

リスク論的安全評価手法を視野に入れた多孔質性岩盤中の核種移行試解析

大成建設株式会社 正会員 鈴木 俊一, 正会員 ○本島 貴之  
独立行政法人原子力安全基盤機構 非会員 青木 広臣, 正会員 小野 誠

1. 目的

多孔質性岩盤中に存在する亀裂は放射性廃棄物処分施設の安全性能評価を行ううえで、その亀裂頻度、透水量係数分布、亀裂半径分布あるいは対象とする領域に応じて核種の浸出点（生物圏）における核種の最大放出率の観点から無視することができない要因となる可能性がある。既往の国内外における放射性廃棄物処分に対する安全性能評価においては、岩盤中の亀裂を確率論的な手法であるモンテカルロシミュレーションを用いる手法が主流であることから、最大核種の放出率も確率分布により表現される。一方、原子力安全委員会からシナリオの発生頻度に応じた決定論的な安全評価手法<sup>1)</sup>が示されており、このような概念に対応した天然バリア部の安全評価手法を整備・準備しておくことが重要と考え、本稿にてその手法の提案と試解析を実施した。

2. 岩盤中の亀裂を考慮した物質移行伝達関数の算出

既往の検討<sup>2)</sup>において、亀裂を含む多孔質性岩盤の分散長と実流速補正係数を導出する手法は提案されている。当該検討では、多孔質媒体における物質移行方程式に対応したパラメータを提供することを目的としており、亀裂頻度等によらずに多孔質媒体中の物質移行方程式を用いることを前提としている。一方、多孔質性岩盤といえども、亀裂が発達した岩盤を対象に同支配方程式を適用した場合には、非保守側の結果を与える可能性もあるため、過度に保守的にならず、かつ、安全審査などを視野に入れて原位置で得られたデータから直接あるいは間接的に設定可能なパラメータを用いた天然バリア中の核種移行解析を試験的に構築した。

本検討で構築した核種移行解析評価手法の手順は以下の通りである。

- STEP1**：岩石基質部の代表透水係数、空隙率、一次元亀裂頻度、亀裂半径分布、亀裂部の透水量係数分布、亀裂の方向分布を用いて、基質部及び亀裂部の双方を考慮した数値解析モデルを作成する。基質部の透水係数は地球統計学に基づき不均質性を表現した。
- STEP2**：数値解析モデルにおける相対する鉛直面間に所定の動水勾配を与え、その他の面は不透水境界として、鉛直面における流量を算出する。
- STEP3**：数値解析モデルの鉛直面片側に流量に応じて、パーティクルを配置し、相対する鉛直面でのパーティクルの破過曲線を算出する。
- STEP4**：算出された破過曲線に数値微分を行った関数が対象とした地盤の物質移行伝達関数と見なして、畳込み積分法を用いて核種移行解析を実施する。

表 1 試解析条件一覧

| 評価対象領域                 | 鉛直一次元亀裂頻度              | 多孔質部空隙率 | 亀裂半径分布 | 亀裂方向分布                         | 多孔質部透水係数      | 亀裂部透水量係数                    |
|------------------------|------------------------|---------|--------|--------------------------------|---------------|-----------------------------|
| 100m×<br>100m×<br>100m | 0.08[m <sup>-1</sup> ] | 0.5     | 確率密度関数 |                                |               |                             |
|                        |                        |         | べき乗分布  | Fisher 分布                      | 対数正規分布        |                             |
|                        |                        |         | 最小亀裂半径 | Fisher 分散係数 $\kappa$           | 幾何平均値         | 幾何平均値                       |
|                        |                        |         | 3[m]   | 5.3                            | 1.0E-8[m/s]   | 1.0E-6[m <sup>2</sup> /s]   |
|                        |                        |         |        |                                | 幾何標準偏差        |                             |
|                        |                        |         | べき乗指数  | 亀裂主方向( $\varphi_m, \theta_m$ ) | 1.0E+0.5[m/s] | 幾何標準偏差                      |
|                        |                        |         | 3.6    | (126° , 2° )                   | 相関長           | 1.0E+0.5[m <sup>2</sup> /s] |
|                        |                        |         |        |                                | 5[m]          |                             |

キーワード 亀裂, 多孔質性岩盤, 核種移行解析, 畳込み積分

連絡先 〒163-0606 東京都新宿区西新宿 1-25-1 新宿センタービル 大成建設(株) shun1@ce.taisei.co.jp

### 3. 試解析条件

本検討で実施した試解析条件を表 1 に記す. 地盤モデルの作成及びパーティクルトラッキング解析の実施には亀裂性岩盤汎用理解析コード FracMan を使用した. 岩盤基質部は, 試解析条件と同等の透水係数を与えるように調整した亀裂を等間隔に格子状に配置してモデル化を行った. なお, 本検討では, 亀裂半径や亀裂部の透水量係数といった亀裂特性を確率論に基づいて設定しており, 試解析条件として設定した地盤の代表的な物質移行伝達特性を得るためには, モンテカルロ法を適用する必要がある. 本検討では 100 回の試行を行った.

