

I-10 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

DESIGN OF PILE FOUNDATIONS OF HIGHWAY BRIDGE USING KRIGING TECHNIQUE

白木 渡¹ 松保重之¹ 米村廣之² 伊藤則夫³
 Wataru Shiraki Shigeyuki Matsuho Hiroyuki Yonemura Norio Itoh
 今田賢三⁴ 長谷川幸彦⁵ 安宅和美³ 西谷高広¹
 Kensho Imada Yukihiro Hasegawa Kazumi Ataka Takahiro Nishitani

〔抄録〕 道路橋杭基礎の設計のために橋梁建設対象地域で行われたボーリング調査データを用い、クリッキング手法によりN値の空間分布推定を行う。そして、その推定結果を用いて、杭基礎の支持力推定を行い、従来の方法との比較検討し、その有効性を示す。

〔Abstract〕 The Kriging technique is applied to evaluate the bearing capacity of pile foundations for pier structures of highway bridge. First, the spatial variation of N-values is estimated by the use of Kriging technique. Next, using the estimation results of N-values, the bearing capacity of pile foundations is estimated. The efficiency of design using the Kriging is demonstrated comparing with the conventional design results.

〔キーワード〕 クリッキング, 地盤物性値, 空間変動, 杭基礎, 支持力, 道路橋

〔Keywords〕 Kriging technique, Soil properties, Spatial variation, Pile foundation, Bearing capacity, Highway bridge

1. まえがき

構造物を設計し、建設するにあたって、まず必要となる重要な情報の一つとして、建設対象地域における地盤に関する情報、すなわち地盤物性値が挙げられる。しかし、地盤物性値は、1)土質試験・調査の段階において生じる誤差による不確定性、2)データ不足のため空間的バラツキを把握できないことにより生じる不確定性の2つの不確定性により、確定的に扱うことが困難である。

1)の不確定性は、明確な理論に基づく精度の高い試験方法が確立されれば、取り除くことが可能である。しかし、2)の不確定性を減少させるためには、対象地域にお

ける地盤に対してくまなく調査を行うことが必要であり、これは経済性の面から考えても今後も不可能に近い。したがって、このような地盤物性値の空間的バラツキをいかに合理的に把握するかということが重要な問題となる。

本研究においては、地盤物性値の空間分布を確率場の一つの実現事象である標本場と考え、土質試験・調査で得られた標本値よりその空間分布を推定することを考える。標本場における地盤物性値の空間分布推定法としては、クリッキングと呼ばれる推定法^{1)・2)}がある。この手法は、従来、鉱山工学、水文学、農業分野などで用いられてきた手法であり、最近では、確率有限要素による地盤の沈下問題³⁾や構造物の支持力評価⁴⁾あるいは地震

連絡先 1 〒 680 鳥取市湖山町南4-101 鳥取大学工学部 TEL 0857-28-0321
 2 〒 680 鳥取市湖山町南2-180 創和測量設計 TEL 0857-28-8372
 3 〒 680-01 岩美郡国府町分上2-210 (有)ツ→エ→イ TEL 0857-26-6410

4 〒 682 倉吉市河北町556-8 中国建設弘済会 TEL 0858-26-6935
 5 〒 689-05 気高郡青谷町青谷4047-1 青谷町役場 TEL 0857-85-0011

動のシミュレーション⁵⁻⁷⁾などに適用されている。

空間分布推定法として現在最もよく知られているのは、重回帰分析法¹⁾であると思われる。しかし、この手法は空間分布の内挿ではなく回帰であるため、全体の平均的な傾向の推定を行っていることになり、標本点における推定値は、必ずしも標本値を通るとは限らない。これに対して、クリッキングはこのような不都合を生じさせることのない推定法であり、地盤物性値の持つ不確実性を空間分布の推定に伴う誤差として確率的に取り扱うことのできる合理的な手法である。

本研究では、このクリッキング理論を用いて地盤物性値の内N値に注目し、その空間分布をモデル化する手法を定式化をする。そして、推定したN値の空間分布モデルを道路橋橋脚の杭基礎の支持層推定に適用することにより、その有効性を検討する。

2. 地盤物性値の空間分布推定法

2.1 概説

地盤物性値は、本来空間上にばらつきを持って分布しているが、経済的な制約のためそれらを正確に把握することができない。このような理由により生じる不確実性を有する物理量(図2-1参照)を合理的に評価する1つの方法として、空間的なばらつきをもつ確率場(random field)(図2-2参照)として取り扱い、その空間分布を推定する方法がある⁸⁾。

