

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 9 月 1 日現在

機関番号：12401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420454

研究課題名(和文)複合する非線形条件化での杭基礎構造物の動的相互作用評価と応答予測手法の確立

研究課題名(英文) Soil-pile-structure interaction under nonlinearity in soil and development of method for dynamic response of structural systems

研究代表者

齊藤 正人 (SAITOH, Masato)

埼玉大学・理工学研究科・教授

研究者番号：40334156

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、3年間に亘る群杭基礎構造物の強震時動的相互作用を対象にした実験的、解析的研究である。本研究では、平成26年度にせん断土槽を用いた地盤-基礎-構造物系の模型振動実験を実施し、基盤から地震動を入力した際の構造物全体系の非弾性地震応答特性を評価した。平成27年度は、これらの全体系応答を予測するための手法として、1自由度系と基礎水平スウェイモデルの連成系モデルを構築した。予測値と実験値の差異を詳細に検討するため、平成28年度に基盤入力と杭頭載荷の同時載荷試験を実施し、線形弾性時には生じない非線形時固有の相互作用間の連成作用が応答に影響を及ぼすことを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：This study deals with the mechanism of soil-pile-superstructure interaction subjected to strong ground motions by conducting shaking table tests and analytical approaches. In this study, shaking table tests were conducted first for evaluating the total response of structural systems. Then, an analytical model consisting of one-degree-of-freedom system supported by a sway model was developed. To clarify the mechanism of discrepancies between the test results and analytical results, specific table tests were performed. In the tests, base input and pile-head loading were simultaneously applied to the experimental models. The test results indicate that a new mechanism of soil-pile interaction is generated when nonlinearity in soils and interface nonlinearity occurs: kinematic interaction and inertial interaction are interrelated with each other due to inseparable nonlinear behavior in the system.

研究分野：地震工学

キーワード：動的相互作用 非線形 杭基礎 模型実験 インピーダンス 有効入力地震動

1. 研究開始当初の背景

従来、地盤-基礎系のインピーダンス特性は線形弾性領域で評価されてきた。その主な理由は、インピーダンス特性には強い振動数依存性があること、また強震時におけるインピーダンス特性の評価は、解析的にも困難を極めるためである。本研究では、これまでにインピーダンス特性をメカニカルに表現するためのモデル化を行ってきた。これを「メカニカルインターフェース」と呼ぶ。このシステムは線形弾性を仮定しており、非弾性的な挙動は追跡できない。将来的にこのメカニカルインターフェースを非弾性領域に拡張するためには、非弾性領域におけるインピーダンス特性を評価する必要がある。過去の研究において、模型振動実験を実施しその特性を明らかにしてきた。

しかし、強震時における全体システムの動的挙動を解析によってシミュレートするためには、そうした非弾性時のインピーダンス特性の評価に加えて、以下の影響について検討し、全てを明らかにしなければならない。第1に、断層から伝わる地震動は基礎層を介して表層地盤に伝播する。その際、表層地盤では構造物の有無にかかわらず、そのサイト特有の非線形性(サイト非線形性)が生じることが知られている。このサイト非線形性と基礎近傍地盤のローカルな非線形性が同時に作用するとき、既往のインピーダンス特性とは異なる特性が生じる可能性は否定できない。既往の研究では、実験システムの複雑さから、こうしたサイト非線形性と局所非線形性が同時に作用する際のインピーダンス特性を評価した例はない。実験方法の考案を含めてその特性を解明しなければならない。

2. 研究の目的

本研究では、上述した複雑な非線形条件下における地盤-杭-構造物全体系の模型振動実験を行い、その応答性状を把握する。この応答性状を既往のインピーダンス特性と新たに実施した有効入力動を用いた解析システムを構築し、比較検討を行う。これらの相違点を明らかにし、杭頭動的載荷試験と同時に基礎入力動を与える新しい試験を実施し、複合する非線形条件下でのインピーダンス特性を把握する。

3. 研究の方法

上記の目的により、以下の方法で研究を実施した。

- ・地盤-杭-上部構造物全体系の基礎入力加振試験
- ・応答予測システム(1自由度系+Sway Modelによる振動数領域解析)の構築と評価
- ・地盤-杭系の杭頭と基礎入力同時載荷試験

