

ゴム支承を用いた反力分散構造の減衰設定に関する一考察

松田泰治¹・大塚久哲²・山田純司³

¹正会員 博(工) 九州大学大学院助教授 工学研究院建設デザイン部門 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

²フェロー会員 工博 九州大学大学院教授 工学研究院建設デザイン部門 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

³正会員 工修 (株)オリエンタルコンサルタンツ (〒150-0002 東京都渋谷区渋谷1-16-14)

1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震による被害経験から、道路橋の耐震設計においては部材の非線形挙動を考慮するとともに、地震時において複雑な挙動を示す構造物に対して、従来の静的解析だけでなく動的解析を義務づけ、精度の高い検討を行うことが求められている。近年、動的解析ツールが整備されつつあること、また、性能照査型設計への移行に伴い、非線形挙動を伴う応答の評価が一層重要となることから、橋梁の耐震設計においては非線形動的解析が主流になっていくものと予想される。動的解析ではモデル化や解析に必要な各種条件の設定方法の違いが、解析の結果、および耐震設計の結果に及ぼす影響が大きいことは既往の研究^{1)~4)}においても指摘されている。本検討では、道路橋で大地震時に橋脚基部において非線形挙動を呈するモデルを対象とし、減衰のモデル化に対して、レーリー減衰とモード減衰と等価な全体減衰行列(ひずみエネルギー比例型)の2つの減衰タイプを用いた場合について動的解析結果の比較を行い、それぞれの応答が大きく異なることを確認した。そして、減衰のタイプにより応答が大きく異なる原因について詳細に分析を行い、そこで明らかとなった減衰マトリクスを設定する際の留意点を示した。

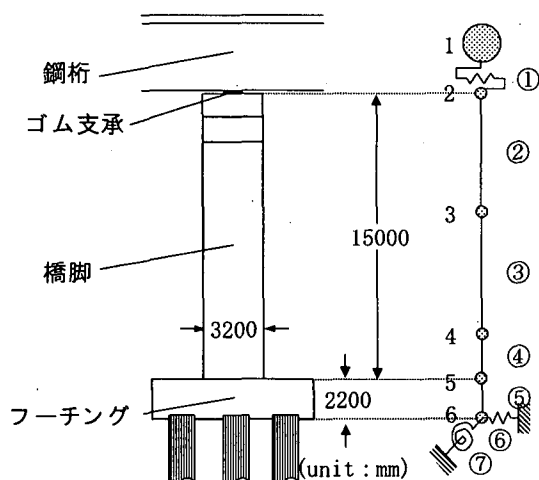


図-1 構造概要と解析モデル

2. 解析モデルおよび解析方法

(1) 解析モデル

Ⅱ種地盤A地域の、ゴム支承を用いて地震時水平力分散構造とした5径間鋼桁橋のうち中央側の橋脚に着目し、これを検討対象とした。図-1に構造概要および解析モデルを示す。桁は重心位置で集中質量によりモデル化し、フーチングを含むRC橋脚は二次元はり要素でモデル化した。質量は節点に集中質量として考慮した。橋脚基部は非線形はり要素で、基部以外は線形はり要素でモデル化した。はり要素の非線形性は武田モデルで考慮した。ゴム支承は線形の水平ばねでモデル化した。フーチング下端には地盤ばねを考慮した。減衰定数はゴム支承の水平ばねを2%、地盤ばねを20%とした。橋脚部分のはり要素に対する減衰定数は非線形はり要素を2%、線形はり要素を5%とした。

(2) 減衰マトリクスの設定方法

減衰マトリクスの設定では2つの減衰タイプを考慮した。

①レーリー減衰

2つの基準モードにおける振動数 f_1 、 f_2 とそれに対する減衰定数 h_1 、 h_2 よりパラメータ α と β を設定する。

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

C : 減衰マトリクス

M : 質量マトリクス, K : 剛性マトリクス

レーリー減衰では、マトリクスを共有できるため解析に用いるコンピュータの容量を節約できるという利点があるが、 α 、 β の算出に用いた2つの基準モード以外のモードは、減衰定数を正確に考慮できない欠点もある。

