

# 載荷試験データによる杭工法別の 鉛直地盤反力係数算定法

西岡 英俊\*      西村 昌宏\*\*  
神田 政幸\*      舘山 勝\*\*\*

## Estimation of Coefficient of Vertical Subgrade Reaction of Pile Based on Database of Load Test

Hidetoshi NISHIOKA      Masahiro NISHIMURA  
Masayuki KODA      Masaru TATEYAMA

In order to introduce the performance based design of pile foundation, a vertical coefficient of subgrade reaction of pile, one of the important design factors, must be determined. The magnitude of the vertical coefficient of subgrade reaction of pile depends on not only the ground stiffness but also the construction method of pile. In the study reported in this paper, we performed a statistical investigation of the database of static axial compressive load test of actual piles constructed by various methods, and proposed an estimation formula of the vertical coefficient of subgrade reaction at pile end and pile shaft for each construction method.

キーワード：杭，載荷試験，鉛直地盤反力係数

## 1. はじめに

### 1.1 研究の背景

鉄道構造物の設計においては、常時の列車の走行安全性を確保するために変位量を一定値以内とすることが設計上極めて重要な照査指標となる。杭の鉛直ばね値算定に用いる鉛直地盤反力係数は、施工による地盤の応力解放や乱れ、あるいは締固め効果の影響を受けるため、地盤条件や施工条件、あるいは環境条件の違いを適切に評価し、合理的な工法選定が可能となるように定める必要がある。1997年（平成9年）に限界状態設計法を導入した鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎構造物（以下「基礎標準」と称す）<sup>1)</sup>では、杭の施工法毎に個別の鉛直地盤反力係数の算定式が示されている。これらの算定式は、杭工法別の多くの単杭の鉛直載荷試験と地盤調査結果から統計的検討により定められたものである<sup>2)</sup>。しかしながら、1986年（昭和61年）の基礎標準改訂時に場所打ち杭工法と打込み杭工法の算定式<sup>2)</sup>が提案されて以降、順次その他の工法についても個別に算定式<sup>例えば3)</sup>、<sup>4)</sup>が提案されてきているため、これまで全工法で統一的な検証が行われておらず、工法別に評価精度が異なる可能性があることが指摘されていた。

本研究では基礎標準の性能規定化に向けた改訂作業の一環として、現行の鉛直地盤反力係数算定式間の評価精度の違いを検証し、さらに各工法で評価精度を統一することで合理的な工法選定が可能となるよう、収集した鉛直載荷試験データベースを基に、新工法を含めた新たな鉛直地盤反力係数の算定式を提案した。本論文では、それらのうち打込み杭および場所打ち杭の統計結果、ならびに算定方法の考え方を示す。なお、本論文では、平成9年版の基礎標準を「現行基礎標準」、それ以降の新工法評価の中で示される算定式および数値をそれぞれ「現行式」、「現行値」と称す。

### 1.2 検討方法の概要

本研究では、表1に示す杭の載荷試験事例を収集し、実測した地盤反力係数と地盤の変形係数の関係から、設計鉛直地盤反力係数の算定式の提案を行った。収集対象とした鉛直載荷試験事例は、杭先端沈下計を設けるとともに、各層別での軸力分布が計測されている事例とし、杭周囲のせん断地盤反力係数の検討には、ひずみゲージを貼り付けた区間において土質が均質なデータのみ採用した。また、荷重段階毎に30分の荷重保持時間を確保する静的載荷試験（地盤工学会基準 JGS1811-2002「杭の押し込み試験方法」<sup>5)</sup>の「段階載荷方式」に相当）を対象とした。

