

# 地盤物性値間の回帰関係を利用したコクリッキングによる送電用鉄塔基礎の支持力の推定

白木 渡<sup>1</sup>・恒国光義<sup>2</sup>・松島 学<sup>3</sup>・安田 登<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 鳥取大学助教授 工学部土木工学科 (〒680 鳥取市湖山町南4丁目101)

<sup>2</sup>正会員 工修 東電設計(株) 技術開発本部 (〒110 東京都台東区東上野3丁目3-3)

<sup>3</sup>正会員 工博 東電設計(株) 技術開発本部

<sup>4</sup>正会員 工博 東京電力(株) 電力技術研究所 (〒230 横浜市鶴見区江ヶ崎町4-1)

基礎構造物の設計・施工において必要となる地盤物性値(N値、内部摩擦角、粘着力等)の情報の内、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。しかし、内部摩擦角や粘着力は、その試験に手間がかかることからデータの数が少ない。本研究では、2物性値間の回帰関係を利用したクリッキングを用いて、データが数多く得られているN値の空間分布特性から、データが少ししか得られていない内部摩擦角や粘着力を推定する方法を示し、その応用例として送電鉄塔基礎の支持力の推定問題を考える。

**Key Words** : kriging combined with linear regression, N value, internal friction angle, cohesion, bearing capacity, foundation of transmission tower

## 1. まえがき

構造物を設計し、建設するにあたって、まず必要になる重要な情報として建設対象地点の地盤物性値が挙げられる。構造物の種類や目的によって必要になる地盤物性値は異なるが、代表的なものとして、N値、内部摩擦角、粘着力等がある。これらの物性値は、標準貫入試験、一軸・三軸圧縮試験等によって求められるが、高架橋や送電用鉄塔のような広範囲にわたる構造物については全ての地点における地盤物性値を求めることは時間もかかり、非常に不経済である。N値については原位置試験によって求められるので、比較的多数のデータを採取できるが、粘着力や内部摩擦角については室内実験によって求めなければならない、手間がかかるため十分なデータが得られない場合が多い。

地盤工学の分野では、少数の限られた標本値から地盤物性値などの空間分布を推定する方法として、クリッキングとよばれる方法がよく用いられている<sup>1)~9)</sup>。この推定法は、鉱山工学から発祥した地盤統計学の考え方を基に定式化された方法で、地盤物性値の空間分布を、一つの確率場とし、観測データを実現事象である標本場の一部と

して扱い、土質調査により得られた標本値をもとに、建設対象地点の地盤物性値の条件付き確率場の一部である空間分布を推定しようとする手法である。しかし、この推定法は、標本自体がある程度の個数得られていなければ信頼できる推定値を得ることは難しい。そこで、N値のように既に比較的多数のデータが得られている物性値から他の地盤物性値を推定することができれば地盤の支持力の推定や杭基礎の設計等に非常に有効である。

地盤物性値間に相関関係が存在する場合には、コクリッキングと呼ばれる推定法を用いて十分なデータが得られているN値から比較的データの入手しにくい粘着力や内部摩擦角の空間分布を推定することができる<sup>7), 9)</sup>。しかし、この推定法では、コクリッキングに必要な2つの物性値間の相関特性をどのように与えるかということがの確率場の自己相関関数やセミバリオグラムと2変量の相関関係によって決まるものである。また、本多ら<sup>10)</sup>が指摘しているように、クロスコレログラムから関数をあてはめてモデル化すると自己相関関数との整合性が得られない可能性があるにもかかわらず、コクリッキングが適用できるという問題が生じる。

以上のような状況を踏まえて、本研究では、同種類の地

盤ですでに十分なデータが集められ、2物性値間にすでにある回帰関係が成立していると仮定できるか、あるいは対象としている地点に近いところで実施された調査により2物性値間の回帰関係が成立していることを前提条件として解析を行う。すなわち、 $N$  値と粘着力および内部摩擦角の間には回帰関係が存在すると仮定し、粘着力および内部摩擦角の統計量（平均値、自己共分散関数等）ならびに  $N$  値と粘着力および内部摩擦角の相互共分散関数を  $N$  値の統計量より推定することを考える。これにより上述したコクリッキングの問題点は解決する。著者らの知る限りにおいては、このような考え方に基づいたコクリッキングの定式化はこれまでなされておらず、もちろん実データを用いた解析例も見られない。

前述したように、 $N$  値に比較して粘着力  $c$ 、内部摩擦角  $\phi$  は入手しにくい物性値であるため、杭基礎等の設計基準においては、 $N$  値と  $c$ 、 $\phi$  との間の回帰関係を利用して、 $N$  値から  $c$ 、 $\phi$  を推定する式が提案されている。本論文でも現行設計で用いられている  $N$  値と  $c$ 、 $\phi$  の間の回帰関係を利用することを考える。このようにして推定した統計量をもとにコクリッキングにより標本値が全く無いか、あっても数が少ない粘着力および内部摩擦角の空間分布の推定を行う。さらに、その結果を用いて、送電用鉄塔深礎基礎の引揚げ支持力を推定し、本研究で示す地盤物性値間の回帰関係を利用したコクリッキングによる推定法の有効性について検討する。

## 2. 相関を有する地盤物性値の空間分布の推定法

ここでは、同一地盤内における2つの地盤物性値の間に回帰関係が成り立ち、その地盤物性値間の関係式が得られていることを前提条件として、多数のデータが得られている地盤物性値の空間分布から、全くデータが得られていないかあるいは少しのデータしか得られていない地盤物性値の空間分布をコクリッキングの理論を用いて推定する方法について示す。

一般に、 $N$  値を代表とする地盤物性値はトレンド（平均値）成分も変動（分散）成分も深さ方向に大きくなる傾向がある。この傾向をモデル化するために、本研究では2つの互いに相関のある標本場  $Z_A(x)$ 、 $Z_B(x)$ ；（ $x$  は座標ベクトル）を、図-1に示すタイプⅢ<sup>4)</sup>の空間分布モデルとして、次式(1)のように表される場合を考えるが、以下の議論は、タイプⅠ、Ⅱについても同様に成立する。

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

$$Z_B(x) = m_B(x) + m_B(x)\xi_B(x) \quad (1b)$$

ここに、 $m_A(x)$ 、 $m_B(x)$  はそれぞれ  $Z_A(x)$ 、 $Z_B(x)$  のトレンド成分で、図-1の実線で表示されているものである。また、 $\xi_A(x)$ 、 $\xi_B(x)$  はそれぞれ  $Z_A(x)$ 、 $Z_B(x)$  からそれぞれのト

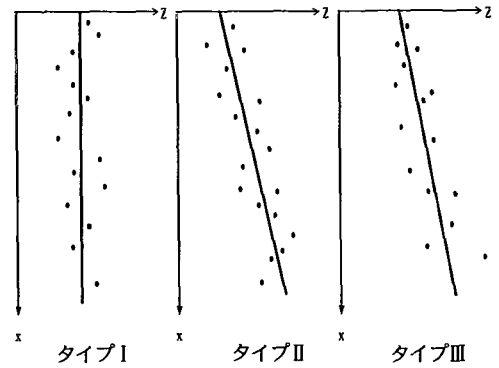


図-1 1次元の地盤物性値の空間分布モデル

レンド成分を引いて、それぞれのトレンド成分で除したものと定義されるランダム成分で、平均値がゼロでエルゴード性を有する確率場としてモデル化できる。

いま、標本場  $Z_A(x)$  において、 $N$  力所で標本値  $Z_A(x_i)$ ； $i=1-N$  が得られており、標本場  $Z_B(x)$  においても、 $M$  力所で標本値  $Z_B(x_j)$ ； $j=1-M$  が得られているとする。そして、これらの標本値から、あるいはこれまでの研究により、それぞれの標本場のトレンド成分が既知であり、またランダム成分の共分散関数と相互共分散関数が得られているものとする。そうすると、式(1)よりそれぞれの標本場の共分散関数は次式のようになる。

$$\begin{aligned} \text{Cov}\{Z_A(x_r), Z_A(x_s)\} \\ = m_A(x_r)m_A(x_s)\text{Cov}\{\xi_A(x_r), \xi_A(x_s)\} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{Cov}\{Z_B(x_r), Z_B(x_s)\} \\ = m_B(x_r)m_B(x_s)\text{Cov}\{\xi_B(x_r), \xi_B(x_s)\} \end{aligned} \quad (3)$$

