

# 新設計標準による杭基礎の試設計と 現行標準による設計比較

手嶋 正和\* 勅使川原 敦\*\* 西岡 英俊\*

## A Trial Design of Pile Foundations Applying a New Design Code and a Comparative Design between the New and Current Design Code

Masakazu TESHIMA Atsushi TESHIGAWARA Hidetoshi NISHIOKA

The design standard for railway foundations, currently based on the limit-state design method is under preparation as a performance-based design method in near future. In this report, we present the trial design of pile foundations according to the new design code, and the difference between the results from the new and current design codes. We performed the seismic performance verification of two rigid frame elevated bridges with the different type piles: cast in place concrete piles and screwed steel piles, using criteria for restoration and safety performance, i. e., (L1 and L2 seismic spectrum II). Consequently, we confirmed that it is adequate to prepare justifiable designs with the new design code.

キーワード：新設計標準，杭基礎，ラーメン高架橋，性能照査，試設計，影響分析

### 1. はじめに

現在改訂を進めている「鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎構造物」について、現行標準<sup>1)</sup>と改訂標準(案)<sup>2)</sup>(以降、新設計標準と呼ぶ)による杭基礎の試設計を実施し、改訂に伴う影響分析を行った。対象構造物は、現行標準による設計事例で、異なる杭基礎(場所打ち杭、回転杭)を有したラーメン高架橋2基である。各構造物に対し、改訂された地盤抵抗特性および復旧性・安全性の照査指標の制限値を用いて、地震時以外の杭基礎の性能照査および地震の影響(L1地震動、およびL2地震動スペクトルII)<sup>3)</sup>に対する性能照査を実施し、現行標準による照査結果との違いを確認した。

### 2. 杭基礎設計法の主な改訂点

#### 2.1 現行設計法の課題

現行標準による杭基礎の設計では、地盤を弾塑性体(地盤反力係数を初期剛性、支持力を上限値とするバイリニア型)と仮定し、さらに各限界状態に対して部分安全係数(地盤抵抗係数)を導入しているが、以下の課題があった。

##### (1) 地盤反力係数

打込み杭、場所打ち杭の載荷試験データより定められたものである<sup>4)</sup>。しかし、上記の算定式が提案された昭

和61年の設計標準<sup>5)</sup>改訂以降、各種新工法が開発されたものの、個別に算定式が提案されており、各種杭工法の間で統一的な評価が行われていなかった。

##### (2) 支持力算定式および地盤抵抗係数

現行の支持力算定式は、杭の載荷試験データや各々の杭種に応じた支持性状の相違を勘案し、杭径の10%の沈下量における支持力(基準支持力)および沈下量についての確率的な検討を行って定めたものである<sup>6), 7)</sup>。しかし、これらは基礎の性能を明確に定義したものではなく、地盤抵抗係数により補正された周面と先端の支持力分担が実現現象と逆傾向となる場合もあった。

#### 2.2 主な改訂点

##### (1) 性能照査型設計への移行

現行標準に示される各限界状態と耐震標準で定義される耐震性能に応じて、実務上の取り扱いとの整合性を考慮して、構造物の要求性能に応じて、杭基礎の性能項目および照査指標を設定した(表1)。

##### (2) 設計地盤反力係数

鉛直方向の設計地盤反力係数は、各種杭工法の基準変位量を10mmに統一し、平均的な評価となるように新たな算定式を提案した(杭先端の設計鉛直地盤反力係数 $k_v$ 、杭周面の設計せん断地盤反力係数 $k_{\rho}$ )。杭周面の設計せん断地盤反力係数 $k_{\rho}$ は杭径の依存性が少ないと考えられることから、杭径に依存しない算定式に変更した。また、非線形解析時の水平地盤反力係数 $k_h$ は、線形解析時(降伏点付近の等価剛性に低限された値)の2倍に割り増すこととした(表2)。

\* 構造物技術研究部(基礎・土構造)

\*\* (株)復建エンジニアリング(前 構造物技術研究部)

