

CS-212 均質化法を用いた岩盤空洞周辺の浸透特性の評価

東北大学工学部 学生員 山川 優樹
(日本学術振興会特別研究員)
日本鋼管(株) 正会員 渡辺 知保
東北大学工学部 正会員 寺田 賢二郎
東北大学工学部 正会員 須藤 良清

1. 研究の目的

岩盤地下構造物周辺は、亀裂などの不連続面が存在するため、地下水の挙動を正確に予測することは一般に困難である。巨視的な物性としての異方的な透水係数を算定するには、岩盤内の亀裂の幾何学的な情報が微視的スケールの観察から得られるのに対して、透水性などは巨視的スケールの物性情報であることから、マルチスケール問題としてとらえることが出来る。

本稿では、均質化法を用いて、微視的スケールの情報と巨視的な透水係数とを関連づけ、岩盤空洞周辺全体の異方的な透水係数を算定する手法を提案する。併せて、岩盤の観測データに基づいた微視構造モデルの生成法と、算定値に対するキャリブレーション法も紹介する。更に、ケーススタディとして3次元浸透流解析を行い、岩盤空洞周辺における浸透特性の評価を行うことにより、この手法の有効性を確認する。

2. 均質化法

均質化法は、構造物全体の(巨視的)スケール $\mathbf{x}$ に対し、それを構成する代表体積要素の大きさ ϵ により関連づけた微視的スケール $\mathbf{y} (= \mathbf{x}/\epsilon)$ を導入し、それぞれを独立変数とした場において、巨視的・微視的スケールの支配方程式を導出するものである。その際、漸近展開形を用いることで $\mathbf{x}, \mathbf{y}$ の変数分離が可能となり、不均質体への適用が可能となる特徴を有する。以下に均質化法による定式化の概要を述べる。

岩盤の不連続面内の流れを、非圧縮性 Newton 流体の Stokes 流と仮定する。このとき支配方程式は、

$$\frac{\partial \sigma_{ij}^\epsilon}{\partial x_j} + \rho f_i = 0, \quad \sigma_{ij}^\epsilon = -p^\epsilon \delta_{ij} + \epsilon^2 \mu \frac{\partial v_i^\epsilon}{\partial x_j}, \quad \frac{\partial v_i^\epsilon}{\partial x_i} = 0 \quad \dots \dots \dots (1)$$

と与えられる。ここで $\rho, f, p^\epsilon, \delta_{ij}, \mu, \mathbf{v}^\epsilon$ はそれぞれ、流体の密度、流体に作用する物体力密度、流体の圧力、Kronecker デルタ、流体の粘性、流速である。上付き添字 ϵ は、その変数が微視構造の大きさ ϵ に依存することを表す。これらの支配方程式に、速度 $\mathbf{v}^\epsilon$ 、圧力 p^ϵ それぞれの漸近展開式

$$\mathbf{v}_i^\epsilon(\mathbf{x}) = \mathbf{v}_i^0(\mathbf{x}, \mathbf{y}) + \epsilon \mathbf{v}_i^1(\mathbf{x}, \mathbf{y}) + \dots, \quad p^\epsilon(\mathbf{x}) = p^0(\mathbf{x}, \mathbf{y}) + \epsilon p^1(\mathbf{x}, \mathbf{y}) + \dots \quad \dots \dots \dots (2)$$

を代入することにより、微視的方程式

$$\int_Y \frac{\partial \kappa_i^k}{\partial y_j} \frac{\partial W_i}{\partial y_j} d\mathbf{y} = \int_Y W_k d\mathbf{y}, \quad \forall W_i(\mathbf{y}) \quad \dots \dots \dots (3)$$

が得られる。ここで κ は Y -periodic な特性関数であり、速度 $\mathbf{v}^\epsilon$ の漸近展開式の零次項は、

$$\mathbf{v}_i^0 = -\frac{1}{\mu} \left(\rho f_k - \frac{\partial p^0}{\partial x_k} \right) \kappa_i^k \quad \dots \dots \dots (4)$$

と与えられる。一方、 κ の代表要素体積平均

$$K_{ik} = -\frac{1}{\mu|Y|} \int_Y \kappa_i^k d\mathbf{y} \quad \dots \dots \dots (5)$$

は、巨視的スケールの流速 $\mathbf{V}$ と一般化圧力勾配 $\partial P / \partial \mathbf{x}$ を関連づける Darcy 則

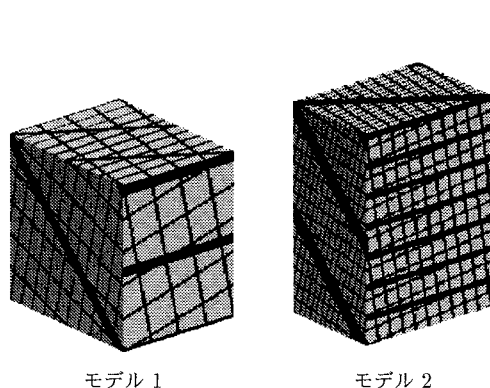
$$\mathbf{V}_i = -K_{ik} \frac{\partial P}{\partial x_k} \quad \dots \dots \dots (6)$$

の透水係数である。ここで $|Y|$ は代表要素の体積を表す。

このようにして幾何的情報を考慮して Stokes 流解析を行うことで、経験則である Darcy 則が導かれる。すなわち、不連続性岩盤の幾何学的情報から異方的な透水係数の評価が可能となり、連続の式と併せて岩盤構造全体の浸透解析に用いられる。

