



杭支持構造物の地震応答性状に関する研究

宮本, 裕司

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

1992-10-02

(Date of Publication)

2012-06-18

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

乙1668

(JaLCOI)

<https://doi.org/10.11501/3070633>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D2001668>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



氏名・(本籍)	宮 ^{みや} 本 ^{もと} 裕 ^{ゆう} 司 ^じ	(東京都)
博士の専攻分野の名称	博士(工学)	
学位記番号	博ろ第64号	
学位授与の要件	学位規則第4条第2項該当	
学位授与の日付	平成4年10月2日	
学位論文題目	杭支持構造物の地震応答性状に関する研究	
審査委員	主査 教授 日下部 馨	
	教授 金谷 弘	教授 北村 泰 寿

論 文 内 容 の 要 旨

ここ数年来、産業構造の転換や都市機能の再編を背景に、新しい立地環境のもとに、新しい都市空間の形成が急速に進みつつある。いわゆるウォーターフロント、リバーフロントの開発に代表されるこのような都市に建設される建築構造物は、その一つ一つが備える機能も多岐にわたり、地震による被害、損傷が社会、経済に及ぼす影響は計り知れず、将来経験するであろう大地震時の被害を最小限にとどめるべく、耐震工学が果たさねばならない使命はますます重要なものとなっている。

このような建築構造物の立地条件は、沖積地や埋立地の軟弱地盤での建設が避けられないため、杭等の間接基礎工法をもつ構造物がほとんどである。また、構造物は地下階を有し、杭本数は数十本から数百本に及ぶものもあり、杭を支持する良好な地盤は、深い場所では数十メートルにも達している。さらに、杭基礎が用いられる地盤では、均質地盤とみなし得る地盤条件はまれで、堆積層からなる成層地盤が一般的である。また、地下水位が高い場所では、大地震時には地盤の液状化が予想され、杭基礎との相互作用も一層複雑化する。一方、このような条件を、杭支持構造物の地震応答解析モデルに厳密に取り入れることは不可能に近く、ある程度の解析条件、仮定を設けた実用的な地震応答解析モデルであることが望まれる。また、このような解析モデルの適用においては、実証データに基づいた十分な解析モデルの検証が必要である。

以上のような観点から、本論文では、杭支持構造物の地震応答性状に影響を与える杭基礎-地盤系の動的相互作用効果を実証的、解析的に明らかにし、杭支持構造物の合理的な地震応答解析モデルを提案することを目的としている。

本論文は全6章から構成されている。以下に、各章の研究成果の概要を示す。

第1章では、現在数多く建設されている杭支持構造物の地震応答性状を評価する上で、杭基礎と地盤の動的相互作用に関する既往関連研究の現状と問題点を明らかにし、本論文の目的と位置付け、研究内容を明示した。

第2章では、杭支持構造物の地震応答解析モデルとして、動的サブストラクチャー法に基づく考えを整理し、群杭の動的インピーダンスと基礎入力動の解析法として、三次元弾性波動論に基づくグリーン関数法と実用的な解析法として三次元薄層要素法を用いた方法を示した。杭支持構造物の地震応答性状を支配する群杭の動的インピーダンス (Inertial Interaction) と基礎入力動 (Kinematic Interaction) の解析的検討では、解析パラメータとして、単杭については地盤条件 (半無限均質地盤と成層地盤) や杭種別 (鋼管杭と鉄筋コンクリート杭) の違いによる影響を、群杭については杭本数や杭間距離の影響を明らかにした。結果として、群杭のインピーダンスは、加振方向、地盤条件、杭本数、杭間距離によりインピーダンスの値や周波数特性が大きく変化することを指摘した。特に、杭本数の増加による杭一本当たりの剛性に関係するインピーダンス実部の低下は著しく、群杭効果を的確に評価することの必要性を指摘した。また、杭基礎の入力動は、群杭の存在により水平、上下方向とも高振動数領域で入力低減がみられること、水平入力時には回転入力動が生じるが、この回転入力動は杭本数が多くなるとその量は小さくなることを指摘した。さらに、杭支持構造物の地震応答解析を、パラメータ解析で得られた群杭の動的インピーダンスと基礎入力動を考慮したスウェイ・ロッキングモデルを用いて実施し、上部構造物の地震応答を支配するものとして、群杭インピーダンスの評価が大きく影響を与えるが、有効入力動に関しては上部構造物の応答に与える影響が小さいことを指摘した。また、簡易地震応答解析モデルとして、群杭インピーダンスを単杭の静的剛性と群杭係数から評価した解析モデルの有効性を示した。

