



地中の残置杭が新設杭基礎の基礎入力動に及ぼす影響に関する解析的研究

メタデータ	言語: jpn 出版者: 日本建築学会 公開日: 2016-09-13 キーワード (Ja): 残置杭, 杭基礎, 基礎入力動, 有限要素法, 薄層法 キーワード (En): Existing pile, Pile foundation, Foundation input motion, Finite element method, Thin layered element method 作成者: 永井, 宏, 土屋, 勉, 葛西, 勇紀 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10258/00008994

地中の残置杭が新設杭基礎の基礎入力動に及ぼす影響に関する解析的研究

AN ANALYTICAL STUDY ON FOUNDATION INPUT MOTION OF NEW PILE FOUNDATION WITH OLD PILES LEFT UNDERGROUND

永井 宏*, 土屋 勉**, 葛西 勇紀***

Hiroshi NAGAI, Tsutomu TSUCHIYA and Yuki KASAI

Reuse of existing foundations can be economical and ecologically beneficial when a structure is rebuilt. However, old underground piles are not reused because the new foundation plan is different or the piles lack sufficient bearing capacity. In this study, a numerical analysis is performed to determine the foundation input motion during an earthquake for new pile foundations in the case where old piles have been left underground. Dynamic soil-pile interactions and pile group effects such as wave propagation from adjacent piles are taken into consideration. The analysis is carried out with the aim of revealing the influences of the diameter, number and layout of the unused piles on the foundation input motion. The results indicate that when the diameter of the existing piles is large, and the new pile foundation is constructed in close proximity to them, the foundation input motion is larger than in the case where there are no existing piles by frequency. Furthermore, when the existing piles have a nonuniform layout, twisting of the new foundation can occur.

Keywords : Existing pile, Pile foundation, Foundation input motion, Finite element method, Thin layered element method

残置杭, 杭基礎, 基礎入力動, 有限要素法, 薄層法

1. はじめに

地球温暖化や産業廃棄物の削減といった環境問題に対して, 建設ストックの再生利用・再資源化が求められ, 基礎構造の分野では既存基礎・既存杭の利活用が注目されている^{1), 2)}. 通常, 基礎は地中に埋設されているため, 特殊な条件下以外では上部構造物に使用されている部材よりもコンクリートの中酸化など材料の劣化は遅いと報告されている. そのため, 既存基礎の利用は, 工期短縮, コスト削減, 建設廃棄物や施工に伴うCO₂の排出など環境負荷の低減など経済面・環境面において有効性が高い. 2000年以降には既存杭の再利用に関する手引きやマニュアル等³⁾⁻⁵⁾が出版され, 現在では超高層建物への利用事例^{例えば6)-8)}も報告されている. 既存杭の健全性・耐久性に関する調査・診断技術の開発も進展しており, 建設時の設計資料や施工記録の保管, 施工時の品質管理が確保されていれば, 杭の再利用化を図ることが可能となろう. 老朽化した構造物, オフィスビルの機能性の追加等による建替工事が増加すると予測されていることから, 再利用の有用性は今後より一層高まると考えられる.

しかし, 新設建物を設計する上で平面プラン上の柱位置関係や既存杭の水平耐力不足等の問題により再利用ができず, また杭解体・撤去に伴う近隣構造物や周辺地盤への影響防止等の観点から, 地中にそのまま残置されるケースも想定される.

このような既存杭の残置(残置杭)に対して, 既往の研究では残置杭が新規杭の鉛直支持力や水平抵抗に及ぼす影響を数値解析⁹⁾⁻¹¹⁾および模型実験^{12), 13)}にて検討されている. また, 残置杭が存在する地盤上に建てられた直接基礎の実建物に対する沈下計測¹⁴⁾も行われている. しかし, 地震時における地盤震動によって基礎に入力する地震動(基礎入力動)に対する検討は行われていない. 周らの研究¹⁵⁾によると, ソイルセメントコラムによる地盤改良は基礎入力動に影響を与え, 直接基礎において入力損失効果が增大することが示されている. 軟弱な地盤中に既存杭が引き抜かれず存置されれば地盤改良を施した状態に近く, 地盤を締固める状況となるので基礎周辺地盤の変動が抑制され, 基礎入力動が低減する効果があるとも考えられる. 一方で, 隣接する杭との間隔や配置によっては, 地盤を介した波動の伝播により入力動が増大することも懸念される.

また, 地盤震動による杭の変形は地震時杭応力の評価に重要である. 杭基礎に対する既往の研究としては, 建物-杭-地盤系の動的弾性解析より杭の地震時応力を建物の慣性力と地盤震動による応力に分けて検討した長谷川らの研究¹⁶⁾, また遠心模型実験および数値解析にて液状化地盤における杭応力を検討した宮本らの研究¹⁷⁾がある. しかし, これらは残置杭を有しない杭基礎での検討である.

* 室蘭工業大学大学院工学研究科 助教・博士(工学)

** 室蘭工業大学大学院工学研究科 教授・工博

*** 室蘭工業大学大学院環境創成工学系専攻 大学院生

Assistant Professor, Graduate School of Engineering, Muroran Institute of Technology, Dr. Eng.

Professor, Graduate School of Engineering, Muroran Institute of Technology, Dr. Eng.

Graduate Student, Division of Sustainable and Environmental Engineering, Graduate School of Engineering, Muroran Institute of Technology.

そこで、本論文では地中に残置杭が存在した場合、新設建物における杭基礎の基礎入力動に及ぼす影響を解析的に検討する。解析法は、隣接杭間の動的相互作用を考慮するため既往の静的解析プログラム^{18), 19)}に薄層法^{20), 21)}を導入して拡張を図った。3D-FEM との比較から本解析法との対応を確認した後、残置杭の直径や本数・配置が基礎入力動に及ぼす影響を検討する。なお、地盤震動は成層地盤において基礎面から垂直上方に伝わる SH 波の調和地動、また基礎はスラブの根入れがない杭基礎を対象とし、周波数応答解析にて基礎入力動を検討する。杭体および地盤は弾性を示す範囲とする。

2. 解析方法

図1は本論文で用いた解析法概念図であり、基礎-地盤系の運動方程式は次式で表される。

$$[M] \cdot \{u''\} + [C] \cdot \{u'\} + [K] \cdot \{u\} = \{F\} \quad (1)$$

$[M], [C], [K]$: 基礎・地盤の質量, 減衰, 剛性マトリックス

$\{u''\}, \{u'\}, \{u\}$: 基礎・地盤に生じる加速度, 速度, 変位ベクトル

$\{F\}$: 基礎に作用する外力ベクトル

いま、基礎層に単位の調和地震動 ($u_{g0}=1 \cdot e^{i\omega t}$) が入力されたとき、自由地盤での地盤震動 u_g を次式で表す調和関数とすると、

$$u_g(t) = U_g(\omega) \cdot e^{i\omega t} \quad (2)$$

U_g : 地盤震動の複素振幅

ω : 円振動数

t : 時間

i : 虚数

このとき、基礎への作用外力はこの地盤震動に伴って杭に作用する地盤の強制変位外力（ドライビングフォース）であり次式で表される。なお、成層自由地盤での地盤震動は1次元の重複反射理論より求められる。

$$\{F\} = [K_s] \cdot \{u_g\} \quad (3)$$

$[K_s]$: 地盤の剛性マトリックス

基礎や地盤の材料構成モデルは、バネとダッシュポットを並列に繋いだ線形粘弾性モデル (Viogt モデル) を考えると、剛性は内部粘性減衰として履歴減衰を考慮した複素剛性にて表される。

$$K^* = i\omega C + K \\ = (1 + 2hi)K \quad (4)$$

K^* : 複素剛性 (複素数)

