

杭の鉛直支持力推定式の作成方法の標準化と それに基づく推定式の見直し

横幕 清* 白戸真大** 中谷昌一***

1. はじめに

道路橋示方書（以下、道示と呼ぶ）では、杭の鉛直支持に関する安定照査は、杭の有効重量等を見捨てれば、 $P \leq R_{ud}/\gamma$ （ P ：杭頭での押し込み荷重、 R_{ud} ：設計上の極限支持力、 γ ：安全率で、常時は3、レベル1地震時は2）を満足するように行われる。この照査は、①最大強度に対する安全性②弾性限界（降伏支持力）に対する安全性③杭の鉛直変位に伴う地震時の傾斜・不等沈下に伴う上部構造の想定外の変状に対する安全性の3つを同時に担保しようとするものである。ここで、極限支持力の算定は、載荷試験結果から一定の規則で判定された値または過去の載荷試験結果から導かれた支持力推定式によるものとされている。

杭の支持力推定式の整備においては、①推定式を作成する方法や推定式の妥当性を検証する方法が統一されていない②新技術の評価に必要なデータの質と量（どの地点での載荷試験結果が必要か、どの程度のデータ数が必要か等）が必ずしも明確にされていない③現在のように全国を対象とした推定式とするのではなく、各地域の地盤性状を反映した地域別の推定式とした方が高い推定精度が得られるはずである等の課題が指摘されている。

現在、数多くのデータを用いて照査結果の確からしさを数値で示そうとする信頼性設計への移行を基本方針として道示の改定作業が進められており、構造物メンテナンス研究センターは改定のために道路協会に設置された各小委員会の幹事を務め、改定原案の作成を行い、各委員会で審議頂いている。そして、信頼性設計の考え方を取り入れつつ支持力推定式の作成方法を統一しておけば、その時点の最新のデータを基に作成される支持力推定式や推定結果のばらつき具合はより客観的なものとなり、信頼性向上にも資することを提案した。本報告は、杭の支持力推定式の作成方法の標準化に関する検討を行い、最新のデータに基づき

支持力推定式の見直しを行った結果の要旨を示すものである。

2. 設計上の極限支持力の定義

2.1 現行の定義

杭の極限支持力 R_u は載荷試験によって判定されるが、実際の載荷試験では変位の増加に伴って抵抗力が漸増することが多く、文字通り抵抗力の最大値である極限支持力 R_u が確認できることは少ない。岡原ら¹⁾は、数多くの載荷試験結果を分析する過程で、多くのデータには $R_u = R_{10}$ （ R_{10} ：杭頭変位 S が杭径 D の10%に達する時の杭頭反力）の関係が成立することに着目し、実用的な設計上の極限支持力の定義 $R_{ud} = R_{10}$ を示した（添字の「 d 」は、「設計上の（design）」という意味で付けた）。この定義は、平成2年の道示に示され、現在も続いている。しかし、杭先端抵抗に多くを依存する杭では、極限支持力を発揮するまでに要する変位が大きく、 $R_{10} < R_u$ となることも指摘している¹⁾。

2.2 最新のデータに基づく定義の確認

杭工法の新技術は、データの蓄積等その熟度に応じて最終的には道示に規定されていく。新技術の開発意欲は旺盛で、平成2年の道示に規定される杭工法は3種類であったが、現在では杭基礎設計・施工便覧に記載のものまで含めるとその数は7種類に増加している。新技術には、先端部が拡大された杭体を用いる回転杭工法に象徴されるように、先端抵抗への依存度が高く、最大抵抗力を発揮する時の杭頭変位が大きいものが多い。

そこで、杭の鉛直荷重変位関係を式(1)に示すWeibull分布曲線により施工法別に連続曲線にモデル化²⁾し、設計上の極限支持力の定義を変えた時の常時・暴風時・レベル1地震時に想定される杭頭変位レベル S/D の相違を見てみる。

$$\frac{R}{R_u} = 1 - e^{-\left(\frac{S/D}{S_y/D}\right)^m} \dots\dots\dots (1)$$

