

粘性減衰のモデル化の違いが非線形応答に与える影響

矢部正明

正会員 博（工） 株式会社長大 構造事業部 構造防災室（〒305-0821 茨城県つくば市春日 3-22-6）

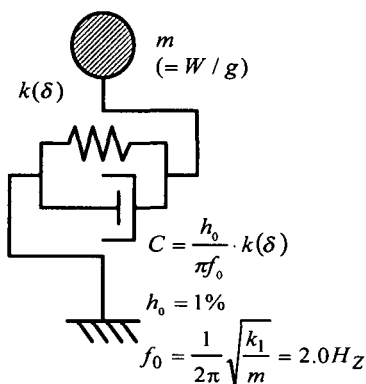
1. はじめに

地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計では、非線形動的解析は、将来もっと普及し、適切な技術力を有する技術者の間では耐震計算法としてルーチン化されると予想される。非線形動的解析では、対象とする橋梁の復元力特性のモデル化は非線形応答に大きな影響を与えるが、これとともに影響が大きいのが減衰特性のモデル化である。しかし、非線形動的解析に用いる減衰特性のモデル化が非線形応答に与える影響を検討した研究^{1)~8)}は、全て建築分野での研究成果であるとともに、平成7年兵庫県南部地震以前に検討された研究がほとんどである。線形、非線形を問わず動的解析に用いる減衰特性は、粘

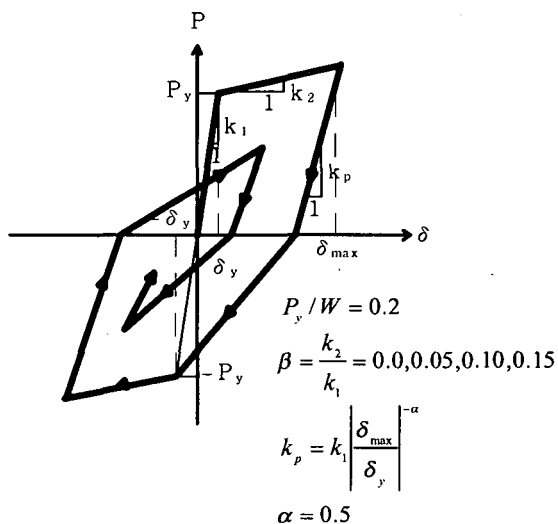
性減衰マトリックスで表されることが多い。しかし、減衰定数の値、粘性減衰マトリックスのモデル化に関して明確な規範はなく、技術者の個々の判断で決められているのが実態である。

本報告は、平成7年兵庫県南部地震で観測された強震記録のようにその地震動強度が大きい加速度波形を用いて、非線形動的解析に用いる粘性減衰マトリックスのモデル化の違いが、非線形応答にどのような影響を及ぼすかを解析的に検討したものである。

2. 検討対象とした解析モデルと入力地震動

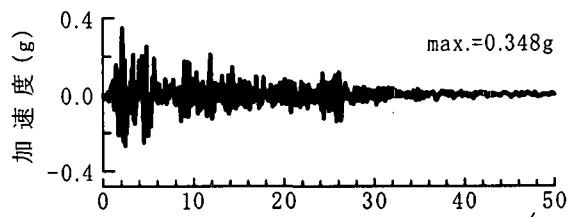


(1) 1自由度系

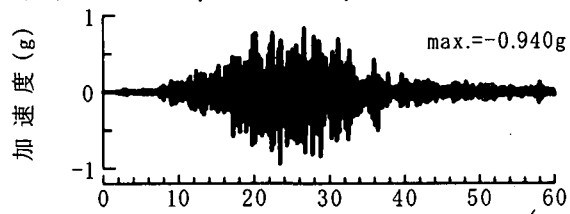


(2) Takeda 型モデル

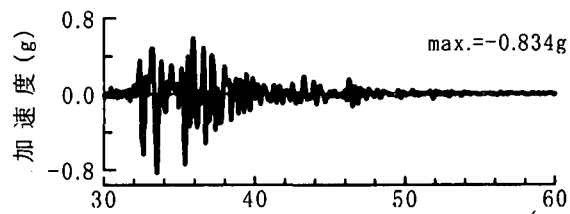
図-1 対象とする1自由度非線形振動系



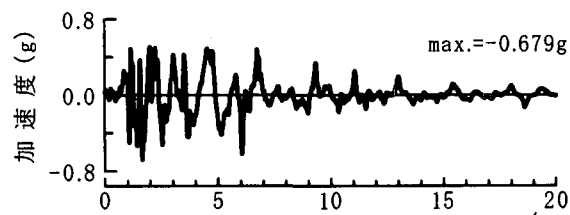
(1) 1940年 Imperial Valley地震 (El Centro) (sec)



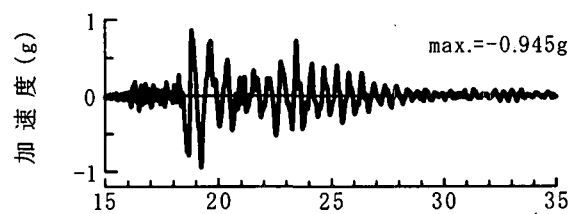
(2) 1993年 釧路沖地震 (釧路気象台) (sec)