空間分布の推定法として現在最もよく知られているのは、重回帰分析法¹⁾であると思われる。しかし、この手法は空間分布の内挿ではなく回帰であるため、全体の平均的な傾向の推定を行っていることになり、標本点における推定値は、必ずしも標本値を通るとは限らない。これに対して、クリッキング手法^{1)・2)}は標本値が得られている地点では、その標本値が確定値となるような確率場の1つの標本である標本場(図2-3参照)を考え、他の地点の値を推定する方法である。

本章では、このクリッキング手法による地盤物性値の空間分布推定法について述べる。

2.2 地盤物性値の空間分布推定法の定式化

クリッキング手法により地盤物性値の空間分布を推定する場合、地盤物性値の標本場を考えるためエルゴード性の仮定が必要となる。

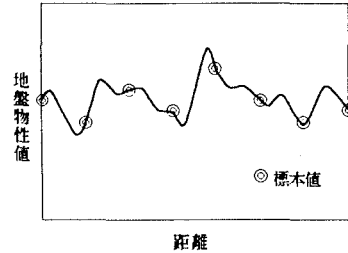


図2-1 地盤物性値の空間分布の概念

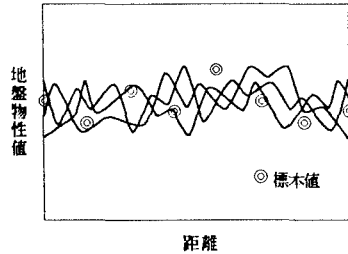


図2-2 地盤物性値の確率場の概念

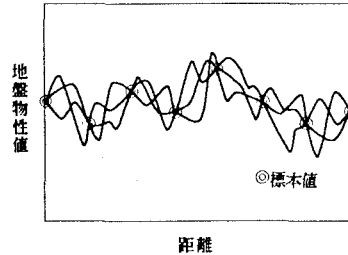


図2-3 地盤物性値の標本場の概念

一般に地盤物性値の空間分布は均質な確率場としてモデル化する事が困難なため、全体的な挙動をマクロ的にとらえたトレンド成分と均質な確率場で扱うランダム成分の和で表現し、次式により地盤物性値 $Z(x)$ の空間分布を推定する。

$$Z(x) = m(x) + W(x) \quad (2.1)$$

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)； $W(x)$ ：ランダム成分(不規則関数)である。

この式で表現しているランダム成分を均質な確率場として取り扱うときに、エルゴード性を仮定する。

また、標本場 $Z(x)$ において、 N カ所で標本値 $Z(x_i)$ ； $i=1 \sim N$ が観測されており、これらの標本値から、あるいはこれまでの地盤物性値に関する研究から、標本場のトレンド成分とランダム成分の共分散関数 $C(Z(x_i), Z(x_j))$ ； (x_i, x_j) は任意座標ベクトルは推定されているものとする。標本場 $Z(x)$ のランダム成分 $W(x)$ は、平均値が0となる定常(エルゴード)確率場であり、式

(2.1)より標本場 $Z(x)$ の共分散関数 $C\{Z(x_r), Z(x_s)\}$ は次式ようになる。

$$\begin{aligned} C\{Z(x_r), Z(x_s)\} \\ = E[\{Z(x_r) - m(x_r)\} \cdot \{Z(x_s) - m(x_s)\}] \\ = E[W(x_r) \cdot W(x_s)] \\ = C\{W(x_r), W(x_s)\} \end{aligned} \quad (2.2)$$

式(2.2)より、標本場 $Z(x)$ の共分散関数はランダム成分 $W(x)$ の共分散関数に一致する。

次に、 N 個の標本値 $Z(x_i); i=1 \sim N$ を用いて任意の点 x_r における推定値 $Z^*(x_r)$ が標本値 $Z(x_i)$ の線形和として表せると仮定する。ここで、式(2.1)により、推定値 $Z^*(x_r)$ は、

$$Z^*(x_r) = m(x_r) + W^*(x_r) \quad (2.3)$$

のように表せるので、推定値 $Z^*(x_r)$ は、そのランダム成分である $W^*(x_r)$ を推定することにより求めることができる。したがって、これ以降、標本値 $Z(x_i)$ におけるランダム成分 $W(x_i)$ を用いて、任意の点 x_r におけるランダム成分 $W^*(x_r)$ を線形補間により、次のように表す。

$$W^*(x_r) = \sum_{i=1}^N \lambda_i(x_r) W(x_i) \quad (2.4)$$

ここに、 $\lambda_i(x_r)$ は、重み係数である。上式において期待値をとれば、標本場のエルゴード性の仮定により $E[W^*(x_r)] = E[W(x_r)] = 0$ となり、式(2.4)は不偏推定式となる。