②モード減衰と等価な全体減衰行列

全ての振動モードの固有振動数と減衰定数を考慮して、式(2)により減衰マトリクスを設定する。

$$C = M \cdot [\Phi] \cdot [\zeta] \cdot [\Phi]^T \cdot M \quad (2)$$

ここで,

$$[\Phi] = [\{\phi_1\} \{\phi_2\} \cdots \{\phi_i\} \cdots]$$

$\{\phi_i\}$: i 次の固有ベクトル

h_i : i 次の減衰定数, ω_i : i 次の円振動数

モード減衰と等価な全体減衰行列の減衰評価手法では,線形系の各振動モードの減衰定数を忠実に表現できるという利点がある.ただし,コンピュータの容量は十分に確保しておく必要がある.

(3) 解析ケース

入力地震波としては,現象の把握を容易にする目的で解析モデルの1次モードに相当する周期1.3秒の共振正弦波を設定した.継続時間は周期の4倍の5.2秒とした.最大加速度は20gal, 50gal, 200galの3つのレベルを設定した.ここで,20galの正弦波は橋脚基部が線形の挙動,50galの正弦波は弱非線形の挙動,200galの正弦波は強非線形の挙動となることを想定している.

表-1に減衰マトリクスの設定に用いるための固有値解析結果を示す.レーリー減衰を用いるもので基準モードを有効質量比の大きな1次と2次の固有振動モードとしたものを[タイプ1],レーリー減衰を用いるもので基準モードを1次と3次の固有振動モードとしたものを[タイプ2]とした.図-2は[タイプ1],[タイプ2]における固有振動数と減衰定数の関係を表したものである.この図よりわかるように,[タイプ1]はレーリー減衰において3次モード以上の高振動数領域の減衰定数が過大となっている,[タイプ2]はレーリー減衰において3次モード以上の高振動数領域の減衰定数を[タイプ1]と比べ相対的に小さく設定したものである.また,[タイプ1]は有効質量が大きい方から2つのモードを選定したタイプであり,このような基準モードの選択は実務設計でしばしば行われている.モード減衰と等価な全体減衰行列(ひずみエネルギー比例型)を用いたものを[タイプ3]とし,減衰マトリクスは以上の3タイプを設定した.

表-2に示すように減衰マトリクスを3タイプの方法で設定した.それぞれの減衰タイプを用いたモデルに対して20, 50, 200galの3つの加速度レベルの正弦波を入力する全9ケースについて検討を行った.

表-1 固有値解析結果

次数	固有周期 (s)	固有振動数 (Hz)	有効質量比 (%)	減衰定数 (%)
1	1.22	0.819	52	0.0675
2	0.384	2.61	26	0.129
3	0.0911	11.0	21	0.144
4	0.034	29.4	1	0.0968

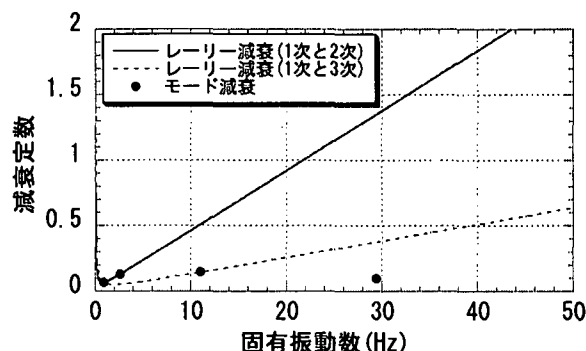


図-2 固有振動数と減衰定数の関係

表-2 解析ケース

検討 ケース	入力正弦波の 最大加速度	減衰マトリクス の設定方法
case1	20gal (線形)	[タイプ1]:レーリー(1次と2次)
case2		[タイプ2]:レーリー(1次と3次)
case3		[タイプ3]:全モード減衰
case4	50gal (弱非線形)	[タイプ1]:レーリー(1次と2次)
case5		[タイプ2]:レーリー(1次と3次)
case6		[タイプ3]:全モード減衰
case7	200gal (強非線形)	[タイプ1]:レーリー(1次と2次)
case8		[タイプ2]:レーリー(1次と3次)
case9		[タイプ3]:全モード減衰

