

# 載荷試験データの統計的処理による 杭工法別の支持力算定法

西岡 英俊\*      神田 政幸\*  
篠田 昌弘\*      舘山 勝\*\*

## A Calculation Method of Design Bearing Capacity of Piles for Several Construction Methods by Statistical Analysis of Loading Test Data Base

Hidetoshi NISHIOKA      Masayuki KODA  
Masahiro SHINODA      Masaru TATEYAMA

A design bearing capacity of piles can be calculated by the characteristic value multiplied by a resistance factor. A calculation method to obtain them from loading test data base for several different construction methods was proposed in this paper. Firstly, the formula to calculate the characteristic value by using results of ground investigation was proposed. Secondary, the resistance factor obtained from the statistical analysis of loading test results by use of the First-order reliability method was proposed. The proposed method can evaluate the difference of the effectiveness of pile construction methods with the same reliability.

キーワード：杭，載荷試験，鉛直支持力，基準支持力，地盤抵抗係数，信頼性設計法

### 1. はじめに

杭の鉛直支持力特性は、杭の施工法に大きく依存している。例えば、地盤を掘削してコンクリートを打設する場所打ち杭では、掘削時の応力開放による地盤の緩みや孔底のスライムの影響により、支持力のばらつきが大きく、ある程度変位しないと十分な反力が得られないといった特徴を有する。一方、打ち込み杭のように施工により地盤を締め固める工法では、ばらつきも小さく、小さな変位から十分な反力が発揮される。また、同じ場所打ち杭であっても先端支持杭の方が、摩擦杭よりも先端抵抗のばらつきの影響を大きく受け、初期沈下も大きくなる。杭の設計においては、このような支持力特性の違いを適切に考慮する必要がある。

1997年（平成9年）に限界状態設計法に移行した鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎構造物編<sup>2)</sup>（以下「基礎標準」と記す）では、このような工法別の支持力特性の違いを考慮した設計支持力算定式が示されている。しかしながら対象工法が場所打ち杭と打ち込み杭等の数工法に限られており、近年開発された低騒音・低振動・低環境負荷の各種新工法へ対応できないという課題があった。また、場所打ち杭については、杭の全支持力に対する先端支持力の負担比率が高い場合（先端支持杭）については設計支持力を低減するように示されているが、こ

の低減が十分ではないとの指摘<sup>3)</sup>や、他工法ではこのような低減方法が示されていないという課題もある。

本研究では、杭工法別の支持力特性の特徴や、杭の全支持力に対する先端支持力と周面摩擦力の負担比率に着目し、載荷試験データベースに基づき信頼性設計法の考え方に基づく杭工法別の設計支持力の算定方法を提案するものである。なお、本報告中では、1997年版の基礎標準およびその中で示される算定式や数値を「現行基礎標準」「現行式」「現行値」として記す。

#### 1.1 杭の設計支持力の考え方

杭の設計において、その鉛直支持力を直接計測するには大掛かりな載荷試験が必要とされるため、一般的には事前の地盤調査結果から得られた物性値（N値や粘着力度）から、経験的に求められた支持力算定式により鉛直支持力を評価して設計されることが多い。現行基礎標準においては、杭の設計鉛直支持力は、特性値に相当する基準支持力を杭径の10%の変位における支持力とし、それに部分安全係数に相当する地盤抵抗係数を乗じた式(1)～(3)により算定するものとしている。

$$R_{vd} = f_{rj} R_f^k + f_{rp} R_p^k \quad (1)$$

$$R_f^k = U \Sigma r_i l_i \quad (2)$$

$$R_p^k = q_p A_p \quad (3)$$

ここで、 $R_{vd}$ ：単杭の設計鉛直支持力、 $R_f^k$ ：単杭の最大周面支持力（の特性値）、 $R_p^k$ ：単杭の基準先端支持力（の

\* 構造物技術研究部（基礎・土構造）

\*\* 構造物技術研究部

特集：構造物技術

特性値),  $f_{fp}$ : 杭の周面支持力に対する地盤抵抗係数,  $f_{ip}$ : 杭の先端支持力に対する地盤抵抗係数,  $U$ : 杭の周長,  $r_i$ : 各土層の杭の最大周面支持力度,  $l_i$ : 各土層の厚さ,  $q_p$ : 単杭の基準先端支持力度,  $A_p$ : 杭先端面積である。なお, 各記号標記のうち上付き添え字  $k$  は, 現行基礎標準には記載されていないが, 特性値であることを明示するために本報告で追記したものである。最大周面支持力度  $r$  と基準先端支持力度  $q_p$  は, 杭工法別にN値や粘着力度からの算定式が示されている。また, 地盤抵抗係数  $f_{fp}$ ,  $f_{ip}$  は杭工法別および限界状態別に数値が示されている。この設計鉛直支持力算定式は杭の載荷試験データから最大周面支持力および基準先端支持力の算定式を求め, 限界状態別に統計的な検討を行って定められたものである<sup>4)</sup>。