この重み係数 $\lambda_i(x_r)$ については、誤差分散 $\sigma^2(x_r)$ を最小とするように決定するものとする。

$$\begin{aligned} \sigma^2(x_r) &= E[\{W(x_r) - W^*(x_r)\}^2] \\ &= E[\{W(x_r) - \sum_{i=1}^N \lambda_i(x_r) W(x_i)\}^2] \\ &= E[W^2(x_r)] - 2 \sum_{i=1}^N \lambda_i(x_r) C\{W(x_r), W(x_i)\} \\ &\quad + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \lambda_i(x_r) \lambda_j(x_r) C\{W(x_i), W(x_j)\} \end{aligned} \quad (2.5)$$

これより、最小自乗法を用いると、式(2.5)は次式のようにになる。

$$\begin{aligned} C\{W(x_r), W(x_m)\} \\ = \sum_{i=1}^N \lambda_i(x_r) C\{W(x_i), W(x_m)\} \end{aligned} \quad (2.6)$$

ここに、 $m=1 \sim N$ である。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

(2.4)に代入し、得られたランダム成分 $W^*(x_r)$ を式(2.3)に代入することにより、推定値 $Z^*(x_r)$ を求めることができ、推定誤差分散は式(2.5)より求めることができる。

また、式(2.6)において、標本値が得られている地点を推定した場合、重み係数 $\lambda_i(x_r)$ は、

$$\begin{aligned} i=r \text{ のとき } \lambda_i(x_r) &= 1 \\ i \neq r \text{ のとき } \lambda_i(x_r) &= 0 \end{aligned} \quad (2.7)$$

となる性質がある。したがって、式(2.4)において $r=j$ とおくと

$$W^*(x_j) = \lambda_j(x_j) W(x_j) = W(x_j) \quad (2.8)$$

となり、標本値 $Z(x_j)$ のランダム成分 $W(x_j)$ に一致する。なお、推定誤差分散においても標本値が得られている地点を推定した場合、式(2.7)により、 $\sigma^2(x_j) = 0$ となる。

以上に述べたような方法で、地盤物性値の空間分布推定を行うことが出来る。クリッキング手法の特徴は、推定値が標本値を通り、推定誤差が標本点では0で、標本値から離れるに従って大きくなる。また、標本値の多く得られているほうが推定誤差も小さくなり、推定値も真の値に近くなっている。したがって、クリッキングによって実際の地盤における地盤物性値の空間分布を推定する場合も、標本値から得られる統計的性質だけでなく、標本値自体も考慮した上で空間分布の推定が可能である。さらに、地盤の不確定性を標本点以外の地盤物性値を推定するときの誤差として定量的に評価することができる。

3. N値の空間分布推定

3.1 概説

本章では、2章で示した地盤物性値の空間分布推定法を、 N 値の空間分布推定に適用する。ここでは、鳥取県東伯郡関金町浅井地区の一般国道313号「犬伏峠道路」の浅井第2橋(橋長375m)建設対象区間で行われたボーリング調査データ⁹⁾を用い、この区間内の N 値の空間分布推定をDL層を対象に行った。調査データについては、表3-1、図3-1に示す。

