

変形に伴う単一亀裂の透水特性の変化に対する統計的手法の適用

井上純哉¹・金亨穆²

¹正会員 工学博士 東京大学講師 大学院工学系研究科社会基盤工学専攻 (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

²正会員 工学博士 東京大学研究員 大学院工学系研究科 (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

本研究では、亀裂開口幅の統計的パラメータが既知の問題を対象とし、せん断に伴う単一岩盤亀裂内の有効透水量係数の変化を、解析的に近似解を求めることで評価することを目的とした。得られた近似解を用いることでせん断変形に伴う亀裂のダイレイションに起因する平均開口幅及び透水量係数の急激な増加を説明し、表面形状の自己相関特性による変化の特徴を示した。本研究で提案する手法を用いることで、せん断変形に伴う有効透水量係数における異方性は、せん断変形の初期段階では確かに生じるものの、せん断変位が表面形状の相関長より十分大きくなるに従い、等方へ収束することが示された。求めた結果の妥当性は、モンテカルロシミュレーションとの比較・検証により示された。

Key Words : *single rock joint, anisotropy, permeability, shear, correlation function*

1. はじめに

岩盤内地下水の流動を把握することは、高レベル放射性廃棄物の地層処分安全性を評価する上において非常に重要な問題となっている。特に亀裂性岩盤では大部分の水が亀裂内を流れるため、亀裂ネットワーク内の流れを把握することが求められているわけであるが、そのためには亀裂ネットワークの構成要素である単一亀裂内の流れの特性を把握する必要がある。そのため、単一岩盤亀裂内流れの特性を把握することを目的にした数多くの研究が国内外で行われている^{1),2),3),4),5),6),7),8),9),10)}。その結果、岩盤亀裂内流れは簡略化された平行平板モデルと異なり、多数の水道を持ちながらチャンネル化されることが知られ、亀裂の透水特性は亀裂表面の起伏形状に大きく起因することが明らかになっている。

岩盤亀裂の透水特性は元々の起伏形状のみならず、亀裂の変形にも大きく左右されると考えられている。例えば、核廃棄物の地層処分施設の建設に伴う掘削空洞の周辺では、応力再分配による亀裂の変形により、二桁ほど透水係数も増加すると考えられている¹¹⁾。それに関連し、特に粗い表面を持つ岩盤亀裂の透水特性においては、せん断変形に伴うダイレイションの影響が非常に大きいことが多くの研究者によって報告されている^{12),13),14),15)}。Esakiら¹⁶⁾及びChenら¹⁷⁾は岩盤亀裂を用いたせん断透水実験を行い、数mm程度のせん断変位でも透水係数は急激に増加することを報告している。

また、亀裂内流れには異方性が存在すること、更に

その異方性はせん断方向と密接な関係を持つことがいくつもの実験結果から報告されている。Gentierら¹⁸⁾は初めて岩盤亀裂内流れの異方性についての報告を行い、続いてYeoら¹⁹⁾もせん断方向に直交する方向への流れの増加が平行する方向より顕著であることを発表している。しかしながら、室内実験で使われる亀裂の大きさには限界があり、彼らの実験は初めから卓越した透水チャンネルを有する亀裂を用いて行われたため、亀裂内透水特性の異方性についての一般的な見解にはまだ議論の余地があると考えられる。

一方、岩盤亀裂内の透水に対する解析的なアプローチには、一般に支配方程式としてレイノルズ方程式を用いたシミュレーションが広く用いられている^{20),21)}。室内実験、特に半径方向流れ実験より線形方向流れ実験においては、せん断方向に直交する方向への流れの計測は非常に困難であることから、このような数値解析手法を用いた方法は非常に有効であると考えられ、同一亀裂に対し境界条件を変更することで、流れの方向により透水量が大きく異なるが報告されている^{22),23)}。しかし、このような数値解析のためには、亀裂の表面形状および上面と下面の隙間に形成される開口幅をランダムに作成し、十分に離散化する必要がある。そのため、統計的に妥当と考えられる結果を得るためには、膨大な数のサンプルに対してモンテカルロシミュレーションを行う必要があり、また、その離散化方法によっては解析結果は大きく変わることも考慮する必要がある。

本研究ではレイノルズ方程式を統計的手法を用いて解くことにより求められた亀裂内透水量係数の解析的

な近似式を用い、せん断に伴う岩盤亀裂内有効透水性および異方性の変化を、解析的に検討することを目的にした。

2. 表面形状と力学及び水理学特性

本研究では、亀裂表面の起伏形状における相関長より十分に大きい亀裂を対象に定式化を行う。これにより、亀裂表面形状はトレンド項 $\overline{A(x)}$ と変動項 $A'(x)$ に分離することが可能となる。ここでは、トレンド項 $\overline{A(x)}$ として3次元空間で平面となる物を考える。実際の岩盤内の亀裂形状は非常に不規則であるため、亀裂全体を一つの平面で近似することは不可能であるが、亀裂表面形状の相関長の十倍程度の部分的な領域ではほぼ平面と考え解析を行った。

(1) せん断変形と開口幅の分散及び自己相関関数

まず、上面と下面が平行に保たれた亀裂を考える。ここでは亀裂面に平行な面に XY 平面を置き、図-1 に示すような座標系を考える。亀裂面に平行な面とは、トレンド項 $\overline{A(x)}$ と平行な面を指す。このとき、亀裂の上面及び下面の z 軸方向の高さを $A^+(x, y)$ と $A^-(x, y)$ とすると、平均値 $\overline{A^+}$ 、 $\overline{A^-}$ と変動項 $A'^+(x, y)$ 、 $A'^-(x, y)$ により、 $A^+(x, y)$ と $A^-(x, y)$ はそれぞれ

$$\begin{aligned} A^+(x, y) &= \overline{A^+} + A'^+(x, y) \\ A^-(x, y) &= \overline{A^-} + A'^-(x, y) \end{aligned} \quad (1)$$

