

氏名	NABA RAJ SHRESTHA
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1205号
学位授与年月日	令和3年3月25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	DYNAMIC BEHAVIOR OF PILE FOUNDATIONS WITH FREQUENCY-DEPENDENCY AND INTENSITY-DEPENDENCY (振動数依存性と強度依存性を考慮した杭基礎の動的挙動に関する研究)
論文審査委員	委員長 教授 齊藤 正人 委員 教授 牧 剛史 委員 准教授 谷山 尚 委員 教授 内村 太郎

## 論文の内容の要旨

Experimental investigations are carried out on instrumented pile models (both single piles and pile groups) embedded in homogeneous sand under 1g condition. Quasi-static loads with various loading rates and dynamic loads with a wide range of frequencies and amplitudes were applied at the pile head fixed in all directions except horizontal. The experimental results are verified with numerical models.

From the quasi-static loading tests, it can be concluded that the loading rate effect in the lateral bearing capacity of the pile is significant. In general, the lateral resistance increases with an increase in the loading rate. The variation of lateral load can be approximated with a linear function loading rate in log scale. On the contrary, the pile bending moment, deflection, and soil reaction distribution profile do not exhibit any rate-dependent behavior. Similarly, the displacement contour profile of the soil surface around the pile, computed with stereo particle image (stereo-PIV) technique shows does not exhibit rate-dependent behavior. These results imply a similar failure pattern in the soil irrespective of the loading velocities. The reason behind the loading rate effect is found to be related to the viscous effect in soil.

Pile head horizontal impedance function (IFs) for both single piles and pile groups evaluated with, and without residual displacement, reveal a dual frequency-dependent and intensity-dependent behavior. The real part of the IFs, i.e., dynamic stiffness, shows a decreasing trend with increasing loading amplitude strain-dependent properties of soil. On the other hand, the imaginary part of IFs, i.e., damping suggests less dependency on the loading amplitude, particularly for lower frequency range, where the effect of hysteric damping dominates. In the higher frequency range, the damping shows some variation due to the radiation

effect. A resonance in the damping tends to shift towards a lower value with the increase in the loading amplitude. The IFs become less dependent on the frequencies as the loading amplitude increases and they are essentially identical to each other for both the initial case and residual case in case of extreme loading condition.

While comparing dynamic stiffness with secant static stiffness based on a given displacement amplitude, a clear trend of the dynamic stiffness approaching towards the secant static stiffness of the back-bone curve is observed. This trend indicates the diminishes in frequency dependency of IFs accompanied by yielding procedure of soil-pile with increasing loading amplitude.

Current findings provide important information on the performance of the soil-pile system, which can be utilized for the development and verification of advanced models in the framework of soil-structure-interaction (SSI). Specifically, the intensity-dependent characteristics are dominant at yielding or near failure point of the soil-pile system, and thus this behavior should be carefully considered together with the frequency-dependent characteristics in the realistic modeling.

## 論文の審査結果の要旨

当学位論文審査委員会は、令和3年2月12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。

本論文は単杭基礎及び群杭基礎の杭頭水平力加振時における動的挙動を研究対象としている。一般に杭基礎は構造物の支持機構として用いられ、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。一方、こうした杭基礎に支えられる構造物は、自然災害、特に地震による作用を受けることでこれまで多くの被害が生じてきた歴史がある。そのため、杭基礎構造物の地震時挙動の解明は重要な課題であり、これまで国内外で数多くの研究がなされている。

地震時における軟弱地盤中の杭基礎は、上部構造物からの慣性力作用と地盤変形の作用を受けることが知られ、いずれも構造物の動的挙動を決定する上で極めて重要な役割を果たす。前者は特に慣性力相互作用問題として長年に亘り国内外の研究者によって研究が行われてきた。この慣性力相互作用を代表する特性の一つに、杭基礎の杭頭位置における水平方向の復元力特性が挙げられる。既往の研究によって、この復元力特性には振動数依存性と呼ばれる特異な性質があることが知られている。振動数依存性とは、杭頭荷重の加振振動数の違いによってその復元力が変化する性質である。この現象は地盤内の複雑な波動場の形成が主な要因であり、群杭の場合には杭相互の波動伝播によって複雑な振動数依存性を示す。既往の研究によるそれら特性の評価は、波動現象を精度良く再現することに重きが置かれていることを主な理由として、地盤を弾性体として扱うものが大半である。一方、近年の地震被害とこれに対応した性能設計への移行も相俟って、基礎の復元力特性を大変形領域まで評価する必要性が高まっている。基礎の変形特性に関する既往の研究では、主に静力学的観点から作用荷重と変形量の特性が研究されており、基礎の支持力特性や荷重と変位の履歴特性が評価されている。既往の研究により、基礎の復元力特性は変位量の増加に伴い剛性が低減するなど複雑な非線形性を呈することが知られている。また、そうした性質は振動数依存性に対して強度依存性と呼ばれている。そうした静力学的特性には、当然の帰結として動的挙動を代表する振動数依存性は一切含まれていない。現行の耐震設計では、その目的や評価手法に応じて選択的に振動数依存性と強度依存性のいずれかを使用する方法が取られているのが現状である。これら2つの特性の関係を解明することは、高精度な応答評価や耐震設計を行う上で極めて重要かつ喫緊の課題である。

