

杭基礎一体型鋼管集成橋脚の更なる実橋適用に向けた地盤の不確実性に関する一考察

曾我 恭匡¹・服部 匡洋²・佐々木 達生³・鬼木 浩二⁴

¹正会員 阪神高速道路株式会社 (〒530-0005 大阪府大阪市北区中之島三丁目2-4)

E-mail: sogaya-yasumasa@hanshin-exp.co.jp

²正会員 (一財)阪神高速先進技術研究所 (〒541-0054 大阪市中央区南本町4-5-7)

E-mail: masahiro-hattori@hit.or.jp

³正会員 大日本コンサルタント株式会社 (〒541-0058 大阪府大阪市中央区南久宝寺町3-1-8)

E-mail: tatsuo@ne-con.co.jp

⁴正会員 大日本コンサルタント株式会社 (〒102-0075 東京都千代田区三番町6-3)

E-mail: oniki@ne-con.co.jp

筆者らは、フーチングレス構造の杭基礎一体型鋼管集成橋脚に関して、実験および解析の両面で耐震性能を評価し、また、柱部と杭基礎を一体形式として「はりーばね」で表現したフレームモデルを用いる設計手法を提案している。一方、道路橋基礎の分野では、以前より地盤種別や地盤調査方法の違いによる地盤物性値のばらつきを設計法に考慮するための研究が進められてきており、地盤物性値のばらつきが杭基礎を対象とした動的解析の結果に与える影響が確認されている。

そこで、本稿では地盤抵抗特性値の不確実性が杭基礎一体型鋼管集成橋脚の設計に及ぼす影響について、従来のRC橋脚や鋼製橋脚との違いによる比較、評価を行った。その結果、杭基礎一体型鋼管集成橋脚の地盤物性値のばらつきの影響度は従来の橋脚形式と同程度であることが明らかとなった。

Key Words: *Pile foundation, footing-less, Evaluation of geotechnical uncertainty*

1. はじめに

鋼管集成橋脚とは、複数本の鋼管柱を橋軸方向および橋軸直角方向に履歴型ダンパー機能を有するせん断リンクによりひとつの柱とした橋脚である¹⁾。本橋脚には損傷制御設計²⁾が適用されており、死荷重や活荷重などの鉛直荷重を主部材である鋼管柱で支持し、地震慣性力などの水平荷重に対しては非主部材であるせん断リンクで抵抗する。従来構造のフーチングを有する鋼管集成橋脚は、阪神高速海老江ジャンクションの橋脚として架設³⁾され、2013年5月に供用した(写真-1)。加えて、フーチングを省略した杭基礎一体型鋼管集成橋脚に関しては、実構造物の1/20サイズの縮小模型を用いた振動台実験の結果などから、地盤の過大な応答変位や液化状が懸念される軟弱地盤において、より優れた変形性能を発揮し、軟弱地盤においても高い適応性があることが明らかとなっている^{4,5)}。

また、阪神高速は湾岸線をはじめ、大阪湾岸地区の軟

弱地盤上に位置するため、今後、杭基礎一体型鋼管集成橋脚を新規路線事業、改築事業、大規模更新・修繕事業などにおいて、構造形式の選択肢のひとつとして取り入れていけるよう実務レベルの検討を行い、構造解析や減

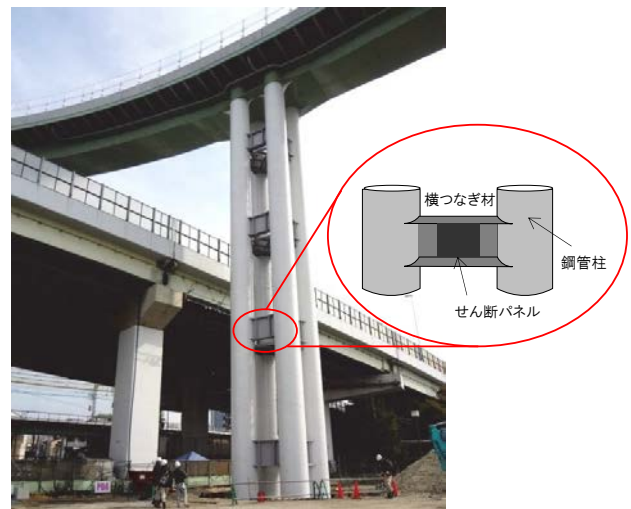


写真-1 鋼管集成橋脚 (海老江ジャンクション)

衰定数の設定などの観点で、より複雑化を避け、簡便かつ精度よく安全側に評価できるモデルとして、橋脚部と杭基礎を一体形式として「はりばね」で表現したフレームモデルを用いる設計手法を提案した⁹⁾。ただし、杭基礎一体型鋼管集成橋脚は、フーチングを省略することで橋脚および基礎がしなやかに変形し、橋脚基部のひずみが抑えられる合理的な構造であるのに対し、フーチング構造であるがため、一般的なRC橋脚や鋼製橋脚に比べ、地盤の不確実さの影響が直接的に橋脚部に影響することが懸念されている。

一方で、2017年道路橋示方書・同解説の改定により、部分安全係数設計法⁷⁾が導入されたが、道路橋基礎の分野では、以前より地盤種別や地盤調査方法の違いによる地盤物性値のばらつきを設計法に考慮するための研究が進められてきている⁸⁾⁹⁾。これらの既往研究では、地盤物性値のばらつきが杭基礎を対象とした動的解析の結果に与える影響を確認している¹⁰⁾。

そこで、本稿では、地盤抵抗特性値の不確実性が杭基礎一体型鋼管集成橋脚の設計に及ぼす影響を明らかにするため、従来のRC橋脚や鋼製橋脚と杭基礎一体型鋼管集成橋脚のそれぞれの橋脚形式に対し、地盤の特性値をばらつかせた動的解析を行い、橋脚形式の違いによる観点と設計体系の違いによる観点で比較、分析を行った。

2. 動的載荷試験及び再現解析による杭基礎一体型鋼管集成橋脚の設計手法の提案

杭基礎一体型鋼管集成橋脚に対して、3次元弾塑性有限要素解析を用いて設計することも考えられるが、汎用性を高め、現実的な設計を行うことを目的として、1/20縮小モデルを用いた動的載荷試験に対する再現解析を行うことで柱部と杭基礎を一体形式として「はりばね」で表現したフレームモデルを用いる設計手法を提案している。本章では、当該設計手法について、概説する。

(1) 解析モデル

振動台実験で用いた供試体(図-1)は、都市高速道路のランプ橋を想定した単柱橋脚の1/20縮小モデルで、相似則¹¹⁾を考慮し、橋脚は4本の鋼管で構成され、鋼管間隔は、杭基礎一体型鋼管集成橋脚の杭中心間隔が杭径の2.5倍となるよう設定し、鋼管間の横つなぎ材は3段配置した。実験の詳細については別稿⁹⁾を参照されたい。

杭基礎一体型鋼管集成橋脚のモデル化は、当該供試体を模擬し、弾性範囲で挙動する橋脚、杭、横つなぎ材、地中梁は線形梁要素として、はりモデルを用いた。杭基礎一体型鋼管集成橋脚の解析モデルの概要を図-2に示す。また、塑性化するせん断パネルは、1軸ばねモデル