\* 構造物技術研究部（基礎・土構造）

\*\* ㈱復建エンジニアリング（前 構造物技術研究部）

\*\*\* 構造物技術研究部

表1 載荷試験事例の概要

杭の種類	杭径 D (m)	杭長 L (m)	載荷試験の総数	データ数		備考 (工法名等)	
				使用項目	砂質土		粘性土
打込み杭	0.8 ~ 1.6	27 ~ 87	11	杭先端 $k_n$	11	—	先端開放の鋼管杭
				杭周面 $k_s$	14	10	
回転杭	0.6 ~ 1.6	13 ~ 55	15	杭先端 $k_n$	15	—	らせん状の先端開放羽根を有する工法 現行算定式は参考文献3)による
				杭周面 $k_s$	22	4	
鋼管ソイルセメント杭	0.8 ~ 1.4	11 ~ 60	10	杭先端 $k_n$	10	—	同時埋設方法、後埋設方法 現行算定式は参考文献4)による
				杭周面 $k_s$	23	13	
場所打ち杭	0.8 ~ 2.0	7 ~ 40	18	杭先端 $k_n$	18	—	オールケーシング工法、リバース工法
				杭周面 $k_s$	43	11	
中掘り先端根固め杭	0.8 ~ 1.0	16 ~ 68	19	杭先端 $k_n$	19	—	NAKS工法、TN工法、TAIP工法 現行算定式は未提案
				杭周面 $k_s$	43	34	
プレボーリング根固め杭	0.35 ~ 1.0	12 ~ 30	22	杭先端 $k_n$	22	—	ニーディング工法、ケムン工法、RODEX工法 現行算定式は未提案
				杭周面 $k_s$	36	16	

## 2. 杭の鉛直地盤反力係数の算定式

### 2.1 基礎標準の改訂に伴う鉛直地盤反力係数の変更

現行基礎標準では杭先端および杭周面の地盤抵抗を、基準先端支持力および最大周面支持力（杭径10%変位時の支持力）を上限とする弾完全塑性型（2次勾配を有しない）のバイリニアモデルとしている（図1）。このため、杭頭鉛直荷重—杭頭沈下関係の初期部分（10mm前後付近）と終局部分（0.1D沈下付近）で鉛直載荷試験結果と設計モデルが比較的一致するものの、その中間部分で設計モデルが過大評価となる課題があった。そこで基礎標準の改訂にあたっては、杭の鉛直地盤抵抗の評価精度を向上させるため、各地盤抵抗のモデル化を図2に示すように2次勾配を有するバイリニア型に変更するとともに、骨格形状の設定の考え方を明確に定めることとした。

具体的には、基準変位量について現行基礎標準では工法別に異なる値（打込み杭で5mm、その他の杭で10mm）であったが、本研究では図2に示すように、杭頭沈下量の評価精度を杭工法、杭径によらず同程度とすることを重視して、一律10mmに統一した。また、2次勾配は基準変位の2倍（20mm）を第1折れ点とし、杭径10%変位で基準支持力を通過するように設定した。なお、このモデルでは2次勾配を有するため杭径の10%を超える領域では基準支持力よりも大きな反力を発揮することとなるが、設計照査段階で杭頭反力（応答値）に対して限界状態毎の設計支持力（基準支持力に部分安全係数を乗じて算定した制限値）の照査を行うことで、過度な変形は許容しない設計体系とした。これらの基準支持力および設計支持力の算定方法の見直しも別途行っており、詳細は参考文献6)を参照されたい。

### 2.2 実測値の整理方法

杭の鉛直載荷試験から得られる各地盤反力係数の実測値は以下に示す方法で整理した。なお、本研究で新たに提案する鉛直地盤反力係数を現行基礎標準の値と区別するために、杭先端の鉛直地盤反力係数を  $k_{n'}$ 、杭周面のせん断地盤反力係数を  $k_{s'}$  と記す。

