

# 動的地盤ばねの周波数依存性を考慮した 群杭基礎構造物の非線形地震応答解析法

藤 森 健 史  
伊 庭 力  
(本社 原子力本部  
原子力部)

高 野 真 一 郎  
梅 木 克 彦  
(本社 原子力本部  
技術部)

安 井 讓  
前 野 仁  
(本社 情報システム  
センター)

## Non-linear Seismic Response Analytical Method for Pile Group Foundation Building Considering Frequency Characteristics of Impedance

Takeshi Fujimori  
Tsutomu Iba

Sin-ichiro Takano  
Katsuhiko Umeki

Yuzuru Yasui  
Hitoshi Maeno

### Abstract

In analyzing the seismic response of structures in bay areas, it is important to appropriately evaluate the dynamic characteristics of the soil spring and the effective input motion. These dynamic soil-structure interaction effects depend on frequency characteristics, and it is difficult for conventional seismic analyses in the time domain to consider them. In addition, in design of pile group foundation structures, it is important to consider pile group effects. This paper presents a non-linear seismic response analytical method for pile group foundation buildings which takes into account the frequency characteristics of impedances and pile group effects.

### 概 要

臨海部等の軟弱な地盤においては、採用する地下構造と地盤構造の関係から定まる動的な地盤ばね特性や基礎に有効に作用する地震動特性を適切に評価する必要性がより大きくなる。これらの動的な相互作用効果は、一般的に周波数依存性が大きいことに特徴がある。一般設計に用いられるばね-マスモデルの逐次非線形地震応答解析法においては、この動的な地盤ばねの周波数依存性を取り込むことは難しい。一方で、これらのサイトで一般的に採用される杭支持構造では、地盤ばねの増加が杭本数に比例しないという性質が従来より指摘されている(群杭効果)。これは、おのおのの杭の振動が互いに作用しあい全体としての地盤ばねの特性に影響を与えるためである。群杭基礎構造物においては、この効果を適切に評価することが地震応答解析の精度を確保するうえで重要となる。以上の背景より、本研究では、動的な群杭効果を考慮した上で上部構造、杭、動的な地盤ばねの弾塑性履歴特性を取り扱うことができる群杭基礎構造物の逐次非線形地震応答解析法を提案した。

### 1. はじめに

臨海部をはじめとした厚い沖積層を有するサイトにおいては、地盤と構造物の動的な相互作用効果を適切に考慮した地震応答解析を行う必要性がより大きくなる。この動的相互作用効果は、一般的に、慣性の相互作用効果を表す動的な地盤ばねと入力との相互作用効果を表す基礎入力動に集約して表現することができる。これら動的な地盤ばねと基礎入力動は、周波数依存性が大きいことに特徴がある。一般設計に用いられるばね-マスモデルの逐次非線形地震応答解析法においては、この動的な地盤ばねの周波数依存性を取り込むことは難しい。

一方、杭基礎構造物においては、地盤ばねの増加が必ずしも杭本数に比例しないという性質が存在する(群杭効

果)。これは、各々の杭の振動が互いに作用しあい全体としての地盤ばね特性に影響を与えるためである。群杭基礎構造物においては、この効果を適切に評価することが地震応答解析の精度を確保するうえで重要となる。

これらの背景に対して、群杭基礎構造物の地震応答解析を精度よく行いたい場合には、主に次の2方法が考えられる。一つは、一体モデルとして3次元的に全ての杭と上部構造をFEMモデル等でモデル化し、時間領域における地震応答解析を行う方法、もう一つは、動的サブストラクチャー法を用い、3次元的にモデル化した地下部分を別個に解き、SRモデルとして解析する方法である。前者の方法は、杭体のボリュームの評価や計算機の能力に対して非現実的なモデルになりがちな点に問題がある。後者の方法は、精算解として精度の高い結果を得ら

れることが確認されているが、線形解析にとどまる。

本研究では、これらの背景を鑑み、精算解として位置づけられる3次元薄層要素の群杭モデルより得られたインピーダンスを上部構造物との一体モデルに組み込み、全体系としての逐次非線形地震応答解析を可能とする解析法を提案した。

## 2. 提案解析モデル

提案解析法は、基本的にはPenzien型のモデル<sup>1)</sup>に基づいている。Penzien型のモデルは、上部建物、基礎構造、周辺地盤、自由地盤をばね-マスでつないだモデルである。この方法は、一体型のモデルとなるので逐次非線形解析に適用できるという点で有効な解析手法である。しかしながら、地下構造部分と地盤部分を結ぶばね(地盤ばね)の評価法として一般的に用いられるMindlin解は、一様半無限弾性体中の静的荷重による解であるため、地盤-構造物の動的な相互作用効果の評価という点に関しては問題を有する。その減衰についても、Mindlin解では評価されないため、周波数依存性の大きい地下逸散減衰効果に対して、周波数に対して一定の等価な材料減衰を適宜設定せざるをえない。

