

氏 名	Chandra Shekhar Goit
博士の専攻分野の名称	博士 (学術)
学位記号番号	博理工甲第 927 号
学位授与年月日	平成 25 年 9 月 20 日
学位授与の条件	学位規則第 4 条第 1 項該当
学位論文題目	EFFECTS OF SOIL NONLINEARITY ON THE DYNAMIC BEHAVIOR OF PILES (地盤の非線形性が杭基礎の動的挙動に及ぼす影響に関する研究)
論文審査委員	委員長 准教授 齊藤 正人 委員 教授 川上 英二 委員 准教授 茂木 秀則 委員 准教授 牧 剛史

## 論文の内容の要旨

Advancements in the methods of analysis and design of pile foundations have been a subject of much research interest over the years. Various solutions for predicting the response of piles that range from very complex formulations to simple approximate equations are available, providing varying levels of accuracy. However, whether it is a complex formulation or just a simple approximate equation, most of the solutions to predict the behavior of piles are based on the assumption that both the pile and soil behave elastically. Assumption of a pile being an elastic material can be viewed as a valid reasonable approximation, however, consideration of soil as elastic or viscoelastic material might not be a reasonable assumption for all levels of strain in soil, as soil exhibits strain-dependent nonlinear behavior.

A significant amount of work has been carried out for the dynamics of vertical piles, as undoubtedly they are a popular choice for a wide range of structures. Inclined piles (also referred as ‘batter piles’ or ‘raked piles’), on the other hand, are particularly desired for structures demanding substantial lateral stiffnesses, such as offshore structures, bridges, towers etc. The distinct advantage of these piles is that they transfer the imposed load not only through shear and bending as those by vertical piles, but also through axial compression. Nonetheless, for a considerable length of time, the use of inclined piles has been considered detrimental in seismic conditions and is restricted by design codes like AFPS and Eurocode. Encouraging findings about the positive aspects on the performance of inclined piles in recent years, however, have attracted much research interest on the topic. Despite such, till date, the virtues and drawbacks concerning the use of inclined piles are largely unknown.

For such, the present study focuses on the effects of soil nonlinearity on the response of both the vertical and inclined piles, encompassing a broad aspect of pile dynamics. Experimental investigations through instrumented model soil-pile systems on a shaking table are carried out. Response of both the solitary piles and pile groups with various configurations including the angle of inclination, spacing between the piles, and loading types, are studied. A range of

lateral loading amplitudes at the pile-head levels of floating single piles and pile groups embedded in cohesionless soil layer is considered to induce varying levels of soil strain, and in turn the soil nonlinearity. A wide range of frequency is considered to encompass the typical structural and soil periods. Practical pile inclinations of  $5^\circ$  and  $10^\circ$  besides vertical pile in the direction of loading are considered for the effects of batter.

Specifically, the dynamic response of single piles and pile groups are investigated through the measure of three distinct quantities: (a) active length of piles, (b) horizontal pile-to-pile interaction factors, and (c) horizontal impedance functions. The experimental results suggest that the behavior of soil-pile systems becomes highly nonlinear with increasing amplitude of loading, as the extent of local nonlinearity around the pile increases. Moreover, the results also indicate that the resonance of soil-pile system has a profound impact on the behavior of piles.

Comparisons between experimentally measured values of active length of pile and available approximate solutions reveal the closeness in values for very low amplitude of loadings, but for intermediate-to-high amplitude of loadings, the experimental values are smaller than those predicted by the approximate equations. Furthermore, both the static and dynamic active lengths of pile converge to an approximately identical value of six times the diameter of pile for intermediate-to-high amplitude of loadings. This suggests that the active lengths are, in fact, the same for both the static and dynamic loadings, under nonlinear conditions. Additionally, results also suggest that the passive-type failures of soil induced by applied lateral loadings in front of the pile govern the active lengths. The dynamic active lengths of pile do not show any significant dependency on the resonance of soil.

The horizontal pile-to-pile interaction factors, on the other hand, show a strong dependency on both the soil nonlinearity and resonance of the soil-pile systems. The experimental results indicate that the nonlinear effects decay with distance and become insignificant beyond spacing to the diameter ratio greater than 5. To account for such nonlinear behavior and resonance in soil, new semi-empirical equations are proposed in computing the horizontal interaction factors, as an extension to elasticity-based available approximate equations for both the close and ample pile spacings.

