不連続性岩盤内における水みち構造について -形成要因と巨視的透水係数に与える影響の考察-

下茂道人

深田地質研究所

Preferential flow pathways in fractured rock - Formation mechanism and those influences on rock mass permeability -

SHIMO Michito

Fukada Geological Institute

要旨:不連続性岩盤内においては、大小の亀裂が主たる浸透経路となっているため、個々の亀裂 の分布、形状および水理特性が、「水みち」と呼ばれる局所的な地下水流動経路の形成や巨視的に みた岩盤の透水性に影響を与えていると考えられる.本研究では、岩盤ブロックを用いた室内試 験や現場試験で得られた透水試験データや亀裂分布データに基づいて作成した不連続性岩盤モデ ルを用いた透水シミュレーション結果およびパーコレーション理論に基づく検討結果から、岩盤 内に水みちが形成される条件について検討した.また、透水不均質性(標準偏差)と岩盤の巨視 的透水係数との関係について解析的かつ理論的考察を行い、これまで報告されている現場試験結 果等との比較によりその妥当性を検討した.さらに、近年急速に発展している 3D プリンター技術 により作成した不連続性岩盤モデルを用いて水みちの可視化を行い、数値解析モデルで予測され た水みち構造との比較を行った.

キーワード:不連続性岩盤,流れの局所化,臨界密度,透水トモグラフィー,X線 CT,3D プリ ンター

Abstract: Flow localization is one of the most fundamental and common issues for characterizing flow in fractured rocks. In this paper, based on the results from the laboratory tests and the numerical study, the formation mechanism of the preferential flow paths and the contribution of those paths to the macroscopic hydraulic conductivity are investigated. The results of the hydraulic tomography and X-ray CT using a 30 cm cube of fractured chert showed that the localized flow is occurring along the interconnected horizontal and smaller scale semi-vertical fractures. From numerical study, it was shown that the flow localization starts to occur when, σ , the standard deviation of the logarithm of the local hydraulic conductivity, is larger than one. The preferential flow pathways are created within the contour surface of top 25 % of the hydraulic conductivity that is equivalent to the "critical path" defined by the percolation theory. The location of the preferential pathways predicted by the numerical simulation was successfully reproduced by the 3D printed fracture network model. It was also pointed out that the macroscopic conductivity, when σ becomes larger than one order of magnitude comparing to the logarithmic mean of the local conductivity, when σ becomes larger than 1.5 which was also predicted by the percolation theory and the numerical simulation.

keyword: fractured rock, flow localization, critical density, hydraulic tomography, X-ray CT, 3D printer

1. はじめに

不連続性岩盤内においては,地下水は断層や節 理などの大小の不連続面が主たる透水経路となる と考えられる.このため,不連続面の分布や水理 特性によっては,地下水が選択的に流れる「水み ち」が形成される場合がある.水みちは,岩盤掘 削時の集中湧水や地下施設からの貯蔵物の漏えい などのリスク要因となる.このため,トンネルや 地下空洞の施工に際しては,事前の地質調査や透 水試験結果に基づいて,水みちの分布を可能な限 り把握し,湧水抑制対策や水抜き対策などに反映 することが重要である.しかしながら,不連続性 岩盤内における水みち形成機構や水みちが岩盤の 巨視的な透水性に与える影響については,必ずし も明らかになっていない.

本研究では、かつて著者らが自然亀裂を有する 岩盤ブロック試料を用いて行った透水トモグラフ ィー結果 (Shimo et al., 1995) および現場透水試験 データに基づく数値解析結果から,不連続性岩盤 内の水みち形成に与える亀裂分布や透水係数分布 の影響について検討した. 透水トモグラフィーに 用いた岩盤ブロック試料については、今回、新た に高出力 X線 CT 装置による撮影を行い、内部亀 裂構造に関する情報を取得し、透水トモグラフィ ー結果との比較を行った.また,近年,技術の進 展が著しい 3D プリンター技術を用いて, 75mm 角の3次元亀裂ネットワークモデルを作成し、染 料を用いた水みちの可視化結果と数値解析で予測 された水みち構造との比較を行った. さらに、岩 盤の透水係数分布と巨視的透水係数との関係につ いて、パーコレーション理論および数値解析モデ ルを用いた検討結果と既往の現場試験結果等との 比較を行い、水みちが岩盤の巨視的透水係数に与 える影響について考察した.