K : 剛性 (実数)

h : 減衰定数

また、基礎の応答も調和振動となるので、(3)式~(4)式より、(1)式は次式のようになる。

$$([K^*] - \omega^2[M]) \cdot \{U(\omega)\} = [K_s] \cdot \{U_g(\omega)\} \quad (5)$$

ここで、質量マトリックス $[M]$ は(6)式で表され、剛性マトリックス $[K^*]$ は(7)式のようにラフト、杭、ラフト-杭頭部間および地盤を構成する減衰を考慮した剛性マトリックスを結合することで最終的なラフト/杭/地盤を連成した複素剛性マトリックスが得られる。

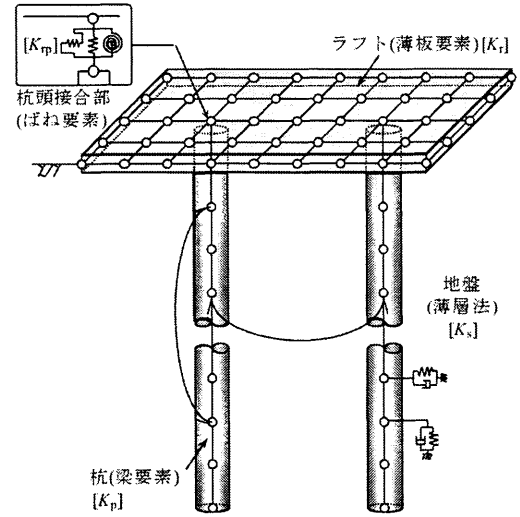


図1 解析法概念図

$$[M] = [M_r] + [M_p] - [M_s^{ep}] \quad (6)$$

$[M_r]$: ラフトの質量マトリックス (本論文では無質量とする)

$[M_p]$: 杭の質量マトリックス

$[M_s^{ep}]$: 杭体積分に相当する地盤の質量マトリックス

$$[K^*] = [K_r] + [K_p] + [K_{rp}] + [K_s] - [K_s^{ep}] \quad (7)$$

$[K_r]$: ラフトの剛性マトリックス

$[K_p]$: 杭の剛性マトリックス

$[K_{rp}]$: ラフト-杭頭部間の剛性マトリックス

$[K_s]$: 地盤の剛性マトリックス

$[K_s^{ep}]$: 杭体積分に相当する地盤の剛性マトリックス

$[K_r]$ および $[K_p]$ には、それぞれ有限要素法による薄板要素および梁要素を用いる。 $[K_{rp}]$ は、ラフトと杭頭部間の接合条件に応じて軸力・せん断力・曲げモーメントを伝達する Winkler 型バネにより考慮する。また、 $[K_s]$ は薄層法の加振解^{15), 16)}による変位影響マトリックスの逆マトリックスである。これにより地盤を介した動的相互作用を考慮する。なお、 $[K_s]$ は加力点と受振点の鉛直軸が一致する場合はリング加振解、それ以外の場合は点加振解を用いた。

本論文では (5) 式を周波数応答解析して基礎入力動を算出する。また、基礎入力動は振動数領域での自由地盤面動 (杭の振動の影響を受けず一次元で挙動する自由地盤面での動き) U_g に対する杭基礎面動 U_p の比 U_p/U_g として示す。なお、以降の図中に示される Abs, Real および Imag は、それぞれ U_g に対する U_p の絶対値 (振幅比)、実部および虚部を表すものとする。

3. 解析法の適用性

本解析法と 3D-FEM との比較を行う。

3. 1 検討モデル

図2に検討モデルの条件、図3に杭の配置図を示す。検討モデルは新設建物が杭基礎で支持されるとし、杭の先端が基礎層まで到達する支持杭形式を設定した。支持杭の場合、一般に杭先端を支持層に杭径程度の根入れをさせるが、本検討モデルでは簡略化して杭の

根入れはない。なお、杭先端の根入れの有無による基礎入力動への影響は小さいことを確認している。杭配置の条件は、残置杭または新設杭がそれぞれ 1 本単独で単杭として存在するケース（残置杭、新設杭）、また残置杭を有しないケースとして 4x4 本の群杭（4x4）、残置杭を有する 4x4 本の群杭を 2 ケース（4x4-u9、4x4-u25）の計 5 ケースである。杭頭部の接合条件として、新設杭は基礎スラブに連結された剛接合（回転拘束）、残置杭は地中での埋設を想定して自由（非接続）とした。なお、基礎スラブは無質量の剛床と仮定し、残置杭の杭頭レベルは新設杭と同様に地表面とした。また、残置杭は施工時期が古い場合一般に新設の基礎杭と材料の剛性や強度が異なることが予想されるが、ここでは残置杭の有無による影響が表現可能であるかに着目することとし、杭は全て同一の物性値を有する直径 1m のストレートな場所打ちコンクリート杭を想定した。

3. 2 3D-FEM モデル

FEM には汎用解析コード Soil Plus Dynamic を用いた。図 4 に FEM 要素メッシュの例（4x4-u25 モデル）を示す。FEM では ZX 平面を対称面として全体の 1/2 の領域をモデル化している。地盤はソリッド要素、基礎スラブはシェル要素を用いた。杭は体積分のソリッド要素を排除し、杭材芯位置に軸方向・曲げ・せん断変形を考慮したビーム要素を配置して、杭節点と同一深度の杭外周に相当する地盤要素の節点とを多点拘束で連結した。基礎スラブは水平変位と鉛直変位（ロッキング変形角）を考慮した。また、解析対象領域である表層地盤からの逸散減衰に対して、側方の自由地盤および下方の基礎層下端との境界にそれぞれ粘性ダンパーを考慮した。なお、基礎入力動は、基礎層下端の X 方向に単位の調和地震動（ $u_{g0}=1 \cdot e^{i\omega t}$ 、2E 波）を作用させ、その振動数を $f=0 \sim 15\text{Hz}$ の範囲にて $\Delta f=2.5\text{Hz}$ の刻みで変化させ、周波数応答解析を行って計算した。

3. 3 基礎入力動の比較検討

図 5 は FEM 解析値（FEM）と本解析値（Cal）との基礎入力動の比較である。ここで、新設杭と残置杭のケースは 1 本単独で単杭として存在する場合であるため、基礎入力動には杭頭の位置での結果を示す。残置杭の有無に関わらず、本計算法の結果（Abs, Imag）は 3D-FEM の結果と今回検討した振動数の範囲まで概ね対応している。なお、残置杭のケースは杭頭自由の条件であるため、 $f=12\text{Hz}$ 程度まで基礎入力動が $U_p/U_g \geq 1.0$ となっている。本解析法では隣接の新設杭間だけでなく、残置杭から新設杭への波動伝播の影響を考慮した基礎入力動を表現可能であることが分かる。また、残置杭を有する場合（4x4-u9、4x4-u25）には新設杭のみの場合（4x4）と異なり、基礎入力動に影響を及ぼすことが分かる。なお、基礎の水平変位のみを考慮した場合には基礎入力動の最大振幅が変動するが、1%以下であったことを確認している。これは本検討モデルが支持杭形式を想定しており、基礎の回転による影響が小さかったことに起因している。

4. 残置杭と新設杭間の動的相互作用

4. 1 検討モデル

次に、1 本の残置杭からの波動の伝播によって 1 本の新設杭に及ぼす影響について基本的な特性（残置杭と新設杭間の動的相互作用）を明らかにするため、残置杭と新設杭を各 1 本、計 2 本の杭で検討した。検討因子は、表 1 に示す残置杭の直径（ D_0 ）、残置杭と新設杭との杭中心間隔（ S_x, S_y ）、および入力加振 X 軸方向に対する新設