本研究でも上記の設計支持力の基本的な考え方を踏襲し, 1) 特性値に相当する基準支持力の推定式と, 2) 部分安全係数に相当する地盤抵抗係数の2点について検討を行い, 新しい設計支持力の算定方法を提案する。

1.2 載荷試験データベースの概要

本研究で用いた載荷試験データベースは, 国鉄時代に収集した載荷試験事例を元に, 近年実施された載荷試験事例を追加収集したものである。その概要を表1に示す。いずれも, 日本国内において適切に施工管理された杭に対する載荷試験事例のうち, 先端沈下量および先端荷重(支持層上端または根固め部上端での軸力)を計測している事例である。杭長の大半がN値4未満の粘性土またはN値50以上の砂礫となる事例や, 他の事例に比べて杭径や杭長が大きく異なる事例は, 統計処理上の取り扱いが困難となるため対象外とした。また, 表層部分にSL材によりフリクションカットを行っている事例については, フリクションカット下端位置の軸力を杭頭荷重と読み替えて整理している。なお, 全事例で共通して得られている地盤定数は, 杭近傍で実施した標準貫入試験のN値のみである。よって載荷試験結果とN値との関係のばらつきには, 杭工法自体の不均質性に起因するばらつきのほか, N値自体の不確定性(N値自体の測定誤差や空間変動, N値と強度定数との相関のばらつきなど)の影響を含むこととなる。ただし後者は各工法で同等に影響し, 実設計においてもその影響は排除しきれないことから, 本研究ではこれらを分離せずに取り扱う。

なお, 本報告では, 各載荷試験での実測値であることを明示する場合に上付き添え字  $l$  を記すこととする。

2. 基準支持力

2.1 基準支持力の定義

異なる工法の載荷試験データから, 工法別に同等の信頼性で支持力を評価するため, 基準支持力の定義をより明確にする必要がある。本研究では, 現行の定義を元に地盤工学会基準における第2限界抵抗力の定義等を参考にし, 図1に示すように, 基準変位量を杭径(主たる軸部の径で一般には杭頭部の径)の10%とし, 杭先端変位量が基準変位量に到達した時点の先端荷重および周面荷重(杭頭荷重から先端荷重を減じた荷重)をそれぞれ, 基準先端支持力, 基準周面支持力と定義した。なお, 基準周面支持力については現行基礎標準では「最大周面支持力」と称していたが, 周面支持力は最大荷重が比較的小さい変位量で発揮され, 杭径の10%まで変位すると最大値より低下している場合もあることから, 本研究ではこのような名称・定義に改めて記す。

ここでの基準支持力は支持力の特性値に相当する。特性値の考え方については, 地盤工学会基準<sup>5)</sup>では「特性値は導出値の平均値(期待値)を原則」としている。一方, コンクリート標準<sup>6)</sup>では「特性値は適切な下限値を用いること」としており, 特性値の考え方(平均値とすべきか, 下限値とすべきか)は現状では統一されていない。本研究では, N値等の地盤定数の特性値は地盤工学会基準に倣い平均値相当とするが, これらの限られた地盤情報から推定される杭の基準支持力については, 一般的に安全側となる下限側の値を特性値として定義することとした。これは, 杭の鉛直載荷試験は計画最大荷重が試験費用に大きく影響するため, 今後, 新規工法を開発する場合などでは下限側の基準支持力から徐々に明らかになっていく場合が多いことを考慮したものである。

