

ダブル球面すべり支承を有する免震橋の地震時挙動に関する解析的研究

宇都宮大学 学生員

○ 高橋健太郎 正会員

藤倉修一

フェロー会員

中島章典 正会員

Nguyen Minh Hai

1. はじめに

日本の免震橋に用いられるほとんどの免震支承は積層ゴム系支承である。しかし、近年の大地震においてゴム支承は破断や損傷が確認されているため、積層ゴム系支承とは異なるタイプの支承を開発することは重要である。そこで、アメリカなどで免震橋への適用実績のある球面すべり支承に着目し、我が国の橋梁への適用性を検討することとした。

球面すべり支承とは、凹形球面を有するコンクリート上を凸型に球面加工したスライダと呼ぶ可動体が摺動する振り子型の免震装置であり、振り子運動による復元機構と摩擦力による減衰機構を有している。ダブル球面すべり支承とは、スライダの上下両面が摺動するタイプであり、固有周期がすべり面の球面半径によって決まるため長周期化が容易であり、コンクリートとスライダの諸量により力学的特性の調整が可能という利点がある¹⁾。

ダブル球面すべり支承の免震性能については、これまでに、実験的検討が行われている。しかし、ダブル球面すべり支承で支持された実橋梁がレベル2地震動のような大きな地震力を受けた場合の挙動は明らかになってはいない。そこで、本研究では、ダブル球面すべり支承を有する免震橋の地震時挙動を解析的に明らかにすることを目的とし、非線形動的解析を行い、現行の示方書により免震設計された道路橋に対して、ダブル球面すべり支承と積層ゴム支承の地震に対する挙動の比較を行った。

2. 解析モデル

(1) 橋梁モデル

本解析に用いる解析モデルは図-1のような鋼3径間連続合成箱桁橋であり、現行の道路橋示方書に基づき、高減衰積層ゴム支承(HDR)を用いて設計された免震橋をモデル化したものである。その支承部をダブル球面すべり支承(SSB)に置き換えたモデルをSSBモデル、高減衰積層ゴム支承のモデルをHDRモデルとした。支承は各橋台、橋脚上に2つずつ配置されている。

上部構造は線形はり要素を格子状に配置してモデル化した。橋脚部も線形はり要素としたが、特に大きな断面力が作用する橋脚の塑性ヒンジ部は、ファイバー要素を用いて、鉄筋の降伏やコンクリートの損傷状態などを確認できるようにした。ファイバー要素の材料構成則として、コンクリートの応力-ひずみ関係には、星隈らの提案する包絡線²⁾に堺らが提案する除荷・再載荷履歴³⁾を組み合わせたモデルを用いた。また、鉄筋の応力-ひずみ関係には、堺らが提案する修正 Menegotto-Pinto モデル⁴⁾を用いた。

(2) 支承のモデル化

ダブル球面すべり支承の水平方向の荷重-変位履歴曲線は、図-2に示されるような剛塑性型特性をもつ。本解析では、支承部水平方向の非線形特性は剛塑性型を表現するためにバイリニア型の非線形ばねを用い、初期剛性は2次勾配に対して十分大きな値とした。ダブル球面すべり支承の特徴とし

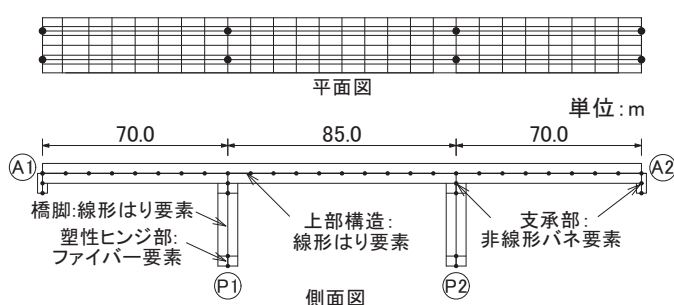


図-1 解析モデル概要図

W : Weight of superstructure R : Spherical radius
 μ : Friction coefficient h : Half height of slider

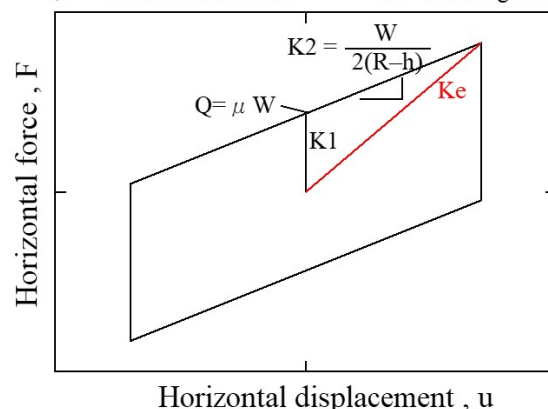


図-2 ダブル球面すべり支承の荷重-変位履歴曲線

表-1 SSBモデル摩擦係数 $\mu=0.05$ における等価特性値とHDRモデルの等価特性値

支承	SSB			HDR
球面半径 R(mm)	1000	1500	2000	-
等価剛性 Ke(kN/m)	8167	6244	5350	12457
等価減衰定数 he	0.22	0.28	0.34	0.22
等価固有周期 Te(s)	2.16	2.47	2.67	1.75

