

(10) 空間的相関特性を考慮した岩盤透水係数分布のモデル化

清水建設(株) 大崎研究室 正会員 ○ 奥野 哲夫
清水建設(株) 大崎研究室 正会員 鈴木 誠
(財)電力中央研究所 我孫子研究所 正会員 中川 加明一郎
(財)電力中央研究所 我孫子研究所 正会員 田中 靖治

Modelling of Spatially Correlated Hydraulic Conductivities in Rock Mass

Tetsuo OKUNO, Ohsaki Research Institute, Simizu Corporation
Makoto SUZUKI, Ohsaki Research Institute, Simizu Corporation
Kameichiro NAKAGAWA, Central Research Institute of Electric Power Industry
Yasuharu TANAKA, Central Research Institute of Electric Power Industry

ABSTRACT

In this paper, a spatially correlated model with respect to hydraulic conductivities is demonstrated to discuss hydraulic properties in rock mass.

The model is characterized by a mean value, variance and covariance function of the hydraulic conductivities. These parameters are evaluated by the maximum likelihood method using the data of Lugeon tests performed in a granitic rock mass. Based on this evaluation, numerical simulations of injection tests are carried out to investigate the effects of the spatial correlation. By comparing the results of the spatially correlated model with those of the uncorrelated one, it is shown that the hydraulic conductivities calculated by injection rates in the case of correlated model scatter around those of the injected elements more widely than in the case of uncorrelated one.

This suggests that not only hydraulic conductivities at the injection intervals but also the spatial correlation of them are important to evaluate the hydraulic properties in rock mass.

1. はじめに

岩盤浸透流の解析に用いられる透水係数は一般にルジオン値から換算されることが多い。特にダム基礎岩盤などでは多くの試験が実施されており、岩盤透水係数の不均質性(空間分布)を推定する上で貴重なデータと言える。本研究では岩盤透水係数の空間分布推定に関する基礎的な検討を行なうため、花崗岩質岩盤で実施されたルジオン試験結果を用いて岩盤透水係数の空間的相関特性を評価する。その結果を用いて空間的相関特性を考慮した透水係数の分布モデルを作成し、注入試験の3次元シミュレーションにより岩盤浸透流の特性を考察する。

2. ルジオン試験結果

ルジオン試験は花崗岩質岩盤中に鉛直に掘削された深さ約300mのボーリング孔を用い、深さ50m~300mの250m区間において5mのステージ長で実施された。一部の区間を除き、この区間の岩盤は電研式岩盤分類で主にC_M級に属する比較的良好な岩盤である。なお、地質特性の詳細は文献[1]を参照されたい。シングルパッカー方式の試験から求めたルジオン値を透水係数に換算し、その分布状況を示したものがFig. 1である。本研究では、このうち深さ95m~295mの200m区間の試験結果を用いて透水係数の空間分布を検討する。実際に検討に用いた値はダブルパッカー方式の値に補正した値であるが、その分布状況はほぼFig. 1と同様である。

Fig. 2には上記200m区間の透水係数のヒストグラムを示している。図中の透水係数は自然対数をとった値を示しており、-18 ~

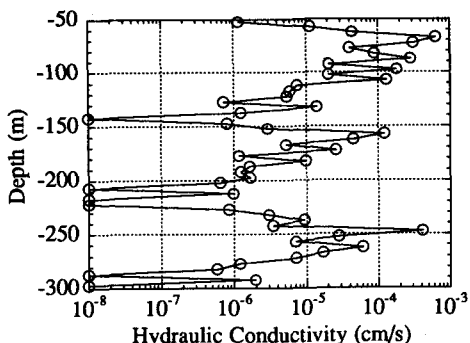


Fig. 1 Observed hydraulic conductivities

-19の範囲に位置するものは、本試験の測定精度が透水係数に換算して 10^{-7} cm/sであるため、これ以下の透水係数を便宜的に 10^{-8} cm/sと表記したためである。この点を考慮すると、一般に言われている様に対数正規分布に近い頻度分布となっている。