と表される。従って、上面と下面の隙間に形成される亀裂開口部の幅は、上面と下面の高さの差として

$$\begin{aligned} a(x, y) &= \overline{A^+} + A'^+(x, y) - \overline{A^-} - A'^-(x, y) \\ \text{ただし、} \quad \overline{a} &= \overline{A^+} - \overline{A^-} \end{aligned} \quad (2)$$

で与えられる。

今、亀裂の上面と下面の起伏形状の統計的特性が分かっており、以下の式で与えられる起伏形状の相関関

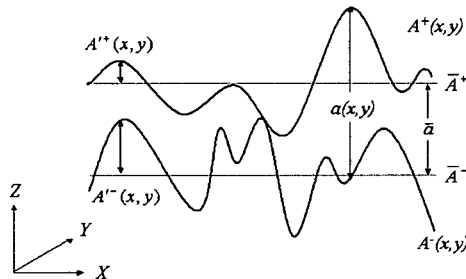


図-1 亀裂面と座標軸; X及びY軸は同一平面上に存在し XY 表面は $\overline{A^+}$ 及び $\overline{A^-}$ と平行する

数 Cor_{A^\pm} 、 $Cor_{A^+A^-}$ が既知であるとする:

$$Cor_{A^\pm}(x, y) = E [A'^{\pm}(x + \xi, y + \eta) A'^{\pm}(\xi, \eta)] \quad (3)$$

$$Cor_{A^+A^-}(x, y) = E [A'^+(x + \xi, y + \eta) A'^-(\xi, \eta)] \quad (4)$$

ここで、 $E[\cdot]$ は期待値を表している。このとき、式(2)より、亀裂開口幅分布 $a(x, y)$ における自己相関関数 Cor_a は、亀裂形状の相関関数 $Cor_{A^\pm}(x, y)$ 及び $Cor_{A^+A^-}(x, y)$ を用いて

$$\begin{aligned} Cor_a(x, y) &= E \{ [a(x + \xi, y + \eta) - \overline{a}] [a(\xi, \eta) - \overline{a}] \} \\ &= Cor_{A^+}(x, y) + Cor_{A^-}(x, y) \\ &\quad - Cor_{A^+A^-}(x, y) - Cor_{A^+A^-}(-x, -y) \end{aligned} \quad (5)$$

となる。

さて、亀裂性岩盤内に内在している亀裂は、過大なせん断変形が生じていない状態においては、多少の欠損等はあるものの亀裂の上面と下面の形状はほぼ同じであると考えられる。そのため、亀裂の上面及び下面の高さの変動項 A'^{\pm} はそれぞれ

$$A'^+(x, y) = A(x + s, y + t) + \hat{A}^+(x, y) \quad (6)$$

$$A'^-(x, y) = A(x, y) + \hat{A}^-(x, y) \quad (7)$$

と表される。ここで、 (s, t) は下面に対する上面の相対的なせん断変位を、 A は上面と下面を分割する時に形成された亀裂面の形状を、 \hat{A}^\pm は欠落等によって生じるずれを表している。本研究では簡単のため、亀裂面形成時及びせん断変形による亀裂凹凸の欠落がないものとし、以下では $\hat{A}^\pm = 0$ とする。

亀裂面の欠落がない場合、式(5)と式(6)、(7)より、亀裂開口幅 $a(x, y)$ の自己相関関数 $Cor_a(x, y)$ 及び標準偏差 σ_a は亀裂表面の起伏形状 $A(x, y)$ の標準偏差 σ_A 及び自己相関関数 $Cor_A(x, y)$ を用いて

$$\begin{aligned} Cor_a(x, y) &= 2Cor_A(x, y) \\ &\quad - Cor_A(x + s, y + t) - Cor_A(x - s, y - t) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \sigma_a^2 &= Cor_a(0, 0) \\ &= 2\sigma_A^2 - Cor_A(s, t) - Cor_A(-s, -t) \end{aligned} \quad (9)$$

となる。

ここでは亀裂に直応力の影響を考慮せずに亀裂開口幅に対する考察を行っているが、一般にはせん断変形に加え更に直応力が作用した場合の開口幅分布の変化を考慮する必要がある。なぜなら直応力が作用した場合、上面と下面の亀裂面は互いに接触し、接触した面は変形をするため、接触面の変形に従い開口幅分布も変化すると考えられるからである。この様な亀裂面の変形は、Mourzenko²⁴⁾により明らかにされている。Mourzenkoらは、上面と下面の接触面 S_c の面積は、亀裂全体の面積に比較し非常に小さいことから、接触面

S_c で生じる直応力 P_c は接触面で一定値:

$$P_c = \frac{\sigma_n}{S_c} \quad (10)$$

となり、亀裂開口幅の標準偏差 σ_a 及び自己相関関数 Cor_a は変化せず、平均開口幅 \bar{a} のみが変化すると仮定することで、直応力 σ_n と亀裂の閉口量 V の関係式が

$$V = 4 \frac{1 - \nu^2}{E} \frac{1 - S_c}{S_c} L_c \sigma_n \quad (11)$$

となる事を示している。ここで、 E と ν は弾性係数とポアソン比である。 L_c と S_c は次式で求まる系の特徴的長さとして接触面積比である:

$$L_c = \iint dr \frac{Cor_a(r)}{S_c(1 - S_c)} \quad (12)$$

$$S_c = \frac{1}{2} \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{b_m}{2\sigma_h} \right) \right] \quad (13)$$

