

# N値の空間分布のモデル化と杭支持力推定への適用

松井謙二\*・前田良刀\*\*・石井 清\*\*\*  
・鈴木 誠\*\*\*\*

地盤物性値 ( $N$  値) の評価は、摩擦杭の支持力推定に大きな影響を及ぼす。高架橋基礎においては、経済的制約から全ての橋脚位置で地盤調査を行うことは難しいことが多い。本論文は  $N$  値を、空間分布を考慮した確率変数として取扱い、杭支持力を確率論的に推定する手法を提案したものである。事例研究により、本手法は杭の支持力推定に十分実用的な結果が得られることを明らかにした。

**Keywords :** bearing capacity, soil properties, pile foundation, spatial variation, probability theory, safety

## 1. はじめに

摩擦杭の鉛直支持力は周面摩擦力に大きく依存するところから、土層構成およびその地盤物性値(ここでは  $N$  値を対象とする)の把握がとりわけ重要である。しかし、高架橋のような線形的・面的に広がりをもつ構造物の場合、すべての基礎の位置で土質調査・試験が行われることは稀である。そこで、限られたボーリング調査から土層の分布や地盤物性値を推定する必要があるが、地盤物性値は本来空間的なばらつきを有しているものであるから、これを確定値として定めることは難しい。従来の設計法では、安全側になるように設計値を設定し、さらに安全率で安全性の余裕を見ているが、この方法では安全性の余裕が定量的でないため経済的な設計が難しいとの指摘もある<sup>1)</sup>。そこで、確率論に基づき安全性を定量的に評価しようとする信頼性設計法が用いられるようになってきた<sup>2)</sup>。杭の設計に関しては、引き抜きに対する安全性評価を確率論的に扱った文献もある<sup>3)</sup>。

本研究では、地盤物性値の試験誤差や統計的性質の推定誤差などの不確定性のうち、同一土層内においても場所によって異なる空間的なばらつきである不確定性を確率論に基づき取り扱うものとする。本文では、2章において地盤物性値の推定に関する基礎的な定式化について整理し、3章～5章において九州横断道小郡地区<sup>4)</sup>の地盤を対象として2章で述べる手法の適用を試みる。ここで得られる各橋脚の支持力は推定値とともに、推定誤差も定量的に評価できるところから、近い将来導入が予定されている基礎の限界状態設計法に対応できる可能性が

ある。

## 2. 地盤物性値の空間分布のモデル化

### (1) 空間分布の確率モデル

設計あるいは解析に用いる地盤物性値は、土質調査・試験から設定されるが、経済性を考えると調査数量に自ずと制約があることから、対象となる工区全体の地盤物性値は限られた土質データをもとに設定することになる。そのため地盤物性値の設定には、試験誤差なども含めて種々の不確定性を考慮しなければならない。特に、地盤物性値の空間分布は、土質調査・試験の技術が進歩しても完全には確定できないものであることから、本研究ではこの取扱いに限定して話を進める。

地盤物性値の空間分布は、統計的性質として平均値や分散などのほかに、2地点間の相関特性を用いた確率場の概念で表現できる<sup>5)</sup>。しかし、確率場の概念は母集団を想定したものであって、サイトが特定された場合には確率場の1つの実現事象である標本場が存在していることになる。むろん、標本場を正確に求めることは不可能なので、調査が行われた点以外は推定する必要がある。すなわち、地盤物性値(例えば  $N$  値)が得られていない橋脚の基礎杭の支持力を推定するためには、その土層の  $N$  値の統計的性質と両サイドのボーリング調査データを用いて当該地点の  $N$  値分布を推定しなければならない。また、その橋脚地点で調査が行われていたとしても、一般的に  $N$  値は1mピッチにしか測定されない。その1mピッチの間の  $N$  値が測定された  $N$  値に近似しているという保証はなく、深さ方向にもまた  $N$  値の推定が必要となる。しかし、推定には当然誤差が含まれるところから、この推定誤差を、地盤物性値(ここでは、支持力推定に一般的に用いられる  $N$  値を対象とする)の空間分布の不確定性として取り扱うものである<sup>6)</sup>。

\* 正会員 (株)建設技術研究所福岡支社技術第2部 次長  
(〒810 福岡市中央区渡辺通り 2-1-10 十八福岡ビル)

\*\* 正会員 日本道路公団東京第一建設局構造技術課 課長代理

\*\*\* 正会員 工博 清水建設(株)大崎研究室 主任研究員

\*\*\*\* 正会員 工博 清水建設(株)大崎研究室

(2) 空間分布の統計的性質

地盤統計学 (Geostatistics) は、確率場の統計的性質を推定し、標本点の値とその幾何学的な配置により、ある点の推定値を求めようとするものである。クリッキング (kriging) は、標本点での値に推定点までの距離から求められる重み関数を乗じて推定量を求めようとする手法である<sup>7)</sup>。一般的には、推定量を標本値の線形和で求め、そのときの重み関数を推定量の不偏性と推定誤差を最小にするように決めることから、BLUE (Best Linear Unbiased Estimator) と呼ばれている。この手法は、鉱山工学で提案され、水文工学や農業分野で用いられている<sup>8)</sup>。また最近では、地盤工学でも用いられるようになってきた<sup>9)</sup>。

