

地盤ばねの不確定性を考慮した場所打ち杭基礎の耐震信頼性評価

秋山充良¹・鈴木基行²

¹正会員 工修 東北大学助手 大学院工学研究科土木工学専攻(〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 06)
²フェロー 工博 東北大学教授 大学院工学研究科土木工学専攻(〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 06)

1. はじめに

現行の道路橋示方書¹⁾では、杭基礎の耐震設計にあたり、橋脚躯体の保有水平耐力に相当する慣性力を考慮することで、基礎には大きな損傷や大きな非線形挙動を生じさせないことを耐震設計の目的にしている。しかしながら、設計時に地盤変位の影響を考慮していないなどの理由により、上部構造、橋脚および基礎からなる橋梁システムの地震応答解析を行うと、基礎を弾性挙動内にとどめることができないことが報告されている²⁾。一方、橋脚－基礎系には、地盤に関する不確定性や、各耐力および支持力算定式のもつ不確定性などが存在する。特に、基礎設計の計算モデル化には、橋脚と比べ、地盤と基礎の相互作用など複雑な要因が多く、算定される耐力や作用力にはかなりの誤差が含まれると思われる。つまり、解析的に得られる基礎の応答値の精度を考慮すると、単に橋脚の保有水平耐力に相当する慣性力を用いて基礎の耐震設計を行った場合には、基礎の降伏に対する安全性が確保されている可能性は低いと言える。このため、現行の道路橋示方書で規定されるような荷重漸増法に用いる基礎の設計荷重の設定時には、橋脚－基礎系に介在する不確定性の影響も適切に考慮する必要がある。

本研究では、こうした状況を踏まえ、従来確定的に用いられてきた杭基礎－地盤間ばねが持つ不確定性を杭の載荷試験データなどから得られている統計量をもとに評価した。そして、これら各不確定性の大きさが動的解析から得られる杭基礎の応答値に与える影響を統計論的立場から検討した。

2. RC 橋脚一場所打ち杭基礎系の解析モデル

(1) 解析対象橋梁

解析対象としたのは、標準的な連続鉄桁橋の中間 RC 橋脚とこれを支持する杭基礎である。杭は場所打ち杭で

あり、また RC 橋脚は平成 8 年道路橋示方書³⁾の規定を満足している。上部構造および RC 橋脚は、上部構造重量 $W_U = 5.88$ (MN) と RC 橋脚の保有水平耐力 $P_U = 4.86$ (MN) の組み合わせ (以下、橋脚 1 と略す)、および上部構造重量 $W_U = 9.53$ (MN) と RC 橋脚の保有水平耐力 $P_U = 9.51$ (MN) の組み合わせ (以下、橋脚 2 と略す) の 2 種類を準備した。橋脚 1 および橋脚 2 は、ともに曲げ破壊先行型である。地盤モデルとしては、地表面から耐震設計上の基礎面までの深さが 15.8m～19.5m までのⅡ種地盤 4 種類を取り上げた。表-1 に各地盤モデルの基本固有周期 T_G (s) および加重平均 N 値などを示した。なお、このような各地盤モデルは、解析対象地震波より求められる基礎地震動から、後述する手法により算定される地表面での最大応答変位 (基礎面に対する相対変位) が概ね等しくなるように選択した。これは、杭基礎に作用する地盤変位の影響を一定とするためである。

(2) 杭基礎－地盤系解析モデル

本研究では、杭基礎－地盤系の解析モデルを図-1 に示されるように、質点系ばねモデルとした。そして、杭の載荷試験データなどから得られている統計量をもとに、杭基礎のモデル化の際に用いる杭基礎－地盤間の平均的なばね値を設定する。

a) 杭軸方向の抵抗特性

杭の軸方向押し込み支持力の上限値 $\overline{R_u}$ は、式(1)により算出される値⁴⁾を用いる。

$$\overline{R_u} = \overline{\alpha_p} \overline{N_p} A + U \sum \overline{\alpha_{fi}} l_i \overline{N_{fi}} \tag{1}$$

表-1 地盤モデルデータ

地盤モデル No.	地盤の特性値 T_G (s)	加重平均 N 値	表層から基礎面までの深さ (m)	地層数
Ⅱ-1	0.33	28.55	16.8	11
Ⅱ-2	0.34	17.07	15.8	9
Ⅱ-3	0.36	23.26	19.5	14
Ⅱ-4	0.39	14.78	17.3	12