3.2 N値のデータ処理

クリッキング手法を用いる場合、標本場を全体的な挙動をマクロ的にとらえたトレンド成分と均質な確率場で扱うランダム成分の和で表現し空間分布推定を行う。そ

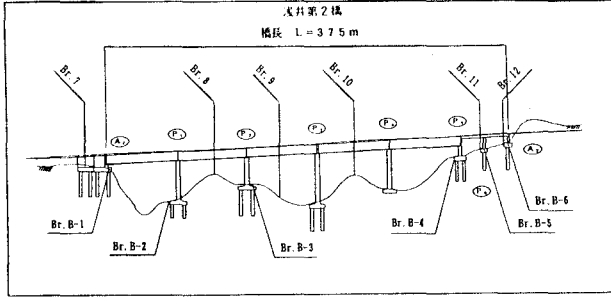


図3-1 ボーリング調査位置の概略

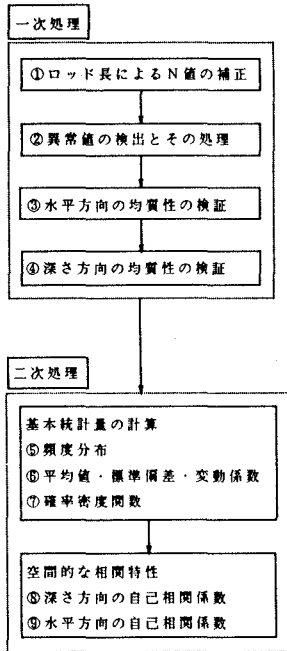


図3-2 N値データ処理フロー

のため、まず、観測された標本値を用いてデータ処理を行い、標本場のトレンド成分とランダム成分の共分散関数の推定を行わなければならない。

ここでは、N値のデータ処理を松尾らの提案に従って、図3-2に示すように一次処理と二次処理とに分けて行う^{4)・10)}。まず、一次処理によって、N値の均質性の判定を行いトレンド成分を見いだす。次に、二次処理によって、空間的に異なる2地点におけるN値間の相関特性を把握する。

3.2.1 トренд成分の推定

(1) 水平方向の均質性の検証

表3-1 ボーリング調査データ(DL層)

調査本数 (本)	調査深度 (m)	平均調査間隔 (m/本)	標準貫入試験 (回数)
6+1 (6)	5~ 47	27.6	38 (42)

() 内は追加ボーリングデータ

表3-2 水平方向の均質性に関する検定結果

	平均	標準偏差	変動係数	データ数
全区間	27.72	16.95	0.61	80
区間1	28.36	18.14	0.64	36
区間2	27.19	15.87	0.58	44
検定結果	(分散)	1.31 < 1.69: 適合		
	(平均)	0.31 < 0.50: 適合		

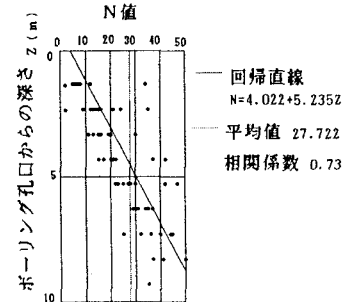


図3-3 深さ方向のN値の分布図と回帰式

統計手法を用い、DL層を例に区間0.5kmを2分割して、水平方向のN値の均質性を検討した。

均質性の検討は、分割された小区間のうち、隣接する2つの小区間を対象に、2つの母分散の違いの検定と平均値の差の検定により行う。

2つの正規分布の分散の比に関する検定は、次式により棄却域が定まる。

$$s_1^2/s_2^2 > F_{n_1-1, n_2-1; \alpha/2} \quad (3.1)$$

ここで、 s_1^2 、 s_2^2 は、標本の大きさ n_1 、 n_2 の小区間のN値の分散、 $F_{n_1-1, n_2-1; \alpha/2}$ はF分布に従う自由度 (n_1-1, n_2-1) 、危険度 α の限界棄却域である。

また、等しい未知の分散をもつ2つの正規分布の平均値の差に関する検定は、次式により棄却域が与えられる。

$$\frac{\bar{N}_1 - \bar{N}_2}{s_w \sqrt{1/n_1 + 1/n_2}} > t_{n_1+n_2-2; \alpha/2}$$