このような問題点を克服するため本手法では、Penzien型のモデルにおける地盤ばねの評価を合理的に行うことを試みている。ここでは、従来のPenzien型モデルのようにあらかじめ分割した地盤層ごとに地盤ばね値を与えるのではなく、はじめに地盤のインピーダンスマトリクスを作成しておき、それを修正して地盤層ごとに分離したばねを与える方法を用いた。この方法は、文献2)においてすでに提案されているが、本論文では、地盤層ごとに分離表現された地盤ばねの周波数依存性を付加質量とダッシュポットを用いて近似表現し、動的相互作用効果の評価精度をより向上させているところに特徴がある。

地盤のインピーダンスマトリクスの評価は、杭体のボリュームを考慮するために杭部分にリング加振解を用いた3次元薄層要素法<sup>3)</sup>によった。この方法によれば、群杭基礎構造の地盤インピーダンスの精算解を得ることができる。このインピーダンスマトリクスはフルマトリクス(式(1))なので、式(2)、式(3)のように軸ばねとせん断ばねのマトリクス形を仮定して、軸ばねは式(4)により、せん断ばねは式(5)により、それぞれ求めた。この仮定は、同じ層内における杭水平変位はいずれの杭も等しいとしたことを意味する。

$$k_{a_{nn}} = \begin{bmatrix} ka_{11} & ka_{12} & \dots & ka_{1n} \\ ka_{21} & ka_{22} & \ddots & ka_{2n} \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ ka_{n1} & ka_{n2} & \dots & ka_{nn} \end{bmatrix} \dots \dots \dots (1)$$

$$k_{l_n} = \begin{bmatrix} kl_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & kl_2 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & kl_n \end{bmatrix} \dots \dots \dots (2)$$

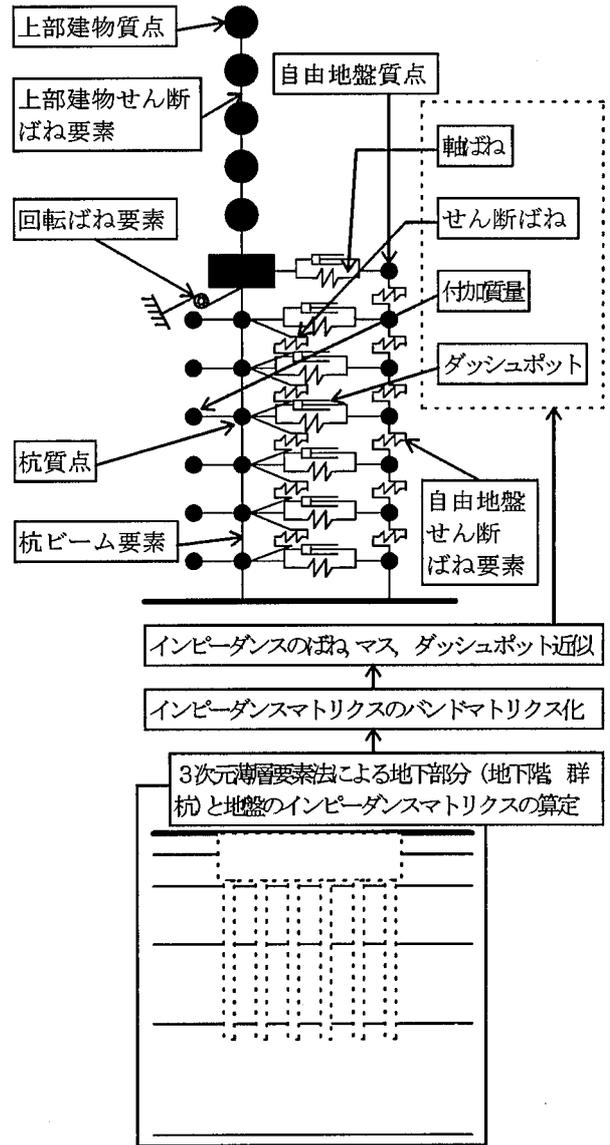


Fig. 1 解析法の概要  
Outline of Analytical Method

$$k_{s_n} = \begin{bmatrix} ks_1 & -ks_1 & 0 & \dots & 0 \\ -ks_1 & ks_1 + ks_2 & -ks_2 & \ddots & \vdots \\ 0 & -ks_2 & ks_2 + ks_3 & \ddots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & -ks_{n-1} \\ 0 & \dots & 0 & -ks_{n-1} & ks_{n-1} \end{bmatrix} \dots \dots (3)$$

$$k_{l_n} \begin{Bmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{Bmatrix} + k_{s_n} \begin{Bmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{Bmatrix} = k_{a_{nn}} \begin{Bmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{Bmatrix} \dots \dots \dots (4)$$

$$k_{l_n} \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ 0 & 1 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 1 \\ 0 & \dots & 0 & 1 \end{bmatrix} + k_{s_n} \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ 0 & 1 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 1 \\ 0 & \dots & 0 & 1 \end{bmatrix} = k_{a_{nn}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ 0 & 1 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 1 \\ 0 & \dots & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots \dots (5)$$

