

岩盤亀裂開口幅評価に関する検討

AN EXAMINATION OF APERTURE ESTIMATION ON FRACTURED ROCK

吉野尚人[※]・澤田淳^{※※}・佐藤久^{※※※}

Naoto YOSHINO, Atsushi SAWADA, Hisashi SATOU

Quantitative measurement of aperture distribution is important for understanding fluid flow and contaminant transport within fractured rock masses. However, some results of the aperture distribution measurement indicate the difficulty of estimation and necessity of further study on this issue. Authors measured the fracture surface height using 3-D measurement system and the aperture using the X-ray computed tomography which can detect inside the induced single fracture in 10 cm edge dimension granite block without destruction. We obtained aperture distribution using 3-D measurement system and X-ray CT. The transmissivity calculated by the filtration analysis using aperture derived from 3-D measurement system was nearly equal to that from permeability test. However, that from X-ray CT did not agree with measurement. This result means the necessity of development on estimating hydraulic aperture in fractured rock using X-ray CT.

Key Words: Aperture, Fracture, X-ray CT, 3-D measurement system

1. はじめに

地下水浸透問題や高レベル放射性廃棄物地層処分の核種移行問題において、対象岩盤が花崗岩のような結晶質岩の場合は岩盤内の亀裂が主たる移行経路となるため、亀裂の水理学的特性、力学的特性、幾何学的特性等を把握した上でそれが地下水浸透や核種移行に及ぼす影響について検討する必要がある。また、これら亀裂の諸特性は一般に不均質性を有しているため、亀裂開口幅の不均質性を考慮した検討が必要となる。そのため、本研究では亀裂の幾何学的特性に着目し、亀裂開口幅の不均質性が地下水浸透や核種移行に与える影響を検討する目的で亀裂開口幅の測定方法について検討を行った。

亀裂開口幅の測定方法としては、亀裂表面形状を測定する方法¹⁾や亀裂開口幅を直接観察する方法²⁾が一般的に使用されている。亀裂表面形状を測定する場合、測定方式は接触式測定法³⁾と非接触式測定法⁴⁾とがあり、亀裂面を直接的に測定するため亀裂表面形状の詳細かつ正確な測定が可能であり測定誤差も小さい。しかし、亀裂面を一度引き離すと元の状態に復元することは難しく、また複数の亀裂が交差する場合には適用困難となり単一亀裂のみに限定した測定方法となる。一方、亀裂開口幅を直接観察する方法は、亀裂内部にエポキシ樹脂等の固化材料を充填注入し、固化後に岩体を切断もしくは研削し、亀裂開口幅を直接測定する。この方法は亀裂開口幅を直接測定するため最も信頼性の高いデータが取得できる。しかし、切断もしくは研削に要する時間や費用の観点

※ 工修 核燃料サイクル開発機構 東海事業所

※※ 核燃料サイクル開発機構 東海事業所

※※※ 工修 検査開発課

から取得できるデータ数には限界があり、地下水浸透問題や核種移行問題に与える影響の検討に十分な開口幅情報を取得することは困難である場合が多い。

一方、最近、亀裂内部の開口幅に対して X 線 CT(Computed Tomography)を使用して非破壊で岩石内部を観察する方法が注目されている。医療分野において発展した X 線 CT は、人体内部の構造を可視化できる逆解析手法である。最近ではこの手法は医療分野に限られず、土木、地質分野においてもその適用可能性について検討されており、岩石等への応用も研究されている。X 線 CT の岩石への応用事例としては、亀裂開口幅計測⁴⁾、応力状況下での岩石内部の破壊進展状況の把握⁵⁾、岩石内透水状況の把握⁶⁾などがあげられる。いずれの研究事例においても、岩石内部の亀裂構造を X 線 CT により概略的に把握可能であるとしているが、データ解釈には慎重であるべきだとする結論が多い。これは、造岩鉱物の不均質性や測定対象亀裂開口幅が X 線 CT の分解能よりも小さい等の影響が測定結果に与える影響が大きいためである。特に結晶質岩の亀裂開口幅の測定では、造岩鉱物の不均質性に起因する X 線の吸収係数のバラツキは堆積岩と比較すると極めて大きくなるため、亀裂開口幅の特定がさらに困難になることが考えられ、不均質な開口幅分布が水理特性に与える影響を検討可能な大きさの岩石試料に対して亀裂開口幅を X 線 CT で特定する技術はまだ確立されているとはいえない。そこで、本研究では、亀裂表面形状測定方法により推定される亀裂開口幅の信頼性が比較的高いと考えられる、亀裂充填物等が無い結晶質岩系岩盤の人工割裂単一亀裂岩体を対象として、前述の測定方法のうち亀裂表面形状を測定する方法と X 線 CT による測定方法の 2 種類での測定を実施し、X 線 CT による亀裂開口幅特定精度に関する検討を行った。

