

(66) トモグラフィーデータを用いた物性値の空間分布の推定

Estimation of spatial distribution of rock properties using tomography data

宮川公雄*・田中靖治*・田中和広*

kimio MIYAKAWA, Yasuharu TANAKA, Kazuhiro TANAKA

The two-dimension sectional data obtained by seismic, radar and resistivity tomography method were employed for spatial distribution of rock properties by using of kriging and cokriging techniques. The first estimated properties by kriging were elastic wave velocity, resistivity, velocity and decay of electromagnetic wave from individual tomography measurement, and additionally hydraulic conductivity estimated from packer test. In the estimation by cokriging the primary variable (estimation value) is hydraulic conductivity, and secondary variable was individual tomography data. The addition of the cross-correlated secondary variables, especially velocity and decay of electromagnetic wave clearly showed that the estimation error was reduced. The usefulness of tomography data as secondary variables were also demonstrated in term of decreasing estimation error with increasing secondary variables.

1 はじめに

地球統計学的手法は鉱床品位の推定手法として発達し、現在では水理分野へも多く適用されている。検層から得られる物性値に関しては比抵抗値などに適用¹⁾が認められ、最近は他の推定手法との比較検討も行われている²⁾。本報告ではボーリング孔に沿った一次元の物性値の代わりに孔間トモグラフィーによる2次元断面の物性値を用いて空間分布の推定を行うとともに、この物性値を2次変数として透水係数の空間分布推定について検討したので報告する。

2. 適用サイトの概要

物性値の推定を実施したサイトは東部の山斜面の西部の海に挟まれた平坦地で、地表より深部まで花崗岩類が分布する。岩盤の状況は地表より20mまでは風化の影響を受けた C_M 級岩盤であり、これより深部は概ね C_H 級である。また岩盤中には固結した破碎帯と系統的な割れ目帯が認められる。サイトにはB-1からB-10までの孔が掘削されており、B-2孔を中心として10m離れた箇所にはB-7, 8, 9, 10孔が、30m離れた箇所にはB-1, 3, 4, 5孔の4本がそれぞれ配置されている。これらのボーリング孔は深度60~100mま

* (財)電力中央研究所

で掘削されている。これらの孔においては単孔式透水試験が実施されており $1\times10^{-7}\sim1\times10^{-4}$ cm/secオーダの透水係数が得られている。

2、手法の概要

物性値の空間分布の推定は最初にトモグラフィー断面データに基づいた物性値の空間分布の推定（クリッキング

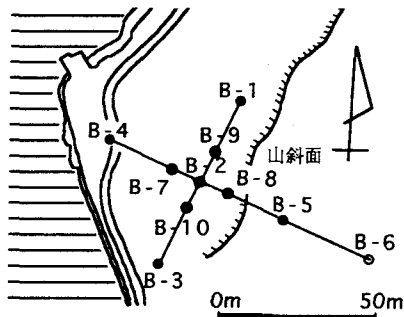


図-1 ボーリング孔配置図

グ)を実施し、次に推定された物性値の空間分布と注水試験から得た透水係数の相関性に基づいた透水係数の空間分布の推定（コクリッキング）を行った（図-2）。本検討のクリッキングで用いたデータは弾性波、比抵抗、レーダーの各トモグラフィーから得ている（表-1）。トモグラフィーはB-1、B-3孔間（1-3断面）およびB-2、B-4孔間（2-4断面）で実施し、この2断面上の物性値の分布が明らかとされている³⁾。このうちレーダートモグラフィーでは試験時に電磁波速度、電磁波減衰率の2物性値が同時に得られた。

透水係数はB-6孔を除くB-1～B-10孔において実施した注水法による単項式透水試験（5 m間隔）によって得られている⁴⁾。クリッキングのためのデータはトモグラフィーの解析範囲と同範囲にある99個のデータを用いた。

