

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

監崎 達也¹・伊津野 和行²

¹学生会員 立命館大学大学院 理工学研究科環境社会工学専攻 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

²正会員 工博 立命館大学教授 理工学部土木工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

すべり摩擦型免震支承装置を用いた橋梁の地震応答解析を行う場合、無限大に近い初期剛性の扱いが問題になる。数値解析上、過度に大きな初期剛性を与えると、支承の変形量が著しく小さくなる結果が得られる。理論的には、初期剛性は無限大でも支承の受ける力が摩擦力を越えていれば、支承は変形するはずであり、数値解析上の誤差が原因だと考えられる。また、減衰をどのように仮定するかによっても、結果が異なる場合がある。これらの問題点を解明するために、市販されている二つの動的解析ソフトウェアを用いて解析を行い、初期剛性と減衰の与え方による地震応答解析結果への影響について考察した。

Key Words : *initial stiffness, sliding bearing, Rayleigh damping, numerical error, strain energy dependent damping*

1. はじめに

橋梁の免震支承としては、鉛プラグ入積層ゴム支承 (LRB)、高減衰積層ゴム支承 (HDR)、およびすべり摩擦型免震支承が代表的である。

LRB は鉛プラグによって減衰性を付加し、積層ゴムのせん断変形を利用することによって長周期化をはかり、かつ復元力を与える。その力学特性は、弾塑性の骨格曲線をもつバイリニア型履歴復元力特性を示す。HDR は、積層ゴムそのものの材料特性によって減衰性を与えている点が LRB とは異なるが、力学特性としては LRB とほぼ同じ履歴復元力特性を示す。

一方、すべり摩擦型免震支承は、上部構造と下部構造とを支承部で滑らせることによって、下部構造から伝わる地震動から上部構造を絶縁することを狙ったものである。すべり面の摩擦によって減衰性を与え、ゴムや金属のバネによって復元力を与える。そのため、力学特性は剛塑性に近い骨格曲線をもったバイリニア型履歴復元力特性を示す。LRB や HDR と比較して、骨格曲線の初期剛性が大きく、ほぼ無限大に近くなるのが特徴である。

橋梁の地震応答をコンピュータでシミュレーションする場合、無限大に近い初期剛性は数値解析上の問題を引き起こしやすい。

1)他部材と比較して剛性に大きな差があるため、計算途中で桁落ち誤差が生じやすい。

2)計算にあたっては具体的な数値を用いる必要があるが、ほぼ無限大に近いという値をどのくらい大きな数で表現するかによって、結果が異なる可能性がある。

3)初期剛性を元に算出されることの多い減衰マトリックスの値が、過度に大きくなる場合がある。

以上の3点の問題について検討するため、本研究では、すべり摩擦型免震支承の初期剛性および減衰マトリックスの計算方法を変えて地震応答計算を行い、その結果を比較検討した。そのうえで、適切な初期剛性の値と減衰の与え方について提案を行った。

2. 解析概要

解析にあたり、使用モデルは図-1のような質点系モデルを考えた。橋脚は鋼製橋脚の諸元を用いて非線形はり部材とし、支承部はバネで表現して非線形部材として扱った。モデルの諸元を表-1に示す。

橋脚、支承システムにおいては、非線形特性を考慮するため、図-2に示したバイリニアモデルを用いた。はり部材では、図-2における横軸を曲率、縦軸を曲げモーメントとした。剛性低下率・降伏曲率は0.01、0.0011(1/m)である。

バネ部材では、横軸をバネ変形量、縦軸をバネ反力とした。本研究で用いた橋脚モデルの剛性が約20MN/mであることから、それより少し小さい値で

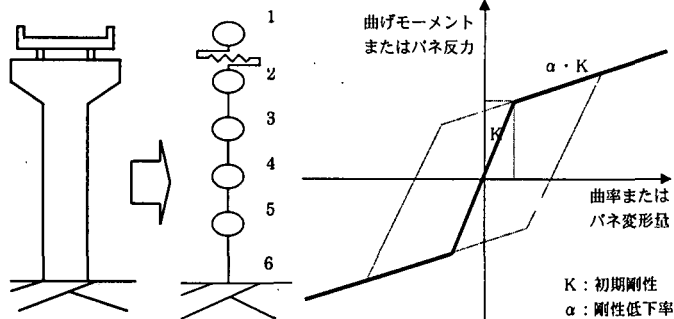


図-1 橋脚のモデル化

図-2 バイリニアモデル

ある $1.5 \times 10 \text{ MN/m}$ から $1.5 \times 10^6 \text{ MN/m}$ まで、剛性を 10 倍ずつ変化させた 6 ケースを考えた。降伏変形量は支承の初期剛性が $1.5 \times 10 \text{ MN/m}$ の時 0.0077333 m で、初期剛性の設定を 10 倍にすると 0.1 倍となる。減衰定数は、すべり摩擦型免震支承を 0、その他の部材を 0.02 として扱った。二次剛性は 2 MN/m で一定とした。