2. 不連続性岩盤の透水係数分布に関する事例

現場透水試験(井戸試験)で得られる不連続性 岩盤の透水係数は、数オーダーに分布することが 珍しくない.図1は、日本原子力研究開発機構瑞 浪超深地層研究所において地表から削孔したボー







リングで実施された花崗岩の透水試験結果(三枝 他,2007)である.測定値は,青線(確率分布)お よび赤線(累積確率)で示す対数正規分布にほぼ 従っている.亀裂分布が異なる2つの亀裂帯 (UHFD,LSFD)の透水係数は,それぞれ4オー ダー,6オーダー以上にわたって分布しており, 透水係数の常用対数の標準偏差σは,それぞれ0.8 および1.6である.図2に,同機構の幌延深地層 研究センターで得られた稚内層(珪質泥岩)の透 水試験結果(太田他,2007)を示す.透水係数は,8 オーダー以上にわたって分布しており,標準偏差 σは1.8である.

一方,図3は,筆者が、かつて実施した自然亀 裂を有する一辺 30cm のチャートブロックを用い て実施した透水トモグラフィーの結果 (Shimo et al., 1995) である. フィールドと比較して小さなス ケールにもかかわらず、逆解析で得られた透水係 数は6オーダー以上の範囲に分布しており, x, y, z 各方向の透水係数には約1オーダーの異方性が見 られる. 種々の通水条件(対面,対角)で行った 浸透流解析(順解析)の結果から、図4に示す上 位25%の連続した高透水部が、流れの主方向にか かわらず流動する共通の経路となることが分かっ た.この結果は、不均質性の高い岩盤内において、 骨格となる流路すなわち水みちが形成されること を示している. また, 対面透水試験の流量(順解 析)から求めた巨視的透水係数と透水係数の対数 平均の比は, x, y, z各方向でそれぞれ20倍, 42倍, 66 倍であり、試料内の一部の高透水部が、全体の 透水性に大きく寄与していることが示唆された

(Shimo et al., 1995).

透水トモグラフィーに用いたチャート内部の 不連続面の構造を調べる目的で,高出力 X 線 CT 装置(図 5, X 線発生器出力 450kV/3.3mA)を用 いた内部構造の可視化を試みた.同撮影装置は,



図3 チャート試料内の透水係数分布(Shimo et al., 1995)



図4 上位25%透水係数の格子要素(Shimo et al., 1995)



図5 高出力X線CT装置(TOSCANER-24500)

産業分野で用いられているもので、国内では、ほぼ最大のX線発生出力を有している.撮影条件を

決定するために、同種類のチャート試料(約 150 mm×約 150 mm×約 85 mm)を用いた予備撮影を行った.得られた画像(図 6)では、堆積面に平行な連続性の高い亀裂およびそれに高角度で交差する亀裂の形状や充填物の有無まで明瞭に可視化することができた.透水トモグラフィーに用いた 30 cm角チャートブロックについては、予備撮影結果を参考に、最大出力 450kV/3.3mA、高解像度モードにより、500 μ m ピッチで撮影を行なった.得られた画像(図 7)は、予備撮影結果のように、正確に亀裂形状を特定できるほど明瞭ではなかった.しかし、500 μ m ピッチのスライス画像を x, y, z 三方向で相互に確認することにより、各方向の画像に共通する比較的連続性の高い亀裂を抽出することができた(図 8).

図8より,透水トモグラフィーに用いたチャー トブロック内では,層理面に平行な連続の高い亀 裂とこれに高角に交差する亀裂により,図4に示 した透水経路に対応するネットワークが形成され ていることが明らかになった.

なお、今後さらに画像解析を進め、より小規模 な亀裂の抽出も試みる予定である.