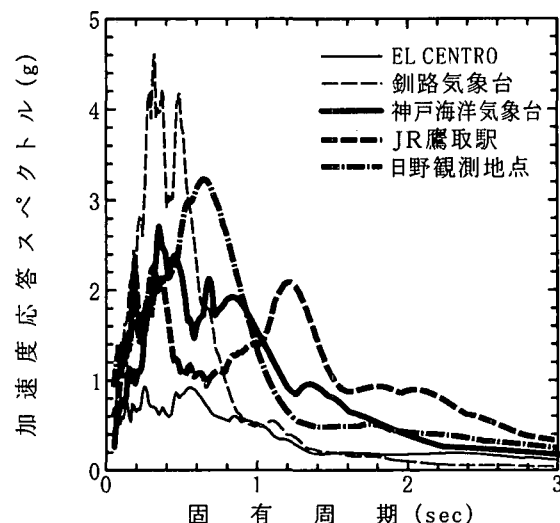
(3) 1995年 兵庫県南部地震 (神戸海洋気象台) (sec)



(4) 1995年 兵庫県南部地震 (JR 鷹取駅) (sec)



(5) 2000年 鳥取県西部地震 (日野観測地点) (sec)



(6) 加速度応答スペクトル

図-2 検討対象とした入力地震動

検討対象としたのは、図-1 に示す 1 自由度非線形系である。復元力特性は RC 橋脚を想定し、ひび割れを無視した Takeda 型モデルとした。2 次剛性比 β は、0.0, 0.05, 0.10, 0.15 と変化させた。後述する入力地震動で確実に図-1 に示す系の地震応答が非線形域となるように、降伏水平耐力 P_y は降伏水平震度 $k_{hy} = P_y / W$ で 0.2 と小さくし、初期固有周期 $T_0 = 1/f_0$ は弾性加速度応答スペクトルの値が大きい領域となるように 0.5 秒とした。構造減衰定数 h_0 は、履歴減衰は復元力モデルによって自動的に考慮されることから 1% とした。なお、後述するように、基礎構造～地盤系の逸散減衰効果等により系のみかけの減衰が大きくなることを想定し、構造減衰定数の大きさを変化させた検討も行っている。

材料の非線形性を考慮した運動方程式は、次式によって与えられる。

$$m\ddot{u} + C\dot{u} + f(U) = -m\ddot{z}_g \quad (1)$$

ここで、 m は質量マトリックス、 C は粘性減衰マトリックス、 $\ddot{u}$ 、 $\dot{u}$ 、 u は相対加速度、相対速度、相対変位、 e は 1 を要素とする列ベクトル、 $\ddot{z}_g$ は地震動 (加速度)、 $f(u)$ は復元力特性である。式(1)を用いて図-1 に示す 1 自由度系の非線形動的解析を行う場合、橋梁の耐震設計で良く用いられる粘性減衰マトリックス C は、構造物の剛性に比例する剛性比例型である。剛性比例型には、構造物の弾性剛性 (初期剛性) k_1 に比例する初期剛性比例型と、時間とともに変化する瞬間剛性に比例する瞬間剛性比例型があるが、橋梁の耐震設計で良く用いられているのは前者である。ここでは、粘性減衰を初期剛性比例型と瞬間剛性比例型でモデル化した。当然、瞬間剛性よりも大きな初期剛性に比例するとした初期剛性比例型の方が、粘性減衰効果は大きい。

図-2 は、検討対象とした入力地震動である。1940.5.Imperial Valley 地震で観測された El Centro 記録⁹⁾ は、前述の既往の研究で用いられている地震動である。1993.1.釧路沖地震で観測された釧路気象台記録¹⁰⁾、2000.10.鳥取県西部地震で観測された Kik-Net の日野観測点記録¹¹⁾はともにその最大加速度が約 0.95g と大きいにもかかわらず、あまり大きな被害が生じなかった地震である。甚大な被害を生じた 1995.1.兵庫県南部地震で観測された記録は、神戸海洋気象台記録¹⁰⁾、JR 鷹取駅記録¹²⁾を対象とした。

