

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

## 非均質含水層水力傳導係數垂向分佈之研究 研究成果報告(精簡版)

計畫類別：個別型  
計畫編號：NSC 95-2116-M-002-011-  
執行期間：95年08月01日至96年07月31日  
執行單位：國立臺灣大學地質科學系暨研究所

計畫主持人：賈儀平

計畫參與人員：專科畢-專任助理：江藝萱  
博士班研究生-兼任助理：李在平

處理方式：本計畫可公開查詢

中華民國 96年10月31日

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫  成果報告  
 期中進度報告

非均質含水層水力傳導係數垂向分佈之研究  
Vertical Distribution of Hydraulic Conductivity  
in a Heterogeneous Aquifer

計畫類別： 個別型計畫  整合型計畫

計畫編號：NSC 95-2116-M-002-011

執行期間：95年08月01日至96年07月31日

計畫主持人：賈儀平

共同主持人：

計畫參與人員：江藝萱、李在平

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)： 精簡報告  完整報告

本成果報告包括以下應繳交之附件：

赴國外出差或研習心得報告一份

赴大陸地區出差或研習心得報告一份

出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份

國際合作研究計畫國外研究報告書一份

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究計畫、列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢

涉及專利或其他智慧財產權， 一年  二年後可公開查詢

執行單位：國立台灣大學地質科學系

中華民國 96 年 10 月 30 日

## 非均質含水層水力傳導係數垂向分佈之研究

### Vertical Distribution of Hydraulic Conductivity in a Heterogeneous Aquifer

#### 一、摘要

含水層中水文地質特性的複雜性，特別是垂向水力傳導係數分佈的變化，對於地下水污染場址特性調查是一項挑戰。傳統上應用於井孔中量測地層垂向水力傳導係數分佈的方法大多精度欠佳或效益不彰。而近年發展中的流速儀提供了一種頗具潛力的量測技術，可連續量測井孔內垂向水流流速，若配合現地水力試驗所得之平均水力傳導係數及井測或岩心記錄，則可估算含水層水力傳導係數在垂向之分佈狀況。

本研究完成在實驗室建立水流試驗系統及井孔模型，並改進熱脈衝流速儀之量測誤差，推導出實驗式以校正量測之流速。根據於實驗室所架設之模擬實驗系統量測結果，本研究得以將亂流以及管流因素對於流速的影響降低，發現熱的自然對流現象對於實驗量測的誤差扮演相當重要的角色。透過實驗數據的統計累積以及管中無流速的量測結果可以得到熱脈衝流速儀於 94 mm 井管中的量測實驗校正公式，實驗量測的精確度以變異係數表示約為 4%，而準確度則隨著水流速度而改變，本研究所控制之流速範圍在 0.24~1.60 cm/sec 之間，當熱脈衝流速儀在最低流速環境下，實測流速最大誤差約為 50%。因此於現地應用時，必須經由校正等相關方法以求得真實流速。

關鍵詞：水力傳導係數、流速儀、地下水、熱脈衝

#### Abstract

Heat-pulse flowmeter is a logging tool for measuring the flow velocity in a borehole under a constant pumping or injection rate. We established a circulation system in the laboratory for measuring water flow velocity through a pipe at a constant inflow rate to evaluate the performance of heat-pulse flowmeter. The system was designed to minimize the error due to turbulent flow and frictional loss. Based on the test results under various flow rates, an empirical formula was developed for calibrating the measured flow velocity.

The measurement precision is about 4% based on the standard deviation of 8 duplicate tests for a specified inflow rate. The measured error increases exponentially from approximately 5% to 50% as the inflow rate decreases from 1.60 cm/sec to 0.24 cm/sec. It is anticipated that free convection plays an important role in driving the upward flow during the measurement, especially at a low flow velocity. The results of test measurements can be

integrated to develop an empirical formula to calibrate the measured flow velocity for field applications.

