

すべり系免震構造物の動的解析における 減衰モデルに関する一考察

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 耐震研究グループ耐震チーム交流研究員
(〒305-8516 茨城県つくば市南原1番地6)

²正会員 工博 独立行政法人土木研究所 耐震研究グループ耐震チーム上席研究員 (同上)

1. はじめに

すべり系免震支承を用いた構造物の動的解析を行う場合、摩擦による減衰力のモデル化を適切に扱うことが必要とされる。クーロン摩擦力の履歴特性は、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に不連続な部分を持つ。これを数値解析上で取り扱う場合、剛塑性から十分傾きの大きな初期剛性を与えた弾塑性型の履歴復元力モデルとする方法が、これまでの研究や設計で多く用いられてきた。この解析手法は、シンプルな復元力モデルに置き換えられるため解析が容易であり、また、適切な初期剛性を仮定すれば厳密解に近い応答値を得ることができる。しかしながら、初期剛性の違いや、初期剛性をもとに計算される減衰マトリックスの設定方法の違いが、地震応答に与える影響が大きいことも、既往の研究で数値解析上の留意点とされている^{1),2)}。

本文では、「動的解析に用いる減衰モデルと摩擦減衰力の取り扱い」と、「摩擦力のモデル化における初期剛性の設定」の2つの課題を分けて検討を行った。

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は、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全体減衰マトリックスの設定を誘導した。

また、摩擦力のモデル化における初期剛性の設定については、摩擦力のみを考慮した橋梁モデルについて動的解析を行い、数値解析上剛とみなせる適切な初期剛性の設定について考察した。

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) 固体摩擦力が作用する1質点減衰系の強制振動の基本式

いま1つの質点の質量を m とし、質点の水平変位を x 、その速度を $\dot{x}$ とする。構造物の部材相互、あるいは支持点などにおいて作用する固体摩擦力としてクーロン摩擦を考える場合、時刻 t における固体摩擦力は次式によって与えられる。

$$F(t) = F_d \operatorname{sgn}[\dot{x}(t)] \quad (1a)$$

$$F_d = \mu mg \quad (1b)$$

ここで、 F は固体摩擦力、 F_d は動摩擦力（＝最大静止摩擦力 F_s とする）、 μ は動摩擦係数（モデル則のもとに一定）、 g は重力加速度である。すべり速度の反転に伴う摩擦力の変化は、符号関数として次式で定義される。

$$\operatorname{sgn}[\dot{x}(t)] = \begin{cases} +1 & \dot{x}(t) > 0 \\ 0 & \dot{x}(t) = 0 \\ -1 & \dot{x}(t) < 0 \end{cases} \quad (2)$$

そこで、上部構造を1つの剛体と仮定し、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、式(1)によって与えられる固体摩擦力が減衰力として符号関数的に作用し、免震支承システムの復元力装置を持つ、粘性減衰を考慮できるものとする。この場合、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。

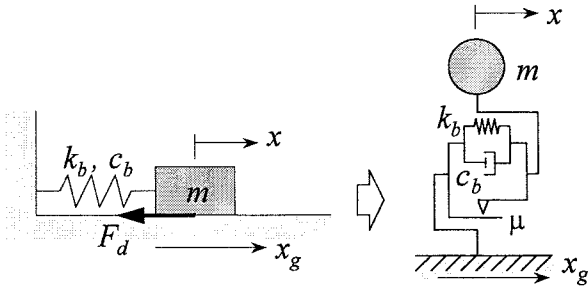


図-1 固体摩擦力が作用する1質点系モデル

$$m\ddot{x} + c_b\dot{x} + k_b x = -m\ddot{x}_g - \mu mg \operatorname{sgn}[\dot{x}] \quad (3)$$

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、 $\ddot{x}_g$ は地動加速度である ($\ddot{x} + \ddot{x}_g =$ 絶対加速度)。

(2) 固有値問題と減衰モデル

多質点系の運動方程式を解くことは、系に置換された減衰の有無にかかわらず、構造系に固有な振動特性を求める固有値問題を解くことに帰着する。多質点減衰系の運動方程式に用いられる減衰マトリックスもまた、減衰項の非連成化仮定のもとに各種モデル化された、固有値による減衰モデルに従って作成される。

固有値および固有ベクトルを求める固有値問題を振動系に対して応用するとき、固有値問題は、構造系を表す質量項と剛性項からなる次の方程式を解くことに帰す。

$$[K]\{\phi\} = \omega^2 [M]\{\phi\} \quad (4)$$

ここで、 $[K]$ 、 $[M]$ は剛性マトリックスと質量マトリックス、 $\{\phi\}$ はモードベクトル、 ω は固有円振動数である。

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についても同様である。このとき、剛性マトリックス設定においては、式(3)の基本式に示すとおり、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、動的解析を行う際の減衰モデルについても、この固有値によるモード減衰定数を用いて減衰マトリックスを作成すればよい。