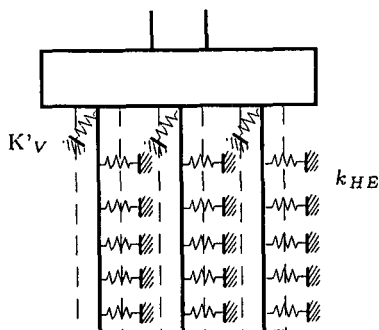


図-1 杭基礎-地盤系解析モデル

ここに,

$\overline{\alpha_p}, \overline{\alpha_{fi}}$: 表-2 に示される杭先端および周面 i 層の支持力係数の平均値

$\overline{N_p}, \overline{N_{fi}}$: 杭先端および周面 i 層の N 値の平均値

U : 杭の周長

A : 杭先端面積

l_i : 周面 i 層の層厚

杭先端および周面 i 層の支持力係数 α_p, α_{fi} の基本統計量を表-2 に示した。これは、岡原ら⁵⁾により行われた杭の鉛直載荷試験データの解析結果である。

場所打ち杭の軸方向ばね定数 K_v は、式(2)を用いた⁶⁾。

$$K_v = (0.031 \frac{L}{d} - 0.15) \cdot \frac{A_p E_p}{L} \quad (2)$$

ここに,

L : 杭長

d : 杭径

A_p : 杭の純断面積

E_p : 杭体のヤング係数

式(2)を用いて算出される杭軸方向ばね定数 K_v の実測値 K_v に対する比 α_v (ばね定数比)を表-3⁶⁾に示す。なお、表-3は、計算値/実測値で与えられている。従って、真の杭軸方向ばね定数の推定の際に必要な実測値/計算値の平均値は、表-3の逆数、また、変動係数は表-3の値をそのまま用いることとした。

杭の軸方向引抜き支持力の上限值は、地盤から決まる杭の極限引抜き力と杭の引張耐力のうち、いずれか小さい値を上限值 $\overline{P_{tu}}$ として与えた。杭の引抜き支持力の上限值 $\overline{P_{tu}}$ に関しては、信頼性のある統計量が得られないため、道路橋示方書の規定に従い算定される値が実際の値を平均的に表現できていると仮定した。

b) 杭軸直角方向の抵抗特性

杭軸直角方向の抵抗特性は、水平方向地盤反力係数、水平地盤反力度の上限值、群杭効果を考慮する補正係数等により記述される。しかしながら現在のところ、これら各値も統計的に評価可能なデータが得られていないため、道路橋示方書で与えられる各抵抗特性を平均値と仮定した。

表-2 支持力係数 α_p, α_{fi} の基本統計量⁵⁾

		データ数	平均値	標準偏差	変動係数
周面 α_{fi}	砂質土	40	0.412	0.252	0.611
	粘性土	35	1.577	1.060	0.672
先端 α_p		16	10.619	5.742	0.541

表-3 ばね定数比 K_v / K_{v0} (場所打ち杭)⁶⁾

		杭先端地盤		
		砂質土	粘性土	全データ
データ数		17	7	24
α_v	平均値	1.613	1.126	1.417
	変動係数	0.605	0.595	0.595

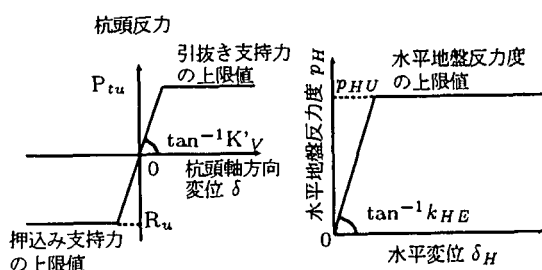


図-2 杭軸方向抵抗特性および杭軸直角方向抵抗特性

図-2 に、杭軸方向および杭軸直角方向の各抵抗特性のモデル図を示した。

(3) 杭基礎-地盤間ばねの不確定性評価

a) 杭軸方向の抵抗特性の不確定性

前記した表-2 に示したように、杭の押込み支持力に関する推定式の不確定性を、岡原らは多数の杭の鉛直載荷試験データから評価している。また、表-2 に示した支持力係数 α_p, α_{fi} は、正規分布および対数正規分布のいずれにも適合するとされている⁷⁾。今、各地層間に相関がなく、杭の周長 U 、杭先端面積 A 、周面 i 層の層厚 l_i を確定値と仮定した場合、杭の押込み支持力の上限値の変動係数は、式(1)をもとに次式⁴⁾で与えられる。