As for the horizontal impedance functions, horizontal impedance functions of inclined single piles are found smaller than the vertical pile and the values decrease with the increase in angle of pile inclination, contrary to the general understating that inclined piles show higher stiffnesses. Validation of such obtained experimental results is carried out through three-dimensional nonlinear finite element analyses, and the results from numerical models are in good agreement with the experimental data. Sensitivity analyses conducted on the numerical models suggest that the consideration of boundary nonlinearity at the vicinity of soil-pile interface highly influences the response of soil-pile systems. Horizontal impedance functions of  $2 \times 2$  inclined pile groups, on the other hand, show higher value of horizontal impedance functions than the corresponding vertical pile group, in line with the general understanding. Influence of pile inclination on the horizontal impedance functions of pile group is further examined through the variation of soil reactions along the pile depth. In addition, semi-empirical expressions for estimating the soil reactions, as a function of pile inclinations, are proposed.

Experimentally measured values of horizontal pile-to-pile interaction factors and single piles' horizontal impedance functions are further employed in assessing the applicability of Poulos' superposition method in computing the pile group response. Utilizing Poulos' superposition method, horizontal impedance functions of a  $3 \times 3$  vertical pile group

are computed. Comparisons between thus computed horizontal impedance functions and experimentally measured ones show a good agreement for low-to-intermediate loading amplitudes, signifying that Poulos' superposition method is valid under nonlinear conditions. For higher loading amplitudes, on the other hand, the pile group shows a distinct group behavior that is neither local nor global, leading to discrepancy between experimentally measured values and computed values by the Poulos' superposition method.

Although the majority of present work focuses on inertial loading conditions, simple two-dimensional linear finite element modeling is carried out for investigating the behavior of both the vertical and inclined piles under kinematic loading. Such analyses are carried out as a validation of experimental data from centrifuge tests. Through the comparison of acceleration and displacement response of the pile-cap, as well as the axial and bending strains of the piles for both the vertical and inclined pile foundations, seismic behavior of piles under kinematic loading is investigated.

## 論文の審査結果の要旨

当学位論文審査委員会は、平成 25 年 8 月 2 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。

近年の耐震設計法の変革に伴って、基礎と構造物の動的相互作用を考慮した地震応答評価法の確立が喫緊の課題となっている。特に、杭基礎構造物は湾岸開発地域などの埋め立て地盤や軟弱な堆積地盤においても高い支持力を発揮できることから、その利用頻度は他の基礎形式に比べて極めて高い。半世紀以上に亘る幾多の研究により、杭基礎構造物の地震時応答を評価する手法として、地盤-基礎-構造物系を要素レベルに離散化して全体系挙動を解析する方法、あるいは地盤-基礎系をインピーダンス（動的ばね特性と減衰効果を含む物理量）で置換し、これを構造物と力学的に結合して解析する動的サブストラクチャー法を利用することができる。世界の動向として、設計指針や設計基準に基づく設計実務では、現象モデル (Phenomenological Model) としての分かりやすさや簡便さから後者の手法を用いる傾向にある。これまで杭基礎-地盤系のインピーダンスに関する多くの評価式が提案されており、地盤と杭基礎の諸元を与えることで比較的容易にインピーダンスを算定することができる。評価式の多くは、線形弾性地盤を仮定した波動理論に基づく解析解を利用したものが多く。しかしながら、近年の地震被害を鑑みれば、地盤材料のひずみ振幅依存性、杭基礎近傍地盤の破壊や基礎と地盤の境界部における剥離や滑りの非線形性が生じている可能性が極めて高い。これまで、地盤の非線形性が杭基礎-地盤系のインピーダンス特性に及ぼす影響について評価した研究は極めて少なく、その特性は明らかにされていない。

本研究では、強震時における杭基礎の水平インピーダンスについて模型振動実験を主体とした評価を行い、動的解析による検証を加えてその特性を明らかにするとともに、地盤の非線形性を考慮した評価式を提案することを目的とした。特に、水平インピーダンス特性に深く関連した3つの物理量、1) 杭基礎の有効長 (Active Length)、2) 水平杭間相互作用係数、そして 3) 水平インピーダンス関数を評価の対象としている。また本研究では、一般的な直杭基礎のみならず、斜杭基礎についても評価の対象としている。斜杭基礎は通常の杭基礎に比べて大きな水平抵抗が得られる利点がある。そのため世界各国で斜杭基礎が使われている。しかし、斜杭基礎の耐震性についてはフランスの AFPS90 や Eurocode EC8/Part5 に見る様に、斜杭の利用を極力控えるような記述が散見される。現在、EU を中心に世界各国の研究者が斜杭の利用に関する見直しを進めており、本研究においては地盤の非線形性を考慮した斜杭基礎のインピーダンス特性の把握を行っている。