2. 試験の概要

(1) 試験岩体の基本物性

試験岩体は開口幅の不均質性の検討に必要な大きさ、亀裂を対象とした透水試験が可能な大きさ、後述する X 線 CT 撮影による亀裂開口幅推定が可能な大きさを考慮して、図-1 に示すような 1 辺 10cm 角立方体の結晶質岩である花崗岩を使用した。試験岩体の高さ方向のほぼ中央には人工割裂単一亀裂を有している。人工割裂単一亀裂は、割裂方向の両端に楔をあて、楔を割裂方向に圧入させて割裂亀裂を発生させた。なお、人工割裂単一亀裂生成時に発生した微細な岩片は、後に行う一連の試験の最中に不意に取り除かれることで開口幅評価に影響を与えないようにするため予め取り除いた。以降、岩体の各軸の標記は図-1 の軸に従うものとする。

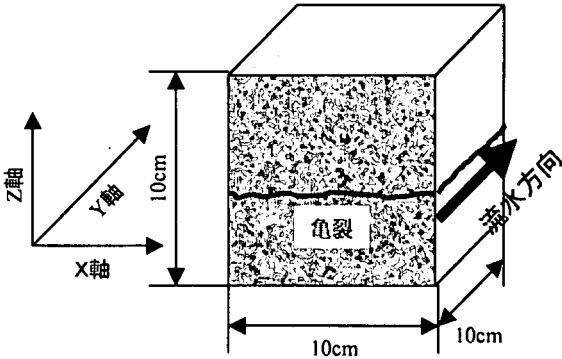


図-1 試験岩体の概要

次に、亀裂内の透水特性を把握する目的で定水位透水試験を行った。透水試験時の試験岩体は、注水側と排水側にポートを設置し注水面および排水面の亀裂はほぼ定水位となるようにし、側面はシリコンにより止水用塩基板を取りつけた。水頭値は注水・排水ポートに設置したマンメータにより計測し、単位時間流量は、排水側から排出される単位時間あたりの排水量を電子秤で計測した。定水位透水試験結果(表-1 参照)より、三乗則から導出される試験岩体の平均的な水理学的開口幅 B_H (式(1)参

表-1 試験岩体の透水特性 (定水位透水試験結果)

動水勾配 (-)	単位時間流 量 (m ³ /sec)	透水量係数 (m ² /sec)	水理学的開口幅 (mm)
1.1	4.32×10^{-7}	3.93×10^{-5}	0.364
1.8	6.88×10^{-7}	3.82×10^{-5}	0.360
2.7	9.12×10^{-7}	3.38×10^{-5}	0.346

照)は約0.36mmとなった。

$$B_H = \left(\frac{12\mu}{\rho g} \frac{L}{W} \frac{Q}{\Delta h} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

ここで、 μ は粘性係数、 ρ は密度、 g は重力加速度、 L は移行経路長、 W は亀裂幅、 Q は単位時間流量、 Δh は水頭差である。

(2) 亀裂開口幅推定方法

a) 亀裂表面形状測定による亀裂開口幅推定

亀裂表面形状測定には、接触式測定装置である3次元測定装置(株式会社ミットヨ製 BRIGHT710)を使用した。3次元測定装置は、直交座標系内を案内するスケール及びプローブをもち、それぞれの移動量から3次元座標値を求めることができる。プローブはX軸駆動部、Y軸駆動部、Z軸スピンドルにより底盤上を移動する。プローブ移動のためには、エアーコンプレッサーから供給される0.4MPaの圧縮空気が使用される。プローブの先端にはルビー球($\phi=1\text{mm}$)が取り付けられており、ルビー球が試験岩体に接触したことを圧力センサーで感知することにより直交座標系の座標値を得る。各軸の公称測定精度は3～6 μm である。測定ではX軸Y軸ともに1mm間隔でデータを取得した。