さて、確率場の統計的性質のうち、平均値や分散は比較的簡単に求めることができるが、2 地点間の相関特性を表す自己共分散関数を推定することは標本数の制約から難しいことが多い。そこで、いくつかの関数形を仮定して、そのパラメータを推定することが一般的に行われている。自己共分散関数  $C(\Delta x)$  は次のようになる。

$$C(\Delta x) = E[Z(x + \Delta x)Z(x)] - E[Z(x)]^2 \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 $x$  は位置座標、 $\Delta x$  は 2 地点間の距離、 $Z(\cdot)$  は地盤物性値の確率変数を表し、 $E[\cdot]$  は期待値を表す。最終的には推定点と標本点、さらに標本点間の共分散マトリックスが作成できれば、地盤物性値の空間分布を推定できる。

(3) 標本からの空間分布推定<sup>7)</sup>

クリッキングの概要を以下に示す。推定量  $\hat{Z}(x)$  を  $N$  個の標本点  $x_i (i=1, 2, \dots, N)$  から得られたデータ  $z(x_i)$  の線形和で表現できるとすると、次式のようになる。

$$\hat{Z}(x) = \sum_{i=1}^N \lambda_i z(x_i) \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 $\lambda_i$  は  $i$  番目のデータに与えられる重みであり、以下に示す 2 つの条件からラグランジュ未定係数法を用いて定められる。

推定量の不偏性：

$$E[Z(x) - \hat{Z}(x)] = 0 \dots \dots \dots (3)$$

最小推定誤差分散：

$$\sigma E^2 = \min E\{[Z(x) - \hat{Z}(x)]^2\} \dots \dots \dots (4)$$

杭の先端支持力を算定するための  $N$  値などは、ある点 (杭先端位置) の値の推定であることから、上記のクリッキングを適用できる。また、各土層での杭の周面摩擦力を算定するためには、深さ方向の平均的な  $N$  値を推定する必要がある。このような場合、領域内での局所平均の考え方を取入れたブロック・クリッキング (block kriging) を用いることができる<sup>10)</sup>。ブロック・グリッキングは、ある大きさをもち領域の局所平均的な推定量

であり、式 (2) の重み係数  $\lambda_i$  を求めるための標本点と推定点との共分散マトリックスを算定するとき局所平均を用いる。

(4) 局所平均

ある土層の杭の周辺の平均的な  $N$  値は、その層厚に従って見かけ上の分散が小さくなる。これを 1 次元で説明すると、次のようになる<sup>9)</sup>。いま、位置  $u$  の値を  $X(u)$  と表現し、これが 1 次元の定常確率過程に従うものとする。要素の長さを  $U$  とすると、その移動平均過程  $X_U(u)$  は次のように表すことができる。

$$X_U(u) = \frac{1}{U} \int_{u-U/2}^{u+U/2} X(u) du \dots \dots \dots (5)$$

また、任意の点  $u_1$  と  $u_2$  の間の相関係数を  $\rho(u_1 - u_2)$  で表現し、 $X(u)$  の分散を  $\sigma^2$  とすると、 $X_U(u)$  の分散は次のようになる。

$$\text{Var}[X_U(u)] = \frac{2\sigma^2}{U} \int_0^U \left(1 - \frac{u}{U}\right) \rho(u) du \dots \dots \dots (6)$$

式 (6) で示すように、 $X_U(u)$  の分散は  $\rho(u)$  と  $U$  の関係で  $\sigma^2$  よりも小さくなるものである。

杭の周面摩擦力を推定するためには、前記のように周面各土層の平均  $N$  値が必要であることから、長さを考慮した共分散マトリックスの計算を行う。

3. N 値の統計的性質の把握

九州横断道小郡地区は、鳥栖 IC から筑後小郡 IC の間に位置する。高架橋は、下部工が 2 柱式橋脚、基礎工が杭径 1.0 m の場所打ち杭からなる多径間連続 RC 中空床版橋である。基礎の設計では杭基礎の支持層の選定が最大のテーマであり、地盤条件から最終的に杭長 15 m の摩擦杭形式が採用されている。さらに高架延長が長いことから、ボーリング調査を通常より高密度に行っている<sup>4)</sup>。

当該地域は標高 18 m 前後の筑後平野部に属し、秋光川低地に挟まれた洪積層は、粘土、砂、砂礫および火山灰 (凝灰質砂質土層、以下 Dt 層と呼ぶ) からなる。図-1<sup>11)</sup>からわかるように、Dt 層は層厚 10 m 前後で、高架橋付近の連続性は非常に良好である。この層を挟んで上部および下部に砂質土層 (上部 Ds 層、下部 Ds 層) と粘性土層 (上部 Dc 層、下部 Dc 層) が分布し、地盤物性値は統計的に均質と見なしうる地盤である。

