

行政院環境保護署

「100 年度土壤及地下水污染研究與技術提昇計畫」

利用熱脈衝流速儀量測井孔地下水流之研究

期末報告

主 辦 單 位：  行政院環境保護署

計 畫 執 行 單 位： 國立臺灣大學／地質科學系

計 畫 主 持 人： 賈儀平教授

計 畫 執 行 期 間： 100 年11 月26 日起至

101 年11 月25 日

中 華 民 國 101年10 月 印製

摘要

地層的透水性是地下水質監測、污染物傳輸速率與污染範圍評估、地下水污染整治的重要依據，目前的污染場址調查多採用現地水力試驗來估算含水層的平均水力傳導係數，然而含水層多為非均質，地下水流通常集中於少數透水性較高的區段，若能量測地層透水性隨深度變化，咸信將明顯提升地下水污染監測與整治工作效益。因此本研究嘗試在實驗室研發改進近期發展之熱脈衝流速儀，藉由設計水流模擬系統，測試與校正量測結果，在現地偵測井孔中的優勢水流，並估算含水層水力傳導係數隨深度的分布。

本研究分為「實驗室井管水流模擬系統建置」、「熱脈衝流速儀實驗室測試」及「熱脈衝流速儀現地測試」三個項目。井管模擬水流系統係藉由重力及水位差來驅動水流，並控制流速，以此分析流速儀量測流速與井管平均流速之關係，探討量測誤差大小與來源。熱脈衝流速儀實驗室測試結果顯示，無論裝設導流器與否，量測流速皆大於井管平均流速，兩者呈線性關係，然而其誤差隨著水流流速降低而增大，其中流速儀置放位置與摩擦損失為最主要誤差來源；此外，在低流速狀態下，熱的自然對流效應顯著影響量測誤差。裝設導流器可有效增加通過流速儀的水流流速，然而當流速超過雷諾數門檻，層流狀態轉換為亂流，誤差將大幅增加。現地試驗證實熱脈衝流速儀可量測井孔中分段水流垂向流速隨深度的變化，藉由實驗室測試得到之校正公式，可解析地層垂直方向上分層透水性分布，測試結果發現在高透水性之礫石層仍存在透水性差異。本研究整合分析流速儀在實驗室和現地測試結果，經由校正分析，將可偵測出井孔中優勢地下水流；若配合現地水力試驗的分析結果，可定量分析水力傳導係數及地下水流在垂直方向上的變化，預期可提升我國地下水污染場址水文地質調查與整治的品質與效益。

Abstract

Hydraulic conductivity of an aquifer plays a very important role in monitoring, site characterization and remediation of groundwater pollution. Hydraulic testing can be used to obtain an equivalent hydraulic conductivity of the whole aquifer. However, an aquifer is often heterogeneous and groundwater flow often concentrates in few highly permeable sections. It is desirable to delineate the preferential flow or the distribution of hydraulic conductivity. Recently developed heat-pulse flowmeter provides a promising technique for continuously characterizing the vertical distribution of hydraulic conductivity in a borehole. The objective of this project is to develop and improve heat-pulse flowmeter measurement techniques for investigating the variation of hydraulic conductivity with depth in an aquifer. A carefully designed water circulation system was established in the laboratory to evaluate the accuracy and precision of flow velocity measured by heat-pulse flowmeter in various conditions. We found a linear relationship between the measured velocity and the averaged velocity for the laminar flow. The measurement error increases as the averaged flow velocity decreases due to free convection. A calibration formula was developed based on the laboratory test data. Field test results at two sites indicated that heat-pulse flowmeter measurement can detect the locations of preferential groundwater flow in gravel aquifers. By integrating the results of hydraulic test, the vertical distribution of hydraulic conductivity in a borehole can be delineated. The result of this research is expected to provide an emerging technology which can significantly improve the quality and efficiency of site investigation and remediation of groundwater pollution.

報告大綱

地下水污染造成民眾生命財產損失，更造成生態永續發展的一大危害，然而因地質環境的不確定性，造成含水層環境之水力特性無法精確分析檢視，使得地下水污染的調查與整治過程中一大難關。有鑑於此，本計畫以熱脈衝流速儀為主提，旨在研究、發展精確且有效的現地水文地質調查技術，咸信能提升地下水污染監測與整治工作效益。本報告以「實驗室量測方法與過程」及「熱脈衝流速儀現地試驗」兩大部分為主題進行討論。

「實驗室量測方法與過程」。各項評估報告指出井孔內流速儀是量測水力傳導係數空間分布最具發展性的一項技術，本研究於實驗室內建置井管水流模擬系統，利用重力與水頭差驅動水流運動，模擬現地地下水監測井抽水之過程，以此進行熱脈衝流速儀之測試，同時利用閥門改變井管中水流流速及將熱脈衝流速儀置放於井管不同位置，分析其量測流速與理論流速之關係，建立校正實驗式，並分析兩者間的誤差來源。

「熱脈衝流速儀現地試驗」。本研究選擇兩個場址進行熱脈衝流速儀現地驗證與試驗，分別為台大農場與台中市大肚區的兩口地下水觀測井。兩地區於地質環境與地下水觀測井之井體結構皆不同，便可利用熱脈衝流速儀進行分析討論。透過現地水力試驗配合流速儀量測結果，得以量化地層之分層水力傳導係數於垂直分布上差異，或採用本研究所定義之透水性指標(**K Index**)界定地層依深度變化上之相對透水特性。

第一章 計畫緣起與目的

1.1 計畫緣起

地下水污染不僅影響地下水的正常用途，例如飲用、灌溉、洗滌、沐浴等，而且威脅到國民健康及生活環境，並導致民眾財產損失，其影響層面更可能擴及到生態問題與環境永續發展。為預防及整治土壤及地下水污染，確保土地及地下水資源永續利用，改善生活環境，維護國民健康，我國在 2000 年制定了土壤及地下水污染整治法，推動地下水污染調查與整治工作。

台灣的地下水污染多出現於西部沖積平原地區的含水層，由於含水層通常由許多厚薄不一的未固結沉積層組成，在空間分布上有所差異，因此加重了污染場址的調查及整治的難度，對於污染物傳輸速率與方向、污染範圍界定、污染物及其衍生物的分布、污染整治方法及其可行性都有莫大的影響。過去藉由地下水流模式逆推以及長期觀測污染物的傳輸速率等方法，常發現真實的傳輸速率會比場址現地水力試驗所估計的值高出許多，而含水層之水力傳導係數為地下水流動的主要控制因素，也是地下水質監測、污染物傳輸速率與污染範圍評估、地下水污染整治的重要依據，含水層的透水性隨深度變化的差異，往往是地下水污染調查成效不彰及整治系統效能低落的重要原因，造成整治技術無法依據污染源的真實主要傳輸路徑進行有效的設計(Mercer *et al.*, 1990; Haley *et al.*, 1991)。目前常用的地下水污染整治技術，例如抽取處理(pump-and-treat)及生物整治(bioremediation)方法，更需要瞭解現地水文地質特性在空間上的分布。目前的污染場址調查多採用現地水力試驗來估算含水層的平均水力傳導係數，然而含水層多非均質，地下水流通常集中於少數透水性較高的區段，若能量測地層透水性隨深度變化，威信將明顯提升地下水污染監測與整治工作效益，因此我國亟需逐步引進及研發相關現地調查技術，繼之以模場試驗，以驗證研發技術應用在地下水污染場址之可行性。

1.2 計畫目的

本計畫旨在研究發展精確有效的現地水文地質調查技術，偵測含水層中地下水流變化，估算井孔中水力傳導係數在垂向上的分布，以提供監測地下水質、評估地下水污染分布及整治地下水污染更為精確的依據，並提升我國地下水污染調查與整治的品質與效益。

1.3 計畫背景

目前常用的現地水文地質調查方式，包括複井抽水試驗、微水試驗及水位回升試驗等，其功能僅止於估算整個含水層的平均透水性質，無法描述含水層特性在垂直方向上的差異。在多數的情況下，水力參數的計算與解釋常受限於現地的量測能力，因此調查水文地質系統中水力參數的垂向分布，需要更有效的量測技術。封塞試驗是近年常使用並能解析井孔中分區段水力傳導係數的現地水力試驗，例如呂琴試驗(Lugeon Test)及雙封塞試驗(Double-packer Test)，然而呂琴試驗量測精準度欠佳，而雙封塞試驗分段操作過程相當耗費人力、物力及時間。國際上有些研究對量測垂直向水力傳導係數分布的技術進行評估與試測(Boggs *et al.*, 1989; Rehfeldt *et al.*, 1989; Molz *et al.*, 1989, 1990)，包括小尺度的示蹤試驗(Small-scale Tracer Test)、實驗室滲透儀試驗(Laboratory Permeameter Test)、多層微水試驗以及井孔內流速儀試驗(Borehole Flowmeter Test)。這些評估報告指出，井孔內流速儀是量測水力傳導係數空間分布最具發展性的一項技術。過去四十年間發展出許多量測井孔內水流流速分布的技術，旋葉式流速儀(Impeller Flowmeter)早年廣泛應用於石油工業，近年來逐漸開始應用於地下水相關領域(Hufschmied, 1983; Molz *et al.*, 1990)，其操作過程較為迅速，但僅能在高流速的環境中使用，在低流速環境則難以驅動旋葉轉動，或是出現頗大的量測誤差。熱脈衝流速儀(Heat-pulse Flowmeter)則為美國地質調查所(USGS)針對較低流速環境所發展出來的量測技術(Hess, 1986)，在低流速環境具有相當良好的解析能力。電磁式流速儀(Electromagnetic Flowmeter)則同樣可以適用於大多數地下水相關調查所需要的流速範圍(Young *et al.*, 1998)，但受限於井管內流體之導電性影響，在較低流速的量測環境下解析較差。

1.4 工作項目

研究發展更有效率且精準的試驗方法和儀器，並以定量方式量測不同深度地層的透水性，一直是學界與業界追尋的目標，本研究即以此為宗旨，經考量各項技術的適用性後，本研究選用熱脈衝流速儀量測技術的應用進行試驗、評估與驗證，並參考過去國外的相關研究(Morin *et al.*, 1988; Paillet *et al.*, 1987)，嘗試進一步改進其量測技術，期望應用於地下水污染調查。本項技術之研究發展過程主要包括下列三項工作，其中第一項與第二項為本年度研究計畫之主要工作內容：

(1) 實驗室水流流速量測試驗、分析及校正

熱脈衝流速儀的量測技術具備潛力偵測不同深度地層之透水性，然而過去的研究發現量測的流速存在不確定的誤差，特別是流速過低的狀況，同時也會受到現地環境、試驗操作流程及多項變因的影響。本研究將在實驗室模擬不同井管尺寸、熱脈衝流速儀在井中位置、改變水流流速等狀況，驗證熱脈衝流速儀之量測結果是否能確實反應出井管中水流流速的變化，檢視流速儀在不同環境下所測得之流速差異，並研究各種因素對量測流速的影響，以期獲得不同變因下之校正實驗式，得以估算更可靠的試驗結果，以改進流速儀量測資料的分析與解釋。

(2) 地下水流垂向分布現地調查測試

本研究將以熱脈衝流速量測技術為重心，發展及改進地下水流垂向分布的現地調查技術，並選擇合適的地下水觀測井進行實地測試。熱脈衝流速儀現地量測結果將用以分析優勢地下水流分布，如能以現有水力試驗方法求取平均水文地質參數，將計算分段地層之水力傳導係數，佐證及解釋流速儀量測結果，期望以較為標準化試驗程序建立地下水污染場址水文地質調查方法。

(3) 評估應用於污染場址調查之可行性

熱脈衝流速儀近年引進台灣後，雖曾應用於測勘高鐵隧道滲漏及裂隙岩體中的優勢地下水流路徑等問題，然而尚未嘗試明瞭這項技術在地下水污染方面的適

用性。量測地層分層透水性於地下水污染場址尤其重要，其提供未來調查與整治之重要訊息，然而在地下水污染場址進行現地試驗具有相當挑戰性，包含熱脈衝流速儀自身的限制條件、場址施作時的流程與污染環境等因素。在下一年度計畫研究過程中，將配合地球物理井孔測勘及水力試驗，進行熱脈衝流速儀量測之模場試驗，以評估此項技術之可行性、限制條件及其對地下水污染調查與整治之潛在應用價值。

第二章 熱脈衝流速儀實驗室測試方法與過程

本研究在實驗室設計模擬井管水流系統及井孔模型，藉由改變不同參數及條件，探討在各種變因下熱脈衝流速儀所測得之流速，並與理論流速進行比較分析，以獲得其量測之精確度與誤差，並以統計方法推導相關校正實驗式，同時分析地下水流速與深度之相關性。本研究在實驗室進行熱脈衝流速儀量測的方法、井管水流模擬系統設計、實驗室流速測試資料的分析及誤差來源的物理機制、地下水流垂向分布之數學模式分述如下：

2.1 熱脈衝流速儀量測方法

本研究係採用 Robertson Geologging 公司所製造之熱脈衝流速儀，總長 2.24 公尺，重量為 9.4 公斤，本體直徑為 50 公釐，量測元件內徑為 44 公釐(Robertson Geologging Ltd., 1997)，可於裸孔或裝設濾水管的井管中使用，由於其尺寸因素，僅能在井徑超過 2 吋以上的井管中施作，而運作環境限制於攝氏 70 度、壓力 20MPa 以內(表 2.1)，然而可由原廠改裝，進而在更高溫及高壓環境中施作。熱脈衝流速儀主要用途為量測井管中液體垂直方向之流動速率，為使水體於井管中流動，可搭配抽水或注水的方式於井孔內進行量測，以探測地層透水性隨深度的變化，亦可由偵測地層中優勢水流的方式，調查地層破裂帶的位置。熱脈衝流速儀主要結構如圖 2.1 所示，由加熱線圈以及上下兩個高靈敏度熱感應器組成，加熱線圈距離上下感應器皆為 5 公分。水流通過線圈部分，當指令下達時，加熱元件可釋放能量，產生脈衝式的熱源，放熱指令同時啟動了資料記錄器和後端軟體，並開始流速量測工作。熱源隨水流移動，由上方或下方的熱感應器偵測，利用資料記錄器記錄到的初始溫度變化之瞬間與開始加熱時間的差值，可測得受熱水流抵達感應器之時間，即可計算井管中水流流速。當管內水流向上流動，利用發熱線圈瞬間加熱流經附近之水流，若上方熱感應器偵測到溫度上升，則熱脈衝曲線朝上方改變(圖 2.2)；反之，曲線則朝下方變化。讀取熱脈衝曲線初始變化瞬間之時間，即為水流從發熱線圈流至熱感應器所需時間。

