

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

澤田 淳^{1*}・鐵 桂一²

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4-33）

*E-mail: sawada.atsushi@jaea.go.jp

亀裂性岩盤を対象とした核種移行評価モデルの一つとして亀裂を均質な一次元平行平板でモデル化する方法が一般的に使われる。しかし、実際の亀裂は複雑な形状を呈しており、一次元平行平板モデルに用いる亀裂の平均的な透水量係数や亀裂開口幅の値の設定方法が課題の一つである。そのため、実際の亀裂の表面粗さや開口幅の分布などの幾何学的な特徴を把握し、それらが亀裂内での移流分散などの物質移行に与える影響を理解することが重要となる。本研究では、天然の亀裂を含む50cmスケールの花崗岩試料を亀裂に直交する方向に1mm毎に精密研削し、各断面における亀裂断面の観察から亀裂表面形状のデータを取得し、亀裂面の粗度、亀裂幅の空間的相関性などの亀裂の特徴を表す平均的なパラメータ値を得た。

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長期的安全性を検討する際には、処分事業の長期にわたる事業期間を通して技術や意思決定の一貫性を保ちつつ、調査の段階に応じて詳細化されるサイト環境条件や技術の進歩に適切に対応した評価手法を用いた性能評価が実施される¹⁾。花崗岩など亀裂性岩盤を対象とした性能評価では、岩盤中の核種移行を評価するモデルとして亀裂を平行平板でモデル化する一次元平行平板モデルが用いられる²⁾。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モデルである。しかしながら、一次元平行平板モデルのパラメータ値の設定方法に課題が残されている。一次元平行平板モデルにおいては、亀裂の平均的な特性としての透水量係数や亀裂の開口幅が重要なパラメータとなる。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（もしくは水理学的開口幅）

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。この課題の解決に向けた研究としては、実際の亀裂の表面の粗さや開口幅の分布などの亀裂の幾何学的な特徴を把握するとともに、その複雑な形状や不均質に分布する亀裂開口幅が亀裂内での物質の移行（特に、移流分散現象）に与える影響を理解することが重要となる。また、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³⁾。

本研究では、上記の課題解決に向けた研究のひとつとして、亀裂の内部構造を詳細に計測することを目的に開発した亀裂の三次元形状および開口幅の測定手法^{4) 5)}（特許第3866257号：亀裂の三次元形状及び開口幅の測定方法及び測定装置）を、釜石原位置試験場から採取した天然の単一亀裂を有する50cmスケールの花崗岩⁶⁾（以下、「50cm岩体」という）に適用して、亀裂の形状を観察、測定した⁷⁾。この測定手法は、岩石試料を亀裂にほぼ垂直な方向に一定の間隔で精密に平面研削しながら、研削断面毎に亀裂の様子（亀裂内部の開口幅や亀裂形状など）を直接観察、計測する手法である。そのため計測には、研削断面の数に比例して長期の作業期間を要し、コストがかかるものの、比較的信頼性の高いデータが取得できる利点がある。

50cm岩体は、釜石原位置試験場から採取した後に、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を通じて、亀裂の透水量係数や物質移行に寄与する開口幅などの平均的な特性値の評価が試みられている^{8,9)}。透水試験やトレーサー試験などの一連の試験が終了した後に、50cm岩体の亀裂にレジン樹脂を注入して亀裂開口部を固化させた。そして、亀裂に直交する方向に1mm間隔で平面研削し、500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。亀裂の画像データから、亀裂に沿って1mm間隔で、亀裂が閉塞した箇所、ガウジなどの介在物、亀裂の分岐など、亀裂内の複雑な形状を観察して亀裂形状を計測した。亀裂内にレジン樹脂を注入して亀裂内部を測定する試みは、Hakami and Larsson (1996)などの例¹⁰⁾があるが、50cmスケールの比較的大きな天然の亀裂の亀裂面を1mm×1mmの間隔で詳細に計測したのは今回が初めてである。