4. 研究成果

- (1)平成 26 年度は、地盤-基礎系、ならびに

地盤-基礎-上部構造物全体系の実験モデルを用いた模型振動実験を実施し、基礎からの地動入力条件における地盤非線形性が全体システムへの応答に及ぼす影響について実験の評価を行った(図1・写真1)。本実験では、サイト非線形性と杭近傍のローカル非線形性が同時に生じる非線形条件下での全体システムへの応答値ならびに応答特性を模型振動実験により求めた。実験方法は、埼玉大学所有の中型振動台(油圧加振型、加振力100kN)を用いてベース加振した。加振パラメータとして、表層地盤の強震振動数以降の特性までを広い範囲に評価するために6-35Hzの振動数範囲を加振領域とし、非線形性のレベルを考慮するため50Gal-500Galの加速度振幅とした。上部構造物に関して、本研究では超高層ビル等のロッキングが著しく卓越するような特殊な構造物は対象から外している。そのため、模型の寸法形状を鑑みて上部構造物は回転モーメントがフーチングに極力伝達しない工夫が必要となる。本研究では、質量の重心位置を低くし、スライドガイドと機械式ばねでベースと質量をリンクさせたシステムを構築した。計測については、杭頭から杭先端までの軸ひずみと曲げひずみ、ならびにフーチングと上部構造物、そして地中部の加速度応答を同時計測した。実験は調和振動加振と実地震動加振を実施した。

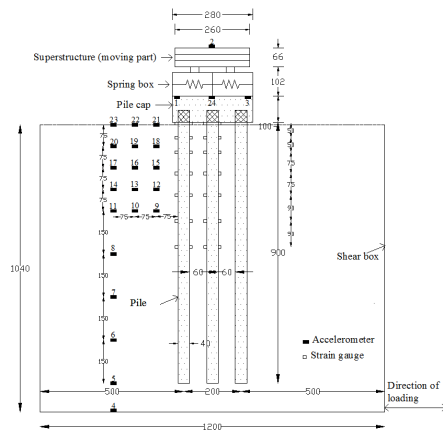


図1 地盤-杭-構造物全体系の実験モデル図

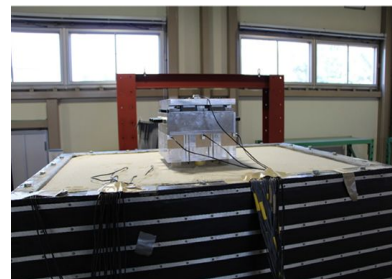


写真1 実験モデルを用いた振動試験の様子

地盤基礎系の Kinematic Interaction については有効入力動係数を実験から求めた。結果、地盤の非線形性が当該振動数範囲に及ぼす効果は限定的であり、地表面の非線形性と

ともに有効入力動も変化するが、その比率はおよそ1近傍で変動する特性を示した(図2)。一方、上部構造物を組み込んだ全体系の実験では、杭近傍の局所非線形性と地盤のグローバルな非線形性の複合的な作用によって、全体系の卓越振動数は著しく低下することが判明した(図3)。

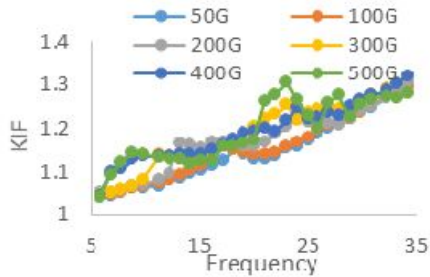


図2 有効入力動係数の結果

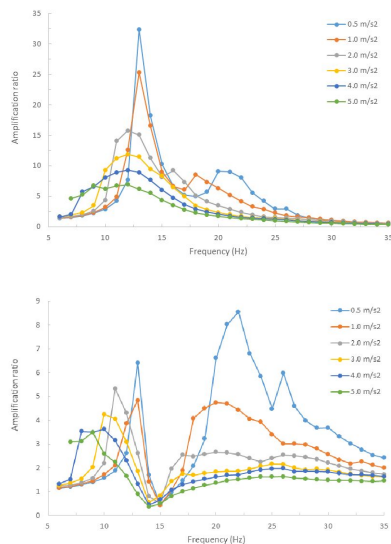


図3 構造物全体系の基盤入力に対する伝達特性の実験結果(上図:上部構造物の伝達特性、下図:フーチング天端位置の伝達特性)

(2)平成27年度は、地盤-基礎系ならびに地盤-基礎-構造物系の模型振動実験結果について、1自由度-Swayモデルによる比較検証を実施した。本検証では、模型実験で得られた各入力レベルの有効入力地震動を慣性系モデルに入力し、Swayモデルのインピーダンス特性(動的ばね特性)は既往の実験結果から得られている実験データを内挿して用いた。その結果、概して地盤-基礎-構造物系の基盤入力に対する伝達特性は、1自由度-Swayモデルによって良好に再現できることが明らかとなった(図4、5)。一方、各卓越振動数近傍において、特徴的な挙動が生じている。第1に、構造物系が主たる振動モードとなる1次卓越振動数近傍において、全体系実験から得られた卓越振動数(目標値)は解析値よりも低くなる傾向が表れている。第2に、地盤系が主たる振動モードとなる2次卓越振動数近傍においては、卓越振動数(目標値)よりも解析値が低くなること判明した。上記から、卓越振動数において系の剛性低下状態

