

III-307

割れ目を含む岩石の透水性と割れ目開口幅との関係

清水建設(株)技術研究所 正会員 多田浩幸・木下直人・若林成樹

1. はじめに

岩盤の透水性と応力との関係を把握することは、地下構造物の安全性・信頼性を高める上で重要である。著者らは、岩盤の透水性と応力との関係式を求めるために、割れ目を含む岩石の透水係数の応力依存性について検討している。本研究の目的は、垂直応力の変化に伴う割れ目の透水性の変化は割れ目の開口幅の変化に依存すると考え、割れ目の透水性と開口幅との関係を調べることにある。割れ目中の流れを表す基礎式として、いわゆる3乗則(cubic law)があるが、これは割れ目を開口した2枚の平行平板で置き換えた場合に成り立つ式である。したがって、割れ目表面が滑らかでなく場合によっては充填物を含むような岩石の割れ目に、この式をそのまま適用するには問題がある。Witherspoonらは、岩石の割れ目に対しても3乗則が適用できるように、3乗則に割れ目表面の特徴を表す係数 f を導入している¹⁾。ここでは、割れ目の透水係数と割れ目閉合量を測定する室内透水試験を行い、係数 f を導入した3乗則を用いて、割れ目の透水性と割れ目開口幅との関係について調べている。

2. 割れ目を含む岩石の室内透水試験

2.1 試験方法と試料：三軸圧縮型透水試験装置を用いて、縦方向に単一割れ目を含む円柱状の岩石試料(直径：50mm)に封圧を作用させた状態で軸方向に水を流し、有効応力(封圧－間隙水圧)を1～28MPaの範囲で変化させた時の各応力レベルでの割れ目の透水係数と割れ目に垂直な方向の変位(割れ目閉合量)を同時に測定した。測定に用いた岩石は花崗岩で、試料G-1～G-3は天然の割れ目を含み、G-4は圧裂引張試験によって人工的に作成した割れ目を含んでいる。割れ目の特徴を定量的に表すために、Bartonによって提案されたJRC値を各々の試料について求めた。JRCの決定に関しては、割れ目のフラクタル次元から求める方法²⁾を用いた。表-1に求めたJRC値を示す。

表-1 試料のJRC値

試料	G-1	G-2	G-3	G-4
JRC	14	15	7	13

2.2 割れ目の透水係数と垂直応力の関係：封圧を割れ目に垂直に作用する応力とみなし、割れ目の透水係数と垂直応力の関係を図-1に示す。図中の実線は昇圧過程、破線は降圧過程の結果をそれぞれ示している。図-1から次のことがわかる。1)割れ目の透水係数は、 $10^{-6} \sim 10^{-3}$ (m/s)のオーダーの値を示している。2)どの試料も垂直応力が増加するにしたがって割れ目の透水係数は減少しているが、透水係数の応力依存性は試料によって異なっている。例えば、G-1は垂直応力が28MPaで透水係数が1MPaの値の1/10に低下しているが、G-2では1/1000まで低下している。3)降圧時の透水係数は昇圧時の透水係数より小さく、応力履歴の影響を受けている。そして、降圧時の透水係数の変化は昇圧時の1/10～1/5程度である。4)JRC値がほぼ等しいG-1、G-2、G-4の透水特性に共通する傾向はみられず、JRC値が2倍違うG-1とG-3を比較しても両者の間に顕著な相違は表れない。これは、割れ目の透水特性が割れ目の粗さだけに支配されるのではなく、他の要因にも影響されることを示している。

2.3 単位水頭当たり流量と開口幅の関係：Sundaramらは、天然の割れ目を含む花崗岩試料(直径：0.914m)の室内透水試験を行

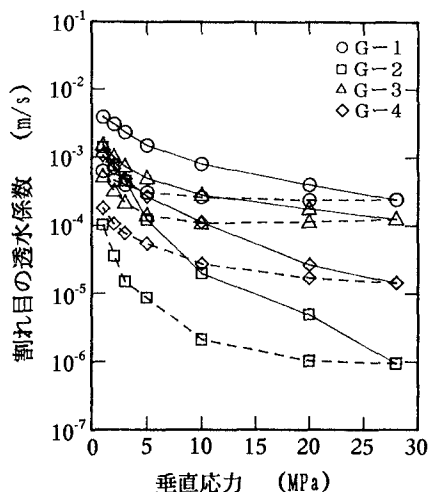


図-1 割れ目の透水係数と垂直応力の関係

い、Witherspoonらが修正した3乗則を式(1)の形で表し、

$$Q/\Delta h = (C/f)(2b_0-d)^3 \quad (1)$$

単位水頭当たり流量と開口幅の関係について報告している³⁾。本研究においても、この報告を参考にして単位水頭当たり流量と開口幅の関係に式(1)を適用した。ここで、 Q は流量、 Δh は圧力水頭差、 C は流れ系の形状と流体に依存した比例定数、 f は割れ目表面の特徴を表す係数、 $2b_0$ は割れ目の初期開口幅、 d は割れ目閉合量をそれぞれ示している。本試験の流れ系は直線流れなので、 C は式(2)により計算される。