杭先端は Dt 層または下部 Ds 層の  $N$  値が 30 前後と相対的に大きい部分に根入れされているが、層厚・強度ともいわゆる良質な支持層 ( $N$  値 30 以上) には該当しない。ボーリングは図-1 に示すとおり、概ね均等に実施されており、最終的に 29 m に 1 本の割合でボーリングが行われている。

これらの土層の地盤物性値のうち、 $N$  値の基本的な統計的性質を検討した結果を、表-1 に示す。また、空

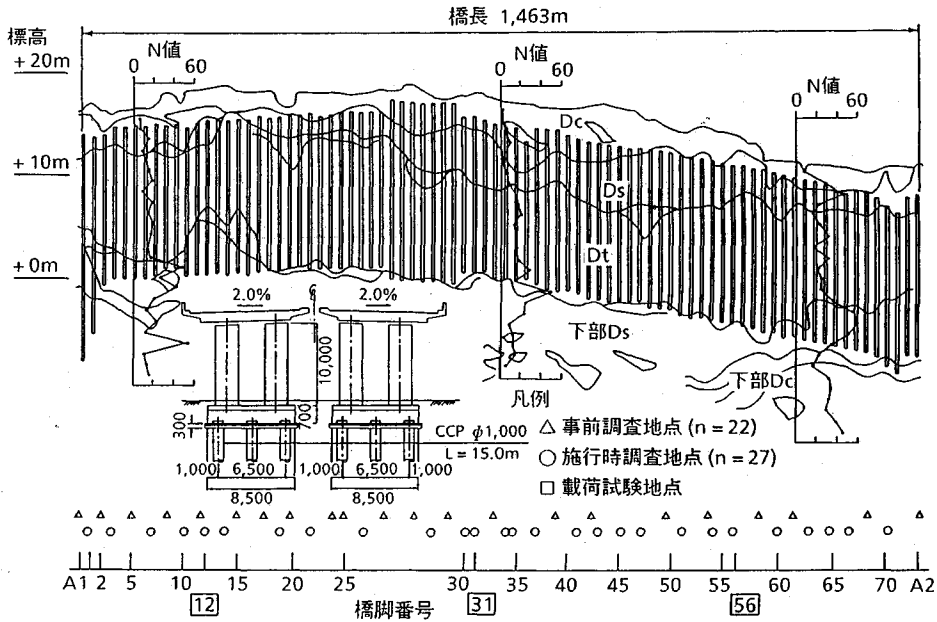


図-1 地質縦断面図

表-1 N値の統計的性質

土層区分	全ボーリング調査 (事前と施工時)			
	データ数	平均 N	標準偏差 s	変動係数 C.O.V.
上部Dc	84 (35)	2.1 (4.3)	2.8 (3.0)	0.597 (0.696)
上部Ds	159 (66)	11.0 (12.5)	8.6 (11.4)	0.785 (0.914)
Dt	460 (214)	22.0 (24.8)	9.7 (11.8)	0.441 (0.478)
下部Ds	380 (167)	30.0 (33.6)	15.3 (15.8)	0.510 (0.471)
下部Dc	115 (57)	14.5 (14.7)	6.8 (8.3)	0.470 (0.565)

( )内の値は事前調査

間的な相関特性を表現する関数はいろいろ提案されているが、ここでは自己相関関数を用いることにする。また、自己相関関数は水平方向と鉛直方向の2成分に分解できると仮定し、次式で表現する<sup>5)</sup>。

$$p = \exp \left[ - \left\{ \left( \frac{\Delta x}{a} \right)^2 + \left( \frac{\Delta z}{b} \right)^2 \right\} \right] \dots\dots\dots (7)$$

式中の  $\Delta x, \Delta z$  は水平・鉛直方向の距離を示す。また、パラメータ  $a, b$  は相関係数が  $e^{-1} = 0.368$  となる距離を表している。ここでは  $a = 73 \text{ m}$ ,  $b = 4 \text{ m}$  とした。このパラメータはデータ数が比較的多い Dt 層 (図-2 参照) から推定したものである。図-1 からわかるように杭の支持力に支配的な土層は N 層や層厚から Dt 層および下部 Ds 層であるが、両層の N 値の相関特性にはあまり

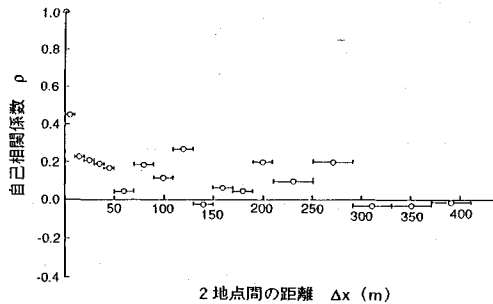


図-2 (a) 水平方向の自己相関関数 (Dt 層)