(3) 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

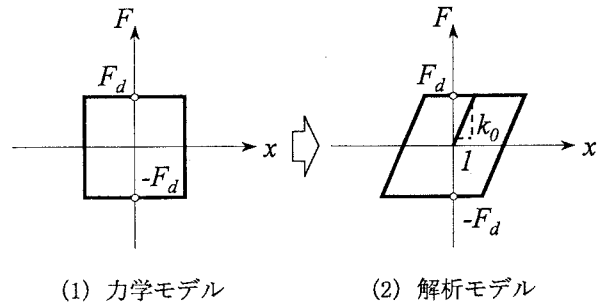


図-2 摩擦力のモデル化

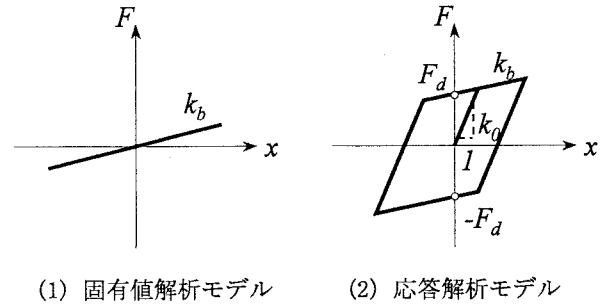


図-3 支承部の復元力モデル

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 で表したとき、多質点系の運動方程式は、次式によって与えられる。

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + \{Q(\{x\}, \{\dot{x}\})\} = -\{m\ddot{x}_g\} \quad (5)$$

ここで、 $[C]$ は構造部材に固有な減衰特性を表す一定マトリックスと仮定する。

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

構造物に固有な減衰特性を表す減衰マトリックスを作成する固有値解析を行う際の復元力モデルについては、前節(1)、(2)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) 地震応答解析

摩擦減衰力は、材料の非線形性と同様に、式(5)の復元力特性を表す変位と速度の関数 Q に導入される。このとき、摩擦力の履歴モデルは、図-2 に示す数値解析上、剛とみなせる適切な初期剛性 k_0 を持つ弾塑性モデルとする。支承部の復元力モデルは、こ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. 橋梁モデルの地震応答

(1) 解析モデルと入力地震動

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違いが地震応答に与える影響を検討した。解析条件を表-1 に示す。動的解析ソフトは TDAPⅢ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-5 に示す。橋脚は単柱式鋼製橋脚を想定し、降伏曲げモーメントは $M_y=30\text{MN}\cdot\text{m}$ ，降伏曲率 $\phi_y=0.0011$ (1/m) とし、二次剛性は剛性低下率を初期剛性の 1/100 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-6 に示す。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。降伏変形量は初期剛性が $1.5\times 10^1 \text{ MN/m}$ のとき $u_y=0.007733\text{m}$ 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わせて変化させた (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取り、 2MN/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、桁および支承の振動モード（1 次：周期 2.25s，減衰 2.9%）と橋脚の振動モード（2 次：周期 0.30s，減衰 2.1%）を選択した。各部材に与える減衰定数 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。

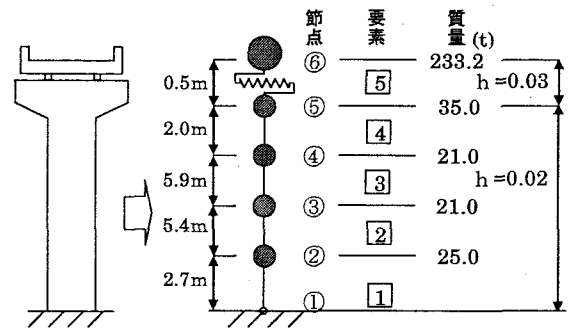


図-4 文献1)による橋脚の解析モデルと諸元

表-1 解析条件

構造要素	支承：非線形せん断バネ要素 (バイリニア)
	橋脚（鋼製）：非線形はり要素 (バイリニア)，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 型減衰
(2 種類)	ひずみエネルギー比例型減衰
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

