

I - 428

コクリッキングを用いた地盤物性値の空間分布推定とその応用に関する研究

鳥取大学工学部 正会員 上田 茂 鳥取大学工学部 正会員 白木 渡
鳥取大学工学部 正会員 松保重之 東京電力(株) 正会員 安田 登
東電設計(株) 正会員 松島 学 Iチ イ シ(株) 正会員 西谷高広
東電設計(株) 正会員 恒國光義 鳥取大学工学部 学生員 堀 英治

1. まえがき：構造物の設計・建設において必要な情報として、建設対象地点（地域）の地盤状況、つまり、地盤物性値（N値、内部摩擦角、粘着力など）が挙げられる。この地盤物性値の中でN値については、現場において比較的簡単な試験で得られることから数多くのデータが蓄積されているが、内部摩擦角、粘着力はその試験が困難なことから、データの数が少ない。そこで本研究では、地盤物性値（内部摩擦角、粘着力など）のデータ不足による地盤の不確定性を解消するために、多くデータが得られている地盤物性値の空間分布特性から、コクリッキング手法を用い、少ししかデータが得られていない地盤物性値の空間分布特性を推定し、その推定結果を用いて、送電線鉄塔深礎基礎の引揚げ支持力の推定を行う。

2. コクリッキングによる地盤物性値の推定法

地盤物性値は、一般的に空間的にばらつきを有していると考えられる。地盤物性値の空間分布には図-1に示す3つのタイプがある。本研究では、その中でタイプⅢのモデルに着目し、これを表現するための定式化を行う。

まず、2つの互いに相関のある標本場 $Z_A(x)$ 、 $Z_B(x)$ が式(1)、(2)のように表されるとする。ここに、 x ：地盤中の位置ベクトル、 $m(x)$ ：トレンド成分（平均値関数）、 $\xi(x)$ ：ランダム成分（不規則関数）である。

本研究では、 $Z_A(x)$ の具体例として図-2に示すN値を考え、 $Z_B(x)$ の具体例として粘着力 C および内部摩擦角 ϕ を考える。図-2は送電線鉄塔深礎基礎の設計を行うためにボーリングされたデータの一例である。図-2に示す3つの図は左からそれぞれ、(a)N値の深さ方向の分布、(b)(a)からトレンド成分を引いたもの、(c)(b)をトレンド成分で割ったものである。これを見ると、(c)は平均がゼロで分散が一定な均質な確率場

$\xi_A(x)$ として取り扱うことができる。

さて、コクリッキングの考え方によれば $\xi_A(x)$ 、 $\xi_B(x)$ の各標本値を用いて、標本場 $Z_B(x)$ の任意の点 x_r における推定値 $\hat{Z}_B(x_r)$ は式(3)で表される。また、式(4)における $\lambda_i(x_r)$ は重み係数で、 $\xi_B(x_r)$ と $\xi_B(x_i)$ との差の2乗の期待値で表される誤差分散を最小にするように式(5)、(6)によって決定できる。

いま、式(7)で表されるN値と粘着力 C との回帰式が得られていると考える。ここに、 a, b は回帰分析により求められる係数、 ε は誤差項で期待値がゼロ、一定の分散を有する確率変数で、確率場 $N^*(z)$ 、 $C^*(z)$ とは独立である。そして、 $N^*(z)$ 、 $C^*(z)$ は共に深さ z に関して均質な一

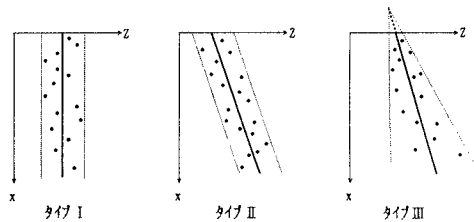


図-1 1次元の地盤物性値の空間分布モデル

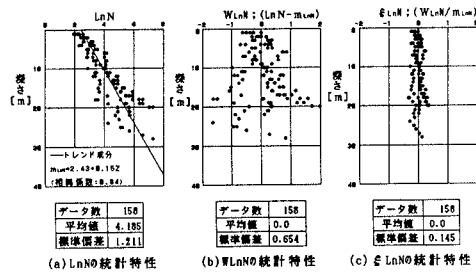


図-2 N値の空間分布モデル化

$$Z_A(x) = m_A(x) + \xi_A(x) \quad (1)$$

$$Z_B(x) = m_B(x) + \xi_B(x) \quad (2)$$

$$\hat{Z}_B(x_r) = m_B(x_r) + \sum_{i=1}^{N+M} \lambda_i(x_r) \xi_B(x_i) \quad (3)$$

$$\xi_B(x_r) = \sum_{i=1}^N \lambda_i(x_r) \xi_A(x_i) + \sum_{i=N+1}^{N+M} \lambda_i(x_r) \xi_B(x_i) \quad (4)$$

$m=1 \sim N$ のとき、

$$\begin{aligned} \text{Cov}\{\xi_B(x_r), \xi_A(x_m)\} \\ = \sum_{i=1}^N \lambda_i(x_r) \text{Cov}\{\xi_A(x_i), \xi_A(x_m)\} \\ + \sum_{i=N+1}^{N+M} \lambda_i(x_r) \text{Cov}\{\xi_B(x_i), \xi_A(x_m)\} \end{aligned} \quad (5)$$

$m=N+1 \sim N+M$ のとき、

$$\begin{aligned} \text{Cov}\{\xi_B(x_r), \xi_B(x_m)\} \\ = \sum_{i=1}^N \lambda_i(x_r) \text{Cov}\{\xi_A(x_i), \xi_B(x_m)\} \\ + \sum_{i=N+1}^{N+M} \lambda_i(x_r) \text{Cov}\{\xi_B(x_i), \xi_B(x_m)\} \end{aligned} \quad (6)$$

