

学 位 論 文 題 名

複合地盤杭の力学挙動評価と耐震設計手法に関する研究

学位論文内容の要旨

社会経済の IT・グローバル化や生活環境の多様化に伴い、公共構造物の機能や質の向上についての確な対応が求められてきている。そのような中、我が国の急峻な地形や多数の河川、あるいは都市部での土地利用の制約などから、今後、構造物基礎は、必ずしも良質な地盤のみではなく軟弱地盤などの不良土地盤での施工を避けることができない現況となってきた。また、軟弱地盤箇所の構造物の基礎工として杭が採用されるが、兵庫県南部沖地震を契機に耐震設計法が整備され、所定の安全性・供用性・修復性の性能確保が要求されている。

最近、杭基礎工法について新技術情報提供システム (NETIS New Technology Information System) や建設技術審査証明などで新たな方法が活用されてきているが、その多くは杭の鉛直支持力の増加を図る手法が主である。杭基礎の設計施工法において、軟弱地盤を克服するためには、特により確かな水平力を与える合理的な技術の進展が強く望まれている。

軟弱地盤中の杭の水平抵抗を向上させる一つの手法として、杭と地盤改良を併用する手法が従来から研究されている。また、地震などで被災した杭基礎の耐震補強工法として、杭周辺を地盤改良で固結させる手法などが用いられている。しかしながら、提案されているこれらの手法の多くは、地盤改良範囲や改良強度の設定法が統一されておらず、体系化された設計施工法にはなっていない。また、地震時における杭と地盤の振動特性や改良地盤と未改良地盤の境界条件に応じた杭の動的力学挙動が不明瞭であり、耐震設計法についても確立されているとは言い難い。

このような背景のもと、本研究では、新工法・新技術の一手法として、軟弱地盤に施工する杭頭部周辺に深層混合処理工法による複合地盤を形成する複合地盤杭工法を開発し、実用化している。本工法は、複合地盤のせん断強度を杭水平抵抗に反映させることで杭本数・下部工躯体を縮小させ、大きな建設コスト縮減が可能となる合理的手法である。このような複合地盤杭では、静的荷重について、杭周辺の複合地盤の改良範囲および改良強度を設定している。すなわち、杭の水平地盤反力を複合地盤のせん断強度 S から算定し、必要な地盤改良領域を杭特性長 $1/\beta$ を指標に杭水平抵抗の及ぶ範囲としている。いくつかの現場における実杭の静的水平載荷試験・鉛直載荷試験および有限要素法解析を実施して力学挙動を計測し、この考え方による設計法の妥当性を論じている。

一方、これまで杭基礎の耐震設計では、主として地盤をバネにモデル化し地震の影響を慣性力として作用させる震度法および保有水平耐力法で照査してきた。ただし複合地盤杭工法では、杭周辺に剛性の大きな人口地盤を造成するため、地震時において未改良地盤との境界部で杭体損傷などの耐震上の懸念がある。そこで、複合地盤杭の耐震性能を動的非線形有限要素法によるパラメトリックスタディおよび遠心力加振実験を行い、詳細に解析している。その結果、杭周辺に複合地盤を施すことで、レベル 1 地震動およびレベル 2 地震動において、杭水平変位、杭ひずみ、地盤変形を一定量

抑制する効果があることを確認している。また、境界条件に応じた杭体ひずみの発現の様子など、その耐震性を考察している。これらの知見に基づき、改良地盤中の杭となる複合地盤杭の耐震照査フローを策定するとともに、耐震設計上の留意点を整理している。

本研究は全 8 章で構成され、各章の概要は以下のとおりである。

第 1 章では、本研究のテーマである改良地盤における杭設計法の研究背景を説明し課題の抽出および研究の位置付けをしている。

第 2 章では、現行の杭基礎の支持力および水平抵抗に関する設計法の概要を示している。特に、道路橋における設計法をレビューしている。

第 3 章では、第 2 章に示した既往の設計法に基づき、軟弱地盤において杭周辺に地盤改良を施す複合地盤杭について、その基本的な静的設計法を検討している。その設計法では、地盤工学に基づく考察より、適正な地盤改良範囲の設定および地盤改良強度から杭水平抵抗を算定する手法について明確にしている。さらに、提案した設計法の妥当性を有限要素法で照査し、改良地盤中の杭である複合地盤杭工法の設計法を提案している。

第 4 章では、提案した複合地盤杭工法による実現場において、実杭の静的水平載荷試験および鉛直載荷試験を実施し、杭の水平地盤反力・応力および周面摩擦力に関する支持力値を計測し、本工法の設計法の妥当性を検証している。

第 5 章では、第 3 章・第 4 章での設計法の研究成果を踏まえ、複合地盤における杭基礎の耐震性について検討している。具体的な検討は、加振レベル別の遠心力模型実験および改良地盤と未改良地盤の境界条件を変化させた動的有限要素法（等価線形法）解析によって行っている。

第 6 章では、レベル 1 およびレベル 2 地震動を用いた動的非線形有限要素法により、複合地盤の有無における詳細な杭の耐震性能を検証している。その際、特に地盤改良の改良深さ・改良幅・改良強度のパラメータが、耐震性能に及ぼす影響を照査している。特に、地震力が杭変形挙動に及ぼす影響因子を検討している。