亀裂表面形状測定から亀裂開口幅を推定するために、まず亀裂の上面と下面それぞれの高さ(図-2中のC1とC2)を測定し、上下面を重ねた状態で試験岩体の高さ(図-2中のA)を測定した。その後、上下面を重ねた状態での試験岩体の高さから亀裂上面・下面の高さを引き、この値(図-2中のB)を3次元測定から算出される開口幅(以下、「 B_{3D} 」と表記する)とした。

b) X線CT撮影による亀裂開口幅推定

X線CT撮影の前に試験岩体内の亀裂開口幅を固定する目的でエポキシ樹脂(シーカ糊製シーカデューア52標準型)を試験岩体単一亀裂内に注入した。使用したエポキシ樹脂は、無溶剤タイプ、2成分型エポキシ樹脂ベースの低粘度注入接着剤であり、揮発成分を含まず、浸透性に優れ、固化後の収縮が小さく強度も大きい。エポキシ樹脂の密度は約1g/cm³である。本研究で使用したX線CTは東芝メディカル株式会社製Asteion(医療用X線CT)である。X線CTで使用される物性値はCT値と呼ばれ、式(2)で定義される。

$$\text{CT値} = (\mu_t - \mu_w) \times K / \mu_w \quad (2)$$

ここで、 μ_t は任意点の吸収係数、 μ_w は水の吸収係数、 K は定数であり、 $K=1000$ とした。ちなみに任意点が空気の場合、空気の吸収係数は0であるためCT値は-1000となる。CT値は被検出体の密度に比例して大きくなることが知られている。今回の撮影ではX軸とZ軸で構成される断面内のCT値について表示画素数=512×512、撮影領域=15cm×15cmとした。画素1辺の長さは0.293mmとなり、これが最小認識長さとなる。撮影断面は3次元測定結果と比較するため、Y軸に沿って1mm間隔で撮影した。このため、1辺長10cmの試験岩体の場合、100断面の撮影が必要となる。試験岩体マトリクス部のCT値のバラツキは、撮影条件によって異なり、一般に管電圧、管電流は大きく、撮影時間は長い方がバラツキは小さくなる。今回の撮影では、試験岩体マトリクス部のCT値のバラツキが最も小さくなる撮影条件として、管電圧は135kV、管電流は220mA、1断面に要する撮影時間は3秒とした。試験岩体内の亀裂開口部に注入固化したレジン材の密度は水とほぼ等しく約1g/cm³であり、これはCT値では約0に相当する。一方、花崗岩の密度は約2.7g/cm³であり、CT値では約2000となる。図-3に、