本論では、亀裂内に介在物を含む亀裂の上下面間の距離、亀裂幅の中心座標を1mm間隔で計測した約25万箇所のデータについて報告するとともに、そのデータから得られた亀裂面の粗度、亀裂幅の空間的相関性などの亀裂の特徴を表すパラメータ値について述べる。

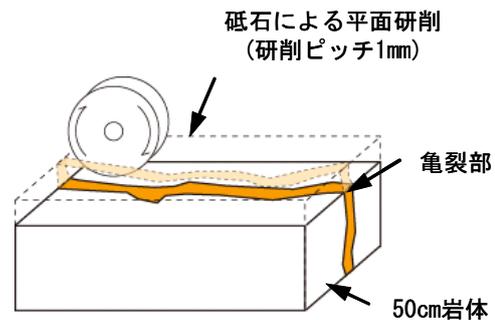
2. 計測方法

(1) 岩体亀裂形状の測定方法

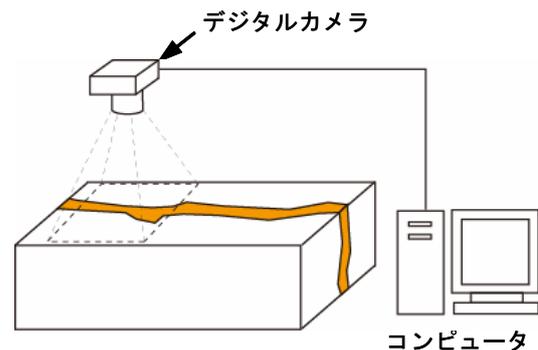
岩体内部の亀裂形状を測定するため、岩体の精密研削と亀裂部の撮影を繰り返す手法を用いた。岩体研削、撮影の概念図を図-1に示す。岩体の表面を精密に平面研削することで、内部の亀裂の断面を研削面に露出させる。研削面に露出した亀裂の断面をデジタル撮影して、画像データとして記録する。この様な研削と撮影を繰り返すことで、岩体全体の亀裂形状画像データが取得できる。またこれらの画像を組み合わせることで、亀裂面全体の詳細な亀裂形状を計測することができる。

岩体試料の研削には、機械平面研削盤GS-64PF（黒田精工株式会社）を改造した岩体試料平面研削装置を使用した。研削装置は、最大で幅600mm×奥行400mm×高さ600mmサイズの岩体試料を0.1 μ mの精度で平面研削可能な精密平面研削盤である。本研究では、亀裂に直交する方向に1mm間隔で平面研削した。

研削面に表出した亀裂断面のデジタル撮影には、1350万画素のデジタルカメラ（CMOSセンサー：4500pixel×3000 pixel）を用いた。亀裂部の開口幅やその測定に必要な精度（数十マイクロメートル）に比べて、測定対象の岩体全体の大きさ（50cm）の比が極端に大きいため、一度の撮影で全体を一括して撮影した場合には数十マイクロメートルという測定精度を確保できなくなる。した



(a) 岩体研削の概念図



(b) 岩体撮影の概念図

図-1 岩体研削、撮影の概念図

がって、亀裂に沿って比較的狭い範囲の撮影を繰り返し、複数の画像データで亀裂をトレースした。亀裂開口幅の測定精度は撮影画像の大きさと撮影解像度に依存することから、本研究では、50cm岩体の研削断面毎に、亀裂に沿って7～8枚のデジタル画像を撮影し、1 pixelあたりの亀裂開口幅の測定解像度は約25 μ mとなった。

亀裂形状の計測は、亀裂に沿って1mm間隔で実施した。その際、小さな亀裂の分岐点においては、亀裂幅が大きく三次元的に連続した主要な亀裂と判断される亀裂を選択した。また、本研究では、ガウジなどの介在物を含む亀裂の上下面を判読し、亀裂の上下面の間を亀裂幅として計測した。さらに、亀裂が閉じている箇所は、最小値（1pixel）を亀裂幅に設定した。このため得られた亀裂幅のデータは、実際の亀裂開口幅より大きな値となる傾向がある。今後、ガウジなどの介在物が存在する箇所や亀裂の分岐等の扱いについて再検討を加えて、開口幅の評価を進める予定である。

