

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

森 伸一郎¹, 平田 昭博²

¹フェロー 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)

²学生会員 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)

軟弱な地盤中に杭基礎で支持される道路橋の橋脚を多質点ばね系にモデル化した場合に、橋脚と杭の地震応答に及ぼす地盤、杭、相互作用ばねの非線形性の影響を検討した。解析の結果、地盤のひずみが大きく現れた箇所は杭のモーメントが大きくなること、相互作用ばねの非線形性は杭頭部では曲げモーメントが増加し、地中部では減少すること、地盤の非線形性と同時に相互作用ばねの非線形性を考慮することが重要であることなどがわかった。

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

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していると考えられ、杭の非線形性と地盤の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、相互作用ばねでモデル化される地盤と杭との間の抵抗機関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いる。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、相互作用ばねの非線形性の影響について検討した。

2. 解析モデル

図-1 に解析対象とする道路橋基礎¹⁾を示す。解析は質点系モデルの1つである Penzien モデルを用いた。杭-構造物系の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。自由地盤系の質点数は 34 点とし、杭-構造物系との間に動的相互作用を考慮するためにばね、ダッシュポット、有効質量を設定した。地盤は、比較的軟弱な層厚が 14 m あり、支持層深さは 32 m である。地盤特性は表-1 中に示す各層の N 値より設定した。減衰はレーリー減衰とし、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。杭は場所打ちコンクリート杭で、直径 1.2 m、長さ 30 m で 3×4=12 本で構成される。杭先端位置に入力する波形は 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 GL-83 m(NS 成分)の加速度記録(図-2)とした。

(1) 地盤の非線形性のモデル化

地盤の動的変形特性は下記の今津・福武²⁾の式を基本とした。(ただし、せん断ひずみ 0.5%まで)

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

$$h = c \cdot \gamma^d \quad (2)$$

ここで、 a, b, c, d : 定数

これらから、 h_{max} , $\gamma_{0.5}$ を算定し、復元力特性である Ramberg-Osgood モデルのパラメータとする。以下に地盤の R-O モデルの骨格曲線を示す。

$$\gamma = \frac{\tau}{G_0} \left(1 + \alpha |\tau|^\beta \right) \quad (3)$$

$$\text{ここで、} \beta = \frac{2\pi h_{max}}{2 - \pi h_{max}}, \quad \alpha = \left(\frac{2}{\gamma_{0.5} G_0} \right)^\beta$$

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
解析に用いた入力定数を表-2 に示す。また、図-3

に R-O モデル入力データと今津・福武の式の砂質土における比較を示す。

(2) 杭の非線形性のモデル化

杭の復元力特性はトリリニア+剛性低減+最大点指向の武田モデル³⁾(図-4)を用い、その設定のための断面定数を表-3 に示す。

(3) 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は Ramberg-Osgood³⁾モデルを用いる。以下に骨格曲線を示す。

$$|P| = \frac{P_y}{\delta_y} |\delta| - \alpha \frac{|P|^r}{P_y^{r-1}} \quad (4)$$

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は降伏軸力 P_y 、降伏変形量 δ_y 、 α 、 r の4つがある。降伏軸力としては、杭の受動土圧の3倍の力を想定した。降伏変形量は、降伏軸力を微小変形時の相互作用ばね定数 (Mindlin-II 解により求められる) で除した値とした。また、 α 、 r はばねが降伏するときの変形量が杭径の1/100~1/10になるような値を設定した。図-5 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。

