

## 鋼管杭の極限支持力推定法に関する研究

## STUDY ON METHODS FOR EVALUATION OF BEARING CAPACITY OF STEEL PIPE PILES

松尾 稔\*・菅井 径世\*\*・金 聲 漢\*\*\*

By Minoru MATSUO, Michiyo SUGAI and Seikan KIM

The present paper discusses two main subjects. The first one is concerned with a method for the evaluation of ultimate bearing capacity in which the updated data obtained during the in-situ loading tests are used. The new evaluation method of applying the residual settlements with the total settlement in each loading step is proposed. The other is to show the improved equations of ultimate bearing capacity which are determined based on the statistically analyzed data on many proto-type loading tests done in the fields. The results are compared with the values given by the methods generally used in Japan and the engineering usefulness of the new methods are emphasized.

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

## 1. はじめに

杭の支持力に関する理論的、実験的研究は、古い歴史と実績を有する。理論的研究は、多くの場合、精緻な支持力理論の構築に向けられている。その結果、提案された支持力式には、実際には得ることの困難な地盤情報、たとえば詳細かつ高精度の強度定数などを必要とすることが多く、実務設計用支持力式としては活用しにくい面を否定できない。一方、この方向とは別に、近年、現場載荷試験の重要性が認識され、実測データが着実に蓄積されつつある。ただ惜しむらくは、一般にこれらの載荷試験データが、個々の現場での支持力確認の利用にとどまっておき、必ずしも普遍的な支持力推定法に向けて系統的に整理されているとはいえない。

本論文では、上記の点を踏まえ、まず載荷試験による精度の高い極限支持力推定方法を提案した後、収集した多数のデータの統計的処理に基づく静的支持力式決定法を提示する。同時にこれらと、既往の極限支持力推定法

および、諸官公庁・学協会等における静的支持力式を比較し、新しく提案した方法の妥当性を検討する。

## 2. 載荷試験結果による極限支持力推定法

## (1) 既往の極限支持力推定法

【クイの鉛直載荷試験基準 1977】<sup>1)</sup>では、荷重～沈下量曲線が沈下軸に平行とみなされる荷重を極限支持力としている。載荷試験が信頼度の高い支持力推定法であることはいうまでもない。しかし、現実には、経済性その他の理由により、極限荷重を明確に確認するまで載荷できる場合は少なく、上記の基準のみでは極限支持力の定量的決定が困難の場合が多い。この点に関し、載荷試験データに指数関数などの数学モデルを適用して極限支持力を評価する方法が提案されている<sup>2)</sup>。本論文の構成上、その中でも一般に用いられている a) Van der Veen<sup>3)</sup>、b) 宇都の方法<sup>4)~7)</sup>に関して簡単に触れておく必要があるの以下に結論のみを示す。

## a) Van der Veen の方法

荷重～沈下量曲線は次の指数関数で仮定される。

$$P = P_u(1.0 - \exp(-\alpha S)) \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 $\alpha$ 、 $P_u$ 、 $P$  および  $S$  はそれぞれ定数、極限支持力、荷重および沈下量である。式(1)を書き直すと、

\* 正会員 工博 名古屋大学教授 工学部地盤工学教室  
(〒464-01 名古屋千種区不老町)

\*\* 学生会員 工修 名古屋大学大学院工学研究科地盤工学専攻(同上)

\*\*\* 正会員 工修 (株)日本技術開発・土木本部総合技術部  
(〒160 新宿区大久保 226)

$$S = -\frac{1}{\alpha} \log \left( 1.0 - \frac{P}{P_u} \right) \dots\dots\dots (2)$$

上式から、横軸に  $\log(1-P/P_u)$ 、縦軸に  $S$  をとり、いくつか仮定した  $P_u$  ごとに  $P/P_u$  と  $S$  の関係をプロットする。描かれた曲線群のうち最も直線性の高いときの  $P_u$  が極限支持力値である。この方法は、極限支持力を数学モデルで推定する方法として先駆的なものであり、複雑な数値計算を必要としない利点がある。しかし、図の直線性を視覚的に判断するため客観性に乏しいという問題点がある。

b) 宇都の方法

荷重～沈下量関係が次のような指数関数で仮定される。

$$P = P_u \left\{ 1.0 - \exp \left( - \left( \frac{S}{d_s} \right)^m \right) \right\} + P'_u \dots\dots\dots (3)$$

ここに  $d_s$  は基準変位とよばれ、ほぼ降伏荷重に対応する沈下量を表わす。 $m$  は変位指数とよばれるパラメーターで  $P'_u$  は原点の補正係数である。式中のパラメーター ( $P_u, d_s, m, P'_u$ ) は、載荷試験から得られる  $P, S$  の実測値を用いた非線形回帰計算より決定され、( $P_u + P'_u$ ) が極限支持力とされる。この方法は、最近、最も注目すべき提案であり、Van der Veen の方法に比べ、恣意性を排除した点で高く評価される。しかし、精度の高い推定には降伏荷重をかなり越えた載荷が必要であり、また変位指数  $m$  を用いると、計算が非常に複雑になり、演算時間も長くなるという難点は避けられない。

(2) 新しい極限支持力推定法の提案

【クイの鉛直載荷試験基準 1977】<sup>1)</sup> など、通常の載荷試験示様では多サイクル載荷方式を採用している。この方法によれば各荷重段階で残留沈下量が測定されるから、沈下量との差として弾性沈下量も求められる。測定結果は一般に沈下量曲線、残留沈下量曲線、弾性沈下量曲線として図に表わされるが、実際に支持力推定に用いられるのは沈下量曲線だけであり、これは Van der Veen、宇都の方法でも同様である。しかし、たとえば杭頭で降伏の発生を確認したならば、それはとりもなおさず杭先端地盤での降伏発生を意味しているから、杭頭の残留沈下量の挙動は、杭先端の沈下挙動と密接に関係する。すなわち、杭の極限支持力推定に残留沈下量曲線を利用することはきわめて重要かつ有効である<sup>8)</sup>。さらに、残留沈下量を加えれば、それだけデータ数が増えるため、統計学的にも精度向上につながる。以上の点を踏まえて、荷重～沈下量曲線と残留沈下量曲線の2つを利用する極限支持力推定法を以下に提案する<sup>9)</sup>。