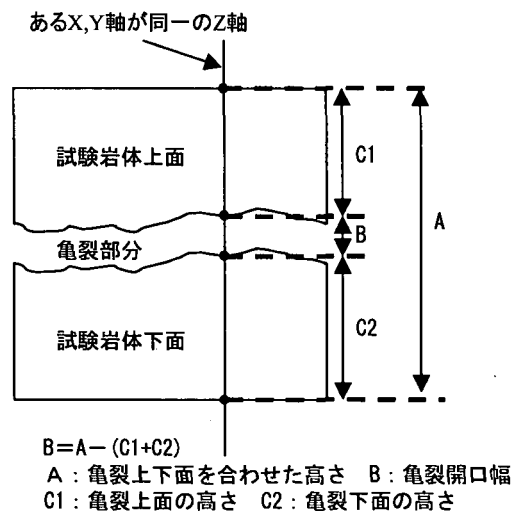


図-2 3次元開口幅推定方法

ある測定断面内のZ軸に沿った1側線についてCT値の一例を示す。同図より岩体のマトリクス部ではCT値が約2000を中心に±1000程度のばらつきを有しているが、亀裂開口部と考えられる部分では、CT値が極端に小さくなっており、亀裂を検出することが可能であることがわかる。現状ではCT値と亀裂境界部の厳密な関係に関する知見は得られていないため、ここでは亀裂境界部および亀裂開口幅の特定に際しては、図-4に示すようにCT値が最小となる亀裂開口部と考えられるZ軸座標からCT値が1000になるZ軸方向両端の境界を亀裂上面境界、亀裂下面境界として、その差分を亀裂開口幅とした。なお、X線CTの最小認識長さは0.293mmであるため、本手法による開口幅評価では、0.293mm以下と0.293mm付近の開口幅は認識不可能もしくは過大・過小評価となる。以降、この手法で推定された開口幅を「Bcr」と表記する。

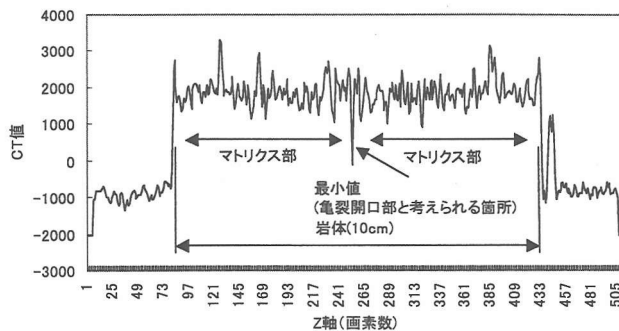


図-3 X線CT測定の一例(測定断面内のZ軸に沿った値)

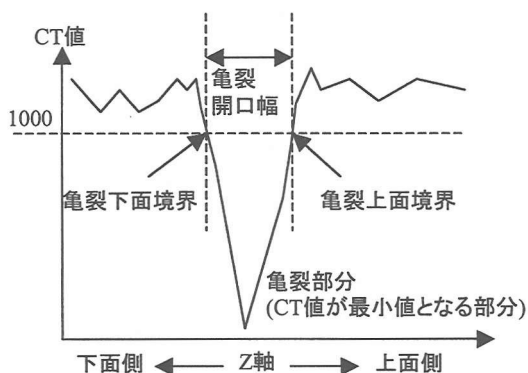


図-4 X線CTからの亀裂境界部と亀裂開口幅特定概念

3. 試験結果および考察

(1) 亀裂表面形状の比較

図-5に試験岩体の亀裂表面形状の推定結果を示す。亀裂表面形状は上面と下面の2種類あるが、両者はほぼ同様の傾向を示したため、ここでは上面の結果のみを記載する。3次元測定とX線CTによる亀裂表面形状の推定結果は概略的な傾向はほぼ等しいといえる。すなわちX線CTから亀裂上面境界、亀裂下面境界を抽出することは概ね可能であることが明らかとなった。しかし、X線CTから推定された亀裂表面の形状は3次元測定での亀裂

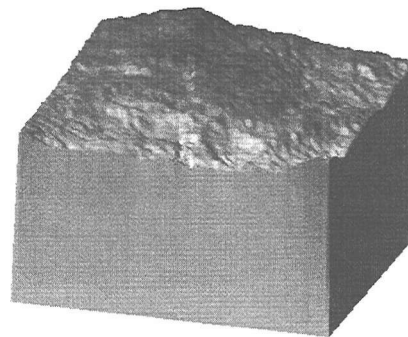
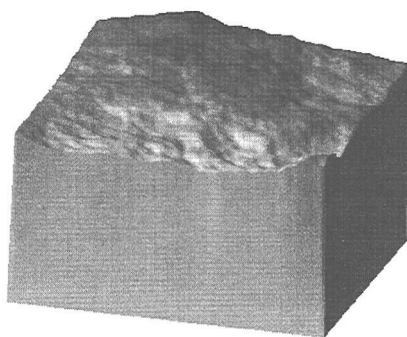


図-5(a) 亀裂表面形状推定結果(3次元測定)

図-5(b) 亀裂表面形状推定結果(X線CT撮影)