が異なることが推察される。その主な要因は、サイト非線形性と局所非線形性を同時に受ける際の、インピーダンス特性の変化にあると予想される。つまり、1次卓越振動数近傍ではサイト非線形性が局所非線形性による剛性低下を強める効果を発揮していると考えられる。他方、2次卓越振動数近傍では、サイト非線形性が局所非線形性を弱める働きをしている可能性が推察される。

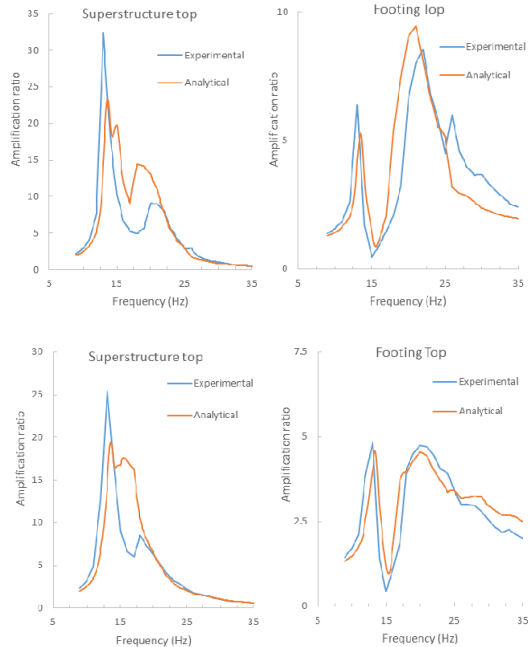


図4 実験と解析の伝達特性の比較(上図:0.5m/s²入力のケース、下図:1.0m/s²入力のケース、上部構造物の固有振動数:15.1Hz)

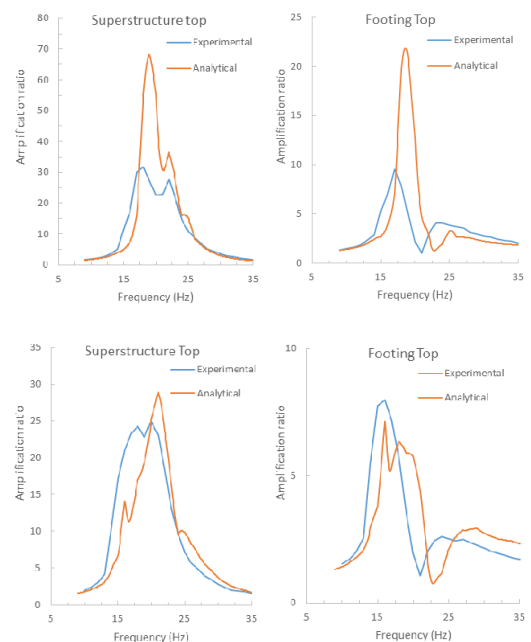


図5 実験と解析の伝達特性の比較(上図:0.5m/s²入力のケース、下図:1.0m/s²入力のケース、上部構造物の固有振動数:21Hz)

(3)平成 28 年度は、前年度までの比較検証結果を踏まえ、地盤変形と慣性力を同時载荷した場合のインピーダンス特性を実験的に検証した(写真 2)。比較検証では、インピーダンス特性がサイト非線形性と杭周辺の局所非線形性を同時に受けることで、相互作用間のインターアクションが生じていることが予想された。実験の結果、1 次卓越振動数近傍では基盤入力を与えた場合、インピーダンスの剛性項が低下することが判明した(図 6)。またその度合いは、入力レベルの増加に伴い増加することが明らかとなった。一方、表層地盤が卓越する 2 次卓越振動数近傍では、基盤入力を与えた場合、インピーダンスの剛性項が増加する傾向が表れた。この特性は平成 26 年度、平成 27 年度の比較検証結果の妥当性を裏付ける結果であり、大変興味深い。つまり、同時载荷により、1 次卓越振動数近傍では剛性低下による卓越振動数の低下が顕著になる。そのため、独立して実験から求めたインピーダンス特性をシミュレーションで用いた場合には、実際の卓越振動数を高めに評価することになる。一方、2 次卓越振動数では同時载荷により剛性増加が生じ、これにより卓越振動数が高くなる(図 7)。そのため、独立して求めたインピーダンス特性をシミュレーションで用いた場合、実際の卓越振動数を過小評価する結果となる。本実験に加えて、杭頭を静的载荷しながら、基盤入力を作用させる実験も補足的に実施した。図 8 に示すように、基盤入力作用することで杭頭における荷重と変位の関係は変化し、その勾配(剛性)は入力レベルの増加に伴い低減することが明らかとなった。