次元正規確率場で、式(8)で与えられるものと
する。ここに、 $N(z)$ 、 $C(z)$ は共に一次元対数正
規確率場である。

建設地点においてボーリング調査が行われ、
N値のトレンド成分とランダム成分の共分散関
数 $\text{Cov}\{\xi_N^*(z_1), \xi_N^*(z_2)\}$ が推定されたとする
と、 $C^*(z)$ の共分散関数 $\text{Cov}\{\xi_c^*(z_1), \xi_c^*(z_2)\}$
は、式(9)のように与えられる。さらに、N値
と粘着力との間のランダム成分の相互共分散関
数は式(10)で表される。この式(9)、(10)を式(5)、
(6)に代入することによって重み係数が求まる。
また、粘着力 $C(z)$ の推定誤差分散は式(11)のよ
うになる。以上、コクリッキングによる粘着力
の推定法について示したが、内部摩擦角の推定
も同様に行うことができる。

3. 推定結果および考察：2. で示した推定法によりN値の標本値を用いて、粘着力および内部摩擦角を求
めた。ここではその内、内部摩擦角 ϕ の推定結果の一例を図-3、4に示す。図-3において左から、(a)推定する
のに用いたN値の標本値、(b)ケース1の場合（N値を用いて内部摩擦角を推定）の推定結果を示している。
図-4において左から、(a)推定するのに用いた内部摩擦角の標本値、(b)ケース2の場合（既知の内部摩擦角
を用いて未知の内部摩擦角を推定）の推定結果、(c)ケース3の場合（既知の内部摩擦角とN値を用いて未知
の内部摩擦角を推定）の推定結果を示している。ただしどのケースにおいても、N値と ϕ との回帰分析の誤
差 ε を考慮している。これらの推定結果より、コクリッキングを用いた地盤物性値の空間分布推定では、与
える情報が多いほど推定誤差が小さくなり精度も良くなることがわかる。また、内部摩擦角の情報が1つも
ない場合でも、かなりの精度で、内部摩擦角を推定することができ、コクリッキングによる地盤物性値の空
間分布推定は、非常に有効であることがわかる。

また、推定した粘着力と内部摩擦角を用いて送電線鉄塔基礎基礎
の引揚げ支持力を推定した結果を表-1に示す。ケース1の場合は推
定誤差内に実際に得られているC、 ϕ を用いて行った支持力の計算
結果が入っていて、うまく推定ができている。ケース2の場合は、
標本値として、幾つか得られているC、 ϕ のみ用いているので、推
定値とかなり近い値が得られている。ケース3の場合は、N値に加
えて幾つか得られているC、 ϕ の標本値も用いて支持力を推定して
いるので、他のケースに比べて最も推定誤差が小さくなっているのがわかる。

表-1 深礎基礎の引揚げ支持力の推定結果（単位：tf）

ケース	推定値	推定値+推定誤差	推定値-推定誤差
1	2543.1	3711.5	1437.9
2	2236.9	2386.5	2089.7
3	2225.4	2274.1	2176.8

◎実際に得られたC、 ϕ を用いて行った
支持力の計算結果 1974.2 (tf)

参考文献 1)鈴木 誠：地盤物性値の空間分布特性
の確率論的記述と地盤工学における信頼性設計の
基礎的研究，名古屋工業大学 博士論文，1990.4。
2)東京電力株式会社：送電用鉄塔基礎の信頼性設計に関する研究，1984。

$$C^*(z) = aN^*(z) + b + \varepsilon \quad (7)$$

$$N^*(z) = \text{Ln}N(z), \quad C^*(z) = \text{Ln}C(z) \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \text{Cov}\{\xi_c^*(z_1), \xi_c^*(z_2)\} \\ = \left\{ \frac{a m_N^*(z_1)}{a m_N^*(z_1) + b} \right\} \left\{ \frac{a m_N^*(z_2)}{a m_N^*(z_2) + b} \right\} \text{Cov}\{\xi_N^*(z_1), \xi_N^*(z_2)\} \\ + \left\{ \frac{1}{a m_N^*(z_1) + b} \right\} \left\{ \frac{1}{a m_N^*(z_2) + b} \right\} \text{Var}(\varepsilon) \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \text{Cov}\{\xi_N^*(z_1), \xi_c^*(z_2)\} \\ = \left\{ \frac{a m_N^*(z_2)}{a m_N^*(z_2) + b} \right\} \text{Cov}\{\xi_N^*(z_1), \xi_N^*(z_2)\} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{ec}^2(z_r) &= E\{[C(z_r) - \hat{C}(z_r)]^2\} \\ &= m_c^2(z_r) \{\exp(\sigma_c^{*2}) - 1\} \\ &\quad + [m_c(z_r) - \exp\{\hat{C}(z_r)\}]^2 \end{aligned} \quad (11)$$

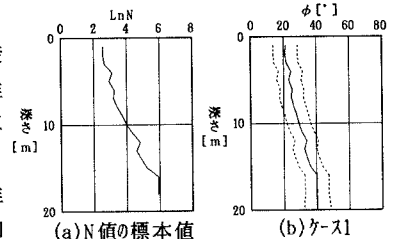


図-3 N値の標本値と推定結果

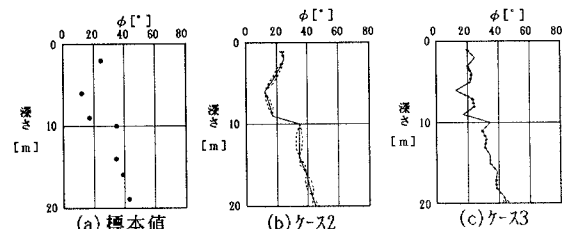


図-4 内部摩擦角の標本値および推定値