ここに、 $k_{a_{nn}}$ ,  $k_{l_n}$ ,  $k_{s_n}$  : 地盤インピーダンス, 軸ばね, せん断ばねのマトリクス

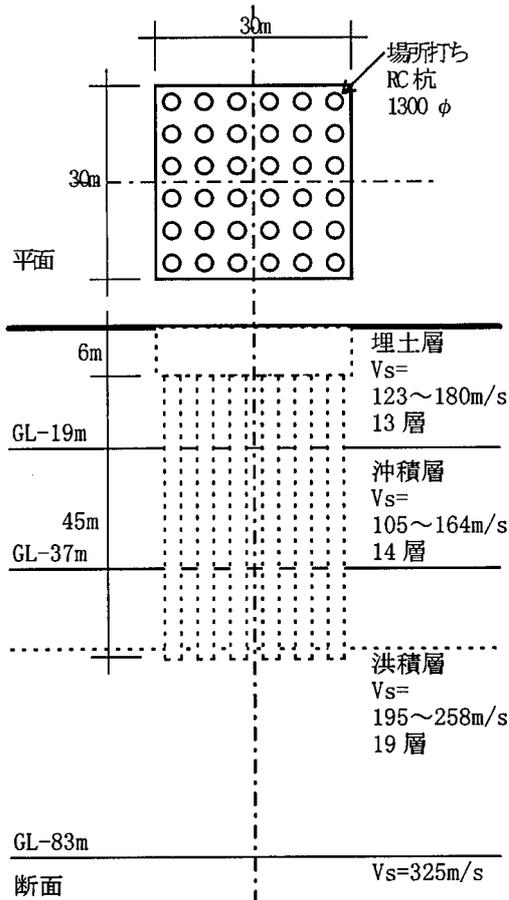


Fig. 2 地下部分の解析モデル  
Analytical Model of under Ground

このようにして求めた軸ばねとせん断ばねの周波数依存性は、付加質量とダッシュポットを用いて式(6)、式(7)で近似表現する。

$$\text{real}(k(\omega)) = \text{real}(k(0)) - m\omega^2 \dots \dots \dots (6)$$

$$\text{imag}(k(\omega)) = \text{imag}(k(0)) + c\omega \dots \dots \dots (7)$$

ここに、 $\text{real}(k(\omega))$ 、 $\text{imag}(k(\omega))$ ：軸ばね，せん断ばねの実数部分，虚数部分， $m$ ：付加質量， $c$ ：ダッシュポット

これら軸ばね，せん断ばねに関する $m$ ， $k(0)$ ， $c$ を用いて上部建物，基礎，群杭，自由地盤部分を一体で表したばね-マスモデルを構築<sup>4)</sup>する。これにより，群杭基礎と地盤の慣性の相互作用効果は，軸ばね，せん断ばねの $m$ ， $k(0)$ ， $c$ に集約され近似的に表現される。また，入力相互作用効果は，地下部分(基礎部分，群杭部分)の剛性により近似的に考慮される。

なお，軸ばねの $\text{imag}(k(0))$ とせん断ばねの $m$ ， $c$ は相対的に値が小さく，影響を与えにくいので，ここではモデルの簡略化のため無視した。せん断ばねの $\text{imag}(k(0))$ は，ひずみエネルギー比例型減衰における材料減衰として与えた。また，自由地盤の挙動を地盤ばねを介してドライビングフォースとして与える方法もできるが，同じく簡略化のため自由地盤もばね-マスモデルとして全体モデルに取り込んだ。このとき，自由地盤のばね-マス系には構造物の影響を受けないよう十分に大きな質量を持たせた。また，回転ばねは精算解による動的地盤ばねの1