応答解析に先立って行った固有値解析の結果から、1 次モードの固有周期と有効質量比の値を表-2 に示す。有効質量比は 84% から 90% と、1 次モードの影響が非常に大きい。また、後に述べるレーリー減衰の計算に使用する係数 α (質量項)、 β (剛性項) の値を表-3 に記す。係数 α 、 β は、歪みエネルギー比例によるモード減衰定数から、応答計算に大きな影響を及ぼす 2 つのモードの固有振動数とモード減衰定数を用いて算出する値で、本解析では 1 次モードと 2 次モードを選んでいる。

なお、入力地震波は道路橋示方書 V 耐震設計編¹⁾に基づく標準入力波形のうち、I 種地盤用レベル 2 タイプ 2 の地震波一つ選び、水平方向に入力した。

3. ソフトウェア A における応答解析結果

レーリー減衰と歪みエネルギー比例型減衰という 2 種類の減衰条件を用いて、応答解析を行った。レーリー減衰は、その簡便性のため一般に多用されており、減衰行列を全体質量行列と全体剛性行列との線形和で表す減衰方法である。歪みエネルギー比例型減衰とは、系の各要素に蓄えられるひずみエネルギーの一部が減衰エネルギーとして消費されるという考え方である。

各々支承の初期剛性を $1.5 \times 10 \text{ MN/m}$ から $1.5 \times 10^6 \text{ MN/m}$ まで変化させて応答解析を行い、上部構造変位、橋脚天端変位、上部構造加速度、橋脚天端

表-1 モデルの諸元

区間	EI (GN・m ²)	L(m)	節点 番号	質量 (t)
節点1-2	—	—	1	233.2
節点2-3	26.9	2.0	2	35.0
節点3-4	26.9	5.9	3	21.0
節点4-5	26.9	5.4	4	21.0
節点5-6	26.9	2.7	5	25.0

表-2 1 次モードの固有周期及び有効質量比

支承の初期剛性 (MN/m)	固有周期 (sec)	有効質量比 (%)
1.5×10	1.039	84
1.5×10^2	0.796	89
1.5×10^3	0.766	90
1.5×10^4	0.763	90
1.5×10^5	0.763	90
1.5×10^6	0.762	90

表-3 レーリー減衰の係数

支承の初期剛性 (MN/m)	質量項の 係数 α	剛性項の 係数 β
1.5×10	0.10169	0.00053
1.5×10^2	0.27095	0.00021
1.5×10^3	0.31743	0.00016
1.5×10^4	0.03184	0.00023
1.5×10^5	0.31403	0.00023
1.5×10^6	0.31405	0.00023

加速度、橋脚基部の曲げモーメント、支承の変形量について比較、検討した。なお、支承の二次剛性は 2 MN/m で一定とした。

変位応答を示す図-3 において、エネルギー比例型減衰を用いた場合には上部構造変位、橋脚天端変位共に初期剛性の値が変化しても、それぞれほぼ一定の値を示すのに対し、レーリー減衰を用いると支承の初期剛性によって結果が変化することがわかる。 $1.5 \times 10^4 \text{ MN/m}$ 以上のケースでは上部構造変位と橋脚天端変位が同じ値になっている。

また、加速度応答を示す図-4 においても、エネルギー比例型減衰では上部構造加速度、橋脚天端加速度共にそれぞれほぼ一定の値を示すのに対し、レーリー減衰使用時には $1.5 \times 10^4 \text{ MN/m}$ 以上のケースにおいて、上部構造加速度と橋脚天端加速度がほぼ同じ値をとるようになっている。これは初期剛性 1.5