また、標本場間の相互共分散関数は次式のようになる。

$$\begin{aligned} \text{Cov}\{Z_A(x_r), Z_B(x_s)\} \\ = m_A(x_r)m_B(x_s)\text{Cov}\{\xi_A(x_r), \xi_B(x_s)\} \end{aligned} \quad (4)$$

ここに、 $\text{Cov}(A, B)$  は  $A$  と  $B$  の共分散を示す。式(2)、式(3)および式(4)より、それぞれの標本場の共分散関数と標本場間の相互共分散関数は、それぞれのランダム成分の共分散関数とそれぞれのトレンド成分の積になる。

ここで、それぞれの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(1)より、

$$\hat{Z}_B(x_r) = m_B(x_r) + m_B(x_r)\xi_B(x_r) \quad (5)$$

のように表せるので、推定値  $\hat{Z}_B(x_r)$  は、そのランダム成分である  $\xi_B(x_r)$  を推定することにより求めることができる。これ以降、それぞれの標本値からトレンド成分を引いたランダム成分の実現値を用いて、標本場  $Z_B(x)$  の任意の点  $x_r$  におけるランダム成分  $\xi_B(x_r)$  を線形補間により求めることを考える。

それぞれの標本場の各座標位置において得られている標本値からトレンド成分を引いたランダム成分の実現値

を用いると、標本場  $Z_B(x)$  の任意の点  $x_r$  におけるランダム成分  $\xi_B(x_r)$  の線形補間式は、次のように表せる。

$$\hat{\xi}_B(x_r) = \sum_{i=1}^N \lambda_i(x_r) \xi_A(x_i) + \sum_{i=N+1}^{N+M} \lambda_i(x_r) \xi_B(x_i) \quad (6)$$

ここに、 $\lambda_i(x_r)$  は、重み係数である。上式において両辺の期待値をとれば

$$E[\hat{\xi}_B(x_r)] = E[\xi_B(x_r)] = 0$$

となり、式(6)は不偏推定式となる。

式(6)より、重み係数  $\lambda_i(x_r)$  を求めれば任意の点  $x_r$  におけるランダム成分  $\xi_B(x_r)$  が求められるが、この重み係数  $\lambda_i(x_r)$  については、 $\hat{\xi}_B(x_r)$  と  $\xi_B(x_r)$  との差の2乗の期待値で表される誤差分散  $\sigma_{\xi_B}^2(x_r)$  を最小とするように決定するものとする。この誤差分散  $\sigma_{\xi_B}^2(x_r)$  は、次式で表される。

$$\begin{aligned} \sigma_{\xi_B}^2(x_r) &= E\left\{\left[\xi_B(x_r) - \hat{\xi}_B(x_r)\right]^2\right\} \\ &= E\left\{\left[\xi_B(x_r) - \sum_{i=1}^N \lambda_i(x_r) \xi_A(x_i) - \sum_{i=N+1}^{N+M} \lambda_i(x_r) \xi_B(x_i)\right]^2\right\} \\ &= \text{Var}\{\xi_B(x_r)\} - 2 \sum_{i=1}^N \lambda_i(x_r) \text{Cov}\{\xi_B(x_r), \xi_A(x_i)\} \\ &\quad - 2 \sum_{i=N+1}^{N+M} \lambda_i(x_r) \text{Cov}\{\xi_B(x_r), \xi_B(x_i)\} \\ &\quad + 2 \sum_{i=1}^N \sum_{j=N+1}^{N+M} \lambda_i(x_r) \lambda_j(x_r) \text{Cov}\{\xi_A(x_i), \xi_B(x_j)\} \\ &\quad + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \lambda_i(x_r) \lambda_j(x_r) \text{Cov}\{\xi_A(x_i), \xi_A(x_j)\} \\ &\quad + \sum_{i=N+1}^{N+M} \sum_{j=N+1}^{N+M} \lambda_i(x_r) \lambda_j(x_r) \text{Cov}\{\xi_B(x_i), \xi_B(x_j)\} \quad (7) \end{aligned}$$

ここに、 $\text{Var}(A)$  は  $A$  の分散を示す。これより、推定誤差分散を最小とするように重み係数  $\lambda_i(x_r)$  を決定するために最小自乗法を用いると、式(7)は次式ようになる。

$m = 1 \sim N$  のとき、

$$\begin{aligned} \text{Cov}\{\xi_B(x_r), \xi_A(x_m)\} &= \sum_{i=1}^N \lambda_i(x_r) \text{Cov}\{\xi_A(x_i), \xi_A(x_m)\} \\ &\quad + \sum_{i=N+1}^{N+M} \lambda_i(x_r) \text{Cov}\{\xi_B(x_i), \xi_A(x_m)\} \quad (8) \end{aligned}$$

$m = N+1 \sim N+M$  のとき、

$$\begin{aligned} \text{Cov}\{\xi_B(x_r), \xi_B(x_m)\} &= \sum_{i=1}^N \lambda_i(x_r) \text{Cov}\{\xi_A(x_i), \xi_B(x_m)\} \\ &\quad + \sum_{i=N+1}^{N+M} \lambda_i(x_r) \text{Cov}\{\xi_B(x_i), \xi_B(x_m)\} \quad (9) \end{aligned}$$

上式で与えられる連立方程式を解くことにより、重み係数  $\lambda_i(x_r)$  を求めることができる。

以上のようにして求められた重み係数  $\lambda_i(x_r)$  を式(6)に代入し、得られたランダム成分  $\xi_B(x_r)$  を式(5)に代入することにより、 $Z_B(x_r)$  の推定値  $\hat{z}_B(x_r)$  を求めることができる。さらに、式(7)よりランダム成分  $\xi_B(x_r)$  の推定誤差分散が求められるので、いま、 $Z_B(x) = aZ_A(x) + b$  なる回帰

式が求められているとすると、標本場  $Z_B(x_r)$  の推定誤差分散は次式より求めることができる。

$$\begin{aligned} \sigma_{\xi_B}^2(x_r) &= E\left\{\left[Z_B(x_r) - \hat{z}_B(x_r)\right]^2\right\} \\ &= E\left\{\left[m_B(x_r) + m_B(x_r) \xi_B(x_r) - m_B(x_r) - m_B(x_r) \xi_B(x_r)\right]^2\right\} \\ &= m_B^2(x_r) E\left\{\left[\xi_B(x_r) - \xi_B(x_r)\right]^2\right\} \\ &= \{a m_A(x_r) + b\}^2 \sigma_{\xi_B}^2(x_r) \quad (10) \end{aligned}$$

標本値が得られている地点においては、推定値が標本値に一致し、推定誤差分散  $\sigma_{\xi_B}^2(x_r)$  はゼロになる。

以上が、回帰関係を有する2つの地盤物性値のコクリッキングによる空間分布推定の定式化である。上記の定式化は、推定対象となる地盤物性値においても数個の標本値が得られている場合を想定して行ったが、標本値が1つも得られていない場合においても、地盤物性値間の相関特性が与えられたならば、もう1つの地盤物性値の空間分布をもとに対象地盤物性値の空間分布の推定が可能である。

### 3. N値を用いた粘着力および内部摩擦角の空間分布の推定

本研究で対象とする送電用鉄塔基礎もそうであるが、一般に基礎構造物においては、粘着力や内部摩擦角などを基準にして設計が行われている場合がほとんどである。地盤の粘着力と内部摩擦角を知るための試験は、ほとんどの場合が室内試験を必要とするものであり、経済的・時間的な面から考えても建設地点においてこれらの十分なデータを得ることは困難である。これを補うために現在、N値と粘着力、内部摩擦角との関係に関する研究は数多くなされており、N値と粘着力、内部摩擦角との関係式も多く提案されている<sup>11)</sup>。