Key words: hydraulic conductivity, flowmeter, groundwater, heat pulse

## 二、計畫緣由與目的

本計畫將於實驗室內建立一水流實驗系統以評估和改進熱脈衝流速儀之量測成果，以及校正相關誤差。現地實驗將於選定之井孔進行包含地球物理井測、水力試驗以及流速儀之量測。

地層的透水性在地下水資源開發、地下水污染調查、及隧道與水壩工程等工作中，扮演相當重要的角色。目前以抽水試驗、水位回升試驗等方式量測地層透水性，所得到的結果代表一整段量測地層之透水性質，然而地層的透水性隨著不同地點以及地質材料組構的不同，傳輸地下水的的能力往往隨著深度而有垂直方向的變化，而利用分段抽水的試驗、漏浸試驗等方法，其試驗方法操作不易，且量測得之分段地層透水性精準度欠佳，因此如何以定量方式準確地描述不同深度地層的透水性，一直是大家所努力的課題。

本研究計畫之目標為瞭解一含水層當中，水力傳導係數之非均質性於污染物傳輸速率當中所扮演的角色，以及發展於井孔內量測水平水力傳導係數垂直向分佈之技術。熱脈衝流速儀是近期發展中之地層分段透水性量測技術，利用量測井管在抽水情況下不同深度的水流流速，可精確地反應出不同深度地層之透水性。因此本研究於實驗室中建構模擬之井體實驗系統，目的為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以及研究熱對流效應等不確定因素在井管中所扮演的角色。並觀察流速儀在不同井徑井管中所測得之流速差異，藉以分析出相對應之流速校正公式於現有之現地觀測井量測不同深度地層之透水性，並依據實驗室和現地的測試結果，輔以岩心記錄和地球物理井測資料作綜合的分析與解釋。預期將建立相關之標準作業程序，描述針對含水層水平水力傳導係數之垂直向分佈。

本研究將提升吾人對於自然未固結沈積物非均質性概念之瞭解，以及其對於地下水中溶解物質延散所造成之影響。井孔熱脈衝流速儀的量測技術對於地下水污染場址以及放射性廢棄物的處置場址的調查具備相當之應用潛力，對於岩層中裂隙之進一步研究，將可以擴展其相關地工場址調查之應用。

### 三、結果與討論

1. 回顧過去流速儀相關之文獻與研究指出，流速儀可以有效反應地層中相對透水位置以及裂隙所在，目前主要發展中的流速儀包括旋葉式(Impeller)流速儀、電磁式(Electromagnetic)流速儀，以及本研究所使用之熱脈衝(Heat-pulse)流速儀。旋葉式流速儀應用環境受限於僅能在較高流速的環境中使用，低流速環境無法驅動旋葉轉動得到流速資料。而電磁式流速儀具有良好的解析能力，但受限於井管內流體之導電性影響以及同樣較適合較高流速的量測環境。熱脈衝流速儀則具備了良好解析能力以及應用於低流速環境的特點，在現地適用性上優於另外兩種量測技術，為值得發展之量測系統。
2. 依據熱脈衝流速儀在現地量測的架構完成了實驗室模擬之現地量測實驗系統，本系統可確實模擬井管中水流之流動現象以及變換井管中水流的流速，透過在不同環境下進行熱脈衝流速儀之量測可以觀察各項因子對於量測過程所造成之影響。
3. 根據本研究所建立之實驗系統發現熱脈衝流速儀在井管內進行量測時，主要受到管內亂流、管流流速分佈等因素影響，而可能影響量測結果的代表性。管內亂流效應為主要干擾量測之因子，透過在井管底部放置小礫石層可有效穩定由入水口流入之水流，並且達到層流之穩定狀態。管流流速分佈則因井壁摩擦力的影響而呈現中央流動較快的現象，若將熱脈衝流速儀之量測位置靠近水流入口處，則可以有效降低此因子所造成的影響。
4. 藉由調整控制閥變動井管內的流量在 6000 ml/min~600 ml/min 之流量環境下進行量測管內流速。量測結果實驗精確度以變異係數表示約為 4%，於極高流量和極低流量之環境下精確度表現較低，而在流量 1000 ml/min~4000 ml/min 為熱脈衝流速儀表現最好的流量區段。流量低於 600ml/min 熱脈衝流速儀即無法量測到井管中之流速，其量測流速之最低限約為 0.15 cm/sec。
5. 將熱脈衝流速儀量測後的流速與井管內的平均流速作對比，量測結果呈現相當良好之線性關係，但可以發現量測結果普遍比平均流速快，而量測誤差隨著井管內流速的降低而明顯增加，在流量為 1000 ml/min 時，熱脈衝流速儀的量測結果即達到約 50%的誤差。由於在實驗系統建製時已經排除亂流和管流所造成之影響，因此初步判斷仍有其他影響因子干擾量測結果。
6. 本研究在關閉實驗系統之水流系統後，熱脈衝流速儀在井管內無流速的情況下仍可量測到大約 35~40 秒的熱反應，根據此觀察結將其視為熱的自然對流所造成之影響，而可以推估其所造成的流速加成效應約為 0.125 cm/sec~0.143 cm/sec，