(2) 50cm岩体

50cm岩体は釜石原位置試験場で採取された天然の単一亀裂を有する花崗閃緑岩であり、岩体の中央付近に岩体ブロックの一面とほぼ平行な単一亀裂を有する。50cm岩体は、これまでにLABROCK（亀裂状媒体水理試験設備）を用いた透水試験やトレーサー試験などの試験^{8,9)}を通じて、亀裂の透水量係数や物質移行に寄与する

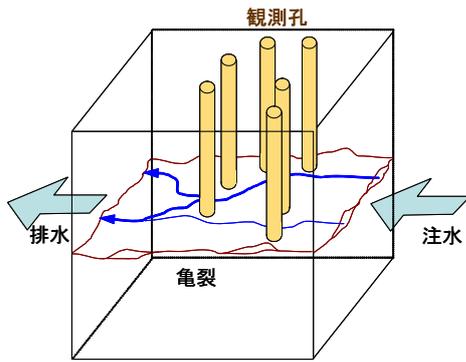


図-2 50cm岩体を対象としたトレーサー試験概念図

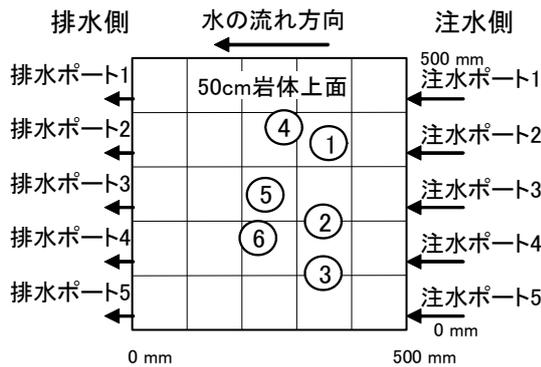


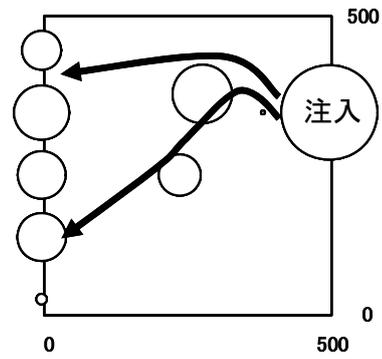
図-3 トレーサー試験時の注排水条件概略図

開口幅などの平均的な特性値の評価が試みられている。その結果、50cm岩体の平均的な水理学的開口幅は約0.4mm程度であり、また物質移行に寄与する開口幅（マスバランス開口幅¹¹⁾）はその2倍程度であったと報告されている。

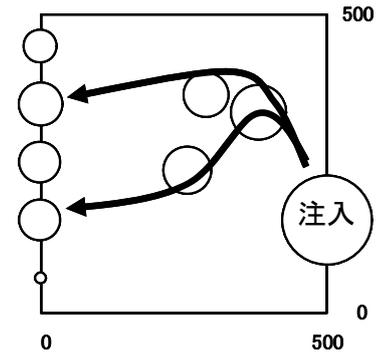
また、図-2に示すように亀裂に垂直な方向に削孔した6本の観測孔を設けてトレーサー試験が行われている。トレーサー試験は、図-3に示すように注水側と排水側をそれぞれ5つのポートに分割し、注水側から排水側への定常の透水条件下で、各ポートから一定濃度の非収着性トレーサーを注入し、各観測孔や排水ポートに移行してきたトレーサー濃度を観測した。トレーサー試験結果の例を図-4に示す。図-4は注水ポート2と注水ポート4からそれぞれトレーサーを注入した際の、観測孔と排水ポートで観測したトレーサー濃度を表したものである。トレーサー濃度は、注入したトレーサー濃度との相対的な比を○印の大きさと表しており、これらの結果から矢印で示されるような、チャンネル状の不均質な流れが生じているものと推察されている。

