

Ⅲ-A349 地表面レベルと弾性波探査結果を利用した基盤面レベル推定 (その1 数値実験による検証)

清水建設 (株) 正会員 ○本多 眞・鈴木 誠
中部電力 (株) 正会員 上田 稔・西村 均

1. はじめに

限られた調査ボーリングデータから起伏を有する基盤面レベルを精度良く推定することは容易なことではない。筆者らは基盤面レベルと地表面レベルが地質学的な観点から相関性を有することが多いことに着目して、地質統計学的手法のCokriging¹⁾を用いて、地表面レベルを補助データとした基盤面レベルの推定法を提案し多くの実績をあげた²⁾。杭基礎構造物のための実際の調査では、ボーリング調査に加えて弾性波探査による調査も併用して行われることが多い。この弾性波探査結果の情報を加えれば、さらなる推定精度の向上が期待できる。Cokrigingで地表面と弾性波探査結果の3変量を扱うのは、パラメータの数が増大するため空間構造の特定(モデル作成)が困難となる。そこで地表面レベルは外部変数トレンド成分として扱い、基盤面レベルと弾性波速度境界面レベルの2変量に減らしたCokriging手法を考えた。トレンド成分に外部変数を用いる場合には、外部変数が空間的に滑らかに変化し、かつ観測位置および推定位置の全てにおいて真値が得られることが条件となるが、地表面レベルは任意の位置で得られるデータであり、この条件を満たしている。

本論文は地表面、基盤面および弾性波探査結果のデータを想定した数値実験により、提案手法の有効性を検証した。

2. 外部変数トレンドを組み込んだCokriging法

$Z(\mathbf{x})$, $S(\mathbf{x})$ をそれぞれ位置 $\mathbf{x}$ における基盤面レベルおよび弾性波速度境界面レベルとし、 $y(\mathbf{x})$ を地表面レベルの関数とすると、 $Z(\mathbf{x})$, $S(\mathbf{x})$ それぞれのトレンド成分を次式で表す。

$$\begin{cases} E[Z(\mathbf{x})] = b_0^{(Z)} + b_1^{(Z)}y(\mathbf{x}) \\ E[S(\mathbf{x})] = b_0^{(S)} + b_1^{(S)}y(\mathbf{x}) \end{cases} \quad (1)$$

任意地点 $\mathbf{x}_0$ における基盤面レベルのCokriging推定値 $\hat{Z}(\mathbf{x}_0)$ および方程式は次式で表される。

$$\hat{Z}(\mathbf{x}_0) = \sum_{i=1}^{n_1} \lambda_i^{(Z)} Z(\mathbf{x}_i^{(Z)}) + \sum_{j=1}^{n_2} \lambda_j^{(S)} S(\mathbf{x}_j^{(S)}) \quad (2)$$

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{n_2} \lambda_i^{(S)} C_S(\mathbf{x}_i^{(S)} - \mathbf{x}_j^{(S)}) + \sum_{k=1}^{n_1} \lambda_k^{(Z)} C_{SZ}(\mathbf{x}_k^{(Z)} - \mathbf{x}_j^{(S)}) \\ + \eta_0 + \eta_1 y(\mathbf{x}_j^{(S)}) = C_{2S}(\mathbf{x}_0 - \mathbf{x}_j^{(S)}), \quad j=1, \dots, n_2 \\ \sum_{k=1}^{n_1} \lambda_k^{(Z)} C_Z(\mathbf{x}_k^{(Z)} - \mathbf{x}_i^{(Z)}) + \sum_{j=1}^{n_2} \lambda_j^{(S)} C_{2S}(\mathbf{x}_j^{(S)} - \mathbf{x}_i^{(Z)}) \\ + \eta_0 + \eta_1 y(\mathbf{x}_i^{(Z)}) = C_{2Z}(\mathbf{x}_0 - \mathbf{x}_i^{(Z)}), \quad i=1, \dots, n_1 \\ \sum_{k=1}^{n_1} \lambda_k^{(Z)} = 1, \quad \sum_{k=1}^{n_1} \lambda_k^{(Z)} y(\mathbf{x}_k^{(Z)}) = y(\mathbf{x}_0) \\ \sum_{i=1}^{n_2} \lambda_i^{(S)} = 0, \quad \sum_{i=1}^{n_2} \lambda_i^{(S)} y(\mathbf{x}_i^{(S)}) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 $\mathbf{x}_i^{(Z)}$ ($i=1, \dots, n_1$) 及び $\mathbf{x}_j^{(S)}$ ($j=1, \dots, n_2$) はそれぞれ基盤面レベル、弾性波速度境界面レベルの観測位置であり、 $\lambda_i^{(Z)}$ 及び $\lambda_j^{(S)}$ は重み係数である。