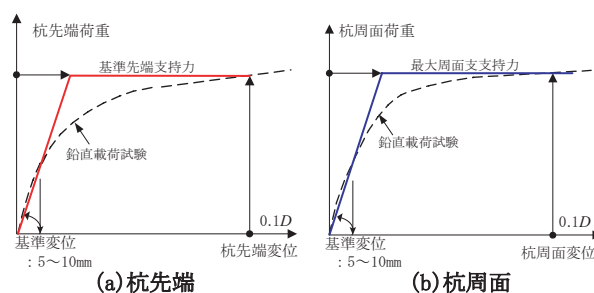


図1 現行の鉛直地盤抵抗モデル

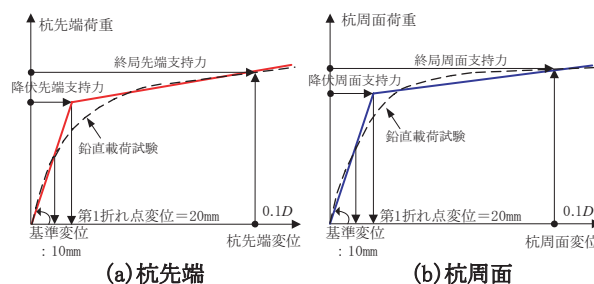


図2 改訂鉛直地盤抵抗モデル

表2 工法別の杭径及び杭先端断面面積・杭周長の定義

杭の種類	杭径 D の定義	杭先端断面面積 A と杭周長 U の定義
打込み杭	既製杭外径*	既製杭外径を直径とする円の面積
		既製杭外径を直径とする円周長
回転杭	鋼管杭外径*	先端羽根部のドーナツ型面積
		鋼管杭外径を直径とする円周長
鋼管ソイルセメント杭	ソイルセメント体の外径の公称径	ソイルセメント体の外径の公称径を直径とする円の面積
		ソイルセメント体の外径の公称径を直径とする円周長
場所打ち杭	掘削径 (公称径)	公称径を直径とする円の面積
		公称径を直径とする円周長
中掘り先端根固め杭	既製杭外径*	既製杭外径を直径とする円の面積
		既製杭外径を直径とする円周長
プレボーリング根固め杭	既製杭外径*	既製杭外径を直径とする円の面積
		既製杭外径を直径とする円周長

\*鋼管杭の外径には腐食しろの低減を考慮しない。

#### (1) 杭先端の鉛直地盤反力係数： $k_{n'}$

杭先端の鉛直地盤反力係数は、杭先端変位量  $S_0$  と杭先端支持力度  $q$  との荷重変位関係 ( $q \sim S_0$  関係) から、基準変位量  $S_0=10\text{mm}$  時の割線剛性  $k_{n'}=q_{(S)} / S_0$  として求めた。ここで杭先端支持力度  $q$  は、杭下端のひずみゲ-

ジから求めた杭先端伝達荷重 $P_0$ を杭先端断面積 $A$ で除して求めた ( $q=P_0/A$ )。杭先端断面積 $A$ は、工法別に表2に示す値を用いた。

(2) 杭周面のせん断地盤反力係数： $k_{fv}$

杭周面のせん断地盤反力係数は、各層での区間平均変位量 $S$ と区間平均周面摩擦力度 $\tau$ との荷重変位関係 ( $\tau \sim S$  関係) から、基準変位量 $S=10\text{mm}$ 時の割線剛性 $k_{fv}=\tau_{(S)}$ として求めた。区間平均周面摩擦力度 $\tau$ を算出する際の杭周長 $U$ は表2に示す値を用いた。なお、一部の層では基準変位量到達前に区間平均周面摩擦力度 $\tau$ が最大値を示し、基準変位量の時点ではピークを過ぎて低下している事例もあったが、そのような事例でもせん断地盤反力係数の実測値としては、基準変位時の割線剛性として整理している。

(3) 荷重保持時間の補正

本研究では、現行基礎標準の取り扱いにならない、静的載荷試験から得られた鉛直地盤反力係数を1/1.5倍して、長期鉛直載荷時(長期使用限界状態)相当の値とした<sup>2)</sup>。これは基準変位量が長期的にはクリープ変形等により1.5倍まで増加することに相当する。

### 2.3 N値からの地盤の変形係数の推定

地盤反力係数の算定式は、2.2で求めた実測値と地盤の変形係数との相関関係として整理されるため、各載荷試験の各層毎に地盤の変形係数を求める必要がある。本研究で収集した載荷試験事例で共通して得られている地盤に関する情報は、土質区分とN値のみであったため、N値から地盤の変形係数を推定する必要がある。

N値から地盤の変形係数を推定する上では、その考え方を明確にしておく必要があるが、現行式では砂質土を対象にして得られた推定式 $E_0=2500N$  ( $\text{kN/m}^2$ )を粘性土にも準用しているなど、この考え方が不明確になっていた。基礎の地盤抵抗特性を評価する場合に用いる地盤の変形係数については、N値から室内圧縮試験の $E_{50}$ 相当の地盤の変形係数 $E_d$ を推定する式として、土質区分毎に以下の式を用いた。詳細は、文献7)を参照されたい。

$$\text{砂質土} : E_d = 2000N \quad (\text{kN/m}^2) \quad (1)$$

$$\text{粘性土} : E_d = 4000N \quad (\text{kN/m}^2) \quad (2)$$

なお、変形係数を式(1)、式(2)によりN値から推定する場合、N値が小さい軟弱地盤や、N値50以上の支持層で換算N値が不明な場合などでは、推定精度が著しく低下する。そのため、杭周面についてはN値4以下およびN値50以上のデータは統計処理対象外とした。そのような地盤で実務設計を行う場合には、別途適切な地盤調査法によって室内圧縮試験の $E_{50}$ 相当の変形係数を算定する必要がある。一方、杭先端ではデータの大半がN値50以上の支持層であるため換算N値を用いて変形係数を算出した。

