

# 裂隙花崗片麻岩體之徑向收斂示蹤試驗分析

陳國宏 劉台生

國立中正大學應用地球物理研究所

## 摘要

本研究目的在分析裂隙花崗片麻岩體中徑向示蹤劑現場試驗結果。試驗地點位於台灣離島之 YJ 場址，現場試驗採用保守之氯化鈉做為示蹤劑，並由一號井 (BH01) 於深度 280 ~ 360 m 之封塞段注入；而抽水井 (BH04) 保持通井抽水，並在三個不同深度及地表設置電導度計以量取示蹤劑溶液電導度。由於注入井封塞段長度為 80 m，故井內的混合 (Mixing) 效應不可忽略；此外，由於不同深度之示蹤劑濃度穿透曲線 (Breakthrough Curve) 之濃度峰值隨深度遞減而漸減，推測乃因抽水井與其它裂隙相交，故由相交裂隙補助的地下水產生之稀釋 (Dilution) 現象。本文發展冪級數半解析解，並考慮上述之混合及稀釋機制，以模擬現場試驗情況。模式中控制穿透曲線之到達時間主要為裂隙內寬與裂隙中地下水流量，而圍岩擴散因子與混合效應則反映在穿透曲線尾部之拖曳情形。分析結果與現場試驗結果相近，然而現場試驗所得穿透曲線發現多峰值現象，估計可能因為岩體中存在多條傳輸路徑所造成，但因為模式假設岩體為單一裂隙構造，故無法模擬此多峰值線現象。此外，分析結果所估計之裂隙內寬、延散度、圍岩孔隙率分別為  $1.27 \times 10^{-3}$  m、0.0475 m 及 0.0047，且圍岩擴散效應不明顯。但注意此實驗條件為強制水力梯度，最大試驗時間小於 20 天，且井間距離為 9.5 m，故圍岩擴散效應可能因為實驗條件的限制而不易顯現。

## 前言

本研究考慮之試驗地點，為台灣離島 YJ 場址之花崗片麻岩體。能環所在此場址共鑿三口深度約 500 m 之垂直井 (編號 BH01、BH02 及 BH04)，任兩井間之距離約為 10 m，並進行了地質調查、地球物理井測、跨孔地電阻、跨孔水力連通及跨孔示蹤劑試驗等試驗。本研究根據跨孔示蹤劑試驗結果，結合其他試驗結果，以綜合分析試驗岩體之水文地質特性。

由跨孔地電阻及水力試驗結果顯示，在 BH01 及 BH04 兩井之間，約在 330~360 m 之間存在明顯的裂隙通路，故選擇該深度為示蹤劑試驗封塞段。示蹤劑試驗採用強制水力梯度方式，先產生穩態的徑向地下水流場後，再以脈衝注入 (Pulse injection) 方式注入保守性的氯化鈉示蹤劑，在 BH01 中 330 m、270 m 及 155 m 分別設置電導度計以量測示蹤劑溶液之電導度，並將之轉換為示蹤劑濃度值。因為注入井穿過數個可能的裂隙連通段，為確保試驗能夠真正進入岩體，故採用了長度為 80 m 之封塞區間做為示蹤劑注入段，但此配置不可避免的產生了注入井的混合效應；另外，於抽水井中，由於井內水流的快速移動而使得混合效

應不明顯，但試驗結果明顯受到額外裂隙水的補助，使得抽水井的示蹤劑濃度有隨深度減少而濃度下降之趨勢，此為本研究所考慮的稀釋現象。因此，本研究利用陳與劉(2005)發展之單一裂隙徑向收斂模式，並加入注入井之混合效應與抽水井之稀釋效應，以分析 YJ 場址之示蹤試驗結果。

## 示蹤劑傳輸之冪級數解析解

單一裂隙之徑向收斂溶質傳輸示意圖如圖一右側所示，裂隙所在深度假設為 360 m， $Q$  為固定之抽水流量， $M$  為示蹤劑注入質量， $r$  為徑向距離， $r_L$  為注入井與抽水井間之距離， $r_i$  為注入井半徑(m)， $r_w$  為抽水井半徑， $h$  為飽和含水層厚度， $h_i$  及  $h_w$  分別代表在注入井及抽水井中混合段高度(Mixing length)， $2b$  為裂隙內寬(Aperture)。此模式考慮注入井之混合效應；裂隙中溶質的平流、延散及吸附應；圍岩中的分子擴散及吸附效應，以及與抽水井相交裂隙提供額外裂隙水的稀釋效應 (如圖一左側所示)。

