

凹凸を考慮した不連続面モデルの提案と グラウト浸透解析における適用性

井関 恭輔^{1*}・吉津 洋一²・岸田 潔¹

¹京都大学大学院 工学研究科都市社会工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂C1)

²株式会社ニュージェック

*E-mail: iseki.kyosuke.66a@st.kyoto-u.ac.jp

本研究では、単一き裂を含む花崗岩供試体CT画像から抽出した不連続面情報に対してフーリエ変換を適用することで、平行平板では表現できない不連続面の凹凸を簡便に考慮したき裂面簡易モデルを提案し、そのモデルを用いて浸透流解析を実施した。その結果、上部き裂面と下部き裂面の凹凸の位相差によって、流量やレイノルズ数に影響があることが確認された。また、き裂面簡易モデルに対して、慣性項を考慮したグラウト注入モデルによる浸透解析を行い、グラウトの浸透における凹凸の影響について検討を行った。その結果、グラウトの注入初期の浸透速度は位相差によって大きく影響を受け、また、設定注入圧によるグラウト浸透への影響は、亀裂面開口幅による影響より小さいことが確認された。

Key Words : rock fracture, grout, roughness, CTimage, FFT

1. はじめに

ダム基礎岩盤における漏水の防止、高レベル放射性廃棄物の地層処分等において、岩盤不連続面の透水性の正確な評価は非常に重要である。また、主に止水性の向上のため、岩盤改良には一般的にグラウチング工法が適用されており、現在に至るまで数々の実績を残している。岩盤不連続面における透水性やグラウト充填プロセスの評価は、平行平板を用いた模型実験¹⁾などがこれまでも多く行われてきた。また、解析においては局所平行平板モデルを用いた解析²⁾などが一般的に行われている。しかしながら、実際の岩盤不連続面内き裂は、大小様々な凹凸を有しており、地下水の流体挙動やグラウト材の充填プロセスは、不連続面内の凹凸に大きな影響を受けることが考えられるため、厳密には平行平板モデルによる解析は適切でない。

そこで本研究では、μフォーカスX線CT装置により撮影された単一き裂を含む花崗岩供試体CT画像に対し高速フーリエ変換 (Fast Fourier Transform:FFT) 法を適用することで、平行平板モデルでは表現できない凹凸を考慮したき裂面簡易モデルを提案する。さらに、き裂面簡易モデルに対して、透水解析およびグラウト浸透解析を行うことで、凹凸や位相差がグラウトの浸透速度や注入圧にどのような影響を与えるのか検討を行う。

2. FFT法を適用したき裂面簡易モデル

(1) μX線CT装置による不連続面情報の抽出

使用した供試体は、圧裂による縦割れき裂を有する花崗岩円柱供試体であり、直径が 15 mm、高さが 30 mm であった。撮影はμX線CT装置の三軸セル内に設置し行われた。撮影条件を表-1 に示す。また、図-1 に得られた単一き裂供試体の凹凸形状を、図-2(a) にき裂面下部の

表-1 撮影条件

管電圧[kV]	130	Matrixサイズ	1024 ²
管電流[μA]	70	Pixelサイズ[mm]	0.01695
スライス厚[mm]	0.034	積算枚数	10

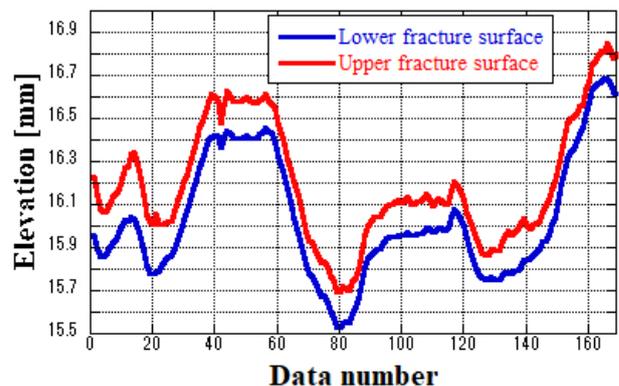


図-1 単一き裂供試体の凹凸形状

凹凸のコンター図を示す。これらの各種不連続面情報は、撮影で得られたCT値データに対し Region Growing 法³⁾を適用することで取得した。Z₂法⁴⁾により求めた JRC は、き裂面上部で3.980、下部で3.475であった。

