

◆ 報文 ◆

載荷試験データの数とばらつきを考慮した杭の鉛直支持力推定式

白戸真大* 福井次郎** 西谷雅弘***

1. はじめに

現在、土木構造物の設計を取り巻く環境は大きく変化しており、従来に比較して、新技術を積極的に活用し、より合理的な設計を行おうとする動きが活発になってきている。橋梁基礎の分野においても、最も使用頻度が高い杭基礎を中心に、新工法の開発が積極的に行われている。

道路橋示方書では、杭の支持力の算定は、載荷試験によるか、または、支持力推定式によるものとされているが、新工法の普及促進のためには、載荷試験を行わずとも、支持力推定式により、ある程度の精度で支持力を推定できることがよい。

道路橋示方書の支持力推定式は、載荷試験データと地盤調査結果を関係づける実験式であるが、これまでの経緯を見ると、実績の少ない工法では載荷試験データの下限値に近い値であり、一方、実績が多い工法では載荷試験データの平均値に近い値になっている^{1),2)}。このように、支持力推定式は、工法の実績や技術的な熟度、また載荷試験データのばらつきなどが経験的に考慮されたものであるが、その根拠が明確でない。

また、推定式の適用にあたって現在は、より精度の良い地盤調査を行い、必要なパラメータを精度良く求め、精度の良い支持力推定式を作成した場合であっても、安全率を変えられる体系になつておらず、精度の差が設計に反映されない。

そこで、本報文では、確率・統計を用いて、載荷試験データ数やデータの持つばらつきを反映させて杭基礎の鉛直支持力推定式を作成する方法を提案する。

ここで提案する方法では、載荷試験データのばらつきは、地盤調査から得られるパラメータ（以後、「地盤パラメータ」という）の評価に伴うばらつきとして取り扱うものとする。地盤パラメータとは、たとえば標準貫入試験ではN値である。

なお、施工法による地盤の乱れ、ゆるみなどは、同じデータ数から支持力推定式が作成された場合には、その推定式自体に反映されることになる。

最後に、提案した方法を実務に適用するための課題を整理して、実務において必要と考えられる事項をまとめるものとする。

2. 杭の支持力推定式と安全係数

杭の極限支持力 R_u は、一般に、次式のように極限先端支持力 R_{pu} と最大周面摩擦力 R_{su} の和として評価される。

$$R_u = R_{pu} + R_{su} = q_d A + \sum f_i U_i L_i \quad (1)$$

ここで、 q_d は先端の極限支持力度、 A は杭先端の断面積、 f_i は各土層の最大周面摩擦力度（以降、単に f と表現）、 U_i 、 L_i は各土層における杭周長と杭長である。

q_d と f は、地盤条件だけでなく、施工法にも依存するため、道路橋示方書では、塑性力学に基づく理論解³⁾ではなく、地盤パラメータとの相関を用い、 $y = ax$ の形で評価している。この相関式が支持力推定式と呼ばれるものであり、 y は先端支持力度 q_d または最大周面摩擦力度 f 、 x は地盤パラメータ、 a が比例係数である。これまでには、必要最小限の地盤調査である標準貫入試験結果のN値との相関を探ることが多かったが、粘性土の場合など、他の地盤パラメーターの方が良いこともある。

比例係数 a の決定は、現在の設計基準では、載荷試験データの数やばらつき、設計基準における安全率などを総合的に判断し、経験的に決定されている。これを、統計的に扱うとすれば、線形回帰式は $y = a'x + \varepsilon$ となる。ここに、 a' は回帰係数、 ε は回帰誤差である。しかし、これを設計に用いるには、これまで経験的に扱つて来たように、さらに、「載荷試験データのばらつき」と、「載荷試験データ数」による影響が考慮される必要がある。

