

## 複合基礎と地盤の動的相互作用解析プログラムの開発

高野 真一郎 若松 邦夫  
安井 謙

## Development of Interaction Analysis Program between Soil and Complex Foundation

Shin'ichiro Takano Kunio Wakamatsu  
Yuzuru Yasui

## Abstract

When we construct an important and huge structure on soft soil in a coastal region, we may adopt a complex foundation consisting of embedment, piles and wall foundations (WF). In order to design such a foundation practically, it is necessary to understand and estimate its performance against earthquakes analytically. For this purpose, we have developed an interaction analysis program between soil and a complex foundation. In this paper, we first show thin layer element solutions, which are the fundamental tools of this analysis, and then we roughly explain the algorithm for analysis. Then we consider mutual influences on each elements of the complex foundation by means of numerical analysis.

## 概 要

臨海部等の軟弱地盤に建設される大型・重要構造物の基礎として、埋込み(地下室)、杭および地中連続壁を併用した基礎構造、いわゆる複合基礎を採用する場合がある。このような複合基礎を合理的に設計するためには、基礎の地震時の性能を解析的に把握・予測することが必要である。このため、本研究において複合基礎と地盤の動的相互作用解析プログラムを開発した。本論文では、基本的な解析ツールとして用いている3次元薄層要素法加振解を示すとともに、解析アルゴリズムの概要を説明した。さらに、数値解析により複合基礎の各要素が互いに及ぼす影響について考察した。

## 1. はじめに

軟弱地盤に建設される大型・重要構造物の基礎として埋込み(地下室)、杭および地中連続壁を併用した基礎構造、いわゆる複合基礎を採用する場合がある(Fig.1)。このような複合基礎では各々の要素(埋込み、杭および地中連続壁)が互いに影響しあって複雑に挙動するため、各々の要素が負担する地震時荷重も要素単独の基礎のものとはかなり異なることが予測される。複合基礎の合理的な設計のためには、このような複合基礎の地震時の性能を解析的に把握・予測することが重要である。

このため、本研究では3次元薄層要素法を用いて複合基礎と軟弱地盤の動的相互作用解析プログラムを開発し、数値解析により複合基礎の各要素が互いに及ぼす影響を把握することとした。なお、本研究は周波数領域の解析であり、時刻歴応答は周波数応答の結果をFFTを用いて時間領域に変換することにより算定する。地盤の非線形性は等価物性値を用いることにより対応する。

本論文では、開発した解析プログラムの概要を説明するとともに、解析事例として複合基礎のうち杭が負担する地震時荷重を算定した結果について述べる。

## 2. 解析プログラムの概要

## 2.1 3次元薄層要素法

薄層要素法は、地盤を薄い層に分割し、各薄層は一樣均質な材料物性を持つものと仮定して波動方程式の離散化を行うことにより、成層地盤の変位と荷重の関係をマトリクス方程式で表現する手法である。さまざまな分布を持った単位動荷重(加振力)に対する変位応答が3次元薄層要素法加振解となる。

本報告では、半無限層の上にN個に分割された薄層が載っているものとして地盤をモデル化する(Fig.2)。第n薄層の上端に振動数 $\omega$ の調和加振力を加えたときの第m薄層上端における応答(3次元薄層要素法加振解)は以下のようまとめられる<sup>1)</sup>。ここで、 $r$ と $\theta$ は各々加振力作用点と応答観測点の距離と方位角であり、 $z_m$ は応答観測点の深さ方向の座標を表す。

$$u(r, \theta, z_m) = a \left( \sum_{l=1}^{2N+2} \phi_u^{ml} \gamma_R^{nl} \frac{d}{dr} f_l + \sum_{l=1}^{N+1} \phi_v^{ml} \gamma_L^{nl} \frac{1}{r} f_l^L \right) \begin{bmatrix} \cos \mu \theta \\ \sin \mu \theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$v(r, \theta, z_m) = a \left( \sum_{l=1}^{2N+2} \phi_u^{ml} \gamma_R^{nl} \frac{1}{r} f_l + \sum_{l=1}^{N+1} \phi_v^{ml} \gamma_L^{nl} \frac{d}{dr} f_l^L \right) \begin{bmatrix} -\sin \mu \theta \\ \cos \mu \theta \end{bmatrix} \quad (2)$$

