

大規模群杭の効率的な動的相互作用解析法

AN EFFICIENT SOIL STRUCTURE INTERACTION ANALYSIS METHOD FOR FOUNDATION WITH A LARGE NUMBER OF PILES

文学章^{*1}, 福和伸夫^{*2}, 小島宏章^{*3}, 酒井理恵子^{*4}

Xuezhang WEN, Nobuo FUKUWA, Hiroaki KOJIMA and Rieko SAKAI

A simplified and efficient soil structure interaction method is presented for foundation with a large number of piles. Some adjacent piles are replaced by a single equivalent pile to reduce the number of degrees of freedom. Thus, in order to correspond with the equivalent piles, the multi-point load solutions, which are the weight average of the results derived from the thin layered element method, are introduced to compute the compliance of soil. Using the method, not only impedances but also foundation input motions can be estimated. The method can also be expanded to the analysis of piled raft foundation and embedded foundation on pile group. The comparison of the results by the method with those by rigorous method is made and it is verified that the method is of sufficient accuracy and good efficiency.

Keywords: Soil-Structure Interaction, Reduction, Impedance, Foundation Input Motion, Pile Foundation, Piled Raft Foundation, Embedded Foundation on Pile Group

地盤と構造物との動的相互作用、縮約、インピーダンス、基礎入力動、杭基礎、パイルド・ラフト基礎、根入れを有する杭基礎

1 はじめに

日本の大都市では、戦後、海、河川・池や水田を埋立て、軟弱な地盤に多数の杭支持建物を建設してきた。杭の地震時挙動を適切に評価するには、群杭効果を適切に考慮することが必要であるが、多数の杭で支持された問題は、計算上の限界から、解析が困難な場合が多い。例えば、図 1(a) に示すように既製杭を利用する場合には、杭径が小さいために一つのパイルキャップの下に多数の杭を設置する例が多い。このため、建物全体としては数百本の杭が利用される。また、火力発電所などのような大規模建物の場合にも、場所打ちコンクリート杭を利用したとしても、数百本の杭となる。このような大規模群杭問題では、解析自由度が 1 万を軽く超えてしまう。群杭の動的剛性マトリクスは各自由度が全て連成したフルマトリクスとなるため、事実上、解析が困難となる。このようなことから、大規模群杭の問題では、解析自由度の縮約が最重要課題となる。そこで、本論では、大規模群杭の問題を、近接する複数の杭を集約杭に置換することにより、小規模の集約群杭の問題に置換する方法を提案する。例えば、パイルキャップ下に多数の既製杭を利用する場合には、パイルキャップ毎に 1 本の集約杭に置換する、といった形で利用する。

杭―地盤系の動的相互作用に関する研究は、過去から数多く行われてきた^(例えば 1~3)。しかし、通常の方法では大規模群杭の解析は困難な

ため、問題を簡略化して計算量を減らす工夫が行われてきた。群杭の簡易評価法に関する既往の研究として、Dobry ら⁴⁾は 2 本杭のインピーダンスを単杭のインピーダンスと杭間距離などに依存する影響係数によって評価し、この影響係数を用いて群杭のインピーダンスを算出する手法を提案した。これに対し、Gazetas ら⁵⁾、Makris ら⁶⁾は柔で長い杭では影響係数の誤差が大きいのを指摘している。また、土方ら⁷⁾は薄層要素法による 2 本杭の杭頭のインピーダンスを用い、影響係数の評価法を改善している。さらに、藤森ら⁸⁾は以上の成果を利用して杭応力の簡易評価法を提案している。一方、野添⁹⁾は動的 Winkler ばねと影響係数を組み合わせた方法を提案している。また、増田ら¹⁰⁾は 2 本杭間で求めた杭頭柔性マトリクスを用い、群杭基礎全体についての杭頭柔性マトリクスをまとめる手法を提案している。

しかし、これらの方法では、2 本の杭の干渉を評価する時、それ以外の杭の影響を考慮していないため、杭の本数が多くなると、誤差が大きくなる。また、インピーダンス評価に関する研究が殆どであり、基礎入力動に関する研究は少ない。さらに、パイルド・ラフト基礎や根入れを有する杭基礎に拡張することも容易ではない。

一方、杭―地盤系を連成質点系にモデル化した Penzien モデル¹¹⁾や修正 Penzien モデル¹²⁾の流れをくむ方法として、宮本ら¹³⁾や阿世賀ら¹⁴⁾がある。宮本ら¹³⁾は薄層要素法を用いて地盤ばねを算定し、さらに

*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

*3 名古屋大学大学院環境学研究科 助手・博士 (工学)

*4 名古屋大学大学院環境学研究科 大学院生

Lecturer, Hunan University, China, Dr. Eng.

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

Research Assoc., Graduate School of Environmental Studies, Nagoya Univ., Dr. Eng.

Graduate Student, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya Univ.