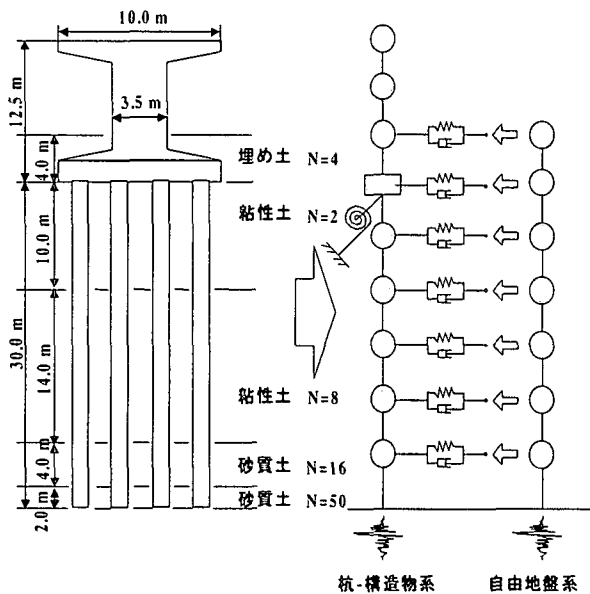


図-1 解析対象と解析モデルの概念図

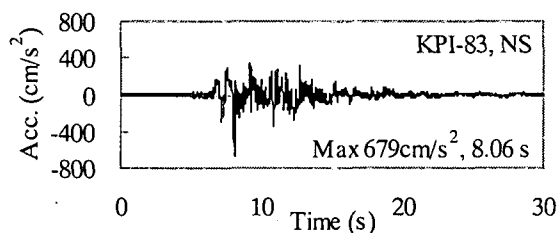


図-2 入力加速度の時刻歴

表-1 地盤の設計定数

番号	土質	層厚 m	平均 N値	単位体積重量 (t/m³)	内部摩擦角 (deg.)	粘着力 (kN/m²)	せん断波速度 (m/s)	せん断剛性 (kN/m²)
1	埋め土	4	4	1.8	-	-	127	29028
2	粘性土	10	2	1.7	0	19.6	126	26989
3	粘性土	14	8	1.8	0	78.4	200	72001
4	砂質土	4	16	1.9	31	0	202	77528
5	砂質土	2	50	2.0	42	0	295	174048

表-2 解析に用いた R-O 入力定数

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

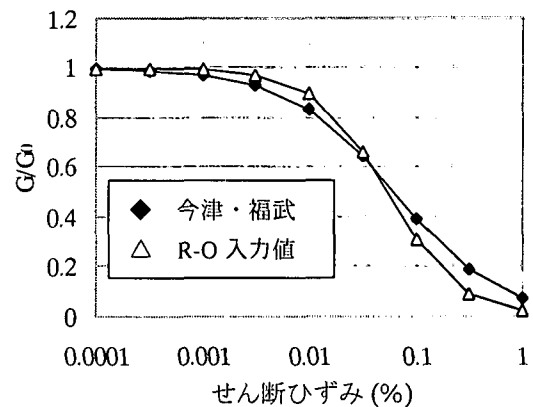


図-3 R-O と今津・福武の式の砂質土における比較

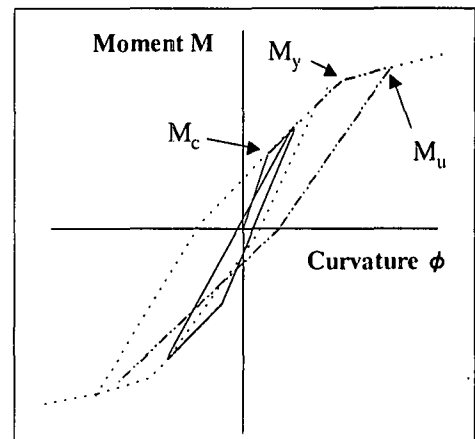


図-4 武田モデル

表-3 杭の M-φ 関係の非線形パラメータ

区間 (m)	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	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	$1.4 \cdot 10^{-2}$

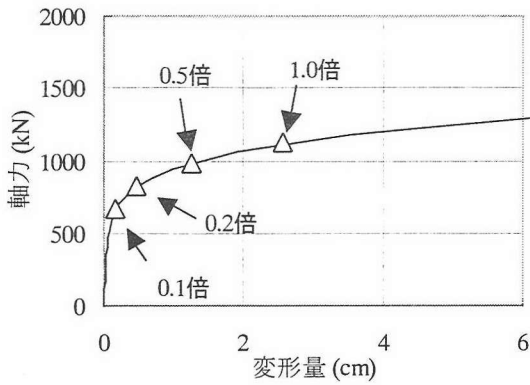


図-5 相互作用ばねの骨格曲線(杭頭部)