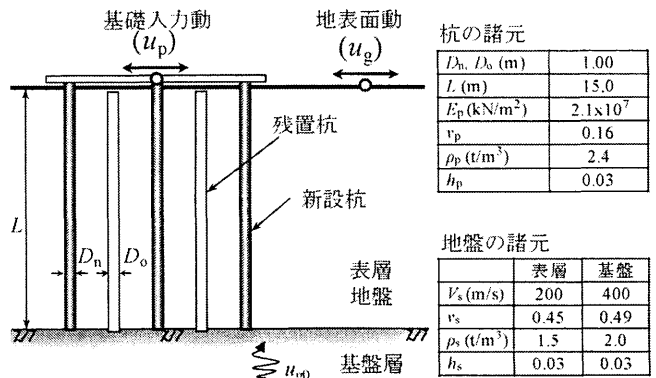


図 2 検討モデルの条件

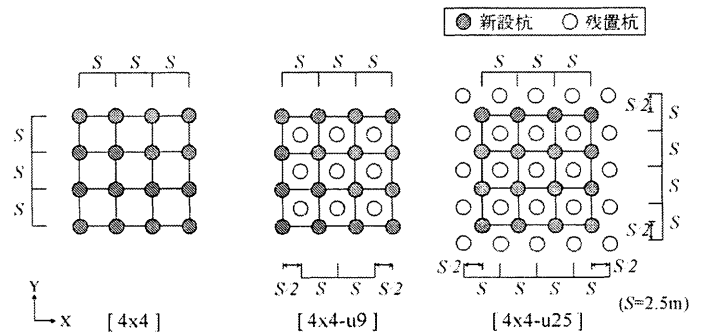


図 3 杭の配置図

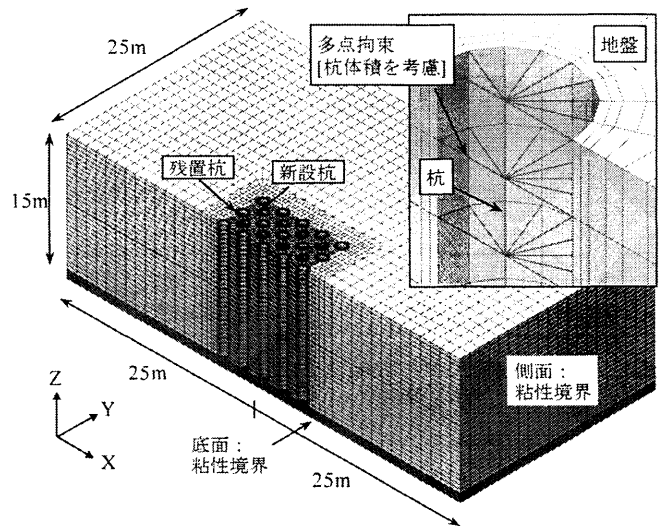


図 4 FEM 要素メッシュの例（4x4-u25）

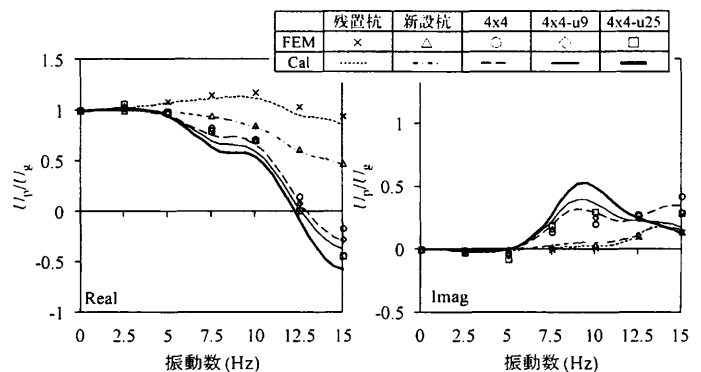


図 5 解析法の適用性

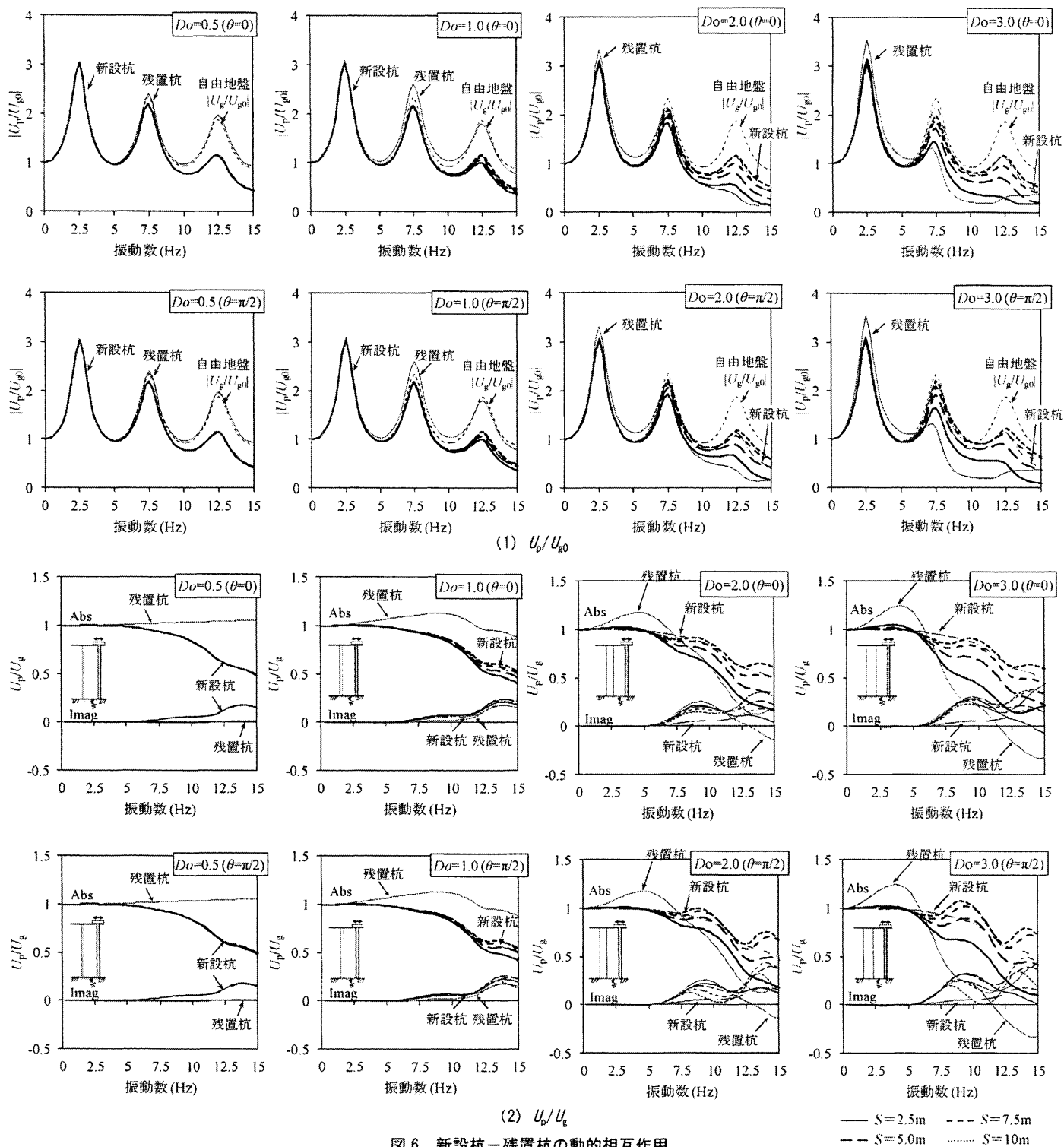
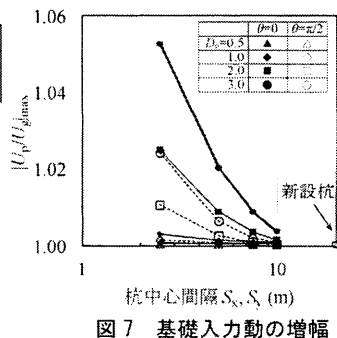
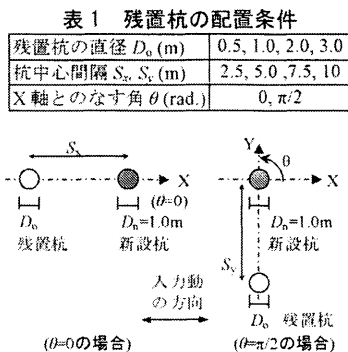


