統計解析に基づく静的支持力式の係数決定法について

METHOD FOR DETERMINATION OF PARAMETERS OF PILE BEARING CAPACITY FORMULA BASED ON STATISTICAL ANALYSIS

松尾 稔*・出村 禧典**・菅井 径世***

By Minoru MATSUO, Yoshinori DEMURA and Michiyo SUGAI

The first object of this paper is to modify the method, which was proposed by authors in the previous paper¹⁾, for determination of parameters of pile bearing capacity formula based on statistical analysis. Accordingly, a new method for estimation of skin friction of steel pipe piles driven into clay layers is proposed based on equation (1). The second object is to show the accuracy of the method. The results of statistical analysis with 68 in-situ loading tests which have been gathered and used in the previous paper are equal to the results of those with 112 tests which are gathered the present paper. Hence, it is seen that the reliability of the statistical analysis by using the data from a sample population of 68 in-situ loading tests is adequate. The new formula is compared with those estimated by the methods currently used in Japan and the engineering usefulness of the new method is emphasized.

Keywords: statistical analysis, bearing capacity, nonlinear least square, in-situ loading test

1. はじめに

著者らは、文献1)において多数の載荷試験データを用い、統計解析に基づく静的支持力決定法を提案した。すなわち、従来から実務設計に用いられている諸官公庁、学協会の静的支持力式よりも、変動係数にして10%以上精度の高い静的支持力式を提案したのである。しかし、提案した支持力式は以下に示す2つの問題点を残していた。第1点は、粘土層の N 値と周面摩擦力の関係に関するものである。提案した式によれば、 N 値=8のとき、算定される単位面積当たりの支持力値が $9.6 \text{ (tf/m}^2\text{)}$ であるのに、 N 値=9になると $3.6 \text{ (tf/m}^2\text{)}$ になる。第2点は、支持力式決定法が統計解析に基づくことに起因するもので、用いるデータ数によって解析解が異なってくる可能性を残した。本研究ノートは、第1の問題点に対する検討に加え、新たに収集した45個の実杭載荷試験データを利用し、データ数増加による解析解の違いや、提案式の精度について検討した結果の報告である。

2. 静的支持力式の分析および検討

(1) 解析に用いたデータ

種々の解析結果を示す前に、用いた載荷試験データについて触れておく。文献1)で用いたデータに加え、新たに収集したデータ数は45であるが、このうち杭径800 mm以上のデータは1個(杭径1500 mm)のみである。したがって、文献1)の3.(3), b)で述べたように、本手法の適用限界を直径700 mmクラスまでの杭に限ることとし、文献1)で用いた杭径800 mm未満のデータ68個と、追加データ44個を用いて解析を行う。

図—1に解析に用いた杭の形状を度数分布の形で示す。図からわかるように、追加したデータは、文献1)で用いたデータと同種であり、杭径、杭長、根入れ比(支持層への根入れ長さ(L)/杭径(D))において特異なデータは追加していない。

図—2に地表面から杭を打ち止める支持層までに存在する砂層および粘土層の平均 N 値の杭周面積分布を示す。図—1の場合と同様、文献1)で用いたデータに比べ特異な地盤情報を含むデータは追加していない。

(2) 現行の支持力式の検討

文献1)にならない、代表的な実務設計用静的支持力式の精度について検討する。対象とした現行支持力式は、

* 正会員 工博 名古屋大学教授 工学部地盤工學教室
(〒464-01 名古屋市中千種区不老町)

** 正会員 工博 石川工業高等専門学校教授 土木工学科
(〒929-03 石川県河北郡津幡町字北中条)

*** 学生会員 工修 名古屋大学大学院 工学研究科地盤工學専攻 (〒464-01 名古屋市中千種区不老町)

図-1 解析に用いた杭の形状等 (データ数 112 個)

図-2 周面摩擦にかかわる N 値と杭周面積 (データ数 112 個)

図-3 実測値と現行支持力式による計算値の比較 (データ数 112 個)

