

学 位 論 文 題 名

Tower Nonlinear Dynamic Response of Cable-Stayed Bridges under Great Earthquake Ground Motion

(斜張橋タワーの大地震時非線形応答性状に関する研究)

学位論文内容の要旨

斜張橋は補剛桁、塔、ケーブル等から構成され、その支間長が増大するにつれて複雑な動的応答性状を示す。現在、大規模地震動に対する斜張橋の非線形応答性状を正確に把握し、耐震性能を向上させることが重要とされている。斜張橋の補剛桁の支持形式としては、橋軸方向に可動支承、水平反力分散支承あるいは免震支承を採用することにより、長周期化が図られ主塔に作用する慣性力を低減することが可能である。しかし、橋軸直角方向においては固定支承が多用され、たとえ弾性支承を用いたとしても橋軸直角方向の長周期化は難しく、大規模地震動に対する主塔の耐震設計が困難となる場合がある。斜張橋の塔基部が損傷することにより、塔頂部には大きな残留変位が生じ、さらに、ケーブル張力が弛緩することにより斜張橋の使用性に問題が生じることも予想される。そこで、大規模地震動を受ける斜張橋タワーの非線形応答性状を把握するために、材料および幾何学的非線形性を考慮した弾塑性有限変位時刻歴応答解析が提案される。さらに、斜張橋の非線形動的応答性状を明らかにし、耐震性能を向上させる対策として、免震デバイスの設置および低降伏点鋼の使用について比較検討される。

本論文は7章から構成されている。まず第1章では斜張橋の非線形動的応答解析および耐震性能に関する既往の研究、本研究の目的および各章の構成について記述する。

第2章では、本研究で対象とした斜張橋タワーを3次元骨組構造にモデル化し、有限要素法による固有振動解析および非線形動的応答解析について述べる。ここで採用した弾塑性有限変位時刻歴応答解析法は、鋼材の降伏とひずみ硬化および幾何学的非線形性を考慮したはり柱要素の有限要素法とニューマーク β 法および修正ニュートンラフソン法を併用した解析手法である。はり柱要素の断面内の塑性領域の判定は、断面分割されたファイバー要素で表現する。各部材要素の面内および面外の2軸曲げモーメントと軸力の相関関係はこのファイバー要素を用いることにより考慮される。また、入力地震波は兵庫県南部地震で記録された3成分加速度波形を用い、橋軸方向にN-S成分、橋軸直角方向にE-W成分、鉛直方向にU-D成分として時刻歴応答解析を行う。

第3章では、本研究で対象とした斜張橋について述べ、解析モデルの構築を行うとともに固有振動特性と動的応答性状を把握することを目的とする。対象とした橋梁は、現在、北海道内において建設されている斜張橋である。斜張橋のタワー形状が地震時応答性状に与える影響を検討するために、斜張橋全体構造系から主塔のみを取り出し、3次元骨組構造にモデル化する。斜張橋補剛桁の重量は主塔のケーブル定着部に鉛直方向に作用させる。ケーブルはばね要素に

モデル化し、ばね定数はケーブルの断面積、応力およびサグを考慮したエルンストの接線弾性係数を用いて概算する。固有振動解析結果より、主塔の面内1次固有周期の値が面外1次固有周期よりも大きく、得られた有効質量比がともに大きいことが確認された。JR 鷹取波により計算された塔頂部の応答変位および塔基部に発生する曲げモーメント、せん断力、軸力は他のレベルⅡ標準波により計算された応答値よりも大きいことが認められた。

