

地盤-杭基礎構造物系の地震応答に及ぼす系構成要素の非線形性の影響

Effects of nonlinearity of members on seismic response of pile-founded structure

森 伸一郎*, 平田 昭博**

Shin'ichiro Mori, Akihiro Hirata

*博士(工学) 愛媛大学助教授 工学部環境建設工学科(〒790-8577 愛媛県松山市文京町3)

**愛媛大学大学院 理工学研究科 環境建設工学専攻(〒790-8577 愛媛県松山市文京町3)

Effects of nonlinearity of members on seismic response of pile-founded structure was studied by dynamic analysis using a Penzien's model as a multi mass-spring system. Conclusions are as follows ; Nonlinear soil response leads some concentration for stress and strain in deep portion of soil system, and it promotes concentration of bending moment in the deep portion of pile. In a pile head, Nonlinearity of interaction spring increases a bending moment. In a underground, it decreases a bending moment. It is important to take a nonlinearity of interaction spring into consideration.

Key Words: pile foundation, seismic response, dynamic interaction, mass-spring system, nonlinearity

キーワード：杭基礎，地震応答，動的相互作用，ばね質点系，非線形

1. はじめに

兵庫県南部地震のような極めて強い地震動の下では、地盤、杭、上部構造物ともに非線形領域に達すると考えられるので、杭および地盤の材料非線形性が上部構造物と杭の応答に及ぼす影響を把握する必要がある。また、地盤と杭との間の水平抵抗機構に非線形性があることは過去の多くの実験で明らかにされており、水平抵抗がばねでモデル化される場合はその非線形性のモデル化が重要である¹⁾。

このような地盤の非線形性が杭-構造物系の応答に及ぼす影響に関する研究が盛んになってきた。宮本ら²⁾は地盤の非線形性や液状化が杭の応答に及ぼす影響を検討した。最近ではコンクリート系の杭に関して軸力変動による杭の剛性変化が応答に及ぼす影響が研究されてきている^{3), 4), 5)}。しかし、地盤と杭の間の水平荷重伝達機構の非線形性に関して着目した研究は多くない。張・木村⁶⁾は3次元FEMにより全ての構成要素を非線形にした解析を行い、構造物や杭の応答のほか杭周囲の地盤要素の応力に着目した検討を行っている。

また、質点はばねモデルでは水平荷重伝達機構は、はりにモデル化された杭と自由地盤を繋ぐ相互作用のばねとしてモデル化される。森ら⁷⁾は杭基礎の液状化地盤での振動台実験結果を相互作用ばねの非線形性の観点か

ら検討した。三浦⁸⁾は等価線形的に相互作用ばねの非線形性の影響を検討した。また、杭体の非線形性について、護・長谷川⁹⁾、宮本・酒向¹⁰⁾らは杭を非線形解析したときの上部構造物に与える影響について検討を行っている。このように地盤、杭、相互作用ばねの非線形性がそれらの応答に及ぼす影響を独立に検討した研究はあるが、それら構成要素の非線形化の影響を比較したものは少ない。

そこで、本研究では、軟弱な地盤中に建設される道路橋の橋脚^{11), 12)}を検討対象とし、ばね質点系にモデル化することによって、地震応答に対する地盤、杭、相互作用ばねの3つの系構成要素について、その非線形性の影響を独立に検討した¹³⁾。

2. 解析手法とモデル

(1) 対象構造物と解析モデル

図-1に解析対象とする道路橋基礎を示す。橋脚は断面が3.0 m×3.5 mのT型橋脚で、橋脚質量は336 tonである。道路橋示方書による上部工の設計水平力は、橋脚上端より2.5mの位置に作用し、大きさは11.76MNとする。橋脚は橋軸方向が弱軸の矩形断面である。

解析は、地盤と杭-構造物系の動的相互作用問題を考慮できる質点系モデルの1つであるPenzienモデルを用いた。Penzien¹⁴⁾が提案して以来、このモデルについては多

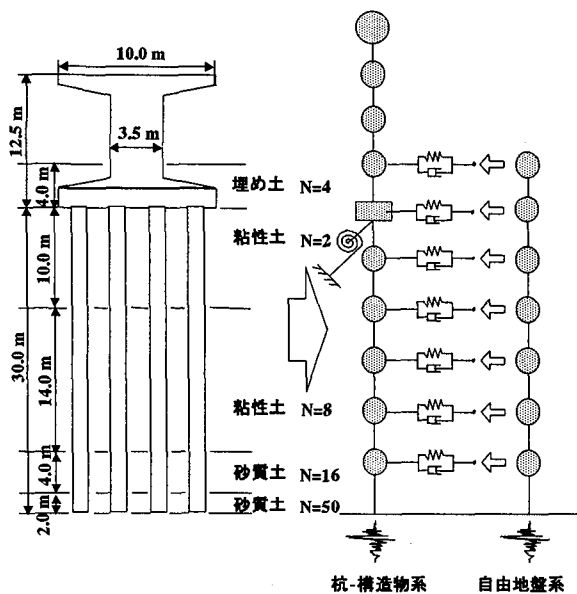


図-1 解析対象と解析モデルの概念図

くの研究がなされ、その詳細は森¹⁵⁾が述べている。オリジナルの Penzien モデル¹⁴⁾では、杭基礎の逸散減衰をとり入れるために、運動エネルギーで等価として算定された有効応力に、地盤と構造物の相対加速度とを乗じた力を動的相互作用力として考慮している。これに対して、河村¹⁶⁾は杭基礎の近傍の地盤を実体のある土柱として扱うことを提案したが、これは土柱の慣性力とせん断抵抗力の2者を考えようとするものである。森¹⁵⁾、¹⁷⁾は河村¹⁶⁾にならいこの2者を考慮しているが、宮本²⁾は後者のみを考慮している。しかし、本論文ではオリジナルの Penzien モデルを採用しており、地盤材料の非線形性は自由地盤と相互作用ばねの2つで考慮した。

図-1 には解析モデルの概念図を示している。杭-構造物系ははりと質点でモデル化され、質点間隔はフーチング部分を除き 1 m とし、質点数は 43 点とした。自由地盤系はせん断ばねと質点でモデル化され、質点数は 34 点とした。さらに、杭-構造物系との間に動的相互作用を考慮するために、相互作用ばね、ダッシュポット、有効質量を設定した。

杭先端地盤に入力する地震波は 1995 年兵庫県南部地震の際に神戸ポートアイランドで観測されたアレー地震観測記録の GL-83 m (NS 成分) の加速度記録とした。図-2 に入力する地震波を示す。

