

地震応答スペクトルによるダブル球面すべり支承で支持された免震橋の 地震時応答評価に関する一考察

宇都宮大学 学生員 ○高橋健太郎 正会員 藤倉修一
HRC 研究所 正会員 Nguyen Minh Hai
フェロー会員 中島章典

1. はじめに

免震支承として、日本では、積層ゴム支承が多く用いられ、その性能向上のための研究が行われている。しかし、近年発生した大地震において、積層ゴム支承は破断や損傷が確認されており、積層ゴム支承とは異なるタイプの支承を開発することも重要である。そこで、海外の地震地域において、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ケイブプレ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¹⁾。これまでに、支承の基本特性に関する検証が行われているが、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い地震動を受けたときの挙動は明らかになっていない。そこで、著者らは、ダブル球面すべり支承で支持された免震橋の基本的な地震時挙動を明らかにすることを目的とし、解析的検討を行ってきた²⁾。しかし、支承部の変位応答がすべり面の摩擦係数によって異なることや、入力地震動の違いによって変位応答に差異が生じることに不明な点があった。本稿では、地震応答スペクトルを用いて、前述した項目について考察を行った。

2. 解析モデル

(1) 橋梁モデル

本解析では、図-1に示すように上部構造が鋼3径間連続合成箱桁で、道路橋示方書³⁾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解析対象とした。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の非線形挙動を再現した。

(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、上下面ですべり面の摩擦係数が等しい場合には、図-2に示されるような剛塑性型となる¹⁾。そのため、SSBモデルの水平方向の荷重-変位関係は、バイリニア型非線形ばね要素を用いてモデル化し、初期剛性 K_1 が2次剛性 K_2 に対して十分大きくなるよう設定した。また、ダブル球面すべり支承は、球面半径 R や摩擦係数 μ といった諸元を変えることにより、その力学特性が変化する。ここでは、球面半径

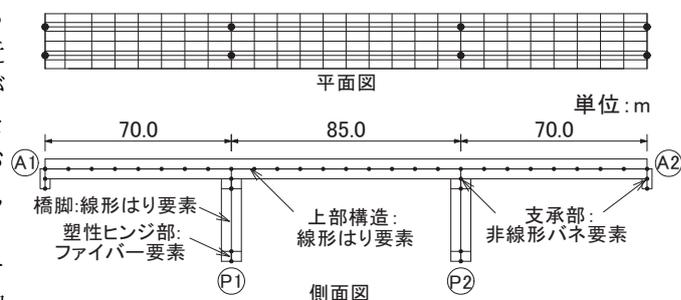


図-1 解析モデル概要図

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

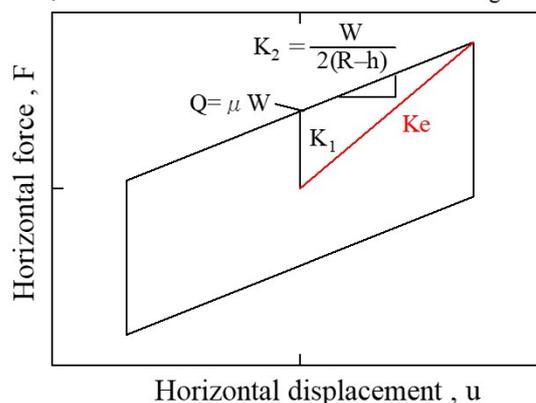


図-2 ダブル球面すべり支承の荷重-変位履歴曲線

表-1 SSBモデルの等価特性値とHDRモデルの等価特性値

支承	SSB			HDR
摩擦係数 μ	0.05	0.10	0.15	-
等価剛性 Ke (MN/m)	5.04	7.46	9.98	11.31
等価減衰定数 h	0.21	0.35	0.43	0.17
等価固有周期 T (s)	2.71	2.23	1.92	1.75

R は1.5mとし、摩擦係数 μ は0.05, 0.10, 0.15の3ケースとした。摩擦係数 μ が変化すると、スライダのすべり始める荷重、すなわち初期剛性の変化点が変わるため、橋梁全体の挙動に及ぼす摩擦係数の影響を検討した。

一方、HDRモデルの水平方向の非線形特性は、道路橋示方書³⁾に基づき設計された高減衰積層ゴム支承の特性に従った。バイリニア型非線形ばねを用い、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0.01mに達した点とした。