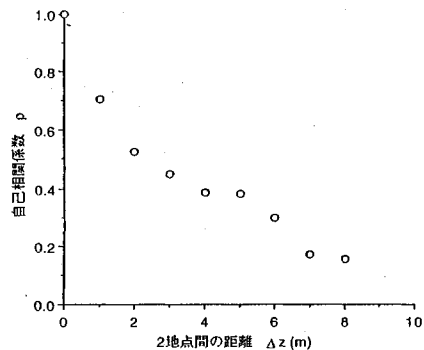


図-2 (b) 鉛直方向の自己相関関数 (Dt 層)

差がないこと (図-3参照), またデータ数の不足からその他の土層のパラメータ  $a, b$  を推定することには無理があることより, Dt 層以外の土層についてもこの値を適用したものである。この値の変動による杭の支持力推定に及ぼす影響は小さいことがわかっている。

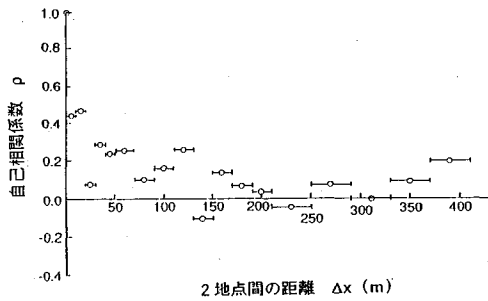


図-3 (a) 水平方向の自己相関関数 (下部 Ds 層)

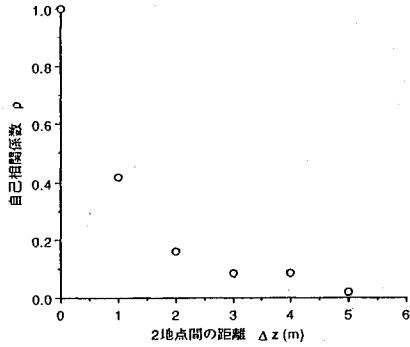


図-3 (b) 鉛直方向の自己相関関数 (下部 Ds 層)

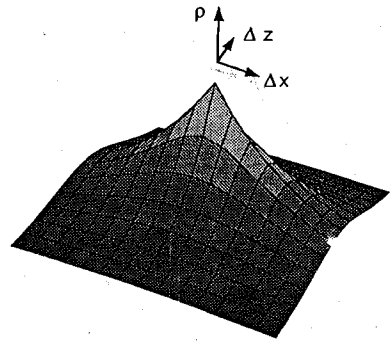


図-4 自己相関関数

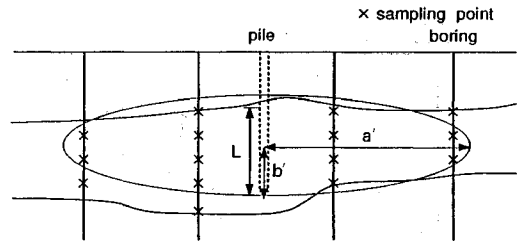


図-5 クリッジングの適用範囲

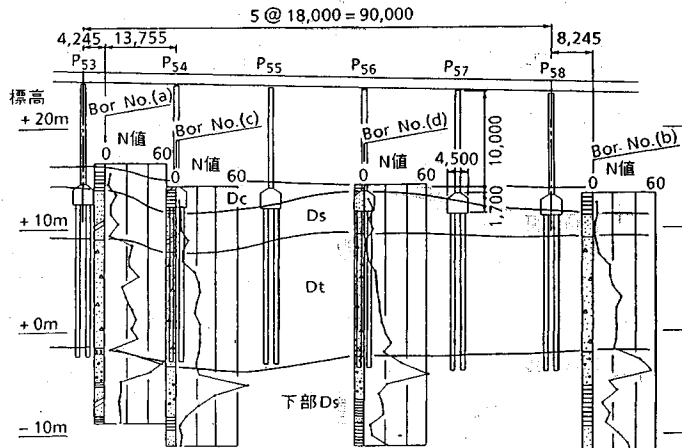


図-6 解析対象の橋脚

自己相関関数は図-4 に示すように、水平方向  $\Delta x$  に相関性が強く、鉛直方向  $\Delta z$  に相関性が弱いことがわかる。

#### 4. 杭設計のための局所平均 N 値の推定

各土層の N 値の統計的性質とデータ自身を用いて、摩擦杭を設計するために必要な局所平均 N 値の推定値と推定誤差を計算する。ボーリング調査は水平方向に広がっていることから、すべてのデータをクリッジングに用いることは計算を行う上で効率的ではない。そこで、

図-5 に示す概念図のように、求めたい場所から楕円の領域を考えてデータを選択する<sup>12)</sup>。ここで、 $L$  は杭の支持力算定の対象となる土層の長さである。また、クリッジングに用いる範囲である  $a', b'$  は推定点を内挿できるように標本点を選択し、数が多くなると相関係数が小さいところは無視できることを考慮して、本研究では自己相関関数のパラメータ  $a, b$  の約 3 倍を用いた。この場合、相関係数が約  $e^{-3}$  ( $=0.05$ ) 以下の標本を無視することになるが、20~30 個のデータを用いればよいといわれているため<sup>13)</sup>、この範囲にすれば標本点数は問題と