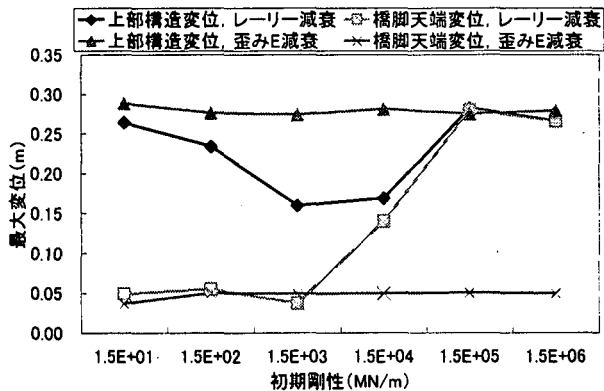


図-3 上部構造、橋脚天端の変位

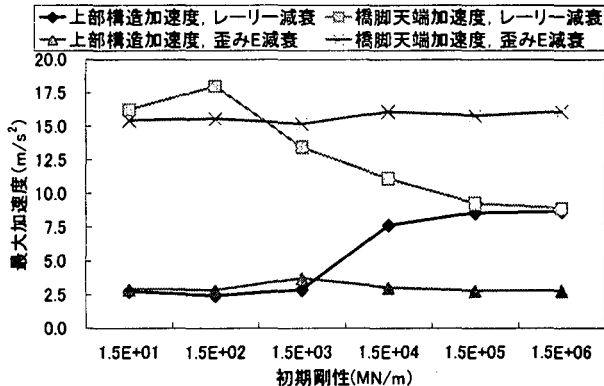


図-4 上部構造、橋脚天端の加速度

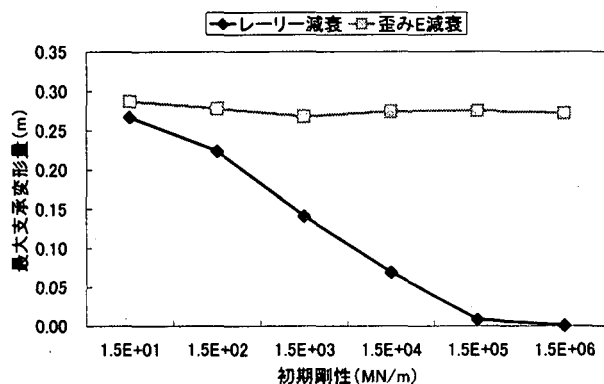


図-5 支承最大変形量

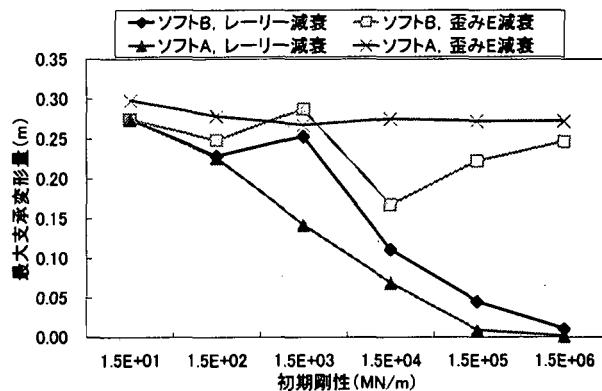


図-6 両ソフト支承最大変形量比較

$\times 10^4 \text{ MN/m}$ 以上のケースでは、上部構造と橋脚天端がほぼ同じ挙動を示していることを表している。

図-5 の最大支承変形量に示されるように、レーリー減衰を用いると、初期剛性の増加に伴って支承変形量が減少していき、 $1.5 \times 10^6 \text{ MN/m}$ 以上のケースでは、支承がほとんど動いていない。

4. ソフトウェア B における応答解析結果

ソフトウェア B においても、レーリー減衰使用時には、初期剛性が高くなると上部構造及び橋脚天端の変位、加速度共に同じ挙動を示し、支承最大変形量は著しく低下した。両解析ソフトウェアの歪みエネルギー比例型減衰とレーリー減衰とを比較すると、減衰方法による支承変形量の違いは図-6 から明らかである。

ソフトウェア A とソフトウェア B との解析結果に多少のずれがあるのは、ソフトウェアにおける解析計算方法の違い、またその解析計算途中の誤差によるものと判断した。特に $1.5 \times 10^4 \text{ MN/m}$ のケースにおいて、ソフトウェア B で歪みエネルギー比例型減

衰を用いた場合に支承変形量がかなり小さくなっている。このケースの時刻歴応答を詳細に検討すると、ある時間のステップにおいて、応答が、バイリニアモデルの二次剛性に入るか入らないかの、わずかな違いから差が生じていた。支承の二次剛性を、初期剛性 $1.5 \times 10^4 \text{ MN/m}$ に比べて、 2 MN/m と小さくしたことが影響している。歪みエネルギー比例型減衰を用いる場合でも、あまり大きな初期剛性を採用しない方がよい可能性がある。

両解析ソフトウェアの解析結果から初期剛性の設定により支承の変形量が大きく異なるのは、減衰の方法が大きな要因であると言える。次に何故、すべり摩擦型免震支承装置では、減衰の与え方により支承変形量にここまで大きな差が出るのかについて考える。

