

Seismic performance of isolated curved highway viaducts equipped with unseating prevention cable restrainers

(落橋防止ケーブルを有する免震曲線高架橋の耐震性能に関する研究)

学位論文内容の要旨

In recent years, horizontally curved viaducts have become important components in modern highway systems as the most viable option at complicated interchanges and urban expressways where geometric restrictions and constraints of limited site space make extremely difficult the adoption of standard straight superstructures. The widely recognized susceptibility to earthquake damage of curved bridges is substantially amplified with the rupture of continuity of the superstructure at expansion joints. Recent strong earthquakes have repeatedly demonstrated that during an earthquake, adjacent spans often vibrate out-of-phase, causing three types of displacement problems. The first type is the catastrophic unseating of deck superstructures that occurs when the seismically induced separation at the expansion joint is excessively large. The second type is a local damage caused by the spans pounding together at the joints. Finally, the third type of damage is related to permanent separations of damaged expansion joints that may considerably disrupt the post-earthquake serviceability of a bridge.

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 isolated curved bridges. This is due to the considerable complexity associated with seismically induced joint movements, which may occur in both tangential and radial directions. In addition, the current design methodology, based on an equivalent static analysis procedure, is not able to ensure the ability of restrainers to operate under the high demands generated by near-fault earthquake ground motions.

The primary objective of the thesis is to investigate the possible advantages that cable restrainers provide to improve the seismic performance of isolated curved highway viaducts subjected to Level II earthquake ground motions. The successful accomplishment of this main objective has been achieved in three progressive stages. The first specific stage consists in the development of a sophisticated three-dimensional computer program combined with a precise model of the viaduct in order to obtain a realistic prediction of bridge structural demands under strong earthquake excitations. In the second stage, the effectiveness of isolation lead rubber bearings (LRB) to reduce seismic damage has been demonstrated through extensive parametric studies varying the size of the lead plug and the radial restraint characteristics of the isolators. Furthermore, an innovative trilinear analytical model of the isolators has shown its ability to accurately represent the bearing behaviour at high strains. Even though the LRB bearings are capable of preventing deck unseating damage, serviceability of the isolated viaduct will be interrupted due to pounding damage and significant residual tangential joint separations that impede vehicle traffic. Therefore, for the last third stage, the isolated curved viaduct is equipped with cable restrainers, which are bi-directionally modeled to simulate yielding and failure behaviour of the cable. The calculated results have shown that adequate cable restrainers are able to minimize the possibility of deck unseating, eliminating pounding and residual joint

separation damages. The investigation results provide sufficient evidence and excellent basement to ensure the appropriate selection of cable restrainers according to characteristics of the isolation system.

The thesis contents are organized in seven chapters, which are further divided into several sections and subsections. The chapters have individual introduction, which give brief orientations of the subject under investigation. For a detailed discussion of various aspects of the subject, many references have been included in each chapter. The specific objectives of each chapter are as follows:

Chapter 1 provides the general introduction and motivating objectives of this research.

Chapter 2 presents the theoretical approach for a sophisticated three-dimensional analytical program capable of simulating structural behaviour in severely inelastic response and accurately predicting seismic response of bridges. The theoretical foundation of the non-linear finite element formulation includes the best features of several previous studies. A three-dimensional element, capable of modeling geometric and material non-linearities, is developed based on the fiber element model. An incremental-iterative method based on the Newmark direct integration method and the Newton-Raphson method is employed for obtaining the solutions of the nonlinear dynamic equilibrium equations. Finally, the energetic analysis formulation of the problem is also presented.

In Chapter 3 the comprehensive three-dimensional analytical model of the highway viaduct object of this research is presented. The effects of the analytical model assumptions are investigated in detail using non-linear seismic time-history analysis. In order to ensure a realistic prediction of the bridge seismic response, a parallel evaluation of two-dimensional and three-dimensional analytical models of the highway viaduct is systematically performed for comparison. Simultaneously, the three-axiality effects of Level II earthquake ground motions on the response and performance of simply-supported highway viaducts are extensively discussed.

Chapter 4 examines the influence of two important parameters that can play a major role on the seismic response of highway viaducts. Firstly, the overall structural performance of the model of highway viaduct is compiled, systematically compared and discussed in order to establish a correlation between seismic structural damage and bridge orientation respect to the active fault due to rupture-directivity effects of near-field earthquakes. Secondly, the complex behaviour of simply-supported skewed viaducts is precisely analyzed. Particular emphasis is focused on calculation of seismic forces acting on individual bearing supports due to the significant bearing damages suffered by skewed highway viaducts during recent strong earthquakes.