ここで、 r は二つの点の間の距離、 erf はエラー関数、 b_m は平均開口幅、 σ_h は表面形状の標準偏差である。Mourzenko らは更に、式 (11) で与えられる解析解とランダムに発生させた亀裂表面形状を用いた数値解析とを比較することで、式 (11) の妥当性を示している。このことから、直応力により生じる接触面での変形は、平均開口幅 \bar{a} を一意的に決定はするが、開口幅の標準偏差 σ_a や自己相関関数 Cor_a はほとんど変化させない事が理解できる。

以上のことより、外部の応力状態により変化する亀裂開口幅分布 $a(x, y)$ の統計的諸モーメントを算出するには、まずせん断変形より開口幅の標準偏差 σ_a と自己相関関数 Cor_a を求め、次いで直応力より求まる平均開口幅 \bar{a} と開口幅分布の標準偏差 σ_a の関係より、平均開口幅 \bar{a} を求めればよいと考えられる。

(2) 亀裂の透水量係数と開口幅分布

亀裂の開口幅分布 $a(x, y)$ が正規分布に従い、亀裂の大きさが亀裂表面の起伏形状の相関長より十分大きい場合、亀裂開口幅 $a(x, y)$ の統計的諸モーメント (平均 \bar{a} 、標準偏差 σ_a 、自己相関関数 $Cor_a(x, y)$) と亀裂の有効透水量係数 K^{eff} の関係は筆者ら^{25), 26)}により、Perturbation expansion 法²⁷⁾を用いて4次までの近似式として以下のように表されることが示されている:

$$K_{ij}^{\text{eff}} = \frac{\rho g}{12\mu} \bar{a}^3 \left[\left(1 + 3 \frac{\sigma_a^2}{\bar{a}^2} \right) \delta_{ij} - 9 \frac{\sigma_a^2}{\bar{a}^2} \alpha_{ij} + 9 \frac{\sigma_a^4}{\bar{a}^4} (\alpha_{ij} - 3\alpha_{ij}^2 + 9\gamma_{ij}) \right] \quad (14)$$

ここで、 α と γ は以下の式で求まる定数である:

$$\alpha_{ij} = \iint_{-\infty}^{\infty} \frac{du}{(2\pi)^2} \hat{\theta}(u) \frac{u_i u_j}{u^2} \quad (15)$$

$$\gamma_{ij} = \iiint_{-\infty}^{\infty} \frac{dudv}{(2\pi)^4} \hat{\theta}(u) \hat{\theta}(v) \left[\frac{\mathbf{u} \cdot \mathbf{v} u_i (u_j + v_j)}{u^2 (\mathbf{u} + \mathbf{v})^2} + \frac{\mathbf{u} \cdot \mathbf{v} \cdot (\mathbf{u} + \mathbf{v}) u_i v_j}{u^2 v^2 (\mathbf{u} + \mathbf{v})^2} + \frac{\mathbf{u} \cdot \mathbf{v} \cdot (\mathbf{u} + \mathbf{v}) u_i u_j}{u^4 (\mathbf{u} + \mathbf{v})^2} \right] \quad (16)$$

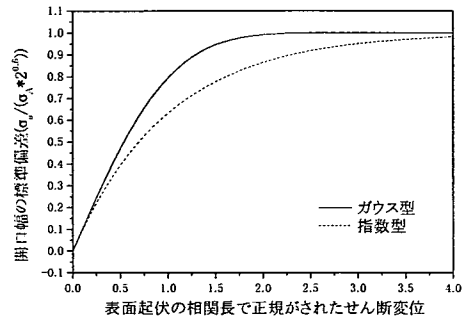


図-2 せん断変形に伴う標準偏差 σ_a の変化

u_i, v_i は \mathbf{u}, \mathbf{v} の各成分であり、 $\hat{\theta}(\mathbf{u})$ は自己相関係数 $\theta(x, y) = Cor_a(x, y) / \sigma_a^2$ のフーリエ変換である。筆者らは更に、ガウス型の自己相関関数を用いて、式 (14) で示される解析解とランダムに発生させた開口幅を用いた数値解を比較することで、近似式 (14) の妥当性を示している。近似式 (14) は、亀裂開口幅 $a(x, y)$ における自己相関係数 $\theta(x, y)$ の異方性が、有効透水量係数 K^{eff} における異方性と密接に関連していることを示しており、せん断変形により生じる自己相関係数 $\theta(x, y)$ の異方性が評価出来れば、有効透水量係数 K^{eff} における異方性も評価できると考えられる。

3. せん断変形に伴う水理特性の変化

ここでは簡単の為に、亀裂表面の起伏形状 $A(x, y)$ が正規分布に従うとし、自己相関関数 $Cor_A(x, y)$ としてガウス型及び指数型を用いることで、せん断変形に伴う開口幅分布における標準偏差 σ_a 及び自己相関関数 $Cor_a(x, y)$ の変化、更には亀裂の有効透水量係数 K^{eff} の変化を示す:

$$Cor_A(x, y) = \sigma_A^2 \rho(x, y) \quad (17)$$

$$\text{ガウス型: } \rho(x, y) = \exp \left[- \left(\frac{x}{\lambda_x} \right)^2 - \left(\frac{y}{\lambda_y} \right)^2 \right]$$

$$\text{指数型: } \rho(x, y) = \exp \left[- \frac{|x|}{\lambda_x} - \frac{|y|}{\lambda_y} \right]$$

ここで、 σ_A は表面起伏形状分布の標準偏差、 $\lambda_x \cdot \lambda_y$ は $x \cdot y$ 方向における表面形状の相関長である。

