

免震支承とRC橋脚がともに非線形化した加震実験の動的解析による再現性

金山亨¹・矢部正明²・塚本英子³

¹正会員 (株)構造計画研究所 エンジニアリング営業部 (〒164-0011 東京都中野区中央4-5-3)

²正会員 (株)長大 構造事業本部 (〒505-0821 茨城県つくば市東平塚730)

³非会員 (株)長大 構造防災技術部 (〒505-0821 茨城県つくば市東平塚730)

1. はじめに

構造物の耐震設計において、入力地震動に次いで不確定性が高いものに減衰がある。少なくとも、公共構造物である橋梁の耐震設計では、設計地震動は公的機関が定めたものを設計荷重として用いるため、実際の耐震設計では、入力地震動は設計者の裁量が入り込む余地は極めて少ないのが普通である。

橋梁構造物、建築構造物ともに、構造物を構成する部材単位の減衰や構造物としての減衰は、実験室内での加振実験や正負交番載荷実験、実構造物を対象とした起振機実験や地震観測で等価減衰定数という形で、ばらつきは大きいとその値は提示されている。しかし、減衰定数の値は、変位や応力の振幅の大きさによって変化する¹⁾ため、耐震設計では確固たる減衰定数を用いているというよりも、慣用的な値が用いられてきている^{2) 3)}。しかし、構造物を構成する要素毎に、減衰定数を与え、構造物としてのモード減衰定数^{4)~7)}を定めることは、わが国の耐震設計では定式化された作業となっており、減衰定数の値さえ決まれば線形域の地震応答を求める場合に限れば、設計者間のばらつきは生じる事は希である。しかし、非線形動的解析において非線形履歴モデルによって自動的に考慮される履歴減衰効果以外の減衰効果を、粘性減衰としてモデル化する際には、設計者によって様々な運用が行われており、耐震設計に用いるための地震応答値は、大きくばらつくことがある。

建築分野では、非線形動的解析が行われるように

なった時代から塑性域における粘性減衰をどうモデル化するかを検討が行われてきている。多くが、振動実験を非線形動的解析で再現する際に、粘性減衰マトリックスを初期剛性比例型とする場合と瞬間剛性比例型とする場合でどちらの再現性が高いかを検討している。RC構造物の場合には、粘性減衰マトリックスを瞬間剛性比例型とする方が、振動実験に対する再現性が高い⁸⁾としている報告が多い。RC橋脚を対象とした池田らの研究でも、粘性減衰マトリックスを瞬間剛性比例型とする方が、振動実験に対する再現性が高い⁹⁾と報告されている。

滝澤らは、粘性減衰の剛性比例項を初期剛性に比例する場合と瞬間剛性に比例する場合では、構造物の損傷形態が異なる¹⁰⁾ことを指摘している。しかし、実際の構造物を対象とした耐震設計では、粘性減衰を瞬間剛性に比例するとモデル化した場合、解が求まらない事がある¹¹⁾ため、実際の構造物の耐震設計に用いるには不便である。土木学会のコンクリート標準示方書のように、周辺地盤を精緻にモデル化し、基礎構造物と地盤間の相互作用効果を動的解析の中で自動的に考慮できるようにし、非線形動的解析では、粘性減衰を考慮しない¹²⁾としている設計基準もあるが、設計費に十分な余裕がある構造物を除けば、採用しにくい方法である。何よりも、構造物が非線形域に至るような地震動が作用した場合には、周辺地盤も強非線形域に至るため、そのような領域における基礎構造物と地盤間の相互作用効果は、ほとんど研究成果がないため、耐震設計成果の妥当性の説明が、高いハードルとなる。

以上のように、構造物が非線形域にある領域における粘性減衰効果をどうモデル化するかにはまだ明確な解が得られていないのが実状であり、解らないことに関しては安全側の判断をとというのが設計者の姿勢となっているが、当然、ばらつきが大きいのが実態である。同様な問題は、免・制震構造を用いた非線形動的解析でもある。和田が指摘するように、早期に降伏する免・制震部材の初期剛性を含んだ剛性マトリックスを用いて粘性減衰マトリックスを作成すると、免・制震部材のエネルギー吸収を二重に評価してしまう¹³⁾。この点に関しては、RC構造のひび割れ剛性も同様であり、免・制震部材の初期剛性だけを問題とするのはおかしいという意見もあるが、RC構造物の多くは、建設時には乾燥収縮等によって微細なクラックが入っており、理論上求められるクラックが無い状態の初期剛性は、実構造物ではほとんど存在しない。これは、建設時の起振機実験等から固有振動特性を解析モデルで再現する場合には、クラックが無い状態の初期剛性では実験より得られる固有周期より短い値が得られることが多く、実験結果に近い固有周期は、RC部材のコンクリートの全断面を有効とみなして算出される剛性を用いた場合に得られることからわかる。道路橋示方書V耐震設計編では、RC橋脚の非線形履歴モデルにはその点が考慮されている¹⁴⁾。現在、道路橋も鉄道橋も、粘性減衰マトリックスを作る場合には、免・制震部材の初期剛性の寄与は無視した方が安全側の評価であるということの基本としている^{15)、16)}。