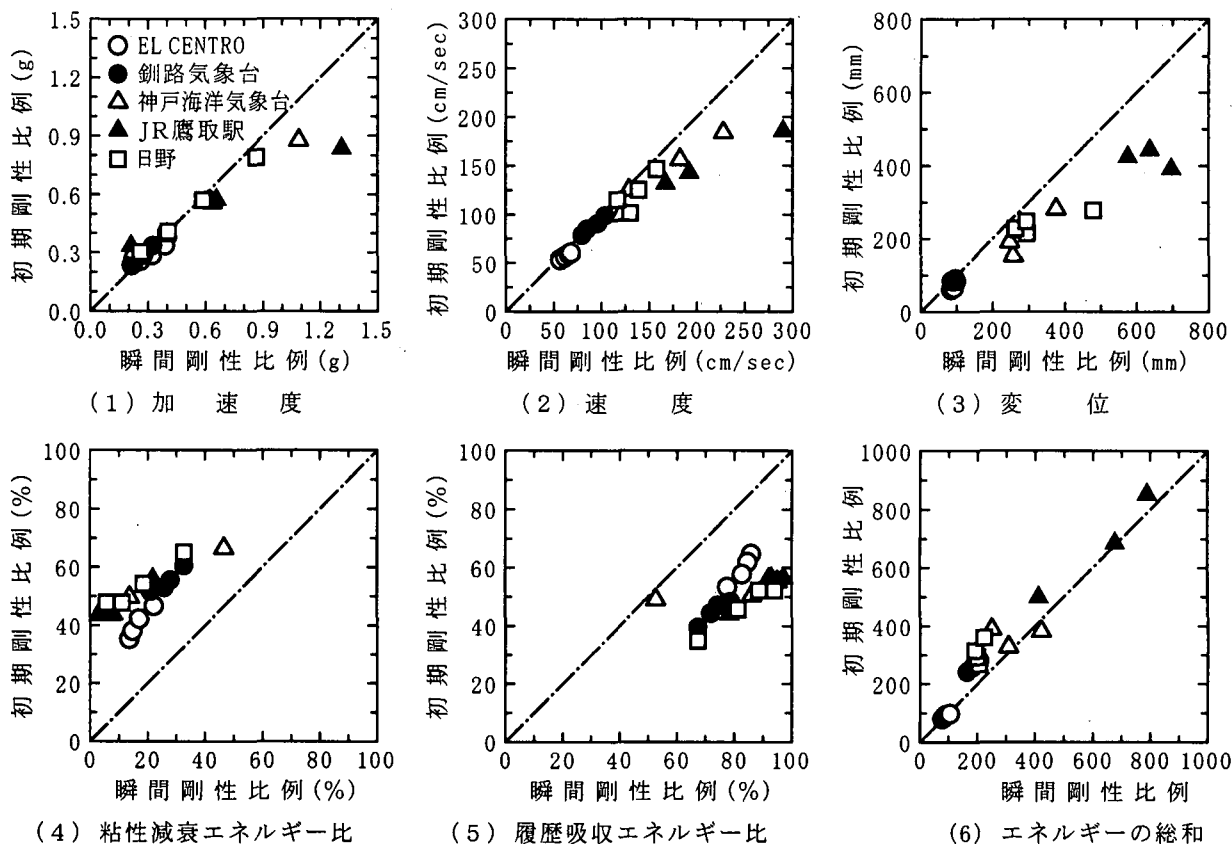


図-3 粘性減衰のモデル化の違いが1自由度非線形系の非線形応答に与える影響

3. 初期剛性比例型減衰と瞬間剛性比例型減衰の比較

図-3は、図-1に示す1自由度非線形系に図-2に示す入力地震動を作用させて得られた最大加速度、最大速度、最大変位、粘性減衰エネルギー比 E_c/E_t 、履歴吸収減衰エネルギー比 E_p/E_t 、エネルギーの総和（弾性振動エネルギー+粘性減衰エネルギー+履歴吸収エネルギー） E_t を、初期剛性比例型減衰と瞬間剛性比例型減衰で比較したものである。El Centro 記録、釧路気象台記録、日野観測地点記録の最大応答加速度と最大応答速度は、ほぼ 45° ライン上に分布している。神戸海洋気象台記録、JR 鷹取駅記録の最大応答加速度と最大応答速度は、 45° ラインよりも下側に分布している。耐震設計上重要な最大応答変位は、何れの入力地震動とも、 45° ラインより下側に分布しているが、特に、JR 鷹取駅記録の最大応答変位の 45° ラインからの離れが大きいことがわかる。粘性減衰の違いが最も大きく現れた JR 鷹取駅記録に着目すると、加速度は0.6~1.6倍、速度は1.3~1.6倍、変位は1.4~1.8倍瞬間剛性比例型減衰による応答値の方が大

きく得られている。

粘性減衰エネルギー比と履歴吸収エネルギー比とエネルギーの総和に着目すると、瞬間剛性比例型減衰と粘性減衰比例型減衰の違いが顕著に現れていることがわかる。粘性減衰効果が大きい初期剛性比例型減衰は粘性減衰エネルギーがエネルギーの総和に占める割合が、粘性減衰効果が小さい瞬間剛性比例型減衰では履歴吸収エネルギーがエネルギーの総和に占める割合がそれぞれ卓越している。図-1に示す系の2次剛性比 β を0.0とした完全弾塑性型に JR 鷹取駅記録を入力したときの粘性減衰エネルギーと履歴吸収エネルギーがエネルギーの総和に占める割合に着目すると、初期剛性比例型減衰では粘性減衰エネルギーが43%、履歴吸収エネルギーが57%となるのに対して、瞬間剛性比例型減衰では粘性減衰エネルギーが3%、履歴吸収エネルギーが97%となる。このように、粘性減衰エネルギーと履歴吸収エネルギーがエネルギーの総和に占める割合は大きく異なっているが、エネルギーの総和は若干初期剛性比例型の方が大きいがほぼ等しい値が得られていることがわかる。