3. 計測結果

岩体研削により計測した亀裂の形状の等高線図を図-



(a) 注水ポート2からのトレーサー移行結果

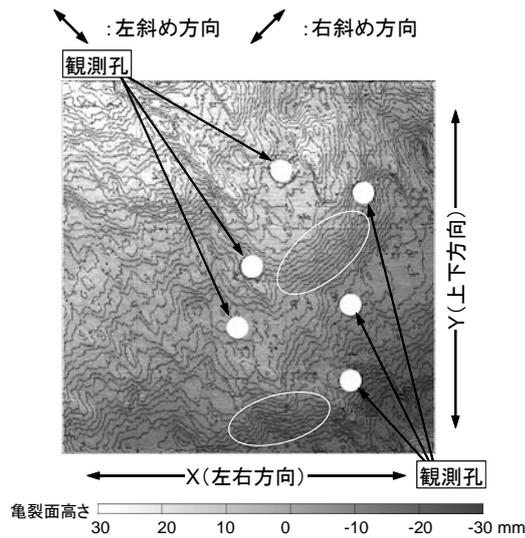


(b) 注水ポート4からのトレーサー移行結果

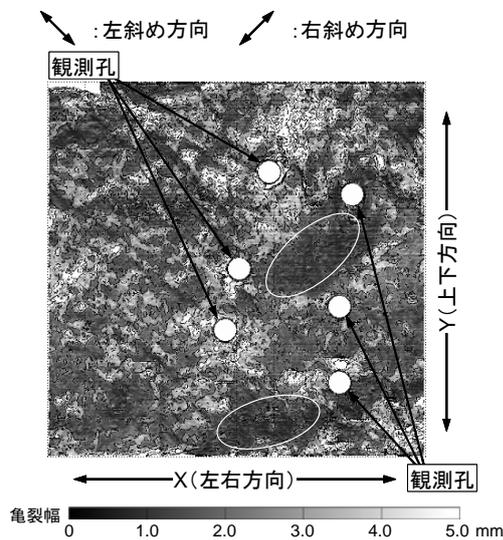
図-4 トレーサー試験結果の例。トレーサーの濃度を注入ポートの○印の大きさとの相対的な濃度比で表す

5(a)に、亀裂幅の分布を図-5(b)に示す。図-5(a)は、亀裂の上下面の中点座標の高さを色の濃淡で表している。また、図-5(b)は亀裂幅を色の濃淡で表している。なお、白抜き6個の円はトレーサー試験時に削孔した観測孔である。計測した亀裂幅の分布は図-6に示されるように0~2mm前後の頻度が高く、その平均値は1.14mmであった。この値は、トレーサー試験の結果から評価された物質移行に寄与する開口幅より若干大きな値となっている。これらの関係については、本研究ではガウジなどの介入物を含む亀裂の上下面から亀裂幅を計測しており、かつ亀裂が閉じている箇所は最小値(1pixel)を亀裂幅に設定しているため、実際の開口幅より大きな値となっていることから説明できると考えられ、実際の開口幅を再評価するなど検討を継続して実施していく予定である。

図-5(a)の等高線が密に分布している箇所(白線の楕円印)は、図-5(b)では亀裂幅の小さい箇所が広がっている領域であることがわかる。また、左斜め方向に条線のような一定方向の線構造も観察される。このような線構造は、図を描画する際に光源の方向を変えることでより顕著に描写させることができる(図-7参照)。これらの線構造は亀裂に作用するせん断によって形成されたと考えられる。亀裂にせん断力が加わると、せん断に垂直な方向に亀裂の接触領域がより広く分布し、せん断に平



(a) 亀裂面の高さ分布等高線図. 上下亀裂面の中央面, 等高線幅は1mm.