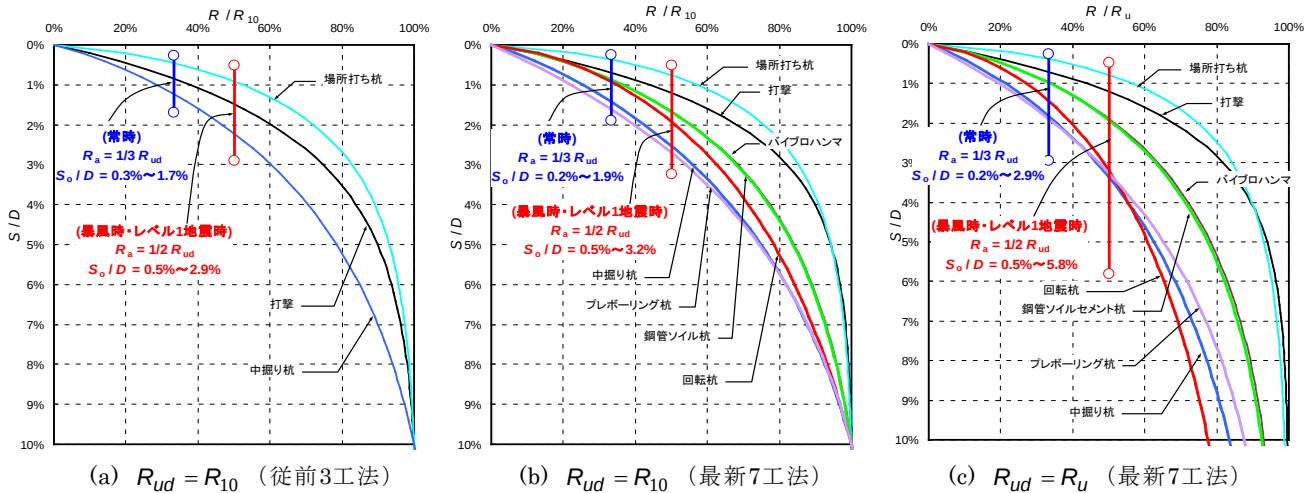


図-1 設計上の極限支持力の定義の相違と許容支持力時に想定される杭頭変位レベルの範囲

ここに、 R ：杭頭反力、 R_u ：極限支持力、 e ：自然対数の底、 S_y ：杭頭変位の特性値（≡杭頭降伏変位）、 m ：変位指数であり、 $S = S_y$ となる時の杭頭反力（≡降伏支持力） R_y は常に $R_y \cong 0.63 R_u$ の関係にある。

図-1(a)は、平成2年道示に規定される3工法の当時のデータに基づく荷重変位曲線である。荷重変位曲線は、載荷試験結果を式(1)で近似し、曲線の形状を決定するパラメータ S_y および m は施工法別平均を用いた。ここで、杭頭変位 S の値そのものではなくこれを杭径 D で正規化するのは、同一の杭頭変位が上部構造に与える影響は支間が大きいほど小さく、支間が大きければ死荷重・活荷重も大きいために杭径の大きなものを使用されるはずであると考えられるためである。設計上の極限支持力 R_{ud} を安全率3あるいは2で除した許容支持力 R_a に対する杭頭変位レベル S/D の90%信頼区間は、常時：0.3%～1.7%、暴風時・レベル1地震時：0.5%～2.9%である。逆に言えば、既往の道示の規定にしたがって設計・施工されてきた杭の杭頭変位レベルは、ほぼこの範囲に収まるように意図されていたことになる。一方、図-1(b)(c)は、最新の7工法の荷重変位曲線であり、(b)は $R_{ud} = R_{10}$ とした場合、(c)は $R_{ud} = R_u$ とした場合である。極限支持力の定義を $R_{ud} = R_u$ とした場合、常時・暴風時・レベル1地震時に想定される杭頭変位レベル S/D を計算し、上部構造の構造諸元や形式、材料に応じて上部構造に与える影響を検討する必要があるが、鉛直変位の計算精度は現状では著しく悪いだけでなく、上部構造のクリープの影響など精度良く見込むことが困難な要因も

多い。一方で、これまで通りの定義 $R_{ud} = R_{10}$ としておけば、許容支持力の照査を満足する基礎の鉛直変位は従前と同程度に収まり、上部構造に与える影響も問題の無い範囲であることは実績から明らかである。