図6 新設杭—残置杭の動的相互作用

杭と残置杭とのなす角 (θ) である。ここで、 $D_o=3.0\text{m}$ の残置杭は場所打ちコンクリート杭の変遷²²⁾を踏まえると現状では存在しないと考えられるが、現在は施工可能な杭径であり残置した場合にどの程度の影響が生じるのか把握することを目的としている。なお、地盤や杭の物性は第3章と同一条件とし、新設杭は直径 $D_n=1\text{m}$ の場所打ちコンクリート杭とした。また、杭頭部の接合条件は第3章と同様に、新設杭は剛接合 (回転拘束)、残置杭は自由 (非接続) とした。



4. 2 隣接杭間の影響

図6は入力動 U_g に対する基礎面 U_p の伝達関数, 新設杭の基礎入力動であり残置杭の直径ごとに整理した。また, 図6(1)には自由地盤面 U_g , 図6(2)には新設杭, 残置杭それぞれ1本単独で存在した場合の杭頭の位置での結果も併記した。 $D_0=0.5\text{m}$ のモデルは残置杭による影響がほぼ見られない。 $D_0=1.0\text{m}$ のモデルでは $f \geq 10\text{Hz}$ にて残置杭との隣接杭間隔が狭い場合ほど新設杭の基礎入力動に与える影響が大きくなっている。これに対して, 新設杭よりも大口径の場合 ($D_0=2.0\text{m}, 3.0\text{m}$) では特定の振動数の範囲で新設杭のみの場合よりも基礎入力動が大きい ($|U_p/U_g| \geq 1.0$)。これは, 以下に述べる残置杭と自由地盤との動きの差異が影響している。振動数 $f=0 \sim 5\text{Hz}$ では, 新設杭の最大振幅比 $|U_p/U_g|_{\max}$ ($f=0 \sim 5\text{Hz}$, $S_x=S_y=20\text{m}$ のプロットは新設杭のみの値) が図7のように $\theta=\pi/2$ (加振直交方向) よりも $\theta=0$ (加振方向), また杭中心間隔が狭い方が増大している。加振方向の方が波動伝播速度が大きく, 残置杭からの位相の変化が小さいため伝播波動が入力動の加算に寄与することを示唆する。一方, それ以降の振動数 $f=7.5 \sim 10\text{Hz}$ では $\theta=\pi/2$ で杭中心間隔が大きい場合に基礎入力動が $U_p/U_g \geq 1.0$ となっている。これは残置杭の存在によって基礎面 U_p の伝達関数のピークが自由地盤の地表面 U_g よりも

僅かに高振動数となり, U_p がピークの谷間で U_g よりも大きな振幅となったためと言える。

5. 残置杭が新設杭基礎の基礎入力動へ及ぼす影響

5. 1 検討モデル

新設杭は 4×4 本杭を対象とし, 残置杭の直径が $D_0=1.0\text{m}, 2.0\text{m}$ のケースにて残置杭の本数や配置が新設杭基礎の基礎入力動に及ぼす影響を検討する。地盤は第3章と同一条件とする。

図8に杭の配置図を示す。新設基礎の隣接杭間隔は $5D_0$ であり, $D_0=2.0\text{m}$ のケースである。(1)は残置杭が均等配置, (2)は残置杭が不均等配置である。なお, 基礎スラブは水平変位と鉛直変位 (ロッキング変形角) を考慮する。

5. 2 残置杭の本数・配置の影響

5.2.1 杭本数の影響

図9に残置杭が均等配置されたケース (4×4 -u4a, 4×4 -u9a, 4×4 -u16a, 4×4 -u25) での入力動 U_g に対する基礎面 U_p の伝達関数, 基礎入力動を示す。ここで, 図9(1)には自由地盤面 U_g , 図9(2)には残置杭は1本単独で存在した場合の杭頭の位置での結果を併記した。また, f_1, f_2 および f_3 は表層地盤の1次, 2次および3次の固有振動

