

地表面の起伏と弾性波探査結果を考慮した 基礎地盤面の推定

本多 眞¹・鈴木 誠²・上田 稔³・西村 均⁴

¹ 正会員 工修 清水建設(株) 和泉研究室 (〒100 千代田区内幸町 2-2-2 富国生命ビル)

² 正会員 工博 清水建設(株) 和泉研究室

³ 正会員 工博 中部電力(株) 技術開発本部電力技術研究所 (〒459-8522 名古屋市緑区大高町字北関山 20-1)

⁴ 正会員 中部電力(株) 技術開発本部電力技術研究所

杭構造物の基礎となる基礎地盤面は、地質学的な観点からみると地表面の起伏に追従していることが多い。ここに着目して地表面レベルを補助データとした Cokriging による基礎地盤面レベルの推定法をこれまでに提案し多くの実績をあげた。本研究では地表面に加えて、弾性波探査による情報を取り入れた推定法を提案する。Cokriging で 3 变量以上を扱う場合、空間構造モデルが複雑となり、少ないデータからの推定は精度に問題がある。そこで地表面レベルはトレンド成分として扱う手法を考案し、数値実験により手法の妥当性を検証した。また実際のサイトに適用することにより、本手法の有効性を確認した。

Key Words : cokriging, elastic wave exploration, pile foundation, ground surface

1. はじめに

山間丘陵地などの起伏に富んだ場所での杭基礎設計にあたり重要なことの一つは、限られたボーリングデータから杭の支持層である基礎地盤面のレベルを精度良く推定することである。本論文では、杭の支持層までのレベルを基礎地盤面レベルと称し、一般に N 値 50 以上となる地盤深さを想定している。これまでに著者らは、この基礎地盤面が岩盤の風化によって形成されるなど、地表面の起伏と相関性があることに着目し、地質統計学(Geostatistics)¹⁾の Cokriging²⁾を用いて地表面レベルを補助データとした基礎地盤面レベル推定法を提案し、多くの実績をあげた^{3),4),5)}。

Cokriging では、推定したい物理量が他の物理量と相関性のあるときに、両者の観測値を用いることで精度の高い推定が可能となる。すなわち基礎地盤面レベルの推定に地表面レベルを用いることで、ボーリングデータだけから推定した場合よりも精度が向上する。しかし沖積平野などの地表面が平らな場合など地質状況によっては基礎地盤面が必ずしも地表面の起伏と相関性が大きいとは限らないこともある。このため実際の変電所などの新設工事では、ボーリング調査に加えて弾性波探査も併用して行われることが多い。最近ではデジタル多チャンネル測定器やトモグラフィ的な解析手法を用いたより高精度な弾性波探査⁶⁾なども開発されており、このような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。

そこで本研究では、地表面レベルと弾性波探査結果

の 2 つの情報を取り入れた推定法を開発し、地表面との相関性の有無に関わらず、弾性波探査の情報により精度良く推定ができる手法を提案する。

地質統計学を用いた推定では、まず観測値から共分散関数モデルを推定する必要がある。複数の補助変量を取り込むことができる Cokriging では、複数の物理量のそれぞれの共分散関数モデルと各物理量相互の相互共分散関数モデルを推定する必要がある。すなわち K 個の異なる物理量を扱った Cokriging では、 K^2 個の共分散関数モデルを推定しなければならないことになり、理論的には定式化は可能でも現実的にはデータ数が限られるため 3 变量以上の適用は難しい。

Cokriging のように推定したい変量と相関性のある第二の変量を取り込んだ推定方法には、他に「線形回帰を結合した Kriging (Kriging combined with linear regression)⁷⁾ や、G.Matheron のグループ (フランスの地質統計学研究所) が開発した「外部変数トレンドを含む Kriging (Kriging with an external drift)^{8),9)} などがある。前者は、推定したい第一の変量と第二の変量のデータから予め線形回帰モデルを推定し、モデルにデータをあてはめて得られる第一の変量の推定値を Universal Kriging¹⁰⁾ のデータとして追加する手法である。後者は、第二の変量の包括的な変動が、推定すべき第一の変量の変動と相関関係を有すると考え、Universal Kriging のトレンド成分を第二の変量の線形関数で置き換えた手法である。いずれも第二の変量を考慮できる推定法であるが、Cokriging と異なり相互共分散関数を必

要としないため適用が容易である。これらの手法の比較検討を行った研究¹¹⁾によれば、それぞれ次のような特徴が示されている。前者の線形回帰を結合した Kriging では、回帰モデルを作成するための二つの変量のデータの組が多く必要であり、またその相関性が低い場合、回帰誤差が大きくなり精度が悪くなる。後者は、第二変量が空間的に滑らかに変化し、かつ第一変量の観測位置および推定したい位置の全てにおいて第二変量の真値が与えられることが前提条件となっており、適用には制限がある。

本研究では、地表面レベルおよび弾性波探査結果を用いた基礎地盤面レベルの推定を目的とし、「外部変数トレンドを含む Kriging」の手法を参考にして、弾性波探査結果と基礎地盤面レベルの Cokriging に対して、地表面レベルの外部変数トレンドを加えた手法を提案した。そして数値実験により提案した手法の検証を行い、地表面レベルとの相関性の違いによる影響や弾性波探査結果に含まれるノイズの大きさによる影響などについて比較検討を実施した。また実際の杭基礎工事におけるボーリング調査および弾性波探査結果に対して本手法を適用し、既存ボーリング位置でのブラインドテストにより、その有効性を確認した。

2. 推定手法の定式化

(1) 地表面レベルを補助データとした Cokriging

基礎地盤面レベルおよび地表面レベルの確率場をそれぞれ $Z(\mathbf{u})$, $Y(\mathbf{u})$ として、次式のようにトレンド成分とランダム成分の和として表す。

$$Z(\mathbf{u}) = \mu^{(Z)}(\mathbf{u}) + \varepsilon^{(Z)}(\mathbf{u}) \quad (1a)$$

$$Y(\mathbf{u}) = \mu^{(Y)}(\mathbf{u}) + \varepsilon^{(Y)}(\mathbf{u}) \quad (1b)$$

ここで、 $\varepsilon^{(Z)}(\mathbf{u})$ および $\varepsilon^{(Y)}(\mathbf{u})$ はそれぞれ位置 \mathbf{u} における基礎地盤面レベル、地表面レベルの変動のランダム成分を表しており、平均値 0 で位置 \mathbf{u} および \mathbf{u}' の間の共分散関数がそれぞれ $C_Z(\mathbf{u} - \mathbf{u}')$, $C_Y(\mathbf{u} - \mathbf{u}')$ であるものとする。また $\mu^{(Z)}(\mathbf{u})$ および $\mu^{(Y)}(\mathbf{u})$ はそれぞれ位置 \mathbf{u} における基礎地盤面レベル、地表面レベルのトレンド成分であり、次式のように位置ベクトル \mathbf{u} の多項式で表される。

$$\mu^{(Z)}(\mathbf{u}) = \sum_{k=0}^{K^{(Z)}} b_k^{(Z)} f_k^{(Z)}(\mathbf{u}) \quad (2a)$$

$$\mu^{(Y)}(\mathbf{u}) = \sum_{k=0}^{K^{(Y)}} b_k^{(Y)} f_k^{(Y)}(\mathbf{u}) \quad (2b)$$

ここで、 $f_k^{(Z)}(\mathbf{u})$, $f_k^{(Y)}(\mathbf{u})$ は \mathbf{u} の多項式を表す関数で、 $b_k^{(Z)}$, $b_k^{(Y)}$ はその係数である。また $K^{(Z)}$, $K^{(Y)}$ は多項式の数を表している。

任意の位置 \mathbf{u}_0 における基礎地盤面レベルの Cokriging による推定値 $\hat{Z}_{COK}(\mathbf{u}_0)$ は、次式のように基礎地盤面レベルおよび地表面レベルのデータの重み付き線形和で表される。

$$\hat{Z}_{COK}(\mathbf{u}_0) = \sum_{i=1}^{n_1} \lambda_i^{(Z)} Z(\mathbf{u}_i) + \sum_{j=1}^{n_2} \lambda_j^{(Y)} Y(\mathbf{u}_j) \quad (3)$$

