

直接基礎、杭基礎とパイルド・ラフト基礎の動的相互作用特性

DYNAMIC SOIL STRUCTURE INTERACTION OF SPREAD FOUNDATION, PILE FOUNDATION AND PILED RAFT FOUNDATION

文学章^{*1}, 福和伸夫^{*2}

Xuezhang WEN and Nobuo FUKUWA

This paper deals with soil-structure interaction of pile foundation, piled-raft foundation and embedded foundation on pile group. The impedances and foundation input motions are analyzed by the thin layered element method and flexible volume substructure method. The comparison among piled-raft foundation, pile foundation and raft foundation and the comparison among embedded foundation on pile group, piled foundation and embedded foundation are made. Also, the effects of the joint at pile head, the extension at pile tip, the size of raft of piled-raft foundation and the contact condition between soil and the bottom of mat on pile group are discussed. The bending moments in piles subjected to harmonic loads and S-wave input motion are also examined.

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

構造物と地盤との動的相互作用、インピーダンス、基礎入力動、直接基礎、杭基礎、パイルド・ラフト基礎、根入れ

1 はじめに

耐震基準の性能規定化と共に導入された限界耐力計算法は、荷重の動的効果を積極的に取り入れ、表層地盤の増幅や構造物との動的相互作用効果を導入した点で、従来に比べて大きく進歩した。ただし、現段階で地盤と構造物との動的相互作用効果を厳密に取り扱うことは難しく、簡易な地盤ばねの形でモデル化されている。しかし、基礎形式は、地表面基礎、根入れ基礎、杭基礎、パイルド・ラフト基礎、根入れを有する杭基礎など様々な種類があり、それらの動的相互作用特性の相違を適切に評価して取り入れる必要がある。また、杭基礎およびパイルド・ラフト基礎の場合、様々な要因（例えば、杭頭の接合条件、杭の拡底、ラフトの拡大部分、基礎底面の接触条件など）の影響が考えられる。実際の基礎－地盤系を簡略なモデルで置き換える際には、それらの影響度合いを勘案して結果を吟味する必要がある。

単独基礎の動的相互作用特性についての研究は、吉田による直接基礎のインピーダンスと基礎入力動に関する系統的な研究¹⁾、杭基礎に関する群杭効果と杭の地震応答に関する長谷川の研究^{2,3)}、パイルド・ラフト基礎を対象とした中井らの研究⁴⁾、根入れを有する杭基礎に関する喜多村の研究⁵⁾などがある。また、異なる基礎形式の比較については、杭基礎と地表面基礎を比較した飯場の研究⁶⁾、根入れを有する杭基礎を根入れ基礎や杭基礎と比較した高野らの研究⁷⁾などがある。筆者らも直接基礎を対象に、隣接建物の存在⁸⁾、基礎

の形状や形式⁹⁾についての検討を行ってきた。異なる基礎形式について同一の条件下で比較した系統的な分析例は、三浦等¹⁰⁾の軸対称有限要素法による解析的検討があるが、3次元解析による検討は殆どない。また、上述の各種要因の影響を要因別に検討した例も見られない。

そこで、本論では、地表面直接基礎、地表面杭基礎、パイルド・ラフト基礎、根入れを有する直接基礎、根入れを有する杭基礎を対象に基礎形式による動的相互作用特性の違いを分析する。さらに、個々の基礎形式に対して、以下の要因の影響を検討することにする。

- ① 杭基礎の場合の支持層と表層地盤のS波速度比
- ② 杭基礎の場合の杭頭条件（剛接合とピン接合）
- ③ 杭基礎の場合の杭端条件（拡底の有無）
- ④ パイルド・ラフト基礎のラフトの拡大の有無
- ⑤ 根入れを有する杭基礎の基礎底面の接触条件

これらの検討により、限界耐力計算法で利用されているような簡易な相互作用ばねへの置換に際しての基礎的知見を得る。

2 解析手法

解析法は、既出の論文と同様であり^{8,9)}、基本的にLysmerらによるSASSI¹¹⁾の考え方に準拠し、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。ここでは、図1に示すように、根入れ基礎＋基礎部と周辺地盤とを分離し

*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.

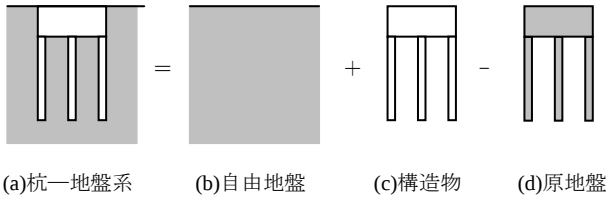


図1 容積法による杭一地盤系のモデル

て解析を行い、インピーダンスや基礎入力動を算定する。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ヤル境界¹²⁾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。杭の拡底を考慮する場合には、グリーン関数の相反定理が成り立たないため、杭部と拡底部のグリーン関数の平均値を用いている。また、根入れ部原地盤は3次元アイソパラメトリック要素でモデル化して根入れ部地盤を除去し、杭はせん断変形を考慮した梁要素を用いてモデル化する。なお、杭一地盤間の力の授受は杭周面で行われるため、杭の断面積を考慮したグリーン関数の算定が必要となる。本論では、ディスク加振解を用いることによりこの点を考慮しているが、別途、リング加振解を用いた検討も行い、結果に差異が小さいことを確認している。また、杭のモデル化については、地表面杭基礎の場合を対象として、杭の剛性・質量を地盤のそれと一致させた検討を行い、自由地盤の動きを再現できることを確認している。合わせて、既往の解析結果^{2),3),5),7)}を再現できることを確認している。地盤は二層地盤を想定し、薄層の分割は、対象振動数範囲での波長の変化を表現するため、図2に示すように18×1m+32×1m+50×2m+25×4mに分割した。

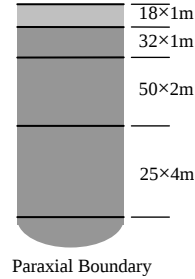


図2 地盤の薄層モデル

無質量剛基礎一杭一地盤系の振動数領域での運動方程式は、式(1)のように書くことができる。

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

ここに、

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

また、 $[K]$ 、 $[M]$ 、 $\{u\}$ 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 はそれぞれ自由地盤、剛基礎及び杭、基礎及び杭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、根入れ部についてはソリッド要素で評価する。

無質量剛基礎のインピーダンスを算出するために、全ての自由度を基礎の自由度(下添え字 F)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。

$$\begin{bmatrix} [S_{FF}] & [S_{FO}] \\ [S_{OF}] & [S_{OO}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u_F\} \\ \{u_O\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{F_F\} \\ \{F_O\} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