表面形状と比較すると局所的な凹凸が見られる。これは、X線CTの測定限界により0.293mm以下の領域が測定不可能であったためや、亀裂開口部の特定が困難となった箇所があったためではないかと考えられる。また、CT値から亀裂開口幅を推定する際の閾値の設定等についても検討が必要であることを示していると考えられる。さらに、マトリクス部のCT値のバラツキが大きい場合にはさらに境界設定が困難になるため、マトリクス部のバラツキを低減させる方法についての検討も必要となる。

(2) 亀裂開口幅の比較

亀裂開口幅推定結果を図-6に示す。 B_{3D} と B_{CT} の概略的な傾向はほぼ等しいが、 B_{CT} は B_{3D} よりもバラツキが大きい。図-7に B_{3D} と B_{CT} のヒストグラムを示す。一般に亀裂開口幅の分布は対数正規分布に従うことから、

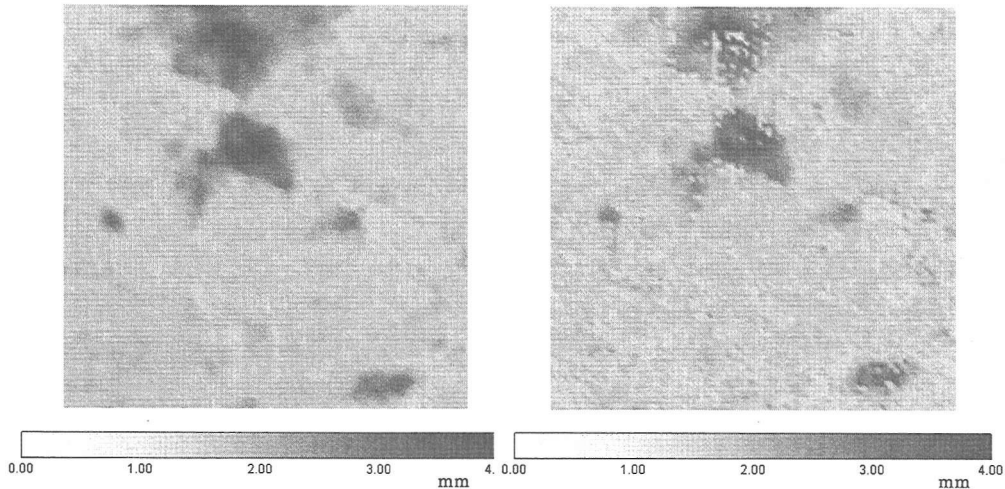


図-6(a) 亀裂開口幅推定結果(3次元測定)

図-6(b) 亀裂開口幅測定結果(X線CT撮影)

ヒストグラムの区間は開口幅の対数で設定した。 B_{3D} の分布はほぼ対数正規分布に従うが、 B_{CT} の $10^{-0.75}\text{mm}$ 以下の値や $10^{-0.5}\sim 10^{-0.25}\text{mm}$ がほとんど欠落しており対数正規分布に従っていない。また、 B_{CT} は0mmと推定された部分が3次元開口幅よりも多いことがわかる。これらは、X線CTの測定限界値が0.293mmであることに起因している。このことから、 B_{CT} の分布を統計的に表現する際には全体のデータを使用してそのまま平均値や分散等を算出することは不適切であることがわかる。

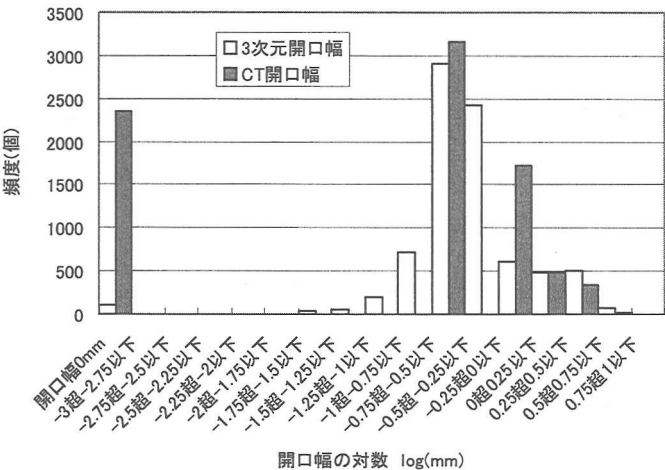


図-7 B_{3D} と B_{CT} のヒストグラム

(3) 透水試験との比較

測定した B_{3D} と B_{CT} を使用して微小な領域に3乗則が成り立つと仮定して2.1(2)で実施した透水試験と同様の条件での浸透流解析を行った。使用し