ここで、 $\lambda_i^{(Z)}$ は n_1 個の基礎地盤面レベルのデータ $Z(\mathbf{u}_i)$ に対する重み係数、 $\lambda_j^{(Y)}$ は n_2 個の地表面レベルのデータ $Y(\mathbf{u}_j)$ に対する重み係数である。この重み係数は次式の方程式を解くことで求められる。

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{l=1}^{n_2} \lambda_l^{(Y)} C_Y(\mathbf{u}_l - \mathbf{u}_j) + \sum_{k=1}^{n_1} \lambda_k^{(Z)} C_{YZ}(\mathbf{u}_k - \mathbf{u}_j) \\ \quad + \sum_{m=0}^{K^{(Y)}} \eta_m^{(Y)} f_m^{(Y)}(\mathbf{u}_j) = C_{ZY}(\mathbf{u}_0 - \mathbf{u}_j), \\ \quad j = 1, \dots, n_2 \\ \sum_{k=1}^{n_1} \lambda_k^{(Z)} C_Z(\mathbf{u}_k - \mathbf{u}_i) + \sum_{l=1}^{n_2} \lambda_l^{(Y)} C_{ZY}(\mathbf{u}_l - \mathbf{u}_i) \\ \quad + \sum_{m=0}^{K^{(Z)}} \eta_m^{(Z)} f_m^{(Z)}(\mathbf{u}_i) = C_Z(\mathbf{u}_0 - \mathbf{u}_i), \\ \quad i = 1, \dots, n_1 \\ \sum_{k=1}^{n_1} \lambda_k^{(Z)} f_m^{(Z)}(\mathbf{u}_k) = f_m^{(Z)}(\mathbf{u}_0), \quad m = 0, \dots, K^{(Z)} \\ \sum_{l=1}^{n_2} \lambda_l^{(Y)} f_m^{(Y)}(\mathbf{u}_l) = 0, \quad m = 0, \dots, K^{(Y)} \end{array} \right. \quad (4)$$

なお $\eta_m^{(Z)}$ および $\eta_m^{(Y)}$ はそれぞれ制約条件に関する $(K^{(Z)} + 1)$ 個、 $(K^{(Y)} + 1)$ 個のラグランジエパラメータである。

(2) 外部変数トレンドを含む Kriging (Kriging with an external drift)

Cokriging 以外で 2 变量を取り扱うことのできる推定手法にはいくつかあるが、ここでは「外部変数トレンドを含む Kriging」^{8),9)}について検討する。

一般的な Universal Kriging¹⁰⁾では、トレンドモデルは式 (2a) のような位置ベクトル \mathbf{u} の多項式で表されるが、本手法では $\mu^{(Z)}(\mathbf{u}) = b_0 + b_1 f_1(\mathbf{u})$ の 2 項に限定して、 $f_1(\mathbf{u})$ の項を第二の变数とする。これは第二の变数の包括的な变動が、推定したい第一の变数の变動と相関関係を有すると考えたものである。この $f_1(\mathbf{u})$ の項に地表面レベル $y(\mathbf{u})$ を用いれば、前節 (1) で示した地表面レベルを補助データとした Cokriging による推定と同様の推定が可能となる。

本手法の適用にあたっては、次の 2 つの条件を満たす必要がある。

- 方程式の解が安定するためには、トレンドモデルに用いる外部変数は空間において滑らかに変化する必要がある。
- トレンドモデルに用いる外部変数は、データ位置および推定位置の全てにおいて真値が得られている必要がある。

一般に地表面レベルは、基本的には空間的に滑らかに変化し、かつ任意の位置で真値が既知であるので、十分に適用が可能である。

そこで基礎地盤面レベルのトレンド成分を次式のように、 b_0, b_1 の2つのパラメータによる線形近似で表す。

$$E[Z(\mathbf{u})] = \mu^{(Z)}(\mathbf{u}) = b_0 + b_1 y(\mathbf{u}) \quad (5)$$

ここで b_1 のパラメータは、地表面レベルと基礎地盤面レベルの相関性を表すことになる。すなわちこれが0となれば、単純な基礎地盤面レベルだけの Kriging に等しくなる。

本手法による任意の位置 \mathbf{u}_0 における基礎地盤面レベルの推定値 $\hat{Z}_{CED}(\mathbf{u}_0)$ および方程式は、次式の通りである。

$$\hat{Z}_{CED}(\mathbf{u}_0) = \sum_{i=1}^{n_1} \lambda_i Z(\mathbf{u}_i) \quad (6)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^{n_1} \lambda_i C_Z(\mathbf{u}_i - \mathbf{u}_j) + \eta_0 + \eta_1 y(\mathbf{u}_j) \\ \quad = C_Z(\mathbf{u}_0 - \mathbf{u}_j), \quad j = 1, \dots, n_1 \\ \sum_{i=1}^{n_1} \lambda_i = 1 \\ \sum_{i=1}^{n_1} \lambda_i y(\mathbf{u}_i) = y(\mathbf{u}_0) \end{array} \right. \quad (7)$$

ここで、 λ_i , ($i = 1, \dots, n_1$) は重み係数、 η_0, η_1 はラグランジエパラメータである。

(3) 弹性波探査と地表面を考慮した提案手法

(Cokriging with an external drift)

地表面レベルは任意の位置で既知であり、空間的に滑らかに変動する性質を有しており、外部変数トレンドとして取り込むことが可能である。そこで弹性波探査結果と基礎地盤面レベルの Cokriging に対して、地表面レベルの外部変数トレンドを加えた手法を提案した。

基礎地盤面が地表面との相関性が低く、独自のトレンドを有するような場合も考慮して、位置座標によるトレンドも考慮できるような形で定式化を行った。

弹性波探査結果として、基礎地盤面レベルに相当する弹性波速度境界面レベルを考え、その確率場を $S(\mathbf{u})$ とする。基礎地盤面レベルの確率場を $Z(\mathbf{u})$ として、基

礎地盤面レベルおよび弹性波速度境界面レベルそれぞれのトレンドモデルを次式のように表す。

$$E[Z(\mathbf{u})] = \sum_{k=0}^{K^{(Z)}} b_k^{(Z)} f_k^{(Z)}(\mathbf{u}) + b_{K^{(Z)}+1}^{(Z)} y(\mathbf{u}) \quad (8a)$$

$$E[S(\mathbf{u})] = \sum_{k=0}^{K^{(S)}} b_k^{(S)} f_k^{(S)}(\mathbf{u}) + b_{K^{(S)}+1}^{(S)} y(\mathbf{u}) \quad (8b)$$

各々の式で第1項は位置ベクトル \mathbf{u} の多項式 $f_k^{(Z)}(\mathbf{u}), f_k^{(S)}(\mathbf{u})$ で表される関数で、通常の Universal Kriging などでトレンドモデルとして用いてきたものである。これに対して第2項は地表面レベル $y(\mathbf{u})$ の線形関数であり、係数 $b_{K^{(Z)}+1}^{(Z)}, b_{K^{(S)}+1}^{(S)}$ の大きさが地表面との相関性の強さを示すことになる。したがってデータから推定される係数 $b_k^{(Z)}, b_k^{(S)}$ の値によって、地表面の起伏に基づいたトレンドと位置によるトレンドのどちらにも対応が可能である。

さて任意の位置 \mathbf{u}_0 における基礎地盤面レベルの推定値 $\hat{Z}_{CED}(\mathbf{u}_0)$ は、従来の Cokriging と同じく2変量のデータの重み付き線形和で表される。

$$\hat{Z}_{CED}(\mathbf{u}_0) = \sum_{i=1}^{n_1} \lambda_i^{(Z)} Z(\mathbf{u}_i) + \sum_{j=1}^{n_3} \lambda_j^{(S)} S(\mathbf{u}_j) \quad (9)$$

ここで、 $\lambda_i^{(Z)}$ は n_1 個の基礎地盤面レベルのデータ $Z(\mathbf{u}_i)$ に対する重み係数、 $\lambda_j^{(S)}$ は n_3 個の弹性波速度境界面レベルのデータ $S(\mathbf{u}_j)$ に対する重み係数である。この重み係数は次式の方程式を解くことで求められる。