3. 透水係数分布のモデル化

岩盤の透水係数分布の確率論的なモデル化として簡単な方法は、対象領域をいくつかの領域に分割し、各領域の透水係数を1つの確率変数として扱うものである。このモデルでは、各領域内の試験結果のばらつきを測定誤差として扱い、データの平均値や分散から積率法により確率モデルのパラメータを推定することができる。しかし、各領域内の透水係数分布も、地質学的な成因から隣接する位置の相関性が大きく、離れた位置の相関性は小さくなるのが一般的である。したがって、このような空間分布特性を考慮した方がより現実的と考えられ、ここでは確率場の理論を導入して透水係数の空間的相関特性をモデル化する。ただし、原位置透水試験から求まる透水係数は影響半径内の全領域の透水性を反映した結果となっている。このため、透水係数を試験位置の物性値として評価するのではなく影響半径を考慮した値として評価する必要があるが、この問題は別途検討するものとする。

確率場は確率過程論を空間に拡張したものであり、ここでは2次の定常確率場を仮定する。この統計量として、平均値と分散の他に2地点間の相関特性を表す共分散関数を推定する必要がある。これに類する統計量として地盤統計学ではセミバリオグラム $\gamma(h)$ が使われており、定常確率場では共分散関数 $C(h)$ と次の関係がある。

$$\gamma(h) = C(0) - C(h) \quad (1)$$

ここで、 h は2地点間の距離(Lag)、 $C(0)$ は分散を表す。空間的に分布するデータからセミバリオグラムを求める一手法として、 $N(h)$ 個のデータペアから不偏推定量 $\gamma^*(h)$ を次式で求める手法がある。

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} \{Z(x_i + h) - Z(x_i)\}^2 \quad (2)$$

ここで、 $Z(x_i)$ は位置 x_i における物性値である。この手法では、空間に規則的に分布したデータが得られない場合、距離 h のデータペア数 $N(h)$ が少なくなり精度が低下する。また、積率法を用いているため各データペアが互いに独立である必要がある。このような問題点があるため、ここではデータ間の空間的な相関特性が考慮でき、等間隔でない場合でも比較的安定した推定が行える最尤推定法を用いた。この詳細は文献[2]を参照されたい。なお、セミバリオグラムは次式の指数関数形のものを、確率場は対数正規確率場を仮定する。

