

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 に関する解析的研究

高橋 健太郎¹・藤倉 修一²・中島 章典³・NGUYEN Minh Hai⁴

¹学生会員 宇都宮大学大学院 地域創生科学研究科（〒 321-8585 宇都宮市陽東 7-1-2）

²正会員 Ph.D. 宇都宮大学准教授 地域デザイン科学部 社会基盤デザイン学科
（〒 321-8585 宇都宮市陽東 7-1-2）

³フェロー会員 工博 宇都宮大学教授 地域デザイン科学部 社会基盤デザイン学科
（〒 321-8585 宇都宮市陽東 7-1-2）

⁴正会員 博（工） 宇都宮大学助教 地域デザイン科学部 社会基盤デザイン学科
（〒 321-8585 宇都宮市陽東 7-1-2）

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、近年発生した大地震において、積層ゴム支承では破断や損傷の被害が確認されており、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、図-1に示すような、凹形球面を有するコンケイブプレート上に凸型に球面加工したスライダー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。また、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、コンケイブプレートとスライダー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⁾。1面摺動タイプのシングル球面すべり支承、2面摺動タイプのダブル球面すべり支承などが開発されているが、本研究ではダブル球面すべり支承を対象として、検討を行うこととした。ダブル球面すべり支承の特徴として、2面が摺動するため、1面摺動のシングル球面すべり支承よりも大きい変位に対応でき、上下面で摩擦係数を変えることができることが挙げられる。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、藤倉ら¹⁾によって実験的検討

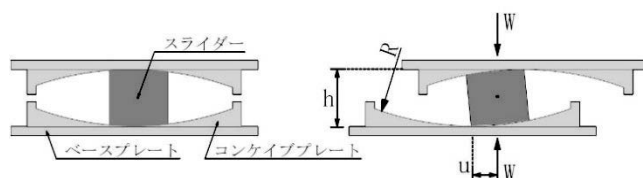


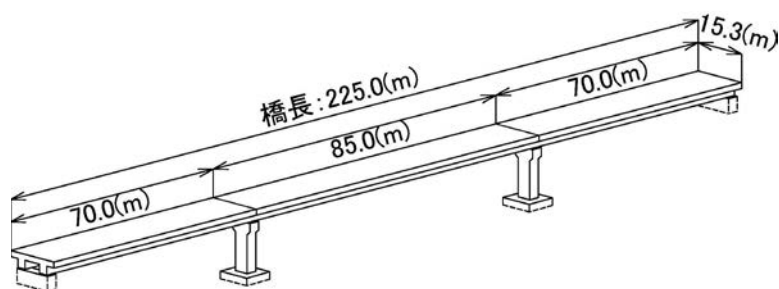
図-1 ダブル球面すべり支承の概要図

が主に行われているが、ダブル球面すべり支承を用いた実橋梁が、レベル2地震動のような大きな地震動を受けたときの挙動は明らかにされていない。そこで、本研究では、ダブル球面すべり支承を用いた免震橋が大きな地震動を受けた時の挙動を解析的に明らかにすることを目的とし、道路橋示方書により免震設計された橋梁モデルに対して、非線形動的解析を行い、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。

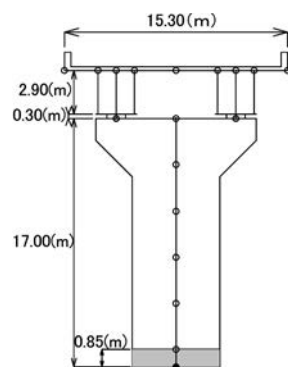
2. 解析概要

(1) 解析対象橋梁モデル

本解析に用いる橋梁モデルは図-2に示すような鋼3径間連続合成箱桁の直線橋であり、道路橋示方書に基づき、超高減衰積層ゴム支承（HDR-S）を用いて設計された免震橋に基づいている。地盤種別はI種地盤を想定し、また、地域区分をA2として、地域別補正係数はすべて1.0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、超高減衰積層ゴム支承のモデルをHDRモデルとし、