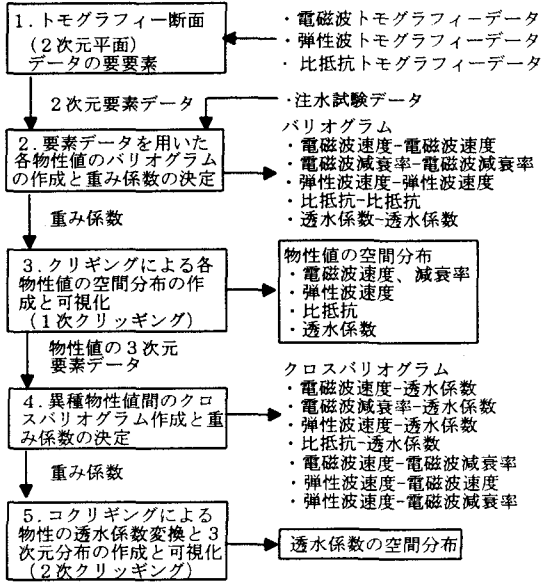


図-2 トモグラフィーデータの空間分布推定フロー

表-1 空間分布の推定に用いたトモグラフィーデータと範囲

手法	対象物性値	データ範囲
弾性波	弾性波速度 (m/sec)	1-3断面、4-5断面のGL0m～GL-60mの範囲
レーダー	電磁波速度 (m/μsec)	2-1断面、2-3断面、2-4断面、2-5断面のGL0m～GL-60mの範囲
	電磁波減衰率 (db/m)	2-1断面、2-3断面、2-4断面、2-5断面のGL0m～GL-60mの範囲
比抵抗	比抵抗 (Ωm)	1-3断面および4-5断面のGL0m～GL-60mの範囲

3、トモグラフィーデータおよび透水係数のクリッキング

クリッキング法は対象とする箇所の未知量をその周辺の既知データから推定する手法である。推定箇所の値($\hat{v}_0$)は以下のように既知データ(v_i)その距離の重み係数(w_i)乗じた線形和から算出する⁵⁾。

$$\hat{v}_0 = \sum_{i=1}^n w_i v_i$$

推定誤差を最小とする重み係数は測定データから作成されるバリオグラムによって決定する。 N 個のサンプルが存在し、各サンプル間の距離ベクトルを $\mathbf{h}$ とするときバリオグラム関数 $\gamma(\mathbf{h})$ は以下のように示される。

$$\gamma(\mathbf{h}) = \frac{1}{2N(\mathbf{h})} \sum_{(i,j)|\mathbf{h}_{ij}=\mathbf{h}} (v_i - v_j)$$

バリオグラム関数には様々な理論モデルが提案されているが、ここではトモグラフィー間の推定結果の比較のため球モデルのみで推定した。球モデルのバリオグラム関数は $\gamma(\mathbf{h})$ は以下式で示される。

$$\gamma(\mathbf{h}) = C_1 \left[1.5 \frac{\mathbf{h}}{a} - 0.5 \left(\frac{\mathbf{h}}{a} \right)^3 \right] + C_0 \quad |\mathbf{h}| \leq a$$

$$\gamma(\mathbf{h}) = C_1 + C_0 \quad |\mathbf{h}| > a$$

$$\gamma(\mathbf{h}) = 0 \quad |\mathbf{h}| = 0$$

このうち C_0 はナゲット (nugget)、 $C_0 + C_1$ はシル (sill)、 a はレンジ (range) と呼ばれる関数パラメータでバリオグラムモデルの近似によって決定できる。

トモグラフィーデータに基づいたバリオグラムは各断面毎に2次元バリオグラムを作成し関数を決定した。

この関数に基づいて各物性値のクリッキングを行い空間分布を推定した (図-3)。

透水係数の空間分布については、トモグラフィーに比べて離散的なデータであるため3次元バリオグラムを作成し、クリッキングを実施した。

4、透水係数とトモグラフィーデータによるコクリッキング

コクリッキングは直接推定したい変数(1次変数)に対して、これと相関を有する別の変数(2次変数)がある場合、この変数群を利用して推定する方法である。たとえば u_i を1次変数とし、これと相関を有する別の変数群 v_i を2次変数とした場合推定値 u_0 は以下に示す1次変数と2次変数の線形結合によって示される⁵⁾。

$$u_0 = \sum_{i=1}^n a_i \cdot u_i + \sum_{j=1}^m b_j \cdot v_j$$

ここで $a_1, \dots, a_n, b_1, \dots, b_m$ はそれぞれの変数の重み係数である。コクリッキング法でもクリッキング法と同様に推定誤差が最小値となるように重み係数を決定する。最小値はクリッキングと同様の γ_U, γ_V のバリオグラム関数の他、以下に示すクロスバリオグラム関数 $\gamma_{UV}(\mathbf{h})$ を用いて決定する。

$$\gamma_{UV}(\mathbf{h}) = \frac{1}{2N(\mathbf{h})} \sum_{(i,j)|\mathbf{h}_{ij}} (u_i - u_j) \cdot (v_i - v_j)$$