特集：基礎構造物の設計技術

表1 構造物の要求性能と杭基礎の性能項目・照査指標（部材の照査を除く）

要求性能		新設計標準			現行標準	
		性能項目		照査指標（設計限界値）	照査項目	
安全性	安定	地震時以外	地盤の破壊 水平安定 回転安定	基準支持力×地盤抵抗係数 $f$ （表4） フーチング中心の変位量 $1.2\%L$ <sup>注1)</sup> $\leq 100\text{mm}$ フーチング中心の回転角 $6/1000\text{rad}$	支持力（終局限界） — —	
		地震時（L2地震）	地盤の破壊 水平安定 回転安定	基準支持力×地盤抵抗係数 $f$ （表4） フーチング中心の変位量 $10\%L$ <sup>注1)</sup> フーチング中心の回転角 $30/1000\text{rad}$	— — —	
使用性	支持性能	地震時以外	長期支持性能	基準支持力×地盤抵抗係数 $f$ （表4） フーチング中心の変位量 $0.4\%L$ <sup>注1)</sup> $\leq 40\text{mm}$ フーチング中心の回転角 $2/1000\text{rad}$	支持力（長期使用） — —	
			短期支持性能	基準支持力×地盤抵抗係数 $f$ （表4） フーチング中心の変位量 $0.4\%L$ <sup>注1)</sup> $\leq 40\text{mm}$ フーチング中心の回転角 $2/1000\text{rad}$	支持力（使用限界） — —	
復旧性	性能レベル1	残留変位	地震時（L1地震）	残留鉛直変位 残留水平変位 残留傾斜	基準支持力×地盤抵抗係数 $f$ （表4） フーチング中心の変位量 $2.0\%L$ <sup>注1)</sup> $\leq 100\text{mm}$ フーチング中心の回転角 $10/1000\text{rad}$	基礎の降伏点
	性能レベル2		地震時（L2地震）	残留鉛直変位 残留水平変位 残留傾斜	基準支持力×地盤抵抗係数 $f$ （表4） フーチング中心の変位量 $8.0\%L$ <sup>注1)</sup> $\leq 500\text{mm}$ フーチング中心の回転角 $20/1000\text{rad}$	基礎の塑性率

注1)：Lは基礎前面の抵抗幅で、群杭の場合は、杭径D×杭列数nとする。

表2 主な地盤抵抗特性（場所打ち杭，回転杭）

地盤抵抗特性・杭種		新設計標準	現行標準	
地盤反力係数 (kN/m <sup>3</sup> )	場所打ち杭	杭先端の鉛直地盤反力係数 $k_v$	$1.40\rho_v E_s D^{-3/4}$ <sup>注1)</sup>	$0.60\alpha E_s D^{-3/4}$
		杭周囲のせん断地盤反力係数 $k_h$	$0.22\rho_s E_s$ <sup>注1)</sup>	$0.09\alpha E_s D^{-3/4}$
		水平地盤反力係数 $k_h$	線形解析時： $1.80\rho_s E_s D^{-3/4}$ <sup>注1)</sup> 非線形解析時： $3.60\rho_s E_s D^{-3/4}$ <sup>注1)</sup>	$0.60\alpha E_s D^{-3/4}$
	回転杭	杭先端の鉛直地盤反力係数 $k_v$	$6.00\rho_v E_s D^{-3/4}$ <sup>注1)</sup>	$2.72\alpha E_s D^{-3/4}$
		杭周囲のせん断地盤反力係数 $k_h$	$0.22\rho_s E_s$ <sup>注1)</sup>	砂質土： $0.12\alpha E_s D^{-3/4}$ 粘性土： $0.15\alpha E_s D^{-3/4}$
		水平地盤反力係数 $k_h$	線形解析時： $1.80\rho_s E_s D^{-3/4}$ <sup>注1)</sup> 非線形解析時： $3.60\rho_s E_s D^{-3/4}$ <sup>注1)</sup>	$0.60\alpha E_s D^{-3/4}$
基準支持力度 (kN/m <sup>2</sup> )	場所打ち杭	基準先端支持力度 $q_k$	砂質土： $60N \leq 3500$ 砂礫土： $60N \leq 7500$	砂質土： $70N \leq 3500$ 砂礫土： $100N \leq 7500$
		基準周囲支持力度 $r_k$	砂質土： $3N \leq 150$ 粘性土： $6N \leq 150$ または、 $0.4c \leq 150$	砂質土： $5N \leq 150$ 粘性土： $10N \leq 150$ または、 $q_s/2 \leq 150$
	回転杭	基準先端支持力度 $q_k$	砂質土： $150N \leq 10000$ 砂礫土： $150N \leq 10000$	$150N \leq 7500$
		基準周囲支持力度 $r_k$	砂質土： $2.5N \leq 120$ 粘性土： $5N \leq 100$ または、 $0.3c \leq 100$	砂質土： $2N \leq 100$ 粘性土： $5N \leq 50$ または、 $q_s/2 \leq 50$

