

学 位 論 文 題 名

道路橋の地震応答特性に与える 杭基礎の群杭効果の影響に関する研究

学位論文内容の要旨

レベル2地震動と呼ばれる強地震動に対して橋梁構造物の耐震性を適切に照査するには、構造物地上部位の損傷過程に立ち入った照査を行うだけでなく、構造物の応答を地盤のひずみレベルの増大にともなう基礎とその周辺地盤(以後、「基礎-地盤系」)の動的挙動を反映した照査を行う必要がある。

橋梁構造の上部工、支承、橋脚および底版など(以後、「構造物-基礎系」)については、1995年兵庫県南部地震による被災を契機に、それらを構成する部材の動力学特性やモデル化手法、照査手法、構造細目などについて理論面だけでなく実験的研究が進展し、さらには、免震・減震・制震など地震による振動制御に関する研究も進められ、橋梁構造物の耐震性向上に資する多くの工学的情報がもたらされている。

基礎-地盤系は構造物-基礎系の応答による慣性力(Inertial Interaction)を受けるだけでなく、地盤の振動変位による影響(Kinematic Interaction)も受ける。また、地盤はその応力～ひずみ関係において非線形性に富む材料であり、地盤自体が地震動の伝達媒体となることも原因し、構造物-基礎系に比較して未解明な点が多く、それは基礎と地盤間に介在する簡単なバネや入力損失の問題として扱われる場合が多い。さらに、杭基礎においては、レベル2地震動下のように大変位を呈する場合に、各杭の隣接する地盤を介した相互干渉(Pile-soil-pile Interaction)による影響の評価が課題となる。そうした中、実務においては、新技術の採用やコスト縮減などの面から高性能杭を採用するケースが多くなり、限定的ではあるが、杭基礎の許容水平変位を緩和する方向にもある。これらは杭基礎の剛性が低下し、地震時における応答変位が従来に比べて大きくなる方向にあることを意味する。さらに、既設杭基礎の耐震診断や補強は今日的な課題であり、その基礎-地盤系の挙動解明と評価手法の確立が急務となっている。

本研究は、杭基礎で支持される道路橋における耐震性照査手法の高度化を目指し、杭基礎の高レベル地震動下における挙動を評価するために重要となる基礎-地盤系に係わる四つの技術的テーマについて明らかにすることを目的とする。一つ目は地盤の動的非線形変形特性のモデル化手法と構造物の非線形応答への影響、二つ目は構造物-基礎-地盤系(構造全体系)の地震時応答における杭基礎のInertial InteractionおよびKinematic Interactionと群杭効果、杭配置と群杭効果、基礎-地盤系の振動モードと群杭効果、さらにそれらが橋梁構造全体系の応答に与える影響、三つ目は基礎-地盤系の振動モードと杭間地盤のすり抜け現象、また、群杭効果への影響、四つ目は杭基礎の変位時における杭配置と各杭が地盤から受ける復元力への影響である。

テーマ1:地盤の動的変形特性のモデル化手法と構造物の非線形応答への影響

基礎-地盤系の相互作用の評価において、地盤の動的応答特性の評価が重要であり、地盤の動的変形特性のモデル化手法などが課題となる。本研究では、始めに、地震観測が実施され、地盤情報が公開されている実地盤を簡単な一次元でモデル化し、地盤の非線形変形特性に等価線形化手法を適用した重複反射理論(以後、「SHAKE」)、非線形変形特性の骨格曲線をROおよび双曲線モデルで表し、Masing履歴則を適用した逐次積分法による応答解析を振動数特性の異なる2タイプの地中観測波を用いて実施する。次に、鋼製橋脚で支持される道路橋を自由度系非線形モデルで表し、地盤の応答解析で得られる地表波を入力地震動とする非線形応答解析を行い、構造物の非線形応答指標である最大変位じん性率、履歴エネルギー吸収および残留変位、および、弾性加速度応答スペクトル曲線などに与える影響を考察する。

SHAKEは地盤の固有振動数や入力波の卓越振動数において選択的に地盤のせん断応力を大きく評価し、応答加速度を過剰に評価する。これによる構造物の応答特性に与える影響を明らかにした。また、逐次積分法による応答値は入力波や地盤の振動数特性に依存しないが、骨格曲線を規定するパラメータの設定方法が地盤のせん断応力～せん断ひずみ履歴に影響を与え、構造物応答の振動数特性に一定の影響を与えることを明らかにした。

