

(106) 地質統計手法を用いた地盤のモデル化について

鹿島建設技術研究所 正会員

青木謙治

○ 稲葉武史

堀越清規

GEOLOGICAL MODELLING BY GEOSTATISTICAL APPROACH

Kenji AOKI

KAJIMA Institute of

Takeshi INABA

Construction Technology

Kiyomi HORIKOSHI

Abstract

For the geological modelling, geostatistics has applied for permeability coefficient and RQD values of fractured granite and uniform mudstone sites, the range and accuracy of geostatistical estimation was studied. And, the accuracy of the model by this method was investigated by numerical analysis.

For RQD data, by using moving average method, the accuracy of estimation has been improved.

1. はじめに

土木構造物の設計・施工における数値解析用の地盤のモデル化は、従来地質区分や岩盤等級区分に基づいたいわば経験的な方法で行われることが多かったが、最近では詳細な検討を行うために、より実態に近い正確なモデル化が要求されるようになってきている。

一方、資源探査分野では鉱床の品位分布や規模などの推定したり、追加調査の位置決定を行うのに Geostatistics (地質統計手法、地球統計学等と呼ばれる) という統計的手法が開発され、サンプルの位置を考慮して鉱床の定量的評価を行うのに用いられている¹⁾。

筆者等はこの手法を土木地質分野へ適用するための検討を続けているが最初に、地表弾性波探査によって得られた測線上の風化層厚分布から、ある領域全体の風化層厚分布をより合理的に推定するためにこの手法を適用し、現在は土地造成計画時の土量計算などに利用している²⁾。

今回はこの手法を用いた解析用地盤モデルの作成のため国内2か所の地質調査結果のうちボーリング孔内の透水試験結果およびRQDデータに対してこの手法を適用し、推定可能範囲の大きさ、推定誤差などの検討を行うとともに、作成した数値解析用モデルの精度について検討した結果を報告する。

2. 地質統計手法の概要

地質統計手法の適用手順はある空間に分布する地質データの分布則を求める段階（バリオグラムの作成）と、このバリオグラムをもとに必要な推定を行う段階（クリギング）とに分けられる。

2.1 バリオグラム

バリオグラムとはある距離 h だけ離れたサンプルペアの差の二乗の平均値を計算したもの（式(1)）であり、これを $h = d \sim nd$ について求めたものをサンプルバリオグラムとよんでいる。その一例を図-1に示す。

$$\gamma(h) = \Sigma (D(X+d) - D(X))^2 / 2n \quad (1)$$

$\gamma(h)$: バリオグラム

$D(X+d), D(X)$: 地点 X および地点 X から距離 d だけ離れた位置のデータ

n : ペアサンプル数

一方、地質データのバリオグラムの形状は一般に(2)式で表される球モデルで近似できることが多くとされており、通常サンプルバリオグラムをこの球モデルに近似させたものをバリオグラムとして用いている。

式(2)において R はレンジ（影響範囲）と呼ばれ、1つのサンプル値が周辺に影響する範囲、逆にいえばある未知の点の推定に考慮しなければならない範囲である。

$$\gamma(h) = C_0 + C \left(\frac{3h}{2R} - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{R} \right)^3 \right) \quad (0 < h \leq R) \quad (2)$$

$$\gamma(h) = C_0 + C \quad (R < h)$$

$$\gamma(h) = 0 \quad (h = 0)$$

C_0 : ナゲット効果 $C_0 + C$: シル R : レンジ

2.2 クリギング

クリギングは上記のバリオグラムをもとに、各サンプルに付加する重みを求め、未知の点の推定を行うもので、重みの計算は、誤差の平均値が最小で、重みの合計が1になるという条件で、バリオグラムを係数とした連立方程式（式(3)）を解いて求めている。この重みを用いて(4)式により未知の点の推定を行う。また各推定点の推定誤差（分散）は式(5)から求めることができる。