なお、ここで確認した設計上の極限支持力の定義は、地盤工学会基準³⁾に従って判定される極限支持力「杭先端変位が杭先端径の10%に達した時の抵抗力」とは異なることになる。しかし、地盤工学会基準の定義は杭の耐荷性能のみに重点を置いたものであり、したがって杭の変位が構造物へ及ぼす影響については各構造物の設計基準側で配慮しなければならない。

3. 極限支持力推定式の見直し

3.1 検討対象とする杭工法・載荷試験データ

ここでは、表-1に示す5工法の検討結果を示す。土木研究所がこれまで収集を継続してきた載荷試験結果のうち、土質条件の不備や載荷荷重不足のものを除くと、表-1に示すデータ数となる。

表-1 検討対象

施工法	データ数
打撃工法	169
バイプロハンマ工法	9
場所打ち杭工法*	89
中掘り杭工法**	129
鋼管ソイルセメント杭工法	25

*：ストレート杭(杭径が軸方向に一定である杭)に限る

**：セメントミルク噴出攪拌方式に限る

3.2 設計上の杭先端位置の定義

一般に、杭の支持力は、周面抵抗力和先端抵抗力との和で表され、前者は載荷試験で計測された

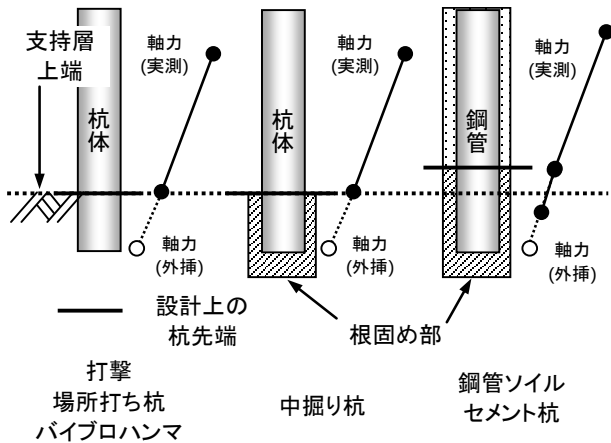


図-2 杭体軸力の計測と外挿の例

杭体の軸力（軸ひずみ×軸剛性 EA ）の差分により、後者は杭頭反力と周面抵抗力との差分により、それぞれ評価される。ここで、部材端部は局部応力を受けやすく杭体下端の軸力を直接計測するのは困難であるため、何らかの方法によって外挿してこれを予測せざるを得ない（図-2）。しかし、外挿の方法そのものや、杭体以外の根固め部等の軸剛性の評価方法によって予測値は不確実なものとなる。

そこで、改定案では、支持層の上端位置を設計上の杭先端位置とみなすことにし（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ものとする）、これによって杭体軸力の外挿の不確実性を極力排除することとした。このことは、昭和39年の基準に既に解説されている⁴⁾が、その後顧みられなかった。先人の教えの偉大さを痛感する次第である。

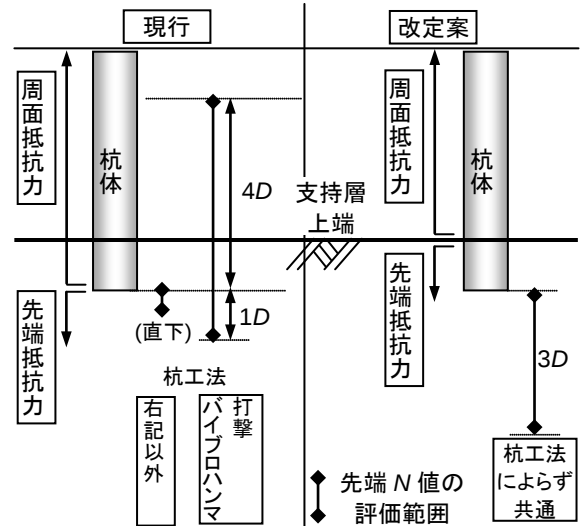
なお、表-2に示すように、設計においては周面抵抗力を考慮する土層の範囲もこれに合わせて変更する必要がある。

表-2 杭先端位置と周面抵抗力を考慮する土層の範囲

施工方法	設計上の杭先端位置*	周面抵抗力を考慮する土層の範囲
鋼管ソイルセメント杭工法以外	支持層上端	支持層上端より上方
鋼管ソイルセメント杭工法	根固め部の上端	根固め部の上端より上方

