

PC 連続ラーメン橋の減衰性評価に関する一考察

松田泰治¹・大塚久哲²・宇野州彦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学生会員 九州大学大学院 工学府建設システム工学専攻 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

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)~5)}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PC連続ラーメン橋を対象とし、減衰のモデル化に対して、レーリー減衰とひずみエネルギー比例型で求めたモード減衰と等価な全体減衰行列の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。

2. 解析手法の概要

(1) 解析モデルおよびモデル化手法

本検討は支間割りが対称である橋長299.00mのPC4径間連続ラーメン橋を対象とした(図-1参照)。本橋梁の支間割りは54.55+94.00+94.00+54.55mで、橋脚高はP1橋

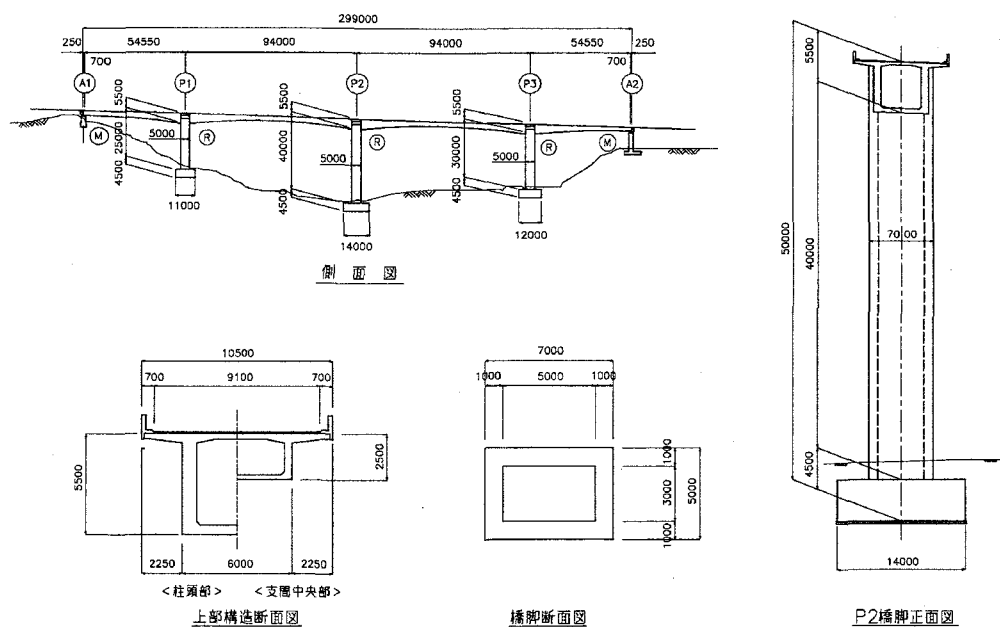


図-1 解析対象橋梁

脚が25m, P2橋脚が40m, P3橋脚が30mの不等橋脚高を有するモデルである。解析モデルの材料特性は上部構造を全断面有効時の線形はり要素とした。橋脚部の材料特性は図-2に示す橋脚断面を基に、降伏剛性を有する非線形はり要素とした。ただし橋脚の上下端には塑性ヒンジを設定し、塑性ヒンジ領域の中央に非線形回転バネを設けた。また解析モデルの質量は、節点に集中質量とし、節点の自由度は水平2方向と回転を考慮した。図-3に示すように、橋脚のフーチング下端には動的変形係数を考慮した水平・鉛直・回転の線形の地盤バネを設けた。基礎形状は、直接基礎でI種地盤上に建設される橋とし、地域区分はA地域(地域別補正係数: $C_z=1.0$)、重要度区分はB種の橋とする。また橋梁全体系の破壊形態として、上部構造は降伏させない橋脚の曲げ破壊先行型とする。復元力モデルはトリリニア型(武田モデル)を設定した。