### 2.4 地盤反力係数算定式における寸法効果の取り扱い

載荷試験から得られた地盤反力係数の実測値と地盤の変形係数の関係を評価する上では、同一の地盤に対しても載荷幅が大きくなると地盤反力係数が低下する寸法効果の影響を考慮する必要がある。この寸法効果は、弾性論では載荷幅 $B$ に対して反比例 ( $B^{-1}$ ) であるが、実際の地盤では $B$ の $-3/4$ 乗に比例 ( $B^{-3/4}$ ) するとの経験則<sup>8)</sup>が設計実務で多く適用されている。杭の鉛直地盤反力係数に対する現行式でも、この寸法効果を踏襲して、杭径 $D$ の $-3/4$ 乗 ( $D^{-3/4}$ ) に比例するものとしている。

この地盤反力係数の寸法効果の発現メカニズムについてはいまだ未解明な部分も多いが、精緻な室内圧縮試験結果と非線形弾性有限要素解析に基づき、地盤材料の非線形性・応力レベル依存性のほか、載荷幅に応じた地盤内影響領域の広がり具合が影響するとの検討事例<sup>9)</sup>がある。よって、面的に載荷されて地盤内の影響領域の広がり具合が平板載荷試験に近いと考えられる杭先端の鉛直地盤反力係数 $k_{fv}$ については、これまでと同様の寸法効果を踏襲してもよいと考えられる。

一方、杭周面の設計せん断地盤反力係数 $k_{fv}$ の寸法効果については、これまでは杭先端の鉛直地盤反力係数算定式と同様に杭径に応じた寸法効果が考慮されていたが、以下の点を考慮すると必ずしも杭径との相関は高くないと考えられる。

- (1) 現行式と同様に杭径の寸法効果を考慮した場合と杭径の寸法効果を考慮しない場合とで統計結果に有意な差が見られないこと。
- (2) 杭先端とは載荷条件が異なり、せん断変形の範囲が杭近傍に限られ、杭径に応じた影響領域の広がりには生じにくいと考えられること。
- (3) 同一地盤で杭径の異なる実杭を用いた載荷試験事例<sup>10)</sup>および同一地盤で実施された載荷幅の異なる平板載荷試験事例<sup>11)</sup>を参考に、杭径の寸法効果を整理した結果、杭先端については、概ね平板載荷試験の寸法効果と同様の杭径依存性の影響が見られるが、杭周面に関しては杭径依存性がほとんどみられない結果が得られたこと。

上記(1)については、本研究で得られた鉛直載荷試験のデータベースに基づき、杭径を考慮した場合と考慮しない場合で統計処理を行った結果、算定式の精度(地盤の変形係数と地盤反力係数の相関程度)にほとんど違いはないことを確認した。

上記(3)のような同一地盤での異径杭の鉛直載荷試験事例は非常に少なく、統計的な検証は十分には行われていないのが実情であるが、本研究では上記考察に基づき、杭周面のせん断地盤反力係数 $k_{fv}$ については杭径非依存として取り扱うこととした。

