

應用雙封塞水力試驗探討裂隙岩體之水力特性

許世孟 翁孟嘉 曾慶恩 顧承宇 譚志豪

財團法人中興工程顧問社 大地工程研究中心

摘要

裂隙岩體的水力特性主要反應水體在裂隙間流通的能力。由於模擬破碎岩體內地下水污染物流動與傳輸行為時，需先確認研究範圍內裂隙岩體的水力特性，因此有必要界定各種裂隙構造岩體水力特性變化概況。為了量測各種裂隙構造水力特性，本研究應用雙封塞水力試驗設備，測量裂隙岩體的水力特性。封塞試驗是在試驗過程中，利用封塞阻隔一個裂隙或是多個裂隙，甚至整個岩體結構，測量其水力特性。本研究選單一鑽孔，針對完整岩體、單一裂隙岩體及多裂隙岩體區域，在不同深度位置，進行現地單井雙封塞水力試驗。本研究藉由試驗的結果可建立(1)低滲透性裂隙岩體在不同岩體構造下，水文地質特性的變化;(2)相同地質構造下，水文地質特性與地層深度之關係。

關鍵字：裂隙岩體、水力特性、雙封塞水力試驗。

一、前言

準確地描述裂隙岩體水力特性是模擬破碎岩體內地下水污染物流動與傳輸行為成功與否之關鍵課題，而裂隙主要控制這類岩體的水力特性，同時也是污染物傳輸過程中的主要路徑。因此在岩體中，裂隙本身大小、裂隙出現密度及裂隙與裂隙間之連通性皆會影響岩體的水力特性[1]。此外，有些研究指出描述裂隙岩體水力特性之水文地質參數滲透係數會隨地層深度而減小趨勢，其原因是由於大地應力增加導致節理內寬或岩基孔隙變為緊密，及節理頻率變小等因素所導致[2]。雖然從這些研究已發現岩體的滲透係數會隨深度呈現遞減趨勢，但是此種遞減關係並非有條理、系統地，特別是在深度大於 50 米。然而有其它研究發現在超過 1000 米的地層下，原本認為滲透係數應當很小，但發現在此深度之裂隙滲透能力卻很顯著，例如 Fetter(1988)[3]在美國伊利諾州，從花崗岩的水力試驗中，發現在 664m 到 1669m 深度間，卻有較高的滲透率；Kessels and Kuck(1995)[4]和 Gerard et al.(1996)[5]分別在德國與法國地區，在試驗場址大約三千公尺的地層中發現裂隙岩體也具較高的滲透能力。綜觀上述討論，我們可以從試驗數據觀察得到，大致上滲透係數會隨深度而遞減，但也不是每一個場址會獲得相

同結論，因此有必要對個別場址進行此議題相關研究。

過去裂隙岩體的水力試驗多採用呂琴試驗，此類試驗只能提供整個鑽孔岩體周遭之水文參數，無法針對特定區段裂隙構造進行試驗，為了探討影響裂隙岩體水力特性之可能因子，雙封塞水力試驗設備可達成此目的。此設備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，主要的應用有(1)利用固定的試驗區段，依次往下，觀測水力傳導係數在孔中垂直的變化；(2)針對不同裂隙構造區段進行試驗。

本文主要目的，除了介紹雙封塞水力試驗外，另選擇一試驗場址實際在裂隙岩體中進行水力試驗，探討(1)低滲透性裂隙岩體在不同岩體構造下，水文地質特性的變化；(2)相同地質構造下，水文地質特性與地層深度之關係，藉此了解岩體裂隙構造之水文地質資料與台灣地區岩體之透水係數隨深度的變化趨勢，以利水文地質分析模式選定與分析之參考。