また, 現行基礎標準では「基準支持力の算定式」とし

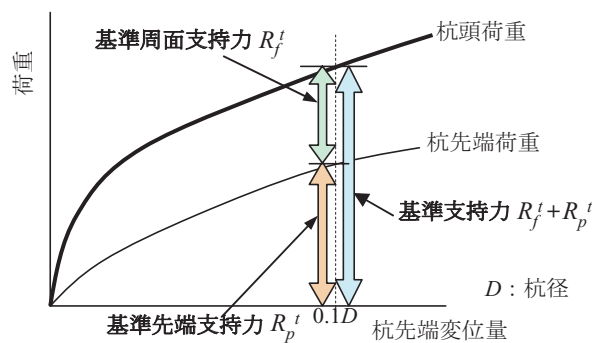


図1 基準支持力の定義

表1 載荷試験データベースの概要

杭の種別	採用数	杭径	杭長	備考(工法名)
場所打ち杭	9	0.8~1.2m	10~40m	自然泥水掘削(オールケーシング工法, リバース工法)
打ち込み杭	6	0.8~1.0m	27~87m	先端開放の鋼管杭
中掘り先端根固め杭	15	0.5~0.8m	20~68m	(NAKS工法, TN工法, TAIP工法)
プレボーリング根固め杭	11	0.35~1.0m	19~30m	杭周固定液使用(ニーディング工法, ケムン工法, RODEX工法)

ているが、本報告では、特性値としてばらつきの影響も考慮した下限側の値を推定するという意図を明確にするため、「基準支持力の推定式」と称することとした。

2.2 基準支持力の推定式の提案

基準先端支持力度  $q_p$  および基準周面支持力度  $r$  の推定式は、N値に比例する推定式(ただし上限値を有する)として提案する。具体的にはN値と  $q_p$ ,  $r$  との関係に考慮した複数の推定式を仮定し、載荷試験毎の推定値が実測値に対して統計的に安全側となることを検証しながら決定した。設計支持力の最終的な信頼性については、後述する地盤抵抗係数の設定において考慮されるため、基準支持力の推定式自体は、設計実務上の簡便性と、各工法別の特徴に応じた大小関係を重視して提案した。

表2 基準先端支持力度の推定式

杭工法	基準先端支持力度 $q_p$ (kN/m <sup>2</sup> )		
	推定式	上限値	
		砂質土	砂礫
場所打ち杭	60 N	3,500	7,500
先端開放 打ち込み杭	(28/D)(l/D)N*	8,000	12,000
中掘り先端 根固め杭	150 N	10,000	12,000
プレボーリング 根固め杭	150 N	10,000	12,000

\* D : 杭径, l/D : 換算根入れ比

表3 基準周面支持力度の推定式

杭工法	図2の 凡例	基準周面支持力度 $r$ (kN/m <sup>2</sup> )	
		砂質土	粘性土
場所打ち杭	◆	3N ≤ 150	6N ≤ 150
先端開放 打ち込み杭	▲	3N ≤ 120	6N ≤ 120
中掘り先端 根固め杭	●	1N ≤ 40	1N ≤ 40
プレボーリング 根固め杭	■	3N ≤ 150	6N ≤ 150

\* 先端付近(支持層への根入れ部または根固め部)では周面支持力度は考慮しない

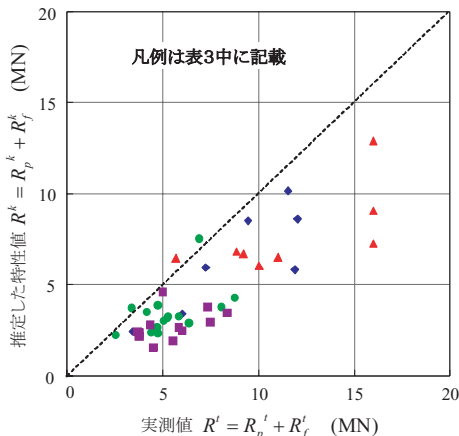


図2 基準支持力の実測値と推定値の関係

提案する各工法別の基準先端支持力度  $q_p$  および基準周面支持力度  $r$  の推定式を表2, 3に示す。また検証結果として、各載荷試験の基準支持力の実測値  $R^k$  と表2, 表3により推定した基準支持力の特性値  $R^k$  の関係を図2に示す。なお、ここでの検証には表1の事例のうち、杭先端で杭径の10%以上まで載荷した事例と、降伏点が明確で荷重～杭先端変位関係を両対数軸上で外挿した基準支持力が載荷最大荷重の1.25倍以下となる事例のみを用いた。図2より、推定した特性値の大半は実測値よりも小さく、安全側の推定式となっていることがわかる。