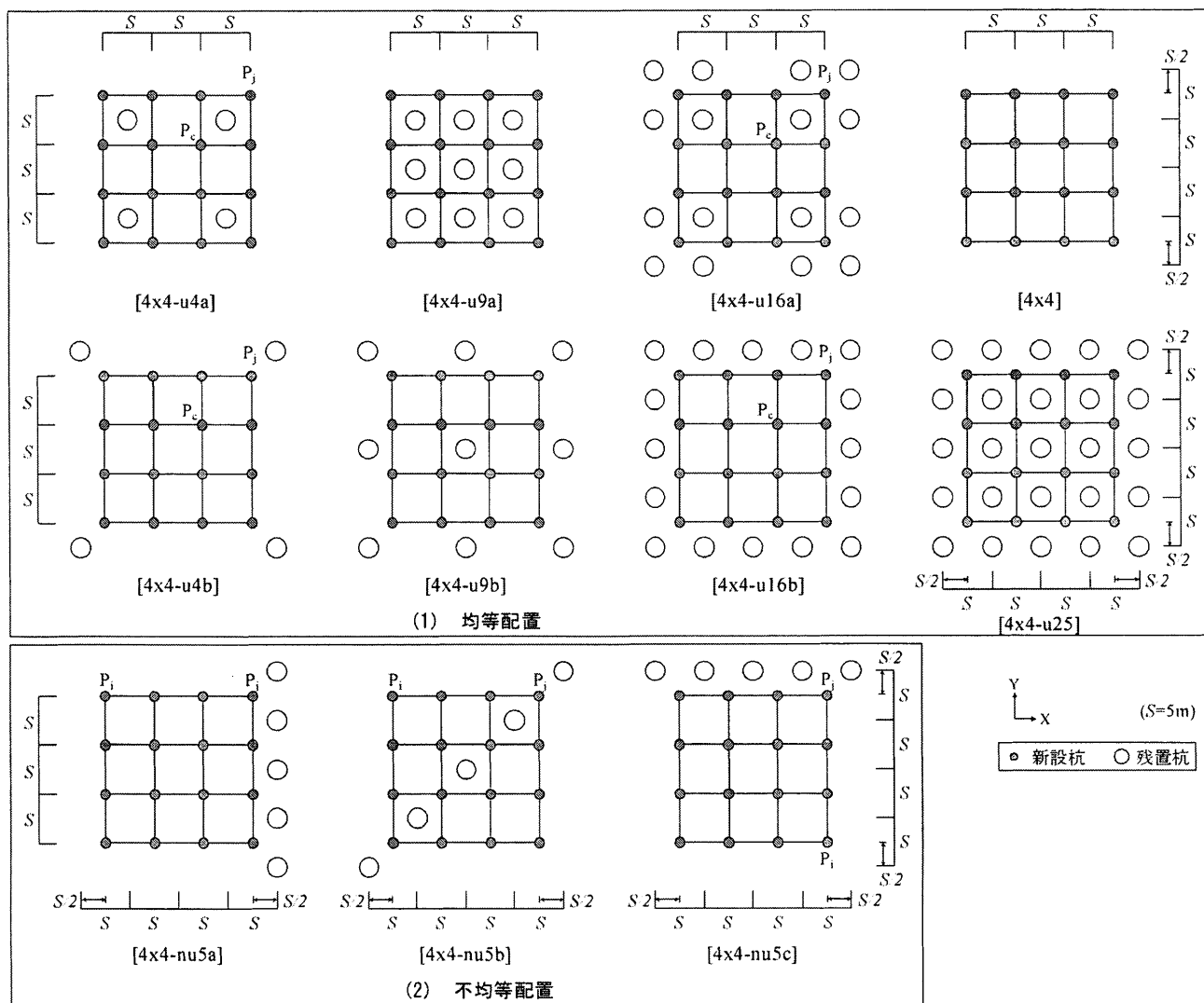


図8 杭の配置図 ($D_0=2.0\text{m}$ の場合)

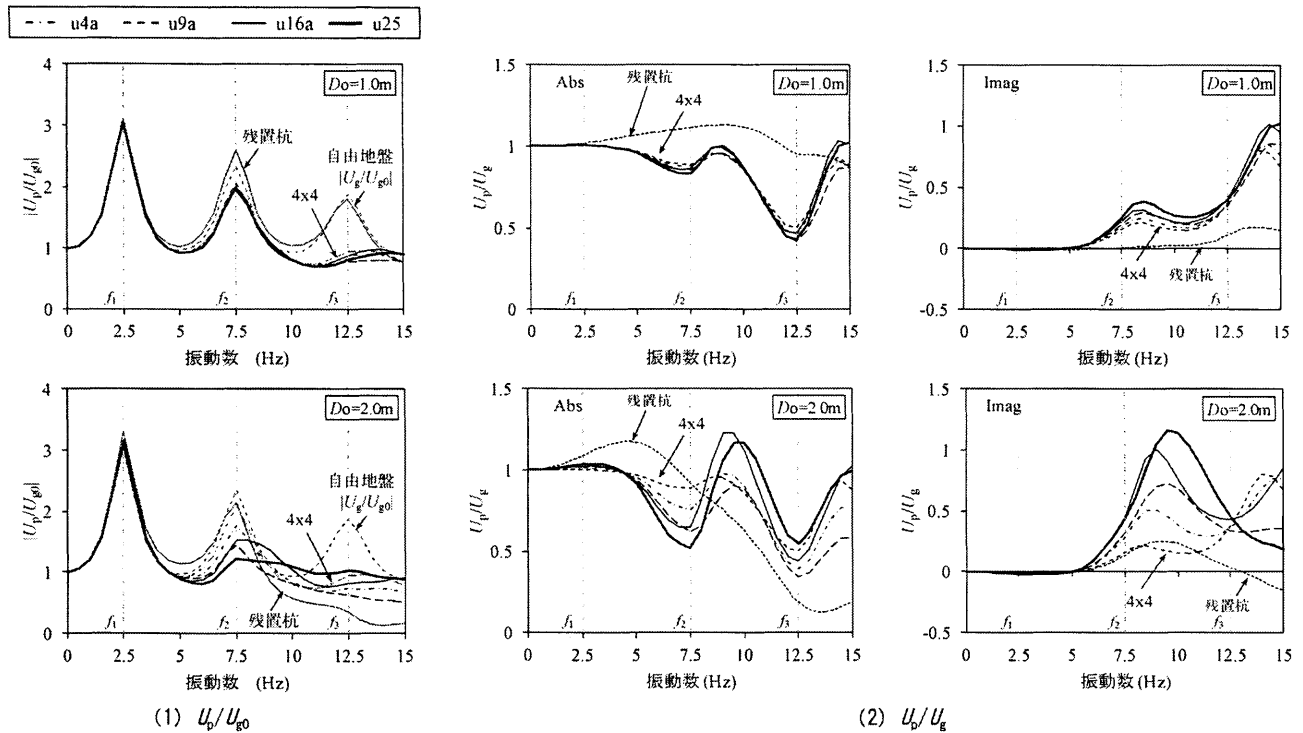


図 9 伝達関数，基礎入力動（本数の影響）

数を表す。残置杭の本数が多いほど伝達関数 U_p/U_{g0} ，基礎入力動 U_p/U_g への影響が大きく現れており， $D_0=2.0\text{m}$ でその傾向が顕著に見られる。地盤の 1 次固有振動数である $f_1=2.5\text{Hz}$ では残置杭からの位相の変化が小さいため伝播波動が入力動の加算に寄与するため新設杭のみの場合（4x4）よりも基礎入力動が大きくなるのに対して，振動数 f_2 以降では伝達関数 U_p/U_{g0} のピークを示す振動数が高振動数へとシフトしたことで 4x4 よりも大きくなっている。ゆえに，振動数によっては新設杭のみの場合（4x4）よりも基礎入力動が大きくなる振動数の範囲が存在することが分かる。 $D_0=2.0\text{m}$ における新設杭と残置杭が同数のケース（4x4-u16a）では， $|U_p/U_{g0}|$ は $f=2.5\text{Hz}$ ， $f=9.5\text{Hz}$ にて 4x4 よりもそれぞれ約 2%，約 32% 大きい。なお，振動数 $f=7.5\sim 10\text{Hz}$ では U_{g0} に対する U_p の伝達関数自体は小さいが，入力地震動がこの辺りの振動数成分を多く含む場合には注意を要する。

図 10 に全てのケースにおける $f=0\sim 15\text{Hz}$ での新設杭の最大振幅比 $|U_p/U_{g0}|_{\max}$ を示す。 $|U_p/U_{g0}|_{\max}$ は 4x4-u25 よりも 4x4-u16a の方が大きい。これは，残置杭からの波動伝播によって 4.1 節で示した波動が重なり合い，4x4-u25 では振動数 f_2 以降の伝達関数 U_p/U_{g0} の増幅が抑制されたことを反映している。残置杭の本数だけでなく，その配置に依存すると言える。

5.2.2 杭配置の影響

図 11 に残置杭が同数で杭配置が異なるケースでの入力動 U_{g0} に対する基礎面 U_p の伝達関数，基礎入力動の比較を示す。ここで，図 11(1)には自由地盤面 U_g ，図 11(2)には新設杭のみのケース（4x4）も併記した。均等配置の場合では，残置杭が外側に配置されたケース（u4b，u16b）の方が内側に配置されたケース（u4a，u16a）よりも図 11(1)に示す $f=5\text{Hz}$ 以降の伝達関数 $|U_p/U_{g0}|$ のピーク振動数が新設杭のみ（4x4）よりも高振動数へシフトし， $|U_p/U_{g0}|$ の値も大きいため，図 11(2)に示す $|U_p/U_g|$ の最大値が大きくなっている。これは，残置杭が内側よりも外側に配置されている方が基礎中央部との距離が