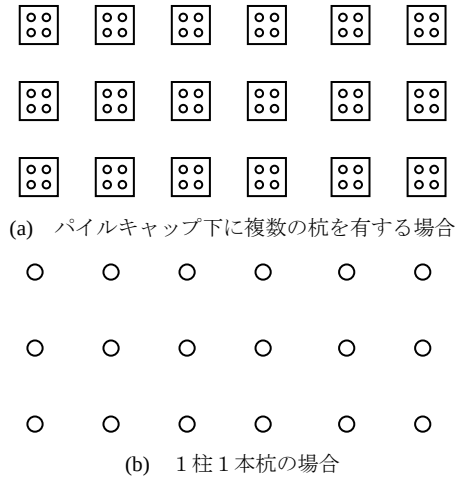


図1 杭基礎

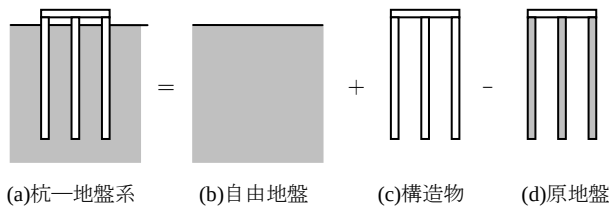


図2 容積法による杭一地盤系の解析

群杭の変位は同一深さで同一である仮定した簡易法を提案し、阿世賀ら¹⁴⁾は簡単な影響係数法(Nogami法¹⁵⁾)を適用した手法を提案した。

既往の研究の多くは杭の自由度を杭頭に集約することにより、計算量を減少する立場をとっている。これに対し、本論では、上下方向の離散化は保持したまま、水平方向に近接する複数杭を1本杭に集約する方法を提案する。この方法は、インピーダンスのみではなく、基礎入力動の解析にも適用でき、パイルド・ラフト基礎や根入れを有する杭基礎にも拡張できる。主要な要因(例えば、パイルキャップ間距離)が保存されるので、近似度が高い。以下には、本論で提案する方法を概説すると共に、インピーダンスと基礎入力動を精算解と比較して、提案方法の有効性を検証する。

2 解析手法

本論で用いる解析法は、薄層要素法と有限要素法を、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り、図2に示すように、基礎と周辺地盤とを分離して、インピーダンスや基礎入力動を算定している^{16,17)}。

地盤は、図3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を、二層の地盤の場合は支持杭を想定したことに相当する。地盤の薄層の分割は、対象振動数範囲での波長の変化を表現するため、 $18 \times 1\text{m} + 32 \times 1\text{m} + 50 \times 2\text{m} + 25 \times 4\text{m}$ とした。

2.1 インピーダンスと基礎入力動の評価

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、

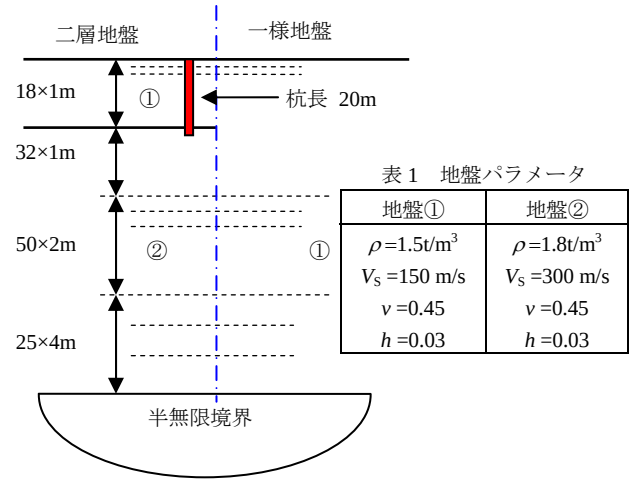


図3 二層地盤と一様地盤

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

であり、 $[K]$ 、 $[M]$ 、 $\{u\}$ 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。また、上添字 G、S、E はそれぞれ自由地盤、構造物、構造物に置換した原地盤を意味する。原地盤の剛性マトリクスは、構造物と同種類の有限要素でモデル化し、杭については梁要素で、根入れ部についてはソリッド要素で評価する。

自由地盤の剛性マトリクス $[K]^G$ は次式のように得られる。

$$[K]^G = [G]^{-1} \quad (2)$$

ここに、 $[G]$ は自由地盤のグリーン関数マトリクスで、薄層要素法^{18)~20)}のディスク加振解(加振点との受振点在同一鉛直軸上の場合)と点加振解を用いて評価しており、各節点は3自由度としている。

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)とそれ以外の自由度(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。

$$\begin{bmatrix} [S_{FF}] & [S_{FO}] \\ [S_{OF}] & [S_{OO}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u_F\} \\ \{u_O\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{F_F\} \\ \{F_O\} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

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(3)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とができる。これにより、基礎のインピーダンスは式(4)のように評価することができる。

$$[K_F] = [T]^T [S_{FF}]^* [T] \quad (4)$$

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(5)で表せることから、これを式(3)に代入して、基礎の応答を評価している。

$$\begin{Bmatrix} \{F_F\} \\ \{F_O\} \end{Bmatrix} = [K]^G \{u\}_G = \begin{bmatrix} [K_{FF}]^G & [K_{FO}]^G \\ [K_{OF}]^G & [K_{OO}]^G \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u_F\}_G \\ \{u_O\}_G \end{Bmatrix} \quad (5)$$

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。

2.2 精算法

杭毎に離散化し、上下方向の要素分割が十分であれば、誤差が小さ

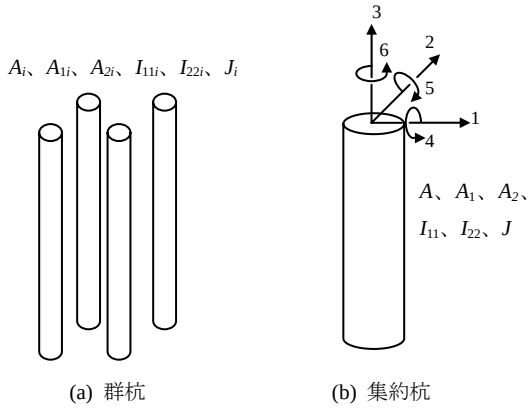


図4 群杭と集約杭の断面パラメータ

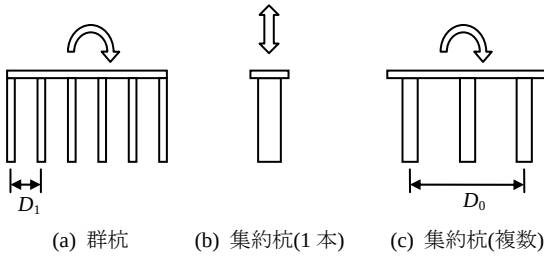


図5 群杭と集約杭の回転剛性

い結果が得られる。以降、これを精算解と呼ぶ。ただし、式(2)に示したマトリクス逆行列の乗除算の計算量は自由度の3乗に比例するため、杭本数が多い場合、コンピュータのメモリと計算時間の制限により実用上解析が困難になる。