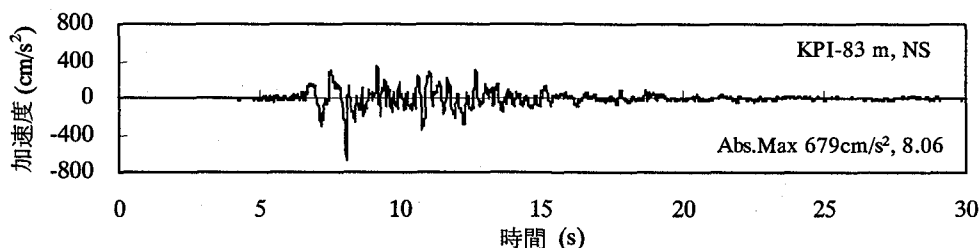


図-2 入力加速度の時刻歴

表-1 地盤の設計定数

土質	層厚 (m)	平均 N 値	単位体積重量 (tf/m³)	粘着力 (kN/m²)	せん断波速度 (m/s)	せん断剛性 (kN/m²)
埋め土	4	4	1.8		127	29028
粘性土	10	2	1.7	19.6	126	26989
粘性土	14	8	1.8	78.4	200	72001
砂質土	4	16	1.9	0	202	77528
砂質土	2	50	2.0	0	295	174048

表-2 杭の諸元

杭種	場所打ちコンクリート杭
杭径	1.2 m
杭長	30.0 m
コンクリート強度	24 N/mm²
弾性係数	2.5*10⁴ N/mm²
鉄筋	SD295A
0~2.4 m	主鉄筋 D29-28本 帯鉄筋 D16-ctc150
2.4~10.0 m	D29-28本 D16-ctc300
10.0~30.0 m	D29-14本 D16-ctc300

(2) 地盤と基本地盤物性

地盤は、表層に層厚 14 m の比較的軟弱な埋め土層・粘性土層があり、その下に層厚 14m の N 値 8 の粘性土層が続き、N 値 50 の砂礫層を含む支持層の深さは 32 m である。表-1 に地盤の構成と設計定数を示す。せん断波速度とせん断剛性は N 値より設定した。その設定方法¹⁸⁾を以下に示す。

$$V_s = 100N^{1/3} \quad (\text{粘性土}) \quad (1)$$

$$V_s = 80N^{1/3} \quad (\text{砂質土}) \quad (2)$$

$$G_0 = \rho V_s^2 \quad (3)$$

ここで、 V_s : せん断波速度 (m/s), N : N 値

G_0 : 初期せん断剛性, ρ : 単位体積質量

減衰はレーリー減衰とし、線形時の地盤の 1 次と 2 次の振動数で減衰定数が 2% となるように設定した。また、非線形解析においては、減衰を大きめに評価することになるので、同様な方法で 1% とした。

(3) 杭とそのモデル化

杭はRC場所打ち杭で3×4=12本で構成され、加振方向は橋軸直角方向で、4列並んだ方向である。表-2に杭の諸元を示す。また、杭先端の支持条件はピン支持とする。Penzienモデルでは、杭群は1本のはりに縮約されるため、水平抵抗に直接関連する曲げ剛性は本数分が合算される。杭群の軸剛性は基礎フーチングの回転ばねとして評価される。回転ばねについて考慮すべき要素として、フーチングの底面と側面に接する周辺地盤の剛性、杭体の軸剛性、杭周面の地盤のせん断剛性、杭先端地盤の鉛直剛性などが考えられる。ここでは回転ばねは杭体の軸方向の剛性のみを考慮し、杭周辺地盤は応力を負担しないものとして算定した。ただし、回転ばねは線形ばねとし、本解析の非線形モデルでは外側の押し込み杭の軸力は極限支持力に達しないため、杭の荷重～変位関係の変化は考慮していない。

(4) 地盤の非線形性のモデル化

地盤のせん断剛性 G と減衰定数 h はせん断ひずみ γ に依存して材料非線形性を呈する。微小ひずみ下の G を G_0 とする。動的変形特性 $G/G_0 \sim \gamma$, $h \sim \gamma$ については、過去の多くの試験の文献から整理して求められた下記の今津・福武の式¹⁹⁾を用いた。ただし、この式の適用範囲はせん断ひずみで0.5%までとし、大きなせん断ひずみについては経験的に設定した。

$$G/G_0 = 1/(1 + a \cdot \gamma^b) \quad (4)$$

$$h = c \cdot \gamma^d \quad (5)$$

式(4), (5)で a, b, c, d は定数であり、表-3にこれらの数値を示す。

解析に用いる地盤の復元力特性の非線形モデルはRamberg-Osgoodモデル(R-Oモデル)である。式(6)に地盤のR-Oモデルの骨格曲線を示す。このモデルは、式(6)に示すように3つのパラメータ G_0 , α , β で決定される。 α , β はさらに式(7), (8)で示すように、地盤物性として理解しやすいパラメータ h_{max} , $\gamma_{0.5}$ に置き換えられる。

$$\gamma = \frac{\tau}{G_0} \left(1 + \alpha |\tau|^\beta \right) \quad (6)$$

$$\alpha = \left(\frac{2}{\gamma_{0.5} G_0} \right)^\beta \quad (7)$$

$$\beta = \frac{2\pi h_{max}}{2 - \pi h_{max}} \quad (8)$$

ここで、 h_{max} : $\gamma \rightarrow \infty$ のときの減衰定数

$\gamma_{0.5}$: $G/G_0=0.5$ となるときのせん断ひずみ

すなわち、式(4), (5), 表-3 で与えられる動的変形特性

表-3 今津・福武式の定数

	a	b	c	d
砂	12.11	0.89	38.81	0.47
粘性土	4.71	0.79	13.51	0.27
砂礫	12.42	0.75	18.93	0.30

表-4 解析に用いた R-O モデルのパラメータ

	$\gamma_{0.5}(\%)$	$h_{max}(\%)$
砂	0.0607	24.94
粘性土	0.1406	14.52
砂礫	0.0348	14.42

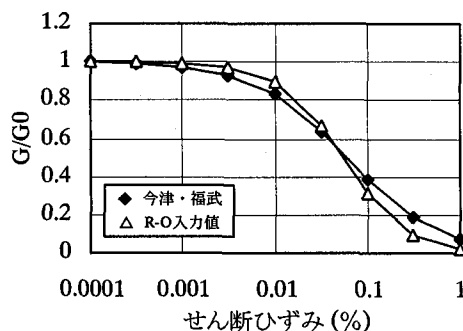


図-3 R-O と今津・福武の砂質土における比較

表-5 杭の M- ϕ 関係の特性点

区間 (m)	軸力 (tf)	ひび割れ時		降伏時		終局時	
		M_c (kNm)	ϕ_c (m^{-1})	M_y (kNm)	ϕ_y (m^{-1})	M_u (kNm)	ϕ_u (m^{-1})
0~2.4	195.6	675	$2.3 \cdot 10^{-4}$	2199	$2.4 \cdot 10^{-3}$	3190	$2.1 \cdot 10^{-2}$
2.4~10		675	$2.3 \cdot 10^{-4}$	2225	$2.4 \cdot 10^{-3}$	3190	$1.2 \cdot 10^{-2}$
10~30		648	$2.3 \cdot 10^{-4}$	1556	$2.2 \cdot 10^{-3}$	2105	$1.4 \cdot 10^{-2}$