載荷試験時の荷重～沈下量関係は、Van der Veen の方法や宇都の方法に準じ、指数関数を仮定する。ただし、式 (3) における  $m$  は物理的な意味が明確でないので

$m=1$  としたうえで、沈下量  $S$  について整理すると次式となる。

$$S = d_s \log (P_u / (P_u + P'_u - P)) \dots\dots\dots (4)$$

また荷重～弾性沈下量 ( $S_e$ ) 関係は、線形で表示するのが妥当だから次式を用いる。

$$S_e = \frac{P - P'_e}{E'} \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 $E'$  は定数、 $P'_e$  は原点の補正係数である。したがって、残留沈下量  $S_r$  は次式で表わされる。

$$\begin{aligned} S_r &= S - S_e \\ &= d_s \log (P_u / (P_u + P'_u - P)) - \frac{P - P'_e}{E'} \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

上式の関係から、次式を最小化するような非線形回帰計算により、パラメーター ( $P_u, d_s, P'_u, E', P'_e$ ) を決定することができる。

$$\begin{aligned} S_p &= \sum_{i=1}^n [S_i - \hat{d}_s \log (\hat{P}_u / (\hat{P}_u + \hat{P}'_u - P_i))]^2 \\ &+ \sum_{i=1}^m [S_{ri} - \left\{ \hat{d}_s \log (\hat{P}_u / (\hat{P}_u + \hat{P}'_u - P_i)) \right. \\ &\quad \left. - \frac{P_i - \hat{P}'_e}{\hat{E}'} \right\}]^2 \dots\dots\dots (7) \end{aligned}$$

このとき、求めるべき極限支持力は ( $P_u + P'_u$ ) で与えられる。

実際には、パラメーター ( $P_u, d_s, P'_u, E', P'_e$ ) は以下の手順で推定することができる。① 実測された荷重～弾性沈下量関係により、式 (5) のパラメーター ( $E', P'_e$ ) を回帰計算により決定する。② ①で決定した ( $E', P'_e$ ) と実測の荷重～残留沈下量関係により、荷重～沈下量関係を計算する。③ ②で計算した荷重～沈下量関係と、実測の荷重～沈下量関係の双方を同時に用いて ( $P_u, d_s, P'_u$ ) を決定する。かくして、極限支持力 ( $P_u + P'_u$ ) が求められるのである。

(3) 新しく提案する方法の検討

前述したように、Van der Veen の方法では  $S \sim \log(1-P/P_u)$  の直線性を視覚的に判定しなければならない欠点があるので、本節では宇都法との比較において新提案法を検討する。なお、宇都法では変位指数  $m$  を  $m=1$  とせず  $m$  を用いた厳密計算を行っている。ここで検討に用いたデータは、ほぼ極限まで載荷されている19例で、すべて打ち込み開端鋼管杭での試験結果である。ここでは載荷試験による極限支持力の実測値を真値とみなし、それとの乖離の大小で精度を検討する。通常、極限支持力推定法は、極限付近までの実測データがない場合にその有効性が評価されなければならない。そこでどの程度の載荷レベル (試験荷重/極限支持力×100 (%)) までのデータが得られれば極限支持力のある精度の範囲で推定できるかという点について、この2つの

