

天然の単一亀裂の形状計測データを用いた透水特性の評価について

(独)日本原子力研究開発機構 正会員 ○澤田 淳
検査開発株式会社 鐵 桂一
株式会社 NESI 坂本 和彦

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物地層処分の長期的な安全性の評価には、調査の段階に応じて得られるサイト環境条件の変化や技術の進歩に適切に対応した手法が用いられる¹⁾。亀裂性岩盤を対象とした評価では、亀裂を一次元の平行平板でモデル化する手法が一般に用いられる。このモデルは簡略かつ、複数の一次元平行平板モデルを組み合わせることで岩盤中の不均質な移行経路を表現することが可能などの応用力を有するという利点があり、広く用いられている。しかしながら、実際の亀裂は内部にガウジなどの介在物を含んでいるほか、分岐や亀裂表面の粗さなど複雑な形状を呈しているため、地下水の浸透や核種の移行に寄与する場となる亀裂の開口部は不均質に分布する。このように、不均質な特性を有する亀裂を一次元平行平板モデルで表現した際に用いられる亀裂の平均的な特性として、透水量係数や物質移行に寄与する開口幅の値をどのように設定するかが課題となっている。著者らは、この課題の解決に向けた研究として、①実際の亀裂の表面の粗さや開口幅の分布などの実測から亀裂の幾何学的な特徴を理解するとともに、②亀裂の透明レプリカを用いた不均質に分布する亀裂開口幅と亀裂内での物質の移行（特に、移流分散現象）の定量的測定に基づく不均質亀裂内の流れの理解に向けた研究²⁾を進めてきた。①は実際の亀裂の特徴に基づいたモデルやパラメータ値を提示できると考えられるものの、調査可能なスケールや数量が限定される。また、亀裂内の流れや物質移行を直接観察することはできない。②では不均質に分布する亀裂開口幅とそこでのトレーサの移行を定量的に計測することが可能であるものの、実験可能な試料はレプリカに限定される。これらの知見に基づき、より包括的には亀裂内の複雑な様々な特徴を有する亀裂を数値実験的に作成して数値解析を行うことで、亀裂形状を表す指標が亀裂の水理学的特性や物質移行特性に与える影響について検討を進めることも重要である。本報では、上記①に関連して実施した亀裂の計測データを用いた数値解析による透水特性評価について報告する。用いた計測データは、50cm スケールの岩石を対象に 1mm 間隔で計測した天然単一亀裂の形状と亀裂幅の約 25 万箇所³⁾である。

表 1 透水試験測定結果の一部

	区間	1	2	3	4	5	平均
水頭 ×10 ⁻² m	注水側	0.8	1.0	1.2	1.2	1.2	1.1
	排水側	0.7	0.5	0.4	0.5	0.5	0.5
流量×10 ⁻⁶ m ³ /s	排水側	0.096	0.081	0.084	0.083	0.061	0.081*

2. 亀裂の計測データ

試験の対象とした岩石試料は、亀裂を中心に 50cm 角に整形後、実験室内において透水試験やト

レーサー試験などの試験により, *: 排水流量の総和は $0.405 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$

亀裂の透水量係数などの 50cm スケールの平均的な特性値の評価を試みた⁴⁾。透水とトレーサー試験は任意の 1 方向で実施され、それぞれの面で 5 等分に分割した区間で注排水を制御した。透水試験結果の一部を表 1 に示す。一連の試験後に、レジン注入して亀裂開口部を固化させ、亀裂に直交する方向に 1mm 間隔で平面研削して研削断面毎に亀裂断面の詳細な画像データを取得した。この画像データから亀裂開口部などの透水に寄与する構造の詳細を調査する予定であるが、これまでに、画像データから亀裂に沿って 1mm 間隔で亀裂の上下面の形状を判読し、亀裂上下面の粗度 (JRC: Joint Roughness Coefficient) を評価した。また、亀裂上下面形状から亀裂の幅を求め、その平均値 (1.14mm)、標準偏差 (0.78mm) や地球統計モデルを用いた相関長などを評価した³⁾。なお、この亀裂幅にはガウジなどの亀裂内の介在物を挟んだ値が含まれており、亀裂の開口部よ

キーワード 地層処分, 単一亀裂, 不均質性, 開口幅, 透水量係数

連絡先 〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松 4-33 (独) 日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門 TEL 029-282-1111

