50cmスケールの岩石試料の亀裂開口幅 測定データに基づく亀裂の透水特性評価

澤田 淳^{1*} · 鐵 桂一² · 坂本 和彦³

¹日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門(〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松4-33)
²検査開発株式会社(〒319-1112 茨城県那珂郡東海村村松字平原3129-37)
³株式会社NESI.(〒312-0005 茨城県ひたちなか市新光町38)
*E-mail: sawada.atsushi@jaea.go.jp

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, 亀裂を一枚の均質な平行平板に近似した モデルを一般的に用いる.実際の亀裂は複雑な形状を呈しており,これを平行平板モデルで表現する際, 透水量係数や亀裂開口幅の値をどのように設定するかが課題となる.本研究では,天然の亀裂を含む50cm スケールの岩石試料の1mm毎の精密研削と研削断面における亀裂形状観察の繰返しにより, 亀裂開口幅の 不均質な分布が透水特性に与える影響を分析する上で有効な亀裂形状や亀裂開口幅の分布データを得た. その結果,本研究で対象とした亀裂は,相対的に早い移行経路と極端に遅い移行経路を有するといった不 均質性や異方性を有していることが分かった.

Key Words : rock fracture, transmissivity, aperture, hydraulic aperture, transport aperture

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物地層処分の安全評価に際しては, 地下水の移行経路にあたる岩盤の間隙中での地下水流動 挙動や、物質移行挙動を適切に表現したモデルやパラメ ータ値を用いる必要がある. 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, 亀裂を平坦な2枚の 板を合わせた平行平板で近似したモデルが一般に用いら れる¹⁾. 平行平板モデルの場合には亀裂の透水量係数は 開口幅の三乗に比例する、しかし、実際の亀裂は亀裂表 面の粗さ, 亀裂上下面の接触による亀裂間隙の閉塞など の複雑な形状や、ガウジなどの充填物が内在するといっ た不均質な性状を呈するため、地下水の流動や物質移行 に寄与する場となる亀裂内の開口部は不均質に分布する. このように本質的に不均質な特性を有する亀裂を平行平 板で近似したモデルで表現した際に、亀裂の平均的な特 性として用いられる透水量係数や物質移行に寄与する亀 裂開口幅²の値をどのように設定するかが、 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とって解 決すべき課題のひとつとなっている³. そのような課題 を解決するためのひとつのアプローチとして、天然の亀 裂の形状や亀裂開口幅の分布の特徴の詳細な調査と透水 特性の関係の検討が行われている4.

著者らは、実際の亀裂の表面の粗さや亀裂開口幅の分 布などの実測から亀裂の幾何学的な特徴を理解すること を目的に、単一の亀裂を含む50cmスケールの岩石試料 の亀裂の形状等の精密計測を行ってきた⁹. これまでに、 亀裂の上下面の形状計測に基づいた亀裂幅の測定とその 特徴を分析するとともに、亀裂幅データを用いた亀裂の 透水特性や物質移行特性について検討を行った⁹. この 亀裂の上下面の形状計測では、JRC(Joint Roughness Coefficient)[¬]などを用いた亀裂表面の粗度の評価に活用 することができる. しかし、亀裂幅のデータはガウジな どの亀裂内の充填物を含む値である. そのため、著者ら は、亀裂幅の分析に加えて亀裂内の透水に寄与する亀裂 開口部の分析を進めてきた⁸.

本論文では、亀裂開口幅の計測方法、測定した亀裂開 ロ幅の分布、ならびに既報の亀裂幅データとの比較など の亀裂開口幅の特徴について報告するとともに、 亀裂開 ロ幅データを用いた数値解析による亀裂の透水特性につ いて論じる.