2.3 簡易評価法

上述の問題を解決するために、近接する複数の杭を1本杭に集約する簡易評価法を提案する。ここでは、図4～5に示すように、群杭をブロック化し、各ブロックで複数の杭を1本の集約杭に置換する。集約杭の剛性については、集約前の杭の水平剛性と上下剛性を保存するように集約する。杭周囲の地盤ばねについては、グリーン関数として、ブロック内の同一平面上の杭位置で同時加振した場合の受振面上でのグリーン関数を、加振面積を重みとして平均した値を用いる。なお、根入れ側面部、及び、パイルト・ラフト時の基礎底面位置の自由度は低減されない。また、剛基礎部の変位拘束条件は集約前と同様に扱う。

2.3.1 集約杭の断面定数

図4に示すように、集約杭と群杭の水平剛性および上下剛性を保存するために、集約杭の断面パラメータは群杭の断面パラメータの単純和とする。

$$A = \sum A_i \quad (6a)$$

$$A_1 = \sum A_{1i} \quad (6b)$$

$$A_2 = \sum A_{2i} \quad (6c)$$

$$I_{11} = \sum I_{11i} \quad (6d)$$

$$I_{22} = \sum I_{22i} \quad (6e)$$

$$J = \sum J_i \quad (6f)$$

ここに、 $A, A_1, A_2, I_{11}, I_{22}, J$ はそれぞれ軸断面積、1軸(x)方向と2軸(y)方向のせん断断面積、1軸と2軸まわりの断面2次モーメントおよびねじり断面2次モーメントである。また、集約杭の座標位

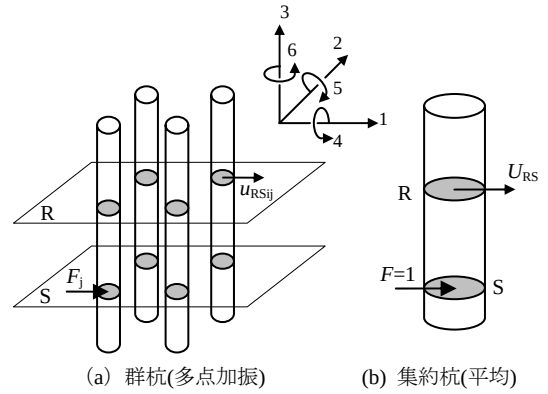


図6 多点加振解

置は集約する杭断面の図心とする。

$$X = \sum x_i A_i / \sum A_i \quad (7a)$$

$$Y = \sum y_i A_i / \sum A_i \quad (7b)$$

群杭全体の回転抵抗については、図5に示すように、集約杭の上下剛性に基礎中心からの距離を積和することにより得ることとし、集約杭の回転剛性は無視する。このため、ブロックを大きくしすぎると、集約杭の回転抵抗を無視した影響が大きくなり誤差が発生する原因となる。ブロック化による誤差については、3節で詳しく考察する。

2.3.2 集約杭に用いる薄層解（多点加振解）

図6に示すように、集約杭に適用する薄層解は以下のように同一面上の杭位置に同時加振した場合の受振面上の杭位置変位の重み付き平均変位とする。すなわち、S節面に作用する加振力によるR節面の変位は、群杭のS節面の多点加振によるR節面の多点の変位を重み付き平均した値とする。S節面の多点に作用する加振力の総和が1とすると、S節面上のj杭の加振力 F_j は次式のように書くことができる。

$$F_j = \frac{w_j}{\sum_{k=1}^{N_s} w_k} \quad (8)$$

ここに、 w は重み、 N_s はブロック内の杭の本数である。この加振力によるR節面上のi杭位置の変位 u_{RSi} は次式のように書くことができる。

$$u_{RSi} = \sum_{j=1}^{N_s} F_j u_{RSij} = \sum_{j=1}^{N_s} \left(\frac{w_{Sj}}{\sum_{k=1}^{N_s} w_{Sk}} u_{RSij} \right) = \frac{\sum_{j=1}^{N_s} w_{Sj} u_{RSij}}{\sum_{k=1}^{N_s} w_{Sk}} \quad (9)$$

ここに、 u_{RSij} は薄層要素法による加振解である。R面の各杭位置の変位を重み付き平均すると、次式が得られる。

$$U_{RS} = \frac{\sum_{i=1}^{N_R} w_{Ri} u_{RSi}}{\sum_{i=1}^{N_R} w_{Ri}} = \frac{\sum_{i=1}^{N_R} \sum_{j=1}^{N_s} w_{Ri} w_{Sj} u_{RSij}}{\sum_{i=1}^{N_R} w_{Ri} \sum_{k=1}^{N_s} w_{Sk}} \quad (10)$$

本論では、薄層解として、重み w としては加振面及び受振面の杭の断面積を用いる。杭断面が同じ場合は次式のように書くことができる。

$$U_{RS} = \frac{\sum_{i=1}^{N_R} \sum_{j=1}^{N_s} u_{RSij}}{N_R N_s} \quad (11)$$

なお、図6は、同一のブロック内での加振解の誘導の例を示しているが、異なるブロック間での多点加振解も全く同じ手続きで求めることができる。

このような手続きを経ることにより、各ブロックの複数杭が水平剛性と上下剛性が保持された1本の集約杭に置換され、各集約杭には、集約杭用の薄層加振解(11)式が適用されることになる。これにより、大規模群杭の問題が、小規模集約群杭を解く問題に変換され、解析自由度が大幅に縮約され、実用可能な解析になる。