にフィットするパラメータ h_{max} , $\gamma_{0.5}$ を算定した。表-4に解析に用いた R-O モデルのパラメータを示す。また、図-3に R-O モデルと今津・福武の式の砂質土における比較を例示する。

(5) 杭の非線形性のモデル化

杭の復元力特性には、骨格曲線をトリリニアとし、除荷時には剛性を低減し、さらに復元力の符号が変わると過去の最大点を指向するという武田モデルを用いた。トリリニアの折れ点を規定するのはひび割れ点、初降伏点、終局点の3つの特性点である。表-5にその特性点を示す。

(6) 相互作用ばねの非線形性のモデル化

相互作用ばねの復元力特性には Ramberg-Osgood モデルを用いる。式(9)に骨格曲線を示す。

$$\delta = \frac{P}{K_0} \left(1 + \alpha' |P|^{\beta'} \right) \quad (9)$$

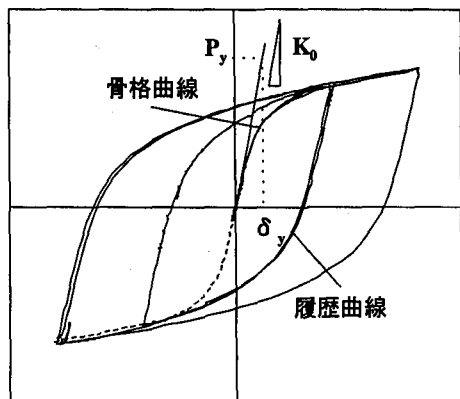


図-4 相互作用ばねの Ramberg-Osgood モデル

ただし、 P はばね反力(軸力)、 δ はばね変形量である。R-O モデル設定のためのパラメータには、微小変形時の相互作用ばね定数 K_0 、と曲線の形状を規定する α' 、 β' の3つがある。このうち K_0 は Mindlin-II 解を利用²⁰⁾して求められる。

図-4 に $P \sim \delta$ と特性点を示す。パラメータ α' 、 β' は次のように決定する。 $K_0 = P_y / \delta_y$ なので、降伏軸力 P_y を決めると降伏変形量 δ_y が求められる。降伏軸力としては、足立ら²¹⁾の杭の室内水平載荷試験に関する研究成果における考え方を導入し、杭幅の3倍に作用する受働土圧とし、群杭係数 $n^{1/2}$ (ただし、 n は杭本数) を考慮して算定する。 α' 、 β' は、図-4 のようにこの (δ_y, P_y) を下回って、その近くで骨格曲線が折れ曲がるような組み合わせを試行錯誤して求める。また、不規則な荷重に対するばね反力-ばね変形量関係は Masing 則に従うものとする。

(7) 解析ケース

解析は3つの系構成要素(地盤、杭、相互作用ばね)がそれぞれ線形、非線形のときを比較した。解析ケースを表-6に示す。また、入力波倍率においては、原波形を0.1、0.2、0.5、1.0倍したものを用い、比較、検討した。

3. 解析結果とその考察

(1) 地盤の非線形性の影響

杭が非線形である場合の地盤の非線形性(解析ケース番号3と5の比較)について示す。図-5に自由地盤系の最大せん断ひずみ分布を示す。この図で、ひずみが急激に変化している深さ(14, 28, 32 m)は地層境界に相当する。地盤の非線形化により、自由地盤の深さ30 m付近(32 m~28 mの砂質土層)で大きなせん断ひずみが生じている。これは深さ32 m~28 mの砂質土層(N値16)がその下層の砂質土層(N値50)に対し、非常に軟らかいことに起因すると考えられる。

図-6に入力波倍率1.0倍での自由地盤地表面の加速度時刻歴、図-7に入力波倍率0.2倍での加速度時刻歴を示す。両方とも地盤の非線形化によって長周期化すると

表-6 解析ケース

番号	地盤	杭	相互作用ばね
1	線形	線形	線形
2	非線形	線形	線形
3	線形	非線形	線形
4	線形	線形	非線形
5	非線形	非線形	線形
6	非線形	非線形	非線形

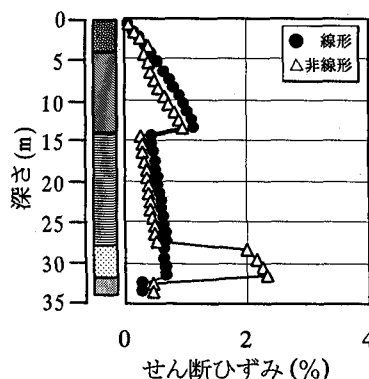


図-5 地盤の最大せん断ひずみ分布における地盤の非線形化の影響

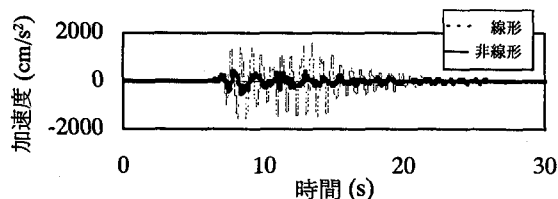


図-6 自由地盤地表面の加速度時刻歴(1.0倍)における地盤の非線形化の影響

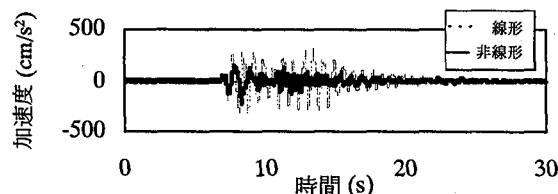


図-7 自由地盤地表面の加速度時刻歴(0.2倍)における地盤の非線形化の影響

もに、大幅に加速度が減少していることがわかる。線形：非線形の比は入力波倍率1.0倍で1:0.26、入力波倍率0.2倍では1:0.46である。解析に最大加速度 679 cm/s^2 という非常に大きな入力波を用いたため、強い非線形性を示している。

図-8に連成系の最大加速度分布を示す。地盤の非線形化により、加速度が大幅に減少していることがわかる。また、入力波倍率が大きくなるほど、その減少の割合は大きくなっている。結果的に、0.1倍入力に対し1.0倍入力では、入力が10倍になったのに対して橋脚上端の応答は約5倍であり、フーチング上端では約3.5倍である。