(1) せん断変形と開口幅の分散及び自己相関関数

式 (8) に式 (17) を代入すると、せん断変形 (s, t) に伴う開口幅分布 $a(x, y)$ の標準偏差 σ_a 及び自己相関関数 Cor_a は以下ようになる:

$$\sigma_a^2 = 2\sigma_A^2 [1 - \rho(s, t)] \quad (18)$$

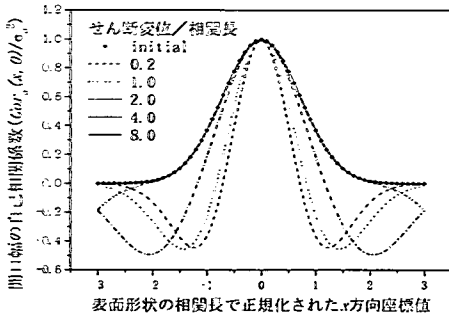


図-3 セン断変形に伴う開口幅分布の自己相関係数 $\theta(x, 0)$ の変化 ($y = 0$ での切断図): ガウス型自己相関関数

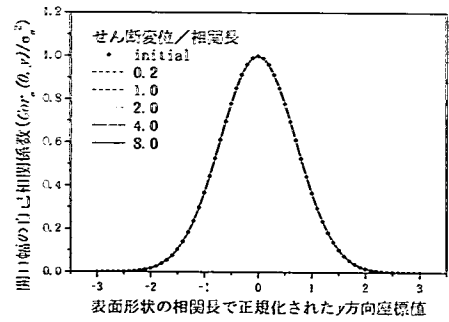


図-5 セン断変形に伴う開口幅分布の自己相関係数 $\theta(0, y)$ の変化 ($x = 0$ での切断図): ガウス型自己相関関数

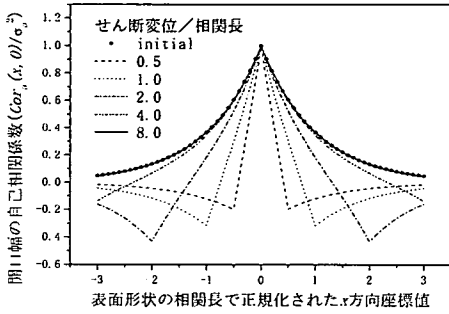


図-4 セン断変形に伴う開口幅分布の自己相関係数 $\theta(x, 0)$ の変化 ($y = 0$ での切断図): 指数型自己相関関数

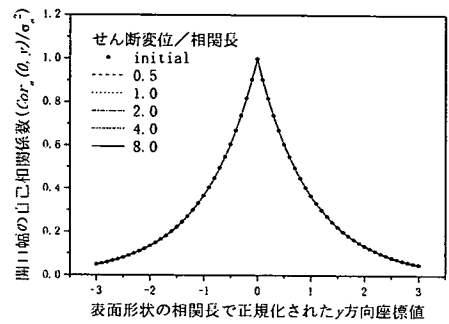


図-6 セン断変形に伴う開口幅分布の自己相関係数 $\theta(0, y)$ の変化 ($x = 0$ での切断図): 指数型自己相関関数

$$Cor_a(x, y) = \sigma_a^2 \theta(x, y) \quad (19)$$

$$\theta(x, y) = [2\rho(x, y) - \rho(x + s, y + t) - \rho(x - s, y - t)] / [2 - 2\rho(s, t)] \quad (20)$$

上式 (18)・(19) を用い、 x 方向にのみ ($t = 0$) セン断を与えた場合の開口幅分布の標準偏差 σ_a の変化と自己相関関数 Cor_a の変化を、図-2 から図-4 に示す。横軸は x 方向のせん断変形量を示し、縦軸はそれぞれ標準偏差 σ_a と x 軸上での自己相関係数 $\theta(x, y)$ の変化を示している。図-3 は自己相関関数がガウス型の場合、図-4 は指数型の場合の変化である。なお、全ての図において横軸はせん断変位を相関長 λ_x で正規化されており、図-2 の縦軸は亀裂表面の起伏形状の標準偏差 σ_A で正規化されている。また、参考のため自己相関係数の y 軸上の変化を図-5・図-6 に示す。

図-2 より、ガウス型・指数型いずれの場合においても、開口分布の標準偏差は、その増加量の差はあるもののせん断変形の増加と共に急激に増加し、せん断変形が相関長を超えるに従いその増加速度は低下し、最

終的には亀裂表面の起伏形状の標準偏差 σ_A の $\sqrt{2}$ 倍に収束する事が分かる。このことから、直応力が一定で、標準偏差 σ_a と平均 \bar{a} の比があまり変化しない状況下では、せん断に伴い開口幅の平均値 \bar{a} は始め急激に増加するが、せん断変形が相関長を超える程度である一定値にほぼ収束すると予測できる。

一方で、自己相関係数は、図-3・4 より、せん断変形が相関長より小さい場合はその変形が大きいものの、せん断変形量が相関長を超えるとともに変化が小さくなり、最終的には亀裂表面の起伏形状における自己相関係数と同じ形状に収束して行くことが分かる。つまり、有効透水量係数 K^{eff} は開口幅の平均 \bar{a} と自己相関関数で決定される係数 α, β の関数であることから、亀裂表面の起伏形状における相関長より十分に大きな亀裂においては、せん断変形により平均開口幅 \bar{a} の増加に従い有効透水量係数 K^{eff} も増加し (図-2)、せん断変形が相関長より十分大きくなると平均開口幅 \bar{a} が一定値に収束するため (図-2)、有効透水量係数 K^{eff} も一定

