

減衰行列の作成方法が 免震橋の非線形動的解析結果に及ぼす影響

藤田亮一¹・大越靖広²・森 敦³

¹正会員 日本技術開発株式会社 構造耐震・保全部（〒164-8601 東京都中野区本町5-33-11）

²正会員 株式会社熊谷組 土木事業本部 土木設計部（〒162-8557 東京都新宿区津久戸町2-1）

³正会員 日本技術開発株式会社 構造耐震・保全部（〒164-8601 東京都中野区本町5-33-11）

1. はじめに

構造物の動的解析においては、減衰行列の設定方法が解析結果に大きく影響することが知られている。減衰行列の設定方法にはいわゆる標準的な手法が存在しない上に、作成方法も多種多様であるため、実務においては判断が難しいことが多い。特に非線形動的解析が主流となってからは減衰特性と応答値の関係がさらに複雑になっており、より判断が難しくなっている。また、このような背景から減衰行列に着目した研究が近年活発になり、その重要度が高まっている^{1)~10)}。

本研究では上記の背景と既往の研究結果を踏まえ、すべり免震支承システムを有する3径間連続鋼板桁橋を対象として減衰行列の設定方法をパラメータとした非線形動的解析を行い、各設定法と応答解析結果の関係について検討を行った。このようなパラメータスタディはすでに多く実施されているが、自由度の少ない単純なモデルを用いたものが多いため、本研究では実際の耐震設計で行うように一般的な免震橋梁全体系のモデルを用いて検討を行い、応答特性を確認した。

2. 対象橋梁の概要と検討条件

(1) 対象橋梁の構造諸元

検討対象橋梁は、連続形式として一般的な鋼3径間連続2主箱桁橋にすべり免震支承システムを採用した橋梁である。下部構造はRC単柱橋脚、基礎構造は場所打ち杭基礎である。本橋梁のすべり免震支承システムは、すべり支承にはPTFEとステンレス板を、水平荷重分散装置には積層ゴムデバイスをそれぞれ

用いた¹¹⁾¹²⁾。対象橋梁の構造一般図を図-1に示す。

(2) 対象橋梁のモデル化

対象橋梁は図-2に示すように3次元の梁～ばね要素でモデル化した。橋脚は梁要素でモデル化し、非線形履歴特性としてはRC柱部材の解析に広く用いられている修正武田モデル¹³⁾を採用した。基礎～地盤は道路橋示方書V耐震設計編¹⁴⁾（以下、道示V）