第3章では、実地盤に製作した4本杭模型基礎の振動実験と地震観測結果から、基礎強制加振時と地震入力時の杭基礎の応答性状を明らかにした。これらの実測結果から、杭基礎加振時の地盤抵抗は、水平加振時では地表面近くの地盤抵抗が、上下加振時では杭長に沿った周辺地盤と杭端での支持地盤における地盤抵抗が支配的となることを指摘した。また、地震時の杭の応答は、地中では地盤応答に支配され自由地盤系とほぼ同様の応答性状を示すが、杭頭では基礎の慣性力の影響によりその応答が大きくなることを指摘した。三次元薄層要素法を用いた解析法の検証では、振動実験から算定した動的インピーダンスとの比較により、本解析法の有効性を明らかにした。また、地震観測結果のシミュレーション解析を、同解析法で求めた動的インピーダンスを用いたスウェイ・ロッキングモデルにより行い、杭支持構造物の地震応答性状を把握する上で本解析モデルが有効であることを明らかにした。

第4章では、56本杭からなる群杭基礎および地下階を有する84本杭からなる群杭基礎の振動実験を実施し、これら2つの群杭基礎の振動性状を明らかにした。また、三次元薄層要素法に基づく解析法を用いて、動的インピーダンスのシミュレーション解析を行い、その有効性を明らかにし、本解析法が実用的な手法として、多本杭を有する杭基礎のインピーダンス評価に適用できることを検証した。さらに、当該実験杭基礎を対象にして杭本数をパラメータとする解析を行い、多本杭を有する杭基礎の動的インピーダンス特性を明らかにするとともに、基礎形式が異なる直接基礎や埋込み基礎との比

較により、群杭基礎の静的剛性（インピーダンスの実部）について明らかにした。結果として、両実験杭基礎のインピーダンスとも、群杭効果による剛性の低下と周波数特性の変化が現れていること、長尺杭をもつ群杭基礎の静的剛性は直接基礎とほぼ同等なものとなるが、基礎直下の成層地盤と杭間の連成効果に起因するインピーダンスの周波数特性が顕著に現れることを指摘した。また、地下階をもつ群杭基礎のインピーダンスは、基礎底面位置の群杭インピーダンスが支配的となり、実験杭基礎のように杭本数が多い場合、基礎側面の地盤抵抗によるインピーダンスの増加は小さくなることを指摘した。

第5章では、実地盤内の上載応力条件を再現できる遠心載荷装置を用いて、乾燥砂および飽和砂層内の4本杭基礎モデルの地震波加振実験を行い、入力地震波の加速度レベルの違いによる地盤の応答性状（加速度、変位、過剰間隙水圧）、杭基礎の応答性状、杭の曲げモーメントについて実証的に明らかにした。これらの実測結果から、杭基礎の応答は、入力レベルが大きくなると地盤の非線形性や液状化にともない応答加速度の振幅や周波数特性が大きく変化すること、杭の曲げモーメントは、地盤震動の影響を受け地盤深い位置で大きなモーメントを示す分布形状となることを指摘した。また、この応答の傾向は、液状化層では過剰間隙水圧の上昇に対応して著しくなることを指摘した。解析モデルとして、杭基礎-地盤系を群杭効果を考慮したウィンクラー型の水平地盤ばねを有する1本の曲げせん断棒にモデル化し、自由地盤の応答に有効応力解析を、相互作用ばねに杭の変形による地盤非線形性と有効応力の変化を取り入れたモデルを提案した。解析結果は、実験時の杭基礎の応答性状と良く対応し、非線形地盤や液状化地盤内の杭基礎の応答を把握する上で本解析モデルが有効であることを明らかにした。さらに、非線形、液状化地盤に建つ杭支持構造物の地震応答性状に関して、本解析モデルを用いた解析的検討を行い、地盤の応答性状の違いが上部構造物の地震応答に与える影響を明らかにした。杭の地震時応力は、地盤線形時には杭頭付近では上部構造物の慣性力が、杭端および地中では地盤震動による寄与が支配的となるが、液状化地盤内では有効応力の低下にともなう著しい地盤抵抗の低下により、上部構造物の慣性力が深い位置まで杭に大きな応力を生じさせることを指摘した。また、中間層に液状化層がある地盤では、液状化層で急変する地盤応答の影響を受け、杭に大きな応力が生じることを指摘した。

