

隣接建物の存在が杭基礎の動的相互作用特性に与える影響に関する解析的検討

ANALYTICAL STUDY ON THE EFFECTS OF ADJACENT BUILDING ON DYNAMIC SOIL STRUCTURE INTERACTION OF PILE FOUNDATION AND PILED RAFT FOUNDATION

文学章^{*1} 福和伸夫^{*2}

Xuezhang WEN and Nobuo FUKUWA

Effects of adjacent building on soil-structure interaction of pile foundation, piled raft foundation and embedded foundation on pile group are studied by the thin layered element method combined with flexible volume substructure method. The Homogeneous soil and two-layered soil are considered to simulate friction pile and bending pile. The effects of the adjacent building on the impedances and foundation input motions are analyzed and compared with those of spread foundation. The bending moments and shear forces in piles are also examined and the results show that the effects of adjacent building on the stress in the adjacent piles of two pile foundations or piled raft foundations are prominently.

Keywords: Soil-Structure Interaction, Cross Interaction, Impedance, Foundation Input Motion, Pile Foundation, Piled Raft Foundation, Embedment, Pile Stress

構造物と地盤との動的相互作用、隣接建物間相互作用、インピーダンス、基礎入力動、杭基礎、パイルド・ラフト基礎、根入れ、杭応力

1 はじめに

大都市の多くは軟弱な地盤に広がっており、その中心部には中高層建物が林立している。軟弱地盤に建設される建物は、杭基礎で支持される場合が多く、地盤－杭－建物の動的相互作用が地震時挙動に与える影響は大きい。従って、杭で支持された隣接建物間の動的相互作用効果を明らかにする必要がある。

しかし、従来の隣接建物間動的相互作用についての研究は、直接基礎を対象とする研究に限られている^{1)~9)}。筆者らも、直接基礎を対象として、隣接建物の階数、建物間距離、基礎の根入れ深さ、建物間の埋土の剛性、隣接建物の棟数・規模・隣接方向などが、動的相互作用特性に与える影響を検討してきた¹⁰⁾。一方、杭基礎を対象とした解析的な動的相互作用研究は、単独建物の場合に限られており、杭間隔や本数が群杭効果および基礎入力動に与える影響を検討した長谷川らの研究^{12,13)}、パイルド・ラフト基礎を対象とした中井らの研究¹⁴⁾、埋め込みを有する杭基礎を対象とした高野らの研究¹⁵⁾、日下部らの研究^{16,17)}、実証的と解析的両面から検討した喜多村らの研究¹⁸⁾などがある。

そこで、本論では、杭で支持された建物を対象に隣接建物間動的相互作用効果を分析する。ここでは、杭基礎（摩擦杭と支持杭）、パイルド・ラフト基礎及び根入れを有する杭基礎を対象とし、基本的な動的相互作用特性である、インピーダンスと基礎入力動に与える隣接建物の影響を主として検討する。また、杭の応力への影響についても検討を加える。

2 解析手法

本論では、杭基礎で支持された隣接建物間の動的相互作用効果を検討するために、図1に示すように無質量剛基礎Aに隣接して建物Bが存在する問題を考え、基礎Aのインピーダンスや基礎入力動を算定する。解析法は、既出の論文と同様であり^{10,11)}、薄層法と有限要素法を、容積法を用いた動的サブストラクチャー法により結合した方法である。薄層法には、線形の内挿関数を利用し、薄層底面境界にはパラキシャル境界¹⁹⁾を適用している。グリーン関数としては、ディスク加振解（加振点と受振点が同一鉛直軸上の場合）と点加振解を用いている。また、図1に示すように、根入れ部は3次元アイソパラメトリックソリッド要素でモデル化し、分割数は $15 \times 10 \times 2$ を基本としている。また、建物部と杭は、せん断変形を考慮した梁要素を用いてモデル化している。

地盤は、図2に示すように、一様地盤と二層地盤の2つのケースを考える。一様地盤の場合は摩擦杭、二層の地盤の場合は支持杭を想定している。地盤の薄層の分割は、杭内の応力変化と対象振動数範囲での波長の変化を表現するため、 $18 \times 1\text{m} + 32 \times 1\text{m} + 50 \times 2\text{m} + 25 \times 4\text{m}$ とした。

建物が存在しない無質量剛基礎Aの隣に建物Bが建っている場合の基礎A－地盤－建物Bの振動数領域での運動方程式は式(1)のように表すことができる。

$$([S]^G + [S]^S - [S]^E)\{u\} = \{F\} \quad (1)$$

ここに、

*1 中国湖南大学、講師、博士（工学）

*2 名古屋大学大学院環境学研究科 教授・工博

Lecturer, Hunan University, China, Dr. Eng.

Prof., Graduate School of Environmental Studies, Nagoya Univ., Dr. Eng.

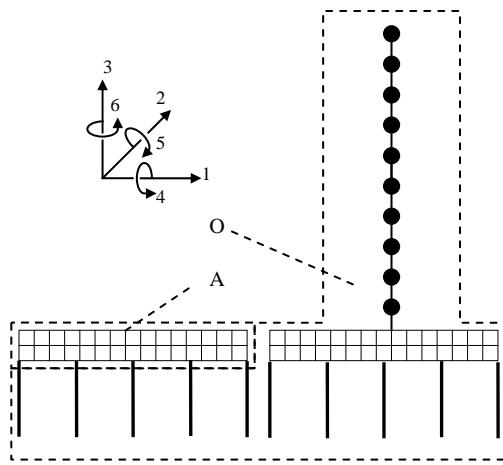


図 1 離散化モデル

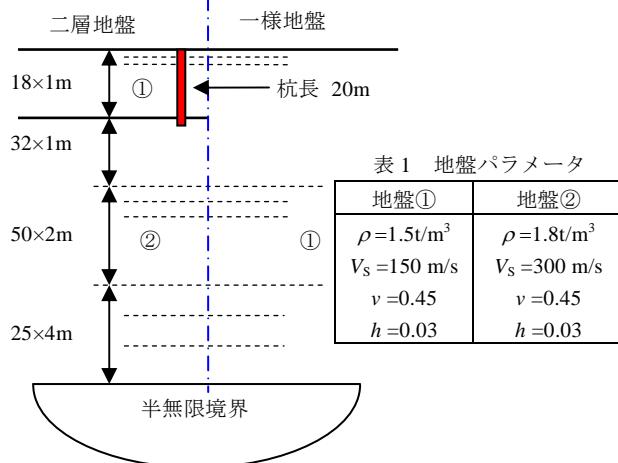


図 2 一様地盤と二層地盤

$$[S] = [K] - \omega^2 [M]$$

であり、 $[K]$ 、 $[M]$ 、 $\{\boldsymbol{u}\}$ はそれぞれ剛性マトリクス、質量マトリクス及び変位ベクトルである。上添字 G、S、E は、それぞれ地盤、構造物、基礎に置換した原地盤を意味する。ただし、原地盤の剛性マトリクスは、杭については梁要素で評価し、根入れ部についてソリッド要素で評価する。図 1 に示すように、全ての自由度を基礎 A の自由度(下添え字 A)とその以外の自由度(下添え字 O)に分けると、式(1)を以下のように書くことができる。

$$\begin{bmatrix} [S_{AA}] & [S_{AO}] \\ [S_{OA}] & [S_{OO}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \{\boldsymbol{u}_A\} \\ \{\boldsymbol{u}_O\} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \{F_A\} \\ \{F_O\} \end{bmatrix} \quad (2)$$