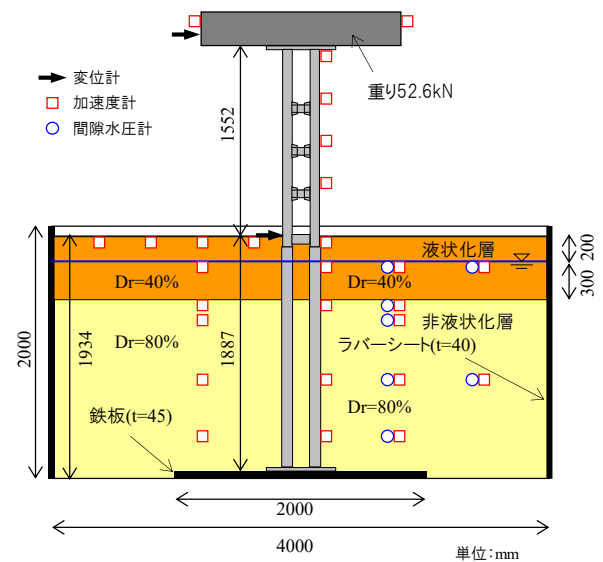


図-1 模型地盤及び計測項目とその配置(杭基礎一体型)

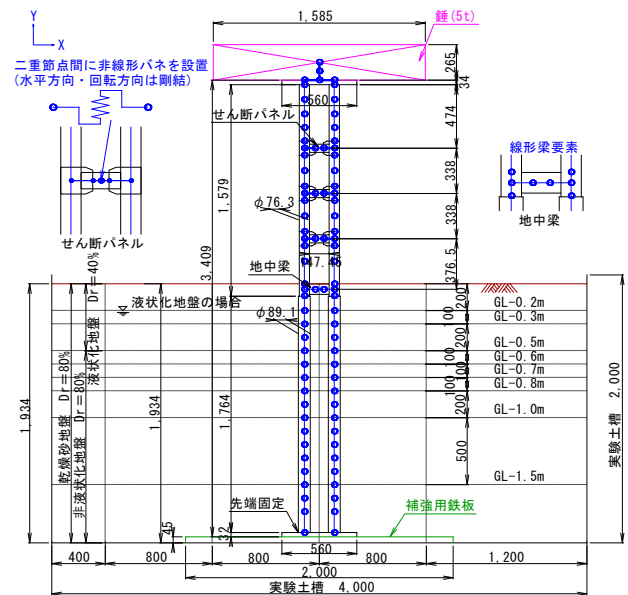


図-2 杭基礎一体型鋼管集成橋脚の解析モデルの概要

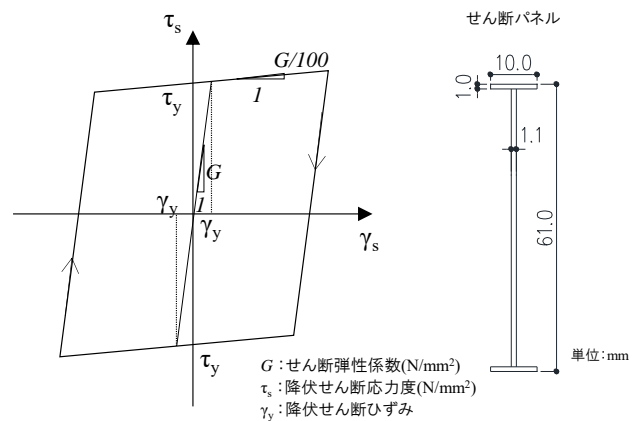


図-3 せん断パネルの材料構成則

として二重節点間にせん断方向の非線形ばねを設置し、**図-3**の構成則を有するバイリニア移動硬化則とし、降伏剛性はひずみ硬化などを評価して **G100** とした¹²⁾。せん断パネルについては、ねじれの影響を考慮し、ファイバーモデルを適用することも考えられたが、モデルの違いによる影響を別途検討したところ双方に大きな違いが認められなかったこと、今回の振動台実験の加振方向が一方方向（剛土槽の長手方向）であることから、ここでは1軸ばねモデルとした。各部位の解析パラメータを**表-1**に示す。

表-1 実験供試体の解析パラメータ

モデル形式	部位	断面剛性 (kN)	せん断剛性 (kN)	曲げ剛性 EI (kN/m ²)
線形梁	橋脚	1.3×10 ⁵	1.3×10 ⁵	87
	杭	1.5×10 ⁵	1.5×10 ⁵	140
	地中梁	2.8×10 ⁴	9.5×10 ³	17
非線形ばね	せん断パネル	1.7×10 ⁴	5.2×10 ³	7.4

(2) 周辺地盤モデル

周辺地盤モデルは、実務設計に落とし込むために簡易な「はり-ばね」とし、地盤は振動台実験で用いた砂質土の情報を基本に設定した。土質条件を**表-2**に示す。また、水平方向の地盤反力係数は、道路橋示方書・同解説（以下、道示と称す）IV下部構造編¹³⁾を参考に、以下の式より求め、**表-3**に整理する。なお、ここでは代表して乾燥砂地盤条件下の数値を示す。

$$k_H = \lambda k_{H0} (B_H/0.3)^{-3/4} \quad (1)$$

$$k_{H0} = \alpha E_0 / 0.3 \quad (2)$$

$$B_H = \sqrt{D/\beta} \quad (3)$$

$$\beta = \sqrt[4]{k_H D / 4EI} \quad (4)$$

ここに、 k_H ：水平方向地盤反力係数(kN/m³)、 λ ：基礎の施工方法の影響を考慮する係数、 k_{H0} ：直径0.3mの剛体円板による平板載荷試験の値に相当する地盤反力係数(kN/m³)、 α ：地盤反力係数の推定に用いる係数、 E_0 ：標準貫入試験の N 値より $E_0 = 2800N$ で推定した変形係数、 D ：荷重作用方向に直交する基礎の載荷幅、 β_H ：荷重作用方向に直交する基礎の換算載荷幅(m)、 β ：基礎の特性値(m⁻¹)、 EI ：基礎の曲げ剛性(13000 kN・m²)である。

(3) 杭基礎一体型鋼管集成橋脚の設計手法

杭基礎一体型鋼管集成橋脚の設計手法を提案するための再現解析については、振動台模型実験の結果を踏まえ、せん断パネルが面外変形を起こし、柱部が塑性化したフリーチング型鋼管集成橋脚の乾燥砂地盤／第3加振(1.5 m/sec²)を対象に検証を行った。検討項目は以下の4項目とし、①加速度及び変位波形と最大・最小応答値、②杭の曲げモーメント分布と変位分布を比較するとともに、実験では加振終了後の自由振動の区間で波形の減衰が明瞭に得られているため、この区間を対象に③卓越周期や④対数減衰率の算出を行うこととした。

以上を踏まえて、構造解析、入力地震動、減衰定数の設定の観点で検証を行ったところ、限られた実験結果との比較ではあるが、解析結果を総合的に判断し、杭基礎一体型鋼管集成橋脚の実務レベルにおける設計モデルとして、**表-4**に示すパラメータを提案した。

表-2 土質条件（上：乾燥砂，下：液状化）

地盤種類	層厚 (m)	平均 N 値	単位体積重量 γ_t (kN/m ³)	せん断抵抗角 (°)	平均せん断弾性波速度 V_s (m/s)	動的ポアソン比 ν_D
砂質土	0.500	1	16.0	41.0	220	0.50
	0.500	11	16.0	41.0	235	0.50
	0.500	18	16.0	41.0	250	0.50
	0.389	27	16.0	41.0	250	0.50

地盤種類	層厚 (m)	平均 N 値	単位体積重量 γ_t (kN/m ³)	せん断抵抗角 (°)	平均せん断弾性波速度 V_s (m/s)	動的ポアソン比 ν_D
砂質土	0.200	1	16.0	36.5	165	0.50
	0.300	1	19.3	36.5	165	0.50
	0.500	3	20.0	41.0	250	0.50
	0.500	9	20.0	41.0	270	0.50
	0.389	11	20.0	41.0	270	0.50

