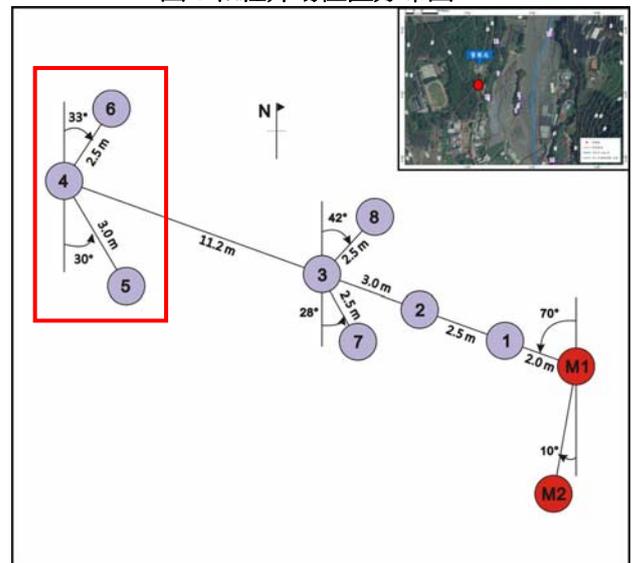


圖 7 和社井場位置分布圖

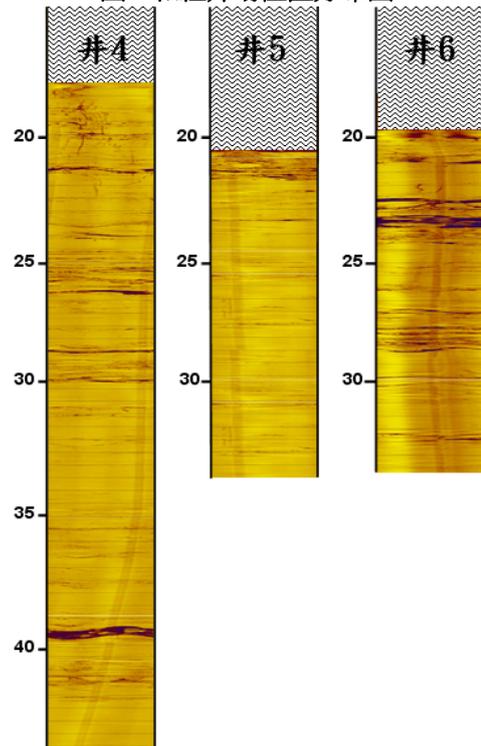


圖 8 井 4 熱脈衝流速儀與水力試驗

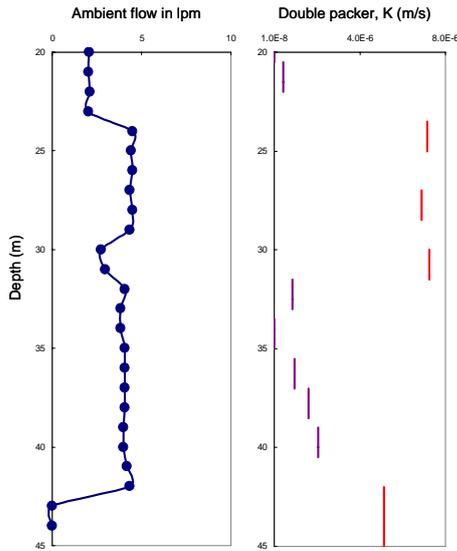


圖 11 井 5 跨孔熱脈衝流速儀試驗

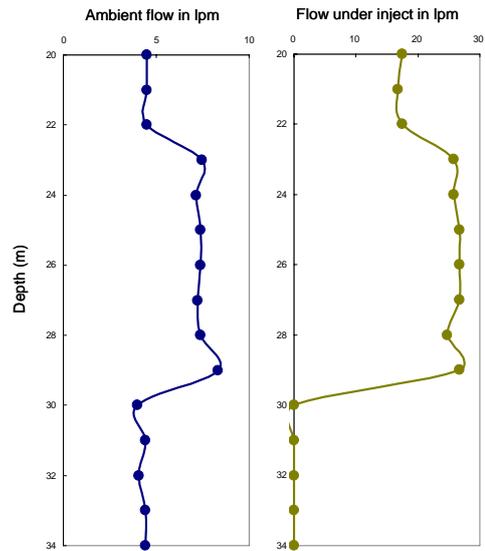


圖 9 井 5 熱脈衝流速儀與水力試驗

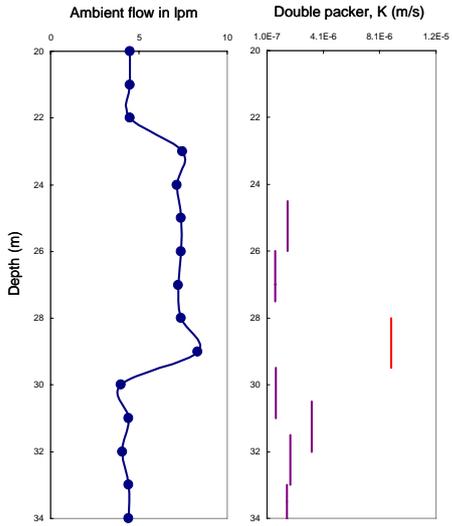


圖 10 井 4 跨孔熱脈衝流速儀試驗