(b) 亀裂幅分布 (上下亀裂面の中央面)

図-5 亀裂の形状と亀裂幅の分布

行な方向の透水性が小さくなるといったことから、透水特性、物質移行特性などが顕著な異方性を示すことが知られている¹²⁾。このことから、上記の線構造が亀裂面のせん断によって生じた条線と仮定した場合、このような条線に平行な方向と垂直な方向で透水異方性を示す可能性があると考えられる。

4. 評価と考察

(1) 亀裂表面形状の評価

亀裂表面形状の評価には、表面の粗さを示す指標のひとつであるJoint Roughness Coefficient (JRC)¹³⁾を用いた。JRCは値が大きくなるほど表面形状は粗くなり、一般的に、JRCが20程度で粗い亀裂とされている。本研究では、Tse

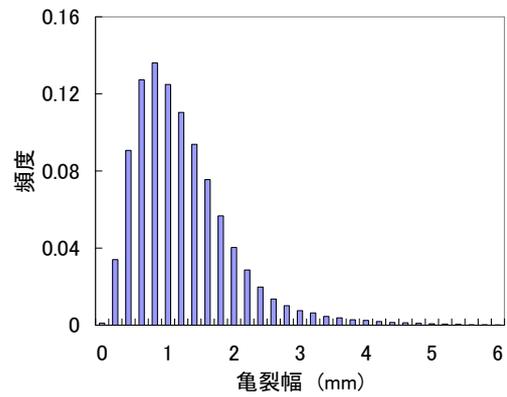


図-6 亀裂幅の頻度分布

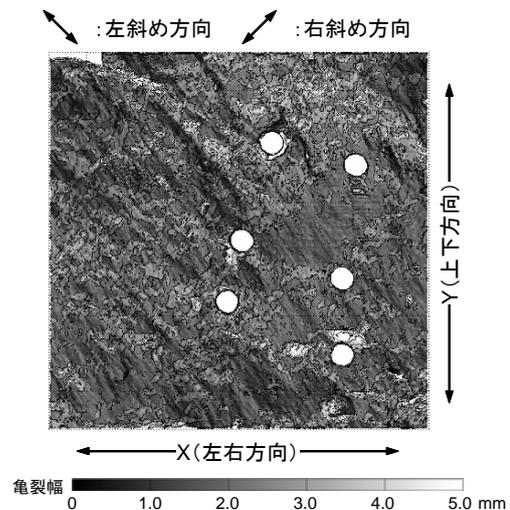


図-7 亀裂面の線構造の様子. 右方向に光源を設定して陰影を強調して描写

and Cruden (1979)¹⁴⁾により提案された不連続面の凹凸形状を特徴付ける統計学的なパラメータZ2と、Xianbin and Vayssade (1991)¹⁵⁾により導き出されたZ2とJRCの関係式を用いて定量的にJRCを求めた。不連続面の凹凸形状を特徴付ける統計学的なパラメータZ2は次式で示される。

$$Z2 = \left[\frac{1}{M-1} \sum_{i=1}^{M-1} \left(\frac{y_{i-1} - y_i}{\Delta x} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (1)$$

ここで、Mは測定点数、 y_i は*i*番目の亀裂面の高さ、 Δx は測定間隔を表す。Z2とJRCの関係式は測定間隔 Δx により異なり、Xianbin and Vayssade (1991)¹⁵⁾は Δx が0.25mm, 0.5mm, 1.0mmのケースについて示している。本研究で用いた Δx が1.0mmのケースを次式に示す。

$$JRC = 64.22(Z2) - 2.31 \quad (2)$$

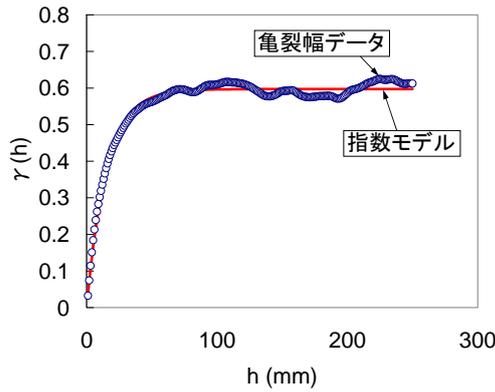


図-8 亀裂幅のセミバリオグラム (左右方向の結果)