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、下添え字が O の自由度を消去することにより、無質量剛基礎に対する 6 自由度の運動方程式に変換する。これにより、基礎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。

$$[K_F] = [T]^T [S_{FF}]^* [T] \quad (3)$$

ここに、

$$[S_{FF}]^* = [S_{FF}] - [S_{FO}][S_{OO}]^{-1}[S_{OF}]$$

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、基礎の応答を評価している。

$$\begin{Bmatrix} \{F_F\} \\ \{F_O\} \end{Bmatrix} = [K]^G \{u\}_G = \begin{bmatrix} [K_{FF}]^G & [K_{FO}]^G \\ [K_{OF}]^G & [K_{OO}]^G \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u_F\}_G \\ \{u_O\}_G \end{Bmatrix} \quad (4)$$

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

3 杭基礎

3.1 支持層の硬さの影響

支持層の硬さが杭基礎のインピーダンスと基礎入力動に与える影響を検討する。図3に示すように、等間隔に正方形配置した場所打ち鉄筋コンクリート杭を想定する。杭は支持層に2m根入れされているとする。杭と表層地盤の主要な解析パラメータを表1に示す。表2に示すように、支持地盤の表層地盤に対するS波速度比： V_{S2}/V_{S1} が1(一様地盤の摩擦杭に相当)、2、4と増加する場合について、インピーダンスと基礎入力動の変動を考察する。ただし、基礎部は無質量とし、杭頭と基礎は剛接とする。また、地震波は鉛直下方からS波が入射する場合を考える。この検討は、摩擦杭と支持杭の差異を検討することにも繋がる。

図4に支持層の硬さがインピーダンスに与える影響を示す。水平成分は、2層地盤では逸散波の重複反射により振動数による変動が

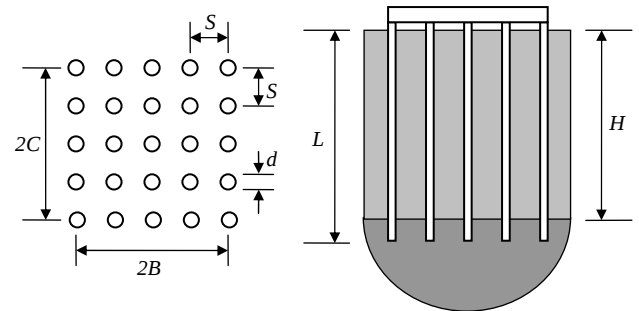


図3 杭基礎と地盤のモデル

表1 杭と表層地盤の解析パラメータ

杭		表層地盤
杭本数 $N=5 \times 5$	$E_p=2.1 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$	$V_{S1}=150 \text{ m/s}$
$d=1.5 \text{ m}$, $S=7.5 \text{ m}$	$\nu_p=1/6$	$\rho_1=1.5 \text{ t/m}^3$
$L=20 \text{ m}$	$\rho_p=2.4 \text{ t/m}^3$	$\nu_1=0.45$, $h_1=0.03$
$2B=2C=30 \text{ m}$	$h_p=0.03$	$H=18 \text{ m}$

表2 支持層の解析パラメータ

CASE1	CASE2	CASE3
$V_{S2}=150 \text{ m/s}$	$V_{S2}=300 \text{ m/s}$	$V_{S2}=600 \text{ m/s}$
$\rho_2=1.5 \text{ t/m}^3$	$\rho_2=1.8 \text{ t/m}^3$	$\rho_2=2.1 \text{ t/m}^3$
$\nu_2=0.45$	$\nu_2=0.45$	$\nu_2=0.45$
$h_2=0.03$	$h_2=0.03$	$h_2=0.03$

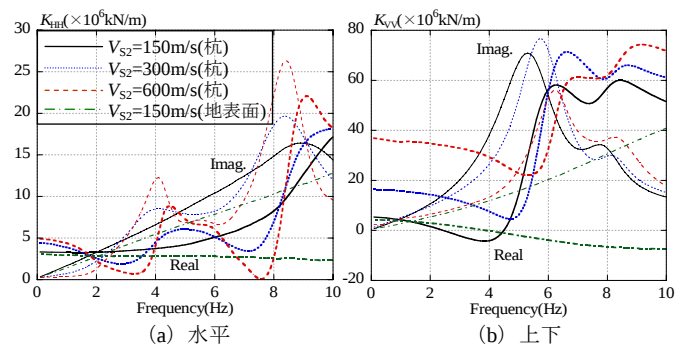


図4 支持層の硬さがインピーダンスに与える影響

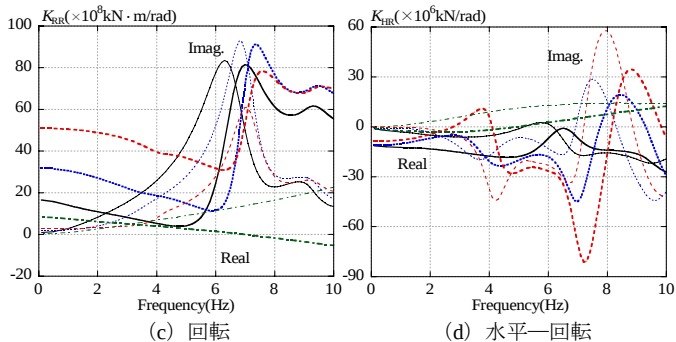


図5 支持層の硬さが基礎入力動に与える影響

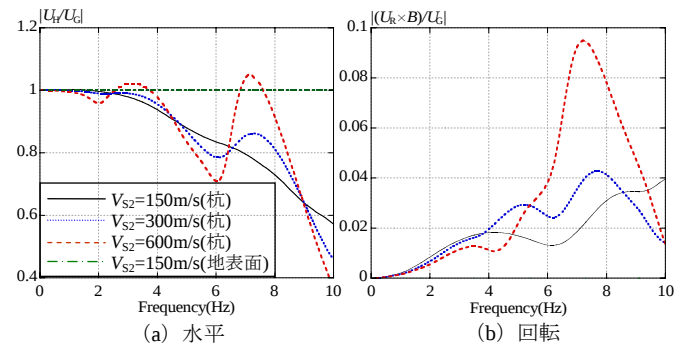


図6 表層地盤の硬さが群杭効率に与える影響

生じており、支持層が硬いほど変動の振幅が大きくなっている。これに対し、上下成分と回転成分は、支持層が硬くなるに従い、杭端での抵抗の増大により低振動数域で実部が増加し、逸散波の重複反射により虚部が減少している。結果として、上下及び回転インピーダンスの等価な減衰は小さくなる。また、支持層の硬さに拘わらず、上下及び回転成分では、高振動数域で Out-of-phase 現象¹³⁾と呼ばれる杭間隔に依存したピークが顕著に現れている。支持杭と摩擦杭の差という観点では、その差は、上下と回転成分に顕著であると言える。参考のために、図4中にはCASE1に相当する半無限一様地盤上の地表面直接基礎の結果を示すが、水平成分は概ね地表面直接基礎の結果に対応している。また、杭長さを20mとした杭の鉛直剛性から求めた上下及び回転ばねは、 $46.4 \times 10^6 \text{ kN/m}$ 、 $52.2 \times 10^8 \text{ kNm}$ であり、CASE3の静的ばねの値に近い。