第 7 章では、杭と地盤改良を併用する複合地盤杭工法の建設コスト縮減や耐震補強工法としての有用性について検討を加えている。また、複合地盤における杭の合理的な施工法についても整理している。

最終の第 8 章は結論であり、各章で得られた知見を総括し、併せて今後の展望と課題を述べている。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 三 浦 清 一
副 査 教 授 三 田 地 利 之
副 査 教 授 藤 井 義 明

学 位 論 文 題 名

複合地盤杭の力学挙動評価と耐震設計手法に関する研究

我が国の社会基盤施設を支える重要基礎構造物は、急峻な地形や都市部等での土地利用の制約などから、必ずしも良質な条件にある地盤のみではなく軟質帯などの不良地盤における施工を余儀なくされる状況にある。さらに、最近の地震動荷重の多様化や軟弱地盤で考慮されるべき変位量の低許容値化などを受けて、構造物の基礎工は大規模になる傾向にあり、建設コストの増大を誘発している。

このような背景のもと、本研究では、軟弱地盤中の杭の水平抵抗を向上化させる手法並びに高耐震性能を保有する基礎工の構築について検討を進めた。具体的には、軟弱地盤域に施工する杭の頭部周辺に深層混合処理工のような方法によって改良地盤を形成するという複合支持地盤杭に着目し、その力学的な挙動と評価について理論的・実験的な研究を展開した。さらにこのような考えを種々の原位置条件にある地盤の杭基礎工に適用し、従来の設計に比べて杭の本数や躯体の縮小化がどの程度可能かについて検討している。なお、このような複合地盤杭工法では杭頭部にアンバランスな人工地盤を形成することになるため、基礎工の耐震性を詳細に見極めておくことが必要である。そこで、本研究では複合地盤杭の地震応答特性を一連の遠心力場の室内実験により検討し、特に複合地盤と未改良地盤の境界条件別の動的力学挙動を明らかにしている。さらに複合地盤の諸元の違いによる耐震性能の変化を、動的非線形有限要素法によるパラメトリックスタディによって解析している。

本論文は8章から構成されるが、研究の成果を章毎に要約すると以下のようなものである。

第1章では、本研究のテーマである複合地盤における基礎設計法に関する研究背景と課題を抽出するとともに、研究の位置付けをしている。

第2章では、杭の支持力および水平抵抗の評価法および基礎地盤の改良工法の概要を示し、併せて現行の道路橋における杭基礎設計法を論述している。

第3章では、基礎頭部周辺の軟弱地盤を改良して構築したいいわゆる複合地盤杭の基本的な設計法に関して静的有限要素法等に基づいて詳細に考察している。その結果、このような基礎の設計では、杭の水平抵抗の影響範囲すなわち複合地盤の必要な改良範囲を杭に作用する受働土圧の作用方向で規定される領域として設定可能であることを明らかにしている。なおこの領域設定法は、モール・クーロン破壊基準や極限地盤反力法をその工学的根拠とするものであり、基礎を構成する各杭の水平地盤反力は複合地盤のせん断強度を変形係数に変換して導くことができるとしている。

第4章では、複合地盤杭工法を採用した種々の地盤条件の施工地点において、水平載荷試験およ

び鉛直載荷試験を行い、実杭の地盤反力や杭周面の摩擦抵抗等力等の支持力特性を観測し、これらと提案した設計法との整合性を明確に説明している。

第5章では、このような複合地盤における基礎の耐震性を検討している。具体的には複合地盤杭の動的応答特性を、一連の遠心力載荷実験および複合地盤と未改良地盤の境界条件を変化させた等価線形法による有限要素法解析によって調べている。これらの研究より、杭の水平変位やひずみおよび基礎地盤の変形量は、想定するレベル1地震動およびレベル2地震動に対して、すべて規定値以下に抑制できていることを示している。なお、複合地盤の強度や改良範囲等の違いが基礎の地震応答特性に及ぼす影響を詳しく調べた結果、改良深さが地盤杭の動的力学挙動に決定的に関与していることが明らかにされている。

第6章では、種々の地震動レベルにおける実杭の地震応答特性を動的非線形有限要素法によって調べている。特に、複合地盤の有無による杭の耐震性能の違いが定量的に示されている。また、複合地盤の改良深さ・改良幅・改良強度等の相違が実杭の動的力学挙動に及ぼす影響が明確にされている。これらの一連の検討から、複合地盤杭の耐震設計は、現行の震度法や地震時保有水平耐力照査法等の静的解析のみによるのではなく、動的応答解析による耐震照査が必須であることを指摘するとともに、複合地盤杭の標準的な耐震性能照査手順を提案している。

第7章では、複合地盤杭工法の建設コストや耐震補強工法としての有用性を他の方法と比較検討することにより、提案する本方法は従来工法に比べて最大5割程度のコスト縮減を導くことが明示されている。

第8章は結論であり、各章で得られた知見を総括し、今後の展望と課題を述べている。

これを要するに、著者は、これまで不明瞭であった基礎工としての杭の力学挙動を的確に評価した上で複合地盤杭の合理的な設計施工法を確立するとともに、基礎構造物の耐震設計手法について新知見を得ており、地盤工学および基礎工学の発展に寄与するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格があるものと認める。