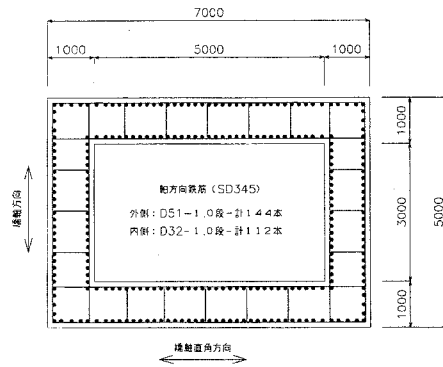


図-2 橋脚配筋図

$$C = M \cdot [\Phi] \cdot [\zeta] \cdot [\Phi]^T \cdot M \tag{2}$$

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ふ利点がある。

(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。

$$C = \alpha M + \beta K \tag{1}$$

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。

(3) 入力地震動およびその他の解析条件

入力地震動は、レベル2地震動として道路橋示方書・同解説V耐震設計編を参考に、強震記録を振動数領域で振幅調整した加速度波形のうちType II-II-1を用いた。各部材の減衰定数は、上部構造:3%, 橋脚部:5%, 塑性ヒンジ部:2%, 基礎構造:20%である。動的解析は、Newmark β 法($\beta=0.25$)による直接積分法で行った。積分時間間隔は0.001秒とした。また、解析に使用した解析ソフトは、汎用解析プログラムTDAP IIIである。

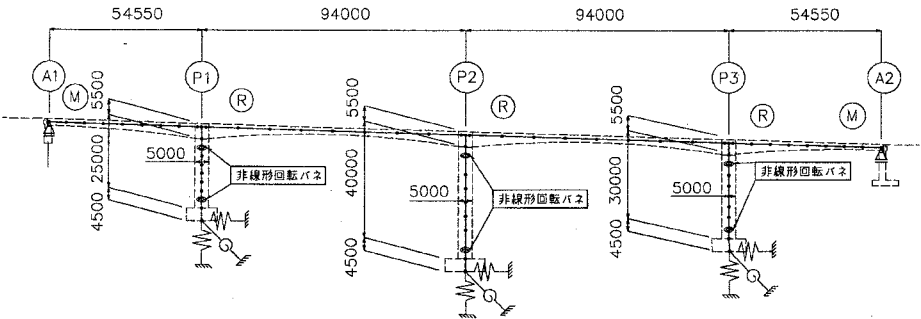


図-3 解析モデル

3. 解析結果

(1) 固有値解析結果および動的解析ケース

表-1に減衰マトリクスを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10次の固有振動モードとしたものを[Case1]、レーリー減衰を用いるもので基準モードを有効質量比が卓越する1次と累積有効質量比が100%となる18次の固有振動モードとしたものを[Case2]とした。図-4は[Case1]、[Case2]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、[Case1]はレーリー減衰において高振動数領域の減衰定数が過大となっている。[Case2]はレーリー減衰において高振動数領域の減衰定数を[Case1]と比べ相対的に小さく設定したものである。また、[Case1]は有効質量比が大きい方から2つのモードを選定したケースであり、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。ひずみエネルギー比例型で求めたモード減衰と等価な全体減衰行列を用いたものを[Case3]とし、減衰マトリクスは以上の3ケースを設定した。

表-1 固有値解析結果

次数	固有振動数(Hz)	固有周期(s)	有効質量	比 (累積%)	減衰定数
1	0.8671	1.1533	11480.000	67	0.1021470
2	1.6150	0.6192	116.200	67	0.0502809
3	2.0259	0.4936	1.338	67	0.0414818
4	3.0855	0.3241	1239.000	74	0.0529719
5	3.2848	0.3044	17.290	75	0.0449464
6	3.9780	0.2514	353.600	77	0.0622168
7	4.5494	0.2198	0.034	77	0.0518319
8	4.8014	0.2083	0.055	77	0.0684226
9	5.2362	0.1910	382.300	79	0.1215600
10	6.2535	0.1599	1907.000	90	0.1383130
11	6.4748	0.1544	1003.000	96	0.1419770
12	6.8044	0.1470	142.600	97	0.1397470
13	6.8650	0.1436	137.200	97	0.1469390
14	7.4093	0.1350	3.986	97	0.1335920
15	7.9609	0.1256	15.690	97	0.1040810
16	8.5917	0.1164	100.400	98	0.0430232
17	9.3232	0.1073	9.472	98	0.0620638
18	10.1090	0.0989	261.200	100	0.0662285

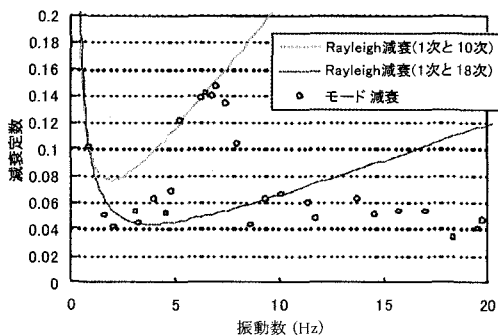


図-4 固有振動数と減衰定数の関係

(2) 動的解析結果

本検討では、P2 橋脚の応答に着目することにした。図-5は Type II - II -1 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。加速度波形に