容積法を用いた動的サブストラクチャー法の考え方を利用して、式(2)を構築した後、建物の存在しない無質量基礎 A について、基礎 A 以外の自由度を消去することにより、無質量剛基礎 A に対する 6 自由度の運動方程式に変換することができる。これにより、基礎 A のインピーダンスは式(3)のように評価することができる。

$$[S_A] = [T]^T [S_{AA}]^* [T] \quad (3)$$

ここに、

$$[S_{AA}]^* = [S_{AA}] - [S_{AO}] [S_{OO}]^{-1} [S_{OA}]$$

である。また、 $[T]$ は、剛基礎の変位拘束条件を表す座標変換マトリクスである。

基礎入力動は、外力を式(4)で表せることから、これを式(2)に代入して、基礎 A の応答を評価している。

$$\begin{bmatrix} \{F_A\} \\ \{F_O\} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [K_{AA}]^G & [K_{AO}]^G \\ [K_{OA}]^G & [K_{OO}]^G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \{\boldsymbol{u}_A\}_G \\ \{\boldsymbol{u}_O\}_G \end{bmatrix} \quad (4)$$

ここに、 $\{\boldsymbol{u}_A\}_G$ と $\{\boldsymbol{u}_B\}_G$ は地震波入射時の自由地盤の変位応答である。

3 インピーダンスと基礎入力動

3.1 杭基礎

図 3 に示すように、杭の本数、間隔、直径、長さの等しい 2 つの建物が長辺方向に隣接する問題を考える。地盤は、図 2 に示すように一様地盤(摩擦杭)と二層地盤(支持杭)を考える。平面形状が 30m × 15m の長方形の建物が長手方向に基礎間距離 $D=3 \text{m}$ で隣接する問題を考え、隣接建物の階数として 10 階の場合を想定する。杭は現場打ち RC 杭を想定し、杭頭は剛なマット基礎に剛接する。解析に用いたパラメータを表 2 に示す。ただし、基礎 A は無質量、基礎 B は 2.4t/m^2 とし、マット部と地盤とは非接触であるとする。また、入射波は、鉛直下方から S 波が入射すると考える。

図 4 に基礎 A のインピーダンスを示す。隣接建物の影響は隣接建物の連成系の 1 次固有振動数(長辺 1.4Hz、短辺 1.2Hz)に現れており、短辺方向に比べ建物が隣接する長辺方向で隣接建物の影響が大きくなっている。この影響は水平、上下、回転、ねじれ成分とともに同様に現れており、低振動数域で実部は増加し、虚部は減少している。隣接建物の影響の現れ方は直接基礎の場合¹⁰⁾と同様であるが、影響度合いはやや大きくなっている。これは、杭基礎の場合の方が杭間の地盤を介して力がやりとりされやすいためと考えられる。

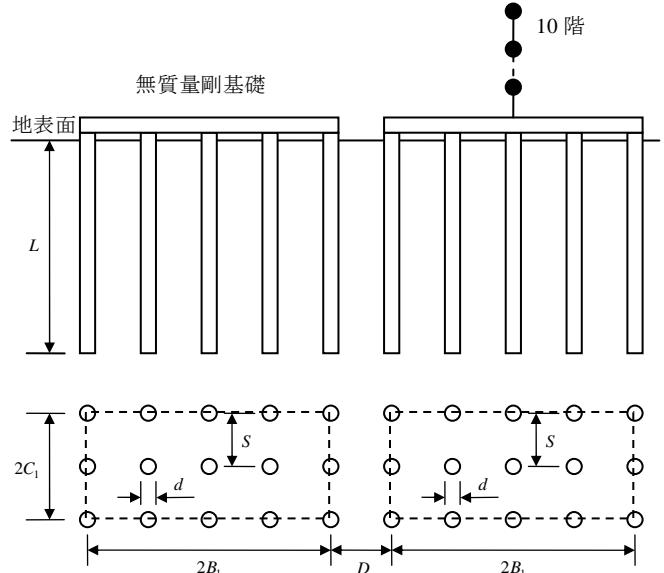


図 3 隣接基礎・建物の断面と平面

表 2 解析パラメータ

杭		基礎	上部構造
本数 5×3	$E_p=2.1 \times 10^7 \text{kN/m}^2$	$2B_1=30 \text{m}$	階数=10
$d=1.5 \text{m}$	$v_p=1/6$	$2C_1=15 \text{m}$	$\rho=1.2 \text{t/m}^2$
$S=7.5 \text{m}$	$\rho_p=2.4 \text{t/m}^3$	$\rho=2.4 \text{t/m}^2$	$f_i=2 \text{Hz}$
$L=20 \text{m}$	$h_p=0.03$		$h=0.03$

また、支持基盤が存在すると、水平成分は波動の重複反射により振動数変動が現れ、低振動数域で虚部が減少している。一方、上下・回転成分は杭端支持の寄与が大きいため、低振動数域で実部が倍増している。ただし、高振動数域の特性である杭間隔と逸散波の波長に起因する強い振動数依存性、いわゆる Out-of-phase 現象²⁰⁾は、支持基盤の有無に関わらず生じている。隣接建物の影響については、水平成分については支持基盤の有無に関わらず同程度に現れているが、上下・回転成分では支持基盤の存在により隣接建物の影響が