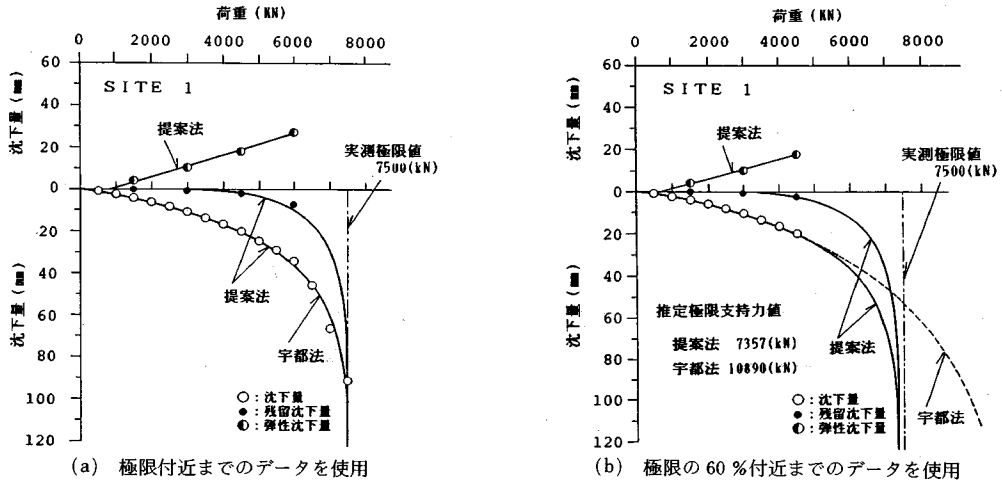


図-1 推定極限支持力の比較

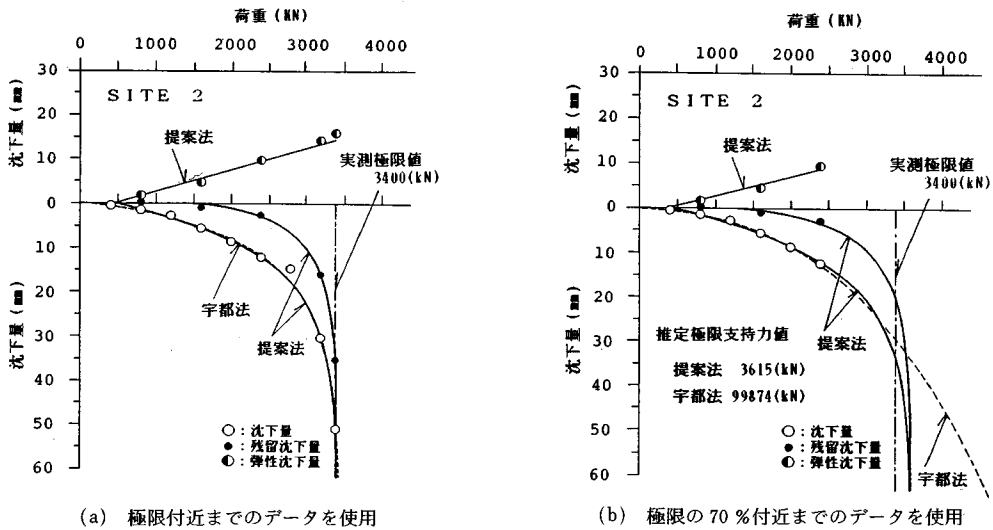


図-2 推定極限支持力の比較

推定法を比較検討した。具体的には載荷荷重を順次1段階ずつ減じてそれまでの試験結果を使って極限支持力を推定している。

図-1, 2は結果の一例であり, Site 1, 2の2地点での載荷試験結果に関するものである。両図において図(a)は載荷試験の極限值付近までのデータを用いた場合であり, 宇都法, 提案法とも実測の荷重~沈下量関係をよく追跡し, かつ推定極限支持力値にも差はない。一方, 図-1 (b)に示す極限値の約60% 載荷レベル, 図-2 (b)に示す極限値の約70% 載荷レベルまでのデータを使用した場合をみると, 両者の傾向はかなり異なる。すなわち, 提案法ではほとんど推定誤差を生じないのに対し, 宇都法では, 外挿する荷重領域の大きい範囲で荷重~沈下量関係が実測値を大幅に逸脱し, 極限支持力にも大き

な推定誤差が生じている。表-1に検討結果のすべてを示した。この表は載荷レベル10%ごとにまとめて示してあるので, その範囲に相当する載荷レベルでの試験が行われていない場合は欠番となっている。また, 表には, 実測された極限支持力のほかに, 載荷レベルごとの実測値と計算値との差 (=残差: 極限支持力に対する百分率(%))も示してある。表からわかるように, 提案法の場合, 載荷レベルが50%前後になると, 推定残差の絶対値はかなり大きくなるが, それ以上の場合には工学的に十分精度のよい推定が可能である。図-3は, 載荷レベル別の残差の平均値と標準偏差である。平均値は各レベルとも負の値であり, 設計上は全般に安全側である。また, 載荷レベル40~60%の場合を除いて, 残差の平均値が非常に小さいこと, およびその標準偏差も20%

表一 極限支持力の推定精度の比較

Site	実測 極限支持力 P (kN)	載荷レベル (%)	従来法による推定値		宇野法による推定値	
			極限支持力 P <sub>N</sub> (kN)	偏差 $\frac{r_N}{100} (\frac{P_N}{P}-1)$	極限支持力 P <sub>o</sub> (kN)	偏差 $\frac{r_o}{100} (\frac{P_o}{P}-1)$
1	7500	93.3	7467	-0.44	7368	-1.76
2	3400	94.1	3405	0.15	3583	5.38
3	2200	90.9	2100	-4.54	2076	-5.63
4	3300	90.9	3296	-0.13	3106	-5.89
5	4800	99.0	4419	-7.94	4845	0.93
5	4800	93.8	4280	-10.84	4572	-4.75
6	3000	91.7	3209	6.95	3089	2.98
7	3000	96.7	3055	1.83	2987	-0.43
7	3000	93.3	3066	2.21	2894	-3.54
7	3000	90.0	3032	1.07	2940	-2.01
8	3100	96.8	3151	1.65	3072	-0.91
8	3100	93.5	3346	7.95	3275	5.64
9	3000	91.7	2819	-6.04	2888	-3.75
10	2500	90.0	2258	-9.66	2354	-5.83
11	3500	91.4	3400	-2.87	4303	22.93
12	4500	93.3	4560	1.33	4662	3.60
1	7500	86.7	7706	2.75	7717	2.89
1	7500	80.0	8106	8.08	9837	31.16
2	3400	82.4	3959	16.44	303939	8839.39
3	2200	81.8	2088	-5.11	1849	-15.95
5	4800	88.5	4160	-13.34	4389	-8.57
5	4800	83.3	4519	-5.85	4080	-15.01
6	3000	83.3	3344	11.45	3430	14.35
7	3000	83.3	3104	3.47	2908	-3.06
9	3000	83.3	2750	-8.32	2867	-4.45
10	2500	80.0	2078	-16.89	2411	-3.54
11	3500	80.0	3088	-11.78	3919	11.98
13	5600	89.3	5087	-9.16	11573	106.66
13	5600	80.4	4761	-14.99	8871	58.41
14	550	81.8	525	-4.55	523	-4.95
15	1800	88.9	1472	-18.21	1500	-16.67
16	3200	87.5	2814	-12.07	2849	-10.97
17	2500	80.0	2465	-1.40	3603	44.12
18	3350	89.6	2997	-10.55	3061	-8.64
19	2700	88.9	2794	3.47	8308	207.71
1	7500	73.3	7442	-0.77	9090	21.20
2	3400	70.6	3615	6.31	99874	2837.48
3	2200	72.7	2953	34.23	1768	-19.65
4	3300	72.7	4534	37.40	480278	14453.86
5	4800	78.1	3963	-17.44	4119	-14.18
5	4800	72.9	3863	-19.52	3731	-22.28
6	3000	75.0	3326	10.86	3834	27.79
7	3000	75.0	3094	3.15	2582	-13.94
9	3000	75.0	2633	-12.23	2481	-17.32
12	4500	77.8	4590	2.00	3923	-12.82
13	5600	71.4	4200	-25.00	7380	31.78
15	1800	77.8	1410	-21.66	1400	-22.22
16	3200	75.0	2919	-8.79	2666	-16.69
18	3350	71.6	2798	-16.48	3177	-5.17
19	2700	77.8	2935	8.72	10145	275.74
1	7500	66.7	7187	-4.17	8146	8.62
1	7500	60.0	7357	-1.91	10890	45.19
5	4800	67.7	3858	-19.63	3490	-27.30
5	4800	62.5	3984	-17.00	3407	-29.01
6	3000	66.7	3193	6.45	3713	23.77
7	3000	66.7	2897	-3.45	2340	-22.00
9	3000	66.7	3419	13.96	10390	246.33
11	3500	68.6	2770	-20.85	2515	-28.14
12	4500	62.2	6815	51.44	11363	152.52
13	5600	62.5	3847	-31.30	7013	25.23
19	2700	66.7	2574	-4.67	7996	196.14
1	7500	53.3	6369	-15.08	8446	12.61
1	7500	46.7	5797	-22.71	5629	-24.94
1	7500	40.0	5912	-21.17	6025	-19.66
2	3400	58.8	2216	-34.83	35637	948.16
2	3400	47.1	1818	-46.52	1694	-50.16
5	4800	57.3	4835	0.73	323331	6636.06
5	4800	52.1	4167	-13.19	234373	4782.77
5	4800	46.9	3442	-28.28	145278	2926.63
5	4800	46.9	2744	-42.84	32086	568.46
7	3000	58.3	4123	37.44	7989	166.30
7	3000	50.0	4031	34.37	115019	3733.97
13	5600	53.6	3047	-45.59	5824	4.01
13	5600	44.6	2557	-54.34	2540	-54.65
14	550	54.5	626	13.78	80464	14529.85
19	2700	55.6	1665	-38.33	2447	-9.38