表 2.1 熱脈衝流速儀之規格及適用環境

直徑 / 內徑	50 mm / 44mm
長度	2.24 m
重量	9.4 kg
最高適用溫度	70°C
最大適用壓力	20 MPa

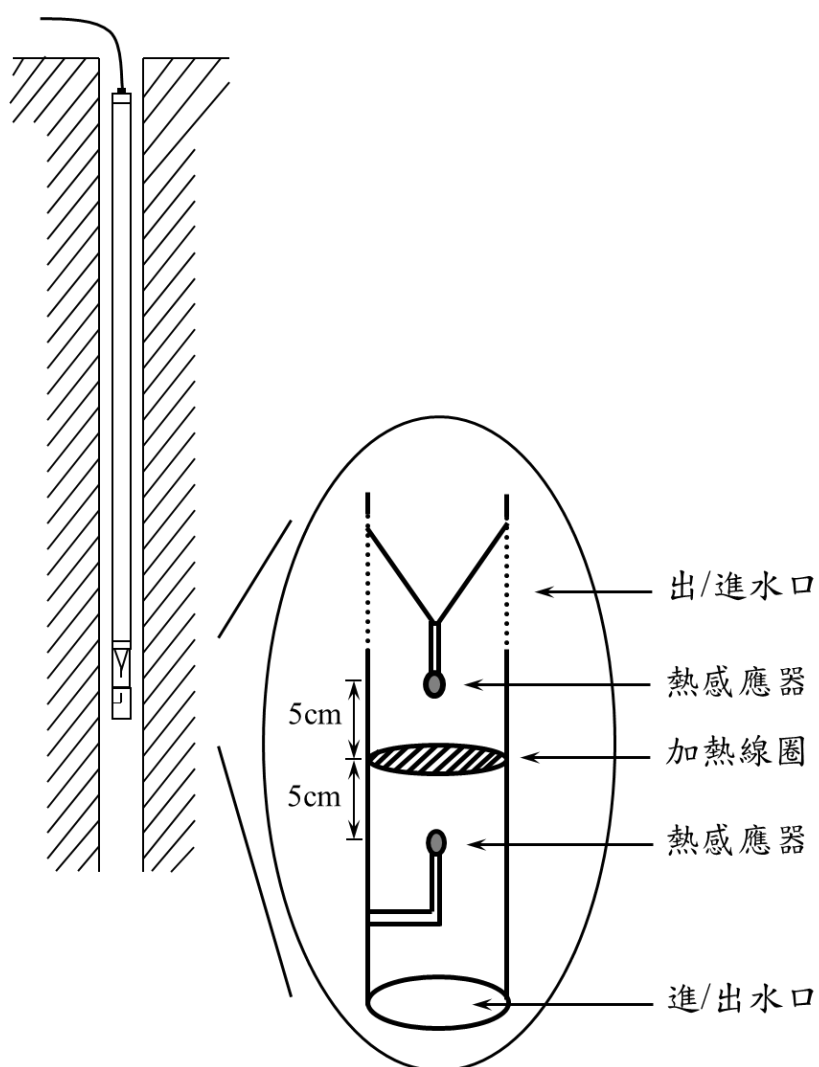


圖 2.1 熱脈衝流速儀構造示意圖

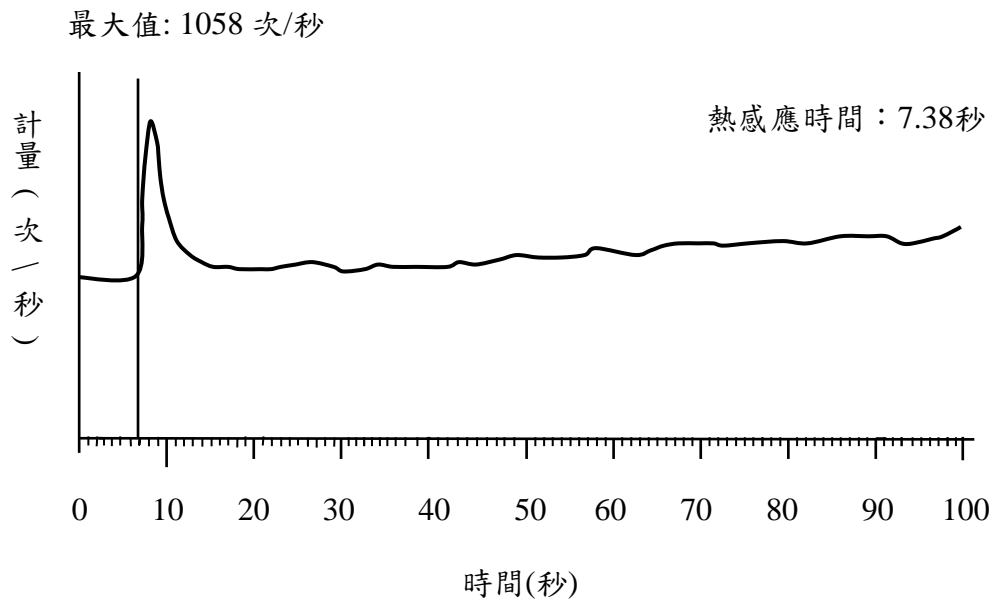


圖 2.2 熱脈衝流速儀量測曲線

如熱脈衝流速儀此類靈敏的流速量測儀器，在地下水相關的現地應用上可以提供許多重要的資訊，包括針對井孔內各區段的透水性進行直接量測、評估井篩的位置與狀態、在觀測井中釐清自然水流的路徑、偵測井內中地下水流進出的區段等。過去的研究指出在評估觀測井中污染物傳輸時，井孔內流速儀量測提供了不同化學物質與水混合後在自然水流或是抽水狀態下可能進入井體的直接路徑 (Church and Granato, 1996; Collar and Mock, 1997; Martin-Hayden and Robbins, 1997)。在裂隙岩體中，地下水流可能僅流經少數的裂隙區段，而流速儀可以提供良好的鑑別能力。井孔內自然水流的流動方向有助於評估垂直向水力梯度，這些資訊可以提供建立場址地下水流系統的概念化模型的依據。這種技術也可以應用在礫石層中，提供水力傳導係數在空間上分布的細節資料。

2.2 實驗室井管水流模擬系統

本研究旨在進行實驗室模擬系統的建立，利用不同抽水速率下造成井管中水流流速變化，分析不同抽水量造成的理論流速及熱脈衝流速儀測得的實際流速進行儀器量測精確度的分析，並以校正兩者間的關係性。為使實驗室得到之試驗結

果能應用於現地環境，將模擬系統設計為與現地地下水井相似的觀測環境，井管使用現地常用的 2 英吋或 4 英吋壓克力管模擬地下水監測井和觀測井，目前已完成 4 英吋壓克力管之建置；井管水流則採用水頭差驅動水流循環，以模擬現地水力試驗中抽水與注水的行為，實驗配置如圖 2.3 所示。利用抽水幫浦將水由抽水槽中汲取至儲水槽，經由管線使水流由壓克力管下方控制閥進入井管中，由於儲水槽高程較井管頂來得高，可利用重力及連通管原理驅動水流，井管頂則設置溢流孔，使井管中維持定水頭的實驗條件，流量量測槽可承接溢流水，並同時量測井管中之水流流量，獲得量測數據後將之放流至下方抽水槽，再經由抽水幫浦抽至儲水槽中，進行下一個循環，即形成循環水流系統。

一般認為雷諾數(Reynolds number)小於 2100 時，可將水流運動視為層流系統，高於此值則使亂流逐漸加劇，影響量測結果，因此本實驗即以能反映圓形管流動特性的雷諾數和入口長度(entrance length)作為實驗系統的參考依據，以降低井管內亂流和井管對流速量測所造成之影響。由於本模擬實驗設計範圍超過層流與亂流之臨界值，因此同時進行高流速下熱脈衝流速儀量測數據之分析。

熱脈衝流速儀之量測結果受多項變因影響，本實驗則控制其他環境條件，將流速儀以置中的方式進行操作，僅變動井管內水流流量，於不同流速條件下進行多次實驗，為求實驗數據的可靠及穩定，每次記錄八筆以上的數據，並求得平均值。量測結果不僅可估算流速儀量測之精度與誤差，探討誤差來源及其與流速之間的相關性，亦可評估量測之限制條件。此外將量測流速與流量所推算得之實際平均流速進行統計分析，求得流速之校正實驗式，並於現地試驗所量測結果進行校正。

然而若於地下水污染場址進行抽水，可能造成現地處理上的困難及二次污染，同時因地層水力參數之差異，造成抽水量受到限制，因此本研究未來將考慮採用注水的方式進行實驗，基於井管水流為固定方向，改以設計可倒掛流速儀之水流實驗系統，以此模擬向下通過流速儀的水流運動，其餘實驗方法如同一般流速儀試驗。本實驗系統以改變水流方向進行重複試驗，測試實驗室在不同水流方向得到的結果及流速校正依據，以做為本研究現地試驗之數據修正及污染場址的應用可行性分析。

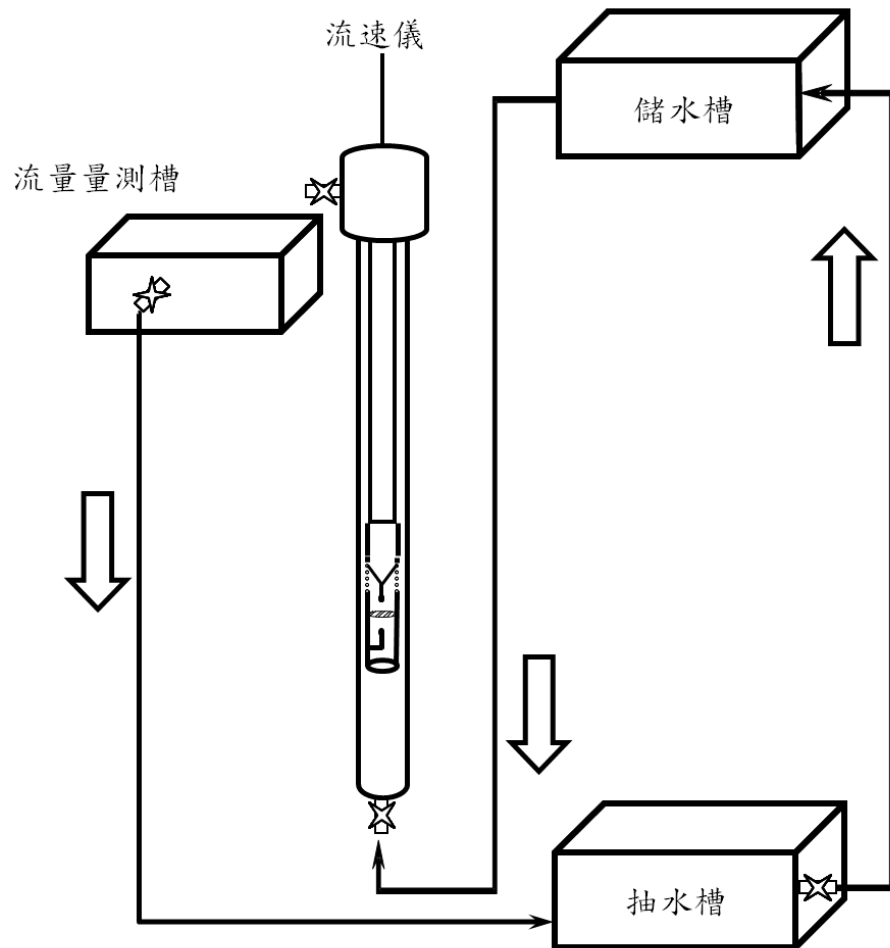


圖 2.3 實驗室流速儀模擬量測系統示意圖

本實驗系統設計為流速儀可在變動流速環境下進行反覆測試，目的為提供一個理想的試驗環境作為驗證熱脈衝流速儀量測結果之用，並盡量降低各種人為誤差干擾，以評估熱脈衝流速儀的應用能力和操作限制。實驗系統共包含三個主要元件：熱脈衝流速儀、電子訊號設備和循環水流裝置。

各項實驗元件利用不銹鋼支架作為主要的乘載結構，熱脈衝流速儀設置於 4 英吋(94mm)壓克力管內，其為實驗進行的核心。井管的管體設計部分，選用透明之壓克力管，可隨時觀察水流流動情況和流速儀的安裝位置是否偏移，而由於熱脈衝流速儀長度逾 2 公尺，因此透明壓克力管的長度須超過 2 公尺以上。井管底部則設計放置約 20 公分厚的填充材料，作為穩定井管內水流流線與減少亂流之用，為尋找最適宜量測及進行實驗的材料，本研究採用小礫石、彈珠、砂及不同比例之混合材料試驗，發現以小礫石為主之填充材料可以獲得最佳的水流狀態。當水流通過井管底部之填充材料時，水流狀態為適宜進行量測的層流狀態，同時於此定流量環境下之水流變動誤差可控制在 5% 以下。

水流驅動裝置部分，本研究考量抽水機於井管內直接抽水不易製造穩定水流的缺點，改採水頭差異驅動的方式來提供水流。本系統分設儲水槽、流量量測槽、抽水槽，並於儲水槽增設溢流構造，持續提供穩定的高水頭驅動水流經由模擬井管的下方進入井管，再由模擬井管上方的溢流口排出，即可形成井管內定水頭的實驗條件。而井管溢流出的水則經過通路流經流量計進行量測，記錄流量後即排入下方流量量測槽，系統流量可操作範圍為 500 ml/min 至 6000 ml/min，經過反覆測試，定流量環境下之水流變動誤差可控制在 5% 以下。

考量現地試驗過程受限於環境因素，可能因為抽水量降低造成流速減緩，流速過低的情況下，則會影響流速儀的量測結果進而產生誤差甚至無法量測，因此本研究亦嘗試發展可適用於不同井管狀態下的導流器封塞裝置，藉由縮小井管內的截面積，在不更動原本的實驗條件下即可將原有的水流速度提升，再配合實驗室的校正結果，不僅可加速流動速率，藉此增加熱脈衝流速儀對於低流速狀態下的量測能力，更可強制使其通過流速儀內部，減少其他可能造成誤差的因子。

導流器裝置(圖 2.4)主要目的即為封塞井管內流速儀和井壁之間的空間，並期

望設計具有容易操作且可隨不同環境進行更動的特性，目前使用的材料為發泡海綿和橡膠襯環，實驗過程仍持續改變實驗系統的水流速度，藉此分析探討流速儀對於低流速環境下的適用情況以及對於高流速狀態下的量測能力，導流器安裝後，熱脈衝流速儀於本系統可量測到的最低極限流量由未安裝前的 500 ml/min 降低到 200 ml/min。固定流量狀態下，溢流口反覆測量的流量值則仍維持未安裝導流器前的穩定程度。