(2) FFT法の適用

この供試体不連続面情報に対し、FFT法を適用することで、不連続面の凹凸を考慮した1次元き裂面簡易モデルを作成した。FFT法は、他のスペクトル推定法と比較して非常に計算速度が速いため、計算負荷の短縮に最適である。しかし、データ数が2ⁿ個でなくては扱えないため、データ数により打ち切り誤差が生じる場合がある。そのため通常、窓関数により平滑化が行われるが、ラフネスに人工的な操作を加えることは適切ではないため、本研究では直接FFT法を適用している。

本研究で用いた手順としては、まずX線CT撮影により抽出した供試体不連続面情報のうち、供試体水平断面方向の凹凸を平均化する。つぎに、供試体鉛直断面方向の凹凸に対しFFT法を適用する。この際、FFT法はデータ数が2ⁿ個でなくては適用できない。本研究で用いた透水方向のデータ数は169個であるため、データ数を128個で打ち切って適用した。さらに、パワースペクトルが最大となる周波数、振幅を抽出する。最後に、式(1)に表すsin関数でき裂面の凹凸を表現した。表-2にFFT法で用いた各種データを示す。

$$y(x) = D + A_x \times \text{Sin}(2\pi \cdot f \cdot t \cdot x + \varphi_x) \quad (1)$$

ここで、 $y(x)$ は標高 [mm]、 D は元の供試体き裂面下部の標高の平均 [mm]、 A_x は振幅 [mm]、 f は周波数、 t はサンプリング長 [mm]、 x はデータNo、 φ_x は初期位相である。き裂面上部における D は、水理学的開口幅 D_h [mm]を用いて、 $D + D_h$ で表される。

これらの手順により、本研究で用いた供試体のき裂面上部と下部の鉛直断面方向の凹凸はそれぞれ、表-3に示す1次元のsin関数に変換される。水理学的開口幅 D_h の求め方については3章で述べる。また、図-2(b)にFFT法適用後のき裂面簡易モデル下部の凹凸コンター図を、図-3にき裂面簡易モデルの凹凸形状を示す。

表-2 FFT分析条件

データ数	データ間隔[mm]	周波数間隔
128	0.1775	0.044

表-3 パワースペクトル最大時の各数値

	周波数	振幅[mm]	位相[°]
き裂面上部	0.11	0.199	-44.17
き裂面下部	0.11	0.205	-41.92

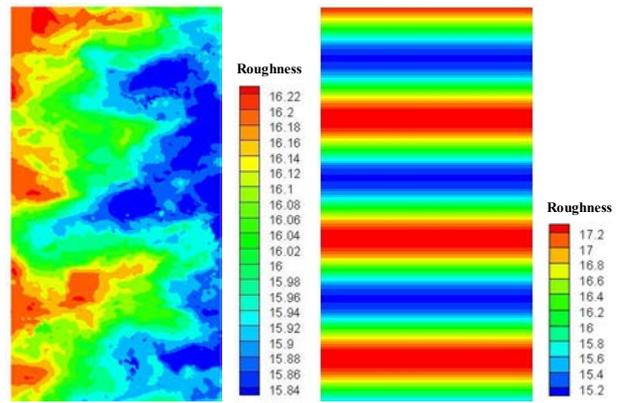


図-2 き裂面下部凹凸コンター図

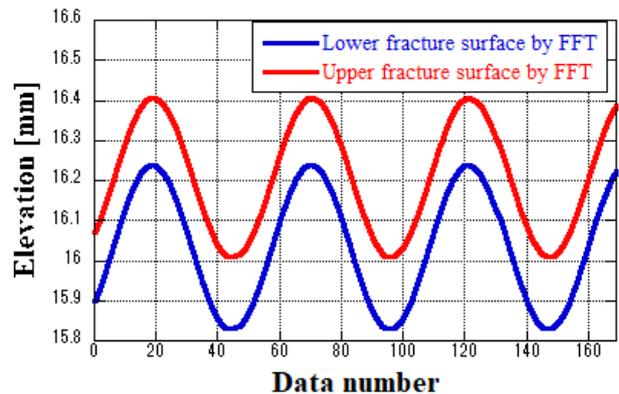


図-3 き裂面簡易モデルの凹凸形状

3. 浸透流解析

本研究では、Kishida, et al.⁵⁾で用いられた平面二次元モデルにより、X線CT撮影により抽出した単一き裂面データ、水理学的開口幅を適用した平行平板およびき裂面簡易モデルに対して浸透流解析を行った。