$$\gamma(h) = \sigma^2 \{1.0 - \exp(-\frac{h}{a})\} \quad (3)$$

以上の方法により透水係数の母集団のパラメータである平均値 μ 、分散 σ^2 、相関距離 a を推定した。その結果を

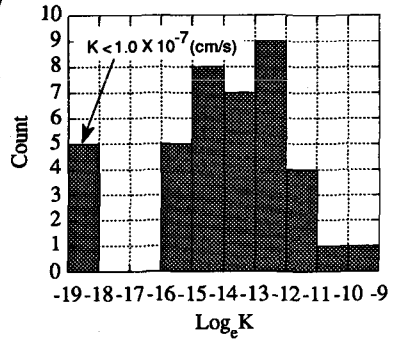


Fig. 2 Histogram of Log K

Table 1 Estimated parameters

Mean value μ	Variance σ^2	Correlation distance a
-13.87	4.68	6.59

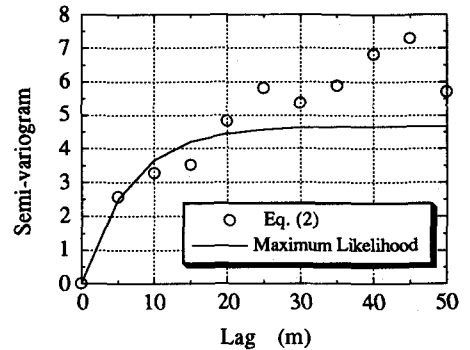


Fig. 3 Semi-variogram of observed data

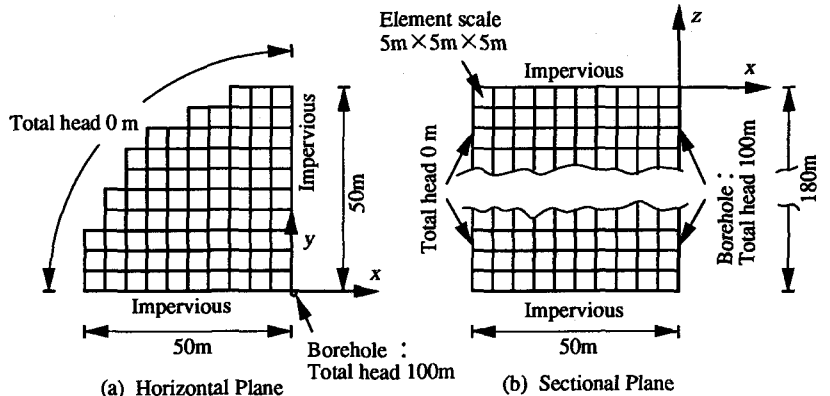


Fig. 4 FEM model

Table 1 に示す。また最尤推定法から求めた(3)式のセミバリオグラムと先の(2)式から求めた結果を比較してFig. 3 に示す。Fig. 3 より、(2)式から求めた値は2地点間の距離 h が増加するとデータペア数が減少し、最尤推定法から求めた値と異なることがわかる。

4. 注入試験の3次元シミュレーション

上記の空間的相関特性を考慮した岩盤透水係数の分布モデルを作成し、注入試験のシミュレーションから空間的相関特性を有する岩盤の一般的な浸透特性を考察する。

有限要素解析モデルはFig. 4 に示すようにボーリング孔を中心とした1/4領域とし、半径約50m、深さ180mを対象とする。透水係数の空間分布はボーリング孔を中心として軸対象ではないため、厳密には1/4領域では不十分であるが、計算容量の節約から1/4領域に設定する。また、要素形状は全要素とも一辺5mの立方体とする。以上の設定により要素数2844、節点数3700の解析モデルとなる。境界条件としては上下端面は不透水境界、外周境界は全水頭0m、また注入区間は深さ180mのボーリング孔全長とし、ボーリング孔に隣接する全節点に全水頭100mを与える。

次に、先で求めた相関特性を考慮して岩盤透水係数の分布をモデル化する。まず、要素間の共分散マトリックスを要素中心位置の距離から(1)式と(3)式を用いて作成する。この共分散マトリックスをコレスキー分解し、モンテカルロ・シミュレーションにより、所定の確率分布に従う空間分布モデルを1つ発生させる。ここでは得られているデータが1次元であるため、3次元モデルにおいても要素中心位置の距離のみに依存した等方的な相関特性となる。本研究では、透水係数の空間的相関特性の影響を調べるため、無相関のモデルCaseAと相関特性を有するモデルCaseBの2種類を作成する。なお、両モデルとも確率分布はTable 1 の平均値と分散に従う対数正規分布である。また、作成した透水係数値をFig. 5 に示す10区間に分類し、要素透水係数として新たに区間中央値(Representative value)を設定する。これは数値解析において、物性番号の数を節約するためである。

以上の方法で作成した2種類の分布モデルについて、ボーリング孔に隣接する要素の透水係数を抽出し、深さと要素透水係数の関係を示したものがFig. 6 である。図には上部から深さ方向に順番付けた要素位置で水平断面位置を示し、各分布モデル