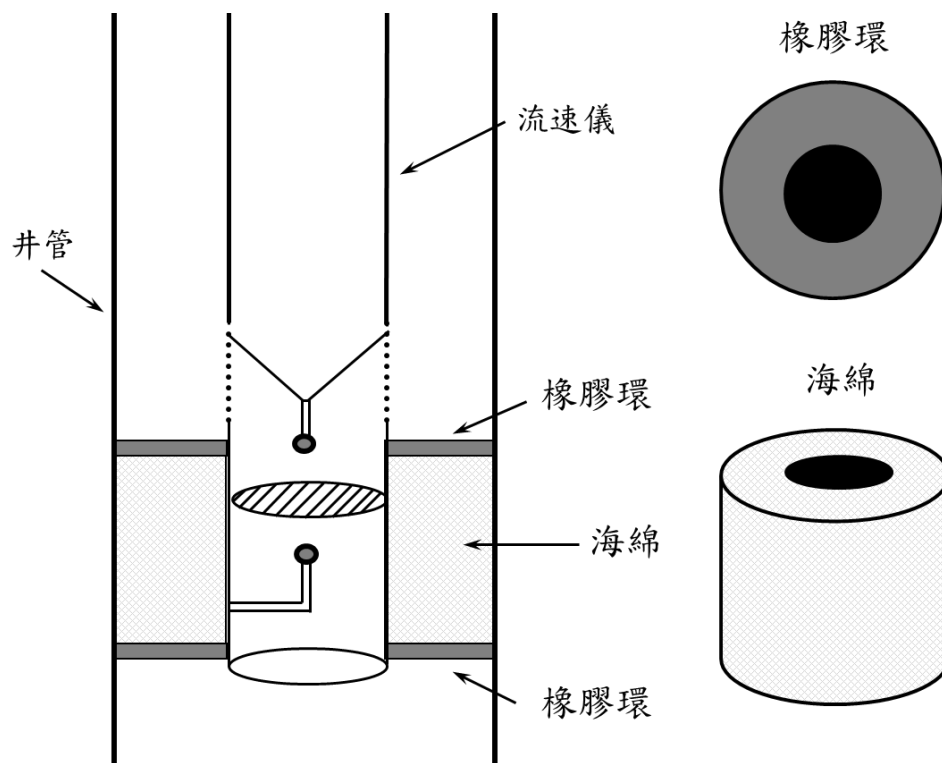


圖 2.4 導流器裝置示意圖

2.3 實驗室流速測試資料分析

本研究在進行熱脈衝流速儀量測試驗之初，井管底部中央的小孔為入水孔，由於水管中央的流速頗高，造成熱脈衝流速儀量測數據不甚穩定。本實驗將井管底部置放 20 公分厚的礫石後，量測之流速穩定度上升且誤差值變動幅度也下降。一般而言，井管內水流最高流速位於管中央，由於井壁與水體間的摩擦力，造成流速越靠近井壁越低，尤其在層流的情況下，該現象更加顯著。因此本研究於此部分進行兩類型的試驗，分別為將流速儀置放於井管中心及貼近井壁兩種，每一筆資料經過反覆量測記錄，同樣流量情況下取 8 筆資料點求平均值並計算誤差(Error)和精確度(Precision)。

流速儀置放於井管內的正中央時，將井管內的平均流速(V_a)與熱脈衝流速儀的量測流速(V_m)作圖即可得到兩者的相對關係，如圖 2.5 所示。其中井管內的平均流速(V_a)定義為井管內單位面積的進流量，即

$$V_a = Q/A = 4Q/\pi D^2 \quad (1)$$

式中， Q : 流量 (L^3T^{-1})

A : 截面積 (L^2)

D : 管體直徑 (L)

因此利用流量計測得之流量可推算出平均流速。而熱脈衝流速儀經由資料接受器轉換出的數據為發熱線圈開始加熱到熱感應器接受到之間的歷時，發熱線圈和上下熱感應器的距離又固定為 5 公分，因此井管內的量測流速(V_m)為：

$$V_m = 5/t \quad (2)$$

式中 t 為歷時 (T)

將熱脈衝流速儀的量測流速和平均流速進行線性回歸後如圖 2.5 所示，圖中虛線為對應平均流速的理論量測流速，經過比較可以發現實際量測的流速隨著平均流速增加亦呈相當良好的線性增加關係，相關係數達 99。

量測誤差(Error)定義為量測流速和平均流速之間的差異對於平均流速的比值，

即 $(V_m - V_a)/V_a$ 。圖 2.5 顯示，隨著實驗系統最高流速 1.37 cm/s 降至 0.18 cm/s 的過程當中，量測誤差從 4.6% 逐漸增加到 94.4%，當處於相對低流速的量測環境時，熱脈衝流速儀的量測結果與平均流速已存有相當大的差異。實驗過程當中，由於每一個變動流量的測試點都有 8 次的反覆試驗，將此 8 次反覆試驗測得之量測流速結果進行分析，量測精確度以變異係數(Coefficient of Variation, C_v)來表示，隨著井管內平均流速的改變，精確度的範圍為 0.4% 至 5.8% 之間。實驗結果顯示，反覆試驗的精確度會隨著流速不同而改變，在低流速環境有較高的精確度。

當流速儀的置放位置靠近井壁時，將平均流速和量測流速進行線性回歸(圖 2.6)，其中黑色方形為對應不同平均流速時的量測結果，而空心圓點則為置放於井管中央所量測到的流速結果。實驗結果顯示流速儀的量測流速在相近的平均流速環境下，靠近井壁時的結果會明顯低於置放於井管中間時所測到的數據。當井管內流速較快時，量測流速和平均流速的結果較為接近，實驗誤差在流速範圍由 0.77 cm/s 降低到 0.18 cm/s 的環境下，由 2% 增加到 50%。誤差分布的特性和置放於井管中間一樣，都隨著流速的降低而增加，雖然靠近井壁的量測結果在對應不同平均流速下的誤差皆小於置於井管中央的情況，但線性回歸得到之斜率在靠近井壁時為 1.15，明顯大於置放於井管中央時的 1.05，顯示有另外影響實驗結果的因素存在，造成量測結果的線性回歸曲線斜率增加。

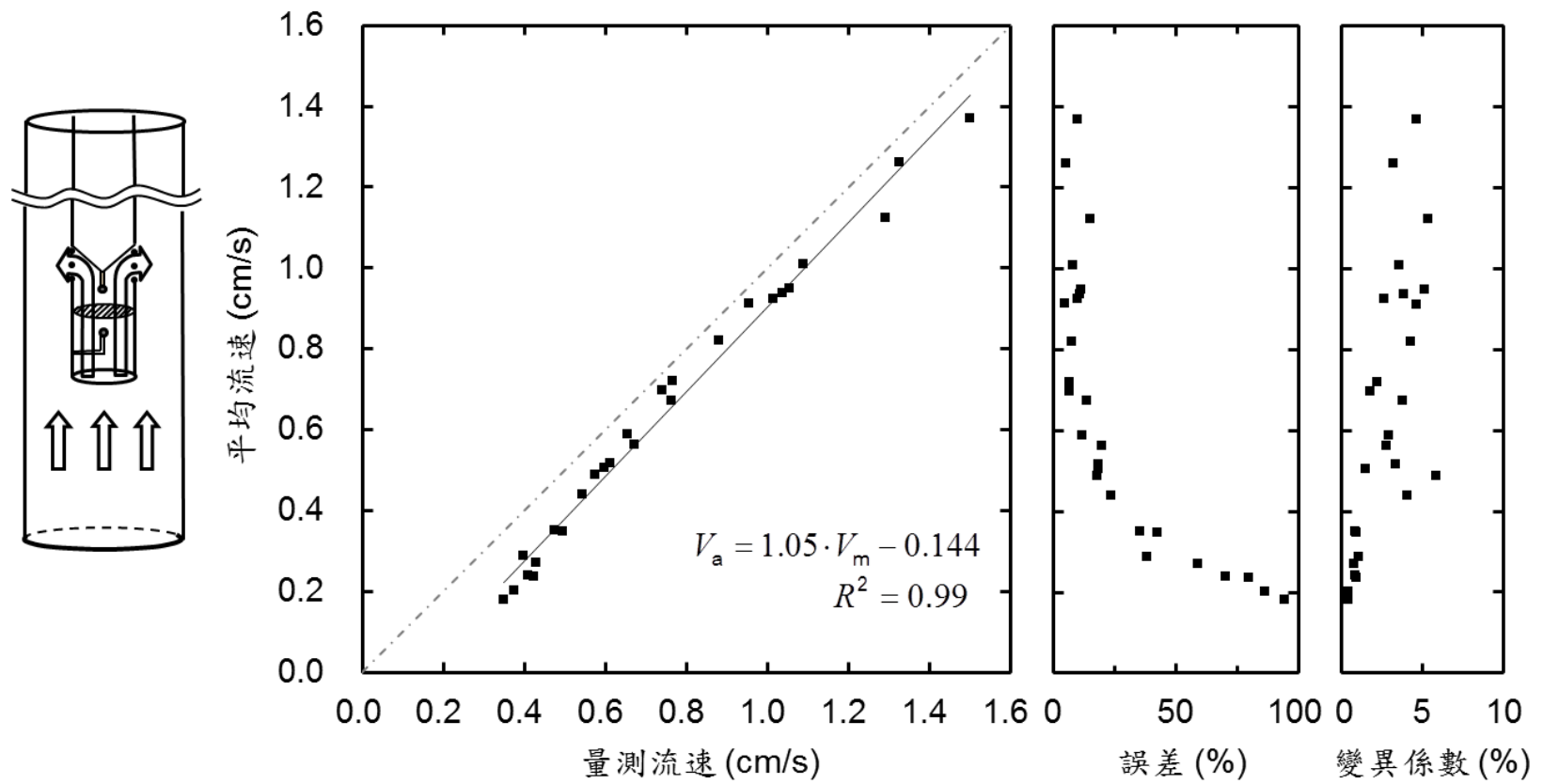


圖 2.5 流速儀置中量測結果

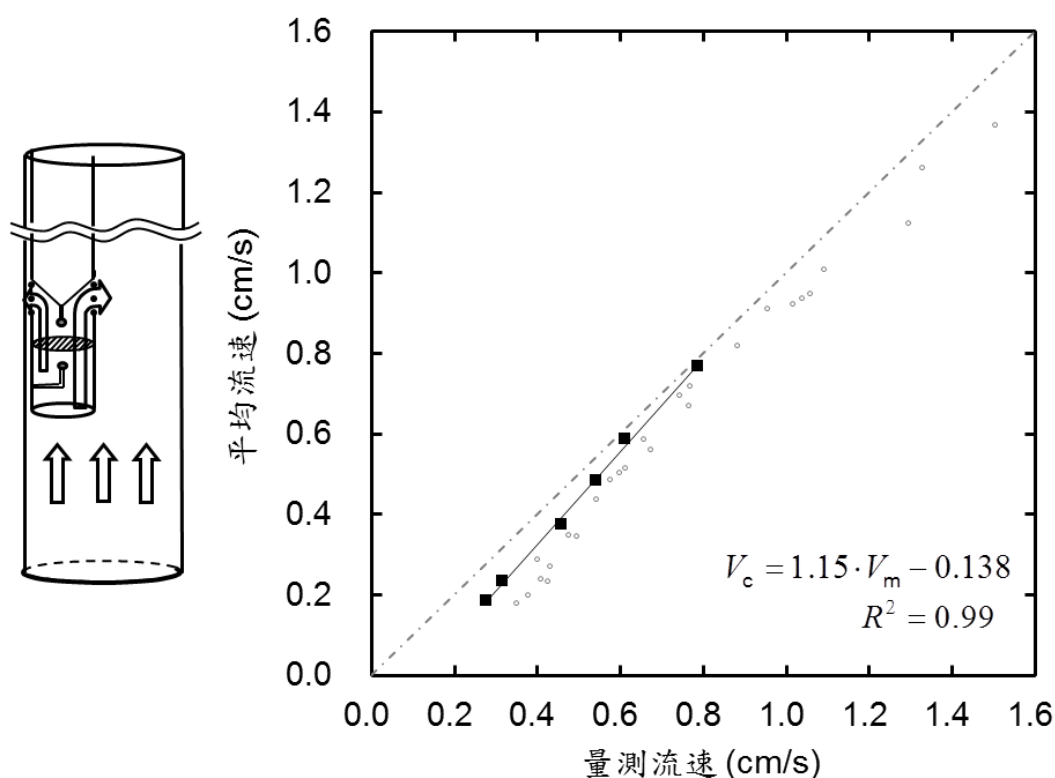


圖 2.6 流速儀靠近井壁量測結果

根據實驗結果，不論是將流速儀置於井管中央或是靠近井壁，量測流速皆高於平均流速，誤差也隨著對應平均流速的增加而擴大，顯示存在一固定的系統誤差，當流速靠近井壁時，量測流速線性回歸的斜率也和置中情況不同，表示流速儀在井管內的置放位置也為影響量測結果並改變誤差程度的因素之一。

熱脈衝流速儀的量測機制主要是利用熱的傳遞來達到量測流速的目的，而熱的傳遞方式包含傳導、對流和輻射三種。由於本研究實驗系統於水中進行實驗分析，流速儀內發熱線圈製造的溫度差也相當小，因此在水中的熱輻射傳遞效應將可以忽略，熱傳導和熱對流則為可能影響熱脈衝流速儀實驗結果的因素之一。

Peclet Number 為一個評估熱傳輸中熱傳導和熱對流強度的無因次參數：

$$Pe = LV/\alpha = Re \cdot Pr \quad (3)$$

式中 L : 特徵長度 (L)

V : 流速 (LT^{-1})

α : 熱擴散係數 (L^2T^{-1})

Pr : Prandtl Number

Prandtl Number 則為動力擴散係數和熱擴散係數的比值，同樣為無因次參數，在 $20^{\circ}C$ 的水當中大約等於 7。因此根據本實驗模擬系統的水流環境以及熱脈衝流速儀的幾何結構來計算，Prandtl Number 皆相當大，顯示當水流經過熱脈衝流速儀發熱線圈受熱後，主要提供熱傳遞的驅動力為熱對流，相較之下熱傳導所佔的比重極微。而在大多數的情況下，熱的強制對流為主要驅動熱傳遞的媒介，然而當流速儀在低流速環境下操作時，熱的自然對流效應所扮演的腳色就會越來越重，在完全靜止的水流環境當中，熱的傳遞將完全由熱的自然對流效應所控制，熱的自然對流效應即成為熱脈衝流速儀量測過程當中，低流速環境下最主要的誤差來源。