Key Words: 球面すべり支承, 免震橋, 時刻歴応答解析, 等価線形化計算, 地震応答スペクトル

〒321-8585 宇都宮市陽東 7-1-2 宇都宮大学大学院地域創生科学研究科社会デザイン科学専攻 Tel.028-689-6227

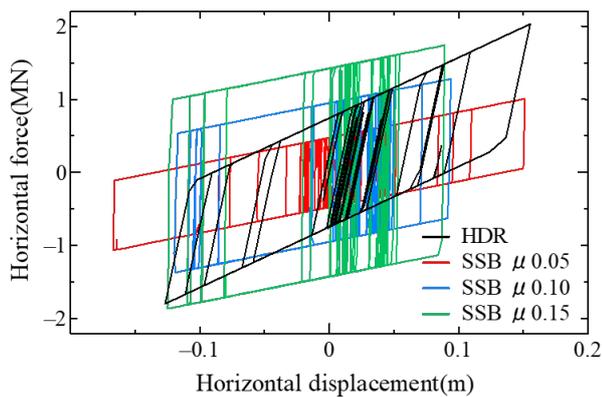


図-3 P1 橋脚上支承の橋軸方向の水平荷重-変位履歴曲線

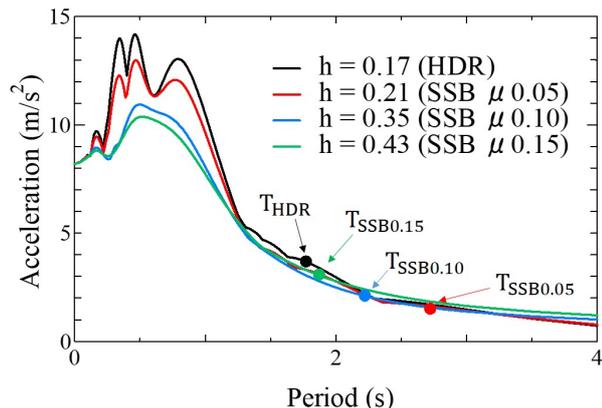


図-4 JMA 神戸 NS 成分（橋軸方向入力）の加速度応答スペクトル

3. 解析条件

減衰行列には 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特性をもつ要素を含む場合には、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は、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。繰り返し計算により得られた等価特性値を表-1 に示す。なお、繰り返し計算では、道路橋示方書のレベル2地震動タイプIIの標準加速度応答スペクトルを用い、構造系の変位と等価剛性の積が慣性力と等しくなったときの値を等価特性値と定義した。表-1 に示す支承特性を用いて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。

本解析では1995年兵庫県南部地震 JMA 神戸波を用いて非線形時刻歴応答解析を行った。数値積分法には Newmark β 法 ($\beta=1/4$) を用いて、積分時間間隔は0.001秒とした。

さらに、等価線形化計算により求めた等価減衰定数や等価固有周期から、JMA 神戸波の加速度応答スペクトルと変位応答スペクトルを算出し、動的解析の結果と比較する。

4. 解析結果及び考察

SSB モデルの摩擦係数 $\mu=0.05, 0.10, 0.15$ の3ケースおよび HDR モデルとの解析結果を相互に比較する。P1 橋脚上の支承の、橋軸方向の水平荷重-変位履歴曲線を図-3 に示す。図-3 の縦軸である水平荷重の最大値に着目すると、HDR モデルが最も大きい値を示しており、また、SSB モデルでは、摩擦係数の小さい順に、1.06MN, 1.37MN, 1.86MN となり、摩擦係数が小さくなるに従って、作用する荷重は小さくなった。ここで、時刻歴応答解析による最大水平荷重を

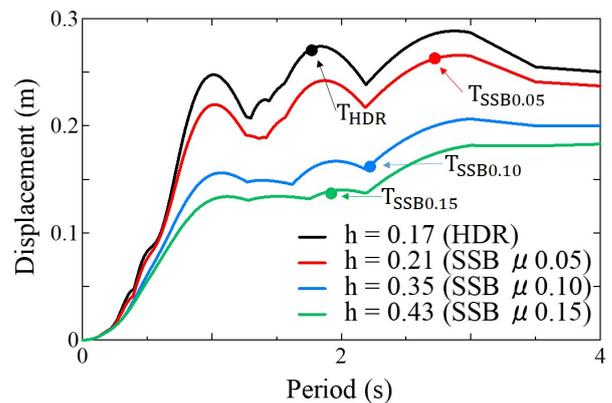


図-5 JMA 神戸 NS 成分（橋軸方向入力）の変位応答スペクトル

表-2 動的解析結果と変位応答スペクトルの結果の比較

支承	SSB			HDR
摩擦係数 μ	0.05	0.10	0.15	-
動的解析結果 (m)	0.167	0.120	0.125	0.154
変位応答スペクトル (m)	0.262	0.164	0.139	0.271

評価するために、橋軸方向に入力した JMA 神戸波 NS 成分の加速度応答スペクトルを図-4 に示す。加速度応答スペクトルは、各ケースの等価減衰定数 h を基に算出し、各ケースの等価固有周期 T に当たる点を図中に示している。図-4 の各モデルの固有周期に相当する加速度は、SSB モデルの摩擦係数が小さくなる程小さい。これより、摩擦係数が小さくなる程、等価固有周期が大きくなり、長周期化によって地震力が低減されたと考えられる。

次に、時刻歴応答解析による最大変位を評価するために、橋軸方向に入力した JMA 神戸波 NS 成分の変位応答スペクトルを図-5 に示す。なお、各ケースの等価固有周期 T に当たる点を図中に示している。また、図-3 の横軸である水平変位の最大値に着目し、両者を比較したものが表-2 である。SSB モデルにおいて、摩擦係数が大きい程、最大変位は小さい傾向である。摩擦係数が大きくなることで履歴曲線の描く面積が大きくなるため、履歴減衰が大きくなり、変位は小さくなったと考えられる。SSB モデルの摩擦係数 $\mu=0.05$ のケースでは、HDR モデルの最大変位と同程度であった。動的解析結果と変位応答スペクトルによる結果は、応答値の大きさに違いはあるものの、各ケースの最大変位の大小関係は概ね一致する。

5. まとめ

支承部の非線形特性を等価線形化して求めた加速度応答スペクトルおよび変位応答スペクトルは、時刻歴応答解析による結果と比較すると、各ケースの大小関係が概ね一致し、長周期化および減衰機能の考察に有効である。

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, pp.283-292, 2018.3.
- 2) 高橋健太郎, 藤倉修一, 中島章典, Nguyen Minh Hai: ダブル球面すべり支承で支持された免震橋の地震時挙動に関する研究, 第39回地震工学研究発表会講演論文集, A22-1491, 2019.10.
- 3) 日本道路協会: 道路橋示方書 (V 耐震設計編)・同解説, 2017.3.