(a) 一般図



(b) P1,P2橋脚断面図

図-2 対象橋梁

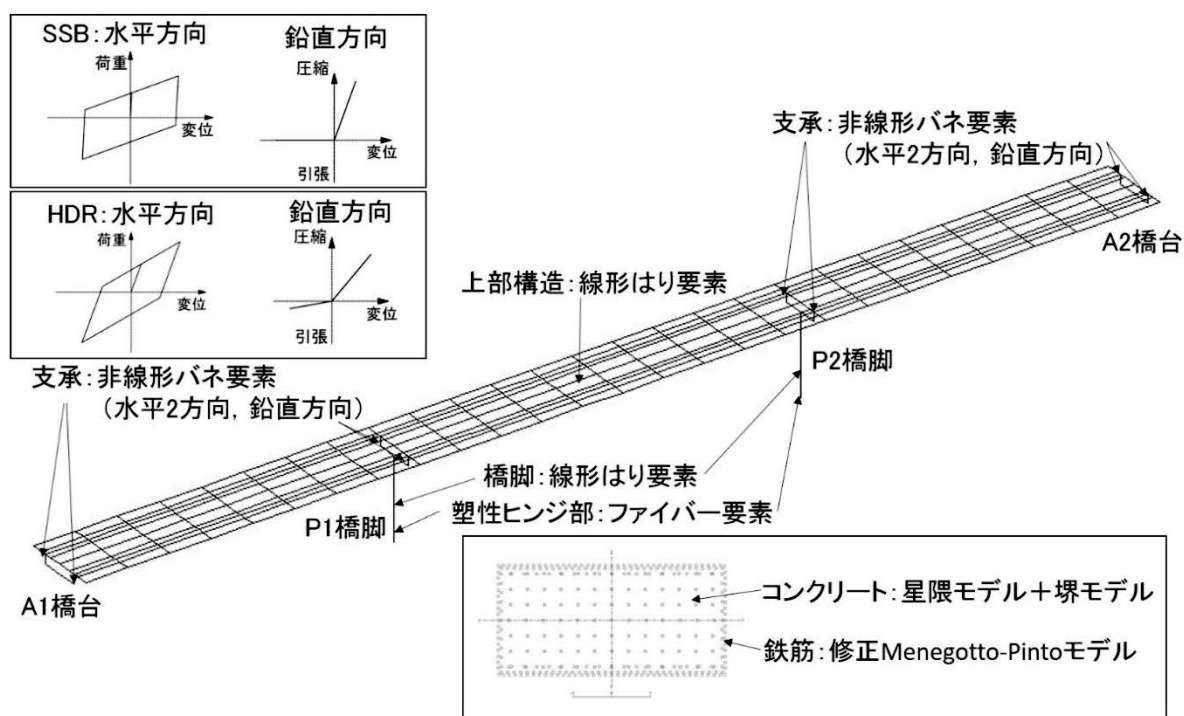


図-3 解析モデル概要

解析を行った。支承は各橋台、橋脚上に2基ずつ、計8基配置されている。また、2つの橋台、橋脚はそれぞれ同じものとし、橋台上の支承、橋脚上の支承もそれぞれ同じものとした。

(2) ファイバー要素によるモデル化

解析モデルの概要を図-3に示す。塑性化が期待できるP1、P2橋脚の基部のみ塑性変形を考慮し、橋脚の塑性ヒンジ部以外は線形はり要素とした。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挙動を再現できるようにした。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。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。両端の橋台は直接基礎とした。また、地盤種別はI種地盤上であることから、十分固いものとし、橋台、橋脚の基部は完全固定とした。上部構造は、線形はり要素を格子状に配置し、格子状モデルとすることで上部構造の変位や回転を再現した。また、2本の主桁の断面は同じものとし、モデル全体として橋軸方向、橋軸直角方向ともに対称なモデルとした。