本章においては、比較的多くのデータを得ることができるN値と、同じように同一の土層における粘着力および内部摩擦角が回帰関係を有すると考え、2章で示した回帰関係を有する2つの地盤物性値のコクリッキングによる空間分布の推定法により、N値の空間分布から粘着力及び内部摩擦角の空間分布を推定することを考える。N値から粘着力を推定する場合も、内部摩擦角を推定する場合も同じ手法が用いられるので、以下、N値から粘着力を推定する場合についてのみ示す。2章で示した2つの回帰関係を有する地盤物性値  $Z_A(x)$  と  $Z_B(x)$  は、以下の議論ではそれぞれN値  $N^*(z)$  と粘着力  $C^*(z)$  に対応する。

ある土層においてN値と粘着力の関係が、回帰分析により次式のように与えられていると考える。

$$C^*(z) = aN^*(z) + b \quad (11a)$$

また、 $N$  値と粘着力の回帰式が誤差  $\epsilon$  を含む場合は

$$C^*(z) = aN^*(z) + b + \epsilon \quad (11b)$$

ここに、 $a, b$  は回帰分析により求められる係数で、誤差  $\epsilon$  は期待値ゼロの確率変数であり確率場  $N^*(z), C^*(z)$  とは独立である。そして、 $N^*(z), C^*(z)$  はともに均質な1次元正規確率場で次式で与えられると考える。

$$N^*(z) = \ln N(z) \quad (12)$$

$$C^*(z) = \ln C(z) \quad (13)$$

ここに、 $N(z), C(z)$  はともに1次元対数正規確率場である。また、対数正規確率場  $C(z)$  の期待値と分散は次のようになる。

$$\begin{aligned} m_C(z) &= E[C(z)] = E[\exp\{C^*(z)\}] \\ &= \exp\left\{m_C^*(z) + \frac{1}{2}\sigma_C^2(z)\right\} \end{aligned} \quad (14)$$

$$\sigma_C^2(z) = m_C^2(z) \left\{ \exp\{\sigma_C^2(z)\} - 1 \right\} \quad (15)$$

ここに、 $m_C^*(z), \sigma_C^2(z)$  は、それぞれ  $C^*(z)$  の期待値および分散である。

これまでのデータ解析により、 $N$  値の対数  $\ln N$  と粘着力  $C$  の対数  $\ln C$  の間に線形回帰関係が仮定される場合が多いので、ここでも  $\ln N$  と  $\ln C$  の線形関係を仮定している。したがって、 $N$  と  $C$  の間には線形関係は成立していない。

そして、 $N^*(z)$  は、図-1に示すタイプⅢの空間分布モデルで表されると考えると、次式となる。

$$N^*(z) = m_N^*(z) + m_N^*(z)\xi_N^*(z) \quad (16)$$

ここに、 $m_N^*(z)$  は  $N^*(z)$  のトレンド成分、 $\xi_N^*(z)$  は  $N^*(z)$  のランダム成分である。同一地盤内のどこにおいても式(11a)および式(11b)の関係が成り立っていると仮定すると、式(11a)より粘着力の確率場は次式ようになる。

$$\begin{aligned} C^*(z) &= a\{m_N^*(z) + m_N^*(z)\xi_N^*(z)\} + b \\ &= \{am_N^*(z) + b\} + am_N^*(z)\xi_N^*(z) \\ &= m_C^*(z) + m_C^*(z)\xi_C^*(z) \end{aligned} \quad (17a)$$

また、 $N$  値と粘着力の回帰式が誤差  $\epsilon$  を含む場合は式(11b)より

$$\begin{aligned} C^*(z) &= a\{m_N^*(z) + m_N^*(z)\xi_N^*(z)\} + b + \epsilon \\ &= \{am_N^*(z) + b\} + am_N^*(z)\xi_N^*(z) + \epsilon \\ &= m_C^*(z) + m_C^*(z)\xi_C^*(z) \end{aligned} \quad (17b)$$

いま、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  $m_N^*(z)$  とランダム成分  $\xi_N^*(z)$  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、式(17a)および式(17b)が成り立つ時、 $C^*(z)$  のトレンド成分  $m_C^*(z)$ 、ランダム成分  $\xi_C^*(z)$ 、共分散関数  $\text{Cov}\{\xi_C^*(z_1), \xi_C^*(z_2)\}$  ならびに  $\xi_N^*(z)$  と  $\xi_C^*(z)$  の相互共分散関数  $\text{Cov}\{\xi_N^*(z_1), \xi_C^*(z_2)\}$  は、それぞれ次式(18)～(21)のように与えられる<sup>12)</sup>。

$$m_C^*(z) = am_N^*(z) + b \quad (18)$$

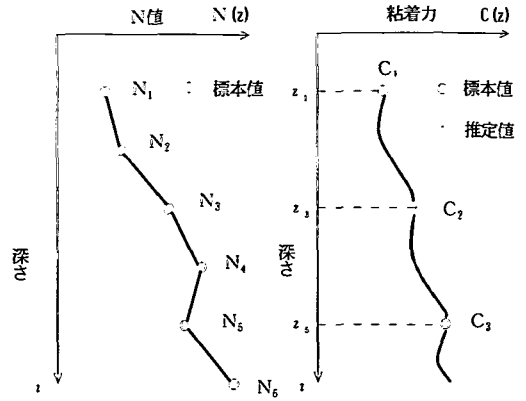


図-2 2つの相関のある地盤物性値の推定の概念

$$\xi_C^*(z) = \frac{am_N^*(z)}{am_N^*(z) + b} \quad (19a)$$

$$\xi_C^*(z) = \frac{am_N^*(z)\xi_N^*(z) + \epsilon}{am_N^*(z) + b} \quad (19b)$$

$$\text{Cov}\{\xi_C^*(z_1), \xi_C^*(z_2)\} = K_1 K_2 \text{Cov}\{\xi_N^*(z_1), \xi_N^*(z_2)\} \quad (20a)$$

$$\begin{aligned} \text{Cov}\{\xi_C^*(z_1), \xi_C^*(z_2)\} &= K_1 K_2 \text{Cov}\{\xi_N^*(z_1), \xi_N^*(z_2)\} \\ &+ \left\{ \frac{1}{am_N^*(z_1) + b} \right\} \left\{ \frac{1}{am_N^*(z_2) + b} \right\} \text{Var}(\epsilon) \end{aligned} \quad (20b)$$

$$\text{Cov}\{\xi_N^*(z_1), \xi_C^*(z_2)\} = K_2 \text{Cov}\{\xi_N^*(z_1), \xi_N^*(z_2)\} \quad (21)$$

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

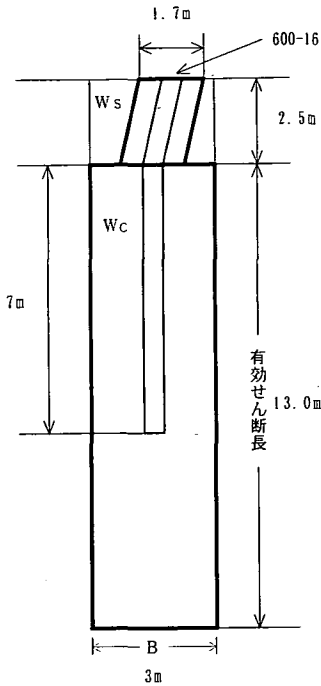
以上、 $N$  値の情報をもとに得られた式(18)～(21)に示す粘着力の統計量を用いて、式(8)、(9)の連立方程式を解くことにより、重み係数  $\lambda_i(z_r)$  を求めることができる。得られた重み係数  $\lambda_i(z_r)$  を式(5)、(6)に代入すれば、粘着力の対数値  $C^*(z_r)$  の推定値  $\hat{C}^*(z_r)$  が得られる。さらに、式(13)の関係から最終的に求める粘着力  $C(z_r)$  の推定値が得られる。このときの誤差分散  $\sigma^2_{\epsilon C}(z_r)$  は、次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \sigma^2_{\epsilon C}(z_r) &= E\left\{ [C(z_r) - \hat{C}^*(z_r)]^2 \right\} \\ &= \sigma_C^2(z_r) + \left\{ m_C(z_r) - \hat{C}^*(z_r) \right\}^2 \end{aligned}$$

$$= \sigma_C^2(z_r) \left\{ \exp\{\sigma_C^2(z_r)\} - 1 \right\} + \left\{ m_C(z_r) - \exp\{\hat{C}^*(z_r)\} \right\}^2 \quad (22)$$