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{l=1}^{n_3} \lambda_l^{(S)} C_S(\mathbf{u}_l - \mathbf{u}_j) + \sum_{k=1}^{n_1} \lambda_k^{(Z)} C_{SZ}(\mathbf{u}_k - \mathbf{u}_j) \\ \quad + \sum_{m=0}^{K^{(S)}} \eta_m^{(S)} f_m^{(S)}(\mathbf{u}_j) + \eta_{K^{(S)}+1}^{(S)} y(\mathbf{u}) \\ \quad = C_{ZS}(\mathbf{u}_0 - \mathbf{u}_j), \quad j = 1, \dots, n_3 \\ \sum_{k=1}^{n_1} \lambda_k^{(Z)} C_Z(\mathbf{u}_k - \mathbf{u}_i) + \sum_{l=1}^{n_3} \lambda_l^{(S)} C_{ZS}(\mathbf{u}_l - \mathbf{u}_i) \\ \quad + \sum_{m=0}^{K^{(Z)}} \eta_m^{(Z)} f_m^{(Z)}(\mathbf{u}_i) + \eta_{K^{(Z)}+1}^{(Z)} y(\mathbf{u}) \\ \quad = C_Z(\mathbf{u}_0 - \mathbf{u}_i), \quad i = 1, \dots, n_1 \\ \sum_{k=1}^{n_1} \lambda_k^{(Z)} f_m^{(Z)}(\mathbf{u}_k) = f_m^{(Z)}(\mathbf{u}_0), \quad m = 0, \dots, K^{(Z)} \\ \sum_{l=1}^{n_3} \lambda_l^{(S)} f_m^{(S)}(\mathbf{u}_l) = 0, \quad m = 0, \dots, K^{(S)} \\ \sum_{k=1}^{n_1} \lambda_k^{(Z)} y(\mathbf{u}_k) = y(\mathbf{u}_0), \quad \sum_{l=1}^{n_3} \lambda_l^{(S)} y(\mathbf{u}_l) = 0 \end{array} \right. \quad (10)$$

なお $\eta_m^{(Z)}$ および $\eta_m^{(S)}$ はそれぞれ制約条件に関する $(K^{(Z)}+1)$ 個、 $(K^{(S)}+1)$ 個のラグランジエパラメータである。

3. 数値実験による検証

提案する手法の推定精度の検証を実施するために、模擬確率場による数値モデルでシミュレーションを行う。数値モデルは地表面レベル、基礎地盤面レベルおよび弾性波探査結果としての弾性波速度境界面レベルを想定したモデルを複数個生成して、手法の違いや地表面との相関性、弾性波探査の測定精度などのパラメータの違いによる比較を行った。

(1) 数値実験モデル

a) 地表面レベルおよび基礎地盤面レベル

それぞれの確率場 $Y(\mathbf{u})$, $Z(\mathbf{u})$ を次のように設定する。

• トレンド成分

位置 \mathbf{u} による変化をなくして一定としたモデルと、基礎地盤面レベルだけに y 軸方向に傾斜する 1 次のトレンド平面を設定したモデルの 2 種類用意した。

$$\begin{cases} E[Y(\mathbf{u})] = 50 \\ E[Z(\mathbf{u})] = 0 \end{cases} \quad (11a)$$

$$\begin{cases} E[Y(\mathbf{u})] = 50 \\ E[Z(\mathbf{u})] = 0.05u_y \end{cases} \quad (11b)$$

なお後に示す検討ケースのうち、Case-IIIにおいて 2 つのトレンドモデルを比較しており、Case-I, II では前者のみを用いている。

• ランダム成分

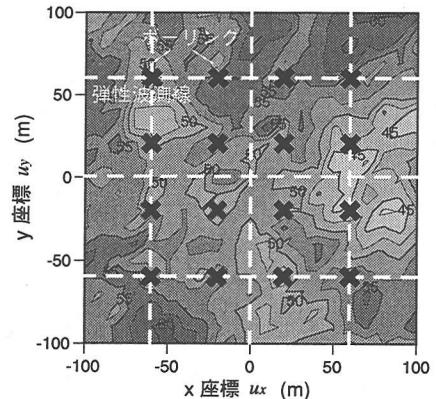
共分散および相互共分散関数として次の指數関数型のモデルを設定した。なお空間的相関性は異方性を考えず、距離 $\Delta h = |\mathbf{u} - \mathbf{u}'|$ のみに依存するものとした。

$$\begin{cases} C_Y(\Delta h) = 30 \cdot \exp\left(-\frac{\Delta h}{70}\right) \\ C_Z(\Delta h) = 20 \cdot \exp\left(-\frac{\Delta h}{70}\right) \\ C_{YZ}(\Delta h) = C_{ZY}(\Delta h) \\ = \rho_{YZ} \cdot \sqrt{20} \cdot \sqrt{30} \cdot \exp\left(-\frac{\Delta h}{70}\right) \end{cases} \quad (12)$$

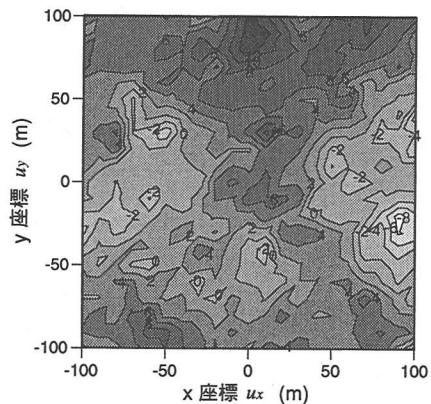
ここで、地表面および基礎地盤面の起伏を表す分散（30 および 20）および相関距離（70m）は、これまで著者らが対象とした実際の山間丘陵地におけるサイトの起伏に近い値を用いた。

なお地表面と基礎地盤面の間の相関係数 ρ_{YZ} は 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.8, 0.9 の計 6 種類設定した。

以上のように定義した確率場から、解析対象の地表面と基礎地盤面の標本場を計 30 組発生した。図-1 に示した濃淡のコンター図は、それぞれ発生した模擬地表面レベルおよび基礎地盤面レベルの一例である。



a) 地表面レベルの例およびボーリング・弾性波測線位置



b) 基礎地盤面レベルの例

図-1 数値実験モデルの例（地表面と基礎地盤面の相関 $r = 0.7$ の場合、トレンド成分は式 (11a) を使用）

b) 弹性波速度境界面レベル

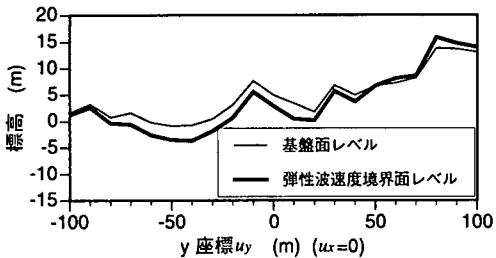
弾性波探査の結果は、測線に沿った断面でいくつかの弾性波速度層として得られる。したがって実際の適用では、目的とする基礎地盤面レベル（通常 N 値 50 以上）に相当すると考えられる弾性波速度層境界面のレベルをデータとして入力することになる。

ここでの数値実験では、先に示した図-1a) の 6 本の破線を弾性波探査測線と想定して、この位置で弾性波速度境界面レベルの数値モデルを発生する。いま与えられる弾性波速度境界面レベルのデータは、真の基礎地盤面レベルに対して測定誤差（ノイズ）が含まれたものであると仮定し、その測定誤差は次のような統計量を有するものとする。

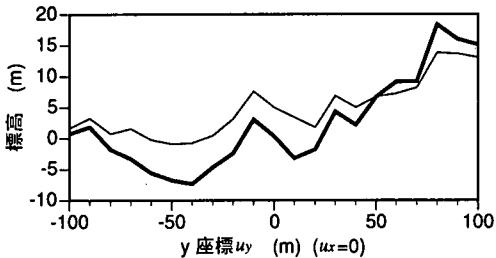
• 平均値: 0

• 共分散関数:

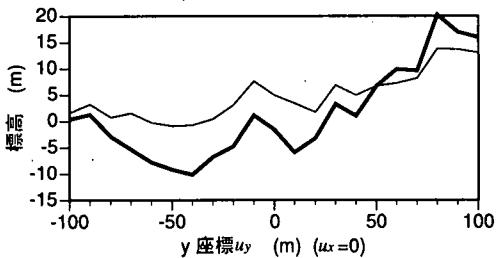
基礎地盤面レベルの共分散関数 C_Z と同じ空間構



a) 測定誤差 10%



b) 測定誤差 50%



c) 測定誤差 100%

図-2 弹性波速度境界面レベルの例

造を有し、大きさ k で比例倍したもの。

$$C_{Noise}(\Delta h) = k \cdot 20 \cdot \exp\left(-\frac{\Delta h}{70}\right) \quad (13)$$

測定誤差の違いによる推定結果への影響を検討するためには、測定誤差の大きさである k を、0.01(1%), 0.1(10%), 0.3(30%), 0.5(50%), 1.0(100%), 1.5(150%), 2.0(200%) の 7 段階に分けてデータを作成した。

$u_x = 0(m)$ の測線位置で作成した測定誤差 10%, 50%, 100% の弾性波速度境界面レベルのデータを例として図-2 に示す。

実際の弾性波探査結果では、基礎地盤面レベルの起伏は捉えられても、そのレベルが上下にシフトするような測定誤差を有することが多い。すなわち測定誤差の平均値が 0 ではないことが多いが、Cokriging の定式化から明らかのように、平均値はトレンドとして取り除かれるため全く関係なく、分散（ばらつき）のみが影響する。そのためここでは測定誤差の平均値を 0 としている。

表-1 検討ケース

検討ケース	検討内容
Case-I	これまでに提案した「地表面との Cokriging」(Type-COK)による推定と「地表面を外部変数 レンドとした kriging」(Type-KED)による推定の比較検討。
Case-II	提案する「弾性波探査結果を考慮した推定」(Type-CED)について、弾性波速度境界面レベルを想定したモデルを用いて検証。弾性波速度境界面レベルに含まれるノイズの大きさの違いや、地表面との相関性の違いによる比較を実施。
Case-III	トレンドモデルとして地表面レベルの外部変数トレンドだけでなく、位置座標の多項式によるトレンド成分を考慮した場合と考慮しない場合との比較を実施。

(2) 検討ケース

先の図-1a) に示す×印の 16 カ所が、基礎地盤面レベルの真値をデータとして与えるボーリング調査位置とした。また弾性波探査結果は、測線上に 10m 間隔の計 117 点で与え、地表面レベルは領域内 10m 間隔の格子点（計 441 点）で与えている。共分散-相互共分散関数の推定は、これらのデータを用いて最尤法（文献¹²⁾参照）を用いて実施した。

推定する領域は図に示す 200 × 200m の範囲で、10m 間隔の格子点を推定位置として、基礎地盤面レベルの推定値と真値の残差を評価する。検討ケースは表-1 に示す 3 つのケースである。まず Case-I では、これまでに著者らが提案した「地表面レベルを補助データとした Cokriging 法」³⁾（以降はこれを Type-COK という記号で表す）による推定と、地表面レベルをトレンド成分に組み込んだ「外部変数トレンドを含む Kriging 法」^{8),9)}（以降はこれを Type-KED と表す）による推定の精度を比較し、地表面レベルをトレンド成分として扱うことの妥当性を検証する。

Case-II では、本論文で提案する「弾性波探査結果を考慮した推定法」（以降はこれを Type-CED と表す）による推定を行い、地表面と基礎地盤面の相関性の違いや、弾性波探査結果に含まれる測定誤差の大きさによる影響などを検討し、弾性波探査結果の取り込みの有効性を評価する。

提案手法では、外部変数トレンド (External drift) の概念に、位置座標に依存するトレンドを加えた新たな定式化を行っている。Case-III では、この妥当性を示すために位置座標に依存するトレンド成分を考慮した場合と考慮しない場合の比較検証する。

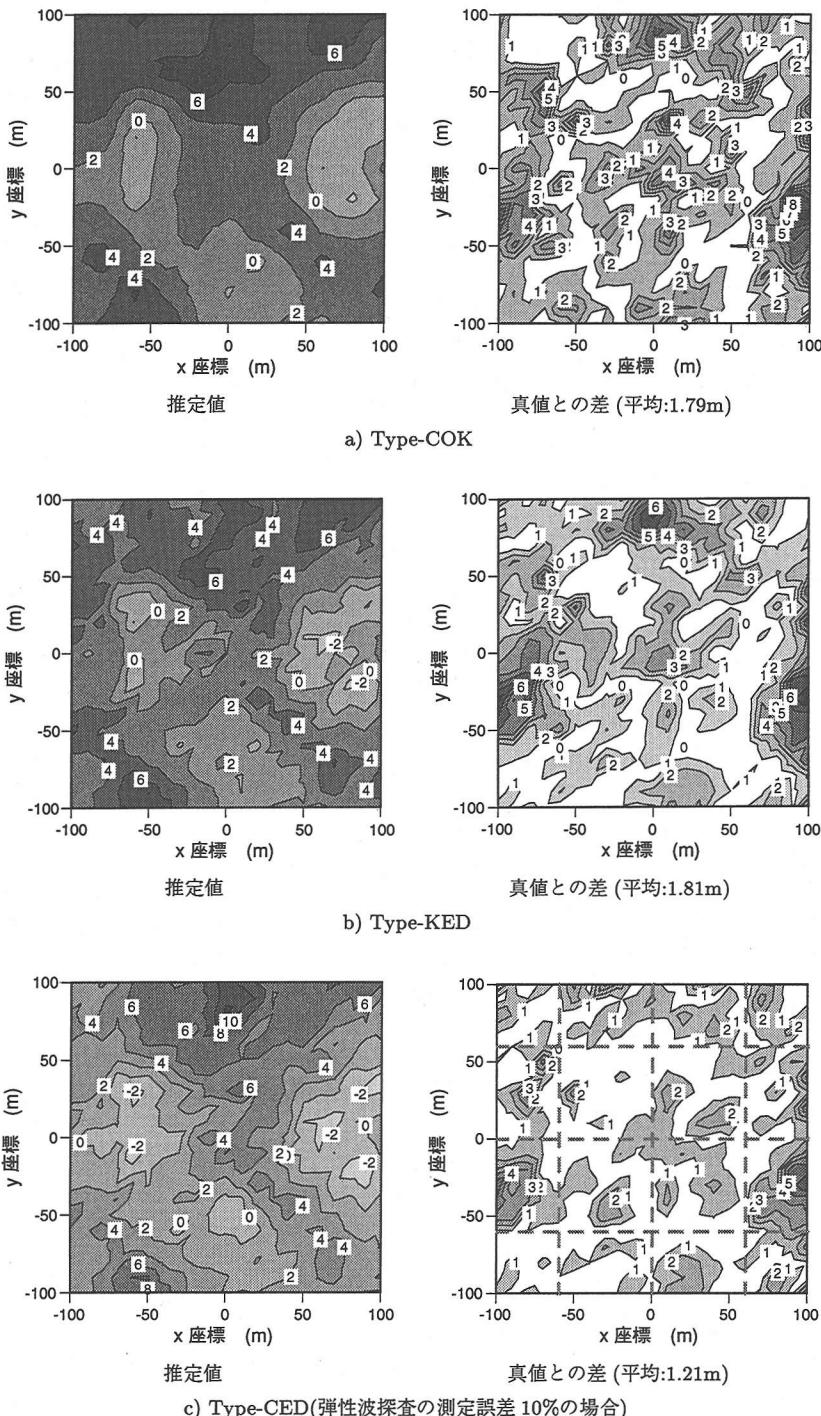


図-3 各手法による推定結果の例 (地表面と基礎地盤面の相関 $\rho_{YZ}=0.7$ の場合)

(3) 検討結果

a) Case-I

地表面と基礎地盤面の間の相関係数 ρ_{YZ} (0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.8, 0.9 の 6 種類) 每に、各々 30 組の地表面

レベルおよび基礎地盤面レベルのデータを用いて推定を実施した。推定結果の一例として相関係数 $\rho_{YZ}=0.7$ のケースを図-3 に示す。図の a) が Type-COK による推定結果、b) が Type-KED による推定結果で、それぞ