此外，在層流的環境下，圓柱體內的水流經過一段路徑後受到管壁摩擦力的影響，會逐漸形成拋物線型(Parabolic Flow)的分布，靠近井壁的水流速度會趨近於零，而井管中央速度會比較快，管內水流的速度曲線分布如圖 2.7 所示，這樣的效應即為摩擦損失。

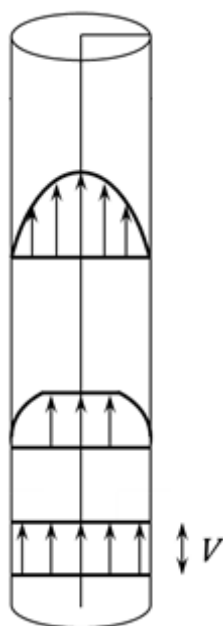


圖 2.7 摩擦損失影響管流流速分布示意圖

依據緊靠井壁的情況下進行的實驗結果顯示，井壁造成的摩擦損失對於水流速度的影響不能忽略，量測流速明顯比置放於井管中央慢。而流速儀內部構造的發熱線圈為柵狀，水流通過時會因為阻力而影響原來的水流速度，以及井管內水流受到流速儀進水口的幾何形狀影響改變原本層流狀態的流線分布，這些都屬於受到摩擦損失的影響而可能產生量測誤差的原因。

經由分析影響本研究模擬實驗系統的相關誤差因子後，可將主要造成實驗誤差的因素整理出來，熱的自然對流效應以及流體受到摩擦損失為最主要的兩個誤差來源，因此利用實驗模擬系統獲得量測流速與平均流速之間的關係，即可以建立熱脈衝流速儀量測結果的校正實驗式。

同樣實驗系統的條件下，熱脈衝流速儀加裝導流器後的量測則仍然利用變動不同進流量之方式分析對應的量測流速，將平均流速與量測流速作圖即可得到其相對關係(圖 2.8)。其中井管內的平均流速由於受到導流器封阻而減少截面積的影響，固定流量的情況下，水流流進模擬實驗系統入水閥到達流速儀進水口時會增加速度，因此平均流速改以熱脈衝流速儀之量測元件內的直徑 4.4 公分取代井管內

徑以計算平均流速。

在原有的模擬實驗系統的量測環境下，由於導流器的加速效應，平均流速在靠近熱脈衝流速儀量測元件的位置附近可以被提高到 0.23 cm/s 至 4.6 cm/s 之間。加裝導流器後的量測精確度在量測流速為 10 cm/s 以下時，其精確度以變異係數約為 0.46% 到 5.5%，然而當量測流速超過 10 cm/s 時，熱脈衝流速的量測精確度即大幅降低，變異係數提高到超過 10% 以上。量測誤差方面和未安裝導流器之前相比，誤差有明顯增加，當井管內水流為層流狀態時(平均流速低於 2.36 cm/s)，量測流速和平均流速之間存在有相當良好的線性關係，此時的量測誤差介於 50% 到 75% 之間，然而當井管內的水流為亂流狀態時(平均流速高於 2.36 cm/s)，量測誤差開始迅速增加到超過 100%，顯示加裝導流器所產生的高流速環境會因為亂流的影響使熱脈衝流速儀的量測結果準確度和精確度都大幅降低。

根據實驗結果顯示(圖 2.8)，雖然我們已將平均流速改以熱脈衝流速儀的量測元件內徑來計算，在層流的水流環境下，量測流速仍然比平均流速快了約 50% 到 70% 之間。當井管內的流速環境開始逐漸增加，實驗模擬系統的進流量超過 2400 ml/min 時(雷諾數大於 2386)，井管內的水流狀態已非層流而轉變為亂流的不穩定狀態，平均流速和量測流速的相對關係也開始呈現非線性的曲線。圖 2.8 當中空心方塊的部分顯示當井管內的流速過高時，熱脈衝流速儀的量測結果無法再和層流狀態下對於平均流速具有相同的線性關係，此時量測誤差大幅增加，精確度也降低，呈現不同的分布曲線。然而一般於現地環境應用時，在相對透水的沉積物含水層當中，若加裝封塞或是導流器進行流速儀的量測，是相當容易達到如此高的流速環境，若直接使用流速儀所測得之流速推估地層透水性，將會嚴重高估實際的水力傳導係數，而量測誤差也會過大影響校正的合理性。因此，若是在現地環境有可能達到亂流狀態的水流環境，則不建議加裝導流器來使用，才能得到較為準確的量測結果。

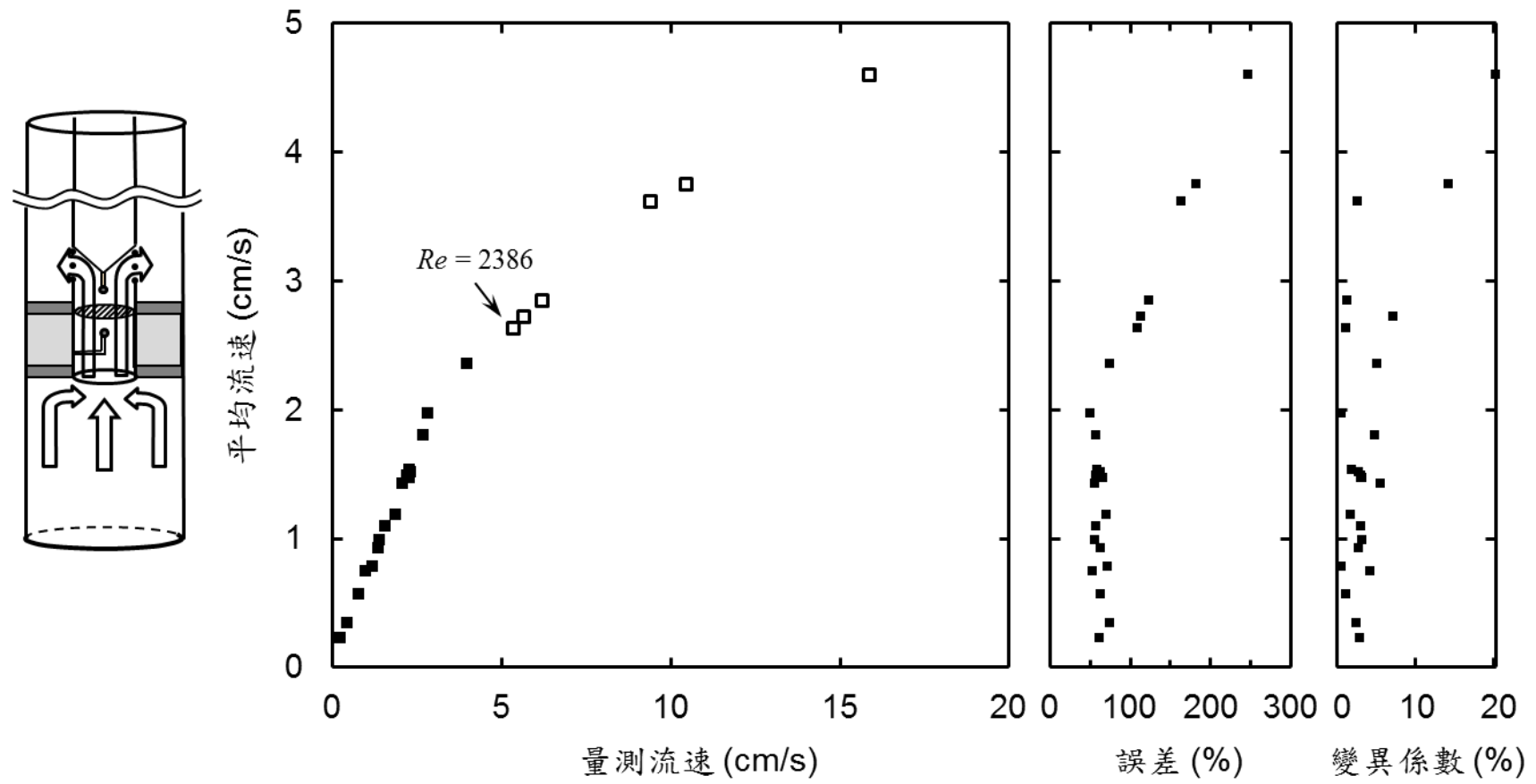


圖 2.8 流速儀加裝導流器量測結果

2.4 地下水流垂向分布之數學模式

熱脈衝流速儀除了可以在井篩開設區段或裸孔區段連續量測垂向水流流速變化，偵測優勢地下水流的位置，亦可配合現地水力試驗結果，進而估算水力傳導係數在垂向之分布狀況。若在井孔中進行定量抽水時，井管內垂向水流及含水層中的側向水流狀態可以圖 2.9 表示，假設水流是從側向水平地層流進井管中，我們可依據流速儀量測到的流速和井管的截面積，計算出該量測點以下所有從地層流入井管之流量。例如當流速儀在 a 點量測，可量得 A 點位置下方所有井篩區段地層總出水量(Q)；隨著流速儀逐段向下量測，於 B 點可量得 B 點位置以下所有地層出水量(Q')；而點 C 位置以下則因地層出水量已趨近於零，故亦難以量測得出水量(Q'')。接著利用鄰接兩點所量測之地層出水量，可計算出位於其間 i 分段地層出水量(q_i)，並進一步換算得各分段地層之出水量百分比。由於地層的透水性往往呈現不均勻分布，並非所有分段地層均為高透水段。當此 i 分段地層出水量(q_i)為正值時，代表此區段水流由地層流進井管，反之若為負值則代表水流由井管向地層流動。

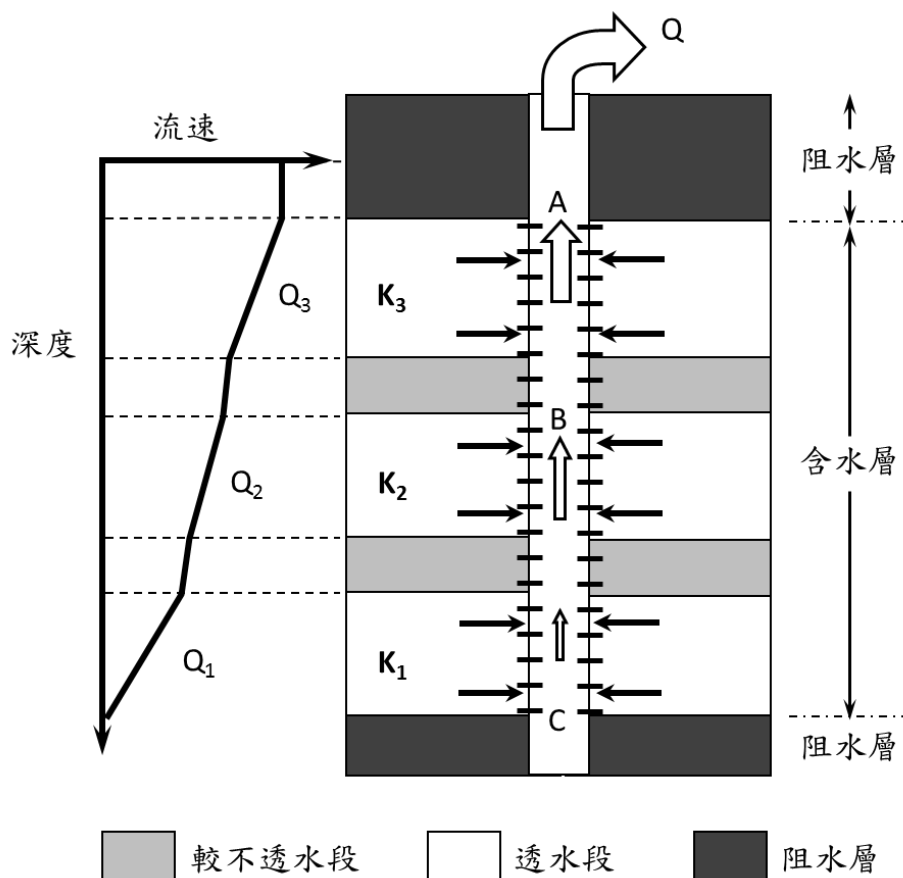


圖 2.9 抽水狀態下井孔及其附近之地下水流狀態示意圖

依據 Javandel 與 Witherspoon(1969)所發展出的數值模式以及 Molz 等人(1989)推導出的分析方法，當符合基本假設：(1)於一個理想的標準含水層中定量抽水，(2)含水層當中相鄰各小層的水力傳導係數相差極大，(3)水流在各小層當中是水平流動，(4)各小層皆為水平無限延伸的情況下，即可以計算此非均質含水層當中各層的水力傳導係數。

在這樣的假設下，抽水狀態下第*i*分層的地下水流入井內的流量(q_i)與該分層的導水係數(T_i)或是該小層厚度與此層水力傳導係數的積($m_i \cdot K_i$)會成正比關係，可表示為：

$$q_i = \alpha \cdot m_i \cdot K_i \quad (4)$$

式中， q_i ：抽水狀態下第 i 分層出入井內之流量 (L^3T^{-1})

α ：比例常數 (L)

m_i ：第 i 分層之厚度 (L)

K_i ：第 i 分層之水力傳導係數 (LT^{-1})

實際抽水的环境下，要達到地層當中各小層的出水量和導水係數成正比則須再符合抽水時間 $t > 100 \cdot r_w^2 \cdot S_s / K$ 的條件，其中 S_s 為此非均質含水層之比儲水係數， K 為整個含水層的平均水力傳導係數， r_w 為井管半徑。此時井管周圍徑向的水力梯度皆趨於穩定，即使上下兩層的水力傳導係數相差很大，地下水流入井管時仍可視為水平流動。含水層內各分層流量之總和或抽水量即可以表示為：

$$Q = \sum_{i=1}^n (q_i) = \alpha \cdot \sum_{i=1}^n (m_i \cdot K_i) = \alpha \cdot m \cdot K = \alpha \cdot T \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{Q}{T} = \frac{Q}{m \cdot K} \quad (6)$$

式中， Q ：含水層總出水量 (L^3T^{-1})

m ：含水層總厚度 (L)

K ：含水層平均水力傳導係數 (LT^{-1})

T ：含水層導水係數 (L^2T^{-1})