以上、 $N$  値の対数値  $N^*(z)$  と粘着力の対数値  $C^*(z)$  の間の回帰関係を利用して、粘着力  $C(z)$  をコクリッキングにより推定する方法について示したが、内部摩擦角  $\phi(z)$  の推定も同様に行うことができる。

上で示した粘着力の空間分布の推定の具体的なイメージは図-2に示すようなものになる。つまり、 $N$  値の標本値  $N_1$  から  $N_6$  と粘着力の標本値  $C_1, C_2$  を用いて、深さ  $z_3$  の位置における粘着力の値  $C_3$  を推定することになる。この



(1) 基礎体鉄筋コンクリート容積	94.880 (m <sup>3</sup> )
重量	254.278 (tf)
鋼管	重量 2.184 (tf)
$W_c = 256.462 (tf)$	
(2) 埋戻し土量	$W_s = 19.194 (tf)$

図-3 深礎基礎モデル

場合の推定値  $c_i$  は推定誤差を含んだものである。もちろんクリッキング手法を用いれば  $c_i$  だけでなく任意の点の粘着力の空間分布の推定が可能となる。また、内部摩擦角についても同様な方法により空間分布が推定できる。

#### 4. 送電用鉄塔基礎の引揚げ支持力の推定

現在、送電用鉄塔深礎基礎の引揚げ支持力の評価は、対数ら線法、円弧法、せん断法、有限要素法などにより行われているが、本研究においては、せん断法により引揚げにおいては、深礎基礎のようになりに深くにまで根入れされる構造物については、地盤の破壊がせん断的になると考えられるからである。

本研究においては、図-3に示すような送電用鉄塔の深礎基礎の引揚げ支持力をせん断法によって次式により評価する<sup>11), 13)</sup>。

$$R_v = W_c + W_s + T \quad (23)$$

ここに、

- $R_v$  ; 引揚げ支持力 (tf)
- $W_c$  ; 基礎体の重量 (tf)
- $W_s$  ; 埋め戻し土の重量 (tf)
- $T$  ; せん断抵抗力 (tf)

また、せん断抵抗力  $T$  については次式で与えられる。

$$T = \sum_{i=1}^n l_i \pi B (C_i + K_0 \sigma_i \tan \phi_i) \quad (24)$$

ここに、

- $C_i$  ;  $i$  層の粘着力 (tf/m<sup>2</sup>)
- $\phi_i$  ;  $i$  層の内部摩擦角 (°)
- $\sigma_i$  ; 設計地盤面を基準としたときの  $i$  層中央での土被り圧 (tf/m<sup>2</sup>)
- $K_0$  ; 静止土圧係数
- $l_i$  ;  $i$  層の層厚 (m)
- $n$  ; 層の数

以上が、せん断法による送電用鉄塔深礎基礎の引揚げ支持力の評価式であるが、本研究においては、クリッキングにより推定された粘着力と内部摩擦角を用いて評価を行うため、式 (23) は、次式のようになる。

$$\bar{R}_v = W_c + W_s + \bar{T} \quad (25)$$

ここに、 $\bar{R}_v$  は推定引揚げ支持力の推定値、 $\bar{T}$  は推定せん断抵抗力の推定値であり、次式のようになる。

$$\bar{T} = \sum_{i=1}^n l_i \pi B (\bar{C}_i + K_0 \sigma_i \tan \bar{\phi}_i) \quad (26)$$

したがって、本研究においては、 $N$  値の空間分布から粘着力および内部摩擦角の空間分布  $N$  を推定し、その推定値を用いて最終的に式 (25)、式 (26) により、送電用鉄塔深礎基礎の支持力評価を行う。

#### 5. 数値計算例

前章までに示した地盤物性値ならびに送電用鉄塔基礎の支持力の推定手法の有効性を示すため、数値計算例として、送電用鉄塔新設工事に伴って得られている実際の地質調査データの一部 (A 地点、B 地点) を用いて  $N$  値より粘着力  $c$  および内部摩擦角  $\phi$  を推定し、その結果を利用して鉄塔基礎の引揚げ支持力の推定を行う。

##### (1) 粘着力および内部摩擦角の推定

###### a) $N$ 値の空間分布のモデル化

クリッキングによって粘着力、内部摩擦角を推定する準備段階として  $N$  値のモデル化を行う。今回用いるデータは、送電用鉄塔の建設対象地点で得られたものであるが、この送電用鉄塔は脚間の距離が 20m 近くもある巨大なものでありしかも山岳地帯に建設されるので、それぞれの脚に標高差が生じることが考えられる。この標高差が推定結果に何らかの影響を与えたと考えられる。一般

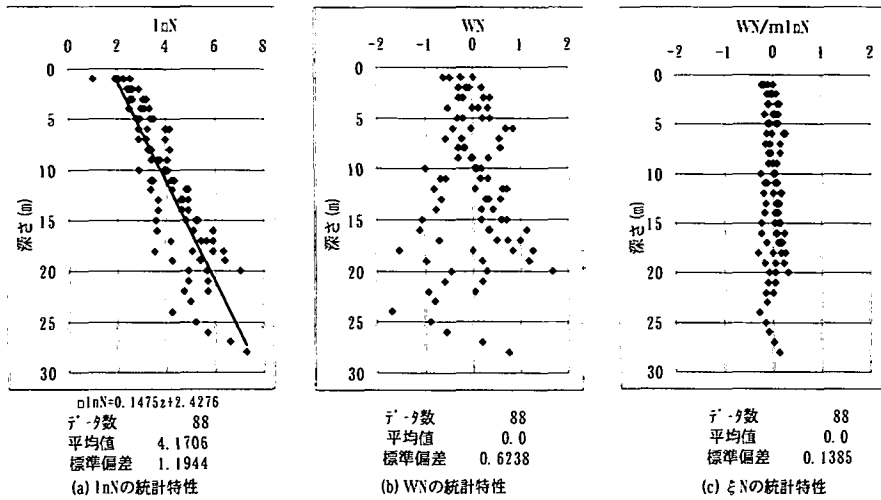


図-4 タイプⅢによるN値の空間分布モデル (A地点)

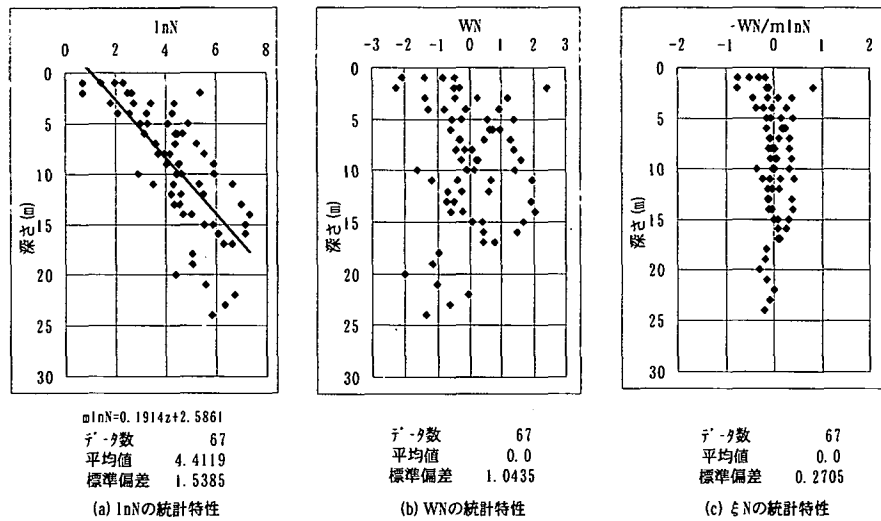


図-5 タイプⅢによるN値の空間分布モデル (B地点)