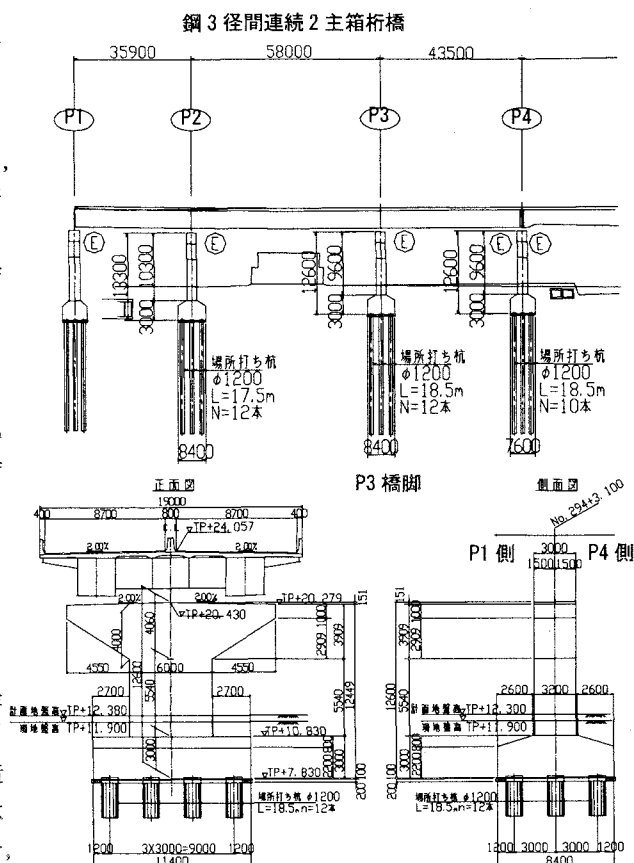


図-1 検討対象橋梁

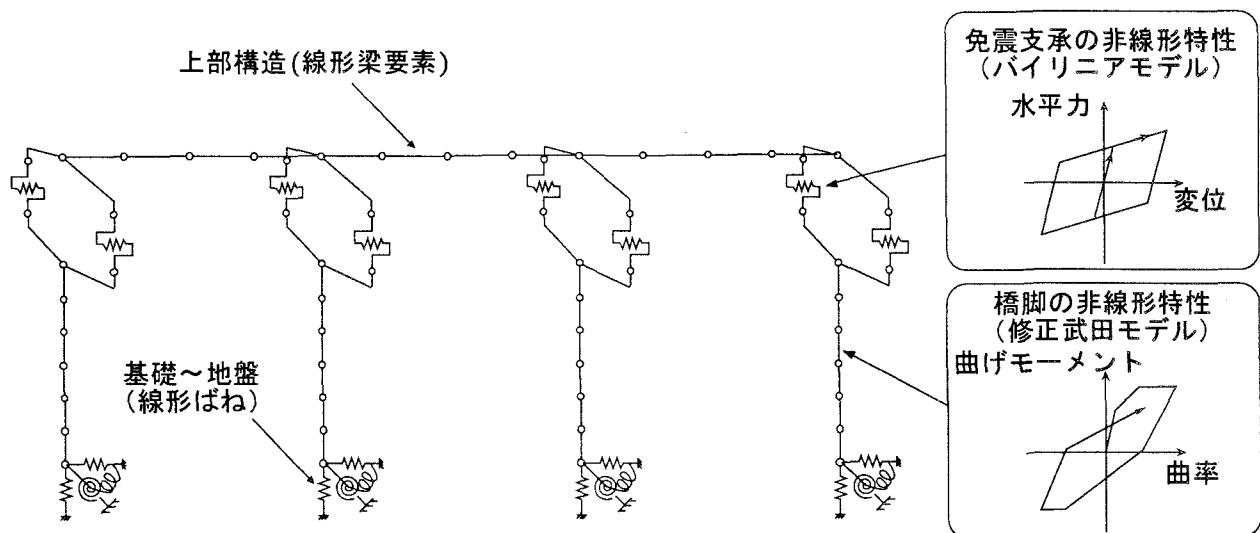


図-2 解析モデル

表-1 解析条件

項目	設定した条件	備考
動的解析法	時刻歴応答解析	
数値積分法	ニューマークβ法	
時間刻み	0.001秒	
モデル	立体骨組みモデル	
橋脚	非線形梁要素	修正武田型
桁	線形梁要素	
支承	非線形ばね要素	
地盤・基礎	線形ばね要素	
減衰マトリックス	(要素別)Rayleigh減衰 ひずみエネルギー比例減衰	要素別の場合には 支承部は非減衰
材料減衰定数	桁	0.02
	ゴム支承	0.04
	橋脚	0.02
	基礎	0.20
入力地震動	道路橋示方書V 標準波T2-II-1	レベル2、II種地盤 倍率0.5、1.0、1.5

に示される手法に従って、線形ばね要素でモデル化した。また、すべり免震支承システムはバイリニア型の履歴復元力特性を有するばね要素によりモデル化した。

(3) 動的解析条件

検討に用いる動的解析法は直接積分による非線形時刻歴応答解析とし、各パラメータを表-1に示すように設定した。各部位の材料減衰定数は道示Vを参考に設定し、減衰行列の作成方法は後述するように複数のケースを想定した。入力地震動は道示Vに示されるII種地盤の時刻歴加速度波形(T2-II-1)の振幅を0.5倍、1.0倍、1.5倍したものを用いた(図-3)。なお解析には、非線形動的解析ソフトのDYNA2E¹⁵⁾を用いた。