2. 50cmスケールの亀裂の形状計測方法

亀裂構造の精密計測には、大型の岩石試料を対象に精 密平面研削を可能にする装置と、CCD(Charge Coupled Device)カメラを用いた亀裂部の観察を併用した測定手 法(特許第3866257号)を用いた.この測定手法は、岩 石試料を亀裂面に直交する方向に任意の間隔で精密に平 面研削しながら,研削断面に表れる亀裂の様子を直接観 察,計測する手法である.対象とした岩石試料は, 亀裂 を中心に約50cm角の立方体に整形⁹して、実験室内にお いて透水試験やトレーサー試験等が行われている. その 結果から、50cmスケールの平均的な水理学的開口幅は 約0.4mm程度で、物質移行に寄与する開口幅はその2倍 程度と評価されている^{10,11)}.その室内試験の後に、レジ ンを亀裂に注入して亀裂部を固定した. 亀裂部の固定に は、粘性が低く硬化時間が長くなるように開発されたレ ジン¹⁰を使用した. レジンで固定した亀裂の面に直交す る方向に1mm間隔で平面研削し、各断面における亀裂形 状をデジタル画像データとして取得した. それぞれの研 削断面では、亀裂にほぼ沿った方向とその直交方向の直 交座標系で、亀裂に沿った方向に1mm間隔で亀裂上下面 の座標を特定して亀裂に直交した方向の亀裂幅を計測し た.この亀裂幅には、ガウジなどの亀裂内の充填物を含 んでいる. そのため、透水に寄与すると考えられる亀裂 内の開口部として亀裂内に充填したレジンに着目して, その厚さから亀裂開口幅を測定した.任意の研削断面に おける, 亀裂幅と亀裂開口幅測定の概念図を図-1に示す. なお、レジン内に残った気泡など、初期の亀裂内の間隙 であることが明らかな場合は亀裂開口部と判断した.

3. 亀裂開口幅と亀裂幅の比較

測定した亀裂幅と亀裂開口幅の分布をそれぞれ図-2と 図-3に示す. これらの図では、青色の濃淡でそれぞれの 幅の大きさを示しており、3 mm以上の亀裂幅と亀裂開 口幅の値は3 mmと同じ濃さで示している. 図中に示さ れている6つの白丸は、透水試験やトレーサー試験の観 測のために亀裂面にほぼ垂直に掘削されたボーリング孔 の跡で、亀裂を観察することができなかった箇所である. また、「注水側」や「排水側」の表記は、透水・トレー サー試験時の透水の方向を表している. 透水・トレーサ ー試験は一定の方向で実施され、注水側や排水側ともに 5つの区間に分割して注排水制御や水頭計測が実施され ている. 図-4に、 亀裂幅と 亀裂開口幅の 頻度分布をそれ ぞれ示す. 亀裂幅の平均値1.14 mm (標準偏差0.78 mm) に対して, 亀裂開口幅の平均値は0.75 mm (標準偏差0.71 mm)とトレーサー試験から求められる物質移行に寄与 する開口幅(2章参照)に近い値であった。 亀裂上下面 が接触して幅がほぼ0mmと判定された場所が亀裂幅デ ータの場合には全体の0.1%程度であったが、亀裂開口 幅データでは約17.4%が亀裂内の充填物により閉塞して いることがわかる.



図-1 亀裂幅と亀裂開口幅測定のイメージ図



図-2 亀裂幅の分布 (3mm以上は3mmの色で表示) 矢印は条線状の線構造のおおよその方向を示す







図-4 亀裂幅と亀裂開口幅の頻度分布

亀裂幅(図-2)が大きな箇所は、図中に矢印で示した 方向に1 cm前後の間隔で線状に分布している.また、そ の線状の構造に直交する方向に10 cm前後の間隔で亀裂 幅が大きな箇所が分布している.前者は亀裂のせん断 などに伴って形成された条線によるもので,後者は条 線の直交方向に発達する亀裂面のより長い間隔の凸凹 構造(スリッケンステップ)に依存していると推定さ れる.ただし、本研究の対象とした亀裂のせん断方向 などの詳細は明らかにされてはいない. 亀裂開口幅の 分布(図-3)は亀裂幅と同様の傾向を示すが、相対的 に線構造に起因した幅の値が小さくなる傾向がある. その結果、亀裂開口部のチャンネル構造が亀裂幅に比 べて局所化していることがわかる.

図-5は亀裂幅に対する亀裂内充填物の幅の比の亀裂 幅依存性について, 亀裂幅1mm毎に平均値, 標準偏差 を示したものである. 亀裂内充填物の幅は亀裂幅と亀 裂開口幅の差から求めた. 標準偏差が大きいものの, 平均的には亀裂幅の3割程度がガウジなどで充填され, 相対的に亀裂幅が小さいところほど充填物で閉塞され る傾向にあることがわかる. このため, 条線状の構造 に起因する線構造などの相対的に亀裂幅が小さい箇所 がガウジなどで充填され亀裂開口幅が小さくなり,開 口部の分布が局所化したと推察される.