$$s_w = \sqrt{\frac{\{(n_1-1)s_1^2 + (n_2-1)s_2^2\}}{(n_1+n_2-2)}} \quad (3.2)$$

ここで、 $\bar{N}_1$ 、 $\bar{N}_2$ は、それぞれ標本の大きさ n_1 、 n_2 の

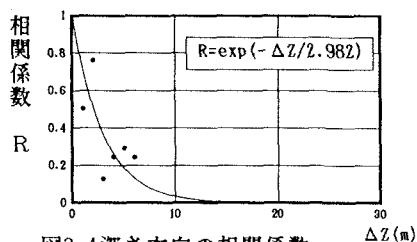


図3-4 深さ方向の相関係数

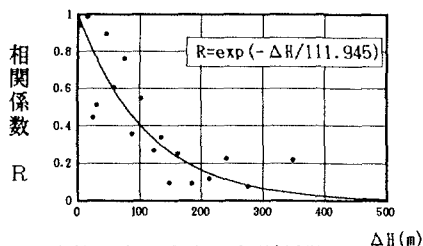


図3-5 水平方向の相関係数

小区間のN値の平均、 $t_{n_1+n_2-2; \alpha/2}$ は、t分布に従う自由度 (n_1+n_2-2) 、危険度 α の限界棄却域である。

検定の結果を表3-2に示す。ここで、危険度 α は5%とした。結果はいずれも合格しており、分割の必要性はなく、水平方向にトレンドをもたないといえる。

(2) 深さ方向の均質性の検証

N値は、深度が深くなるに従って大きくなる特性(トレンド)を持つ場合がある。そこで、DL層を例にとり、N値に対して深さ方向のトレンド成分を回帰分析によって求め、その結果を図3-3に示す。

図3-3には、深さ方向にN値が増加する傾向がみられ、回帰式の相関係数は0.73とかなり大きく、深さ方向にトレンド成分を持つといえる。

3.2.2 N値の空間的な相関特性

N値の推定対象空間において土質調査により得られた標本値を、様々な間隔ごとに採取し、それぞれの相関係数を求める。そして求められた相関係数を縦軸に相関係数、横軸に標本値の得られている間隔をとってプロットする。この結果をもとに種々提案されている自己相関関数モデル⁸⁾の中から適合度の良いものを選び、そのパラメータを決定し、自己相関関数を求める。また、これまでの研究による知識により、今回用いた自己相関関数モデルとしては、次式の2次元自己相関関数モデルを用いる⁸⁾。

$$\rho(\Delta x, \Delta y) = \exp \left[- \left\{ \left(\frac{\Delta x}{L_x} \right)^2 + \left(\frac{\Delta y}{L_y} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \right] \quad (3.3)$$

ここに、 L_x, L_y は、相関特性の減衰の程度を表すパラメータであり、それぞれx方向、y方向の相関距離と呼ばれている。また、 $\Delta x, \Delta y$ はx方向、y方向の2地点間の距離である。

以上のような方法で、DL層におけるN値の空間的な相関特性を調べ、図3-4に深さ方向の自己相関係数、図3-5に水平方向の自己相関係数を示す。なお、水平方向においては、ボーリング調査データが等間隔で得られていないため、 ΔH に幅を持たせて計算を行った。図3-4、図3-5によれば、深さ方向のN値の相関性は、2地点間の深さの距離差が増えるに従って、指数関数的に減少するが、水平方向のN値の相関性は、2地点間の水平の距離差が200m、300m離れても相関があることがわかる。

3.3 クリギング手法によるN値の空間分布推定

橋脚基礎の設計のためのN値の推定を行うことを目的として、P5橋脚位置とその近傍でのN値の空間分布推定を行った。推定に用いたN値データは、表3-1に示した事前調査で得られた38個(ケース1)と、それに追加ボーリングで得られた42個を加えた80個(ケース2)を用いた。トレンド成分は、図3-3に示されるように深さ方向に関してだけ見いだされ、 $N=4.022+5.235Z$ と与えた。ランダム成分の共分散関数は、式(3.3)を用い図3-4、図3-5より、深さ方向の相関距離 L_z は2.982(m)、水平方向の相関距離 L_h は111.945(m)を与えた。推定結果を図3-6(ケース1)、図3-7(ケース2)に示す。

ここで、P5橋脚位置は、地点位置No.37から82.0mの位置、近傍位置Kは、地点位置No.37から70.0mの位置である。

図3-6、図3-7を見ると、かなり形が違っているがその理由としては、ケース1の場合相関距離内にあるBr.10、11、12の3ヶ所で得られたデータに影響を与えられ、特にBr.10のデータに引張られるように深さ6~7mのあたりでトレンドに反して、N値がわずかに減少する傾向が見られるのに対して、ケース2では、推定地点のより近傍にBr.B-4、5、6の3ヶ所のデータが加えられ、特に最も近い地点Br.B-4の影響を大きく受けているためである。

また、推定誤差に関しても、N値が50に達する深さが、ケース1では4.4~11.7mほどの大きさになっているのに対して、ケース2では7.4~8.0mとかなり小さくなって