* 摩擦杭では、杭体下端から杭径分上方の位置を杭先端位置とした。

また、最近の成果を含めた既往の研究成果⁵⁾を参考に、先端抵抗力の推定に用いる平均 N 値の評価範囲も杭体先端から杭径の3倍下方までの範囲に見直した（図-3）。

図-3 周面抵抗力の考慮範囲と先端 N 値の評価範囲

3.3 推定式の支持力係数の作成

3.3.1 原則

極限支持力は、これまでと同様に式(2)により推定するものとする。

$$R_{ud} = q_d \cdot A + U \sum (L_i \cdot f_i) \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 R_{ud} ：地盤から決まる杭の極限支持力（kN）、 q_d ：杭先端の有効断面あたり先端抵抗力度（kN/m²）、 A ：杭先端の有効断面積（＝杭先端の有効径の2乗× $\pi/4$ ）（m²）、 U ：杭の有効周長（＝杭の有効径× π ）（m）、 L_i ：周面抵抗力を期待する土層の層厚（m）、 f_i ：周面抵抗力を期待する土層の周面抵抗力度（kN/m²）である。

なお、推定式の信頼性は、部分安全係数によって別途担保するものとし、推定値の平均値が2.で定義した極限支持力 $R_{ud} = R_{10}$ の実測値の平均値となるように支持力係数 q_d および f_i を決定する。

表-3 杭の有効径

施工法	杭の有効径
打撃工法（先端解放）	杭体の直径
打撃工法（先端閉鎖）	
パイロハンマ工法	
場所打ち杭工法	杭体の直径（設計径）
中掘り杭工法	杭体の直径
鋼管ソイルセメント杭工法	ソイルセメント柱の直径

3.3.2 先端抵抗力度 q_d

従来は、杭先端の最大抵抗力度で評価されていたが、2.の検討に基づき、杭頭反力 R が設計上の極限支持力 $R_{ud} = R_{10}$ に達した時（Weibull分布曲線による外挿を含む）の先端抵抗力度 q_d と土質定数（ N 値）との関係性を評価した。なお、データ整理上、杭先端の支持地盤の判別は、杭体

先端から杭径の3倍下方までの範囲の支配的な（層厚で3/4以上を占める）地盤種別とした。

3.3.3 周面抵抗力度 f_i

従来は、最大周面抵抗力度で評価されていたが、2.の検討に基づき、杭頭反力 R が設計上の極限支持力 $R_{ud} = R_{10}$ に達した時（Weibull分布曲線による外挿を含む）の周面抵抗力度 f_i と土質定数との関係を評価した。

ここで、土質定数は、砂質土では N 値を、粘性土では粘着力 C 値を基本とした。なお、止むを得ない場合に備え、粘性土においても N 値からの推定式も示すこととした。ただし、現行道示においても $N \leq 4$ となるような軟弱な粘性土の場合、室内試験により粘着力を評価しなければならないことから、粘性土における N 値からの推定式は、洪積層を対象に求めた。すなわち、沖積粘性土については安全側となるように意図してある。

3.3.4 支持力係数の作成方法の標準化

従来、支持力係数（ f_i - N 関係、 f_i - C 関係および q_d - N 関係）の作成方法には、統一された方法がなかったが、本検討では支持力係数は次の要領で作成した。

- (1) 2次勾配を有しないバイリニアモデルとする。
すなわち、ある N 値を境界とし、 N 値の増加に伴い強度が上昇する領域（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）があるとする。
- (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線とする。
- (3) 「領域1の推定線」と「領域2の推定線」とが2つの境界線上で交わるように、境界位置を

試行錯誤で決める（境界位置が不適切であると、2つの領域に対する推定線が境界線上で交差しない。図-4参照）。

以上の要領にしたがって支持力係数を適切に作成するためには、土質定数が幅広く分布するだけの載荷試験数が付帯事項となる。

3.4 検討結果

3.4.1 支持力推定式の係数

見直し後の支持力推定式の係数を現行の係数と併せて表-4,5に示す。改定案は、全般的な傾向として、先端抵抗力度 q_d が現行よりも大きめに、周面抵抗力度 f_i は現行よりも小さめとなっている。