れ左図が推定値、右図が真値との差の等高線図である。右図の白い部分の面積が広いほど推定精度が良いことを示す。

a) と b) で推定値の分布を比較すると、a) の方が全体を滑らかに補間しており、b) は地表面の影響を強く受けている。しかし真値との差の分布を比較すると、ほとんど違いが認められない。全計算ケースを相関係数 ρ_{YZ} ごとに記号を分けてプロットした図が図-4 である。横軸は Type-COK の平均推定残差、縦軸は Type-KED の平均推定残差である。両者の手法が同等であるならば、プロットは 1:1 の線上に分布する。結果を見るところばらつきはあるものの、ほぼ 1:1 の線上に分布している。細かく見ると、推定精度の良い（すなわち相関係数 ρ_{YZ} が 0.9 や 0.8）ケースでは、明らかに 1:1 の線より下にプロットされており、つまり Type-COK よりも Type-KED の方が推定結果が良いことを示している。逆に推定精度の悪い（相関係数 ρ_{YZ} の低い）ケースを見ると、1:1 の線より上にプロットされているものもあるが、極端に偏っていることはない。ただしプロットの分布が横軸方向よりも縦軸方向にはばらつきが大きく、Type-KED よりも Type-COK の方が推定精度のばらつきが小さいことを示している。Type-KED では、地表面レベルを基礎地盤面レベルのトレンド成分として扱うため、統計量の推定には基礎地盤面レベルと地表面レベルが組で得られる 16 カ所のボーリング位置のデータのみを用いることになる。これに対して Type-COK では、2 変量の確率場モデルを仮定しているので、統計量の推定には 16 点の基礎地盤面と 441 点の地表面のデータを全て用いることができる。このため後者の方が、より精度良く統計量を算定することができ、推定精度のばらつきが小さくなっているものと考えられる。

しかし多少のばらつきはあるものの、どちらもほぼ同程度の結果が得られることがわかり、むしろ地表面と基礎地盤面の相関性が大きい（0.8 以上）場合には、Type-KED の方が精度の良いことがわかった。

b) Case-II

先の図-3 の推定結果の例の最下図 c) は、弾性波探査結果を考慮した提案手法 (Type-CED) によるものであり、入力した弾性波速度境界面レベルに含まれる測定誤差が 10% の場合である。右図の真値との差の分布から、弾性波測線に沿って白い部分の面積が広くなっている。明らかに推定精度が良くなっているのが見てとれる。平均でも 1.21m と弾性波を考慮しない場合 (1.79m) に比べて、70% となっている。

入力した弾性波速度境界面レベルとしては、測定誤差の大きさ k によって 7 種類に分けられ、それぞれについて地表面と基礎地盤面の相関係数 ρ_{YZ} の異なる 6 種類のデータに適用、各々 30 組の計算を実施しているので、

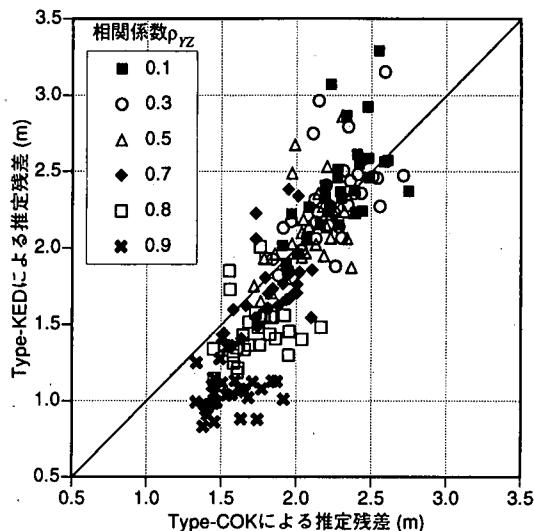


図-4 Type-COK と Type-KED の推定残差の比較

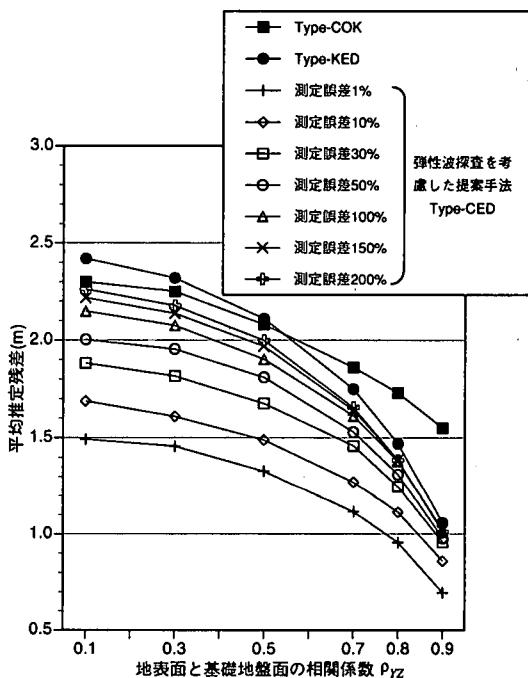
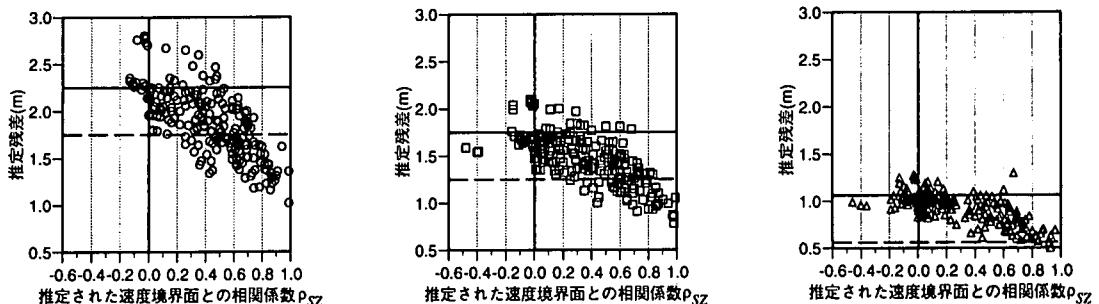


図-5 地表面との相関係数 ρ_{YZ} および弾性波探査の測定誤差の大きさで整理した平均推定残差

$7 \times 6 \times 30 = 1260$ ケースの推定計算を実施した。これらの推定残差を各々のケース毎に平均してプロットしたグラフが図-5 である。横軸に地表面と基礎地盤面の相関係数 ρ_{YZ} をとり、縦軸に各々 30 個の推定残差の平均をとっている。同時に Case-I で計算した Type-COK による推定と Type-KED による推定の結果もプロット



a) 地表面との相関係数 $\rho_{YZ}=0.3$ の場合 b) 地表面との相関係数 $\rho_{YZ}=0.7$ の場合 c) 地表面との相関係数 $\rho_{YZ}=0.9$ の場合

図-6 弾性波速度境界面と基礎地盤面の相関係数 ρ_{SZ} による推定精度の違い

している。

当然のことであるが、どのケースも相関係数 ρ_{YZ} が大きくなると推定精度が向上している。また提案する Type-CED による推定は、弾性波探査結果に含まれる測定誤差の最も大きい(200%)ケースでも、弾性波探査結果を考慮していない2つの手法に比べて精度が良いことがわかる。さらにどの相関係数 ρ_{YZ} においても、弾性波探査に含まれる測定誤差の大きさが小さくなれば、順に推定精度が向上していることもわかる。

提案手法は基礎地盤面レベルと弾性波速度境界面レベルの Cokriging が基本になっており、確率場のランダム成分として以下の式を仮定してモデルの推定を行っている。推定は最尤法¹²⁾を用いて、パラメータ $\sigma_s^2, \sigma_z^2, \rho_{SZ}$ および a を同時に求める。

$$\left\{ \begin{array}{l} C_S(\Delta h) = \sigma_s^2 \cdot \exp(-\Delta h/a) \\ C_Z(\Delta h) = \sigma_z^2 \cdot \exp(-\Delta h/a) \\ C_{SZ}(\Delta h) = C_{ZS}(\Delta h) \\ = \rho_{SZ} \cdot \sigma_s \cdot \sigma_z \cdot \exp(-\Delta h/a) \end{array} \right. \quad (14)$$

