

III-443

亀裂性岩盤における物質移行特性についての一考察

(株)間組 技術研究所 正会員 山下 亮
 (株)間組 技術研究所 正会員 小林 晃

1. はじめに

放射性廃棄物の地層処分の問題に関連して、亀裂性岩盤中での地下水流れに伴う物質移行特性が重要な研究課題の1つとなっている。各国の研究機関はこの問題に取り組むために様々な室内試験や原位置試験を実施しつつある。本論文では、1次元の2重空隙モデルについてのFLUX型の解析解を示し、スウェーデンのFinnsjonサイトで実施された原位置トレーサー試験結果に適用した結果について述べる。

2. 解析方法

亀裂性岩盤における物質移行のメカニズムとして移流、分散、固相への吸着、亀裂部からマトリックス部への拡散などがある。さらに放射性廃棄物に関しては核種の崩壊連鎖なども考慮する必要があり、多くの物理的、化学的要因が物質移行特性に影響を与えられている。一般に2重空隙モデルと呼ばれるモデルにおいては、亀裂部とマトリックス部での物質の出入りを考慮した支配式が用いられる。D.H.Tangは、マトリックス拡散を考慮した支配式に対して亀裂入口において物質の濃度を一定に拘束した境界条件での1次元の解を導いている。筆者らは、Tangらと同じ支配式に対してパルス注入条件の場合のFLUX型の解がTangらの解に比べてかなり単純な形で得られることを見いだした。以下にこの解について述べる。

単一亀裂系における移流、分散、マトリックス拡散を考慮した場合の1次元の物質移行式は亀裂部とマトリックス部でそれぞれ次のようになる。

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_f \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - v \frac{\partial c}{\partial x} + \frac{2\phi D_m}{b} \frac{\partial c'}{\partial z} \Big|_{z=b/2}, \quad \frac{\partial c'}{\partial t} = D_m \frac{\partial^2 c'}{\partial z^2}$$

これらの支配式に対し、単位質量の溶質が注入された場合を考える。すなわち、初期条件、境界条件として次式を用いる。

$$c(x, 0) = 0, \quad bD_f \frac{\partial c}{\partial x}(0, t) - bvc(0, t) = \delta(t) \\ c(+\infty, t) = 0, \quad c'(z, 0) = 0, \quad c'(b, t) = c, \quad c'(+\infty, t) = 0$$

ここで、 c 、 c' 、 D_f 、 v 、 ϕ 、 D_m 、 b はそれぞれ亀裂部、マトリックス部での濃度、分散係数、流速、マトリックス部での空隙率および拡散係数、亀裂幅である。まず、マトリックス拡散のない場合($D_m = 0$)を考える。初期条件、境界条件は同様であるとすると物質流束 F_1 は次のようになる。

$$F_1(x, t) = bvc_1 - bD \frac{\partial c_1}{\partial x} = \frac{x}{2\sqrt{\pi D_f t^3}} \exp\left\{-\frac{(x-vt)^2}{4D_f t}\right\}$$

次に $\tau < t < \tau + \Delta\tau$ の間に亀裂の出口より流出する物質の質量 $\Delta M = F_1(x, \tau)\Delta\tau$ について注目する。距離 x を時間 τ で移行する場合の見かけの移行速度 \bar{v} は次のように表される。

$$\bar{v} = x/\tau$$

質量 ΔM についてマトリックス拡散の影響を考慮することを考える。ここではある固定された見かけ速度 \bar{v} で移行する質量について考えているので亀裂中での分散は考慮する必要がない。この場合($D_f = 0$)の物質流束は、次のようになる。

$$F_2(x, t, \bar{v}) = b\bar{v} \frac{k}{b\bar{v}\sqrt{\pi}(t-t_w)^{3/2}} \exp\left(\frac{-k^2}{t-t_w}\right) \theta(t-t_w) \\ \theta(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ 1 & t \geq 0 \end{cases}, \quad t_w = x/\bar{v}, \quad k = \frac{\phi\sqrt{D_m}t_w}{b}$$