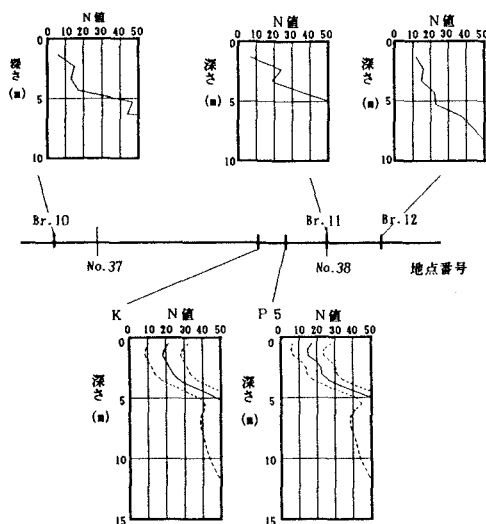


図3-6橋脚P5とその近傍のN値の推定(ケース1)

いることがわかる。つまり、事前調査で得られているボーリングデータが橋脚位置付近にない場合、推定誤差は大きくなり、また、追加ボーリング6本を行い橋脚位置近くにボーリングデータが得られた場合、推定誤差は非常に小さくなる。もし、要求されている推定誤差が、ケース2ほど小さくなくて良いなら、追加ボーリングの本数を減らすことが出来るといえる。

以上のことから、橋脚位置近くにボーリングデータが得られていれば推定誤差は小さくなるが、期待される推定誤差によっては、必ずしも橋脚位置にボーリングをする必要はなく、要求される推定誤差に合わせて、合理的にボーリング本数、ボーリング位置を決定できるであろうと思われる。

4. 杭基礎の支持層推定への応用

4.1 概説

橋梁の設計に先立ち地盤の成層状態や工学的特性を把握する目的で行なわれる地質調査は、物理探査、ボーリング、各種原位試験、サンプリング、土質試験等である。しかしながら、連続した長い橋の基礎構造物の設計においては、費用、時間の制約等から全ての橋脚地点でボーリング調査を行なうことは一般に困難である。従って、ボーリングを実施していない地点の基礎構造物に対

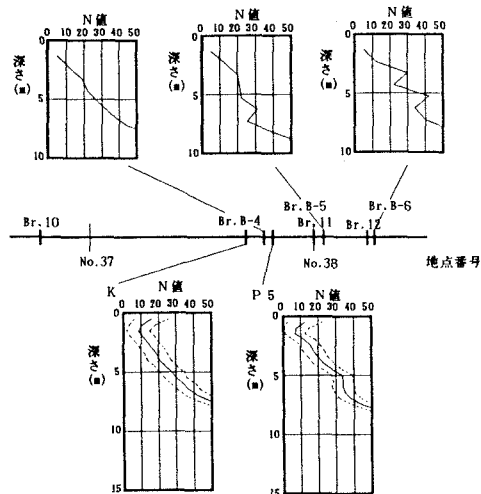


図3-7橋脚P5とその近傍のN値の推定(ケース2)

する地盤耐力を周囲の地盤情報を用いてできるだけ正確に推定することが必要である。

ここでは、杭基礎の支持層推定への応用例として、一般国道313号「犬伏峠道路」浅井第2橋で実施されたボーリング調査データを用いてクリグging理論により地層の空間分布の推定を行ない、さらに実際の深礎杭設計計算値と比較する。

4.2 N値の空間分布推定を利用した深礎杭の設計

ここでは、3章で求めた空間分布推定結果を用いて浅井第2橋下部構造物を対象に地層の推定および設計計算を行なった。以下その結果について述べる。

浅井第2橋は急峻な谷あいにかかる橋のため、採用された基礎形式はP4橋脚の直接基礎以外は全て斜面上の深礎杭である。ここでは、P5橋脚位置で地層の空間分布を推定し、深礎杭の設計を行なった。

地層の推定では当該地点の近傍数ヶ所で深さ方向のN値の推定を行ない、同一のN値を結び各層厚を推定する方法を用いた。

報告書⁹⁾によると岩級区分(電研式)は表4-1のとおりである。犬伏峠道路の設計ではDM層とDII層がほぼ通った性質を有するとして扱われている。今、N値50をDL層とDM層の境界であるとし、クリグgingによって地層線を推定した。ここで、DL、DM層の境界線はボーリングBr. 11とP5 (No. 37+82、クリグging)とNo. 37+70