杭基礎の有効長に関しては、杭の柔性を評価する指標の一つであり、杭長が有効長より長い場合にはインピーダンスは杭長に依存しない。有効長の近似解は複数提案されているが、それらは線形弾性地盤の条件を仮定しており、杭径と地盤と杭の剛性比で表現されることが知られている。本研究では乾燥沙（岐阜砂）中に埋設した直杭について、加振振幅と加振振動数の二つをパラメータとした杭頭調和加振実験を実施している。本実験からは、有効長は杭が微小な変形状態において近似解と一致すること、また加振振幅を大きくした場合、杭近傍地盤の塑性化と受動的な破壊に伴い、近似解よりも実験で得られた有効長が小さくなる傾向にあることを明らかにしている。さらに、そのときの有効長は、静的加振、動的加振に関わらず、概して同じ大きさであり、振動数依存性は非常に小さいことを示している。

杭間相互作用係数は、群杭基礎内部の波動伝播と杭間応答特性を示す重要な指標であり、水平インピーダ

ンス関数を簡易に算定する際に使用される。従来、杭間相互作用係数は数値解析や波動解析により評価されており、実験等により計測が行われた事例はない。本研究は杭間相互作用係数を実験模型を用いて計測した初めての試みであり、実験で得られた杭間相互作用係数は、地盤の非線形性ならびに表層地盤の卓越振動数に著しく影響を受けることが示されている。また、杭間隔 / 杭径比が 5 を超えると、地盤の局所非線形性による影響が著しく低下することを把握している。本研究では、弾性波動理論に基づく従来の評価式を改良し、杭近傍の非線形性の影響と表層地盤の伝達特性の効果を反映した新しい評価式を提案しており、実験結果を良好に再現可能であることを示している。

単杭基礎のインピーダンス特性に関しては、杭の傾斜角を  $0^\circ$ 、 $5^\circ$ 、 $10^\circ$  の 3 つの杭について評価を行っている。斜杭の水平剛性は水平荷重の一部を軸力として支持することから、一般に斜杭の水平剛性は直杭よりも増加すると考えられてきた。しかしながら本研究の実験結果は相反する傾向を示し、傾斜角の増加に伴い水平剛性が低下する結果となった。3次元非線形有限要素法によるシミュレーション解析を用いた検証により、杭と地盤の剥離現象が斜杭の非対称性により直杭に比べて顕著となり、これが原因で水平剛性が低下するメカニズムを明らかにしている。この事実は一柱一基礎構造の安全性を評価する上で極めて重要な示唆を与えるものである。また、斜杭が群杭基礎を構成する場合には、杭間相互作用の効果によって水平剛性は直杭よりも増加することを確認している。

群杭のインピーダンス関数を算定する近似的手法として、Poulos' superposition method が用いられている。この手法は、線形弾性理論を前提として提案されており、算定にはインピーダンス関数と杭間相互作用係数が用いられる。本研究では、 $3 \times 3$  配列の 9 本杭を対象に実験計測データを用いて Poulos' superposition method を適用し、非線形条件下における同手法の適用性とその限界について検証している。その結果、加振レベルが 300Gal 程度の中間的な加振振幅までは Poulos' superposition method は群杭のインピーダンス特性を良好に再現できる。しかし、それ以上の加振振幅の場合には、群杭周辺地盤に広範囲の非線形領域が生成されることによって、同手法の再現性が低下することを明らかにしている。

地盤の非線形性が杭基礎の水平インピーダンス特性に及ぼす影響に関して、実験を主体に動特性を評価し、幾多の重要なメカニズムを解明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、従来の弾性線形理論に基づく評価式を改良し、既往の手法の妥当性を検証したことは、当該分野におい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 Earthquake Engineering and Engineering Vibration、Soil Dynamics and Earthquake Engineering、ACTA Geotechnica 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。