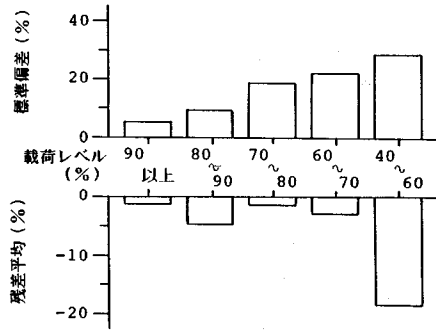


図-3 荷重レベルによる推定極限支持力値の残差の平均値と標準偏差

以下であることは注目に値する。すなわち、降伏荷重付近まで荷重するならば、提案法は工学的にみて精度のよい推定極限支持力値を与えると結論される。なお、表-1の宇都法の解析では、使用実測データを非線形回帰して求めたパラメーター ( $P_u$ ,  $d_s$ ,  $m$ ,  $P'_u$ ) を用い推定した極限支持力値を示しているが、実測値に比べ、総じて非常に大きな推定値を与えている。文献5)によれば、宇都法の場合、工学的にみてあまりに大きな極限支持力を推定しそうなときなどには修正が加えられるようであるが、この修正法が必ずしも客観的一般性を有しているように思えないので修正を加えることができなかった。

### 3. 統計解析に基づく静的支持力式決定法の提案

#### (1) 諸官公庁、学協会の静的支持力式

本節では、諸官公庁、学協会の静的支持力式として、[道路橋示方書・同解説]<sup>10)</sup>に準拠する式(以下道路橋式と呼称)、[国鉄建造物設計標準解説]<sup>11)</sup>に準拠する式(同国鉄式)、[建築基礎構造設計指針]<sup>12)</sup>に準拠する式(同建築学会式)、[港湾の施設の技術上の基準・同解説]<sup>13)</sup>に準拠する式(同港湾式)を取り上げる。これらを列記すると以下のようである。

##### a) 道路橋式

$$(L/D) \leq 5$$

$$P_u = 6(L/D) \bar{N}_p A_p + 0.2 \sum N_s l_s U + 1.0 \sum N_c l_c U$$

$$(L/D) > 5$$

$$P_u = 30 \bar{N}_p A_p + 0.2 \sum N_s l_s U + 1.0 \sum N_c l_c U$$

$$0.2 N_s \leq 10, 1.0 N_c \leq 15$$

.....(8)

ここに、 $L$ ,  $D$ ,  $A_p$ ,  $U$  は、それぞれ支持層への根入れ長さ、杭径、杭の先端閉塞断面積および杭周長を、 $N_p$ ,  $N_s$ ,  $N_c$  は、支持層、砂層および粘土層の平均  $N$  値を、また、 $l_s$ ,  $l_c$  は、砂層および粘土層の層厚を示す。なお、以下の各式においても同じ記号はこれらと同内容を示

す。

##### b) 国鉄式

$$D < 0.8 \text{ m}$$

$$(L/D) \leq 5$$

$$P_u = 5(L/D) \bar{N}_p A_p + 0.2 \sum N_s l_s U + 1.0 \sum N_c l_c U$$

$$(L/D) > 5$$

$$P_u = 25 \bar{N}_p A_p + 0.2 \sum N_s l_s U + 1.0 \sum N_c l_c U$$

$$D \geq 0.8 \text{ m}$$

$$(L/D) \leq 5$$

$$P_u = 4(L/D^2) \bar{N}_p A_p + 0.2 \sum N_s l_s U + 1.0 \sum N_c l_c U$$

$$(L/D) > 5$$

$$P_u = 20/D \bar{N}_p A_p + 0.2 \sum N_s l_s U + 1.0 \sum N_c l_c U$$

$$0.2 N_s \leq 10, 1.0 N_c \leq 10$$

.....(9)

##### c) 建築学会式

$$P_u = 30 \eta \bar{N}_p A_p + (1/3) \sum N_s l_s U + 0.5 \sum N_c l_c U$$

$$2 \leq L/D_1 \leq 5 \quad \eta = 0.16(L/D_1)$$

$$L/D_1 > 5 \quad \eta = 0.8$$

.....(10)

ここに  $D_1$  は杭の内径を示している。

##### d) 港湾式

$$P_u = 40 \alpha \bar{N}_p A_p + 0.2 \sum N_s l_s U + \sum c_a l_c U \text{ .....(11)}$$