3.4.2 推定精度の検証

得られた支持力推定式を用い、現行および改定案の2通りの方法で推定値を求め、これと実測値との関係を確認する。

ここで、現行式において、先端地盤が粘性土の場合の中掘り杭工法および鋼管ソイルセメント杭工法の先端抵抗力度 q_d は、場所打ち杭工法と同様に $q_d = 3q_u$ ⁶⁾ により推定し、 $q_u = 25\bar{N}$ ⁷⁾ とした。

推定比（= 実測値 / 推定値）の平均値の対比を図-5に、推定比の標準偏差の対比を図-6に示す。改定案では、推定比の平均は現行に比べて1.0に近くなり、推定結果のばらつき具合を表す標準偏差の値も全般に小さくなった。なお、沖積粘性土において粘着力 C 値が得られている土層厚の合計は全沖積粘性土の層厚の合計の約10%であり、残りの90%は改定案においても周面抵抗力度を N 値から推定している。推定比の平均値が1.0よりもやや大きいことから、粘性土の周面抵抗力度を N 値から推定すると、 C 値から推定する場合に比べ安全側に推定されることも確認できる（全ての粘性

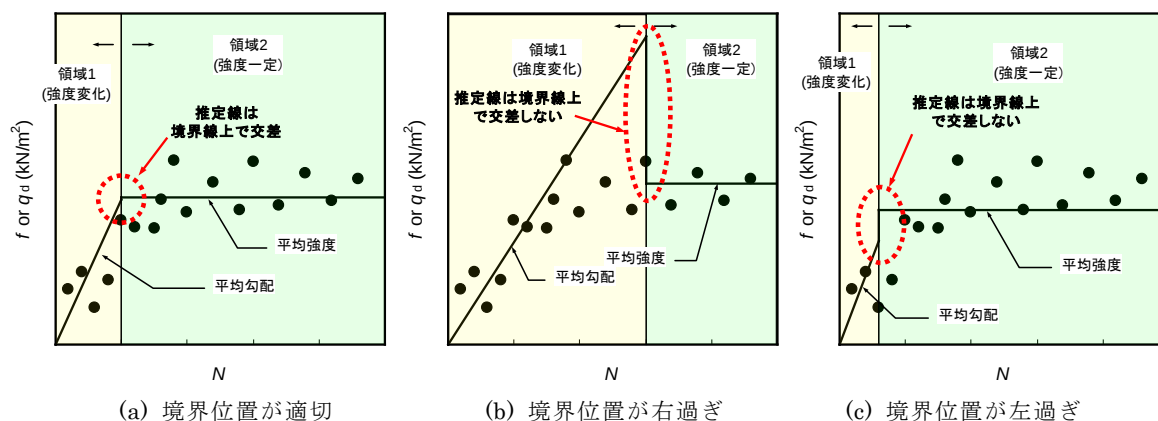


図-4 バイリニア関係と仮定する支持力係数の決定法の例

土の C 値が得られた状態を想定すると、推定比の平均値はほぼ1.0となり、標準偏差の値もより小さくなることを確認済み)。

すなわち、改定案では、詳細な地盤調査に対する動機付けも同時に得られることが分かる。

また、ここで紹介できなかった施工法に対しても、2.の定義に従う極限支持力に対し、3.に従って試験結果を整理すれば、本報文で示した結果と同様に支持力推定式の見直しが可能であると考えられる。

表-4 先端抵抗力度 q_d (kN/m²)

