

(28) 地質統計手法による地盤の弾性波速度構造の推定法

鹿島建設技術研究所 正会員 青木謙治、○稲葉武史
渥美博行、谷野郁子

Application of geostatistics to obtain the Geological profile by seismic prospecting

Kenji AOKI, Takeshi INABA; Kajima Institute of Construction Technology
Hiroyuki ATSUMI, Ikuko YANO; Kajima Institute of Construction Technology

ABSTRACT

This paper describes the application of geostatistical method which is used to estimate the distribution of the thickness of weathered layers by seismic prospecting results.

Generally the weathered layer is thick at ridges and thin at valleys. Therefore it is necessary to consider this topographic characteristics at the interpretation and extrapolation of the results of measured velocity structure. To obtain accurate distribution of weathered layer to the whole area from limited measured results, following procedure had been adopted and their validity was studied.

- 1) The correlation between thickness of weathered layer and topographical profile was calculated.
- 2) On computing variogram, thickness value of weathering was corrected by this correlation.
- 3) Using corrected thickness data, overall distribution of weathered layer thickness out of measured data is estimated by kriging.

Using this method, following results were obtained.

- 1) By the correction of weathered layer thickness based on topographic value, the sill of variogram decreased and the range increased.
- 2) The accuracy of this method was confirmed by comparing estimated thickness with measured value.

I. はじめに

土木分野において岩盤の弾性波速度は、それを構成する岩石の強度、き裂分布に関する性状を定量的に表わす方法として、トンネルの地山、ダム基礎、原石山等の地質評価、土地造成に伴う切土のリップビリティ（掘削の難易性）の調査・評価等に幅広く利用されている。

地表弾性波探査により得られる地盤の弾性波速度構造は、測線を含む鉛直二次元断面の速度構造であり、対象領域全域にわたる岩盤の性状を評価するには、測線以外の部分を推定し、三次元的な地盤の速度構造（速度層厚の平面的分布）を求める必要がある。従来、経験的判断によっていたこの作業を地質統計手法を用いた電算処理により簡便、迅速で精度の高い評価を行うために検討を続けてきたが、本報文ではこの手法の概要について土地造成計画への適用事例を主体に報告する。

II. 三次元弾性波速度構造の推定

弾性波探査により測線を含む鉛直断面で得られた二次元速度構造をもとに、対象領域全体の三次元速度構造を評価する。ここでは地表面から新鮮岩表面までの風化層厚を対象として評価を行った。

一般に岩盤の風化層の厚さ（新鮮岩までの深さ）は尾根部で厚く、谷部で薄いという特徴を有することから、測線データから測線以外の任意の点の風化層厚を推定する際、単に推定点との距離が小さい測線データに大きな重みを与えるだけではなく、推定点および測線の地形の差異についても考慮に入れる必要がある。

今回、開発したプログラムは、地形の起伏度を数値化して地形補正を行ったうえで、地質統計手法を適用して測線データに推定点との距離に応じた重みを与えて風化層厚分布を推定するものである。

1. 適用した地質統計手法

地質統計手法とは、データ採取点の位置を考慮して、層厚、物性、化学組成等の地質データが有する相互の空間的位置関係を表現する統計解析手法で、これまで主に鉱床探査分野で領域内の鉱量、平均品位等を求めるために広く利用されてきた手法である^{1),2)}。以下に今回適用した当手法の概要を述べる。

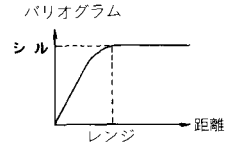
距離dだけ離れた2点間のデータの差の分散がその2点の位置によらず一定であるとし、次式で示すバリオグラムを求め、対象領域でのデータの距離に対する相関性を表わす。

$$\gamma(d) = \frac{1}{2} E [(h(X+d) - h(X))^2]$$

$\gamma(d)$; バリオグラム $E[]$; 期待値

$h(X), h(X+d)$; 地点X、地点Xから距離d離れた

位置のデータ（ここでは測線上の風化層厚） 図-1 バリオグラム模式図



バリオグラムは一般に図-1の模式図で表わされる球状モデルと呼ばれる形状を呈することが多く、距離が近いほどバリオグラムは小さくデータは互いに強い相関を示し、逆にバリオグラムがほぼ一定（この値をシルと呼ぶ）となる距離すなわちレンジ以遠のデータは互いに独立と見なされる。