以上のことから、3年間を通じて比較検証したシミュレーション解析と実験との比較に明確な説明根拠を得るに至った。このことは、本シミュレーション技術に基づく応答予測を行う際、通常、独立した動的相互作用である Kinematic 相互作用と Inertial 相互作用には、地盤や境界部の非線形性を介して連成作用があり、これを適切に考慮する必要があることが明らかとなった。平成 28 年度に実施した実験は制御方法を含め困難を極めたものであったが、学術的に大変新しく、また強震時における応答予測において今後有用な知見である。

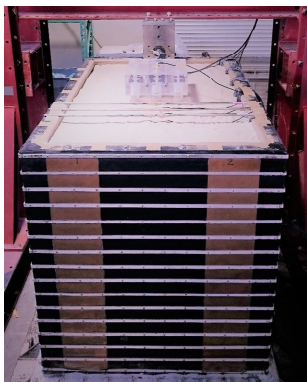


写真 2 同時载荷試験の状況

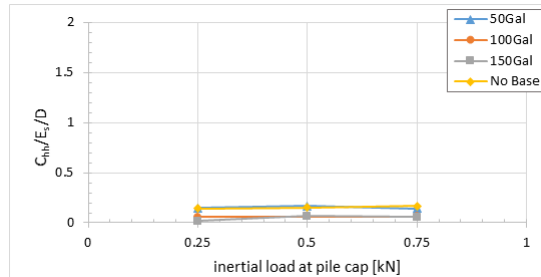
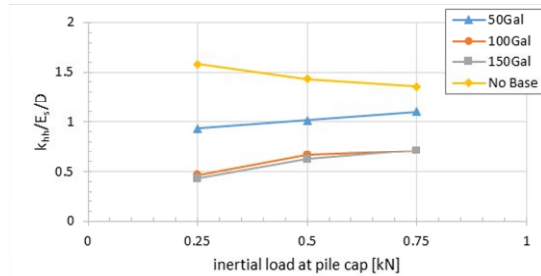


図 6 同時载荷試験(動的载荷)から求めたインピーダンス特性(10Hz)

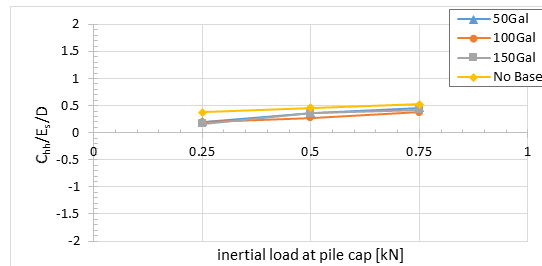
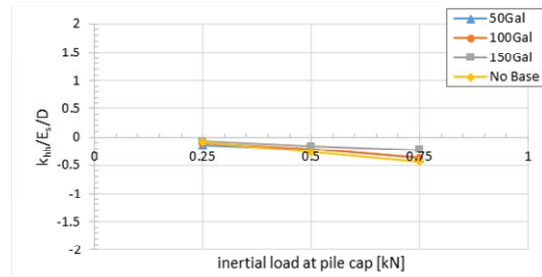


図 7 同時载荷試験(動的载荷)から求めたインピーダンス特性(21Hz)

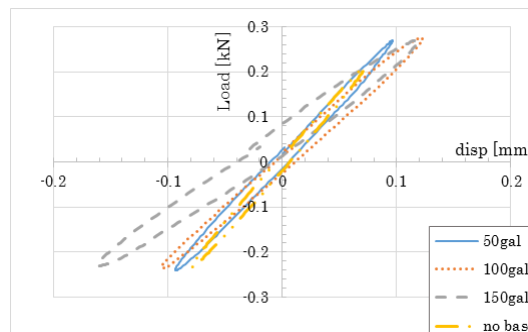


図 8 同時载荷試験から求めたインピーダンス特性(静的载荷+基盤入力)

5. 主な発表論文等
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表](計 1件)

Md Shajib Ullah、Masato Saitoh、
Experimental study on kinematic response
of soil-pile-superstructure system、第70
回土木学会年次学術講演会、2015.09.16、岡
山大学(岡山市)

6. 研究組織

(1)研究代表者

齊藤 正人(SAITOH, Masato)

埼玉大学・理工学研究科・教授

研究者番号：4 0 3 3 4 1 5 6