本報告では、文献17)に示された免震支承とRC橋脚がともに非線形化した振動実験を、免震支承の初期剛性が粘性減衰マトリックスに寄与しないようにした要素別Rayleigh型粘性減衰マトリックスを用いた非線形動的解析で再現できるかを検討した。本報告は、耐震設計に用いる動的解析法の高度化を目指した、性能に基づく橋梁等構造物の耐震設計法に関する研究小委員会動的解析WGの活動の一環として実施されたものである。

2. 検討対象とする振動実験

検討対象とした振動実験は、写真-1に示す文献17)で実施された鉛プラグ入り積層ゴム支承（以下、免震支承とする）とRC橋脚がともに、非線形化した振動実験である。実験の詳細は、文献17)を参照されたい。振動台は、3次元加振が可能な振動台であるが、加振は、橋軸方向の一方方向だけである。加振に用いた地震動は、1995年兵庫県南部地震でJR鷹取駅周辺地盤上で観測されたNS成分の振幅特性を



写真-1 免震支承とRC橋脚がともに非線形化した振動実験概況¹⁷⁾

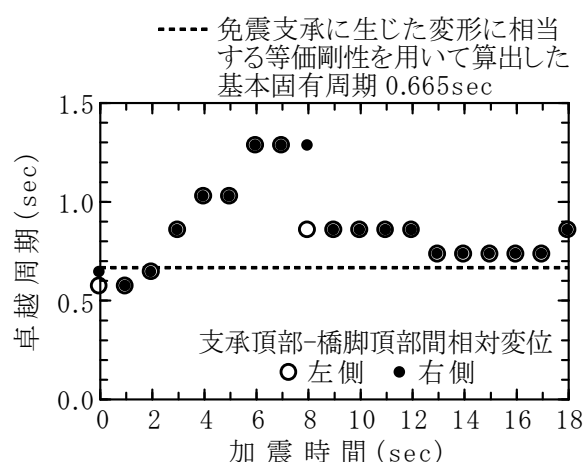


図-1 免震支承の変形から求めた等価固有周期の変化

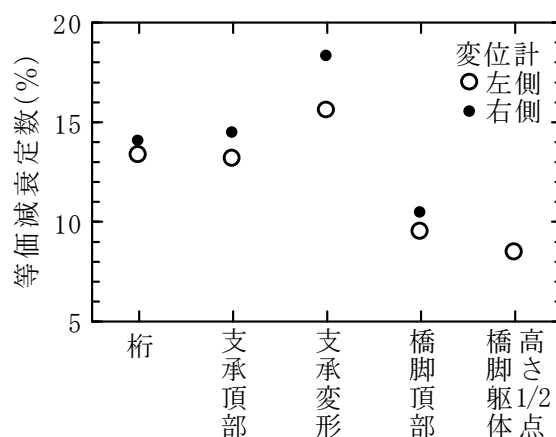


図-2 応答変位波形から求めた等価減衰定数

周波数領域で調整した加速度波形である。時間軸は、相似則に基づいて50%に圧縮されている。具体的には、道路橋示方書V耐震設計編に示された標準加速度波形II-II-1の時間軸を50%に圧縮（加速度強度1.0、

変位振幅1/4縮小)した波¹⁷⁾で加振が行われている。振動実験は、3回行われているが、本報告では、一度損傷したRC橋脚が再び加振される2回目と3回目の振動実験は対象外としている。

図-1は、免震支承頂部の応答変位波形と橋脚頂部の応答変位波形から求めた相対変位（免震支承の変形に相当）波形から非定常スペクトル¹⁸⁾を求め、その卓越周期を整理したものである。図に示すように、免震支承の等価固有周期が時々刻々と変化していることがわかる。固有周期は、初期の値から約2倍に長周期化している。

図-2は、桁、支承頂部、橋脚頂部、橋脚躯体高さの約1/2点の応答変位波形からRD法¹⁹⁾によって推定した等価減衰定数の値である。橋脚躯体高さの約1/2点を除けば、等価減衰定数は10%より大きいことがわかる。これは、免震支承とRC橋脚がともに非線形化していることによる。