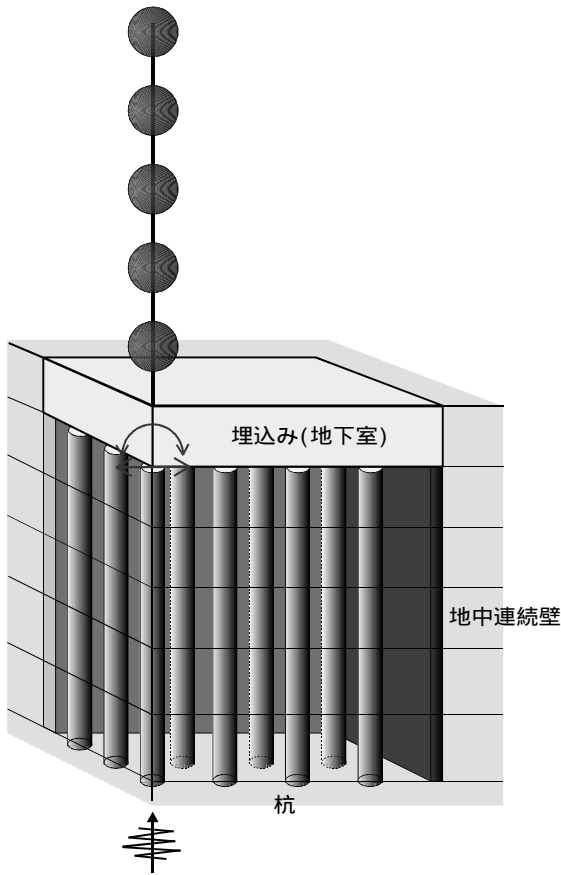


Fig.1 複合基礎で支持された構造物  
Structure Supported on Complex Foundation

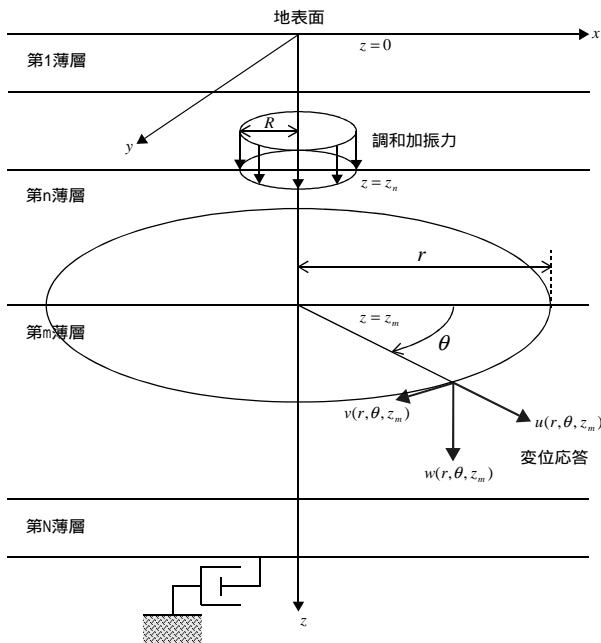


Fig.2 薄層要素法における地盤のモデル化  
Soil Modeling of Thin Layered Element Method

$$w(r, \theta, z_m) = a \left[ \sum_{l=1}^{2N+2} \varphi_w^{nl} \gamma_R^{nl} f_l k_l \begin{matrix} \cos \mu \theta \\ \sin \mu \theta \end{matrix} \right] \quad (3)$$

ここで、括弧 [ ] の上部は対称モードの加振力に対する解を表し、下部は逆対称モードの加振力に対する解を表している。各加振力に対し、各係数をTable 1のようにまとめることができる。ここで、変数Rは円盤あるいはリングの半径である。また、Table 1中の関数  $I_{1l}$ 、 $I_{2l}$ 、 $I_{3l}$ 、 $I_{4l}$ 、固有値  $k_l$ 、固有ベクトルの要素  $\varphi_u^{nl}$  等はKausel等の文献<sup>1)</sup>を参照されたい。