二、單井雙封塞水力試驗

2.1 試驗儀器

單井雙封塞試驗主要設備規格及功能說明如下：

1. 深井封塞：由 Farwest Aircraft Inc. 製造，材質為耐高壓充氣橡皮。適用水深可達 500m，連接為雙封塞用以封堵欲試驗區段。
2. 離心式抽水幫浦：由 Grundfos. Inc. 製造之沉水離心式馬達，適合 2 吋地下水井採樣。最大揚程可達 75m，最大出水量 9 GPM，用以抽取試驗區段地下水。
3. 水壓感測器：INW Inc. 製造。水壓感測器包含兩型號，壓力量測範圍分別為：0 ~ 21 kg/cm² 及 0 ~ 56 kg/cm²，精確度為±0.1%，並含過壓保護裝置，用以量測試驗區段水壓。
4. 封塞器充氣裝置：包含氮氣及鋼瓶、高壓氣管調整器、氣體流量計、高壓閥門及高壓充氣管，用以膨脹深井封塞。
5. 自動資料收集處理器：自動資料收集處理器之程式執行速度最高可達 100Hz，輸入埠包含 24 只 SE 及 4 組 plus 訊號輸入，可與電腦直接連線，具 100 萬筆資料儲存功能。
6. 注水用馬達：為 3HP 沉水離心式馬達，用於注水試驗。
7. 捲揚系統：主要將雙封塞系統置入擬試驗區段，包括捲揚機、三角架、滑輪、吊頭、不銹鋼連接管及管鉗。

圖 1 是雙封塞組裝完成的照片，圖中上下封塞的距離為 1.6m，該長度即為本次水力試驗區間，試驗結果將呈現此區間內地質構造之水力特性，此試驗區間長度可隨試驗目的而調整。因此雙封塞設備在進行水文參數調查好處是可利用封塞來阻隔試驗區間，以了解區間內各

種地質構造的水力特性。

2.2 水力試驗方法簡介與比較

一般單孔水力試驗有四種試驗方法在獲得裂隙岩體水力參數[6]: (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)。傳統上，試驗方法的選擇是依據(1)試驗區段所期望的水力傳導能力(地質條件)；(2)採樣的岩石體積；(3)可支配時間(計畫費用考量)；(4)設備儀器。綜觀四種單井水力試驗方法，本研究整理各種方法的優缺點比較，如表 1 所示，同時整理出各種試驗各自適合施作的地質條件狀況，如表 2 所示，表 1 及表 2 可作為一試驗場址水力試驗方法選擇之依據。

三、案例分析

3.1 試驗場址描述

試驗場址位置位於台中盆地東側之大坑山區如圖 2 所示，場址座落於一西北-東南向之陡坡上，坡高約 30 m。鑽孔為一 HQ 孔徑(99 mm)、深度 110 m 之垂直鑽孔，採用旋鑽方式鑽掘，孔口高程 314.2 m，地下水位深 8.9 m。

根據區域地質圖可知，本場址地層屬卓蘭層(CL)，岩性以砂岩、頁岩互層為主，位態大致呈南北向、向東傾 36-38 度，距離場址西側之車籠埔斷層約 600 m。依據岩心資料，岩性主要為灰色細砂岩及灰黑色粉砂岩，其中除在深度 31.0 - 44.0 m 處較為破碎外，其餘岩心完整性良好。關於場址岩盤中裂隙分佈情形，參見下一節孔內攝影調查。

3.2 孔內攝影試驗與試驗區段規劃

傳統上，地下弱面調查主要透過鑽孔岩心資料，統計弱面分佈及位態狀況，然而卻存在許多限制，例如(1)不易判斷岩心顯示之弱面為原生或因人為鑽取引致；(2)不易透過岩心檢視空穴、弱面內寬、易流失之夾心等情形；(3)遇岩心破碎或無法提取時，有無法了解該區段地下地質狀況之風險。有鑑於此，為改善上述限制並提供雙封塞試驗位置選擇的依據，本研究採用音射式孔內攝影進行弱面調查，以瞭解弱面真實之情形。