$$V_R = \sqrt{\sigma_R^2 / \overline{R_u}} \quad (3)$$

$$\sigma_R^2 = \sigma_p^2 A^2 + U^2 \sum l_i^2 \sigma_{fi}^2$$

ここに,

$$\sigma_p^2 = \alpha_p^2 \sigma_{N_p}^2 + \sigma_{\alpha_p}^2 \overline{N_p}^2$$

$\overline{\alpha_p}, \sigma_{\alpha_p}^2$: 杭先端の α_p の平均値, 分散

$\overline{N_p}, \sigma_{N_p}^2$: 杭先端 N 値の平均値, 推定誤差分散

$$\sigma_{fi}^2 = \alpha_{fi}^2 \sigma_{N_i}^2 + \sigma_{\alpha_{fi}}^2 \overline{N_i}^2$$

$\overline{\alpha_{fi}}, \sigma_{\alpha_{fi}}^2$: 杭周面 i 層の α_{fi} の平均値, 分散

$\overline{N_i}, \sigma_{N_i}^2$: 杭周面 i 層の N 値の平均値, 推定誤差分散

表-4 変動係数の一覧

	抵抗特性	変動係数
杭軸方向	押し込み支持力の上限値 R_u	0.221~0.281
	引抜き支持力の上限値 P_{tu}	0.221~0.281
	杭の軸方向ばね定数 K_v	0.601
杭軸直角方向	水平地盤反力度の上限値 p_{HU}	0.960
	水平方向地盤反力係数 k_{HE}	0.960

橋梁架設地点における N 値の変動係数は、 N 値の空間分布を考慮した松井らによる次式⁴⁾により算定する。

$$V_N = (0.331 + 0.264 \Delta l / a_0) V_N \quad (4)$$

ここに、

Δl : 標本点から推定点までの距離

a_0 : 水平方向パラメータ

V_N : 当該地層の N 値の変動係数

また、表-2 に示した各支持力係数の変動係数は、様々な地盤条件から構成されるデータを統計処理したものである。そこで、松井らにより調査された同一地域、同一地層における載荷試験データを反映させた式(5)を用いて、杭周面 i 層の支持力係数 α_{fi} の変動係数 $V_{\alpha fi}$ を評価することとした。

$$V_{\alpha fi} = 0.3 \overline{\alpha_{fi}} \quad (5)$$

以上、表-2 に示した平均値と変動係数および式(3)~(5)を用いることで、杭の押し込み支持力に関する推定式の不確定性を評価することができる。

杭軸方向ばね定数も、表-3 に示す不確定性を有している。従って、杭の軸方向ばね定数 K_v は、式(6)で与えられる確率変数として評価される。

$$K_v' = \alpha_v \cdot K_v \quad (6)$$

ここに、

α_v : 実測値/計算値の平均値および変動係数を有する確率変数

K_v : 式(2)により算出される杭の軸方向ばね定数

一方、杭の軸方向引抜き支持力の上限値 P_{tu} は、前記したようにその不確定性を統計的に評価するデータが得られていない。そこで、押し込み支持力に関する推定式が持つ変動係数と同一であると仮定した。

b) 杭軸直角方向の抵抗特性の不確定性

杭の水平載荷試験より求められた水平地盤反力係数と、道路橋示方書により算出される地盤反力係数の比の変動係数は 0.96 程度であり、その比の対数値は、概ね正規分布に従うことが報告されている⁸⁾。その他の杭軸直角方向の抵抗特性に関しては、その不確定性を評価可能なデータの集合が得られていない。そこで、図-2 に示した水平地盤反力度の上限値等の変動係数は、この水平地盤反力係数の変動係数に等しいと仮定した。