(1) 解析モデル概要

岩盤不連続面の地下水流動は、非常にゆっくりした流れであるという前提のもと、主としてダルシー流れと近似し解析されてきた。しかし、これまでの研究で、局所的にはレイノルズ数が大きくなる部分が存在することが明らかにされており⁶⁾、解析においても解析メッシュの小さいモデルで行う必要がある。そのため本研究では、不連続面を細かくメッシュに区切り、同一メッシュ内では平行平板間流れと仮定して解析を行った。不連続面内の流れの支配方程式としては、直交座標表示で仮定された開口幅において、三次元の連続式と運動量方程式を解くことによって求められる平面二次元流れの連続式と運動方程式を用いた、平面二次元モデルを適用している。数値解析法としては、スタッガード格子を用いた有限体積法により、流れを管路状態と仮定したモデルとなっており、ナビヤ・ストークス (NS) 式において圧力項、粘

性項、慣性項が考慮されているため、非ダルシー流れにおいても誤差の小さい解析結果が得られる。

解析は境界条件として水頭差を与えて浸透流解析を行っており、水頭差 0.5, 1.0, 2.0, 3.0 cm の4ケースを行った。また、レイノルズ数 (Re) が十分に小さい層流状態では式(2)に示す三乗則が成立する。

$$Q = \frac{D_h^3 W}{12\mu} \frac{dh}{dx} \quad (2)$$

ここで、 Q は流量、 W はき裂幅、 μ は流体の粘性係数、 D_h は水理学的開口幅、 dh/dx は動水勾配である。この式(2)を用いて浸透流解析の結果から水理学的開口幅の算定を行い、その値を用いた平行平板モデルについても浸透流解析を行った。

(2) 単一き裂面および平行平板モデル解析結果

X線CT撮影から得られた単一き裂不連続面情報を用いて実施した浸透流解析の結果を図-4、表-4に、水理学的開口幅を適用した平行平板解析結果を表-5に示す。表-4、表-5のReは、不連続面内全体(解析対象領域)における平均のReである。また、図-4(a)は単一き裂データ解析における水頭差2.0cmでの定常状態での流速ベクトル図、図-4(b)はReの不連続面内空間分布である。Reは、解析より得られた個々のセルでの流量から式(3)を用いて算出した。

$$Re = \frac{\overline{\rho u D}}{\mu} = \frac{\rho Q}{\mu W} \quad (3)$$

ここで、 ρ は流体密度、 \overline{u} はき裂内平均流速、 D はき裂内開口幅である。Reを求める代表長さを D とすることは、Kishida et al.⁹⁾を参照した。表-4より、水頭差が増加するに従いReが増加することが確認できる。平行平板においても、表-5より単一き裂と比較して流量に差異はみられるが、水頭差が増加すると流量も増加し、不連続面体の平均Reはほとんど変わらない。一方で図-4より、単一き裂不連続面内の流れは、き裂の形状に左右

表-4 単一き裂解析における流量とRe

水頭差 [cm]	0.5	1.0	2.0	3.0
流量 [cm ³ /s]	3.28×10 ⁻³	6.49×10 ⁻³	1.18×10 ⁻²	1.85×10 ⁻²
Re	0.243	0.482	0.874	1.37

表-5 平行平板モデル解析における流量とRe

水頭差 [cm]	0.5	1.0	2.0	3.0
流量 [cm ³ /s]	3.04×10 ⁻³	6.14×10 ⁻³	1.11×10 ⁻²	1.73×10 ⁻²
Re	0.240	0.484	0.876	1.37