松島は、バイリニア型履歴系の地震応答に及ぼす減衰

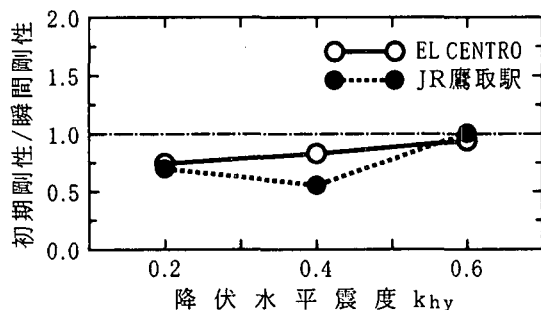


図-4 粘性減衰のモデル化の違いが非線形応答変位に与える影響（降伏水平震度 k_{hy} の違いに着目）

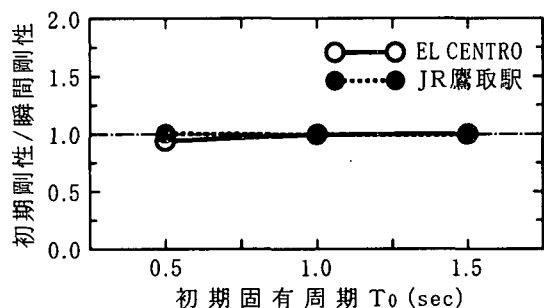


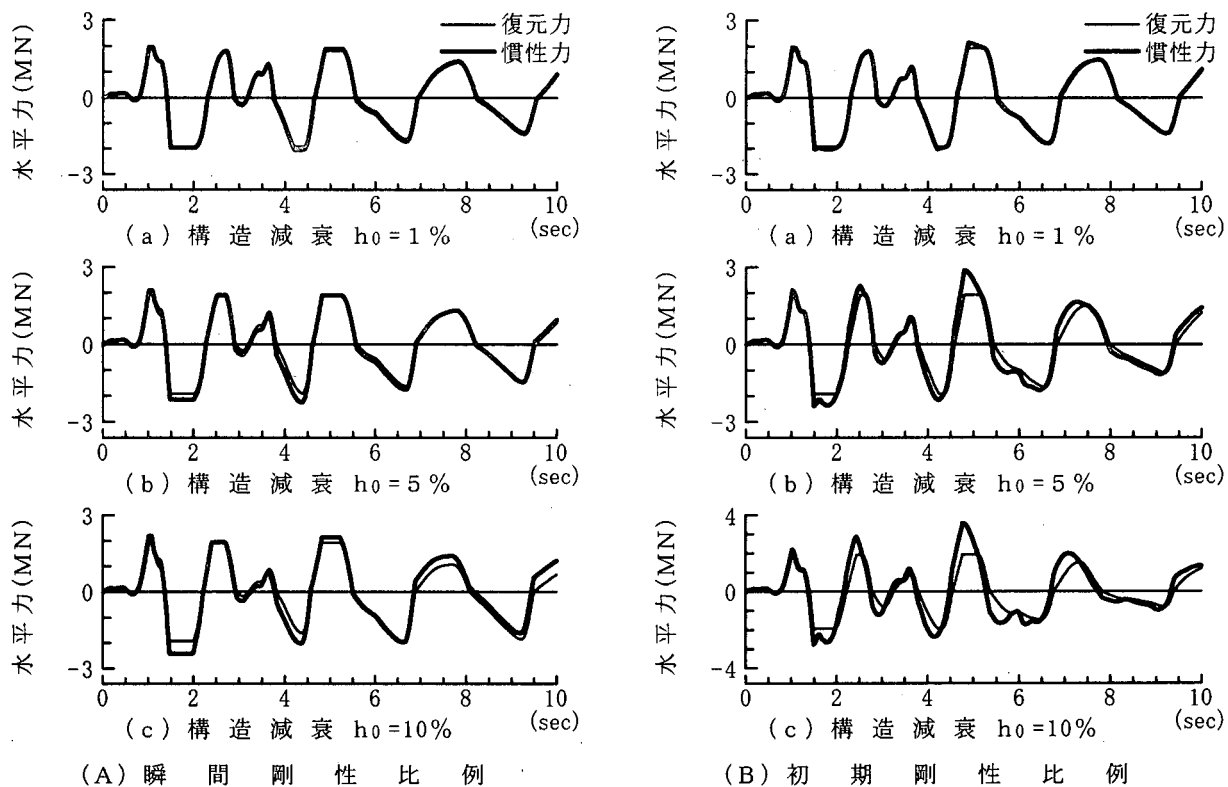
図-5 粘性減衰のモデル化の違いが非線形応答変位に与える影響（初期固有周期の違いに着目）

の影響について検討し、非線形応答は減衰定数の値に強く影響されるが、減衰の型にはあまり依存しないという結論を得ている⁶⁾。しかし、本研究で用いた入力地震動の中で同様な傾向が得られているのは、El Centro 記録と釧路気象台記録だけである。図-3に示すように、構造減衰定数が1%と小さいにもかかわらず、耐震設計上重要な量である最大応答変位は、初期剛性比例型減衰と瞬間剛性比例型減衰ではかなり異なる値が得られている。