3. 数値モデルによる水みち形成に関する検討

透水不均一性と水みち形成との関係および水 みちが岩盤の巨視的透水係数に与える影響を定量 的に把握することを目的として数値解析的検討を 行った.

解析には、図9に示すように、確率論的に亀裂 を発生させた一辺 100m の岩盤ブロックモデルを 用いた. 亀裂の発生には、幌延のモデル化事例な ど(熊本他、2007)を参考に、表1に示すパラメ ータを設定した.水みち形成に与える透水不均質 性の影響にのみ着目するため、亀裂構造は同一(図



図6 X線CT画像(予備撮影) 試料サイズ約150mm×約150mm×約85mm



---- CT 画像から抽出した亀裂

図7 X線CT画像(30cm角チャートブロック, xy面)



図8 X線CTで抽出されたチャート試料内の亀裂

9) とし、開口幅分布(標準偏差)を変えることに より不均質性の異なる4つのモデルを作成した. 岩盤のモデル化・浸透流解析には、等価不均質連 続体モデル化手法による有限要素法解析コード (下茂他, 1996)を用いた. 解析領域を 20×20 ×20の立法体要素で分割し、要素ごとに透水テン ソルを算定した.開口幅分布の標準偏差を変えた 4 つのモデルの各要素の平均透水係数 ((kxx+kyy+kzz)/3)の分布を図 10 に示す. 要 素透水係数の常用対数の標準偏差は、0.21、0.55、 1.0, 1.96, であり、モデルごとに不均質性の程度 が異なる.図11に、x方向に動水勾配1を与えて (側方4面は不透水)得られた岩盤内部の流線お よび中央断面の水頭分布を示す. 同図から,透水 係数の不均質性が小さい場合 σ=0.21 のケースで は、流線はほぼ直線であるのに対して、不均質性 が増大するにしたがって、流線に偏りが生じ、最 も不均質性が大きいケース (σ=1.96) では、一部 の限られた経路のみに流れが集中する「水みち」 が形成されていることが分かる. 4 ケースとも, 幾何構造は同一であるから、水みちが透水不均一 性のみによって形成されることが分かる. 不連続 かつ不均質な岩盤中の水みち形成要因について、 複合材料の伝導特性を確率論的に評価する理論で あるパーコレーション理論 (Berkowitz,1998) に より検討する.パーコレーション理論の中の重要 な概念の一つに「臨界密度」がある.格子状(2) 次元または3次元)の回路において、格子点間の 連結を一本ずつ外していくと、ある時点を境に、 相対する面を連続する経路(無限経路)が消失し、 回路は導体から絶縁体に相変化する. この時の, 連結経路が非連結部を含むすべての経路に占める 割合を「臨界密度」とよぶ、臨界密度は、二次元 格子では0.55~0.65、三次元格子では、0.25~0.33 程度の値をとる(Berkowitz,1998). この概念を不



図9 亀裂ネットワーク岩盤モデル

表1 亀裂分布パラメータ

亀裂パラメータ	分布関数	検討に用いた値
三次元密度	_	5×10 ⁻⁴ (個/m ³)
方向分布	一様分布	_
半径分布	べき乗分布	b=3.5, r _{min} =5m
開口幅分布	対数正規分布	$< logt > = -4.75m, \sigma_{logt} = 0 \sim 0.5$

均質岩盤の透水構造に適用すると、均質な岩盤で は、岩盤内のすべての経路は連結しており満遍な く水が流れるのに対し、不均質性の増大につれて 実質的な通水経路が高透水経路に制限されると解 釈される.極限的には、岩盤が透水 (percolate) であるためには、臨界密度に匹敵する経路 (critical path)を通って水が流れる.すなわち、不均質性 の高い岩盤では、臨界密度以上の高透水部が「水 みち」を形成していると考えられる.図12は、図 10のモデルの内、最も不均質性の高い case4 につ いて、上位 25%の透水係数の等値面と図11 に示 した流線を重ねて表示したものである.流線が集 中する箇所 (水みち)は、等値面、すなわち「上 位 25%の透水係数が連続した構造」の内部に形成 されていることが分かる.