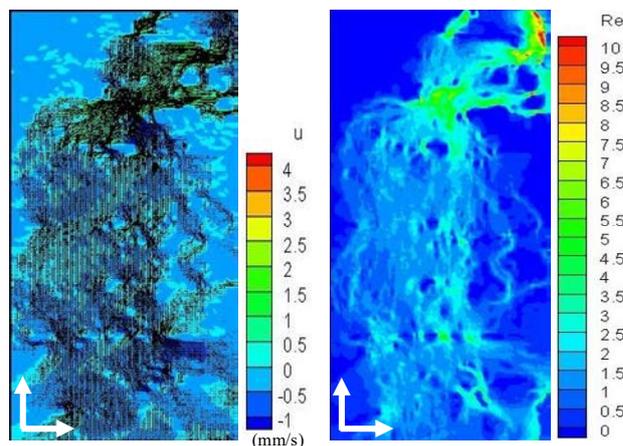


図-4 水頭差2.0cmでの単一き裂浸透流解析結果

され一様ではなく、局所的な流れが卓越することが確認でき、水頭差 2.0, 3.0 cm では、局所的に $Re > 10$ となる部分もみられた。

(3) き裂面簡易モデル解析結果

不連続面内の局所的な流れの原因の一つに、凹凸形状が考えられ、特にグラウト流体の浸透において、き裂面の凹凸は非常に重要な一つの要素である。き裂面簡易モデルに対するグラウト浸透解析は4章で述べるが、その前段階として、単純な凹凸が流量やReにどのような影響を与えるか把握するため、提案したき裂面簡易モデルに対し浸透流解析を行った。

解析ケースは水頭差0.5cmのみで行い、開口幅には水理学的開口幅を適用した。また、位相差による不連続面

表-6 き裂面簡易モデル解析結果

	平均開口幅 [mm]	流量 [cm ³ /s]	き裂面初期位相 [°]	平均 Re	最大 Re
Case-1-1	0.121	2.96×10 ⁻³	上部: -44.17, 下部: -41.92	0.233	0.312
Case-1-2	0.122	2.92×10 ⁻³	上部: -41.92, 下部: -41.92	0.230	0.283
Case-1-3	0.122	2.94×10 ⁻³	上部: -41.92, 下部: -36.92	0.232	0.290
Case-1-4	0.121	2.99×10 ⁻³	上部: -41.92, 下部: -38.92	0.235	0.329
Case-1-5	0.120	3.05×10 ⁻³	上部: -41.92, 下部: -40.92	0.240	0.379
Case-1-6	0.122	2.91×10 ⁻³	上部: -41.92, 下部: -42.92	0.229	0.289
Case-1-7	0.123	2.89×10 ⁻³	上部: -41.92, 下部: -44.92	0.228	0.309
Case-1-8	0.123	2.86×10 ⁻³	上部: -41.92, 下部: -46.92	0.226	0.346