以雙孔隙率模式的概念，分別建立裂隙與圍岩內之溶質傳輸模式，並在裂隙與圍岩交接處考慮示蹤劑濃度的連續性，以結合兩不同介質間的溶質傳輸。混合效應則以注入井的邊界條件考慮之；而稀釋效應則考慮圖一左側的小控制體積內的質量平衡，其中裂隙水的補助量，則由現場示蹤劑穿透曲線估計之，並假設此補助量平均分配於兩電導度計之間。故由裂隙出口處之濃度，考慮裂隙水之補助後，則可計算在不同深度因稀釋效應造成之示蹤劑濃度變化。

求解過程中，首先將模式無因次化，求出裂隙中示蹤劑濃度之 Laplace 域之冪級數(Power series)解析解( $\bar{C}_{D,i}$ )，再利用數值逆轉換，求出時間域的數值解，並將此半解析解模式簡稱為 PRTSF。若以  $s$  代表 Laplace 變數，則在不同深度( $y$ )的無因次濃度 Laplace 解( $\bar{C}_{wD}$ )如式(1)所示 (陳，2006)

$$\bar{C}_{wD}(r_w, s) = \frac{\bar{C}_{D,i}(r_w, s)}{Q_{D,i}} \exp\left(-\frac{r^2}{r_w^2}\right) - 1 + \sum_{j=1}^i \frac{Q_{D,j}}{Q_{D,j-1}} \ln\left(\frac{y_j}{b} - \frac{y_{j-1}}{b}\right) \frac{Q_{D,j}}{Q_{D,j-1}} s \quad (1)$$

其中  $Q_D$  為不同深度之無因次裂隙水補助量。 $\bar{C}_{D,i}$  為無因次參數 Peclet number ( $Pe$ )、圍岩擴散因子( $\Phi$ )及注入井之混合因子( $\mu_i$ )的函數，分別表示為：

$$Pe = r_L / \alpha_L \quad (2)$$

$$\Phi = \phi_m \sqrt{2\pi r_L^2 D_m / (Q_f b)} \quad (3)$$

$$\mu_i = r_i^2 h_i / (2b)(r_L^2 - r_w^2) \quad (4)$$

其中  $\alpha_L$ 、 $\phi_m$ 、 $D_m$  及  $Q_f$  分別為延散度(Dispersivity)、圍岩孔隙率、分子擴散係數及裂隙內流量。當  $\Phi$  值大時，表示圍岩擴散效應強，則示蹤劑穿透曲線之拖曳情形明顯，反之則圍岩擴散效應不明顯；而當  $Pe$  值大時，代表示蹤劑傳輸主要由平

流效應控制，反之，則主要由延散效應控制； $\mu_i$  則控制穿透曲線之拖曳情形。若不考慮抽水井之稀釋效應，則示蹤劑濃度並不會隨著抽水井深度遞減而下降，且 330 m 深度之穿透曲線僅是裂隙出口處(360 m)穿透曲線在時間軸上的平移，如圖二所示。但若考慮稀釋效應，則模擬結果（圖中虛線）與觀測結果則非常接近。

## 現場試驗數據分析結果

示蹤劑試驗選用保守型的氯化鈉 (NaCl) 作為示蹤劑，實驗時量取 26 kg 的氯化鈉調製成 800 l 濃度一致的示蹤劑，注入前量測示蹤劑電導度約為 50 mS/cm，換算成濃度則為 32.82 g/kg。將示蹤劑置於 1000 l 容量的量筒內，筒的最高位置約高於地表 3 m，底部距地表約 1.5 m。實驗開始前先於 BH01 連續抽水 3 小時，以達穩態地下水流後，之後開啓量筒底部閥門，以自然流入的方式經由連接管注入至封塞段中。另外，沈水馬達置於地表下深度 150 m 處，以通井抽水的方式將地下水抽引至地表，並於地表設置一電導度感應器，紀錄自抽取之地下水中，示蹤劑的電導度變化情形。