亀裂幅や亀裂開口幅, 亀裂内充填物の幅について距離と方向の関係(空間的相関性)を,地球統計法¹³を用いて評価した. 図-6に示す4つの方向(E-W, N-S, NW-SE, NE-SW)について,セミバリオグラム γ (h)を求めた.

図-7に亀裂開口幅のE-W方向のセミバリオグラム γ (h) と、セミバリオグラムの理論モデルのひとつである 指数モデルを用いた分析結果を示す. 同様の分析を亀 裂幅, 亀裂開口幅, 亀裂内充填物の幅について4つの 方向毎に行い、シルとレンジを求めた(図-8).一般 に、シルは分散と等しく、レンジは空間的な相関関係 を示す相関長を表す指標である.図-8(a)にはシルとの 比較として各値の分散を点線で示した. シルとレンジ どちらも、 亀裂幅や充填物の厚さがNW-SE方向が他の 方向より値が大きく異方性を示しているのに対して, 亀裂開口幅はほぼ等方性を示している. 亀裂開口幅に 関しては、シルはほぼ等方性を示しているのに対して、 レンジはE-W方向が若干大きく、やや異方性を呈して いる. このように、充填物の厚さの異方性が条線状の 構造に起因した亀裂幅とほぼ同じ方向ということは, 条線状の線構造に起因した亀裂幅(相対的に小さい) が選択的に充填されている影響の可能性を示している と考えられる.

4. 亀裂開口幅データによる数値モデルによる解析

図-3に示した亀裂開口幅のデータから、亀裂面に平行



図-5 亀裂幅に対する亀裂内充填物の幅の比の亀裂幅依存性 亀裂幅0.1mm間隔毎の平均値,標準偏差,データ数



図-6 地球統計法による空間的相関性の分析方向(4方向) E:注水側,W:排水側



図-7 セミバリオグラム y(h)の指数モデルを用いた分析結果例

な二次元平面を1mm間隔で離散化した有限要素で数値モ デルを作成した.局所的には三乗則が成り立つ(LCL: Local Cubic Law)と仮定して個々の要素の亀裂開口幅か ら透水量係数を設定した.なお,数値モデルは,50 cm

×50 cmの大きさの亀裂面の両端部から1cmを除外した48 cm×48 cmとした.これは、亀裂の端部は亀裂開口幅が 岩石試料の整形時の影響を受けている可能性と、透水試 験時に注排水ポート設置や側面を不透水とするために施 した接着材による閉塞の影響などを考慮したためである. 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¹⁴を用いた.LCLを仮定して各要素の透水量係 数を求めた数値解析モデルを図-9に示す. 図-9では、48 cm×48 cmの平面に設定した透水量係数の分布を示して いる. 白抜きの部分は亀裂が閉塞(亀裂開口幅が0 mm)している箇所や、不透水と設定したボーリング孔 部である.この亀裂を対象とした透水試験では、注水側 と排水側に設けた堰により一定の水頭差で注排水を制御 するとともに、注排水の各区間の水頭をマノメータによ り計測している. 透水試験結果の例として、水頭差設定 値11 cmのケースを表-1に示す. 各区間で測定された水 頭差は配管内の圧力損失と亀裂内の不均質な透水性の影 響により、それぞれ平均で約0.6 cmと小さく、水頭や排 水流量も区間によって異なる値となっている.表-1のケ ースについて、定常状態を仮定した浸透流解析を行った. 浸透流解析に際しては、水頭や流量が区間によって異な る試験条件を勘案して、①一定水頭条件と②一定流量条 件の2つの条件で解析を行い、それぞれ実測値と比較す ることとした. 注水側と排水側以外の側面は不透水境界 とした. 6つの観測孔は不透水に設定した.

一定水頭条件の解析では、注水側と排水側でそれぞ れ測定した水頭を各区間に設定して定常状態の浸透流解 析を行った.浸透流解析の結果、亀裂全体の透水量が 1.4×10⁶ m³/sと表-1に記した実測値より若干大きな値と なった.解析の結果から求められた亀裂全体の透水量か ら三乗則を用いて水理学的開口幅を評価すると、0.67 mmと透水試験から得られた水理学的開口幅(約0.4mm, 2章参照)より若干大きな値となる.これは、数値モデ ルから除外した亀裂面の両端部から1cmの部分の透水性 分布の影響と、数値モデルから除外した分だけ動水勾配 を過大に設定している影響が原因と考えられる.