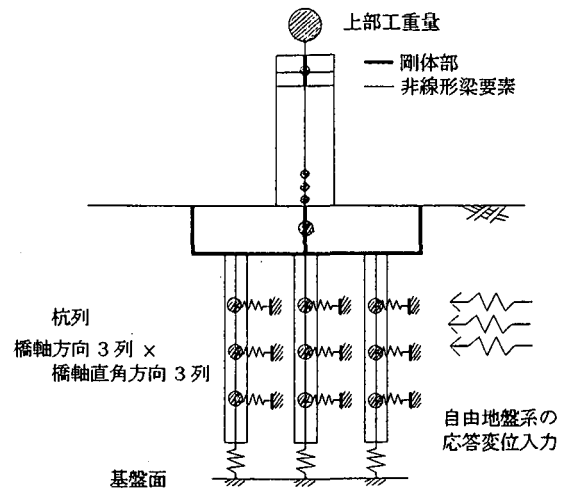


図-3 動的解析モデル

表-4 に本研究で設定した杭軸方向および杭軸直角方向の各抵抗特性に関する変動係数の一覧を示した。なお、押し込み支持力および引抜き支持力の上限値の変動係数は、各地盤モデル毎に異なるため、その上下限値を記した。

(4) 動的解析モデルおよび入力地震動

図-3 に示す上部構造、RC 橋脚および場所打ち杭基礎から構成される橋梁システムの動的解析モデルを述べる。基本とした解析モデルは、集約モデル(修正ペンゼンモデル)である。

上部構造は中間橋脚が支持する死荷重分を 1 質点系に集約し、支承条件は固定とした。RC 橋脚および杭体は、非線形はり要素でモデル化し、その履歴復元力特性としては、剛性低下型の Takeda モデルを与えた。橋脚の横はり部およびフーチング部は剛体とした。杭軸方向の復元力特性および杭周辺地盤の水平抵抗復元力特性は、完全弾塑性型のバイリニアモデルで表し、各ばねの剛性および上限値は、前述した杭の載荷試験データから設定した平均的なばね値を用いる。

図-3 にモデル化された杭体には、ラーメン構造物の柱のように地震時に軸力変動が生じるが、本研究では、このような影響を考慮せず、常時の作用軸力から求められる曲げモーメント-曲率関係を用いることとした。また、杭の質量には、杭体に囲まれた範囲の地盤の質量を付加質量(集約質量)として加えた。

自由地盤系は、上部構造、RC 橋脚および場所打ち杭基礎からなる橋梁構造系からの作用は受けない独立した系として、その応答値を等価線形解析により算定した。

減衰は Rayleigh 減衰とし、各構造要素の減衰定数としては、橋脚および杭体は 2%、剛体部は 0%、そして杭基礎-地盤間ばねでは逸散減衰を見込んで 10% とした。