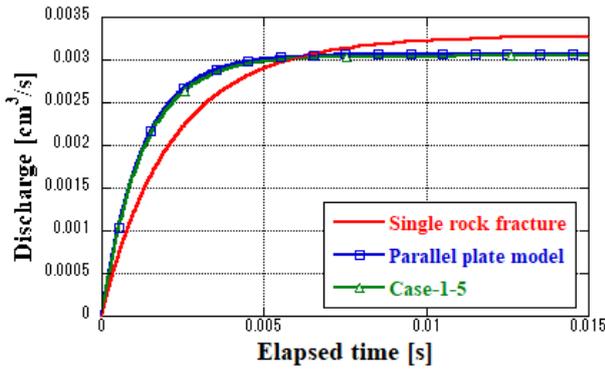


図-5 浸透解析における流量の時間変化比較

内流れへの影響を調べるため、き裂面上部の初期位相 ϕ_x をき裂面下部の初期位相と合わせ、き裂面下部の位相を 1° ずつ、 -5° から 5° まで変位させて、計 12 ケース浸透流解析を行った。その結果の一部を表-6 に示す。き裂面簡易モデルは、平行平板モデルと比較して1次元的是ではあるが透水方向に凹凸を有するため、不連続面内流れは一樣ではなく、Re 数も最小 voxel と最大 voxel を比較して2倍以上差が出た。また、平行平板モデルにおいては y 方向の流速は0であるが、き裂面簡易モデルにおいては凹凸の影響により、 y 方向にも流速を確認することができた。位相差による不連続面内流れへの影響に関して、流量、Re 数ともに変化が確認された。流量に関しては、Case-1-5が最大であったが、平均開口幅は最小である。このことから、流量は開口幅だけに影響を受けるのではなく、位相差や凹凸の形状にも依存することがわかる。同様に、Case-1-2とCase-1-8の比較により、流量の少ないCase-1-8の方がCase-1-2より最大Re数が大きいことから、Re数も位相差や凹凸形状に大きく依存する。図-5に、水頭差0.5 cmの際の単一き裂面、平行平板モデル、Case-1-5に対する透水解析結果における流量の時間変化を示す。流量の時間変化に関しては、平行平板モデルとき裂面簡易モデルで差異は確認できなく、単一き裂面の結果と比較して、定常状態に早く移行した。

4. グラウト浸透解析

本研究では、Kishida, et al.¹⁾ で用いられた単一き裂平行平板グラウト注入モデルを使用し、3章と同じ平行平板モデルに対し浸透解析を行った。また、き裂面簡易モデルに対しても浸透解析を行うため、上記モデルの導出に用いられているNS式において、平行平板のため考慮されていない圧力項を考慮したグラウト注入モデルにより、単一き裂面とき裂面簡易モデルに対して同様にグラウト浸透解析を行った。

(1) 解析モデル概要

Kishida, et al.¹⁾は、非ニュートン流体であるグラウト流体を、ある降伏応力以上の力を受けない限り流れないビンガム流体として扱い、図-6に示すような単一き裂平行平板グラウト注入モデルにより解析を行った。

ある基準面から、き裂面下側壁面の高さを z_b 、上側壁面の高さを z_s とすると、Mgaya, et al.⁷⁾ は、単一き裂における浸透方向のNS式を次式(4)のように表している。

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial \beta M^2 / D}{\partial x} + \frac{\partial \beta MN / D}{\partial y} = -\frac{\partial}{\partial x} \cdot \left(\frac{p_D}{\rho} D + \frac{gD^2}{2} \right) + \frac{p_D}{\rho} \cdot \frac{\partial z_s}{\partial x} - \left(\frac{p_D}{\rho} + gD \right) \cdot \frac{\partial z_b}{\partial x} - \frac{\tau_{sx}}{\rho} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{\partial z_s}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial z_s}{\partial y} \right)^2} - \frac{\tau_{bx}}{\rho} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{\partial z_b}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial z_b}{\partial y} \right)^2}$$

ここで、 τ は壁面せん断抵抗、 p は圧力、 ρ は流体密度、 M 、 N は流量フラックス、 p_D はき裂面上側圧力、 β は運動量補正係数である。

平行平板モデルでは式(4)において、壁面の凹凸による影響がないため、 $\frac{\partial z_s}{\partial x} = \frac{\partial z_b}{\partial x} = 0$ である。さらに、 y 方向の流れを想定しない1次元流れの場合、図-6において、幅 H [m] を有する水槽左側を基準面とし、管軸上の運動方程式を解くと、グラウト入口圧力 P_0 [Pa] と注入圧力 P_g [Pa] の関係は式(5)で表すことができる。

$$\left[\frac{d^2 I}{dt^2} + \frac{1}{H} \left(\frac{dI}{dt} \right)^2 \right] \cdot \frac{H}{2} = -\frac{P_0}{\rho} + \frac{P_g}{\rho} \quad (5)$$

また、ビンガム流体では、ニュートン流体と異なり浸透速度が一定となる領域が存在する。その領域の幅を $2Z$ [m] とする。グラウトが浸透した距離 I [m] での壁面せん断抵抗を τ [Pa] とし、さらに地下岩盤の間隙水圧 P_w [Pa] が十分に小さく無視できるとすると、グラウト浸透式(6)を導くことができる。これらと、Hässler⁸⁾の平行平板内グラウト浸透流速の式(7)と合わせて、式(5)、(6)、(7)の3式により、単一き裂平行平板グラウト注入モデルは構築される。