注1)： $\rho_v$ （地盤反力係数の修正係数）は長期0.5，短期1.0とする。

(3) 設計基準支持力

杭の鉛直載荷試験における「杭先端沈下量が杭径の10%に至る状態の支持力」を基準支持力と定義し、基準支持力を安全側に評価できる算定式を提案した（表2）。

また、従来の地盤抵抗係数は、構造物の変位算出時に設計地盤反力の非線形特性の設定に用いる係数（支持力修正係数）と、設計限界値としての設計支持力算定時に用いる係数（地盤抵抗係数）にそれぞれ区分した。

(4) 設計地盤反力の非線形特性

杭先端の鉛直地盤抵抗および杭周囲のせん断地盤抵抗の非線形特性は、初期剛性がばね定数で、折れ点荷重が

降伏支持力、ばね変位が杭径Dの10%時に終局支持力となる2次勾配を有するバイリニア型モデルである（図1）。これらの降伏支持力，終局支持力は，基準支持力に

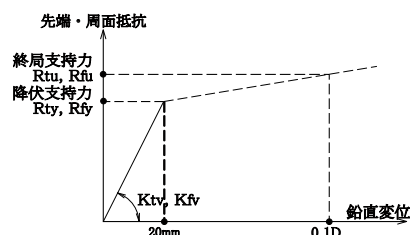


図1 鉛直方向の地盤抵抗の非線形特性

表3の支持力修正係数を乗じて算出する。杭の水平地盤抵抗は、従来と同様に2次勾配を有しないバイリニア型とした。

(5) 地盤抵抗係数

設計限界値としての設計支持力算定時に用いる地盤抵抗係数は、各要求性能に対して許容沈下量を設定し、安全側に支持力を評価できるように設定した(表4)。

表3 支持力修正係数(場所打ち杭, 回転杭)

抵抗特性		場所打ち杭	回転杭
先端抵抗	降伏 $\rho_y$	0.5	0.9
	終局 $\rho_u$	1.2	1.2
周面抵抗	降伏 $\rho_y$	1.1	1.1
	終局 $\rho_u$	1.3	1.1

表4 要求性能と地盤抵抗係数の設定根拠

要求性能	性能項目	地盤抵抗係数の設定根拠
安全性	安定	地震時以外 現行標準の終局限界状態相当
	地震時(L2地震)	杭先端沈下量が杭径の10%
使用性	支持性能	短期支持性能 短期沈下量20mm
	長期支持性能	長期沈下量20mm
復旧性	残留変位	地震時(L1地震) 杭先端沈下量が杭径の5%
	地震時(L2地震)	杭先端沈下量が杭径の10%

3. 設計条件

3.1 基本条件

構造形式：複線用RCラーメン高架橋

検討方向：線路直角方向

検討条件：基礎の支持力係数 $\alpha_f = 1.0$

材料修正係数 $\rho_m = 1.0$

上部工：起点側 RC単純T桁10.0m

終点側 RC単純T桁10.0m

基礎形式：①場所打ち杭 L=27.0m,  $\phi = 1.5$ m

②回転杭 L=28.0m,  $\phi = 1.0$ m

高架橋高さ：H=12.48m(1層4径間)

地盤条件：G4地盤(図2参照)

表層地盤：砂質土・粘性土の互層

支持地盤：N値50の砂質土層

3.2 構造形状

解析対象構造物の構造形状図を図2に示す。図中には、解析モデル上の節点および要素番号を示す。なお、杭を除く部材の諸元(寸法, 配筋)は場所打ち杭・回転杭で同一としている。