以上より、杭周面のせん断地盤反力係数の算定式は次式により表されるものとして、鉛直載荷試験事例の統計

特集：基礎構造物の設計技術

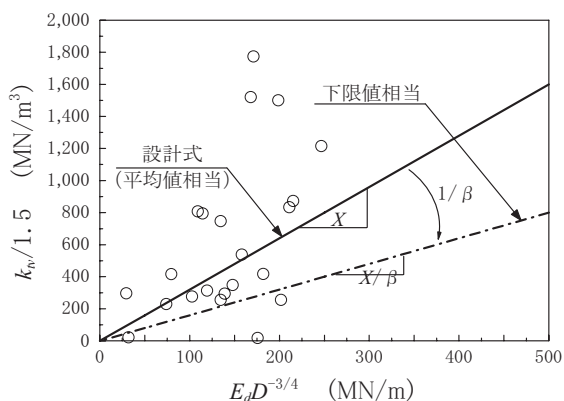


図3 低減係数の導入の例

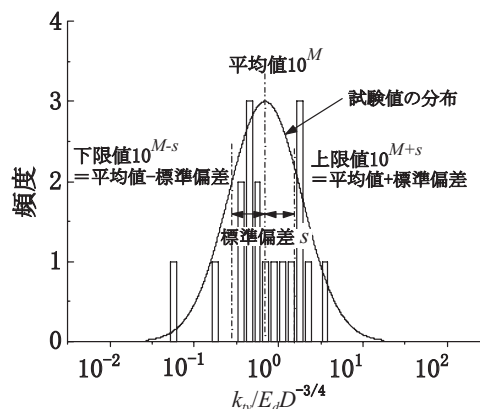


図4 比例係数 X のヒストグラム

処理を行った。

$$k_{rv} = X_{rv} \cdot E_d \cdot D^{-3/4} \quad (3)$$

$$k_{fv} = X_{fv} \cdot E_d \quad (4)$$

ここに、 $k_{rv}$ ：杭先端の鉛直地盤反力係数 (kN/m<sup>3</sup>)、 $k_{fv}$ ：杭周面のせん断地盤反力係数 (kN/m<sup>3</sup>)、 $X_{rv}$ 、 $X_{fv}$ ：杭工法別の比例係数、 $E_d$ ：地盤の変形係数の設計値 (kN/m<sup>2</sup>)、 $D$ ：杭先端の直径 (m) で工法別に表2に示す値である。

### 2.5 比例係数 X 及び低減係数 β の導入

N値から推定した地盤の変形係数と鉛直地盤反力係数の実測値では、ばらつきが見られる。算定式の X は、ネガティブフリクションの算定など、下限側の値を用いることが安全側になるとは限らないため、統計値の平均値相当となるように定めることとする (図3)。平均値相当の算定式を同一の精度で算定するために、比例係数 X の統計処理方法を統一する必要がある。図4に示すとおり、本研究では、実測の地盤反力係数と地盤の変形係数の比が対数正規分布となるものとして、以下の式により求めることとした。

$$X = 10^M \quad (5)$$

ここに、 $M$ ： $\log(X_{rv})$  および  $\log(X_{fv})$  の平均値である。

また、ラーメン高架橋や連続ラーメン橋など、複数の基礎に支持される不静定構造物においては、個々の基礎の地盤抵抗特性がばらつくことにより不静定応力が発生し、上層梁等に有害なひび割れが発生する可能性がある。そこで本研究では、算定式を下限値に変換するための低減係数 β を導入することとした。

低減係数 β は対数正規分布上で標準偏差  $s$  分の分布幅を考慮し、分布下限値  $10^{M-s}$  と分布中心  $10^M$  の比として、以下の式より求めることとした。なお、統計処理上の分布下限値  $10^{M-s}$  には、N 値のばらつきの影響が含まれている。文献7)では、各調査法自体のばらつき (調査精度) を考慮する部分安全係数  $\gamma_E$  を提案している。そこで

本研究では、文献に示す N 値から推定する際の部分安全係数相当分を除去することとした。

$$\beta = \left( \frac{10^M}{10^{M-s}} \right) \cdot \frac{1}{\gamma_E} = \frac{1}{10^{-s} \cdot \gamma_E} \quad (6)$$

ここに、 $s$ ：対数正規分布の標準偏差、 $\gamma_E$ ：地盤調査法別の地盤の変形係数の部分安全係数であり、本研究では標準貫入試験に対する値として  $\gamma_E=1.4$  とした。

### 3. 統計処理結果

表3、表4には打込み杭と場所打ち杭の他、他工法の統計処理結果を併記した。図5および図6に打込み杭と場所打ち杭の統計処理結果を示す。なお、他工法の統計処理結果は、文献12)を参考されたい。

#### 3.1 各種杭工法の地盤反力係数と現行値の比較

場所打ち杭の地盤反力係数は、杭先端で現行式の8%減となるものの、杭周面の平均値では現行式と同等となっており、全体としては現行とさほど変りない。

一方、打込み杭 (先端開放) は、杭先端で現行式の12%減、杭周面で約50%減となった。これは、従来の基準変位を5mmから10mmに変更したためと考えられる。

これに対して、比較的新しい工法である鋼管ソイルセメント杭および回転杭の杭先端は、現行値を上回る結果となった。これは、現行式が下限側の値で評価しているのに対して、本検討では平均値相当を設計値と定めたためと考えられる。また、鋼管ソイルセメント杭の杭周面は、他工法に比して大きな値となった。この要因は、支持層まで地盤を掘削攪拌ヘッドで削孔するところにセメントミルクを注入することにより地盤との密着性が高くなるためと考えられる。

回転杭については、先端の鉛直地盤反力係数は打込み杭よりも2割程度低い値となった。ただし、両工法では杭先端面積  $A$  の評価が異なっており、同一杭径の打込み杭に比べて回転杭の杭先端面積  $A_w$  は、1.4~2.0倍となっているため、面積を乗じたばね値としては、回転杭は同一杭径の打込み杭の1.2~1.6倍程度の値となる。一方、