3. 動的解析結果

図-3～図-4は最大加速度50galと200galの正弦波入力時の応答加速度および応答変位の時刻歴を示したものである.弱非線形挙動を示すcase4～case6ではcase5とcase6で加速度波形に高振動数成分が顕著に現れているのに対し,case4ではそのような成分は現れておらず,応答が異なる.強非線形挙動を示すcase7～case9でもcase8とcase9で同じく加速度波形に高振動数成分が顕著に現れているのに対し,case7ではそのような成分は現れていない.また,変位波形についてもcase8, case9が同位相であるのに対し,case7は位相に差異が認められる.線形挙動を示すcase1～case3では応答は加速度,変位ともによく一致した.

図-5～図-6は最大加速度50galと200galの正弦波入力時の橋脚のはり要素の材端モーメント分布を示したものである.case4～case6の弱非線形挙動時はcase4で材端モーメントの分布曲線が非線形はり要素④の上下端の節点4と節点5において不連続となっており,case5, case6では連続となっている.また,case5とcase6とでは材端モーメントの分布曲線はよく一致している.case7～case9の強非線形挙動時はcase7, case8で材端モーメントの分布曲線が節点4と節点5において不連続となっており,case9では連続となっている.また,case7における節点4と節点5の上下の材端モーメントの差異はcase8と比較して大きい.case1～case3の線形挙動時は材端モーメントの分布曲線は連続となり,その値もよく一致した.

表-3は各正弦波入力時の最大応答値を比較したもの

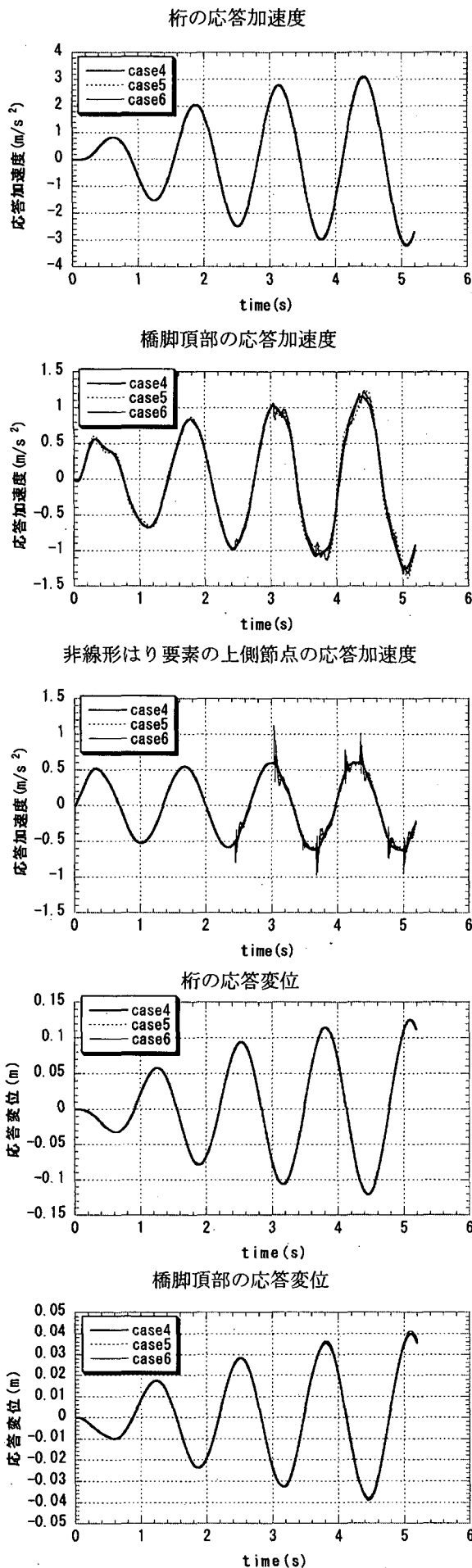


図-3 応答加速度および応答変位の時刻歴(弱非線形)