すなわち、「載荷試験データのばらつき」の考慮については、支持力推定式の回帰誤差 ϵ を考慮し、安全率や安全係数を設定することになる。また、「載荷試験データ数」の考慮については、計測値からの線形回帰式により q_d や f を推定することが自動的に載荷試験データから確率モデルを推定していることになるため、確率モデルを推定する際の統計的推定誤差を考慮し、安全率や安全係数の設定をすることになる。たとえば、データ数が多い場合に母集団の確率モデルを推定すると、推定された確率モデルは平均的な値として評価されるが、データ数が少ないと偏りを持つ可能性がある。これは、得られたデータが母集団からの有限個数のサンプルであることに起因している。このように、統計的推定誤差は、データ数が多くなるにしたがい小さくなる。

以上をまとめると、例えば最大周面摩擦力度 f の設計値 f_d は、次のように表すことができる。

$$f_d = y/\gamma_0/\gamma \quad (2)$$

ここに、 y は支持力推定式、 γ_0 は統計的推定誤差を考慮する安全係数、 γ は支持力推定式の回帰誤差 ϵ を考慮する安全係数である。現在の道路橋示方書では、 γ_0 は、 y を (y/γ_0) として、前述のように実績が多い工法では平均値に、実績が少ない工法では下限値に近い値とすることで評価されており、また、 γ は安全率の中で評価されていることから、 f_d が持つ安全性として、何が、何処に、どのように考慮されているのかが明確な形ではない。

3. 載荷試験データ数を考慮した支持力推定式

載荷試験データ数が少なくなれば、支持力推定式の信頼性は落ちてくる。そのことを示すために、ここでは、一般的な在来工法である場所打ちコンクリート杭 (CCP) と打込み鋼管杭 (SPP) の載荷試験から得られた最大周面摩擦力度 f と地盤の N 値を対象に次のような検討を行ってみる。

(1) 載荷試験データ m 個より、確率分布を f と N 値の 2 变量正規確率分布として、最尤法に従い母集団の確率モデルを推定する。確率モデルの推定に必要な回帰分析結果を表-1 に、例として砂質土における SPP の載荷試験データの分布を図-1 に示す。

(2) 表-1 の結果を用いた確率モデルから乱数で

$f \sim N$ 関係を z 個発生させる。すなわち、擬似的に z 個の載荷試験データを得る。

- (3) 擬似載荷試験データ z 個より回帰式 $f = a'_z N$ を算定する。
- (4) 2., 3. を n 回行う。ここでは、 $n = 1000$ とした。したがって、1000 個の回帰係数 a'_z が求まる。
- (5) n 個の a'_z の度数分布より、線形回帰式の任意の信頼区間を検討する。

すなわち、この解析は、ここでは m が非常に大きいことから、 a_m を母集団の回帰係数と仮定し、載荷試験データ数が m より少ない z 個のときの回帰係数 a_z が、 a'_m に対してどの程度ばらつく可能性があるのを調べるものである。

解析結果の一例として、図-2 に $z = 3, 5, 10$ としたときの砂質土における SPP の回帰係数 a'_z の度数分布を、図-3 に載荷試験データの回帰により求まる a'_m と、各 z において、たとえば片側 95% 信頼区間の上・下限値の a'_z を用いて支持力推定式を作成した結果を示す。また、図-3 には、確率モデルを設定する基となったデータもプロットした。図-2, 3 から、擬似載荷試験データ数が多くなると、回帰係数のばらつきが小さくなり信頼区間が狭まっていく様子がわかる。つまり、データ数の違いによる回帰式の統計的推定誤差は、データ数に依存した回帰係数の信頼区間で考慮することができる。

実際の支持力推定式の作成では、載荷試験データ自身は母集団に対するサンプルであることから、載荷試験データ数と同じサンプル数のデータの

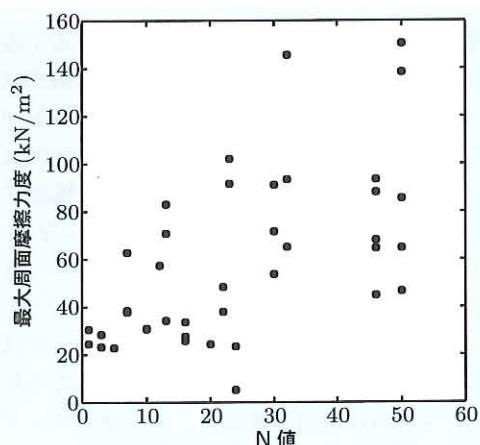


図-1 載荷試験データの分布 (SPP 砂質土)