図11 不均質性の異なる4つのモデルの流線と圧力

case4: σ= 1.96

case3: σ= 1.0

以上から、不均質性の高い岩盤では、臨界密 度に対応する高透水経路(critical path)が、水 みちを形成することが確認された.

4. 3D プリンターモデルによる水みちの可視化

水みち構造の形成に関する数値解析結果を検 証するため、3D プリンターによる亀裂モデルを 用いた流れの可視化試験を行った.95mm× 81mm×81mmのブロック内に,前節に示した1 辺 100m の岩盤モデル (case4) を 75mm 角に縮 小した亀裂モデルをプリントした. 通水試験や トレーサー試験が可能なように、亀裂モデルの x方向上下流面に接するように注排水用のタン ク(75mm×75mm×2.5mm)を設け、配管継ぎ 手も含め全体を一体化したブロックとして一括 プリントした.モデル作成には、3D Systems 社 製の ProJet 3500 HDMAX (積層ピッチ 16µ~) を、材料には、UV 硬化プラスチック (VisiJet M3 Crystal) 用いた. 同プリンターは, 現時点で最 高レベルの加工精度を有しているが、数オーダ ーにわたる開口幅の亀裂をすべてプリントする ことは不可能であるため、開口幅を数値モデル の5倍とした上で、0.1mm~2mm (2mm 以上は 2mm で固定) の亀裂のみ (オリジナルモデルの 約54%)をプリントした.三乗則を仮定すると、 最小・最大開口幅の透水量係数の比は8000倍で あり、水理学的に有意な亀裂は、今回の 3D プ リントモデルに反映されていると考えられる. 図13に、x方向に通水しながら染料(食紅)を 投入した際の状況を示す.図12の解析結果の流 線が集中する部分に,染料が 選択的に流れてお り, 数値解析的で予測された水みちが亀裂モデ ル内でも形成されていることが確認された. ま た、3Dプリンター技術が、岩盤内の透水物質移



図12 上位25%透水係数等値面と流線との関係



図13 3Dプリンター亀裂ネットワークモデル内の染料分布 行現象の理解や可視化にとって有効であること が示された.

5. 岩盤の巨視的透水性に関する検討

岩盤内に形成される水みちによる巨視的な透 水係数への影響について,前出のパーコレーシ ョン理論により検討する. Kirkpatrick(1971)は, 異なる抵抗で構成される回路の電気伝導特性を 有効媒体理論とクリティカルパス理論により検 討した. 有効媒体理論は,媒体中を満遍なく伝 達(流動)する場合を想定した不均質性が小さ い場合を対象とした理論で、平均透水係数*k*_m は、次式の解として得られる

$$\int p(k) \frac{(k_m)}{\left(\frac{z}{2}-1\right)k_m+k} dk = 0 \quad (1)$$

ここに, *p(k)*: 透水係数分布関数, *z*: 配位数 (3 次元格子の場合 8), である. 一方, クリテ ィカルパス理論は, 臨界密度に対応する経路を 伝達(流動)する場合を想定した不均質性が大 きい媒体を対象とした理論で, 平均透水係数は 次式で表される.

$$k_m = \exp(a(\mu + 0.67\sigma)) \qquad (2)$$

ここに, $\mu, \sigma: \log_{10} k$ の標準偏差, $a = \ln 10$, である.

図14に、上記の2式で計算される平均透水係

数(巨視的透水係数)と標準偏差の関係を,算 術平均,調和平均など,一般的に用いられる平 均値,対数正規分布に従って透水係数がランダ ムに分布するモデルを用いた数値解析結果(各 100 ケース),さらには,透水試験分布と巨視的 透水係数が示された現場の事例,をあわせて示 す.

