

氏 名	MOSTAFA FAGHIH Nia TORSHIZI
博士の専攻分野の名称	博士（学術）
学位記号番号	博理工乙第246号
学位授与年月日	平成30年3月23日
学位授与の条件	学位規則第4条第2項該当
学位論文題目	Influence of pile radius on kinematic and inertial responses of pile groups (地盤変形と慣性力を受ける群杭基礎の応答特性に及ぼす杭径寸法の影響)
論文審査委員	委員長 教 授 齊藤 正人 委 員 准 教 授 茂木 秀則 委 員 准 教 授 牧 剛史 委 員 教 授 松本 泰尚

論文の内容の要旨

An efficient method has been developed to compute the normalized total bending strains of fixed-head pile groups of finite length embedded in a homogeneous soil layer subjected to both kinematic and inertial harmonic loading. The proposed method allows the total bending strains to be obtained in a closed form formula while using a dynamic Winkler approach in conjunction with an extension to three-dimensions of Novak's plane strain model. The enhanced model is free of the drawbacks of the two-dimensional plane strain model, as it is able to reproduce the cutoff frequency of the soil-pile system. Pile group effect is considered through frequency-dependent interaction factors and the total bending strains are normalized with respect to the mean shear strain of the soil stratum γ_s . The variation of the normalized total bending strains against slenderness ratio r/H is investigated, revealing valuable insight into the characteristics of the bending strains radius in pile groups. Solutions for pile groups' responses are obtained at the fundamental frequency of the soil stratum.

This research shows the normalized total bending strains for various parameters, such as the factor F_r and ϕ_r , representing the relative amplitude and the phase lag between the inertial lateral loading and the deformation of the soil medium, the pile-soil stiffness ratio E_p/E_s , normalized total bending strains' characteristics indicates the presence of the local minimum and the local maximum in soil-pile group systems. The results of parametric study imply the dependence of the optimal radius and the optimal bending strains in pile groups on the factor F_r , the pile-soil stiffness ratio E_p/E_s and the phase lag ϕ_r . As a whole, it appears that the slenderness ratios at local minimum point increases as F_r increases, while the ratios remain unvaried as E_p/E_s and ϕ_r increase. It should be noted that a substantial decrease in the normalized total bending strains at optimal radius would be expected within a range of small E_p/E_s and F_r . Moreover, this decrease seems to be more significant for small values of the phase lag ϕ_r . Three different approaches (average, weighted average and envelope) are provided for estimating the optimal radius in pile groups that minimize the normalized total bending strains simultaneously. Each of them can be considered applicable for engineering purposes.

論文の審査結果の要旨

本学位論文審査委員会は、平成 30 年 2 月 13 日に論文発表会を開催し、論文内容の発表に続いて質疑と論文内容の審査を行なった。以下に審査結果を要約する。

半世紀に亘る杭基礎構造物の動的相互作用に関する研究では、地盤と杭間の波動現象ならびに地盤-杭-構造物系の振動現象という二つの現象を軸としてその解明が行われている。それらは主に 3 次元弾性波動論に基づく理論的研究や有限要素法や境界要素法による解析的研究、更には模型実験や実計測による実証的研究によるものである。また、従来から現象モデル (Phenomenological Model) と呼ばれる、杭を梁要素、地盤抵抗を地盤ばねとして取り扱う Winkler モデルが提案されている。このモデルは動的相互作用の複雑な現象を簡易なモデルで精度よく表現することを目的としている。近年では地盤と杭との波動現象を表現可能とした動的 Winkler モデルが注目されており、従来の厳密な評価手法と対比してその利便性と等価性が高く評価されている。本論文は、動的 Winkler モデルに基づく杭基礎構造物の動的相互作用に関する研究成果を取りまとめたものである。

地震時における軟弱地盤中の杭基礎構造物は、上部構造物からの慣性力のみならず地盤変形に伴う作用を受けることが知られており、前者を Inertial 相互作用、後者を Kinematic 相互作用と呼称する。近年の耐震設計法ではそれら二つの作用を適切に評価することが推奨されている。従来、Inertial 相互作用に対しては、杭径を増加させることで杭体の曲げ剛性を増し、曲げ変形を抑制させるのが一般的である。一方、Kinematic 相互作用に対する曲げ変形の抑制方法については未解明な点が多く、杭径を増加することが曲げ変形を増大させる場合も多いことが知られている。近年の研究により、Kinematic 相互作用を受ける杭は杭径が比較的細い領域では杭径の増加が曲げ変形を増加させること、また杭径には曲げ変形を極大化させる不適杭径が存在し、それよりも杭径が増加すると曲げ変形は抑制されることが理論的に解明されている。また、Inertial 相互作用と Kinematic 相互作用を同時に受ける場合には、曲げ変形を極小化する杭径 (最適杭径) が存在する場合があることが知られている。こうした特性は杭径の適切な設定により曲げ変形を抑制できることを示唆している。しかし、Kinematic 相互作用と杭径に関する既往の研究は単杭を対象としたものに限られている。一般に、杭は複数の杭を用いた群杭として用いられる場合が多く、その挙動は単杭に対比して極めて複雑となる。特に、複数の杭群は杭間で動的相互作用が生じることが知られている。これらの影響が杭体の曲げ変形と杭径の関係に及ぼす影響については、単純化した条件下においても未だ解明されていないのが現状である。