に、N 値は地盤空間に不均質に分布しているため、標高差のある N 値のデータを単に足し合わせるといった作業は確率場の理論に沿うものではない。しかし、標高差分のズレがあってもこれによる誤差が小さく標高差が無視できると仮定できれば、そのまま足し合わせても問題がないと考えられる。本来は不均質な場を均質な場に変換して初めて足し合わせが可能となる。つまり、N 値の空間分布モデルが図-1で示すタイプⅢのモデルであるならば均質場のランダム成分  $\xi_{\ln N}$  に変換した後足し合わせるというめんどろ作業が必要となる。

本研究では、標高差を無視した場合と考慮した場合で推定結果にどのような違いが生じるかを調べ、標高差の影響を検討する。そのために、両方の場合について N 値

の空間分布をモデル化する。

まず、図-4および図-5に標高差を無視した場合の N 値の空間分布モデルを示す。図-4が A 地点の場合で、図-5が B 地点の場合である。いずれの場合も表層部 1~2 m を除いて結晶片岩の地層で、深さ方向へ 1 m 間隔でとられた 4 つの脚すべての N 値のデータを標高差を考えずに統計処理したものである。図-4 (a)、図-5 (a) で N 値の自然対数値  $\ln N$  のトレンド成分  $m_{\ln N}$  が推定できる。

図-4 (b)、図-5 (b) は、 $\ln N$  からトレンド成分  $m_{\ln N}$  を引いたもので、さらにそれをトレンド成分  $m_{\ln N}$  で除いたものが図-4 (c)、図-5 (c) に示す  $\ln N$  のランダム成分  $\xi_{\ln N}$  である。図-4 (c)、図-5 (c) に示すランダム成分  $\xi_{\ln N}$  の自己相関係数は、それぞれ  $\rho(\Delta z) = \exp(-\Delta z/4.68)$  および  $\rho(\Delta z) =$

表-1 標高差を考慮した場合のN値の空間分布特性

(a) 柱鉄番号 5 0.

各脚のトレンド成分	
柱脚A	$m_{lnN}=0.2184z+1.9942$
柱脚B	$m_{lnN}=0.2112z+2.2328$
柱脚C	$m_{lnN}=0.1905z+1.8887$
柱脚D	$m_{lnN}=0.1156z+2.4315$
全脚のランダム成分	
平均値	0
標準偏差	0.0971
自己相関係数	$\rho(\Delta z)=\exp(-\Delta z/1.57)$

(b) 柱鉄番号 5 1

各脚のトレンド成分	
柱脚A	$m_{lnN}=0.3015z+3.1679$
柱脚B	$m_{lnN}=0.2365z+1.7698$
柱脚C	$m_{lnN}=0.1556z+2.7258$
柱脚D	$m_{lnN}=0.4708z+3.9795$
全脚のランダム成分	
平均値	0
標準偏差	0.1639
自己相関係数	$\rho(\Delta z)=\exp(-\Delta z/0.682)$

$\exp(-\Delta z/4.04)$ でモデル化される。ここに、 $\Delta z$ は2点間の距離差である。

つぎに、標高差を考慮するために4つの脚A～Dごとに、図-4および図-5と同じモデル化を行い、各脚ごとのランダム成分 $\xi_{lnN}$ を足し合わせてA地点とB地点のそれぞれのランダム成分 $\xi_{lnN}$ のモデルを作成する。紙面の都合上その結果のみを表-1に示す。

**b) N値と粘着力Cおよび内部摩擦角φの関係**

一般に、送電用鉄塔の基礎の設計に際しては、鉄塔の数が多すぎるため、各鉄塔の基礎位置で直接粘着力や内部摩擦角の地盤物性値を得ることはできない。現在行われている地盤物性値の設定は、地質ゾーン区分（鉄塔20～40基）は、同一の工学的性質を有すると仮定し、代表地点（2～4基）で実施される集中調査孔のデータを用いてN値と粘着力および内部摩擦角の相関関係を求め、この関係から各基礎位置のN値を介して行われている。

本研究で用いているA地点およびB地点の地質ゾーン区分について、集中調査孔のデータを用いてN値と粘着力および内部摩擦角の相関関係を求めたところ、次の関係を得た。

$$\ln C = 0.3296 \ln N - 1.6359 \quad (27)$$

$$\text{相関係数 } 0.55 \quad \text{標準誤差 } 0.61$$

$$\phi = 5.4992 \ln N + 6.9778 \quad (28)$$

$$\text{相関係数 } 0.70 \quad \text{標準誤差 } 7.22$$

ただし、データの個数は、粘着力30個、内部摩擦角31個を用いた。また、これらの回帰式は深さ方向いたるところで同一であるという仮定のもとで得られたものである。こ

の仮定は厳密には成立しないが、同一の工学的性質を有する地盤では実用上問題ないと考えられる。

これからわかるように、 $\ln N$ と $\ln C$ の間の相関係数が0.55となっており、ばらつきが大きくあまりよい線形関係が成立しているとはいえない。これに対して、 $\ln N$ と $\phi$ との間の相関係数は0.70でかなり相関が高く、両者の間には比較的よい線形関係が成立している。

なお、N値と粘着力および内部摩擦角の相関関係は、それぞれ実測値そのままの値と実測値の対数をとったものの4つの組合せパターンに対して求め、最も相関の高いパターンのもを用いた。

**c) 推定結果の一例**

まず、脚の標高差を無視した場合と考慮した場合で地盤物性値の推定値にどの程度の違いが生じるかについて検討する。A地点の脚Aを例にとって、標高差を無視した場合と考慮した場合のそれぞれに対して、粘着力Cを推定した結果をそれぞれ図-6および図-7に示す。これらの図において、ケース1～ケース4の推定値が示されているが、以下これらについて説明しながら脚の標高差を無視した場合と考慮した場合の推定値の違いについて検討する。

ケース1は、式(11a)の場合、つまりN値と粘着力の関係に誤差を含まない場合で、完全な相関関係が成立している場合である。従って、N値の標本値（実測値）が得られている深さ位置についてのみ粘着力を推定する場合は、クリッキングによる推定誤差が生じないことになる。図-6(b)および図-7(b)は、N値の標本値だけを与えてその標本値に対応する深さ位置における粘着力を推定したもので、クリッキングによる推定誤差が示されていない。2つの図からわかるように、標高差による推定値の違いはほとんどみられない。

ケース2は、式(11b)の場合、つまりN値と粘着力の関係式が誤差項 $\epsilon$ を含む場合である。ここでは、この誤差 $\epsilon$ を平均値がゼロで標準偏差は、式(27)に示す標準誤差を有する正規確率変数とした。ケース1の場合と同様、N値の標本値が得られている深さ位置における粘着力のみを推定する場合は、クリッキングによる推定誤差は生じないが誤差項 $\epsilon$ に関する誤差が生じる。図-6(c)および図-7(c)には推定値（実線）と推定誤差（破線）を示している。この推定誤差は深さ方向に大きくなっているが、標高差を考慮した場合の方が推定誤差が大きくなっている。これは、表-1に示すA地点の脚AのN値のトレンド成分 $m_{lnN}$ の傾きが0.2184で、図-4に示す4脚全部のトレンド成分の傾き0.1475に比べて大きな値となっていることによる。この結果より各脚の特性が反映できる標高差を考慮した場合の推定が望ましいことがわかる。また、同図には、比較のために粘着力の標本値（実測値）が6個合わせて示してある。N値のみから推定した粘着力Cは、