表-3 亀裂幅の地球統計法による評価結果. 指数モデルへのフィッティングの結果

	シル	レンジ
左右方向	0.597	46.0
上下方向	0.568	37.5
左斜め方向	0.643	60.8
右斜め方向	0.496	29.6

50cm岩体の上亀裂面及び下亀裂面のJRCを表-1に示す. JRCの評価は、図-5の左右方向、上下方向でそれぞれ行った. その結果、JRCは11.9~14.5に分布し、上亀裂面、下亀裂面とも、左右方向に比べ上下方向のJRCの値が大きいことが分かる. 図-5や図-7から判読される線構造の影響を検討するために、斜め方向の亀裂表面形状の特性を、Z2を用いて検討した. ここで、JRCではなくZ2を用いたのは斜め方向では測定間隔 Δx が約1.4mmとなり、Xianbin and Vayssade (1991)¹⁹が示したZ2からJRCを導く式が使用できないためである. Z2の計算結果を表-2に示す. Z2の値は方向によって異なり、本試験に用いた50cm岩体の亀裂表面形状は異方性があることが分かる. また図-5や図-7から判読される線構造に沿った左斜め方向は、他の方向に比べ上亀裂面、下亀裂面ともZ2が小さく、亀裂表面の粗さが相対的に小さい結果となった.

(2) 亀裂幅空間分布の評価

亀裂幅分布の距離と方向の関係(空間的相関性)を、地球統計法¹⁶を用いて評価した. 亀裂表面形状の評価と同様に、図-5や図-7の左右方向、上下方向、右斜め方向、左斜め方向の4方向について、次式のセミバリオグラム $\gamma(h)$ を求めた.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i - h)]^2 \quad (3)$$

表-1 亀裂表面のJRC評価結果

	上亀裂面	下亀裂面
左右方向	11.9	12.2
上下方向	14.5	13.9

表-2 亀裂表面のZ2評価結果

	上亀裂面	下亀裂面
左右方向	0.222	0.225
上下方向	0.261	0.253
左斜め方向	0.210	0.208
右斜め方向	0.236	0.232

ここで、 $N(h)$ は2点間の距離が h となるデータ組み合わせ総数を、 $Z(x)$ は座標 x における亀裂幅を表す. 図-8に左右方向のセミバリオグラム $\gamma(h)$ と、セミバリオグラムの理論モデルへのフィッティング結果を示す. セミバリオグラムの理論モデルとしてはHakami and Larsson (1996)¹⁰と同様に次式の指数モデルに近似することができた.

$$\gamma(h) = c \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{3h}{a}\right) \right] \quad (4)$$

ここで、 c はシル、 a はレンジ、 h はデータ組み合わせ2点間の距離を表す. 各方向のセミバリオグラムを式(4)にフィッティングして求めたシルとレンジを表-3に示す. その結果、図-5や図-7から判読される線構造に沿った左斜め方向のシルとレンジが最も大きく、直行方向の右斜め方向のシルとレンジが最も小さい結果となった.

(3) 考察

亀裂表面形状の評価の結果、図-5や図-7から判読される線構造に沿った左斜め方向が、他の方向に比べ亀裂表面の粗さが相対的に小さい結果となった. このような、亀裂面形状の異方性は、亀裂幅分布にも影響を与えると考えられ、地球統計法を用いた評価から左斜め方向のシルとレンジが最も大きい結果を得た. Hakami and Larsson (1996)⁹は、シルが大きい方向はせん断変位が大きい方向と一致していることを報告している. このことから、本研究で使用した50cm岩体は線構造に沿った左斜め方向にせん断変位が発達し、その結果として右斜め方向の透水性が相対的に高い、透水異方性を有していると考えられる.