関しては、応答が[Case3]に対して[Case1]、[Case2]で最大値で1割程度小さくなっている。また、変位波形に関しては、応答が[Case3]に対して[Case1]は最大値で1.3割、[Case2]は最大値で0.5割程度それぞれ小さくなっている。

非線形挙動時に[Case1]、[Case2]、[Case3]の減衰で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-4に示したように[Case1]で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、表-1に示すように1次モードの有効質量比が67%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[Case1]～[Case3]で高振動数領域の減衰評価に差異があるにも関わらず、加震開始から最初の約5秒間は線形挙動であるため、ほぼ同様の応答を示している。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、高次のモードの減衰定数を過大に評価している[Case1]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、高次のモードの減衰定数を[Case1]に比べ小さめに評価している[Case2]およびすべてのモードの減衰定数を正確に評価した[Case3]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、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る解析ケースでは、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。

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)として橋脚下端の塑性ヒンジ部の回転バネに作用する。図-6～図-9は[Case1]、[Case2]における橋脚下端の塑性ヒンジ部のバネの上下端におけるモーメントの差と橋脚下端の塑性ヒンジ部の回転バネ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、橋脚下端の塑性ヒンジ部のバネの上下端におけるモーメントの差は、[Case1]、[Case2]ともに橋脚下端の塑性ヒンジ部の回転バネに作用する回転方向の減衰力とほぼ一致していることがわかる。つまり、橋脚下端の塑性ヒンジ部の回転バネに作用する回転方向の減衰力により橋脚下端の塑性ヒンジ部のバネの上下端におけるモーメントに差

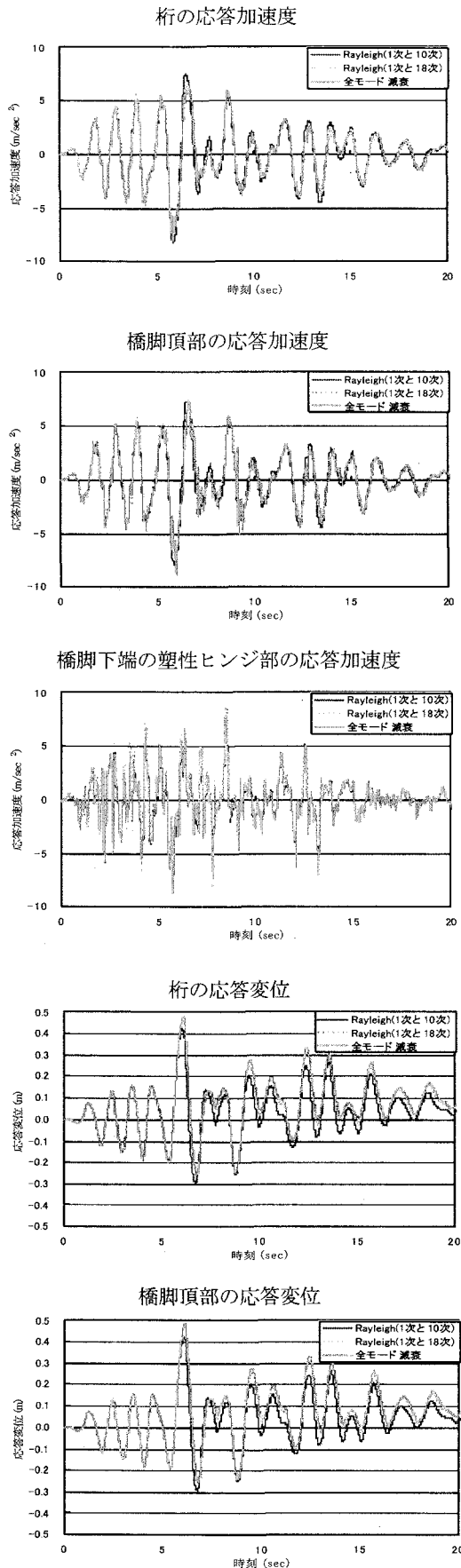


図-5 応答加速度および応答変位の時刻歴

異が生じたことになる。一方、ひずみエネルギー比例型で求めたモード減衰と等価な全体減衰行列では、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。

