

| | |
|----|------|
| 氏名 | 柏 尚稔 |
|----|------|

(論文内容の要旨)

近年、活断層破壊に起因する内陸直下地震が頻発しているが、これらの震源域では、一般的に用いられる設計用地震荷重を遙かに上回る強震動が観測されている。このような地震動が構造物に作用する場合、構造物を支える杭-地盤系は強非線形挙動を呈することが指摘されており、杭基礎を合理的に設計するためには、この杭-地盤系の強非線形挙動を考慮することが必要不可欠である。しかし、耐震設計で考慮されている以上の変位を受ける杭の水平抵抗特性に関わる実情報は極めて限られており、杭-地盤系の強非線形性は十分に解明されていない。このような事情を踏まえ、本研究では建物が大地震を被った場合に現れる杭-地盤系の強非線形性が、杭基礎の水平抵抗に及ぼす影響を解明するとともに、設計で考慮されているよりはるかに大きな杭頭変位まで、建物慣性力に対する杭の耐震性能を評価することを目的としている。この目的を達成するために、乾燥砂地盤に設置した群杭の大振幅水平載荷実験を実施し、また三次元有限要素解析を用いて分析することにより、現行の設計で考慮されているよりもはるかに大きな変位を受ける杭の耐震性能を実験的・解析的に検証した。本論文は以上の結果を全7章でまとめたものである。各章の要旨を以下に示す。

第1章は序論であり、研究を行うに至った背景と本研究の目的を明記した。さらに杭の水平抵抗問題に対して取り組まれてきた既往の研究を概説し、本論文の位置付けを明確にした。

第2章では、大振幅水平載荷実験を実施し、杭頭荷重-杭頭変位関係の非線形性の進展性状について検討した。実験は重力場での大型固定土槽を用いて行い、杭には鋼管、地盤には乾燥した豊浦標準砂を用いた。実験では長い杭として挙動する杭に加えて、今までほとんど実験の行われてこなかった短い杭についても検討し、杭径の3倍の振幅までを杭頭に作用させる繰り返し載荷とした。その結果、既往の実験では確認されなかった、杭頭荷重-杭頭変位関係に現れる強非線形性を明らかにした。特に、群杭では前方杭から後方杭の順に杭頭が塑性化し、杭頭荷重-杭頭変位関係の接線剛性が低下すること、また短い杭で構成される群杭では、杭径を超える振幅になると地盤の受働破壊により履歴形状が変化し、杭頭荷重が低下することを実証した。

第3章では、大振幅水平載荷実験において地表面に現れる杭近傍地盤の変形状態を詳細に検討した。さらに、短い杭で構成される4本群杭を対象として、群杭の対称面上の地盤変状を直接観察できる実験を行い、地盤内部の変形状態についても検討した。その結果、既往の研究では確認されていない、杭近傍の地盤に現れる非線形挙動に関する実験データを獲得した。特徴的な挙動として、載荷初期では杭近傍の地盤はすり鉢状にくぼみ、載荷方向に並ぶ杭に挟まれた地盤とその周囲の地盤の間にすべりが生じること、杭径を超える振幅になるとすり鉢の外周地盤が大きく隆起し、明瞭な段差が現れることを確認した。また地盤内部を直接

観察できる実験から、短い杭の場合におけるこの現象は、杭先端から地盤への受働破壊によるもので、これが大変位履歴化における杭頭荷重の低下の原因となることを突き止めた。

第4章では、既往の研究から杭の水平抵抗の評価に対してその有効性が確認されている三次元有限要素解析を用いて、大振幅水平載荷実験のシミュレーション解析を行った。その結果、杭-地盤系の材料非線形性と杭-地盤間の接触条件を考慮した有限要素解析モデルを用いることにより、地盤の受働破壊が生じるまでの範囲で杭-地盤系の非線形性を適切に表現でき、群杭の水平抵抗を概ね評価できることを検証した。

第5章では、大振幅水平載荷実験と第4章で構築した有限要素解析を用いて、群杭-地盤系の非線形性の進展性状とこれに伴う杭頭荷重分担率の定性的傾向を分析した。その結果、杭の長さや耐力によって、群杭-地盤系の非線形性の進展性状が変化し、これに伴って杭頭荷重分担率も大きく変化することを明らかにした。特に、杭長が短く耐力が高い杭では、杭間の地盤に生じるすべりが杭先端まで達することによって、後方杭の杭頭荷重分担率が減少すること、一方で、杭長が長く耐力が低い杭では、前方杭の杭頭が塑性化する影響を受けて、後方杭の杭頭荷重分担率が増大することを明らかにした。

第6章では、既往の実大実験を参照した有限要素解析により、第5章で検討した群杭-地盤系の非線形性の進展性状が杭頭荷重分担率に及ぼす影響を分析した。その結果、杭間の地盤を介する前方杭と後方杭の相互作用が杭頭荷重分担率に及ぼす影響は無視しえず、前方杭が塑性化した後の後方杭の杭頭荷重分担率の変化は、特に短い杭で顕著であることを明らかにした。

第7章は結論であり、各章で得られた成果を要約している。

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、大地震時に現れる杭－地盤系の強非線形挙動の解明をめざし、乾燥砂地盤に設置した群杭に対する大振幅水平載荷実験を実施し、現行の設計で考慮されているよりもはるかに大きな変位を受ける杭基礎の耐震性能を、実験的・解析的に検証した内容である。本論文から得られた主たる知見は下記のとおりである。

1. 杭－地盤系の強非線形性の把握：大型固定土槽を用いた大振幅に至る繰返し水平載荷実験から、既往の研究では確認できなかった、強非線形性を有する杭頭荷重－杭頭変位関係と、載荷に伴って現れる杭頭近傍の地盤変状を再現した。とりわけ特徴的な地盤変状として、群杭の杭間のすべり線と群杭の外周地盤における明瞭な段差を同定した。さらに地盤内部を直接観察できる土槽実験から、短い杭における外周地盤の段差は、杭先端から地盤への受働破壊によるもので、これが大変位履歴下における杭頭荷重低下の原因となることを突き止めた。
2. 杭－地盤系の強非線形性を考慮した解析手法の構築：(1)で実施した実験の再現をめざして詳細な弾塑性有限要素解析を実施し、杭・地盤の材料非線形性と杭－地盤間の接触条件を考慮したモデルを用いることによって、地盤の破壊が生じる杭頭変位に至るまでの杭－地盤系の非線形性を適切に表現できること、群杭の水平抵抗機構をよい精度で評価できることを実証した。
3. 大変位下における群杭の耐震性能評価：(1)、(2)の知見に基づいて、群杭中の各杭杭頭荷重分担率は、杭頭変位の増加に伴って現れる杭・地盤の材料非線形性に大きな影響を受けること、載荷方向に並ぶ杭の位置によっても杭と周辺地盤の非線形性の現れ方が異なること、を明らかにした。さらに、大振幅水平載荷実験及び既往の実大実験を参照した有限要素法解析より、杭の長さや耐力によって群杭－地盤系の非線形性の進展性状が変化し、これに伴って杭頭荷重分担率も大きく変化することを明らかにした。

以上、本論文は乾燥砂地盤という条件下において、特に群杭に対して、既往の研究からは明確でなかった大変位下での杭－地盤系の強非線形現象を解明するとともに、群杭の水平抵抗に及ぼす影響を定量化した内容であり、杭基礎の二次設計に対して、今まで考慮できなかった杭－地盤系の強非線形性を盛り込むための基盤を構築するなど、得られた知見は耐震工学の高度化に寄与するところが大きい。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成21年2月20日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果合格と認めた。