図5に支持層の硬さが基礎入力動に与える影響を示す。水平・上下成分共に、支持層が存在すると、水平インピーダンスと同様に表層内の波動の重複反射による振動数変動を示し、支持層が硬いほど変動度合いが大きくなっている。

3.2 表層地盤の硬さの影響

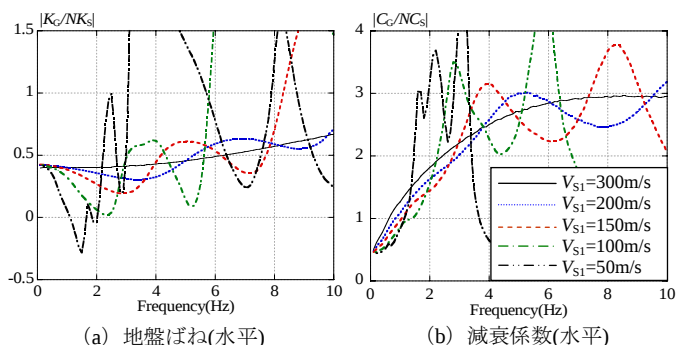


図7 水平加振(1kN)による杭の曲げモーメント

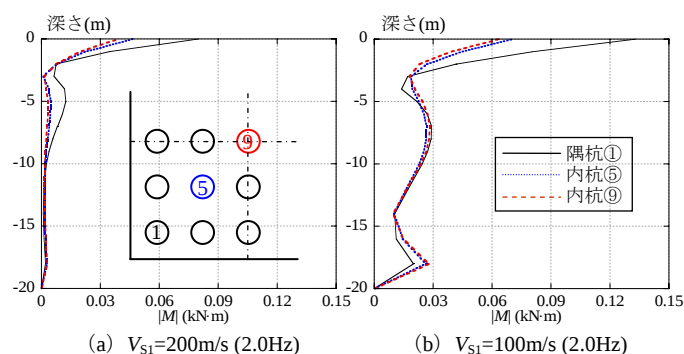


図8 回転加振(1kNm)による杭の軸力

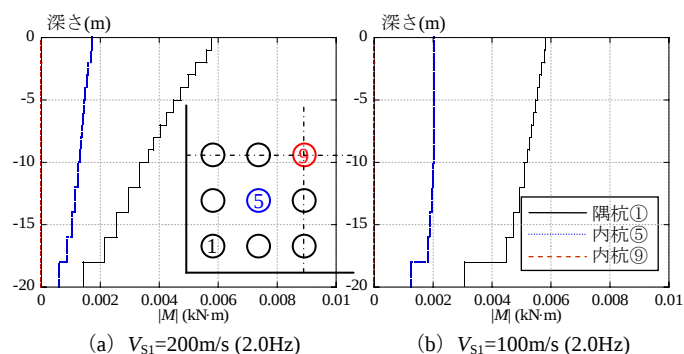


図9 入力地震(地表面 100gal)による杭の曲げモーメント

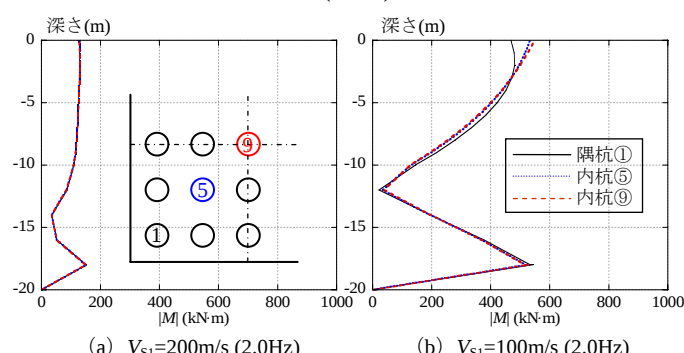


図10 入力地震(地表面 100gal)による杭の曲げモーメント

つぎに、表層地盤の硬さが群杭効率と杭応力に与える影響を検討する。支持層のS波速度を $V_{S2}=300\text{m/s}$ と固定し、表層地盤のS波速度 V_{S1} をそれぞれ 300m/s、200m/s、150m/s、100m/s および 50m/s とする。

図6に、表層地盤の硬さが群杭効率に与える影響を示す。群杭、単杭の水平インピーダンスをそれぞれ $K_G + i\alpha C_G$ 、 $K_S + i\alpha C_S$ と記し、群杭効率を算定する(わり算は、各振動数の群杭の結果を単杭(杭

頭回転拘束)の結果×杭本数で除している)。図より、地盤ばねに関しては、静的な群杭効率に与える表層地盤の硬さの影響は小さく、表層が軟弱なほど、低振動数域での群杭効率が大きく低下すると共に、振動数変動が大きくなり、ばねの群杭効率は1を中心に変動するようになる。一方、減衰に関しては、杭で囲まれた地盤が一体で振動するようになるため、群杭効率は1を上回るが、表層が軟弱になるとその効果が減じられている。

図7～9に、表層S波速度が200m/sと100m/sの場合の、水平加振時の杭の曲げモーメント、回転加振時の杭の軸力および地震入力による杭の曲げモーメントの振幅を比較する。図7より、杭頭水平加振の場合には、内杭よりも隅杭で曲げモーメントが大きく、表層地盤が軟らかくなるに従って、杭の曲げモーメントが大きくかつ反曲点が深くなり、深くまで力が伝達されている。図8より、基礎に回転加振力が作用する場合には、杭頭の軸力負担分布は基礎中心に対して三角形にはならず、隅杭①は内杭⑤の3倍程度になっている。また、表層地盤が軟らかくなるに従って、杭頭の軸力が深さ方向に低減しにくくなり、杭頭の寄与が大きくなっている。図9より、S波入射の場合には、表層が軟弱な場合には杭頭で隅杭よりも内杭で曲げモーメントが大きく、層境界で大きなモーメントを生じている。

3.3 杭頭条件の影響

杭頭条件がインピーダンスと基礎入力動に与える影響を検討する。図10に示すように、杭頭と基礎の接合条件が剛接合およびピン接合の2ケースを想定する。杭と地盤の主要な解析パラメータは表1と表2のCASE2とする。