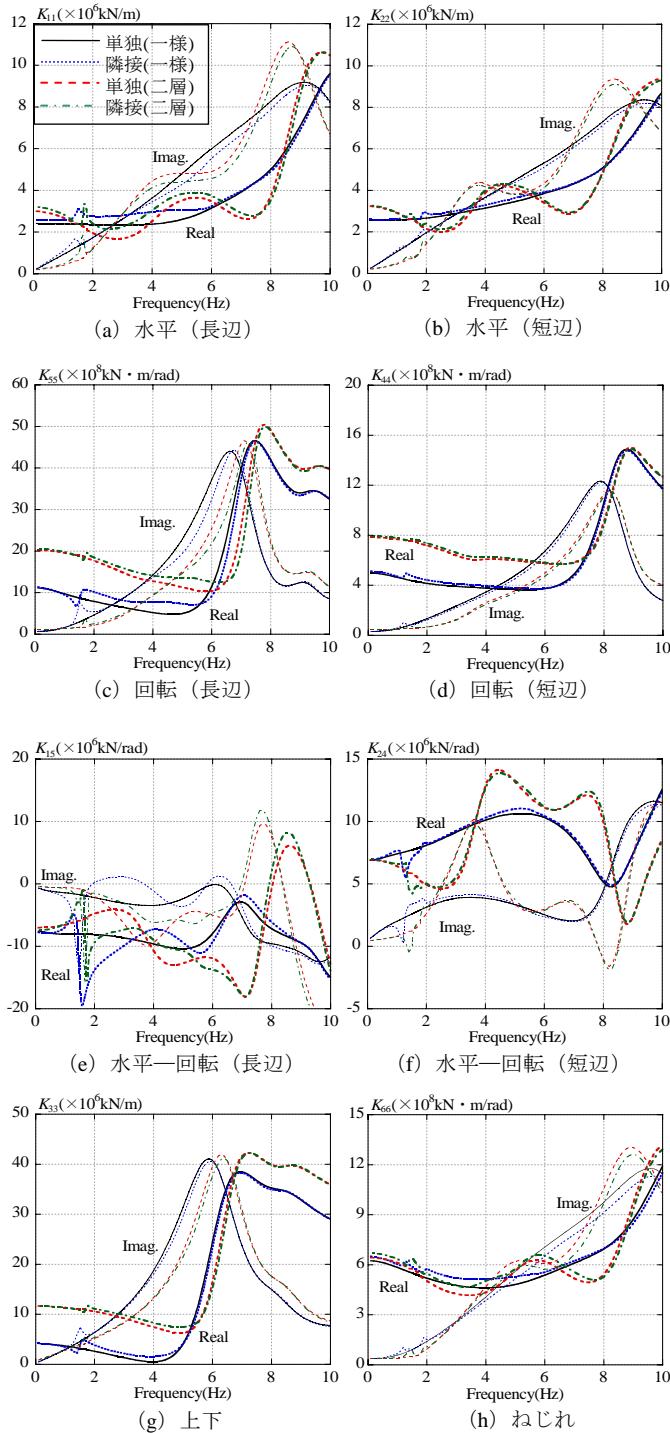


図4 基礎Aのインピーダンス（杭基礎）

小さくなっている。これは支持基盤が、隣接建物のロッキング応答を抑制するためと考えられる。

図5に基礎Aの基礎入力動を示す。地盤変位が杭の深さ方向で変化するため、入力損失効果が生じ、水平入力動は振動数と共に減少し、回転は逆に増加している。隣接建物の影響は、直接基礎¹⁰⁾の場合と同様に、隣接建物の連成系の固有振動数近傍で振動数変動を与えると共に、回転動を励起する形で現れる。支持基盤が存在する場合には、水平成分については、隣接建物の連成系の1次固有振動数

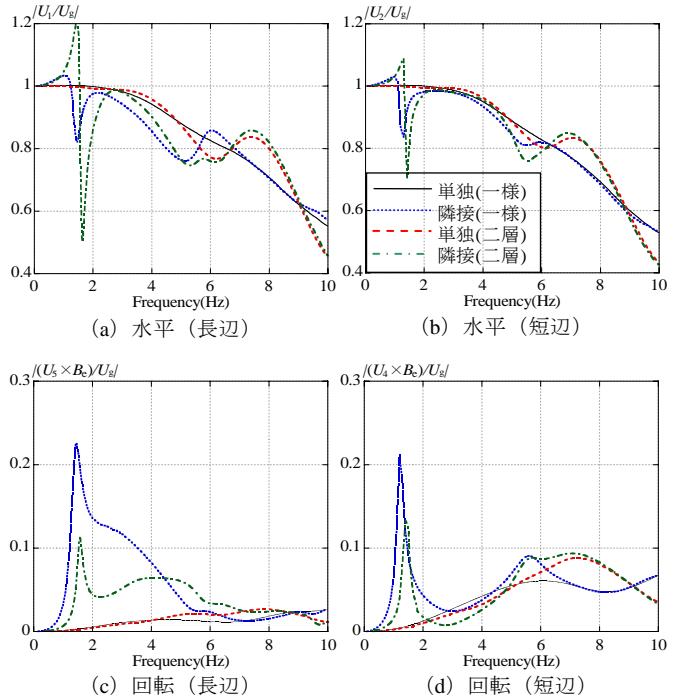


図5 基礎Aの基礎入力動（杭基礎）

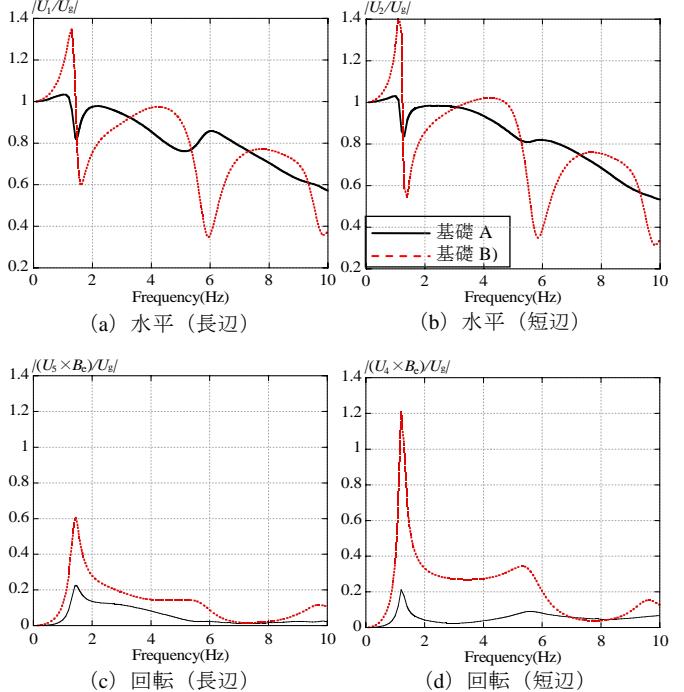


図6 基礎Aと隣接建物の基礎応答の比較(一様地盤)（杭基礎）

付近の影響が大きくなっているが、回転成分は、支持層の存在によりロッキング動が抑えられるため、低振動数部での応答が減少している。

図6に、一様地盤の場合について、基礎Aの基礎入力動と建物Bの基礎応答を比較して示す。地表面直接基礎¹⁰⁾の場合と同様に、隣接建物の基礎応答の影響が地盤を介して伝達している。

3.2 パイルド・ラフト基礎

パイルド・ラフト基礎の場合の、隣接建物の影響を検討する。ここで、杭基礎とパイルド・ラフトとの違いは、マット基礎底面と地盤との接触の有無による差として解析上取り扱っている。図3に示した杭基礎と同じモデルを用いるが、基礎底面と地盤が密着している点のみが異なる。

図7に一様地盤と二層地盤の場合の、隣接建物の有無によるインピーダンスの変化を示す。図4に示した杭基礎の場合の結果と比べて、静的ばね定数は、水平成分は約10%、上下成分、回転成分は約5%程度増加している。水平インピーダンスは直接基礎¹⁰⁾に類似し