以上から分散とマトリックス拡散の両方を考慮した場合の物質流束は次のような積分形で与えられると考えられる。

$$F(x, t) = \int_0^t F_2(x, t, x/\tau) \Delta M = \int_0^t F_1(x, \tau) F_2(x, t, x/\tau) \Delta \tau$$

ここで求めているのは物質流束であり濃度ではない。しかし、処分システムの性能評価や実験結果との比較においては物質流束の経時変化は重要な評価指標となる。

3. トレーサー試験結果の解析例

本論文で取りあげた原位置でのトレーサーを用いた物質移行試験は、スウェーデンで現在実施されている試験の一部である。サイトの地質は結晶質岩であり、比較的大規模な破砕帯が存在する。試験はこの破砕帯でのトレーサー移行を調べるものである。図-1に示すように BFI01、KFI06、KFI11 の3本のボーリング孔でトレーサーを投入し BFI02 孔で揚水が行われた。投入孔から揚水孔までの距離は 160m から 190m である。投入孔では特に水圧を作用させてのトレーサー液の圧入を行っていないため、流れは揚水により放射状に BFI02 孔に向かって流れることになる。揚水した地下水中のトレーサー濃度の経時変化が測定されており、これを単位時間当たりに流出する物質質量に変換し注入したトレーサー物質の総量で基準化してプロットした結果を図-2に示す。同図には上述した解析解でフィッティングした結果も示している。

解析解のパラメータのうち流速だけを変化させてフィッティングさせており、その他のパラメータ (D_f 、 ϕ 、 D_m 、 b) についてはそれぞれ 0.8×10^{-2} 、 0.01 、 1.0×10^{-9} 、 1.0×10^{-4} (単位: m,sec) とした。解析結果はかなり良く実測結果を再現しており、特に FLUX のピークを過ぎた後長いテール部が見られる現象をよく再現することができていると言える。このような長いテール部は2重空隙モデルの特徴と考えられ、本論文で用いている2重空隙モデルとその解析解が亀裂性岩盤での物質移行特性を予測する上で妥当なものであることがわかる。本論文では1次元解を用いたが実現象は3次元のでありより詳細な解析を行うためにはFEMなどの数値解法を用いる必要があると考えられる。

参考文献 J.E. Andersson et al. : Hydraulic interference tests and tracer tests within the Brandan area, Finnsjon study site, SKB Technical Report 89-12, 1988.

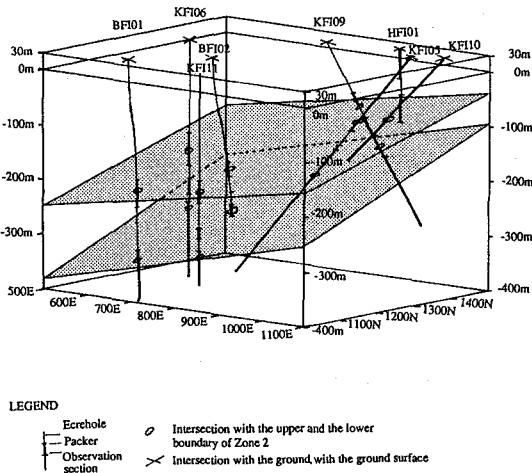


図-1 試験サイト概要

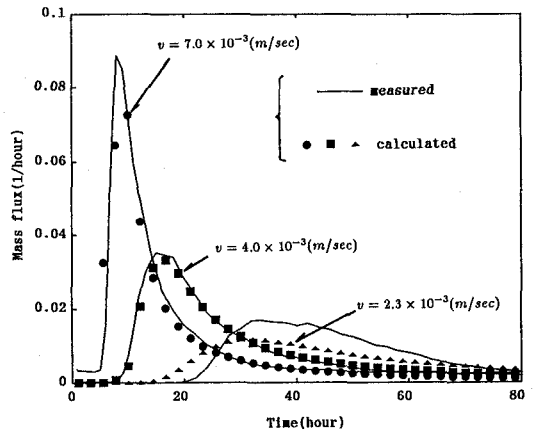


図-2 ブレークスルーカーブの実測値と計算値の比較