ここに  $\alpha$ ,  $c_a$  は開端杭の閉塞効果に関する低減率および粘土層における土と杭の間の付着力である。

式(8)~(11)は、いずれも先端解放の鋼管杭を対象としたものだが、必ずしも、これらの式が示方書等にこの形で記されているわけではない。たとえば建築学会式では、粘土層の周面摩擦力の算定には、一般に、一軸圧縮強さの1/2を用いるべきであるとされている(式(10)の第3項の係数は文献14)による)。また、以下の解析で用いた荷重試験杭の直径が、これらの支持力式がその適用を指定している範囲外の場合もある。このように、詳細な点には若干問題があるが、統計的には大きな推定誤差を生じないことを別に確かめた。そのうえで、これらを実用的支持力算定式と考えて、収集したすべての荷重試験杭に関して上式を適用し、以下の解析を行う。なお、式(8)~(11)は、いずれも、第1項が杭の先端支持力、第2項が砂層の周面摩擦力、第3項が粘土層の周面摩擦力を表わしている。

#### (2) 統計解析に基づく新しい静的支持力式決定法

式(8)~(11)は、次式で一般化できる。

$$P_u = a_1 \bar{N}_p A_p + a_2 \sum N_s l_s U + a_3 \sum N_c l_c U \text{ .....(12)}$$

ここに係数  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  の値は、諸官公庁、学協会それぞれ独自に与えられている。たとえば、道路橋式では以下のように決定されている。

杭体の軸力分布が測定されている荷重試験結果から、まず砂層と粘土層の周面摩擦力を算定する。次に、砂質

土と粘性土とに分離された周面摩擦力と  $N$  値との関係が線形的に比例関係で近似される。式 (8) 中の第 2 項の係数 0.2 および第 3 項の係数 1.0 はこれらの比例係数である。以上のように、周面摩擦力に関する係数 (本論文では摩擦係数とよぶ) が特定の限られたデータから決定される。一般の載荷試験では先端支持力と周面摩擦力を分離測定することは難しいので、載荷試験結果として得られた極限支持力値から、先の係数を用いた周面摩擦力の計算値を減じることによって先端支持力値が計算される。この値から杭径や根入れに関係した先端支持力に関する係数 (式 (8) では、 $6(L/D)$  および 30) が決定されるのである。

これからもわかるように、従来の静的支持力式の決定は、式 (12) 中の係数  $a_1, a_2, a_3$  を決定することに帰着する。諸官公庁、学協会の提案式が長年の経験と実績および論理的考察に基づいていることは論を待たないのであり、これら各式の基本形式を尊重すべきは当然である。この観点から、係数  $a_1, a_2, a_3$  の決定に中心をおいて検討する。方法論としては、次式の最小化により係数を決定する手法を用いる。

$$S_p = \sum_{i=1}^n (P_{ui} - \hat{P}_{ui})^2$$

$$= \sum_{i=1}^n (P_{ui} - \hat{a}_1 \bar{N}_{\rho_i} A_{\rho_i} - \hat{a}_2 \sum N_{s_i} l_{s_i} U_i$$

$$- \hat{a}_3 \sum N_{c_i} l_{c_i} U_i)^2 \dots \dots \dots (13)$$

ただし、式 (12) 中の  $a_1, a_2, a_3$  は、物理的条件として以下の条件を満たさねばならない。

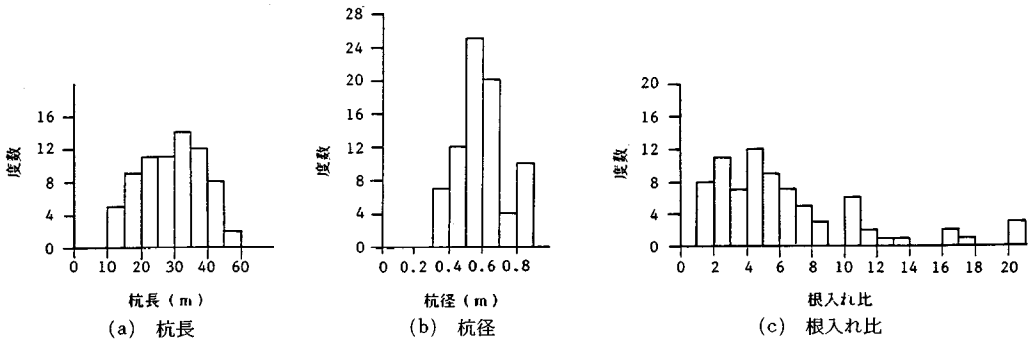
$$\left. \begin{aligned} \hat{a}_1 \geq 0, \hat{a}_2 \geq 0, \hat{a}_3 \geq 0 \\ \hat{a}_3 \geq \hat{a}_2 \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (14)$$