テーマ2:杭基礎で支持される橋梁構造と地盤の一体モデルによる動的相互作用解析

杭基礎で支持された道路橋と平面ひずみを仮定する2次元有限要素法による地盤との一体モデルによる動的

相互作用解析を実施し、杭基礎の群杭効果と基礎-地盤系の変位モードや橋梁構造全体系の振動数特性に与える影響を明らかにする。本研究では、2次元一体解析における杭基礎-地盤系のモデル化手法に関する最近の研究動向を踏まえ、地盤を2次元有限要素法で、構造物-基礎系を2次元骨組みでモデル化し、それらを杭周辺の土の構成則から与えられるせん断応力-せん断ひずみ関係を用いて規定する相互作用バネを介して結合一体化する方法(貼り合わせモデル)を採用した。また、基礎は卓越する変位モードの異なる「支持力性能が一般的な打ち込み工法による鋼管杭」と「軸方向支持力性能が高く回転変位の大きい鋼管ソイルセメント杭」による杭基礎を対象とした。地盤はせん断応力-せん断ひずみ関係の主応力軸の回転が評価可能なマルチスプリングモデルを採用し、各スプリングの応力～ひずみ関係は Masing 履歴則を適用した修正双曲線モデルに、地盤のせん断強度はモールクーロンの破壊基準に従うものとした。

地震動の継続時間中において、Kinematic Interaction が卓越する時間帯は杭と杭の奥行き方向に隣接する地盤との変位差(以後、「地盤のすり抜け」)が小さく、Inertial Interaction が卓越する時間帯は地盤のすり抜けが大きいこと、同時に、構造物-基礎系の Locking 振動モードは Sway 振動モードに比較して地盤のすり抜けが大きく、基礎としての剛性や各杭の水平力分担比に大きな影響を与えることを明らかにした。また、杭基礎における杭列の奥行き方向の間隔が地盤のすり抜け量に影響し、橋梁構造全体系の応答特性に影響を与えることを明らかにした。

テーマ 3: 杭基礎の変位モードと群杭効果

杭基礎の水平載荷実験による既往の研究を踏まえ、テーマ 2 と同じモデルによる静的非線形解析 (Pushover 解析) を実施した。既往の研究において実施されている底版下面端部に載荷する場合 (Sway 変位モードが卓越) は、杭頭水平力分担比等、既往の研究と整合する結果が得られ、数値実験としての妥当性を確認した。一方、橋脚天端に載荷する場合 (Locking 変位モードが卓越) は、変位方向の前方杭の水平力分担比は既往の研究に比較し大きくなり、また、同一水平変位量に対し、Locking による変位の比率が大きい場合に杭基礎の水平方向の剛性は低下することを明らかにした。

杭基礎の剛性は杭に隣接する地盤の局所的非線形化に伴う地盤のすり抜けの影響を受け、それは基礎の変位モードや奥行き方向の列間隔に因ることを明らかにし、現行の基準類で規定されている群杭効果を現すパラメータは地震時における応答特性を反映していない場合があることが明らかにした。

テーマ 4: 杭基礎における各杭が地盤から受ける復元力の杭配置による影響

杭基礎の水平変位時において杭基礎の各杭が地盤から受ける復元力の杭配置による影響を杭周辺地盤の変位や応力に着目し、地盤の 2 次元水平断面モデルを用いて検討したものである。初めに、単杭と単杭が変位方向と直角方向(以後、「並列方向」)に並ぶことによる地中応力の「重なり合い」による影響、次に、単杭が変位方向(以後、「直列方向」)に並ぶことによる地中応力の「影になる」による影響をそれぞれ杭の間隔との関係において考察し、杭が「直列方向」と「並列方向」に並ぶ群杭における「影になる」かつ「重なり合う」ことによる水平変位～復元力関係を明らかにした。また、一方向単調載荷だけでなく、地震時の想定される交番繰り返し載荷を通し、Pile-Soil-Pile 相互作用の視点から杭基礎の微小変位および大変位時における群杭効果を明らかにした。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 林 川 俊 郎