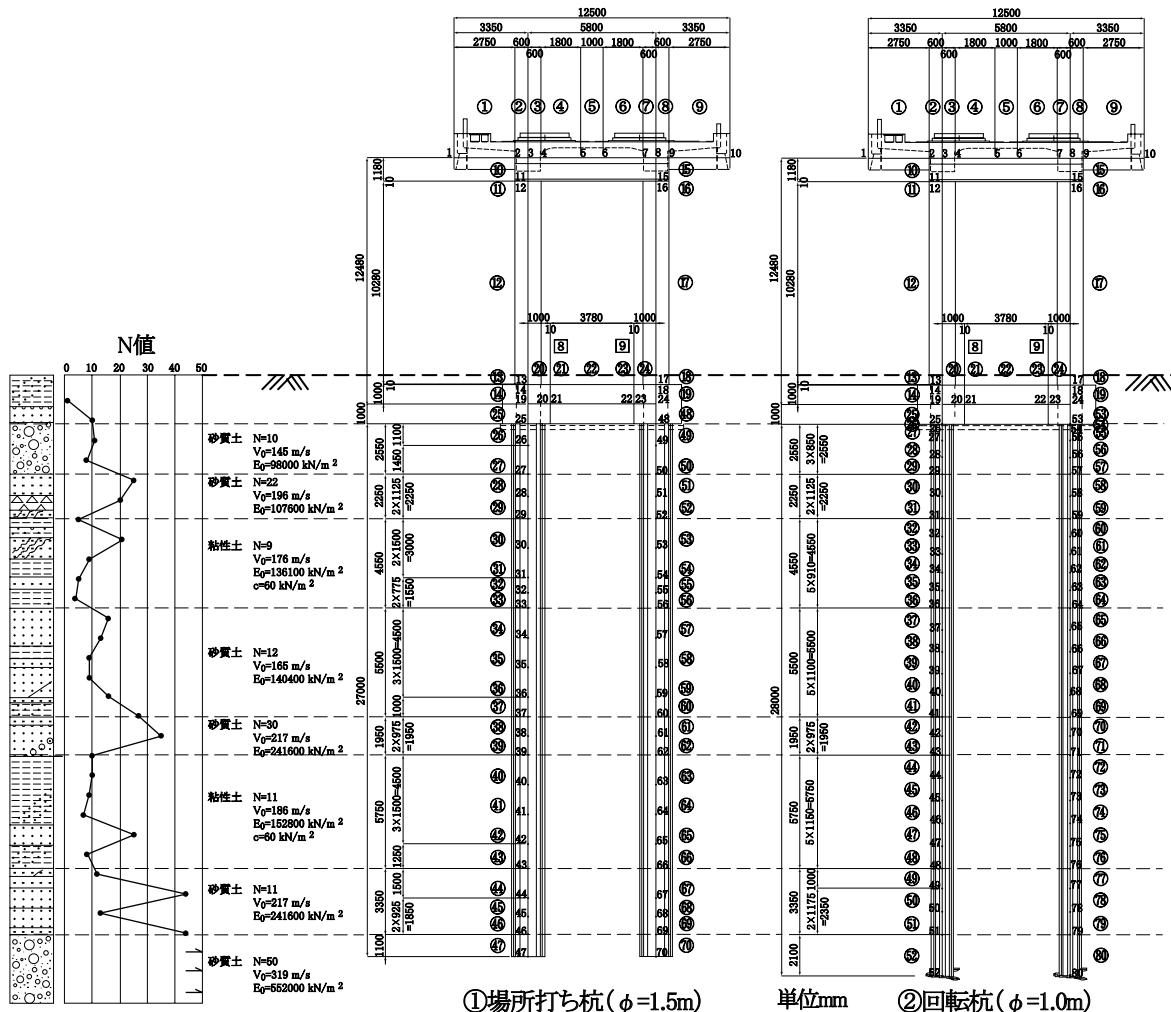


図2 ラーメン高架橋の構造形状図

特集：基礎構造物の設計技術

4. 試設計と設計比較

4.1 場所打ち杭

4.1.1 荷重-変位曲線

表5に新設計標準と現行標準により求めた荷重-変位曲線を示す。荷重-変位曲線の比較により、以下の傾向が確認できる。

- (1) 柱基部が先行降伏するため、構造物の降伏震度は新設計標準と現行標準でほぼ同値となるが、降伏変位は基礎の変形量の増大により、新設計標準の方が約3割(141mmから189mmに)増加した。
- (2) 降伏変位の増大に伴い、構造物の等価固有周期も新設計標準の方が約2割(1.20sから1.39sへと)長くなった。
- (3) 最大応答変位についても新設計標準の方が約1割(507mmから565mmに)増加した。