このような考察の結果は、2章に記したトレーサー試験の結果から推察された(図-4の矢印参照)チャンネル状の局所的な流れとも整合的である. すなわち、注水ポート2やポート4から注入されたトレーサーは、図-5の楕円で示された亀裂幅が小さい領域を迂回した後に、線構造(もしくはせん断方向)に垂直な右斜め方向に沿った

方向に移行していると説明することができる。

5. おわりに

岩体試料平面研削装置、撮影装置を用いて50cm岩体の亀裂を対象に1mm×1mmの間隔で、約500×約500個の亀裂形状データを得た。このデータから50cm岩体の亀裂の幅は0~2mm前後に分布し、その平均値は1.14mmとトレーサー試験から得た物質移行に寄与する開口幅より若干大きな値であった。JRCを用いて亀裂表面形状を、バリオグラムを用いて亀裂幅の分布を評価するとともに、それらの値の方向依存性について検討した。その結果、亀裂表面の条線のような線構造の方向が亀裂の閉塞箇所や透水異方性に大きく影響することが推定された。これらのデータは、1つのサンプルデータで、50センチメートルスケールという限定されたデータではあるが、天然単一亀裂の特徴を表す貴重なデータの一例となる。

なお、本研究で得られた亀裂幅のデータは、実際の亀裂開口幅より大きな値となる傾向がある。今後は、 gauze などの介在物を考慮するなどの再検討により開口幅の評価を進める予定である。また、得られた開口幅データを数値解析に適用することで、事前に実施された透水試験やトレーサー試験の結果の解釈など、不均質に分布する亀裂開口部が亀裂の平均的な透水特性や物質移行特性に与える影響についての検討を加えていく予定である。

参考文献

- 1) 原子力発電環境整備機構：段階的な事業推進における構造化アプローチと要件管理，NUMO-TR-07-01，2007。
- 2) 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。
- 3) Sawada, A., Sato, H., Tetsu, K. and Sakamoto, K. : Characterization of fracture aperture for groundwater flow and transport, *AGU 2007 Fall Meeting*, H23G-1705, 2007。
- 4) 鐵桂一, 澤田淳：研削した岩体亀裂開口部の観察による開口幅の測定 —NETBLOCK 試験報告—, 核燃料サイクル開発機構, NCTN8430 2005-001, 2005。
- 5) 鐵桂一, 澤田淳, 内田雅大：“研削による岩体亀裂開口部の測定”，第59回年次学術講演会講演概要集, CS1-013, pp.25-26, 2004。
- 6) 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。
- 7) 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に関する研究, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Research 2008-079, 2008。
- 8) 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。
- 9) 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, 2003.3, pp.51-58, 2003。
- 10) 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。
- 11) 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。
- 12) 小山倫史, Lanru Jing, 大西有三：岩盤不連続面のせん断時における透水性および物質移行に関する研究, 第37回岩盤力学に関するシンポジウム公演集, pp.269-274, 2008。
- 13) Barton, N. and Choubey, V. : The Shear Strength of Rock Joints in Theory and Practice, *Rock Mechanics*, Vol.10, pp.1-54, 1977。
- 14) Tse, R. and Cruden, D. M. : Estimating joint roughness coefficients, *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 16 (5), pp.303-307, 1979。
- 15) Xianbin, Y. and Vayssadea, B. : Joint profiles and their roughness parameters, *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 28 (4), pp.333-336, 1991。
- 16) Deutsch, C. and Journel, A. : GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide, Oxford Univ Press, 1992。

A STUDY ON FRACTURE GEOMETRICAL CHARACTERIZATION BY GRINDING 50 cm SCALE OF GRANITIC ROCK SAMPLE

Atsushi SAWADA and Keiichi TETSU

The homogeneous one-dimensional parallel plate model is usually applied as a nuclide migration model in a fracture. However, an actual fracture in the natural geological environment has complex rough surface. It is one of the issues for developing the methodology how to define the representative parameters such as transmissivity and fracture aperture. In this study, we conducted the fracture geometrical characterization by grinding 50 cm scale of granitic rock which has a single natural fracture, and we obtained about 250 thousand points of fracture geometry and aperture data. The fracture characteristic parameter values as one of the representative data of 50cm scale of the rock sample were analyzed.