## 2.2 解析アルゴリズムの概要

以下に、解析アルゴリズムの概要を示す。

薄層境界面で切断される埋込み、杭、地中連続壁各要素上に、節点あるいは節リングを設ける(Fig.3)。半無限自由地盤上の各節点あるいは節リングに単位の加振力を与えたときの、各節点および節リングにおける変位応答を(1)~(3)式により算定し、これらを要素とする柔性マトリクス [D] を構築する(Fig.4)。この時、x、y座標が同じ節点間の関係は、点加振に対する要素(埋込み側面あるいは連続地中壁上の節点に対しては線要素、埋込み底面上の要素に対しては面要素)における平

Table 1 各加振力に対する解表現の係数  
Coefficients of Thin Layer Solutions for  
Each Dynamic Load

加振力	a	$\gamma_R^{nl}$	$\gamma_L^{nl}$	$f_l$	$\mu$
水平点加振	$1/(4i)$	$\varphi_u^{nl}$	$\varphi_v^{nl}$	$H_1^{(2)}(k_l r)/k_l$	1
上下点加振	$1/(4i)$	$\varphi_w^{nl}$	0	$H_0^{(2)}(k_l r)/k_l$	0
水平円盤加振	$1/(\pi R)$	$\varphi_u^{nl}$	$\varphi_v^{nl}$	$I_{3l}$	1
上下円盤加振	$1/(\pi R)$	$\varphi_w^{nl}$	0	$I_{4l}/k_l$	0
水平リング加振	$1/(2\pi)$	$\varphi_u^{nl}$	$\varphi_v^{nl}$	$I_{1l}^*$	1
上下リング加振	$1/(2\pi)$	$\varphi_w^{nl}$	0	$I_{4l}/k_l$	0
回転リング加振	$1/(\pi R)$	$\varphi_w^{nl}$	0	$I_{2l}/k_l$	1

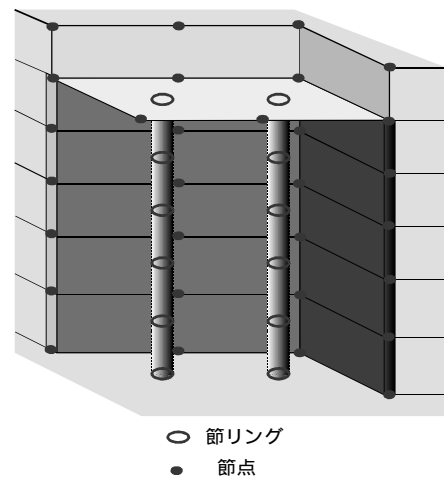


Fig.3 節点・節リングの設定  
Construction of Nodes and Rings in Soil



分の反力の和として求める(Dynamic Interaction)。また、基礎入力動は、入射地震波に対する剛体部分の応答として求める(Kinematic Interaction)。同時に、剛体部分加振時および地震波入射時における複合基礎各要素の応答および負担荷重を求めておく。これらの結果は、で構成した剛性マトリクスのマトリクス操作により計算される<sup>2)</sup>。

上部建物の解析モデルに で計算したインピーダンスを付加し、基礎入力動を作用させることにより、建物および地下室部分の応答を算定する。この数値計算は既往の周波数応答解析プログラムにより行う。算定した地下室部分の応答をの結果にフィードバックし、さらに周波数領域に変換された地震波のデータを用いることにより、地震時における複合基礎各要素の周波数領域の応答および負担荷重を求める。周波数領域の結果を、FFTにより時刻歴へ変換する。