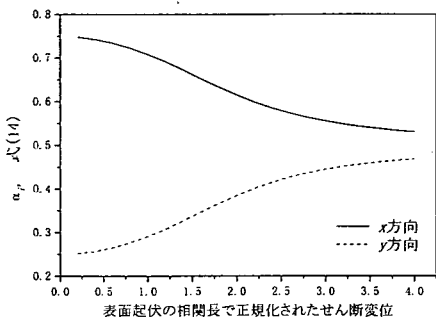


図-7 せん断変形に伴う係数 α の変化:ガウス型自己相関関数

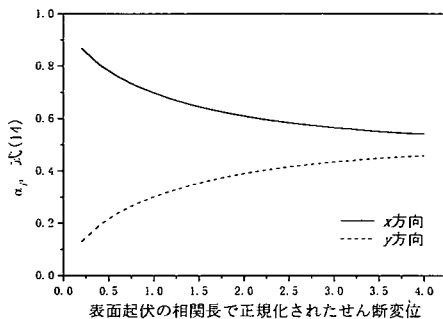


図-9 せん断変形に伴う係数 α の変化:指数型自己相関関数

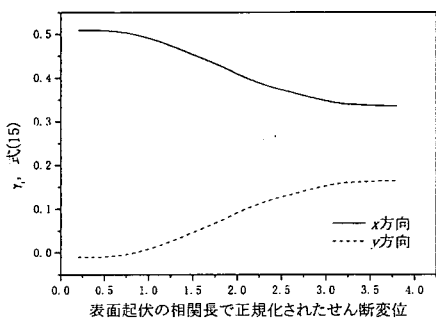


図-8 せん断変形に伴う係数 γ の変化:ガウス型自己相関関数

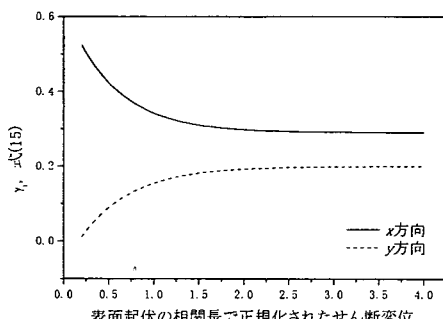


図-10 せん断変形に伴う係数 γ の変化:指数型自己相関関数

値に収束すると考えられる。

一方で、自己相関係数 $\theta(x, y)$ における異方性は、せん断変形によりはじめは大きな値を取るが、せん断変形が相関長より十分に大きくなるに従い、自己相関係数 $\theta(x, y)$ の異方性は失われるため、有効透水量係数 K^{eff} における異方性も、せん断変形の初期段階では大きいものの、せん断変形が進むにつれ減少し、最終的には等方になると考えられる。

(2) せん断に伴う係数 $\alpha \cdot \gamma$ の変化と有効透水量係数 K^{eff} の異方性

式 (20) を式 (15)・(16) に代入し、 x 方向のせん断変形に伴う係数 $\alpha \cdot \gamma$ の変化を、数値積分により求めたグラフを図-7 から 10 に示す。図-7・8 がガウス型の自己相関関数を用いたケース、図-9・10 が指数型の自己相関関数を用いたケースである。横軸がせん断変形量を相関長 λ_x で正規化した値を示し、縦軸が $\alpha \cdot \gamma$ の $x \cdot y$ 方向の成分を示している。また、式 (14) を用いせん断変形に伴う、有効透水量係数の異方性を予測したグラフを図-11 に示す。ここで、異方性はせん断方向に対

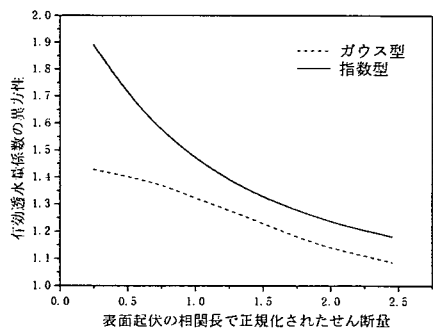


図-11 せん断変形に伴う有効透水量係数 K^{eff} の異方性の変化

し、直交する方向への透水量を平行する方向への透水量で割った比で定義される。

図-11 より、せん断変形初期の段階では有効透水量係数 K^{eff} の異方性は大きいものの、せん断変形量が相関長 λ_x より十分大きくなるに従い異方性は失われること

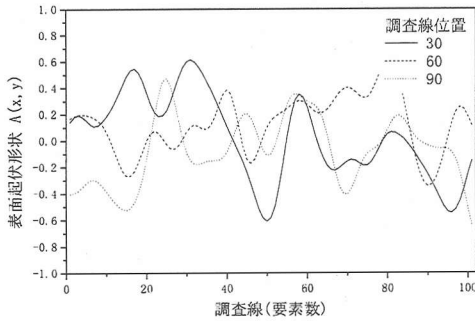
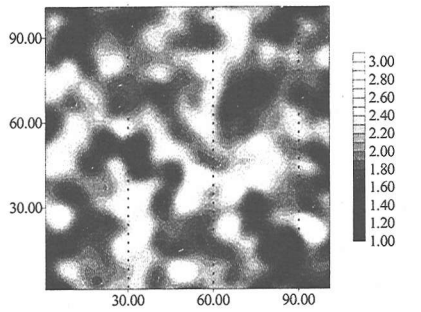


図-12 数値解析に用いた表面形状例: ガウス自己相関関数

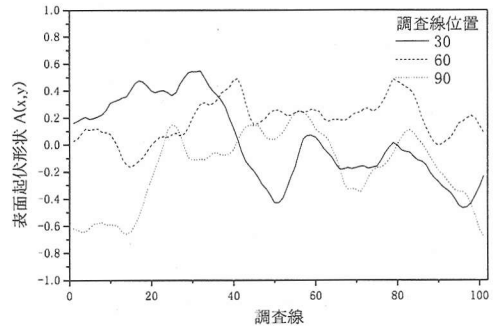
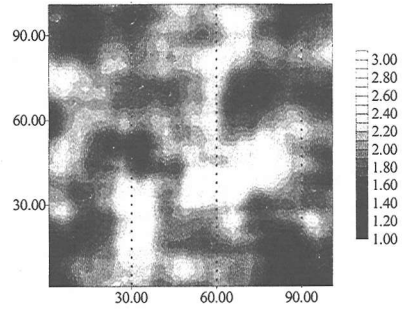