在本試驗場址使用音射式探測儀掃描一個深度 110m 垂直鑽孔，扣除深度 22m 以上由於岩層過於風化，攝影效果較差，不進行分析外，共在鑽孔深度 22m-107m 間發現 93 道地質弱面。圖 3 左側顯示在深度 57-59 公尺處，使用音射式探測儀擷取之影像結果，而圖 3 之右側則利用影像處理軟體 RGLDIP 分析弱面、構造位態之結果。

依孔內攝影之結果與本計畫試驗目的，規劃不同深度之不同地質構造段進行試驗，試驗位置詳如表 3 所示。

3.3 試驗方法選擇與試驗資料分析方法

從本場址的岩心資料與孔內攝影結果研判，本場址地質狀況主要為含裂隙之砂岩、粉砂岩岩體，其透水係數 K 大致介於 $10^{-7} \sim 10^{-10}$ m/s [7]。分析四種水力試驗方法，抽水試驗不易在本場址施作(可能抽不到水)，而微水試驗雖可在本場址施作，但因滲透係數太低，可能造成施作時間過長，在經費考量下，不宜考慮，因此採用定水頭注水試驗與壓力脈衝試驗，作為推求滲透係數的試驗方法，由於本次試驗過程中，因時間與經費因素壓力脈衝試驗只在其中四處施作，所以本報告將只以注水試驗的結果呈現。

本研究定水頭注水試驗資料，採用 ASTM (American Society for Testing and Materials) 針對定水頭注水試驗推求低滲透性岩體透水係數及儲藏係數所制定之標準分析方法 [8]，進行試驗資料之分析工作。

假設一個試驗鑽孔貫穿一廣大含水層，封塞試驗段在定壓作用下，將水注入岩體中，圍繞在封塞段所形成暫態水流行為，其偏微分方程式之解如下 (Jacob and Lohman) [8]

$$Q = 2\pi T P G(\gamma) / \rho g \quad (1)$$

其中， Q 是水流進入封塞段岩體的流量； T 是封塞段水力傳導量； P 是試驗定水頭壓力； ρ 是水的密度； g 是重力加速度； $G(\gamma)$ 是注水試驗水井函數。

$$\gamma = Tt / Sr_w^2 \quad (2)$$

其中， t 是試驗所經過時間； S 是儲水係數； r_w 是封塞段試驗井的半徑。

方程式(1)中 $G(\gamma)$ 對 γ 的關係圖如圖 4。為了推求封塞段的 T 及 S ，首先，繪製注水試驗過程中所紀錄的水流進入岩體的流量隨時間之關係曲線，再將此圖與圖 4 作套疊，應用基型曲線重疊法及方程式(1)和(2)，即可推求出封塞段周圍岩體水力特性。

3.4 試驗結果

利用 3.3 節定水頭注水試驗資料分析方法，本研究針對各個封塞段試驗資料進行水力傳導係數推估工作。圖 5 是在深度 36.4 m ~ 38.0 m 封塞試驗區之計算成果，此處屬於多裂隙區。表 3 是本研究此次現地水力試驗定水頭注水試驗所有分析結果。圖 6 則很清楚地顯示，在相同地質構造下，無論是完整岩心段、單一裂隙段或是多裂隙段，水力傳導係數值因地層深度遞增而遞減，主要因為地層越深，地層應力增加，使裂隙寬度減小，相對的岩體的滲透係數也變小。如果分別假設試驗場址水力傳導係數與深度關係是遵循 Black(1987) [9] 所提的幕次定律及本研究所提的指數關係，本研究利用不同地質構造試驗結果，可回歸出本試驗場址水力傳導係數與深度關係之經驗公式及公式的相關性 R^2 值，如表 4 所示。從 R^2 值大小判斷，可知本場址較合適的水力傳導係數與深度關係模式是指數關係的形式。