3. 岩盤微視構造のモデル化

微視的な解析では、式(3)を数値的に解く必要があるが、その数値モデルは、実際の岩盤の幾何学的情報を有している必要がある。ここでは、岩盤不連続面の実測データ(デジタルイメージ)から3次元亀裂モデルを生成する。現場の地質状態は2つに分類されることから、2つの微視構造モデルを生成することとし、モデ



モデル 1

モデル 2

図-1 デジタルイメージに基づく岩盤微視構造モデル

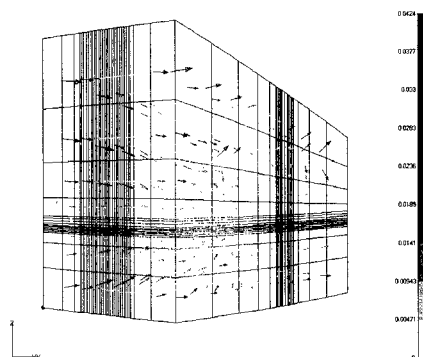


図-2 3次元浸透流解析による流速分布

ル 1, 2 として 図-1 に示す. 透水係数算定においては, これらのモデルの 1 ボクセル (体積画素) を 1 つの有限要素として解析する.

4. 透水係数の算定とキャリブレーション

式 (5) の透水テンソル K は, 生成したモデルを用いて, 式 (3) の FEM 解析を行うことにより算出した. モデル 1, 2 それぞれから算定した透水テンソル K'_1, K'_2 は,

$$K'_1 = \begin{bmatrix} 8.7 \times 10^{-12} & -9.7 \times 10^{-14} & -5.8 \times 10^{-13} \\ \text{Sym.} & 1.4 \times 10^{-11} & -1.1 \times 10^{-13} \\ & & 1.4 \times 10^{-11} \end{bmatrix}, \quad K'_2 = \begin{bmatrix} 1.2 \times 10^{-12} & -1.4 \times 10^{-14} & -1.3 \times 10^{-13} \\ \text{Sym.} & 2.0 \times 10^{-12} & 1.7 \times 10^{-14} \\ & & 1.8 \times 10^{-12} \end{bmatrix} \quad \dots\dots (7)$$

となった (数値の単位は $\text{m}^4/\text{N} \cdot \text{s}$). この数値解析により得られる透水テンソル K' は, 開口幅や充填物など不連続面の水理学的特性は反映されておらず, また形状近似誤差が含まれるため, 実測値を用いてキャリブレーションを行う必要がある. そこで, 透水テンソルの主値の平均値を平均透水係数 k'_{ave} とし, k'_{ave} と実測値 k'' との比 $\lambda (= k''/k'_{\text{ave}})$ を重みとして K' に乗じて, 浸透解析に用いる透水テンソル K とする. 式 (7) より平均透水係数は $k'_{\text{ave},1} = 1.2 \times 10^{-11}$, $k'_{\text{ave},2} = 1.7 \times 10^{-12}$ ($\text{m}^4/\text{N} \cdot \text{s}$) である. 一方, ルジオン試験により透水係数の実測値は $k'' = 2.5 \times 10^{-13}$ ($\text{m}^4/\text{N} \cdot \text{s}$) と得られている. 従って, 重みはそれぞれ $\lambda_1 = 2.1$, $\lambda_2 = 1.5 \times 10$ と計算され, 補正された透水テンソルは,

$$K_1 = \begin{bmatrix} 1.8 \times 10^{-11} & -2.0 \times 10^{-13} & -1.2 \times 10^{-12} \\ \text{Sym.} & 2.9 \times 10^{-11} & -2.3 \times 10^{-13} \\ & & 2.9 \times 10^{-11} \end{bmatrix}, \quad K_2 = \begin{bmatrix} 1.8 \times 10^{-11} & -2.1 \times 10^{-13} & -2.0 \times 10^{-12} \\ \text{Sym.} & 3.0 \times 10^{-11} & 2.6 \times 10^{-13} \\ & & 2.7 \times 10^{-11} \end{bmatrix} \quad \dots\dots (8)$$

となり, 単位不連続面積当たりの平均透水係数はそれぞれ $k_{\text{ave},1} = 6.4 \times 10^{-13}$, $k_{\text{ave},2} = 4.0 \times 10^{-14}$ ($\text{m}^4/\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$) となる. これには, モデルの節理面をボクセルで表すことによる形状近似誤差が含まれるが, 節理面の水理学的特性を考慮した単位節理面積当たりの重みはそれぞれ 1.1×10^{-1} , 3.6×10^{-1} ($1/\text{m}^2$) と, 両者はほぼ一致しており, 均質化法とデジタルイメージによる透水係数の算定値は妥当なものと考えられる.

5. 3次元浸透流解析

巨視的な岩盤全体における微視構造の影響を調べるため, 算定した透水テンソルを用いて, 空洞周辺全体での 3 次元浸透流解析を行う. 解析領域は, 空洞横断方向には上流側 555 m 地点から下流側 420 m 地点まで, 長手方向には 600 m とした. 境界条件は自由表面からの静水圧とした. 解析領域の流速分布を 図-2 に示す.

6. 結果・考察

均質化法を用いることで, 岩盤微視構造の幾何形状から直接, 岩盤全体での透水係数を求めることが出来ることを示し, これにより, 岩盤の浸透特性をマルチスケール問題としてとらえる手法を提案した. 本研究では岩盤の幾何構造のみに着目してモデルを生成したが, 今後はモデルに用いるデータも含めて検討し, より実用性の高い手法へと拡張する必要がある.

参考文献

- 1) Keller, J. B. (1980): Darcy's law for flow in porous media and the two phase method, *Nonlinear partial differential equations in engineering and applied science*, pp. 429-443, United States, Office of Naval Research, M. Dekker, New York.