

1. はじめに

山間丘陵地などに構造物を建設する場合には杭基礎が用いられることが多いが、その設計においては起伏を有する基盤面レベルを精度良く推定することが重要となる。しかし限られた調査ボーリングデータからこれを精度良く推定することは容易なことではない。そこで筆者らは、基盤面レベルと地表面レベルは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、地質統計学的手法のCokriging²⁾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た。実際の変電所などの造成工事では、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とから、地表面レベルのデータに弾性波探査結果の情報も加えて推定精度を向上する手法が考えられる。この場合3変量を扱った問題となり、Cokrigingの適用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)の観点から非常に困難なものとなる。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。

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

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

ここで、 $\mathbf{x}_i^{(Z)}$ ($i=1, \dots, n_1$)および $\mathbf{x}_j^{(S)}$ ($j=1, \dots, n_2$)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、 $\lambda^{(Z)}$ および $\lambda^{(S)}$ は重み係数である。

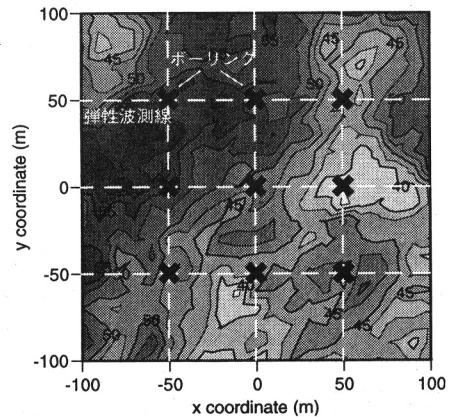
3. 数値実験による検証

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は作成した数値実験モデルで、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。地表面と基盤面の相関係数は0.7としている。

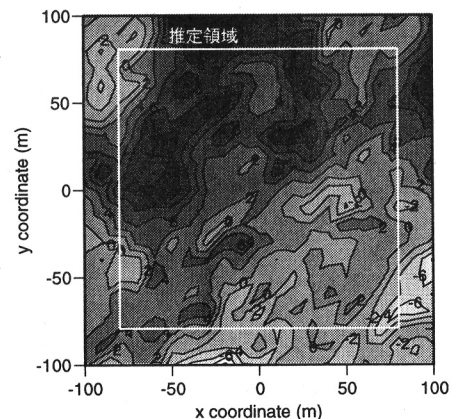
$$C_Z(\Delta h) = 20 \cdot \exp(-\Delta h / 70), \quad C_Y(\Delta h) = 30 \cdot \exp(-\Delta h / 70)$$

$$C_{ZY}(\Delta h) = C_{YZ}(\Delta h) = 0.7 \cdot \sqrt{20 \cdot 30} \cdot \exp(-\Delta h / 70) \quad (4)$$

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。ここで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



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

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 東京都千代田区内幸町2-2-2 富国生命ビル 清水建設(株) TEL03-3508-9052 FAX03-3508-2196

し、ノイズの大きさ k を 0.01(1%), 0.05(5%), 0.1(10%), ..., 1.0(100%) として、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。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に弾性波データを考慮しない地表面レベルとのCokrigingによる推定結果を示す。a)は推定値、b)は真値との残差のコンターを示しており、真値と比べると傾向は良く捉えられているが、全体に滑らかに補間されて細かな部分が再現されていないのがわかる。残差分布をみると最大で6m以上残差の生じている部分もある(平均残差は1.65m)。これに対して10%のノイズを含む弾性波データを考慮した提案手法による推定結果を図3に示す。図2に比べて明らかに詳細に基盤面を再現できているのがわかる。残差も小さくなっており最大4m程度に抑えられており、平均残差は1.12mである。

次に、基盤面レベルとそれにノイズを加えて生成した弾性波速度境界面レベルとの間の相関係数を基に、提案手法の推定精度を評価した。図4のグラフは今回実施した全計算ケースについて、横軸に弾性波データと基盤面の相関係数 r 、縦軸には平均推定残差の弾性波データを考慮しない場合(1.65m)からの減少率 R でプロットしたものである。また指数関数で近似した曲線も同時に示す。この図から今回のモデルでは、弾性波データが基盤面レベルと0.9以上の相関性があれば、弾性波データを考慮しない推定よりも、推定残差が20%以上減少することがわかる。逆に相関性が0.7より低い場合には、その効果は10%以下であることがわかった。

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。今後は、実際のデータに適用していく所存である。

参考文献

- 1) 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.
- 2) Journel, A.G. and Huijbregts, Ch.J. : Mining geostatistics, Academic Press, Inc., pp.324-343, 1978.