換言すると、式 (14) の線形不等式の制約条件のもとで、式 (13) に示す非線形な目的関数を最小化する非線形計画問題に帰着できる。

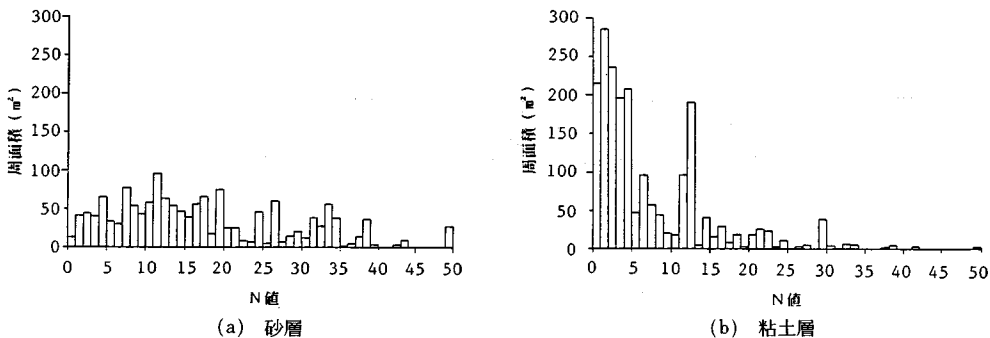
(3) 静的支持力式の分析および検討

a) 用いた載荷試験データ

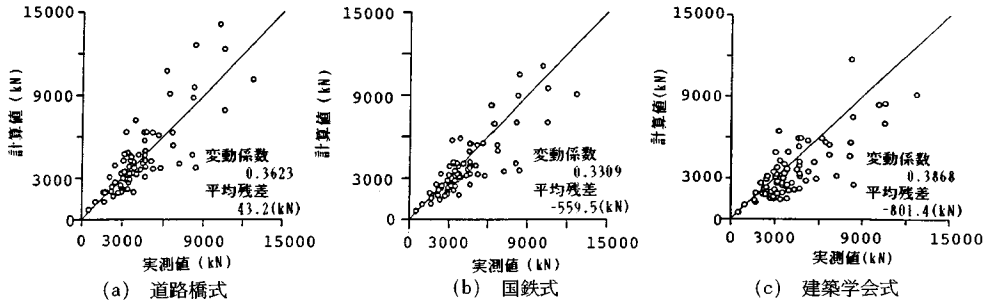
種々の解析結果を示す前に、用いた載荷試験データその他準備的事項に触れておく必要がある。地盤情報としては、それ以外の計測値がほとんどないこともあって、 $N$  値の深さ方向への分布と地層構成図のみである。図一4に、解析に用いた杭の形状を度数分布の形で示す。杭長としては 10~60 m の範囲で 30 m 前後のものが多く、杭径は約 300~800 mm の範囲で 600 mm 前後のものが多く、支持層への根入れ比 (根入れ長さ/杭径) は 2~6 程度のものが多く、幅は広い。地表面から杭を打止める支持層までに存在する砂層および粘土層の平均  $N$  値を杭周面積の分布として示したのが図一5である。図からわかるようにばらつきは大きい、砂層の  $N$  値  $N_s$  は 2~20 程度の場合が多い。また、粘土層



図一4 解析に用いた杭の形状等 (データ数 78 個)



図一5 周面摩擦にかかわる  $N$  値と杭周面積



図—6 実測値と現行支持力式による計算値の比較（データ数78個）

の  $N$  値である  $N_c$  は 1~10 の範囲のものが多いが、15 以上の場合もある。柱状図によると、これらは固結粘土、固結シルト、土丹などである。なお、ここで杭周面積を用いたのは以下の理由による。 $N$  値は通常 30 cm ごとに測定されるが、式 (8)~(12) からわかるように、支持力値や  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$  の決定に影響するのは測定される  $N$  値の出現回数ではなく、これに杭の周面積を乗じた値だからである。

b) 現行の支持力式の検討

(1) で代表的な静的支持力式を説明したが、式 (11) の港湾式では先端支持力に関する低減率  $\alpha$  の具体値が明らかでないので以下の解析の対象から外す。図—6 は、78 個の全載荷試験データを用いて、現行式による計算値と実測値を比較したものである。図からわかるように、いずれの式も比較的よい精度を有しているが、詳細は図中に併記した残差の平均値（平均残差）と変動係数をみてもみる必要がある。道路橋式の平均残差は 3 者のうち最も小さく、変動係数値にも現われているように個々のケースのばらつきはやや大きい。平均的には中庸の値を与える。これに対し、建築学会式の平均残差は -801.4 (kN) となっており、図からもわかるように、この式は設計上かなり安全側の値を与える。しかし、中小規模の建物を比較的小さい建築事務所において大きな間違いを起こさず設計しなければならない建築分野の実情を勘案すれば、必ずしも不当とはいえない。国鉄式も平均残差はマイナスで全般に安全側にあるが、変動係数は 0.331 であり、この意味で精度的には国鉄式が最も高く、道路橋式、建築学会式の順の結果となった。

c) 提案法による数値計算例

本論文で提案しようとする静的支持力式は地盤情報も含め、各種データがよく整った多数の載荷試験結果を統計的に解析することによって得ようとするものである。解析および検討は次の項目ごとに、順を追って進める。すなわち、①  $N$  値大の粘土層の周面摩擦に関する係数の決定法、② 根入れ比が先端支持力の係数  $a_1$  に与える影響、③ 杭径が先端支持力の係数  $a_1$  に与える影響、④

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。

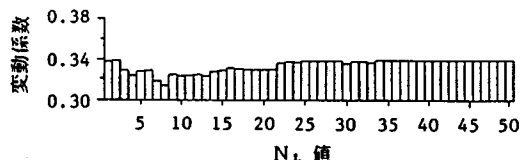
①  $N$  値大の粘土層の周面摩擦に関する係数の決定

式 (12) の極限支持力は、先端支持力、砂層および粘土層における周面摩擦力の和として 3 つの項で表わされる。ところで、図—5 に示したように、粘土層にも  $N$  値が 15 を越えるような、過圧密度が非常に高いと考えられる層がある。式 (8)、(9) にみられるように、現行式においても周面摩擦に関する粘土層の  $N$  値には、式中に示すような適用限界を設けているが、これは妥当である。すなわち、このような粘土では、 $N$  値の小さな正規圧密粘土層や若干過圧密された層とは力学特性、特にせん断特性が非常に異なるから、当然、摩擦係数も同一規範では扱えないと考えるのが正当である。本研究では粘土層の種類をある値の  $N$  値 ( $N_L$ ) によって 2 つに区分けし、それぞれに、別の係数を用いることとする。式で表わすと以下のようである。

$$P_u = a_1 \bar{N}_p A_p + a_2 \sum N_s l_s U + a_3' \sum N_c' l_c U + a_3'' \sum N_c'' l_c U \quad \left. \vphantom{P_u} \right\} \dots (15)$$

$(N_c' \leq N_L, N_c'' > N_L)$

ここに  $a_3'$ 、 $a_3''$  は、それぞれ、 $N_L$  以下の平均  $N$  値を示す粘土層、および  $N_L$  より大きな平均  $N$  値を示す粘土層に関する周面摩擦力の係数である。 $N_L$  の値は、粘土の力学に関するこれまでの経験に基づけば 10 前後と考えられる。しかし、 $N$  値自身が室内土質試験のような精度を有しないことを考慮して、ここでは  $N_L$  を 1 から 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を取る。図—7 はその結果である。この図は、各  $N_L$  値で粘土層