一定流量条件での解析結果を図-10に示す.解析に際 しては、注排水の区間毎に一定の流量を設定した.具体 的には、排水側は表-1に示した実測値を、注水側は全体 の注水量を実測されている水頭の比で分配して一定流量 条件を設定した.ただし、有限要素法による浸透流解析 において全ての境界条件を流量条件とすると解が安定し ないことから、注排水ともに区間5を実測された水頭値 を用いて水頭条件とした.図-10から、数値解析の結果 は、水頭の平均値は注水側で実測値より小さく、排水側 で実測値より大きい値で、平均的な水頭差が実測値より 若干小さな結果となったものの、各区間の水頭の実測値 の分布と同様の傾向を示した.



図-8 セミバリオグラムγ(h)の指数モデルを適用した分析結果

以上のことから、測定した亀裂開口幅の分布を用いた LCLの仮定に基づいた数値モデルは、透水試験から得ら れた実測値より若干大きな透水性を呈するものの、不均 質な亀裂開口幅の分布の影響などを良く表現できている と考えられる.

図-9の数値モデルを用いて、粒子追跡法による移流分 散解析コード¹⁴による物質移行解析を行った.注水側に 一定量の粒子を等間隔に配置し、一定の動水勾配0.01を 設定した.粒子が移行した経路を図-11に、排水側への 粒子の累積破過曲線を図-12に示す.図-11では、図-9で 透水量係数を設定している箇所を黒で表わし、各要素を 通過する粒子の数を色で表している.この図から、移行 経路が局所化していることがわかる.特に、注水側の区 間1と2の間から排水側の区間1と2へ経路が集中している ことがわかる.また、図-12からは全体の5~7割の粒子 の破過時間(約100~200秒)に比べて、残りの粒子の破 過時間(数百秒~千数百秒)が極端に遅いことがわかる. このことから、開口部が不均質に分布しその空間的な連 続性が局所化することにより、相対的に移行時間の早い 経路に平均的な移行特性が支配されるものの、極端に遅



図-9 数値解析に用いたモデルの透水量係数分布図

表-1 透水試験測定結果の例



*: 排水流量の総和は4.05×10⁷ m³/s





図-10 注排水の各区間の水頭値の解析結果と実測値の比較

い移行経路が存在することがわかる.これは、一般に "non-Fickian dispersion"と呼ばれる現象で、透水係数の 不均質性や異方性に起因して、移流分散方程式で表現で きない早い移行経路と長いテールを生じさせる遅い移行 経路の組み合わせで特徴つけられるものである^{15,16}.本



図-11 粒子追跡法による移行経路分布図 白: 不透水区間,黒:透水部





研究で得られた亀裂開口幅データは、自然の亀裂におい てそのようなnon-Fickian dispersionを呈するほどの不均質 性や異方性の特徴を有することを示している.

5. おわりに

実際の亀裂の表面の粗さや亀裂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ことを目的に, 50cm角の大きさの岩石試料の亀裂の形状等の精密計測 により, 亀裂幅ならびに亀裂開口幅のデータを取得した. その結果, ガウジなどの亀裂内の充填物の影響により亀 裂幅が小さい箇所ほど亀裂が閉塞している傾向があり, そのため亀裂開口部の連続したチャンネル構造が亀裂幅 にくらべて局所化していることがわかった.また, 亀裂 内充填物の幅の異方性が条線状の構造に起因した亀裂幅 の異方性とほぼ同じ方向を示しており,これは条線状構 造に起因した亀裂幅が選択的に充填されている可能性を 示していることが分かった. 測定した亀裂開口幅の分布を用いて、LCLの仮定に基 づいた数値モデルは、実測値より若干大きな透水性を呈 するものの、不均質な亀裂開口幅の分布の影響などを良 く表すことができた.このことから本研究で得た亀裂開 ロ幅分布データは、透水試験などの実験結果と絶対値で 比較することは困難なものの、亀裂開口幅の不均質な分 布が透水特性に与える影響を分析する上で有効なデータ といえる.また、粒子追跡法による移流分散解析を行っ た結果、本研究で対象とした亀裂は、相対的に早い移行 経路と極端に遅い移行経路で特徴づけられるnon-Fickian dispersionを呈するほどの不均質性や異方性を有している ことが分かった.