インピーダンスと基礎入力動を図11及び図12に示す。水平成分は、ピン接合になると実部・虚部ともに大きく減少するが、上下成分と回転成分には杭頭条件の影響はほとんどないことが分かる。一方、基礎入力動は、ピン接合になると、水平成分は増加し、回転成分は減少しており、地表面直接基礎の状態に近づいている。水平成分で1を超える場合があることは注意を要する。近年、杭頭の接合条件を柔にすることによって杭モーメントを低減する提案が各所でされているが、杭応力の低減の代わりに建物応答を増加させる傾向があることに留意するべきである。

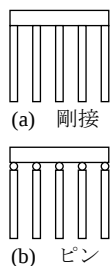


図10 杭頭条件

3.4 杭の拡大の影響

次に、図13に示すように杭の拡大がインピーダンスと基礎入力動に与える影響を検討する。杭と地盤の解析パラメータは表1と表2のCASE2とし、杭頭は剛接、拡大部の直径は $d_1=2.5\text{m}$ とする。

図14に示すように、インピーダンスは、上下成分と回転成分で拡大の有無による差が若干認められるが、水平成分と水平一回転成分では、この差は極めて小さい。

これは、図7～8に示したように、水平成分は回転成分に比べて杭頭の抵抗の寄与が小さいためである。また、図15に示すように、基礎

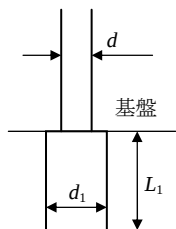


図13 拡大のモデル

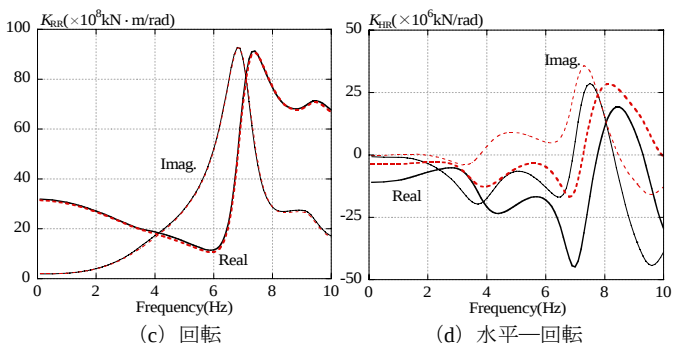
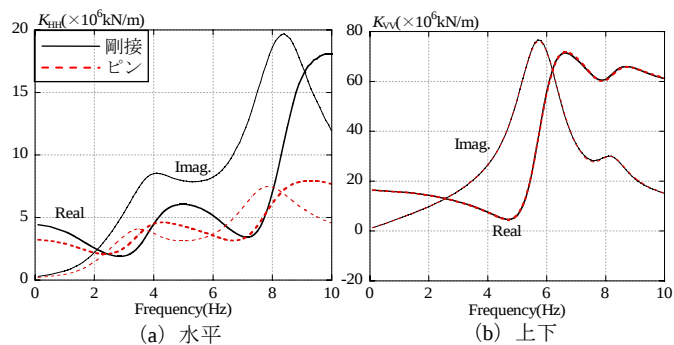


図11 杭頭条件がインピーダンスに与える影響

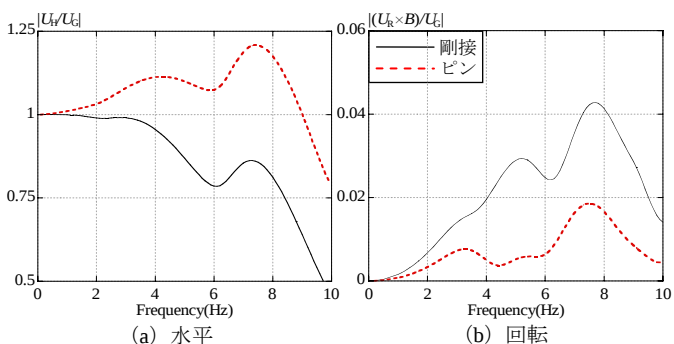


図12 杭頭条件が基礎入力動に与える影響

入力動には拡大の影響は非常に小さい。これらの結果から、支持杭の動特性を考える際には、杭頭の拡大の効果を無視しても大きな問題にはならないことが分かる。ただし、表層部が非線形化によって剛性低下しており、杭一地盤間の摩擦が期待できない場合には、拡大の影響はより大きくなる。

4 パイルド・ラフト基礎

基礎底部と地盤を密着させた場合をパイルド・ラフト基礎と考え、非接触と仮定した摩擦杭基礎、地表面直接基礎と、結果を比較する。また、ラフトの拡大部分の影響についても検討を加える。解析に用いたパラメータを表3に示す。

4.1 ラフトの拡大部分の影響

図16に示すように、ラフトの拡大部分がインピーダンスと基礎入力動に与える影響を検討する。ラフトの拡大部分は $S_1=1.5\text{m}$ とする。基礎は無質量とし、杭頭と基礎は剛接とする。図17にインピーダンスを、図18に基礎入力動を、ラフトの拡大の有無を比較して示す。図より、高振動数域でインピーダンスの実部、基礎入力動の回転成分に相違がみられるが、低振動数域ではラフト拡大の影響は非

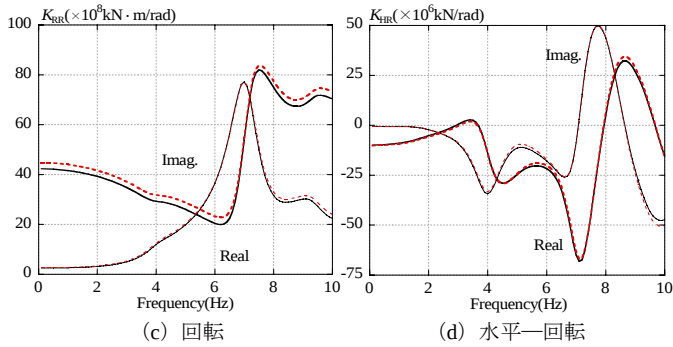
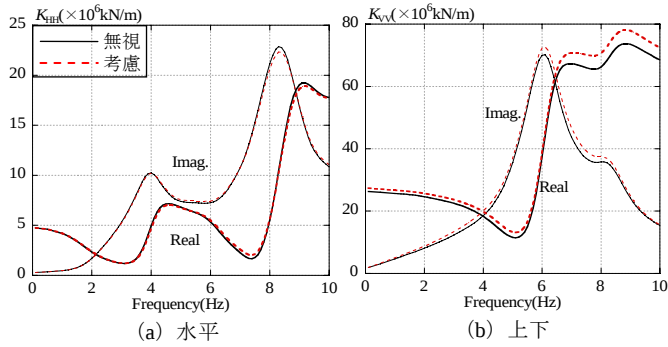