重みの計算

$$\Sigma \lambda_i \gamma_{ij} + \mu = \Sigma \gamma_{i0} \quad (3)$$

$$\Sigma \lambda_i = 1$$

λ_i : 測点 i のデータに対する重み

γ_{ij} : 測点 i, j 間の距離に対するバリオグラム

γ_{i0} : 測点 i , 推定点 0 間の距離に対するバリオグラム

μ : 未定係数

未知点の推定

$$D_0 = \Sigma \lambda_i \cdot D_i \quad (4)$$

推定誤差の計算

$$e^2 = \Sigma \lambda_i \cdot \gamma_{i0} + \mu \quad (5)$$

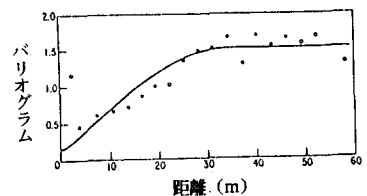


図-1 バリオグラム

3. 実測データを用いた地盤モデルの作成

今回用いたデータは、花崗岩（Aサイト）と泥岩（Bサイト）の岩盤で実測された透水係数およびRQDで、透水係数はボーリング孔の各5m区間のルジオンテストにより、RQDはボーリングコア1m毎に測定された実測値である。

これらのデータに地質統計手法を適用し、透水係数データについては5m毎に、RQDデータについては1m毎にバリオグラムを求め、次に球モデルバリオグラムに近似して、シル、レンジ、ナゲットを決定した。次にこれらの結果を用いてある断面での透水係数およびRQDの分布の推定やそれらの推定誤差についての検討を行った。さらに透水係数に対してはモデルの精度についても検討した。

3.1 浸透流解析モデルの検討

(1) サイトA（花崗岩）の場合

サイトAは亀裂の多い花崗岩で、卓越した割れ目が発達しており、不均質な岩盤である。このサイトでは垂直・水平・及び斜め方向に多数のボーリングが行われている。

このサイトの透水係数のバリオグラムは図-2に示すとおりであり、球モデルにあてはめると推定可能範囲であるレンジは54mであった。ある断面上での実測透水係数の分布は図-3のとおりで、この断面上の透水係数の分布を地質統計手法によって求めると図-4のようになり、水平方向に約350m、垂直方向に約250mの範囲について透水係数の分布を推定することができた。

この推定結果と、先に開発した手法²⁾によって求めた風化層厚分布を組み合わせて図-5に示す浸透流解析用モデルを作成して、トンネル掘削後の地下水位分布の解析を行った。また平均透水係数を用いた一様地盤での解析も行い、それらの結果と実測された地下水位との比較を図-6に示した。この結果によると地質統計手法によって推定された実測透水係数分布を反映した不均質モデルを用いた場合のほうが、平均透水係数を用いた均質モデルよりも実測地下水位に良い一致を示した。

(2) サイトB（泥岩）の場合

Bサイトは新第三紀の泥岩では40～50m間隔に深度80～100mの垂直ボーリングが約20本行われ、このうち8本で透水試験が行われている。透水係数のバリオグラムを求めると推定可能範囲（レンジ）は約50mとなった、これを基に図-7(1)に示すように実測値が分布している断面