3 簡易評価法の有効性の検討

本論で提案した簡易評価法の妥当性を検証するために、動的相互作用の基本特性であるインピーダンスと基礎入力動を算出し、群杭を群杭として求めた結果（精算解と呼ぶ）と比較する。

3.1 パイルキャップ下に複数の杭がある場合

既製杭のように、パイルキャップ下に複数の杭が存在する問題を考

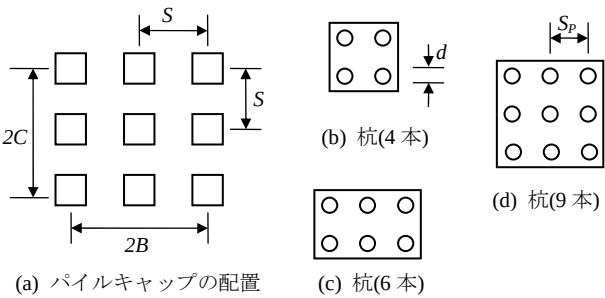


図7 パイルキャップ下に複数の杭が存在する問題

表2 解析パラメータ

パイルキャップ	杭	
数 3×3、5×3	本数 4、6、9	$E_p=2.1 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$
$2B=15\text{m}$ 、 30m	杭径 $d=0.6\text{m}$	$\nu_p=1/6$
$2C=15\text{m}$	間隔 $S_p=1.5\text{m}$	$\rho_p=2.4\text{t/m}^3$
$S=7.5\text{m}$	長さ $L=20\text{m}$	$h_p=0.03$

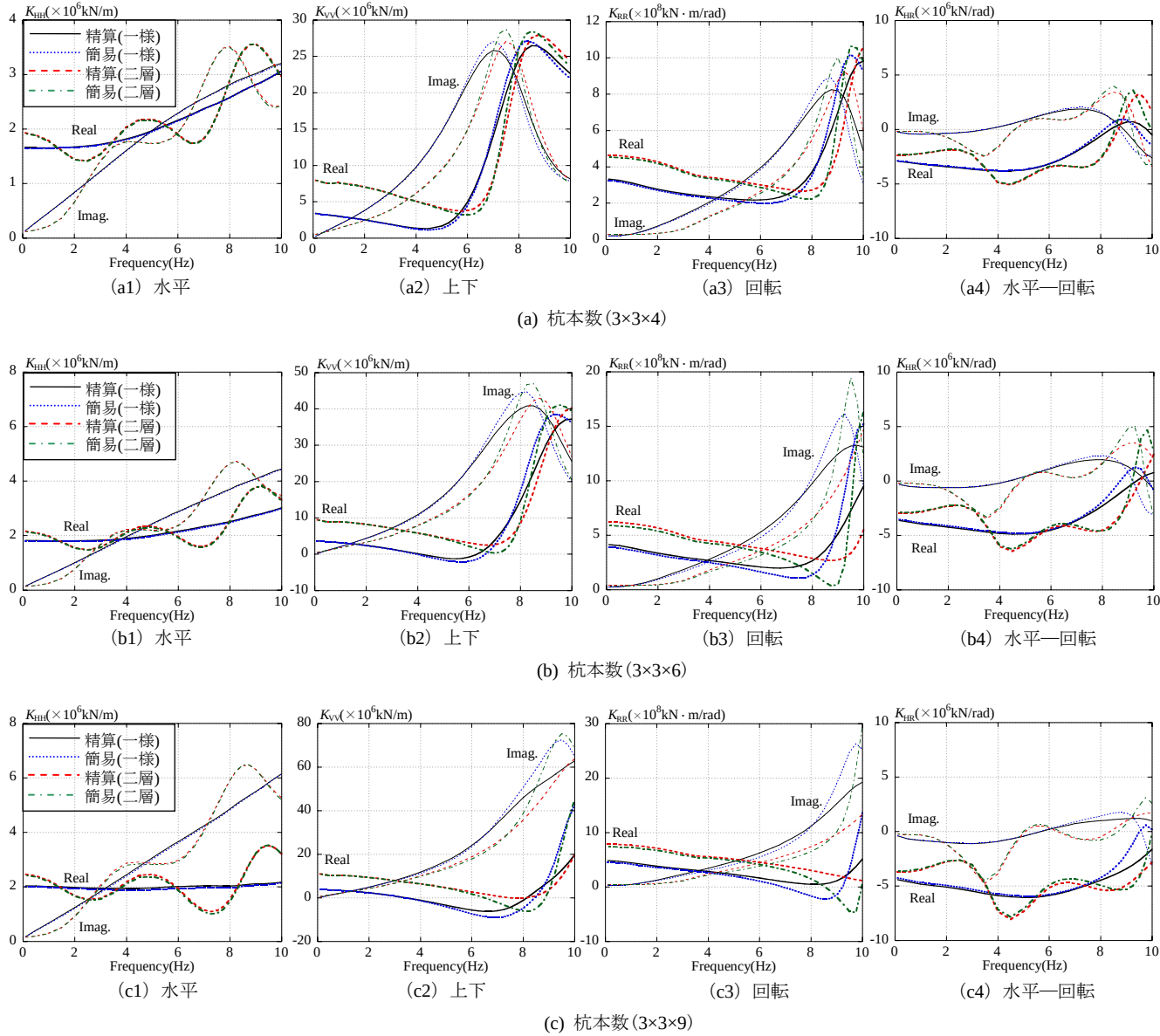


図8 パイルキャップ下に複数の杭を有する場合のインピーダンス

える。地盤は、図3に示した一様地盤(摩擦杭)と二層地盤(支持杭)を考える。図7に示すように、等間隔に正方形配置したパイルキャップの下にそれぞれ4本、6本および9本の既製鉄筋コンクリート杭が存在する場合を想定する。主要な解析のパラメータを表2に示す。ただし、基礎は無質量剛基礎とし、杭とパイルキャップは剛接されているとする。また、入射波は、鉛直下方からS波が入射するとする。群杭の集約はパイルキャップ毎に行うことにする。