図—7 粘土層分類のための  $N_L$  と式の精度

表一 係数  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$ ,  $a_3'$  の計算結果

係数 $a_1$	係数 $a_2$	係数 $a_3$	係数 $a_3'$	変動係数	データ数
30.52	0.153	1.172	0.381	0.3197	78

を2つに区分して定めた  $a_3'$ ,  $a_3''$  を式 (15) に適用した支持力値を実測値と比較して求めたものである。図から、 $N_L=8$  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、 $N_L$  として8を採用することにするが、これは粘土の力学の経験に照らして妥当である。

表一に、 $N_L=8$  とした場合の係数  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$ ,  $a_3'$  の値と支持力値に関する変動係数を示す。表で注目すべきは、非線形計画問題として定式化した提案法により算定した各係数が、現行の各静的支持力式に採用されている値と大差ないことである。ただし、 $a_1$  は根入れ比や杭径に大きく影響されると考えられるので、表一に基づき  $a_2$ ,  $a_3$ ,  $a_3'$  をそれぞれ、0.15, 1.17, 0.38 に固定

表二 根入れ比別の  $a_1$  の計算結果

根入れ比	杭径 (mm) 318.5 ~ 711.2		杭径 (mm) 800.0 ~ 812.8	
	係数 $a_1$	データ数	係数 $a_1$	データ数
~ 1.0	-	0	-	0
1.0 ~ 2.0	31.87	7	10.50	1
2.0 ~ 3.0	0.1267	-	-	-
3.0 ~ 4.0	15.61	8	10.49	3
4.0 ~ 5.0	0.3117	-	0.3268	-
5.0 ~ 6.0	24.29	5	33.09	2
6.0 ~ 7.0	0.0667	-	0.2087	-
7.0 ~ 8.0	33.21	12	-	0
8.0 ~ 9.0	0.2587	-	-	-
9.0 ~ 10.0	38.06	7	44.67	2
10.0 ~	0.1816	-	0.1862	-
~ 1.0	34.09	7	-	0
1.0 ~ 2.0	0.2761	-	-	-
2.0 ~ 3.0	43.62	4	25.99	1
3.0 ~ 4.0	0.1202	-	-	-
4.0 ~ 5.0	92.18	2	35.93	1
5.0 ~ 6.0	0.1619	-	-	-
6.0 ~ 7.0	-	0	-	0
7.0 ~ 8.0	-	-	-	-
8.0 ~ 9.0	32.03	16	-	0
9.0 ~ 10.0	0.2871	-	-	-

したうえで、 $a_1$  についての検討をさらに深める。

② 根入れ比が先端支持力の係数  $a_1$  に与える影響

表一は、載荷試験杭をその杭径 800 mm で区分し、根入れ比別にまとめたデータから計算された  $a_1$  の値、支持力値に関する変動係数、データ数を示している。800 mm 以上の径をもつ杭を別にした理由は、この種の大口径の杭の先端支持力は一般に閉塞効果の影響が大きく、諸官公庁や学協会等の静的支持力式においても対象外、あるいは別の式 (国鉄式の場合) を設けているためである。

表二にみられるように、一般に根入れ比が小さいときには  $a_1$  値は小さい。ただし、杭径 711.2 mm 以下で、根入れ比が2以下の場合にだけ特別に大きな値を示している。これは、施工に際し、支持層に深く根入れをするまでに先端地盤が十分な抵抗を示したため止められたものと推測されるが、理由を記した正確な記録はない。現行各式の適用においても、この種の杭は十分根入れされた場合とみなして計算しなおすと (たとえば道路橋式の場合、 $a_1$  として  $6(L/D)$  ではなく 30 を用いる)、各式の精度は、表一のように、図一と比較してわずかながらよくなる。以上の結果から、係数  $a_1$  に関しては、根入れ比2以下の場合、2~3, 3~4, 4以上の4つの範囲に分けて別個に求めるのがよいと考えられる。結果は次の検討に含めて示す。

③ 杭径が先端支持力の係数  $a_1$  に与える影響

表二は、根入れ比で4つに区分し、さらに各杭径別に求めた  $a_1$  の値、支持力値に関する変動係数、データ数を示している。なお、杭径 800 mm 以上の大口径杭に関しても一応の計算を行っているが、前述の閉塞効果の問題があることに加え、載荷試験データが現時点ではきわめて少ないので、ここに提案する式の適用限界は 711.2 mm までのものとする。したがって、以下の解析は杭径 711.2 mm 以下のデータのみを用いて行う。た

表三 根入れ比2以下の先端支持力の係数を変更した場合

	道路橋式	国鉄式	建築学会式
変動係数	0.3615	0.3259	0.3858

表四 杭径別の  $a_1$  の計算結果

根入れ比	杭径 (mm) 318.5 ~ 355.6		杭径 (mm) 400.0 ~ 485.0		杭径 (mm) 500.0 ~ 508.0		杭径 (mm) 600.0 ~ 660.4		杭径 (mm) 700.0 ~ 711.2		杭径 (mm) 800.0 ~ 812.8	
	係数	データ数	係数	データ数	係数	データ数	係数	データ数	係数	データ数	係数	データ数
~ 2.0	-	0	26.96	3	32.12	3	49.47	1	-	0	10.50	1
2.0 ~ 3.0	-	0	0.1667	-	0.0198	-	-	-	-	-	-	-
3.0 ~ 4.0	-	0	19.51	2	10.14	3	17.51	3	-	0	10.49	3
4.0 ~	-	0	0.1428	-	0.2753	-	0.4146	-	-	-	0.3268	-
~ 2.0	-	0	22.80	1	26.81	1	18.77	1	26.33	2	33.09	2
2.0 ~ 3.0	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0150	-	0.2087	-
3.0 ~ 4.0	50.37	7	27.34	6	39.71	18	35.44	15	27.46	2	39.93	4
4.0 ~	0.2394	-	0.1285	-	0.1971	-	0.3657	-	0.1293	-	0.1735	-