図 14 杭の拡底がインピーダンスに与える影響

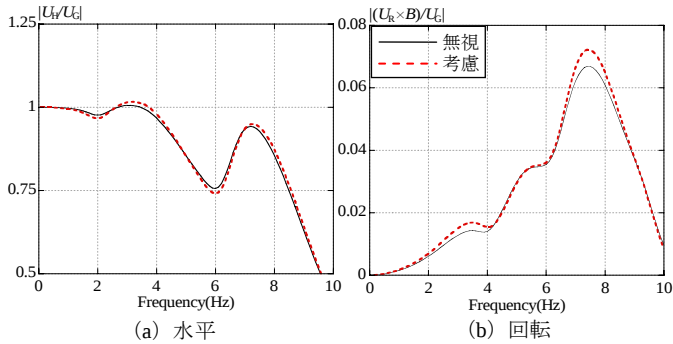


図 15 杭の拡底が基礎入力動に与える影響

常に小さい。この結果から、一般の建物の 1 次固有振動数程度以下の振動数範囲であれば、1.5m 程度のラフト部分の拡大の影響は概ね無視できることが分かる。

4.2 パイルド・ラフト基礎と地表面基礎と杭基礎との比較

パイルド・ラフト基礎を地表面基礎や杭基礎と比較する。パイルド・ラフト基礎のパラメータは 4.1 節と同様とし、ラフト拡大部は無視する。また、地表面基礎はパイルド・ラフト基礎と同じサイズで、 $2B \times 2C = 30\text{m} \times 30\text{m}$ とする。

図 19 に、3 種類の基礎形式のインピーダンスを比較して示す。水平成分は、低振動数域では三者がよく対応し、パイルド・ラフト基礎、杭基礎、地表面基礎の順に値が小さくなっている。高振動数域では三者の差は拡大しているが全体的傾向は類似している。これに対し、回転、上下成分は、杭の寄与が大きいため、低振動数域で杭基礎とパイルド・ラフト基礎がほぼ一致している。ただし、パイルド・ラフト基礎の場合には、高振動数域に見られる杭間隔に依存する Out-of-phase 現象が抑制されている。これらの結果は、限界耐力計算法で、杭基礎の水平地盤ばねの算定に際して、地表面基礎の地

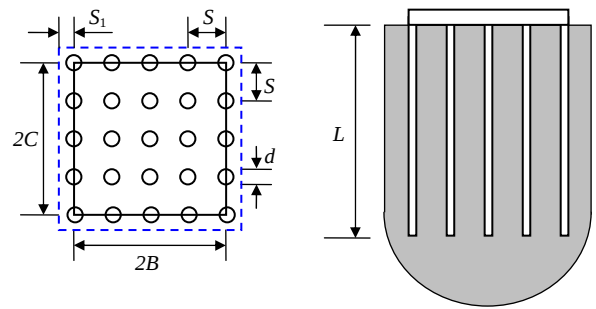


図 16 パイルド・ラフト基礎のモデル

表 3 パイルド・ラフト基礎の解析パラメータ

杭	ラフト	地盤
本数 $N=5 \times 5$	床: $2B=30\text{m}$	$V_s=150\text{m/s}$
$d=1.5\text{m}$	床: $2C=30\text{m}$	$\rho=1.5\text{t/m}^3$
$S=7.5\text{m}$	拡大: $S_1=1.5\text{m}$	$\nu=0.45$
$L=20\text{m}$		$h=0.03$
	$E_p=2.1 \times 10^7 \text{kN/m}^2$	
	$\nu_p=1/6$	
	$\rho_p=2.4\text{t/m}^3$	
	$h_p=0.03$	

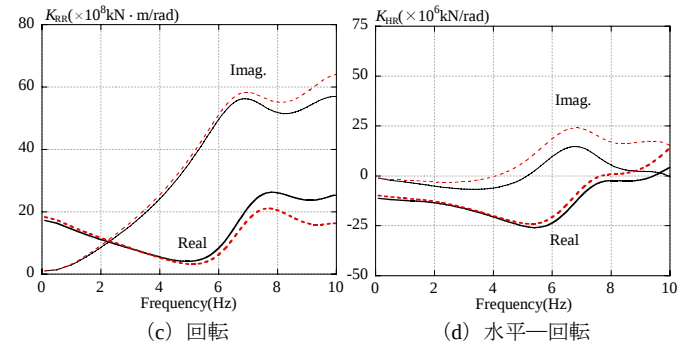
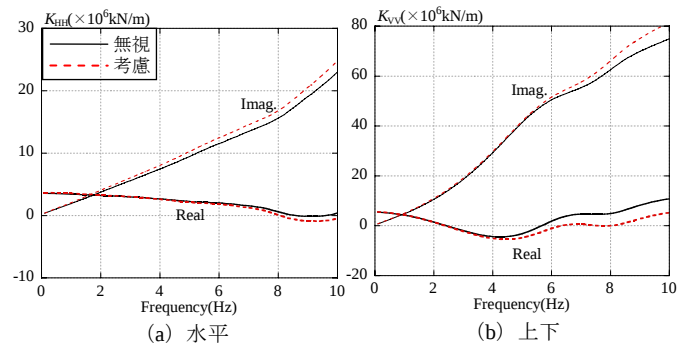