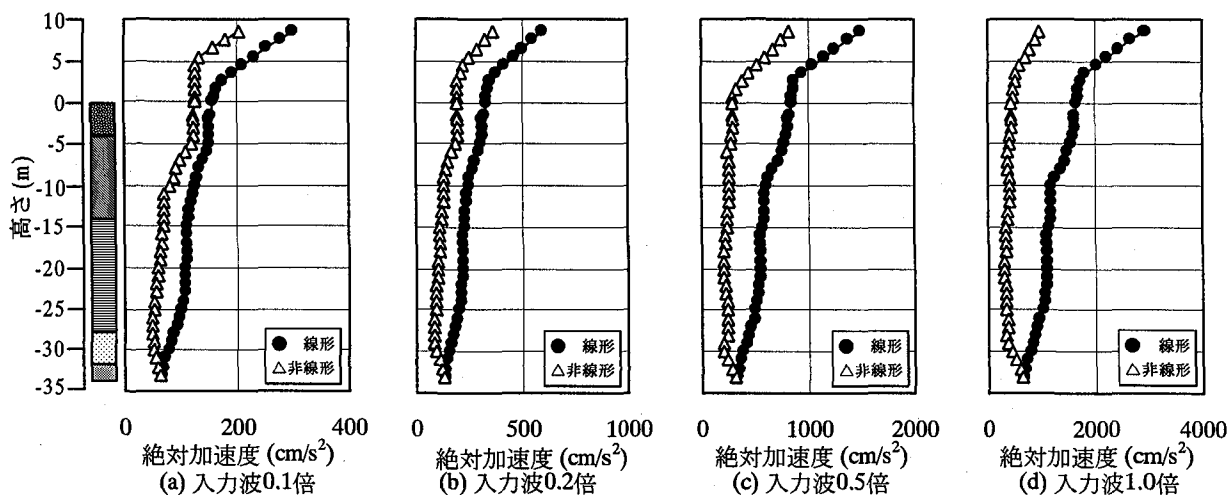


図-8 連成系の最大加速度分布における地盤の非線形化の影響

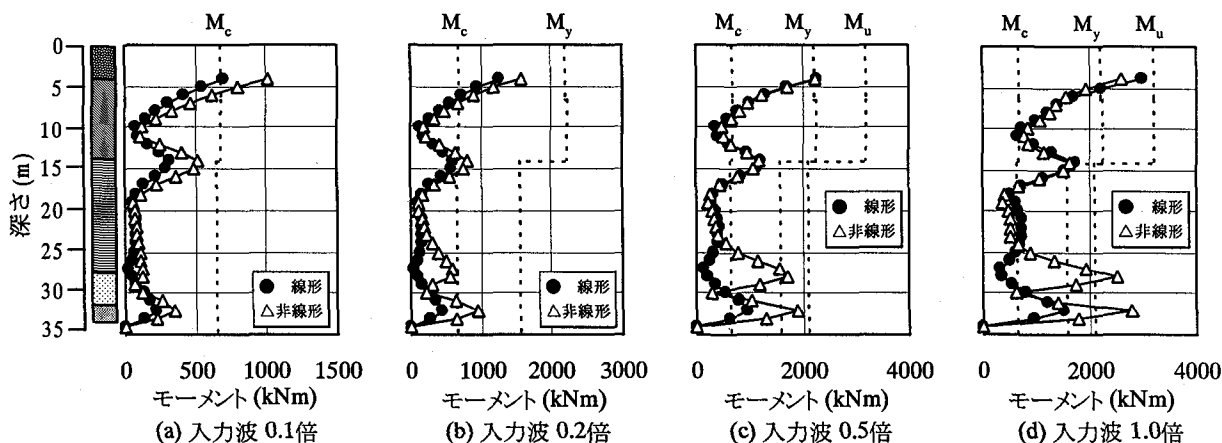


図-9 杭の最大曲げモーメント分布における地盤の非線形化の影響

線形応答に対する非線形応答の低減率は、0.1 倍入力では約 0.8 だが、1.0 倍入力では約 0.3 である。

図-9 に杭 1 本あたりの最大曲げモーメント分布を示す。以下、杭の曲げモーメントについては杭 1 本あたりの値である。図-9(a) の入力波倍率 0.1 倍では地盤の非線形性を考慮することで、全体的にモーメントがわずかに大きくなっているが、線形、非線形ともにグラフの概形に大差はない。

ところが、入力波倍率が 0.2, 0.5, 1.0 倍と大きくなっていくとともに、深さ 28 m, 32 m 付近の曲げモーメントが大きくなっている。杭体は非線形領域に入っており曲げ変形(曲率)にするとその差は極めて大きい。この地点はそれぞれ硬軟の差が大きい層境界に相当し、地盤のせん断ひずみが急激に変化した点と一致する。加速度応答は線形に比べていずれも小さくなっていることから、この位置のモーメントは地盤の変形に起因するものであると言える。したがって、地盤の非線形性を考慮することで、層境界に大きなひずみが現れ、そのひずみが大きく現れた箇所はモーメントも大きな値を示すこと、入力が大きくなり地盤の非線形化が進むほどそれが顕著になることがわかる。

また、杭頭部のモーメントに着目すると、入力波倍率

が小さいときは非線形の方が大きい、倍率が大きくなると線形の方が大きくなっている。これは、入力波倍率を大きくすることにより、上部構造物の加速度が大きくなったため、相互作用ばねの非線形化の影響以上に慣性力の影響が強くなってきているものと考えられる。

(2) 杭の非線形性の影響

杭の非線形性が杭と構造物の応答に及ぼす影響について考察する。入力倍率が 1.0 倍で地盤が非線形である場合について、杭が線形の場合(ケース 2)と杭が非線形の場合(ケース 5)を比較する。図-10 に、例として深さ 15 m における杭の M-φ の応答を示す。また、図-11, 図-12 に橋脚上端の変位時刻歴、加速度時刻歴を示す。M-φ の応答を橋脚上端の変位波形と併せて見ると、最初の大きな一波で降伏を越え、次の一波で反対側の降伏を越え、その後は減衰していく様子が読みとれる。これらの時刻歴は線形、非線形を重ね描きしているにも関わらずほとんど差が認められない。さらに、図-13 に連成系の最大変位分布と最大加速度分布を示す。変位、加速度ともにその差はほとんどない。すなわち、杭が大きく非線形化しているにもかかわらず、杭の非線形化は杭と構造物の変位や加速度にはほとんど影響しないことがわかる。

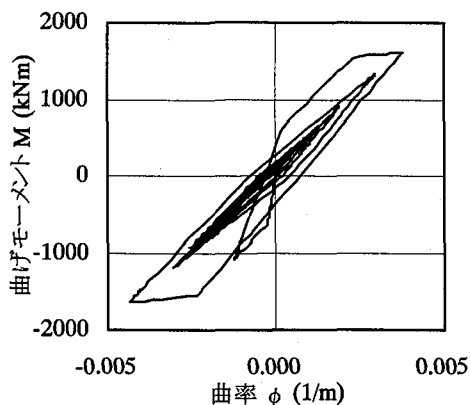


図-10 杭の M- ϕ (入力波倍率 1.0 倍, 15 m)