將 α 利用式 6 的結果帶入式 5 即可解析出各分層之水力傳導係數：

$$\frac{K_i}{K} = \frac{m}{m_i} \cdot \frac{q_i}{Q} \quad (7)$$

若考量地層於未抽水狀態時即於井管內存在垂直向流動的自然水流，則必須利用流速儀於未抽水狀態下在各小層量測得到的流量進行修正，將抽水狀態時量測得到之流量扣除自然水流即為修正後的流量。

$$\frac{K_i}{K} = \frac{m}{m_i} \cdot \frac{(q_i - q'_i)}{Q} \quad (8)$$

式中， q'_i ：自然狀況下第 i 分層出入井內之流量 (L^3T^{-1})

第三章 熱脈衝流速儀現地試驗

實驗室熱脈衝流速儀流速測試工作完成後，本計畫即蒐集整理現地試驗相關之監測井背景資料，並逐步進行脈衝流速量測之現地試驗，整體的研究流程如圖 3.1 所示。現地試驗將依據實驗井的狀況，配合熱脈衝流速儀的量測結果進行分析，並套用實驗室發展之校正公式來修正量測流速、井管中水流垂直向變化分布及透水性差異，並對於現地環境提出解釋。本研究各項工作及其主要成果分述如下：

3.1 現地測試操作過程

主要現地試驗則為熱脈衝流速儀操作。熱脈衝流速儀現地量測規劃的配置如圖 3.2，其必須在井管中地下水面之下進行量測，完整的實驗系統包括有熱脈衝流速儀、沉水式抽水機、捲揚機、三腳架、地下水位計和資料接收系統等設備。抽水機為提供井管內垂向水流流動的主要元件，可有效提高井管內水流速度，增加量測解析能力，因此一般都會裝設抽水機來進行操作，若環境不允許抽取地下水，則可利用注水的方式進行。

開始進行抽水量測前，必須先測量井孔內的背景自然水流。由於熱脈衝流速儀的高靈敏性，自然水流會影響抽水量測時的流速變化，特別是在低透水性地層中。完成自然水流的量測後，接著將抽水幫浦置入井中定量抽水或配合地面設施進行注水，當井內流場達到近乎穩定狀況時，將流速儀設置於井管內井篩或裸孔之上緣，即開始量測流速，此時接近濾水管上緣量測到的流速應當等於定量抽水或注水速率。完成量測資料記錄後，再將流速儀下降一段距離，進行下一次的量測，持續操作直至流速儀通過井篩的下緣或裸孔底部或無法量測處。為驗證下降量測結果，可以再將流速儀拉升起一段距離進行分段量測，重複同樣的程序直到流速儀高過井篩或裸孔上緣，此時量測到的流速應當等於抽水或注水的速率。若現地量測環境無法達到井內近乎穩定的水流狀況或抽水速率波動不定，則須考慮利用封塞的方式，增加通過流速儀的流速，並維持穩定的量測環境。

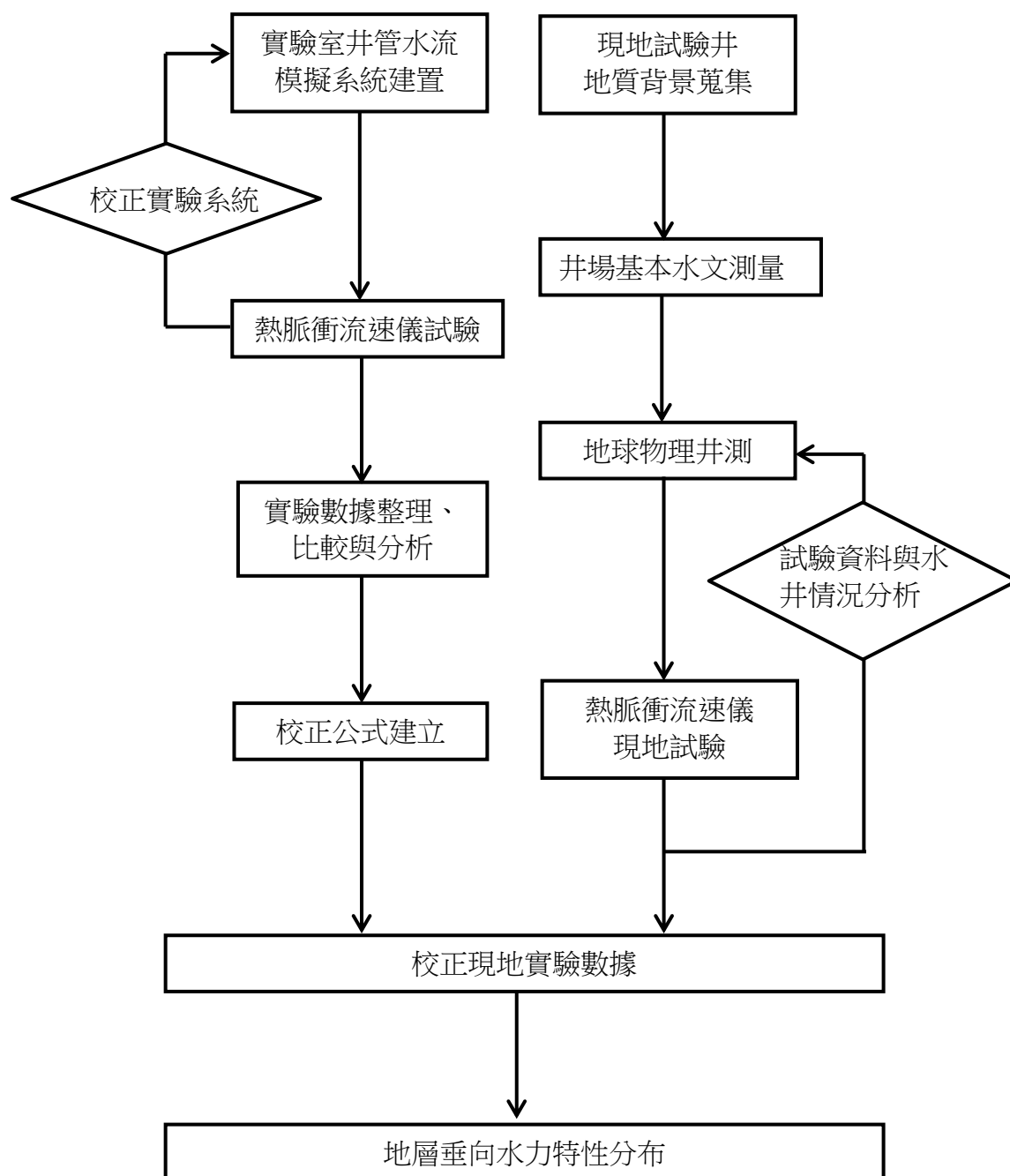


圖 3.1 研究流程圖

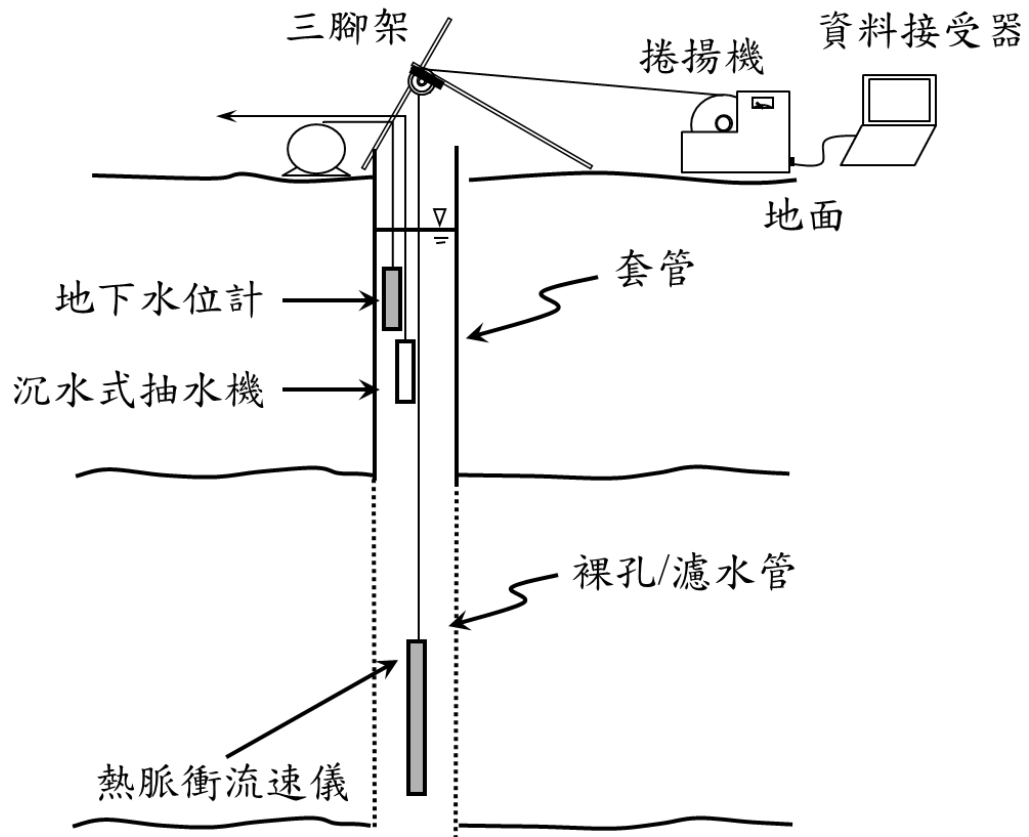


圖 3.2 現地流速試驗儀器配置圖(修改自 Molz *et al.*, 1989)

3.2 台大農場現地試驗

完成熱脈衝流速儀在實驗室內的測試分析和驗證後，證明當井管內水流為層流狀態時，平均流速和量測流速具有非常好的線性關係，藉由量測過程中各項誤差因子的評估與校正，已建立相關的實驗校正式。因此，本研究選定台灣大學農場內和實驗室模擬系統相近的的一口觀測井，進行現地實際操作熱脈衝流速儀的前導驗證試驗。

3.2.1 觀測井基本資料

此試驗觀測井位於國立台灣大學校區內的台大農場中(圖 3.3)。該口觀測井由台灣糖業公司鑽井隊於民國 84 年 8 月所建置，井孔開口約 30 公分，深度達 24 公尺。井管則使用口徑為 97 公釐之 PVC 管，裝設範圍由地表至地下深度 23.6 公尺處，其中深度範圍 5 至 17 公尺處裝設井篩，井篩則同樣為口徑 97 公釐的切縫式 PVC 管(圖 3.4)。井管外和井孔間則以濾料充填，填充範圍由地表下 2 公尺至 24 公尺，地表下至深度 2 公尺之間則以皂土覆蓋。



圖 3.3 台大農場觀測井位置圖

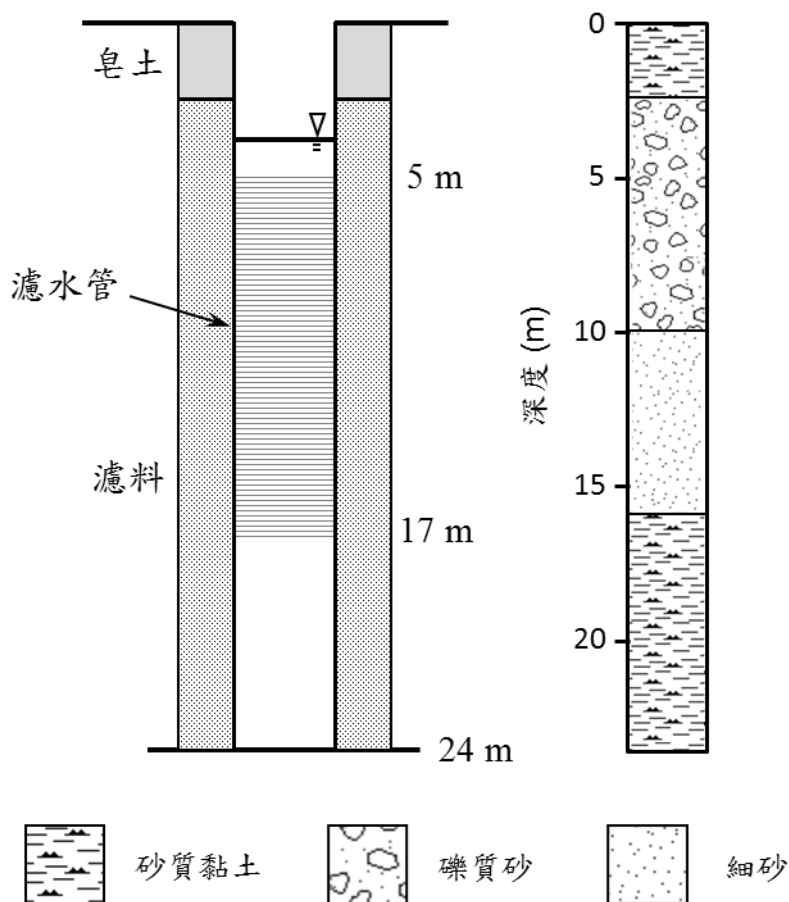


圖 3.4 台大農場觀測井之井體設計與岩芯資料

依據台灣糖業公司(1995)的鑽井資料顯示(圖 3.4)，台灣大學農場觀測井深度範圍 24 公尺內可主要區分為四種不同的地質材料，皆屬於台北盆地之上部地層。岩性從地表到深度 2.5 公尺的範圍為泥層，主要成分為砂質黏土；2.5 至 10 公尺為礫質砂；10 至 16 公尺為細砂偶可見小礫石；16 至 24 公尺則為砂質黏土層。根據台灣糖業公司鑽井完成後所進行的抽水試驗結果顯示，本觀測井開篩範圍的平均導水係數(Transmissivity, T)為 $0.84 \text{ m}^2/\text{min}$ (台灣糖業公司，1995)。

試驗當天地下水位深度為地表下 1.7 公尺，考量抽水後可能造成的地下水位下降，因此將抽水機裝設於深度 3 公尺處，進行定量抽水，提供井管內穩定的向上水流。地下水位計則裝設於井內地表下 2.5 公尺處，試驗過程中可全程監控地下水

位變化，並可提供地下水位是否已達定水頭的判斷依據。由於台大農場觀測井井篩的開設深度為地表下 5 公尺到 17 公尺處，因此將熱脈衝流速儀的起始量測點設定為地表下 4.75 公尺處。

3.2.2 試驗成果

熱脈衝流速儀試驗共進行未抽水狀態和抽水狀態下量測各一次，未抽水狀態下並未量測到井管內有自然垂向的水流，因此接著進行抽水狀態下的試驗。抽水機的定量抽水速率為 4520 ml/min，經過一段時間由水位計即時監控水位判斷地下水為達到穩態平衡後，即準備開始進行熱脈衝流速儀實驗的操作，熱脈衝流速儀以定點方式向下逐段進行量測，量測間隔為 50 公分，當發現流速有明顯變化時，即提高為每 25 公分進行量測，直到熱脈衝流速儀無法測得有效數據停止，熱脈衝流速儀於台大農場觀測井的量測結果經過修正後如圖 3.5 所示。

