

杭の軸方向の支持力に関する新たな推定式の提案

七澤利明・河野哲也・大城一徳・飯島翔一

1. はじめに

道路橋の設計基準である道路橋示方書IV下部構造編（以下「道示」という。）では、杭を設計する際に用いる支持力推定式が規定されている（2.参照）。推定式の中で用いる杭の先端支持力度や周面抵抗力度は、 N 値等の地盤定数を用いた推定方法が杭工法別に示されている。ここで、平成24年版までの道示では、推定式から得られる極限支持力は、安全側を考慮して鉛直載荷試験結果の平均値よりもやや低い値となるように定められていた。一方、H24道示を改定するにあたっては信頼性設計法の概念と部分係数の導入が改定方針とされたことなどから、平均的な値を推定する推定式の検討および推定精度の向上が重要な検討事項となっていた。

また、これまでは、数多く蓄積された鉛直載荷試験データから支持力推定式を定める方法に人為差が入る余地が大きかったため、人為差の少ない標準化された算定方法の提案が望まれていた。

本稿では、試験データから支持力推定式を定める際の標準化された方法を開発したうえで、推定精度を評価し新たな支持力推定式を提案した。

2. 推定式の検討方法

H24道示における杭の支持力推定式を式(1)に示す。式右辺の第1項は先端抵抗項、第2項は周面抵抗項であり、それぞれ杭の先端抵抗力度 q_d および周面抵抗力度 f_i の一次関数となっている。

$$R_u = R_{up} + R_{uf} = q_d A + U \sum L_i f_i \quad \text{式(1)}$$

ここに、

R_u ：地盤から決まる極限支持力（kN）

R_{up} ：極限支持力のうち杭の先端抵抗（kN）

R_{uf} ：極限支持力のうち杭の周面抵抗（kN）

q_d ：杭先端の有効断面あたりの先端抵抗力度（kN/m²）

A ：杭先端の有効断面積（ $= \pi D_1^2 / 4$ ）（m²）

U ：杭の有効周長（ $= \pi D_1$ ）（m）

L_i ：周面抵抗を期待する土層の層厚（m）

f_i ：周面抵抗を期待する土層の周面抵抗力度（kN/m²）

D_1 ：杭の有効径（m）

D_2 ：杭先端の有効径（m）

本稿では、打撃工法、場所打ち杭工法、中掘り杭工法、プレボーリング杭工法、鋼管ソイルセメント杭工法、回転杭工法を対象とし、土木研究所で収集した多数の杭の鉛直載荷試験データを用いて、杭の先端抵抗力度 q_d および周面摩擦力度 f_i と N 値（もしくは粘着力 c 値）の関係から支持力推定式を構成する q_d および f_i の推定式を見直した。

道示では、極限支持力 R_u は杭頭部の荷重 P_o —沈下 S_o 関係（以下「 P_o — S_o 曲線」という。）において、沈下量 S_o の軸に平行とみなせるときの荷重とすることを基本とし、杭頭部の沈下量が杭径の10%を超えても P_o — S_o 曲線が沈下量 S_o の軸に平行とみなせない場合には、杭頭部の沈下量が杭径の10%に達した時の杭頭荷重を設計上の極限支持力と定義している。このため q_d および f_i の見直しの検討を行う際にも、この定義に従い3.1に示す方法を用いて極限支持力を定めた。また、杭先端地盤の地盤定数については3.2に示す方法により設定した。

一方、新たな推定式の算定は、近年の土木研究所の研究成果²⁾と同様にバイリニア型の支持力推定線を前提とし、4.に示す標準化された手法を開発したうえで行った。また、H24道示の従来式と本稿で算定した推定式それぞれの推定値と実測値の比について3.3に示す統計量を算出して推定精度を評価したうえで、平均的な挙動を推定でき、推定精度を向上させた新たな支持力推定式の提案を行った。