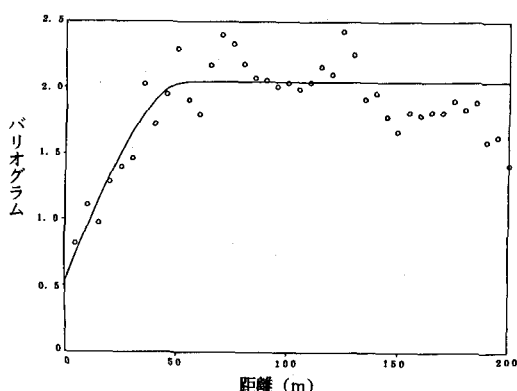


図-2 透水係数のバリオグラム（Aサイト）

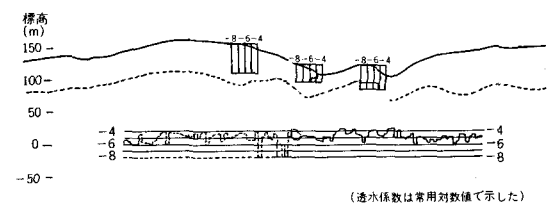


図-3 透水係数の実測値

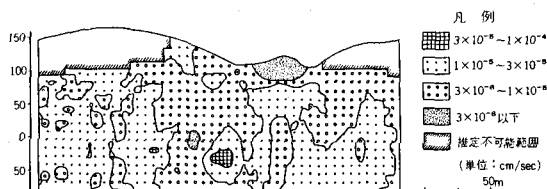


図-4 推定された透水係数の分布

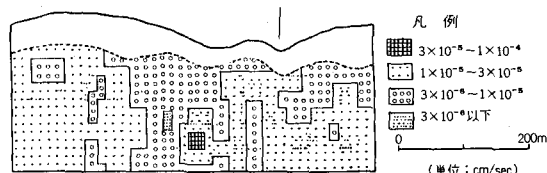


図-5 解析モデル

上での透水係数の分布及びその推定誤差を求めると同図(2)、(3)のようになる。このように誤差は伴うが実測値の位置を反映した透水係数の分布が容易に得られる。また上記Aサイトとは異なりこのような比較的均一な地盤に対しては図-7(3)のように推定誤差分布を求めることで調査ボーリング位置の最適化を図ることが可能と思われる。

3.2 RQD値による地盤モデルの検討

地盤の力学的な検討に対して地盤モデルを作成するにあたり対象とするパラメータには、強度、変形性など力学定数そのものもあるが、マクロなゾーニングを行うには割れ目の多寡を表す、例えばRQDによるモデル化が考えられる。ただしRQDや変形係数、一軸圧縮強度などについてはかなり局所性が強いいため、地質統計手法による推定誤差が大きくなることが予想される。そこで前記A、BサイトのRQD値を用いて特に推定誤差を少なくする方法について検討した。

(1) サイトA（花崗岩）の場合

実測のRQDデータを用いてバリオグラムを求めると図-8に示すように球モデルで近似できるような形状となり、レンジ（影響範囲）は40mとなったがシル、ナゲットはかなり大きい値となった。そこで推定精度向上のため実測データに移動平均を施してバリオグラムの計算を行った。移動平均はある深度の値として、その深度での実測値とその前後の測定値との平均値を用いるものでここでは5m間の移動平均を行ったので、その深度と上下各2mの合計5個の測定値の平均値を求めた。このような処理を行った結果、図-8のようにシル・ナゲットともに半分程度となり、推定精度はかなり向上した。

(2) サイトB（泥岩）の場合

BサイトについてもAサイトと同様に実測値そのままと5mの移動平均を行ったものについて検討した。そのバリオグラムを示すと図-9のようであり、シル・ナゲットの値は大幅に減少している。またレンジはいずれも約30mであった。これを用いて3本のボーリング孔を含む断面での推定を行うと図-10のとおりである。また図-

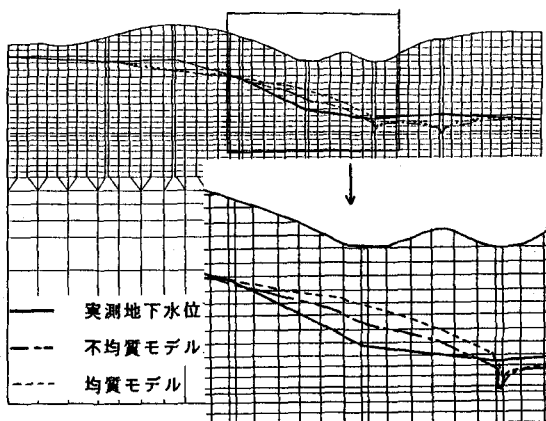
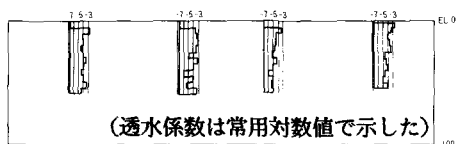
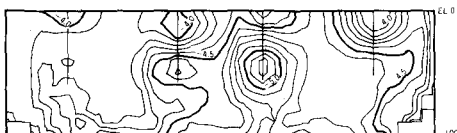


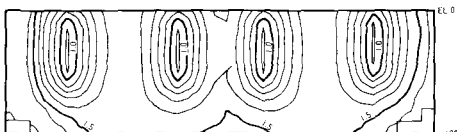
図-6 解析結果と実測値の比較



(1) 透水係数の実測値



(2) 推定された透水係数の分布



(3) 推定誤差の分布

図-7 透水係数分布の推定 (Bサイト)