第4章では、斜張橋タワーの大地震時応答性状に与える減衰特性、鉛直地震動、初期不整、タワーの骨組形状などの諸因子の影響を調べるためにパラメトリックスタディーが実施される。まず、鉛直地震動の影響は取り扱う減衰特性に大きく依存することが示される。質量比例型減衰は塔基部に発生する軸力および塔頂部の加速度応答を過大に評価することが分かった。斜張橋タワーの動的応答解析においてはレイリー減衰を用いることが有効である。初期たわみの影響は主塔高さの0.1%以内の実務設計範囲において非常に小さいことが示される。また、塔断面の製作時における溶接残留ひずみの影響は比較的小さいことが明らかにされる。タワーの骨組形状により、つまり、左右の主塔を結ぶ水平梁の位置や長さによっては、斜張橋タワーの動的応答に好ましくない影響を与えることが数値計算により示される。逆V型タワーは橋軸方向、橋軸直角方向ともに応答変位が小さく、逆V型タワーよりも長い水平梁を有するH型や門型タワーの応答変位は比較的大きくなる傾向がある。しかし、塔基部における軸力は逆V型タワーがもっとも大きな軸圧縮力と負反力を発生することが確認された。大きな負反力が生じることはアンカーボルトの浮き上がりが懸念され、斜張橋タワーの耐震設計に注意を要する。

第5章では、斜張橋タワーの耐震性能を向上させる対策の一つとして、水平梁の中央部または両端部において鉛直変位あるいは回転を許す免震デバイスの設置が提案される。水平梁に免震デバイスを挿入することにより斜張橋タワーの長周期化が図られ、さらに、エネルギー吸収機能を有することから、主塔に作用する地震力はかなり軽減されることが分かった。主塔基部に作用する面内せん断力、曲げモーメントおよび軸力は基本タワーモデルの解析結果と比較して軽減効果が明らかとなり、免震デバイスの有効性が確認された。とくに、逆V型タワーでは大きな負反力が発生する問題点も改善されることが明らかとなった。斜張橋タワーの水平梁は、地震により損傷を受けた場合あるいは地震発生前に他の部材と交換することが可能である。もう一つの耐震性能向上対策として、水平梁に低降伏点鋼を使用することが提案される。主塔鋼材の降伏点より0.28倍程度の低降伏点鋼を使用した場合には、塔基部に作用する軸力、せん断力、曲げモーメント等の応答値が軽減され、その有用性が認められた。

第6章では、幅広のフーチング基礎を有する斜張橋タワーの大地震時応答性状における動的相互作用の影響について述べる。地盤と構造物との動的相互作用を考慮するために、3次元骨組モデルと集約ばねモデルが採用される。水平方向にせん断変形を受ける地盤の履歴曲線として、双曲線型のH-Dモデルが用いられる。また、大きな地震動が作用する場合には、フーチング基礎が支持地盤から浮き上がることもあり得るため、フーチング基礎底面にギャップ要素を導入した。簡易的な集約ばねモデルは応答ピーク値を比較的良好に評価することができるが、上部構造の応答加速度を過大評価し、塔基部における軸力を過小評価することが分かった。フーチング基礎の応答鉛直変位は地震動の鉛直成分よりも体積重量の大きい基礎のロッキング振動による寄与が卓越していることが分かった。フーチング基礎の浮き上がりが斜張橋タワーの動的応答変位に与える影響は小さいものの、部材断面力を減少させることが認められた。

第7章では、各章で得られた知見についてまとめ、本研究の総括を行った。

学位論文審査の要旨

主 査 助 教 授 林 川 俊 郎
副 査 教 授 佐 藤 浩 一
副 査 教 授 角 田 興 史 雄
副 査 教 授 三 上 隆

学 位 論 文 題 名

Tower Nonlinear Dynamic Response of Cable-Stayed Bridges under Great Earthquake Ground Motion

(斜張橋タワーの大地震時非線形応答性状に関する研究)

先の兵庫県南部地震では、高速道路や鉄道などの橋梁構造物が甚大な被害を受けた。これにより、道路橋耐震設計法の再検討がなされ、道路橋示方書・耐震設計編の改訂が行われた。現在、中小規模の支間長を有する高架橋を中心として耐震設計の再考がなされ、動的解析法の研究が盛んに行われている。しかし、斜張橋の動的応答解析に関する研究は数少なく、今後の発展が期待されている。本論文は、斜張橋タワーを対象として3次元立体骨組構造にモデル化を行い、材料および幾何学的非線形性を考慮した弾塑性有限変位動的応答解析プログラムを独自に開発し、大規模地震動を受ける斜張橋タワーの非線形応答性状を明らかにし、耐震性能向上に資する新たな知見を得たものである。