図-13 数値解析に用いた表面形状例: 指数型自己相関関数

が理解できる。なお、本研究では初期状態で亀裂が完全に一致している条件を想定しているため、せん断量が0の場合は流れは発生しないため異方性は不明となる。

4. モンテカルロシミュレーションとの比較

ここまでは解析的な観点からせん断変形に伴う有効透水量係数 K^{eff} の変化及びその異方性の変化を議論してきたが、ここではその妥当性を評価するために、実際にランダムに生成した亀裂形状を用いて数値解析を行い、解析解との比較を行う。自己相関関数 $Cor_A(x,y)$ を持ったランダムな亀裂形状の生成は、Adler ら²⁸⁾に従いフーリエ変換を用いる方法を用いた。開口幅の平均と標準偏差の比は亀裂表面の格子稠密度と自己相関関数の形状にも影響されるが、本研究では正方形格子を用い、要素分割数は 100×100 とした。

(1) せん断変形・直応力による開口分布の変化

せん断変形及び直応力の変化に伴う開口分布の変化を求めるため、本研究では以下の手順に従った:

- (a) -図 12・13 に示したような表面形状の亀裂を作成する。図-12・13 は、それぞれガウス型・指数型自己相関関数を仮定し同じ乱数を用いた結果である。ここで、上面と下面を同じ形状であると仮定し、上下面ともに弾性体としてモデル化し、平均

高を $3\sigma_A$ となるように肉厚を設定する。下面の亀裂面を構成するブロックの最下面の変位は固定される。

- (b) 上面を構成するブロックを $10\sigma_A$ 分だけ z 方向に上昇させる。
 (c) 上面を構成するブロックを x 方向のノード間隔分だけ x 方向に水平移動する。
 (d) 上面を構成するブロックの最上面が常に平面を保つように最上面の変位を制御し、上面を構成するブロックを z 方向に降下させる。
 (e) 降下中の数値解析は上面と下面それぞれを構成するブロック同士の2体の接触問題を解くことで解析し、上面を構成するブロックの最上面に作用する平均応力が所定の値になるまで上面を降下させる。一方、平均応力の大きさは開口幅の平均及び標準偏差の比によって決まる。

せん断に伴う標準偏差 σ_a を図-14 に、また平均開口幅 \bar{a} の変化を図-15、更に平均開口幅 \bar{a} と標準偏差 σ_a の比の統計を表-1 に示す。図-14・図-15 中の実線は、平均開口幅 \bar{a} と標準偏差 σ_a の比が一定とし式 (9) から求まる解析解を表しており、それぞれの点が各せん断変位に対する数値解の平均値である。図-14 より、式 (9) を用いた解析的近似解は数値解析との比較から妥当であることが分かる。一方、図-15 で見られる解析解と数値解間の誤差は、表-1 に示されたように、数値解析で

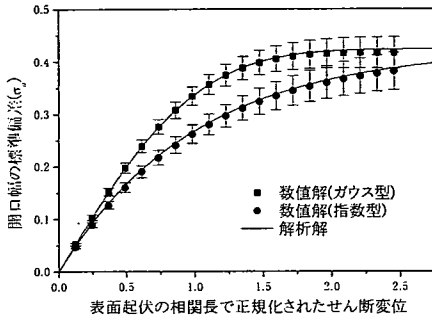


図-14 せん断に伴う標準偏差 σ_a の変化

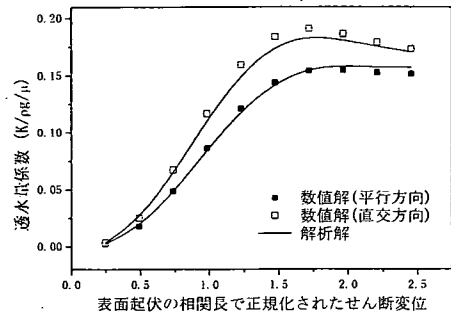


図-16 せん断に伴う有効透水量係数の変化：ガウス型自己相関関数

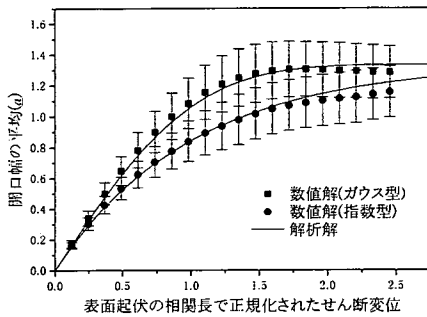


図-15 せん断に伴う平均開口幅の変化

表-1 モンテカルロシミュレーションにおけるせん断に伴う平均開口幅と標準偏差の比 (\bar{a}/σ) の統計量

	ガウス型	指数型
\bar{a}/σ の平均	3.20	3.17
\bar{a}/σ の標準偏差	0.07	0.13

求められる平均と標準偏差の比が、解析解を求める時に用いた値と若干異なることに起因する。ここで注意すべき点は、上述の結果は簡単のためせん断変形による垂直応力の変化が比較的小さく、開口幅の平均と標準偏差の比が一定の場合の結果のみを示したが、地下深部のように亀裂を含んだ岩盤が周辺岩盤に拘束を受け、せん断により直応力の変化が生じる場合は、開口幅の平均と標準偏差の比も変化するためその傾向は異なるものと考えられる。当然その場合の開口幅の平均値 \bar{a} は、式 (11) により求めればよいのである。