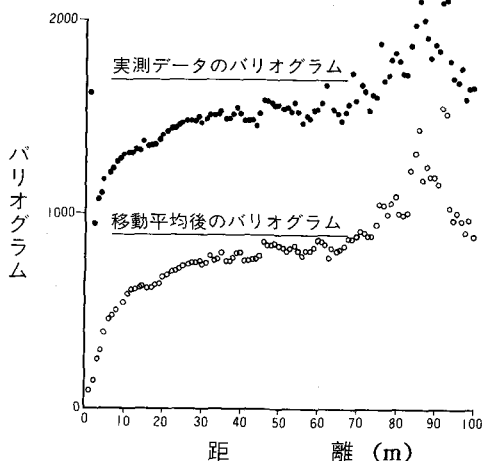


図-8 RQDのバリオグラム (Aサイト)

11に推定誤差を示した。図-10ではEL-40m付近にいずれもRQD値の低い部分が推定されておりこの断面では地層がほぼ水平であることから同一層準にRQD値の低い部分があるものと推定される。このように地質統計手法を用いると地質データの分布をコンター図などで現わすことが可能であり、全体的な広がりを容易に把握できる利点がある。

以上述べたようにRQDのような局所性の強いデータに地質統計手法を適用する際には移動平均のような処理を行ったほうがより良い結果が得られることが確認された。

4. まとめ

- (1) 花崗岩および泥岩地域で実測された岩盤の透水係数データに地質統計手法を適用しバリオグラムを求めた結果いずれもほぼ球モデルで表され、50m程度の範囲について推定ができることがわかった。さらに不均質な花崗岩地盤の透水係数分布の推定結果から解析モデルを作成し、浸透流解析を行った結果、均質なモデルの結果よりも実測値に良く一致した。
- (2) RQDデータのバリオグラムは30~40mのレンジを有するが、実測値をそのまま用いるとシル・ナゲットは大きく推定精度は低い。しかしながら、実測値に移動平均を施すことでかなり改良されることがわかった。
- (3) 地質統計手法を用いることにより、実測値の分布を反映した推定が容易に行えるほか、誤差の評価もできるため、地質調査位置の最適な配置の検討などにも適用できるものと考えられる。

参考文献

- 1) 浅見、片谷、秋山、弘前：カナダ、クチヨ鉱床での地質統計学的方法による試錐密度の検討、鉱山地質、vol.33,no.3,pp131-136,1983
- 2) 青木、稲葉、渥美、谷野：地質統計手法による地盤の弾性波速度構造の推定、第21回岩盤力学シンポジウム講演論文集、pp136-140, 1989

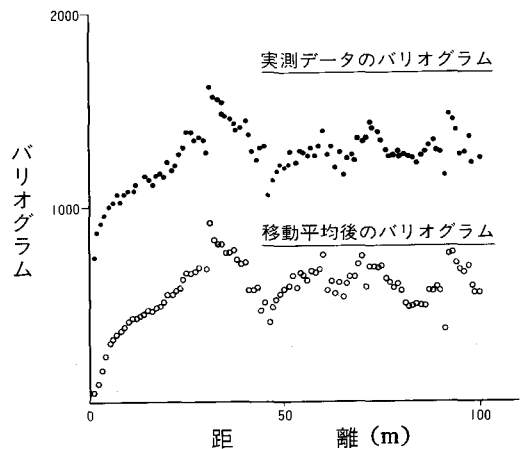


図-9 RQDのバリオグラム (Bサイト)

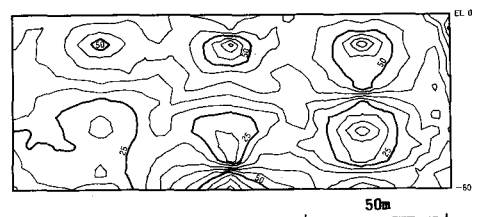


図-10 RQD分布の推定結果

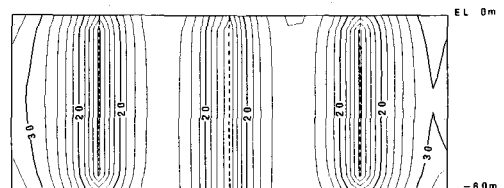


図-11 RQDの推定誤差