杭周囲のせん断地盤反力係数の砂質土の平均値は、打込み杭の2/3の値となっており、施工時の羽根の回転圧入に伴い地盤を乱す影響と考えられる。

杭と同程度である。一方、杭周囲は、他工法と比べ低い値となった。これは、工法上、アースオーガーによる掘削径よりも既製杭の杭径が若干小さいために生じる周辺地盤の緩みが原因の一つであると考えられる。

中掘り先端根固め杭の杭先端は、鋼管ソイルセメント

表3 杭先端の比例係数  $X_n$  及び低減係数  $\beta_n$

杭の種類	$\log(k_n/E_s D^{-3/4})$ の平均 $M$	$\log(k_n/E_s D^{-3/4})$ の標準偏差 $s$	$X (=10^M)$	現行式相当の $X$	低減係数 $\beta_n$	(参考) 現行式
打込み杭	0.546	0.148	3.51	4.00	1.02	$k_n=f_{in}(3.2\alpha E_s D^{-3/4})$
回転杭 (押込み側)	0.467	0.193	2.93	2.51	1.09	$k_n=\beta_{vc} \cdot f_{in}(3.2\alpha E_s D^{-3/4})$
鋼管ソイルセメント杭	0.555	0.189	3.59	2.00	1.08	$k_n=f_{in}(1.6\alpha E_s D^{-3/4})$
場所打ち杭	-0.160	0.434	0.69	0.75	1.90	$k_n=f_{in}(0.6\alpha E_s D^{-3/4})$
中掘り先端根固め杭	0.558	0.214	3.61	—	1.15	
プレボーリング根固め杭	0.503	0.451	3.19	—	1.98	

表4 杭周囲の比例係数  $X_p$  及び低減係数  $\beta_p$

杭の種類	$\log(k_p/E_s)$ の平均 $M$	$\log(k_p/E_s)$ の標準偏差 $s$	$X (=10^M)$	現行式相当の $X$	低減係数 $\beta_p$	(参考) 現行式
打込み杭	-0.990	0.361	0.10	0.20 (砂質土) 0.19 (粘性土)	1.61	$k_p=f_{in}(0.16\alpha E_s D^{-3/4})$ (砂質土) $k_p=f_{in}(0.30\alpha E_s D^{-3/4})$ (粘性土)
回転杭	-0.941	0.302	0.12	0.15 (砂質土) 0.09 (粘性土)	1.40	$k_p=\beta_{vs} \cdot f_{in}(0.16\alpha E_s D^{-3/4})$ (砂質土) $k_p=\beta_{vs} f_{in}(0.30\alpha E_s D^{-3/4})$ (粘性土)
鋼管ソイルセメント杭	-0.640	0.183	0.23	0.20 (砂質土) 0.19 (粘性土)	1.07	$k_p=f_{in}(0.16\alpha E_s D^{-3/4})$ (砂質土) $k_p=f_{in}(0.30\alpha E_s D^{-3/4})$ (粘性土)
場所打ち杭	-0.946	0.494	0.11	0.11	2.18	$k_p=f_{in}(0.09\alpha E_s D^{-3/4})$
中掘り先端根固め杭	-1.176	0.485	0.07	—	2.14	
プレボーリング根固め杭	-0.844	0.404	0.14	—	1.77	