施工法	先端地盤	現行	改定案
打撃工法 (先端解放)	粘性土	$60(L_b/D)\bar{N}$ ($\bar{N} \leq 40, L_b/D \leq 5$)	$(20L_b/D+35)\bar{N}$ ($\bar{N} \leq 30, L_b/D \leq 5$)* ¹
	砂質土		$(30L_b/D+35)\bar{N}$ ($\bar{N} \leq 50, L_b/D \leq 5$)* ¹
	砂礫・岩盤		$(35L_b/D+35)\bar{N}$ ($\bar{N} \leq 50, L_b/D \leq 5$)* ¹
打撃工法 (先端閉鎖)	粘性土	$60(L_b/D)\bar{N}$ ($\bar{N} \leq 40, L_b/D \leq 5$)	$200\bar{N}$ ($\bar{N} \leq 30$)
	砂質土		$300\bar{N}$ ($\bar{N} \leq 50$)
	砂礫・岩盤		$300\bar{N}$ ($\bar{N} \leq 50$)
バイプロハンマ工法	粘性土	$60(L_b/D)\bar{N}$ ($\bar{N} \leq 40, L_b/D \leq 5$)	— (データなし)
	砂質土		$(20L_b/D+35)\bar{N}$ ($\bar{N} \leq 50, L_b/D \leq 5$)* ²
	砂礫		$(25L_b/D+35)\bar{N}$ ($\bar{N} \leq 50, L_b/D \leq 5$)* ²
場所打ち杭工法	粘性土	$3q_u$	$115\bar{N}$ ($\bar{N} \leq 30$)
	砂質土	$3,000$ * ³	$125\bar{N}$ ($\bar{N} \leq 30$)
	砂礫	$5,000$ * ⁴	$135\bar{N}$ ($\bar{N} \leq 50$)
中掘り杭工法 (セメントミルク 噴出攪拌方式)	粘性土	—	$150\bar{N}$ ($\bar{N} \leq 40$)
	砂質土	$150\bar{N}$ ($\bar{N} \leq 50$)	$200\bar{N}$ ($\bar{N} \leq 50$)
	砂礫	$200\bar{N}$ ($\bar{N} \leq 50$)	$250\bar{N}$ ($\bar{N} \leq 50$)
鋼管ソイル セメント杭工法	粘性土	—	$150\bar{N}$ ($\bar{N} \leq 40$)
	砂質土	$150\bar{N}$ ($\bar{N} \leq 50$)	$200\bar{N}$ ($\bar{N} \leq 50$)
	砂礫	$200\bar{N}$ ($\bar{N} \leq 50$)	$250\bar{N}$ ($\bar{N} \leq 50$)

$\bar{N}$: 杭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)

()内は、 q_d 算定上の $\bar{N}$ および L_b/D の上限値

*1 : 改定案の適用範囲は、杭径 $D \leq 1,500$ mm程度とする。

*2 : 改定案の適用範囲は、杭径 $D \leq 800$ mm程度とする。

*3 : 砂礫および砂層 ($30 \leq N \leq 50$)

*4 : 良質な砂礫層 ($N \geq 50$ の層が5m以上)

表-5 周面抵抗力度 f_j (kN/m²)

施工法	周面地盤	現行	改定案
打撃工法	粘性土	C または $10N$ (≤ 150)	C または $8N$ (≤ 75)
	砂質土	$2N$ (≤ 100)	$10N$ (≤ 100)
バイプロハンマ工法	粘性土	C または $10N$ (≤ 150)	C または $8N$ (≤ 50)
	砂質土	$2N$ (≤ 100)	$2N$ (≤ 50)
場所打ち杭工法	粘性土	C または $10N$ (≤ 150)	C または $8N$ (≤ 80)
	砂質土	$5N$ (≤ 200)	$5N$ (≤ 80)
中掘り杭工法	粘性土	$0.8C$ または $8N$ (≤ 100)	C または $5N$ (≤ 50)
	砂質土	$2N$ (≤ 100)	$4N$ (≤ 75)
鋼管ソイルセメント杭工法	粘性土	C または $10N$ (≤ 200)	C または $10N$ (≤ 200)
	砂質土	$10N$ (≤ 200)	$10N$ (≤ 350)

N : 杭周面地盤の平均 N 値

C : 粘性土の粘着力 (kN/m²)