### 3. 数値解析例

地震波が鉛直下方から入射するときの建物と杭の時刻歴最大応答、および杭が負担する時刻歴最大荷重を評価して、複合基礎の地震応答特性について検討する。

#### 3.1 解析モデル

対象とする建物は5階建てとし、その基礎固定時の固有周

期を0.5秒とする。質量、階高をFig.7に示す。また、建物の*i*階のせん断ばね  $K_i$  は上部建物の1次モードが直線となるときにばね定数を採用し、次式により算定した。

$$K_i = 0.5\{N(N+1) - i(i-1)\}m(2\pi/T_s)^2 \quad (4)$$

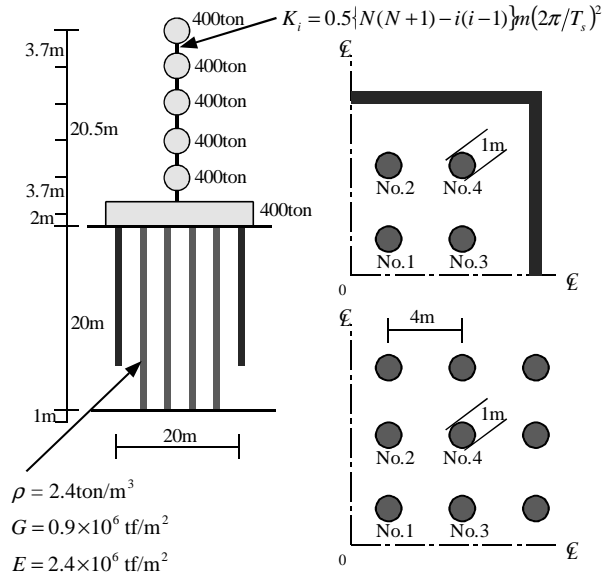


Fig.7 解析モデル図  
Model for Analysis

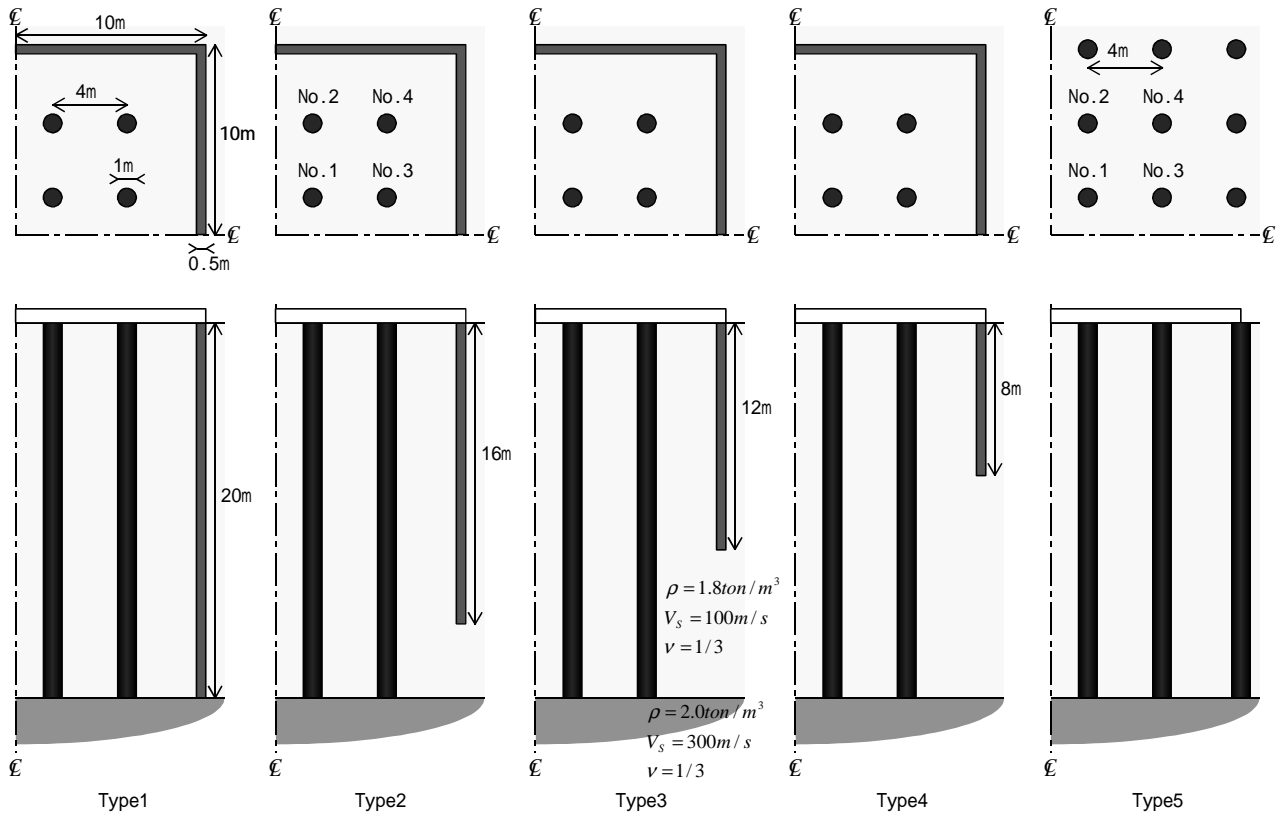


Fig.8 解析基礎地業  
Soil and Foundation Systems for Analysis

ここで、 $N$  は総階数すなわち5、 $m$  は階の質量、 $T_s$  は建物の基本周期すなわち0.5秒である。また、複素減衰を2%とした。

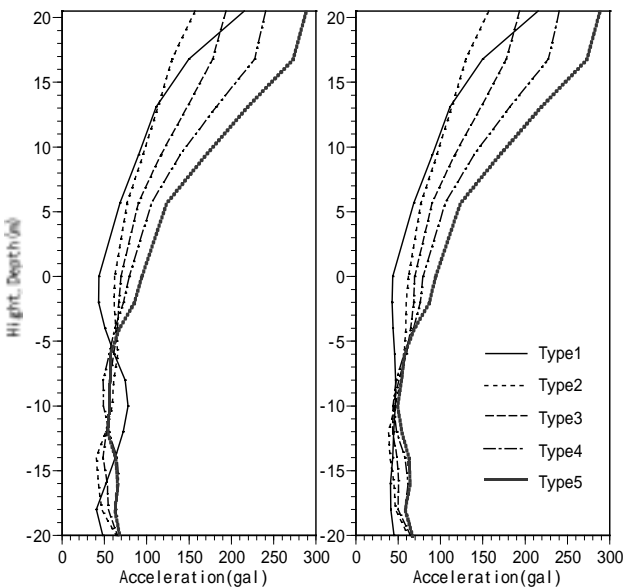