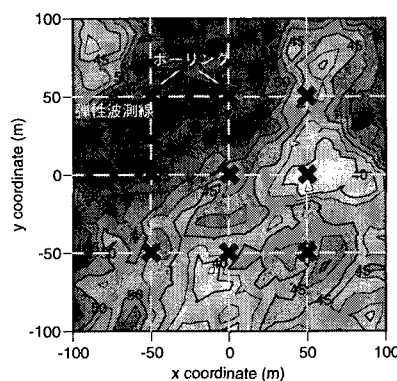
3. 数値実験による検証

提案手法による推定精度の検証を行うために、模擬確率場による数値実験を実施した。図1は作成した数値モデルの例で、a)のコンターが地表面レベル、b)のコンターが基盤面レベルを示しており、それぞれ平均値50m, 0mおよび次式の共分散・相互共分散関数を用いて生成した。

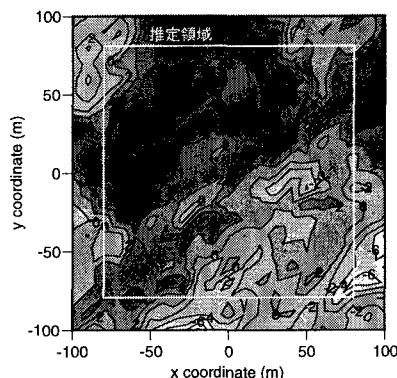
$$C_Z(\Delta h) = 20 \cdot \exp(-\Delta h / 70), \quad C_Y(\Delta h) = 30 \cdot \exp(-\Delta h / 70)$$

$$C_{ZY}(\Delta h) = C_{YZ}(\Delta h) = r \cdot \sqrt{20} \cdot \sqrt{30} \cdot \exp(-\Delta h / 70) \quad (4)$$

上式で地表面と基盤面の相関係数 r は0.3, 0.7, 0.9の3ケースとしている。a)の図で、★印が基盤面レベルの真値を与えるボーリング位置とし、5本の破線が弾性波測線を想定した弾性波速度境界面レベルを与える位置とする。弾性波速度境界面レベルは、基盤面レベルの真値にノイズ(平均0, 共分散関数 $C_{nois}(\Delta h) = k \cdot C_Z(\Delta h)$)を加えたものとし、ノイズの大



a) 地表面レベルおよび
ボーリング・弾性波測線位置



b) 基盤面レベルの例
(地表面との相関係数0.7)

図1 数値実験モデル

Keywords: 杭基礎, 基盤, 地質統計学, 数値実験, Cokriging

連絡先: 〒100-0011 東京都千代田区幸町 2-2-2 富国生命ビル 清水建設 (株) TEL03-3508-9052 FAX03-3508-2196

きさ k を0.01(1%), 0.05(5%), 0.1(10%), ..., 1.0(100%)の12ケース設定し, 弾性波探査結果の精度の違いによる推定結果の影響について検討する。確率場生成のばらつきを抑えるため全て5セットずつ生成しており, 全解析数は $(3 \times 5) \times (12 \times 5) = 900$ である。b)の図の矩形内の10m格子点で基盤面レベルの推定を行い, 真値との残差の平均で推定精度を評価する。まず図2には推定結果の一例を, 推定値と真値の残差コンター（色の濃い部分が誤差の大きいところを示す）で表し, 手法を比較している。a)は弾性波を考慮しない地表面とのCokrigingによるもの, b)は10%のノイズを含んだ弾性波データを考慮した提案手法によるものであり, 地表面と基盤面の相関係数は0.7のケースである。この図から弾性波を考慮しない場合, 最大で6m以上残差の生じている部分があるのに対して, 提案手法によるものは最大4m程度に抑えられており, 平均残差は1.12mと50cm以上減少している。