本論文では、軟弱地盤中の群杭基礎構造物、とりわけ表層地盤の影響が顕著となる先端支持杭を対象に、動的 Winkler モデルを用いた解析解の導出を行い、群杭内の各杭の曲げ変形と杭径の特性を評価することを目的としている。杭頭は完全拘束条件、杭先端条件としては汎用性の高いヒンジ固定、ならびに回転拘束 (完全固定) の 2 種類を対象とし、表層地盤は剛な基盤層に支持されており一様弾性を仮定している。本解析解の妥当性の検証に際しては、本研究分野で実績の高い有限要素法と境界要素法をカップリングした数値解析解 (FE-BE 解) を利用している。本論文は、1) 杭と地盤の動的相互作用、2) Inertial 相互作用、3) Kinematic 相互作用、4) 二つの動的相互作用の 4 つから構成される。

本論文では、群杭基礎構造物の動的応答の導出原理である従来法の Three-Step 法を概説した後に、杭と地盤の動的相互作用に関する主要な 2 つの物理量について検討が行われている。第 1 に動的地盤ばねの設定方法、第 2 に主動杭 (source 杭) から受動杭 (passive 杭) への変位伝達特性 (attenuation function) の設定方法である。動的地盤ばねは、平面ひずみを仮定した Nogami and Novak による長杭を仮定した比較的精

度の高い波動論解が知られている。一方、本研究対象は表層地盤の固有モードが卓越する先端支持杭であることから、上記の波動論解では表層地盤の深さ方向の振動性状が反映されず、FE-BE 解との差異が顕著となる。変位伝達特性に関しては Gazetas and Dobry による 2 次元平面内の波動伝播を模擬した近似解が提案されているが、上記と同様に表層地盤の固有モードの影響が考慮されていない。本研究では、従来の提案手法の比較解析を行い、表層地盤の固有モードを近似的に考慮した Mylonakis による動的地盤ばねと変位伝達特性が、群杭の曲げ変形挙動を精度よく再現できることを明らかにしている。

上記検討に続き、本論文では Inertial 相互作用を受ける群杭基礎の応答特性を評価している。Inertial 相互作用に関する研究では、上部構造物からの慣性力を受ける群杭基礎構造物を想定し、杭頭部にせん断力（ベースシア）を受ける杭の曲げ変形応答の解析解を導出している。解析解の導出では、始めに杭間の変位と曲げひずみに関する相互作用係数を求め、続いて Three-Step 法を適用し、群杭全体系の変位と曲げひずみの一般解を求めている。一般解の導出により、曲げひずみが杭の径長比、杭間隔、杭本数、杭頭全体に作用するベースシア、地盤と杭の剛性比と密度比、地盤のポアソン比の関数として表現できることを明らかにした。また、導出した解析解は FE-BE 解との比較によってその妥当性が確認された。本研究によって、群杭基礎の曲げひずみは、杭径の増大に伴い著しく減少する傾向があり、単杭基礎と極めて類似した性質を示すこと、及び単杭基礎と比べて群杭基礎の曲げひずみは増加傾向にあることを明らかにした。

続く Kinematic 相互作用に関する研究では、表層地盤の振動変位を受ける群杭基礎構造物を想定し、動的地盤ばねを介して主たる地盤変形モードを受ける杭体の解析解を求めている。Inertial 相互作用と同様に、Kinematic 相互作用に関する相互作用係数を導出し、群杭全体の変位と曲げひずみの一般解を求めている。導出した解析解と従来法及び FE-BE 解を比較した結果、本提案手法による解析解が FE-BE 解を最も良好に表現できることが示された。本研究によれば、Kinematic 相互作用を受ける群杭基礎の曲げひずみは、杭径が小さい領域では杭径の増加に伴い線形的に増加する傾向が現れること、また極大値を迎えた後に杭径の増加に伴って減少することが判明した。この性質は単杭基礎の性質と極めて類似しており、杭間相互作用によって複雑化する群杭基礎においても同様の性質が認められることを示している。一方、群杭基礎の曲げひずみの大きさは単杭基礎に比べて減少し、杭間隔が狭まるとその傾向が強まることがわかった。加えて、Kinematic 相互作用を受ける曲げひずみは端部や角部よりも、中心部で一層低下することが明らかとなった。

上記検討を踏まえ、前述の二つの動的相互作用を同時に受ける場合の群杭基礎構造物の曲げ変形を評価している。線形弾性を仮定した本解析解では、その一般解として二つの解の線形重ね合わせとして表現することができる。結果、一般解はベースシアと表層地盤の変形量の二つの物理量による無次元量（荷重比係数）として関連付けられることが明らかとなった。一般解を用いたパラメトリック解析により、Inertial 相互作用による曲げひずみの減少特性と Kinematic 相互作用による増加特性を示す領域に、曲げひずみを極小化する杭径が現れることを示した。この特性は単杭固有のものではなく、群杭基礎においても現れることを示す極めて興味深い知見である。本研究による解析により、この極小値を示す杭径は、杭本数や杭間隔など群杭構造としての特徴には大きな影響を受けず、単杭と同様に荷重比係数によって大きく変動することが判明した。またその杭径は単杭の場合とおおよそ同値であることが示された。これらの特性を利用して、群杭基礎構造物の曲げひずみを低下させるための杭径寸法の設定手法が提案されている。

以上のように、Inertial 相互作用と Kinematic 相互作用を受ける群杭基礎構造物の曲げ変形と杭径の関係について、動的 Winkler モデルを利用した解析解を導出し、幾多の重要な性質を明らかにしたことは先駆的かつ独創的であり、大変重要な成果が得られたといえる。また、曲げ変形を抑制できる杭径寸法の設定手法の提案は、将来の実務的研究に向けて極めて重要な示唆を与えている。なお、研究成果は、第一著者として学術論文誌 *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* (IF1.545)、国際会議論文集 *International Journal of*

Geological and Environmental Engineering (19th International Conference on Earthquake Engineering and Seismology 2017) に掲載されている。

以上のことから、当学位論文審査委員会は、本論文が博士(学術)の学位に相応しい内容であると判断した。