

## 物質移行に寄与する亀裂開口幅に関する検討

日本原子力研究開発機構  
検査開発株式会社

正会員 ○澤田 淳  
坂本 和彦

## 1. はじめに

高レベル放射性廃棄物地層処分安全評価における岩盤中の核種移行評価に際しては、地下水の移行経路にあたる岩盤の間隙中での地下水流速が重要なパラメータのひとつとなる。花崗岩などの結晶質岩の場合、岩石基質部は緻密で間隙率や透水係数が低く、地下水は主に断層や亀裂などの間隙中を流れる。このような亀裂性岩盤を対象とした地下水流動評価や核種移行評価には、亀裂を均質な平行平板に近似したモデルが用いられ、高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の第2次取りまとめでも安全評価に採用されている<sup>1)</sup>。この亀裂を平行平板に近似したモデルのパラメータのうち、亀裂開口幅は地下水流速を求めるために必要なパラメータである。亀裂が均質な平行平板の場合には、亀裂開口幅は一般に三乗則により求められる水理的亀裂開口幅に等しい。しかしながら、岩盤中の亀裂形状は複雑で亀裂開口部も不均質に分布しており、均質な平行平板に近似した場合の亀裂開口幅は三乗則により求められる水理的亀裂開口幅に等しくないことが知られている<sup>2), 3)</sup>。Rhén et al. (1996)は、スウェーデン Äspö島の Hard Rock Laboratory で実施された幾つかのトレーサー試験のデータから物質移行に寄与する亀裂開口幅を評価するとともに、それらの値と亀裂の透水量係数との相関関係を示している<sup>4)</sup>。また、国内では釜石原位置試験場でのトレーサー試験結果から、物質移行に寄与する亀裂開口幅を求めて Rhén et al. (1996)と同様に透水量係数との相関関係を示すとともに、それらの値は三乗則により求められる水理的亀裂開口幅の数倍から十数倍程度であることが報告されている<sup>5)</sup>。このようなトレーサー試験は物質移行に寄与する亀裂開口幅を原位置で求める上で有効な手法であるが、得られた物質移行に寄与する亀裂開口幅は大きな不確実性を伴う<sup>6)</sup>とともに、地上からの調査段階など調査の初期の段階ではトレーサー試験の実施が困難な場合もある。本研究では、調査の初期段階などデータ量が少ない場合にも柔軟に対応できる評価手法の構築に資する観点から、亀裂の性状を示すパラメータと水理的亀裂開口幅の関係の検討<sup>7)</sup>に加え、物質移行に寄与する亀裂開口幅との相関関係を整理することを目的に、亀裂開口幅が不均質に分布する亀裂の数値モデルを用いた数値解析的な検討を試行した。

## 2. 数値解析条件, 解析結果

亀裂の性状を示すパラメータとして以下の2つに着目した。亀裂内の空隙体積に直接的に影響するパラメータとして亀裂の接触面積率（亀裂の上下面が接触している面積の比率）と、複雑な亀裂の表面の粗度を示すパラメータとして亀裂のせん断挙動などの力学的研究で幅広く用いられている JRC (Joint Roughness Coefficient) である<sup>8)</sup>。接触面積率については、亀裂が半分程度閉塞している40%のケースから接触面積率が小さくなる25%, 5%の3ケースを設定した。JRCについては、一般的に粗度が大きい亀裂とされている20の値<sup>9)</sup>を上限に、5, 12, 20の3ケースを設定した。128mm×128mmの正方形領域を対象に、0.5mm間隔で256×256のメッシュを亀裂の数値モデルに用いた。フラクタルの概念を活用した統計的手法<sup>10)</sup>により、設定した各ケースの接触面積率とJRCを呈する亀裂の数値モデルを作成した。亀裂の数値モデル例を図1に示す。各ケースともに10個程度のリアライゼーションを用いた。亀裂開口幅の平均値は0.2mmで一定とした。亀裂の数値モデルに対して任意の方向に一方

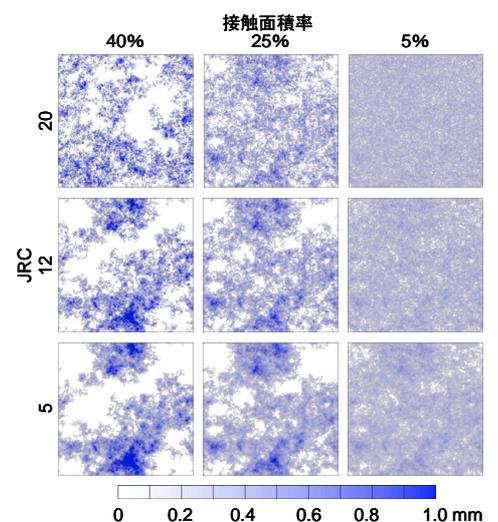


図1 JRCと接触面積率の変化に伴う亀裂開口幅分布の変化

キーワード 地層処分, 亀裂, 開口幅, 物質移行, JRC, 接触面積率

連絡先 〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松4-33 日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門 TEL029-282-1111