数値積分には Newmark の β 法を用い、 $\beta = 1/4$ とした。入力地震動は、道路橋示方書に規定されるタイプ II の

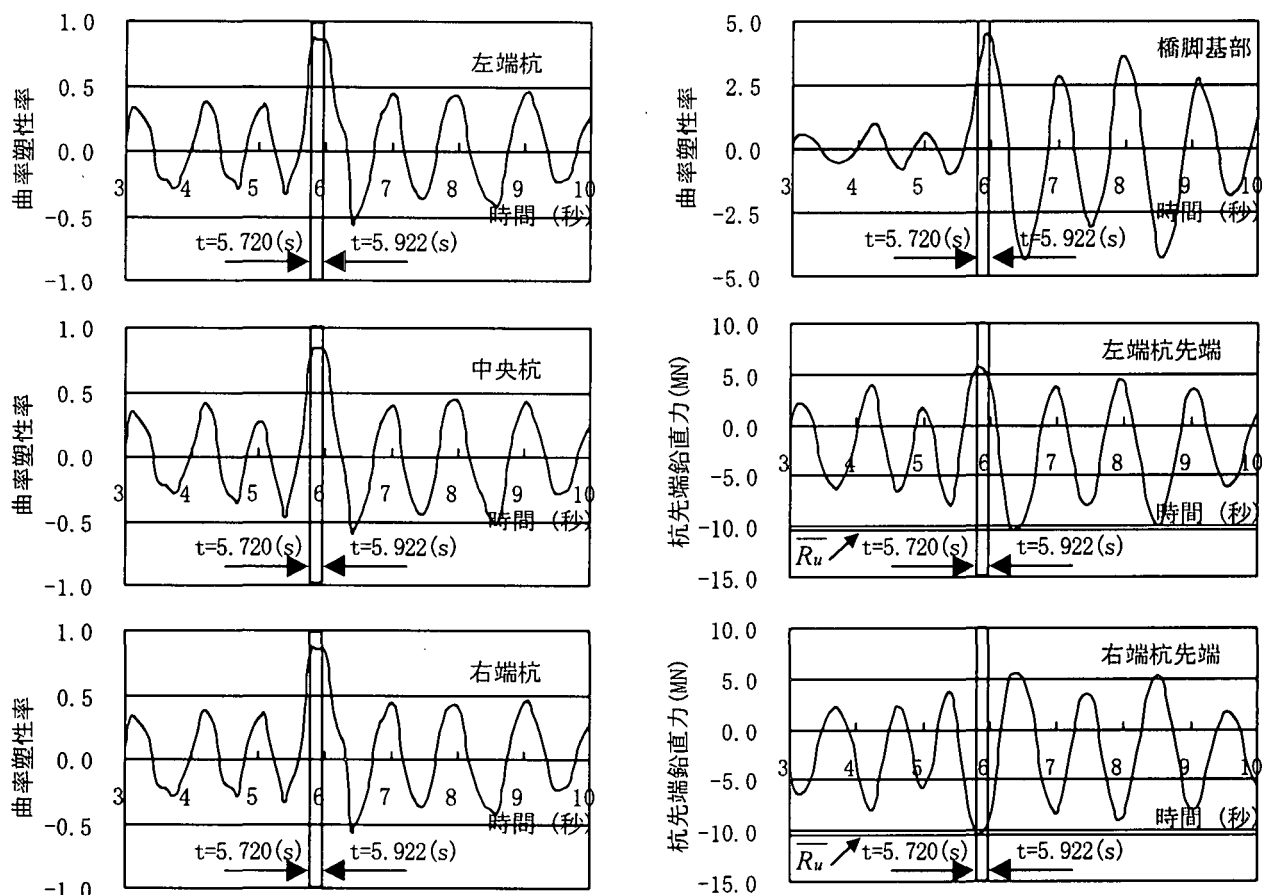


図-4 RC 橋脚および杭基礎の各応答値

Ⅱ種地盤用の標準波形(TypeⅡ-Ⅱ-1)を用い、重複反射理論に基づいた解析プログラム SHAKE により各地盤モデル毎の基盤波形を推定した。

3. 杭基礎—地盤間ばねの不確定性が杭基礎の動的解析結果に与える影響

(1) RC 橋脚と場所打ち杭基礎の地震時挙動の関係

まず、杭基礎—地盤間ばねの不確定性を考慮しない形で動的解析を実施し、RC 橋脚と場所打ち杭基礎の地震時挙動の関係について検討した。

ここでは、橋脚 2 と地盤モデルⅡ-1 を対象とした時の結果を示す。杭基礎は、橋脚 2 の保有水平耐力に相当する震度 $k_{hp} = 0.80$ を上回る降伏震度 $k_{hy} = 0.85$ を持つように荷重漸増法にて設計した。杭基礎の降伏の定義は、①全ての杭において杭体が降伏する、あるいは②1列の杭の杭頭反力が押し込み支持力の上限值 R_u (式(1))に達する時とした¹⁾。杭の配列は、橋軸方向、橋軸直角方向ともに3列である。RC 橋脚および杭体に降伏剛性を与え、この RC 橋脚—杭基礎系の固有周期 T を算定したところ、 $T = 0.744$ (s)であった。