3. 地盤抵抗係数

3.1 信頼性設計の考え方に基づく地盤抵抗係数の導出

3.1.1 鉛直支持力の性能関数と限界状態超過確率

単杭の鉛直載荷試験において、ある限界状態(沈下量がある基準変位に達した状態)となった状態の杭先端抵抗力および杭周面抵抗力を  $R_p^i$ ,  $R_f^i$  とすると、杭頭荷重  $S$  が作用した場合の性能関数  $Z$  は、 $R_p^i$ ,  $R_f^i$ ,  $S$  を確率変数として以下のように表すことができる。

$$Z = R_p^i + R_f^i - S \tag{4}$$

一般に性能関数  $Z$  は複雑な関数となり限界状態超過確率を容易に求めることは困難である。そこで、確率変数を正規分布関数で近似し、性能関数がゼロになる点(設計点)まわりでテーラー展開して級数を1次の項で打ち切って線形化を行い、限界状態超過確率を算定する。この手法を一次近似信頼性設計法(First Order Reliability Method, FORM)<sup>7), 8)</sup>と呼び、一般には収束計算により限界状態超過確率を算定することができる。さらに性能関数が正規分布関数の線形和で表される場合には、収束計算を行わずに限界状態超過確率を算定することができる。

まず、確率変数  $R_p^i$ ,  $R_f^i$ ,  $S$  をそれぞれ基準支持力の特性値  $R_p^k$ ,  $R_f^k$  および杭頭作用荷重の特性値  $S^k$  で正規化した  $R_p^i/R_p^k$ ,  $R_f^i/R_f^k$  および  $S/S^k$  を、互いに独立な正規分布をもった確率変数と仮定する。そしてそれぞれ平均値が0, 標準偏差が1となる正規分布をもった確率変数  $Y_p$ ,  $Y_f$ ,  $Y_s$  を用いると性能関数  $Z$  は以下のように表すことができる。

$$Z = R_p^k \mu_p + R_f^k \mu_f - S^k \mu_s + R_p^k \sigma_p \cdot Y_p + R_f^k \sigma_f \cdot Y_f - S^k \sigma_s \cdot Y_s \tag{5}$$

ここで、 $\mu_p$ ,  $\mu_f$ ,  $\mu_s$  および  $\sigma_p$ ,  $\sigma_f$ ,  $\sigma_s$  は、確率変数  $R_p^i/R_p^k$ ,  $R_f^i/R_f^k$ ,  $S/S^k$  の平均値および標準偏差である。この変換の結果、正規化した座標 ( $Y_p$ ,  $Y_f$ ,  $Y_s$ ) における原点から式(5)で表される面への最短距離にある点が設計点となり、安全性指標  $\beta$  は原点から設計点までの最短距離として、次式により求められる。

$$\beta = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z} = \frac{R_p^k \mu_p + R_f^k \mu_f - S^k \mu_s}{\sqrt{(R_p^k \sigma_p)^2 + (R_f^k \sigma_f)^2 + (S^k \sigma_s)^2}} \tag{6}$$

特集：構造物技術

基本確率変数が互いに独立で正規分布関数に従い、性能関数が基本確率変数の線形関数で表される場合には、安全性指標  $\beta$  と限界状態超過確率  $P_f (Z \leq 0)$  には、以下の関係がある。

$$P_f = \Phi(-\beta) \tag{7}$$

ここに、 $\Phi$  は標準正規確率分布関数であり、安全性指標  $\beta$  は、限界状態に至る点 ( $Z=0$ ) から平均値  $\mu_z$  が相対的にどの程度離れているかを標準偏差  $\sigma_z$  に対する倍率として表した尺度である。

なお、設計事例毎にこの安全性指標  $\beta$  を直接求め、目標安全性指標  $\beta_a$  を上回ることを照査するのが「レベルⅡの信頼性設計法」と呼ばれるものであり、目標安全性指標  $\beta_a$  を満足できるように部分安全係数（地盤抵抗係数、作用係数）を定めるのが「レベルⅠの信頼性設計法」である<sup>9)</sup>。本研究では、「レベルⅠの信頼性設計法」により、抵抗側の部分安全係数に相当する地盤抵抗係数を提案する。

