

すべり系免震支承の摩擦履歴モデルの初期剛性と 減衰タイプの違いが地震応答に与える影響

矢田部 浩¹ · 運上 茂樹²

¹正会員 工修 独立行政法人土木研究所耐震研究グループ交流研究員 (〒305-8516茨城県つくば市南原1-6)
E-mail: yatabe44@pwri.go.jp
²正会員 工博 独立行政法人土木研究所耐震研究グループ上席研究員 (同 上)
E-mail: unjoh@pwri.go.jp

機能分離型支承など、すべり系免震支承を用いた橋梁の地震応答解析を行う場合は、摩擦力のモデル化 を適切に行うことが必要とされる.一般に、剛塑性のクーロン摩擦をモデル化するために、十分に大きな 初期剛性を仮定したバイリニアモデルを用いて応答解析を行う場合が多い.その初期剛性と初期剛性をも とに計算する減衰マトリックスの設定法によって、応答解析結果が異なる場合があることが報告されてい る.本文では、摩擦履歴モデルの初期剛性の大きさや減衰の与え方の違いによる地震応答への影響につい て検討を行った結果を報告する.

Key Words : sliding bearing, friction isolator, dynamic response analysis, initial stiffness, damping model

1. はじめに

すべり系免震支承は、機能分離型支承など、すべ り支承を鉛直支持装置およびエネルギー吸収装置とし、 復元力装置を別途設けるタイプの免震支承であり、従 来のゴム系の免震支承とは異なるタイプの支承として、 現在、適用が試みられている.

すべり系免震支承を用いた橋梁の地震応答解析を 行う場合,摩擦による減衰力のモデル化を適切に行う ことが必要とされる.剛塑性の特性を持つクーロン摩 擦を考える場合,すべり速度の符号が反転する際に, 摩擦力が符号関数的に突然変化する力学的な不連続性 が生じるが¹⁾,その数値解析上の取り扱いについては 大きく2つの方法に分けられる.

ーつは不連続性をそのままモデル化して応答解析 を行う方法である^{2), 3)}.提案されている解析手法を計 算プログラムに導入すれば,すべり停止後の残留変位 まで適切に評価でき,振動台実験結果との整合性が高 いことも報告されている.

もう一方の方法としては、力学的に不連続な部分 を十分に傾きの大きな連続関数に置き換えて応答解析 を行う方法である^{1), 4), 5)}.特に、摩擦履歴をバイリニ ア型モデルで近似した変位制御タイプは、容易に汎用 ソフトに取り込めることと,適切な初期剛性を仮定す れば厳密解に近い応答変位が得られることから,これ までの研究や設計で多く用いられてきた.しかしなが ら,摩擦履歴モデルの初期剛性の設定によっては数値 解析上の誤差を生じる場合があることや,初期剛性を もとに計算する減衰マトリックスの設定方法によって 解析結果が異なる場合があることも確認されている⁶. 特に,減衰モデルの仮定にRayleigh型を用いた場合, 初期剛性のあるレベルから解析上橋脚が大きく変形し ているにもかかわらず支承に変位が生じないといった 不合理な状態を招くため,数値解析上の留意点とされ ている.

本文では、支承部の応答が不合理な状態に至る前 の、初期剛性による応答値の遷移領域に着目し、すべ り系免震支承を使った橋梁モデルを用いて、地震応答 に及ぼす摩擦履歴モデルの初期剛性の影響について検 討を行った結果を報告する.