図-4 は、RC 橋脚基部と杭頭部の曲率塑性率、および左端杭先端および右端杭先端の鉛直力の時刻歴データで

あり、各応答値が最大となる時間帯を含む地震波入力後 3 秒から 10 秒までの結果である。ここに、初期の加速度入力に対して、押し込み側となる杭を左端杭、引抜き側となる杭を右端杭、フーチング中央に位置する杭を中央杭とした。中央杭は、構造系の対称性のために、死荷重状態の押し込み力から鉛直力が変動しないので、杭先端の鉛直力の時刻歴データは省略している。また、杭先端の鉛直力は、押し込み力を負として表記している。各応答値が最大をとる時刻は、橋脚の塑性化後 5.720(秒)から 5.922(秒)の間に生じている。矢部氏の指摘⁹⁾にあるように、減衰力の影響のため、各応答値が最大値をとる時刻は同一ではないが、杭の損傷をもたらす地震力は、橋脚に作用する最大の地震時慣性力が主要因であると言える。しかし、橋脚の保有水平耐力を上回る杭基礎であっても、杭先端部は押し込み支持力の上限值に達している。このため、従来から指摘されているとおり、杭基礎の設計荷重設定時には、橋脚の保有水平耐力に相当する慣性力の他に、減衰力の効果や地盤振動の影響を考慮する必要があると言える。また、前述したように、杭基礎—地盤間ばねの設定には、大きな不確定性が介在するため、これが杭基礎の応答値に与える影響も評価する必要がある。そこで次節では、統計シミュレーションの手法を用いて、これら不確定性が杭基礎の各応答値に与える影響を検討した。

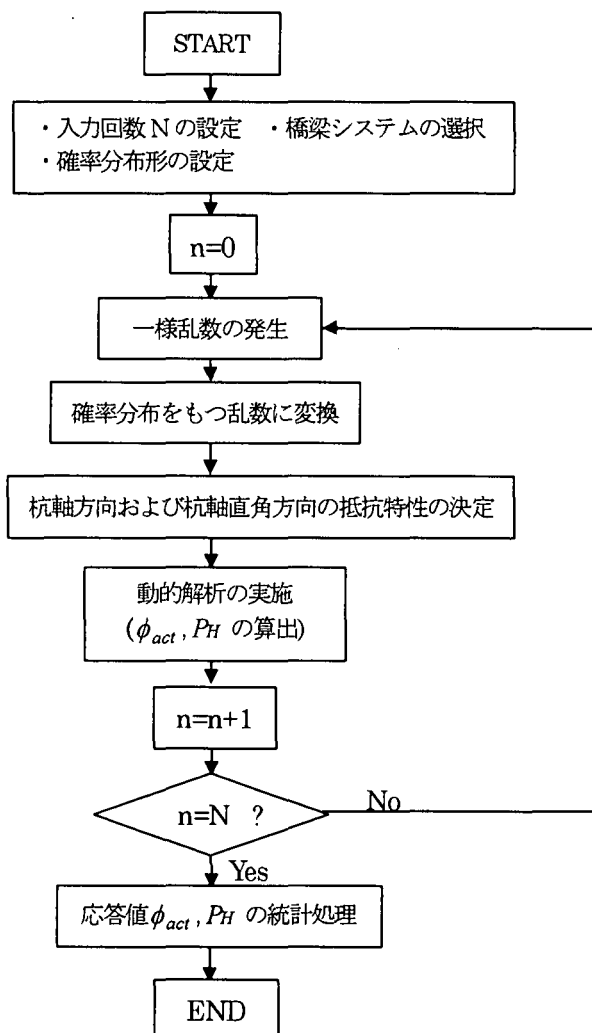


図-5 統計シミュレーションのフロー

(2) 杭基礎—地盤間ばねの不確実性が杭基礎の動的解析結果に与える影響評価

a) 統計シミュレーション

前述したように本研究で用いた杭軸方向および杭軸直角方向の抵抗特性には、大きな推定誤差が含まれている。そこで、表-4の不確実性のもとで確率的にとりうる値を各抵抗特性に割り当てた。そして、杭基礎—地盤間ばねの不確定要因が杭基礎の動的解析結果に与える影響を解析的にシミュレートした。

統計シミュレーションの実施にあたり、杭軸方向ばね定数および引抜き支持力の上限值、また杭軸直角方向ばね定数および水平地盤反力度の上限值に対して、対数正規分布に従う乱数を各々1000個発生させて、各抵抗特性にそれぞれ割り当てた。その際には、杭軸方向ばね定数および引抜き支持力の上限值は、各杭ともに同じ乱数から算定し、杭軸直角方向に関しては、各地層間毎に独立な乱数を用いてばね定数および水平地盤反力度の上限值を算出した。なお、同一地層内では、各抵抗特性の空間的なばらつきは考慮せず、完全相関の関係にあり、また、