図 17 ラフトの拡大部分がインピーダンスに与える影響

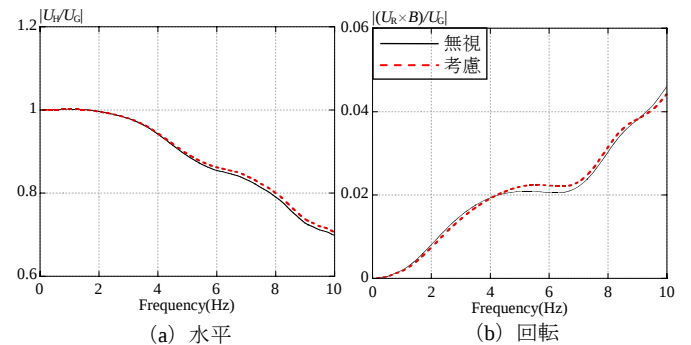


図 18 ラフトの拡大部分が基礎入力動に与える影響

盤ばねを準用していることの妥当性をある程度支持していると解釈できる。

図 20 には、対応する基礎入力動を示す。パイルド・ラフト基礎の

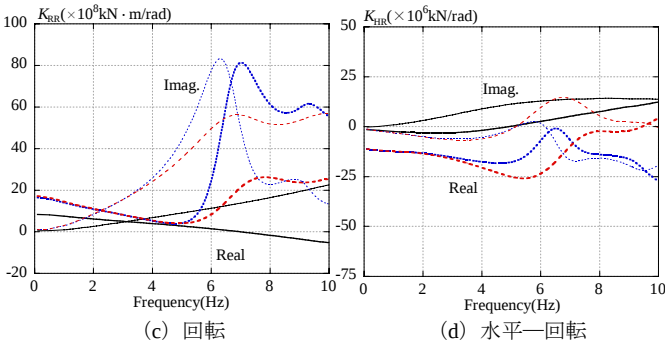
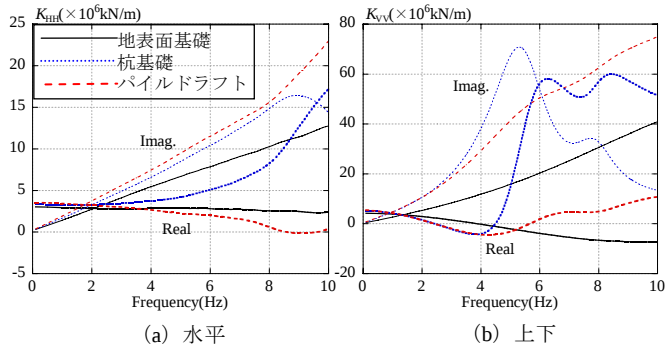


図 19 地表面基礎、杭基礎とパイル・ラフト基礎のインピーダンスの比較

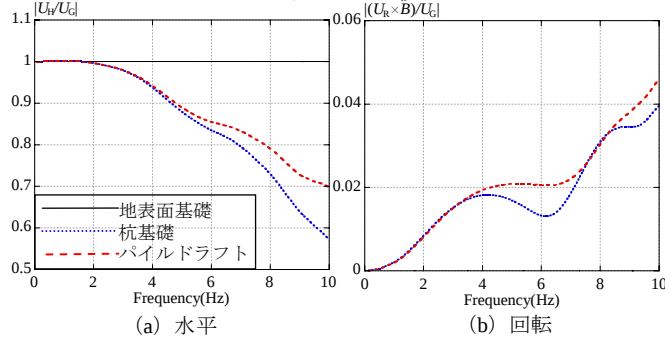


図 20 地表面基礎、杭基礎とパイル・ラフト基礎の基礎入力動の比較

結果は杭基礎と概ね一致する結果を示している。

以上の結果から、パイル・ラフト基礎は第一次近似として、杭基礎の結果を利用することが可能であると考えられる。

5 根入れを有する杭基礎

つぎに、図 21 に示すように、根入れを有する杭基礎について検討する。地盤、杭、根入れ部の主要な解析パラメータは、表 4、表 5 に示す通りである。

5.1 根入れ底部の接触条件の影響

最初に、基礎底部の接触条件の影響について考察する。ここでは、根切り底の埋土の影響を検討するために、図 22 に示すように、基礎底部が原地盤と密着・非接触の 2 ケースと、埋土が存在するケースの計 3 ケースを考える。ただし、地盤は一様地盤と想定している。

インピーダンスと基礎入力動を、図 23、図 24 に示す。高振動数域では、非接触の場合のみ差異が生じているが、低振動数域では三者が概ね一致しており、基礎底面の接触条件が、相互作用特性に与える影響は大きくはないことが分かる。

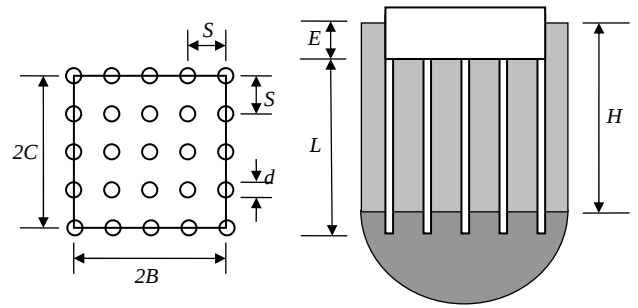


図 21 根入れを有する杭基礎のモデル

表 4 根入れを有する杭基礎の解析パラメータ

杭		根入れ部
本数 $N=5 \times 5$	$E_p=2.1 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$	$2B=30\text{m}$
$d=1.5\text{m}$	$\nu_p=1/6$	$2C=30\text{m}$
$S=7.5\text{m}$	$\rho_p=2.4\text{t/m}^3$	$E=4\text{m}$
$L=16\text{m}$	$h_p=0.03$	

表 5 地盤の解析パラメータ

表層地盤	支持層
$V_{s1}=150\text{m/s}$	$V_{s2}=300\text{m/s}$
$\rho_1=1.5\text{t/m}^3$	$\rho_2=1.8\text{t/m}^3$
$\nu_1=0.45$	$\nu_2=0.45$
$h_1=0.03$	$h_2=0.03$

また、図 19～20 と比較すると、根入れの存在によってインピーダンスはいずれの方向成分も実部・虚部共に増加しているが、直接基礎の場合ほど根入れによる変動は大きくはない。根入れの存在により、上下及び回転方向成分に見られる杭間の距離によって生じる振動数変動が減少している。これは、根入れの存在により杭部の寄与が減少することと、基礎底部・地盤接触時にマット部の拘束効果が増加するためと思われる。また、基礎入力動は、根入れによる水平動低減効果と回転動増大効果が現れている。

5.2 根入れ基礎と根入れを有する杭基礎の比較

根入れを有する杭基礎のインピーダンスと基礎入力動を、根入れを有する直接基礎および地表面杭基礎の結果と比較する。ただし、図 25 に示すように、根入れを有する杭基礎では基礎底部と地盤が密着していると仮定し、直接基礎と杭基礎は根切りの有無の二者を考える。

インピーダンスは、図 26 に示すように、水平成分と回転・上下成分では傾向が異なる。水平成分では、根入れを有する杭基礎の結果は直接基礎と良く対応している。これに対し、上下成分と回転成分は、根入れを有する杭基礎は低振動数域で杭基礎とよく対応している。ただし、杭基礎に見られる杭間距離に伴う振動数変動は根入れの存在により抑制されている。また、杭基礎については、特に低振動数域では根切りの有無による差は無視できる量である。水平成分と、回転・上下成分との差異は、インピーダンスに及ぼす杭部と根入れ側面部との寄与度が、方向成分によってことなることに起因している。水平成分に関しては、杭の曲げ剛性が小さいため、地盤の圧縮・引張抵抗に伴う根入れ側面部の剛性寄与が支配的になる。波動逸散に関しても根入れ部の前後面からは P 波が逸散するた