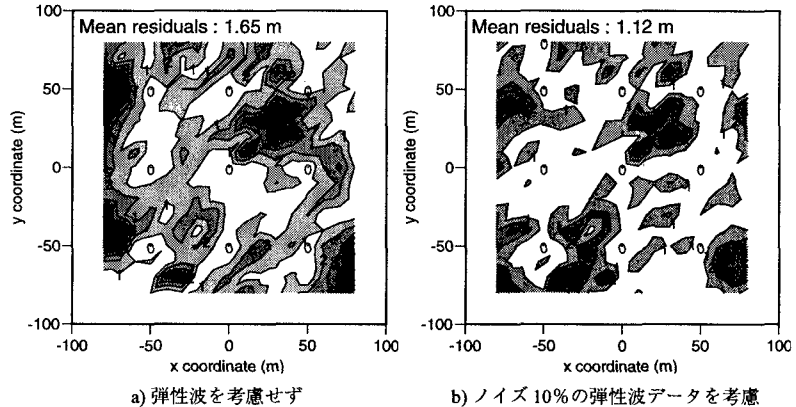


図2 弾性波データを考慮しない場合と考慮した提案手法の推定残差の例

次に全解析ケースを地表面と基盤面の相関係数 r および弾性波データに含まれるノイズの大きさ k ごとに平均をとってプロットしたものが図3である。また図には弾性波を考慮しない場合の平均推定残差も同時に示している（破線）。どのケースもノイズが小さくなれば, 推定精度が良くなっているのがわかる。またどのケースも弾性波を考慮しない場合に比べて, 平均的には弾性波を考慮した提案手法の方が推定精度が良いことが見て取れる。ただしその効果は, 地表面と基盤面の相関係数 r によって異なり, 相関性の高い $r=0.9$ ではノイズの大きさが30%以上ではほとんど効果がないのに対して, $r=0.3$ では大きさ100%でもある程度の効果がある。これは地表面との相関性の強いケースでは, もともと推定精度が良く, ノイズの大きい弾性波データを考慮してもあまり効果がないことに起因している。

実際の調査では弾性波探査結果に含まれるノイズの大きさは明らかでないので, ボーリングで確認された基盤面との相関性を基に評価することになる。そこで図4に基盤面と弾性波速度境界面との間の相関係数 ρ を横軸に平均推定残差をプロットしたものの（例として地表面との相関性0.7のケース）を示す。この図から, 相関係数 ρ が大きくなると精度が良くなる傾向が明らかであるが, 個々の解析ケースで見れば必ずしも良くなるとは限らない。平均推定残差が約半分と大幅に減少しているケースもあるが, なかには弾性波を考慮しない場合に比べて多少ながら悪くなるケースも見受けられる。すなわちその効果にはばらつきがあり, 弾性波との相関性が高いからといって, 推定精度が大幅に向上するとは限らないことに注意が必要である。ただし, 平均的に見れば0.6~0.7程度の相関性があれば, その効果が期待される。

4. おわりに

本研究では, 基盤面レベルの推定に地表面レベルだけでなく弾性波探査結果のデータも加えて推定精度を向上させる手法を提案, 数値実験による有効性の検証を行った。その結果, 弾性波データを考慮した場合の効果は, 基盤面が地表面と相関性が低いときにより効果が高く, 沖積平野などの地表面の情報が利用できない場合などにより有効であることが示された。

参考文献

- 1) Journel, A.G. and Huijbregts, Ch.J. : Mining geostatistics, Academic Press, Inc., pp.324-343, 1978.
- 2) 本多ほか：地形情報を用いた基礎地盤面のモデル化と推定, 土木学会論文集, No.561/III-38, pp.62-74, 1997.

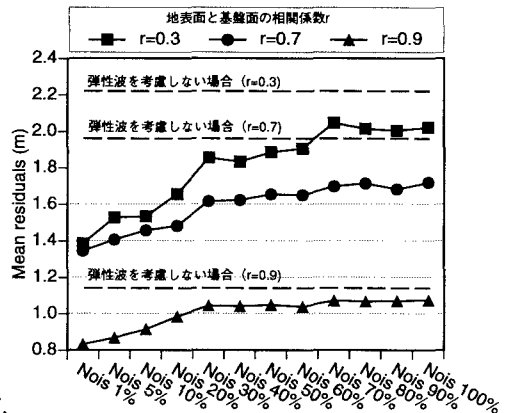


図3 平均推定残差の比較

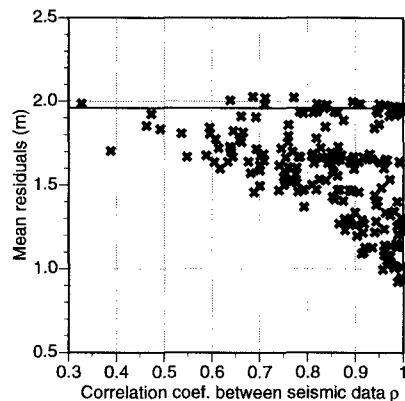


図4 基盤面と弾性波との相関係数 ρ と推定残差の関係（地表面との相関 $r=0.7$ の例）