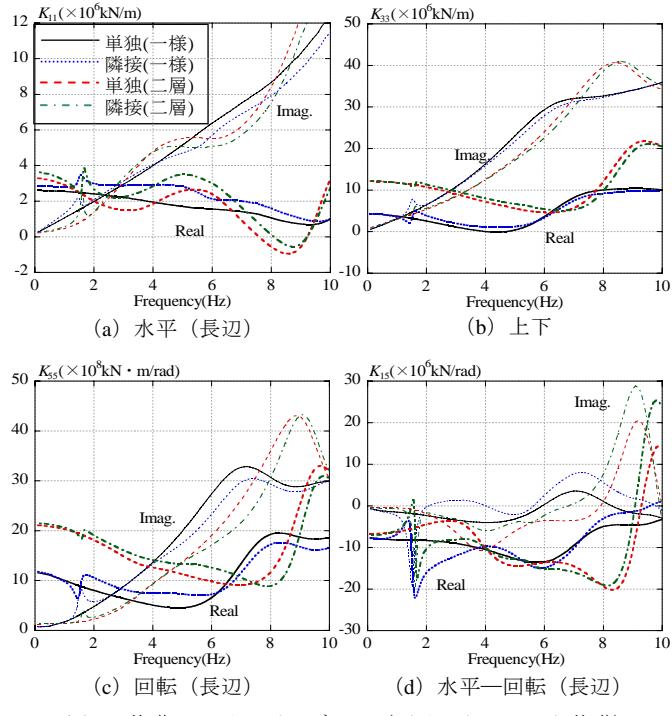


図7 基礎Aのインピーダンス (パイルド・ラフト基礎)

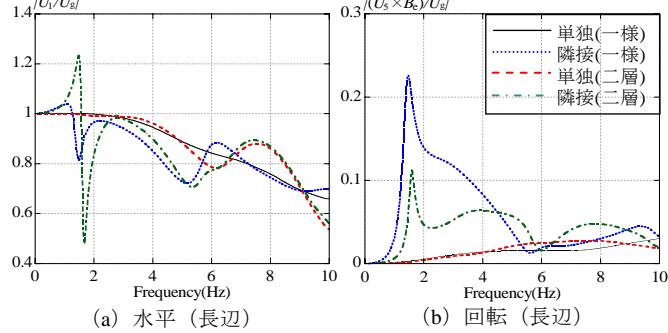


図8 基礎Aの基礎入力動 (パイルド・ラフト基礎)

た特性となっている。これに対して、回転・上下インピーダンスは杭基礎の結果と類似しているが、ラフト部が表層地盤を拘束するため、高振動数域での杭間隔に起因する Out-of-phase 現象が減じられている。隣接建物の影響については、杭基礎の場合と同じように、隣接建物の連成系の1次固有振動数の近傍のみで現れており、実部が大きく虚部が小さくなっている。高振動数域では、直接基礎の場合と同様に水平一回転に与える影響が大きくなっている。

図8に対応する基礎入力動を示す。図5に示した杭基礎の結果と比較すると、水平入力動がやや大きいものの、ほぼ一致した結果となっており、基礎入力動に関しては、パイルド・ラフトと杭基礎とは類似の結果を与えると言える。

3.3 根入れを有する杭基礎

図9に示すように、根入れが存在する杭支持の基礎が隣接する場合を考える。根入れ深さは $E=4\text{m}$ とし、建物、杭及び地盤の諸元は表1及び表2と同一である。ただし、杭の長さを $L=16\text{m}$ とする。隣接建物の階数は10階とし、基礎底面部と地盤とは密着しているとする。

図10に一様地盤と二層地盤の場合の、隣接建物の有無によるインピーダンスの変化を示す。図7に示したパイルド・ラフト基礎の場合と比べて、水平成分の静的ばね定数が大幅に増加している。これに比べて、回転・上下成分の増加度合いは大きくなっている。これは杭部に対する根入れ部側面の寄与度の差が方向成分によって異なるためである。振動数に対する変動は、根入れ部の拘束の増大により抑制されやすくなっている。また、基礎底面から支持層までの距離が短くなるために固有振動数が増加している。隣接建物の影響については、根入れの存在によって水平成分での影響度合いが増加している。この傾向は直接基礎の場合と同様である。これに対して、回転成分、上下成分に及ぼす隣接建物の影響は小さい。これは、杭の軸剛性が大きいため支持層での影響が相対的に大きく、周辺地盤の影響が減じられるためと考えられる。

図11に基礎入力動を示す。パイルド・ラフト基礎と同じように、

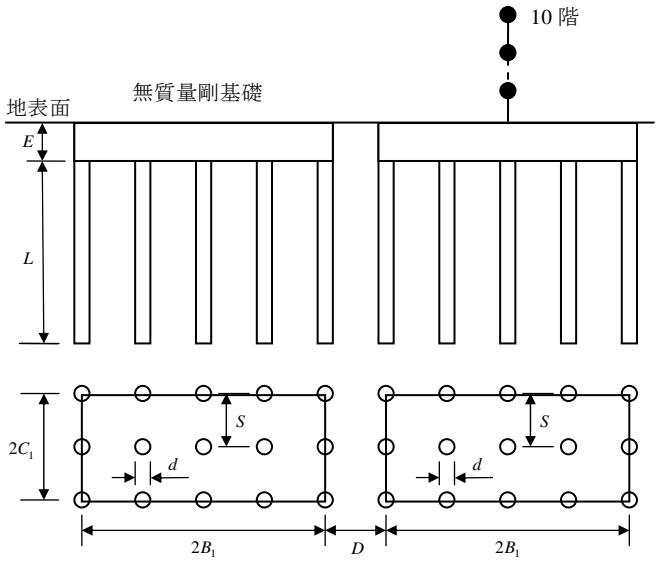


図9 根入れを有する杭基礎

地盤一建物連成系の固有振動数近傍で影響が大きく、この影響は、水平成分については、二層地盤のほうが大きい。回転成分は、支持地盤により拘束されるため、二層地盤のほうが小さい。図5に示した杭基礎の結果及び図8に示したパイルド・ラフト基礎の結果と比べて、根入れの存在により水平成分が減少し回転成分が増加しているが、隣接建物の存在による変動は、パイルド・ラフト基礎の結果と類似している。

全体的な傾向として、水平インピーダンスと水平基礎入力動は根入れを有する直接基礎の結果に良く対応し、回転及び上下インピーダンス、回転入力動はパイルド・ラフトの結果に類似していると言える。

4 杭の応力

隣接建物の存在が杭の応力に与える影響について、杭の最大曲げモーメントおよびせん断力を中心に考察する。地盤は図2の二層地盤を考え、杭基礎（支持杭）、パイルド・ラフト基礎及び根入れを有する杭基礎の3種類の基礎で支持された3階建てと10階建ての