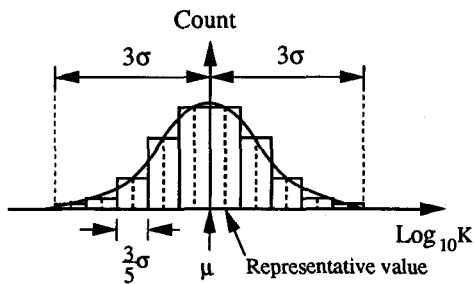


Fig. 5 Histogram of elementary hydraulic conductivities

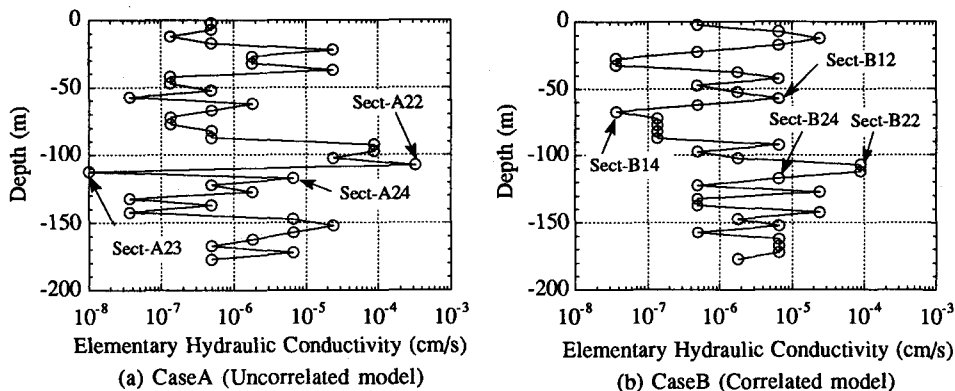


Fig. 6 Elementary hydraulic conductivities (along the borehole)

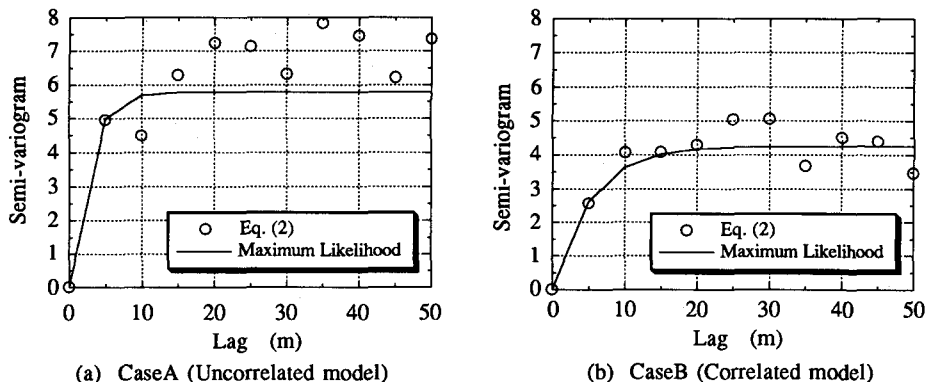


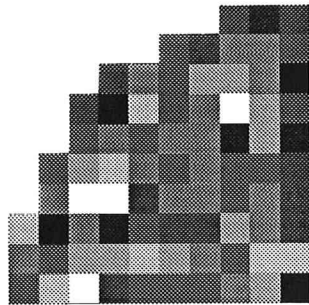
Fig. 7 Semi-variogram of analysis models

ルと水平断面位置の組み合わせで表わしている。たとえば、Sect-A22はCaseAの上部から22番目の要素位置である。CaseAではSect-A22とSect-A23のように上下に隣接する要素においても 10^{-4} から 10^{-8} cm/sのオーダーまで透水係数が変化しており、これは無相関の特性を反映している。これに対して、CaseBでは隣接する要素間でこれほどの変化は見られず、相関特性が反映されている。さらに、Fig. 6の値からCaseAとCaseBについてセミバリオグラムを作成したものがFig. 7である。図には先の(2)式で計算した値と最尤推定法で求めた曲線を示しているが、CaseBでは先の注入試験から求めたセミバリオグラム (Fig. 3) を再現していることがわかる。

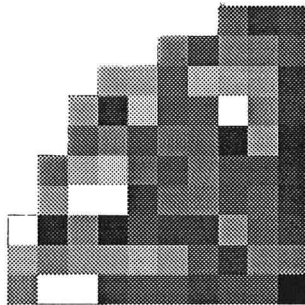
5. シミュレーション結果と考察

2種類の分布モデルを用いた注水試験のシミュレーションから、ボーリング孔に隣接する要素の流量を用いて各5m区間の注入量を求め、これから透水係数を算定した。この算定にはルジオン試験から透水係数を算定する場合と同様に水平方向の放射流を仮定した式を用いているが、影響半径は解析モデルより50m、ボーリング孔半径は33mmとした。ボーリング孔に隣接する要素の透水係数(Elementary Hydraulic Conductivity)と注入量から算定した透水係数(Calculated Hydraulic Conductivity)の関係を示したものがFig. 8である。CaseAでは要素透水係数が 10^{-4} cm/sのオーダー程度になると注入量から算定した透水係数が小さくなる。また、CaseBではCaseAに比べて同一の要素透水係数に対して注入量から求めた値の分散が大きい。これらはいずれも影響半径内の透水係数の空間分布による影響と考えられ、孔壁の透水係数から予想される注入量と実際の注入量の相違を示している。以上の結果を考察するため、代表的な水平断面内の透水係数分布と流量分布を調べた。その結果をFig. 9～13に示すが、図中、透水係数および流量の大きさを濃淡で表わしており、濃い色が相対的に大きな値を示す。また、各位置は先のFig. 6に示している。