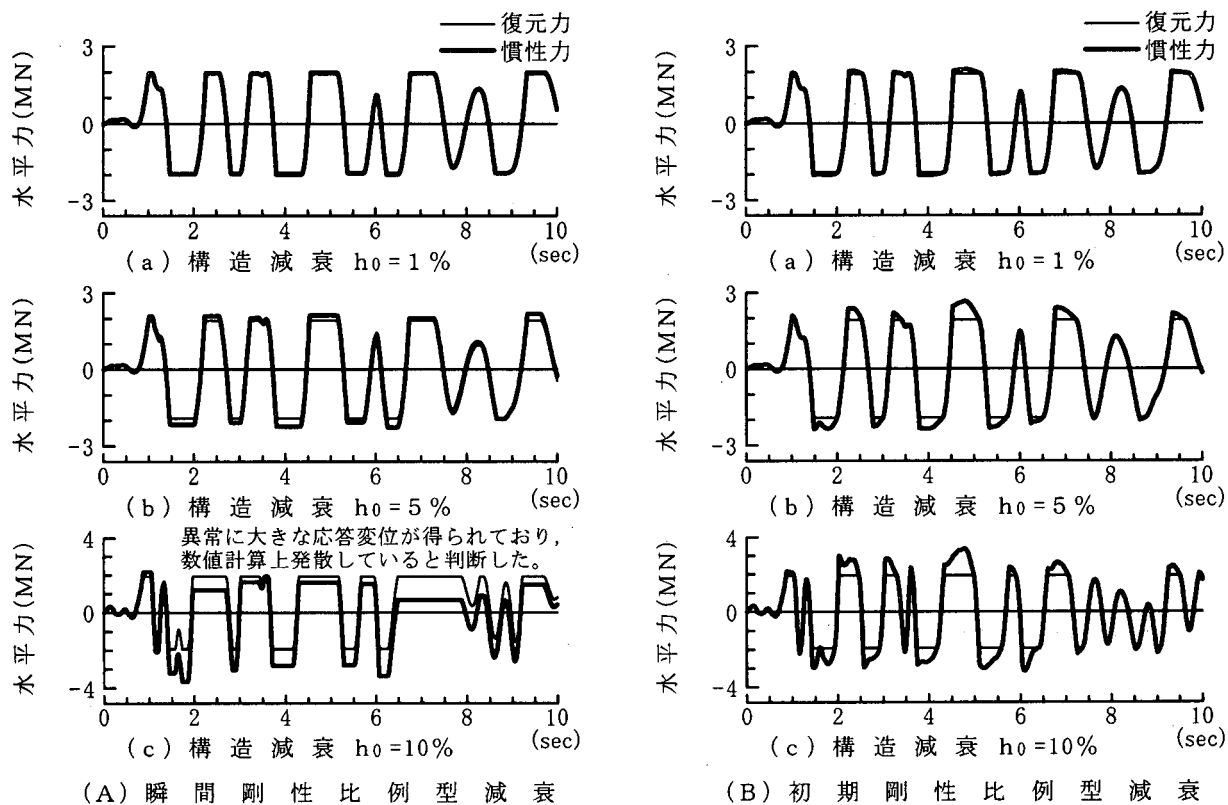
図-4は、図-1に示す系の降伏水平震度を0.2, 0.4, 0.6と変化させて、粘性減衰のモデル化の違いによる影響が非線形応答にあまり現れなかったEl Centro 記録と、その影響が大きく現れたJR 鷹取駅記録の最大応答変位を比較したものである。図-4より、El Centro 記録、JR 鷹取駅記録とも、非線形系の降伏水平耐力が大きくなるほど、初期剛性比例型減衰と瞬間剛性比例型減衰の差が小さくなることからわかる。これは、降伏水平耐力が大きくなるにともない、系に生じる非線形化の度合いが小さくなったために、初期剛性と瞬間剛性の差が小さくなったからと考えられる。図-5は、図-4において初期剛性比例型減衰と瞬間剛性比例型減衰の差が小さかった降伏水平震度

0.6の系に対してその初期固有周期を0.5, 1.0, 1.5秒と変化させて最大応答変位を比較したものである。図より、固有周期が長くなるほど、初期剛性比例型減衰と瞬間剛性比例型減衰の差が小さくなることからわかる。これは、対象とする構造系の初期固有周期が長くなるほど、地震動が構造物に与える影響が小さくなるからと考えられる。

静的な力のつり合いに基づけば、図-1に示すような完全弾塑性型の骨格曲線を有する系には降伏水平耐力よりも大きな慣性力が作用することはない。しかし、動的な力のつり合いでは、慣性力は復元力と減衰力の和につり合うため、降伏水平耐力よりも大きな慣性力が作用することになる^{3), 6), 13)}。図-6は、図-1に示す系の質点に生じる応答加速度に質量を乗じて求めた慣性力と復元力を比較したものである。系の初期固有周期は1.0秒、降伏水平震度は0.2、復元力特性は完全弾塑性型の骨格曲線を有するTakeda型モデルとバイリニアモデルである。構造減衰定数を1%, 5%, 10%と変化させてある。図中、復元力特性をバイリニアモデル、構造減衰定数10%とし、瞬間剛性比例型で求めた解析結果は、異常に大きな応答変位が得られていることから、数値計算上発散していると判断した。図より、復元力特性や粘性減衰のモデル化にかかわらず、構造減衰定数が大きくなるほど慣性力が降伏水平耐力よりも大きくなる傾向が現れている。ただし、構造減衰定数1%では、慣性力と復元力の時刻歴応答はよく一致しており、粘性減衰のモデル化の違いをほとんど受けていないことがわかる。図-7は、慣性力と降伏水平耐力の比が、構造減衰定数によってどのように変化するかを示したものである。瞬間剛性比例型減衰、初期剛性比例型減衰とも、構造減衰定数が大きくなるにともない、慣性力が降伏水平耐力よりも大きくなる度合いも大きくなっている。特に、構造減衰定数を10%とした場合には、瞬間剛性比例型減衰を用いた場合の慣性力はEl Centro 記録で約1.2倍、JR 鷹取駅記録で約1.25倍、初期剛性比例型減衰を用いた場合の慣性力はEl Centro 記録で約1.2倍、JR 鷹取駅記録で約1.9倍と大きくなっている。しかし、前述したように、構造減衰定数が1%程度であれば、初期剛性比例型減衰を用いた場合でも、慣性力は降伏水平耐力の1.1倍よりは大きくならないため、構造減衰定数として1~2%程度の小さい値を用いるかぎり、粘性減衰のモデル化の違いによって慣性力が降