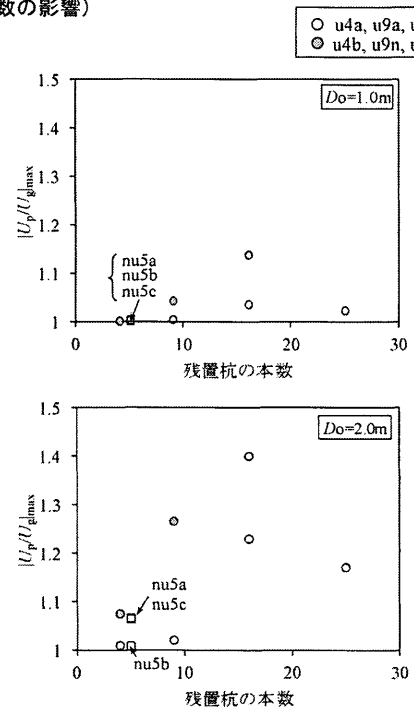


図 10 基礎入力動の増幅

あるため新設杭の動きが拘束されないためである。また，不均等配置の場合でも基礎入力動は若干異なるが，基礎全体の平均水平変位への影響は小さい。この理由は杭頭が剛基礎スラブに連結されており，杭の変位が基礎全体で平均化されるためと考える。

図 12 は $D_0=2.0\text{m}$ の均等配置における杭の水平変位の深度分布である。ここでは，残置杭 4 本（u4a，u4b）および 16 本（u16a，u16b）のケースで，基礎スラブの中央および隅角に位置する新設杭（図 8 の P_c ， P_j ）を示す。2 次固有振動数 f_2 のとき，地中部の変位は，残置杭の本数が多い u16a と u16b では両者ともに基礎の中央に配置された杭 P_c が隅角の杭 P_j よりも大きい傾向を示している。一方，残置

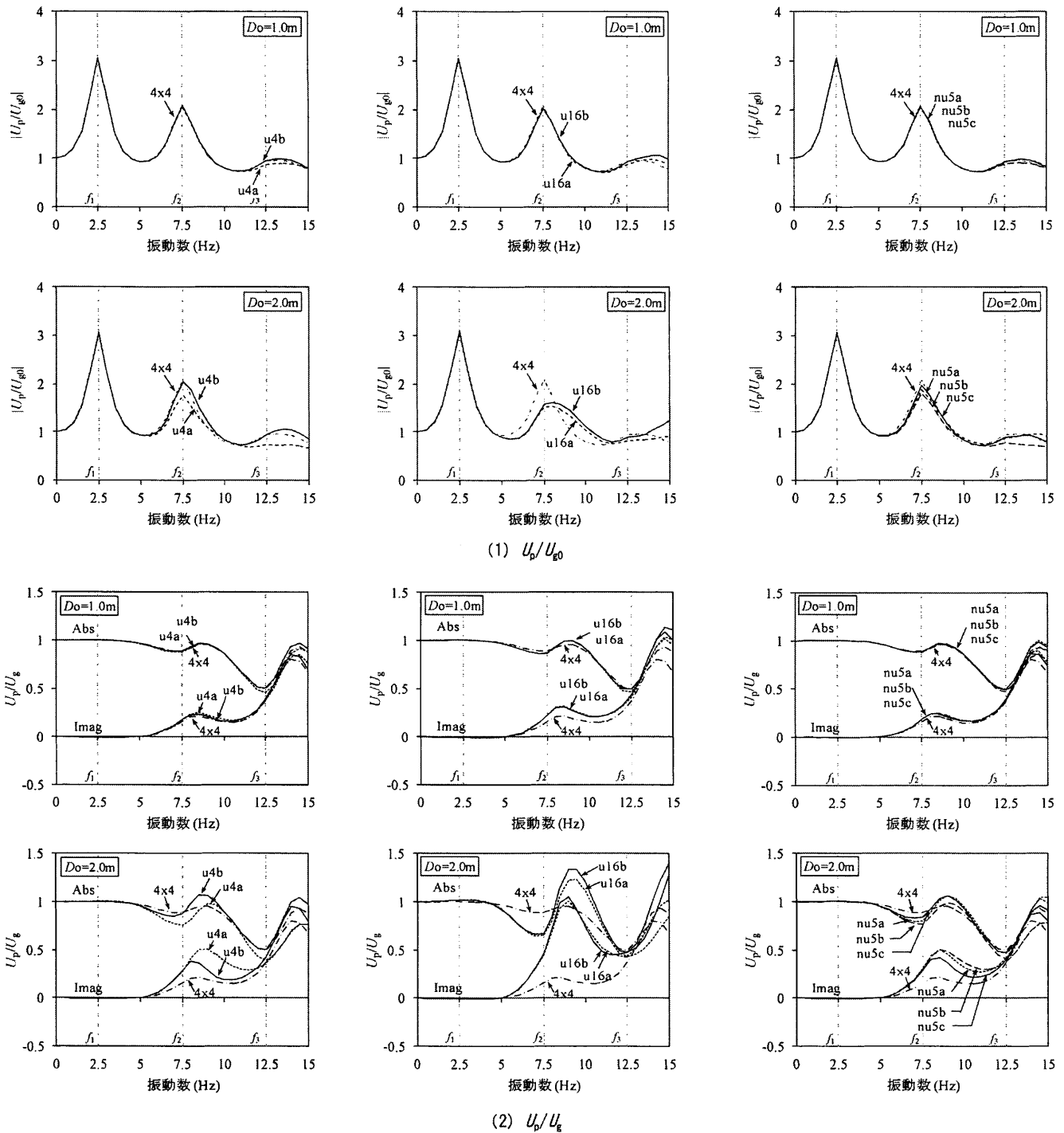


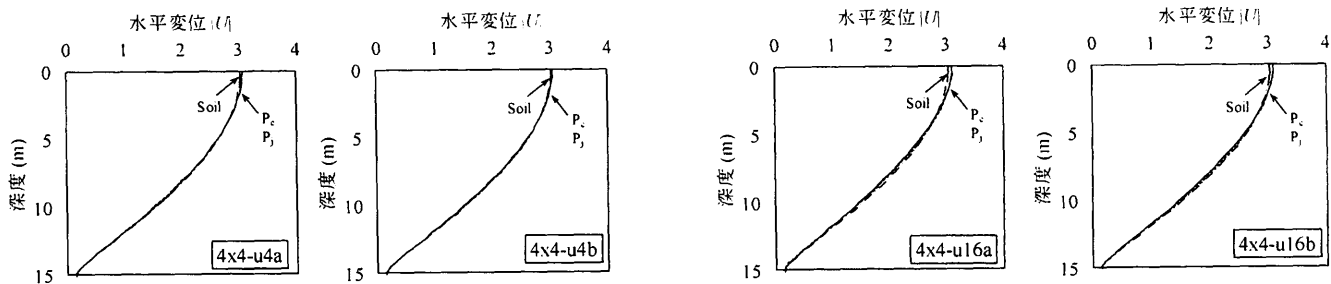
図 11 伝達関数，基礎入力動(配置の影響)

杭の本数が少ない場合 ($u4a$, $u4b$) では，残置杭が内側に配置されている $u4a$ では隅角の杭 P_j の変位が中央の杭 P_c よりも大きい，残置杭が外側に配置された $u4b$ では逆に中央の杭 P_c の方が変位が大きい，残置杭の杭本数が少ない場合にはその配置の影響が大きく寄与すると言える。