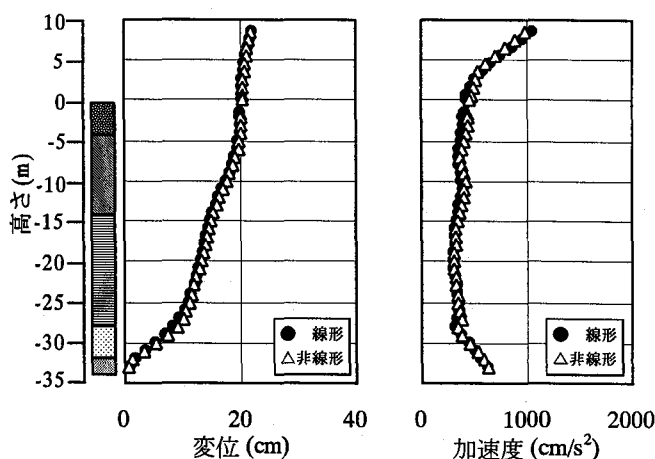


図-13 連成系の最大変位, 加速度分布における杭の非線形化の影響

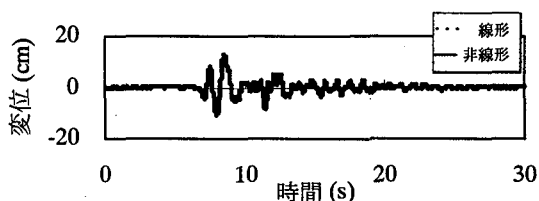


図-11 橋脚上端の変位時刻歴における杭の非線形化の影響

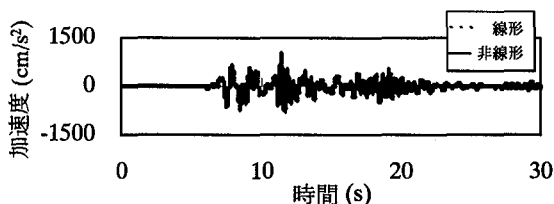


図-12 橋脚上端の加速度時刻歴における杭の非線形化の影響

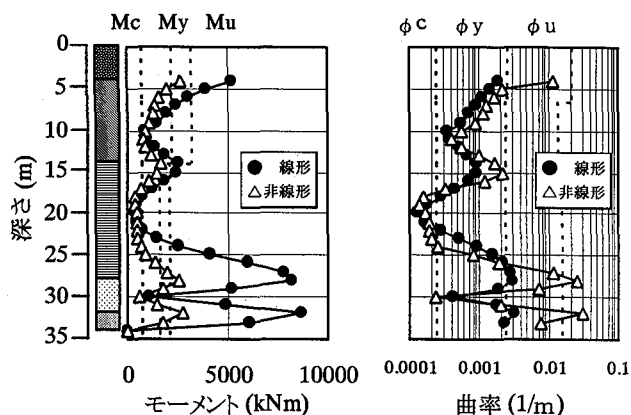


図-14 杭の最大曲げモーメント分布における杭の非線形化の影響

杭の非線形化が上部構造物に与える影響については、護・長谷川⁹⁾、宮本・酒向¹⁰⁾らが検討しており、上部構造物の応答に影響がないという同様の結果を得ている。

一方、杭自身の応力と変形の応答を見てみる。図-14に杭の最大曲げモーメント分布と曲率分布を示す。杭の非線形化によって、特に深さ 4 m, 14 m, 28 m, 32 m 付近の曲げモーメントが大きなところで、曲げモーメントが大幅に低減していることがわかる。逆に曲率については、曲げモーメントが低減した箇所で大幅な増加が見られる。曲げモーメントと曲率における線形解析と非線形解析での大小関係の逆転は見事であり、等価エネルギー法による算定の可能性を示唆している。

杭の非線形化が杭と構造物の運動応答に影響しないのであれば、等価エネルギー法による算定の可能性を検討することは価値がある。M- ϕ の線形最大応答点 (ϕ_e , M_e) から、骨格曲線と ϕ 軸で囲まれる面積が等価であるとして求められる等価最大応答点 (ϕ_{eq} , M_{eq}) と非線形解析の最大応答点 (ϕ_p , M_p) を比較する。レベル 2 などの大きな地震力の下では変形が重要であるので、図

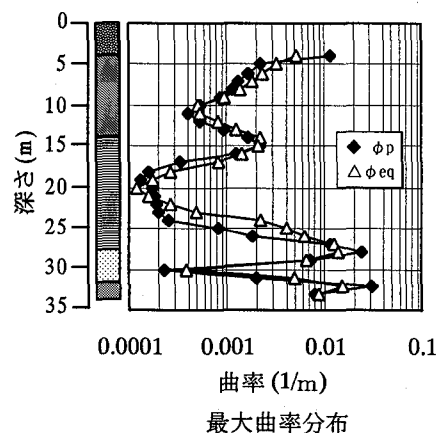


図-15 非線形最大応答曲率 ϕ_p と等価最大曲率 ϕ_{eq} の深度分布

-15 に非線形最大応答曲率 ϕ_p と等価最大曲率 ϕ_{eq} の深度分布を示す。深さ 22~26 m の間で 3~6 倍の差はあるが、それ以外では概ね良い評価を与えることがわかる。

(3) 相互作用ばねの非線形性の影響

護・長谷川⁹⁾、宮本・酒向¹⁰⁾らは本研究と同様な検討を行っているが、地盤の非線形性については地盤のせん断振動を支配する物性と相互作用を支配する相互作用の物性を区別せずに扱っている。しかしながら、著者はそれらの挙動を支配するメカニズムの違いから、励起されるひずみの成分が異なり、ひいては発現される物性も異なるものと考えている。したがって、本研究では地盤と相互作用ばねをそれぞれ独立した要素として非線形性を考慮している。そのため、地盤を非線形としたときでも、相互作用ばねの非線形性の影響を考慮していない杭応力を独立に算定していることが他の研究に見られない独自性であると言える。

ここでは、地盤、杭ともに非線形の条件のもとで、相互作用ばねの非線形性が杭と構造物の応答に及ぼす影響について考察する。相互作用ばねが線形の場合(ケース5)と非線形の場合(ケース6)を比較する。相互作用ばねの復元力特性に用いた Ramberg-Osgood モデルの状況を見るために、図-16 に杭頭部における相互作用ばねの骨格曲線を示す。図中の△は入力波倍率 0.1, 0.2, 0.5, 1.0 倍のときの最大応答値をプロットしたものである。この図によると、入力波倍率 0.2 倍で既に非線形領域に

入っており 0.5, 1.0 倍では、軸力が伸びないのに変形が延びるという強い非線形性を示している。これは、杭頭部において上部構造物の慣性力が働いているためだと考えられる。

図-17 に深さ 14 m、入力波倍率 1.0 倍における相互作用ばねの軸力と変形量の関係を示す。この地点は地層境界に相当し、強い非線形性を示した点の一つである。