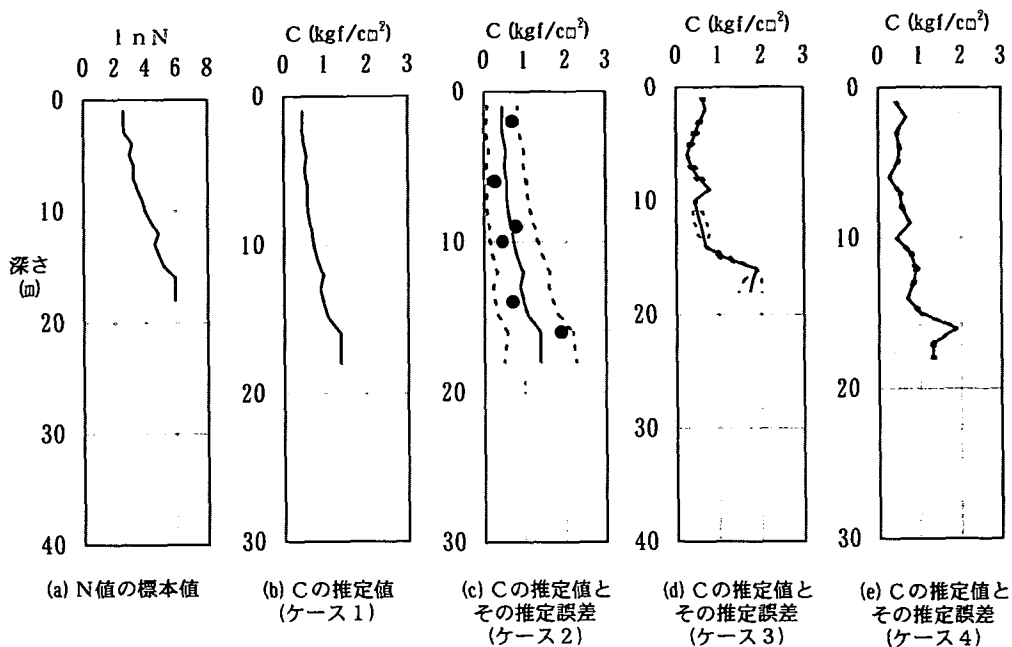


図-6 柱脚の標高差無視の場合のCの推定値の比較  
(A地点脚A:タイプⅢの空間モデル使用)

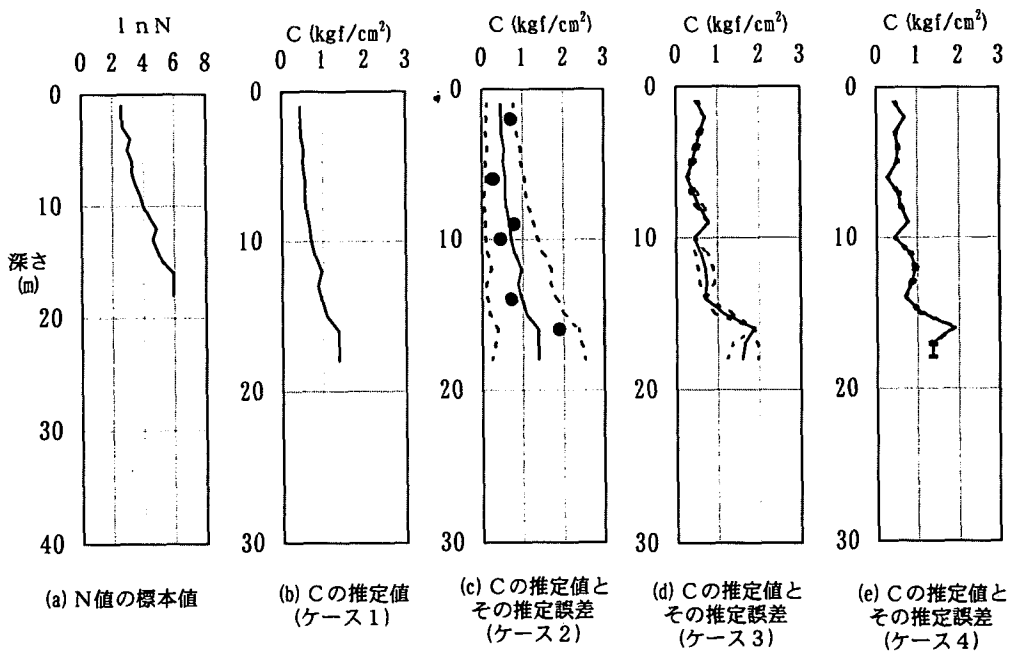


図-7 柱脚の標高差考慮の場合のCの推定値の比較  
(A地点脚A:タイプⅢの空間モデル使用)



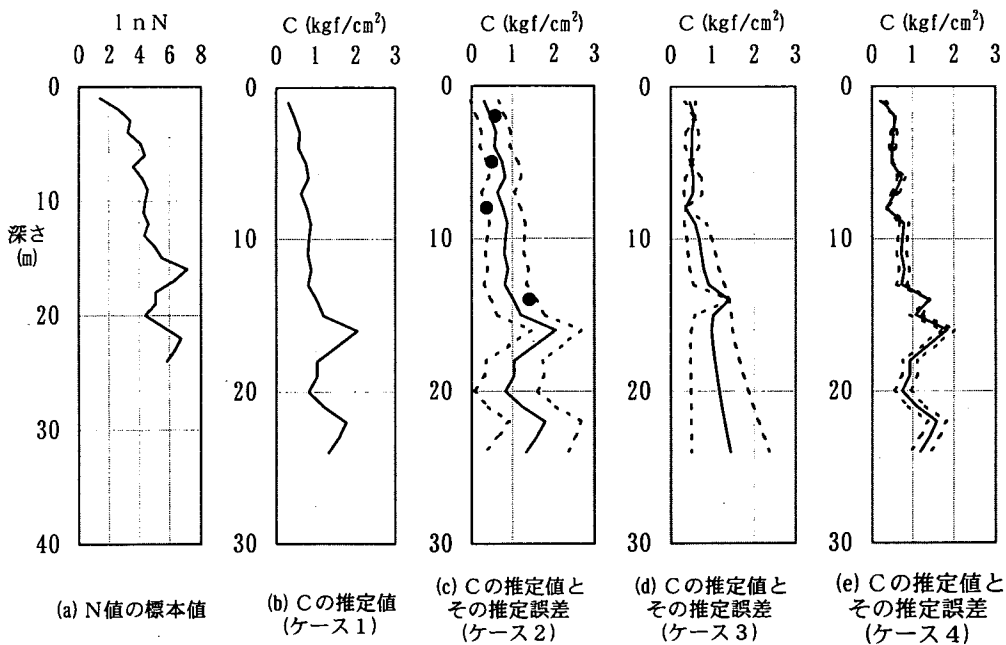


図-8 タイプⅢの空間モデルによるCの推定値の比較  
(B地点脚C:脚の標高差考慮)