圖三為假設單一裂隙位於 360 m，經由 30 m 之稀釋深度後，在深度 330 m 處之模擬結果與現場數據之比對。圖三所使用的模擬參數列於表一，選用此參數的原則為使得 330 m 之模擬 BTC 與現場 BTC 間具有最小的方根平均誤差(Root mean square error, RMSE)。圖中顯示，穿透曲線之上升部分 (50 ~ 75 hrs) 與現場結果非常接近，在穿透曲線之下降部份，於 75 ~ 120 hrs 內之 PRTSF 模擬值略高於現場觀測值，但在 120 hrs 之後之模擬值高於現場觀測值，故整體的回收率接近現場試驗之回收率。而穿透曲線之拖曳現象則應該由圍岩擴散 ( $\Phi = 0.1$ ) 及注入井混合效應 ( $\mu_i = 0.4$ ) 所導致。

圖四顯示深度 270 m 之穿透曲線與現場數據之比對。在時間 0 ~ 80 hrs 內，PRTSF 與現場數據可以大致吻合，於時間 80 hrs 之後，PRTSF 略高於現場觀測值，但在 125 hrs 之後，現場數據顯示出第二峰值。當岩體內之裂隙網絡構造較複雜時，示蹤劑可能經由不同的路徑傳輸，因此可能出現多峰值的情形，而造成現場濃度穿透曲線的多峰值現象。但因 PRTSF 模式並未考慮其他傳輸路徑的影響，使得在時間 125 ~ 185 hrs 之區間，PRTSF 與現場數據的比對結果較不理想。

圖五顯示在深度 155 m 之穿透曲線與現場數據之比對，在時間 0 ~ 140 hrs 內，PRTSF 與現場數據可以大致吻合，在時間 140 ~ 400 hrs 之間，於現場濃度之穿透曲線可觀測到其他峰值的發生 (220 ~ 230 hrs 與 330 ~ 350 hrs)，而 PRTSF 僅考慮單一徑向裂隙，因此使得此時間段之 PRTSF 與現場數據的比對結果較不理想。

Maloszewski and Zuber (1990) 以 Laplace 逆轉換方式，發展出裂隙岩體中的傳輸解析解(簡稱 SFDM)。SFDM 考慮之傳輸機制與 PRTSF 類似，但 SFDM 考慮一維座標系統，但 PRTSF 考慮與現場試驗較符合的逕向座標系統。且 SFDM 並未考慮注入井的混合效應以及抽水井的稀釋效應，故 SFDM 與 PRTSF 僅能比

較在 330 m 之模擬解果。圖六為 PRTSF 及 SFDM 之模擬結果比較，從結果可以看出 PRTSF 與 SFDM 在穿透曲線曲線上升部分是幾乎相同的，而在穿透曲線拖曳部份 SFDM 濃度明顯為低，且在回收率部份，PRTSF 較接近現場觀測值之回收率。表二為 PRTSF 與 SFDM 估計參數之比較。比對發現，二者所得到的延散度相近且均很小，顯示裂隙中之平流效應大於延散效應。圍岩孔隙率與能環所量測的比對結果為：能環所為 0.53 % (平均值)，PRTSF 為 0.47 %，SFDM 則為 0.26 %，故結果顯示 PRTSF 模式的估計值較接近實際岩體的平均值。

## 結論

本研究以徑向收斂模式解析解 (PRTSF) 分析裂隙花崗片麻岩體之示蹤劑試驗結果，此模式中除了包含平流、延散、圍岩擴散外，還考慮了注入井的混合效應與抽水井的稀釋效應，使之能更符合現場之試驗情形。分析所得結論如下：