解析対象としてFig.8に示したType1～Type5の5種類の基礎地業を考える。Type1～Type4は地中連続壁と群杭から成る複合基礎である。群杭部分は共通であり、16本の杭で構成されている。また、地中連続壁はそれぞれ20m、16m、12m、8mの深さまで埋設されている。Type5は、Type1～Type4の地中連続壁部分を杭としたものであり、36本の杭で構成される群杭基礎である。杭および地中連続壁は基礎に剛接し、基礎底面と地盤は接触していないものとする。すべての杭は、杭径が1.0m、杭長が20mであり、杭先端が比較的硬質な半無限弾性層に接しているものとする。また、地中連続壁の厚さは0.5mである。杭および地中連続壁の材料は一樣均質とし、材料定数は単位体積質量を2.4ton/m<sup>3</sup>、せん断弾性係数を0.9x10<sup>6</sup>tf/m<sup>2</sup>、ヤング率を2.1x10<sup>6</sup>tf/m<sup>2</sup>とする。

地盤モデルは、比較的硬い半無限弾性層(単位体積質量2.0ton/m<sup>3</sup>、S波速度300m/s、ポアソン比1/3)の上に10の薄層に分割された厚さ20mの一樣均質な軟弱層(単位体積質量1.8ton/m<sup>3</sup>、S波速度100m/s、ポアソン比1/3)が存在するものとする。なお、表層地盤および半無限地盤の材料減衰は各々2%および1%とした。

### 3.2 建物および杭の最大応答加速度分布

地震波がせん断波として鉛直下方から入射するものとする。入力地震波は、自由地表面における観測波が最大速度10cm/sのEl Centro/NS波となるように補正したものをを用いる。