3. 推定式の検討に用いる支持力値、地盤定数および評価に用いる統計量の設定方法

本章では、鉛直載荷試験結果に基づく極限支持力の設定方法、杭先端地盤の地盤定数の設定方法

および推定式の評価に用いる統計量の設定方法について示す。これらの設定方法は近年の土木研究所の研究成果²⁾に示される方法を踏襲している。

3.1 鉛直載荷試験結果に基づく極限支持力の設定

極限支持力 R_u は、一般には P_o-S_o 曲線の形状から判定されるが、極限支持力まで載荷されていないデータも多くこれらも含めて分析対象とするために、Weibull分布関数によって P_o-S_o 曲線を近似もしくは外挿した曲線を利用して極限支持力を算出し、実測値として用いた。

3.2 杭先端地盤の地盤定数（平均 N 値）の設定

杭の先端抵抗力度 q_d の評価では、図-1に示すように、支持層の上端位置を設計上の杭先端位置とした（設計上の杭先端位置より下方の周面抵抗力は先端抵抗力に含まれる）。これにより直接計測するのが困難である杭体下端に作用する軸力を外挿する際の不確実性を極力排除している。また、先端抵抗力の推定に用いる平均 N 値の評価範囲は杭体先端から杭径の3倍下方までの範囲とした。

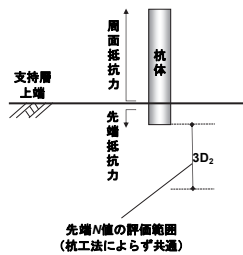


図-1 設計上の杭先端位置と先端 N 値の評価

3.3 推定式の評価に用いる統計量

地盤構造物設計における地盤定数等は不確定要素が大きいため正規分布を仮定すると偏差や分散が大きくなる傾向があることから、対数正規分布を仮定するのが一般的である。文献³⁾では、杭の支持力については、施工法、支持形式、支持力式の推定精度誤差、地盤強度のばらつきなどの不確定要素が一般に大きく、支持力算定式の推定精度が正規分布よりも対数正規分布に適合することが示されている。また、杭頭変位の特性値を杭径で正規化した値は、概ね対数正規分布に適合することが示されている。このため本稿でも、算定された推定式が平均的な値を推定しているかを確認するための統計量は（5.参照）、基本的には式(2)に示す幾何平均 GM とした。ただし、算定の結果見直しを検討した推定式の推定精度の検証では、基礎としての平均的な挙動（平均 $M=1.0$ ）に対する推定値の再現性を確認するため、偏りの指標と

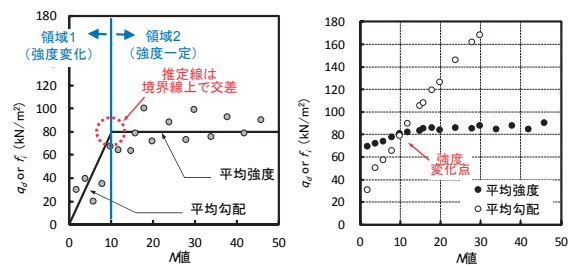
して式(3)に示す算術平均 M を用いた（6.参照）。また、ばらつきの大きさを表す指標は変動係数 CV を用いた。

$$GM = \left(\prod x_i \right)^{\frac{1}{n}} = \left(x_1 \times x_2 \times \dots \times x_n \right)^{\frac{1}{n}} \quad \text{式(2)}$$

$$M = \frac{1}{n} \sum x_i = \frac{1}{n} (x_1 + x_2 + \dots + x_n) \quad \text{式(3)}$$

4. 推定式算定方法の標準化

支持力推定式を定める際に人為差が生じないように、次の通り標準化された方法を定めた。



(a) バイリニア型推定線 (b) 強度変化点判定図

図-2 強度変化点判定図を利用した推定線の算定例

- ① 図-2(a)に示すように、バイリニア型推定線はある N 値を境界とし、 N 値の増加に伴い強度 (q_d もしくは f_t) が上昇する領域（領域1）と、 N 値の増加に関わらず強度が上昇しない領域（領域2）から構成されている。
- ② 領域1の推定線の勾配は、領域1に含まれるデータの平均勾配とし、領域2の推定線は、領域2に含まれるデータの平均強度とする。
- ③ 図-2(b)に示すように、領域1と領域2の境界 N 値を任意に仮定し、平均勾配（○分布）と平均強度（●分布）の分布図において○分布と●分布の交点を強度変化点とする。ここに、○分布は N 値の小さなデータから順に採用した平均勾配線の分布であり、●分布は N 値の大きなデータから順に採用した平均強度の分布である。