測点以外の任意の点における値は、バリオグラムをもとに推定誤差の平均がゼロで共分散が最小になるように測点でのデータに線形の重みをつけて次式により求める。

$$h(X_0) = \sum_{i=1}^n (\lambda_i \cdot h(X_i))$$

$h(X_0)$; 任意の点 X_0 における推定値 n ; 推定に採用するデータ数

λ_i ; 測点 X_i のデータに対する重み

この重み λ_i は、次の連立方程式を解くことにより得られる。

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j \gamma(d_{ij}) + \mu = \gamma(d_{i0}), \quad \sum \lambda_i = 1 \quad (i=1 \dots n)$$

d_{ij} ; 測点 X_i, X_j 間の距離 d_{i0} ; 測点 X_i 、推定点 X_0 間の距離

μ ; 未定係数

推定誤差の共分散は次式により求められる。

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot r(d_{i0}) + \mu$$

このような推定をクリッキングと言ひ、この操作により、測点からの距離がレンジ以内の範囲で、少ないデータを有効に利用して、測点と推定点の位置関係を考慮した精度の高い推定が可能となる。

2. 地形の数値化

解析対象領域を格子状に分割して各格子点の地形の起伏度を数値（地形数値）化して、測線上のデータについて地形数値と風化層厚との関係を求め、これをもとにバリオグラムを計算し、クリッキングの際に地形補正を行った。

位置Xの地形数値A(X)は、次式により定義した。したがってこの値は尾根部で最大、谷部で最小となる。

$$A(X) = \left[\sum_{V \in D} (T(X) - T(V)) \right] / N$$

D：地形数値化取込み範囲（ポイント数N） T(X)、T(V)；地点X、Vの標高

地形数値化取込み範囲（上式のD）は、地形数値化を行う点を中心とした正方形領域とし、その大きさは、風化層厚と地形数値の関係が最も明確になるものを相関係数等により判断して決定した。

3. 解析方法

従来の地質統計的考え方に、地形による補正を加えて、風化層厚の分布を推定した。この解析の手順は図-2に示したが、本解析手法の特徴である地形による層厚の補正は以下のようにして行った。

① 測線での観測データをもとに、地形数値-層厚相関図を作成し、回帰式を求める。

② 測線上の層厚データを①の回帰直線の傾きにより補正を行い、平均地形数値での層厚換算値を求める。層厚補正の計算は次式によって行う。

$$d' = d - B(A(0) - A(X))$$

d'：補正後の風化層厚， d：実測風化層厚

B：風化層厚と地形数値の関係を表わす回帰直線の傾き

A(X)， A(0)：推定点の地形数値及び測点の地形数値

③ ②の層厚換算値に対してバリオグラムを計算する。

④ 測線上のデータに①の相関関係を用いた補正を行い、各推定点の地形数値に対応する層厚換算値を求める。

⑤ ④で求めた層厚換算値に③のバリオグラムにより重みを与えて推定点の風化層厚を計算する（クリッキング）。

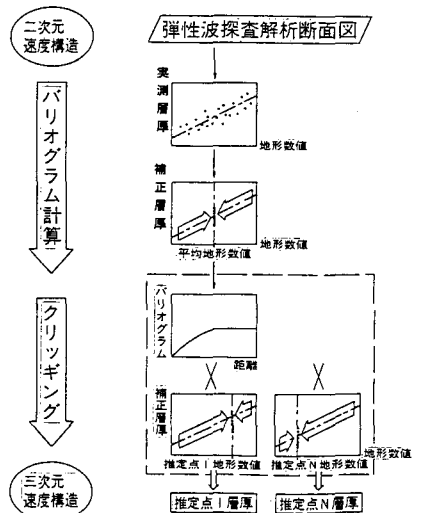


図-2 解析手順

Ⅲ. 解析結果

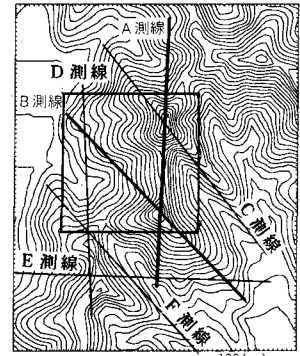
本手法の開発の目的は、三次元的な速度構造の推定にあるが、その推定精度の検証のため、まず弾性波探査結果が得られている測線の鉛直二次元断面の速度構造を、近傍の弾性波探査測線による実測データを用いて推定し、実測値と比較した。解析の対象としたのは南北610m、東西750mの範囲（図-3）で、領域内で実施した弾性波探査6測線のうち、A、B以外の4測線の実測データを用いて本手法を適用し、A、B測線の風化層厚を推定し、その実測値と比較した。

図-4は測線上5m間隔の661点について求めた地形数値-風化層厚関係図であり、地形数値が大きい部分が尾根部に相当する。

図-5に風化層厚の地形補正をしない場合と、した場合のバリオグラムを示す。この形状からバリオグラムは球状モデルとし、地形補正によりシルが減少するとともに、レンジが約140mから約330mにのび、測線からの推定可能距離を大幅に増大することができた。