上式の基礎地盤面レベルと速度境界面レベルの間の相互共分散関数 C_{SZ}, C_{ZS} の係数 ρ_{SZ} は、2つの間の相関性を表す。実際のデータに適用する場合、弾性波探査を考慮することの有効性は、この相関性で判断することになる。そこで今回の数値実験結果を相関係数 ρ_{SZ} で整理した。

図-6は地表面との相関係数 ρ_{YZ} ごとに分けて、確率場モデル選定の段階で推定された弾性波速度境界面と基礎地盤面の間の相関係数 ρ_{SZ} を横軸にとって、推定残差を縦軸にプロットしたものである。計算結果の内、地表面との相関係数 $\rho_{YZ}=0.3, 0.7, 0.9$ の3つの図を示した。図中の実線および破線の横線は、それぞれ弾性波を考慮しない推定残差の平均値およびその50cm減を示す。

3つとも多少のばらつきは見られるが、ほとんどの計算ケースが弾性波を考慮しない場合の平均残差(実

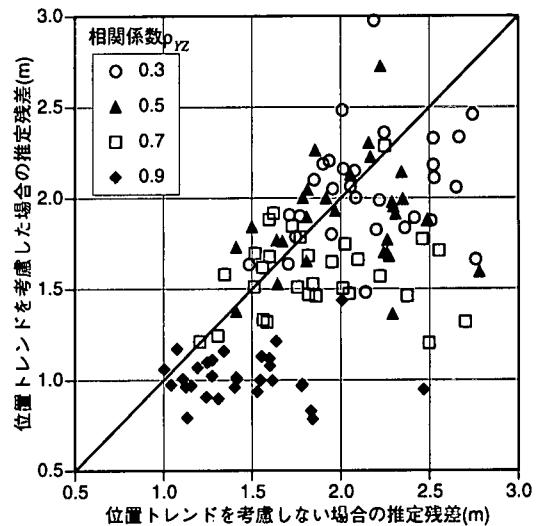


図-7 位置トレンドを考慮した場合と考慮しない場合の推定残差の比較

線)よりも下にプロットされており、弾性波探査結果の効果が認められる。実線付近のプロットはどのケースも、推定相関係数 ρ_{SZ} が 0.0 付近に集中しており、 ρ_{SZ} が低い場合には、弾性波探査結果を考慮する効果があまり期待できないことを示している。ばらつきも含めて確実に効果が期待できるのは、 $\rho_{SZ} : 0.5 \sim 0.6$ 以上の場合である。また効果が絶対値として大きいのは地表面との相関係数 ρ_{YZ} の低い場合で、 $\rho_{YZ}=0.3$ のケースでは ρ_{SZ} が 0.7 以上あれば 50cm 以上減少できるのにに対して、 $\rho_{YZ}=0.9$ のケースでは ρ_{SZ} が 0.9 以上であっても、減少幅は 50cm 以下である。

c) Case-III

最後に、提案手法で新たに導入したトレンド成分の定式化について検証を行った。先の式 (11b) で示すように、基礎地盤面レベルが y 軸方向に傾斜するトレンドを有する場合、トレンド成分の定式化としては式 (5)

のように地表面レベル $y(\mathbf{u})$ の線形関数として表すだけでなく、式(8a)のように位置座標ベクトル \mathbf{u} の多項式で表される関数も加えた方が精度が良くなると考えられる。

そこで次式の2つのトレンドモデルを仮定して、それぞれの推定結果を比較した。

$$E[Z(\mathbf{u})] = b_1^{(Z)} + b_2^{(Z)} u_y + b_3^{(Z)} y(\mathbf{u}) \quad (15a)$$

$$E[Z(\mathbf{u})] = b_1^{(Z)} + b_2^{(Z)} y(\mathbf{u}) \quad (15b)$$

図-7は、縦軸に u_y に関する項を考慮したトレンドモデル(式(15a))による推定残差、横軸に位置座標によるトレンドを考慮しないモデル(式(15b))の推定残差をとて、全ての計算結果をプロットしたものである。1:1の線よりも下にプロットされているものが多く、式(15a)のトレンドモデルを用いた方が推定精度が高いことがわかる。

推定結果のばらつきを見ると、例えば地表面との相関係数 $\rho_{YZ}=0.9$ のケース(◆印)では、位置座標によるトレンドを考慮しない場合、約1.0~2.4mの範囲に渡っているのに対して、考慮した場合には約0.8~1.4mとばらつきの幅も小さい。他の相関係数 ρ_{YZ} のケースでも同じような傾向が見られる。

4. 実際の基礎地盤面調査への適用

本章では、実際の調査結果に提案する手法を適用して、その有効性を検証する。

(1) 対象サイトの概要

図-8は対象サイトの地形を等高線で表し、同時に調査ボーリングおよび弾性波探査測線の位置を示したものである。当サイトでは基礎地盤面レベルの調査として、調査ボーリングを計21本、弾性波探査をA~Hの8本の測線で実施している。

サイト周辺の地質は、領家変成岩の主として砂質片岩よりなる。砂質片岩は風化が進むと砂状を呈す風化土となるが、サイト周辺では風化の進み具合は一様ではないが、尾根部などでは表土・風化土ともに厚く15m程度である。いわゆる典型的な風化岩盤地域であり、基礎地盤面と地表面の起伏は強い相関性を有している。

風化岩盤地域のため、推定対象である基礎地盤面レベルはN値50以上と定めた。調査ボーリングの情報から弾性波探査結果の弾性波速度分布において、第II速度層(0.5~1.0km/sec)と第III速度層(1.8~2.3km/sec)の境界面レベルがN値50以上の基礎地盤面レベルに対応づけられるものと考えられ、この境界面レベルを各側線上に、測点間隔とほぼ同等の約5m間隔でデータ化した。

(2) 確率場モデルの統計的推定

ここでは提案するType-CEDとType-COKの2通りの推定を実施して比較検討する。そこで与えられたデータからそれぞれの確率場のモデル化を行い、統計量の推定を実施した。具体的にはトレンド成分とランダム成分のそれぞれに対して、いくつかの関数モデルを仮定して、情報量基準により最も良いモデルを選択している(文献³参照)が、ここでは推定結果のみを示す。

表-2は提案手法Type-CEDによる推定のための統計量推定結果を示している。いくつか設定したモデルの中で、トレンド成分モデルとして地表面レベルの線形関数に2次元平面トレンドを加えたもの、ランダム成分モデルとして2次元の指數関数型モデルが選択された。

• トレンド成分

$$\begin{cases} E[S(\mathbf{u})] = b_0^{(S)} + \\ \quad b_1^{(S)} y(\mathbf{u}) + b_2^{(S)} u_x + b_3^{(S)} u_y \\ E[Z(\mathbf{u})] = b_0^{(Z)} + \\ \quad b_1^{(Z)} y(\mathbf{u}) + b_2^{(Z)} u_x + b_3^{(Z)} u_y \end{cases} \quad (16)$$

• ランダム成分

$$\begin{cases} C_S(\mathbf{u}, \mathbf{u}') = (\sigma^{(S)})^2 \\ \quad \exp[-\{(\frac{u_x - u'_x}{a_1})^2 + (\frac{u_y - u'_y}{a_2})^2\}^{1/2}] \\ C_Z(\mathbf{u}, \mathbf{u}') = (\sigma^{(Z)})^2 \\ \quad \exp[-\{(\frac{u_x - u'_x}{a_1})^2 + (\frac{u_y - u'_y}{a_2})^2\}^{1/2}] \\ C_{SZ}(\mathbf{u}, \mathbf{u}') = \rho_{SZ} \cdot \sigma^{(S)} \cdot \sigma^{(Z)} \\ \quad \exp[-\{(\frac{u_x - u'_x}{a_1})^2 + (\frac{u_y - u'_y}{a_2})^2\}^{1/2}] \end{cases} \quad (17)$$

推定結果の中で、 ρ_{SZ} が弾性波速度境界面レベルと基礎地盤面レベルの間の相関性を表しているが、0.39と比較的小さい。先の数値実験から弾性波探査結果による効果が確実に得られるのは ρ が0.5~0.6以上であるということで、この場合推定精度向上の期待はあまり大きくない。

