

均質化法を用いた岩盤空洞周辺の透水特性の評価

東北大学工学部 ○ 学生員 渡辺 知保
正会員 寺田 賢二郎
正会員 池田 清宏

1. 緒言

発電所地下空洞などの岩盤地下構造物周辺は、亀裂等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。観察される不連続面の水みちモデルを作成することにより浸透特性を評価する試みもなされているが、巨視的な物性としての異方的な透水係数を算定する方法論を確立するには至っていない。岩盤の有するそれら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、透水性等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の、評価法を確立する必要がある。

本研究では、均質化法を用いて微視的スケールの情報を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、岩盤の観測データから均質化法に用いる3次元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。

2. 均質化法の概要¹⁾

均質化法は構造物全体の（巨視的）スケール 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 $y(=x/\varepsilon)$ を導入し、それぞれを独立変数とした場において、微視的・巨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 x 、 y の変数分離が可能となり、不均質体への適応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。

液体は非圧縮性 Newton 流体からなり、不連続面内の流れは Stokes 流と仮定する。このとき支配方程式は次式で与えられる：

$$\frac{\partial \sigma_{ij}^{\varepsilon}}{\partial x_{ij}} + \rho^{\varepsilon} f_i = 0 \quad (1)$$

$$\sigma_{ij}^{\varepsilon} = -p^{\varepsilon} \delta_{ij} + \varepsilon \mu D \frac{\partial v_i^{\varepsilon}}{\partial x_j} \quad (2)$$

ここで、 v_i^{ε} 、 D 、 $\rho^{\varepsilon} f$ は、それぞれ不均質性を有する流速、せん断成分を抽出する演算子、及び、 ρ^{ε} を密度としたときの物体力を表し、場の変数はスケール・パラメータ $\varepsilon = x/y$ に依存している。この支配方程式に、速度 v の漸近展開式、 $v_i^{\varepsilon}(x) = v_i^0(x, y) + \varepsilon v_i^1(x, y) + \dots$ を代入することによって 微視的方程式、

$$\mu \int_Y D \frac{\partial \kappa_i^0}{\partial y_j} \frac{\partial W_i}{\partial y_j} dy = \int_Y W_i dy \quad \forall W_i(y) \quad (3)$$

を得る。ここで、 κ_i^0 は Y-periodic な特性関数であり、速度の漸近展開形の零次項は、

$$v_i^0(y, x, t) = \left(\rho f_k - \frac{\partial p^0(x, t)}{\partial x_k} \right) \kappa_i^k(y) \quad (4)$$

で与えられる。一方、 κ_i^k の代表要素体積平均

$$K_{ik} = \frac{1}{|Y|} \int_Y \kappa_i^k(y) dy \quad (5)$$

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

$$V_i = -K_{ik} \frac{\partial P}{\partial x_k} \quad (6)$$

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学的情報を考慮して Stokes 流体の解析を行うことで、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情報を有している必要がある。ここでは、そのデジタル・イメージを利

用して、岩盤不連続面の実測データ²⁾(東京電力葛野川発電所：山梨県)から3次元亀裂モデルを生成する。

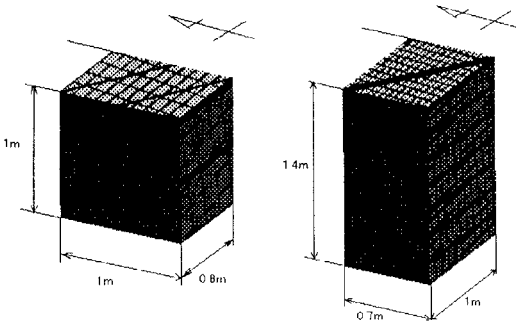
現場の地質状態は、泥岩優勢部(65%)、砂岩・泥岩同率部(35%)、に大別され、それぞれを領域1、2とする。なお、以降は添字1、2によりそれらを区別する。さらに、節理系は3パターン(J_{EW}-h系：東西走向急傾斜、J_{NS}-h系：南北走向急傾斜、J-I系：緩傾斜)に分類され、領域1、2における節理密度を表1に示す。

これらの情報をもとに生成した3次元デジタル・イメージ微視構造(代表体積要素)モデル、Model 1(領域1)、Model 2(領域2)を図1に示す。透水係数算定においては、このモデルの1 voxel(体積画素)を1つの有限要素として解析する。

表1 各地質での節理密度

	J _{EW} -h系	J _{NS} -h系	J-I系
領域 1	10	5	5
領域 2	20	10	10

(単位：本/m)