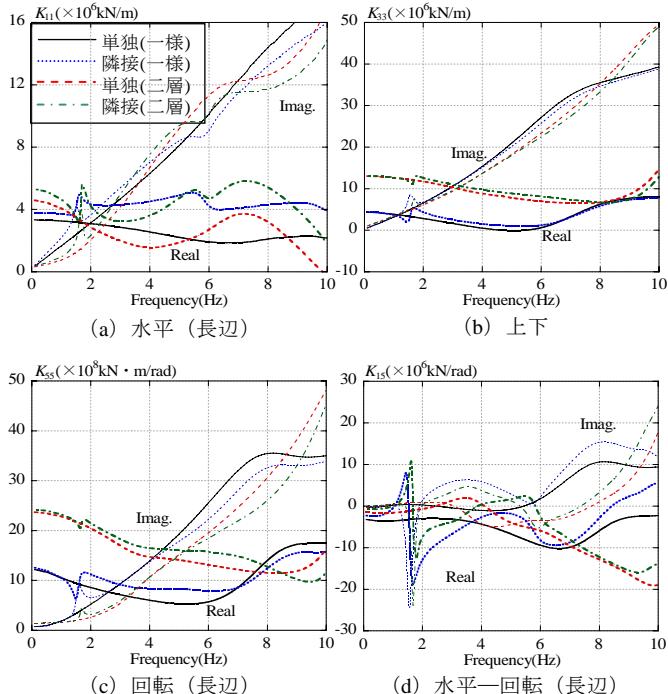


図10 基礎Aのインピーダンス（根入れを有する杭基礎）

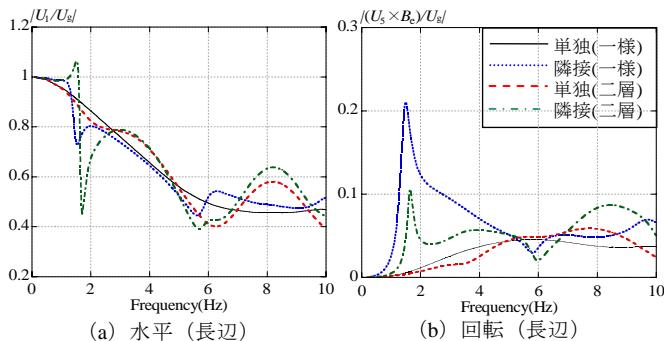


図11 基礎Aの基礎入力動（根入れを有する杭基礎）

建物を考える。基礎の諸元は、それぞれ3.1節、3.2節および3.3節と同様なものとする。隣接する建物の階数は、3、6、10階建てを想定し、上部構造の質量は $1.2t/m^2$ 、それぞれの基礎固定時の振動数は 6.0Hz 、 3.2Hz 、 2.0Hz とする。入力地震動は、鉛直下方から S 波が入射すると考える。波形は最大加速度を 100Gal に基準化した El Centro(NS)波であり、解析振動数範囲は 10Hz までとして周波数応答解析を行った。杭の平面位置による応力の差を検討するために、図12に示すように、杭の位置により A1～A5、B1～B5 と呼称することにする。

最初に杭基礎の結果を検討する。図13～14は、杭で支持された3

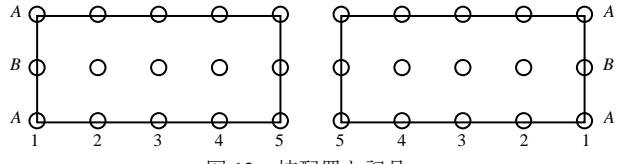


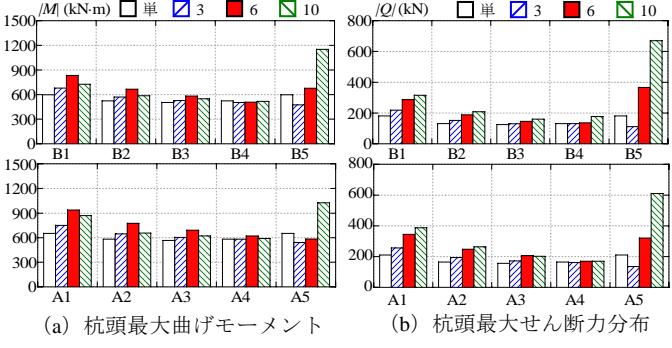
図12 杭配置と記号

階建てと10階建ての建物の結果を示しており、各図中では単独建物の場合、長辺方向に3階、6階、10階の建物が隣接する場合の結果を比較して示している。(a)と(b)は各杭の杭頭の最大曲げモーメントと最大せん断力を、(c)～(e)は隣接建物に近い位置の隅杭A5と中心杭B3の最大曲げモーメントと最大せん断力の分布を示している。

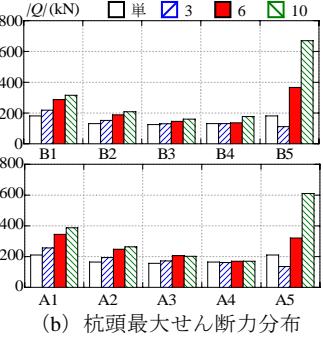
(a)および(b)を見ると、単独建物の場合には、杭頭の応力分布は点対称となっており、中央杭で小さく、隅杭で大きくなっている。その傾向は建物が高いほど顕著である。元来、上部構造の慣性力による杭頭の応力は隅杭で大きく、地盤震動による杭頭の応力は内杭で大きい¹⁸⁾特性がある。建物が高くなると、上部構造の応答によるベースシアが増加し、地盤震動による応力に比べ、杭頭慣性力による応力が支配的になるため、結果として建物高さによって杭応力の分布が変化することになる。

隣接建物が存在すると、杭の応力分布は大きく変化し、中央杭よりも隅杭でその変動が大きくなる。変化が最も大きいのは、3階建ての隣に10階建て建物が存在する場合のB5杭で、曲げモーメントが約2倍、せん断力が約4倍になっている。同じ高さの建物が隣接する場合には、2つの建物がおじぎをするような逆位相の入力成分があるため¹⁰⁾、隣接側の杭で応力が小さくなり、その反対の杭でやや大きくなる。一方、異なる建物が隣接する場合には、隣接側の杭で影響が大きく、低い建物の隣に高い建物が隣接する場合に、低い建物の隣接側の杭の杭応力が大きく増大する傾向がある。