比較不同岩體構造下，水力傳導係數之變化，多裂隙區段的岩體滲透性通常比單一裂隙段或完整岩心段高之趨勢，如圖 6 顯示在深度 35.5 公尺附近，多裂隙區的岩體滲透值比單一裂隙區多 13 倍，而此深度也是地下水主要的出水帶。雖然本研究發現岩體的滲透性會隨裂隙越多而越大，但在深度 95 公尺附近發現相反的趨勢，多裂隙區段岩體(深度 95m 附近)滲透性卻比完整岩心區段(深度 91m 附近)還低 2.8 倍，討論趨勢相反的可能原因有二，(1)深度；(2)多裂隙區中，從岩心資料發現裂隙中有夾泥，因此造成滲透能力減弱。

根據本研究此次在定水頭試驗所得資料，我們可以繪製每次定水頭注水試驗時，在 2 小時的試驗過程中，注入岩體的平均注水流量與水力傳導係數 K 值的關係圖，如圖 7 所示。圖 7 顯示注水試驗平均注水流量與岩體 K 值成線性的關係，回歸的 R^2 達到 0.85，此結果可以提供定水頭注水試驗，工程應用上一種快速的方法在估算 K 值，只要記錄平均注水量，透過本研究建立的關係式，將可立刻獲得岩體 K 值，而不需在使用複雜的基型曲線匹配法推求 K 值。

四、結論與建議

由上述單井現地雙封塞試驗結果，本研究可獲以下幾點結論與建議：

1. 本研究成功地完成水文地質單井雙封塞現地透水試驗技術之開發與試驗資料分析方法之建立工作，同時證明雙封塞設備適合於裂隙岩體中進行相關裂隙構造水文地質特性調查工作。
2. 本研究試驗結果發現，在相同地質結構下，裂隙岩體的滲透係數會隨深度而遞減，呈現一指數遞減之關係；另外，在相同長度的試驗區段，岩體中包含的裂隙越多，岩體之滲透係數也有越高之趨勢，但裂隙中如含有夾泥等材料，會使岩體滲透能力減弱。
3. 從定水頭注水試驗結果，本研究初步建立一個簡易的注水試驗資料分析方法，而不需使用複雜的基型曲線匹配法推求 K 值。
4. 目前台灣地區在裂隙岩體相關的水文地質參數調查甚為缺乏，未來可持續篩選合適之裂隙岩體試驗場址進行水文地質試驗，可作為水文地質分析模式參數選用之參考。

參考文獻

- [1]. Singhal, B.B.S., and Gupta, R.P., Applied Hydrogeology of Fractured Rocks, Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, pp.151-168 (1999).
- [2]. Lee, C. H., and Farmer, I., Fluid Flow in Discontinuous Rocks, Chapman&Hall, London, pp.1-26 (1993).
- [3]. Fetter, C.W., Contaminant Hydrogeology, Macmillan, New York, 458pp. (1988).

- [4]. Kessels, W. and Kuck, J., "Hydraulic communication in Crystalline rock between the two boreholes of the Continental Deep Drilling Project in Germany," *Int. J. Rock Mech. Min. Sc. Geomech. Abstr.*, 32(1), pp.37-47 (1995).
- [5]. Gerard, A., Baumgartner, J., Baria, R. et al., "European Hot Dry Rock Research project at Soultz-sous-Forets," 30th IGC, Abstracts, Vol. 1, Beijing, pp. 385. (1996).
- [6]. National Research Council (NRC), *Rock Fractures and Fluid Flow: Contemporary Understanding and Applications*, National Academy Press, Washington DC. 551pp. (1996).
- [7]. Kruseman, G.P. and de Ridder, N.A., *Analysis and Evaluation of Pumping Test Data*, 2nd edn, Intl. Inst. For Land Reclamation and Improvement, Publication 47, Wageningen, p. 377. (2000).
- [8]. ASTM D 4630, "Standard Test Method for Determining Transmissivity and Storativity of Low Permeability Rocks by In Situ Measurements Using the Constant Head Injection Test," ASTM International.
- [9]. Black, J.H., Flow and flow mechanisms in crystalline rock, in *Fluid Flow in Sedimentary Basins and Aquifers*, (eds J.C. Goff and B.P.J. Williams). Geol. Soc. Spl. Publ. No. 34, pp. 186-200 (1987).