この関数におけるナゲット、シル、レンジはクリッキングと同様にバリオグラムモデルに近似することによって決定し、クロスバリオグラム $\gamma_{UV}(\mathbf{h})$ のパラメータが得られる。2次変数が複数の際はそれぞれバリオグラムの他、変数の組み合わせ毎のクロスバリオグラムが必要とされる。

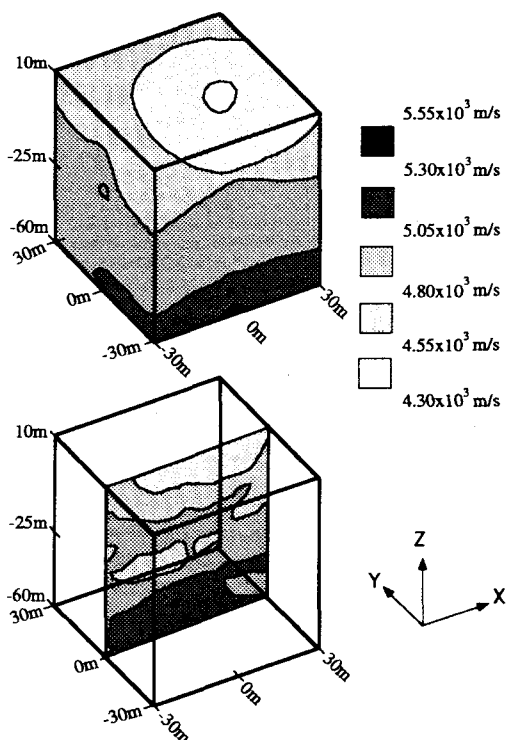


図-3 弾性波速度の空間分布と1-3断面

本報告ではコクリッキングでは透水係数を推定値とし、1 次変数を透水係数、トモグラフィーから得た物性値を 2 次変数として、それぞれのバリオグラム及びクロスバリオグラムを作成した。透水係数の空間分布の推定は 2 次変数群が 1 種類（各物性値毎の 4 ケース）、2 種類（電磁波速度と電磁波減衰率）、3 種類（弾性波速度、電磁波速度と電磁波減衰率）の場合を実施した（表－2）。

表-2 1 次変数（透水係数）に対する 2 次変数

		2 次変数				コクリッキングの対象
		弾性波速度	電磁波速度	電磁波減衰率	比抵抗	
1 次変数	透水係数 (γ_k)	(γ_s)	(γ_r)	(γ_d)	(γ_R)	(1 次クリッキング)
		γ_{ks}	γ_{kr}	γ_{kr}	γ_{kR}	透水係数-弾性波速度、透水係数-電磁波速度、透水係数-電磁波減衰率、透水係数-比抵抗
			γ_{rd}			透水係数-電磁波速度-電磁波減衰率
		γ_{sd}		γ_{sd}		透水係数-弾性波速度-電磁波速度-電磁波減衰率
		γ_{sr}				

以上のバリオグラム関数から決定した重み係数を使い透水係数の空間分布を推定した（図-4）。

5、推定結果の検討

トモグラフィーデータを 2 次変数に用いたコクリッキングの結果を検討するために、以下の検討を実施した。

- ①透水係数のクリッキングの平均推定誤差に対する各コクリッキングの場合の推定誤差変化率（表-3）
 - ②各検討ケースにおける全接点の推定誤差の平均標準偏差の比較(図-4)
 - ③特定点における各ケースの標準偏差の比較(図-5)
- ③点での比較に用いた接点は推定領域の中心に近いトモグラフィー断面上の点(A)とサンプルデータから最も遠い領域コーナーの点(B)とした。

これらの検討によれば、全体的な傾向として透水係数のクリッキングよりもコクリッキングの方が、またコクリッキングの場合は 2 次変数の数が多いほど推定誤差変化率、推定誤差の平均標準偏差、特定接点の推定誤差の減少する傾向が認められる。コクリッキングについては物性値間の相関性にもよるが、ある程度 1 次変数と 2 次変数に相関性があれば 2 次変数の数が多いほど推定誤差が減少するという、コクリッキングの特徴を示していると考えられる。同一接点のうち B 点の場合の推定誤差の標準偏差減少