図-18 に相互作用ばねの最大軸力分布を示す。相互作用ばねが線形の場合では入力が大きくなるにつれて、深さ 15m より浅い部分は分布形状が相似形であるのに対して、それより深い部分では、特に深さ 28m と 32m を中心に浅い部分よりも相対的に大きくなっている。これは地盤の非線形化による深部のせん断ひずみの増大を反映したものと理解できる。一方、相互作用ばねが非線形の場合には、線形の場合と異なるのは次の2点である。第1に、入力波倍率が 0.1 倍では深さ 9 m を境界として、それ以深は線形と非線形の結果に違いはなく強い非線形領域に入っていないことをうかがわせるのに対して、深さ 9 m 以浅では両者に明瞭な差異が見られる。この境界が入力波倍率が大きくなると徐々に深くなり、入力波倍率が 1.0 倍では深さ 14 m に達することである。第2は、その境界以深では線形と非線形で差はないものの深さ

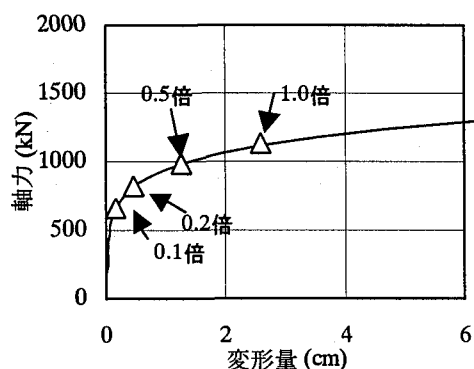


図-16 相互作用ばねの骨格曲線(杭頭部)

