ダブル球面すべり支承を用いた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: フェロー会員 中島章典 正:

正会員 藤倉修一 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 (A) 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. ダブル球面すべ り支承とは、スライダー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⁾.

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が、ダブル球面すべり支承 を用いた実橋梁が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レベル2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. 解析モデル

(1) 橋梁モデル

解析対称橋梁は図-1のような鋼3径間連続合成箱桁橋で あり,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である.本解析では,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に示されるように剛塑性型である.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て,







Horizontal displacement, u 図-2 ダブル球面すべり支承の荷重-変位履歴曲線

	表1	SSB	モデルと	HDR	モデル	レの等	価線形	特性
--	----	-----	------	-----	-----	-----	-----	----

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

2次剛性は球面半径 R によって変化し,スライダーが滑り出 す荷重 Q は摩擦係数 µ によって変化する.本解析では,球面 半径 R=1000,1500,2000(mm),摩擦係数 µ=0.05,0.10, 0.15 の 3 ケースをそれぞれ設定し,各ケースの 2 次剛性と 滑り出し荷重 Q を与えて,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, 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: 非線形動的解析,免震橋,ダブル球面すべり支承,高減衰積層ゴム支承
〒 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 橋脚上支承の履歴曲線(橋軸方向)

図-4 上部構造の時刻歴変位(橋軸方向)

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,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.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. 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つは高次な振動数でとり,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) 支承部水平方向の履歴曲線

図-3 は P1 橋脚上支承の橋軸方向の荷重-変位履歴曲線で あり,球面半径 R=1500(mm) で一定とした時の結果を比較 した図である. SSB モデルでは,摩擦係数 µ が大きいほど 最大変位は小さくなる.摩擦係数 µ が大きいほど,履歴曲 線の描く面積は大きくなり,履歴吸収エネルギーも大きく なるので,変位は小さくなったと考えられる.また最も変 位の大きかった SSB モデルの µ=0.05 のケースでは,HDR モデルと同程度の変位を生じる結果となった.

また,同ケースにおいて,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.幾何学的に求 めた支承の限界変位量は 0.417(m) である.図–3 より,変 位は最も大きい摩擦係数 μ=0.05 のケースにおいても,約 0.16(m) であり,限界変位を超えないことを確認した.

(2) 上部構造の時刻歴変位

上部構造の橋軸方向の時刻歴変位を図-4に示す. ダブル 球面すべり支承は、いずれのケースにおいても、HDR モデ ルより残留変位が大きいという結果となった. これは、荷 重-変位履歴曲線の初期剛性が SSB モデルに比べて、HDR モデルのほうが小さいからであると考えられる.

(3) 塑性ヒンジ部の最大応答曲げモーメント

P1 橋脚塑性ヒンジ部の最大曲げモーメント-曲率関係を 図-5 に示す. 図-5 は橋軸方向の結果であり、3 ケースの摩 擦係数 µ の違いによって色分けしている. なお、HDR モ デルにおける橋脚の最大曲げモーメント-曲率関係と、プッ 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. 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傾向であった. 最も摩擦係数の小さい µ=0.05 のケースでは、最大曲げモー メントは HDR モデルと同程度か少し小さい値であった.

球面すべり支承は、スライダーが滑り出すまでは剛な支 承として働き、スライダーが滑り出して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 イダーが滑り出す荷重Qは、摩擦係数µに比例しており、 摩擦係数µが小さい方が、小さい荷重でスライダーが滑り 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.

- ダブル球面すべり支承の水平変位は摩擦係数 μ が大き いほど小さくなる. 摩擦係数 μ=0.05 のケースにおいて は、HDR モデルと同程度の変位を生じる結果となった.
- 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は小さく なる傾向であった、摩擦係数 µ=0.05のケースでは、最 大応答曲げモーメントは HDR モデルと同程度かそれ 以下となった。

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.

図-5 塑性ヒンジ部の M-φ 関係の最大値 (橋軸方向)