$$C = (W/L)(\rho g/12\mu) \quad (2)$$

ここで、 W は割れ目の幅、 L は割れ目の長さ、 ρ は流体の密度、 g は重力加速度、 μ は流体の粘性係数である。昇圧および降圧の各垂直応力における単位水頭当たり流量とそれに対応する割れ目閉合量の測定データを式(1)で最小自乗近似し、係数 f と初期開口幅 $2b_0$ を決定した。図-2は各試料についての単位水頭当たり流量と割れ目開口幅の関係を示している。図中の f と $2b_0$ は最小自乗法で決定した値であり、曲線はその値を用いた式(1)の近似曲線、○は試験結果をそれぞれ表している。なお、割れ目閉合量は垂直応力が1MPaの時の値を基準値($d=0.0$)として整理している。図-2から次のことが言える。1)どの試料の試験結果も式(1)の近似曲線とよく調和している。2)Witherspoonらは人工的な割れ目の f の値を $1.04 < f < 1.65$ と報告し、Sundaramは天然の割れ目の f について $f=1.78$ と報告している。本試験結果の f は $1.7 < f < 38.9$ であり、全体的に既往の報告よりも大きな値となっている。

3. まとめ

割れ目を含む岩石の室内透水試験を行い、割れ目の透水係数の応力依存性を検討するために、割れ目の透水性と開口幅の関係を調べた。その結果、次のことが明らかになった。

①割れ目の透水係数が $10^{-6} \sim 10^{-3}$ (m/s)の範囲で、昇圧時の透水係数の低下が1~3オーダーの試験結果に対して、係数 f を導入した3乗則を適用することにより、単位水頭当たり流量と割れ目開口幅との関係をよく説明できた。

②本試験結果から得た係数 f は $1.7 < f < 38.9$ であり、既往の研究よりも大きな値となった。

参考文献

1)Witherspoon,P.A. et al.(1980): Validity of cubic law for fluid flow in a deformable rock fracture. Water Resour.Res. 16,6,1016-1024. 2)若林,福重(1991): 岩石不連続面のフラクタル次元とせん断強度に関する実験的研究, 第23回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集,132-136. 3)Sundaram,P.N. et al.(1987): Laboratory investigation of coupled stress-deformation-hydraulic flow in a natural rock fracture. 28th US Symposium on Rock Mechanics,University of Arizona,585-592.

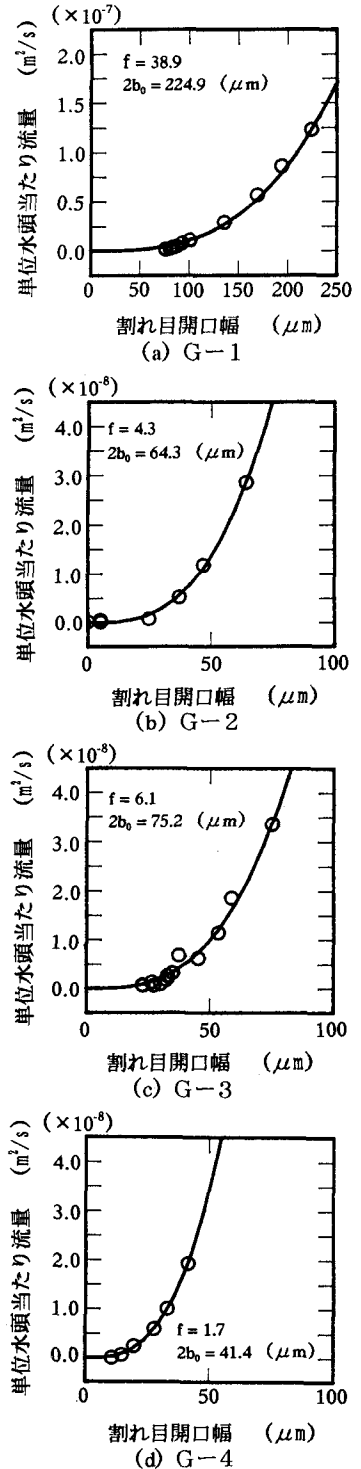


図-2 単位水頭当たりの流量と割れ目開口幅の関係