表-3はType-COKによる推定のための統計量推定結果で、選択されたモデルは以下の通りである。

• トレンド成分

$$\begin{cases} E[Y(\mathbf{u})] = b_0^{(Y)} + b_1^{(Y)} u_x + b_2^{(Y)} u_y \\ E[Z(\mathbf{u})] = b_0^{(Z)} + b_1^{(Z)} u_x + b_2^{(Z)} u_y \end{cases} \quad (18)$$

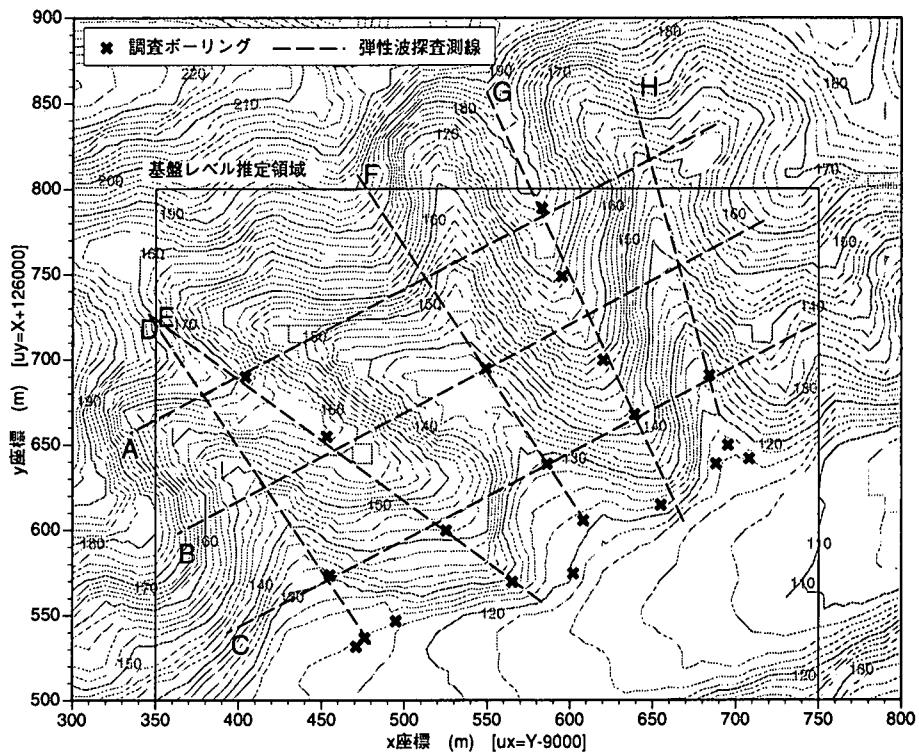


図-8 対象サイトの調査位置図

表-2 統計量推定結果 (Type-CED)

トレンド成分								ランダム成分				
$b_0^{(S)}$	$b_1^{(S)}$	$b_2^{(S)}$	$b_3^{(S)}$	$b_0^{(Z)}$	$b_1^{(Z)}$	$b_2^{(Z)}$	$b_3^{(Z)}$	$(\sigma^{(S)})^2$	$(\sigma^{(Z)})^2$	ρ_{SZ}	a_1	a_2
68.8	0.30	0.08	-0.10	27.7	0.74	0.03	-0.02	187.6	287.7	0.39	1191.3	1178.1

表-3 統計量推定結果 (Type-COK)

トレンド成分						ランダム成分				
$b_0^{(Y)}$	$b_1^{(Y)}$	$b_2^{(Y)}$	$b_0^{(Z)}$	$b_1^{(Z)}$	$b_2^{(Z)}$	$(\sigma^{(Y)})^2$	$(\sigma^{(Z)})^2$	ρ_{YZ}	a	
50.3	-0.13	0.25	62.1	-0.13	0.21	73.2	47.5	0.66	29.3	

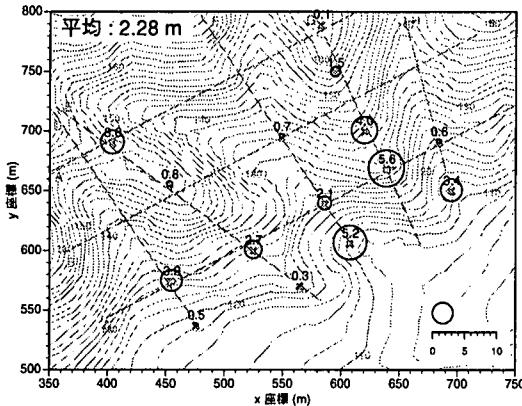
• ランダム成分

$$\left\{ \begin{array}{l} C_Y(\mathbf{u}, \mathbf{u}') = (\sigma^{(Y)})^2 \\ \exp\left(-\frac{\{(u_x - u'_x)^2 + (u_y - u'_y)^2\}^{1/2}}{a}\right) \\ \\ C_Z(\mathbf{u}, \mathbf{u}') = (\sigma^{(Z)})^2 \\ \exp\left(-\frac{\{(u_x - u'_x)^2 + (u_y - u'_y)^2\}^{1/2}}{a}\right) \\ \\ C_{YZ}(\mathbf{u}, \mathbf{u}') = \rho_{YZ} \cdot \sigma^{(Y)} \cdot \sigma^{(Z)} \\ \exp\left(-\frac{\{(u_x - u'_x)^2 + (u_y - u'_y)^2\}^{1/2}}{a}\right) \end{array} \right. \quad (19)$$

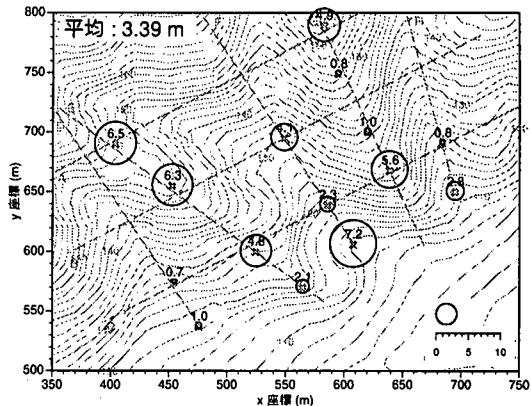
この中の ρ_{YZ} が地表面レベルと基礎地盤面レベルの相関性を表しており 0.66 と比較的大きく、地表面の起伏によって、ある程度精度良く推定できるものと考えられる。

(3) 基礎地盤面レベルの推定

図-9 のセンターは、前述の統計量を用いて基礎地盤面レベルを推定した結果を示したものである。図の a) が提案する Type-CED による推定結果、b) が Type-COK による推定結果を示している。岩盤の風化地域のため地表面との相関性が強く、推定結果は地表面の起伏に



a) Type-CED



b) Type-COK

図-9 基礎地盤面レベルの推定結果とボーリング位置でのブラインドテスト結果

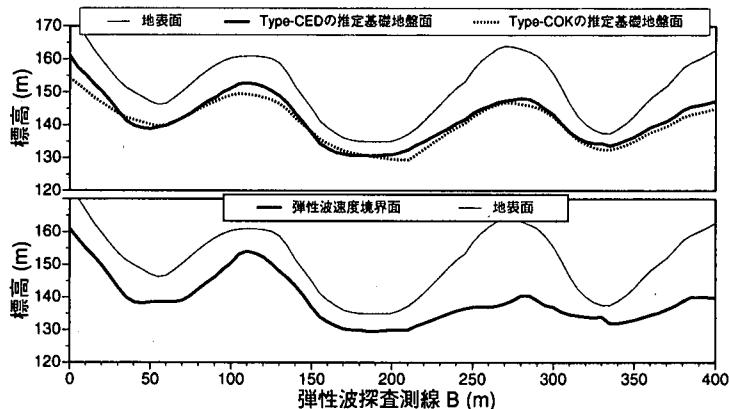


図-10 Type-COK と Type-CED の推定結果の例

良く追従していることがわかる。弾性波探査結果の有無による違いは、センターの比較ではほとんど読みとることができない。そこで弾性波探査結果の影響が大きいと考えられる弾性波測線断面での推定を比較した。