従来の推定式は、領域1と領域2の境界は試行錯誤により決定されていたが、上記の標準化した方法により、人為差をなくすることができる。

5. 新たな杭の軸方向支持力推定式の提案

5.1 先端抵抗力

先端抵抗力の推定式の算定では、先端抵抗力度 q_d と N 値の関係について検討した。前章の標準化

した方法に従い、各工法における先端抵抗力度 q_d の強度変化点判定図を作成した。判定図のうち、図-3に中掘り杭工法の先端地盤が砂の場合の結果を示す。

図-3からわかるように、○分布と●分布の交点から強度変化点 (N 値, q_d (kN/m²)) = (50, 11,000) となる。また、図-3の上部には、判定した強度変化点により算定した推定式の推定値と実測値の推定比の幾何平均 GM 及び変動係数 CV を示しているが、 GM の値から平均的な強度が推定できていることが分かる。他の工法についても中掘り杭工法と同程度の推定誤差であった。以上のようにして判定した強度変化点より、図-4に示す q_d の推定線が得られた。

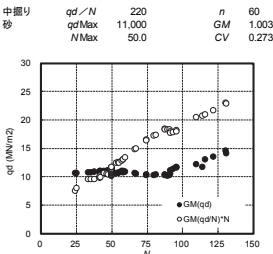


図-3 q_d の強度変化点判定 (中掘り杭工法、砂)

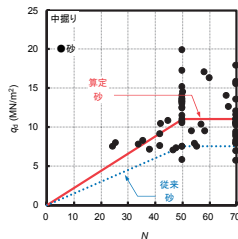


図-4 q_d の推定線 (中掘り杭工法、砂)

5.2 周面抵抗力

周面抵抗力の推定式の算定は、周面抵抗力度 f と粘着力 c 値及び N 値の関係を検討した。H24道示では、 N 値が5未満の軟弱層は粘着力を N 値によって推定することは困難なため、室内試験により粘着力を評価するのがよいと解説されていることから、ここでは N 値が5未満のデータを除外している。ここでは、周面地盤が粘性土、もしくは砂質土の場合による N 値での評価に加え、粘着力 c 値が計測されているデータのみを抽出し、 c 値のみの場合の周面抵抗力度の評価も行い、 c 値による推定式と N 値による推定式が得られたが、周面抵抗力度 f の推定式の上限值は、一部の工法を除き、 c 値による推定式と N 値による推定式で異なる。そこで、 c 値のデータ数は N 値の半分程度以下であることなどから、 f の上限値は N 値による推定式の上限值に統一することとした。また、H24道示と同様に N 値が5未満の軟弱層は室内試験により粘着力を評価することとした。

前節と同様に、標準化した方法に従い、各工法における周面抵抗力度 f の強度変化点判定図を作成した。図-5に、周面地盤が砂質土のプレボーリング杭工法の場合の N 値による強度変化点判定図

を示す。

図-5からわかるように、○分布と●分布の交点から強度変化点 (N 値, f_i (kN/m²)) = (24, 120) となる。先端支持力と同様に、図-5の上部に GM および CV を示しているが、平均的な強度が推定できていることが分かる。他の工法についてもプレボーリング杭工法の場合と同程度であることを確認した。以上のようにして判定した強度変化点より、図-6に示す f_i の推定線が得られた。

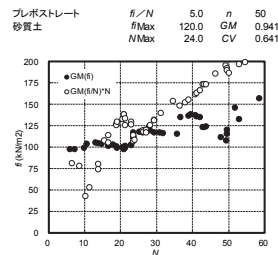


図-5 f_i の強度変化点判定 (プレボーリング杭工法、砂)

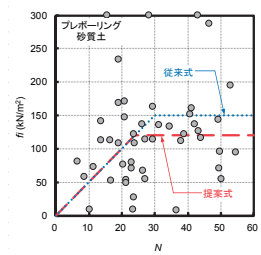


図-6 f_i の推定線 (プレボーリング杭工法、砂)