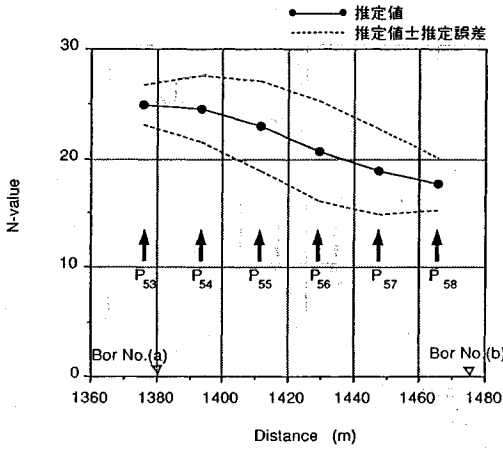


図-7 Dt層の局所平均N値の推定値と推定誤差 (事前調査段階)

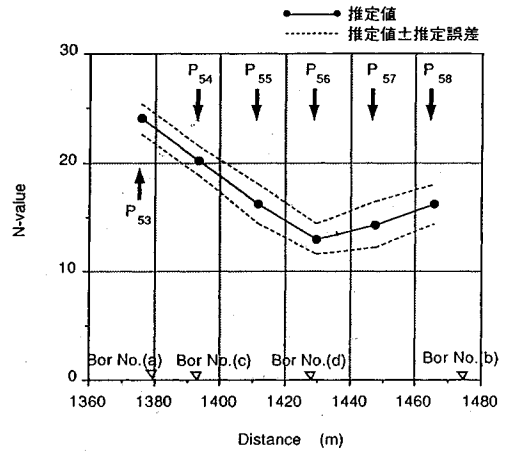


図-8 Dt層の局所平均N値の推定値と推定誤差 (施工時段階)

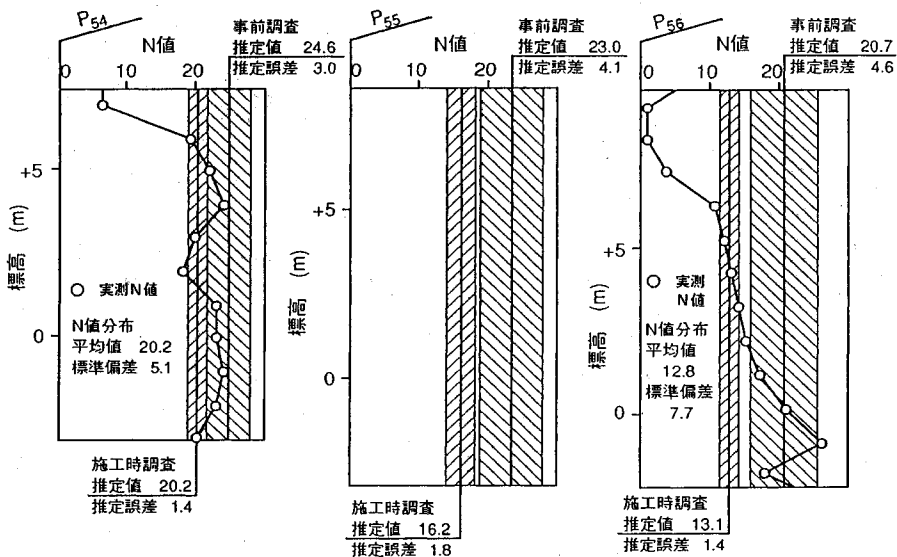


図-9 N値と推定誤差

はならない。

ここでは、一例として図-6に示す橋脚P<sub>53</sub>~P<sub>58</sub>の基礎杭の設計のためのDt層を取り上げる。ボーリング調査は事前調査段階でNo.(a)とNo.(b)があり、施工時段階でNo.(c)とNo.(d)が追加された。そのため、事前調査段階では事前調査のデータを用い、施工時段階ではすべてのデータを用いた。また、施工時段階においても、橋脚P<sub>55</sub>, P<sub>57</sub>の位置ではボーリング調査が行われていないため、局所平均N値の推定に図-7や図-8に示すように比較的大きな誤差が含まれることになる。

基礎杭の設計に必要な局所平均N値は、事前調査段階で図-7に示すような推定値と推定誤差となり、施工時段階で図-8に示すような推定値と推定誤差となっ

た。図中の実線は推定値を、破線は推定値±推定誤差を表している。ボーリングNo.(a)と(b)(両者の離れ、94m)の間に施工時調査としてNo.(c)(P<sub>54</sub>地点)とNo.(d)(P<sub>56</sub>地点)の2つのボーリング調査が追加された効果により、事前調査段階に比べ施工時段階でのN値の推定誤差が著しく減少していることがわかる。

この追加ボーリングの効果をもP<sub>54</sub>~P<sub>56</sub>のDt層に着目して図-9より考察する。P<sub>54</sub>~P<sub>56</sub>はいずれも事前調査はなされていない。P<sub>54</sub>はNo.(a)から14mの離れがあり、P<sub>56</sub>はNo.(a)と(b)のほぼ中央に位置する。したがって事前調査段階においてはP<sub>54</sub>からP<sub>56</sub>にかけて局所平均N値の推定誤差は次第に大きくなっている。一方、推定値の大きさはNo.(a)がN=24.9、No.