(a) Model 1

(b) Model 2

図1 岩盤の微視構造

4 透水係数の算定とキャリブレーション

透水テンソル式(5)は、生成したモデルを用いて、式(3)のFEM解析を行うことで算出した。以下にModel 1、Model 2から算定した透水テンソル K'_1 、 K'_2 を示す。

$$K'_1 = \begin{bmatrix} 8.7 \times 10^{-12} & -9.7 \times 10^{-14} & -5.8 \times 10^{-13} \\ & 1.4 \times 10^{-11} & -1.1 \times 10^{-13} \\ \text{sym.} & & 1.4 \times 10^{-11} \end{bmatrix} \quad (\text{m}^4 / \text{N} \cdot \text{s})$$

$$K'_2 = \begin{bmatrix} 1.2 \times 10^{-12} & -1.4 \times 10^{-14} & -1.3 \times 10^{-13} \\ & 2.0 \times 10^{-12} & 1.7 \times 10^{-14} \\ \text{sym.} & & 1.8 \times 10^{-12} \end{bmatrix} \quad (\text{m}^4 / \text{N} \cdot \text{s})$$

この数値解析により得られる透水テンソル K' は、開口幅

や充填物等、不連続面の水理学的特性は含まないため、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'' の比 λ ($\lambda = k''/k_{\text{ave}}$)を重みとして、 K' に乗じて浸透解析に用いる透水マトリックス K とする。ルジオン試験値 $k'' = k''_1 = k''_2 = 2.5$ (Lu)より、透水係数は $k'' = 2.5 \times 10^{-11} (\text{m}^4 / \text{N} \cdot \text{s})$ ³⁾と得られている。したがって、透水テンソル K'_1 、 K'_2 から平均透水係数は $k_{\text{ave}1} = 1.2 \times 10^{-11}$ 、 $k_{\text{ave}2} = 1.7 \times 10^{-12} (\text{m}^4 / \text{N} \cdot \text{s})$ となり、それぞれの重みは、 $\lambda_1 = 2.1$ 、 $\lambda_2 = 1.5 \times 10$ と計算される。このようにして、透水テンソル K_1 、 K_2 は以下のようにキャリブレーションされる。

$$K_1 = \begin{bmatrix} 1.8 \times 10^{-11} & -2.0 \times 10^{-13} & -1.2 \times 10^{-12} \\ & 2.9 \times 10^{-11} & -2.3 \times 10^{-13} \\ \text{sym.} & & 2.9 \times 10^{-11} \end{bmatrix} \quad (\text{m}^4 / \text{N} \cdot \text{s})$$

$$K_2 = \begin{bmatrix} 1.8 \times 10^{-11} & -2.1 \times 10^{-13} & -2.0 \times 10^{-12} \\ & 3.0 \times 10^{-11} & 2.6 \times 10^{-13} \\ \text{sym.} & & 2.7 \times 10^{-11} \end{bmatrix} \quad (\text{m}^4 / \text{N} \cdot \text{s})$$

ここで得られた透水テンソル K'_1 、 K'_2 の、単位不連続面積当たりの平均透水係数はそれぞれ、 6.4×10^{-13} 、 $4.0 \times 10^{-14} (\text{m}^4 / \text{N} \cdot \text{s} / \text{m}^2)$ となった。これは、モデルの節理面は voxel で表すため、局所的な開口幅の変化が生じるための差異であると考えられる。しかし、節理面の特性を考慮した単位節理面積当たりの重みは、それぞれ $11 \times 10^{-1} (/ \text{m}^2)$ 、 $3.6 \times 10^{-1} (/ \text{m}^2)$ となり、ほぼ一致しており妥当な結果と考えられる。

5. 結言

本研究において、岩盤の幾何学的な情報から3次元微視構造モデルを作成し、その透水テンソルを算定することにより、異方性を考慮した岩盤の透水性を評価できた。不連続面の水理学的特性の評価方法確立のため、さまざまなケーススタディを行うことが今後の課題である。

6. 謝辞

貴重なデータを提供していただいた東京電力株式会社建設部専門技術委員会に謝意を表します。

参考文献

- 1) 寺田、伊東、菊池：固相—液相に対する均質化法の工学的考察、土木学会論文集、投稿中
- 2) 東京電力株式会社建設部専門技術委員会：葛野川発電所地下発電所盤下掘削による挙動について
- 3) 川本、吉中、日比野：新体系土工学、技報堂出版