6. 支持力推定式の推定精度の評価

ここでは、前章の検討から得られた提案式を用いた場合の極限支持力 R_u の推定精度を検証した。検証では、提案式と、H24道示に示す従来式のそれぞれを用いて算出した推定値と実測値を比べ推定比 (= 実測値 / 推定値) を求めた。そのうち、場所打ち杭工法の推定比を図-7に示す。求めた推定比について、各工法の平均 M 、変動係数 CV を求め、推定精度の検証を行った。図-8に、各工法の平均 M 、変動係数 CV を示す。

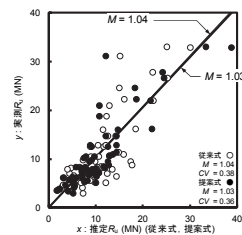
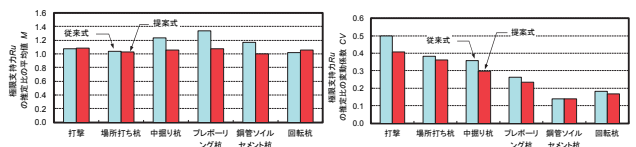


図-7 R_u の実測値-推定値関係 (場所打ち杭工法)



(a) 平均 M

(b) 変動係数 CV

図-8 極限支持力の推定精度

提案式を用いた場合では、ほぼすべての工法において推定比の平均値 M 、変動係数 CV ともに低減されていることが確認できる。H24道示に示す従来式は極限支持力が平均値よりもやや低い値と

なるよう定められていたのに対し、提案式では、平均的な挙動が推定できるようになったといえる。

ただし、回転杭工法については、平均 M において提案式に比べ従来式の推定精度がよい。また、回転杭工法の従来式はH24道示改定の際に新たに示されたものであり、他の工法と異なり従来式においても、既に平均的な値の推定を意図して定められている。したがって、回転杭工法においては、従来式を最終的な提案式とした。

表-1、表-2に、先端抵抗力 q_d および周面抵抗力 f の従来式と新たな推定式（最終的な提案式）を示す。見直しの検討後は、全般的な傾向として、従来式よりも、杭の先端抵抗力 q_d が大きめに、周面抵抗力 f は粘性土で小さめとなっている。

7. まとめ

本稿では、杭の軸方向の支持力推定式について、算定方法の標準化及び式の見直しについて検討し、その推定精度を評価したうえで、新たな推定式を提案した。得られた知見は、次のとおりである。

- 1)できるだけ人為差が少なく客観的に推定式を算定する方法の標準化を行った。
- 2)標準化した方法により算定した推定式について、データの多寡や推定精度を勘案し、最終的な提案式を定めた。なお、新たな推定式は平成29年に改定された道路橋示方書に採用されている。

参考文献

- 1) 福井次郎、西谷雅弘：杭の支持力、変形特性に関する研究、土木研究所資料、第3836号、2001.9.