文献 1) と同様, 「道路橋式」, 「国鉄式」, 「建築学会式」の 3 つである。図-3 は, 112 個の全載荷試験データを用いて計算値と実測値を比較した結果である。いずれの式も精度は比較的よい。図中黒丸で示した追加データ 44 個をみても計算値は実測値とよく対応しており, これにより全体としての式の精度は若干よくなっている。ただし, 図中に併記した残差の平均値 (平均残差) と変動係数に着目しても, 文献 1) における解析と同様の結果を示していることがわかる。

(3) 粘土層の N 値による周面摩擦推定に関する検討

文献 1) では, 土丹や固結シルトなど過圧密度が非常に高く N 値の大きな層を, N 値の小さな正規圧密粘土層や若干過圧密された層とは別の性質の地盤と考えて取り扱った。ところが, 文献 1) の式 (16) を用いると, 1. で述べたような矛盾が生じた。データ数が十分大きくなれば, N 値によるのではなく地盤の種類別に層を

区分することが可能であるが, 土丹や固結シルト層への載荷試験データの収集は容易でない。この点を考慮し, 現行式にならって, 粘土層 N 値の上限 (N_{up}) を定めて支持力式を決定する手法を取ることとする^{2), 3)}。すなわち, 粘土層においては, N_{up} 以上の N 値は, $N = N_{up}$ として計算する。提案する式を示すと以下のようである。

$$P_u = a_1 \bar{N}_p A_p + a_2 \sum N_s l_s U + a_3 \sum_{N_c \leq N_{up}} N_c l_c U \quad \dots (1)$$

ここに, A_p , U はそれぞれ杭の先端閉塞断面積および杭周長を, $\bar{N}_p$, N_s , N_c は支持層, 砂層および粘土層の平均 N 値を, l_s , l_c は砂層および粘土層の層厚を, また, a_1 , a_2 , a_3 は文献 1) と同様, 支持層, 砂層, 粘土層に関する係数を表す。

(4) 提案法による数値計算例

数値解析は, 文献 1) と同様, 次の項目ごとに順を追って進める。すなわち, a) N_{up} の決定, b) 根入れ比が先端支持力の係数 a_1 に与える影響, c) 杭径が先端支持力

図—4 粘土層分類のための N_{up} と式の精度（データ 68 個）

表—1 係数 a_1, a_2, a_3 の計算結果（ $N_{up}=6$ ）

a_1	a_2	a_3	データ数	変動係数
31.18	0.155	1.068	68	0.3246

表—3 根入れ比別の a_1 の計算結果（データ数 68 個）

根入れ比	係数 a_1	データ数	変動係数
0～1	—	0	—
1～2	32.91	7	0.1256
2～3	15.74	8	0.3407
3～4	25.45	5	0.1033
4～5	33.26	12	0.2980
5～6	37.99	7	0.2349
6～7	37.79	7	0.3022
7～8	39.10	4	0.1026
8～9	97.23	2	0.2926
9～10	—	0	—
10～	32.49	16	0.2869

図—5 粘土層分類のための N_{up} と式の精度（データ数 112 個）

表—2 根入れ比別の a_1, a_2, a_3 の計算結果（ $N_{up}=6$ ）

a_1	a_2	a_3	データ数	変動係数
29.14	0.159	1.111	112	0.3290

表—4 根入れ比別の a_1 の計算結果（データ数 112 個）

根入れ比	係数 a_1	データ数	変動係数
0～1	—	0	—
1～2	32.07	7	0.1173
2～3	15.21	14	0.2670
3～4	22.71	15	0.2014
4～5	31.01	23	0.2754
5～6	30.07	14	0.2545
6～7	41.12	9	0.3452
7～8	37.25	5	0.0824
8～9	96.00	2	0.2910
9～10	—	0	—
10～	33.52	23	0.2990