今後は、得られた亀裂開口幅データの分析を進め、そ の不均質性や異方性を表す特性値と亀裂開口幅や透水特 性などの代表値の関係を検討する予定である.

参考文献

- 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.
- RETROCK : Treatment of radionuclide transport in geosphere within safety assessment. Final Report EUR 21230 EN, 2005.
- Hakami, E. and Larsson, E. : Aperture measurements and flow experiments on a single natural fracture, Int. J. Rock Mech. & Min. Sci. & Geomech. Abstr. 33 (4), pp. 395-404, 1996.
- 5) 澤田淳, 鐵桂一:50cm スケールの花崗岩試料の研削に よる亀裂形状計測について,第38回岩盤力学に関す るシンポジウム講演論文集,pp.266-271,2009.
- 6) 澤田淳,佐藤久,鐵桂一,坂本和彦:岩石試料の研削による亀裂形状計測データを用いた透水トレーサー試験の評価, 第39回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp. 54-59,

2010.

- Barton, N., Bandis, S. and Bakhtar, K. : Strength, deformation and conductivity coupling of rock joints. Int. J. Rock Mech. & Min. Sci. & Geomech. Abstr. 22 (3), pp. 121-140, 1985.
- 8) 鐵桂一,澤田淳:研削により測定した 50cm スケール 岩体中の天然亀裂の形状と開口幅の分布に関する研究, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Research 2010-041, 2010.
- 9) 吉野尚人,内田雅大: 亀裂媒体水理試験設備 (LABROCK)用試験岩体の切り出し・整形,核燃料サイ クル開発機構, JNC TN8410 2001-015, 2001.
- 10)吉野尚人,佐藤久: 亀裂状媒体水理試験設備 (LABROCK)による透水・トレーサー試験-2001 年度 までの成果-,核燃料サイクル開発機構, JNC TN8400 2002-001, 2002.
- 11)吉野尚人,佐藤久,内田雅大: 亀裂状媒体水理試験設備 (LABROCK)による天然亀裂内の透水・物質移行特性評 価,サイクル機構技報, No. 18, pp.51-58, 2003.
- 12) Alexander, W., Ota, K. and Frieg B. : Grimsel Test Site Investigation Phase IV (1994-1996): The Nagra-JNC in situ study of safety relevant radionuclide retardation in fractured crystalline rock II : The RRP project methodology, development, field and laboratory tests. Nagra Technical Report NTB 00-06, Nagra, 2003.
- 13) Deutsch, C. and Journel, A.: GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide, Oxford Univ Press, 1992.
- 14)Miller, I., Lee, G. and Dershowitz, W. : MAFIC Matrix/Fracture Interaction Code with Heat and Solute Transport. User Documentation, Golder Associates Inc., 2002.
- 15)Neuman, S. and Zhang, Y. : A quasi-linear theory of non-Fickian and Fickian subsurface dispersion: 1. Theoretical analysis with application to isotropic media, Water Resources Research, vol. 26, No. 5, pp. 887-902, 1990.
- 16)Levy, M. and Berkowitz, B. : Measurement and analysis of non-Fickian dispersion in heterogeneous porous media, Journal of Contaminant Hydrology, vol. 64, pp. 203-226, 2003.

FRACTURE HYDRAULIC CHARACTERIZATION BASED ON APERTURE DATA MEASURED BY 50 cm SCALE ROCK SAMPLE

Atsushi SAWADA, Keiichi TETSU and Kazuhiko SAKAMOTO

The homogeneous one-dimensional parallel plate model is usually applied for nuclide migration model in a single fracture. An actual fracture has complex rough surface. It is one of issues for developing the methodology how to define the representative parameters used for the parallel plate model, such as transmissivity and aperture. We conducted the fracture geometrical characterization by grinding 50 cm scale of rock block including a single natural fracture, and we obtained the valuable data to study the relationship between heterogeneous fracture aperture distribution and the hydraulic characteristics. It is concluded that the fracture shows the mixed system of relatively fast flow paths and slow flow paths.