本論文では上記の課題に対して、その基礎的な特性を把握するための研究として、単杭基礎と群杭基礎の実験模型を作製し杭頭載荷試験を行っている。この研究の中で、載荷速度の違いが杭基礎の降伏過程に及ぼす影響を実験的に評価するとともに、3次元非線形有限要素法を用いた数値解析を実施し詳細な現象解明を行っている。そして、復元力特性の振動数依存性を把握するために調和加振実験を実施している。振幅レベルを段階的に変化させることで、表層地盤の小変形領域挙動、基礎周辺地盤の塑性化を再現し、それらが振動数依存性に及ぼす影響を評価している。本論文は6章で構成される。

本論文の第1章では、動的相互作用に関する一般論とその重要性を既往の研究を引用しながら解説すると共に、杭基礎に関する既往の研究をレビューしている。特に従来の振動数依存性に関する理論的、解析的研究、強度依存性を考慮した Macroelement モデルなどの最近の研究動向を概説している。さらに Lumped Parameter Model (ばね質点系モデル) を利用した振動数依存性と強度依存性を同時に考慮した最新の解析手法に関して概説するとともに、そうした手法の妥当性が未だ検証されていないことを指摘し、本研究の意義と目的を詳説している。

第2章では本研究で適用する実験手法と実験模型の相似則を解説し、これに続く第3章では、単杭基礎と群杭基礎の模型を用いた載荷速度の違いによる杭基礎の降伏過程に関する検討を行っている。杭基礎の杭頭位置に水平載荷装置を取り付けて、静的載荷、低速載荷、急速載荷の3つのパターンで単調載荷、繰り返し載荷を実施している。この実験により、最大変位状態での杭体の曲げひずみ、またそれから算出した地盤抵抗は、いずれの載荷状態においても同様の値を示すことが判明している。また、表層地盤の3次元的な変位量を Stereo-PIV システムで計測し、各載荷状態において同様の変位分布が現れることを明らかにしている。このことは載荷速度の違いが基礎周辺地盤の塑性化の形態に強い影響を及ぼさず、杭頭位置での骨格曲線は一定の値を示すことを示唆している。また、この特性は近年利用されている杭の急速鉛直載荷試験と類似した性質を示すものであり、水平加振においても同様の特性を示すことは興味深く新しい知見である。

第4章では、前章と同じ模型を用いて動的調和加振実験を行っている。この実験では広帯域の振動数を対象に、微小振幅から大振幅までの入力による水平インピーダンス関数を評価している。この水平インピーダンス関数は杭頭の動的な復元力特性を表す指標であり、加振力と応答変位の位相差を考慮した動的ばね特性を表す。実験結果により、単杭、群杭ともに強い振動数依存性を示すこと、入力振幅の上昇に伴い動的ばね値が低下傾向を示すことを明らかにしている。更に、その低下傾向を第3章で得た骨格曲線の割線剛性と比較したところ、動的ばね値は骨格曲線の割線剛性に一致するように収束する特性を有することが明らかとなった。加えて、この特性は一度載荷を経験し、除荷後に再び載荷させた経路での動的ばね値でも類似した傾向を示すことも、本論文の一連の実験にて把握している。こうした特性は従来の研究では知られておらず、振動数依存性と強度依存性の関係を示す重要な成果であり、今後の高精度な慣性力相互作用のモデル化や耐震設計への実装における極めて有用な新しい知見である。

第5章では、第3章と第4章で得られた特性に関する考察と検証を目的とした3次元非線形有限要素法による数値解析を実施している。解析では地盤の非線形性として Mohr-Coulomb の弾塑性モデルと小ひずみ領域におけるひずみ振幅依存性を考慮したモデルを同時に用いている。また、杭と地盤の境界部には滑りや剥離の影響を等価に考慮した境界要素を組み込んでいる。解析の結果、第3章と第4章で観測された特性は解析においても同様の傾向が現れることを確認している。特に、動的ばね値が骨格曲線の割線剛性に一致するように収束する特性が本解析においても再現できたことは、実験結果を裏付ける重要な成果である。第6章では本論文により得られた結論ならびに知見をまとめるとともに、今後の研究課題について述べている。

以上のように、単杭基礎、群杭基礎の慣性力相互作用に関する実験的評価と解析的検討は先駆的かつ独創的であり、大変重要かつ貴重な成果が得られたといえる。また、これらの成果は今後のモデル化の精度向上や将来の耐震設計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 *Soils and Foundations*、国際会議論文集 *5th International Conference on Civil, Structural and Transportation Engineering (ICCSTE' 20)* 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。