地表下深度 6.25 公尺處以上測得之流速皆無明顯下降，顯示此段地層並未有水流流入，為較不透水的區段。直到深度 6.50 公尺以下，熱脈衝流速儀所測得之流速則開始有明顯變化，隨測量深度增加，量測到的流速逐漸降低，顯示此段地層有水流流出，在流速儀的測量最低限度下，可量測到深度 10.75 公尺，表示此區段可能為主要的透水段。深度 10.75 公尺以下，熱脈衝流速儀測得之速度已屬於熱的自然對流效應造成之上浮力速度，經過校正後已幾乎接近於零。深度 12.50 公尺以下則無法由熱脈衝流速儀得到理想的熱脈衝訊號，或是僅接收到熱的自然對流，顯示此深度以下皆為不透水的地層。

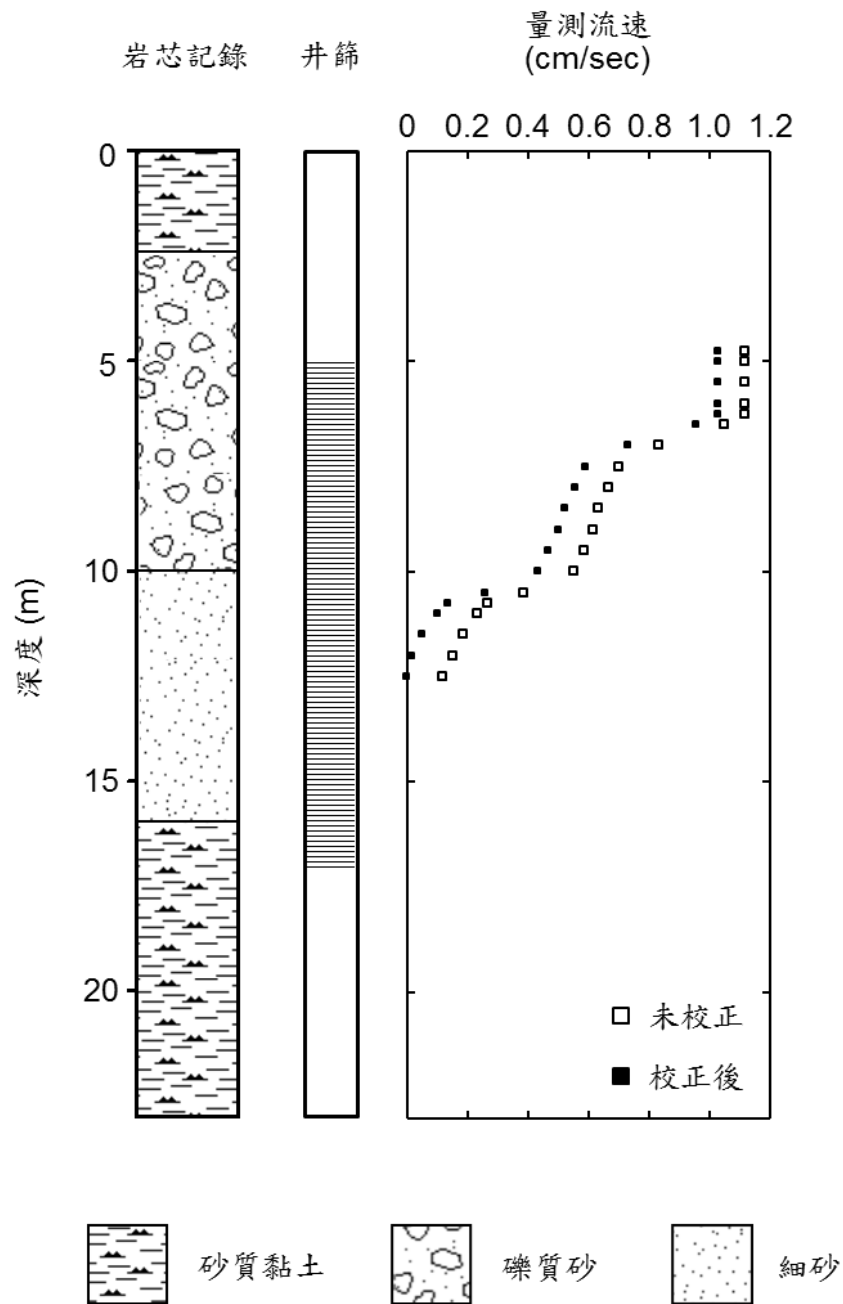


圖 3.5 台大農場觀測井各深度量測流速分布圖

根據台大農場觀測井的岩芯資料，若將深度 2.5 公尺到 10 公尺的礫質砂層和深度 10 公尺到 16 公尺的細砂層視為含水層，則此含水層厚度為 13.5 公尺，而台灣糖業公司利用抽水試驗所測得之導水係數 $0.84 \text{ m}^2/\text{min}$ ，因此可計算得到此含水層的平均水力傳導係數為 0.06 m/min 。依照建井資料，井篩的裝設深度為 5 到 17 公尺處，共 12 公尺。若以此範圍視作含水層的厚度，則此觀測井求得之平均水力傳導係數為 0.07 m/min 。將熱脈衝流速儀於台大農場觀測井各深度的量測結果代入式 7，即可推得各量測間距的水力傳導係數和平均水力傳導係數的比值，再利用此比值和抽水試驗得到的平均水力傳導係數作計算，即可得到各分層的水力傳導係數(圖 3.6)。熱脈衝流速儀測得之結果顯示，實際透水的範圍僅有 6.25 公尺，其中深度 6.25 公尺到 7.50 公尺和深度 10.00 公尺到 10.75 公尺為兩個主要透水區段。經過推算得到的分層水力傳導係數分別為 $0.23 - 0.37 \text{ m/min}$ 和 $0.29 - 0.40 \text{ m/min}$ ，這兩個透水區段的出水量可達整個含水層總出水量的 65%，雖然這兩個透水區段的厚度僅為 2 公尺，但大部分的地下水流皆由這兩個地方提供，因此若使用整段地層或是井篩的開設長度作為含水層厚度，將低估此地層的實際透水能力，而這兩個分層水力傳導係數和平均水力傳導係數的比值(K_i/K)為 3.7 到 6.4 之間，表示其透水性遠高於含水層的平均值。因此當含水層中含有污染物質必須評估其傳輸擴散速率時，若缺乏詳細的分層透水資訊，將無法提供有效的資訊作為整治之參考，僅有平均水力傳導係數的狀態下，將會低估污染物質的傳輸速率，而藉由熱脈衝流速儀的量測，則可有效提高對於地層透水性質的準確性，更能了解地層透水的位置。

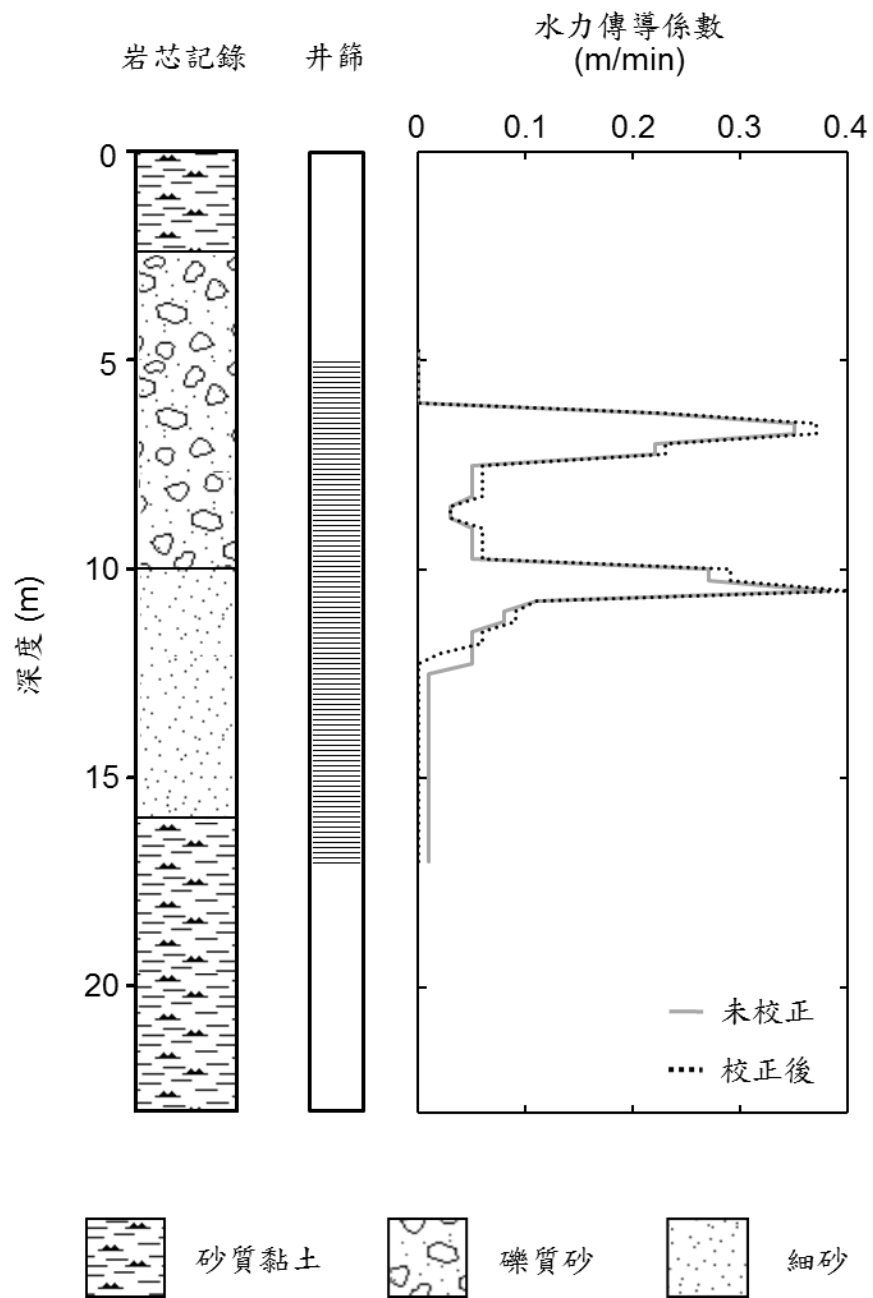


圖 3.6 台大農場觀測井垂向水力傳導係數分布圖

3.3 台中市大肚區現地試驗

為評估在不同地質環境下的現地量測成果，本研究於民國 101 年 1 月前往位於台中市大肚區勘查適合的試驗井(圖 3.7)，以利進行熱脈衝流速儀試驗。試驗場址位於台中大肚台地南緣，在地質分層上屬頭嵙山層火炎山相(圖 3.8)。頭嵙山層廣泛分布在台灣西部麓山帶中，火炎山相是以礫岩為主，偶夾有薄層砂岩，其中石英岩和堅硬的砂岩約佔礫石的 50%，礫石的形狀為圓形至次圓形，直徑大小在數公分到 1 公尺間。礫岩的膠結物大多為細砂，含有鈣質或鐵質，淘選度較差(何春蓀，1997)。

3.3.1 監測井基本資料

試驗場址地表多為礫石及砂為主的沉積物。該地約有 30 口地下水監測井，深度由 6 至 19 公尺不等，本研究選擇兩口較深之觀測井進行測試，井號為 WT-F 及 WT-H，井深分別為 17.25 公尺及 18.75 公尺，觀測井體的外觀、構造與現地試驗照片如圖 3.9 至圖 3.11 所示。由於開始測試時發現 WT-H 井孔地下水位過低，難以進行試驗，因此熱脈衝流速儀試驗僅能在於 WT-F 井施作。此次試驗之地下水觀測井於民國 88 年建置，井管為直徑 4 吋之 PVC 套管與井篩，除封土層(表層封、環狀封及皂土封)之外，近乎全段開篩，篩孔尺寸為 0.02 吋，篩管外側填充 1 至 3 毫米之石英質砂粒濾料。