図-6に、A、B両測線について、①弾性波探査による実測断面②地形補正をした地質統計手法による推定断面③地形補正をしない従来の地質統計手法による推定断面④測線と推定点との距離を考慮せず、図-4の地形数値-風化層厚の関係により求めた断面図を示す。これらの推定精度を比較するため各推定法による計算値と実測値との差を（推定値/実測値）-1のグラフとして図-7にまとめると、②の地形補正を行った地質統計手法を用いた場合が誤差の平均、標準偏差とも最も小さく、より実測値に近い結果となった。また地形補正をしない場合（③）は、地形と層厚の関係から求めたもの（④）よりも誤差が大きく、地形の差異に対する考慮が必要であることがわかる。

次に、図-3に示すこの領域の一部について、この手法を適用し、10m間隔の格子点について風化層厚を求めた。その結果を地表面、基盤岩表面の等高線と共に示すと図-8のようである。このような等高線データが容易に得られ、図化できることから本手法は土地造成計画における切盛土量計算等に対して実用性が高いと思われる。



— : 測線 (太線は解析断面)
□ 内は図-8の範囲
図-3 解析領域図

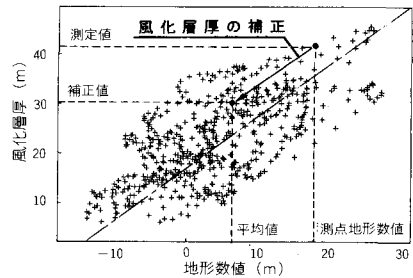


図-4 地形-風化層厚図

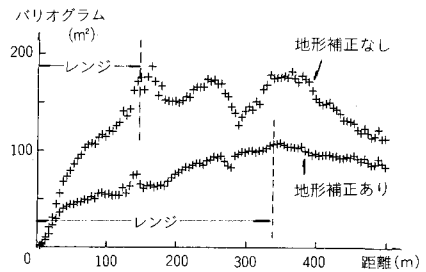


図-5 バリオグラム

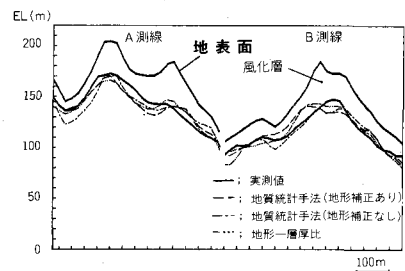


図-6 解析結果 (断面図)

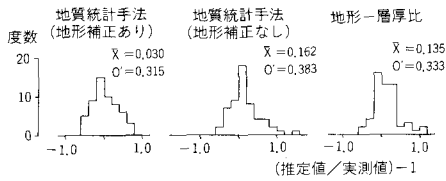
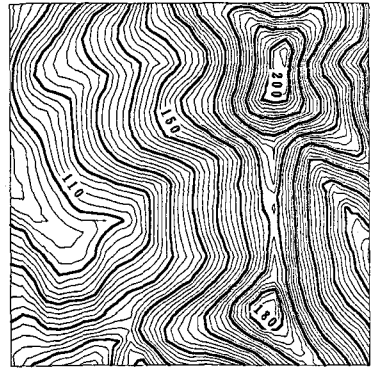
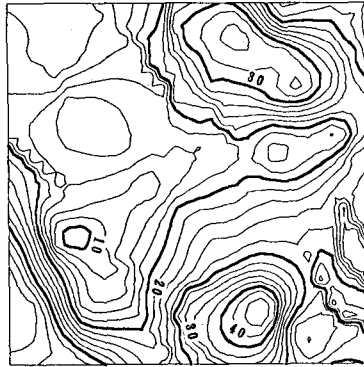


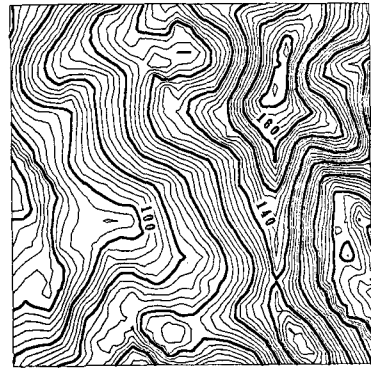
図-7 各種推定法の誤差評価



(a) 地表面



(b) 風化層厚



(c) 新鮮岩表面

100m

図-8 地表面・風化層厚および新鮮岩表面の等高線図

IV. おわりに

地質統計手法を用いた弾性波速度層厚分布の推定法について報告したが以上をまとめると次のとおりである。

- (1) 地形の数値化及び、それを用いた風化層厚の補正により、推定範囲及び精度が向上した。
- (2) 実測値との比較により、この手法の推定精度を確認した。
- (3) 三次元的な風化層厚の分布を容易に求めることができ、切盛土量計算等への適用が可能となった。

参考文献

- 1) Jean-Michel Rendu: Geostatistical Methods of Ore Reserve Estimation, MINING GEOLOGY, vol. 34, no. 3, pp. 197-224, 1984
- 2) 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, pp. 131~136, 1983