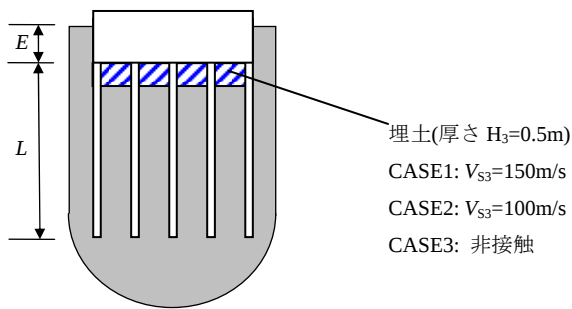


図 22 基礎底面下の埋土を考慮したモデル

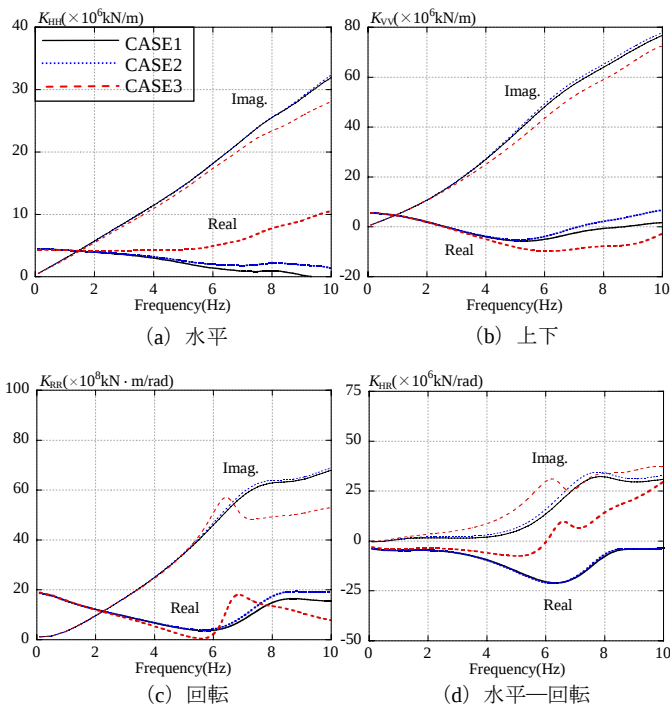


図 23 根入れ底部の接触条件がインピーダンスに与える影響

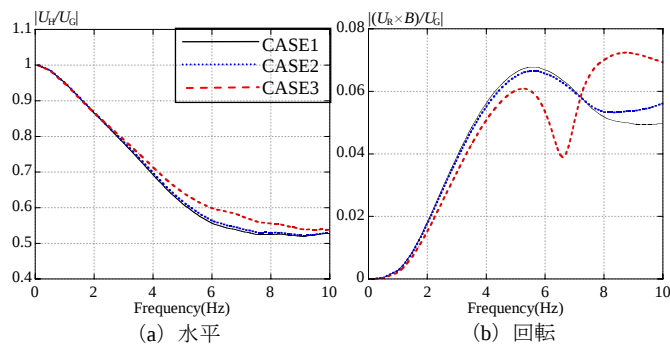


図 24 根入れ底部の接触条件が基礎入力動に与える影響

め大きな波動インピーダンスが期待できる。これに対し、上下および回転成分では、杭の軸剛性が大きく、杭部の寄与が大きいため杭基礎との対応が良くなる。また、杭間距離に伴う振動数変動の抑制については、パイルド・ラフトの場合と同様に、マット基礎による変位拘束効果によると考えられる。

つぎに、図 27 に基礎入力動を比較して示す。CASE5～6 は、根入れに伴う入力低減効果を期待できないため、他の四者と結果が異なる。根入れを有する四者を比較すると、根入れを有する杭基礎は、

根入れ直接基礎と根切りのある杭基礎の結果の中間の結果を与えている。第一次近似としては、限界耐力計算法のように根入れ基礎の基礎入力動を代用することもあり得ることを示している。

6 まとめ

本論では、様々な基礎形式の動的相互作用特性を系統的に分析すると共に、直接基礎、杭基礎、パイルド・ラフト基礎の結果を比較し、地盤、杭、接触条件などの具体的な要因の影響を検討した。得られた主な知見は以下の通りである。

- ①杭基礎の水平インピーダンスは概ね同サイズの直接基礎のそれと対応する。また、支持層の存在により、杭基礎のインピーダンスは、水平成分では、波動の重複反射による振動数変動が生じ、上下成分と回転成分では、低振動数域で実部が増大・虚部が減少し、高振動数域で杭間隔に伴う振動数変動が生じる。基礎入力動に関しては、水平成分は支持層剛性による変動は小さいが、回転成分は支持層の存在に伴う波動の重複反射により励起されやすくなる。
- ②杭応力は、杭頭水平加振時には、表層地盤が柔らかいほど杭の曲げモーメントが大きくなり、深部まで応力が伝達されるが、杭端ではほぼゼロとなる。これに対し、回転加振の場合、軸力は杭端まで伝達される。また、隅杭と内部の杭との応力負担の仕方は、杭頭加振では隅杭で大きく、地盤振動時にはほぼ均等に負担する。さらに、表層地盤の硬さは静的群杭効率に余り影響しないが、表層が軟弱になると重複反射に伴って群杭効率の振動数変動が顕著になる。
- ③杭頭条件がインピーダンスに及ぼす影響は水平成分で大きく、ピン接合時は実部・虚部ともに大幅に減少するが、上下成分・回転成分で影響はほとんどない。基礎入力動は、ピン接合の場合は剛接に比べて水平成分が増大し、回転成分は減少する。杭頭の接合部を柔らかくすることは杭応力の低減には寄与するが建物への入力を増加させる。
- ④本論の例題で用いた比較的長尺の杭の場合には、杭端の拡底がインピーダンスや基礎入力動に与える影響は小さい。
- ⑤パイルド・ラフト基礎の 1.5m 程度のラフト部の拡大によるインピーダンス・基礎入力動への影響は小さい。
- ⑥パイルド・ラフト基礎のインピーダンスは、水平成分では、杭基礎や直接基礎と良く対応する。一方、上下成分と回転成分は低振動数域で杭基礎とほぼ一致する。
- ⑦根入れを有する杭基礎の場合、基礎底面の埋土がインピーダンスと基礎入力動に与える影響はあまり顕著ではない。
- ⑧根入れを有する杭基礎のインピーダンスは、水平成分では根入れ基礎と良く対応し、上下成分と回転成分は杭基礎と良く対応している。基礎入力動は根入れ基礎と杭基礎の中間的な性質を示す。

これらの結果は、単独の基礎の特性を扱う際に有用な知見といえる。特に、解析モデルの作成において、影響の大きい要因と小さい要因を明らかにすることは非常に重要であり、本論の結果はその裏付けを与える意味を持っている。