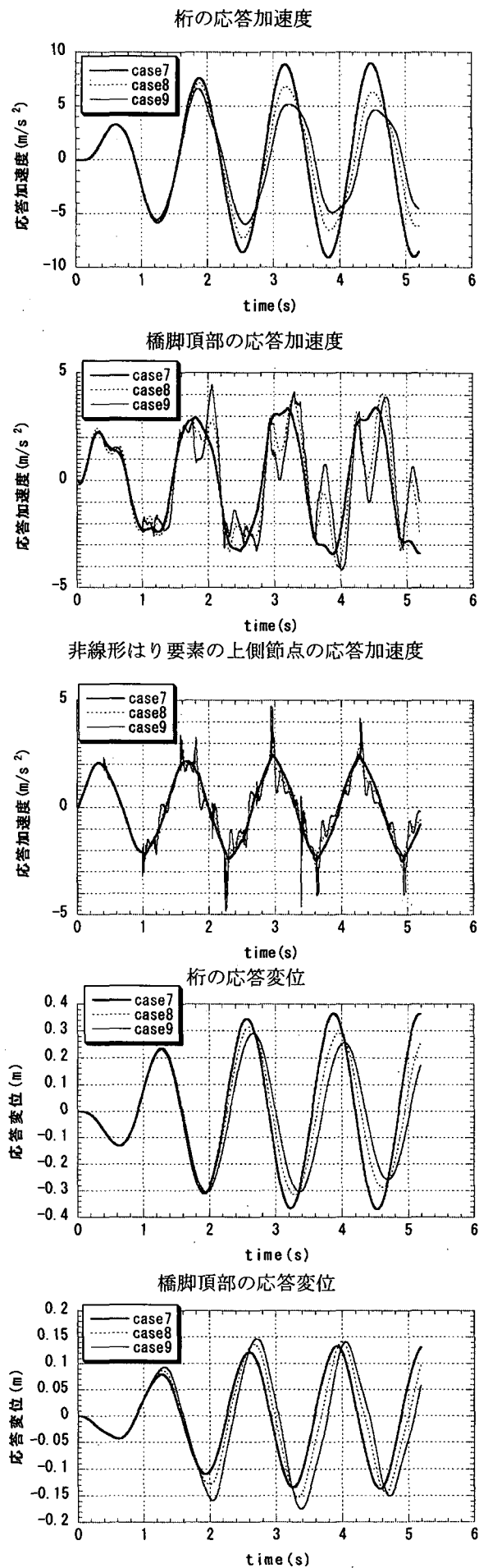


図-4 応答加速度および応答変位の時刻歴(強非線形)

である。case1～case3の線形挙動時は減衰マトリクス
の設定方法によらず橋脚頂部および桁の応答は同様なも
のとなっている。case4～case6の弱非線形挙動時には
case4, case6, case5の順に橋脚頂部の応答は大きくなっ
ている。case7～case9の強非線形挙動時はcase7に比
べ、case8, case9の橋脚頂部の応答は大きくなってい
る。case8とcase9の橋脚頂部の最大応答加速度は高振
動数成分の影響で値にばらつきが認められるが、最大変
位はcase8とcase9でよく一致している。