本論文は全7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、研究の背景および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、有限変位問題を支配する仮想仕事方程式に基づき、有限要素法の手法により接線剛性マトリックスを定式化している。材料の非線形性はひずみ硬化を考慮したバイリニア型の応力-ひずみ関係で表現されている。構造物の幾何学的非線形性と材料非線形性を含む時刻歴応答解析では修正ニュートンラフソン法とニューマーク β 法を併用した数値計算により実施する方法を開発している。3次元骨組構造にモデル化された部材要素の降伏判定は、断面分割されたファイバー要素で表示されている。また、入力地震波は兵庫県南部地震で記録された加速度波形を採用し、橋軸方向にN-S成分、橋軸直角方向にE-W成分および鉛直方向にU-D成分を同時入力する手法を提示し、開発した弾塑性有限変位動的応答解析プログラムの適用範囲を広げている。

第3章では、本研究で対象とした斜張橋タワーについて述べ、解析モデルの構築を行うとともに固有振動特性を明らかにしている。斜張橋タワーの面内1次および面外1次固有振動モードがともに卓越することを確認している。JR鷹取波により計算された主塔基部の面内曲げモーメント

および軸力は他のレベルⅡ標準波により計算された応答値よりも大きいことを指摘している。

第4章では、斜張橋タワーの動的応答性状に与える減衰特性、鉛直地震動、初期不整、タワー形状の影響を明らかにしている。質量比例型減衰は主塔基部に発生する軸力および塔頂部の加速度応答を過大評価する可能性があり、レイリー減衰を採用する有効性を提示している。斜張橋の主塔高さの0.1%以内とする実務設計の範囲において、初期たわみの影響は非常に小さいという知見を得ている。また、主塔製作時における溶接残留ひずみの影響は応答値のほぼ数パーセント以内であり、その影響は比較的小さいことを明らかにしている。斜張橋タワーの骨組形状によって、主塔の応答変位、軸力、曲げモーメントなどが複雑に変化することを明示し、逆V型タワーでは大きな負反力が発生することを指摘している。本研究で開発した弾塑性有限変位動的応答解析プログラムは、この種の動的な影響を調べる上で有用であることを示している。

第5章では、斜張橋タワーに作用する地震力を軽減する対策の一つとして、水平梁にエネルギー吸収機能を有するデバイスを設置すること、および水平梁を低降伏点鋼で置換することを提案し、有益な知見を得ている。まず、エネルギー吸収機能を有するデバイスを使用した場合、主塔の長周期化が図られ、塔基部に発生する面内曲げモーメントおよび軸力等がかなり軽減されることを明らかにしている。また、大きな負反力を発生する逆V型タワーでは、明確な耐震性能の向上が認められる。つぎに、主塔鋼材の降伏点よりも0.28倍程度の低降伏点鋼を水平梁に使用した場合、低降伏点鋼の履歴エネルギー吸収効果により、主塔基部に発生する断面力を軽減させ、その有用性が認められることを明示している。

第6章では、斜張橋タワーの動的応答性状における地盤とフーチング基礎との動的相互作用の影響について明らかにしている。フーチング基礎の3次元骨組モデルよりも簡易的な集約ばねモデルは応答ピーク値を比較的よく捉えることができるが、上部構造の応答加速度を過大評価し、塔基部の断面力を過小評価する可能性があることを指摘している。また、フーチング基礎の応答鉛直変位は地震動の鉛直成分よりも基礎のロッキング振動による影響が大きいことを明らかにしている。さらに、フーチング基礎の浮き上がりは斜張橋タワーの動的応答変位に与える影響は小さいものの、塔基部の断面力をかなり軽減させることを指摘している。

第7章では、各章で明らかとなった内容を要約し、本論文を総括している。

これを要するに、著者は、斜張橋タワーの3次元非線形挙動を把握するために不可欠な弾塑性有限変位動的応答解析手法を開発するとともに、大規模地震動による非線形動的応答性状を明らかにし、耐震性能向上に資する新たな知見を得たものであり、橋梁工学、鋼構造学、地震工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。