(3) 支承部のモデル化

HDR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超高減衰積層ゴム支承

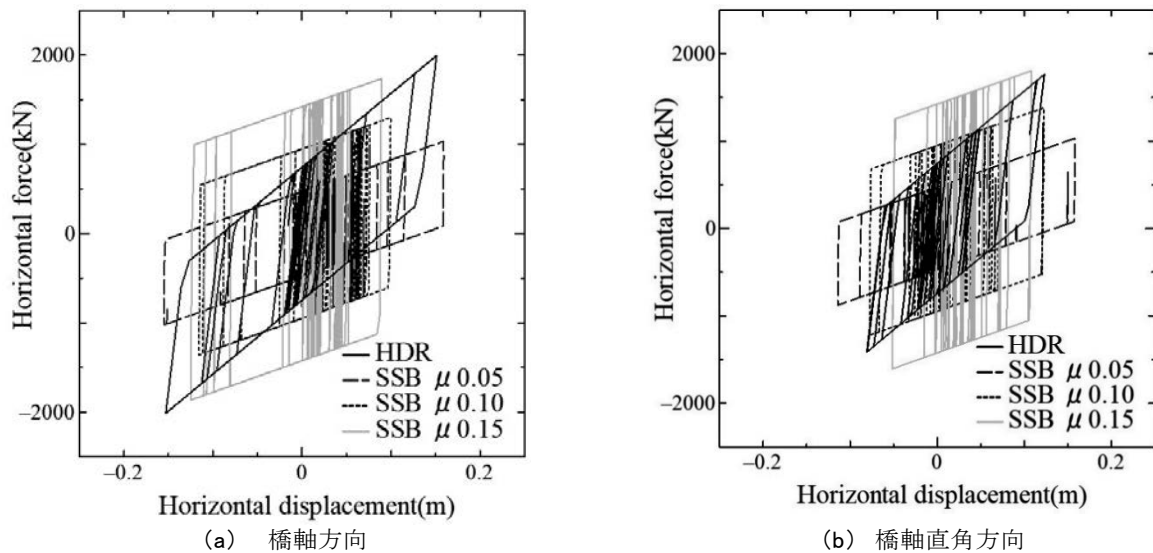


図-4 JMA神戸波入力時のP1橋脚上支承部の荷重－変位履歴曲線

表-1 SSB モデルとHDRモデルの等価特性値

支承	SSB			HDR
摩擦係数	0.05	0.10	0.15	
等価剛性 K_e (kN/m)	6244	9699	13330	12457
等価減衰定数 h_e	0.29	0.41	0.47	0.22
等価固有周期 T_e (s)	2.47	1.98	1.68	1.66

の特性を基に設定した。橋軸方向、橋軸直角方向の2方向に同じ剛性を持つバイリニア型非線形ばね要素を用いた。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。また、鉛直方向については、引張剛性が圧縮剛性の1/5となるような非線形モデルとした。

ダブル球面すべり支承の力学特性はバイリニア型非線形ばね要素を用いてモデル化し、初期剛性が2次剛性に対して十分大きくなるように設定した。支承の諸量を変えることによってその力学特性が変化する。本研究では、球面半径 R は、1000, 1500, 2000 mmの3ケース、摩擦係数 μ は、0.05, 0.10, 0.15の3ケースの組み合わせによる橋梁全体系の挙動の変化に対する比較を行う。

3. 非線形動的解析

(1) 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部材を含む場合は、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、固有値解析を行う際には、支承部の非線形特性を、等価な線形特性として扱うこととした。球面半径 $R=1500$ mmにおける等価線形特性を表-1に示す。表-1のような線形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。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つは高次な振動数とし、1次と20次を用いた。本解析で用いる入力地震波は1995年兵庫県南部地震JMA神戸波とし、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。

(2) 解析結果

a) 支承部水平方向の履歴曲線

球面半径 $R=1500$ mmとし、摩擦係数 $\mu=0.05$, 0.10, 0.15の3ケースのSSBモデルとHDRモデルの解析結果を比較する。P1橋脚上の支承の水平方向の履歴曲線を図-4に示す。橋軸方向、橋軸直角方向ともに摩擦係数 μ が大きいほど最大変位は小さくなる傾向がある。摩擦係数 μ が大きいほど、スライダーが滑り始める荷重は大きくなるため、履歴曲線の描く面積、すなわち履歴曲線の履歴吸収エネルギーも大きくなるため、変位は小さくなったと考えられる。また、HDRモデルと比較すると、最も変位の大きい摩擦係数 $\mu=0.05$ のケースにおいて、最大変位はHDRモデルと同程度であった。