- (1) PRTSF 模式中將地下水的補助造成的稀釋現象考慮為均勻增加模式，配套所得參數值為： $Pe = 200$ 、圍岩擴散參數  $\Phi = 0.1$ 、注射井混合因子  $\mu_i = 0.4$ 、裂隙內寬為  $1.27 \times 10^{-3}$  m。以上列出之參數可求得延散度為 0.0475 m、圍岩孔隙率為 0.0047，注入井之混合高度為 20 m 左右。並且從高  $Pe$  值可以得知示蹤劑於裂隙中之傳輸機制為平流效應大於延散效應。另外，由低的圍岩擴散參數值說明此處之圍岩擴散效應並不明顯，這可能與實驗時間和井間距離有關。
- (2) 注入井的混合效應與抽水井的稀釋效應為本試驗中的重要影響因素，若忽略此兩項因子，則 PRTSF 無法得到合理之模擬結果。雖然 SFDM 並未考慮上述因子，且 SFDM 模擬結果與現場結果也大致符合，但 SFDM 估計之內寬值低於 PRTSF 估計之內寬值，且 SFDM 估計之圍岩孔隙率低於現場量測值。而由敏感性分析結果可知，裂隙內寬為主要的敏感參數，故 SFDM 的模擬結果能夠接近現場試驗結果，即可能是因為 SFDM 忽略混合及稀釋因子，而以較小的裂隙內寬及較小的圍岩孔隙率以彌補之。因此，分析時採用之模式需要接近現場試驗狀況，以期獲得合理之傳輸參數估計值。
- (3) 基於單一裂隙之雙孔隙率模式的假設，PRTSF 能夠獲得合理之模擬結果，但卻無法模擬現場試驗之多峰值現象。此結果表示，雖然現地岩體的溶質傳輸可能由一主要裂隙控制，但其他次要裂隙亦可能提供溶質傳輸路徑，故岩體中裂隙分布的複雜度，為模式分析成功與否的關鍵之一。
- (4) 流場效應對本試驗分析的結果並不明顯，因此 PRTSF 與 SFDM 模擬結果均與現場試驗結果相近，推究其原因可能為本次試驗乃屬於短期示蹤劑試驗，且井間距離僅 9.5m，故徑向流場可近似為線性流場。

## 參考文獻

Maloszewski, P., and A. Zuber, 1990, Mathematical Modeling of Tracer Behavior in Short-Term Experiments in Fissured Rocks, *Water Resources Research*, Vol. 26, No. 7, pp. 1517-1528.

陳美君及劉台生，2005，裂隙岩體徑向收斂示蹤劑傳輸之冪級數解，九十四年度地球物理學會年會暨蔡義本教授榮退專題研討會摘要集，pp. 98。

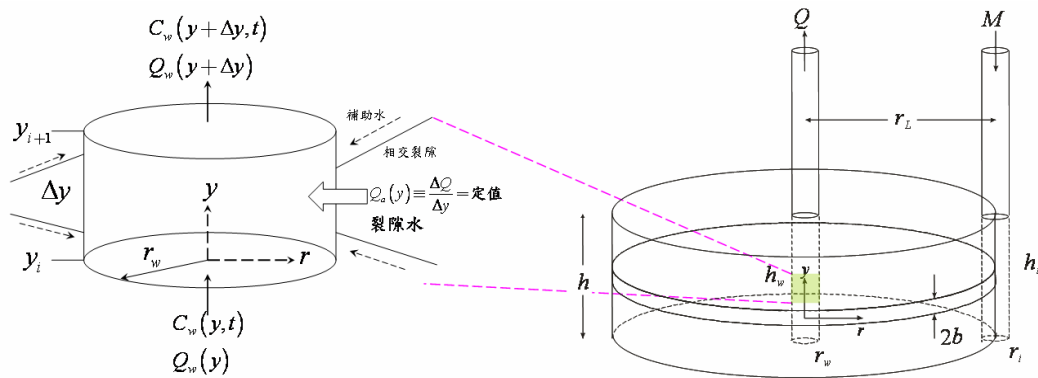
陳國宏，2006，裂隙花崗片麻岩體之徑向收斂示蹤試驗分析，中正大學應用地球物理研究所。

表一、PRTSF 模式使用之模擬參數值

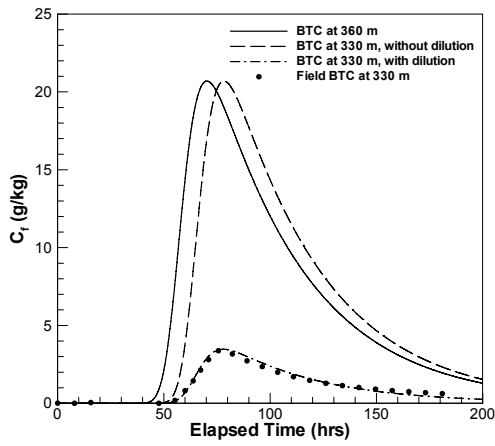
參數	配套值
$Pe$	200
$\Phi$	0.1
$\mu_i$	0.4
$Q_f$	$2 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{sec}$
$2b$	$1.27 \times 10^{-3} \text{ m}$

