

軟弱地盤における橋梁下部工の地震応答特性に関する研究

学位論文内容の要旨

日本における構造物の耐震設計の始まりは、1891(明治 24)年の濃尾地震が契機といわれている。これを機に、極めて直感的ではあるが、簡便で実用上十分な精度が得られる震度法を用いた耐震設計が行われるようになった。その後の度重なる地震被害を教訓にその都度耐震設計法が見直され、日本の耐震工学は世界を大きくリードしてきた。そのため、日本が世界有数の地震国であるにもかかわらず、長大橋梁、巨大ダム、新幹線や高速道路など、高度な社会基盤施設の整備が可能となった。

地震による橋梁の被災は兵庫県南部地震までに、主なものでも 20 回に及んでいる。耐震設計法としては、1923(大正 12)年の関東地震以降初めて地震の影響を考慮するようになり、1952(昭和 27)年十勝沖地震により設計震度の見直しが行われた。1964(昭和 39)年の新潟地震では液状化による被害が認識され、1978(昭和 53)年宮城県沖地震では鉄筋コンクリート構造物の地震時変形性能が注目された。

このように過去の地震被害を教訓にした原因究明、ならびに実橋での強震観測によるデータ収集・蓄積と統計解析、モデル実験や動的解析による実挙動の解明など、橋梁の地震応答特性や耐震性能向上に関する研究が行われ、これらの成果を盛り込んで橋梁、特に橋梁下部工に対する耐震設計基準が見直されてきた。この基準により、橋梁の供用期間中における発生確率の高い地震動に対しては、十分な耐震性能を確保していた。

しかし、地震動の想定を越えた 1995(平成 5)年兵庫県南部地震により人命や構造物に多大な被害が生じ、我々は改めて震災という自然災害の恐ろしさや地震という自然現象への備えの難しさを思い知り、耐震設計法の不完全さが露呈した。この地震による公共性の高い土木構造物の被害の重要性に鑑み、土木学会は耐震基準に対する提言を行った。これらを受けて道路橋、港湾施設や鉄道構造物では、供用期間中に発生する確率が低くても大きな強度を持つ地震動に対して、耐震性能を確保するため基準の改訂が行われた。この改訂には最新の研究成果が加えられたが、まだ検証や解明が十分行われていない耐震設計上の課題が残されている。特に、軟弱地盤に関しては強震動による動的挙動の非線形性が著しく、その地震時応答特性の解明が待たれている。

そこで本研究は耐震設計の課題解決の一助になることを目的に、軟弱地盤に建設された橋梁下部工の地震応答特性を明らかにし、橋梁下部工の耐震性を向上させるための基礎資料を提供する。そのために、①橋梁下部工の被災と耐震設計基準の変遷、および②兵庫県南部地震以降の橋梁下部工の耐震設計法を整理し、耐震設計法における課題を抽出した。次に、③兵庫県南部地震による橋梁下部工の被災メカニズムを究明し、④軟弱地盤上の実橋における強震観測や地震応答解析を通じて、⑤地震動の入力方法と下部工の解析モデル化、ならびに地盤・基礎の動的相互作用について検討し、軟弱地盤における橋梁下部工の地震応答解析の実務に向けた提案を行った。

本論文は7章で構成される。

第1章では、研究の背景とその目的を明らかにしている。

第2章では、地震による橋梁の被災とこれに対応して見直されてきた耐震設計基準の変遷について述べている。さらに、橋梁の耐震設計上最も影響の著しい兵庫県南部地震の地震動の特性、この地震による橋梁下部工の被害の特徴、ならびに当面の復旧仕様の考え方について概説している。

第3章では、兵庫県南部地震後に改訂された新道路橋示方書・V耐震設計編の基本方針や耐震設計法などの要点を説明し、第2章の下部工被害が教訓としてどのように反映されたかを述べている。さらに、同様に改訂された港湾の施設の技術上の基準・同解説、ならびに鉄道構造物等設計標準・同解説とこの道路橋示方書・同解説を比較し、考え方の相違点を明確にした上で、これらの基準で残された課題や未解明の地震時挙動を整理している。

第4章では第3章の課題の内、地盤や基礎への地震動の入力方法、および橋梁下部工のモデル化を検証するため、兵庫県南部地震で被災した第二摩耶大橋を事例にして、橋梁の被災原因を地震応答解析と静的弾塑性解析から究明する。これらの解析から、基礎のモデル化や地震動入力方法による地震応答への影響を把握し、課題解決の方向性を検討している。

第5章では、第3章で取り上げた課題の内、地盤と基礎の動的相互作用を検証するため、実橋での強震観測記録を用いて地震応答解析を行い、軟弱地盤での地盤震動、地盤バネによる地盤と杭基礎間の動的相互作用効果、群杭の杭列に対する地盤バネの考え方について明らかにしている。