て、2次剛性は球面半径Rによって変化し、スライダが滑り出す荷重Qは摩擦係数 μ によって変化する。そこで、球面半径R=1000, 1500, 2000(mm)、摩擦係数 $\mu=0.05, 0.10, 0.15$ の3ケースずつを設定し、それぞれに相当する2次剛性と滑り出し荷重Qを算出し、各ケースの非線形特性とした。なお、ダブル球面すべり支承の面圧、速度、温度による剛性の変化は本解析では考慮していない。

一方、ゴム支承モデルの水平方向の非線形特性は、道路橋示方書に基づき設計された高減衰積層ゴム支承の特性を基に設定した。バイリニア型の非線形ばねを用い、2次剛性は初期剛性の0.1倍、剛性変化点は支承の変位が0.01(m)に達した点とした。

Key Words: 球面すべり支承, 免震橋, 非線形動的解析

〒321-8585 宇都宮市陽東 7-1-2 宇都宮大学地域デザイン科学部社会基盤デザイン学科 Tel.028-689-6227

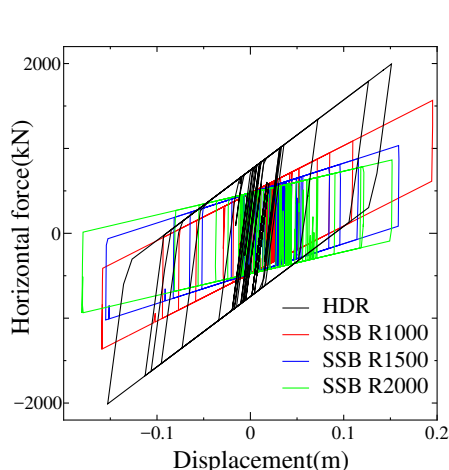


図-3 橋脚上支承の橋軸方向履歴曲線

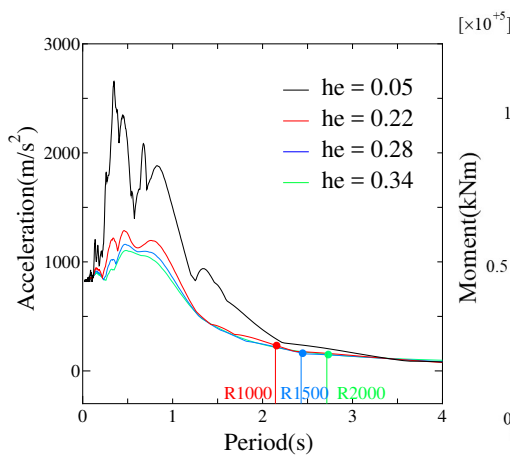


図-4 JMA 神戸 NS 成分 (橋軸方向入力) の加速度応答スペクトル

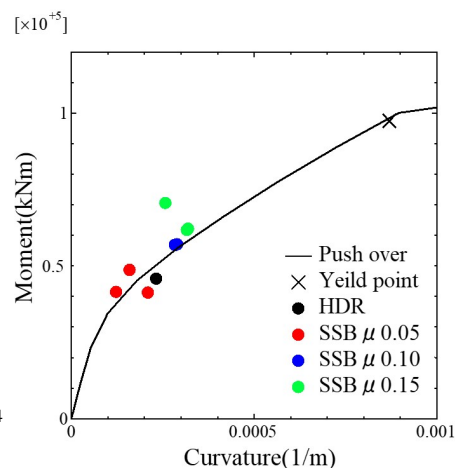


図-5 塑性ヒンジ部の橋軸方向の M-φ 関係の最大値

3. 解析条件

減衰行列は Rayleigh 減衰を用いた。Rayleigh 減衰の設定の際、初期剛性の高い非線形材料を含む場合は、モード別減衰定数算出時に、正しい振動モードが表れない可能性がある。そこで、Rayleigh 減衰の設定のための固有値解析の際に限り、支承部の非線形特性は、等価な線形特性として扱うこととした。摩擦係数 $\mu=0.05$ における非線形性能を表現した等価特性値を表-1 に示す。表-1 のような特性の支承を有する橋梁モデルのモード別減衰定数を算出し、Rayleigh 減衰を設定した。Rayleigh 減衰の剛性比例項が過大とならないように、Rayleigh 減衰の基準振動数の 1 つは高次の振動数でとり、1 次と 20 次とした。