表-1 回帰分析結果

杭種	土質	データ数	平均N値 \bar{N}	平均 f/\bar{f}	回帰係数 a_m	回帰誤差 ε	相関係数 r	変動係数 ε/f
CCP	砂質土	75	21.593	87.261	4.503	6.332	0.711	0.073
	粘性土	59	5.051	58.190	9.175	6.846	0.291	0.118
SPP	砂質土	49	24.959	61.799	2.100	4.904	0.554	0.079
	粘性土	67	8.530	46.352	3.059	5.011	0.277	0.108

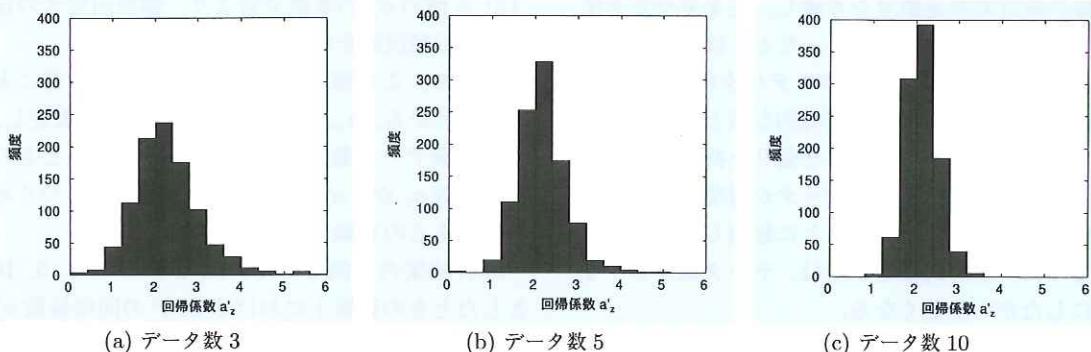


図-2 回帰係数のばらつき (SPP 砂質土)

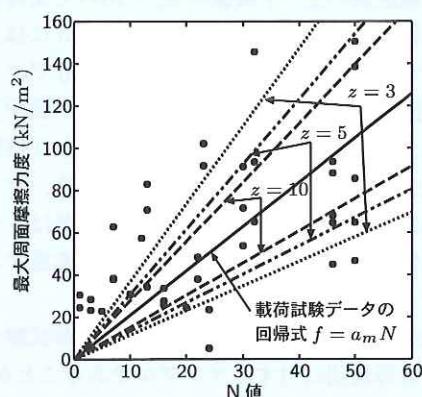


図-3 片側 95%信頼区間 (SPP 砂質土)

回帰式が母集団の回帰式に対して持ち得る不確定性を評価すればよい。したがって、擬似載荷試験データ数 z を載荷試験データ数 m として線形回帰式の任意の信頼区間（たとえば片側 95% や 90% など）を検討し、安全側の関係式を支持力推定式とすれば、式(2)の y/γ_0 に相当するものになる。

この評価方法は、統計解析の分野ではブートストラップ法⁴⁾と呼ばれるものである。ブートストラップ法とは、与えられたサンプル（ここでは載荷試験データのこと）を用いる際に、与えられたサンプルから母集団を推定し、そこからサンプルと同数の新たなサンプルを反復抽出することにより、数に依存したサンプルの偏りから生じる統計

的推定誤差を評価する手法である。

4. 載荷試験データ数による統計的推定誤差を簡便な補正係数により考慮した支持力推定式

3. で示したブートストラップ法は、汎用性のある方法だが、実務上、煩雑である。そこで、載荷試験データ数に応じた係数により、平均値の推定の偏りを一定の水準に補正する方法を考える。

表-1 の各杭種、土質で、3. で検討した手順で擬似載荷試験データ数 z における回帰係数 a_z の分布の片側 95% 信頼区間の下限値の a'' を算出し、

$$\gamma_0 \equiv a_m/a'' \quad (3)$$

なる量を求めてみる。

図-4 に、 γ_0 を算出した結果を示す。杭種に係わらず土質ごとに一定の傾向が見られ、 z が 10 以上になるとそれほど一定の値となる傾向を持っていることがわかる。ここで対象とした載荷試験結果は、いずれもデータ数が非常に多いため、算出した γ_0 は、有限個のデータより求めた回帰係数を載荷試験データ数が非常に多い場合の回帰係数 a_m と同等の信頼度を持つように補正するための係数と考えることができる。