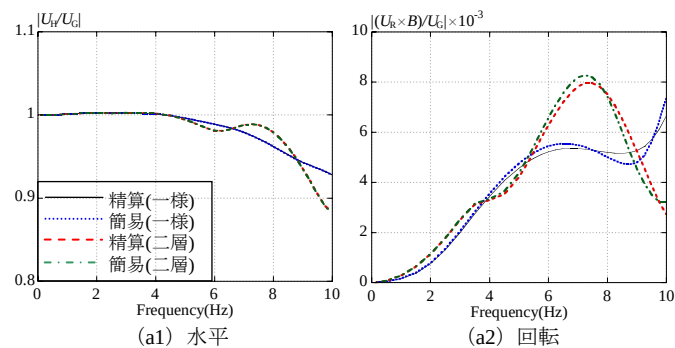
最初に、パイルキャップが正方形配置された15m×15mの基礎の問題を考える。図8に杭本数が3×3×4、3×3×6、3×3×9の場合について、簡易法と精算法のインピーダンスを比較して示す。何れの結果も、簡易解と精算解とは良い対応を示している。水平成分は両者は概ね一致しており、上下成分と回転成分については、高振動数域で、集約する杭本数が多くなると若干差異が生じている。また、回転成分については、集約杭の回転抵抗を無視しているため、静的バネが若干小さく評価されており、パイルキャップ下の杭本数が4本、6本、9本杭の場合

差異はそれぞれ2%、5%、6%である。

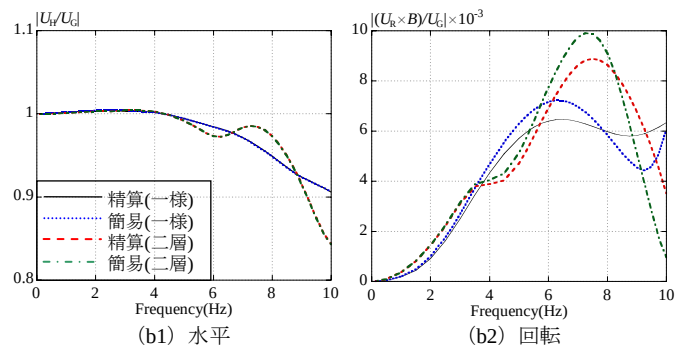
つぎに、図9に基礎入力動を示す。インピーダンスと同様に、水平成分は、簡易解と精算解はほぼ一致しており、回転成分では、高振動数域で両者に差異が生じている。

ちなみに、計算効率に関しては、杭本数が3×3×9の場合、3×3本杭に集約すると、解析自由度は1/9、記憶容量は1/81、入出力も含む全計算時間は約1/180になった。なお、根入れが存在したり、パイルド・ラフト基礎の場合には、剛基礎部と地盤との接触自由度は低減されないで、地表面杭基礎に加えると計算量低減効果は減少する。

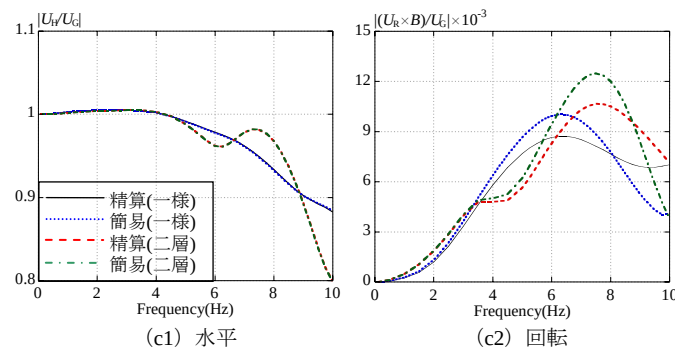
つぎに、基礎の大きさの影響を考察するために、基礎のサイズが15m×30mの場合について検討する。パイルキャップ下の杭本数は4本とし、全体の杭本数が5×3×4の場合を想定する。図10にインピーダンスと基礎入力動を示す。図8(a)及び図9(a)に示した3×3×4本杭の場合と比較すると、基礎寸法が増加する長辺方向で、誤差が小さくなっている。これは、基礎サイズの増大により全体の回転剛性に対する集約



(a) 杭本数(3×3×4)

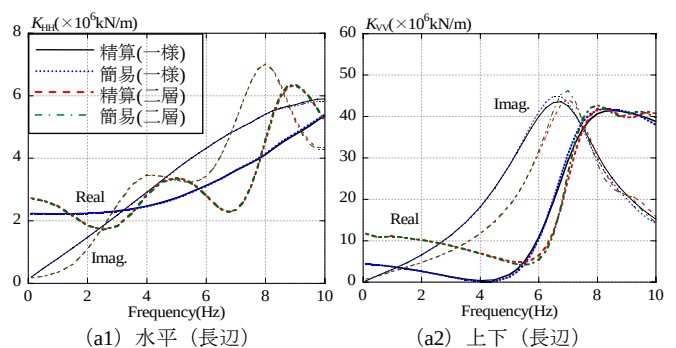


(b) 杭本数(3×3×6)



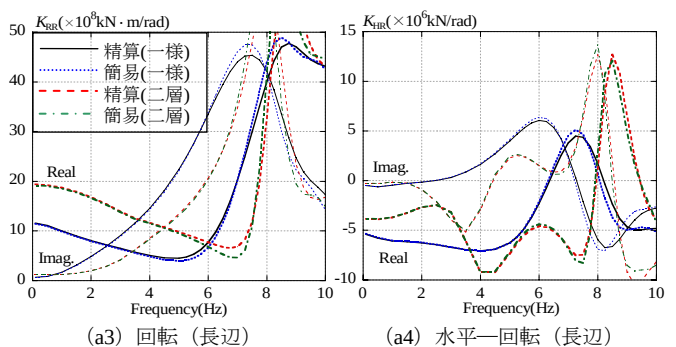
(c) 杭本数(3×3×9)