本解析で用いた入力地震波は 1995 年兵庫県南部地震 JMA 神戸波であり、3 方向加振による非線形時刻歴応答解析を行った。数値積分法は Newmark β 法 ($\beta=1/4$) を用いて、積分時間間隔は 0.001 秒とした。

4. 解析結果及び考察

(1) 球面半径 R の支承部水平変位への影響

摩擦係数 $\mu=0.05$ で一定にした場合の、球面半径 R の違いによる支承の荷重-変位履歴曲線を図-3 に示す。なお、ゴム支承の荷重-変位履歴曲線も合わせて示す。図-3 は P1 橋脚上の支承における橋軸方向の履歴曲線である。球面半径 R が大きいほど 2 次勾配は低下するが、最大変位量も小さくなるという結果であった。この原因を考察するため、各球面半径 R の等価減衰定数 h_e に対応する加速度応答スペクトルを図-4 に示す。各球面半径 R の等価固有周期に対応する応答加速度を比較すると、球面半径 R が大きいほど応答加速度は小さく、地震力が低減されたため、支承の応答変位は小さい結果であったと考えられる。

また、ゴム支承よりも球面すべり支承のほうが最大変位は大きかったため、最大変位の値が球面すべり支承の限界変位量を超えるかの照査を行った。支承の限界変位量 0.417(m) に対して、最大変位は図-3 より約 0.2(m) であり、限界変位量を超えないことを確認した。

(2) 摩擦係数 μ の橋脚への影響

P1 橋脚塑性ヒンジ部の最大曲げモーメントと曲率の関係を図-5 に示す。図-5 は橋軸方向の結果であり、3 ケースの

球面半径 R および 3 ケースの摩擦係数 μ を組み合わせた合計 9 ケースにおける結果である。なお、ゴム支承モデルにおける橋脚の最大曲げモーメントと曲率の関係と、ブッシュオーバー解析によって求めた塑性ヒンジ部の曲げモーメント-曲率曲線、降伏点も合わせて示す。いずれのケースでも降伏には至っておらず、摩擦係数が小さいほど橋脚の応答曲げモーメントが低減される。最も摩擦係数の小さい $\mu=0.05$ のケースでは、最大曲げモーメントはゴム支承と同程度かそれより小さい値であった。

球面すべり支承は、スライダが滑り出すまでは剛な支承として働き、スライダが滑り出して 2 次剛性域に入ると、長周期化により、作用する慣性力が低減される。スライダが滑り出す荷重は図-2 に示すように、摩擦係数 μ に比例しているため、摩擦係数 μ が小さい方が、小さい荷重でスライダが滑り出し、結果として橋脚へ作用する慣性力が低減される。

5. まとめ

本研究では、ダブル球面すべり支承を有する免震橋の地震時挙動を把握するために、1995 年兵庫県南部地震 JMA 神戸波を用いて非線形動的解析を行い、以下の結論を得た。

1. ダブル球面支承における水平変位は、摩擦係数 $\mu=0.05$ のケースにおいて、ゴム支承モデルよりも大きい傾向であったが、スライダの限界変位は超えなかった。
2. ダブル球面すべり支承を有する免震橋は、摩擦係数 μ が小さいほど、橋脚に生じる曲げモーメントを小さくなる傾向であった。摩擦係数 $\mu=0.05$ のケースでは、支承の変位は大きくなるものの、応答曲げモーメントはゴム支承と同程度かそれ以下であった。

参考文献

- 1) 藤倉修一, 菊地真紀, Nguyen Minh Hai, 武田龍國, 中島章典: 静的正負交番荷重実験によるダブル球面すべり支承の復元力特性, 構造工学論文集, Vol.64A, 2018.3.
- 2) Hoshikuma, J., Kawashima, K., Nagaya, K. and Taylor, A.W.: Stress-strain model for confined concrete in bridge piers, Journal of Structural Engineering, Vol. 123, No. 5, pp.624-633, ASCE, 1997.
- 3) 堺淳一, 川島一彦, 庄司学: 横拘束されたコンクリートの除荷および再荷過程における応力度~ひずみ関係の定式化, 土木学会論文集, No.654/I-52, pp.297-316, 2000.7.
- 4) 堺淳一, 川島一彦: 部分的な除荷・再荷を含む履歴を表す修正 Menegotto-Pinto モデルの提案, 土木学会論文集, No.738/I-64, pp.159-169, 2003.7.