3.1.2 地盤抵抗係数の算定式

性能関数式(4)を地盤抵抗係数  $f_{rp}$ ,  $f_{rf}$  および作用係数  $\gamma_s$  を用いた限界状態設計法で表すと以下のようなになる。

$$Z^d = f_{rp} R_p^k + f_{rf} R_f^k - \gamma_s S^k \tag{8}$$

式(8)は目標安全性指標  $\beta_a$  となる設計点で  $Z^d=0$  を満足することから地盤抵抗係数  $f_{rp}$ ,  $f_{rf}$  および作用係数  $\gamma_s$  は、以下のように求められる。

$$f_{rp} = \mu_p - \beta_a \alpha_p \sigma_p \tag{9}$$

$$f_{rf} = \mu_f - \beta_a \alpha_f \sigma_f \tag{10}$$

$$\gamma_s = \mu_s - \beta_a \alpha_s \sigma_s \tag{11}$$

ここに  $\alpha$  は、一般に感度係数と呼ばれ、以下の式で求められる。感度係数は絶対値が 1.0 に近いほどその変数が構造物の信頼性に重要な影響を与えることを意味する。

$$\alpha_p = R_p^k \sigma_p / \sqrt{(R_p^k \sigma_p)^2 + (R_f^k \sigma_f)^2 + (S^k \sigma_s)^2} \tag{12}$$

$$\alpha_f = R_f^k \sigma_f / \sqrt{(R_p^k \sigma_p)^2 + (R_f^k \sigma_f)^2 + (S^k \sigma_s)^2} \tag{13}$$

$$\alpha_s = -S^k \sigma_s / \sqrt{(R_p^k \sigma_p)^2 + (R_f^k \sigma_f)^2 + (S^k \sigma_s)^2} \tag{14}$$

式(9)から(14)中の特性値および平均値  $\mu$ , 標準偏差  $\sigma$  を求めれば、目標安全性指標  $\beta_a$  に応じて地盤抵抗係数および作用係数を決定することができる。本研究では抵抗側の各数値は鉛直載荷試験データベースから 3.1.3 に示す方法で算定する。

一方、作用に関する各数値についても別途定める必要があるが、本研究では作用係数は現行基礎標準の値をそのまま適用することとし、杭頭荷重  $S$  のばらつきを無視して  $\sigma_s=0$  として扱うこととする。これは以下の理由による。まず、杭の支持力照査の実務設計上では杭頭荷重  $S$  は全体系の構造解析の結果として算定され、特に地震時などではその平均値や標準偏差を事前に設定すること

が難しいこと。また、盛土のように地盤の不確実性により作用側と抵抗側の両者に変動が生じる土構造物<sup>10)</sup>と異なり、杭の鉛直支持力照査では地盤の不確実性は主に抵抗側に影響を及ぼし、作用側への影響は比較的小さいと考えられること。よって、設計作用は確定論的に定まるものとして取り扱うこととして、地盤抵抗係数は杭頭荷重  $S$  に依存しない値を提案する方が、現時点の実務上の設計体系として合理的と考えられるためである。ただし、この場合は式(7)による限界状態超過確率  $P_f$  は、確定論的にある設計作用が作用したときの限界状態超過確率を意味することとなり、作用側の変動も考慮した真の限界状態超過確率を評価することができないというデメリットがある。

この結果、感度係数の算定式(12), (13)は、基準先端支持力比  $p = R_p^k / (R_p^k + R_f^k)$  を用いて以下のようなになる。

$$\alpha_p = p \sigma_p / \sqrt{p^2 \sigma_p^2 + (1-p)^2 \sigma_f^2} \tag{15}$$

$$\alpha_f = (1-p) \sigma_f / \sqrt{p^2 \sigma_p^2 + (1-p)^2 \sigma_f^2} \tag{16}$$

式(15), (16)は、例えば先端支持力のみが影響する完全先端支持杭 ( $p=1.0$ ) では  $\alpha_p=1.0$  となり、先端の地盤抵抗係数  $f_{rp}$  が摩擦杭に比べて小さく算定されることとなる。