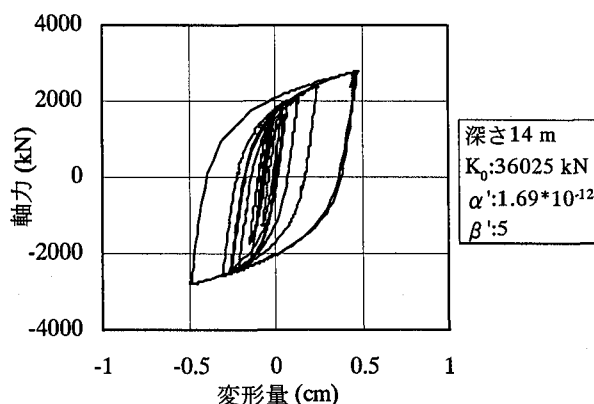


図-17 相互作用ばねの軸力-変形量関係の例

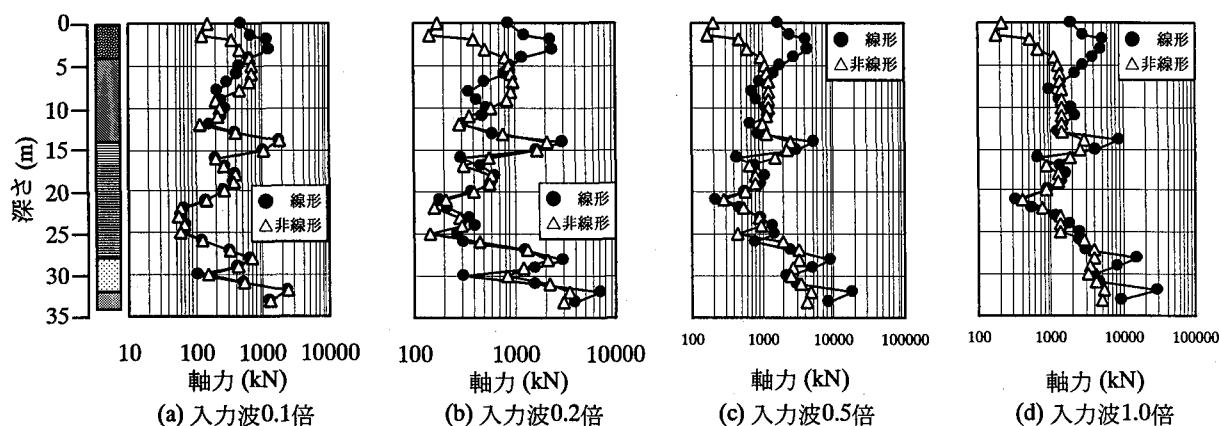


図-18 相互作用ばねの最大軸力分布における相互作用ばねの非線形化の影響

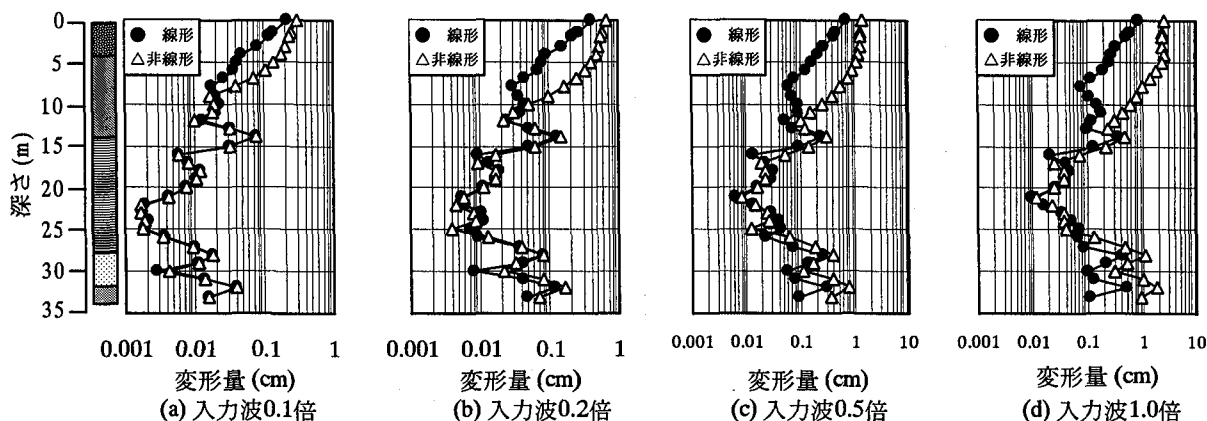


図-19 相互作用ばねの最大変形量分布における相互作用ばねの非線形化の影響

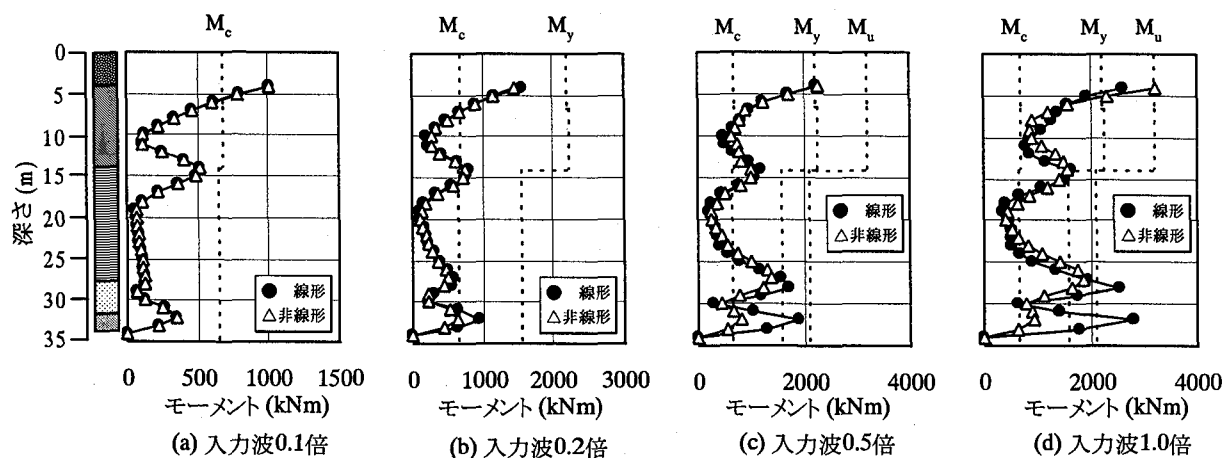


図-20 杭の最大曲げモーメント分布における相互作用ばねの非線形化の影響

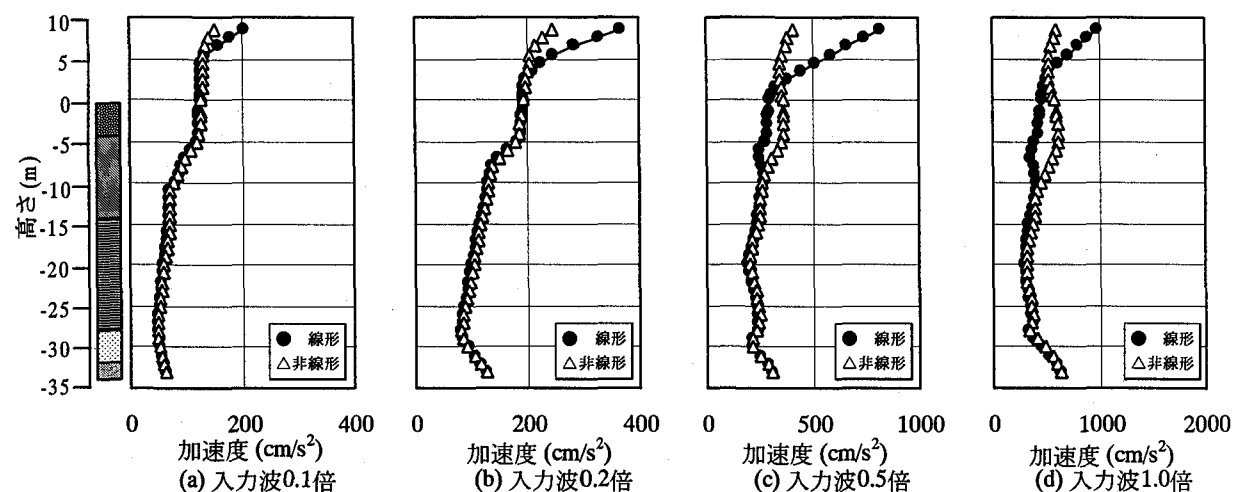


図-21 連成系の最大加速度分布における相互作用ばねの非線形化の影響

28 m と 32 m を中心にして線形と非線形の差が大きくなっている。

上述の 2 点を考察する。図-19 に相互作用ばねの最大変形量分布を示す。相互作用ばねが線形の場合では入力が大きくなるにつれて、深さ 15 m より浅い部分は分布形状が相似形で変化するのに対して、それより深い部分では、特に深さ 28 m と 32 m を中心に浅い部分よりも相

対的に大きくなっており、地盤の非線形化による深部のせん断変形の増大を直接反映したものである。この考察は最大軸力分布と同様であるが、表層ほど相互作用ばねの剛性が小さいことから表層ほど変形は大きい。一方、相互作用ばねが非線形の場合には、入力波倍率が 0.1 倍では深さ 9 m を、1.0 倍では 14 m を境界として、それ以上では非線形の場合が線形の場合よりも大きい。境界より

りも上の部分でも表層 4~6 m では線形に比べて変位が大きく軸力は小さいが、これは、表層ほど相互作用ばねの降伏軸力が小さいことに起因している。一方、境界よりも上の部分でも表層 4~6 m より下の部分では線形に比べて変位も大きく軸力も大きい、表層の相互作用ばねの非線形化によって下方に再配分が生じたためであると理解できる。この再配分が杭頭から下方に向かって進んでいることから、再配分される元となった荷重は杭頭に作用する荷重、すなわち上部構造の慣性力であると言える。

以上のことから、上部構造の慣性力による非線形化が表層から下方に向かって進むとともに、ある境界より深いところでは、地盤変形に起因すると考えられる相互作用ばねの応答の増大が見られ、なかでも地盤の非線形化とともにせん断ひずみが増大する深さ 28 m と 32 m 付近の地層境界を中心として非線形化が進んでいるという相互作用ばねの非線形化の進展とそのメカニズムがわかった。

図-20 に相互作用ばねの非線形化の影響を見るために杭の最大曲げモーメント分布を示す。曲げモーメントは入力波倍率 0.1 倍ではほとんど差はない。0.2 倍もあまり差は見られないが、深さ 32 m 付近では線形時のモーメントが M_c を超えているのに対し、非線形時のモーメントは M_c を超えていない。すなわち、曲げモーメントの差はわずかではあるが、曲率の差は大きいと考えられる。

入力波倍率 0.2 倍以上では、入力波倍率が大きくなるにつれて非線形化により杭頭部曲げモーメントは増大している。この増大傾向は深さ 14 m 以上で認められる。一方で、深さ 28 m と 32 m 付近では非線形化により曲げモーメントは減少している。これらのことは相互作用ばねの非線形化の傾向と符合している。杭頭部では上部構造の慣性力に対する抵抗力が減少したこと、地中部では層の境界で地盤の変形の伝達力が減少したことに起因すると考えられる。

図-21 に連成系の最大加速度分布を示す。相互作用ばねを非線形化することによって上部構造の応答は概して小さくなっているが、入力波倍率が 0.5 倍以上では非線形化が深さ 10 m 以上の応答を増大している。深さ 10 m 以下の地中部ではほとんど変わらない。このことから、相互作用ばねの非線形化は、杭頭部付近で進み、基礎部の加速度応答を増大させている。

(4) 総合的な議論

本研究では、Penzien モデルを用いて、地盤、杭、相互作用ばねの 3 つの系構成要素の非線形性が全体系の応答に及ぼす影響を検討した。上部構造の応答と杭の応答とに分けて議論する。

このモデルでは、杭の非線形性は連成系の加速度や変位応答にはほとんど影響を及ぼさず、杭の応力ひずみ応答にのみ影響を与えることがわかった。また、線形で取

り扱っても等価エネルギー法により非線形の杭の応力ひずみを評価できることがわかった。地盤の非線形性を考慮すると、地盤を線形に扱った場合に比べて杭-構造物系の加速度応答の増幅は小さくなり、入力レベルが大きくなるほどその傾向は大きい。さらに、相互作用ばねの非線形性を考慮すると構造物の応答は概して小さくなり、2 分の 1 程度になる場合もある。入力地震動のレベルが大きくなると応答の差は地中部にも及ぶことがある。