表-3 水平方向の地盤反力係数（静的変形係数より算出）

地盤種類	層厚 (m)	$\alpha \cdot E_0$ (kN/m ²)	k_{H0} (kN/m ³)	β (m ⁻¹)	B_H (m)	k_H (kN/m ³)
砂質土	0.500	5600	18667	0.622	0.378	15681
	0.500	61600	205333	0.622	0.378	172489
	0.500	100800	336000	0.622	0.378	282254
	0.389	151200	504000	0.622	0.378	423381

表-4 提案パラメータ

提案設計モデル	
地盤抵抗特性値	静的変形係数 E_0
入力地震動	地表面波
周辺地盤モデル	はり-ばね
地盤ばね履歴特性	非線形弾性
地盤ばね減衰定数	20%
減衰モデル	Rayleigh 減衰

3. 地盤特性値のばらつきに関する検討

前章のとおり、汎用性を高めることを目的とした杭基礎一体型鋼管集成橋脚の設計では、上部構造や鋼管集成

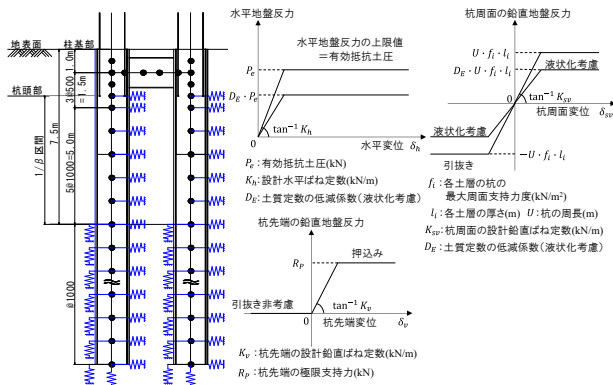


図-4 杭と周辺地盤モデルの概要

橋脚に加え、杭と基礎を一体形式として「はりばね」で表現したフレームモデルを用いて応答値を算出することになるが、図-4に示すような地盤抵抗の特性値に基づいた杭周辺の地盤ばねを用いるため、地盤抵抗の特性値にばらつきが生じることの影響を把握しておくことが、設計を行う上で重要になると考えられる。すなわち、地盤特性値の不確かさが設計に及ぼす影響を評価する必要がある。本章では、地盤特性値のばらつきに関する検討概要について述べる。

(1) 地盤調査のばらつき

地盤特性値を求める際に用いる地盤反力係数の算出において、用いられる変形係数は、原位置試験である孔内水平載荷試験の結果より推定される。このとき、孔内水平載荷試験を実施しない場合には、経験的に標準貫入試験のN値より推定している場合が多いが、孔内水平載荷試験を実施した上での結果から推定される変形係数 E_0 は、試験深度をはじめ、水平方向の立体的な広がりやばらつきを踏まえて、土層の硬軟を端的に示す指標であるN値の関数として整理されるのが一般的である¹³⁾。

ここでは、阪神高速道路管内(図-5)における既往の孔内水平載荷試験の結果より得られた E_0 と、標準貫入試験によって得られたN値との相関関係を整理した。その結果を表-5に示す。同表より、 E/N の平均値 $\mu = 366.4$ であり、標準偏差 $\sigma = 140.3$ と求められる。このことより、変形係数 E_0 はN値との相関を考慮し、平均的には $366.4N$ となる。加えて、上述の平均値 μ と標準偏差 σ の関係から正規分布であると仮定した確率密度関数を図-6に示す。同図より、99.7%データ範囲の上・下限値は $\mu \pm 3\sigma = 787.2, -54.3$ となるものの、設計において負の値は取り得ないため、現実的な範囲として、下限値は $\mu - 1.5\sigma$ とした。この結果より、地盤のばらつきの範囲は、概ね0.5倍~2倍の範囲であると想定し、以降、この範囲で地盤特性値がばらついた場合の応答に与える影響について感度分析を行う。



図-5 阪神高速道路管内図

表-5 変形係数を推定するための係数のばらつき

孔 No.	試験深度 (GL-m)	地層	N 値	変形係数 $E(kN/m^2)$	E/N
1	6.4	粘土混じり砂礫	8	2868	3585
2	7.3		6	3870	645.0
3	8.3		6	2847	474.5
4	6.3		6	3167	527.8
5	6.3		9	2570	285.6
6	6.3		6	2030	338.3
7	6.5		6	1748	291.3
8	7.9		6	1329	221.5
9	6.3	玉石混じり砂礫	6	1253	208.8
10	6.5	粘土混じり砂礫	10	3130	313.0
平均	μ		6.90	2481.2	366.4
標準偏差	σ		1.52	862.1	140.3

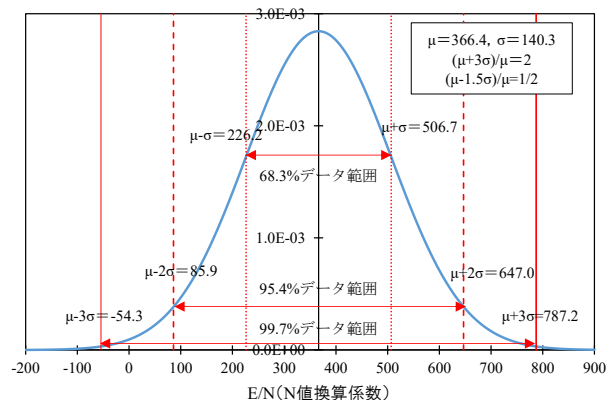


図-6 変形係数を推定するための係数の正規分布

(2) 検討ケースと検討モデル

感度分析においては、図-7及び表-6に示すような一般的な5径間連続橋梁を想定し、従来構造のRC橋脚および鋼製橋脚と杭基礎一体型鋼管集成橋脚とを比較し、検討を行う(図-8)。

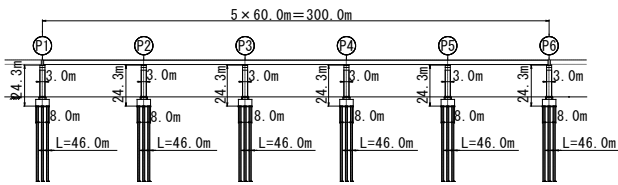


図-7 感度分析モデルの側面図 (鋼製橋脚)

表-6 感度分析モデルの支承条件

橋脚形式	方向	P1	P2	P3	P4	P5	P6
RC 橋脚 鋼製橋脚	橋軸	分散	固定	固定	固定	固定	分散
	橋直	固定	固定	固定	固定	固定	固定
鋼管集成 橋脚	橋軸	分散	剛結	剛結	剛結	剛結	分散
	橋直	固定	剛結	剛結	剛結	剛結	固定

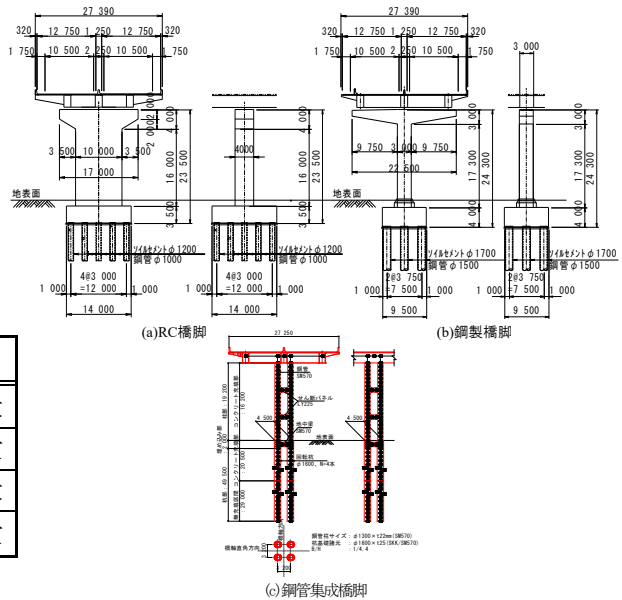


図-8 橋脚形式の比較 (正面図及び側面図)