2. 解析条件

検討にあたり使用した解析モデルおよび橋脚,支 承部の基本的な諸元,初期剛性のステップを含む解析



図-1 橋脚の解析モデルと諸元

表-1 解析条件

構造要素	支承:非線形せん断バネ要素 (バイリニア型) 橋脚(鋼製):非線形はり要素 (バイリニア型),橋脚下端固定
解析手法	時刻歷解析,直接積分法
数值積分法	Newmark- β 法($\delta = 0.5$, $\beta = 0.25$)
減衰モデル	ひずみエネルギー比例型減衰
(2 種類)	Rayleigh 型減衰
入力地震動	道路橋示方書 標準加速度波形 タイプⅡ- I 種地盤用波形 No.1

条件については監崎,伊津野⁶⁰のモデルを参考に設定 した.さらに,地震応答に及ぼす初期剛性の影響と下 部構造側の剛性との関係を検討するために,橋脚の曲 げ剛性を変えたケースを追加した.解析モデルを図-1 に,解析条件を表-1に示す.動的解析ソフトはTDAP Ⅲを使用した.

橋脚の非線形特性を表す履歴モデル(バイリニア 型モデル,非線形はり部材)を図-2 に示す.橋脚と しては鋼製橋脚を想定し,降伏曲げモーメントは基本 ケースとした M_y =30MN·m とこれに対して大小2ケー ス 15 MN·m, 45MN·m の合計 3 ケースとした.バイ リニア型モデルの二次剛性としては,剛性低下率を初 期剛性の 1/100 として設定した.降伏曲率については, ϕ_x =0.0011 (1/m) で一定とした.

支承の非線形特性を表す履歴モデル (バイリニア 型モデル,バネ部材)を図-3 に示す.初期剛性 k_0 は, 橋脚の曲げ剛性と同程度の 1.5×10^1 MN/m から $1.5 \times$ 10^6 MN/m まで 10 倍ずつ変化させた 6 ケースを設定し た.降伏変形量は初期剛性が 1.5×10^1 MN/m のとき $u_y= 0.007733m$ とし,降伏荷重 Q_y を一定とすることか ら初期剛性の変化に合せて変化させた (k_0 が 10 倍の とき u_y を 1/10).二次剛性 k_b は復元力装置のせん断 バネ定数をとり, 2MN/m で一定とした.設定した橋



脚剛性および支承初期剛性の組み合わせに従って固有 値解析を行った結果として、1次モードの固有周期を 図-4に示す.

減衰は、ひずみエネルギー比例型減衰と Rayleigh 型 減衰の 2 種類を比較した. Rayleigh 型減衰の係数 α , β を決める基準モードは、固有値解析の結果より有効 質量の大きな振動モードから順番に 1 次モードと 2 次 モードを選択した (k_0 =1.5×10² MN/m のみ 1 次と 3 次). 部材減衰定数 h は、すべり系免震支承を 0 とし、 その他の部材を 0.02 とした.

入力地震動の加速度波形を図-5 に示す.入力地震動は,道路橋示方書^つに示される標準加速度波形のう



図-6 すべり支承の初期剛性と最大応答値(上段から変位,加速度,支承変位)







3. 最大応答値と時刻歴波形

橋脚剛性の異なる3つの下部構造について、それぞ れ支承の初期剛性および減衰モデルの違いによる地震 応答値の変化を整理した.上部構造の主桁位置と橋脚 天端位置での最大応答変位および最大応答加速度と支 承の最大変位量を図-6に示す.

Rayleigh 型減衰を用いた場合,初期剛性 $k_0=1.5 \times 10^4$ MN/m 付近では支承の応答値が小さくなり,この初期 剛性による応答が遷移領域内にあることを示している.





また, 遷移領域を超えたところでは, 初期剛性 10⁵ MN/m, 10⁶ MN/m レベルのように数値解析上支承に変 位が生じない状態であることが確認できる.

このように初期剛性と最大応答値との関係は、応 答値の遷移領域を含む3つの領域を構成する.応答値 の遷移領域については、下部構造側の剛性の違いによ る影響も考えられるが、橋脚剛性の変化率を0.5倍か ら1.5倍とした範囲では遷移領域の変化に有意な差は 確認されない.したがって、減衰モデルの相違が地震 応答に及ぼす影響は、支承部のバイリニアモデルにお ける初期剛性に依存することを確認した.