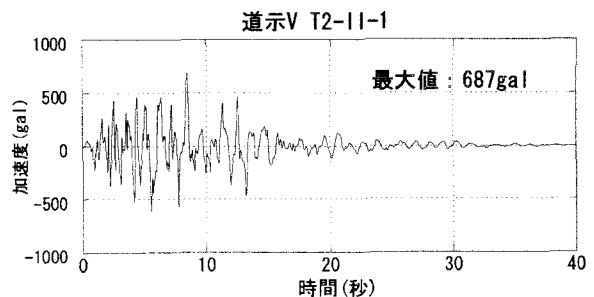


図-3 入力地震動

3. 減衰行列の作成方法

本検討では減衰行列を主なパラメータとしてパラメータスタディを行う。減衰行列の作成方法は様々な方法が提案されているが、ここでは一般的に広く用いられているRayleigh減衰、要素別Rayleigh減衰、ひずみエネルギー比例減衰の3つを想定した。

ここでRayleigh減衰の場合には、採用する固有振動モードを4通りに設定した。すなわち1次と6次、1次と11次、1次と22次のモードを選定した場合(基本ケース)と、50Hzのモード減衰定数が1次モードのそれに等しいとして1次モードと50Hzで設定した場合である(図-4、表-2)。さらに基本となる1次と22次モードを用いた場合については、剛性変化に応じて減衰行列も変化させる瞬間剛性比例のケースも試算を実施した。

要素別Rayleigh減衰の場合は、桁、橋脚、基礎にそれぞれ基本ケースと同じ減衰特性(1, 22次)を設定し、支承部分については比例係数をゼロとして粘性減衰を見込まないようにした。ひずみエネルギー比例減衰の場合は固有振動数が50Hz以下のモードを対象にして減衰行列を作成した。

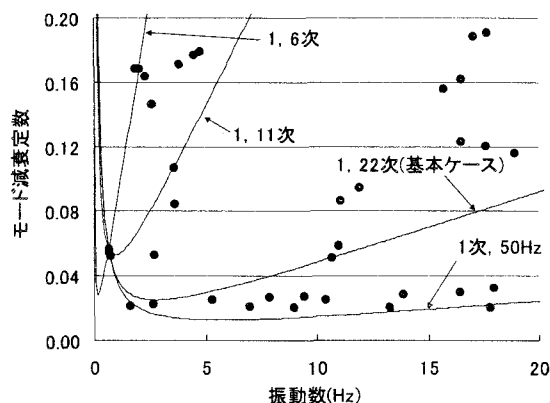


図-4 Rayleigh 減衰の設定

表-2 Rayleigh 減衰の比例係数

減衰行列作成方法		α	β
Rayleigh減衰(1, 22次)		4.30E-1	1.44E-3
要素別 Rayleigh減衰	桁・橋脚・基礎	4.30E-1	1.44E-3
	支承	0.00E+0	0.00E+0
瞬間剛性比例型Rayleigh減衰		4.30E-1	1.44E-3
ひずみエネルギー比例減衰		-	-
Rayleigh減衰(1, 6次)		2.94E-2	2.66E-2
Rayleigh減衰(1, 11次)		3.10E-1	8.97E-3
Rayleigh減衰(1次, 50Hz)		4.47E-1	3.57E-4

4. パラメータスタディ検討

(1) 減衰行列の作成方法に着目した検討

前章で述べた各作成法を用いて減衰行列を作成し、非線形動的解析を行って支承と橋脚の最大応答値を比較した。Rayleigh減衰(1, 22次)を基準として整理した結果を図-5に示す。同図から明らかなように、支承変位については要素別Rayleigh減衰、瞬間剛性比例Rayleigh減衰、Rayleigh減衰(1次, 50Hz)の3ケースで基本ケースより応答値が大きくなっており、その他の3ケースでは応答値が小さくなっている。要素別Rayleigh減衰の場合には約1.5倍と応答値が最も大きく、Rayleigh減衰(1, 6次)の場合は最も応答が小さくて約0.2倍となっている。橋脚についても基準ケースに対する応答値の大小関係は支承と同様になっている。

要素別Rayleigh減衰の支承の応答値が基本ケースよりも大きくなっているのは、支承部分の粘性減衰を0にしているためと考えられる。支承が変形すると橋脚に作用する荷重も大きくなり、橋脚の変形も大きくなったと考えられる。特に本橋の場合はすべり免震システムであり、支承の初期剛性が大きいためゴム系の免震システムよりも感度が大きいと思われる。