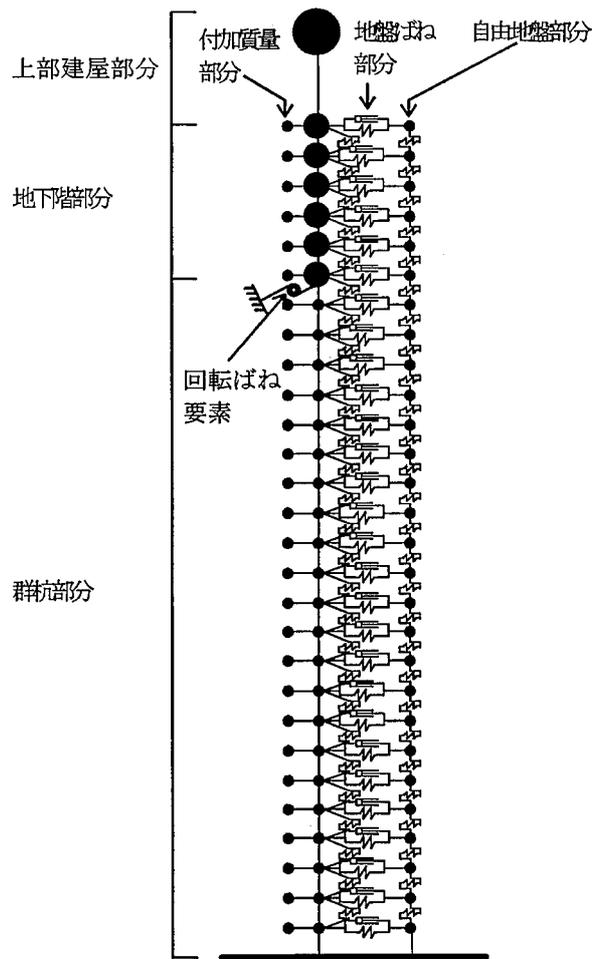


Fig. 3 全体系の解析モデル  
Analytical Model

次固有振動数付近の値を用いた。  
提案解析法の概要をFig. 1に示す。

### 3. 提案解析モデルによる地震応答解析

#### 3.1 解析モデル

1995年兵庫県南部地震におけるポートアイランド地区に建つ6階建(地下1階)の群杭基礎建築構造物を想定して地震応答解析を行った。

このモデルを採用した理由は，軟弱地盤サイトであること，中低層建物のほうが相互作用効果が大きく検証に向いていること，地盤構造が明らかであること，自由地盤における観測記録が得られていること等である。

地下部分のモデル図をFig. 2に示す。杭は場所打ちRC杭で計36本である。地盤は，埋土，沖積層，洪積層で構成され，洪積層内GL-51mを杭支持地盤とする。地下階部分の底面は，GL-6mである。地盤定数は，観測記録に基づいた1次元波動論の等価線形解析によった。

Fig. 2に示したモデルより求められた $m$ ， $k$ ， $c$ を用いて作成した全体系の解析モデルをFig. 3に示す。上部構造は等価高さ，等価質量による1質点モデルとした。基礎固定時の固有周期は0.48秒である。減衰はひずみエネルギー比例型(上部構造3%，杭2%)とした。また，上部構造の弾