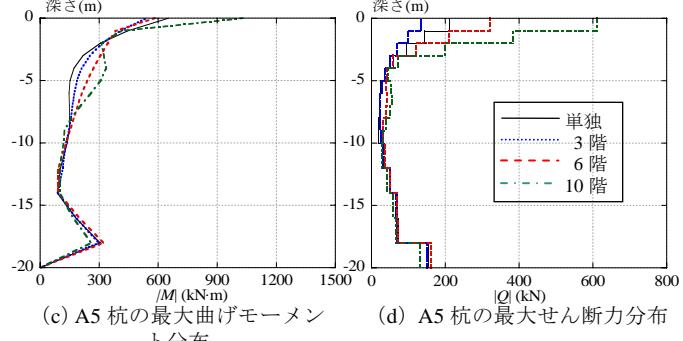
図(c)～(f)を見ると、地震時の杭の応力分布は、杭頭に静的荷重を受ける杭応力と同様に、杭頭で応力が大きく、深くなると速やかに減少し、二層地盤の境界面で大きくなっている。杭端部では、杭の位置、建物上部構造の階数および隣接建物の影響はあまりなく、入力地震動と地盤構造で決まることが分かる。これに対して、杭頭部では建物階数によってベースシアが増加する影響を直接的に受けている。隣接建物の影響については、中央のB3杭では顕著には見られないが、隣接建物に近い位置の隅杭A5杭では、10m以浅の応力分布が大きく変動しており、隣接建物が高いほど、地表に近いほど変動が大きくなっている。



(a) 杭頭最大曲げモーメント

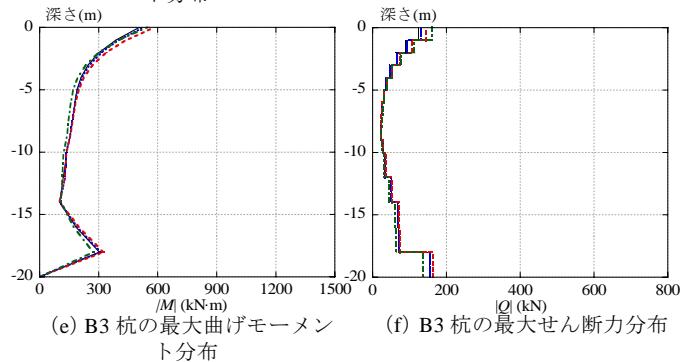


(b) 杭頭最大せん断力分布



(c) A5杭の最大曲げモーメント分布

(d) A5杭の最大せん断力分布



(e) B3杭の最大曲げモーメント分布

(f) B3杭の最大せん断力分布

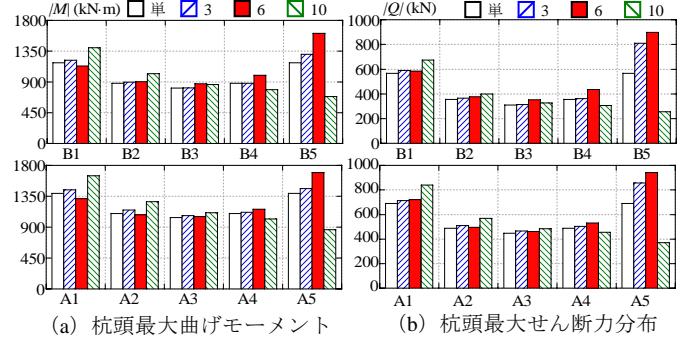
図 13 杭の最大応力分布（3階建物）（杭基礎）

端部杭は、剛版分布的な応力増加に加え、隣接建物の存在による応力変動が大きくなる傾向があり、耐震設計上この変動要因をどのように考慮すべきか今後の検討課題であると思われる。

次に、パイルド・ラフト基礎の場合の結果を図 15、図 16 に示す。図 13、図 14 に示した杭基礎の結果と比較すると、曲げモーメント、せん断力とともに大きく減少しており、基礎マット底面での地盤への応力伝達効果が現れている。例えば、10 階建物の B5 杭は単独の場合の三分の一程度に減少している。隣接建物の影響については、杭基礎の場合と同様な傾向が現れているが、杭応力が低減した結果隣接建物の存在による変動はより大きくなっている。

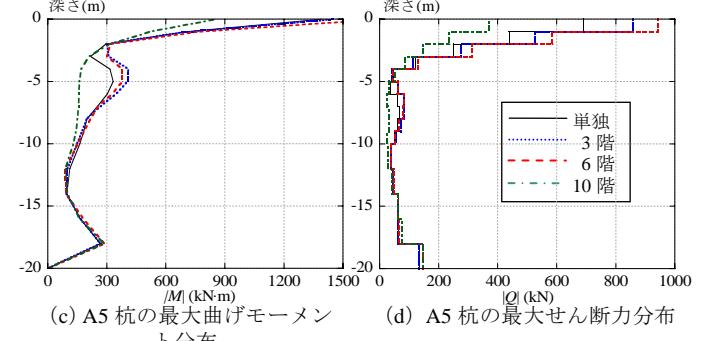
最後に、根入れが存在する場合の結果を、図 17、図 18 に示す。先に指摘したように、根入れを有する杭基礎の水平インピーダンスと水平基礎入力動は根入れ基礎と同様の特徴を持っており、地震時の杭の応力分布は地表面杭基礎とは異なっている。

まず、単独基礎の結果をみると、応力分布は地表面杭基礎のような剛版分布ではなく、ほぼ一様分布をしている。これは喜多村ら¹⁸⁾の指摘と対応している。また、建物の階数が杭の応力に与える影響は、地表面杭基礎に比べ小さい。杭の曲げモーメント分布をみると、



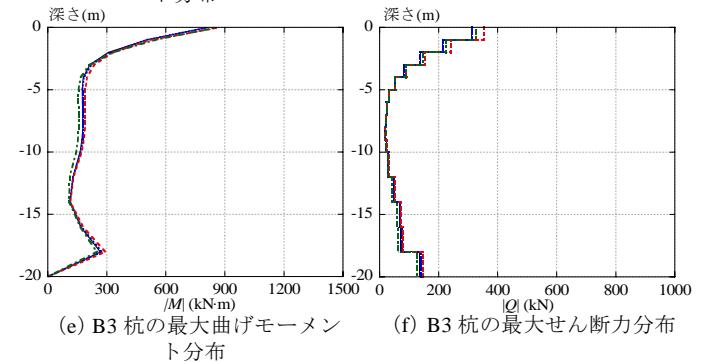
(a) 杭頭最大曲げモーメント

(b) 杭頭最大せん断力分布



(c) A5杭の最大曲げモーメント分布

(d) A5杭の最大せん断力分布



(e) B3杭の最大曲げモーメント分布

(f) B3杭の最大せん断力分布

図 14 杭の最大応力分布（10階建物）（杭基礎）

杭基礎の場合とは異なり、モーメントの反曲点が不明瞭になっている。隣接建物の影響については、根入れが無い場合と比較して、大きく減少している。これは根入れを有する場合には、隣接建物間の影響が主として根入れ側面部を介して伝達され、杭への影響が減じられるためと推察される。

なお、本論には、紙面の制約から建物の応答結果を示すことを略したが、建物の応答性状については、既往の直接基礎の結果¹⁰⁾と類似した結果が得られていることを付記する。

5まとめ

杭基礎、パイルド・ラフト基礎及び根入れを有する杭基礎について、隣接建物の存在がインピーダンス、基礎入力動、及び杭の最大応力に与える影響について解析的に検討した。得られた知見を以下に示す。