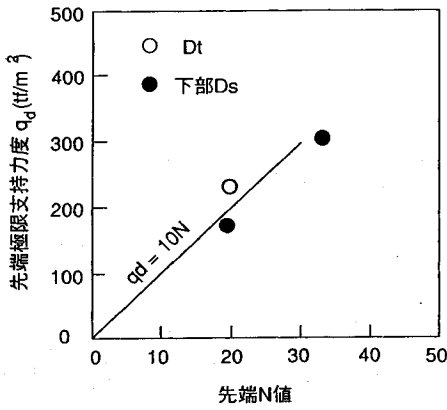


図-10 β 値

(b) が 17.7 であるため P<sub>54</sub> から P<sub>56</sub> にかけて徐々に小さくなっていることがわかる。

施工時段階において、前記のように P<sub>54</sub> 地点に No. (c), P<sub>56</sub> 地点に No. (d) のボーリング調査が追加された。No. (c) と (d) の深さ方向の N 値分布は図-9 に示した通りである。ジャストポイント (P<sub>54</sub>, P<sub>56</sub>) における N 値分布と本手法による局所平均 N 値を比較すると、平均値 (推定値に同じ) はほぼ一致し、ばらつきを表す推定誤差 (標準偏差に同じ) は後者が著しく減少している。この理由は 2. (4) に述べた。また、P<sub>55</sub> 推定値は当然 P<sub>54</sub> と P<sub>56</sub> の間にあり、推定誤差も多少両地点より増えている。しかし、事前調査段階に比べて近傍にボーリング調査が実施されているため、施工時段階の推定誤差は著しく減少している。

### 5. 杭の極限支持力の推定

前章で局所平均 N 値の推定されることを示したことから、本章ではこの結果を利用して杭の極限支持力の推定が行えることを示す。道路橋示方書<sup>14)</sup>の規定では、摩擦杭の先端支持力は原則として無視するが、ここでは載荷試験結果<sup>9)</sup>を考慮して極限支持力は次式により算定する。また、確率論的な取り扱いを行う必要から、先端極限支持力 q<sub>d</sub> および周面摩擦力 f の上限値は考慮しないものとする。なお、杭は杭径 1.0 m、長さ 15 m の場所打ち杭である。

$$R_u = q_d A + U \sum_{i=1}^n l_i f_i \dots \dots \dots (8)$$

q<sub>d</sub>: 先端極限支持力度 (tf/m<sup>2</sup>)

$$q_d = \beta \cdot N \dots \dots \dots (9)$$

ここで、杭先端の β 値 (= q<sub>d</sub>/N, N: 杭先端位置の N 値) は図-10 に示すように載荷試験からの逆算値として、β=10 の確定値として取り扱う。

A: 杭の先端面積 (0.785 m<sup>2</sup>)

U: 杭の周長 (3.142 m)

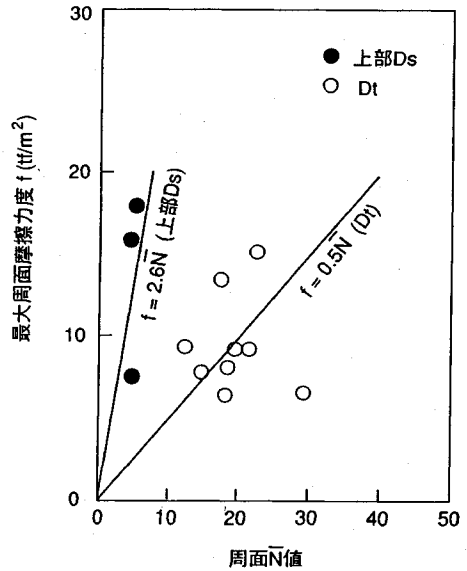


図-11 α 値

l<sub>i</sub>: 周面摩擦力を考慮する層厚

f<sub>i</sub>: 最大周面摩擦力度 (tf/m<sup>2</sup>)

$$f = \alpha \cdot \bar{N} \dots \dots \dots (10)$$

ここで、α 値は以下に示す確定値として扱う。すなわち、上部 Ds 層と Dt 層に関しては図-11 に示すように載荷試験からの逆算値とする。また、上部 Dc 層 (粘性土) と下部 Ds 層 (砂質土) については試験結果が得られていないので、道路橋示方書の式によった。