瞬間剛性比例の場合も支承や橋脚が降伏すること

で減衰係数が低減し、応答値が大きくなったと考えられる。特に橋脚は降伏後に剛性が1000分の1程度になってしまうため、応答値の増加傾向が激しい。

ひずみエネルギー比例減衰の場合は応答値が大きくなっているが、基本ケースでは評価していない5Hz以下の低次かつ高減衰のモードを評価していることが原因と考えられる。

その他のRayleigh減衰については、減衰の曲線が基本ケースより上側(高減衰側)にあるものは応答値が小さくなり、逆に下側(低減衰側)にあるものは応答値が大きくなる傾向が見られ、非線形解析においてもRayleigh減衰の設定が応答値に及ぼす影響が小さいことが確認できた。

(2) 地震動強度との関係に着目した検討

次に、減衰行列作成方法と地震動強度の組み合わせに着目した場合の応答値(P3)の比較を行った。結果を図-6に示す。基本ケースよりも支承の応答値が大きくなっている要素別Rayleigh減衰、瞬間剛性比例Rayleigh減衰、Rayleigh減衰(1, 50Hz)について見てみると、地震動強度によって応答値の差が大きくなっていることがわかる。すなわち、地震動強度が1.0倍および1.5倍の時には応答比率がほぼ等しいが、地震動強度が0.5倍になると応答比率が大きく異なる傾向が見られ、地震動倍率を小さくするにしたがって比率が1.0から離れる結果となった。構造全体の減衰は粘性減衰と履歴減衰からなっているが、入力地震動が小さいと部材の変形が小さくなって履歴減衰効果が相対的に小さくなるため、粘性減衰の影響が大きくなり、粘性減衰が小さい上記3ケースの応答値が大きくなったと考えられる。逆に残りの3ケースは元々の粘性減衰が大きいため、地震動強度にかかわらず応答値が一定の比率になったと考えられる。

橋脚についても地震動強度が1.0倍および1.5倍の時には応答比率がおおむね等しいが、地震動強度が0.5倍になると応答比率が大きく異なる傾向が見られており、粘性減衰と履歴減衰のバランスによって減衰行列作成方法による応答値の変化の程度が異なっていることがわかる。

5. まとめ

以上の検討の結果得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 減衰行列作成方法に着目してパラメータスタディを実施した結果、基本ケースに対して要素別