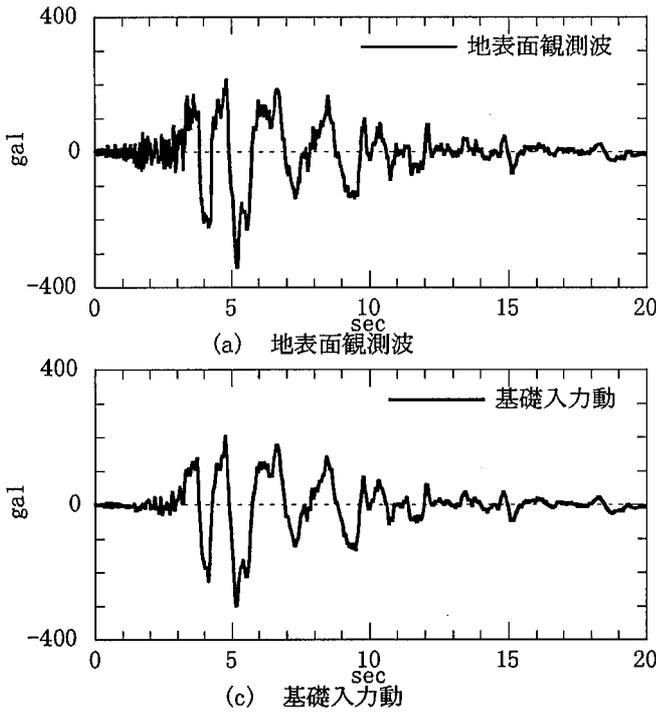


Fig. 4 入力地震動  
Input Motion

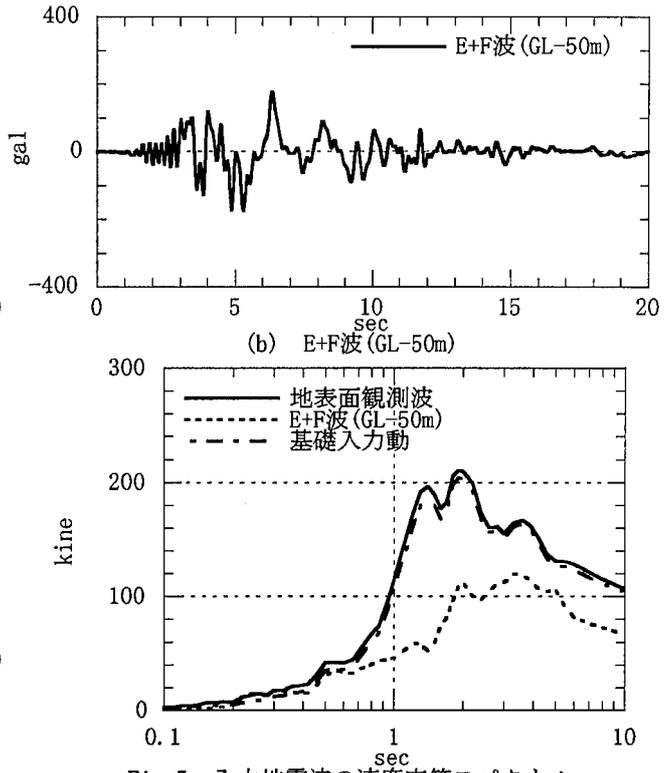


Fig. 5 入力地震波の速度応答スペクトル  
Response Spectra of Input Motions

Table 1 解析手法の概要  
Outline of Analytical Method

		上部構造	杭	地盤ばね	入力動
提案手法	線形	せん断ばね —マス	ビーム	3次元薄層要素法による地盤分割層ごとのインピーダンスの $m, k, c$ 近似 (地盤の等価線形解析による収束物性使用)	杭先端位置における E+F 波
	非線形	せん断ばね —マス (normal-tri-linear)	ビーム (線形, normal-tri-linear 等も可)	3次元薄層要素法による地盤分割層ごとのインピーダンスの $m, k, c$ 近似 (せん断ばねは R-0 モデル, 軸ばねは地盤の等価線形解析による収束物性使用)	同上
比較手法 (SRモデル)	線形	せん断ばね —マス	地盤ばね算定時に線形ビーム要素として考慮	3次元薄層要素法による基礎底面に集約した動的地盤ばね (地盤の等価線形解析による収束物性使用)	基礎入力動
	非線形	せん断ばね —マス (normal-tri-linear)	同上	3次元薄層要素法による基礎底面に集約した動的地盤ばねの $m, k, c$ 近似 (地盤の等価線形解析による収束物性使用)	同上

塑性履歴特性はnormal-tri-linear型とし、第1折れ点における剛性低下率は0.25、第2折れ点における剛性低下率は0.01とした。降伏時の変形角は1/80、ひび割れ荷重は降伏点荷重の1/3とした。降伏点荷重は6,106tfである。杭部分についても弾塑性履歴特性を適用できるが、ここでは線形とした。相互作用ばねのうち、せん断ばねについては、R-0モデルを適用した。R-0モデルの諸定数は文献5)を参考に定めた。せん断ばねの初期値は自由地盤の剛性低下率の逆比を乗じ設定した。軸ばねについては、非線形特性の影響が小さいことから線形とした。<sup>4)</sup>

用いた入力地震波をFig.4に、それらの速度応答スペクトル( $h=0.05$ )をFig.5に示す。Fig.4(a)はポートアイランド地表面観測波<sup>9)</sup>である。Fig.4(b)が用いた入力地震波で1次元波動論の等価線形解析によりFig.4(a)に示した地表面観測波から算定した杭先端位置におけるE+F波である。Fig.4(c)は比較の対象として用いた解析手法における入力地震波で、3次元薄層要素法により算定した地下階を有する群杭基礎の基礎入力動である。

なお、解析は、検証用として、SRモデルを用いた場合

についても行った。SRモデルでは、動的サブストラクチャー法を用いることで地下階を有する群杭基礎の動的地盤ばねが精密に評価され線形解析では精算解が得られる。逐次非線形解析については、精算解を得にくいので、参考例として、基礎底面に集約した動的地盤ばねに  $m, k, c$  近似を用いたSRモデルの逐次非線形解析結果と比較した。この方法では、地盤のひずみレベルが  $10^{-4}$  を越える今回のケースに関しては、地盤ばね部分が等価線形解析となる点で実状と異なっている。上部構造の条件は、いずれにおいても提案手法と完全に一致している。提案手法と比較対象手法(SRモデル)の概要をTable 1に示す。

### 3.2 解析結果

はじめに、3次元薄層要素法により算定した地下階を有する群杭基礎の地盤各層ごとのインピーダンスと  $m, k, c$  によるその近似値を比較してFig.6に示す。ここでは、代表例として、杭頭付近(第6層)、沖積層—洪積層境界付近(第28層)の結果を示した。インピーダンスの  $m, k, c$  近似は、0~5Hzの範囲に関して最小二乗法を適用した。なお、Fig.5の結果等より、この範囲に主要な振動数成分が