4.1.2 部材の損傷

図3にL2地震動スペクトルIIに対する部材の損傷の照査結果を示す。部材の損傷レベルの比較により、以下の傾向が確認できる。

- (1) 現行標準では、柱基部の損傷レベルは3であったが、新設計標準では損傷レベル2となった。これは、構造物全体系の変形が柱基部に集中していたものが、基礎に分散したためである。
- (2) 上層梁や地中梁に関しては、損傷レベルの差異はほとんど見られなかった。また、杭に関しても損傷箇所の違いは生じるものの、損傷レベルについては大きな差異は見られなかった。

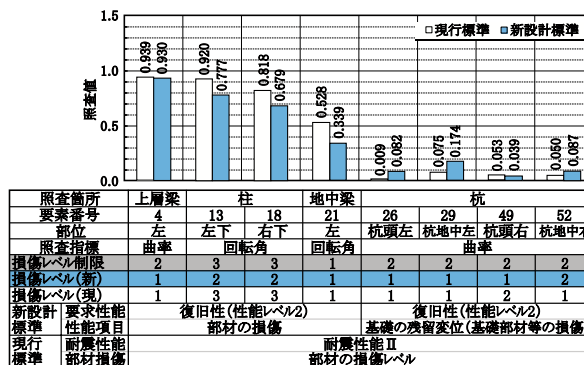


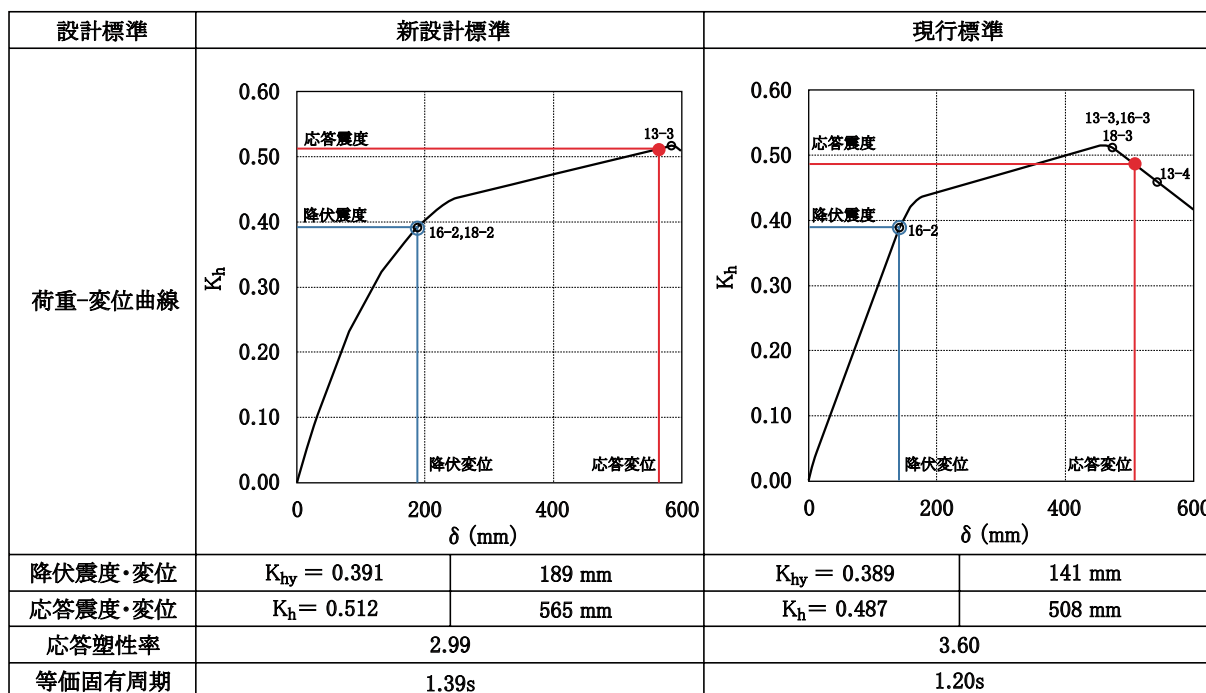
図3 部材の損傷の照査結果 (場所打ち杭：L2地震動スペクトルII)