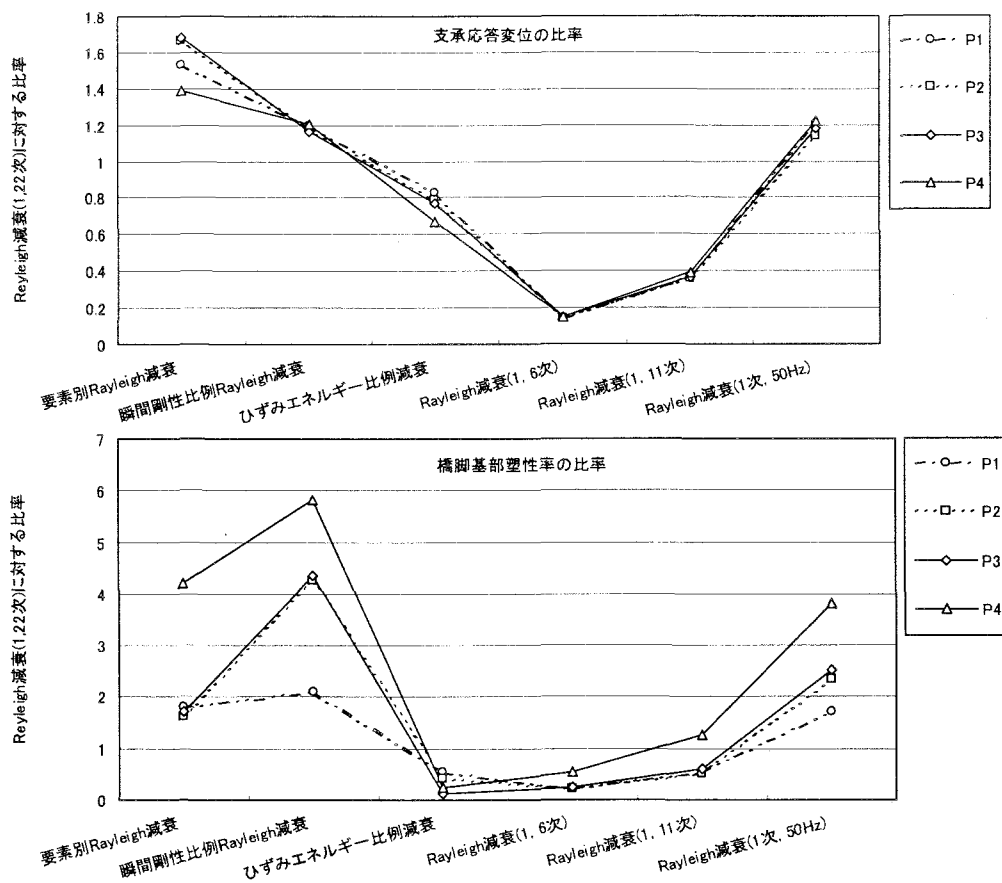


図-5 減衰行列の作成方法に着目した検討結果

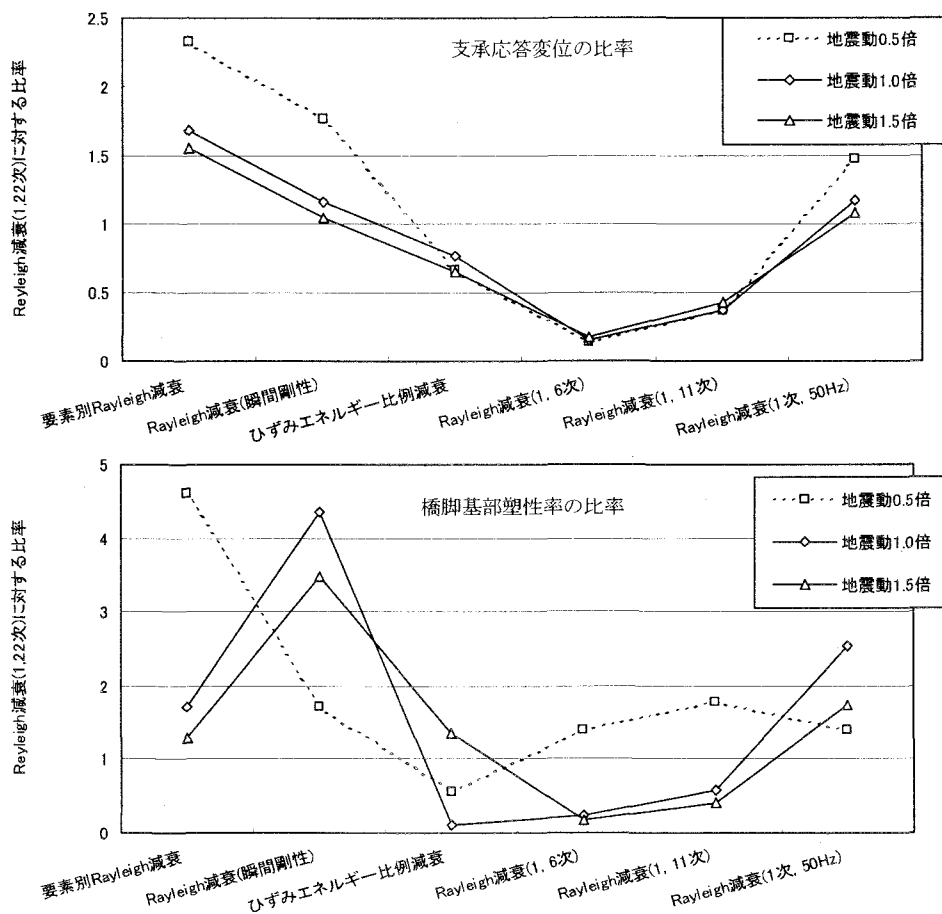


図-6 地震動強度との関係に着目した検討結果

Rayleigh減衰，瞬間剛性比例Rayleigh減衰，Rayleigh減衰(1次,50Hz)の3ケースの応答値が他と比べて大きくなる結果となった．いずれも剛性に比例する減衰力(βK)を小さく評価したケースであり，すべり免震支承等の初期剛性が大きな要素を含む構造に対しては，この減衰力の評価が応答値に大きく影響することが確認できた．したがって，解析上大きな剛性を付与している要素(摩擦要素，ギャップ要素，剛要素等)が解析モデルに含まれる場合には，Rayleigh減衰の係数 β を小さくしたり要素別Rayleigh減衰を採用する等，減衰行列の取り扱いに留意すべきと考えられる．

- 2) 地震動強度との組み合わせも含めて検討した結果，地震動倍率を大きくするにしたがって基本ケースに対する応答比率が1.0に近づく傾向が見られ，相対的に粘性減衰の影響が小さくなっていることが確認できた．したがって，入力地震動が比較的小さく，粘性減衰の影響が相対的に大きくなる場合には，特に減衰行列の作成方法に留意する必要があると考えられる．

6. おわりに

本研究では，動的解析を実施する上でポイントとなる減衰行列の作成方法に着目し，それらが免震橋梁の動的応答に及ぼす影響について検討した．大規模かつ複雑なモデルの非線形動的解析における粘性減衰の取り扱いは難しい問題であり，定量的な評価を行うのは容易ではないが，本研究では一つの事例として相対的な比較の結果を示した．性能設計が主流となり，非線形動的解析により橋梁の耐震設計を行うことが必要不可欠になってきているが，最も評価のあいまいな減衰力の部分が応答値に及ぼす感度が大きいため，耐震設計を行う上での減衰の取り扱いについてさらに研究を進めていくことが必要であると考えられる．

7. 謝辞：本研究は，土木学会地震工学委員会地震時保有耐力法に基づく耐震設計法の開発に関する研究小委員会「構造物の非線形地震時挙動の評価法」分科会の活動内容の一部をとりまとめたものであり，委員の方々から貴重な御意見をいただいた．ここに記して謝意を表する次第である．

参考文献

- 1) 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回地震時保有水平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.101-108，2000年12月
- 2) 西森孝三，足立幸郎：部材減衰を直接的に考慮したレーリー減衰使用による動的解析法，第4回地震時保有水平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.109-114，2000年12月