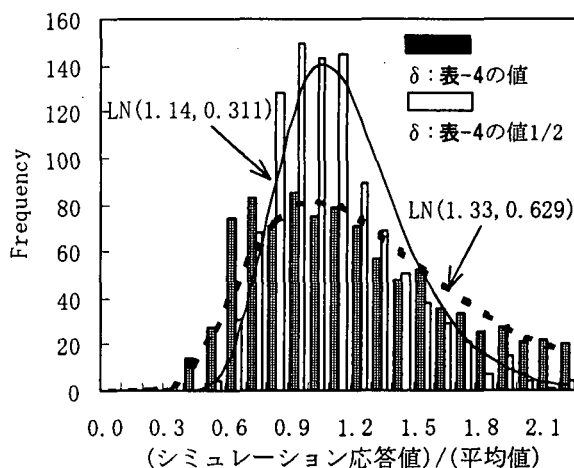


図-6 応答 ϕ_{act} のシミュレーション結果

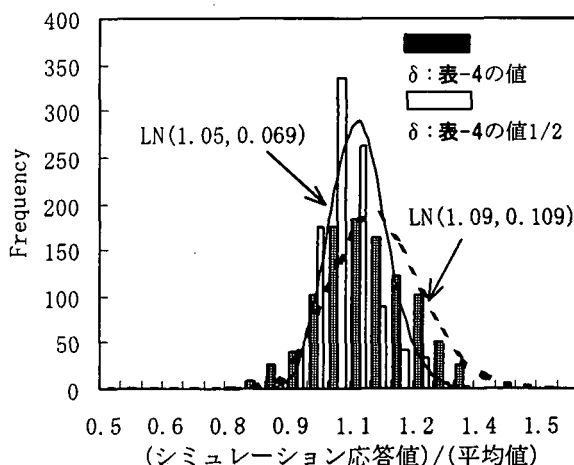


図-7 応答 P_H のシミュレーション結果

各地層間毎の相関はないと仮定している。

統計シミュレーションの結果より、杭の曲率塑性率 ϕ_{act} および杭先端部押込み力 P_H が表-4の各抵抗特性のばらつきから受ける影響を評価することができる。なお、シミュレーションから得られる杭先端部押込み力や杭体塑性率のデータの集合に、初期剛性から剛性低下の生じた解析結果を加えることは、過大に表-4の各抵抗特性のばらつきを考慮することになる。そこで、シミュレーションを実施する際の動的解析では、杭軸方向の押し込み支持力の上限值を設けず、杭体についても降伏剛性を有する線形はり要素でモデル化した。また、入力地震波および RC 橋脚や杭体などの橋梁構造系モデルは確定量とした。以上の解析フローを図-5にまとめて示す。

b) 解析結果

橋脚1と地盤モデルNo. II-4を対象とした時の動的解析より得られる ϕ_{act} , P_H の統計シミュレーションの結果をそれぞれ図-6, 図-7に示す。なお ϕ_{act} は、各杭列の中の最大応答曲率を算出し、その各杭列毎の最大応答曲率の最小値を杭の降伏曲率で除したものを集計した。図中の横軸は、シミュレーションから得られる各応答値と全ての杭基礎—地盤間ばねに2.(2)で述べた値(平均

表-5 統計シミュレーションによる解析結果一覧

地盤モデル		Ⅱ-1	Ⅱ-2	Ⅱ-3	Ⅱ-4
変数	平均	1.151	1.358	1.161	1.330
	変動係数	0.539	0.563	0.392	0.473
P_H	平均	1.044	1.046	1.073	1.094
	変動係数	0.100	0.093	0.073	0.100

値)を用いた時の応答値に対する比を示している。また図-6、図-7には、表-4に設定した変動係数 δ を1/2倍した値を用いて同様の統計シミュレーションを行った時の結果も併記した。図中の実線および点線に示された $LN(\mu_x, \sigma_x)$ は、平均値 μ_x 、標準偏差 σ_x をパラメータとする理論対数正規分布である。