図-10、図-11は[Case1]における橋脚下端の塑性ヒンジ部の回転バネのモーメント-回転角関係、および減衰力-回転角関係を、図-12、図-13は[Case2]における橋脚下端の塑性ヒンジ部の回転バネのモーメント-回転角関係、および減衰力-回転角関係をそれぞれ比較したものである。図より、橋脚下端の塑性ヒンジ部の回転バネで吸収されたエネルギーのうち、減衰によって吸収されたエネルギーの程度を知ることができる。また、[Case1]は[Case2]と比較して減衰を過大に評価しているため、減衰によって吸収されたエネルギーが[Case2]よりも大きくなっている。

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-2からわかるように、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[Case1]では定数 β は大きく、基準振動数 f_1 、 f_2 の差が大きい[Case2]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[Case1]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[Case2]ではそれらは相対的に小さい。

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 は本橋梁の上部構造の部材減衰3%、橋脚部の部材減衰5%より、高次のモードの減衰をこれらの部材の減衰を平均的に表現するため $h_2=0.04$ とする。

表-2よりわかるように、提案する方法では[Case1]、[Case2]と比較して、係数 β が小さく設定される。図-10はType II-Ⅱ-1を入力した際に橋脚下端の塑性ヒンジ

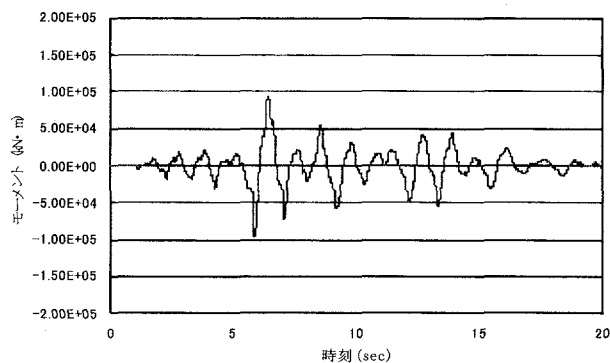


図-6 [Case1]における橋脚下端の塑性ヒンジ部のバネの上下端におけるモーメントの差

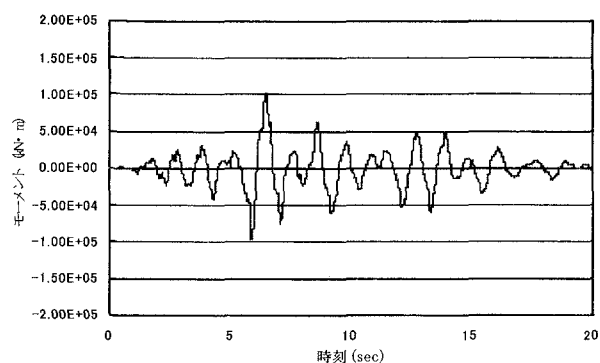


図-7 [Case1]における橋脚下端の塑性ヒンジ部のバネに作用する回転方向の減衰力

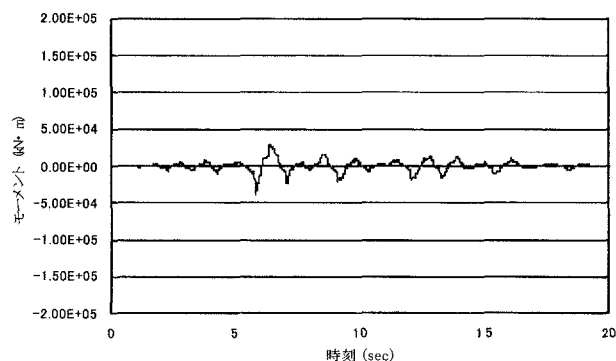


図-8 [Case2]における橋脚下端の塑性ヒンジ部のバネの上下端におけるモーメントの差

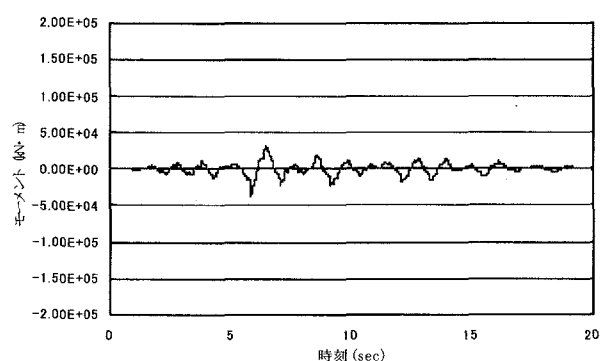


図-9 [Case2]における橋脚下端の塑性ヒンジ部のバネに作用する回転方向の減衰力

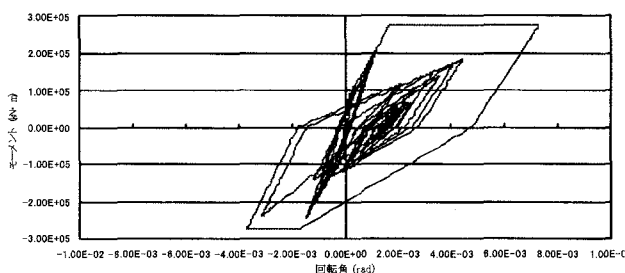


図-10 [Case1]における橋脚下端の塑性ヒンジ部のバネのモーメント-回転角関係

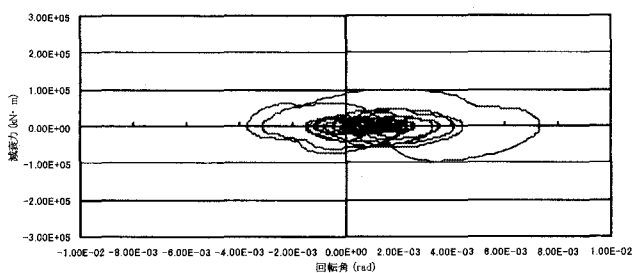