表-1 杭の先端抵抗力度

杭工法	先端地盤	従来式 (H24 道示)	最終的な提案式
打撃工法	粘性土	$q_d / \bar{N} = 60(L_b/D)$ ($\bar{N} \leq 40, L_b/D \leq 5$)	$90\bar{N}$ ($\leq 4,500$)
	砂		$130\bar{N}$ ($\leq 6,500$)
	砂れき		$130\bar{N}$ ($\leq 6,500$)
場所打ち杭工法	粘性土	$3q_u$ $3,000 (30 \leq \bar{N} \leq 40)$ $5,000 (50 \leq \bar{N})$	$110\bar{N}$ ($\leq 3,300$)
	砂		$110\bar{N}$ ($\leq 3,300$)
	砂れき		$160\bar{N}$ ($\leq 8,000$)
中掘り杭工法 (セメントミルク噴出攪拌方式)	粘性土	$150\bar{N}$ ($\leq 7,500$) $200\bar{N}$ ($\leq 10,000$)	$220\bar{N}$ ($\leq 11,000$)
	砂		$250\bar{N}$ ($\leq 12,500$)
	砂れき		$250\bar{N}$ ($\leq 12,500$)
プレボーリング杭工法	粘性土	$150\bar{N}$ ($\leq 7,500$) $200\bar{N}$ ($\leq 10,000$)	$240\bar{N}$ ($\leq 12,000$)
	砂		$300\bar{N}$ ($\leq 15,000$)
	砂れき		$300\bar{N}$ ($\leq 15,000$)
鋼管ソイルセメント杭工法	粘性土	$150\bar{N}$ ($\leq 7,500$) $200\bar{N}$ ($\leq 10,000$)	$190\bar{N}$ ($\leq 9,500$)
	砂		$240\bar{N}$ ($\leq 12,000$)
	砂れき		$240\bar{N}$ ($\leq 12,000$)
回転杭工法 1.5 倍径	粘性土	$120\bar{N}$ ($\leq 6,000$) $130\bar{N}$ ($\leq 6,500$)	$120\bar{N}$ ($\leq 6,000$)
	砂		$120\bar{N}$ ($\leq 6,000$)
	砂れき		$120\bar{N}$ ($\leq 6,000$)
回転杭工法 2.0 倍径	粘性土	$100\bar{N}$ ($\leq 5,000$) $115\bar{N}$ ($\leq 5,750$)	$100\bar{N}$ ($\leq 5,000$)
	砂		$100\bar{N}$ ($\leq 5,000$)
	砂れき		$115\bar{N}$ ($\leq 5,750$)

\bar{N} ：先端抵抗力の算定に用いる平均 N 値、 L_b ：支持層への根入れ長さ、 D ：杭径、 q_u ：一軸圧縮強度 (kN/m²)

表-2 杭の周面抵抗力度

杭工法	周面地盤	従来式 (H24 道示)	最終的な提案式
打撃工法	粘性土	c 又は $10N$ (≤ 150)	c 又は $6N$ (≤ 70)
	砂質土	$2N$ (≤ 100)	$5N$ (≤ 100)
場所打ち杭工法	粘性土	c 又は $10N$ (≤ 150)	c 又は $5N$ (≤ 100)
	砂質土	$5N$ (≤ 200)	$5N$ (≤ 120)
中掘り杭工法	粘性土	$0.8c$ 又は $8N$ (≤ 100)	$0.8c$ 又は $4N$ (≤ 70)
	砂質土	$2N$ (≤ 100)	$2N$ (≤ 100)
プレボーリング杭工法	粘性土	c 又は $10N$ (≤ 100)	c 又は $7N$ (≤ 100)
	砂質土	$5N$ (≤ 150)	$5N$ (≤ 120)
鋼管ソイルセメント杭工法	粘性土	c 又は $10N$ (≤ 200)	c 又は $10N$ (≤ 200)
	砂質土	$10N$ (≤ 200)	$9N$ (≤ 300)
回転杭工法	粘性土	c 又は $10N$ (≤ 100)	c 又は $10N$ (≤ 100)
	砂質土	$3N$ (≤ 150)	$3N$ (≤ 150)

N ：杭周面地盤の平均 N 値、 c ：粘性土の粘着力 (kN/m²)

- 2) 七澤利明、西田秀明、河野哲也、北浦光章、鈴木慶吾：杭基礎の鉛直支持力及び地盤ばね定数推定式の見直しと信頼性の評価に関する研究、土木研究所資料、第4297号、2015. 3.
- 3) 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研究、土木研究所資料、第2919号、1991.1.

七澤利明



研究当時 土木研究所
構造物メンテナンス研
究センター橋梁構造研
究グループ上席研究
員、現 国土交通省国
土技術政策総合研究
所道路構造物研究部
構造・基礎研究室長
Toshiaki NANAZAWA

河野哲也



研究当時 土木研究所
構造物メンテナンス研
究センター橋梁構造研
究グループ主任研究
員、現 国立大学法人
富山大学大学院理工
学研究部准教授、博
士(工学)
Dr. Tetsuya KOUNO

大城一徳



研究当時 土木研究所
構造物メンテナンス研
究センター橋梁構造研
究グループ交流研究
員、現 (株)大林組
Kazunori OSHIRO

飯島翔一



土木研究所構造物メン
テナンス研究センター
橋梁構造研究グループ
研究員
Shoichi IIJIMA