4.1.3 基礎の性能照査

基礎の性能照査として、図4に基礎の鉛直支持力の照査結果を、表6に復旧性の関する基礎の残留変位(残留水平変位・残留傾斜)の照査結果を示す。ここでは、鉛直方向の照査として、安全性に関する基礎の安定(地盤の破壊)、使用性に関する基礎の支持性能、復旧性に関する基礎の残留変位(残留鉛直変位)の照査結果を示し、比較のため現行標準の各限界状態に対する鉛直支持力の照査結果を併記した。また、水平方向、回転方向の照査として、復旧性に関する基礎の残留変位(残留水平変位・残留傾斜)の照査結果を示した。

鉛直支持力の照査に関しては、全体的に新設計標準の照査値が1に近く、地震時以外の性能照査では照査値が1.5~2倍に増加しているほか、L1地震に対する押し込み杭の復旧性照査では照査値が大きく変化(0.496から

表5 荷重-変位曲線の比較(場所打ち杭)



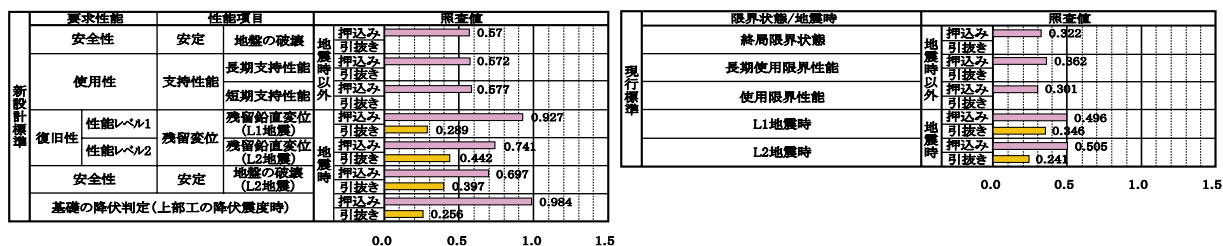


図4 基礎の鉛直支持力の照査結果 (場所打ち杭)

表6 復旧性に関する基礎の残留変位 (残留水平変位・残留傾斜) の照査結果 (場所打ち杭)

要求性能	性能項目	応答値	制限値	安全率	
復旧性	性能レベル1	残留変位 (L1地震)	29.6 mm	60.0 mm	0.494
	性能レベル2	残留傾斜	$7.3 \times 10^{-3}$ rad	$10.0 \times 10^{-3}$ rad	0.727
		残留水平変位	59.2 mm	240.0 mm	0.247
	性能レベル2	残留傾斜	$13.9 \times 10^{-3}$ rad	$20.0 \times 10^{-3}$ rad	0.696

0.927に変化) しており、地盤条件が悪い場合では、現行標準に比べて支持力照査が基礎の決定ケースになることも想定される。ただし、杭先端の設計N値を換算N値に基づいて50以上の値を設定すれば、照査値は大幅に改善される。一方、新設計標準で新たに設定された照査項目である残留水平変位および残留傾斜の照査においては、残留傾斜の照査値が大きめの値を示しており、残留傾斜が基礎の決定ケースになる可能性も想定される。

## 4.2 回転杭

### 4.2.1 荷重-変位曲線

表7に新設計標準と現行標準により求めた荷重-変位曲線を示す。荷重-変位曲線の比較により、以下の傾向

が確認できる。

- (1) 部材の損傷過程や降伏震度に大きな差異は見られないが、降伏変位は新設計標準の方が約1割 (144mm から 135mm に) 減少した。
- (2) 降伏変位の減少に伴い、構造物の等価固有周期も新設計標準の方が約1割 (1.23s から 1.18s へと) 短くなった。
- (3) 最大応答変位についても新設計標準の方が約1割 (516mm から 502mm に) 減少した。