ここで、検証のために、道路橋示方書に支持力推定式が記載されていない合成鋼管杭工法と

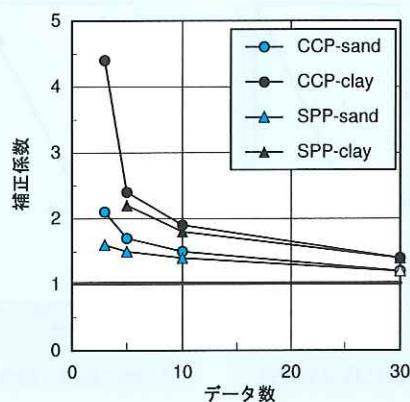


図-4 データ数による補正係数(来工法)

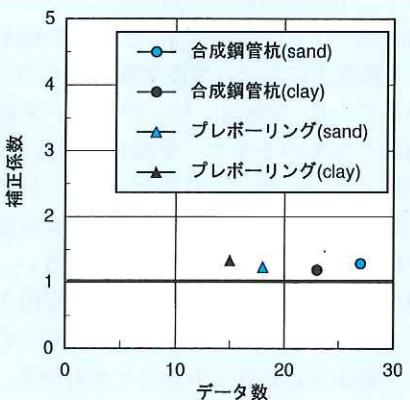


図-5 データ数による補正係数(新工法)

プレボーリング工法を対象として、擬似載荷試験データ数 z を載荷試験データ数 m としたブートストラップ法により γ_0 を算定してみた。ここに、データ数は、合成鋼管杭工法が砂質土で 27、粘性土で 23、プレボーリング工法が砂質土で 18、粘性土で 15 である。 γ_0 とデータ数の関係を図-5 に示す。補正係数は 1 に近い値となっており、これは図-4 の傾向に一致している。

図-4, 5 より、載荷試験データ数と γ_0 の関係は、 γ_0 を丸めた形で一義的に設定することが可能であると考えられ、たとえば表-3 のように設定できる。今後、データ数が少ない範囲での適用性を確認していく必要がある。

5. 載荷試験データのばらつきの考慮

ここでは、部分安全係数設計法を適用することにより、載荷試験データの数に加えて、データのばらつきを設計に反映させることを考える。

表-2 補正係数 γ_0 の標準値の例

載荷試験データ数 m	5	10	20 以上
補正係数 γ_0 (粘性土)	2.3	2.0	1.5

部分安全係数設計法を導入した場合、 f を例に取ると、載荷試験データの数と、載荷試験データ自体のばらつきの両者を考慮した設計支持力 f_d は、式(2)を書き直した次式で求められる。

$$f_d \equiv f_k / \gamma_i = f_m / \gamma_0 / \gamma_i, \quad f_k \equiv f_m / \gamma_0, \quad (4)$$

$$f_m = a_m N$$

もちろん、 f_k は、3. のブートストラップ法により算出することもできる。

杭の鉛直支持に関しては、支持力推定式の回帰誤差、すなわち載荷試験データのばらつきと、さらに杭頭作用力の算出において考慮すべき荷重のばらつきが設定されると安全性余裕を定量的に評価できるので、部分安全係数は目標とする安全性余裕に対して設定できる。

1 例として、2 次モーメント法⁵⁾により部分安全係数の設定を行う例を示す。一般に、基本変数 X_i の部分安全係数 γ_i は、限界状態に対する目標信頼性指標 β_t と、感度係数 α_i を与えれば、下式により算定することができる。

$$\gamma_i = \frac{1}{1 - \alpha_i \beta_t V_i} \quad (5)$$

ここに、 V_i は、基本変数 X_i の変動係数である。

表-3 に、目標信頼性指標 β_t を 3.0 として、周面摩擦力度 f の部分安全係数を試算した例を示す。ここでは、荷重の統計量は既往の資料から与え、地盤パラメータの統計量は標準貫入試験の N 値を対象として表-1 より与えた。また、感度係数 α_i は、数基の既存構造物のキャリブレーションから仮定したものである。