表4-1 岩盤区分

岩盤区分			弾性波速度 (km/s)	ボーリングコアおよび地山状況	
電研式	土軟硬	N値			
D	DL	土砂	<50	≦0.4	・土砂状 一部土層化 ・砂質土状呈するも一部粘土化し、細粒分多くなる。
	DM	軟岩 I	>50	≦1.0	・砂状マサ主体 密実となるも指で容易に土砂化
	DN		>50/10 千貫打 ありなし	・岩層透明となるも、鉱物粒結合が失われバラバラとなる。砂へ遷移を示す。	
C	CL	貫入不能	≦2.0	・岩片へ碎状に採取されるも岩質は脆く、手で容易に砕けバラバラとなる。キレツに滑い土砂化進む。	

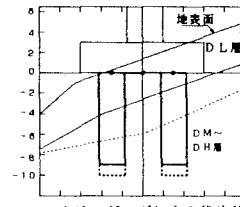
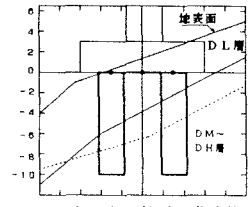

図4-1 P 5 橋脚位置での地層推定
(当初のボーリングデータによる)

図4-2 P 5 橋脚位置での地層推定
(追加ボーリングデータを含む)

表4-2 杭頭変位および最大曲げモーメント(地震時)

計算ケース	杭長 (m)	杭頭変位 X方向変位 Y方向変位	山側 (mm)	谷側 (mm)	最大曲げモーメント (tm)
当初設計 (追加ボーリングなし)	9.0	5.52 -0.72	5.52	-4.98	杭頭 山側 330.71 杭頭 谷側 110.73 中間 山側 -189.30 中間 谷側 -118.28
見直し設計 (追加ボーリング有り)	10.0	7.46 -0.53	7.46	-5.17	416.34 178.50 -183.06 -81.68
クリッキング(追加ボーリングなし)	10.0	8.02 -0.46	8.02	-5.24	384.51 268.73 -142.74 -94.76
クリッキング(追加ボーリング有り)	10.0	8.62 -0.41	8.62	-5.29	415.49 275.48 -116.25 -62.91

(クリッキング)のN値50の位置を直線で結んで決めている。

図4-1に追加ボーリング無しでの推定地層線を示す。ここで、実線は当初設計¹¹⁾を表わし、深礎杭は、φ2500、L=9.0mとされていた。また、破線はクリッキングによる推定を表わし、安定計算¹²⁾の結果、杭長がL=10.0mとなった。浅井第2橋ではP4橋脚、P3橋脚、P5橋脚の順に工事が着工された。P4橋脚は直接基礎であり、付近にDM級の層が露出していたので、当初推定されていた地層線が実際とほぼ一致しており、多少の置換コンクリートはあったものの問題なく工事が完了した。しかし、P3橋脚の深礎杭の施工に際して推定線よりかなり上層でDM層が確認され、杭長の変更が行なわれた。その後、各橋脚位置で6本の追加ボーリングが行なわれ、それらの資料をもとに設計の見直し¹³⁾が行なわれた。その結果、P5橋脚では杭長が10mに変更された。設計の見直しで得られた推定線および追加ボーリングを含む全データを用いてクリッキングにより推定した地層線を図4-2に示す。また、図4-1および図4-2それぞれの推定線で設計された深礎杭の杭頭変位および最大曲げモーメントを表4-2に示す。

表4-2から以下のような考察ができる。当初設計では杭長が9mだがクリッキングによる推定ならびに追加ボーリングを考慮した見直し設計では10mとなっている。また、杭頭部の曲げモーメントは山側、谷側ともクリッキングによる計算値が当初設計の値に比べて大きくなっている。特に谷側のクリッキングによる数値は当初設計の

2倍以上の値を示している。追加ボーリングを考慮した見直し設計とクリッキングによる場合の杭頭変位および山側の杭頭での最大曲げモーメントは、ほぼ似かよった数値を示している。しかし、谷側の杭頭部ではクリッキングによる計算値がほぼ1.5倍を示している。