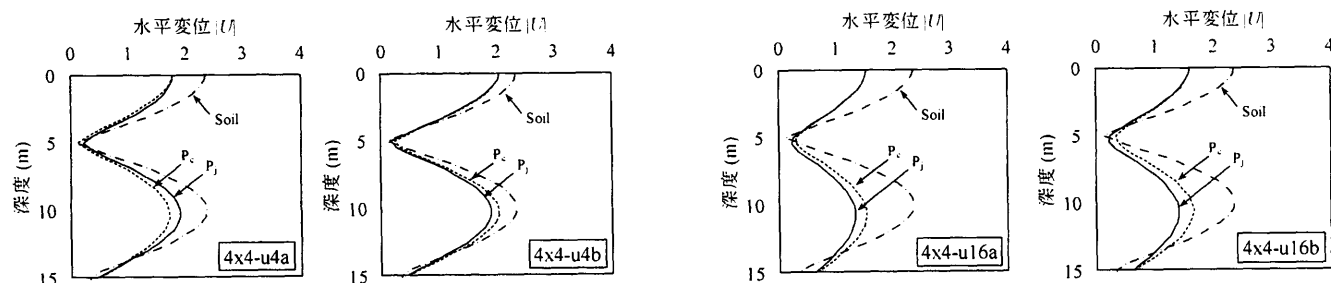
図 13 に $D_o=2.0m$ における不均等配置での杭 (図 8 の P_i , P_j) の水平変位の深度分布を示す。 4×4 - $nu5a$ や 4×4 - $nu5b$ では杭頭位置での差異はないが，地中部で残置杭の影響が表れている。基礎入力動が 4×4 よりも大きくなる 1 次固有振動数 f_1 では残置杭に近接する杭 P_j の変

位が 1% 程度大きくなるのに対して，基礎入力動が小さくなる 2 次固有振動数 f_2 では P_j の変位が小さい。また， 4×4 - $nu5c$ では f_2 にて杭頭の変位に差が生じているが， P_j の変位が P_i よりも杭全長に渡って小さい。残置杭は地盤深部でも新設杭の振動の増減に寄与することが分かる。

不均等配置の場合，基礎の回転動は図 14 のように残置杭の配置によって大きく異なった。図 15 に基礎のロッキング動として， P_i , P_j 位置 (図 8) の基礎の Z 変位を示す。 4×4 - $nu5c$ では位置による相違はほぼないが， 4×4 - $nu5a$ や 4×4 - $nu5b$ では異なっており，ロッキング

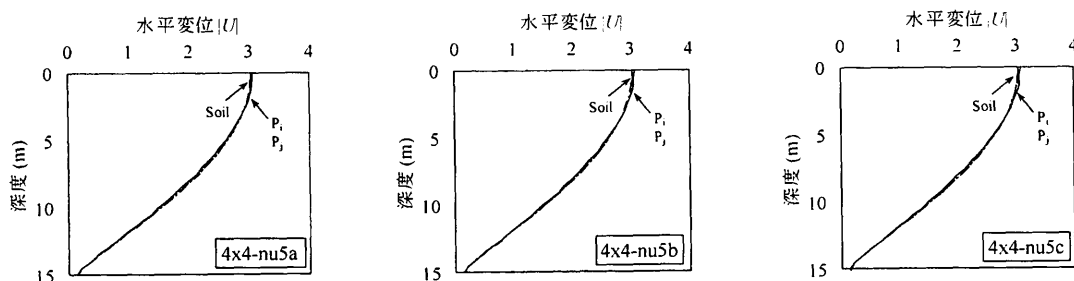


(1) 1次固有振動数

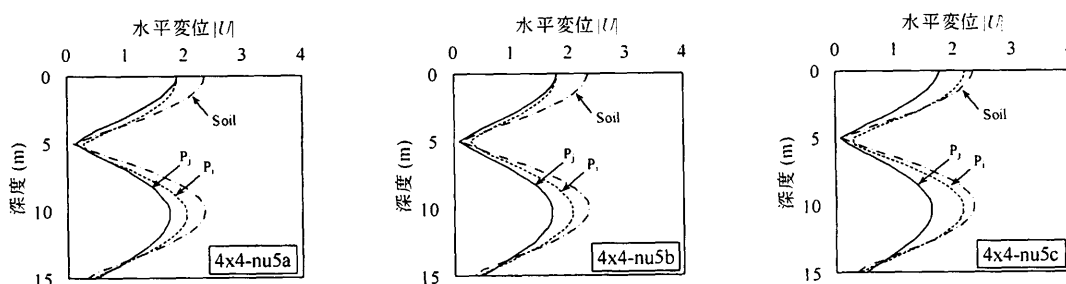


(2) 2次固有振動数

図12 杭の水平変位分布 (均等配置, $D_0=2.0\text{m}$)



(1) 1次固有振動数



(2) 2次固有振動数

図13 杭の水平変位分布 (不均等配置, $D_0=2.0\text{m}$)

動の回転軸が基礎中心を通るY軸からずれることになる。また、変位量は小さいが、残置杭がないケースよりもロッキング動が増大することが分かる。一方、4x4-nu5cではZ軸回りのねじれが励起される。図16に式(8)で計算したZ軸回りの回転角を示した。特に、 $D_0=2.0\text{m}$ では加振方向の基礎入力動が増大する $f=10.5\text{Hz}$ で大きくねじれが生じており、このとき加振直交方向の振動 V/U_g は加振方向の水平動 $(|U_x/U_g|=|U_y/U_g|=0.90)$ に対して0.20倍程度に相当する。ゆえに、新設杭基礎の片側に大口径の既存杭を残置する場合には注意を要する。