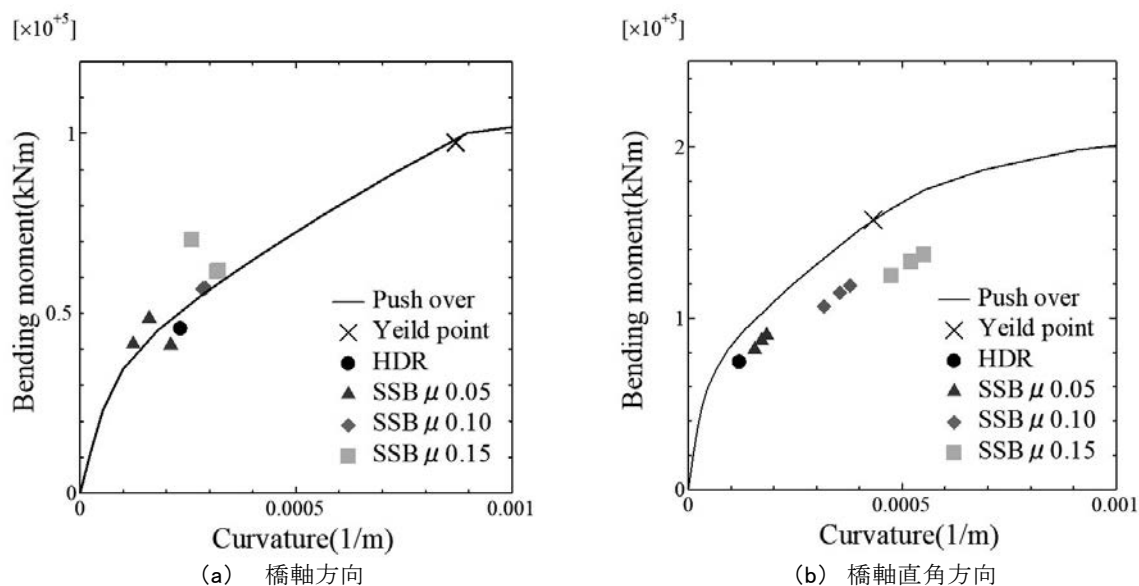


図-5 JMA神戸入力時のP1橋脚の曲げモーメントー曲率関係

b) 塑性ヒンジ部の最大応答曲げモーメント

橋脚塑性ヒンジ部の最大曲げモーメント時における曲率を図-5に示す。各摩擦係数 μ において、球面半径 $R=1000, 1500, 2000$ mm の3ケースについて解析を行った合計9ケースにおける結果及び、HDRモデルの結果を示している。なお、プッシュオーバー解析によって求めた塑性ヒンジ部の降伏曲線と降伏点も合わせて示す。橋軸方向、橋軸直角方向ともに、摩擦係数が小さいほど橋脚の最大応答曲げモーメントが低減される傾向である。また、図-5(a)より、橋軸方向においては、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HDRモデル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、摩擦係数 μ に比例しているため、摩擦係数 μ が小さいケースの方が、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。

4. おわりに

本研究では、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を明らかにするために、道路橋示方書により設計された免震橋のモデルを用いて、非線形動的解析を行った。ダブル球面すべり支承の球面半径 R と摩擦係数 μ を変化させたケースによる解析を行い、

それらの変化が、支承部の水平変位や、塑性ヒンジ部の曲げモーメントに及ぼす影響を検討した。また、HDRモデルによる解析結果との比較を行い、ダブル球面すべり支承の地震時挙動について検討を行った。本研究で行った非線形動的解析を通して得られた結果を以下に示す。

1. ダブル球面すべり支承の摩擦係数 μ が大きいほど、支承部水平方向の応答変位は小さくなる。応答変位は摩擦係数 $\mu=0.05$ のケースで、HDRモデルと同程度か少し大きかった。
2. 摩擦係数 μ が小さいほうが、早期に長周期化するため、橋脚に生じる曲げモーメントは小さくなる傾向であった。摩擦係数 $\mu=0.05$ のケースでは、最大応答曲げモーメントはHDRモデルと同程度か少し小さい値となった。

参考文献

- 1) 藤倉修一, 菊地真紀, Nguyen Minh Hai, 武田龍國, 中島章典: 静的正負交番載荷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載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・再載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.