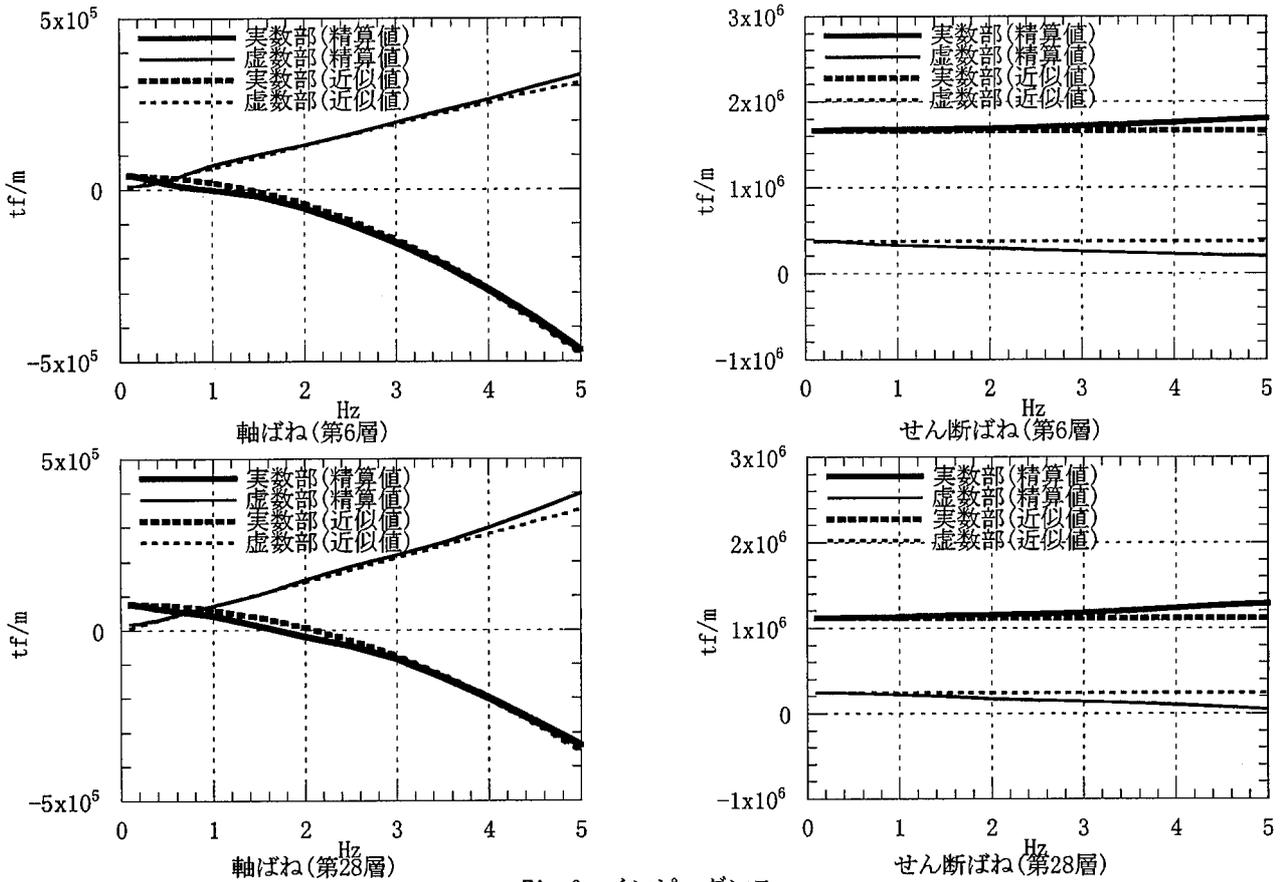


Fig. 6 インピーダンス  
Impedances

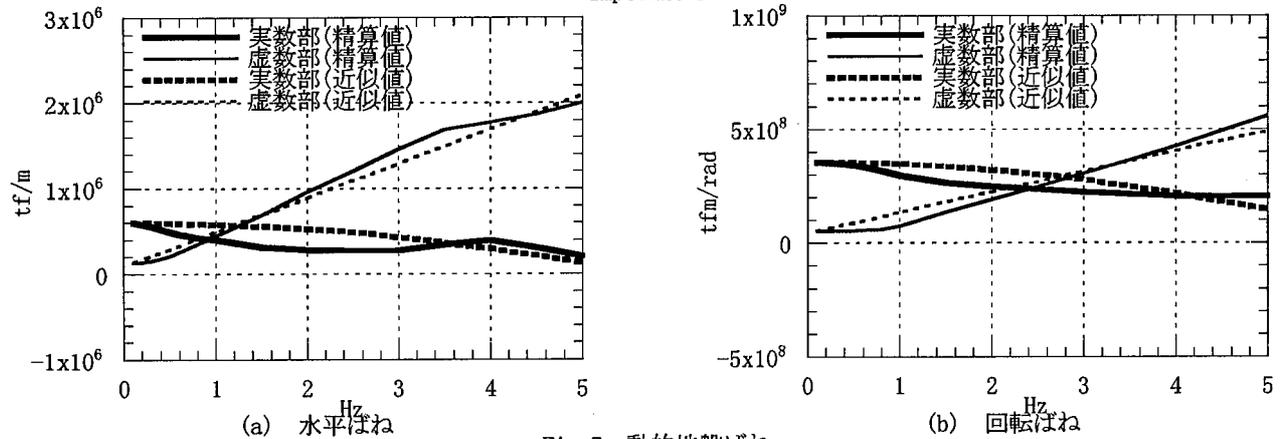


Fig. 7 動的地盤ばね  
Dynamic Soil Springs

含まれていることを確認できる。Fig. 6の結果より、精算値と近似値はおおむね一致しており、 $m, k, c$ により動的な相互作用特性が模擬されることを確認できる。なお、この傾向は他の層についても同様である。

次に、SRモデル(非線形)で用いた $m, k, c$ 近似の動的地盤ばねを精算解と比較してFig. 7に示す。水平ばね、回転ばねとも概ね精算値と一致していることを確認できる。

提案手法による線形解析の結果得られた建屋頂部波形をSRモデル(線形)の結果と比較してFig. 8(a)に示す。両者は良く一致している。また、それらの速度応答スペクトル( $h=0.05$ )をFig. 9(a)に示す。両者は、1次周期付近で若干の差異が認められる。これは、Fig. 6に示した近似インピーダンスのせん断ばねが若干実数部分を過小評価、