(1) Takeda型モデル, 初期固有周期1.0秒, 降伏水平震度0.2



(2) バイリニア型モデル, 初期固有周期1.0秒, 降伏水平震度0.2

図-6 粘性減衰のモデル化の違いが1自由度非線形系に生じる慣性力に与える影響

伏水平耐力よりも大きくなることの影響は小さいといえる。

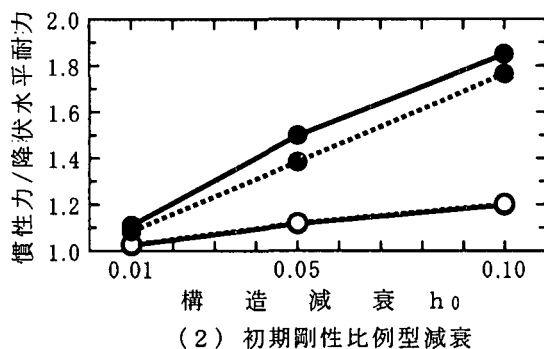
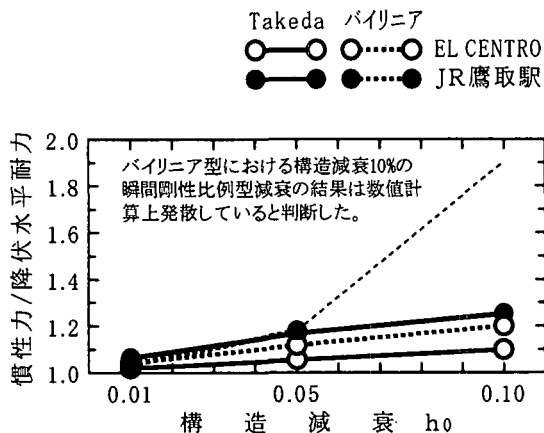
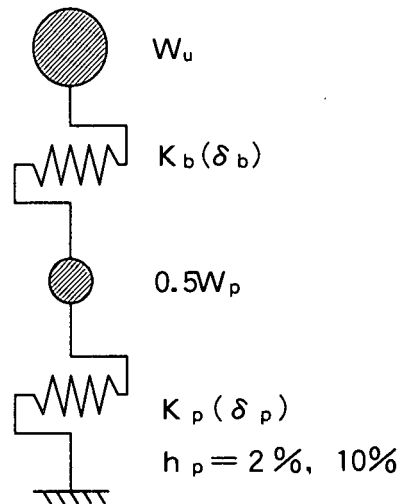


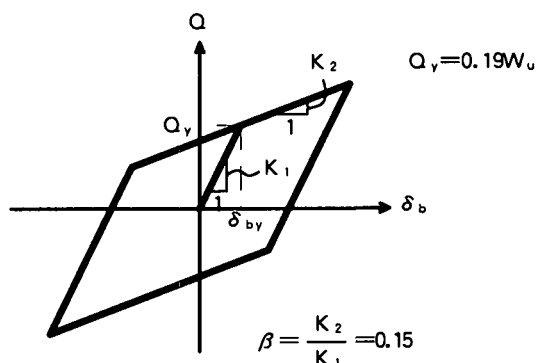
図-7 粘性減衰のモデル化の違いが1自由度非線形系に生じる慣性力に与える影響

4. 免震支承—RC 橋脚系の非線形応答に与える影響

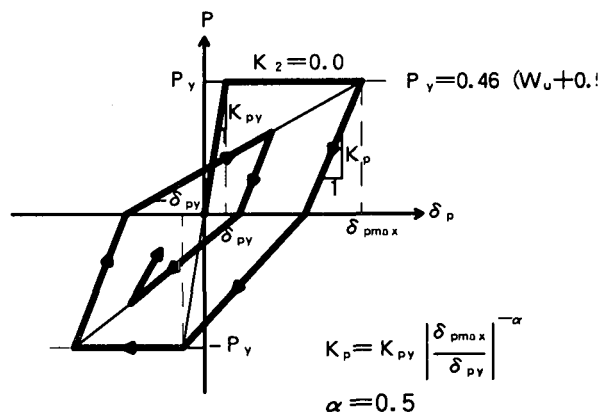
図-8に示す免震支承とRC橋脚からなる2自由度非線形系¹⁴⁾において、粘性減衰のモデル化の違いがその非線形応答に与える影響を検討する。復元力特性は、免震支承がバイリニアモデル、RC橋脚がTakeda型モデルとし、構造減衰定数は、小さな変形から非線形化が始まる免震支承では0%, RC橋脚はひび割れ以前の減衰効果を期待した2%と、基礎構造—地盤系の逸散減衰効果による見かけの減衰が大きくなる場合を想定した10%の2ケースとした。粘性減衰マトリックスは、Rayleigh型減衰でモデル化し、剛性に比例する部分を初期剛性に比例するとして初期剛性比例型と、瞬間剛性に比例するとして瞬間剛性比例型の2つのモデルを対象とした。入力地震動は、JR鷹取駅記録である。図-9は、上部構造慣性力作用位置に相当する桁と橋脚天端に生じる変位、速度、加速度の時刻歴応答を、瞬間剛性比例型と初期剛性比例型で重ね



(1) 2自由度非線形系モデル



バイリニアモデル (免震支承)