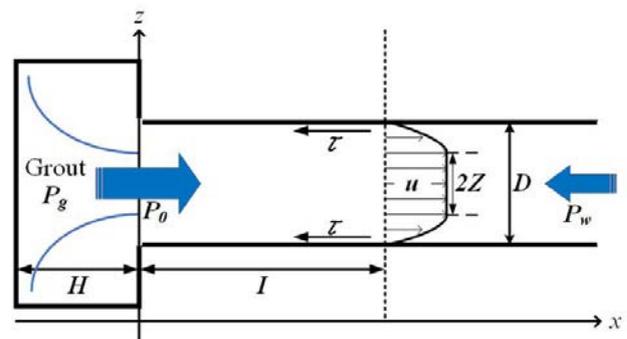


図-6 単一き裂平行平板グラウト注入モデル概念図

$$(H + 2I) \cdot \frac{d^2 I}{dt^2} + \left(\frac{dI}{dt} \right)^2 + \frac{2\tau_0}{\rho Z} I = \frac{2P_g}{\rho} \quad (6)$$

$$\frac{dI}{dt} = -\frac{dp}{dx} \cdot \frac{D^2}{12\mu} \cdot \left\{ 1 - 3\frac{Z}{D} + 4\left(\frac{Z}{D}\right)^3 \right\} \quad (7)$$

ここで、 μ [mPa*sec] は粘性度、 w [Pa] は降伏応力である。

一方、き裂面簡易モデルに対するグラウト浸透解析においては、壁面の凹凸を考慮する必要がある。そのため、式(4)における圧力項 $\frac{\partial \sigma_x}{\partial x}$, $\frac{\partial \sigma_b}{\partial x}$ を、浸透距離 I をデータ間隔である 0.1775 mm で分割し、先端部から区間毎に算出。求めた壁面上部と下部の圧力を式(4)のNS式に代入することで、管内部の圧力を逐次計算する手法をとった。

解析に用いたグラウト材の物性値を表-7に示す。平行平板モデル浸透解析では No.1, No.2 両方のグラウト材を、き裂面簡易モデルに対する浸透解析では No.1 のグラウト材のみ解析で扱った。また解析条件として、平行平板モデル解析は、設定注入圧 P_g を 0.5, 1.0, 2.0 [MPa]、開口幅 D を 1.0, 3.0, 15.0 mm と変えることで計18ケースを行った。き裂面簡易モデル解析は、平均開口幅を 1.0 mm で固定し、初期位相を変位させることで、単一き裂面データと合わせて計7ケースを行った。

(2) 平行平板モデルグラウト浸透解析結果

図-7, 図-8 は、 $P_g = 1.0$ [MPa] に固定し開口幅を変化させた解析結果であり、図-7 が浸透速度の、図-8 が壁面せん断抵抗の時間変化である。各開口幅とも水セメント比の低い No.1 のグラウト材の方が浸透速度は遅く、壁面せん断抵抗は大きく、その差は開口幅が大きいほど顕著に表れている。また、開口幅 15.0 mm の解析では、入口圧力の上昇が緩やかであった。これは、開口幅が大きいいためビンガム流体の速度一定領域 Z が大きくなり、注入初期の浸透速度が大きくなったためであると考えられる。一方、開口幅を固定し P_g を変化させた解析結果は、各ケースほとんど差異がみられなかった。1次元平行平板グラウト浸透解析においては、設定注入圧によるグラウト浸透への影響は開口幅の影響より小さいと言える。

(3) き裂面簡易モデルグラウト浸透解析結果

解析を行った7ケースのうちの一部の初期位相を表-8に示す。また、今回の解析モデルは1次元であるため、単一き裂不連続面情報を直接利用することはできない。そのため、供試体水平断面方向の開口幅データを平均化することで解析を行った。

図-9 は設定注入圧 $P_g = 0.5$ MPa 時の単一き裂面と Case-2-1 の浸透速度の時間変化比較図である。平均開口幅は 1.0 mm と同じであるが、単一き裂面の方が4倍程度

