

すべり系免震構造物の動的解析における減衰モデルと摩擦減衰力の取り扱い

独立行政法人土木研究所 正会員 ○矢田部 浩  
独立行政法人土木研究所 正会員 運上 茂樹

1. はじめに

すべり系免震支承の摩擦減衰力を弾塑性型の復元力モデルで動的解析を行う場合は、復元力モデルの初期剛性や減衰マトリックスの作成方法の違いが地震応答に与える影響が大きく、数値解析上の留意点とされている<sup>1),2)</sup>。本研究では、動的解析に用いる減衰モデルと摩擦減衰力の取り扱いについて、固体摩擦力が作用する減衰系強制振動の基本式から、系に固有な特性によって支配される振動問題を確認し、これに基づいた固有値解析および減衰マトリックスの作成方法を誘導した。また、橋梁モデルについて動的解析を行い、摩擦履歴モデルの初期剛性と減衰モデルの異なる条件下での地震応答から、本減衰モデルの有効性を検証した。

2. 動的解析に用いる減衰モデルと摩擦減衰力の取り扱い

(1) 1質点減衰系強制振動の基本式と減衰モデル

すべり系免震支承を用いた構造物を図-1 に示す 1 質点系モデルで表現する。系には、クーロンモデルに従って固体摩擦力  $F$  が減衰力として符号関数的に作用するとき、地動加振による減衰系強制振動の運動方程式は次式によって与えられる。

$$m\ddot{x} + c_b\dot{x} + k_b x = -m\ddot{x}_g - F_d \operatorname{sgn}[\dot{x}] \quad (1)$$

ここで、 $m$  は上部構造の質量、 $c_b$ 、 $k_b$  は復元力装置の粘性減衰係数およびばね定数、 $\ddot{x}$ 、 $\dot{x}$ 、 $x$  は相対加速度、相対速度、相対変位、 $\ddot{x}_g$  は地動加速度、 $F_d$  は動摩擦力である。

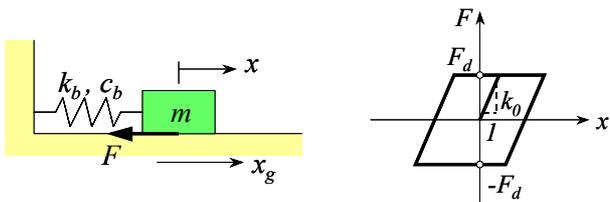
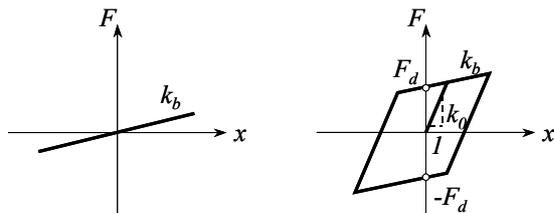


図-1 固体摩擦力が作用する 1質点系モデル

図-2 摩擦力のモデル化



(1) 固有値解析の場合 (2) 動的応答解析の場合

図-3 支承部の復元力モデル

摩擦減衰力が作用する多質点系モデルの固有値問題を解く場合、剛性マトリックスの設定においては、式(1)の摩擦減衰力の項はこの問題に対して影響しないため、支承部の要素剛性は復元力装置の剛性  $k_b$  が与えられる。したがって減衰マトリックスは、この固有値によるモード減衰定数を用いて作成すればよい。

(2) 非線形動的解析における摩擦減衰力の取り扱いと支承部の復元力モデル

振動の非線形性として、質点の変位応答  $x(t)$  と速度応答  $\dot{x}(t)$  によって変化する復元力特性を  $Q(x, \dot{x})$  で表現する。動的解析における支承部の摩擦減衰力に関する取り扱いとして、復元力モデルについては、解析上で要求される特性に応じて次のように設定する。

a) 固有値解析

前節(1)および図-3(1)に示すとおり、摩擦の影響を除いた復元力装置のみの復元力モデルとする。

b) 動的応答解析

摩擦減衰力は、材料の非線形性と同様に、復元力特性を表す変位と速度の関数  $Q$  に導入される。支承部の復元力モデルは、図-2 の摩擦減衰力と復元力装置の抵抗力との合成モデル(図-3(2))によって与えられる。