図-11 [Case1]における橋脚下端の塑性ヒンジ部のバネの減衰力-回転角関係

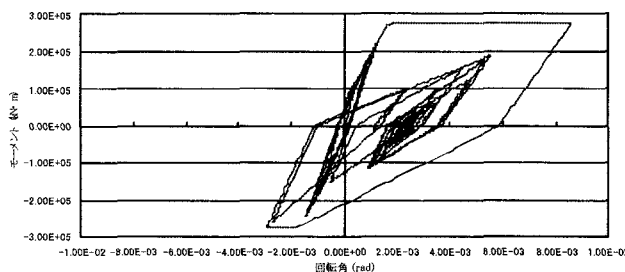


図-12 [Case2]における橋脚下端の塑性ヒンジ部のバネのモーメント-回転角関係

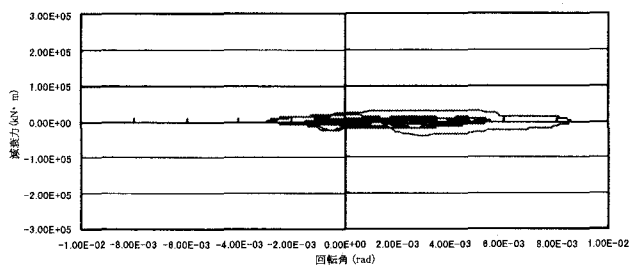


図-13 [Case2]における橋脚下端の塑性ヒンジ部のバネの減衰力-回転角関係

表-2 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		
[Case1]: 1次と10次	0.867	6.25	0.102	0.138	0.922	0.00644
[Case2]: 1次と18次	0.867	10.1	0.102	0.0662	1.06	0.00182
[対策]: 1次と50Hz	0.867	50.0	0.102	0.04	1.11	0.000243

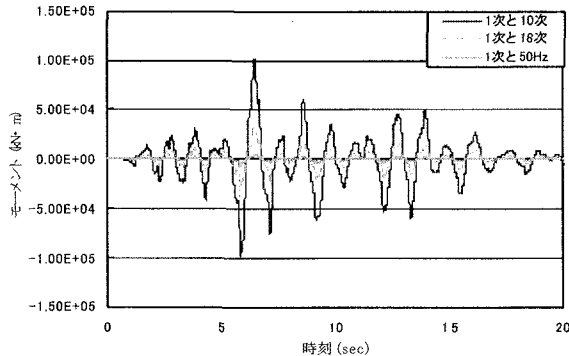


図-14 非線形挙動時に橋脚下端の塑性ヒンジ部のバネに作用する回転方向減衰力の時刻歴

部の回転バネ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[Case1]，[Case2]と比べ、橋脚下端の塑性ヒンジ部の回転バネ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_2 を対象橋梁の上部構造および橋脚部の部材減衰より決定(本検討橋梁では0.04とした)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。

4. 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 を対象とする橋梁の上部構造および橋脚部の部材減衰より決定することで、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PC連続ラーメン橋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, 2001.
- 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, 2001.
- 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.
- 5) 松田泰治，大塚久哲，山田純司：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，第6回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp. 411-416, 2003