図から,上記2式で得られる巨視的透水係数 は、 σ の増加とともに片対数軸上で直線的に増 加し、クリティカルパス理論で得られる巨視的 透水係数が有効媒体理論の結果より常に大きい 値を示す.数値解析結果は、 σ が1程度までは 有効媒体理論の結果にほぼ等しく、 σ の増大と ともにクリティカルパス理論の結果に近づく. 例えば、 σ =1.5の場合、理論解、数値解析結果 とも、巨視的透水係数は対数平均の約10倍の値 を示す.すなわち、このような不均質の大きい 岩盤では、現場透水係数の対数平均で予測され



図14 局所透水係数の標準偏差と巨視的透水係数との関係(下茂他, 1987のFigure 6に追記)

る量の 10 倍の湧水が発生する可能性があるこ とを示している.一方,ブロック透水試験(σ =1.47)の結果は38倍(3方向平均), case4 モデ ずれも理論解やランダムモデルの数値解析結果 より大きな値を示している.この理由としては, 実岩盤や不連続性岩盤モデルでは、亀裂に沿っ て連続する透水性構造、すなわち理論解やラン ダムモデルでは考慮されていない「相関性」が 水みちの連続性を助長していることによると考 えられる. 以上から、透水不均質性の大きい不 連続性岩盤内においては連続する高透水亀裂に 沿って水みちが形成され、その結果、対数平均 よりもオーダー的に大きな巨視的透水係数を示 すことが明らかとなった. 図14において,標準 偏差がσ=1以上の現場データが少ない理由は、 不均質性の大きい岩盤ではグラウチングなどの 湧水抑制対策が実施されることが多く,未対策 の岩盤の透水性に関する情報を得にくいことを 物語っていると考えられる.

6. 結論

本研究で得られた結論は以下のとおりである. ①標準偏差σ<1の範囲において,巨視的透水係 数は有効媒体理論により予測可能であり,特 にσ<0.5 では,局所透水係数の対数平均にほ ぼ等しい.

- ② σ が1程度以上の透水不均質性の高い岩盤では、上位25%程度の高透水構造に沿って水みちが形成され、巨視的透水係数は、σとともに指数関数的に増加する.
- ③不連続性岩盤の巨視的透水係数は、ランダム な不均質性を仮定した同じ不均質性を有す るモデルの予測値より大きな巨視的透水係

数を示す.

- ④岩盤の透水係数分布(特に,標準偏差σ)に 関する情報は、グラウチングなどの湧水抑制 対策の必要性を検討するうえで重要である.
- ⑤X線CTや3Dプリンターによる亀裂モデル を用いた可視化技術は、不連続性岩盤内の流 体や物質移行現象を理解する上で、非常に有 用である.

なお、本研究における浸透解析には、大成建 設(株)が開発した解析コード(EQUIV_FLOW) を用いた.ここに謝意を示す.

文献

- Berkowitz, B. and Ewing, R. (1998): Percolation theory and network modeling applications in soil physics, Surveys in Geophysics, Volume 19, Issue 1, pp. 23-72.
- Kirkpatrick, S. (1971): Classical Transport in Disordered Media: Scaling and Effective-Medium Theories, Phys. Rev. Lett., Vol. 27, pp.1722-1725.
- 熊本 創・下茂道人・操上広志(2007): 幌延深地 層研究計画における地下研究施設掘削に伴う 地下水流動予測解析; 地上からの調査結果に 基づく水理地質構造のモデル化と解析, 地下 水流動解析とモデル化に関するシンポジウム 発表論文集, 地下水学会, pp.43-50.
- 三枝博光 他(2007):超深地層研究所計画にお ける地表からの調査予測研究段階(第1段階) 研究成果報告書, JAEA-Research 2007-043, p.434.
- 太田久仁雄 他(2007): 幌延深地層研究計画に おける地上からの調査研究段階(第1段階) 研究成果報告書 分冊 深地層の科学的研究, JAEA-Research 2007-044, p.337.

- 下茂道人・亀村勝美(1987):測定値における分 布を考慮した岩盤の平均透水係数の予測手法 について,第7回岩の力学国内シンポジウム 講演論文集, pp.229-234.
- Shimo, M. and Iihoshi, S. (1995): Experimental and numerical study on fluid and mass transport through fractured rocks, Proc. of 8th ISRM Congress, pp. 803-806.
- 下茂道人・山本 肇(1996):等価不均質連続体モ デルによる亀裂性岩盤の浸透流解析手法,大 成建設技術研究所報,第29号, pp.257-262.