の係数 a_1 に与える影響、d) 実務設計に用いるための各係数の有効な桁数についてである。さらに、項目ごとに文献 1) で用いた 68 個のデータによる解析結果と、これに追加データ 44 個を加えた 112 個のデータによる解析結果を比較、検討する。

a) N_{up} の決定

N_{up} は、文献 1) で N_L を決定した手法と同様の方法で決定する。すなわち、式 (1) において N_{up} を 1～50 まで変えて支持力値計算を行い、それぞれに対して決定された係数による式の精度を検討する手法である。図—4, 5 は、各データによる計算結果である。両図の横軸は式 (1) に代入した N_{up} 値である。また縦軸の変動係数は、統計解析法により算定した各係数を式 (1) に適用して計算した支持力値と実測値を比較して求めたものである。両図とも $N_{up}=6$ のときの変動係数が最小、換言すると静的支持力式の精度が最もよくなる。したがって、 N_{up} として 6 を採用する。

表—1, 2 に $N_{up}=6$ とした場合の各係数の値と支持力値に関する変動係数を示す。これらの表からわかるように、非線形計画問題として定式化した提案法による各係数値は、現行の各静的支持力式に採用されている値と大差がない。また、表—1, 2 を比較しても、各係数値がほぼ一致していることは特に注目すべきである。これは、データ数の違いにより解析解が変わらないことを意味しており、ここで算定された係数値の信頼性の高さを示している。表の計算結果から、現行式よりも周面摩擦力を若干小さく評価する方が一般に精度よく支持力を推定できることがわかる。

次に、表—1, 2 に基づき、データ数 68 個の場合には a_2, a_3 をそれぞれ 0.16, 1.07、データ数 112 個の場合には a_2, a_3 をそれぞれ 0.16, 1.11 と固定したうえで、根入れ比や杭径に影響されると考えられる a_1 の検討をさらに深める。

b) 根入れ比が先端支持力の係数 a_1 に与える影響

表—3, 4 に、根入れ比別にまとめたデータから計算した a_1 の値、計算に用いたデータ数、支持力値に関する変動係数を示す。文献 1), 3. (3), b), ② で述べたように、根入れ比 2 以下の場合を除き、両表とも一般に根入れ比が小さいときに a_1 値が小さい。したがって、係数 a_1 に関しては根入れ比で次のように区分けして検討を進める。すなわち、データ数 68 個の場合は文献 1) と同様、2 以下、2～3, 3～4, 4 以上の 4 つの範囲、データ数 112 個の場合は、2 以下、2～3, 3～4, 4～6, 6 以上の 5 つの範囲に分ける。後者の場合には、データ数の増加により分ける範囲を増やし、支持力式の精度を高める。

c) 杭径が先端支持力の係数 a_1 に与える影響

表—5, 6 は、b) で決定したように根入れ比で区分けし、さらに各杭径別に求めた a_1 の値、データ数、支持力値に関する変動係数を示している。これらの結果によれば、杭径 250.0～355.6 mm のものは閉塞効果が十分に発揮されると考えられ、比較的大きな係数値を示している。しかし、データ数の少ないこと、および小口径杭の取り扱いが通常は若干粗雑になる実務上の安全性を考慮して、他の杭と同じ係数を用いることにする。また、両表からはデータ数の違いによる係数値の大きな違いは

表一五 杭径別の a_1 の計算結果（データ数 68 個）

杭径	318.5 ～ 355.6		400.0 ～ 485.0		500.0 ～ 508.0		600.0 ～ 660.4		700.0 ～ 711.2	
	係数 a_1	データ数	係数 a_1	データ数	係数 a_1	データ数	係数 a_1	データ数	係数 a_1	データ数
	変動係数		変動係数		変動係数		変動係数		変動係数	
～ 2	—	0	29.32	3	33.11	3	45.72	1	—	0
	—		0.2013		0.0586		—		—	
2 ～ 3	—	0	22.37	2	14.59	3	15.51	3	—	0
	—		0.1266		0.3000		0.4673		—	
3 ～ 4	—	0	24.15	1	31.24	1	18.03	1	27.90	2
	—		—		—		—		0.0428	
4 ～	50.88	7	29.26	6	39.51	18	35.78	15	30.64	2
	0.2121		0.1385		0.1943		0.3695		0.2974	