(1) インピーダンス

①隣接建物の存在がインピーダンスに与える影響は、直接基礎の場合と同様に隣接建物の連成系の固有振動数付近での変動として現れる。隣接建物の影響が大きく現れるのは水平一回転連

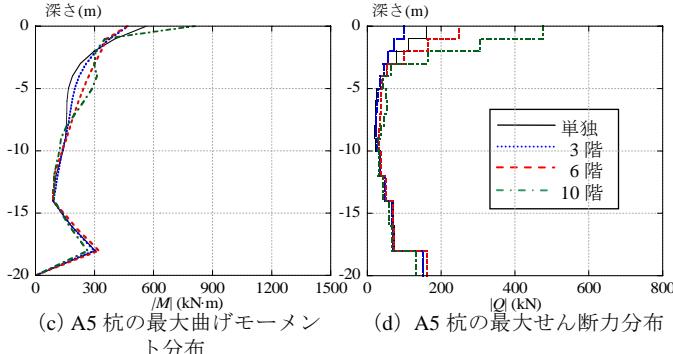
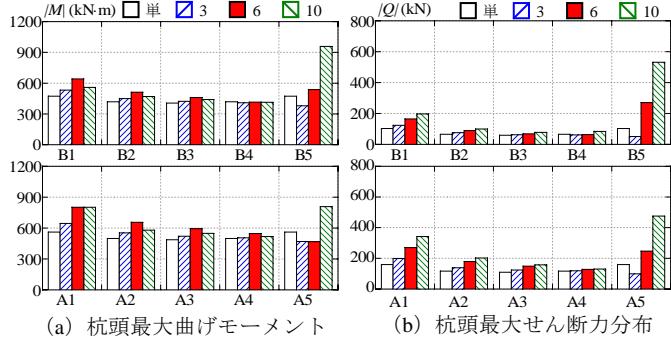


図 15 桁の最大応力分布（3階建物）（パイルド・ラフト基礎）

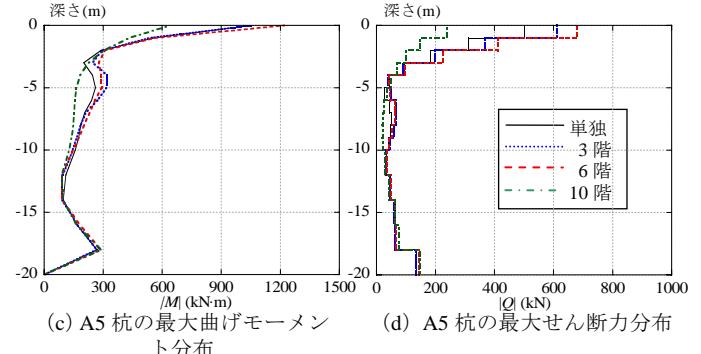
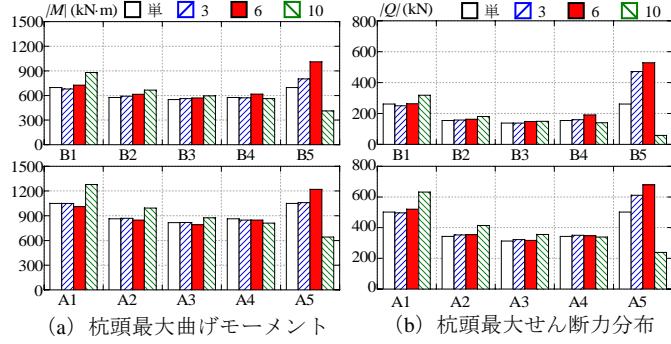


図 16 桁の最大応力分布（10階建物）（パイルド・ラフト基礎）

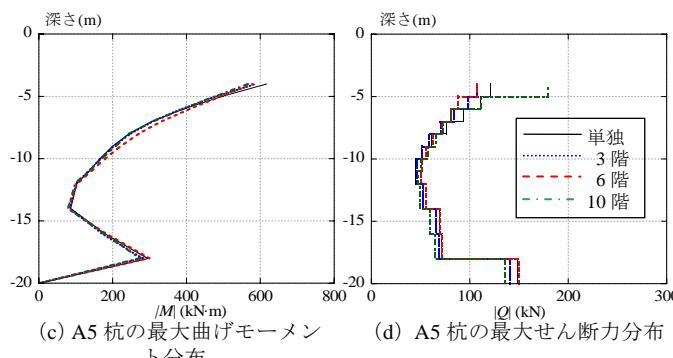
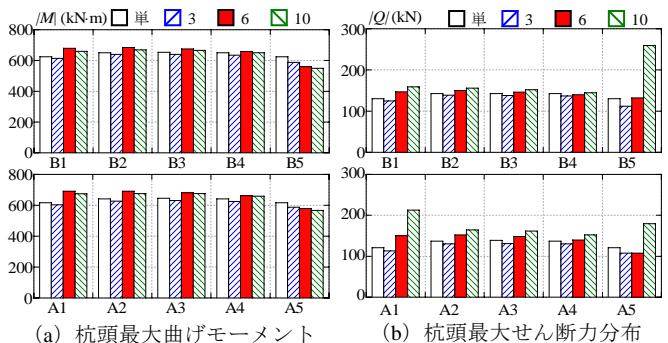


図 17 桁の最大応力分布（3階建物）（根入れを有する杭基礎）

成成分や水平成分であり、回転成分や上下成分は杭の軸剛性が大きいため直接基礎に比べて隣接建物の影響が小さくなっている。また、隣接している方向の方が直交方向より影響が大きい。隣接建物の影響は、低振動数域では実部が増加、虚部が減少する形で現れ、二層地盤の場合には、隣接建物の影響は水平成分で大きく、回転成分と上下成分では小さい。

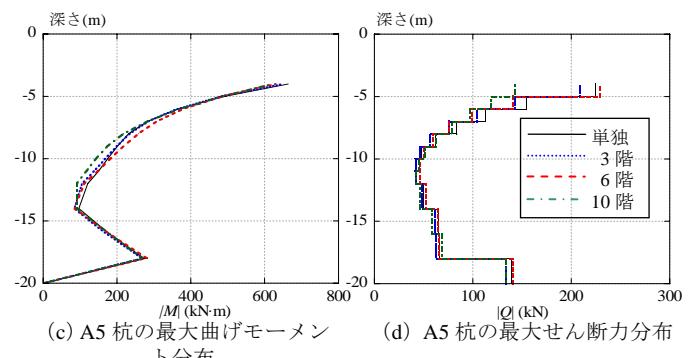
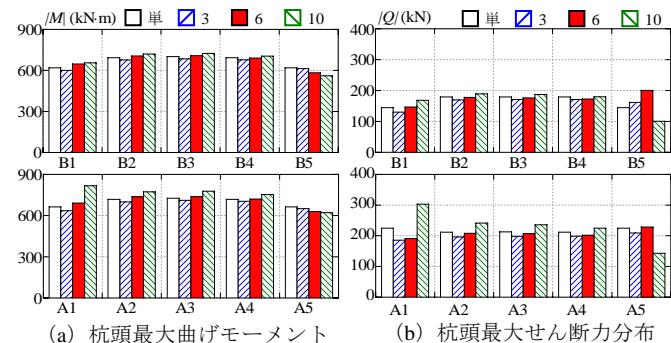


