

ゴム支承を用いた水平力分散構造の地震時挙動に与える減衰設定の影響評価

九州大学大学院 工学府 学生会員 ○宇野州彦
 熊本大学 工学部 正会員 松田泰治
 九州大学大学院 工学研究院 フェロー 大塚久哲

1. はじめに

近年、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に基づく設計が主流になっていくものと予想される。動的解析を行う上では、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^(例えば1),2)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、Rayleigh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

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、非線形ばね要素で、基部以外は線形はり要素でモデル化した。ばね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

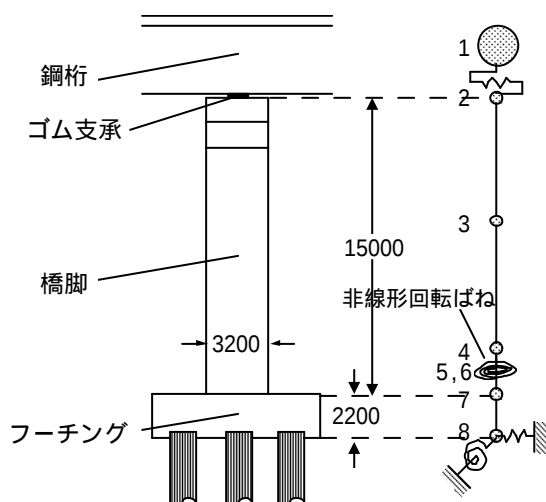


図-1 構造概要と解析モデル

た。橋脚部分のはり要素に対する減衰定数は、非線形ばね要素を2%、線形はり要素を5%とした。

(2) 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、耐震設計編(平成14年度版)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、JR西日本鷹取駅構内地盤上NS成分波(Type - -1)を用いた。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0.0005秒とした。また、解析に使用したプログラムはTDAPである。

3. 解析結果および結果の分析

(1) 固有値解析結果および動的解析ケース

表-1に減衰マトリクスの設定に用いるための固有値解析結果を示す。Rayleigh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[Case1]、Rayleigh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3次の固有振動モードとしたものを[Case2]とした。図-2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Rayleigh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。[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	固有周期 (s)	固有振動数 (Hz)	有効質量比 (%)	減衰定数
1	1.23	0.815	53	0.0678
2	0.387	2.59	25	0.126
3	0.0927	10.8	21	0.143
4	0.0339	29.5	1	0.0951

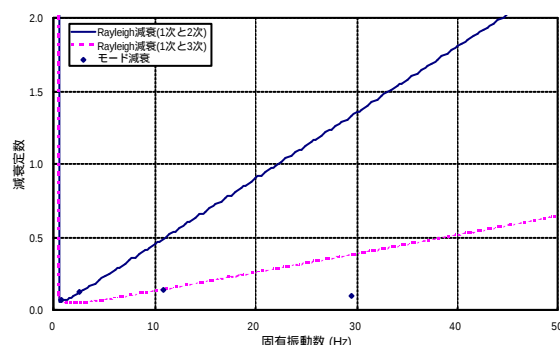


図-2 固有振動数と減衰定数の関係

(2) 動的解析結果

図-3は、Type - -1入力時の橋脚天端の応答変位の時刻歴を示したものである。

非線形挙動時に[Case1]～[Case3]で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、ばね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が励起され、それにより応答が大きくなる。Rayleigh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]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ややおさえられ、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、応答が大きく異なっている。

Rayleigh減衰では、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)として橋脚下端塑性ヒンジ部に作用する。図-4は、[Case1]における橋脚下端塑性ヒンジ部の節点5の上下のモーメント差と、塑性ヒンジ部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、節点上下のモーメントの差は、回転方向の減衰力と一致していることがわかる。つまり、回転方向の減衰力により節点上下のモーメントに差異が生じたことになる。

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Rayleigh減衰を設定すべきである。そのようなRayleigh減衰の設定法として、基準振動数 f_1 を有効質量比

表-2 Rayleigh 減衰の設定における係数

モデルタイプ	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2次	0.815	2.59	0.0678	0.126	0.318	0.0144
[Case2] 1次と3次	0.815	10.8	0.0678	0.143	0.587	0.00410
対策: 1次と50Hz	0.815	50.0	0.0678	0.05	0.688	0.000248

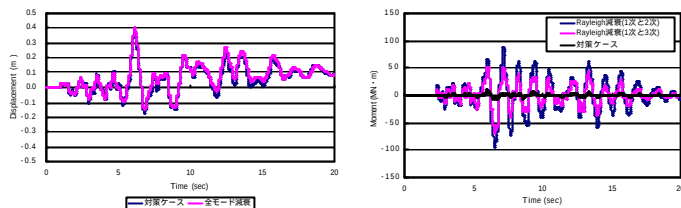


図-5 橋脚天端の応答変位 図-6 橋脚下端の塑性ヒンジ部に作用する回転方向減衰力

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 は本モデルの部材減衰5%より、高次のモードの減衰を $h_2=0.05$ 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-5は、Type - -1を入力した際の橋脚天端の応答変位時刻歴である。対策ケースでは、非線形挙動時に高振動数成分が励起されており、対策ケースと全モード減衰はほぼ同じ挙動を示していることがわかる。図-6はType - -1を入力した際に橋脚下端塑性ヒンジ部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。著者が提案する方法では[Case1]、[Case2]と比べ、橋脚下端塑性ヒンジ部に作用する回転方向の減衰力が小さくなっている。

4. まとめ

本研究より得られた知見をまとめて以下に示す。

- ・Rayleigh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 に比べ大きな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。
- ・Rayleigh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。

上記のRayleigh減衰設定上の問題は著しい非線形挙動を伴う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。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) 松田泰治, 大塚久哲, 宇野州彦: PC連続ラーメン橋の減衰性評価に関する一考察, 第7回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造物の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集 pp.143-148, 2004.1
- 2) 小倉祐介, 運上茂樹: 非線形動的解析における粘性減衰のモデル化に関する一考察, 第7回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造物の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集 pp.155-162, 2004.1

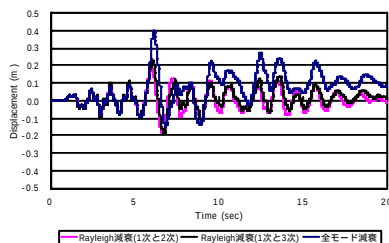
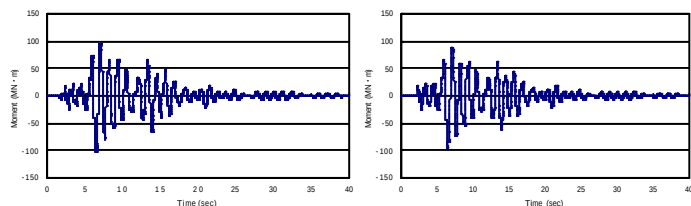


図-3 橋脚天端の応答変位時刻歴



(a) 節点上下のモーメント差 (b) 作用する回転方向減衰力

図-4 [Case1]における塑性ヒンジ部の応答結果 (節点5)