

Seismic Response of Curved Highway Viaducts with Isolation Bearings and Cable Restrainers

(免震支承と PC ケーブルを有する曲線高架橋の動的応答性状に関する研究)

学位論文内容の要旨

Highway viaducts are extremely important components in modern transportation networks. Bridges play the role of critical lifeline facilities due to their significance in the economic development of a nation and their importance in supporting the daily functions and needs. Unfortunately, such essential systems often become the victims of earthquakes. Society suffers a tremendous cost and inconvenience due to the collapse of a bridge. Even non-collapsed, the temporary lost of post-earthquake serviceability of important bridges may cause very costly disruption to vehicle traffic on major transportation arteries and is simply unacceptable. Ideally, earthquake-resistant constructions should be designed to have regular configurations so that their behavior is simple to conceptualize and analyze. This ideal is often not achievable in bridge structures due to the irregularities imposed by site conditions and traffic flow requirements. In practice, it is generally accepted the fact that bridges with irregular configurations complicate and potentially magnify the seismic responses.

The widely recognized susceptibility to seismic damage of horizontally curved highway viaducts is substantially amplified with the rupture of continuity of the superstructure at expansion joints. The increasing need for safer bridges has stimulated the adoption of a common protection strategy consisting in the replacement of the vulnerable steel bearing supports with seismic isolation devices. Moreover, isolated viaducts can be seismically upgraded through the installation of cable restrainers that provide connection between adjacent spans. While the effects of cable restrainers are well understood for straight bridges, it is not clear how effective this unseating prevention measure is for curved bridges, and how much varies the possibility of structural damage on seismically isolated structures. This is due to the considerable complexity associated with seismically induced joint movements, which may occur in both tangential and radial directions. Even though the application of the mentioned earthquake protection techniques, the complexity associated with the analysis of curved viaducts requires a realistic prediction of the structural response, especially under the extreme ground motions generated by level II earthquakes.

Therefore, the purpose of this study is to analyze the overall performance of highway viaducts with and without seismic isolation, as well as the effectiveness of the use of unseating prevention cable restrainers. For this purpose, seismic responses are calculated on a three-dimensional bridge model using a numerical method based on the elasto-plastic finite displacement dynamic response analysis,

considering both geometric and material nonlinearities. Particular emphasis is focused on the expansion joint behavior due to the extreme complexity associated with connection between isolated and non-isolated sections in curved viaducts. The bridge seismic performance has been evaluated for isolated and non isolated models, considering several parameters, such as radius of curvature, type of bearings, earthquake ground motion, and use of unseating prevention cable restrainers.

The calculated results clearly demonstrate that curved viaducts are more vulnerable to deck unseating damage. It has been observed that for more curved viaducts, this possibility increase significantly. However, this type of seismic damage is reduced initially by the installation of LRBs and subsequently by the installation of cable restrainers. Moreover, the use of cable restrainers provides to the bridge a similar behavior in case of curved and straight tending bridges, despite of the curvature radii. In terms of tangential joint residual damage, curved viaducts are found particularly vulnerable. This damage was significantly reduced once LRBs were installed. In restrained viaducts, an important reduction of the residual joint tangential displacement is appreciated and similar values of residual joint tangential displacement are obtained.

Also curved viaducts are found vulnerable to pounding damage. Viaducts supported on steel bearings represent the worst conditions in terms of seismic response, while seismically isolated cases prove to be more effective. A significant reduction in the impact forces at the expansion joint is observed by the installation of LRB supports. Furthermore, even though the differences on the radii of curvature among the viaducts, the application of cable restrainers reduces the possibility of pounding damage. Finally, in this analysis, the effectiveness of seismic isolation combined with the use of cable restrainers on curved highway viaducts is demonstrated, not only by reducing in all cases the possible damage but also by providing a similar behavior in the viaducts despite of curvature radius.

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 林 川 俊 郎

副 査 教 授 緑 川 光 正

副 査 教 授 菊 地 優

副 査 准教授 松 本 高 志

学 位 論 文 題 名

Seismic Response of Curved Highway Viaducts with Isolation Bearings and Cable Restrainers

(免震支承と PC ケーブルを有する曲線高架橋の動的応答性状に関する研究)

1995 年の兵庫県南部地震では高速道路や鉄道などにおける高架橋が数多くの被害を受けた。高架橋は上部構造、支承、橋脚から構成されており、その耐震性能を向上させるためには、構成部材を個別に設計するのみならず、高架橋全体系の地震応答性状を把握し、想定される地震動に対して高架橋の安全性を確保することが重要である。とくに、曲線高架橋は上部構造が曲線であり、3 次元な拵がりを有する構造であることから、地震時の応答性状は非常に複雑であり、詳細でかつ実用的な非線形動的応答解析プログラムが求められている。また、フェールセーフ機能として働くべき落橋防止構造にも甚大な被害が生じ、レベル 2 地震動に対する落橋防止構造の性能照査型設計法の確立が求められている。

このような背景のもと、本論文は隣接する上部構造や支承条件が異なる曲線高架橋を対象として 3 次元骨組構造の解析モデルを構築し、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開発し、PC ケーブルを有する曲線高架橋の非線形地震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-ひずみ関係で表現し、移動硬化則を適用している。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方法を提示している。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、入力地震波は橋軸方向、橋軸直角方向および鉛直方向の 3 成分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、ファイバー要素を用いて単純支持されたアプローチ桁と3径間連続支持桁から構成された2連曲線格子高架橋の解析モデルを適切に構築している。また、鋼製支承、免震支承および伸縮装置を定式化し、その構造諸元を明示している。1994年ノースリッジ地震および1995年兵庫県南部地震で観測された地震波を採用し、その振動特性を明らかにしている。

第4章では、鋼製支承を有する2連曲線格子高架橋の動的応答性状に及ぼす曲率半径の影響についてパラメータ解析を実施している。曲率半径が小さくなると、桁端部に発生する衝突力が大きくなり、支承の損傷に伴い落橋する可能性が高くなることから、支承部に十分な桁かかり長を設けることを指摘している。さらに、橋脚基部の損傷が顕著に現れ、橋軸直角方向の残留変位も大きくなることから、曲線高架橋の使用性に問題が生ずることを指摘している。

第5章では、免震支承を有する3径間連続曲線高架橋と単純支持されたアプローチ桁橋との動的相互作用を考慮した動的応答性状について検討している。鋼製支承に比較して免震支承を用いた場合には、可動支承部桁端の応答変位がかなり減少し、橋軸直角方向の残留変位も低減することを明らかにしている。さらに、橋脚基部の損傷は著しく低減されることを示し、従来の鋼製支承に換わり免震支承を適用することの有効性を指摘している。

第6章では、落橋防止PCケーブルを有する2連曲線格子高架橋の非線形応答性状を明らかにし、落橋防止ケーブルが橋軸方向および橋軸直角方向ともに有効に働くことを指摘している。可動支承部桁端の応答変位および橋軸直角方向の残留変位は落橋防止PCケーブルを適用することにより、顕著な低減を図ることができ、地震後の供用が可能であることを指摘している。また、免震支承と落橋防止PCケーブルを併用することにより、桁端部に発生する衝突力および橋脚基部の損傷を著しく低減できることを明らかにし、2連曲線格子高架橋の耐震性能が向上することを明示している。

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、著者は免震支承と落橋防止PCケーブルを有する曲線高架橋の弾塑性有限変位動的応答解析手法を開発するとともに、レベル2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。