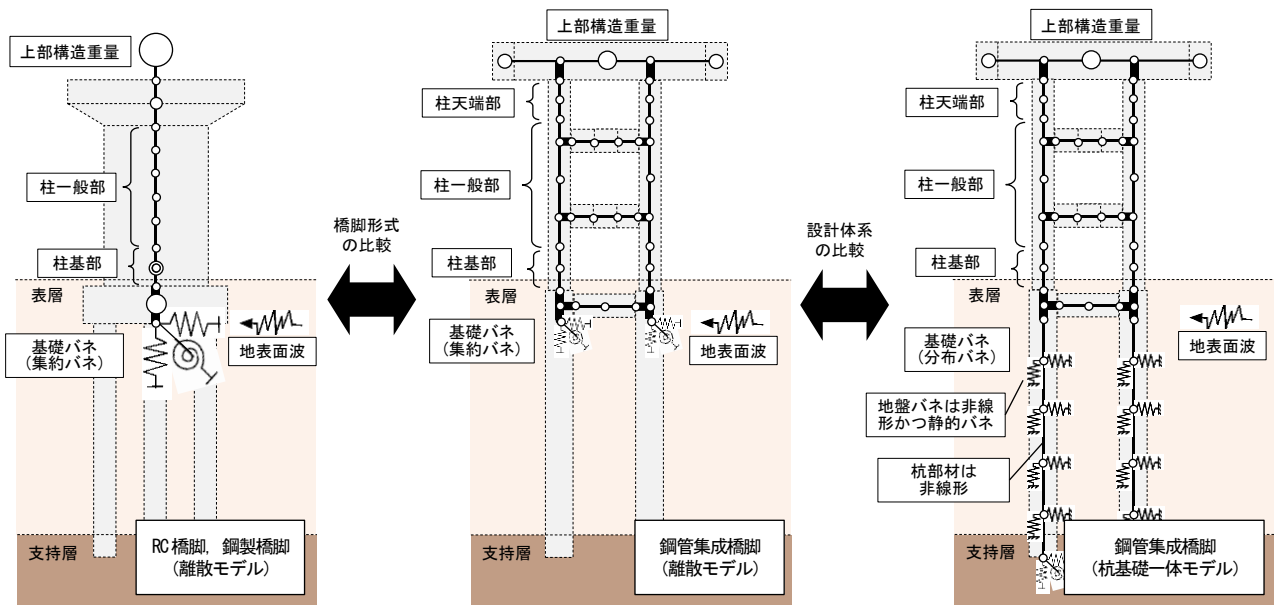


図-9 橋脚形式・設計体系の比較

まず、杭基礎一体型鋼管集成橋脚も含めた橋脚形式に対して、道示に基づいた、橋脚と基礎を個別に設計するときのモデル（以下、離散モデルと称す）による解析を行い、橋脚形式の違いの観点で比較・検討を行う。次に、杭基礎一体型鋼管集成橋脚に対して、離散モデルと杭基礎一体モデルによる解析をそれぞれ行い、設計体系の違いの観点で比較・検討を行う（図-9）。

なお、鋼管集成橋脚は橋脚に作用するモーメントを各鋼管の軸力で負担する構造であることから、軸力変動が大きくなる傾向にあるため、ここで実施する動的解析は、複合非線形解析が可能で、軸力変動を考慮可能なファイバーモデルを適用できる解析プログラム（ScanFEM）¹⁴とし、入力地震動は、架橋位置を阪神高速道路管内と想

定して道示V耐震設計編¹⁵レベル2地震動（タイプII）の標準加速度波形2-II-III-1を用いて感度分析を行う。

また、地盤のばらつきは、基礎ばねのばね定数のばらつきに現れるものとし、橋全体系のフレームモデルの中で基礎ばねのばね定数を設計値に対して変化させた検討ケースを設定する。地盤定数のばらつきの設定は、橋脚全基で同一の係数を乗じて変化させるケースと、図-7のP3橋脚の1基の基礎ばねだけに係数を乗じて変化させるケースの2通りとする。解析方向は橋軸方向および橋軸直角方向の2方向を実施する。ばらつきの範囲は、0.5倍、0.75倍、1.0倍、1.5倍、2.0倍の5通りとした。地盤のばらつきの検討ケースを表-7に示す。

感度分析を行うに際しては、各橋脚形式における、橋

表-7 地盤のばらつきの検討ケース

(a) 全基の基礎ばねをばらつかせるケース

検討 ケース	基礎ばねに乗じる係数					
	P1	P2	P3	P4	P5	P6
①	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
②	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
③	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
④	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
⑤	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0

(b) P3 橋脚 1 基のみ基礎ばねをばらつかせるケース

検討 ケース	基礎ばねに乗じる係数					
	P1	P2	P3	P4	P5	P6
①	1.0	1.0	0.5	1.0	1.0	1.0
②	1.0	1.0	0.75	1.0	1.0	1.0
③	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
④	1.0	1.0	1.5	1.0	1.0	1.0
⑤	1.0	1.0	2.0	1.0	1.0	1.0

脚ばねと基礎ばねの合成ばねや固有周期、橋脚天端変位、橋脚柱基部の応答塑性率に着目する。

なお、本検討では液状化なしの条件下で検討を行う。

(3) 橋脚ばねと基礎ばねの合成

橋脚ばねと基礎ばねの合成は、図-10 に示すとおり直列ばねとして考えられるため、式(5)で与えられ、各橋脚位置及び橋脚形式における下部構造と基礎構造の合成ばねの差異を倍率で表すと、図-11 のとおりとなる。ここで、合成ばね K は初期剛性（零点と初降伏点を結ぶ剛性）として抽出した。

これらより、もともと剛性の大きい RC 橋脚においては、地盤がばらつくことで、橋脚と基礎の合成ばねの変動率が大きくなる傾向あることを確認した。特に、橋軸直角方向は壁式で剛性が大きいため、その影響は顕著である。RC 橋脚において、地盤が柔らかい場合、合成ばね K が相対的に小さくなり、また、地盤が硬い場合は相対的に大きくなる傾向にある。

一方、鋼製橋脚や鋼管集成橋脚では、橋脚と基礎の合成ばねの変化率が小さい傾向にある。また、鋼管集成橋脚に関して、杭基礎一体モデルは杭も地盤も非線形を考慮しているものの、初期剛性は離散モデルと同じであることから、合成ばねは同じ値となる。

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{k_s} + \frac{1}{k_f} \quad (5)$$