の流れを生じさせる一定の動水勾配 (0.01) を、側面境界は不透水境界を設定した。有限要素法解析コード MAFIC<sup>11)</sup> を用いた二次元の定常浸透流解析により亀裂モデルを通過する透水量を求め、その透水量から亀裂を平行平板と仮定した場合の三乗則に基づく水理学的亀裂開口幅を求めた。その結果、接触面積率は JRC に比べて水理学的亀裂開口幅に与える影響が大きいものの、接触面積率が大きくなるとリアライゼーション間のばらつきの影響が大きくなることがわかった。物質移行に寄与する亀裂開口幅  $b$  は、透水量  $Q$  と、粒子追跡法 (10,000 個程度の粒子を用いた) を用いた解析結果から求められる亀裂モデルを通過する粒子の平均移行時間  $t_m$ 、亀裂面積  $A$  から下式(1)により求めた<sup>3)</sup>。平均移行時間  $t_m$  は、時間  $t$  におけるモデルを破過した粒子数  $C(t)$  を用いて下式(2)から求めた<sup>12)</sup>。

$$b = Q \times t_m / A \quad (1), \quad t_m = \int (C(\infty) - C(t)) / C(\infty) dt \quad (2)$$

下流側境界へ到達した粒子の破過曲線の様子から、接触面積率が大きくなると水理学的亀裂開口幅の結果と同様にリアライゼーション間のばらつきの影響が大きくなることが、また JRC が大きくなると粒子が半分程度破過した時間以後の粒子の破過に遅れが生じることがわかった。前者は、接触面積率が大きくなると亀裂開口部の連続性が低下する確率が大きくなるためと考えられる。後者は、JRC が大きくなると相対的に局所的な凸凹が顕在化し、局所的なチャンネル構造が生じるためと考えられる。物質移行に寄与する亀裂開口幅と JRC の関係について、接触面積率が 5% のケースの結果例を図 2 に示す。物質移行に寄与する亀裂開口幅は三乗則に基づく水理学的亀裂開口幅の数倍から数十倍で、JRC が大きくなると物質移行に寄与する亀裂開口幅が大きくなる傾向があることがわかる。

### 3. おわりに

本研究では、亀裂の性状を示すパラメータと物質移行に寄与する亀裂開口幅との相関関係を整理することを目的に、不均質に亀裂開口部が分布する亀裂の数値モデルを用いた数値解析的な検討を試行した。亀裂の数値モデル作成において等方性を仮定、比較的小さなスケールを検討の対象としたことなど、いくつかの制約条件下での試行的な検討であるものの、亀裂のせん断挙動などの力学的研究で幅広く用いられている JRC 値が物質移行に寄与する亀裂開口幅を求める指標の一つとして活用できる可能性があることを示した。

### 参考文献

- 1) 核燃料サイクル開発機構：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 ―地層処分研究開発第2次取りまとめ― 分冊3 地層処分システムの安全評価, JNC TN1400 99-023, 1999.
- 2) Silliman, S.E. : An interpretation of the difference between aperture estimate derived from hydraulic and tracer tests in a single fracture, Water Resources Research, vol.25, no.10, pp.2275-2287, 1989.
- 3) Tsang, Y. W. : Usage of "equivalent apertures" for rock fractures as derived from hydraulic and tracer test, Water Resources Research, vol.28, no.5, pp.1451-1455, 1992.
- 4) Rhén, I., et al. : Äspö HRL – Geoscientific evaluation 1997/5, Models based on site characterization 1986-1995, SKB TR 97-06, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co., 1997.
- 5) Sawada, A., et al. : Non-sorbing tracer migration experiments in fractured rock at the Kamaishi mine, Northeast, Japan, Engineering Geology, 56, pp. 75-96, 2000.
- 6) 井尻裕二 他：原位置トレーサ試験により得られる核種移行パラメータ値の不確実性について，土木学会論文集 No.778/III -69, pp.85-97, 2004.
- 7) 武部篤治 他：亀裂の接触面積率と JRC が透水特性に与える影響検討，土木学会第 61 回年次学術講演会，CS05-013, 2006.
- 8) Olsson, R., Barton, N. : An improved model for hydromechanical coupling during shearing of rock joint, International Journal of Rock Mechanics & Mining Science, 38, pp. 317-329, 2001.
- 9) Barton, N., Choubey, V. : The shear strength of rock joints in theory and practice, Rock Mechanics, Vol.10, pp.1-54, 1977.
- 10) Glover, J., et al. : Fluid flow in fractally rough synthetic fracture, Geophysical Research Letters, vol.24, no.14, pp.1803-1806, 1997.
- 11) Miller, I., et al. : MAFIC, Matrix/fracture interaction code with heat and solute transport, User documentation, Golder Associates Inc., Washington, USA, 2001.
- 12) Moreno, L., et al. : Flow and tracer transport in a single fracture: a stochastic model and its relation to some field observation, Water Resources Research, vol.24, no.12, pp.2033-2048, 1988.

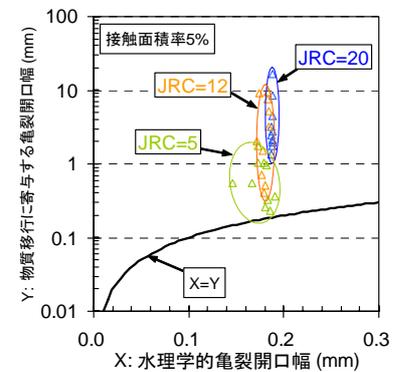


図2 物質移行に寄与する亀裂開口幅と水理学的亀裂開口幅の関係

接触面積率 5% のケース、実線は水理学的亀裂開口幅と物質移行に寄与する亀裂開口幅が等しい線を表す