表-7 解析に用いたグラウト材の物性

	水セメント比	塑性粘度 [mPa*s]	降伏応力 [Pa]	密度 [kg/m ³]
No.1	0.8	6.0	5.746	1611
No.2	1.5	5.0	0.958	1376

表-8 き裂面簡易モデル解析ケース

	き裂面初期位相 [°]
Case-2-1	上部 : -44.17, 下部 : -41.92
Case-2-2	上部 : -44.17, 下部 : -54.17
Case-2-3	上部 : -44.17, 下部 : -44.17
Case-2-4	上部 : -44.17, 下部 : -34.17

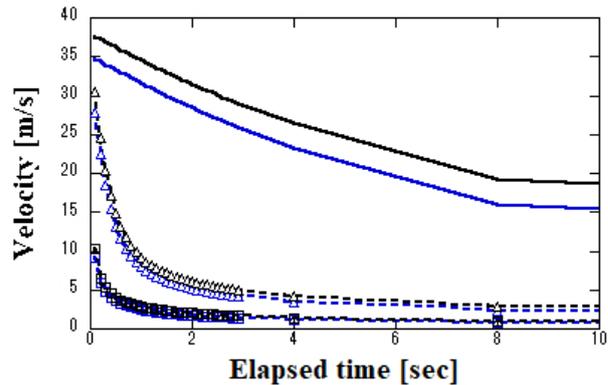


図-7 設定注入圧 1.0 MPa 固定時の速度の時間変化

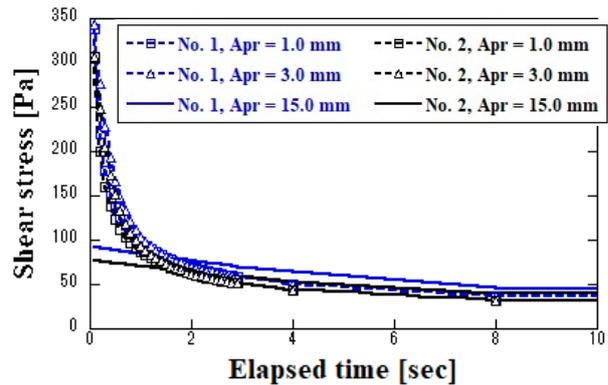


図-8 設定注入圧 1.0 MPa 固定時のせん断抵抗の時間変化

浸透速度が速い。これは、単一き裂面の凹凸は微小であり、き裂面簡易モデルと比較すると壁面せん断抵抗が小さいこと、今回のモデルは1次元での解析であるため、深さ方向の浸透速度を考慮できず、結果として速度一定領域 Z が小さくなったことが原因として考えられる。また図-10より、凹凸の位相差によってグラウトの浸透速度が変化している。浸透速度の低下が早まっている部分があるが、これは壁面によりグラウトが水槽側に圧力を受けたからであると考えられる。設定注入圧による影響は、平行平板モデル解析と同様に少なかった。これらの結果、今回用いた1次元解析モデルでは、グラウトの浸透速度を過大評価してしまうこと、位相差はグラウトの初期浸透速度に大きな影響を与えることが確認された。