3. 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-4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。本研究では, それぞれの系構成要素の非線形性の比較として, 地盤の非線形性の比較では解析ケース番号3と5の比較, 杭の非線形性の比較では2と5の比較, 相互作用ばねの非線形性の比較では5と6の解析ケースを比較した。

表-4 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

4. 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-6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点は層境界に相当する。地盤の非線形化により, 自由地盤の-30m付近(-32m ~ -28mの砂質土層)で大きなせん断ひずみが生じている。これは-32m ~ -28m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-7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。

図-8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-8(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。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, -28m, -32m付近の曲げモーメントが大きくなっている。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。この深さ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。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曲げモーメントや曲率も大きな値を示すことがわかる。

また, 杭頭部の曲げ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で, 上部構造物の加速度が大きくなったため, 慣性力の影響が現れてきているものと考えられる。

(2) 杭の非線形性の影響

地盤が非線形である場合の杭の非線形性(解析ケース番号2と5の比較)について示す。図-9に橋脚上端の変位時刻歴, 図-10に橋脚上端の加速度時刻歴を示す。これらの図は線形, 非線形の2通りを重ね描きしているにも関わらず, ほとんど差異がない。よって, 上部構造物の変位と加速度は杭の非線形性の影響を受けていないことがわかる。図-11に連成系の最大変位分布, 図-12に連成系の最大加速度分布を示す。変位, 加速度ともに, -28m付近と地表付近で, 線形と非線形でわずかに異なる箇所が認められるが, その差はほとんどない。以上より, 連成系の変位, 加速度の応答は杭の非線形性の影響をほとんど受けないことがわかる。

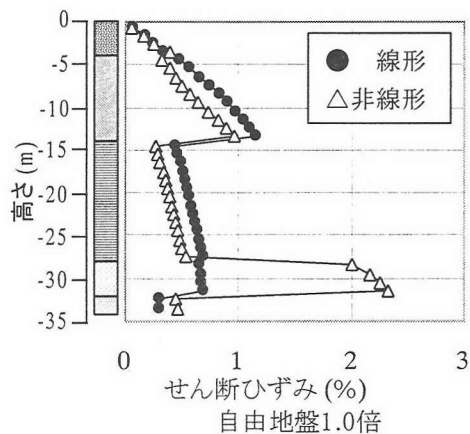


図-6 地盤の最大せん断ひずみ(地盤の非線形性)

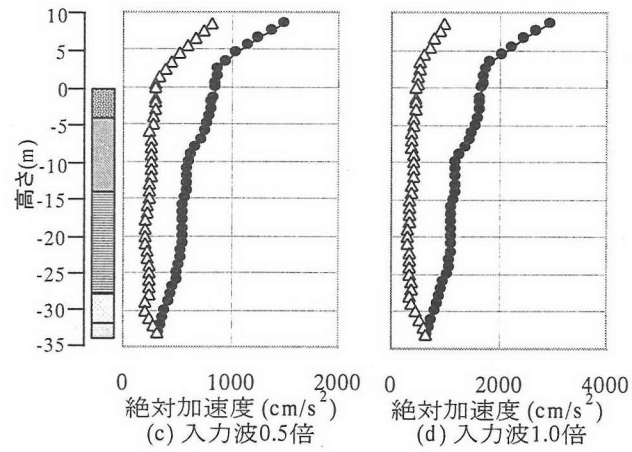
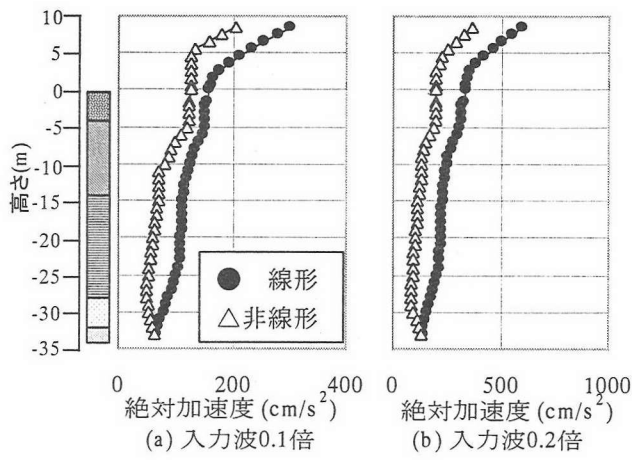