例として弾性波探査測線Bの断面を推定したものが図-10である。上のグラフは、Type-CEDによる推定結果(実線)とType-COKによる推定結果(破線)を重ねて示しており、下のグラフは用いた弾性波速度境界面を示している。実線と破線を比較すると、例えば断面位置110m付近の尾根部で実線は破線より5m程度高く推定しており、これは弾性波速度境界面がこの部分で相対的に高くなっていることに起因している。また270m付近の尾根部では尾根の頂上部が実線と破線で若干ずれており、これも弾性波速度境界面が地表面の頂上部とずれていることに起因する。このように弾性波探査結果の影響を少なからず受けていることが明らかである。ただしこの比較からは、どちらが正しい推定かは言及することはできない。

次に推定精度の評価を行うために、ボーリング位置

での基礎地盤面レベルの真値に対して、ボーリングがなかったとした時のその位置の推定値を比較したいわゆるブラインドテストを実施した。15本のボーリング1カ所ごとに行い、結果を示したものが図-9の大きさの異なる円で示したグラフである。円の大きさが真値との差の大きさを表しており、値も同時に示している。図のa)およびb)を比較すると、ほとんどのボーリング位置でa)の方が差が小さくなっている。これらのボーリングのほとんどが弾性波探査測線近傍にあることを考えると、領域全体の精度向上としては一般化できないものの、ボーリング位置では平均で3.39mから2.28mと約1.1m、30%以上の精度向上が認められる。

当サイトでは地表面との相關性が良いため、元々Type-COKによる推定でも十分に精度が良いことと、弾性波探査結果との相關性があり大きくなることを考えると、推定精度の向上は期待以上のものがある。したがって地表面との相關性の低いサイトや弾性波探査の精度が高い場合には、さらなる推定精度向上の効果が得られるものと確信している。

5. おわりに

本論文では、既に提案している地表面レベルを補助データとした基礎地盤面レベルの推定法³⁾に統いて、弾性波探査の結果も取り入れた推定法を提案した。そして数値実験により提案手法の検証を行い、地表面レベルとの相関性の違いによる影響や弾性波探査結果に含まれるノイズの大きさによる影響などについてシミュレーションを実施した。また実際のボーリング調査および弾性波探査結果に対して適用し、既存ボーリング位置でのブラインドテストにより有効性を確認した。

以下に提案手法の特徴と本論文で得られた知見をまとめると。

- 3変量以上のCokrigingは、パラメータの数が増大し空間構造の特定が困難となるため、現実的には適用が難しい。そこで提案手法では「外部変数トレンドを含むKriging」^{8),9)}を参考に、地表面レベルのデータはトレンド成分として扱う方法を考えた。そして地表面との相関性が高くない場合も想定して、位置座標の多項式で表されるトレンド成分も考慮できるように定式化を行った。
- トレンド成分として外部の変数を組み込む場合、1) 外部変数は空間的に滑らかに変化する、2) 他の変数の観測位置および推定したい位置の全てにおいて外部変数の真値が与えられる、の2つの前提条件を満たす必要があるが、地表面レベルはこれを満たしており、適用が可能である。
- 模擬観測データを用いて、数値実験により提案手法の検証を実施した。まず地表面レベルをトレンド成分として扱うことの妥当性を検証した(Case-I)。その結果、「外部変数トレンドを含むKriging」による推定は、「Cokriging」による推定とほぼ同程度、地表面との相関性が大きい(0.8以上)場合にはむしろトレンド成分として扱った方が推定精度の良いことが判明した。
- 弾性波探査結果の模擬データとして、基礎地盤面レベルの真値に対して分散の1%から最大200%の測定誤差を加えたものを想定して推定計算を実施した(Case-II)。結果は測定誤差の最も大きい(200%)ケースでも、弾性波を考慮しない推定結果よりも精度が良くなることがわかった。
- また推定結果を弾性波探査と基礎地盤面の相関性の観点で整理すると、弾性波探査結果の効果が確実に期待できるのは、相関係数 ρ_{SZ} : 0.5~0.6以上の場合であることが示された。
- 実際の杭基礎工事におけるボーリング調査および弾性波探査結果に対して本手法を適用したところ、基礎地盤面レベルと弾性波速度境界面レベルの相

関係係数 ρ_{SZ} は0.39と小さいものの、既存ボーリング位置でのブラインドテストでは弾性波探査結果を考慮しない場合に比べて30%以上も精度が向上しており、効果が認められた。

実際の弾性波探査結果には測定誤差がどの程度含まれているのか不明である。今回適用したデータでは基礎地盤面レベルとの相関係数が0.39であり、数値実験の結果と照らし合わせると分散の50~100%程度の測定誤差が含まれていると考えられる。しかしこれは地質や地形の状況、測線の位置など、様々な条件によって異なると考えられる。

今後は弾性波探査結果の有する情報内容の解明、ボーリング調査と弾性波探査測線を組み合わせた最適な配置計画など、基礎地盤面レベル推定のための総合的な調査計画について検討していく予定である。

参考文献

- 1) Matheron, G. : Principles of geostatistics, *Economic Geology*, Vol.58, pp.1246-1266, 1963.
- 2) Journal, A.G. and Huijbregts, Ch.J. : *Mining geostatistics*, Academic Press, Inc., pp.324-343, 1978.
- 3) 本多 真, 鈴木 誠, 上田 稔, 近藤寛通 : 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.
- 4) 天野智之, 上田 稔, 依田 真, 本多 真, 鈴木 誠 : 地形情報を用いた基礎地盤レベル推定の事例報告(その2), 土木学会第51回年次学術講演会講演概要集, III-A364, pp.728-729, 1996.
- 5) 上田雅司, 佐藤和昭, 上田 稔, 鈴木 誠, 本多 真 : 地形情報を用いたCokrigingによる基礎地盤面推定(その3推定結果の検証), 第32回地盤工学研究発表会発表論文集, 98, pp.197-198, 1997.
- 6) 林 宏一, 斎藤秀樹 : 高精度屈折法地震探査の開発と適用例, 物理探査, 第51巻, 第5号, pp.471-492, 1998.
- 7) Delhomme, J. P. : Kriging in hydrosciences, *Adv. Water Resour.*, Vol.1, No.5, pp.251-266, 1978.
- 8) Galli, A. and Meunier, G. : Study of a gas reservoir using the external drift method, *Geostatistical Case Studies*, Matheron, G. and Armstrong, M. eds., D. Reidel Pub Co., Hingham, Mass., pp.105-120, 1987.
- 9) Moinard, L. : Application of kriging to mapping of a reef from wireline logs and seismic data; a case history, *Geostatistical Case Studies*, Matheron, G. and Armstrong, M. eds., D. Reidel Pub Co., Hingham, Mass., pp.93-104, 1987.
- 10) Huijbregts, Ch.J. and Matheron, G. : Universal Kriging - An optimal approach to trend surface analysis. *Decision Making in the Mineral Industry*, Special Vol.12, Canadian Institute of Mining and Metallurgy, pp.159-169, 1971.
- 11) Ahmed, S. and de Marsily, G. : Comparison of geostatistical methods for estimating transmissivity using data on transmissivity and specific capacity., *Water Resour. Res.*, Vol.23, No.9, pp.1717-1737, 1987.
- 12) 鈴木 誠, 本多 真 : 最尤法による2変量確率場の統計量推定, 第53回土木学会年次学術講演会梗概集, CS-202, pp.402-403, 1998.

(1999. 6. 23 受付)

ESTIMATION OF PILE TIP LEVELS TAKING ACCOUNT OF THE GROUND SURFACE LEVELS AND THE ELASTIC WAVE EXPLORATION

Makoto HONDA, Makoto SUZUKI, Minoru UEDA and Hitoshi NISHIMURA

The pile tip levels, which are the foundation levels of piled structures, are correlated with the ground surface levels from the geological point of view. We had proposed before the estimation method which is based on the cokriging procedure and had produced excellent results. This paper presents the new estimation method of pile tip levels taking account of not only the ground surface levels but also the elastic wave exploration data. For the purpose of preventing from increasing of model parameters, the ground surface levels are treated as the trend component. In this paper, the proposed method was verified using the numerical data and applied to the actual data.