- 3) 室野剛隆，滝沢聡，畠中仁，棚村史郎：構造物の非線形動的解析における減衰マトリクスの設定に関する検討，第4回地震時保有水平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.115-122，2000年12月
- 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年8月
- 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回地震時保有水平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年1月
- 6) 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(その2)，第6回地震時保有水平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.421-432，2003年1月
- 7) 宋 波，富岡佐和子，伏黒邦雄：地震時の挙動が複雑な橋梁の非線形動的解析における減衰の評価について，第6回地震時保有水平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.443-446，2003年1月
- 8) 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回地震時保有水平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.143-148，2004年1月
- 9) 横川英彰，竹ノ内勇，宇野裕恵：履歴減衰を導入した構造減衰に関する一考察，第7回地震時保有水平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.149-154，2004年1月
- 10) 小倉裕介，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回地震時保有水平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.155-162，2004年1月
- 11) 藤田亮一，森 敦，金治英貞，伊津野和行：すべり免震支承システムのパラメータが橋梁応答におよぼす影響，土木学会地震工学論文集 Vol. 27，2003年12月

- 12) 藤田亮一，森 敦，金治英貞，伊津野和行：すべり免震支承システムのモデル化および地震動入力条件の違いが橋梁応答に及ぼす影響，第7回地震時保有水平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，2004年1月
- 13) 武田寿一：鉄筋コンクリート建物の動的計算，コンクリート・ジャーナル Vol.12, No.8, pp.33-41, 1974年8月
- 14) (社)日本道路協会：道路橋示方書 V 耐震設計編，平成14年3月
- 15) CRC ソリューションズ：DYNA2E ver.7.2 マニュアル（使用編・理論編），2004年5月