副 査 教 授 三 浦 清 一

副 査 教 授 笹 谷 努

副 査 准教授 松 本 高 志

学 位 論 文 題 名

道路橋の地震応答特性に与える

杭基礎の群杭効果の影響に関する研究

杭基礎は上部構造および下部構造躯体などの動的応答による慣性力を受けるとともに、構造物周辺地盤の振動変位の影響を同時に受ける。杭基礎を有する道路橋の耐震性を照査する場合には、レベル2地震動作用時に地盤ひずみの増大にともなう地盤剛性の低下が顕著となり、基礎と地盤との動的相互作用の影響を無視することはできない。とくに、杭頭部を連結した群杭では大地震時における動的応答が局所的に非線形性を呈し、その耐震設計を困難なものとしている。このような状況の中、道路橋の全体構造系としての耐震性能を向上させるためには、杭基礎の耐震設計技術の高度化が必須とされている。また、既設杭基礎の耐震診断や補強は今日的な課題であり、基礎と地盤との動的相互作用の解明と耐震性評価手法の確立は急務の課題となっている。

本論文は、杭基礎で支持される道路橋における耐震性能照査手法の高度化を目指し、杭基礎の高レベル地震動下における動的挙動を評価するために重要となる基礎-地盤系に係わる以下の検討課題について明らかにしている。(1) 地盤の動的変形特性のモデル化手法と構造物の非線形応答への影響、(2) 杭基礎で支持される橋梁構造物と地盤との一体モデルによる動的相互作用解析、(3) 杭基礎の変位モードと群杭効果、(4) 杭基礎の変形時において各杭が地盤から受ける復元力の杭配置による影響である。

本論文は全6章から構成されており、各章の内容は以下のようなものである。

第1章では、杭基礎を有する道路橋の耐震性に関する検討課題と既往の研究成果をまとめ、本研究の目的を明確に示し、各章の構成について記述している。

第2章では、等価線形化手法を適用した重複反射理論 (SHAKE) は地盤の固有振動数や入力地震波の卓越振動数により地盤のせん断応力を過大に評価し、上部構造の動的応答特性に与える影響が大きいことを述べている。また、地盤の非線形特性を RO モデルおよび双曲線モデルで表し、Masing 則を適用した逐次積分法は非定常な地震動入力により非線形応答解析手法として有効であり、比較的精緻な解を得ることを明らかにしている。さらに、地盤の変形特性を規定する構成則のパラメーターの設定が地盤のせん断応力とせん断ひずみ履歴に影響し、RO モデルと双曲線モデルによる応答値にはあまり差異がないことを提示している。

第3章では、地盤の変位応答が卓越する時間帯において、杭と杭の奥行き方向に隣接する地盤との変位差(すり抜け)は小さく、構造物-基礎系の応答が卓越する時間帯においては地盤のすり抜けが大きいことを明らかにしている。構造物-基礎系の回転変位応答(ロッキング振動)は並進変位応答(スウェイ振動)に比較して、杭間地盤のすり抜け量が大きくなることを提示し、水平方向復元力の分担が大きいことを明らかにしている。また、杭基礎における杭列の奥行き方向間隔が地盤のすり抜け量に影響を与え、橋梁構造全体系の振動特性にも影響することを論述している。

第4章では、地盤のすり抜け現象と群杭効果、基礎剛性や杭頭水平力分担等を杭基礎の変位モードとの関係について検討している。杭基礎の剛性は地盤のすり抜けによる影響を受け、基礎の変位量だけでなく、その変位モードや杭の奥行き方向の列間隔に依存することを提示している。また、現行の設計基準類で規定されている大変位時の群杭効果を表すパラメーターは地震時における応答特性を反映していない場合があることを指摘している。

第5章では、杭が地盤から受ける復元力、杭基礎周辺の地盤応力および地盤変位等に注目し、地盤の2次元水平断面モデルを用いて杭基礎の水平変位時における群杭効果を調べている。杭の直列配置および並列配置による影響を単調载荷のみならず、交番繰り返し载荷による非線形解析により、杭基礎の大変位時における群杭効果を明らかにしている。杭基礎の群杭効果は杭が直列方向および並列方向に近接して並ぶことによる相互作用の影響が大きいことを提示している。また、交番繰り返し载荷による杭の復元力は、杭の並列間隔や変位振幅による影響が小さいことを明らかにしている。

第6章では、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、著者は高レベル地震動下における杭基礎の群杭効果と動力学的挙動を的確に評価し、杭基礎で支持された道路橋の耐震性能照査手法の高度化を行う上で有益な知見を得たものであり、橋梁工学、地震工学、鋼構造学に貢献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あるものと認める。