圖 3.7 大肚區試驗井位置圖

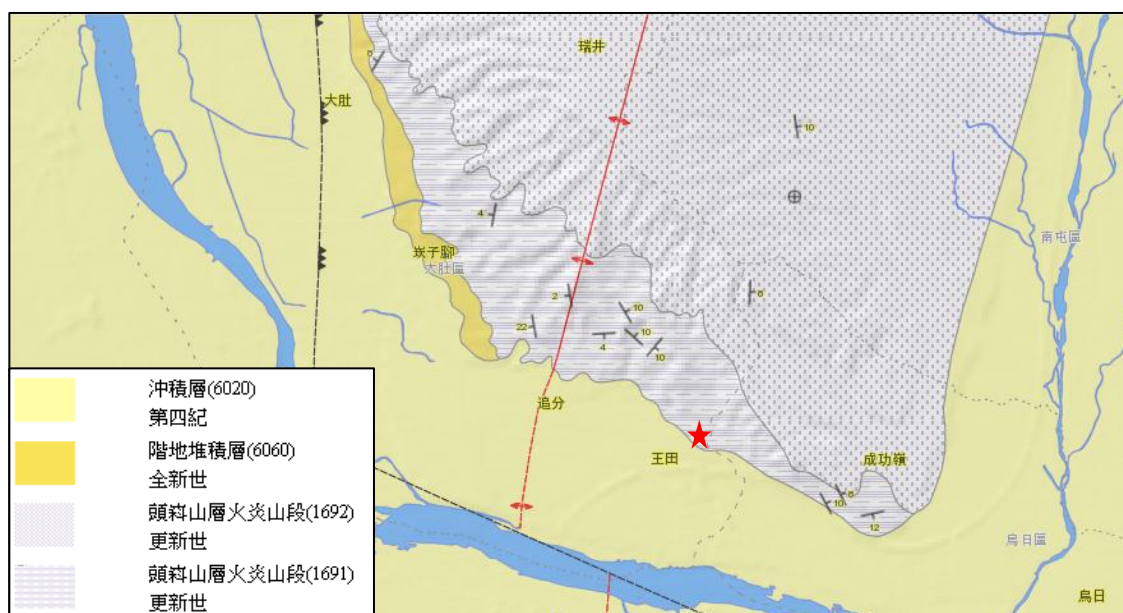


圖 3.8 研究場址及周邊地質圖



圖 3.9 井號 WT-F 地下水井外觀照片



圖 3.10 熱脈衝流速儀現地試驗之儀器配置

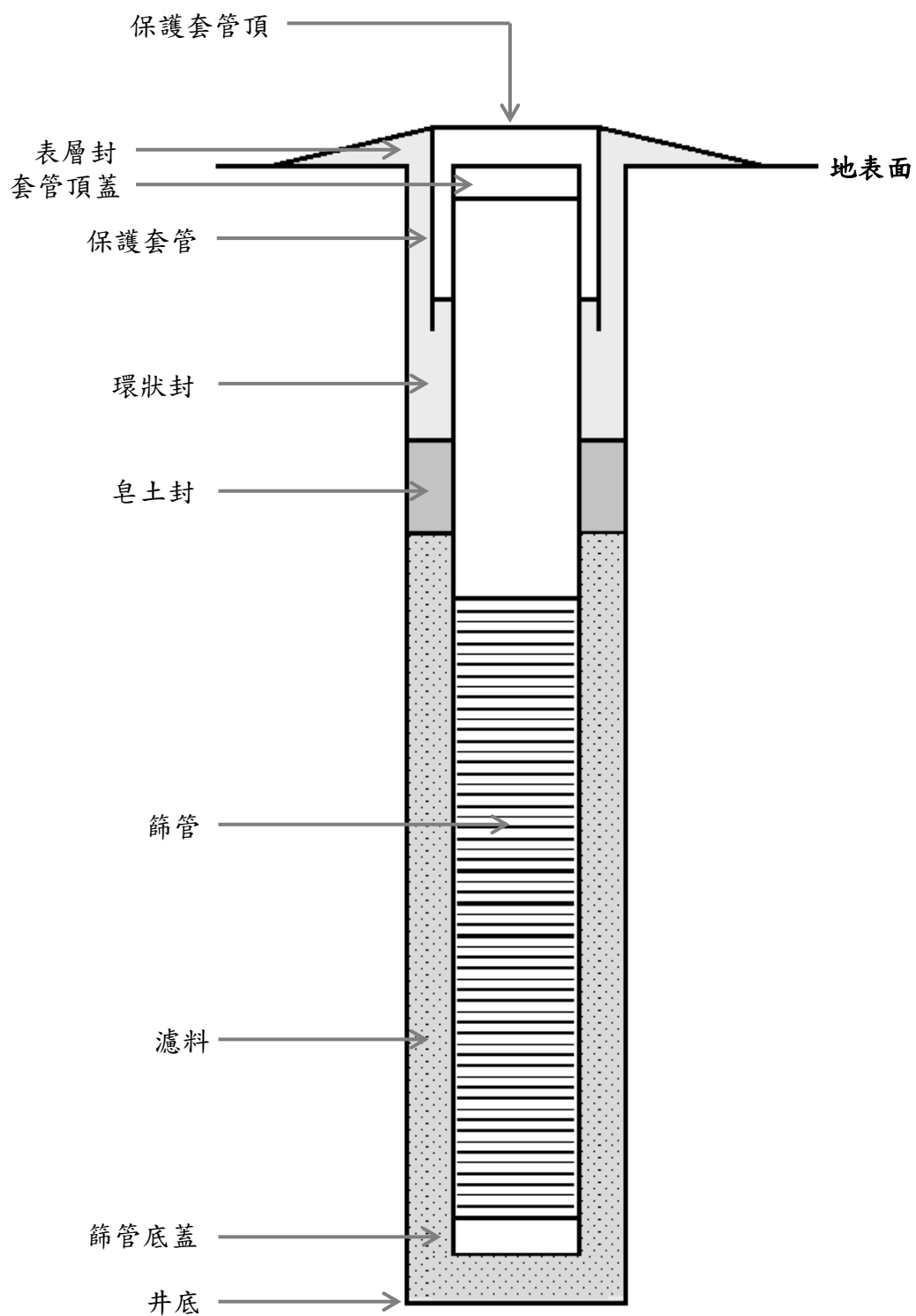


圖 3.11 試驗井之井體構造圖

3.3.2 現地試驗過程

本研究於民國 101 年 3 月前往王田進行第一次現地測試。進行試驗前，先在場址周圍進行大範圍地下水位檢測，觀測井的水位分布範圍由深度 2 公尺至 11 公尺不等，但多數水井之水位約於深度 6 至 8 公尺處，WT-F 井之地下水位深度距地表約 6.97 公尺 (表 3.1)。

表 3.1 試驗場址觀測井基本資訊

編號	井深 (m)	地表高程 (m)	地下水面深度 (m)
WT-A	9	58.802	7.33
WT-B	10.5	61.502	7.92
WT-C	12	63.326	
WT-D	9		7.70
WT-E	7.5		4.79
WT-F	17		7.02
WT-6	7.5		4.85
WT-8	8	57.512	5.87
RW-1	9.5		7.50
RW-2	9.5		7.69
RW-4	9.5	57.140	7.61
RW-5			6.88
RW-13	9		7.08
RW-14	9.5		7.03
RW-16	5		3.36
RW-17	6	53.498	2.56
W-6	7.5		0.80
WT-H	18.75	101.096	5.66
WT-I	15		11.43

在進行熱脈衝流速儀的現地試驗前，本研究先進行井孔地球物理井測，包括自然伽瑪井測(Natural Gamma Log, NGAM)、自然電位(Spontaneous Potential Log, SP)與電阻率電測。電阻率井測的施作項目則包括：64 吋正長距電阻(Long Normal Resistivity, LON)、16 吋正短距電阻(Short Normal Resistivity, SHN)與單點電阻(Single Point Resistivity, SPR)的井測，目的是提供判斷地層透水性的參考資料，並針對熱脈衝流速儀的量測結果提供比對的客觀依據(圖 3.12)。由地球物理井測結果可知，該井受不明流體性質及儀器設備影響，自然電位、長距電阻、短距電阻及單點電阻皆出現異常變化；自然伽瑪射線偵測值顯示地層含泥量多寡，惟 WT-F 井在深度 8.7 公尺至 9.2 公尺間測得之自然伽瑪射線偵測值為該井中最低之區段，顯示該處泥質沉積物含量較少。深度 9.2 公尺到 10 公尺的區段範圍內，自然伽瑪射線的測值則逐漸升高到相對高點，顯示此處的地質材料可能發生改變，含泥質的物質增多。

地球物理井測完成後，隨即進行熱脈衝流速儀量測，熱脈衝流速儀施作需進行抽水，以產生井管中水流之垂向流動，此步驟會造成地下水面下降。本階段流速儀共嘗試進行三次測試，由於現地環境因素，WT-F 井的出水量在維持定水頭狀態下僅能使用較低的抽水量。第一次測試將流速儀置中並放入井管內自抽水機裝設下方 1 公尺處開始量測，但實驗過程中，在地下水面以下各深度皆未出現典型熱脈衝曲線，熱感應器僅接收到自然熱對流訊號，顯示井管中並未測到垂向水流，地下水並非由井管中該試驗區段下方的地層所提供。為加速井管水流流速，因此第二次測試裝設導流器，但仍未在井孔中測得垂向流速。第三次測試仍裝設導流器，並加大抽水量進行試驗，依然無法偵測到明顯的水流反應。俟後分析三次熱脈衝流速儀測試皆未獲得合理之結果，推測原因如下：

- (1) 地層出水段位置：由於抽水因素，造成地下水位下降，使得熱脈衝流速儀只能在較深處量測，而地層出水區段位於淺處，因此無法測得井管水流的變化。
- (2) 井體構造：此地下水觀測井全段皆裝設濾水管，在濾水管外側填充濾料與地層相隔，由於裝設導流器，使得井管截面積減少甚多，基於流體選擇阻礙較小的路徑流動，因此水流傾向由井壁外側之濾料為通道，造成井管中水流流速下降，使流速儀無法偵測。

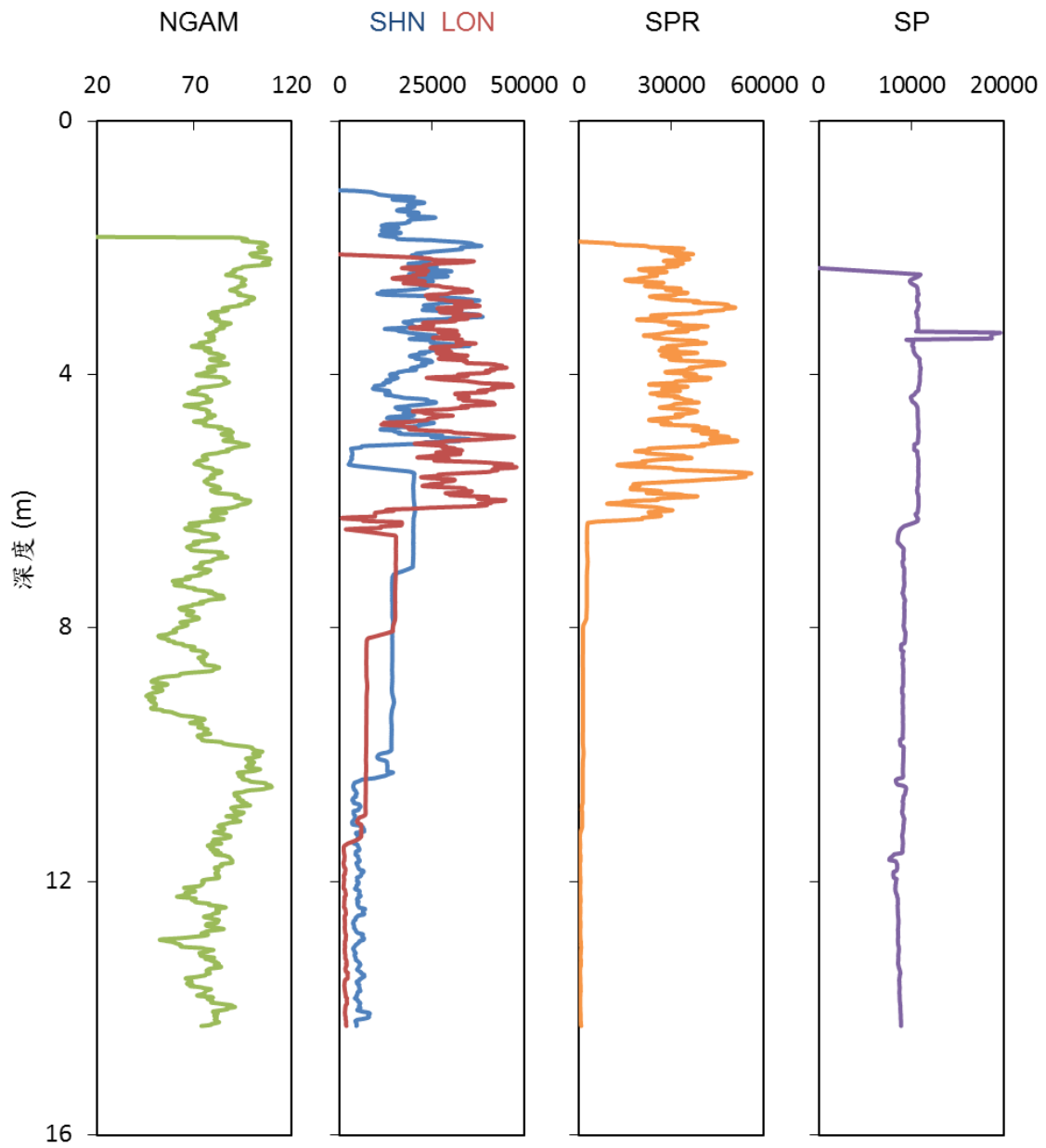


圖 3.12 井號 WT-F 之地球物理井測結果

第二次現地試驗於民國 101 年 7 月施作，WT-F 井之地下水面深度距井口 5.35 公尺。進行熱脈衝流速儀試驗之前，仍然再進行一次地球物理井測的試驗，以和第一次試驗的結果進行比對。量測結果如圖 3.13 所示，自然伽瑪射線偵測值在深度 9 公尺附近仍然相對較低，顯示該處地層含泥量較低，相對較為透水，而深度 9.2 公尺以下開始自然伽瑪射線測值亦逐漸升高，與第一次試驗結果相近。而地層電阻率電測的結果則無明顯變化。

3.3.3 試驗成果

本次流速儀試驗採裝設導流器進行操作，與前述實驗流程相同，當水頭趨於穩定時，抽水量約 2200 ml/min，由於抽水造成地下水面下降，且考慮水位計與抽水幫浦設置深度，因此施作深度由井口下 7.5 公尺處開始進行，每個試驗點間隔 25 公分，若未測得流速，則採 1 公尺間距進行量測及檢驗，各深度量測之流速如圖 3.14 所示。透過熱感應器測得之熱脈衝溫度反應曲線，可得知熱脈衝到達熱感應器所需之時間，由於發熱線圈與熱感應器為 5 公分之距離，故可計算出井管中水流流速。整體而言，由初始量測點開始，熱脈衝流速儀測得之流速隨地層出水量不同，而出現不同程度之流速變化，從流速之變化量可得知地層透水性之差異。熱脈衝流速儀在深度 7.5 公尺處測得平均反應時間為 1.90 秒，換算流速為 2.63cm/sec，為本次試驗中最高流速。移至下一點量測，平均水流速度下降至 1.89cm/sec；至深度 8.25 公尺處，井管水流流速變化量趨緩，向下量測，則變化量再次增加；至深度 9.5 公尺後，測得水流多因熱自然對流向上移動之故。

依據實驗室之模擬水流試驗，若熱脈衝流速儀為置中量測，同時裝設導流器之結果顯示，其量測流速為完全封塞狀況下之 85%，流速必須透過校正才能獲得到較為接近井管內實際狀態下的水流速度；由於井管內的水流配合抽水機的使用屬於向上流動的狀態，考慮自然熱對流效應，亦須對此進行校正，校正後之流速分布圖如圖 3.14 所示。

由於本次試驗量測範圍受限於地下水面深度與現地環境，無法測得整個含水

層的連續資料，而根據式 5，各分層出水量(q_i)會和各量測間距(m_i)內的流速變化(ΔV)成正比，因此 $\Delta V/m_i$ 即可用以表示各量測區段間的相對透水性，若將總出水量(Q)換算為平均流速(V_a)後(式 7)，而總含水層厚度由於缺乏詳盡的地質鑽井資料，則以流速儀量測點至井底的距離 9.5 公尺推算，即可藉由流速儀測得之流速變化量推估各量測段與整個試驗段的相對透水性，本研究將其定義為透水性指標(K Index)，