ここに、

K : 下部構造と基礎構造の合成剛性

k_s : 下部構造の剛性

k_f : 基礎構造の剛性

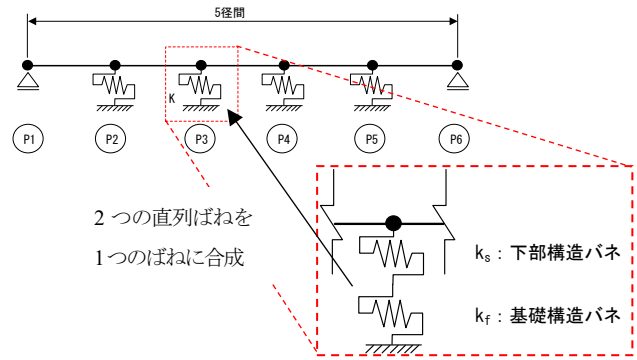


図-10 下部構造と基礎構造の合成ばね

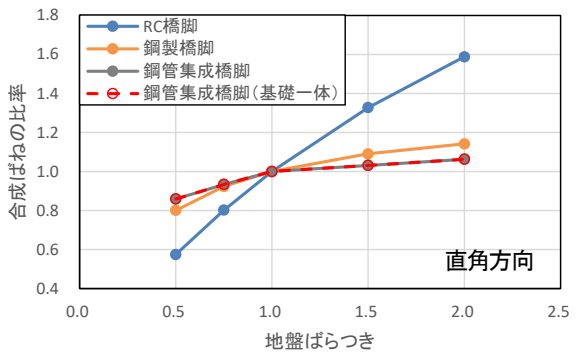
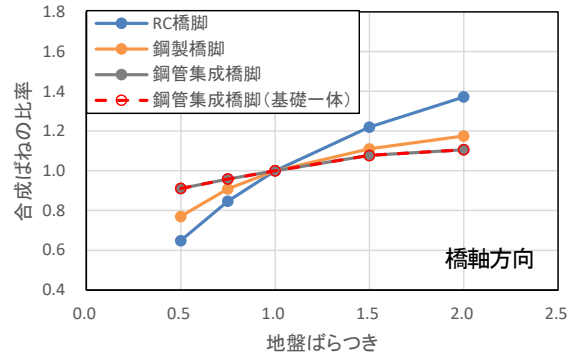


図-11 合成ばねの変化率

4. 地盤特性値のばらつきが橋脚の地震時応答に与える影響

(1) 橋脚全基の基礎ばねをばらつかせるケース

a) 固有周期の変化

各橋脚形式における固有周期の変化を図-12 に示す。ここでは代表して橋軸直角方向の結果を示すが、同図より、RC 橋脚は鋼製橋脚および鋼管集成橋脚に比べて、固有周期の変動率が大きい傾向にあった。特に地盤ばね 0.5 倍とした RC 橋脚の橋軸直角方向加振時の変動率は 1.63 であった。この傾向は橋軸方向でも同様であった。一方、鋼製橋脚および鋼管集成橋脚は、RC 橋脚に比べて、構造そのものの剛性が小さく、地盤のばらつきが生じていても全体的な剛性の変動が小さいため、固有周期の変動率も小さい傾向にあった。なお、鋼管集成橋脚については、離散モデルと杭基礎一体モデルで合成ばねが同じ

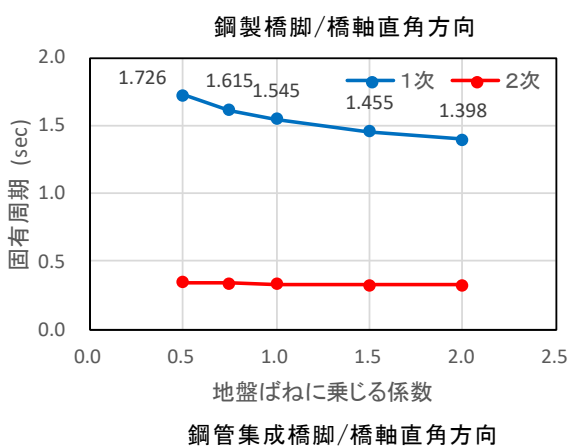
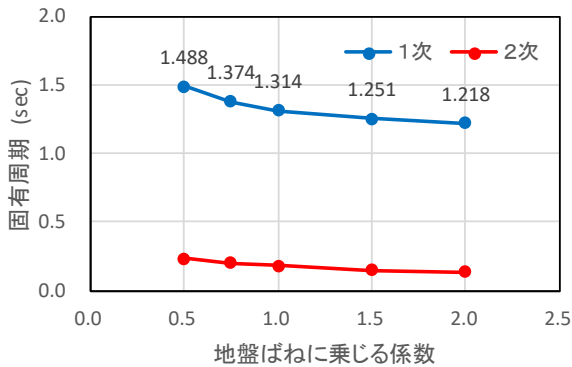
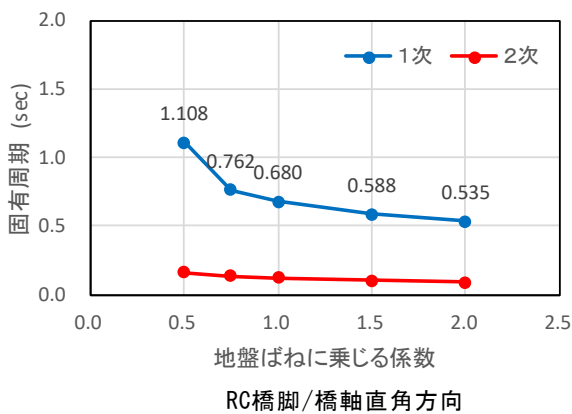


図-12 各橋脚形式における固有周期の変化

であることから、固有周期も同じ値となる。

これらより、もともと剛性の大きい RC 橋脚（特に壁式等）は地盤がばらつくことで、橋脚と基礎の合成ばねの変動率が大きくなり、地盤が柔らかい場合の RC 橋脚では、合成ばね K が相対的に小さく、固有周期が大きくなるものと考えられる。

b) 橋脚天端における応答変位の変化

各橋脚形式の橋軸直角方向の橋脚天端変位の変動率を図-13 に示す。応答変位の変動率は、地盤のばらつきによる合成ばね K の変動率が大きい RC 橋脚が最も大きく、杭基礎一体型鋼管集成橋脚が最も小さいものであった。

また、杭基礎一体型鋼管集成橋脚の橋軸直角方向加振時においては、0.5 倍や 0.75 倍の地盤が柔らかい場合に応答変位が小さくなり、1.5 倍や 2.0 倍の地盤が硬い場合