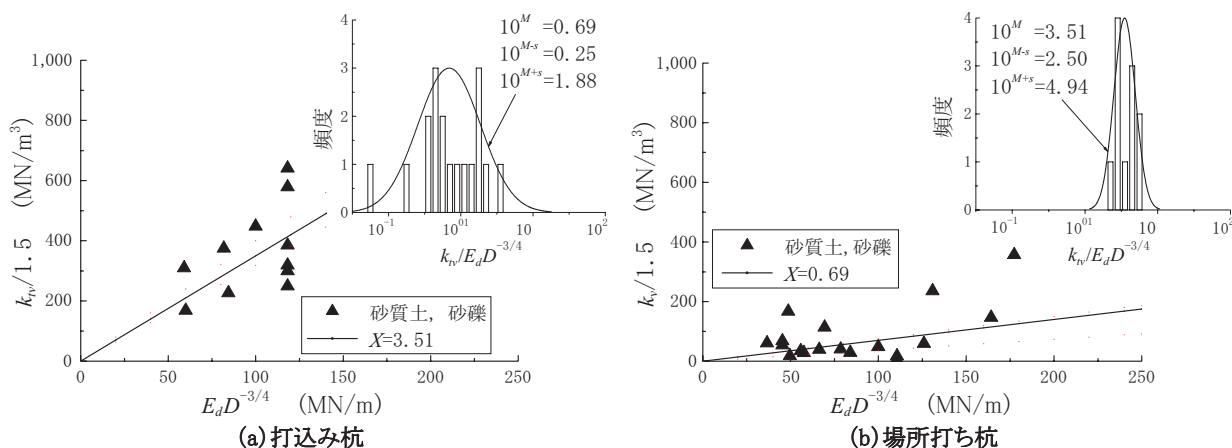


図5 杭先端の鉛直地盤反力係数

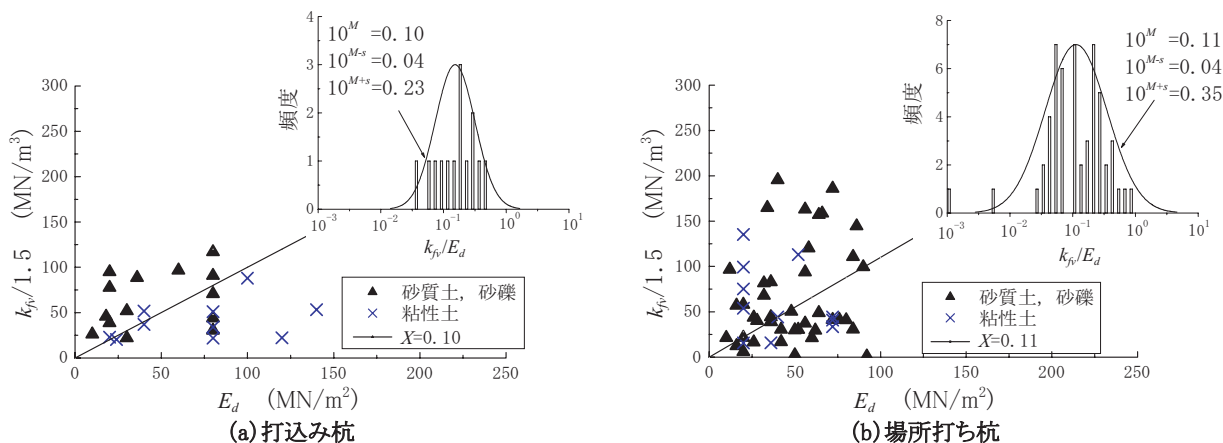


図6 杭周囲のせん断地盤反力係数

特集：基礎構造物の設計技術

3.2 各種杭工法の鉛直地盤反力係数の変動幅と低減係数

各杭工法別に統計値の分布範囲を図7, 図8に示す。杭先端の変動幅に着目すると, 場所打ち杭およびプレボーリング根固め杭の値は, その他の杭に比べて変動幅および低減係数 $\beta$ が大きくなっており, 杭毎のばらつきが大きいことがわかる。施工に伴う応力開放の程度や, スライム処理や根固め部の施工品質が, 杭毎に異なることが影響していると考えられる。

一方, 杭周面の分布範囲に着目すると, 掘削後に杭体を施工する場所打ち杭, 中掘り先端根固め杭, プレボーリング杭の場合, 低減係数は大きくなる傾向にある。これは, 掘削時における地盤の緩みが原因の一つであると考えられる。相対的に廃土の少ない杭工法は, 変動幅が小さい傾向にあるといえる。このように, 変動幅および低減係数には, 施工の影響が顕著に表れる結果となった。これにより, 鉄道のラーメン高架橋などで地中梁を省略した構造とする場合などで, 各杭間の不同沈下による上部工のひび割れを抑制するために, 変動幅の小さい(ばらつきの小さい)杭工法を採用することが設計計算上も有利と評価されるような設計体系が構築可能となる。

4. まとめ

本研究では, 鉛直載荷試験データベースを基に新たな杭の鉛直地盤反力係数の算定式を提案した。本提案式の特徴は, 各工法で評価精度を統一したことで同一の精度で性能評価が可能となったことにある。これにより, 地盤条件や施工条件, あるいは環境条件に適した合理的な工法選定が可能となる。

さらに, 工法別の低減係数の違いを定量的に把握することにより不静定構造物など杭のばね定数の変動の影響が重要となる場合において, 変動の少ない工法の選択が可能となる。