地震時における建物とFig.7のNo.1杭とNo.4杭(以下、杭はFig.7に示す杭番号で指定する)の最大応答加速度分布につ

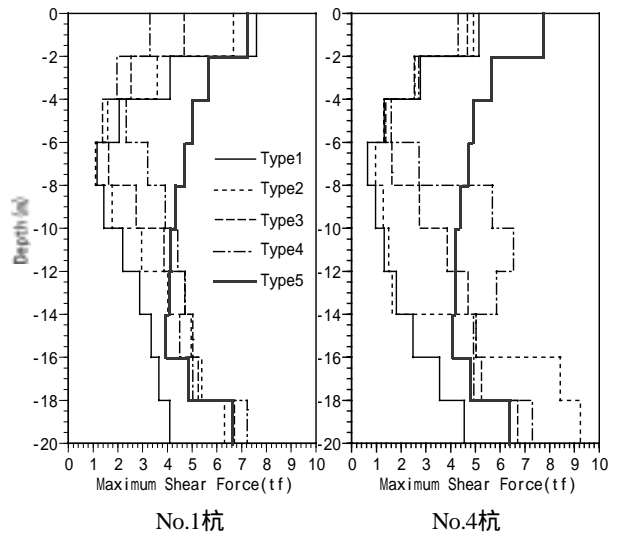


No.1杭 No.4杭  
Fig.9 建物および杭の最大応答加速度分布  
Maximum Accelerations of Structure and Piles

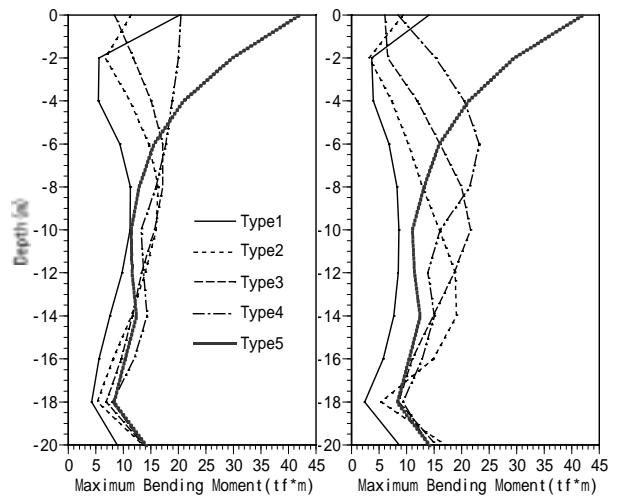
いて計算した結果をFig.9に示す。これより、群杭よりも地中連続壁を有する複合基礎のほうが、また地中連続壁の埋設深さが深いほうが、建物および杭の最大応答加速度は小さくなる事が分かる。ただし、地中連続壁が硬い基盤に達している場合(Type1)は、構造物の頂部付近およびNo.1杭の中間部分で最大応答加速度が大きくなっている。これは、Type1では地中連続壁で囲まれた内部地盤が共振し、中間部分で大きな変位を生じているためと予想される。

### 3.3 杭の地震時最大荷重分布

Fig.10にNo.1杭とNo.4杭の負担する最大せん断力分布を示す。全体的に、杭頭部分では群杭基礎よりも地中連続壁を有する複合基礎のほうが、また地中連続壁の埋設深さが浅いほうが、最大せん断力が小さくなる傾向にある。しかし、深度が増加するにしたがい、地中連続壁の埋設深さが



No.1杭 No.4杭  
Fig.10 最大せん断力分布  
Distribution of Maximum Shear Loads



No.1杭 No.4杭  
Fig.11 最大曲げモーメント分布  
Distribution of Maximum Bending Moments

浅いほうが最大せん断力は大きくなる。また、地中連続壁が基礎まで達していないType2~Type4では、地中連続壁の最深部の直下で大きなせん断力が発生する。これは中央に近いNo.1杭よりも地中連続壁の近くにあるNo.4杭で顕著である。これらより、Type1~Type4の基礎地業では、深度の浅い部分で地中連続壁がせん断力の多くを負担するため、特に杭頭部分でせん断力の負担が軽減されること、地中連続壁最深部の直下では杭のみでせん断力を負担することになるので杭のせん断力が急激に増加すること、などが分かる。