5. 動的解析における減衰行列と初期剛性の設定方法

(1) 支承の減衰の設定

レーリー減衰では、減衰行列が全体質量行列と全

体剛性行列の線形和、すなわち 次の式(1) で仮定される。

$$C = \alpha M + \beta K \quad (1)$$

ただし、 C ：全体減衰行列、 M ：全体質量行列
 K ：全体剛性行列、 α, β ：係数

一方、部材ごとに減衰定数を反映させる歪みエネルギー比例型減衰では、各々の部材について求めた減衰行列を、歪みエネルギーを重み係数として重ね合わせるにより、全体減衰行列 C が作成される。

レーリー減衰を用いると、構造全体に均一の減衰を与えるため、本来、粘性減衰が 0 の(摩擦減衰のみの)すべり支承部分にまで粘性減衰が与えられることになる。初期剛性を高く設定すれば、全体減衰行列における剛性比例部分の占める割合が多くなり、支承に対する減衰が過度に大きくなる。これらのことから、図-3 から図-6 のような結果となったのは、初期剛性の設定の高さにより、非常に大きな減衰が働いたためと考えられる。

一方、歪みエネルギー比例型減衰では、それぞれの部材の減衰性が直接部材に反映され、各部材はその減衰定数に支配されて挙動する。従って減衰定数を 0 に設定すると、初期剛性の違いが減衰行列に影響を与えない。仮に減衰を与えたならば、レーリー減衰と同様の結果となる。

(2) 支承の初期剛性の設定

支承の変形量に起きた問題の主な原因は、減衰方法の与え方によるものだと考えられるが、初期剛性の大きさにより、計算誤差が影響する場合も考えられる。初期剛性が大きくなり過ぎると、積分計算途中で用いる逆行列の計算で桁落ち誤差が発生する。簡単のため、二自由度系で考え、橋脚質量を m_1 、桁質量を m_2 、時間間隔を Δt とし橋脚剛性を k_p 、支承の初期剛性を k_b とすると、

$$\begin{pmatrix} m_1 + \Delta t^2(k_p + k_b)/4 & -\Delta t^2 k_b / 4 \\ -\Delta t^2 k_b / 4 & m_2 + \Delta t^2 k_b / 4 \end{pmatrix}^{-1} = \frac{1}{\text{行列式}} \begin{pmatrix} m_2 + \Delta t^2 k_b / 4 & \Delta t^2 k_b / 4 \\ \Delta t^2 k_b / 4 & m_1 + \Delta t^2(k_p + k_b)/4 \end{pmatrix}$$

という行列を計算途中でかけて次ステップの値を求める場合がある。

ここで $k_b \gg k_p$ の時 (即ち、支承の初期剛性が無限大に近いとき)、この行列の要素が全て $\Delta t^2 k_b / 4$ にほぼ等しくなる。この行列を橋脚に関する値と支承に関する値にかけて次のステップを計算するため、橋脚変位と支承変位が同じになるという結果となる。従って支承の初期剛性は、ある程度小さくする必要がある。本研究の解析結果では、歪みエネルギー比例型減衰のように要素単位の減衰方法を用いることが推奨されるが、他の設計解析条件との兼ね合いで、実務上レーリー減衰を使用する場合もあろう。本研究で用いたモデルの橋脚剛性が約 20MN/m であることから、図-6 よりその 10 倍から 100 倍までは、レーリー減衰も使用可能だと言える。ただし、使用する解析ソフトウェアにより設定範囲は異なる。

また、すべり面をゴム支承の上に設けるデバイスの場合には、ゴムがわずかながらもせん断変形するため、初期剛性は無限大にはならない。従って、すべり部分の初期剛性は理論上無限大であるが、数値解析上の困難により有限の初期剛性をもたせることとしても問題はない。

6. まとめ

本検討結果をまとめると以下の通りである。

- (1) すべり支承をバイリニアとしてモデル化して初期剛性を高く設定し解析を行った場合、レーリー減衰を使用すると、支承変形量が 0 になることがある。
- (2) すべり摩擦支承のような、粘性減衰機構によって減衰力を付加するのではない(摩擦減衰のみの)支承を用いて非線形解析を行う場合、レーリー減衰は使用せず、要素単位で減衰定数を反映させる減衰方法を使用する必要がある。
- (3) 非線形動的解析に用いる支承の初期剛性は、要素単位の減衰を考慮する減衰方法であれば応答結果に及ぼす影響は小さい。その場合、すべり摩擦支承を表す部材の減衰定数は 0 にする必要がある。レーリー減衰を用いる場合、橋脚剛性の 10 倍から 100 倍程度の初期剛性とするのが望ましい。

謝辞：本研究の実施にあたり、株式会社ビービーエムにお世話になった。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説、V 耐震設計編、1996 年 12 月。