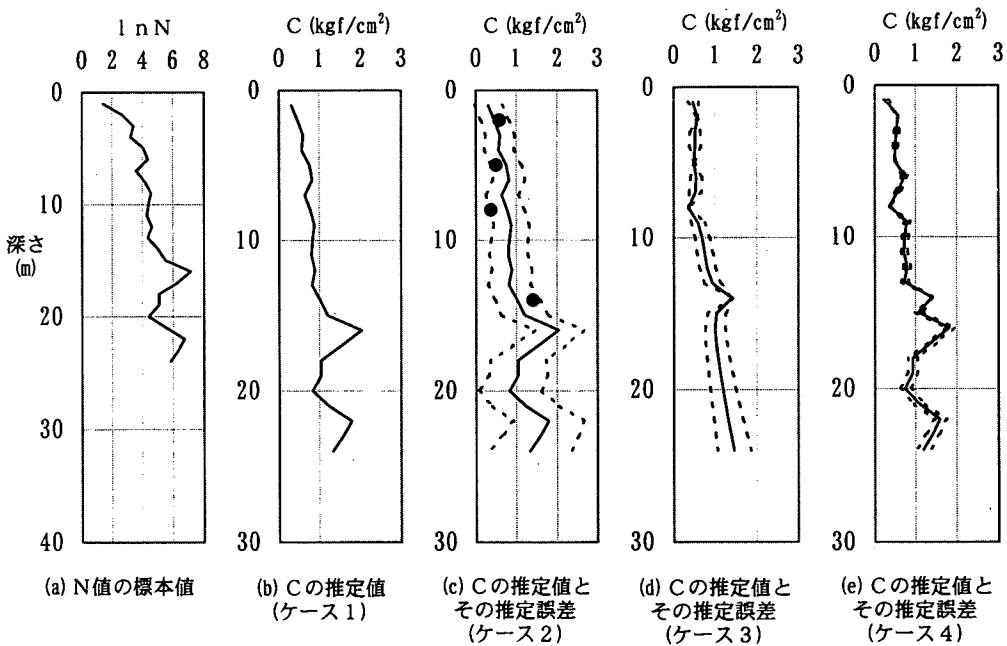


図-9 タイプⅡの空間モデルによるCの推定値の比較  
(B地点脚C:脚の標高差考慮)

cの標本値(実測値)をうまく推定できていることがわかる。この推定結果は、式(27)は $\ln c$ と $\ln N$ の相関係数が0.55という比較的相関係数が小さい場合、つまり標準誤差が大きき場合に得られたものである。相関係数がかつと大きく1.0に近い場合には、さらにより推定値が得られるものと考えられる。

ケース3は、N値を用いずに図-6(c)および図-7(c)に示した6個の粘着力の標本値のみを用いて標本値の得られていない深さ位置の粘着力をクリッキングにより推定した場合である。6個の標本値が存在する深さ位置のところでは誤差が生じず、その他の深さ位置では推定誤差が生じる。この誤差を破線で示す。粘着力cの標本値が6個もあればかなり誤差の小さい精度よい推定が可能になることがわかる。標高差を考慮した場合の方が若干推定誤差が大きい程度で、その差は小さいことがわかる。

ケース4は、N値と粘着力cの標本値の両方を用いて、cの標本値が得られていない位置でのcを推定したものである。N値とcの間の関係は、式(11b)を用いている。実線が推定値で、破線が推定誤差である。ケース3の場合と比較すると、推定誤差がさらに小さくなっていることがわかる。この場合標高差を考慮した場合と無視した場合の推定値にほとんど差は認められないことがわかる。

つぎに、N値の空間分布をモデル化する際に、図-1に示すタイプのどれを採用するかによって、推定値にどの程度の差がでるかについて検討する。図-5および表-1に示すB地点のN値の空間分布モデルは、いずれもタイプⅢのモデルを用いて行ったものである。しかし、図-5を見る限りタイプⅢよりもタイプⅡでモデル化の方がよりよいモデル化が行われることがわかる。以下、B地点の脚Aを例にとり、N値の空間分布モデルをタイプⅢおよびタイプⅡとした場合の粘着力cの推定結果を、それぞれ図-8および図-9に示す。これらの図におけるケース1~ケース4は、図-6および図-7に示す場合と同じである。

図-8(c)と図-9(c)、図-8(d)と図-9(d)ならびに図-8(e)と図-9(e)をそれぞれ比較すると明らかなように、タイプⅢによる空間分布モデルを用いた推定値の方がタイプⅡでモデル化した場合の推定値に比較して、推定誤差がかなり大きくなっていることがわかる。N値の空間分布のモデル化に際してどのタイプの空間分布モデルを用いるかということは非常に重要である。

また、図-8(c)、図-9(c)から、粘着力cの4つの標本値(実測値)は、いずれも推定誤差内に入っており、N値のみから精度よく推定できていることがわかる。さらに、ケース4のようにN値に加えて少ないながらも得られている粘着力の標本値の両方を用いれば非常に精度のよい推定が可能になるものと思われる。粘着力か内部摩擦角の標本値(実測値)が信頼できる精度で得られている場合、N値に加えてこれを用いて推定すれば、本研究で

示したクリッキングにより精度よい推定値が得られることが期待できる。

ここでは、粘着力のみの推定結果で、しかも1つの脚に対するものしか示さなかったが、実際の数値計算ではA地点およびB地点の全脚に対して、粘着力cと内部摩擦角 $\phi$ を深さ方向1m間隔で推定している。 $\phi$ については、N値との関係式が式(28)で与えられ、相関係数も0.7と比較的高く、粘着力cの推定誤差に比べるとかなり小さく、よい推定結果が得られている。

## (2) 引揚げ支持力の推定

上述の(1)で推定した深さ方向に1m間隔での粘着力cと内部摩擦角 $\phi$ の値とその誤差分散を用いて、4章で示した送電用鉄塔基礎の引揚げ支持力を推定する。A地点およびB地点の各脚ごとに深さ方向に1m間隔で得られている粘着力cと内部摩擦角 $\phi$ の推定値を平均値とし、また誤差分散を分散とするcと $\phi$ の正規確率変数を考える。計算の簡単化のために1m間隔で得られているcと $\phi$ は、それぞれ独立であると仮定している。モンテカルロ・シミュレーション法により、cと $\phi$ をシミュレートし、式(25)および(26)より引揚げ支持力を求めた。シミュレーション回数は1万回とした。

表-2~表-5にcと $\phi$ の推定値を式(25)および(26)の支持力式に代入して求めた値とモンテカルロ・シミュレーションにより評価した支持力の確率特性の両方を示す。

表-2および表-3は、それぞれ図-6および図-7に対応する結果である。脚Aについては、ケース1~ケース4まですべての場合について計算を行っているが、脚B、C、Dについては、粘着力cと内部摩擦角 $\phi$ の標本値(実測値)が得られていないのでケース2についてのみ計算を行っている。表-4および表-5は、それぞれ図-8および図-9に対応する結果である。今回の基礎では支持力の計算に15mまでのN値がいるが、脚Aについては、N値が11mの位置までしか標本値がないので、ここでは計算を行っていない。脚CおよびDについてはケース1~ケース4まですべての場合について計算を行っているが、脚Bについてはcと $\phi$ の標本値(実測値)が得られていないので、ケース2についてのみ計算を行っている。また、表中の現行設計値とあるのは、送電用鉄塔基礎の設計において現在用いられているN値によるcと $\phi$ の評価式を用いて計算した支持力<sup>4)</sup>の値である。

これらの表から、各ケースごとに支持力の推定値が異なっていることがわかる。また、シミュレーションの結果ケース2、ケース3、ケース4となるごとに標準偏差が小さくなっていることがわかる。これは、cと $\phi$ の推定誤差がケース2、ケース3、ケース4の順に小さくなることから明らかである。信頼できるcと $\phi$ の実測値が得られている場合は、クリッキングによりN値に加えてこれらを

表-2 脚の標高差無視の場合の支持力の推定値と確率特性

		(単位: t f)			
		推定値を支持力式に代入した値	シミュレーションの計算結果 平均値±標準偏差	現行設計値	
A 地 点	A脚	ケース1	2510.8		
		ケース2	2510.8	2600.3±319.9	0.123
		ケース3	2243.6	2252.1±53.6	0.024
		ケース4	2307.2	2309.8±17.2	0.007
	B脚	ケース1	2647.1		2308.0
		ケース2	2647.1	2739.1±322.3	0.118
		ケース3			
		ケース4			
	C脚	ケース1	2365.2		2160.5
		ケース2	2365.2	2451.5±316.0	0.129
		ケース3			
		ケース4			
D脚	ケース1	2174.6		1990.3	
	ケース2	2174.6	2255.0±307.0	0.136	
	ケース3				
	ケース4				