3. 橋梁モデルによる地震応答

(1) 解析モデルと入力地震動

系に固有な振動特性に従って、固有値、固有モードは一意的に求められるため、粘性減衰モデルに関する影響が小さく橋脚部材の応答が弾性範囲内であれば、摩擦減衰による、ある一定の応答値が得られることが

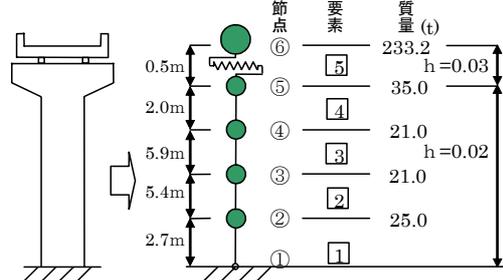


図-4 文献1)による橋脚の解析モデルと諸元

表-1 解析条件

構造要素 (ハブ/リブ)	支承：非線形せん断バネ要素 橋脚（鋼製）：非線形はり要素 橋脚下端固定
解析手法	時刻歴解析、直接積分法
数値積分法	Newmark-β法 ( $\delta=0.5$ , $\beta=0.25$ )
減衰モデル	Rayleigh型、ひずみエネルギー比例型
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

キーワード： すべり支承，摩擦力，非線形動的解析，減衰モデル，初期剛性

連絡先： 〒305-8516 茨城県つくば市南原1番地6 TEL:029-879-6773 FAX:029-879-6736

予測できる。

そこで、図-4 に示すような橋脚単独モデル〔文献1) による〕を対象に、摩擦履歴モデルの初期剛性と減衰モデルの異なる条件下での地震応答から、本減衰モデルの有効性を検証した。解析条件を表-1 に示す。

橋脚と支承の非線形特性を表す履歴モデルを図-5、図-6 に示す。橋脚は単柱式鋼製橋脚を想定した。支承部は降伏荷重  $Q_y$  を一定とし、初期剛性  $k_0$  は、橋脚の曲げ剛性と同程度の  $1.5 \times 10^1 \text{ MN/m}$  から  $1.5 \times 10^6 \text{ MN/m}$  まで 10 倍ずつ変化させた 6 ケースを設定した。復元力装置のせん断バネ定数  $k_b$  は  $2 \text{ MN/m}$  で一定とした。

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 型減衰の基準モードは、有効質量の大きな桁および支承の振動モード（1 次）と橋脚の振動モード（2 次）を選択した。部材減衰定数  $h$  は、支承部材は地震時水平力分散ゴム支承と同等の水平支持機能および履歴特性を持つ復元力装置として 3% とし、橋脚部材を 2% とした。

入力地震動は、道路橋示方書に示される標準加速度波形のうち、レベル 2 のタイプ II、I 種地盤用波形 No.1 (II-I-1) を用いた。

## (2) 解析結果

図-7 に摩擦履歴モデルの初期剛性と支承の最大変形量との関係を示す。また、図中には減衰マトリックスの設定に摩擦減衰力を考慮した場合の応答値<sup>2)</sup>（摩擦履歴モデルの初期剛性を支承部材の剛性とし、その固有値による減衰設定を行った応答値。減衰モデルはひずみエネルギー比例型）を参考ケース「摩擦考慮」として示す。