さらに、設計鉛直支持力式(1)を式(17)のように変形することで、全基準支持力 ( $R_p^k + R_f^k$ ) に対する地盤抵抗係数  $f_r$  として式(18)により一つに集約することができる。

$$R_{vd} = f_r (R_p^k + R_f^k) \tag{17}$$

$$f_r = (f_{rp} R_p^k + f_{rf} R_f^k) / (R_p^k + R_f^k) \tag{18}$$

このように、本手法により、杭の基準先端支持力比  $p$  に応じた地盤抵抗係数  $f_r$  を合理的かつ比較的簡便に決定することができる。

3.1.3 支持力の平均値と標準偏差の算定

支持力に関する平均値  $\mu_p$ ,  $\mu_f$  および標準偏差  $\sigma_p$ ,  $\sigma_f$  は、鉛直載荷試験データベースから、載荷試験毎に杭先端が基準変位量に達した状態での杭反力の実測値  $R_p^i$ ,  $R_f^i$  を基準支持力の特性値  $R_p^k$ ,  $R_f^k$  で正規化した値 ( $R_p^i / R_p^k$ ,  $R_f^i / R_f^k$ ) を集計し、これらの平均値および標準偏差として算定される。本研究では基準変位量を、現行基礎標準での基準変位の考え方<sup>1), 3), 4)</sup>や、他分野での検討事例<sup>11)</sup>を参考に、想定する限界状態に応じて表4に示す値とした。なお、長期変位は通常の載荷試験での沈下量の 1.5 倍と推定<sup>12)</sup>し

表4 限界状態と基準変位量

限界状態	基準変位量	想定する被害
長期使用	長期 20mm	不同沈下により
使用	20mm	上部工にひび割れが生じる
終局	min (50mm, 杭径 5%)	残留沈下により
地震時使用		軌道狂い等が生じる
地震時終局	杭径 10%	大きな残留沈下により構造物の補修が必要となる

表5 荷重試験データベースにより算定した限界状態別の平均値と標準偏差

杭工法	抵抗箇所	先端				周面			
	限界状態	長期使用	使用	終局 地震時使用	地震時終局	長期使用	使用	終局 地震時使用	地震時終局
場所打ち杭	平均値 $\mu$	0.50	0.56	0.85	1.39	1.16	1.16	1.31	1.37
	COV	60%	46%	44%	49%	38%	38%	40%	33%
先端開放 打ち込み杭	平均値 $\mu$	0.67	0.78	0.92	1.10	1.91	1.93	1.93	1.92
	COV	35%	30%	27%	22%	5%	5%	4%	3%
中掘り先端 根固め杭	平均値 $\mu$	0.99	1.17	1.36	1.73	2.02	2.17	2.10	2.02
	COV	36%	31%	27%	29%	61%	67%	64%	55%
プレボーリング 根固め杭	平均値 $\mu$	1.10	1.23	1.42	1.69	0.79	0.80	0.81	0.80
	COV	45%	36%	39%	40%	29%	30%	31%	24%

て杭反力の実測値を求めた。

統計処理においては、有意水準5%のスミルノフ・グラブス検定により異常値を除外した。また、平均値  $\mu_p$ 、 $\mu_f$  は母集団の平均値とし、データ数に応じて信頼区間0.75の下限値となるように低減して推定した。これにより荷重試験事例が少ない新工法では安全側の地盤抵抗係数が算出され、荷重試験事例が豊富な既存工法との信頼性の違いが評価できる。

統計処理の結果、得られた平均値  $\mu$  と変動係数 COV ( $=\sigma/\mu$ ) を表5に示す。基準変位が小さい長期使用限界状態で場所打ち杭の先端の変動係数が大きいなど、工法別の特徴が現れた結果となっていることがわかる。

### 3.2 地盤抵抗係数の提案

本研究では目標安全性指標  $\beta_a$  は、既往の設計支持力に対するキャリブレーションおよび他基準での値<sup>11), 13)</sup> を参考に、各限界状態に応じて表6の値として設定した。なお本研究では作用側の変動を無視していることから、表6における限界状態超過確率および目標安全性指標は設計支持力と同じ荷重が杭頭に作用した場合に各基準変位を上回る沈下が発生する確率および安全性指標を意味することに注意を要する。

以上より、3.1に示す手法により、各算定式に表5の統計値と表6の目標安全性指標  $\beta_a$  および設計する杭の基準先端支持力比  $p$  を代入して、地盤抵抗係数  $f_r$  を算定した。なお、表5の統計値のうち変動係数については工法によって10%以下と比較的小さい値も得られているが、実際の設計では地盤調査の不確実性などの影響も考慮する必要がある。そこで、本研究では地盤抵抗係数の算定が安全側となるよう、変動係数が30%未満のケース(表5中の下線部)でも30%と仮定して地盤抵抗係数を算出した。算出した地盤抵抗係数  $f_r$  と基準先端支持力比  $p$  の関係を図3に示す。図3は小さい方から順に、長期使用、使用、終局、地震時使用、地震時終局の各限界状態の地盤抵抗係数を示している。

