

立命館大学理工学部 学生員 ○監崎 達也
立命館大学理工学部 正会員 伊津野和行

1. はじめに 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を持つことが、数値解析上問題になる。本研究では、初期剛性と減衰の与え方による応答解析結果への影響について考察した。

2. 解析概要

- (1) 目的 すべり摩擦型免震支承装置を用いた橋梁の非線形解析を行う場合、以下のような問題がある。
- i) すべり支承をバイリニアとしてモデル化した場合、初期剛性の設定により支承の変形量が著しく異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降伏ひずみ時の応力を超えていれば、支承の変形量には影響がないはずである。
 - ii) 実務上粘性減衰は一般的にレーリー減衰が用いられているが、すべり摩擦型免震支承を有する橋梁へ適用しても良いのか明らかではない。

これらの疑問点を明らかにするために、市販の二つの動的解析ソフトウェアAとBで解析を行った。

(2) モデル化 モデルは図1のような質点系モデルとして考え、橋脚ははり、支承部はバネで表現して非線形部材として扱った。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、バイリニアモデルを用いた。詳細を表1に示す。なお、入力地震波は内陸

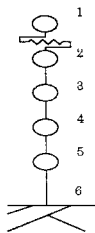


図1 一橋脚モデル

表1 モデルの詳細設定

区間	EI (GN・m ²)	L (m)	節点番号	質量 (MN)
節点1-2	—	0.5	1	2.33
節点2-3	26.9	2.0	2	0.35
節点3-4	26.9	5.9	3	0.21
節点4-5	26.9	5.4	4	0.21
節点5-6	26.9	2.7	5	0.25

直下型のレベル2の標準入力波形（Ⅰ種地盤用）を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 レーリー減衰と要素別減衰という減衰条件の異なるケースを考えた。レーリー減衰とは、全体質量行列と全体剛性行列との線形和で表すことができる減衰方法であり、要素別減衰とは、要素剛性比例型の減衰方法である。各々支承の初期剛性を $1.5 \times 10^6 \text{ MN/m}$ から $1.5 \times 10^4 \text{ MN/m}$ 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、検証した。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2において、要素別減衰を用いると上部構造、橋脚天端共にそれぞれほぼ一定の値を示すのに対し、レーリー減衰では $1.5 \times 10^4 \text{ MN/m}$ 以上のケースで上部構造と橋脚天端が同じ値になっている。図3に示す加速度応答についても同様である。これは上部構造と橋脚天端が同じ挙動を示していることを表し、支承が図4の最大支承変形量に示されるように、全く動いていない。

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では、要素別減衰という減衰方法が無いため、代わりに歪みエネルギー比例型減衰を用いた。これは、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、減衰なしの固有モードを求め、各次のモードごとに各要素のひずみエネルギーを求める方法である。この場合も、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、橋脚天端は同じ挙動を示し、支承最大変形量は著しく低下した。歪みエネルギー比例型減衰でもレーリー減衰と比較すると減衰方法による支承変形量の違いは図5からも明らかである。

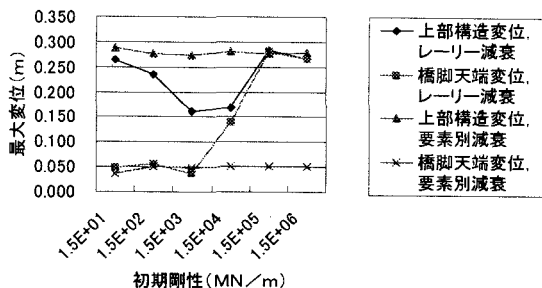


図2 上部構造，橋脚天端の変位

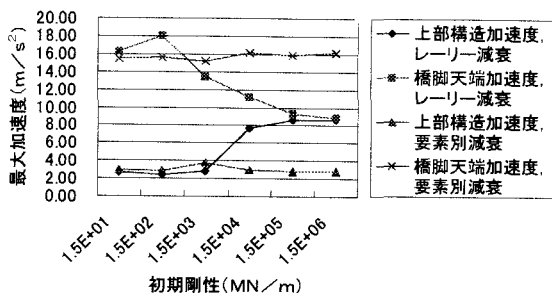


図3 上部構造，橋脚天端の加速度

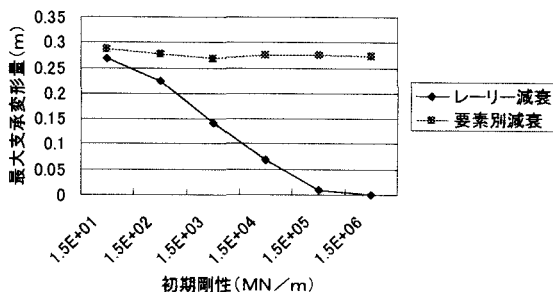


図4 支承最大変形量

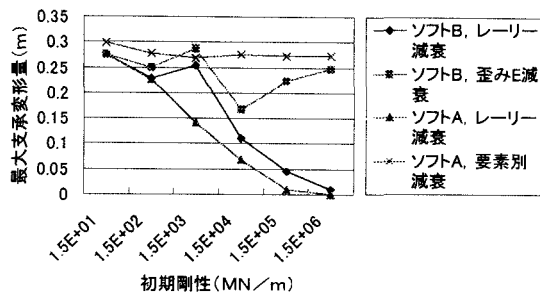


図5 両ソフト支承最大変形量比較

5. 支承の初期剛性の設定 支承の変形量に起きた問題の大きな原因は、減衰方法の与え方によるものと思われるが、初期剛性の大きさにより、計算過程がおかしくなっていることも考えられる。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る必要がある。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。解析結果より要素単位の減衰方法を用いると問題ないと思われるが、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でも、本研究で用いたモデルの橋脚剛性が約20 MN/mであることから、図5よりその10倍から100倍までは、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。

6. まとめ すべり摩擦型免震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。支承の初期剛性の設定は、要素単位の減衰を考慮する減衰方法なら特に問題はない。レーリー減衰を使用した場合、橋脚剛性の10倍から100倍までは使用可能範囲といえる。