### 4.2.2 部材の損傷

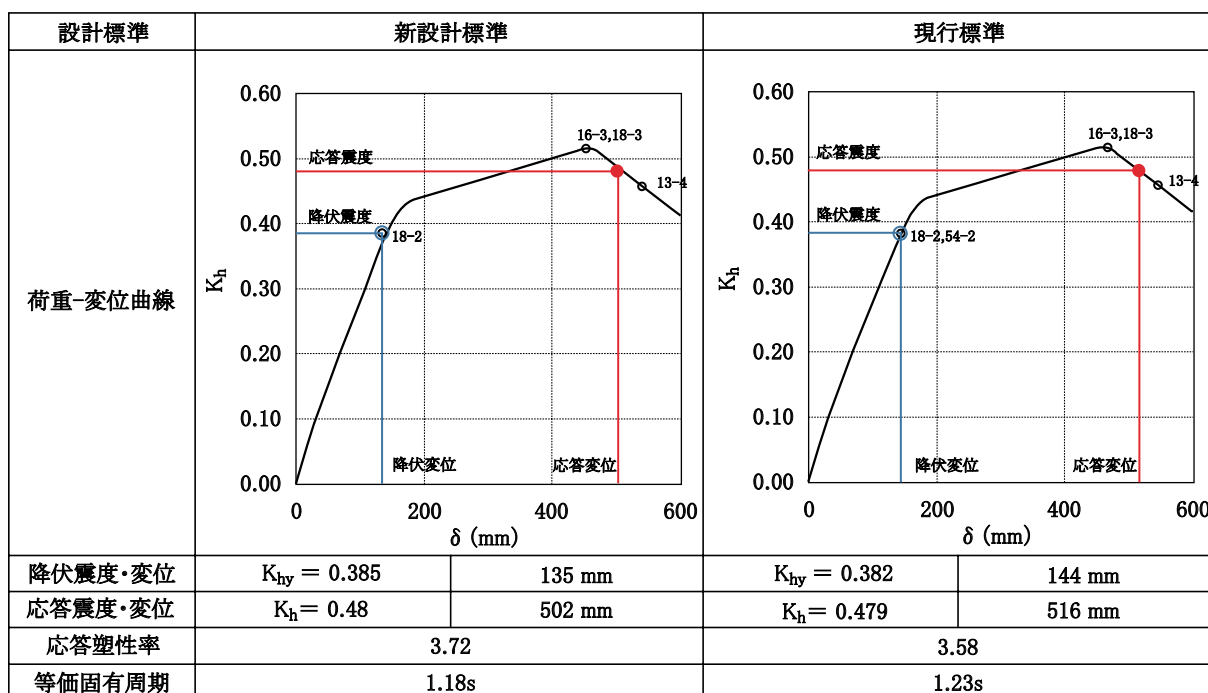
図5に部材の損傷の照査結果を示す。現行標準と新設計標準で、部材の損傷レベルに差異はほとんど見られず、標準改訂による損傷レベルへの影響は小さいといえる。

### 4.2.3 基礎の性能照査

基礎の性能照査として、図6に基礎の鉛直支持力の照査結果を、表8に復旧性に関する基礎の残留変位 (残留水平変位・残留傾斜) の照査結果を示す。

現行標準に比べ、新設計標準では鉛直支持力の照査値が小さく (安全側) になっており、特に地盤抵抗係数による設計支持力の低減度合いが緩和されたため、安全

表7 荷重-変位曲線の比較 (回転杭)



特集：基礎構造物の設計技術

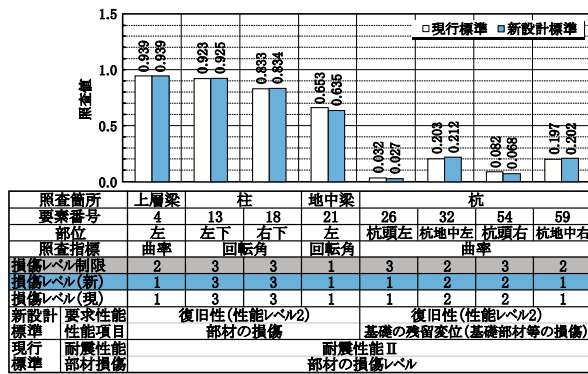


図5 部材の損傷の照査結果 (回転杭：L2地震動スペクトルII)