第6章では、発生確率は低いが強震動であるレベルⅡクラスの地震動に対して、下部工の地震応答特性に対する考察として、第4章や5章で得られた知見を総括し、確認すべき課題を整理するとともに、軟弱地盤における橋梁下部工の地震応答解析の実務に向けた提案を行っている。

第7章は本研究の結論であり、得られた知見と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 田 地 利 之
副 査 教 授 三 浦 清 一
副 査 教 授 三 上 隆

学 位 論 文 題 名

軟弱地盤における橋梁下部工の地震応答特性に関する研究

多大な人的・物的被害をもたらした1995年兵庫県南部地震は、人々にあらためて震災の恐ろしさや地震への備えの難しさを思い知らせるとともに、耐震設計法の不完全さを認識させるに十分であった。そもそも日本における構造物の耐震設計の始まりは1891年の濃尾地震が契機と言われているが、いわゆる震度法による橋梁の耐震設計が行われるようになったのは1923年の関東地震以降であり、1952年十勝沖地震により設計震度の見直しが行われた。1964年の新潟地震では液状化による被害が認識され、1978年宮城県沖地震では鉄筋コンクリート構造物の地震時変形性能が注目された。このように過去の地震被害を教訓にした原因究明、実橋での強震観測によるデータ収集・蓄積と統計解析、モデル実験や動的解析による実挙動の解明など、地震応答特性や耐震性能向上に関する研究成果を盛り込んで、橋梁、特に橋梁下部工に対する耐震設計基準が見直されてきた。

兵庫県南部地震による被害の重要性に鑑み、道路橋や港湾施設、鉄道構造物を対象に、供用期間中の発生確率は低いが極めて強い地震動に対する耐震性能確保のための設計基準の改訂が行われた。この改訂には最新の研究成果が加えられたが、まだ検証や解明が十分行われていない耐震設計上の課題が残されている。特に軟弱地盤に関しては強震動による動的挙動の非線形性が著しく、その地震時応答特性の解明が待たれている。

以上のような背景のもと、本研究は橋梁下部工の被災と耐震設計基準の変遷を整理し、耐震設計法における課題を抽出するとともに、兵庫県南部地震による被災メカニズムの究明と軟弱地盤上の実橋における強震観測や地震応答解析を通じて、地震動の入力方法と下部工の解析モデル化ならびに地盤・基礎の動的相互作用について検討し、橋梁下部工の地震応答解析法の実務に向けた提案を行ったもので、7章からなる。

第1章では、研究の背景とその目的を明らかにし、本研究の位置づけを行っている。

第2章では、地震による橋梁下部工の被災と耐震設計基準の変遷について概説し、橋梁の耐震性能にもっとも大きな影響を及ぼしたのは兵庫県南部地震であり、鉄筋コンクリート橋脚の段落とし部や鋼製橋脚に被害が生じ、基礎には大きな残留変位や曲げ亀裂が見られたことを示し、これらは地盤の液状化による側方流動が主因と考えられること

を示唆している。

第3章では兵庫県南部地震以降に改訂された橋梁下部工の耐震設計法を概説し、改訂により耐震設計法のレベルが大幅に向上したが、レベルⅡ地震動のような最大規模の強震動によって生ずる現象や地震応答に関して未解明の課題があるとし、橋梁下部工の耐震設計上、基礎の応答変位・残留変位ならびに保有耐力や変形能を照査するために、地盤や基礎への地震動の入力方法、地盤と基礎の動的相互作用を検証し説明することが重要であることを論じている。

第4章では前章で示した課題のうち、地盤や基礎への地震動の入力方法を検証するために、兵庫県南部地震で被災した第二摩耶大橋を対象にして、地震応答解析と静的弾塑性解析を行って、橋梁下部工の被災メカニズムを論ずるとともに、基礎のモデル化や地震動入力方法による地震応答への影響を把握し、課題解決の方向性を検討している。

第5章では、第3章で取り上げた課題のうち、地盤と基礎の動的相互作用を検証するために、軟弱地盤上に建設された羽田スカイアーチについて強震観測を行い、観測記録と地震応答解析の比較から、軟弱地盤での地盤震動、地盤バネによる地盤と杭基礎間の動的相互作用効果等を明らかにするとともに、群杭の杭列に対する地盤バネの考え方について論じている。

第6章では、レベルⅡクラス地震動に対する下部工の地震応答特性に関する考察として、第4章や5章で得られた知見と確認すべき課題を整理するとともに、軟弱地盤における橋梁下部工の地震応答解析法の実務に向けた提案を行っている。

第7章は本研究の結論であり、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、レベルⅡのような最大規模の強震動に対する橋梁下部工の耐震設計上重要な、基礎の応答変位・残留変位ならびに保有耐力や変形能照査のための地震動入力方法、地盤と基礎の動的相互作用について詳細に検討し、実務上有用な多くの新知見を得るとともに、軟弱地盤における橋梁下部工の地震応答解析法の実務に向けた具体的提案を行っており、地盤工学ならびに耐震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あるものと認める。