ABSTRACT

Hydraulic properties of fractured rock masses reflect the ability of a formation to transmit water through its fractures. Understanding these properties therefore can greatly help study the groundwater flow and transport in fractured rock masses. A double-packer technique was adopted in this research. Packer tests utilize two or more packers to isolate a portion of borehole for testing. In practice packers can be used to isolate a single fracture, a group of fractures, or an entire rock of formation. In the present test programs, a fixed test interval was chosen, and the borehole was tested in different sections along its length with no fracture, a single fracture, or multiple fractures at different depths to obtain hydraulic conductivities. Based on the testing data, the study is able to identify (1) the relationship between hydraulic properties and geological structures and (2) the relationship of permeability with depth in fractured rocks.

Keywords: fractured rock masses, hydraulic properties, double-packer hydraulic tests.

表 1 單井水力試驗方法簡介及優缺點比較

| 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水文地質區域性質。 | (1)需知抽水量。 (2)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。 | (1)所得透水係數代表較小的試驗岩體；(2)如低滲透性岩體及大管徑都導致試驗時間攏長。 |
| 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。 |

表 2 單井水力試驗適合施作之地質條件

| 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，其它亦可 |
| 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 3 定水頭注水試驗位置與分析結果

| 試驗編號 | 試驗區間 | | G(γ) | γ | Q (m ³ /day) | t (min) | K (m/s) | 地質描述 |
|-------|------|--------|---------------|----------|-------------------------|---------|-----------|------|
| | Top | Bottom | | | | | | |
| T35.5 | 34.7 | 36.3 | 6 | 900 | 9 | 20 | 7.596E-08 | 單一裂隙 |
| T37.2 | 36.4 | 38.0 | 1 | 100 | 20.3 | 3 | 1.03E-06 | 多裂隙 |
| T57.5 | 56.7 | 58.3 | 1 | 100 | 0.4 | 3 | 2.02E-08 | 單一裂隙 |
| T75.4 | 74.6 | 76.2 | 7 | 0.3 | 2 | 40 | 1.45E-08 | 多裂隙 |
| T78.0 | 77.2 | 78.8 | 9 | 1 | 0.4 | 90 | 2.25E-09 | 完整岩心 |
| T83.4 | 82.6 | 84.2 | 1 | 0.8 | 0.04 | 20 | 2.02E-09 | 單一裂隙 |

| | | | | | | | | |
|-------|------|------|----|------|------|-----|----------|------|
| T91.0 | 90.2 | 91.8 | 30 | 0.05 | 0.5 | 200 | 8.43E-10 | 完整岩心 |
| T95.0 | 94.2 | 95.8 | 5 | 0.3 | 0.03 | 400 | 3.04E-10 | 多裂隙 |

表 4 本試驗場址水力傳導係數與深度關係

| 地質構造 | 幕次關係(Black 1987) | 指數關係(本研究) |
|------|----------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| 單一裂隙 | $K = 0.2756Z^{-4.1731} ; R^2 = 0.95$ | $K = 10^{-6} \exp(-0.0761Z) ; R^2 = 0.99$ |
| 多裂隙 | $K = 5 \times 10^6 Z^{-8.0171} ; R^2 = 0.93$ | $K = 2 \times 10^{-4} \exp(-0.1361Z) ; R^2 = 0.98$ |