ここで重要なことは、載荷試験データのばらつき、つまり式(4)の V_i は、基づく地盤パラ

表-3 部分係数

土質	Case	α_i	V_i	γ_i
砂質土	常時	0.7	0.08	1.20
	地震時	0.5		1.14
粘性土	常時	0.7	0.12	1.34
	地震時	0.5		1.22

メータのばらつきに強く依存することである。したがって、部分安全係数の設定にあたっては、載荷試験とともに地盤調査による各種の地盤パラメータごとに支持力推定式の回帰誤差を整理することで、地盤パラメータの種別による支持力推定式の精度の差を部分安全係数に反映させられる。

6. 載荷試験数が著しく少ない場合の注意

少ない載荷試験数から支持力推定式を作成する場合には、特に、先端支持力の評価に関して検討しておく必要がある。

道路橋の設計では、良質な支持層として粘性土ではN値20以上、砂質土ではN値30以上を目安として判定している。しかし、載荷試験データ数が少ない場合には、N値が50をこえるような地盤におけるデータのみである場合も多い。この場合、たとえばN値が30程度の地盤においてもN値が50以上の地盤に対して評価した結果が適用できるか否かは明らかでない。したがって、評価においては、図-1において横軸上にデータが広がりをもって分布していることが望ましい。

7. 支持力推定式の精度向上のための課題

部分安全係数設計法では、支持力推定式の精度の向上に伴い、より合理的な設計が可能となることを示した。ここでは、支持力推定式の精度を向上させるために必要な事項を整理する。

7.1 粘性土における地盤調査方法

載荷試験データのばらつきが地盤パラメータのばらつきに強く依存することを述べたが、このことは、地盤調査による地盤パラメータの推定精度が、支持力推定式の推定精度に影響を与えることを意味する。したがって、地盤種別に応じた地盤調査方法の選定が重要である。

過去には、地盤構成を把握するために必要最小限の地盤調査として実施する標準貫入試験のN値を用いて地盤パラメータを推定することが多かった。しかし、この試験は動的な貫入試験であるため、粘性土に対しては粘性の影響から調査結果のばらつきが大きくなる。特に、軟弱な場合には、大きな打撃エネルギーを与えて貫入抵抗を得ることは妥当ではない。この他に、粘性土の強度を調べる試験として広く行われているものに一軸圧縮試験がある。

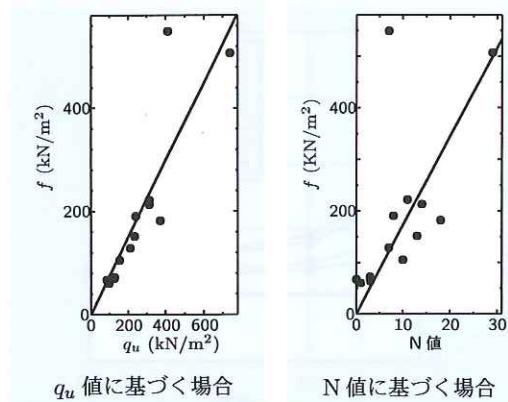


図-6 地盤調査法の違いによる載荷試験データのばらつきの違い(合成鋼管杭)

図-6に、合成鋼管杭の載荷試験データより、一軸圧縮試験による圧縮強度 q_u とN値の両者が計測された粘性土における周面摩擦力度 f のデータを集め、 f と q_u の関係、および、 f とN値の関係を整理したものを示す。実線は回帰式である。相関係数 r は、 q_u 値による場合は0.88、N値による場合は0.55で、 q_u を元にしたものはN値を元にした場合よりもばらつきがかなり小さい。一軸圧縮強度 q_u も、サンプリングなどに起因する試験結果のばらつきが大きいことはよく知られているが、N値よりは良好であることがわかる。