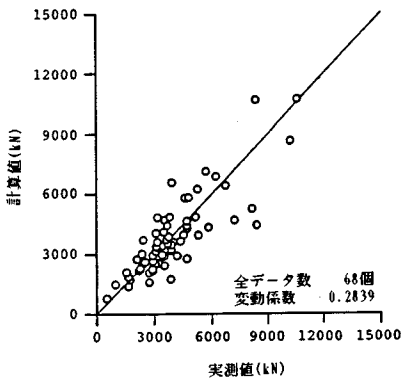


表一六 杭径 711.2 mm 以下のデータによる再計算

$N_L$ の超過値	係数 $a_2$	係数 $a_3'$	係数 $a_3''$	データ数
8	0.148	1.184	0.382	68

表一七 根入れ比別の  $a_1$  の計算結果

根入れ比	杭径 (mm) 318.5 ~ 711.2		
	係数 $a_1$	変動係数	データ数
~ 2.0	31.81	0.1265	7
2.0 ~ 3.0	15.55	0.3115	8
3.0 ~ 4.0	24.18	0.0657	5
4.0 ~	34.94	0.2952	48



図一八 実測値と提案法による計算値の比較

だし、この場合でも、これまでの  $N_L$ 、 $a_2$ 、 $a_3'$ 、 $a_3''$  の計算結果は、表一六に示すとおりであり、ほとんど変わらない。以下、 $N_L$ 、 $a_2$ 、 $a_3'$ 、 $a_3''$  の値をそれぞれ、0.15、1.18、0.38として解析をすすめる。また、表一五の結果によれば、杭径 300 mm クラスのものは閉塞効果が十分に発揮されるものと考えられ、比較的大きな係数値を示しているが、やはり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。

④ 実務設計に用いるための各係数の有効な桁数

表一七は、以上のような区分けをして求めた  $a_1$  値とそのときの変動係数、データ数を示したものである。さらに、図一八はこれらの値を式 (15) 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、図一六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、実用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 (0.285) によって示したように図一八と比較してほとんど落ちず、実用的にはこれで十分である。新しく提案する実用式を以下に示す。

表一八 実用式の係数値

根入れ比	係数 $a_1$	根入れ比	係数 $a_1$
~ 2.0	32.0	3.0 ~ 4.0	24.0
2.0 ~ 3.0	16.0	4.0 ~	35.0
係数 $a_2$		係数 $a_3'$	
0.15		1.20	
変動係数		0.2847	
		データ数	68

$D \leq 711.2$  mm

$$P_u = a_1 \bar{N}_p A_p + 0.15 \sum N_s l_s U + 1.20 \sum N'_c l_c U + 0.40 \sum N'_c l_c U$$

$L/D \leq 2$   $a_1 = 32$  (打止め時に十分な先端支持力が確認された場合)

$2 < L/D \leq 3$   $a_1 = 16$

$3 < L/D \leq 4$   $a_1 = 24$

$L/D > 4$   $a_1 = 35$

( $N'_c \leq 8$ ,  $N'_c > 8$ )

.....(16)

4. おわりに

本論文は、載荷試験結果に基づく極限支持力推定法と統計解析に基づいた静的支持力式決定法とを提案したものである。主な結果は、以下のとおりである。

(1) 既往の極限支持力推定法の検討をもとに、杭頭での荷重~沈下量に加え、残留沈下量データをも利用した新しい、精度の高い支持力推定法を提案した。

(2) 先端支持力と周面摩擦が分離されていない数多くの載荷試験結果を統計的に解析することによって、その分離を可能とするような新しい静的支持力式決定法を提示し、その工学的有用性を従来法との精度の比較によって確かめた。

なお、実務設計を行う場合は、まず載荷試験実施の有用性の検討、次いで実施する場合には載荷試験の規模や載荷レベルの検討が必要である。これらは設計の対象となる構造物の重要性と密接に関係するが、その評価法および決定法に関しては別の論文で報告したい。

本研究の遂行にあたり、徳島大学助教授 鈴木 壽博士に有益なご助言とご助力を、また載荷試験データの収集に関し、名城大学教授 堀内孝英博士および川崎製鉄株式会社の関係各位に多大のご協力を頂きました。ここに付記し、深甚の謝意を表わします。

参考文献

- 1) 土質工学会編：クイの鉛直載荷試験基準・同解説、1977.
- 2) 土質工学会編：杭基礎の設計法とその解説、1985.
- 3) Van der Veen, C. : The Bearing Capacity of a Pile, Proc. 3rd ICSMFE, Vol. 2, pp. 84~90, 1953.
- 4) 宇都一馬・冬木 衛・近藤 博・桜井 学：クイの載荷

- 試験結果の一整理法, 第 13 回土質工学研究発表会講演集, pp. 813~816, 1978.
- 5) 浅沼秀弥・宇都一馬・冬木 衛・桜井 学：杭の  $P\sim S$  曲線のパターン分類について, 第 17 回土質工学研究発表会講演集, pp. 2085~2088, 1982.
  - 6) 宇都一馬・冬木 衛・桜井 学：指数関数係の回帰式について, 第 18 回土質工学研究発表会講演集, pp. 935~936, 1983.
  - 7) 宇都一馬・冬木 衛・桜井 学：載荷試験から得られる荷重～変位曲線の非線形回帰計算について (その 3), 土木学会第 38 回年次学術講演会講演概要集, 第 III 部門, pp. 607~608, 1983.
  - 8) 吉成元伸：載荷試験から支持力を推定するうえでの問題点, 土と基礎, Vol. 23-7, pp. 27~33, 1975.
  - 9) 松尾 稔・鈴木 壽・金 聲漢：荷重～沈下量曲線と残留沈下量曲線を用いた極限支持力推定法の提案, 第 22 回土質工学研究発表会講演集, pp. 1165~1166, 1987.
  - 10) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説, IV 下部構造編, 1987. 5.
  - 11) 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.
  - 12) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針, 1988 年 1 月.
  - 13) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説, 1979.
  - 14) 土質工学会編：構造物基礎の設計計算演習, pp. 111~139, 1982.
  - 15) 松尾 稔・鈴木 壽・菅井 径世：統計解析に基づいた静的支持力式決定法の提案, 土木学会第 42 回年次学術講演会講演概要集, 第 III 部門, pp. 708~709, 1987.
- (1988. 11. 14・受付)
-