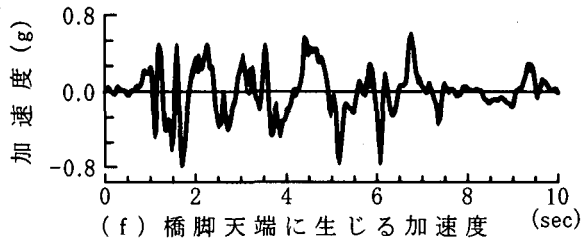
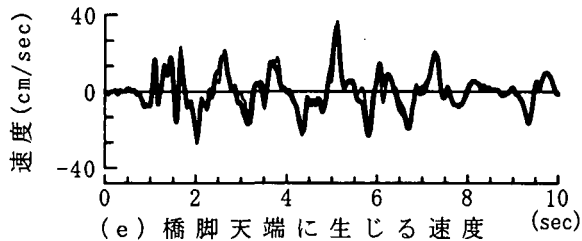
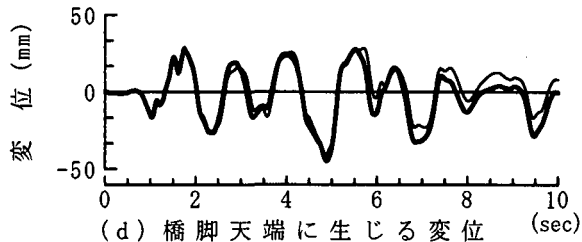
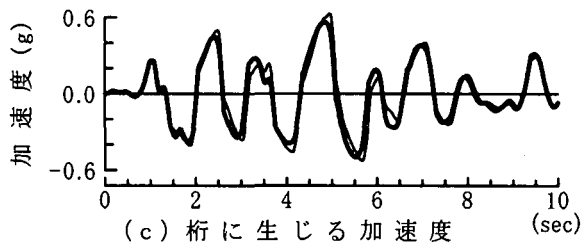
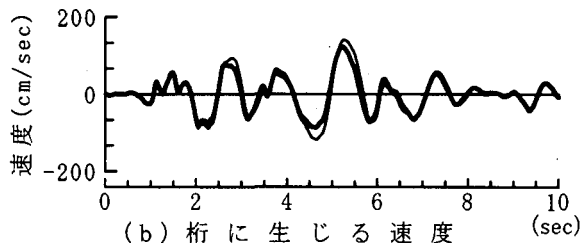
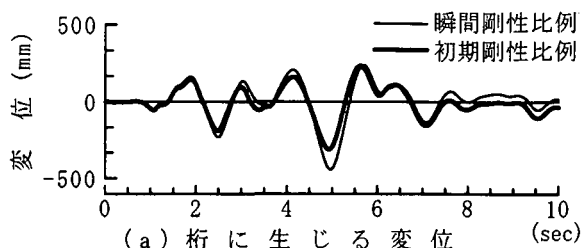


Takedaモデル (橋脚)

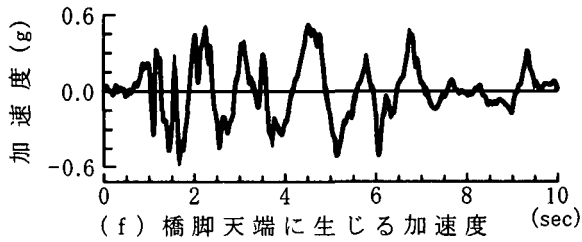
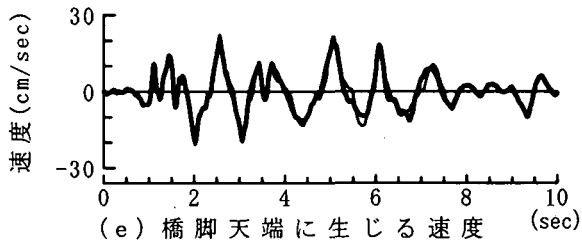
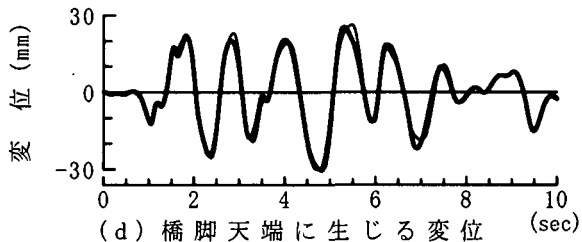
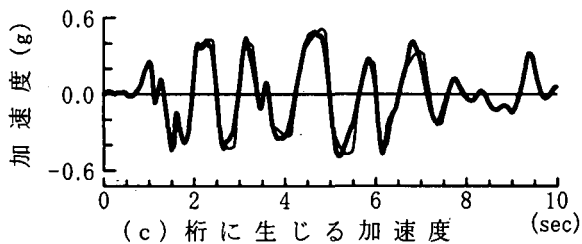
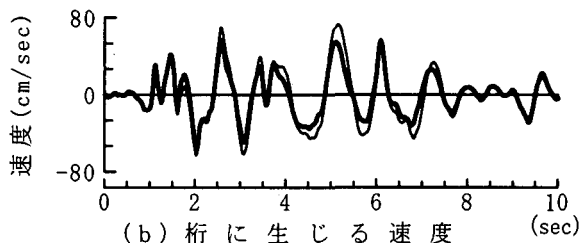
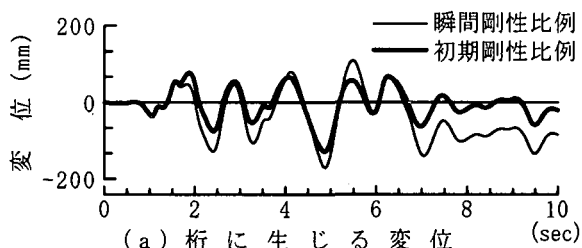
(2) 免震支承とRC橋脚の復元力特性

図-8 検討対象とした免震支承—RC橋脚系モデル

書きしたものである。構造減衰定数の大小に関係なく、桁と橋脚天端では、桁に生じる非線形応答の方が粘性減衰マトリックスの違いによる影響が大きく現れている。橋脚天端の非線形応答は、構造減衰定数が小さい2%の