図9 パイルキャップ下に複数の杭を有する場合の基礎入力動



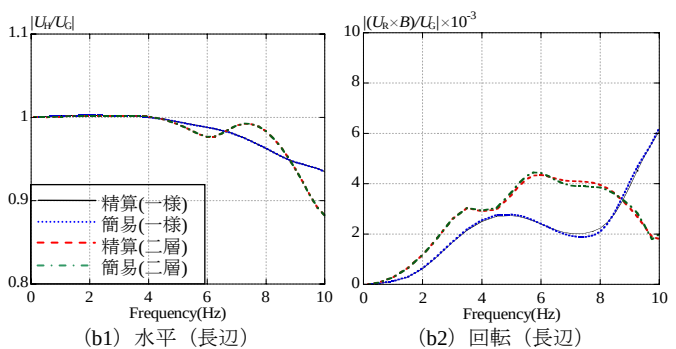
(a1) 水平 (長辺)

(a2) 上下 (長辺)



(a3) 回転 (長辺)

(a4) 水平—回転 (長辺)



(b1) 水平 (長辺)

(b2) 回転 (長辺)

図10 杭本数が5×3×4の場合の結果の比較

杭の上下剛性の寄与が増し、誤差の原因となる集約杭の回転剛性の寄与が減少するためである。

3.2 パイルド・ラフト基礎と根入れを有す杭基礎の場合

つぎに、パイルド・ラフト基礎と根入れを有す杭基礎の場合について、簡易法の検証を行う。図 11 に示すように、パイルド・ラフト基礎の場合 ($E=0\text{m}$) および根入れを有する杭基礎の場合 ($E=4\text{m}$) を想定する。パイルキャップが 3×3 の正方形配置で、パイルキャップ下の杭

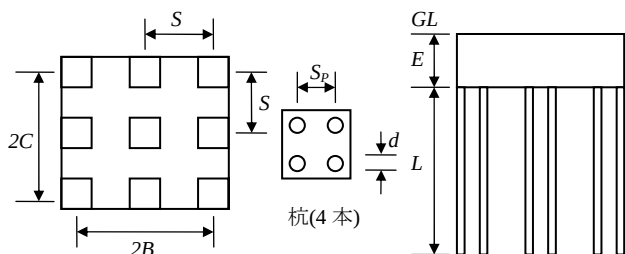
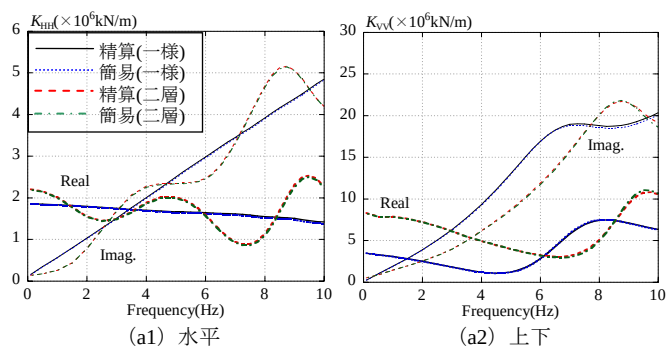
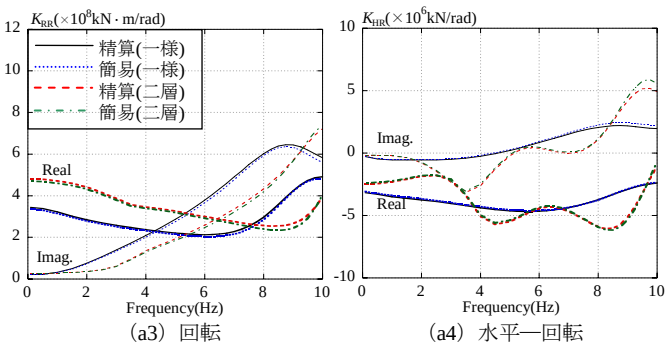


図 11 根入れを有する場合



(a) インピーダンス



(b) 基礎入力動

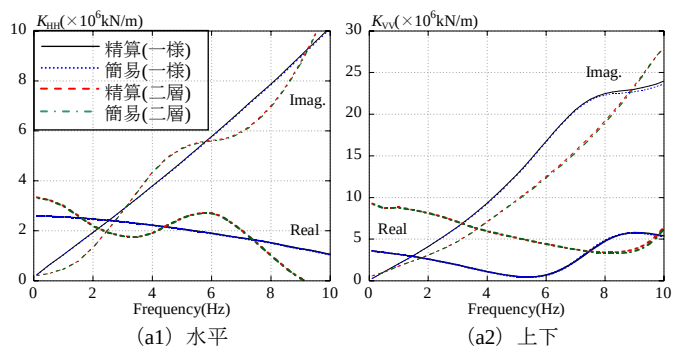
図 12 パイルド・ラフト基礎 (杭本数 $3\times 3\times 4$)

本数が 4 本の場合を考える。根入れ部はソリッド要素で評価し、要素分割は $12\times 12\times 2$ としている。主要な解析パラメータは表 1、表 2 に示したものを用いる。ただし、根入れ深さが $E=4\text{m}$ の場合には、表層厚さを統一するため、杭長は $L=16\text{m}$ とする。根入れを有する場合には、基礎底面と地盤とは密着させている。