虚数部分を過大評価しており、全体として減衰( $h = \text{imag}(k(\omega)) / 2\text{real}(k(\omega))$ )を過大評価するためと考えられる。従って、この傾向は、近似インピーダンスの精度を向上させることで改善できる。なお、インピーダンスは、軸ばねに比べてせん断ばねの値が大きいため、解析結果に与える影響はせん断ばねのほうが大きい。

同様に、提案手法による逐次非線形解析の結果得られた建屋頂部波形をSRモデル(非線形)の結果と比較してFig. 8(b)に、それらの速度応答スペクトル( $h=0.05$ )をFig. 9(b)に示す。また、両者の建屋応答のQ-D関係をFig. 10に示す。提案手法では、R-0モデルの性質に基づき地盤ばねの剛性低下がSRモデルより進行した。このため、上部構造の剛性低下はSRモデルより小さくなった。

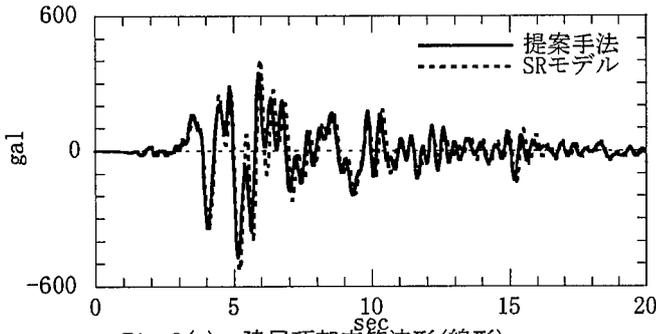


Fig. 8(a) 建屋頂部応答波形(線形)  
Response Accelerations of Structure (Linear)

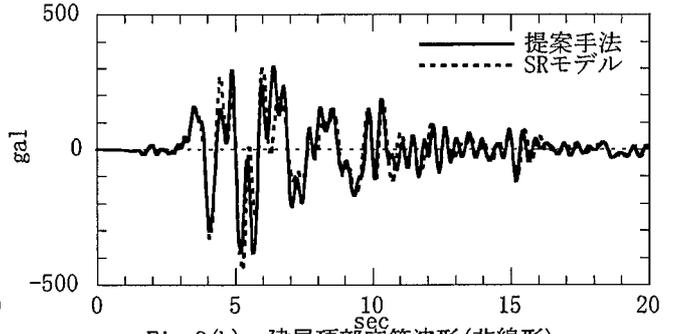


Fig. 8(b) 建屋頂部応答波形(非線形)  
Response Accelerations of Structure (Non-linear)