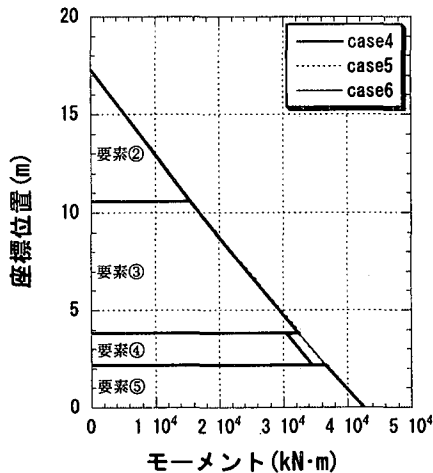


図-5 はり要素の材端モーメント分布(弱非線形)

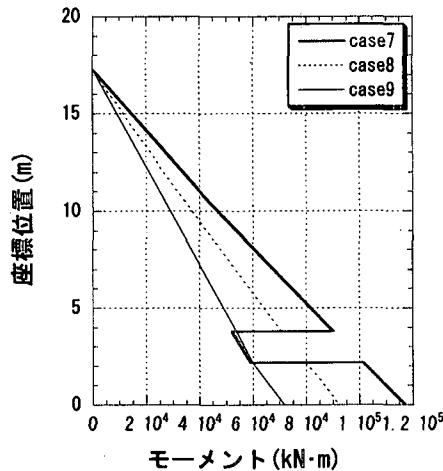


図-6 はり要素の材端モーメント分布(強非線形)

4. 結果の分析

非線形挙動時に[タイプ1]と[タイプ2],[タイプ3]の
減衰で橋脚部分の応答加速度および応答変位が大きく異
なる理由として、図-2に示したように[タイプ1]で3次
モード以上の高振動数領域の減衰定数が過大評価されて
いることが考えられる。

本解析モデルは地震時水平力分散構造を採用している
ため、表-1に示すように1次モードの有効質量比が52
%とその他のモードの有効質量比と比較して大きい。また、
線形挙動時には剛性が変化しないため高次の振動
モードが励起されない。そのため、[タイプ1]～[タイプ

3]で高振動数領域の減衰評価に差異があるにもかかわらず、
case1～case3ではほぼ同様の応答を示していると
考えられる。

これに対し、非線形挙動時には剛性の急変により非線
形の振動モードが励起され、応答は大きくなる。レー
リー減衰で、3次以上のモードの減衰定数を過大に評価
している[タイプ1]では高振動数成分はその影響で減衰
する。レーリー減衰とし、3次以上のモードの減衰定数
を小さめに評価している[タイプ2]およびすべてのモー
ドの減衰定数を正確に評価した[タイプ3]では非線形の
振動モードの励起を低減させるような想定外の減衰力は
作用していない。そのため、case4とcase5, case6, ま
たcase7とcase8, case9ではそれぞれの応答が大きく異
なっている。

本検討では、橋脚基部の非線形特性をトリリニアで与
えているため、はり要素が非線形領域に入った解析ケー
スでは、剛性の急変を繰り返すことで、非線形の振動モー
ドの励起が引き起こされる。

一方、[タイプ1],[タイプ2],[タイプ3]の減衰で材端
モーメントの分布曲線が大きく異なる原因として、レー
リー減衰では、はり要素が非線形領域に入った場合に、
相対角速度が増加し、それに比例した減衰力が発生する
ことが考えられる。

レーリー減衰では式(1)に示すように質量マトリクス
と剛性マトリクスにそれぞれ係数 α , β をかけたものの
線形和で減衰マトリクスが構成されている。本検討では
回転慣性を考慮しておらず、回転方向の減衰マトリクス
は回転方向の剛性マトリクスに係数 β をかけたもののみ
で構成されている。つまり、回転方向の減衰マトリクス
と上下の節点間の相対角速度との積が回転方向の減衰力
(モーメント)として非線形はり要素(要素④)に作用す
る。図-7, 図-8はcase7, case8における節点4の上
下のはり要素の材端モーメントと節点4に作用する減衰
力の時刻歴を示したものである。この図より、節点4の
上下のはり要素の材端モーメントの差は節点4に作用す
る回転方向の減衰力と一致していることがわかる。つま
り、要素④に作用する回転方向の減衰力により節点4の
上下のはり要素の材端モーメントに差異が生じたことにな
る。これは節点5についても同様である。一方、モー
ド減衰と等価な全体減衰行列(ひずみエネルギー比例型)
では、本検討で回転慣性を考慮していないため、回転方
向の減衰成分は存在せず、回転方向の減衰力は作用して
いない。そのため、質点に回転方向の減衰力が作用して
いるcase7, case8と質点に回転方向の減衰力が作用し
ないcase9とでは非線形はり要素の応答モーメント、応
答曲率、橋脚部分のはり要素の材端モーメント分布が異
なる。