上部 Dc 層: 1.0      上部 Ds 層: 2.6

Dt 層: 0.5      下部 Ds 層: 0.5

各土層間の相関性がないとすると、この式から極限支持力の推定値  $\bar{R}_u$  と推定誤差分散  $\sigma_k^2$  は次式で求めることができる。

$$\bar{R}_u = \bar{q}_d A + U \sum_{i=1}^n l_i \bar{f}_i \dots \dots \dots (11)$$

$$\sigma_k^2 = \sigma_q^2 A^2 + U^2 \sum_{i=1}^n l_i^2 \sigma_f^2 \dots \dots \dots (12)$$

σ<sub>q</sub>: 先端支持力の推定誤差

σ<sub>f</sub>: 周面摩擦力の推定誤差

事前調査段階での極限支持力の推定値と推定誤差の結果を図-12 に示す。全体的にかなり大きな値になっているのは、N 値のばらつきから極限支持力のばらつきを検討するとき、上限値があると確率論的な取り扱いが困難になるため、先端支持力度や周面摩擦力度を N 値から推定するときには上限値を用いていないことによる影響である。そこで、支持力の許容値を議論するときに考慮する極限支持力の分布は、上限値を考慮して確定的に計算された極限支持力よりも小さくなることを扱う必要がある。

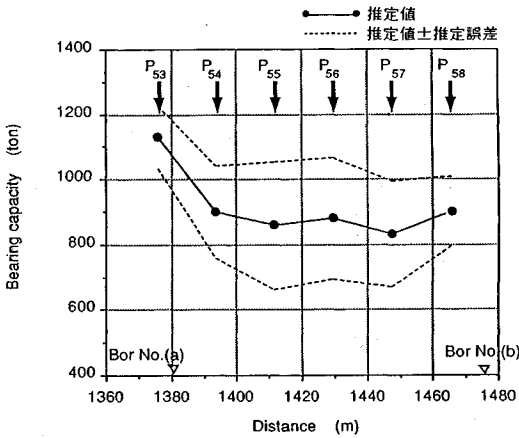


図-12 極限支持力の推定値と推定誤差 (事前調査段階)

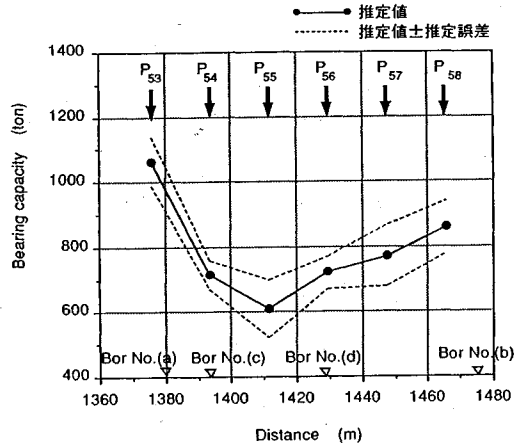


図-13 極限支持力の推定値と推定誤差 (施工時段階)

図-12からボーリング調査地点の近傍であるP<sub>53</sub>やP<sub>58</sub>の推定誤差は約100 tonくらいあるのに対し、その他の地点ではP<sub>53</sub>やP<sub>58</sub>から遠ざかるに従って約150 tonから約200 tonまで大きくなっていることがわかる。これは、図-7に示す推定誤差の影響であり、ボーリング調査地点から離れるに従って大きくなる傾向を示すものである。

施工時段階での極限支持力の推定値と推定誤差の結果を図-13に示す。橋脚P<sub>53</sub>とP<sub>58</sub>の支持力は相対的に低いN値のNo. (c)と(d)の影響から事前調査段階に比べて多少小さくなっている。P<sub>55</sub>の支持力は約600 tonと最も小さい値となった。これは、杭先端がDt層に根入れされていると仮定したため、下部Ds層に根入れされている基礎に比べて先端支持力が小さいものと考えられる。さらに、図-8に示すように、周面摩擦力に支配的なDt層の局所平均N値の推定値が小さいことも影響している。ボーリング調査の行われているP<sub>54</sub>とP<sub>56</sub>では、鉛直方向に局所平均N値を推定することから、推定誤差は小さいがゼロではないことがわかる。むしろ、ボーリング調査の行われていないP<sub>55</sub>とP<sub>57</sub>などの推定誤差はP<sub>54</sub>とP<sub>56</sub>の推定誤差に比べて当然に大きくなる。しかしながら、N値の変動係数が44%~79%もある地盤でも、杭の極限支持力としてみた場合、推定誤差は大きいものでも100 ton以下となり、変動係数になると10%~15%程度と小さくなった。

図-12と図-13を比較すると、追加ボーリング調査を行ったことによって、各基礎の極限支持力の推定誤差をかなり小さくすることができ、設計支持力を設定するときに有効な情報が得られることがわかった。現行の許容応力度設計法(安全率設計法)では不確定性には安全率で対処しており、推定誤差の大きさを設計に考慮することはできないが、各機関<sup>15)</sup>で鋭意研究中の限界状態設計法ではこの推定誤差を支持力に関する部分安全係数に