次に、Fig.11にNo.1杭とNo.4杭の曲げモーメント分布を示す。最大せん断力の場合と同様、群杭基礎よりも地中連続壁を有する複合基礎のほうが杭頭部分の最大曲げモーメントは小さくなる。また、地中連続壁が基礎まで達していないType2~Type4では、地中連続壁の最深部付近で大きな曲げモーメントが発生している。これは、地中連続壁の最深部の上下に見られるせん断力の差により生ずるものと考えられる。

Fig.12には、No.1杭とNo.4杭の変動軸力分布を示す。地中連続壁が基礎に達しているType1のNo.4杭を除いて、複合基礎のほうが群杭基礎よりも杭頭部分の最大軸力は大きくなる。これは、群杭基礎の最も外側の杭が基礎に達しているために軸力を多く負担するのに対し、Type2~Type4の地中連続壁は基礎に達していないため軸力を負担する割合が小さいことが原因と考えられる。また、複合基礎の軸力は、地中連続壁を有する深さまでは、深度が大きくなるほど増加し、地中連続壁の端部より深い部分では減少する傾向にある。これは、複合基礎では、建物の慣性力により発生する軸力に加え、地中連続壁で囲まれた内部地盤の慣性力が杭が負担するためと考えられる。

#### 4. まとめ

複合基礎と地盤の動的相互作用解析プログラムを開発し、数値解析を行うことにより、複合基礎(地中連続壁と群杭)が建物の地震応答に及ぼす影響、地中連続壁内の杭が負担する地震時荷重の特徴について考察した。

本論文の数値解析では、特に地中連続壁が杭に及ぼす影響を明らかにするために複合基礎として地中連続壁と群杭

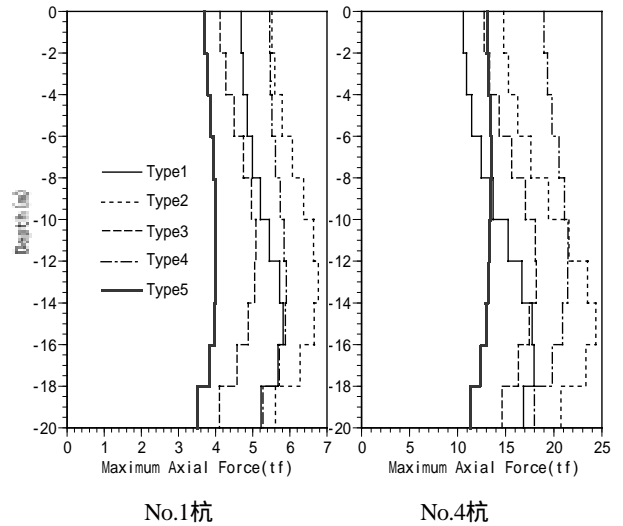


Fig.12 最大軸力分布  
Distribution of Maximum Axial Forces

のみを解析対象としたが、解析プログラムはこれらに加えて基礎の埋込みも考慮することができる。また、本論文では複合基礎・地盤系の周波数特性について示すことができなかったが、これについては別の機会に発表するつもりである。

本研究で開発した解析プログラムは、解析モデルの形状や解析規模に制限があるが、今後これらを改良し、入力データやマニュアルの見直しを行うことにより利用しやすい解析システムとして発展を図りたい。

#### 参考文献

- 1) E. Kausel and R. Peek : Dynamic Loads in the Interior of a Layered Stratum : An Explicit Solution, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.72, pp.1459-1481, 1982.
- 2) 高野真一郎, 安井讓 : 埋込みを有する群杭基礎の動的応答解析, 第9回日本地震工学シンポジウム論文集, Vol.1, pp.1195-1120, 1994
- 3) 長瀧慶明, 妹尾博明 : 建物周囲に設置した地中壁による杭基礎の水平力低減効果, 日本建築学会構造系論文集 第467号, pp.73-82, 1995