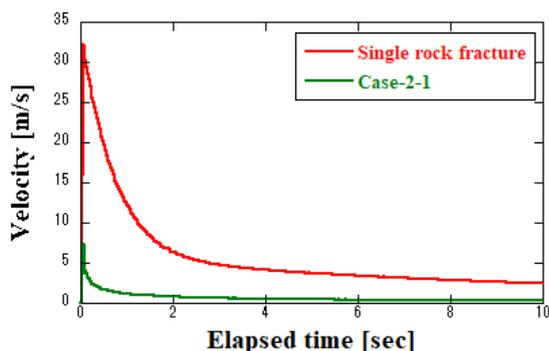


図-9 元の供試体データとき裂面簡易モデルのグラウト浸透解析における浸透速度の時間変化比較

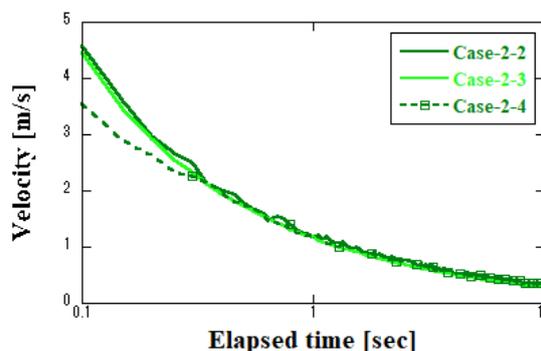


図-10 位相差を与えなき裂面簡易モデルのグラウト浸透解析における浸透速度の時間変化比較

5. まとめ

本研究では、不連続面内の凹凸を表現するため、X線CT撮影により取得した不連続面情報に対してFFT法を適用することで、凹凸を有するき裂面簡易モデルを提案した。さらに、き裂面簡易モデルに対して浸透流解析とグラウト浸透解析を行い、流体の浸透に対する凹凸や位相差の影響について考察を行った。浸透流解析では、流量やRe数は、開口幅だけではなく、凹凸形状や位相差にも大きな影響を受けることが確認できた。グラウト浸透解析では、設定注入圧による影響より小さいことが確認された。また、ビンガム流体としてグラウト流体を扱う場合、深さ方向の浸透速度を考慮しなくては、グラウトの浸透速度を過大評価してしまうこと、凹凸の位相差は、不連続面内入口の開口幅や壁面圧力を左右し、グラウトの初期浸透速度に大きな影響を与えることが確認された。

参考文献

- 1) Kishida, K., Kobayashi, K., Hosoda, T., Fujita, T., Kishi, H., Kuzuha, Y., Nobuto, J.: Development of grout injection model to single fracture in considering inertia term and its application on parallel plate experiments, *Journal of the Society of Materials Science*, 61(3), pp. 245-252, 2012.
- 2) 岸裕和, 小林薫, 角江俊昭: 節理性岩盤におけるグラウト注入モデルに基づく一考察, *地盤工学ジャーナル*, Vol 13, No. 4., pp. 359-378., 2018.
- 3) Rosenfeld, A., Kak, A. C.: *Digital Picture Processing*, San Diego, CA, Academic Press. 1982.
- 4) Tse, R., Cruden, D. M.: Estimating joint roughness coefficients, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts.*, Vol 16., No 5., pp. 303-307, 1979.
- 5) Kishida, K., Mgaya, P., Ogura, K., Hosoda, T.: Flow on a single rock fracture in the shear process and the validity of the cubic law examined through experimental results and numerical simulations, *Soils and Foundations*, 49(4), pp. 597-610, 2009.
- 6) Kishida, K., Sawada, A., Yasuhara, H., Hosoda, T.: Estimation of fracture flow considering the inhomogeneous structure of single rock fractures, *Soils and Foundations*, 53(1), pp. 105-116, 2013.
- 7) Mgaya, P., Hosoda, T., Kishida, K.: Estimation of flow behavior on rock joints using the depth averaged flow model, *Journal of Applied Mechanics*, Vol 7, No.2, pp. 1013-1021, 2004.
- 8) Hässler, L.: *Grouting of Rock-Simulation and Classification*, PhD Thesis, Royal Institute of Technology, 1991.

Single Rock Fracture Modelling through CT Data and Its Application for Grouting Injection Flow

Kyosuke ISEKI, Yoichi YOSHIZU and Kiyoshi KISHIDA

This study propose a simplified single rock fracture model that can express the roughness of a rock fracture by applying a fast Fourier transform (FFT) to the rock fracture, using information from microfocus X-ray CT, and then conduct a permeability analysis of it. As a result, it is confirmed that the flow rate and the Reynolds number are affected by the phase difference between the roughness of the upper and lower fracture surfaces. In addition, a grouting injection analysis, considering the inertia term, is conducted for the simplified model to study the effect of roughness and the phase difference on the grouting permeability. It is seen that the injection rate of grouting at the initial stage is greatly affected by the phase difference and that the effect of the established injection pressure on the grouting permeability is smaller than the effect of the width of the open fracture.