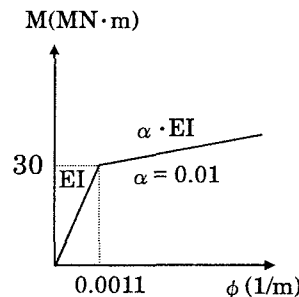


図-5 橋脚のM-φ関係

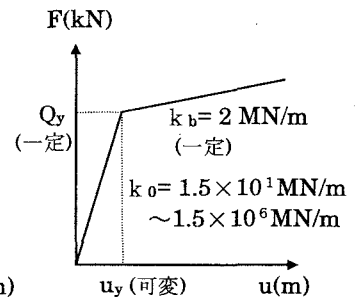
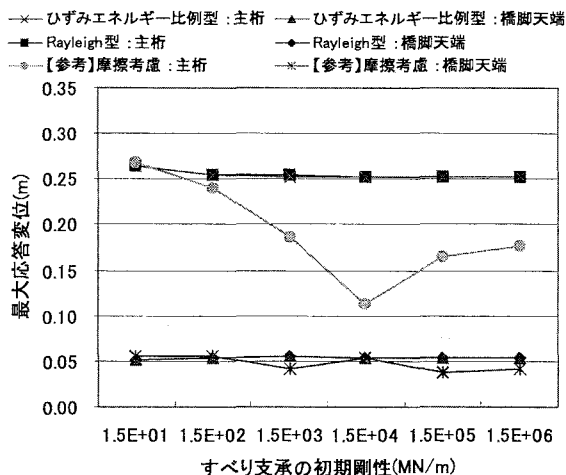
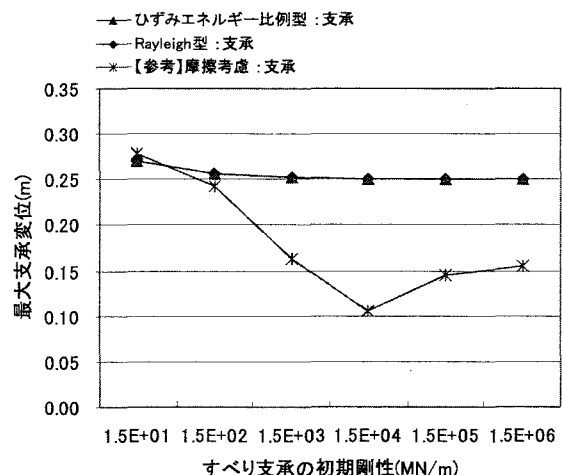


図-6 支承の復元力-変位関係
(初期剛性 k_0 = 6 ケース)



(1) 主桁位置と橋脚天端の最大応答変位



(2) 最大支承変位

図-7 摩擦履歴モデルの初期剛性と最大応答値

入力地震動は、道路橋示方書³⁾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

摩擦履歴モデルの初期剛性と最大応答値との関係として、主桁位置および橋脚天端の最大応答変位を図-7(1)に、最大支承変位を図-7(2)に示す。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²⁾(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主桁の最大変位は、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 1.5×10^1 で0.27m発生し、 1.5×10^2 以降は0.25mと、ほぼ安定した解が得られている。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いることがわかる。

4. 摩擦力のモデル化における初期剛性の設定

クーロン摩擦を考えた場合、摩擦力の力学モデルは図-2(1)の剛塑性型で表される。しかしながら、力学モデルを直接使用するのは実際的でないため、弾塑性モデルを用いて、数値解析上剛とみなせる適切な初期剛性を与える必要がある。

そこで、前章で使用した解析モデルを用いて、地震応答に与える粘性減衰の影響を除いた履歴減衰のみの橋梁モデルについて動的解析を行い、適切な初期剛性の設定について考察する。図-8に摩擦履歴モデルの初期剛性と支承の最大応答変位との関係を、粘性減衰を0とした場合と、前章の解析結果である粘性減衰を考慮した場合の2ケースを示す。

支承部に関する粘性減衰は、復元力装置のバネ値において一定であり、初期剛性の影響を受けないため、当然のことながら初期剛性の違いによる応答値の変化は両者とも一様に相似形となる。粘性減衰を失った応答値は、摩擦履歴モデルの初期剛性による弾性変位量の増減を明確に現している。これによれば、前章の解析モデルについては、数値解析上剛とみなせる適切な初期剛性は 1.5×10^3 であり、橋脚バネに対して100倍、復元力装置のバネに対して 10^3 倍となる。

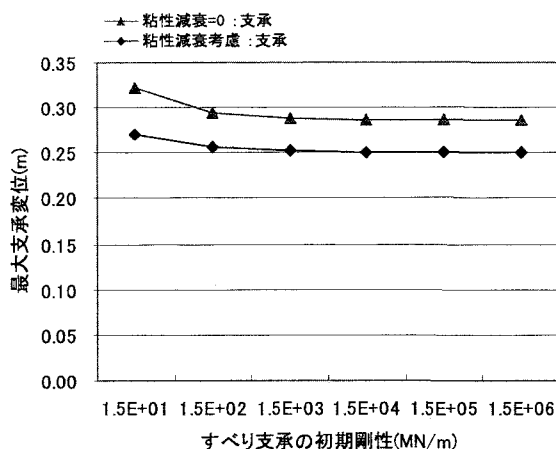


図-8 摩擦履歴モデルの初期剛性と最大応答値

5. まとめ

本文では、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と、摩擦力のモデル化における初期剛性の設定について検討を行った。その結果、得られた知見をまとめると以下のとおりとなる。

- (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全体減衰マトリックスの設定を誘導した。
- (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た。
- (3) 摩擦力のモデル化における適切な初期剛性の設定としては、本文の解析モデルの場合、橋脚バネに対して100倍、復元力装置のバネに対して 10^3 倍の結果を得た。

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.
- 3) (社)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, V耐震設計編, 2002.3.