Sect-A22 (Fig.9) はボーリング孔に隣接する要素透水係数が最も大きな場合を示しているが、CaseAは無相関であるためこの要素周辺には相対的に透水係数の小さな要素が存在する。このため流路が形成されにくく、要素透水係数に比較して流量の増加が見られないものと判断される。Sect-A24 (Fig.10) はCaseAにおいて孔壁で 6.63×10^{-6} cm/sの透水係数を示す水平断面であるが、透水係数分布が無相関であるため明確な流路は形成されていない。

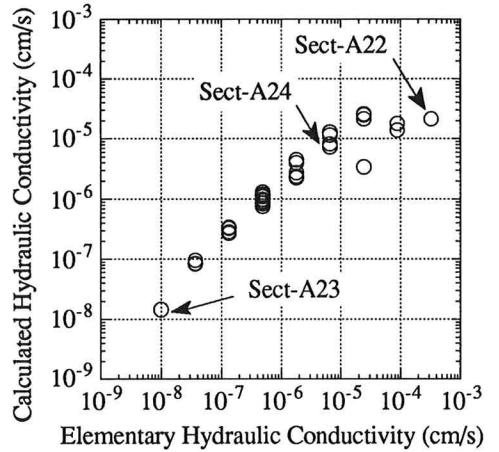


(a) Hydraulic conductivities

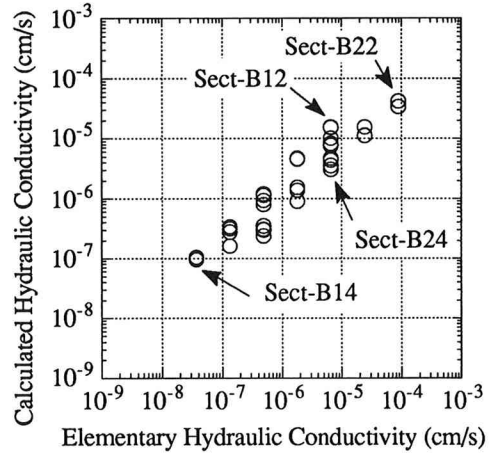


(b) Flow rates

Fig. 9 Sect-A22

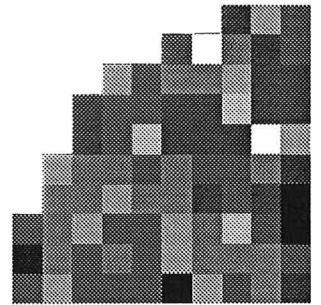


(a) CaseA (Uncorrelated model)



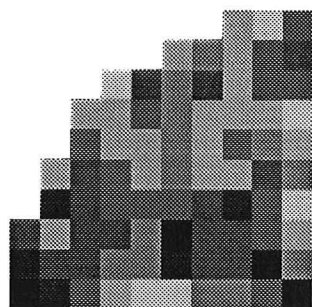
(b) CaseB (Correlated model)

Fig. 8 Hydraulic conductivities

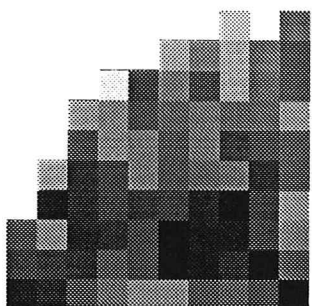


(Hydraulic conductivities)