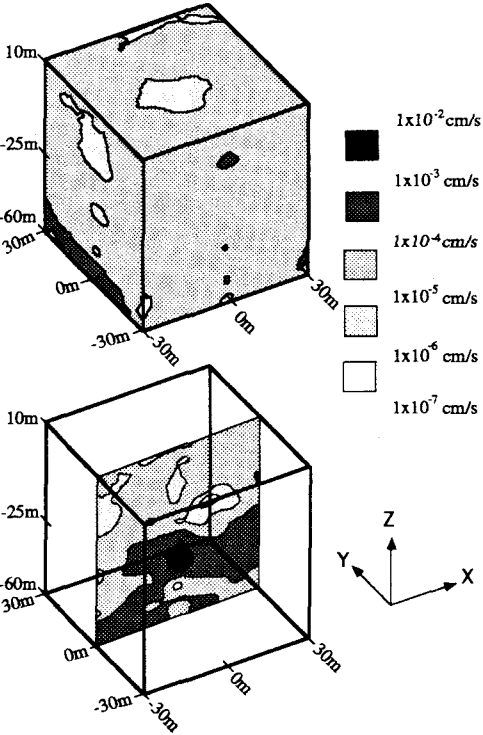


図-4 透水係数の空間分布と1-3断面
(2 次変数：弾性波速度、電磁波速度、電磁波減衰率)

が小さく認められる。これはこの推定点が各サンプル点から最も遠い点であるため、各ケースとも全体の物性値の平均に近い値となり、よって推定誤差の標準偏差の減少も小さくなった為と考えられる。また各トモグラフィー間の比較では2次変数が電磁波速度、電磁波減衰率である場合が変化率、平均標準偏差、特定接点の標準偏差が減少する傾向が認められた。

表-3 透水係数クリッキングとコクリッキングの推定誤差変化率

	弾性波速度	電磁波速度	電磁波減衰率	比抵抗
透水係数(E)	(G) 1.50%	(H) 7.19%	(I) 7.83%	(F) 0.62%
		(J) AV=9.26%		
	(K) AV=9.99%			

6、まとめ

トモグラフィーによる断面データを用いて物性値の空間分布の推定をした。透水係数の空間分布の推定を事例として異種物性値を用いたコクリッキング法を適用した。その結果透水係数のクリッキングよりも異種物性値を2次変数としたコクリッキング方が、また2次変数の数が多いほど推定誤差が減少する傾向が認められ、トモグラフィーによる物性値を用いた場合でもコクリッキングの利点を確認された。

なお本研究のとりまとめに際しては住友金属鉱山の水落氏に、また解析に関しては日本総合研究所の國枝氏に大変お世話になった。両氏に深く感謝致します。

6. 参考文献

- 1) 大西有三、田中誠、大澤英昭、不均質地盤内の地盤定数の推定に関する基礎的研究、土木学会論文集、No. 457, pp51-58, 1992. 12
- 2) 尾方伸久、柳澤孝一、地球統計解析手法を用いた三次元透水係数分布の推定、原子力学会「1994春の年会」講演予稿集、p78, 1994
- 3) 田中和広他：割れ目系岩盤における水理地質構造の調査手法の提案と適用、応用地質、第37巻第1号, 1996, 印刷中
- 4) 田中靖治、田中和広、割れ目系岩盤における地下水調査システムの提案と原位置への適用 土質工学会 94年度講演予稿集、1994
- 5) Journel A.G. and Huijbregts C.J. Mining Geostatistics, Academic Press, 1978

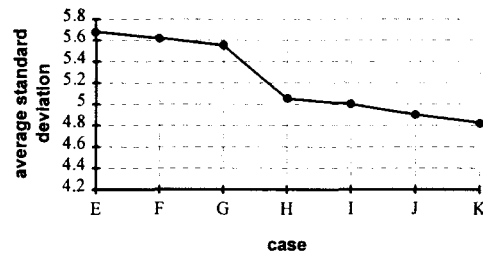


図-5 各ケースにおける推定誤差の平均標準偏差

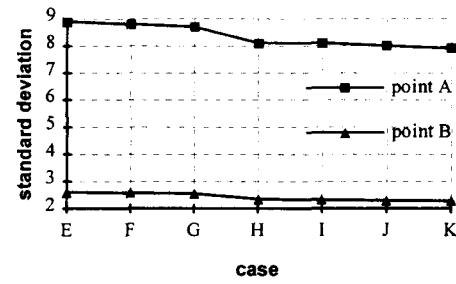


図-6 各ケースにおける推定誤差の標準偏差