図-9はcase4, case5における節点5に対する節点4

表-3 各ケースの最大応答値の比較

検討 ケース	挙動	橋脚頂部		桁		橋脚基部の 最大曲率と 降伏曲率 との比
		最大加速 度(m/s^2)	最大変位 (m)	最大加速 度(m/s^2)	最大変位 (m)	
case1	線形	0.506	0.0153	1.33	0.0508	0.0511
case2		0.506	0.0153	1.33	0.0508	0.0511
case3		0.506	0.0153	1.33	0.0508	0.0512
case4	弱非線形	1.25	0.0399	3.20	0.125	0.314
case5		1.38	0.0411	3.16	0.125	0.368
case6		1.33	0.0410	3.18	0.126	0.374
case7	強非線形	3.41	0.137	9.02	0.369	3.182
case8		4.05	0.153	7.23	0.317	5.211
case9		4.45	0.175	6.64	0.305	6.873

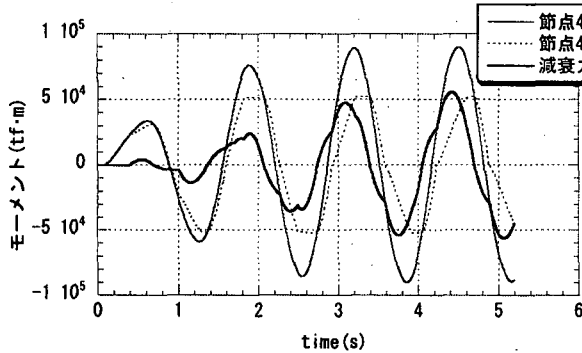


図-7 case7における節点4に作用する回転方向の減衰力と節点4の上下のモーメントの時刻歴

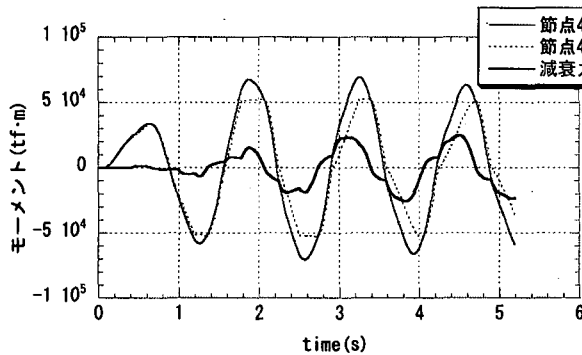


図-8 case8における節点4に作用する回転方向の減衰力と節点4の上下のモーメントの時刻歴

の相対回転角速度を、図-10はcase7, case8における節点5に対する節点4の相対回転角速度をそれぞれ比較したものである。節点5に対する節点4の相対回転角速度は非線形化の程度に比例して大きくなっている。回転方向の減衰力は回転方向の減衰マトリクスと上下の節点間相対角速度との積で表されるため、上下の節点間相対角速度の増加にともない大きくなる。非線形化の程度が顕著になると要素④に作用する回転方向の減衰力が増加し、節点4および節点5の上下の材端モーメントの差異は大きくなる。このことは図-5、図-6において非線形化の程度が顕著になるほど、節点4および節点5の上下の材端モーメントの差異が大きくなる傾向とよく一致している。