参考ケースでは初期剛性の変化に対して大きく応答値が変化していた最大支承変形量は、減衰モデルの違いによる応答値の変化はなく、初期剛性が  $1.5 \times 10^1$  で  $0.27 \text{ m}$  発生し、 $1.5 \times 10^2$  以降は  $0.25 \text{ m}$  と、ほぼ安定した解が得られている。応答値が比較的安定した状態に入る、初期剛性  $1.5 \times 10^3$  における時刻歴を図-8 に示す。2 種類の減衰モデルによる時刻歴はほぼ同じであり、減衰モデルの違いによる影響は見受けられない。一方、参考ケースは同じ波形パターンであるがピークが抑えられた形であり、前者との減衰の違いを示している。

したがって、摩擦履歴モデルの初期剛性や減衰モデルの違いに関わらず、復元力装置の粘性減衰と免震支承全体の履歴減衰による安定した応答値が得られており、本文で示す減衰モデルによって地震応答が改善されたことを確認した。

## 4. まとめ

すべり系免震構造物の動的解析に用いる減衰モデルと摩擦減衰力の取り扱いについて検討を行った結果、得られた知見を以下に示す。

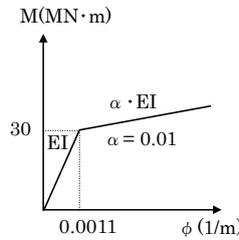


図-5 橋脚のM-φ関係

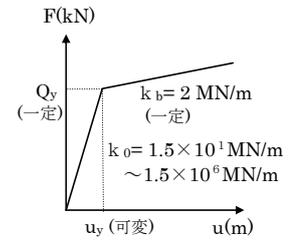


図-6 支承の復元力-変位関係  
(初期剛性 $k_0 = 6$ ケース)

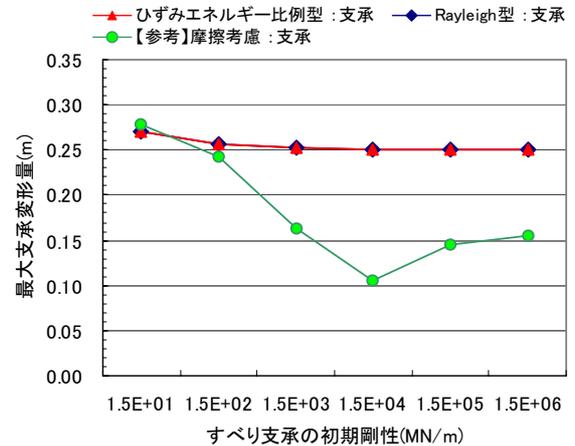
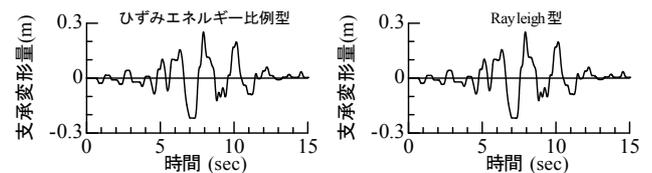
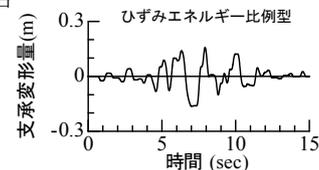


図-7 摩擦履歴モデルの初期剛性と最大支承変形量



(1) ひずみエネルギー比例型 (2) Rayleigh型減衰の場合  
減衰の場合



(3) 参考：摩擦考慮〔文献2) による〕の場合

図-8  $k_0 = 1.5 \times 10^3$  における支承変形量の時刻歴

- (1) 固体摩擦力が作用する減衰系強制振動の基本式から、系に固有な特性によって支配される振動問題を確認し、これに基づいた固有値解析および減衰マトリックスの作成方法を誘導した。
- (2) これにより地震応答は、摩擦履歴モデルの初期剛性に大きく左右されない、復元力装置の粘性減衰と免震支承全体の履歴減衰による安定した解が得られており、本文で示す減衰モデルによって地震応答が改善されたことを確認した。

## 参考文献

- 1) 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.
- 2) 矢田部浩，運上茂樹：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，土木学会地震工学論文集，Vol.27，No.262，2003.12.