表二、PRTSF 與 SFDM 傳輸參數比較

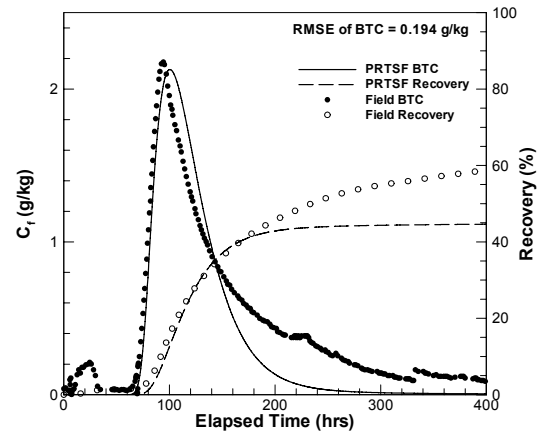
參數	PRTSF	SFDM
$\alpha_L$	0.0475 m	0.063 m
$\phi_m$	0.47 %	0.26 %
$h_i$	20 m	未考慮



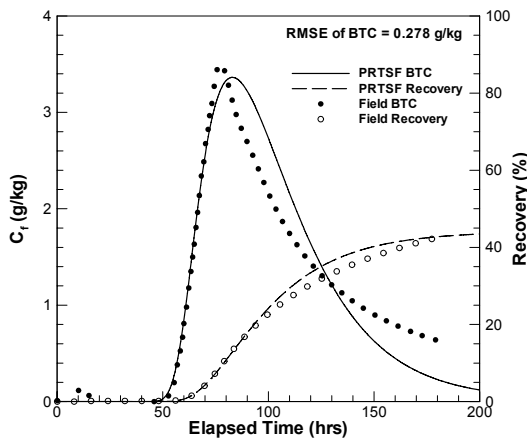
圖一、單一裂隙徑向收斂模式與稀釋模式示意圖



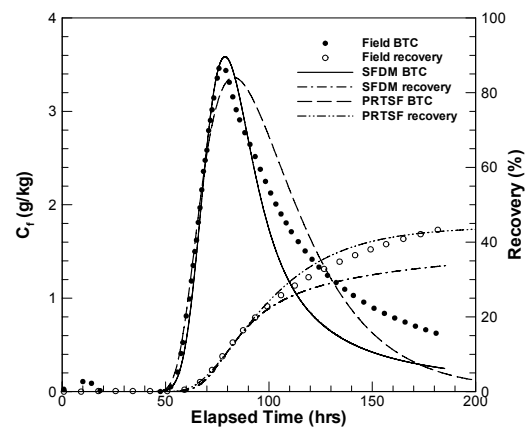
圖二、稀釋效應對模擬結果之影響



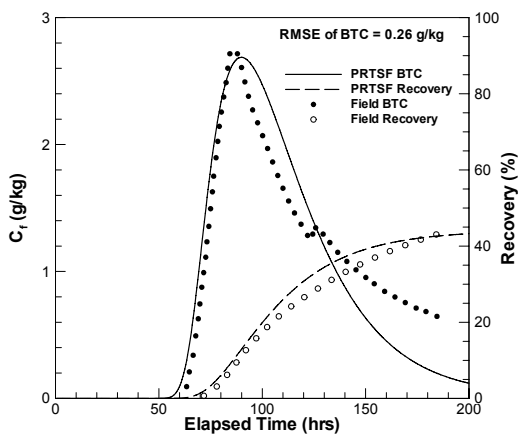
圖五、深度 155 m 之 PRTSF 模擬結果



圖三、深度 330 m 之 PRTSF 模擬結果



圖六、PRTSF 及 SFDM 模擬結果比較



圖四、深度 270 m 之 PRTSF 模擬結果