両図より、表-4の各抵抗特性のばらつきが対数正規分布に従うと仮定した時、各応答値の頻度分布も概ね対数正規分布に従い、その平均値は1.0すなわち2。(2)で設定したばね値を用いた応答値に近い結果を示すことが分かる。一方、表-4の不確実性から受ける各応答値のばらつきは、杭の曲率塑性率 ϕ_{act} の場合、変動係数にして0.473程度生じる。このことから、2。(2)で設定した杭基礎-地盤間ばねを用いた解析より得られる杭体の応答値は、あくまでも平均値であり、実際には杭基礎-地盤間ばねのモデル化に伴う不確実性により、図-6のような大きなばらつきを有する確率変数であると言える。地盤に関するばね定数等を評価することは難しく、現状では、表-4のような精度の低さを許容せざるを得ない。限定された地盤モデルを対象とした解析結果なので、得られた結果の一般性が保証される訳ではないが、このような地盤系の不確実性が構造物系の応答値に与える影響を定量的に評価していく必要があると考える。

本動的解析では、鉛直方向の加速度入力を行っていないため、杭先端部の押込み力は、水平方向の慣性力に付随して生じる。従って、図-7に示すように、杭先端部の押込み力は、表-4に示した杭基礎-地盤間ばねの不確実性から大きな影響を受けない結果となった。

また、各図に示したように、何らかの手段により杭基礎-地盤間ばねの推定精度が向上し、表-4の変動係数を1/2倍に評価することができた時には、各応答値のばらつきを小さく見積もることが可能となる。特に、杭体の応答値である ϕ_{act} のばらつきが大幅に小さく評価できるため、このような杭基礎-地盤間ばねの推定精度の向上は、合理的な杭基礎の設計につながると言える。

橋脚1を対象としたシミュレーションより得られる各地盤モデル毎の基本統計量の一覧を表-5に示した。他の地盤モデルから得られる度数分布の形状も、地盤モデルNo.Ⅱ-4と同様に対数正規分布で近似されたが、変動係数等の値には、地盤モデル毎に差が生じた。これは、表-1に示した各地盤モデルを形成する層数の相違に一

因がある。本解析では、各地層間の相関を無視しているため、各地層毎に独立な乱数を割り当て、杭軸直角方向の杭基礎-地盤間ばねを計算している。従って、地盤を形成する層数が多くなると、個々の地層に割り当てられる乱数の大きさが杭基礎の動的解析結果に与える影響は相対的に小さくなる。このため、層数の最も多い地盤モデルNo.Ⅱ-3では、得られる応答 ϕ_{act} の変動係数が最も小さくなったと思われる。このことは、地盤を含めたモデルを構築する際、同一地層内でも位置的な強度の変動を考慮した杭基礎-地盤間ばねを用いることで、構造系の応答値のばらつきを小さく評価できることを意味している。

5. 結論

本研究では、主に杭基礎-地盤間ばねの不確実性が杭基礎の地震時の各応答値に与える影響を統計論的立場から評価した。主な結論を以下に示す。

- (1)杭基礎-地盤間ばねの各抵抗特性が対数正規確率変数である時、杭基礎の各応答値も、対数正規分布に従う確率変数であり、その平均値は、全ての杭基礎-地盤間ばねに平均値を用いた値と概ね一致することを確認した。
- (2)杭の軸方向力の応答値は、杭基礎-地盤間ばねの推定精度の影響を大きく受けないが、杭体の曲率塑性率としての応答値は、変動係数0.5程度のばらつきを持つ。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅳ 下部構造編，1996。
- 2) 矢部正明，川島一彦：橋脚～基礎～地盤系の地震応答特性に関する研究，第24回地震工学研究発表会講演論文集，pp.1069-1072，1997。
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅴ 耐震設計編，1996。
- 4) 松井謙二，落合英俊：地盤の不確実性を考慮した摩擦杭基礎の支持力評価，土木学会論文集，No.445/Ⅲ-18，pp.83-92，1992.3
- 5) 岡原美知夫，中谷昌一，田口敬二，松井謙二：軸方向押込み支持力に対する杭の支持力特性に関する研究，土木学会論文集，No.418/Ⅲ-13，pp.257-266，1990。
- 6) 岡原美知夫，中谷昌一，松井謙二：杭の鉛直および水平方向の支持特性に関する研究，構造工学論文集，Vol.37A，pp.1453-1466，1991。
- 7) 日本道路協会：杭基礎設計便覧，pp.429-439，1992。
- 8) 建設省土木研究所 構造橋梁部基礎研究室：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No.2919，1991。
- 9) 矢部正明，川島一彦：杭基礎の地震時保有水平耐力法における静的解析と動的解析の比較，第1回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp.275-278，1998。