In Chapter 5, the expected seismic vulnerability of bridge structures with curved deck geometries supported on standard steel bearings is analyzed to obtain a refined estimation of seismic demands on most critical bridge components. In order to improve the seismic performance of highway viaducts, comparative analyses of the seismic demands calculated for a curved viaduct model supported on isolation bearings are presented. The nonlinear response comparison has been accomplished by extensive parametric studies conducted by varying those bearing design parameters, which have major influence on the overall bridge response. Moreover, lateral bearing restraint as well as hardening effect of lead rubber bearings at high strain levels have been introduced, as additional design parameter, to evaluate its influence on the behaviour of seismically isolated viaducts subjected to great earthquake ground motions.

In Chapter 6, the efficacy of using cable restrainers at expansion joints to mitigate seismic damage of isolated curved bridges in the event of severe earthquakes is investigated. An innovative non-linear analytical model of cable restrainer, which considers the bi-directionally effect as well as plasticity and failure statements of the cables, is presented. The capacity of cable restrainers for overcoming the potential problems associated with deck unseating is evaluated according with the implementation of the isolation design philosophy, providing an excellent basement to ensure the appropriate selection of restrainers according to characteristics of isolation bearing supports.

Finally, the significant findings and general conclusions in this research are summarized in Chapter 7. Specific recommendations are made for designing new bridges and for retrofitting of existing structures.

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 林 川 俊 郎
副 査 教 授 鏡 味 洋 史
副 査 教 授 三 上 隆
副 査 教 授 上 田 多 門

学 位 論 文 題 名

Seismic performance of isolated curved highway viaducts equipped with unseating prevention cable restrainers

(落橋防止ケーブルを有する免震曲線高架橋の耐震性能に関する研究)

落橋防止構造は1964年新潟地震による被害を教訓として考案された、わが国固有の耐震技術の一つであり、その後の橋梁耐震設計で重要な構造要素となっている。しかし、新潟地震以後、落橋防止構造が橋梁落下を防止する上で有効に機能するような大規模地震があまり発生することがなかったことから、落橋防止構造の要求性能に関する詳細な研究はあまり行われてこなかった。これに対して、1995年兵庫県南部地震では、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、現在、レベル2地震動に対する落橋防止構造の性能照査方法の確立が求められている。

本論文は、隣接する上部構造形式や規模が異なる曲線高架橋等を対象として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の開発を行い、大規模地震動を受ける曲線高架橋等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等で記録されたレベル2地震動の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、高架橋の適切な解析モデルの構築を目指して、レベル2地震動を受ける平面骨組モデルおよび立体骨組モデルによる動的応答性状の比較検討を行っている。また、観測されたレベル2地震動を高架橋の橋軸方向のみに入力した場合と橋軸方向、橋軸直角方向および鉛直方向に3成分同時入力した場合についても比較検討している。鋼製支承を有する高架橋の地震応答解析結果より、3成分地震波入力による立体骨組モデルを用いた解析モデルの有用性を指摘している。また、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効であることを示している。

第4章では、活断層の方向と高架橋との位置関係および斜角の影響についてパラメータ解析を実施している。高架橋の架設位置によっては、各主桁に発生する支点反力や桁端部の衝突による衝撃荷重が大きく異なり、橋脚の損傷状態も変化することを指摘している。特に、高架橋が活断層と平行な位置関係にあると、支承部や伸縮装置の損傷が大きいことを明らかにしている。今後、高架橋の路線線形および補修補強に活断層の方向性について配慮する必要があることを明示している。さらに、斜角が大きくなると鋼製支承に発生する支点反力が大きくなり、支承の崩壊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。

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大地震時非線形応答性状について検討している。免震支承の剛性および橋軸直角方向の拘束条件により地震応答性状が異なることを指摘し、新たな免震支承の設置方法を提案し、有益な知見を得ている。また、上部構造の伸縮装置部分の損傷形態を5種類に分類し、過去の損傷事例を調査し、その損傷レベルを3段階に定量化している。鋼製支承に比較して免震支承を用いた場合には、曲線高架橋の損傷をかなり低減できることを明らかにしている。さらに、大地震動により免震支承に大きな変形を生ずる場合には、免震支承のひずみ硬化を考慮する必要性を指摘し、曲線高架橋の損傷が増大することを指摘している。

第6章では、落橋防止ケーブルを有する免震曲線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。また、曲線高架橋では内桁よりも外桁の方が桁端部間の変位移動量が大きくなり、桁端部に生ずる衝突荷重も大きいことを明らかにしている。さらに、比較的剛性の大きい免震支承を採用し、連続曲線高架橋の両端部における免震支承の橋軸直角方向を拘束すると、落橋防止ケーブルが有効に働くことから地震後の橋梁使用性を確保できる可能性を明示している。よって、落橋防止ケーブルの長さや剛性および免震支承の剛性と拘束条件の組み合わせにより、曲線高架橋の耐震性能の向上が認められ、橋脚基部の損傷などを低減する新たな知見を得ている。

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、著者は落橋防止ケーブルを有する免震曲線高架橋の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。