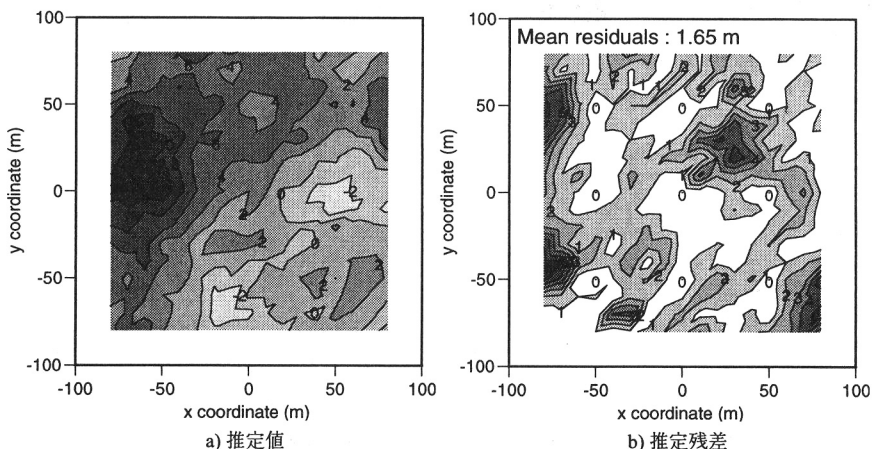


図2 弾性波を考慮しない地表面レベルとのCokriging手法による推定結果

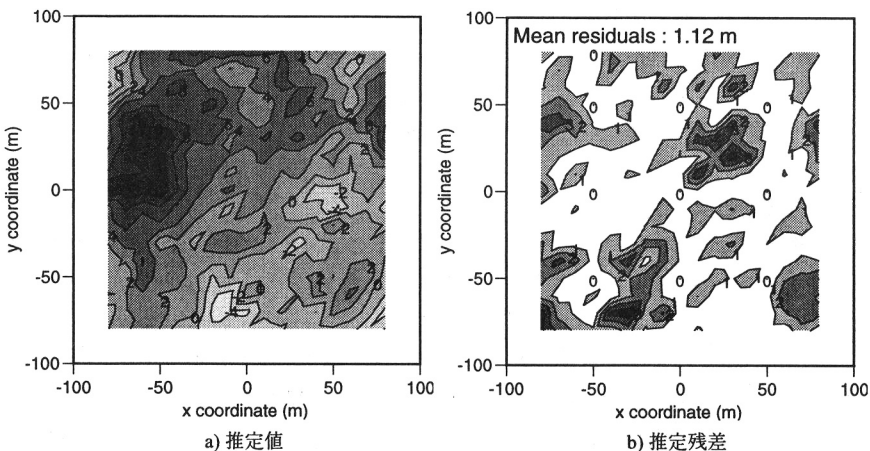


図3 弾性波データ(含10%ノイズ)を考慮した提案手法による推定結果

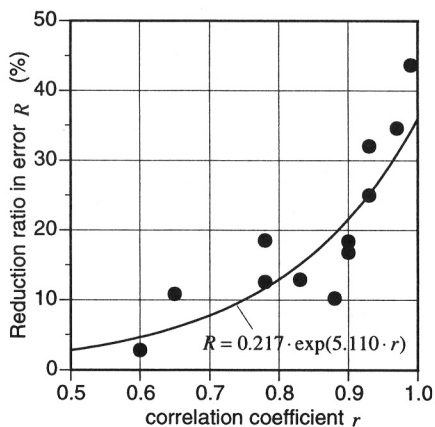


図3 推定精度と弾性波データとの相関性の関係