次に、杭の曲げモーメントや曲率などの応答を考察する。注目すべき位置は 3 箇所ある。杭頭部(深さ 4 m)、地中部 1(深さ 14 m)、地中部 2(深さ 28 m と 32 m) の 3 箇所である。動的な応答として地層境界に大きなせん断ひずみが生じ、周辺地盤のせん断ひずみが杭に曲げ変形を強要し、その結果その深さで杭にも大きな曲げモーメントが生じるが、地盤の非線形性を考慮することで、せん断ひずみが大きく増幅するところ(深さ 28 m と 32 m) では杭の応答も大きくなることがわかった。

一方、そのようなところでは相互作用ばねの非線形性を考慮することで、杭の曲げモーメントが減少することがわかった。すなわち、このようなせん断ひずみが集中する深さにおいては、相互作用ばねは地盤の応答の影響を杭-構造物系に伝える役割を主としているという理解ができる。相互作用ばねとその非線形性の評価は、地中部の杭の曲げ応答の評価を大きく左右すると考えられる。非線形性を考慮しなければ過大評価の可能性があるが、過大な非線形性の評価は過小評価を招く。また、地盤の非線形性を考慮すると、上部構造の加速度応答が相対的に小さくなり、杭頭部の曲げモーメントは小さくなる。相互作用ばねの非線形性を考慮すると加速度応答が大きくなっている。以上より、地盤の非線形性を考慮することはもちろん重要であるが、それと同時に相互作用ばねの非線形性を考慮することも極めて重要であると考えられる。

4. 結論

系構成要素の非線形性の影響を独立に検討した結果、以下のような結論が得られた。

- (1) 地盤の非線形性を考慮することで、地層境界に地盤のせん断ひずみが一層大きくなり、その箇所は地盤変形による杭の曲げモーメントも増大する。
- (2) 杭の非線形性は、杭と上部構造物の変位と加速度の応答にはほとんど影響を及ぼさない。また、杭の非線形性を考慮すると杭の曲げモーメントを小さく、曲率を大きく評価する。
- (3) 杭の非線形性を考慮した場合の杭の曲げモーメントと曲率の応答は、等価エネルギー法によって線形解析の結果からおおむね評価できる。
- (4) 相互作用ばねの非線形性は、表層部では上部構造物の慣性力に対する抵抗力が減少し、曲げモーメント

が増加するが、地中部では地盤変形を荷重として伝達する力が減少することにより曲げモーメントが減少する。

- (5) 地盤の非線形性はもちろん、相互作用ばねの非線形性の評価は、杭の曲げ応答や構造物の加速度応答にとって重要である。

参考文献

- 1) 土質工学会：16.3 水平抵抗，第 16 章 杭基礎，土質工学ハンドブック，pp.563-572, 1983.
- 2) 宮本 裕司ほか：非線形，液状化地盤における杭基礎の地震時応答性状に関する研究，日本建築学会構造系論文報告集，第 471 号，pp.41-50, 1995.
- 3) 酒向 裕司，宮本 裕司：変動軸力を考慮した杭基礎の地震応答に関する解析的検討，日本建築学会構造系論文報告集，第 523 号，pp.79-86, 1999.
- 4) 立石 章，古池 章紀：軸力変動を考慮した動的非線形解析による杭基礎の耐震性に関する一考察，土木学会第 25 回地震工学研究発表会講演論文集，pp.585-588, 1999.7.
- 5) 孫 利民，後藤 洋三：杭基礎を有する RC 橋脚の非線形地震応答解析，土木学会第 25 回地震工学研究発表会講演論文集，pp.837-840, 1999.7.
- 6) 張 鋒，木村 亮：3 次元 FEM による杭基礎一体系耐震性能評価，杭基礎の耐震設計法に関するシンポジウム論文集・報告書，土木学会，pp.109-118, 2001.9.
- 7) 森 伸一郎，池田 隆明：地震時液状化の際の杭基礎構造物の動的応答に及ぼす非線形相互作用バネ特性の影響，土木学会第 47 回年次学術講演会講演概要集第 1 部，pp. 158-159, 1992.9.
- 8) 三浦 賢治：地盤ばね，逸散減衰，入力動に及ぼす土の非線形性，第 4 回構造物と地盤の動的相互作用シンポジウム—非線形動的相互作用の現状と課題—，日本建築学会，1995.10.
- 9) 護 雅史，長谷川 正幸：杭と地盤の非線形性を考慮した杭支持建物の地震応答解析法，第 10 回日本地震工学シンポジウム，pp.1711-1714, 1998.
- 10) 酒向 裕司，宮本 裕司：入力地震動の波形特性の違いによる液状化地盤の杭基礎の地震応答，日本建築学会構造系論文集，第 514 号，pp.133-140, 1998.
- 11) 森 伸一郎，三浦 房紀：杭基礎構造物の地震応答解析法，杭基礎の耐震に関するワークショップ，pp.1-7, 1999.8.
- 12) 大塚 久哲，久納 淳司，五瀬 伸吾：橋脚—基礎一体モデルの地震時挙動に関する考察，第 10 回日本地震工学シンポジウム論文集，pp.1705-1710, 1998.12.
- 13) 森 伸一郎，平田 昭博：地盤-杭基礎構造物系の地震応答に及ぼす系構成要素の非線形性の影響，杭基礎の耐震設計法に関するシンポジウム論文集・報告書，土木学会，pp.91-96, 2001.9.
- 14) Penzien, J., Scheffey, C.F. and Parmelee, R.A.: Seismic Analysis of Bridges on Long Piles, J. of the Eng. Mech. Div., Proc. of ASCE, Vol. 90, No. EM3, pp. 223 -254, 1964.6.
- 15) 森 伸一郎：杭基礎構造物に対する質点ばね系モデルの提案とその実被害への適用，応用力学論文集，土木学会，Vol. 3, pp. 609-620, 2000.8.
- 16) 河村 壮一：埋立軟弱地盤に建つ杭支持建物の地震動観測と解析(その 7) Penzien 型モデルと集約型モデル，日本建築学会大会学術講演概要集，pp.415-416, 1975.10.
- 17) 森 伸一郎，滝本 幸夫他：液状化地盤における杭基礎構造物の動的相互作用と液状化解析の適用性，構造物の基礎と地盤との動的相互作用に関するシンポジウム，pp.173-180, 1990.
- 18) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，1996.12.
- 19) 今津 雅紀，福武 毅芳：砂礫材料の動的変形特性，第 21 回土質工学研究発表会，pp.509-512, 1986.
- 20) 杉村 義広：軟弱地盤における長尺支持ぐい基礎の地震時振動性状に関する研究，早稲田大学博士論文，pp. 211, 1972.10.
- 21) 足立 紀尚，木村 亮，多田 智：室内模型実験による地すべり抑止機構に関する考察，土木学会論文集，No.400,III-10, pp.243-252, 1988.12.

(2001 年 9 月 14 日受付)