図 18 桁の最大応力分布（10階建物）（根入れを有する杭基礎）

- ② パイルド・ラフト基礎の結果は、概ね杭基礎と類似しているが、杭間距離により生じる変動が抑制される。
- ③ 根入れを有する杭基礎の場合は、回転成分と上下成分は杭基礎の特性とほぼ同様の結果を示し、水平成分は根入れ基礎と同様の結果を示している。

(2) 基礎入力動

- ①直接基礎の場合と同様に、隣接建物の影響はインピーダンスよりも基礎入力動に強く現れ、水平成分より回転成分で影響が顕著で、連成系の固有振動数周辺で大きく変動している。
- ②二層地盤（支持杭）の場合には、半無限一樣地盤（摩擦杭）の場合と比べて、水平成分は大きくなり、回転成分は小さくなる。
- ③パイルド・ラフト基礎の結果は杭基礎とほぼ等しく、根入れを有する杭基礎の場合は水平成分では根入れ基礎と、回転成分では杭基礎と同様の結果を与える。

(3) 杭の最大応力

- ①中央杭では隣接建物の影響は余りないが、隣接側の杭で隣接建物の影響を大きく受ける。この影響度合いは曲げモーメントよりもせん断力で大きく、杭頭での変化が顕著である。
- ②同じ建物が隣接する場合、隣接側の杭で曲げモーメントとせん断力が共に減少する。異なる建物が隣接する場合には、隣接側の杭で曲げモーメントとせん断力が共に増加し、この傾向は隣接建物の規模が大きいほど顕著となっている。
- ③隣接建物の影響は、杭基礎とパイルド・ラフト基礎の場合に大きく、根入れを有する杭基礎の場合は小さい。

以上のように、杭を有する基礎の場合、隣接建物の影響は、隣接建物の杭～建物間の地盤～杭を介して伝達される。このように、杭周を介するため、地盤との接触面積が増え、直接基礎の場合に比べ、隣接建物の影響を受けやすい。ただし、支持杭のように上下・回転拘束が増大すると、隣接建物の影響が顕著な回転動の影響が減じられる。隣接建物の影響が最も顕著に表れるのは、地表面杭基礎の杭応力であり、特に隣接建物に近接する杭応力は大きく変動する。このため、建物外周部の杭については、一般的な応力集中に加え、隣接建物の存在などの影響を加味し、十分に余裕を持った設計が必要であると考えられる。

謝辞

本論をまとめるに当たって、名古屋大学大学院環境学研究科の飛田潤助教授、小島宏章助手には有益な助言を頂いた。また、同大学院生の酒井理恵子氏にも協力を頂いた。さらに、日建設計の白瀬陽一氏、鹿島建設の酒向裕司氏にはプログラム検証に当たって助言を頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) J.E. Luco and L.Contesse : Dynamic Structure-Soil-Structure Interaction, Bull. Seis. Soc. America, Vol.63, pp.1289-1303, 1975
- 2) 小堀鐸二、南井良一郎、日下部馨：粘弾性層地盤上の構造物群の振動特性、関東地震 50 周年記念地震工学シンポジウム, pp.195-202, 1973
- 3) T.Kobori and K.Kusakabe : Dynamic Cross Interaction between Two Embedded Foundations, Proc. 5th Japanese Earthq. Eng. Symp., pp.521-528, 1978
- 4) H.L. Wong and J.E. Luco : Dynamic Interaction between Rigid Foundations in a Layered Half-space, Soil Dyn. Earthq. Eng., Vol.5, pp.149-158, 1986
- 5) 中井正一、福和伸夫：埋め込み剛基礎の動特性に基づく動的擬似 3 次元効果の考察、境界要素法による動的擬似 3 次元効果に関する研究（その 2），日本建築学会構造系論文集, No.380, pp.56-66, 1987.10
- 6) 川瀬博、吉田一博、佐藤俊明：境界要素法による地表面上剛基礎の相互連成解析、清水建設研究報告、第 38 号, pp.11-21, 1984
- 7) 吉田一博、川瀬博：埋設された剛構造物相互の連成振動、第 7 回日本地震工学シンポジウム, pp.1045-1050, 1986
- 8) 岩本賢治、兵頭陽、喜多村英司、宮本裕司、大塚康弘：複数隣接建屋の動的相互作用解析（その 1）埋込みが無い場合、（その 2）埋込みが有る場合、日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.387-390, 1995.8
- 9) 今村晃、渡辺孝英、吉田一博、石崎萬平、源栄正人：埋め込みを有する複数建屋の地震応答性状に関する研究（その 1）解析手法に関する検討、日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp.461-462, 1990.9
- 10) 文学章、福和伸夫：隣接建物の存在が直接基礎の動的相互作用特性に与える影響、日本建築学会構造系論文集, No. 600, pp.97-105, 2006.2
- 11) 文学章、福和伸夫：直接基礎の基礎形状と基礎形式が動的相互作用効果に及ぼす影響、構造工学論文集, Vol.52B, 2006.3 (登載候補論文)
- 12) 長谷川正幸、中井正一：杭基礎のインピーダンス関数に基づいた群杭効率の研究、日本建築学会構造系論文報告集, No.417, pp. 133-145, 1990.11
- 13) 長谷川正幸、中井正一：杭基礎の有効入力に関する基礎的研究、日本建築学会構造系論文報告集, No. 422, pp. 105-115, 1991.4
- 14) 中井正一、松田崇、石田理永：パイルドラフト基礎の振動特性に関する基礎的検討、構造工学論文集, Vol. 4 7 B, pp.435-442, 2001.3
- 15) 高野真一郎、安井譲：埋め込みを有する群杭の動的応答解析、第 9 回日本地震工学シンポジウム, pp. 1195-1200, 1994
- 16) 日下部馨、野添久視、吉田良：群杭で支持された埋設構造物の水平振動特性、第 8 回日本地震工学シンポジウム, pp.1263-1268, 1990
- 17) 日下部馨、柳澤信行：群杭で支持された埋込剛体基礎の振動特性、構造工学論文集, Vol.38B, pp.117-124, 1992.3
- 18) 喜多村英司、宮本裕司、三浦賢治、増田潔：埋め込みを有する群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, No.492, pp.53-60, 1997.2
- 19) 増田潔、佐々木文夫：半無限層を考慮した薄層法による点加振解の検討、日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp.221-222, 1985
- 20) Kaynia, A. M. and Kausel, E.: Dynamic Behavior of Pile Groups, Proc. of Second International Conference on Numerical Method in Offshore Piling, pp.509-532, 1982
- 21) 日本建築学会：入門・建物と地盤との動的相互作用、1996