### 4. 試解析結果

図 1 に 100 回の試行により得られた破過曲線を示す. また, この破過曲線に多孔質媒体の理論式中の実流速及び分散長を変数として, 破過曲線と理論解の最大誤差が最小となるように逆解析を行った. この逆解析により同定した実流速及び分散長を用いた理論式による破過曲線を併せて同図に記載する. 得られた破過曲線に数値微分を行い, 対象とする地盤の物質移行伝達関数を用いた核種放出率の式は式 1 にて表される.

$$y(t) = \int_0^t x(\tau) h_{\tau}(t - \tau) d\tau \quad \text{式 1}$$

ここに,  $y(t)$ : 時間  $t$  における下流端での核種放出率,  $x(t)$ : 時間  $t$  における入力関数,  $h_{\tau}(t)$ : 対象地盤の物質移行伝達関数である. また, 遅延係数及び核種崩壊を考慮した物質移行伝達関数は以下の式で表される.

$$h_{\tau, \text{retard}, \text{decay}}(t) = e^{-\lambda R_d t} \cdot h_{\tau}(R_d \cdot t) \quad \text{式 2}$$

ここに,  $\lambda$ : 崩壊定数[1/yr],  $R_d$ : 岩盤中の遅延係数[-]. なお, 対象とした核種は  $^{14}\text{C}$  であり, 地盤の遅延係数  $R_d$  は 2.0 とし, 核種の入力関数としては, 以下の条件とした.

$$x(t) = 1 \text{ [g/yr]} \quad 0 \leq t \leq 1,000 \text{ yr}, \quad x(t) = 0 \text{ [g/yr]} \quad t > 1,000 \text{ yr} \quad \text{式 3}$$

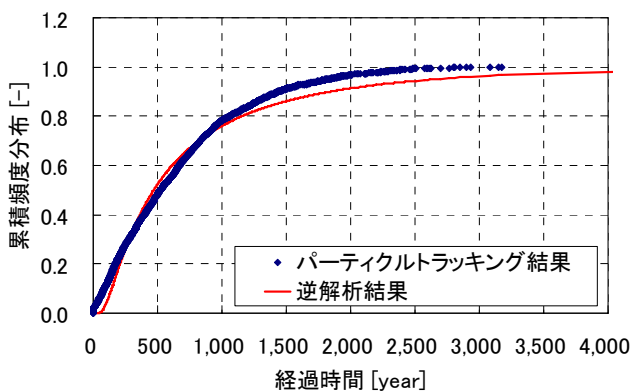


図 1 破過曲線結果

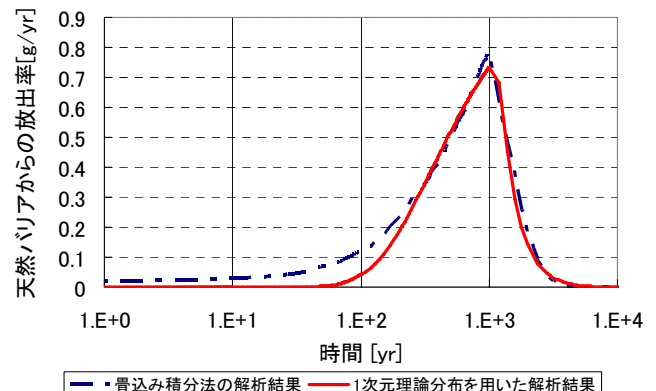


図 2 核種放出フラックスの時系列

上記の条件により算出した核種放出率の結果を図 2 に示す. 破過曲線の立ち上がり物質移行方程式による逆解析結果よりも早いことから予想されるように, 畳込み積分によって核種移行解析を実施すると, 物質移行方程式による解析結果よりも早い時点から核種が漏出する結果となる. これは, 畳込み積分法は核種が亀裂中を速く移行する影響を考慮しているのに対して, 物質移行方程式では亀裂の影響による移行時間の短い移行経路の影響を考慮することができないためだと考えられる.

### 5. まとめ

亀裂を含む多孔質性岩盤中の物質移行解析手法として, 多孔質媒体での物質移行方程式に拠らない, 畳込み積分による解析手法を提案した. 物質移行方程式による解析結果との比較から, 本検討での解析条件においては畳込み積分による解析手法は過度に保守的ではないものの, 亀裂が発達した岩盤において, 亀裂の影響による早期の核種フラックスの放出を表現できる解析手法であることを確認した.

### 参考文献

- 1) 原子力安全委員会: 低レベル放射性廃棄物埋設に関する安全規制の基本的考え方 (中間報告), 2007.
- 2) 佐々木泰ほか: 水理特性を試験スケールから評価スケールに巨視化する方法, 地下水学会秋季講演会, 2005.