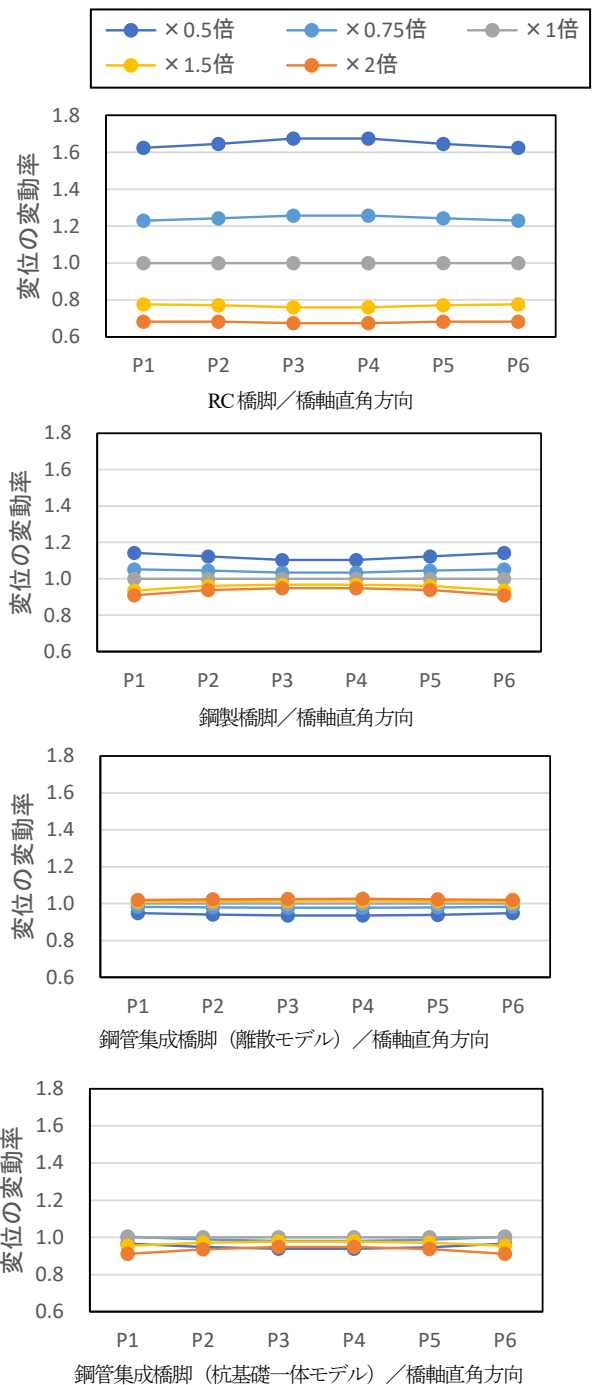


図-13 橋脚天端変位の変動率の比較

に応答変位が大きくなる逆の傾向を示した。これは、もともと固有周期が長い杭基礎一体型鋼管集成橋脚において、地盤が柔らかい場合には長周期化し、地震慣性力が低減したものと考えられる。

c) 橋脚基部の応答塑性率の変化

橋脚形式（RC 橋脚、鋼製橋脚、鋼管集成橋脚）及び各設計体系（離散モデル、杭基礎一体モデル）、各橋脚位置（P1、P3）での橋脚基部の塑性率の変動率を図-14 に示す。なお、ここでは代表して橋軸方向加振時を示す。橋軸方向加振時は、端部橋脚（分散支承）と中間橋脚

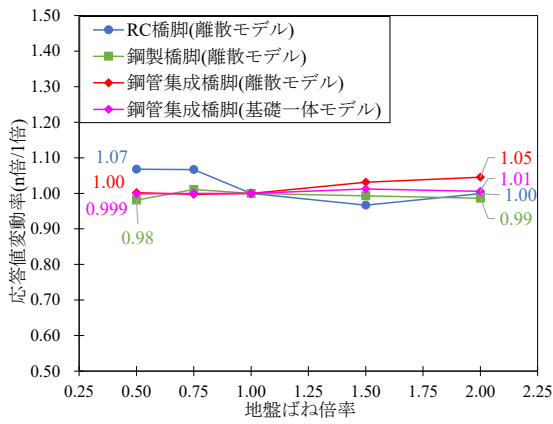
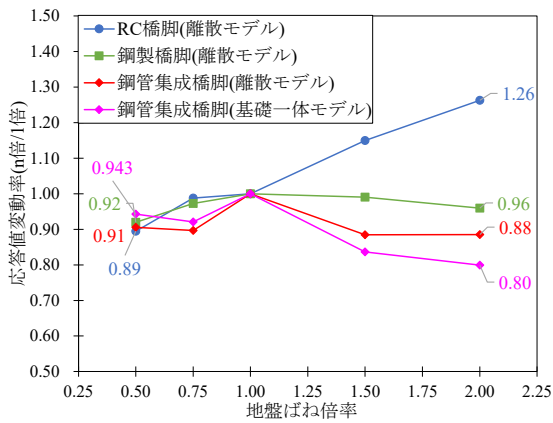


図-14 橋脚基部塑性率の変動率の比較

(固定支承)で支承条件が異なるため、荷重分担率が変化するものと考えられる。また、地盤が硬くなるにつれて、合成ばね K が大きくなり、橋脚天端の応答変位は抑制されるが、発生断面力は増加し、応答値は増加する傾向にあるものと考えられる。さらに、橋脚形式に着目すると、RC橋脚では地盤が硬くなるケースで影響が大きい傾向にある一方、鋼管集成橋脚では地盤が柔らかくなるケースで影響が大きい傾向にあった。

(2) 橋脚1基のみ基礎ばねをばらつかせるケース

a) 固有周期の変化

図-12と同様に各橋脚形式における固有周期の変化を図-15に示す。ここでは代表して橋軸方向の結果を示すが、同図より、RC橋脚は鋼製橋脚及び鋼管集成橋脚に比べて、固有周期の変動率が大きく、橋脚全基の基礎ばねをばらつかせたケースと同様の傾向であった。ただし、その変動率は数%程度であり、橋脚全基の基礎ばねをばらつかせたケースほど鋼製橋脚や鋼管集成橋脚との差は大きくなかったことや2次モードの固有周期がほぼ直線的であることから、基礎のばらつきが固有周期に与える影響は小さいものと考えられる。

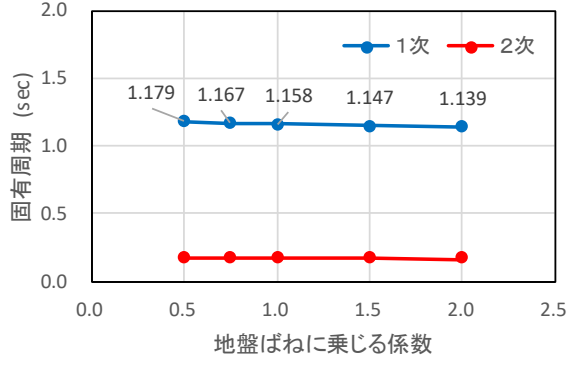
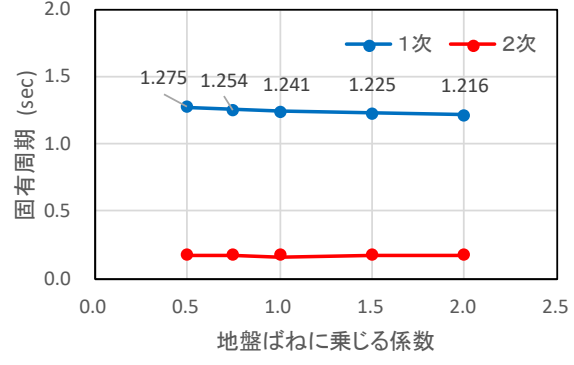
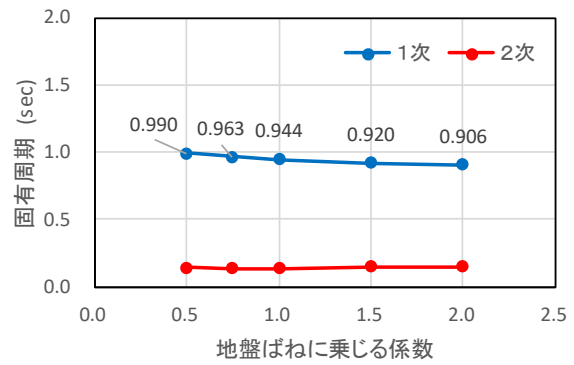


図-15 各橋脚形式における固有周期の変化

b) 橋脚天端における応答変位の変化

各橋脚形式における橋脚軸直角方向の橋脚天端変位の変動率を図-16に示す。

応答変位の変動率は、橋脚全基の基礎ばねをばらつかせたケースと同様にRC橋脚で大きく、鋼製橋脚や鋼管集成橋脚で小さい傾向を示した。これは、剛性の大きいRC橋脚において地盤がばらつくことで、橋脚ばねと基礎ばねの合成ばね K の変動率が大きくなるためであり、変位の変動率も大きくなるものと考えられる。

c) 橋脚基部の応答塑性率の変化

橋脚形式 (RC橋脚, 鋼製橋脚, 鋼管集成橋脚) 及び各設計体系 (離散モデル, 杭基礎一体モデル), 各橋脚位置 (P1, P2, P3) での橋脚基部応答変化率を図-17に示す。なお、ここでも代表して橋軸方向加振時を示す。