(1) 橋脚の構造減衰定数 $h_0=2\%$



(2) 橋脚の構造減衰定数 $h_0=10\%$

図-9 粘性減衰マトリックスのモデル化の違いが免震支承-RC橋脚系の非線形応答に与える影響

応答変位の最大応答発生後に僅かな差が生じている。変位、速度、加速度に着目した場合、粘性減衰マトリックスの違いによる影響は、変位で大きく現れ、速度、加速度と影響の度合いが小さくなっている。

粘性減衰マトリックスの違いが最も大きく現れた桁に

生じる最大応答変位は、構造減衰定数 2%では約 1.4 倍、10%では約 1.3 倍瞬間剛性比例型減衰の方が大きく得られている。構造減衰定数 2%と 10%の差が前述の 1 自由度系よりも小さいのは、免震支承によるエネルギー吸収効果が粘性減衰のエネルギー吸収効果よりも卓越してい

るからと考えられる。

5. まとめ

動的解析に用いる粘性減衰マトリックスは、橋梁構造物の減衰特性のメカニズムを適切にモデル化したというよりも、運動方程式を解くことができるようにモデル化されており、これに数少ない弾性域での振動実験や地震観測から得られたモード減衰定数に関する知見をリンクさせているのが実状である。本報告で対象とした初期剛性比例型減衰と瞬間剛性比例型減衰も、質量や剛性に比例するという運動方程式を簡便に解くようにモデル化された粘性減衰と、非線形応答では、剛性が逐次変化するという物理現象を結びつけたものである。本報告で示したように、構造減衰定数が1~2%と小さく、非線形化の度合いが小さい場合には、粘性減衰マトリックスの違いが非線形応答に与える影響は小さいが、基礎構造～地盤系の逸散減衰効果等の影響を考慮して構造減衰定数を大きくする場合や非線形要素の非線形化の度合いが大きい場合には、粘性減衰マトリックスのモデル化の違いが非線形応答に大きな差をもたらすので注意が必要である。また、免震橋梁では、免震支承によるエネルギー吸収効果が大きいので、粘性減衰のモデル化の違いの影響が顕著には現れないことから、従来、耐震設計で多用されてきた初期剛性比例型減衰を用いても、実用上は問題がないようである。

非線形動的解析に用いる粘性減衰マトリックスは、対象とする構造物の非線形域における減衰特性をモデル化するだけでなく、完全に構造物の非線形性を表現できない復元力特性を補完することや、対象とする系の剛性がある瞬間において非常に小さくなることにより数値計算が発散しないようにすることも期待されているのが実状である。非線形動的解析における粘性減衰マトリックスのこの役割は、当分の間変わることはないと考えられる。このような状況を踏まえて、今後は、非線形域における構造物の減衰特性を解明するとともに、できるだけその減衰特性を非線形動的解析の中に取り込みながら、復元力特性の弱点を補い、非線形計算の収束性を確保することができる減衰モデルに関する検討が必要である。

参考文献

- 1) 江戸宏彰, 武田寿一, 表祐太郎: 3層1スパン鉄筋コンクリート骨組の動的破壊実験(その2. 実験結果の検討), 日本建築学会関東支部, 第44回(48年度)研究報告集, pp.45-48, 1973.
- 2) 表祐太郎, 武田寿一: 鉄筋コンクリート造煙突の弾塑性応答に関する研究(その2. 実大煙突の応答性状), 日本建築学会論文報告集, 第227号, pp.25-33, 1975.
- 3) 小谷俊介: 鉄筋コンクリート造骨組の震動破壊実験—動的非線形解析の資料—, 日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿), pp.1555-1556, 1980.
- 4) 滝澤春男, 関弘義: 塑性履歴域で異なる粘性減衰性が梁崩壊型靱性架構の激震応答挙動に及ぼす影響, 日本建築学会, 構造工学論文集, Vol.33B, pp.103-110, 1987.
- 5) Pierre Leger, Serge Dussault: Seismic-Energy Dissipation in MDOF Structures, ASCE, Journal of Structural Engineering, Vol.118, No.5, pp.1251-1269, 1992.
- 6) 松島豊: バイリニア型履歴系の地震応答に及ぼす減衰の影響, 日本建築学会構造系論文報告集, 第436号, pp.63-70, 1992.
- 7) S.Soda: Role of Viscous Damping in Nonlinear Vibration of Buildings Exposed to Intense Ground Motion, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 59, pp.247-264, 1996.
- 8) 室井一夫, 稲田泰夫, 長島俊雄, 兼近稔, 秋野金次: 原子炉建屋耐震壁の動的復元力特性—塑性時の減衰性能と解析用履歴モデル—, 日本建築学会構造系論文集, 第501号, pp.65-72, 1997.
- 9) 財団法人日本建築センター: 高層建築物の動的解析用地震動
- 10) 財団法人日本気象協会: 気象庁87型電磁式強震計波形データ
- 11) 防災科学技術研究所 Kik-Net, <http://www.kik.bosai.go.jp>
- 12) Nakamura, Yutaka: Waveform and its Analysis of the 1995 Hyogo-Ken-Nanbu Earthquake, JR Earthquake Information, No.23c, Feb.1995, Railway Technical Research Institute
- 13) 矢部正明, 川島一彦: 杭基礎の非線形地震応答特性とブッシュオーバーアナリシスによる解析法に関する研究, 土木学会論文集, No.619/I-47, pp.91-109, 1999.
- 14) 財団法人日本道路協会: 道路橋の耐震設計に関する資料, pp.5-1~5-36, 1997.