

III-B 402 地盤物性値間の線形関係を利用したクリッキングによる地盤物性値の推定とその応用

鳥取大学工学部 正会員 白木 渡 東京電力㈱ 正会員 安田 登
東電設計㈱ 正会員 松島 学 鳥取大学大学院 学生員○堀 英治
東電設計㈱ 正会員 恒国光義

1. まえがき：地盤物性値（N値、粘着力C、内部摩擦角 ϕ など）の中で、N値については比較的多くのデータが得られているが、C、 ϕ は室内試験を必要とするため手間がかかり、あまりデータが得られていない。そこで本研究では、地盤物性値間（N値とC、 ϕ ）の線形関係を利用したクリッキング¹⁾により、N値のデータからC、 ϕ の空間分布の推定法について示す。さらにその推定法を用いて送電鉄塔深礎基礎の引揚げ支持力の推定を行う。

2. 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²⁾。本研究では、その中でタイプII、IIIのモデルに着目して推定を行った。

推定法(1)：いま、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。ここでは、タイプIIIの空間モデルを用いて地盤物性値を以下のようにしてモデル化する。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。対象とする送電鉄塔は山岳地帯に建設されるため、鉄塔の4脚に通常標高差が生じるが、推定法(1)ではこの標高差を無視して $\xi_A(x)$ のモデル化を行う方法について示す。

さて、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 $\lambda_1(x_r)$ は重み係数で、 $\xi_B(x_r)$ と $\xi_B(x_r)$ 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 $N^*(z)$ 、 $C^*(z)$

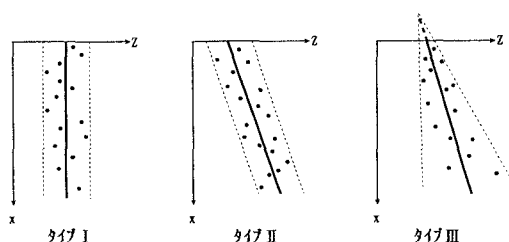


図-1 1次元の地盤物性値の空間分布モデル

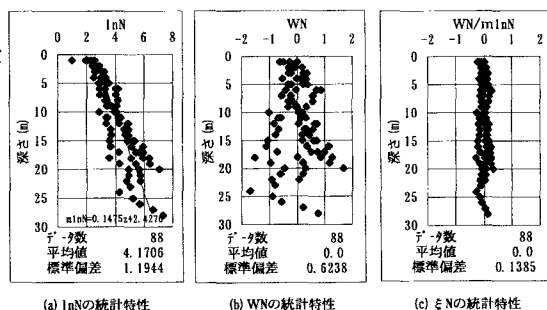


図-2 タイプIIIによるN値の空間分布モデル

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

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

$$\hat{Z}_B(x_r) = m_B(x_r) + m_B(x_r) \hat{\xi}_B(x_r) \quad (3)$$

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

$m = 1 \sim N$ のとき

$$\text{Cov}\{\xi_B(x_r), \xi_A(x_m)\} = \sum_{i=1}^N \lambda_i(x_r) \text{Cov}\{\xi_A(x_i), \xi_A(x_m)\}$$

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

$m = N + 1 \sim N + M$ のとき

$$\text{Cov}\{\xi_B(x_r), \xi_B(x_m)\} = \sum_{i=1}^N \lambda_i(x_r) \text{Cov}\{\xi_A(x_i), \xi_B(x_m)\}$$

とは独立である。

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、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を行うことができる。

推定法 (2) : 推定法 (1) では、鉄塔の4脚の標高差を無視した場合についての推定法について示したが、ここでは1脚ずつのデータを用いてランダム成分 $\xi_N^*(z)$ を求め、それぞれのランダム成分を重ね合わせて全体の統計特性を求めることにより、4脚の標高差を考慮した地盤物性値のモデル化を行う。そのモデルを用いて、推定法 (1) と同様にしてN値からC, ϕ を推定する。推定法 (1) と (2) を比較することにより、標高差が推定結果に及ぼす影響がわかる。

推定法 (3) : 推定法 (1) では、地盤物性値を図-1に示すタイプⅢでモデル化したが、タイプⅢの代わりにタイプⅡのモデルを用いた推定法をここでは推定法 (3) とする。推定法 (1) あるいは (2) と (3) の推定結果を比較することにより、地盤物性値の空間分布モデルとしてタイプⅡとタイプⅢのどちらかを用いるかによって推定結果にどのように影響するかを比較・検討できる。