また、質点に作用する回転方向の減衰力は減衰マトリクスの設定に用いる係数 β にも比例する。表-4からわか

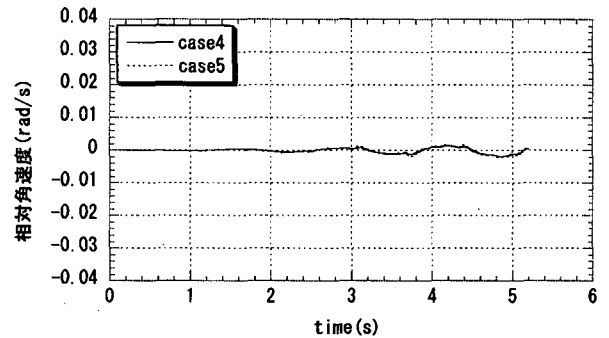


図-9 case4, case5における節点5に対する節点4の相対回転角速度

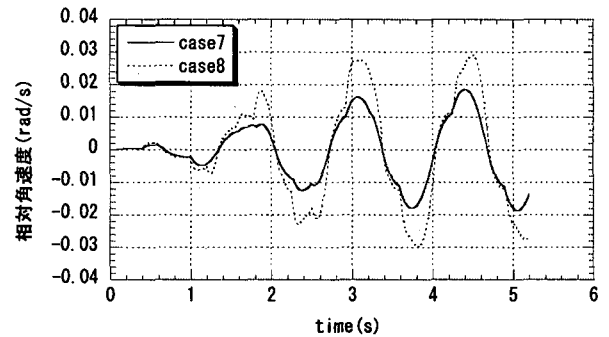


図-10 case7, case8における節点5に対する節点4の相対回転角速度

るように、レーリー減衰を設定する際の基準振動数 f_1, f_2 の差が小さく、減衰定数 h_1 に対し h_2 が相対的に大きな[タイプ1]では定数 β は大きく、基準振動数 f_1, f_2 の差が大きい[タイプ2]では定数 β は相対的に小さくなる。非線形挙動時は定数 β が大きい[タイプ1]では節点に作用する回転方向の減衰力および節点の上下の材端モーメントの差異は大きく、定数 β が小さい[タイプ2]ではそれらは相対的に小さい。このことは、図-5、図-6において[タイプ1]では節点4および節点5の上下の材端モーメントの差異が大きく、[タイプ2]ではそれが小さいという傾向とよく一致している。

通常の実務設計では、レーリー減衰を設定する際の基準モードとして有効質量比が大きい方から2つのモードを選択することがしばしば行われる。今回検討を行ったモデルでは、基準振動数 f_1, f_2 の差が小さく、なおかつ

表-4 レーリー減衰の設定における係数

モデル名	基準振動数		基準減衰定数		α	β
	f_1	f_2	h_1	h_2		
[タイプ1]:1次と2次	0.819	2.61	0.0675	0.129	0.307	0.0146
[タイプ2]:1次と3次	0.819	11.0	0.0675	0.144	0.587	0.00405
[対策]:1次と50Hz	0.819	50.0	0.0675	0.0675	0.683	0.000423

減衰定数 h_2 が h_1 に比べ大きいために係数 β が大きくなり、高振動数領域の減衰を過大に評価する結果となった。このようなケースでは非線形挙動を伴う部位で想定外の過大な減衰力が作用して応答に大きく影響することが明らかになった。

このような状況を回避するためには、通常の耐震設計で対象とされる30～50Hz程度までの振動数領域において減衰定数の振動数依存性が不合理とならないように基準振動数 f_2 と減衰定数 h_2 を適切に選定し、係数 β が過大とならないようレーリー減衰を設定すべきである。そのようなレーリー減衰の設定法として、基準振動数 f_1 を有効質量比の大きな1次の固有振動数とし、 f_2 を有効質量比に関係なく50Hzとする方法を提案する。減衰定数 h_2 は図-2において振動数に依存した傾きを極力小さくすることが望ましいと判断されるので $h_2=h_1$ とする。