り大きな値となっている。

3. 数値解析による分析

数値解析には、ダルシー則に基づく二次元飽和浸透流解析コード⁵⁾を用いた。亀裂幅の計測データから三乗則を仮定して透水量係数を 1mm 間隔の二次元平面の要素に設定した。このような複雑な亀裂へ局所的に三乗則を適用 (LCL:Local Cubic Law) した場合には、実測される透水量係数より 10~100%程度の大きな値が推定される傾向があることが報告されている⁶⁾。LCL により個々の要素の透水量係数を換算した数値解析モデルを図1に示す。表1の注水側と排水側で測定した水頭の平均値の差から、平均的な動水勾配を 0.011 と設定して定常浸透流解析を実施した。注水と排水以外の側面は不透水境界とした。解析の結果、亀裂全体を通過する流量が $5.3 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ と表1の実測値より一桁以上多い流量が求められた。解析から求められた流量が過大評価となった理由には、(1)局所的な三乗則の仮定の影響、(2)実際に透水に寄与する亀裂の開口部だけではなくガウジなどの亀裂内の介在物を含んだ亀裂幅のデータを用いた点、の2点が挙げられる。(1)については上述のようにその影響は 10~100%程度と考えられ、本検討の場合は(2)の影響が相対的に大きいと考えられる。(2)の影響について、亀裂内に平均的にガウジなどの介在物が存在していると仮定し、(a)開口部が亀裂幅の a 倍 (ガウジなどの介在物が 1-a 倍)、(b)亀裂幅に関係なく一定の厚さ b (mm) で介在物が存在、の2つを仮定して流量の実測値に対してそれぞれ a, b を実測値の流量に対してキャリブレーションした。その結果、(a)のケースでは a=0.43 の場合に、(b)のケースでは b=0.57 mm の場合に実測値とほぼ同じ流量となった。これらの結果から、本岩石試料の場合、平均的に亀裂幅の約半分がガウジなどの介在物の影響を受けており、天然の亀裂の透水量係数の評価には亀裂表面形状のみならずガウジなどの介在物の影響を考慮した計測が重要であると考えられる。このような亀裂内の介在物は亀裂の成因などに依存して局所的に分布する可能性もあり、局所的な亀裂の閉塞など、亀裂の透水性に対してより複雑な影響を呈すると考えられる。

4. おわりに

50cm スケールの亀裂形状を 1mm 間隔で計測した亀裂の上下面からなる亀裂幅データを用いて、亀裂幅から LCL を仮定して透水量係数を推定し、定常浸透流解析を実施した。数値解析による亀裂全体の透水量は実測値に比べて一桁以上多く、その理由としてガウジなどの介在物を含んだ値を開口幅と仮定して透水量係数を算定したためと推察した。亀裂形状の様々な測定方法のうち、亀裂の上下面形状をプロファイロメーターにより計測する手法は JRC を用いた亀裂面形状による透水特性の補正⁷⁾などに有効であるものの、ガウジなどの亀裂内の介在物が計測できずその影響を考慮した補正が困難になる可能性がある。本研究で用いた岩石試料は亀裂に直交する方向に 1mm 間隔で平面研削し、研削断面毎に亀裂断面の詳細な画像データを取得している。この画像データから亀裂の開口部などの透水に寄与する構造の調査を継続して実施しているところである。今後は、得られた亀裂開口部のデータから、亀裂全体の透水特性評価と亀裂の幾何学的な特徴との関係について検討する予定である。

参考文献

- 1) 原子力発電環境整備機構, NUMO-TR-07-01, 2007.
- 2) 佐藤・澤田, 第37回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, pp. 263-268, 2008.
- 3) 澤田・鐵, 第38回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, pp. 266-271, 2009.
- 4) 吉野ほか, サイクル機構技報, No. 18, 2003. 3, pp. 51-58, 2003.
- 5) Miller et al., Golder Associates Inc., 2002.
- 6) Al-Yaarubi, et al., *Dynamics of Fluids and Transport in Fractured Rock*, Faybishenko et al., ed., AGU, pp. 55-64, 2005.
- 7) Olsson and Barton, *Int J Rock Mech Min Sci*, 38, pp. 317-329, 2001.

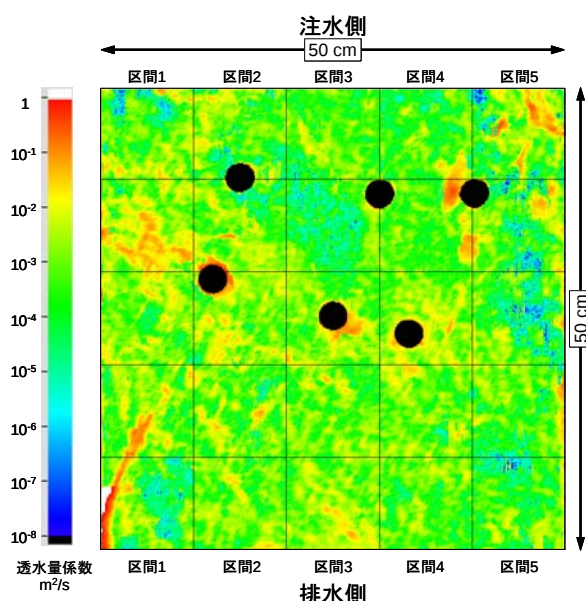


図1 解析に用いたモデルの透水量係数分布
●印は岩石試料に掘削されたボーリング孔
解析に際しては、不透水に設定した