反映させることができる。例えば、少ないボーリング調査で大きい推定誤差のもとで設計支持力を小さく設定するか、または調査をより密に行い、推定誤差を小さくして設計支持力を大きく設定するかという選択に用いることができる。すなわち、ボーリング調査にコストをかけ、支持力から決まる杭本数を少なくする方がよいのか、その逆とすべきか、経済性の観点からの比較検討を定量的に評価することが可能となる。

このように、今回対象とした事例では、N値の空間分布を確率論で扱う本手法は、支持力の推定に十分実用的な結果が得られることがわかった。

## 6. まとめと今後の課題

従来の設計ではボーリング調査がなされていない橋脚基礎の支持力は、その前後の調査地点の支持力から工学的判断により推定せざるを得ない。しかし、N値の空間分布特性を確率論で扱う方法を導入することによって、ボーリング調査の有無を問わず、支持力の推定値と推定誤差を定量的に算定することができた。本手法はN値のばらつきを合理的に評価でき、杭の支持力を精度よく推定できる手法と考える。

杭の支持力推定において、支持力式のもつ不確定性を無視することはできない。本研究では式(9)、(10)の係数 $\alpha, \beta$ は便宜的に確定値としたが、本来は確率変数として取り扱うべきものである。今後は、確率変数としての $\alpha, \beta$ を考慮した杭の極限支持力の評価法の検討を進めたい。さらに、作用荷重の影響を考慮すると、安全性指標が得られるところから確率論的に安全性の照査ができ、かつ限界状態設計法対応の部分安全係数を設定することも可能となる。

謝辞：本研究を行うにあたり、九州大学工学部・落合英俊教授より貴重なご助言を得ている。ここに記して、

謝意を表する次第です。

参 考 文 献

- 1) Ang, A.H.-S. and Tang, W.H. : Probability Concepts in Engineering Planning and Design, Vol.I-Basic principles, John Wiley & Sons, 1975.
- 2) 星谷 勝・石井 清 : 構造物の信頼性設計法, 鹿島出版会, 1986.
- 3) Ronold, K.O. : Random Field Modeling of Foundation Failure Modes, Journal of Geotechnical Engineering, Vol.116, No.4, pp.554~570. 1990.
- 4) 前田良刀・遠藤元一・松井謙二 : 場所打ち杭の支持力に関する信頼性評価, 橋梁と基礎, Vol.20, No.5, pp.8~16, 1986.
- 5) Vanmarcke, E.H. : Probabilistic Modeling of Soil Profiles, Journal of the Geotech, Eng. Div. ASCE, Vol.103, No.GT 11, pp.1227~1246, 1977.
- 6) 鈴木 誠・石井 清 : 土質定数の空間分布推定法を用いた確率有限要素法, 土木学会論文集, 第394号/Ⅲ-9, pp.97~104, 1988.
- 7) Journel, A.G. and Huijbregts, Ch. J. : Mining Geostatistics, Academic Press, 1978.
- 8) Virdee, T.S. and Kotlegoda, N.T. : A Brief Review of Kriging and Its Application to Optimal Interpolation and Observation Well Selection, Hydrological Sciences, Vol.29, pp.367~387, 1984.
- 9) 上田貴夫・本城勇介・波多野敬・坂口修司 : 造成工事における残留沈下量の平面的予測および誤差, 土と基礎, Vol.34, No.6, pp.51~58, 1986.
- 10) Burgess, T.M. and Webster, R. : Optimal Interpolation and Isarithmic Mapping of Soil Properties, 2, Block Kriging, Vol.31, pp.333~341, 1980.
- 11) 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.
- 12) Kafritsas, J. and Bras R.L. : The Practice of Kriging, Ralph M. Persons Laboratory, Department of Civil Engineering Massachusetts Institute of Technology, Report No.263, 1981.
- 13) Delhomme, J.P. : Kriging in Hydrosociences, Advan. Water Resour., No.1, pp.251~266, 1978.
- 14) 道路橋示方書・同解説, IV 下部構造編, 1990.
- 15) 例えば, (財)国土開発技術研究センター : 道路橋下部構造の限界状態設計法に関する調査研究. (1990.7.23 受付)

PROBABILISTIC ESTIMATION OF SPATIALLY DISTRIBUTED N-VALUES AND ITS APPLICATION TO PILE DESIGN

Kenji MATSUI, Yoshito MAEDA, Kiyoshi ISII and Makoto SUZUKI

It is very important that the soil properties of the ground where the friction piles may be placed are sufficiently affect the bearing capacities of the piles. However, for the case of the widely expanding structures such as the piers of the viaduct, it is not practical from the economical reason that the soil explorations are implemented in every points. Using the limited information based upon the soil exploration, conventional method may not accurately clarify the soil properties due to their large uncertainties. This paper proposes the probabilistic method to deal with the N-value as the random variable accounting for its spatial variation and estimates the bearing capacities for the pile foundations of the Ogori viaduct in the Kyushu expressway.