文 献

- 1) 運輸省鉄道局監修, (財) 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, 2000.6.
- 2) 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, 国鉄構造物設計事務所, No.83, 1985.9
- 3) 小松章, 神田政幸, 西岡英俊, 武川啓悟: 回転圧入鋼管杭工法に関する支持力性状評価, 第40回地盤工学研究発表会, pp. 1591 ~ 1592, 2005.7
- 4) 勅使川原敦, 棚村史郎, 永尾拓洋, 神田政幸: 鋼管ソイルセメント杭の地盤抵抗特性, 鉄道総研報告, Vol.16, No.9, pp. 23 ~ 28, 2002.9
- 5) (社) 地盤工学会編: 地盤工学会基準 JGS1811-2002「杭の鉛直載荷試験方法・同解説」, 第2編杭の押込み試験, 2002.5

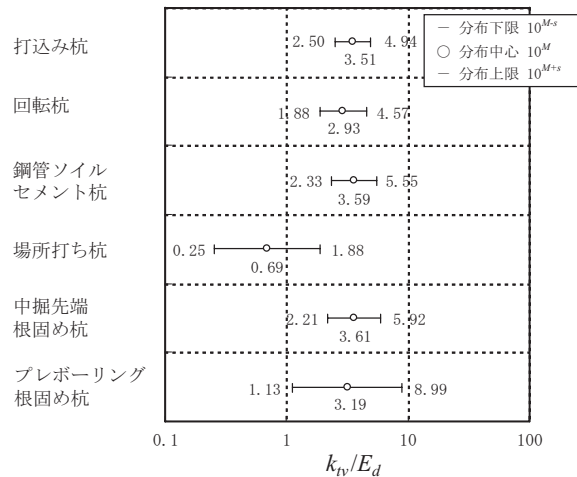


図7  $k_{pv}/E_d$  の  $\pm 1.0\sigma$  の分布範囲

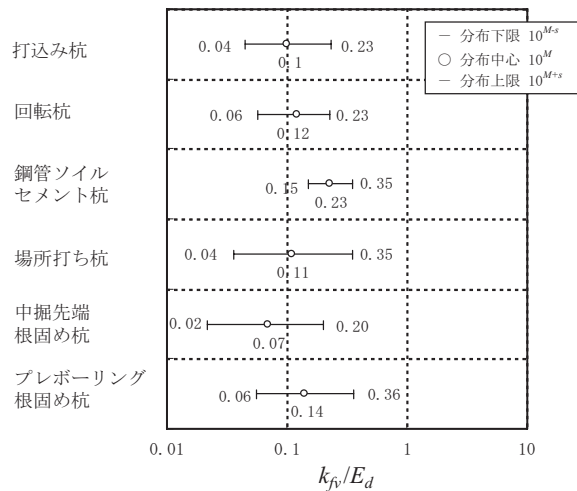


図8  $k_{fv}/E_d$  の  $\pm 1.0\sigma$  の分布範囲

- 6) 西岡英俊, 神田政幸, 篠田昌弘, 館山勝: 載荷試験データベースの統計的処理による杭工法別の支持力算定法, 鉄道総研報告, Vol.21, No.10, pp.41 ~ 46, 2008.10
- 7) 西岡英俊, 安西綾子, 神田政幸, 館山勝: 地盤調査法に応じた地盤の変形係数および地盤反力係数算定法, 鉄道総研報告, Vol.24, No.7, pp.11 ~ 16, 2010.7
- 8) 吉中竜之進: 横方向地盤反力係数, 土木技術資料, Vol.10, No.1, pp.32 ~ 37, 1968.1
- 9) 古関潤一, 倉知禎直, 緒方辰男: 地盤反力係数の寸法効果に及ぼす地盤変形係数の応力レベルと依存性と非線形性の影響, 基礎工, pp.26 ~ 29, 2005.12
- 10) 藤岡豊一, 青木一二三, 谷口正嗣, 住 義雄: 阿部知之: 高品質アースドリルの開発実験 (その3: 鉛直載荷試験), 第33回地盤工学研究発表会, pp.1385 ~ 1386, 1998.7
- 11) 古山章一, 瀧内義男: 直接基礎を緩い砂礫地盤へ適用する場合の検討方法, 土木学会論文集, No.623, VI-43, 45-55, 1999.6
- 12) 西村昌宏, 西岡英俊, 神田政幸, 館山勝: 載荷試験データベースに基づく杭工法別の鉛直地盤反力係数, 第54回地盤工学シンポジウム, 2009.1