圖 1 雙封塞儀器實際完成組裝照片

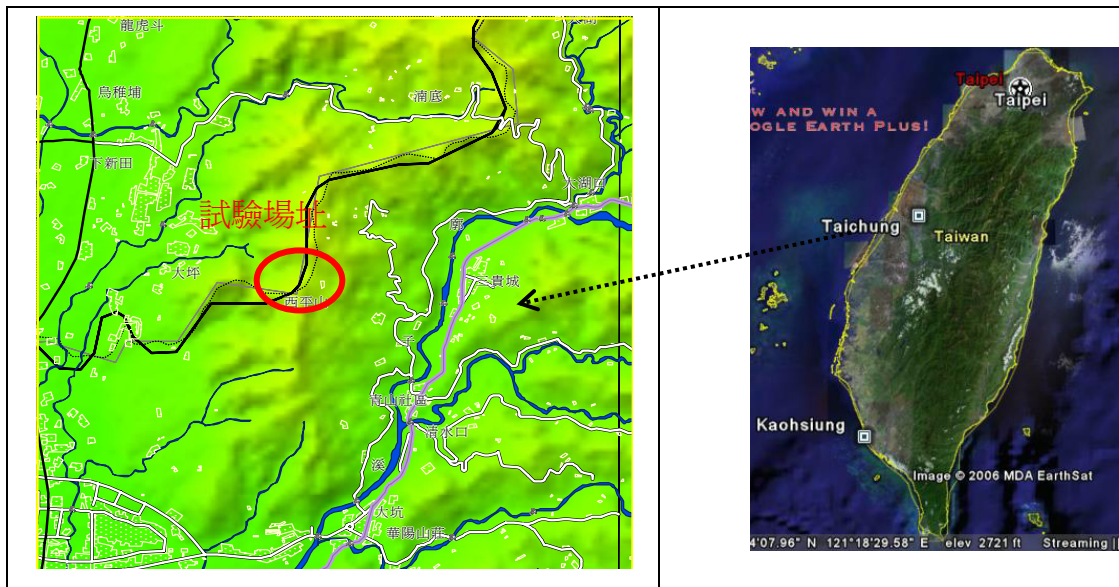


圖 2 試驗場址位置圖

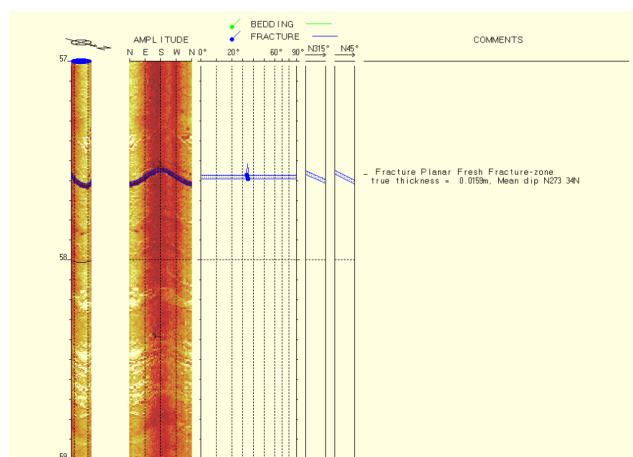


圖 3 弱面位態分析結果

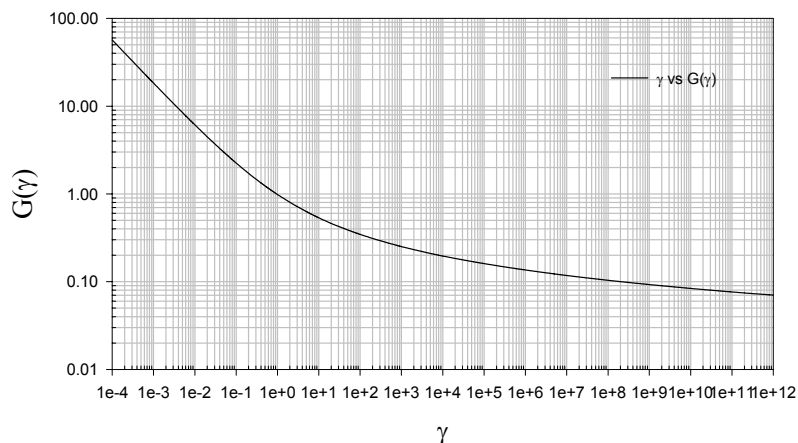


圖 4 Jacob and Lohman 基型曲線