応答値の遷移領域を挟む前後2つの応答領域に関す る時刻歴波形を図-7.1,図-7.2に示す.2つの領域を 代表する初期剛性は,前半をk₀=1.5×10² MN/m,後半

を $k_0=1.5 \times 10^5$ MN/m とした.

応答値の遷移領域以前では、減衰モデルによる応 答の違いは見受けられない.一方、応答値の遷移領域 以降では、Rayleigh 型減衰の場合に上部構造と橋脚天 端の波形が同調しており、支承の応答が小さく、ほと んど固定状態であることが確認できる.

4. Rayleigh型減衰の基準モードの設定案

着目する構造系の復元力特性が線形モデルで表さ れ、卓越する振動モードが限定される場合には、系の 応答は Rayleigh 型減衰を用いて精度よく解くことがで きる.この減衰モデルが、係数α、βの設定も含めて モード解析法のもと、一定の剛性に対して成り立って いるためである.

取り扱う構造部材のうち、すべり支承については、 すべり状態での応答が常に塑性域にあることから、減 衰の基準モードを1次モードと支承変形の卓越モード とした Rayleigh 型減衰による解析を行った.この手法 を前項の解析モデルについて試みた結果として、最大 応答値と応答値の遷移領域以降の時刻歴波形を図-8 に示す.

応答特性は,前項の図-6,図-7.2 に示す応答値の 遷移領域とそれ以降において支承に変位が生じない状 態から改善され,ひずみエネルギー比例型に近い波形 を示している.ただし遷移領域以降の最大応答値は相 対的に大きくなっており,有効な初期剛性の範囲は, 遷移領域の 10⁴MN/m レベルまでと考えられるが,適 切な初期剛性の範囲も含めて更に検討を要する.

5. まとめ

すべり系免震支承の初期剛性と減衰モデルの違い による応答値の影響について検討を行った結果,以下 のような知見を得た.

- (1)初期剛性と最大応答値との関係は、応答値の遷移 領域を含む3つの領域を構成する.この遷移領域は、 下部構造側の剛性の変化率が0.5倍から1.5倍の範 囲では領域の変化に有意な差はなく、減衰モデル の相違による応答値の変化は支承部のバイリニア モデルの初期剛性に大きく依存することを確認した。
- (2) Rayleigh 型減衰の基準モードを1次モードと支承変 形の卓越モードとした解析手法を提案した.応答 特性は改善されたが,適切な初期剛性の範囲につ いては更に検討を要する.



図-8 支承変形の卓越モードを Rayleigh 型減衰の基準 モードとした場合の最大応答値と時刻歴波形 (M,= 30MN・m)

参考文献

- 川島一彦:動的解析における摩擦力のモデル化に関する 一考察,土木学会論文報告集,第309号,pp. 151-154, 1981.5.
- 2) 沢辺浩,栗田哲,杉村義広:剛滑り支承免震建物の地震応答解析法に関する基礎的研究,第11回日本地震工学シンポジウム論文集,pp.1689-1694,2002.11.
- 玉木利裕,小川一志:摩擦減衰型免震装置の実験的研究 (その1 振動台実験),日本建築学会大会学術講演梗 概集,pp.489-490,1998.9.
- Mostaghel, N. and Davis, T.: Representations of Coulomb friction for dynamic analysis, *Earthquake Engineering and Structual Dynamics*, Vol.26, pp. 541-548, 1997.
- 伊津野和行,袴田文雄,中村一平:機能分離型支承装置の動特性と設計手法に関する研究,土木学会論文集, No.654/1-52, pp. 233-244, 2000.7.
- 6) 監崎達也,伊津野和行:すべり摩擦型免震支承のモデル 化における初期剛性と減衰の与え方に関する検討,第26 回地震工学研究発表会講演論文集,pp.1073-1076,2001.8.
- 7) (社)日本道路協会:道路橋示方書・同解説, V耐震設計 編,2002.3.
 (2003.10.10 受付)