此效應在低流速的量測環境下影響顯著而無法忽略。

7. 由於熱脈衝流速儀現地量測時會因為井管歪斜或擺放角度問題而無法置於井管中央量測，因此藉由實驗室之系統進行擺放位置量測結果差異之比較。比較流速儀置於井管中央量測與貼近井壁量測結果顯示，當流量越大，兩者流速差異越大，誤差範圍分佈約為 8~10%。顯示流速儀會因量測位置不同而造成量測流速之差異。因此於現地量測時，流速儀在井管內擺放置中為考慮之要件。

#### 四、計畫成果自評

流速儀量測技術在國外應用層面甚廣，對於地層的透水性分佈具有良好的解析能力，本研究有助於提升對於量測地層透水性之各項技術的瞭解，可作為探討地下水文分佈狀況以及地下水流流動機制之參考。根據實驗結果顯示，熱脈衝流速儀確實可以反應出井管中的流動狀態，透過相關的實驗校正公式可以準確回歸出實際的水流流速，對於解析現地的水流狀態具有相當高的參考價值，若能再進一步發展與提升熱脈衝流速儀之量測範圍，將可更有效找出現地透水的區段和地層的破裂帶。

在經建及應用方面，本研究將有潛力提昇我國對於地層透水性的量測技術，過去主要應用抽水試驗和漏浸試驗僅能夠瞭解整段含水層的透水性質，對於地下水污染整治以及需要地層高解析透水性分佈的重大建設所能提供的資訊相對缺乏，熱脈衝流速儀的發展已研究可增進吾人對於地層透水性分佈的瞭解，期能有助於日後相關領域應用資訊的提供。

#### 五、參考文獻

- Javandel, I., and Witherspoon, P.A., 1969, A method of analyzing transient fluid flow in multilayered aquifer, *Water Resource Research*, 5, 856-869.
- Hanson, R.T., and Nishikawa, T., 1996, Combined use of flowmeter and time-drawdown data to estimate hydraulic conductivities in layered aquifer system, *Ground Water*, 34(1), 84-94.
- Molz, F.J., and Young, S.C., 1993, Development and application of borehole flowmeters for environmental assessment, *The Log Analyst*, 34, 13-22.
- Molz, F.J., Boman, G.K., Young, S.C., and Waldrop, W. R., 1994, Borehole flowmeter: field application and data analysis, *Journal of Hydrology*, 163, 347-371.
- U.S. Environmental Protection Agency, 1998, Application of the electromagnetic borehole flowmeter, EPA/600/R-98/058, 53 p.

- Schürch, M., and Buckley, D., 2002, Integrating geophysical and hydrochemical borehole-log measurements to characterize the Chalk aquifer, Berkshire, United Kingdom, *Hydrogeology Journal*, 10, 610-627.
- Muldoon, M., Simo, J., and Bradbury, K., 2001, Correlation of hydraulic conductivity with stratigraphy in a fractured-dolomite aquifer, northeastern Wisconsin, USA, *Hydrogeology Journal*, 9, 570-583.
- Wilson, J.T., Ross, R.R., and Acree, S., 2005, Using direct-push tools to map hydrostratigraphy and predict MTBE plume diving, *Ground Water Monitoring and Remediation*, 25, 93-102.
- Paillet, F., 2004, Borehole flowmeter applications in irregular and large-diameter boreholes, *Journal of Applied Geophysics*, 55, 39– 59.
- Ruud, N.C., and Kabala, Z.J., 1997, Numerical evaluation of the flowmeter test in a layered aquifer with a skin zone, *Journal of Hydrology*, 203, 107-108.
- Xiang, J., 1995, The evaluation of the flowmeter test in three-layer aquifers and the influence of disturbed zones, *Journal of Hydrology*, 166, 127-145.
- Shapiro, A.M., and Hsieh, P.A., 1998, How good are estimates of transmissivity from slug tests in fractured rock?, *Ground Water*, 36, 37-48.
- Johnson, C.D., Haeni, F.P., Lane, J.W., Jr., and White, E.A., 2002, Borehole-geophysical investigation of the University of Connecticut landfill, Storrs, Connecticut: U.S. Geological Survey, Water-Resources Investigations Report 01-4033, 187 p.
- Johnson, C.D., Lane, J.W., Jr., Williams, J.H., and Haeni, F.P., 2001, Application of geophysical methods to delineate contamination in fractured rock at the University of Connecticut landfill, Storrs, Connecticut, *Proceedings, Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*, Denver, Colorado.