表-3 脚の標高差考慮の場合の支持力の推定値と確率特性

		(単位: t f)			
		推定値を支持力式に代入した値	シミュレーションの計算結果 平均値±標準偏差	現行設計値	
A 地 点	A脚	ケース1	2508.3		
		ケース2	2508.3	2600.7±339.9	0.131
		ケース3	2284.7	2295.2±67.7	0.029
		ケース4	2330.6	2333.6±20.5	0.009
	B脚	ケース1	2643.8		2308.0
		ケース2	2643.8	2740.9±354.0	0.129
		ケース3			
		ケース4			
	C脚	ケース1	2369.8		2160.5
		ケース2	2369.8	2454.3±308.2	0.126
		ケース3			
		ケース4			
D脚	ケース1	2178.3		1990.3	
	ケース2	2178.3	2254.6±283.5	0.126	
	ケース3				
	ケース4				

表-4 タイプⅢの空間分布モデルによる支持力の推定値と確率特性

		(単位: t f)			
		推定値を支持力式に代入した値	シミュレーションの計算結果 平均値±標準偏差	現行設計値	
B 地 点	B脚	ケース1	2448.3		
		ケース2	2448.3	2540.5±346.2	0.136
		ケース3			
		ケース4			
	C脚	ケース1	2709.0		2440.7
		ケース2	2709.0	2807.9±354.9	0.126
		ケース3	2769.0	2803.9±158.9	0.057
		ケース4	2835.9	2846.7±58.9	0.021
	D脚	ケース1	3370.2		3068.0
		ケース2	3370.2	3512.6±541.0	0.154
		ケース3	3502.3	3522.5±454.1	0.125
		ケース4	3549.7	3611.2±273.6	0.076

表-5 タイプⅡの空間分布モデルによる支持力の推定値と確率特性

		(単位: t f)			
		推定値を支持力式に代入した値	シミュレーションの計算結果 平均値±標準偏差	現行設計値	
B 地 点	B脚	ケース1	2451.0		
		ケース2	2451.0	2531.0±275.4	0.109
		ケース3			
		ケース4			
	C脚	ケース1	2707.6		2440.7
		ケース2	2707.6	2792.8±280.2	0.100
		ケース3	2789.2	2814.3±110.4	0.039
		ケース4	2840.2	2849.4±48.3	0.017
	D脚	ケース1	3360.0		3068.0
		ケース2	3360.0	3484.6±434.4	0.125
		ケース3	3549.0	3606.1±230.1	0.064
		ケース4	3577.4	3610.5±153.2	0.042

用いて推定すれば精度よい支持力の推定が期待できることがわかる。

表-2と表-3を比較すると、脚の標高差を無視する場合と考慮する場合の支持力の評価に違いがでることがわかる。ケース2について特に影響がでている。これは、図-6および図-7で指摘したようにcの推定誤差が標高差を考慮した場合にかなり大きくなることによる。また、

表-4と表-5を比較すると、N値の空間分布モデルとしてタイプⅢを用いるかタイプⅡを用いるかによって、支持力の評価に違いがでているのがわかる。タイプⅢを用いるとタイプⅡを用いる場合よりも支持力の標準偏差が大きくなっているのがわかる。先にも指摘したが、N値の空間分布のモデル化に際しては注意を要する。

また、現行設計では、表-2および表-3に示す現行設計値をさらに安全率3で除した値が実際の設計の場合の許容支持力値として用いられる。表-2の脚A(ケース2)についてみると、この許容支持力値は約770tfとなる。シミュレーション結果からこの許容支持力値を評価すると、この値は平均値2600tfから標準偏差340tfの5倍以上離れた小さな値となっている。支持力の許容値が少し過小評価になっているが、外力のばらつきを考えると妥当な値と考えられる。このように、クリッキングによる推定値とその推定誤差を用いて、モンテカルロ・シミュレーションを行うことにより、支持力の確率特性が評価でき、地盤物性値のばらつきや情報量に応じた合理的な評価値が設定できる。

## 6. あとがき

本研究では、ある1つの地盤物性値の空間分布から、同一地盤内の回帰関係を有する他の地盤物性値の空間分布を、コクリッキングにより推定した。また、その推定値を用いて送電用鉄塔基礎の引揚げ支持力を推定し、その確率特性についての評価を行った。さらに、その結果をもとに支持力の現行設計基準による値について考察した。これらの結果をまとめると以下ようになる。

(1) コクリッキング手法によりN値から粘着力および内部摩擦角の推定が精度よく行えることがわかった。しかし、推定に際しては、建設対象地点の脚の標高差を考慮すること、またN値の空間分布モデルは、その標本値の空間分布により近いタイプのモデルを用いて決定する必要があることが示された。さらに、データ数が多ければ多いほど、相関が高ければ高いほど誤差の少ない精度のよい推定が可能となることが示された。

(2) 数は少なくとも信頼できる精度のcとφの測定値があれば、それらをN値に加えてコクリッキングによる推定を行えば、支持力の推定誤差を小さくできることがわかった。

(3) コクリッキングによって求められた粘着力および内部摩擦角の推定値を用いて、送電用鉄塔の支持力の確率特性をシミュレーション手法により評価した。その結果、現行の設計基準で設定されている支持力の値は、シミュレーションの結果得られた支持力の分布からみると安全側に位置していることがわかった。しかし、外力のばらつきを考えると現行のcおよびφの推定式は、妥当な

ものと考えられる。

最後に、本研究を行うにあたって、数値計算および図表の作成に協力いただいた鳥取大学大学院生 堀 英治君 (現在 (株)シーアールホーム勤務) にお礼申し上げます。

#### 参考文献

- 1) Ripley, B.D. : *Spatial statistics*, John Wiley and Sons, 1981.
- 2) Journel, A. G. and Haldrup, Ch.J. : *Mining geostatistics*, Academic Press, 1978.
- 3) 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) Weeks White, W. : Soil variability: characterisation and modelling, *Probabilistic Methods in Geotechnical Engineering*, pp.111-120, 1993.
- 5) 松井謙二, 鈴木 誠: N値の空間分布のモデル化と杭支持力推定への適用, 土木学会論文集, No. 436/III-16, pp. 57-64, 1991-9.
- 6) 松井謙二, 前田良刀, 石井 清, 鈴木 誠: 空間的な変動を考慮したN値のデータ処理, 土と基礎, Vol. 38, No. 8, pp. 23-27, 1990.
- 7) 星谷勝: 条件付確率場のシミュレーション理論, 土木学会論文集, No. 459/ I -22, pp. 113-118, 1993-1.
- 8) 白木渡他: クリッキングを用いた道路橋杭基礎の設計に関する研究, 土木情報システム論文集 Vol. 3, pp. 71-78, 1994.
- 9) 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.
- 10) 本多眞, 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. 63-74, 1997.
- 11) 土質工学会 : 杭基礎の設計法とその解説, 1985.
- 12) 高岡宜善 : 工学のための応用不規則関数論, 共立出版, 1975.
- 13) 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.
- 14) 東京電力株式会社: UHV基礎設計要項 (案) , 1988.

(1996. 7. 25受付)

## ESTIMATION OF BEARING CAPACITY OF FOUNDATION OF TRANSMISSION TOWER USING COKRIGING WITH REGRESSION RELATION

Wataru SHIRAKI, Mitsuyoshi TSUNEKUNI, Manabu MATSUSHIMA  
and Noboru YASUDA

This paper presents a procedure which estimates a less-sampled variable such as the internal friction angle or the cohesion with acceptable precision using a better-sampled variable such as N-value. Incorporating the regression relationship between a better-sampled variable and a less-sampled variable into the cokriging method, the cross-covariance function is easily determined, then the better estimation of the less-sampled variable is obtained.

In a numerical example, the bearing capacities of four foundations supported a transmission tower are calculated using the internal friction angle and cohesion estimated by this proposed procedure. The calculation results are compared with those of calculated according to the current specifications.