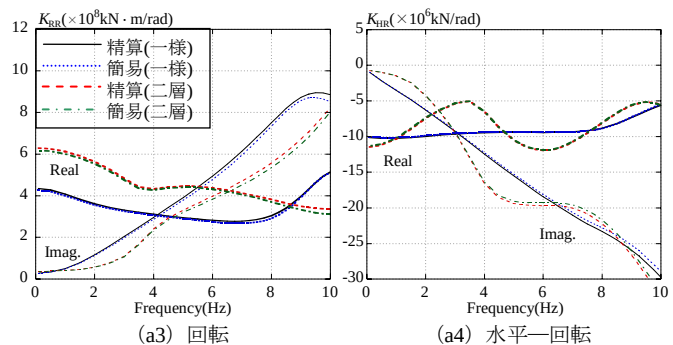
図 12、図 13 にパイルド・ラフト基礎および根入れを有する杭基礎の場合の、インピーダンスと基礎入力動を示す。杭基礎の場合と同様に、インピーダンスと基礎入力動は、水平成分ではほぼ一致している。上下成分と回転成分についても、根入れの無い杭基礎の場合と異なり、簡易法と精算法の差は非常に小さい。これは、ラフトや根入れの存在により、相対的に誤差原因となる集約杭の回転剛性の寄与が減少するためである。

3.3 大規模な群杭の場合

つぎに、大規模な群杭の場合を検討する。図 14(a) 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。地盤は二層地盤を想定し、杭は支持層に 2m に根入れさせている。杭の主



(a) インピーダンス



(b) 基礎入力動

図 13 根入れを有する杭基礎 (杭本数 $3\times 3\times 4$)

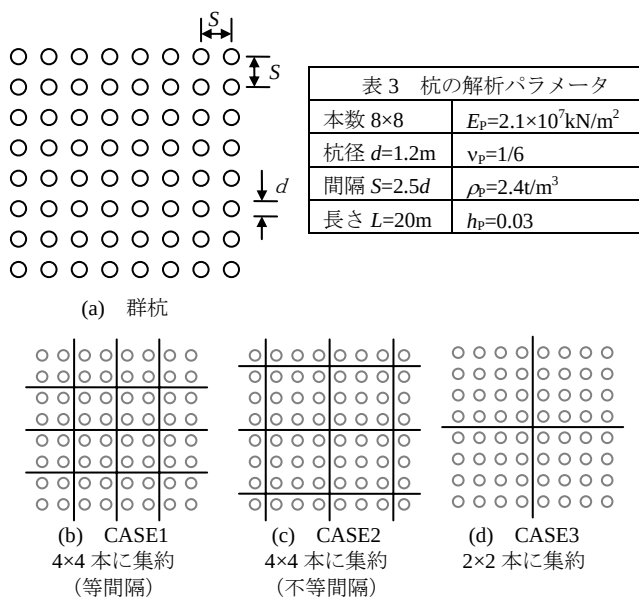


図 14 大規模な群杭

要な解析パラメータを表 3 に示す。杭の集約方法が解析誤差に与える影響を考察するために、図 11(b)～(d)に示すように、4×4 本（等間隔 Mesh と不等間隔 Mesh を想定）、2×2 本に集約した 3 ケースを考える。

図 15 に、インピーダンスと基礎入力動を示す。何れも水平成分については精算解と良く一致しており、分割ブロック数の影響は小さい。これに対して回転成分や上下成分は、2×2 本に集約した CASE3 の場合には、集約範囲と基礎規模の比が大きいため、特に回転成分で精算法との差が大きくなる。静的回転ばね定数の誤差は 23% となっており、インピーダンス虚部も系統的に過小評価している。これに対して 4 分割（Case1）にすると誤差は大きく減少し、さらに、周辺部のみ細かく分割した不等間隔の場合（Case2）には、誤差がさらに小さくなっている。各方向に等分割に n 分割してブロック化した場合の誤差は、正方形断面の断面 2 次モーメントに関する離散的評価とのアナロジーで、理論的には $1/n^2$ となる。これによれば、2 分割の場合は誤差 25%、4 分割の場合には 6% 強の誤差となり、図 15～16 の結果と概ね対応する。従って、 $1/n^2$ の誤差がブロック化の目安になる。基礎入力動についても、水平成分はよく対応しているが、回転成分を過大に評価している。計算時間と精度とのバランスを考えると、4×4～6×6 本に集約することが望ましいと考えられる。

4 まとめ

本論文では、杭本数が非常に多い場合の解析を実用可能な計算量で解析できる杭の集約化の方法を示すと共に解析例を通してその妥当性を検証した。この簡易評価法の特徴は以下の通りである。

- ① 提案手法は、インピーダンスのみではなく、基礎入力動も評価でき、杭の集約化により大幅に計算時間・記憶容量を節約できる。このため、従来は解析が困難だった大規模群杭の解析が容易となる。また、パイルキャップ下に多数の既製杭を設置した場合の解析も、単独場所打ち杭の場合と同等の計算負荷で解析が可能となる。ちなみに、 m 本を集約した場合には、自由度は $1/m$ に、記憶容量は $1/m^2$ に減少する。