た解析コードは MAFIC[®]である。その結果、Bcr を使用した場合は、透水試験と同じ条件では有意な浸透が得られないという結果になった。これは、3.2 で示したように開口幅が 0mm と評価された部分が多くなり、流れ方向の開口幅の連続性が乏しくなったことが原因ではないかと考えられる。一方、B3D を使用した浸透流解析では、実際の透水試験結果とほぼ等しい透水量が得られた。以上より、今回対象としたような結晶質岩の微細亀裂に対しては、X 線 CT から推定された開口幅は実際の開口幅の概略的な傾向は表現できるが亀裂内の水理学的な特性を表現することは困難であることが判明した。

4. おわりに

本研究では、結晶質岩を対象として、3 次元測定および X 線 CT により亀裂開口幅の定量的評価を行うとともに、その透水特性（水理学的開口幅）に関する検討も行った。X 線 CT の測定限界（分解能）の問題や造岩鉱物の不均質性が CT 値に及ぼす影響により、X 線 CT 撮影から推定された亀裂開口幅の分布は全体の概略的な傾向は表現できるが詳細な部分は表現できず、透水特性の表現が困難であることを明らかにした。これらの問題に対しての解決策としては、試験岩体マトリクス部の CT 値のバラツキを低減する方法の開発、測定精度を上げること等が考えられる。菅原ら⁴⁾による最近の研究では、主に堆積岩を対象として、亀裂を含む領域の CT 値の平均値と亀裂を含まない部分の CT 値の平均値について比をとり、この比が亀裂開口幅に比例することに着目した検討を行っており、X 線 CT の測定限界以下の亀裂開口幅が評価可能であることを示している。しかし、本論文で扱ったような結晶質岩の場合、マトリクス部の密度のバラツキが大きいため、このような平均化手法を適用する場合には、平均化することで開口幅部分が検出できなくなる可能性もある。現状では、結晶質岩の亀裂開口幅を X 線 CT で評価することは困難であるが、非破壊かつ比較的短時間で測定できる利点を考慮すると、上記の課題について今後さらに検討を重ねることによる測定精度の向上等が望まれる。

・参考文献

- 1)例えば、木村強、江崎哲郎(1992): 岩盤不連続面の凹凸および開口幅の特徴と水理学的性質, 応用地質 33 巻 2 号, pp.1-10.
- 2)例えば、E.Hakami(1995):Aperture Measurement and Flow Experiments on a Single Natural Fracture, Aperture Distribution of Rock Fractures (Doctoral Thesis), Division of Engineering Geology Department of Civil and Engineering Royal Institute of Technology Stockholm, Sweden
- 3)江崎哲郎、神野健二、三谷泰裕、蔣宇静、内田雅大、吉野尚人(2001): 岩盤不連続面の力学・透水メカニズムの実験的・解析的研究: 核燃料サイクル開発機構技術資料, JNC TY8400 2001-005
- 4)菅原勝彦、小島隆輔、尾原祐三、佐藤晃、島田英樹(1998): X 線 CT による亀裂開口解析, 資源と素材, Vol.114, pp881-887.
- 5)K.Sugawara, Y.Obara,K. Kaneko,K. Koike,M. Ohmi, T.Aoi(1997): Visualization of three-dimensional structure of rocks using X-ray CT method,Environmental and Safety Concerns in Under ground Construction,Lee,Yang&Chung(eds),pp769-774.
- 6)菅原勝彦、尾原祐三、青井崇浩、小島隆輔(1998): X 線 CT による岩石透水現象の可視化, 第 10 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集
- 7)Bianchi,L., and D.Snow(1968): Permeability of crystalline rock interpreted from measured orientations and apertures of fractures, Annu. Arid Zone,8(2),231-245
- 8)Ian Miller, Gholi Lee, William Dershowitz(1998): Mafic matrix/fracture interaction code with heat and solute transport user documentation version 1.6,user documentation, Golder associates Inc, Seattle WA.