当初設計と見直し設計で杭頭部のモーメントの比(見直し/当初)は山側で1.26倍、谷側で1.61倍となり、当初設計が危険側の設計となっていると言える。同様に、追加ボーリングの有無を考えたクリッキングによる計算値を比較すると比(追加有り/追加なし)は山側で1.08、谷側で1.03となり、前者に比べ変動が少ないことを示している。これらの結果より、従来の推定方法(当初および見直し)では下部工位置にデータがある場合とない場合の計算結果に大きな差があるが、クリッキングによる推定では前者に比べて差が少なく、従来の方法に比べて有効であることがわかる。

残念ながら、実際の地層を確認することは現実には不可能に近いので、現段階でどちらの推定が正しいのかを判断することは出来ないが、仮に見直し設計の推定線が真値に近いとして杭頭のモーメントを比較するとクリッキングによる計算値は安全側の数値となっている。また、追加ボーリングなしのクリッキングによる山側の計算値は見直しの数値を下回っているが、92%程度の数値を示しており、実用上問題となる数値ではない。逆に、クリッキングによる推定が真値に近いとすると、見直し設計の谷側の数値は65%程度となり、危険側の設計となる。

4.3 考察

基礎構造物の設計において、支持層あるいはほぼ同じような性質を持つ層、たとえばN値50以上の層の深さおよび層の厚さを正確に推定することは非常に重要である。にもかかわらず、調査費用と時間に制約をうけ、少ないボーリングデータと地形から設計者の経験と感で推定されているのが現状である。今回の研究では、これまで得られているボーリングデータを有効に利用して、クリッキング手法によりボーリングの無い地点のN値の空間分布を求め、その結果をもとに杭基礎設計のための地層の推定を行なう1つの方法を提案した。この方法によれば設計者の違いにより推定線の推定結果が異なるということは生じない。また、推定値の推定誤差分散 σ^2 が得られるため、与えられた許容誤差内におさまるような信頼度の高い設計結果を得ることが期待できる。

5. あとがき

本研究では、クリッキング手法により地盤物性値の内、N値に注目し、その空間分布の推定を行った。そして、その推定結果を用いて道路橋橋脚の杭基礎の設計へ適用し、その有効性を示した。

クリッキング手法を用いれば、これまでのデータを有効に生かして、データのない地点における物性の推定値をその推定誤差のもとに定量的に示すことができる。従って、少ない土質調査・試験で大きい推定誤差のもとに物性値を推定するか、また、より密に土質調査・試験を行い、小さい推定誤差のもとに物性値を推定するかの判断を定量的に行うことが可能になる。このことは、地盤のデータ不足を補い、合理的な構造物の設計を行う上で非常に重要な点である。

なお、本研究は、平成4年4月に「地域に根づいた研究を行う」ことを目的に設立された湖山構造研究会(KKK:会長 米村廣之)の研究活動の一貫として実施したものである。また、本研究を遂行するに当たり土木学会中国四国支部研究活動助成金(B)(平成5年度)の支給を受けた。さらに、本研究で用いたデータは、建設省中国地方建設局倉吉工事事務所より提供を受けた。ここに、関係各位に、厚くお礼申し上げる次第である。

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, 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, No. 394/III-9, PP. 97~104, 1988. 6.
- 4) 松井謙二, 鈴木 誠: 空間的変動を考慮したN値のデータ処理—九州横断道路小郡高架橋への適用—, 土と基礎, Vol. 38, No. 8, PP. 23~27, 1990. 8.
- 5) Vanmarcke, E. H. and Fenton, G. A. : Conditioned Simulation of Local Fields of Earthquake Ground Motion, Structural Safety, Vol. 10, pp. 247~264, 1991.
- 6) 星野勝: 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.
- 7) 星野勝, 桑野智英: 条件付確率場のシミュレーション理論の検証, 土木学会論文集, No. 477/I-25, pp. 93~96, 1993. 10.
- 8) 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.
- 9) 建設省中国地方建設局倉吉工事事務所: 山口地区地質調査業務報告書, 1988.
- 10) 松尾稔: 土質データのばらつきと設計, 土と基礎, Vol. 34, No. 12, PP. 77~83, 1986. 12.
- 11) 建設省中国地方建設局倉吉工事事務所: 一般国道313号犬狹峠道路浅井第2橋設計(その2)業務報告書, 1991.
- 12) ㈱総合システム: USER'S MANUAL, 基礎工(深礎杭の設計), 1993.
- 13) 建設省中国地方建設局倉吉工事事務所: 一般国道313号犬狹峠道路浅井第2橋設計(その2)業務報告書, 1993.