從透水性指標隨深度變化分布來看，深度 7.5 至 9.5 公尺之間皆有良好透水能力，其中深度 7.5 至 7.75 公尺之間為最透水之區段，依深度增加而逐漸下降，在深度 9.5 公尺以下則無法量測出地下水流，預期透水能力甚低。本次量測結果顯示 WT-F 觀測井中地下水流主要出現在深度 9.5 公尺以上之地層，而本研究第一次試驗時由於地下水位較低，流速儀施作起始深度已低於此深度，造成流速儀無法測得有效的地下水流，亦可獲得合理之解釋。

本研究原先預期頭嵙山層之透水性相當良好，然而於高解析度之熱脈衝流速儀試驗結果顯示，在礫石層中透水性因深度不同仍有顯著差異。該場址多口岩芯資料指出，地質材料組成由黏土至礫石皆有，且空間分布差異甚大。因此厚層礫石層中或含有黏土或粉砂較多時，仍會形成低透水性區段。此外，井孔中經年累積的沉泥也可能阻滯地下水流，造成量測垂向水流流速較低。

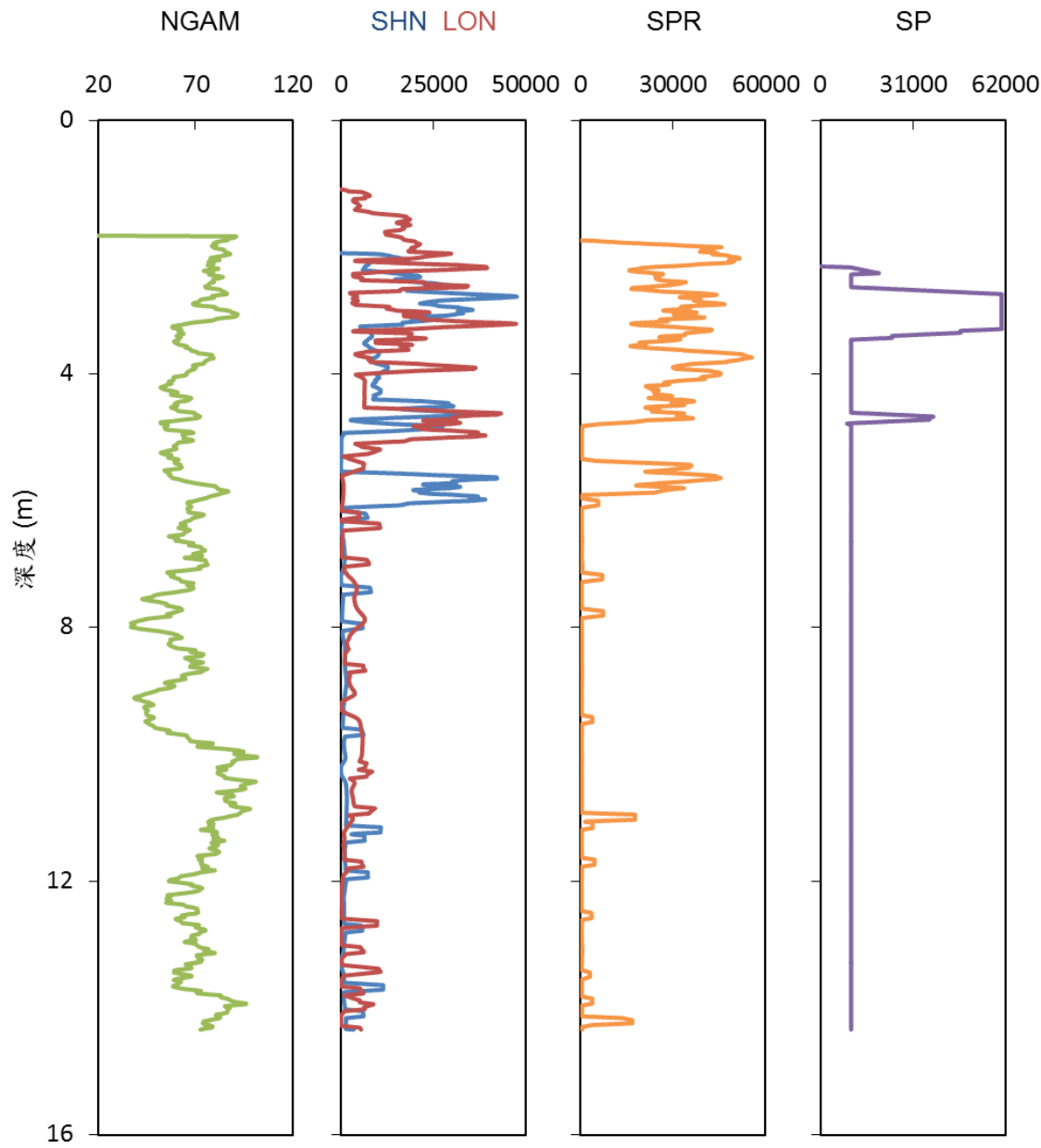


圖 3.13 井號 WT-F 之第二次地球物理井測結果

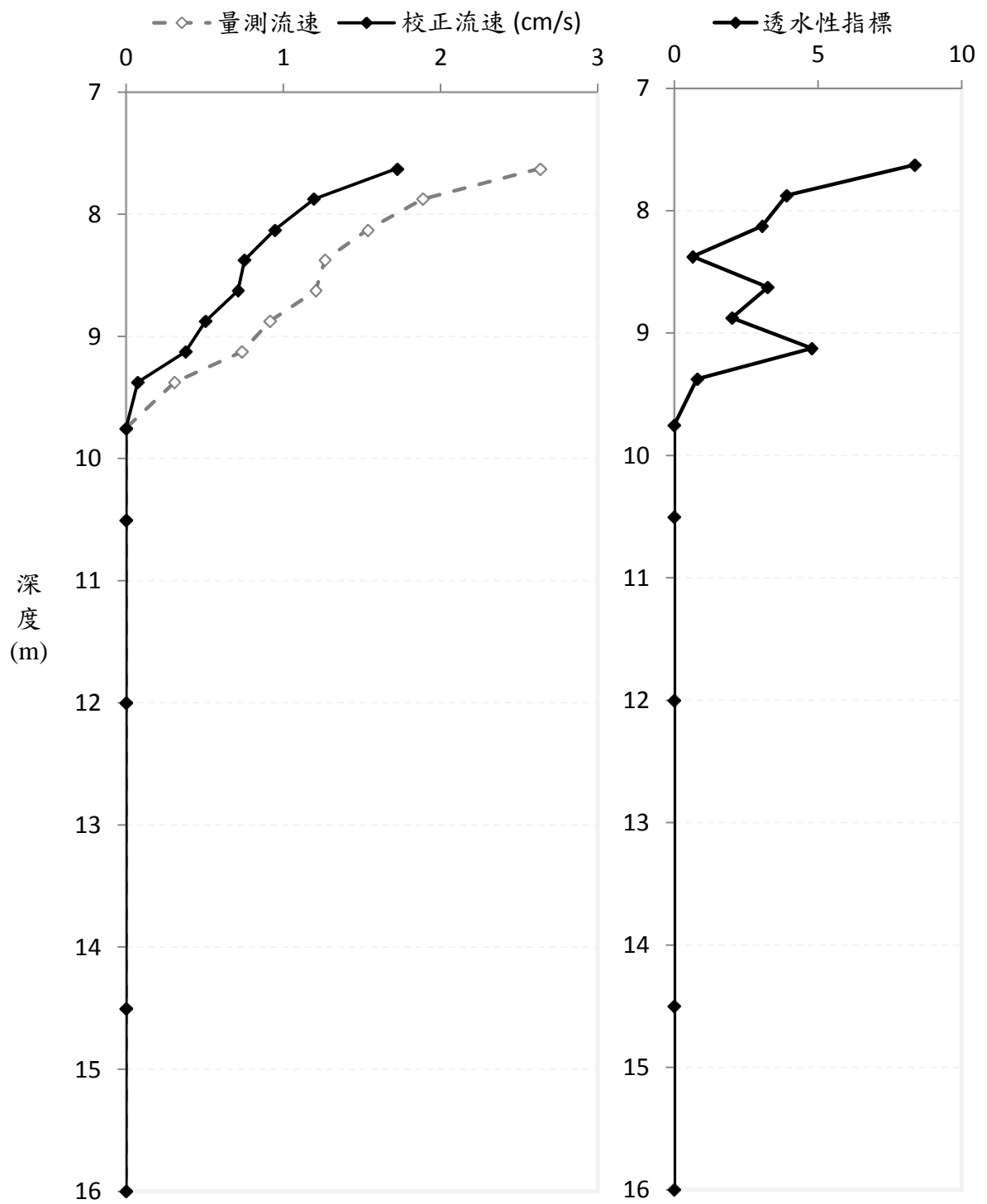


圖 3.14 熱脈衝流速儀量測與校正結果，及透水性指標分布圖

第四章 結論與建議

本研究設計實驗室井管水流模擬系統，利用熱脈衝流速儀量測不同條件下的水流流速，探討量測誤差之物理機制，並建立校正實驗式，以改進熱脈衝流速儀量測之準確度。繼而進行現地測試，分析、校正井孔水流量測結果，確認熱脈衝流速儀量測技術在現地環境之適用性。本研究的主要結論如下：

1. 為有效提升熱脈衝流速儀在實驗室測試之準確性，井管水流模擬系統設計必須利用水頭差驅動井管中水流，經由孔隙介質流動，才能避免亂流干擾，使井管水流以接近層流的形式流動，此系統的流速誤差可控制在 1~5%。
2. 熱脈衝流速儀在實驗室量測結果指出，量測流速皆大於理論流速，其誤差隨著流速降低而增大。在高流速環境中，量測誤差主要來自於摩擦損失；然而在低流速狀態下，熱的自然對流效應可以造成明顯的誤差。因此熱脈衝流速儀現地量測的流速必須經由實驗量測資料推導之實驗式加以校正。
3. 井管水流在層流狀態時，實驗室的量測流速與理論流速具有較佳的線性關係，然而在流速儀裝設導流器後，水流加速而出現亂流狀態後，熱脈衝流速儀的量測精確度將大幅下降，因此現地試驗宜限制抽水速率，以避免量測誤差過大的情形。
4. 台大農場觀測井之現地測試結果顯示，熱脈衝流速儀在非均質沉積物含水層中可以測到高解析度的垂向水流流速分布，配合現地水力試驗結果，可確認高度透水區段分布位置，其厚度約為井篩長度的 1/6，其水力傳導係數約為平均水力傳導係數 3.7 到 6.4 倍。
5. 台中市大肚區監測井之現地測試在頭嵙山層礫石層中進行，雖因水位較深，以致熱脈衝流速儀量測範圍受限，仍可偵測到優勢地下水流分布於淺處兩公尺範圍，其他較深區段的礫石層可能因黏土或沉泥含量較高，透水性相對較低。

此外對未來相關技術發展事宜，本研究建議熱脈衝流速儀現地量測試驗較適於在污染場址調查期間進行，如能配合設置監測井或抽水井的鑽井工作，在裸孔中配合抽水或注水進行，其量測成果較佳，而且可以立即提供井篩設置深度與長度。若是在設置完成的監測井或舊井中量測，流速儀的操作範圍可能受限於既有井篩的長度，也容易受到長年積聚的沉泥影響。

第五章 參考文獻

- Boggs, J. M., Young, S. C., Benton, D. J., and Chung, Y. C., 1989. *Hydrogeologic characterization of the MADE site*, EPRI Interim Report, EN-6915, Electric Power Research Institute, Palo Alto, California.
- Church, P. E., and Granato, G. E., 1996. *Bias in ground-water data caused by well-bore flow in long-screen wells*, Ground Water, 34:262-273.
- Collar, R. J., and Mock, P. A., 1997. *Using water-supply wells to investigate vertical ground-water quality*, Ground Water, 35:743-750.
- Haley, J. L., Hanson, B., Enfield, C., and Glass, J., 1991. *Evaluating the effectiveness of ground-water extraction systems*, Ground Water Monitoring Review, 11:119-124.
- Hess, A. E., 1982. *A heat-pulse flowmeter for measuring low velocities in boreholes*, U.S. Geological Survey Open-File Report 82-699, U.S. Geological Survey, Reston, Virginia.
- Hess, A. E., 1986. *Identifying hydraulically conductive fractures with a slow-velocity borehole flowmeter*, Canadian Geotechnical Journal, 23:69-78.
- Hufschmied, P., 1983. *Ermittlung der durchlässigkeit von lockergesteins - grundwasserleitern, eine vergleichende untersuchung verschiedener feldmethoden*, Ph.D. Dissertation 7397, Eidgenössische Technische Hochschule, Zurich, Switzerland.
- Martin-Hayden, J. M., and Robbins, G. A., 1997. *Plume distortion and apparent attenuation due to concentration averaging in monitoring wells*, Ground Water, 35:339-346.
- Mercer, J.W., Skipp, D.C., and Griffin, D., 1990. *Basics of pump-and-treat remediation technology*, EPA/600/8-90/003, U.S. Environmental Protection Agency, Ada, Oklahoma.
- Molz, F. J., Güven, O., Melville, J. G., (with contributions by Javandel, I., Hess, A. E., and Paillet, F. L.), 1990. *A new approach and methodologies for characterizing the hydrogeologic properties of aquifers*, EPA/600/2-90/002, U.S. Environmental Protection Agency, Ada, Oklahoma.

- Molz, F. J., Morin, R. H., Hess, A. E., Melville, J. G., and Güven, O., 1989. *The impeller meter for measuring aquifer permeability variations: Evaluations and comparison with other tests*, Water Resources Research, 25:1677-1683.
- Morin, R. H., Hess, A. E., and Paillet, F. L., 1988. *Determining the distribution of hydraulic conductivity in fractured limestone aquifers by simultaneous injection and geophysical logging*, Ground Water, 26:587-595.
- Paillet, F. L., Hess, A. E., Cheng, C. H., and Hardin, E. L., 1987. *Characterization of fracture permeability with highresolution vertical flow measurements during borehole pumping*, Ground Water, 25:28-40.
- Rehfeldt, K. R., Hufschmied, P., Gelhar, L. W., and Schaefer, M. E., 1989. *Measuring hydraulic conductivity with the borehole flowmeter*, EPRI Topical Report EN-6511, Electric Power Research Institute, Palo Alto, California.
- Robertson Geologging Ltd., 1997. *User's Guide for heat pulse Flowmeter sonde*.
- Young, S. C., Julian, H. E., Pearson, H. S., Molz, F. J., Boman, G. K., 1998. *Application of the Electromagnetic Borehole Flowmeter*. US Environmental Protection Agency Report EPA/600/R-98/058.
- 台灣糖業公司，1995，台灣大學農業工程學系教學用井建井報告，共 13 頁。
- 何春蓀，1997，台灣地質概論，經濟部中央地質調查所。