図3について、地震時終局限界状態に対する各限界状

表6 限界状態別の目標安全性指標

限界状態	基準変位量を超過する確率の目安	各限界状態に対する目標安全性指標
長期使用	$P_f = 5\%$	$\beta_a = 1.6$
使用	$P_f = 10\%$	$\beta_a = 1.3$
終局	$P_f = 16\%$	$\beta_a = 1.0$
地震時使用	$P_f = 20\%$	$\beta_a = 0.85$
地震時終局	$P_f = 30\%$	$\beta_a = 0.5$

態の低下率に着目すると、場所打ち杭は低下率が大きく、打ち込み杭は低下率が小さい。これは支持力のばらつきの少ない打ち込み杭と、ばらつきが大きく荷重初期の先端反力が十分に発揮されない場所打ち杭との工法的な特徴をよく表している結果といえる。

また、同じ杭の中で比較すると、場所打ち杭は基準先端支持力比  $p$  が高いほど低下率が大きくなっている。これも、周面に比べて先端のばらつきの大きい場所打ち杭の特徴をよく表している。

このように、本研究で求めた地盤抵抗係数は、工法別のばらつきの程度や変位レベル別の杭反力の発現程度の違いが考慮され、設計する杭の基準先端支持力比に応じて先端抵抗と周面抵抗それぞれにこれらの特徴が反映されていることがわかる。

なお、表5の統計値から算出した図3の地盤抵抗係数は、表2, 3の基準支持力推定式との組み合わせに対してのみ適用できることに注意が必要である。

## 4. おわりに

本研究では、荷重試験データベースを基に、新工法を含めた基準支持力の推定式を求め、レベルIの信頼性設計の考え方にに基づき地盤抵抗係数を提案した。これにより、各杭工法で同等の信頼性を有し、さらに基準先端支持力比に応じた合理的な設計支持力を現行基礎標準と同じくらい簡便に算定することができる。なお、近年、表1に示す以外の杭工法も開発されている。これらの工法あるいは今後開発される新工法に対しても、本研究と同様の手法で検討することにより、既存工法と同等の信頼