3. 推定結果及び考察 : 推定法 (1) ~ (3) によりN値からC, ϕ を推定する場合について、それぞれにおいてケース1~3に分けて推定を行った。ケース1はN値を用いてC, ϕ を推定、ケース2は既知のC, ϕ を用いて未知のC, ϕ を推定、ケース3は既知のC, ϕ とN値を用いて未知のC, ϕ を推定したものである。このようにして推定したC, ϕ を用いて、モンテカルロ・シミュレーションにより送電用鉄塔深礎基礎の引揚げ支持力の推定を行った。その結果を表-1に示す。表において、

50-A, 51-C とあるのは鉄塔の柱鉄番号50の柱脚Aと柱鉄番号51の柱脚Cについての計算結果である。

推定法 (1) と (2) による50-Aの結果、推定法 (2) と (3) による51-Cの結果を比較すると、どちらも推定法 (2) の推定誤差が大きくなっている。これから、地盤物性値の空間分布のモデルの選択、各脚の標高差を考慮するか無視するかにより、結果に違いがでることがわかる。また、ケース1よりケース2、ケース2よりケース3の方が推定誤差が小さくなっていることより、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。

参考文献

- 1) Ahmed, S. and de Marsily, G. : Comparison of geostatistical methods for estimating transmissivity using data on transmissivity and specific capacity, Water Resource Research, Vol. 23, No. 9, pp. 1717-1737, 1987.
- 2) Weeks White, W. : Soil variability: characterisation and modelling, Probabilistic Methods in Geotechnical Engineering, pp. 111~120, 1993.

$$+ \sum_{i=N+1}^{N+M} \lambda_i(x_i) \text{Cov}\{\xi_N(x_i), \xi_N(x_m)\} \quad (6)$$

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

$$N^*(z) = \ln N(z) \quad (8)$$

$$C^*(z) = \ln C(z) \quad (9)$$

$$\text{Cov}\{\xi_C^*(z_1), \xi_C^*(z_2)\} = K_1 K_2 \text{Cov}\{\xi_N^*(z_1), \xi_N^*(z_2)\} + \left\{ \frac{1}{a m_N^*(z_1) + b} \right\} \left\{ \frac{1}{a m_N^*(z_2) + b} \right\} \text{Var}(\varepsilon) \quad (10)$$

$$\text{Cov}\{\xi_N^*(z_1), \xi_N^*(z_2)\} = K_2 \text{Cov}\{\xi_N^*(z_1), \xi_N^*(z_2)\} \quad (11)$$

$$\text{ここで、} K_1 = \frac{a m_N^*(z_1)}{a m_N^*(z_1) + b}, K_2 = \frac{a m_N^*(z_2)}{a m_N^*(z_2) + b}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{EC}^2(z) &= E\{[C(z) - \hat{C}(z)]^2\} \\ &= \sigma_C^2(z) + \{m_C(z) - \hat{C}(z)\}^2 \\ &= m_C^2(z) \{ \exp(\alpha_C^2) - 1 \} \\ &\quad + [m_C(z) - \exp(\hat{C}(z))]^2 \end{aligned} \quad (12)$$

表-1 深礎基礎の引揚げ支持力の推定値と確率特性
(単位: t f)

	柱鉄番号	ケース	シミュレーションの計算結果		現行設計値
			平均値	標準偏差 変動係数	
推定法 (1)	50-A	1	2600.3 ± 319.9	0.123	2308.7
		2	2252.1 ± 53.6	0.024	
		3	2309.8 ± 17.2	0.007	
推定法 (2)	50-A	1	2600.7 ± 339.9	0.131	2308.7
		2	2295.2 ± 67.7	0.029	
		3	2333.6 ± 20.5	0.009	
	51-C	1	2807.9 ± 354.9	0.126	2440.7
		2	2808.9 ± 354.10	0.057	
		3	2846.7 ± 58.9	0.021	
推定法 (3)	51-C	1	2792.8 ± 280.2	0.100	2440.7
		2	2814.3 ± 110.4	0.039	
		3	2849.4 ± 48.3	0.017	