(2) せん断変形・直応力による有効透水量係数 K^{eff} の変化

有効透水量係数 K^{eff} を求めるため、力学解析から求めた亀裂開口幅分布 $a(x, y)$ を用い、水理解析を行った。水理解析においては、亀裂の水理解析で一般的に用いられている支配方程式である Reynolds 方程式を用いた：

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\rho g}{12\mu} a(x, y)^3 \frac{\partial H(x, y)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\rho g}{12\mu} a(x, y)^3 \frac{\partial H(x, y)}{\partial y} \right) = 0 \quad (21)$$

ここで、 ρ と μ は流体の密度と粘性係数、 g は重力加速度、 $H(x, y)$ は亀裂内水頭である。

水理解析より求められた透水量係数を、解析解と共に図-16 及び 17 に示す。図より、本研究で求められた有効透水量係数 K^{eff} の解析的近似解は数値解と極めてよく一致している事が分かる。また、数値解析においては計算機資源の制限から、大きなせん断変位に対する結果は得られなかったが、解析的近似解により得られるせん断変位が大きくなった場合の有効透水量係数 K^{eff} の変化を図-18 に示す。図より、表面形状の相関関数により収束速度の差はあるが、せん断変位が亀裂表面の相関長より十分大きくなると、両者ともある一定値に収束する事には変わりがないことが分かる。

5. 結論

本研究では、せん断変形による単一岩盤亀裂内透水特性の変化を統計的な手法を用いて解析的検討を行い、その結果をモンテカルロシミュレーションを用いた数値解析の結果と比較・検証した。解析手法としては岩盤亀裂内透水解析に多く使われているレイノルズ方程式を、統計的手法を用いて解くことによって求められる

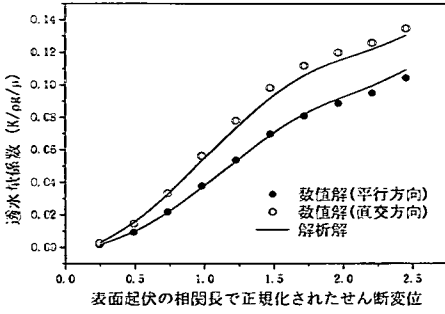


図-17 せん断に伴う有効透水量係数の変化：指数型自己相関関数

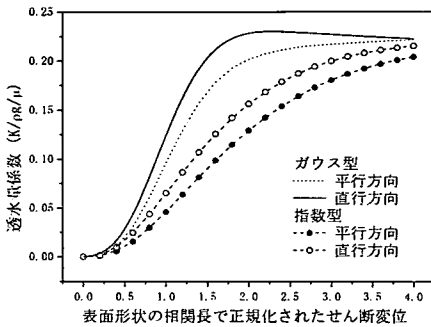


図-18 解析的に求めたせん断に伴う有効透水量係数の変化

透水量係数の近似式を用いた。一方、数値解析ではランダムに作成された亀裂表面形状を用いて解析を行った。表面の起伏形状作成時は、ガウス型及び指数型の二つの相関関数を用いた。

本研究で得られた主な結果は以下のように要約される。

- (a) 亀裂表面形状の相関特性によって若干その挙動の差はあるものの、せん断に伴う亀裂透水量の急激な増加を亀裂内有効透水量係数の近似式を用いて効率的に説明することができた。
- (b) せん断変位が亀裂表面起伏形状の相関長より十分大きくなるに伴い、透水量の増加はほぼ止まることが分かった。
- (c) 亀裂内流れにおいてはせん断変形によって初め異方性が発生するものの、せん断変位が増加するに伴い徐々に等方に収束することが分かった。また、ガウス型より指数型の場合の方が、せん断によって発生する初期異方性が大きい事が分かった。
- (d) 以上の結果より、亀裂の変形に起因した亀裂性岩盤内透水特性の変化を評価する際、せん断変位に

よる亀裂内異方性よりはダイレーションに起因した透水量の急激な増加に注目した解析を行うことが必要であると考えられる。

しかし、上に述べた結果は表面形状の相関長よりも十分に大きな岩盤亀裂を用いた結果であるため、亀裂表面形状の特性が十分に反映できない大きさの室内実験では、垂直応力及びせん断に伴い亀裂透水特性の異方に顕著な変化が発生する場合もありうると考えられる。

最後に、実際の岩盤には様々な方向の亀裂が存在するため、本研究で得られた成果を岩盤透水の評価に利用する際には、各方向に対する垂直応力とせん断変位を求める必要がある。このような亀裂性岩盤内で掘削などによる応力解放に起因する亀裂毎のせん断変位と垂直応力の導出方法は、既にいくつか提案されている²⁹⁾。従って、今後岩盤内透水解析を行なう際には、亀裂性岩盤を亀裂ネットワークに置き換え解析を行うわけであるが、その場合の各亀裂の透水係数は、前述のような既存の手法に基づく掘削解析によりせん断変位及び垂直応力を求め、本研究で提案する近似解から推定する事も可能となると期待できる。