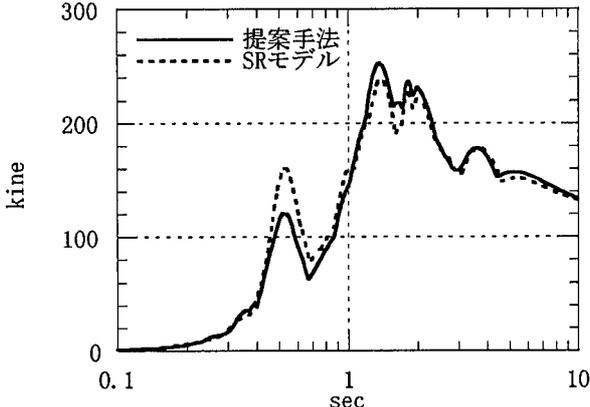


Fig. 9(a) 建屋頂部応答波形の  
速度応答スペクトル $h=0.05$ (線形)  
Response Spectra of Structure (Linear)

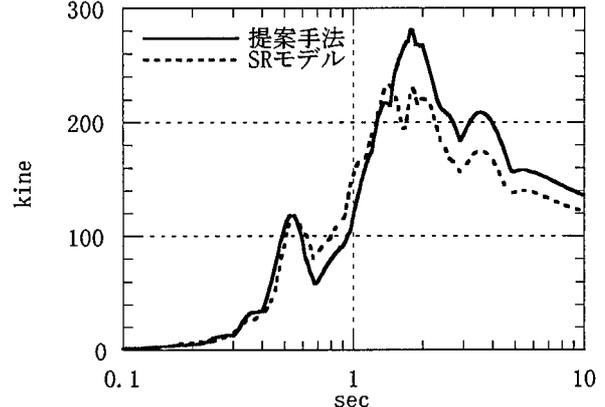


Fig. 9(b) 建屋頂部応答波形の  
速度応答スペクトル $h=0.05$ (非線形)  
Response Spectra of Structure (Non-linear)

#### 4. むすび

群杭基礎構造物の逐次非線形地震応答解析を合理的に行う手法を提案した。本手法によれば、動的な群杭効果を考慮した上で上部構造、杭、動的地盤ばねの弾塑性履歴特性を取り扱うことができる。今後の課題として、動的地盤ばねの近似レベルを向上させること、液状化地盤への対応等が考えられる。

#### 謝 辞

本研究の一部は関西電力(株)からの受託研究として、(株)ニュージェック、大成建設(株)、(株)竹中工務店と共同で実施しました。関係各位に深謝いたします。

#### 参考文献

- 1) J.Penzien, 他: Seismic Analysis of Bridges on Long Piles, ASCE, Vol. 90 EM3, p. 223~254, (1964)
- 2) 宮本, 酒向, 喜多村, 三浦: 非線形化, 液状化地盤における杭基礎の地震応答性状に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第471号, p. 41~50, (1995)
- 3) 高野, 安井, 他: サブストラクチャー法を用いた群杭基礎の三次元地震応答解析 その6) 基礎が埋め込みを有する場合の定式化について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, p. 595~596, (1992)

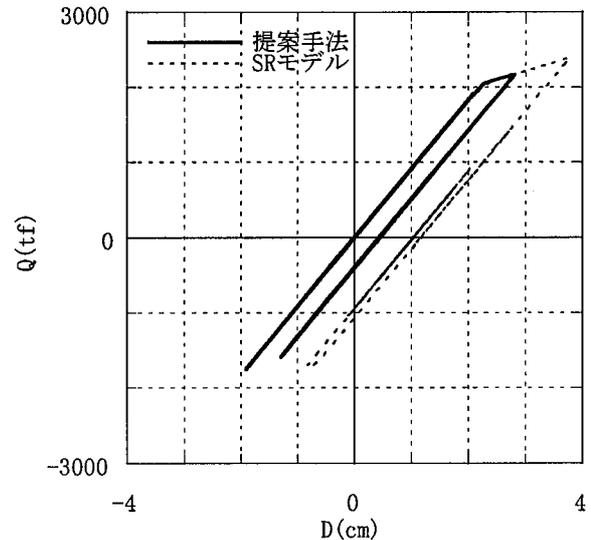


Fig. 10 建屋応答のQ-D関係  
Q-D of Structure

- 4) 船越, 高野, 鬼丸, 高倉, 他: 建屋-基礎-杭-地盤連成系の地震応答の評価方法に関する研究 (その1)~(その4), 日本建築学会大会学術講演梗概集, p. 449~456, (1996)
- 5) 吉田: 1995年兵庫県南部地震におけるポートアイランドの地震応答解析, 土と基礎, 第43巻, 第10号, p. 49~54, (1995)
- 6) 日本建築学会兵庫県南部地震特別研究委員会特定研究課題1-SWG1, 日本建築学会近畿支部耐震構造研究部会: 1995年兵庫県南部地震強震記録資料集, (1996)