特集：構造物技術

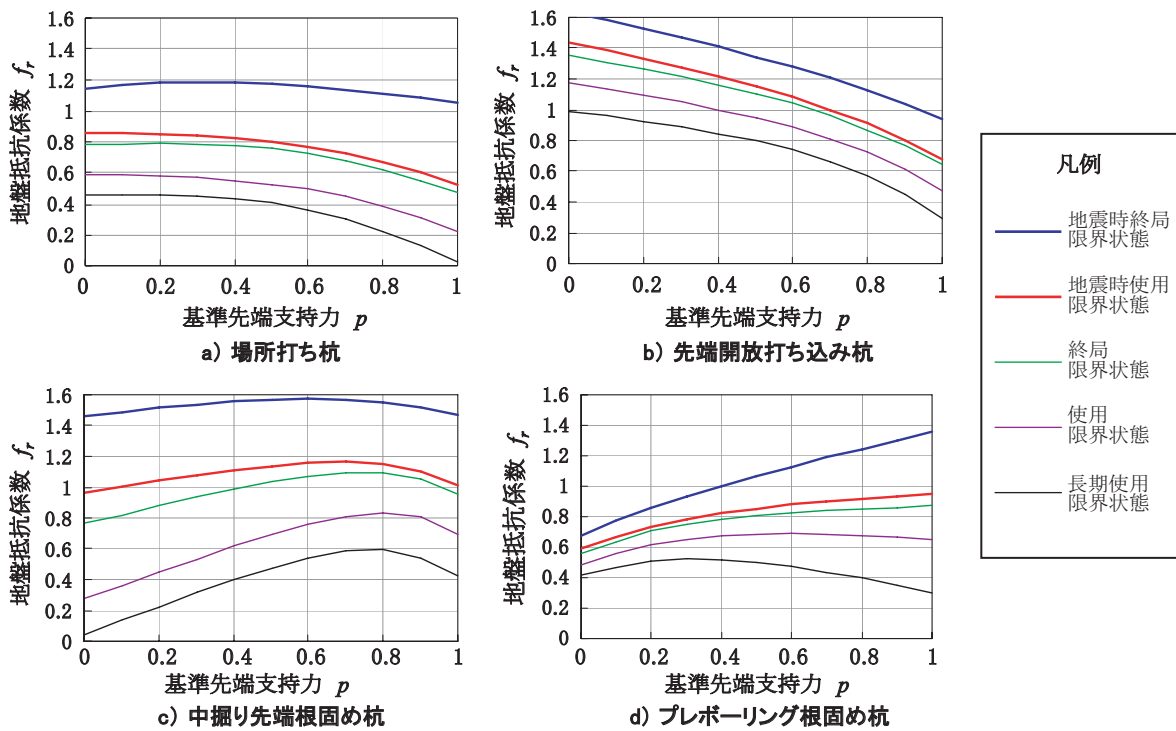


図3 工法別および限界状態別の地盤抵抗係数と基準先端支持力比の関係

性で設計支持力を算定することが可能となる。

なお、杭の部分安全係数に関しては、本研究と同様に各限界状態に応じた基準変位を設定して信頼性設計の考え方に基づく検討が建築分野<sup>11)</sup>や道路分野<sup>13)</sup>でも行われているが、本研究は各基準変位毎の平均値および標準偏差を杭工法別に直接載荷試験データベースから求めたことが大きな特徴である。逆に本研究の地盤抵抗係数は、載荷試験データベースの統計値を用いているため、データベースと同様の地盤条件や、杭諸元に対する提案値である。特に杭径については、杭径が大きくなると同一地盤であっても基準先端支持力度が低下するという報告<sup>14)</sup>もあり、データベースの範囲を超える杭径へ適用する場合には十分注意が必要である。

なお、基礎標準については、2004年(平成16年)より「基礎構造物・抗土圧構造物設計標準に関する委員会・拡大幹事会」(委員長：日下部治 東京工業大学教授、幹事長：古関潤一 東京大学教授)において、性能規定化に向けた改訂作業が進められており、本研究はこの改訂作業の一環として行われたものである。審議いただいた委員及び幹事各位に感謝申し上げます。

文献

- 1) 海野隆哉：最近の鉄道橋基礎の設計の考え方，基礎工，Vol.13, No.11, pp.45-50, 1985
- 2) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説(基礎構造物・抗土圧構造物)，丸善，1998

- 3) 村田修，館山勝：場所打ち杭の支持力性状についての統計的考察，鉄道総研報告，Vol.4, No.7, pp.30-36, 1990
- 4) 村田修，青木一二三，真田道夫：場所打ち杭の支持力評価，構造物設計資料，No.77, pp.31-34, 1983
- 5) 地盤工学会基準JGS4001-2004：性能設計概念に基づいた基礎構造物等に関する設計原則，地盤工学会，2006.3
- 6) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説(コンクリート構造物)，丸善，2004
- 7) Hasfer, A.M. and Lind, N.C.: Exact and invariant second-moment code format, J. Eng. Mech., ASCE, Vol.100, No.EM1, pp.111-121, 1974.
- 8) 本城勇介：信頼性設計入門，基礎構造物の信頼性設計講習会講演資料，pp.1-32，地盤工学会，2006.12
- 9) 星谷勝，石井清：構造物の信頼性設計法，鹿島出版会，pp.58-64，1986
- 10) 例えば，米澤豊司，篠田昌弘，館山勝，古関潤一：補強土壁構造物の限界状態設計法における荷重係数と抵抗係数，土木学会論文集，Vol. 2005, No. 785, pp.71-81, 2005
- 11) 小林勝巳，山本秀明：場所打ちコンクリート杭の使用限界支持力，第48回地盤工学シンポジウム，pp.155-162, 2003
- 12) 青木一二三，真田道夫：杭の設計に用いる地盤反力係数，構造物設計資料，No.83, pp.20-25, 1985.9
- 13) 白戸真大：杭基礎の安定照査，基礎構造物の信頼設計講習会講演資料，pp.83-115，地盤工学会，2006.12
- 14) 藤岡豊一，青木一二三：場所打ち杭の先端抵抗力度と杭径の関係，土木学会第54回年次学術講演会，III-647, pp.1293-1294, 2002