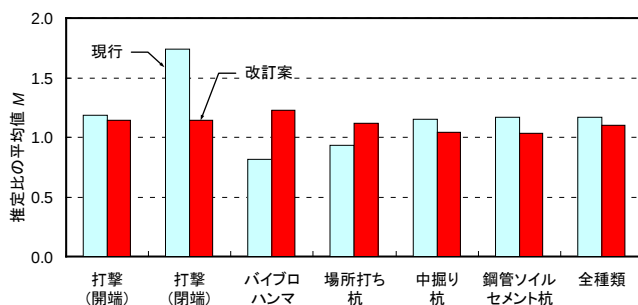


図-5 推定比 (= 実測値 / 推定値) の平均値の対比

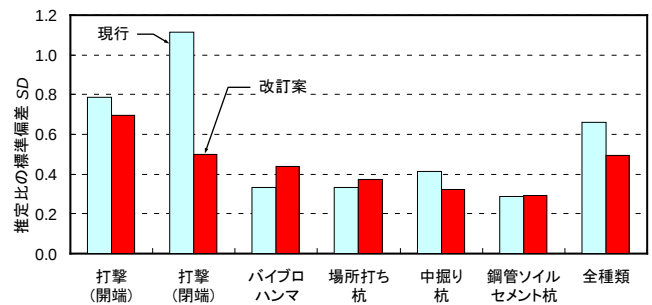


図-6 推定比 (= 実測値 / 推定値) の標準偏差の対比

4. 設計モデルの課題

2.に示すように極限支持力を定義すると、レベル2地震時の照査に用いる杭軸方向抵抗特性モデルが新たな課題となる。図-7に示すように、現行のモデルは、設計上の極限支持力 R_{ud} を上限値とする弾完全塑性型で与えられている。しかし、杭頭変位レベル S/D が10%を超える領域では、先端抵抗に多くを依存する杭の抵抗は R_{ud} よりも大きくなり、現行モデルは杭頭反力を過小評価することになる。一方で、フーチングの曲げ・せん断に対する設計において、杭頭反力は支配的な荷重であり、杭頭反力を過小評価することはフーチングの設計に対しては危険側となる場合がある。これを解消するためには、フーチングの設計に用いる杭頭反力を何らかの係数等によって割増す必要がある。または、図中に併せて破線で例示するように2次勾配を与えるもしくは複数の折れ点を設ける等、設計モデルを変更する案も考えられる。

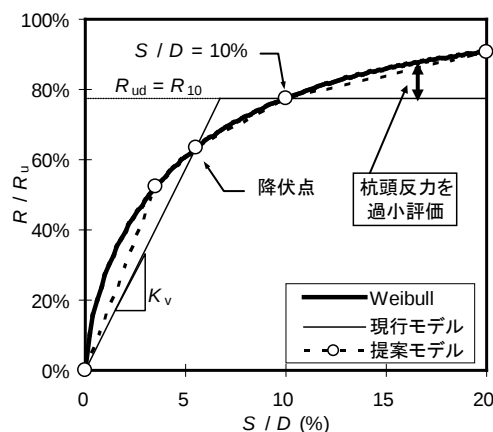


図-7 先端抵抗依存型の杭の荷重変位曲線と設計モデル

5. まとめ

以上をまとめると次のとおりである。

- (1) 常時、暴風時およびレベル1地震時に許容できる杭頭変位に着目すると、極限支持力の定義はこれまでのものを踏襲するのがよいことを示した。
- (2) 支持力推定式の作成方法を標準化し、人為差の少ない客観的な推定式の作成方法を示した。
- (3) 見直した支持力推定式は、現行に比べ推定結果の偏りやばらつきが低減され、加えて地盤調査の精度向上が反映されるものとなる。
- (4) レベル2地震時の照査に用いる杭軸方向抵抗特性モデルの扱いが課題である。

謝 辞

本件、(社)日本道路協会橋梁委員会下部構造小委員会においてご審議頂きました。委員各位には深くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 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
- 2) 宇都一馬、冬木衛、桜井学：杭の載荷試験結果の整理方法、基礎工、Vol.10、No.9、pp.21~30、1982
- 3) (社)地盤工学会：地盤工学会基準 杭の鉛直載荷試験方法・同解説 -第一回改訂版-、2002
- 4) (社)日本道路協会：道路橋下部構造設計指針 くい基礎の設計篇、1964
- 5) 例えば、佐伯英一郎、岩松浩一、木下雅敬：Non-Displacement Pileの先端支持力推定のための地盤の「平均N値」に関する解析的一考察、日本建築学会構造系論文集、第535号、pp.87~94、2000
- 6) (社)日本道路協会：道路橋下部構造設計指針・同解説 くい基礎の設計篇、1976
- 7) 福井次郎、白戸真大、松井謙二：道路橋基礎の部分安全係数設計法開発へ向けた基礎研究、土木研究所資料、第3936号、2004

横幕 清*



株式会社JFEスチール
(前独立行政法人土木研究所
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)
Kiyoshi YOKOMAKU

白戸真大**



独立行政法人土木研究所
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、博
(工)
Dr. Masahiro SHIRATO

中谷昌一***



独立行政法人土木研究所
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、博
(工)
Dr. Shoichi NAKATANI