図-7 連成系の最大加速度分布(地盤の非線形性)

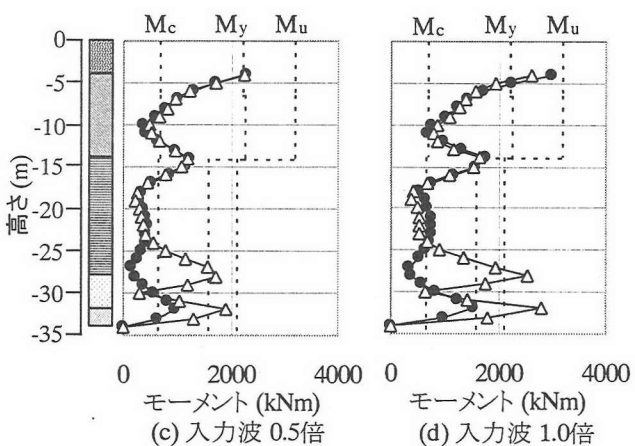
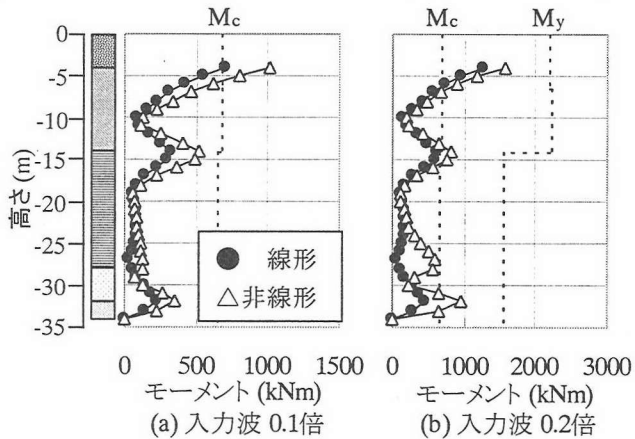


図-8 杭の最大モーメント分布(地盤の非線形性)

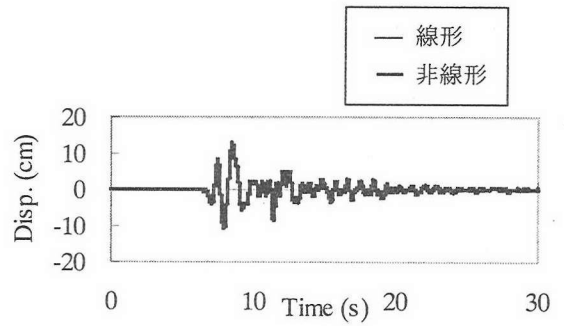


図-9 橋脚上端の変位時刻歴(杭の非線形性)

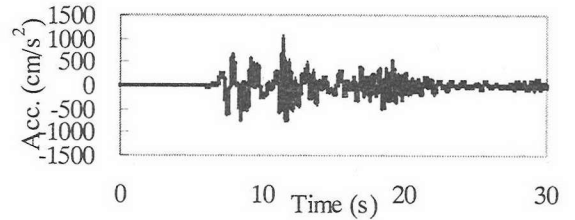


図-10 橋脚上端の加速度時刻歴(杭の非線形性)