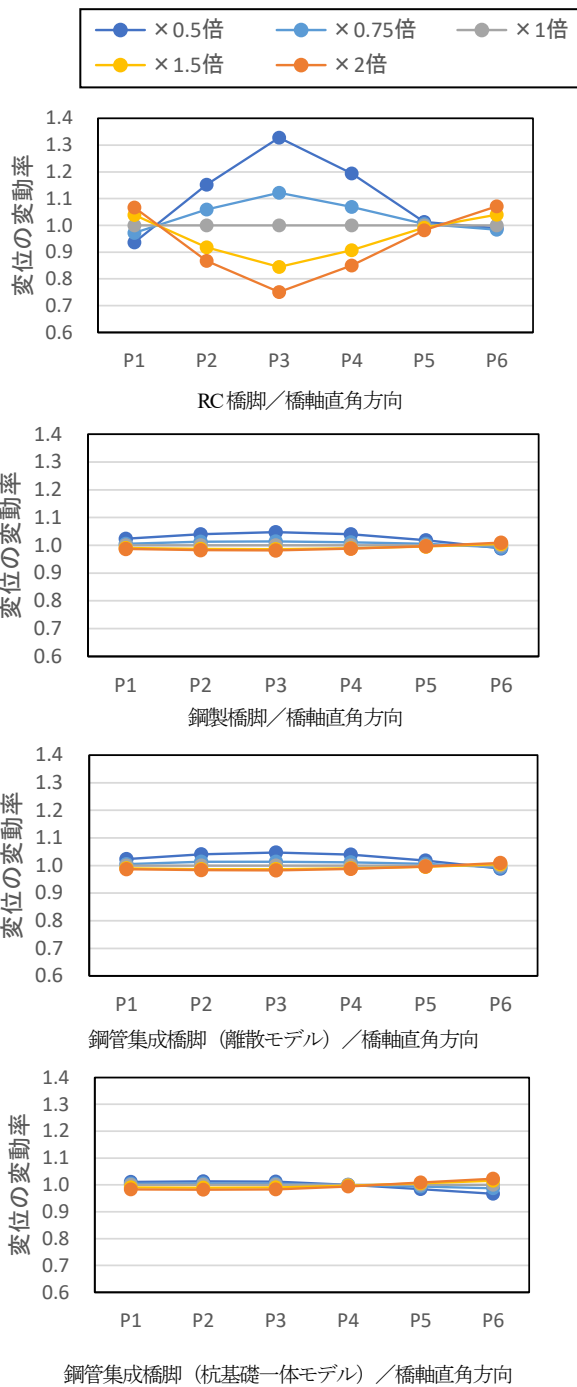


図-16 橋脚天端変位の変動率の比較

基礎ばねをばらつかせた P3 橋脚において、地盤のばらつきによる応答塑性率の変化率が最も大きい傾向（特に、RC 橋脚で顕著）にあり、解析結果の妥当性が確認できる。また、鋼管集成橋脚の応答塑性率については、従来形式の橋脚（RC 橋脚、鋼製橋脚）と比較して、地盤ばらつきの影響は同程度以下であることが確認できる。

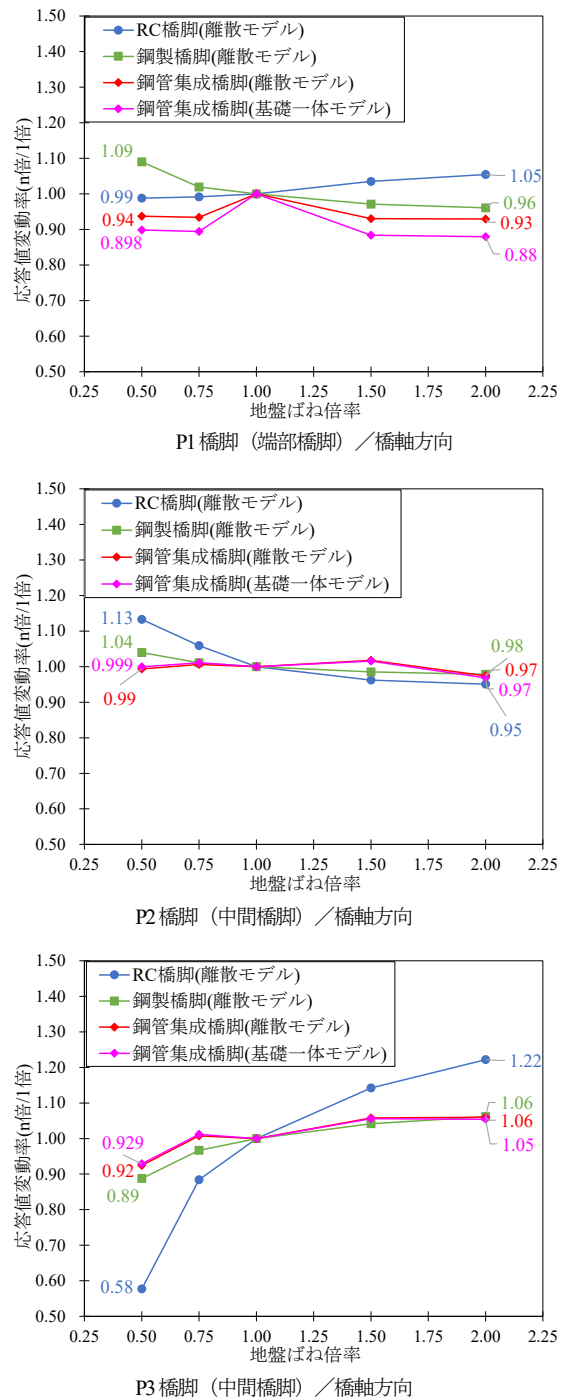


図-17 橋脚基部塑性率の変動率の比較

5. 地盤特性値のばらつきに関する感度分析に基づく考察

(1) 橋脚形式の観点による感度分析結果と考察

a) 橋脚ばねと基礎ばねの合成ばね

RC 橋脚の橋軸直角方向は壁式橋脚となっているため、特に合成ばね K の比率が大きい傾向を示した。また、剛性の大きい RC 橋脚において、地盤のばらつきの影響を考慮する場合、合成ばね K の変化率が相対的に大きい傾向を示したことが分かる。

b) 固有周期

鋼製橋脚及び鋼管集成橋脚に比べて、RC 橋脚の固有周期の変化率は大きく、特に地盤が柔らかい場合、RC 橋脚では合成ばね K が相対的に小さくなり、固有周期の変化率が大きくなったと考えられる。

c) 橋脚天端変位の変化率

鋼製橋脚及び鋼管集成橋脚に比べて、RC 橋脚の橋脚天端変位の変化率は大きく、剛性の大きい RC 橋脚において地盤がばらつくことで、橋脚ばねと基礎ばねの合成ばね K の変動率が大きくなるためと考えられる。

d) 橋脚柱基部の応答塑性率

橋脚全基の基礎ばねをばらつかせる場合、RC 橋脚では地盤が硬くなると応答塑性率への影響が大きく、鋼管集成橋脚では地盤が柔らかくなると応答塑性率への影響が大きい傾向を示した。一方で、橋脚 1 基 (P3) の基礎ばねをばらつかせる場合、各橋脚の荷重分担率が偏る傾向になり、基礎ばねをばらつかせた橋脚とその周辺の橋脚に影響が集中することを確認した。また、いずれのケースにおいても、RC 橋脚は許容塑性率を超える応答塑性率が生じるなど地盤のばらつきの影響度が大きいことが確認できたことから、RC 橋脚は他の橋脚形式と比較して、地盤のばらつきの影響を受けやすいと考えられる。