参考文献

- 1) Witherspoon, P. A., Wang, J.S.Y., Iwai, K., and Gale, J. E.: Validity of cubic law for fluid flow in a deformable rock fracture, *Water Resources Res.*, 16(6):1016-1024, 1980.
- 2) Tsang, Y. W. and Witherspoon, P. A.: Hydromechanical behavior of a deformable rock fracture subject to normal stress, *J. Geophys. Res.*, 86(B10):9287-9298, 1981.
- 3) Tsang, Y. W.: The effect of tortuosity on fluid flow through a single fracture, *Water Resources Res.*, 20(9):1209-1215, 1984.
- 4) Tsang, Y. W. and Tsang, C. F.: Flow channeling in a single fracture as a two-dimensional strongly heterogeneous permeable medium, *Water Resources Res.*, 25(9):2076-2080, 1989.
- 5) 岩野政浩: 亀裂内透水特性に関する確率論的評価, 岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, 23:327-331, 1991.
- 6) 岩野政浩, 飯星茂: 岩盤亀裂内間隙構造と透水特性に関する考察, 土木学会年次学術講演会講演概要集第3部, 48:1314-1315, 1993.
- 7) 正田武, 西垣誠, 荻原義孝: 単一亀裂性岩盤における浸透特性に関する研究, 土木学会年次学術講演会講演概要集第3部, 49:150-151, 1994.
- 8) 内田雅大, 野田兼司, 丸山誠, 杉藤賢: 亀裂性媒体水理試験装置による単一岩体透水・トレーサー試験, 岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, 26:156-160, 1995.
- 9) 高橋学, 張銘, 林為人, 西山哲, 李小春: 室内透水試験における供試体中の水頭分布, 動水勾配, 貯留係数について, 資源と素材, 114(12):888-894, 1998.
- 10) 菅原勝彦, 佐藤晃一, 尾原祐三, 柳迫将秀: X線ctによる岩石の透水係数の測定, 資源と素材, 115(11):803-808, 1999.
- 11) 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技術的信頼性-地層処分開発第2次取りまとめ-, 核燃料サイクル開発機構, 2000.
- 12) Barton, N., Bandis, S., and Bakhtar, K.: Strength,

- deformation and conductivity coupling of rock joints, *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.*, 22(3):121-140, 1985.
- 13) Makurat, A., Barton, N., Rad, N. S., and Bandis, S.: Joint conductivity variation due to normal and shear deformation, *Rock Joints, Balkema*, pages 535-540, 1990.
 - 14) Pyrak-Nolte, L. J., Nolte, D. D., Myer, L. R., and Cook, N.G.W.: Fluid flow through single fractures, *Proc. Int. Symp. Rock Joints*, pages 405 - 412, 1990.
 - 15) Olsson, R. and Brown, S. R.: Hydromechanical response of a fracture undergoing compression and shear, *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.*, 30:845-851, 1993.
 - 16) Esaki, T., Du, S., Mitani, Y., Ikusada, K., and Jing, L.: Development of a shear-flow test apparatus and determination of coupled properties for a single rock joint, *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.*, 36:641-650, 1999.
 - 17) Chen, Z., Narayan, S. P., Yang, Z., and Rahman, S. S.: An experimental investigation of hydraulic behavior of fractures and joints in granite rock, *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.*, 37:1061-1071, 2000.
 - 18) Gentier, S., Lamontagne, E., Archambault, G., and Riss, J.: Anisotropy of flow in fracture undergoing shear and its relationship to the direction of shearing and injection pressure, *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.*, 34(3-4):Paper No. 258, 1997.
 - 19) Yeo, I. W., De Freitas, M. H., and Zimmerman, R. W.: Effect of shear displacement on the aperture and permeability of a rock fracture, *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.*, 35(8):1051-1070, 1998.
 - 20) Brown, S. R.: Flow through rock joints: The effect of surface roughness, *J. Geophys. Res.*, 92(B2):1337-1347, 1987.
 - 21) Zimmerman, R. W. and Bodvarsson, G. S.: Hydraulic conductivity of rock fractures. *Transport in Porous Media*, 23:1-30, 1996.
 - 22) 金亨穆, 堀井秀之, 井上純哉: 変形と表面形状を考慮した単一ジョイント内の水の流れ, 岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, 31:266-270, 2001.
 - 23) Meheust, Y. and Schmittbuhl, J.: Geometrical heterogeneities and permeability anisotropy of rough fractures, *J. Geophys. Res.*, 106(B2):2089 - 2102, 2001.
 - 24) Mourzenko, V. V., Galamay, O., Thovert, J. F., and Adler, P. M.: Fracture deformation and influence on permeability, *Physical Review E*, 56(3):3167-3184, 1997.
 - 25) 井上純哉, 杉田博章: 確率微分方程式を用いた単一亀裂特性の推定, 土木学会論文集, No.726/II-62:31-39, 2003.
 - 26) Inoue, J. and Sugita, S.: Fourth order approximation of fluid flow through rough-wall rock fracture, *Water Resources Res.*, in press.
 - 27) Mark, J. B.: *Statistical continuum theories*, Interscience Publishers, 1968.
 - 28) Adler, P. M. and Thovert, J. F.: *Fractures and Fracture Networks*, Kluwer academic publishers, 1999.
 - 29) 堀井秀之, 宇野晴彦, 吉田秀典, 芥川真一, 打田靖夫, 森川誠司, 山辺正, 多田浩幸, 京谷孝史, 伊藤文雄: 節理性岩盤を対象とした各種解析手法による要素解析結果の比較, 土木学会論文集, 659:229-240, 2000.

(2002. 12. 5 受付)

PROBABILISTIC EVALUATION OF THE CHANGE IN FLOW CHARACTERISTICS OF A DEFORMING JOINT

Junya INOUE and Hyung-Mok KIM

The primary objective of this study is to investigate an anisotropic permeability through a single rough rock joint and its characteristic change due to shear displacement. Permeability approximation, which is represented by statistical first and second moments of aperture distribution, was used for this purpose. The shear-induced remarkable increment and anisotropy in the joint permeability were simulated, and their characteristics by a different spatial correlation function (; Gaussian and Exponential) of surface roughness were demonstrated. Obtained results were compared with those of Monte Carlo Simulation so as to present the validity of the current approach.