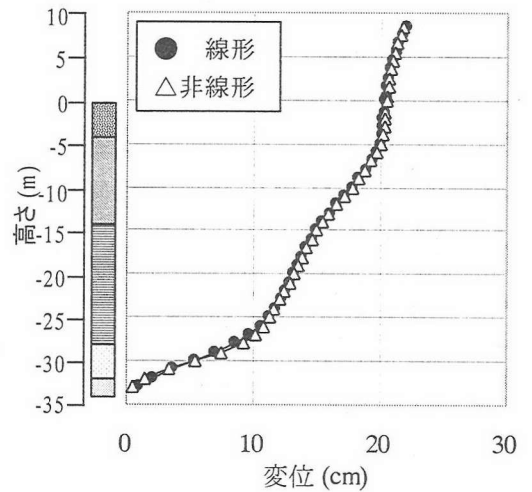


図-11 連成系の最大変位分布(杭の非線形性)

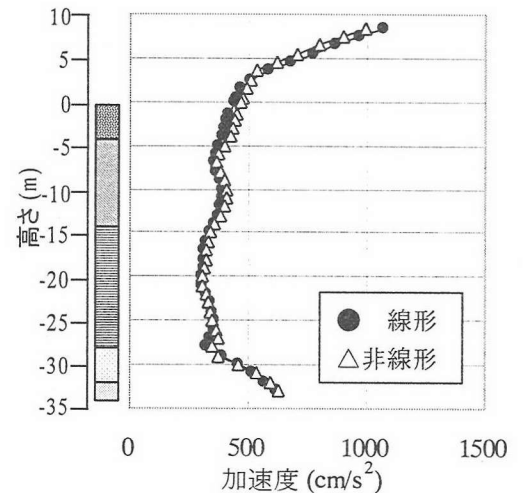


図-12 連成系の最大加速度分布(杭の非線形性)

(3) 相互作用ばねの非線形性の影響

地盤、杭ともに非線形の条件のもとで、相互作用ばねの線形、非線形を比較する。図-13 に相互作用ばねの最大軸力分布を示す。まず、入力波倍率 0.1 倍では地表面付近で非線形化している。次いで、0.2 倍では支持層付近の地中部、0.5 倍では-14 m 付近という順番で非線形化していることがわかる。図-14 に相互作用ばねの最大変形量分布を示す。入力波倍率 0.1 倍では地表面付近で非線形化し、0.5 倍で-28、-32 m 付近の非線形化が見られる。図-15 に杭の曲げモーメント分布を示す。曲げモーメントは 0.1、0.2 倍でほとんど差がなく、0.5 倍以上で差が生じてきている。1.0 倍では杭頭部で増加し、-28、-32 m 付近で減少している。杭頭部では上部構造物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起因すると考えられる。モーメントについては相互作用ばねの軸力と変形の違いの割には全体的に影響は大きくない。これは杭の断面が十分大きいためであるとされる。図-16 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物の応答が小さくなっている。