表一六 杭径別の a_1 の計算結果（データ数 112 個）

杭径	250.0 ～ 355.6		400.0 ～ 485.0		500.0 ～ 508.0		600.0 ～ 660.4		700.0 ～ 750.0	
	係数 a_1	データ数	係数 a_1	データ数	係数 a_1	データ数	係数 a_1	データ数	係数 a_1	データ数
	変動係数		変動係数		変動係数		変動係数		変動係数	
～ 2	—	0	28.58	3	32.31	3	44.15	1	—	0
	—		0.1835		0.0591		—		—	
2 ～ 3	—	0	16.38	3	11.94	5	16.23	6	—	0
	—		0.1784		0.2478		0.2991		—	
3 ～ 4	—	0	14.89	2	29.43	7	15.81	4	27.25	2
	—		0.3939		0.1919		0.1078		0.0355	
4 ～ 6	41.86	4	25.41	5	35.78	20	33.25	6	22.20	2
	0.4345		0.1289		0.1907		0.4045		0.1755	
6 ～	50.99	6	36.38	5	43.23	15	33.48	12	41.99	1
	0.3048		0.1623		0.3228		0.3682		—

図一六 実測値と提案式による計算値の比較（データ数 112 個）

みられない。

d) 実務設計に用いるための各係数の有効な桁数

表一七は、以上の解析に基づき、全載荷試験データ 112 個を用いて求めた a_1 値とそのときのデータ数、支持力値に関する変動係数を示したものである。表からは、根入れが十分であれば一般に現行支持力式の場合よりも若干大きめの先端支持力値が期待できることがわかる。さらに、図一六は、これらを式（1）に適用して求めた計算値と載荷試験における実測値を比較したものである。当然のこととはいえ、提案法では図一三に示したいずれの支持力式よりも高い精度の推定値を与えている。

なお、実務式として用いる場合には、工学的に有効な精度を保持しつつ、各係数値はできるだけ簡単な方がよい。この観点から表一七の値を再整理したものが表一八である。式の精度は、同じく表中の変動係数（0.284）に示したように図一六と比較してほとんど落ちず、実用

表一七 根入れ別の a_1 の計算結果

杭径	250.0 ～ 750.0		
	係数 a_1	データ数	変動係数
～ 2	32.07	7	0.1173
2 ～ 3	15.21	14	0.2670
3 ～ 4	22.71	15	0.2014
4 ～ 6	30.72	37	0.2692
6 ～	37.66	39	0.3346

表一八 実用式の係数値

根入れ比	係数 a_1		係数
～ 2	32.0	a_2	0.16
2 ～ 3	15.0	a_3	1.10
3 ～ 4	23.0	データ数	112
4 ～ 6	31.0	変動係数	0.2840
6 ～	38.0		

的にはこれで十分である。新しく提案する実用式は、式（1）に表一八の係数値を適用したものとする。

3. おわりに

本研究ノートは、文献 1）において著者らが提案した統計解析に基づく静的支持力式決定法に基づき、新たに 44 個の載荷試験データを追加して静的支持力式を決定し、さらにその信頼性や精度について検討を加えたものである。主な結果は、以下のとおりである。

（1）粘土層の N 値と単位面積当たりの周面摩擦力値の関係を新たに提案した。

（2）文献 1）で用いたデータによる解析結果と、追加データによる解析結果を比較することにより提案した支持力式の信頼性を検討した。

参考文献

- 1) 松尾 稔・菅井 隆世・金 馨漢：鋼管杭の極限支持力推定法に関する研究，土木学会論文集，第 406 号／Ⅲ-11，pp. 253～262，1989 年 6 月。
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，Ⅳ下部構造編，1987.5。
- 3) 土木学会編：国鉄建造物設計標準解説（基礎構造物，抗土圧構造物），1986。

（1990.6.6・受付）