(2) 設計体系の観点による感度分析結果と考察

a) 橋脚ばねと基礎ばねの合成ばね

地盤のばらつきの影響を考慮した合成ばね K (初期剛性) の変化率については、離散モデルと杭基礎一体モデルの合成ばねは同じであることから、同様な傾向を示したが、動的解析時は、杭及び地盤が非線形挙動となるため、合成ばね (等価剛性) の大小関係は「離散モデル > 杭基礎一体モデル」の傾向を示し、地盤のばらつきによる合成ばねの変化率は「離散モデル < 杭基礎一体モデル」の傾向を示すものと考えられる。

b) 固有周期

合成ばね K の変化率の関係から、地盤のばらつきによる固有周期の変化率の大小関係は「離散モデル < 杭基礎一体モデル」の傾向を示すと考えられる。ただし、合成ばねの変化率の関係は離散モデルと基礎一体モデルで変わらないため、地盤ばらつきによる固有周期の変化率も等しくなると考えられる。

c) 橋脚天端変位の変動率

橋脚天端の応答変位の大小関係は、杭基礎一体モデルの杭および地盤が非線形挙動となるため、「離散モデル < 杭基礎一体モデル」の傾向を示した。また、杭基礎一体モデルでは、地盤が柔らかいケース (0.5 倍あるいは 0.75 倍) において応答変位が小さくなる傾向を示したが、もともと周期が長い杭基礎一体型鋼管集成橋脚において、地盤が柔らかい場合、長周期化の影響で地震慣性力が低

減したものと考えられる。

d) 橋脚柱基部の応答塑性率

全基礎をばらつかせた場合、1 基礎をばらつかせた場合のいずれのケースにおいても、橋脚の応答塑性率の大小関係は「離散モデル > 杭基礎一体モデル」であり、杭基礎一体モデルでは、橋脚柱基部の応答塑性率を過小評価する傾向がある。これは、基礎の変位と橋脚の変位の内訳が異なるためであり、基礎変位の大小関係は「離散モデル < 杭基礎一体モデル」であるが、橋脚変位の大小関係は「離散モデル > 杭基礎一体モデル」となる。

6. おわりに

フーチングレス構造の杭基礎一体型鋼管集成橋脚に関する、柱部と杭基礎を一体形式として「はりーばね」で表現したフレームモデルを用いる設計手法に対して、地盤抵抗特性値の不確実性が設計に及ぼす影響を明らかにすることを目的に、従来の RC 橋脚や鋼製橋脚との違いによる比較、評価を行った。その結果、得られた知見を以下に整理する。

- (1) 地盤の不確実性を評価するために、地盤特性値のばらつきに関する感度分析を行ったところ、橋脚形式の観点では、基礎ばねを全基ばらつかせたケースと 1 基のみばらつかせたケースのいずれにおいても、RC 橋脚が他の橋脚形式と比較して地盤特性値のばらつきの影響を受けやすい構造であることが明らかとなった。
- (2) 設計体系の観点では、基礎ばねを全基ばらつかせたケースと 1 基のみばらつかせたケースのいずれにおいても、杭基礎一体型鋼管集成橋脚の杭基礎一体モデルでは、橋脚柱基部の応答塑性率を過小評価する傾向があることが明らかとなった。
- (3) 基礎ばねを全基ばらつかせたケースと 1 基のみばらつかせたケースのいずれにおいても、杭基礎一体型鋼管集成橋脚は、従来形式の橋脚 (RC 橋脚、鋼製橋脚) と比較して、地盤のばらつきによる影響は同程度かそれ以下であることが明らかとなった。

今回の検討は限られた条件下での感度分析であること、また、杭基礎一体モデルにおいて、一部橋脚基部の応答塑性率を過小評価する結果も得られたことなど課題が残っている。阪神高速では鋼管集成橋脚の実構造物を対象としたモニタリング計測を行っていることから、これらの記録を蓄積し、分析することで、引き続き、より安全で合理的な設計手法を確立していけるよう更なる検証・検討を進めていきたい。

REFERENCES

- 1) 金治英貞, 鈴木英之, 野中哲也, 馬越一也: 履歴型ダンパー付鋼管集成橋脚の損傷制御構造に関する基礎的研究, 構造工学論文集, (公社)土木学会, Vol.50A, pp.559-566, 2004.
- 2) 和田章, 岩田衛, 清水敬三, 安倍重孝, 川合廣樹: 建築物の損傷制御設計, 丸善, 1998.
- 3) 森岡登, 三嶋大悟, 伊藤太一, 三好哲典, 宮永満, 松元丈臣: 海老江ジャンクションにおける鋼管集成橋脚の製作と架設, 橋梁と基礎, pp.37-42, 2014.
- 4) 篠原聖二, 金治英貞, 鬼木浩二, 木村亮: 杭基礎一体型鋼管集成橋脚の構造提案と地震時応答解析, 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol.69, No.3, pp.312-325, 2013.
- 5) 磯部公一, 澤村康生, 杉山裕樹, 篠原聖二, 曾我恭匡, 小林 寛, 木村 亮: 振動台模型実験による杭基礎一体型鋼管集成橋脚の耐震性能評価, 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol.72, No.4, pp.327-338, 2016.
- 6) 曾我恭匡, 岡上政史, 服部匡洋, 佐々木達生, 吉澤努, 磯部公一: 杭基礎一体型鋼管集成橋脚の更なる実橋適用に向けて～基礎部設計パラメータに関する検討～, 土木学会第 77 回年次学術講演会, 2022.
- 7) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 I 共通編, pp.41-60, 2017.
- 8) Tetsuya Kohno., Takashi Nakamura., Masahiro Shirato., and Shoichi Nakatani. : An evaluation of the reliability of vertically located shallow foundations and grouped-pile foundations, Proceedings of the 2nd International Symposium On Geotechnical Safety & Risk, Gifu, Japan, 11-12 June, 2009. Taylor & Francis Group, London. Pp.177-184, 2009.
- 9) Masahiro Shirato., Tetsuya Kohno., Shoichi Nakatani. : LRFD for the Structural Design of Piles in Grouped-pile Foundations, The 17th Southeast Asian Geotechnical Conference, Taipei, Taiwan, May 10-13, 2010.
- 10) 河野哲也, 谷本俊輔, 安藤滋芳, 堺淳一, 星隈順一: 地盤物性値のばらつきが杭基礎に対する動的応答評価に与える影響, 地盤工学ジャーナル, Vol.9, No.2, pp.110-139, 2014.
- 11) 井合進: 1g 場での地盤-構造物-流体系の模型振動実験の相似則, 港湾空港技術研究所報告, Vol. 27, No. 3, pp. 3-24, 1988.
- 12) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説【耐震設計】, 2012.
- 13) (社)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説IV下部構造編, 2017.
- 14) SeanFEM: (株)地震工学研究開発センター, <https://www.eerc.co.jp/seanfem/>
- 15) (社)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説V編耐震設計編, 2017.

(Received ?????, 2022)

(Accepted ?????, 2022)

A STUDY ON GEOTECHNICAL UNCERTAINTY FOR FURTHER APPLICATION OF A MULTIPLE STEEL PIPES BRIDGE PIER INTEGRATED BY PILE FOUNDATION WITHOUT A FOOTING

Yasumasa SOGA, Masahiro HATTORI, Tatsuo SASAKI and Koji ONIKI

In this paper, the effects of geotechnical uncertainties on the design of a multiple steel pipes bridge pier integrated by pile foundation without a footing are evaluated and compared with those of conventional RC piers and steel piers. The results show that the influence of the ground variation is comparable to that of the conventional pier type.