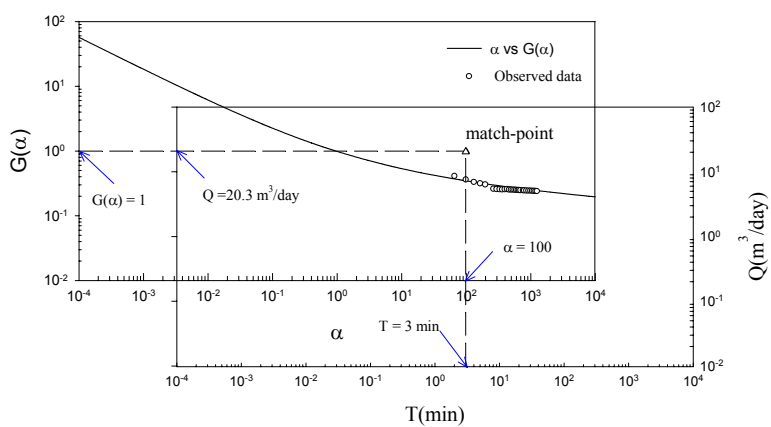


圖 5 試驗段水力特性計算圖(封塞區間:36.4 m ~ 38.0 m)

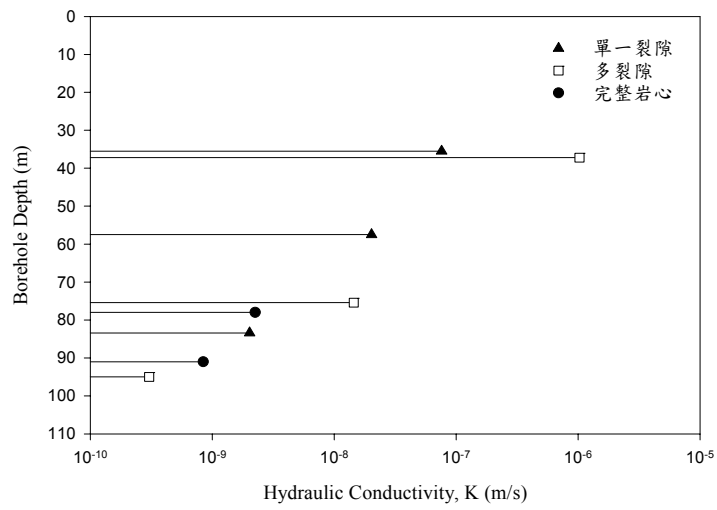


圖 6 定水頭注水試驗分析結果

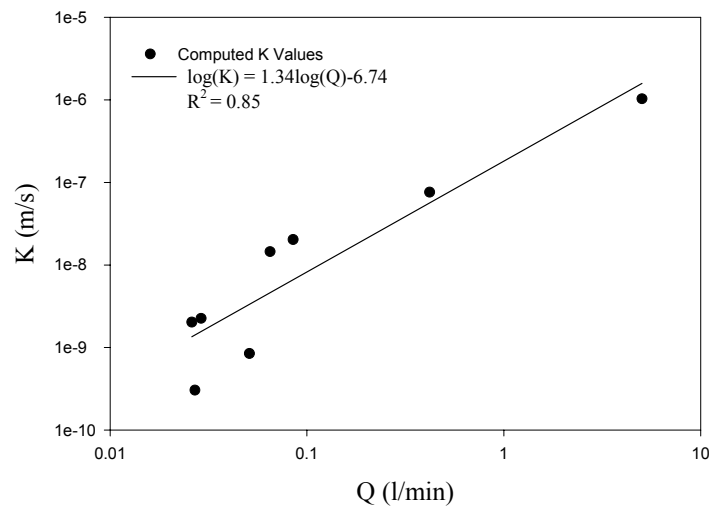


圖 7 K 值與注水試驗平均注水流量之關係