謝辞

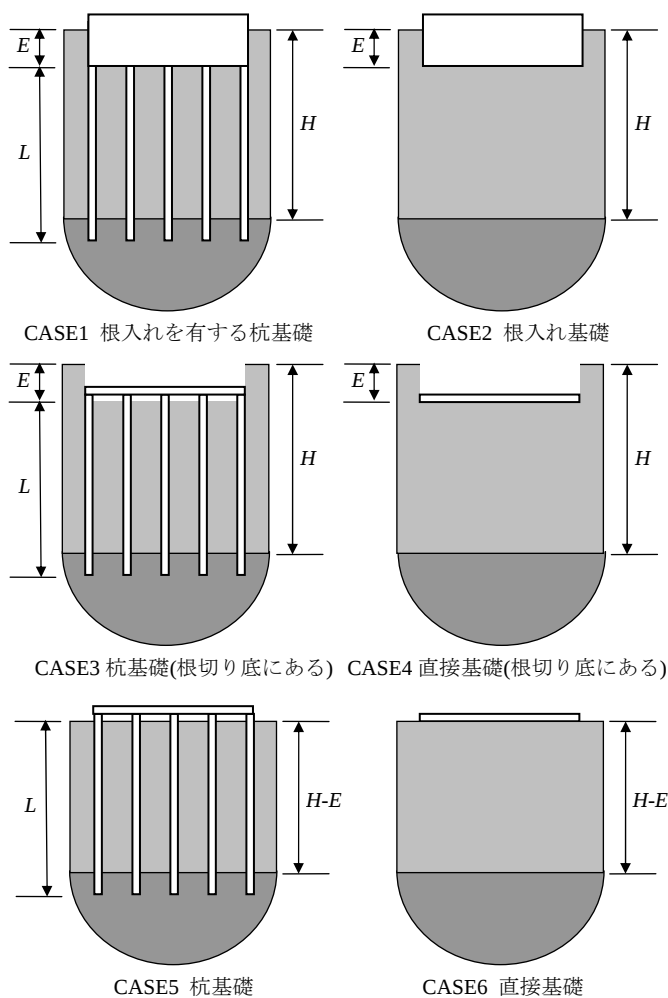


図 25 根入れを有する杭基礎と根入れ基礎、杭基礎との比較

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。同大学院生の酒井理恵子氏に協力を頂いた。また、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) Yoshida, K.: Fundamental Studies on Soil-Structure Interaction Problems, IRI Report 95-01, SHIMIZU CORPORATION, 1995
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 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報告集, No.492, pp.53-60, 1997.2
- 6) 飯場正紀: 振動台実験に基づく建築物・基礎の地震時挙動及び地盤の影響を取り入れた地震応答評価法の構築, 名古屋大学博士論文, 2002
- 7) 高野真一郎, 安井謙: 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
- 8) 文学章, 福和伸夫: 隣接建物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報告集, No. 600, pp.97-105, 2006.2
- 9) 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

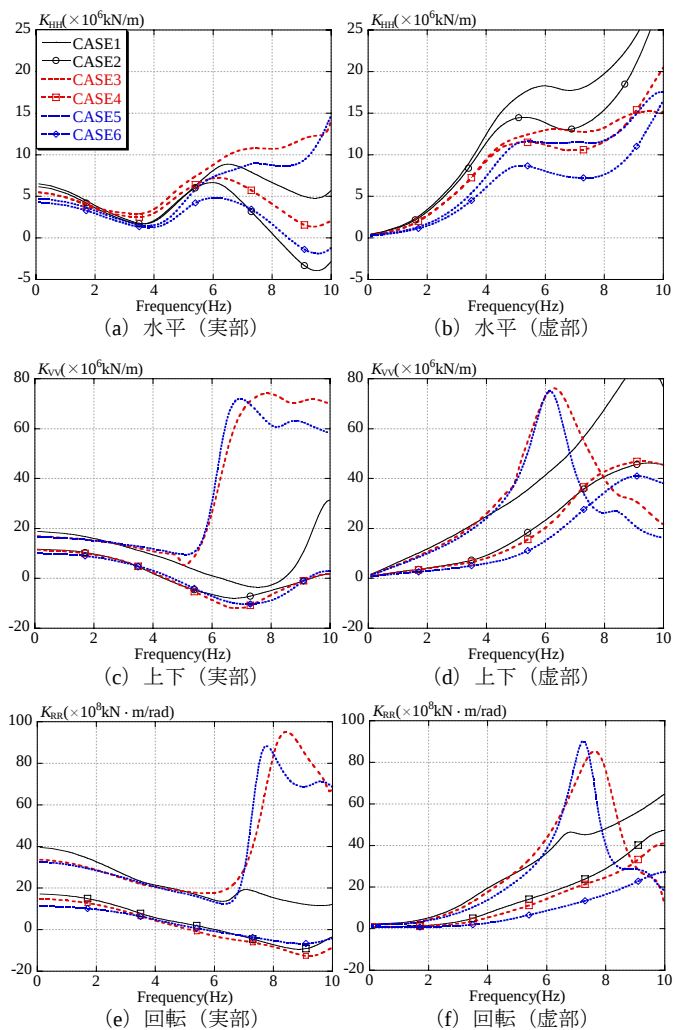


図 26 根入れ基礎、杭基礎、根入れを有する杭基礎のインピーダンスの比較

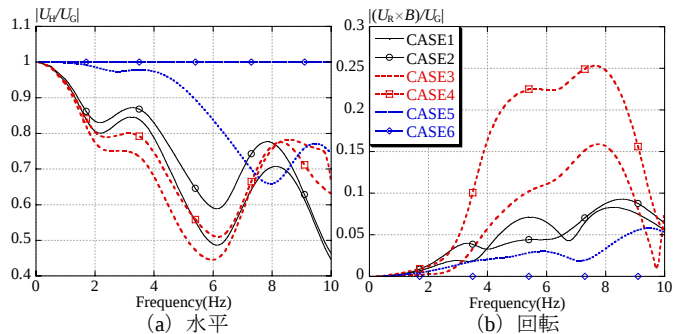


図 27 根入れ基礎、杭基礎、根入れを有する杭基礎の基礎入力動の比較

- ぼす影響, 構造工学論文集, Vol. 52B, pp. 23-31, 2006. 3
- 10) 日本建築学会: 入門・建物と地盤との動的相互作用, 1996
 - 11) J. Lysmer, R.M. Tabatabaie, F. Tajirian, S. Vahdani, F. Ostadan: SASSI - A System for Analysis of Soil-structure Interaction, UCB/GT/81-02, University of California, 1981
 - 12) 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
 - 13) 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