第6章では、本論文の成果を整理し、各章での結論を要約した。

以上のように、本論文では杭支持構造物の合理的な耐震設計に資することを目的として、杭支持構造物の地震応答性状に関する杭基礎-地盤系の動的相互作用効果を実証的、解析的に明らかにした。さらに、非線形、液状化地盤に建つ杭支持構造物の地震応答を評価する上で有効な地震応答解析モデルを示した。

論文審査の結果の要旨

建築構造物は堅牢な地盤に直接支持させて建設するのが理想的であるが、国土の狭いわが国では、

必ずしも堅牢な地盤上に建設できるとは限らず、逆に、近年では、軟弱な地盤に多くの高層建物が建てられているのが実状である。このような軟弱地盤に建てられる構造物は、その重量を杭によって堅牢な地盤に伝えて支持することになる。ところで、地震時における構造物の挙動は、軟弱な地盤ほどその影響を大きく受けることになるので、杭支持構造物の耐震設計に際しては、杭基礎の動的問題に関する研究が必要となる。

本論文は、杭支持構造物の地震応答性状に影響を及ぼす杭基礎—地盤系の動的相互作用効果を実験的、解析的に明らかにするとともに、杭支持構造物の合理的な地震応答解析モデルを提案することを目的としており、6章から構成されている。

第1章では、現在数多く建設されている杭支持構造物の地震応答性状を評価する上で、杭基礎と地盤の動的相互作用に関する既往関連研究の現状と問題点を明らかにし、本論文の目的と位置付け、研究内容を明示している。

第2章では、杭支持構造物の地震応答解析に用いる杭基礎—地盤系の振動特性の解析法として、精算法と略算法の二つを提案している。すなわち、精算法としてはリング状加振に対するグリーン関数を用いて群杭基礎の動的相互作用を解析しており、略算法としては三次元薄層要素法を用いて群杭の杭頭における連成効果を解析することにより群杭基礎の振動特性を求めている。ここでは、群杭基礎の複素剛性に相当する動的インピーダンスを先の精算法と略算法により解析し、両者の比較から、略算法が実用的に有効であることを検証している。さらに、群杭基礎のより簡略化した地震応答解析モデルとして1対のスウェイとロッキングの複素ばねを静的剛性と群杭係数により表現すると共にその有効性も示している。

第3章では、実地盤に製作した4本杭模型基礎の起振動実験と地震観測を行い、群杭基礎の振動性状を計測している。起振機実験結果から算定した動的インピーダンスを略算法による解析結果と比較することにより、本解析法の有効性を検証している。また、地震観測結果のシミュレーション解析を、群杭基礎のスウェイ・ロッキングモデルを用いて行い、杭支持構造物の地震応答性状を把握する上でこのモデルが有効であることを明らかにしている。

第4章では、56本杭からなる群杭基礎および地下階を有する84本杭からなる群杭基礎の振動実験を実施し、これら2つの群杭基礎の振動性状を計測している。一方、略算法を用いて、動的インピーダンスのシミュレーション解析を行い、この解析法が多本杭を有する杭基礎のインピーダンス評価にも適用できることを検証している。

第5章では、実地盤内の上載応力条件を再現できる遠心載荷装置を用いて、乾燥砂および飽和砂層内の4本杭基礎模型の地震波加振実験を行い、地盤の非線形性や液状化が群杭基礎の振動性状、杭の曲げモーメント等に及ぼす影響について検討している。一方、杭基礎—地盤系を群杭効果を考慮したウィンクラー型の水平地盤ばねを有する1本の曲げせん断棒にモデル化し、自由地盤の応答に有効応力解析を、相互作用ばねに杭の変形による地盤非線形性と有効応力の変化を取り入れたモデルを提案し、この解析結果を実験による杭基礎の応答性状と比較することにより、非線形地盤や液状化地盤における杭基礎の応答を把握する上で本解析モデルが有効であることを明らかにしている。さらに、非

線形、液状化地盤に建つ杭支持構造物の地震応答性状に関して、本解析モデルを用いた解析的検討を行い、地盤の非線形性、液状化が上部構造物の地震応答に及ぼす影響について検討を加えている。

第6章では、本論文の各章で得られた研究結果を要約している。

本研究は、軟弱地盤に建設される杭支持構造物について、その群杭基礎－地盤系の振動特性および地盤－杭基礎－構造物連成系の地震応答性状を解析と実験の両面から研究したものであり、杭支持構造物の耐震安全性を評価する上での重要な知見を得たものとして価値ある集積であると認める。

よって、学位申請者宮本裕司は、博士（工学）の学位を得る資格があると認める。