一軸圧縮試験に替わる簡便で安価な調査法としては、コーン貫入試験が挙げられ、粘性土における静的なコーン貫入強度のばらつきは、標準貫入試験より小さく、コーン貫入強度からの粘着力の推定も可能である^{6),7)}。また、一軸圧縮試験では試験結果のばらつきにサンプリングなどに起因するものが大きいため、一軸圧縮試験に比べてもコーン貫入試験の方が試験結果のばらつきが小さい場合も多い^{7),8)}。

したがって、杭の載荷試験の場合にはもちろん、一般に、粘性土ではコーン貫入試験や一軸圧縮試験を行い、地盤パラメータを推定することを強く推奨したい。

また、近年、地盤の強度定数を精度良く推定するため、セルフボーリング型の原位置試験方法も開発され、日本道路公団では積極的に活用を進めている⁹⁾。これも有力な調査法と考えられる。

7.2 N 値 50 以上の地盤における載荷試験データの整理

標準貫入試験においては、N値が50をこえる

場合には、調査を打ち切ることがよく行われる。そのため、載荷試験データの整理を行う際に、N値が50をこえるものは地盤条件によらずN値を50として整理している事例がほとんどである。その結果、特に先端支持力度に関しては、N値が50以上になる場合には推定支持力度も一定値とせざる得ない場合が多く、地盤条件が支持力度に反映されない。

しかし、N値が50以上の地盤であっても、換算N値により強度を評価できると考えられるため、試験結果をまとめる際には、換算N値を算出しておくことが望ましい。ここに、換算N値とは、50回打撃時の貫入量から、30cm貫入するために必要な打撃回数を逆算した値である。

8. まとめ

杭を対象に、載荷試験数を考慮して一定の安全余裕度を持たせた支持力推定式の作成方法を開発した。開発した手法は、従来、経験的に行われてきた、ともすれば安全側すぎになりがちな配慮を、確率・統計を援用することにより合理的、かつ簡便に行なうものである。また、部分安全係数設計法の導入に伴い、地盤パラメータのばらつきに応じた支持力式の推定精度を考慮して部分安全係数が設定できることを示した。最後に、今後、合理的な支持力推定式、安全係数を設定するための方策をまとめた。中でも載荷試験とともに行なう地盤調査が重要であることを示した。

現在、世界的に構造物の設計は部分安全係数設計法によることが主流であり、道路橋示方書も部分安全係数設計法を導入する改訂作業を進めている。そこでは、より合理的な設計が行なうことができるよう、部分安全係数の導入に併せて支持力推定式の見直しも検討されている。このためには多くの載荷試験、およびそれに併せて精度の高い地盤調査が必要である。ただし、ここで言う精度の高い調査とは、せいぜい粘性土において静的なコーン貫入試験を行う程度のことである。関係各位には、条件が許す限り載荷試験および総合的な地盤調査を行われるよう、お願ひしたい。

参考文献

- 1) 社団法人日本道路協会：道路橋示方書IV下部構造編、丸善、1996.
- 2) 岡原美知夫、高木章次、中谷昌一、木村嘉富：単杭の支持力と柱状体基礎の設計法に関する検討、土木研究所資料、第2919号、1991.
- 3) たとえば、土質工学会：杭基礎の設計法と解説、土質工学会、1985.
- 4) Efron, B. : Bootstrap methods: Another look at the jackknife, Annals of Statistics, Vol.7, No.1, pp.1-26, 1979.
- 5) たとえば、星谷勝、石井清：構造物の信頼性設計法、鹿島出版会、1986.
- 6) 地盤工学会：地盤調査法、1995.
- 7) 地盤工学会九州支部：限界状態設計法における調査・設計・施工、1997.
- 8) 地盤工学会：土質試験の方法と解説、第一回改訂版、2000.
- 9) 日本道路公団：設計要領、第二集、橋梁建設編、1998.

白戸真大*



独立行政法人土木研究所
構造物研究グループ
(基礎) 研究員
Masahiro SHIRATO

福井次郎**



同 構造物研究グループ
(基礎) 上席研究員
Jiro FUKUI

西谷雅弘***



同 構造物研究グループ
(基礎) 主任研究員
Masahiro NISHITANI