以上より、相互作用ばねの非線形化は、自由地盤の影響を連成系に反映しにくくすることがわかる。

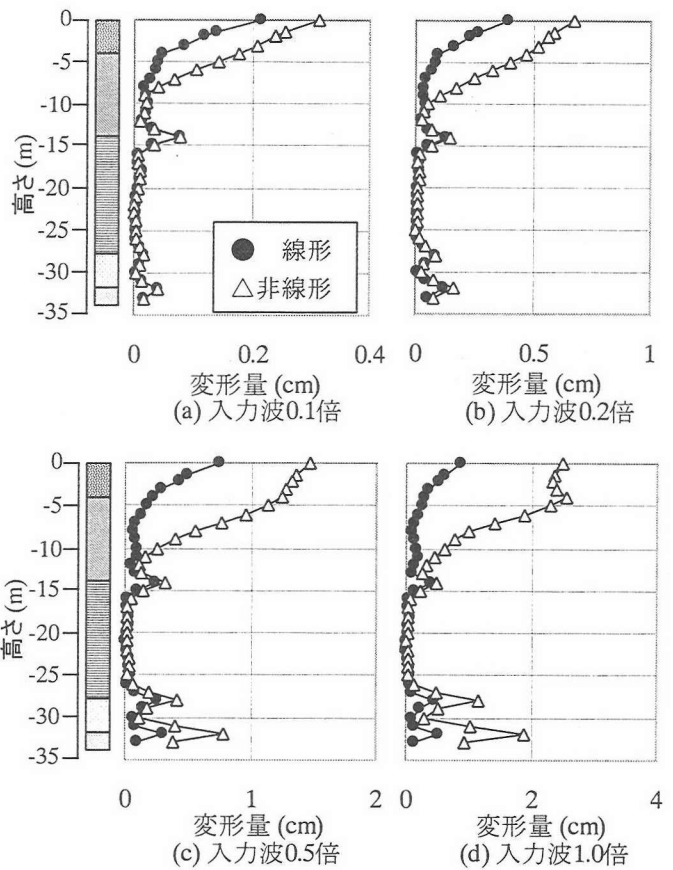


図-14 相互作用ばねの最大変形量分布

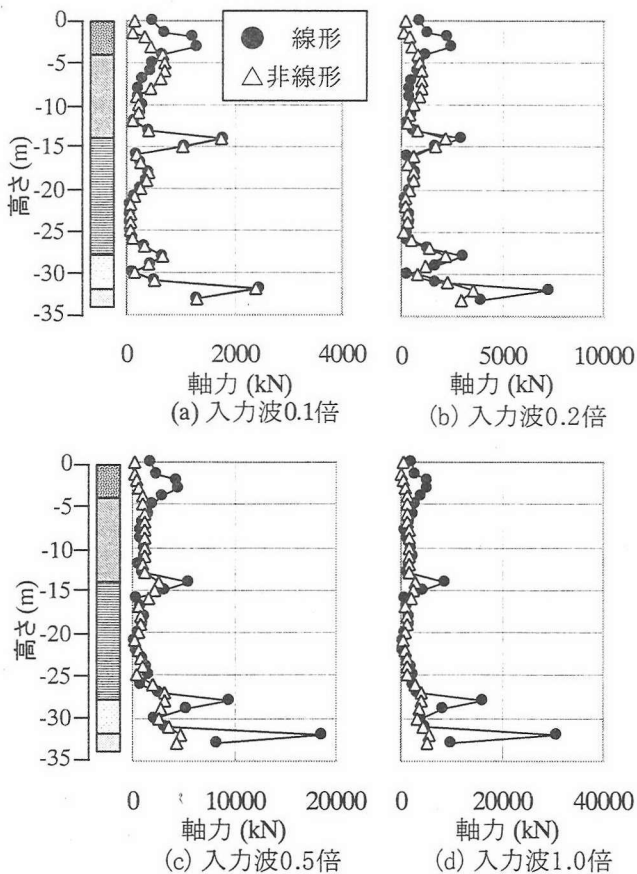


図-13 相互作用ばねの最大軸力分布

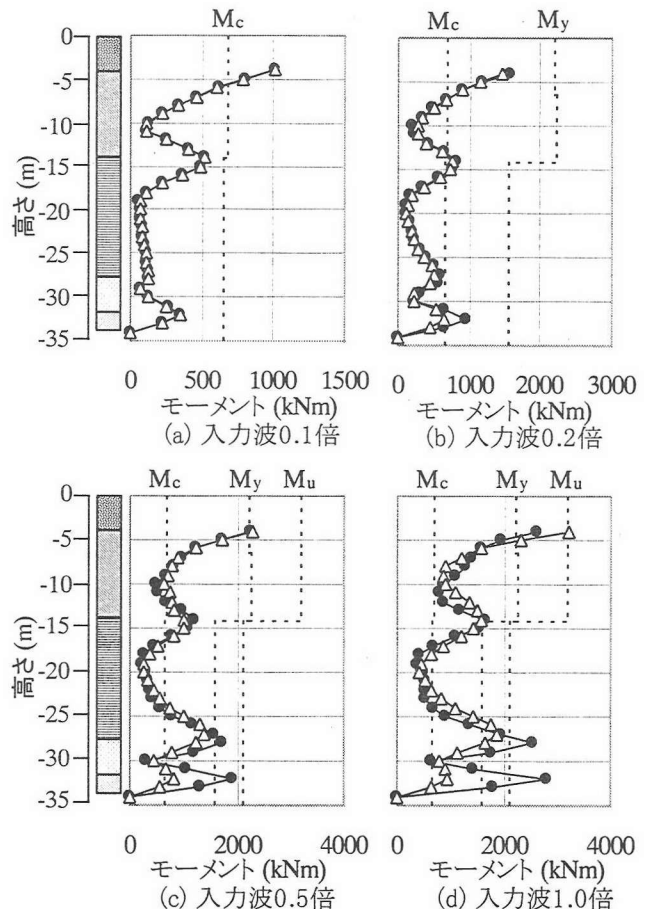


図-15 杭の曲げモーメント分布

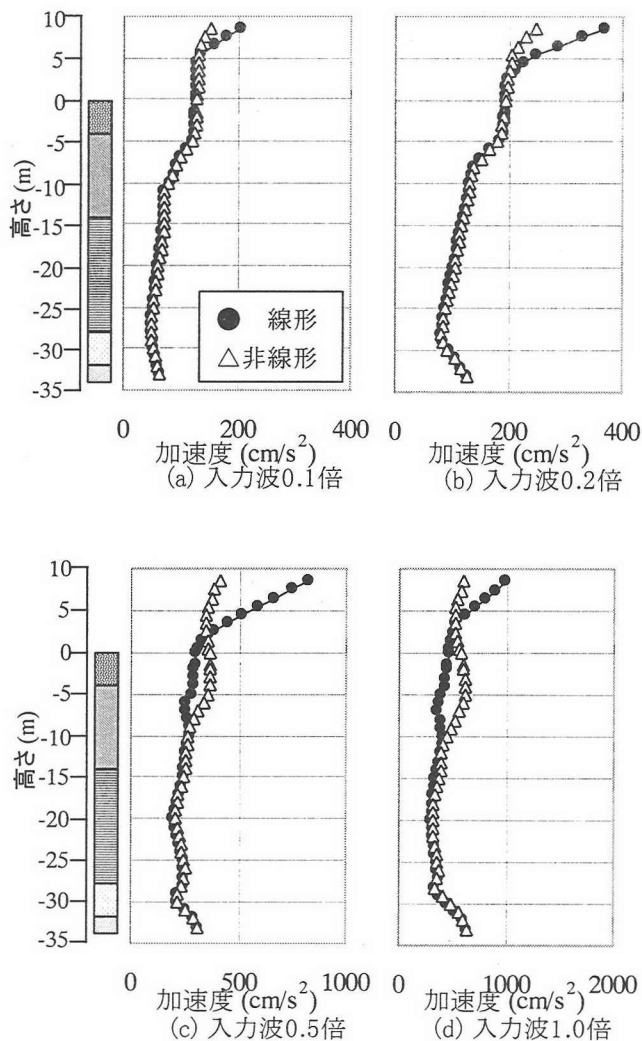


図-16 連成系の最大加速度分布

(4) 総合的な考察

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。杭の応答と上部構造の応答に分けて議論する。

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、杭の応答にのみ影響を与えることがわかった。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は増幅は小さくなり、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。

一方、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(-4m)、地中部1(-14m)、地中部2(-28mと-32m)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(-28mと-32m)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目を果たす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はあるが、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、上部構造物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り曲げモーメントも大きくなっている。

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。

5. 結論

系構成要素の非線形性の影響を検討した結果、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、その箇所は杭の曲げモーメントも増大する。
- (2) 杭と上部構造物の変位と加速度の応答は杭の非線形性の影響をほとんど受けない。
- (3) 相互作用ばねの非線形性は、杭頭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、地中部では地盤の変形の伝達力が減少することにより曲げモーメントが減少する。
- (4) 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) 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
- 2) 今津 雅紀, 福武 毅芳: 砂礫材料の動的変形特性, 第21回土質工学会研究発表会, pp.509-512, 1986
- 3) 土木学会: 動的解析と耐震設計 第1巻 地震動・動的物性, 1989