表-4よりわかるように提案する方法では[タイプ1]、[タイプ2]と比較して、係数 β が小さく設定される。図-11は2.3で示した200galの正弦波を入力した際に節点4に作用する回転方向減衰力の時刻歴を示したものである。著者らが提案する方法では[タイプ1]、[タイプ2]と比べ、節点4に作用する回転方向の減衰力が小さくなっている。つまり、レーリー減衰を設定する際に基準振動数 f_1 を1次の固有振動数、 f_2 を50Hzとし、減衰定数 h_1 、 h_2 をともに1次のモード減衰定数とすることで非線形はり要素に想定外の過大な減衰力が作用することを回避することが可能となる。

5. まとめ

レーリー減衰やモード減衰と等価な全体減衰行列といった減衰マトリクスの設定方法の違いが非線形動的解析の結果に及ぼす影響について検討を行った。その結果得られた知見をまとめて以下に示す。

- ・レーリー減衰を設定する際の基準振動数 f_1 、 f_2 の差が小さく、なおかつ減衰定数 h_2 が h_1 に比べ大きいケースでは、非線形挙動を伴う部位で想定外の減衰力が作用するため応答を精度よく評価することが困難となる。
- ・レーリー減衰を用いて非線形挙動を評価する際には、有効質量比の大小に関わらず、基準振動数 f_1 、 f_2 の差が小さく、なおかつ減衰定数 h_2 が h_1 に比べ大きくなるように設定することは避けるべきである。通常の耐震設計で対象とされる30～50Hzまでの振動数領域において減衰定数とモード減衰定数との間で著しい差が生じないように基準振動数 f_2 と減衰定数 h_2 を設定することが望まし

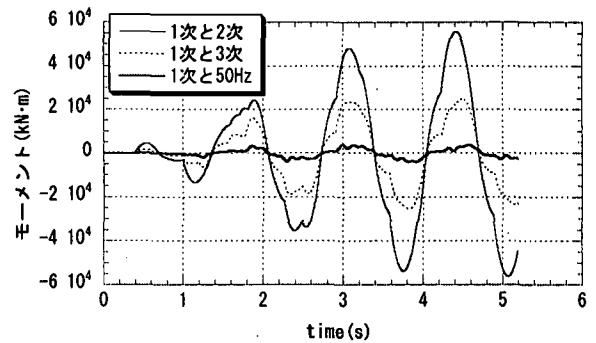


図-11 強非線形挙動時に節点4に作用する回転方向減衰力の時刻歴

い。

- ・レーリー減衰を用いた場合でも基準振動数 f_1 を有効質量比の大きな1次固有振動数、 f_2 を50Hzとし、 h_2 を1次のモード減衰定数 h_1 と等しくすることで、想定外の過大な減衰力の発生を極力抑え、非線形挙動の評価が可能となる。
- ・モード減衰と等価な全体減衰行列を用いた場合は、想定外の過大な減衰力は作用せず、非線形挙動による高振動数成分の励起を含む応答が評価可能となる。

上記のレーリー減衰設定上の問題は著しい非線形挙動を伴うはり要素が存在する場合の構造物の応答評価において一般に起こりうる問題である。特に本研究で検討対象としたゴム支承を用いた地震時水平反力分散構造や免震構造の減衰評価においてはその応答に及ぼす影響が顕著となる。実務設計者はそれぞれのタイプの減衰の特性を十分に熟知した上で、構造物の非線形挙動の評価を行うことが重要と考えられる。

参考文献

- 1) (財)土木研究センター：平成9・10年度 耐震設計ソフトウェアに関する研究委員会報告書，1999
- 2) 矢部正明：粘性減衰のモデル化の違いが非線形応答に与える影響，第4回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp. 101-108, 2000.
- 3) 室野剛隆，滝沢聡，畠中仁，棚村史郎：非線形動的解析に用いるRayleigh減衰のモデル化に関する提案，第4回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp. 115-122, 2000.
- 4) 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.