Fig. 10 Sect-A24

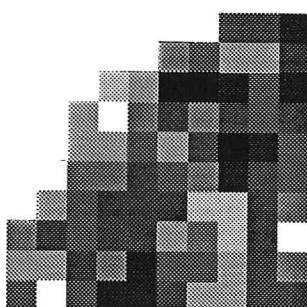


(a) Hydraulic conductivities

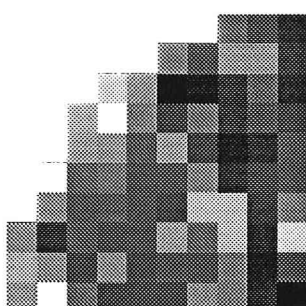


(b) Flow rates

Fig. 11 Sect-B22

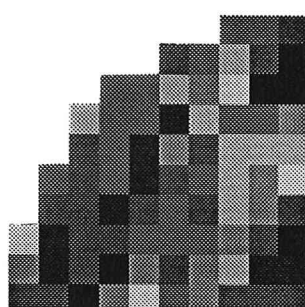


(a) Hydraulic conductivities

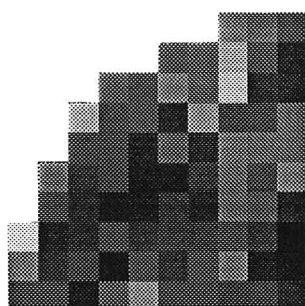


(b) Flow rates

Fig. 12 Sect-B12



(a) Hydraulic conductivities



(b) Flow rates

Fig. 13 Sect-B24

Sect-B22 (Fig.11) はCaseBにおいて孔壁の要素透水係数が最も大きな場合を示している。この場合は相関特性を考慮したモデルであるため、注入位置の要素周辺にも透水係数の比較的大きな要素が存在する。さらに、このように透水係数の比較的大きな領域が連結し流路を形成している。Sect-B12 (Fig.12) は孔壁で $6.63 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ の透水係数を示す水平断面であるが、同一の要素透水係数のうちでは流量が最も大きくなる断面である。この断面の透水係数分布を見ると、ボーリング位置から外周境界まで同程度の透水係数を示す要素が直線的に連結しており、透水経路が明確に形成されている。これは相関特性を有するがために一定領域に同程度の透水係数が分布し、このような領域同士がさらに連結して一つの透水経路を形成したものと考えられる。これに対して、Sect-B24 (Fig.13) は孔壁で $6.63 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ の透水係数を示す水平断面であるが、同一の要素透水係数のうちでは流量が最も小さくなる断面である。この場合の透水係数分布は、ボーリング孔位置周辺の要素のみ同程度の透水係数を示しており、その周辺を比較的低透水係数の低い要素が覆っている。このため明確な透水経路は形成されていない。

以上のように、相関特性を考慮したモデルのほうが注入量の分散が大きくなる。その理由として透水経路の形成の違いが挙げられる。即ち、相関特性によって同程度の透水係数を有する領域が形成され、これらの領域間の連結状態が影響する。これに対して無相関の場合は、一つの要素の周辺に空間的な偏りが少ない状態で透水係数が分布するため、明確な流路や不透水領域が形成されにくい。このため要素透水係数と注入量の関係において注入量の分散が少なく平均的な透水係数が得られるものと考えられる。

6. おわりに

本研究では、花崗岩質岩盤の透水係数分布から空間的な相関特性を考慮したモデルを作成し、3次元シミュレーションを用いてボーリング孔壁の透水係数と注入量から算定される透水係数との関係を調べた。その結果から、相関特性を考慮したモデルのほうが、ボーリング孔壁の要素透水係数から予想される注入量に対して実際の注入量がばらつく傾向が示された。現場経験的には、ボーリング孔壁の割れ目分布状況などから判断される透水性と、実際の注入量から算定される透水係数の関係にはばらつきが大きいことは周知のとおりであり、以上の傾向はこのような現象を示唆しているものと思われる。したがって、空間的な相関特性を考慮したモデルによる解析が重要と考えられる。

参考文献

- [1] 志田原 巧, 大山 隆弘, 中川 加明一郎, 新 孝一, 硬岩空洞の圧縮空気貯蔵機能評価に関する研究, 電力中央研究所報告 (準備中) .
- [2] Kitanidis, P. K., Statistical Estimation of Polynomial Generalized Covariance Functions and Hydrologic Applications, Water Resources Research, Vol.19, No.4, pp.909-921, 1983.