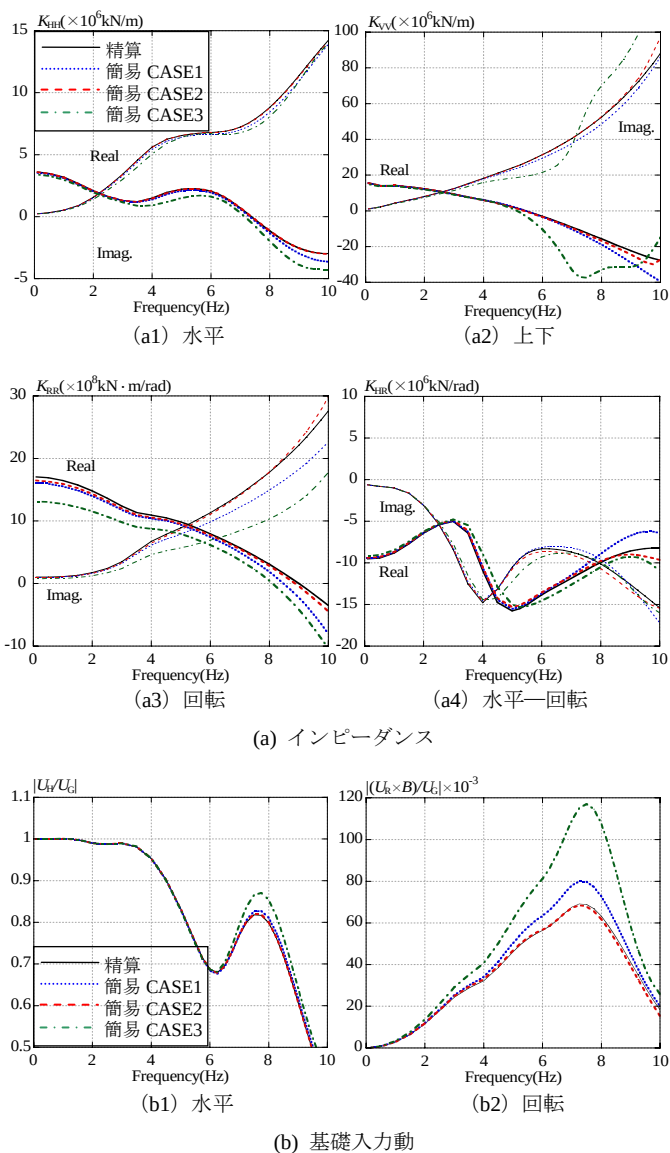


図 15 大規模な群杭の場合 ($S=2.5d$)

- ② インピーダンスについては、水平成分は精算解とほぼ一致する。一方、回転成分では集約杭の回転抵抗の取扱いに伴う誤差が生じる。また、基礎入力動については、水平成分は精算法の結果とほぼ一致し、回転成分は高振動数で差が生じるものの、低振動数域で差は小さい。
- ③ 提案手法は、地表面杭基礎に加え、パイルド・ラフト基礎や根入れを有する場合にも適用できる。ラフトや根入れが存在する場合には、地表面杭基礎の場合よりも近似度が良い。また、この手法は、隣接建物間相互作用や杭頭の接合条件を考慮した解析にも容易に適用ができる。
- ④ 大規模群杭を均等のブロックに集約化した場合、各方向のブロック数を n とすると、回転インピーダンスの誤差は $1/n^2$ 程度となる。このため、実用上は、4×4～6×6 本に集約するとよい。また、端部のみ小さくブロック化することで精度の向上を図ることができる。

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には有益な助言を頂いた。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) 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, 1982.4
- 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) Dobry, R. and Gazetas, G.: Simple Method for Dynamic Stiffness and damping of Floating Pile Groups, Geotechnique, Vol.38, No.4, pp.557-574, 1988.12
- 5) Gazetas, G. and Makris, N.: Dynamic Pile-Soil-Pile Interaction, Part I: Analysis of Axial Vibration, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 20, pp. 115-132, 1991.1
- 6) Makris, N. and Gazetas, G.: Dynamic Pile-Soil-Pile Interaction, Part II: Lateral and Seismic Resposns, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 21, pp. 145-162, 1992.1
- 7) 土方勝一郎, 柳下文雄, 富井隆: 群杭の動的インピーダンス簡便評価法, 日本建築学会構造系論文集, No.455, pp.73-82, 1994.1
- 8) 藤森健史, 八幡夏恵子, 羽鳥敏明, 中川太郎, 田中勝: スウェー・ロッキングモデルに基づいた埋め込みを有する群杭基礎の地震時杭応力簡易評価法 日本建築学会構造系論文集, No.523, pp. 55-62, 1999.9
- 9) 野添久視: 群杭基礎インピーダンスの準動的簡易算定法, 日本建築学会構造系論文集, No.525, pp.49-56, 1999.11
- 10) 増田潔、三浦賢治、喜多村英司、宮本裕司：大規模群杭の動的インピーダンス、日本建築学会構造系論文集, No. 447, pp. 67-66, 1993.5
- 11) Penzien, J., Scheffy, C.F. and parmelee, R.A.: Seismic Analysis of Bridges on Long Piles, Journal of Engineering Mechanics Division, ASEC, Vol. 90, No.3, pp. 223-254, 1964.7
- 12) 河村壮一：埋立軟弱地盤に建つ杭支持建物の地震動観測と解析、(その7)Penzien 型モデルと集約型モデル、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.415-416, 1975.9
- 13) 宮本裕司、酒向裕司、喜多村英司、三浦賢治：非線形、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, No. 471, pp. 41-50, 1995.5
- 14) 阿世賀宏、新井寿昭、笠原章、ほか4名：動的相互作用ばねを用いた地盤一杭基礎系の動的応答解析の一手法、日本建築学会構造系論文集, No. 526, pp. 45-52, 1999.12
- 15) Nogami, T.: Flexural Response of Grouped Piles Under Dynamic Loading, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 13, pp. 321-336, 1985.3
- 16) 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
- 17) 文学章: 地盤と構造物との動的相互作用における基礎形式・基礎形状・隣接建物の影響に関する解析的研究, 名古屋大学学位論文、2006.3
- 18) Tajimi, H.: A Contribution to Theoretical Prediction of Dynamic Stiffness of Surface Foundation, The 7th World Conference on Earthquake Engineering, Vol. 5, pp. 105-112, 1980.9
- 19) Wass, G.: Dynamisch Belastete Fundamente auf Geschichtetem Baugrund, VDI-Berichte, Nr. 381, pp. 185-189, 1980
- 20) Kausel, E.: An Explicit Solution for the Green Function for Dynamic Loads in Layered Media, Research Report R81-13, Department of Civil Engineering, M. I. T., Cambridge, Massachusetts, 1981