$$|\theta_z| = \frac{|V_i - V_j|}{3S} \quad (8)$$

ここで、 V_i, V_j は P_i, P_j の加振直交方向の変位、 $3S$ は基礎の幅(=15m)。

6. まとめ

本論文では既存の杭を地中に残置した場合の基礎入力動への影響を解析的に検討した。得られた知見を以下にまとめる。

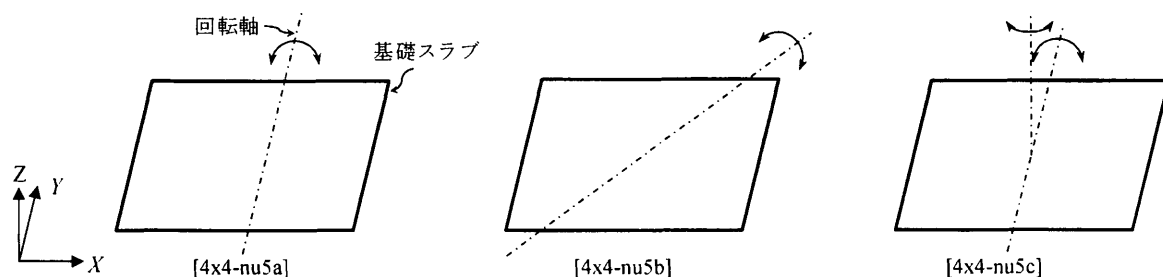


図 14 基礎のロッキング動のイメージ図

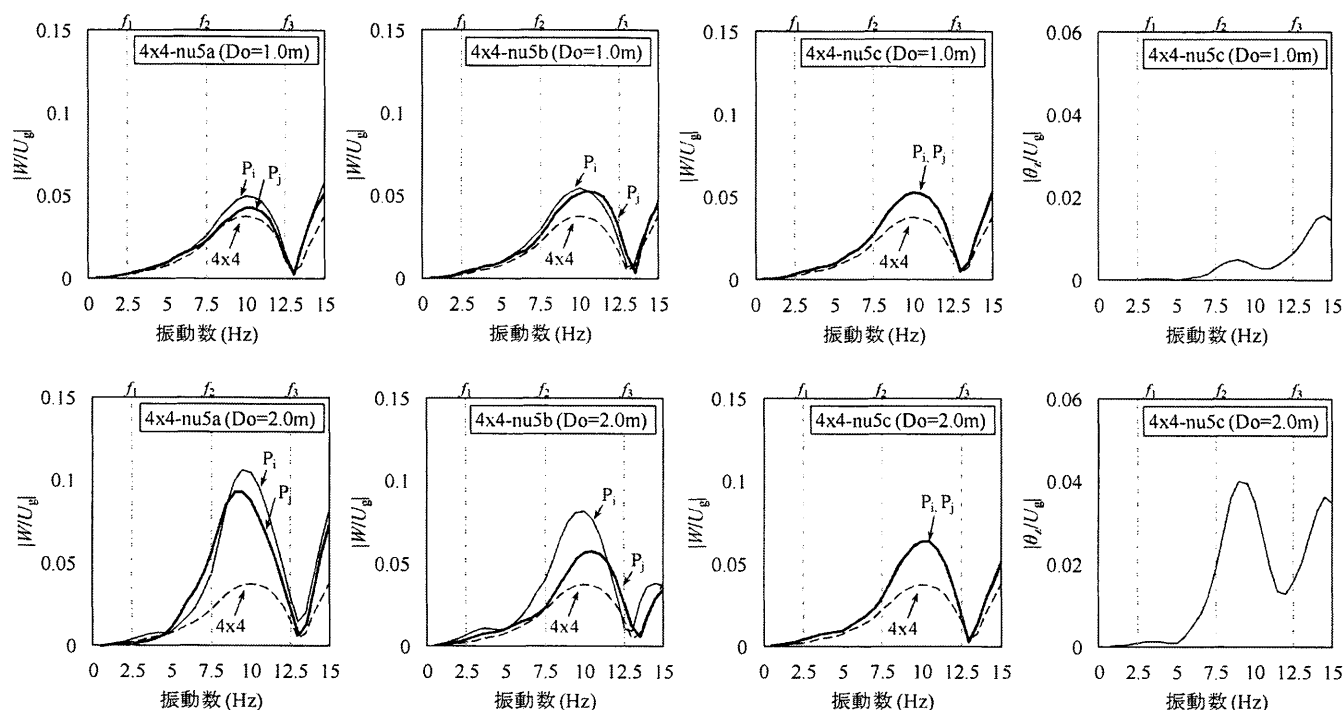


図 15 基礎のロッキング動 (Z 変位)

図 16 基礎のねじれ (Z 軸回り)

- ①隣接杭間の影響は、残置杭が新設杭に近接する場合や大口径の場合の方が基礎入力動に及ぼす影響が大きい。
- ②残置杭を有する場合の基礎入力動への影響は、残置杭の本数が多いほど大きく現れる。また、特定の振動数領域では新設杭のみの場合よりも大きくなる場合がある。
- ③残置杭の配置が均等の場合、配置パターンが基礎入力動に及ぼす影響は新設杭の基礎スラブでの連結により基礎全体で振動が平均化されるため振動数が低い範囲では小さいが、振動数が高くなると残置杭が新設杭基礎の内側よりも外側に配置された方が大きい。
- ④残置杭の配置が不均等の場合には、加振直交方向の基礎入力動も生じ、新設杭基礎にねじれが励起される。

本論文で検討した解析は限られたケーススタディーであり、杭の諸条件（剛性、残置杭の埋設深度、基礎の根入れ）や上下動入力による影響、地盤の層構成・不陸や非線形性に対する検討は今後の課題である。また、新設建物の地震時挙動や地震時杭応力の評価についても検討する必要があると考えている。

参考文献

- 1) 総合土木研究所：基礎工 特集 既存基礎の再利用技術，Vol.33，No.4，2005.4
- 2) 総合土木研究所：基礎工 特集 既存基礎の利活用，Vol.39，No.2，2011.2

- 3) 建築業協会地盤基礎専門部会：既存杭利用の手引き，2003.2
- 4) 構造法令研究会：既存杭等再使用の設計マニュアル(案)，2008.11
- 5) A P Butcher, J J M Powell and H D Skinner: Reuse of Foundations for Urban Sites: A Best Practice Handbook, 2006.
- 6) Dinesh Patel, Sarah Glover, Jonathan Chew, Jenny Austin: The Pinnacle Tower - Geotechnical Challenges, International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Volume 4, Issue 1, pp.9-24, 2010.3
- 7) 辻泰一，角田光正，宮田章：超高層建築物における既存杭利用（その 1）既存杭利用の概要と構造設計，日本建築学会学術講演梗概集，第 565 号，2007.8
- 8) 河本慎一郎，富田菜都美，石崎定幸，辰濃達，渡邊徹，長尾俊昌：超高層建物における既存場所打ち杭再使用の事例 その 1 設計概要，日本建築学会学術講演梗概集，pp.429-430，2014.9
- 9) 宮田章：地中に残置された既存杭が新設杭の鉛直支持力に及ぼす影響，第 39 回地盤工学研究発表会，pp.1501-1502，2004.7
- 10) 宮田章：地中に残置された既存杭が新設杭の水平抵抗力に及ぼす影響，第 40 回地盤工学研究発表会，pp.1569-1570，2005.7
- 11) 田村修次，足立圭佑，肥田剛典，林康裕：FEM 解析による残置杭が新規杭の水平抵抗に及ぼす影響の検討，第 45 回地盤工学研究発表会，pp.1445-1446，2010.8
- 12) 田村修次，樋口康仁，足立圭佑，林康裕，山崎雅弘：遠心載荷実験における残置杭が新規杭の鉛直支持力に及ぼす影響—新規杭の表面が滑らかなケースと粗いケースの比較—，日本建築学会構造系論文集，第 74 巻，第 645 号，pp.2039-2044，2009.11
- 13) 勝二理智，柏尚詮，井上和歌子，吹田啓一郎，林康裕：既存・新設複合杭基礎の水平抵抗機構に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，第 74 巻，第 644 号，pp.1751-1758，2009.10
- 14) 梅本浩一，森高英夫，石川明，桂豊，浅香美治，福武毅芳：既存杭が残存した地盤上に建てられた直接基礎建物の沈下挙動，日本建築学会大会学術講演梗概集，B-1，pp.679-680，2008.9

- 15) 周方圓, 護雅史, 福和伸夫: 改良地盤上に立地した免震建物の地震時応答性状に関する考察, 日本建築学会技術報告集, 第 17 巻, 第 36 号, pp.473-478, 2011.6
- 16) 長谷川正幸, 中井正一: 杭の地震時応力とその評価法に関する研究, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 432 号, pp.105-118, 1992.2
- 17) 宮本裕司, 福岡篤信, 安達直人, 酒向裕司: 液状化地盤における杭基礎の地震時杭応力に関する研究 杭基礎の遠心模型実験と解析的検討, 日本建築学会構造系論文集, 第 482 号, pp.53-62, 1996.4
- 18) 永井宏: 地震時の建物慣性力を受けるパイルド・ラフト基礎の非線形挙動に関する解析的研究, 舞鶴工業高等専門学校紀要, 第 44 号, pp.45-52, 2009.
- 19) 永井宏, 土屋勉: 水平力が作用するパイルド・ラフト基礎の非線形挙動に関する解析的研究, 構造工学論文集, Vol.52B, pp.1-8, 2006.3
- 20) 日本建築学会: 建築構造力学の最近の発展 -応力解析の考え方-, pp.850-876, 1987.11
- 21) 日本建築学会: 建物と地盤の動的相互作用を考慮した応答解析と耐震設計, pp.311-326, 2006.2
- 22) 福井次郎: 総説 場所打ちコンクリート杭の変遷と今後の課題, 基礎工, Vol.33, No.2, 2005.2