表8 復旧性に関する基礎の残留変位(残留水平変位・残留傾斜)の照査結果(回転杭)

要求性能	性能項目	応答値	制限値	安全率	
復旧性	性能レベル1	残留変位(L1地震)	31.7 mm	40.0 mm	0.793
		残留傾斜	$5.8 \times 10^{-3}$ rad	$10.0 \times 10^{-3}$ rad	0.577
	性能レベル2	残留変位(L2地震)	54.5 mm	160.0 mm	0.340
		残留傾斜	$7.9 \times 10^{-3}$ rad	$20.0 \times 10^{-3}$ rad	0.395

性、使用性および復旧性性能レベル1の照査において顕著である。また、残留水平変位および残留傾斜の照査においては復旧性性能レベル1の照査値が大きくなっている。

4.3 杭種による設計比較

同一地盤条件下で設計した場所打ち杭と回転杭の設計結果を比較すると、場所打ち杭は、支持力および回転変位の照査が厳しく、杭径が細く水平剛性自体は相対的に低い回転杭では水平変位の照査が厳しくなり、特性の異なる杭形式同士の特徴を反映した照査結果となっている。また、新設計標準の照査によっても、構造物寸法は変更が生じず、同程度の評価が得られることが確認できた。

5. まとめ

今回実施した場所打ち杭と回転杭の試設計と設計比較による新設計標準の影響分析を通して、現行標準と新設計標準による設計結果の差異を確認することができた。

得られた知見を以下に整理する。

- (1) 場所打ち杭の設計に関しては、新設計標準への移行により、地盤抵抗特性が現行標準に比べて低めに評価されることから、基礎の変形量が増加するほか、支持力、回転変位の照査が厳しくなる。一方、構造物全体系の変形が柱基部に集中していたものが、基礎に分散することにより、柱の損傷度合が低下する。
- (2) 回転杭の設計に関しては、部材照査への影響はほとんど見られないが、地盤抵抗特性が現行標準に比べて若干高めに評価されることから、基礎の変形量が減少し、支持力照査に余裕が生じる。しかし、制限値が厳しい水平変位の照査は厳しくなる。
- (3) 同一条件下で設計した場所打ち杭と回転杭の設計結果を比較すると、特性の異なる杭形式同士がそれぞれの特徴を反映させた照査結果となる。

本設計比較により、新設計標準の照査内容が現行標準と同程度の評価となることが確認できた。また、照査結果に杭の特徴や性能が反映されることを示すことができた。これより、設計条件に対して杭種選定の幅が広がり、設計の自由度が増す効果が期待できる。

文献

- 1) 運輸省鉄道局監修，財団法人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，2000
- 2) 基礎構造物・抗土圧構造物設計標準に関する委員会：鉄道構造物等設計標準・同解説，基礎構造物委員会案，2008.7.
- 3) 運輸省鉄道局監修，財団法人鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計，1999
- 4) 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.83，1985
- 5) 日本国有鉄道：建造物設計標準解説 基礎構造物・抗土圧構造物，1986
- 6) 海野隆哉：最近の鉄道橋杭基礎の設計の考え方，基礎工，Vol.13，No.11，1985
- 7) 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.77，1983

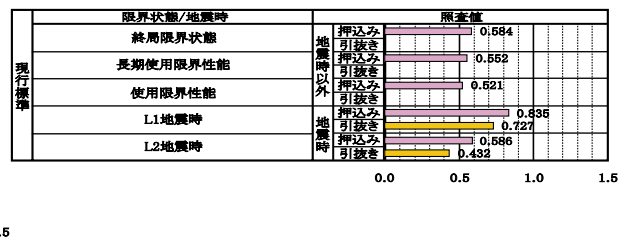
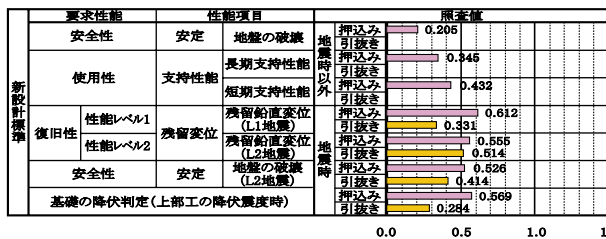


図6 基礎の鉛直支持力の照査結果(回転杭)