3. 粘性減衰特性のモデル化

振動実験は、橋軸方向の1方向だけを加振しているので、動的解析モデルは、フーチングとRC橋脚躯体および免震支承とそれが支持する上部構造（桁と質量）からなる系とし、桁の両端部は橋軸方向に可動とした。免震支承の非線形性は非線形せん断ばね、RC橋脚の非線形性は曲げモーメント-曲率関係でモデル化した。免震支承の繰返し則はバイリニアモデル、RC橋脚の繰返し則はTakeda型モデルを採用した。

図-3は、動的解析モデルの主要な固有振動モード形とひずみエネルギー比例減衰法によるモード減衰定数を整理したものである。固有値解析の際には、免震支承は、実験より得られた変形約38mmに相当する等価剛性でモデル化した。1次の固有振動モードは、上部構造が橋軸方向に剛体変位し、免震支承とRC橋脚躯体が変形するもので固有周期約0.67秒である。2次の固有振動モードは、RC橋脚躯体が振動しており固有周期は約0.07秒である。構造要素に与えた減衰定数は、RC橋脚の2%だけであり、そのため橋のモード減衰定数は2%以下の値となっている。

非線形動的解析に用いる粘性減衰マトリックスは、要素別Rayleigh型粘性減衰マトリックス²⁰⁾とし、免震支承と剛部材および質量効果だけをモデル化した上部構造の剛性は、粘性減衰効果に寄与しないようにした。

Rayleigh型粘性減衰の比例定数は、橋軸方向のモード寄与率を重み係数として最小2乗法^{21),22)}によって求めた。その結果、免震支承やRC橋脚が非線形

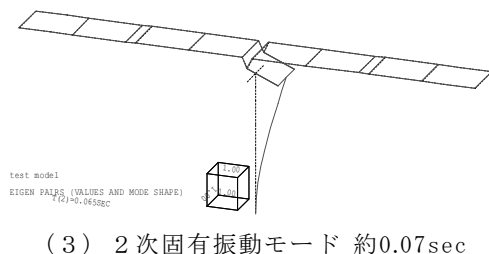
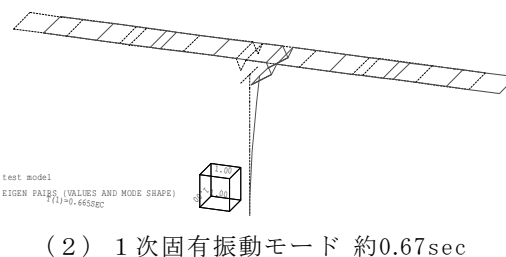
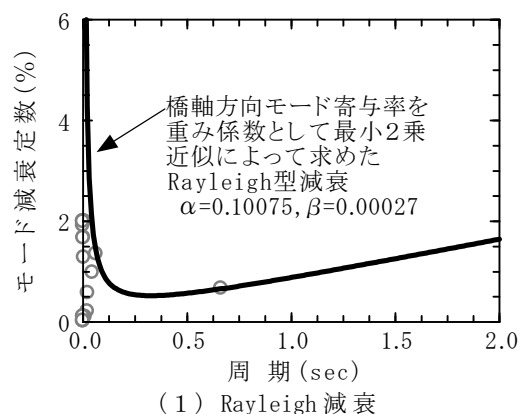


図-3 固有振動特性とモード減衰定数

化して等価固有周期が延びても、過大な粘性減衰効果が得られないような粘性減衰特性とすることができた。具体的には、固有周期が1.5秒で1.3%，2秒で1.6%という減衰定数の効果しか粘性減衰効果として生じないことになる。

4. 非線形動的解析による振動実験の再現

鉛プラグ入り積層ゴム支承の初期剛性（＝1次剛性）は、設計法としては2次剛性の6.5倍とすることが決められている。しかし、免震支承は、荷重-変位関係に明確な降伏点（変曲点）が現れるまでは、せん断ひずみ（水平変位＝せん断変形）の大きさに応じてその剛性が大きく変化することから、ここで行うように、実際に生じた挙動の再現解析の場合は、2次剛性だけでなく、初期剛性のモデル化も重要となる。図-4は、免震支承の2次剛性は実験より得られた約38mmでモデル化し、初期剛性を設計で決められた2次剛性の6.5倍とした場合と、免震支承の変形が実験と解析で近似するように、初期剛性を変化させた場合の免震支承の変形を比較したものであ

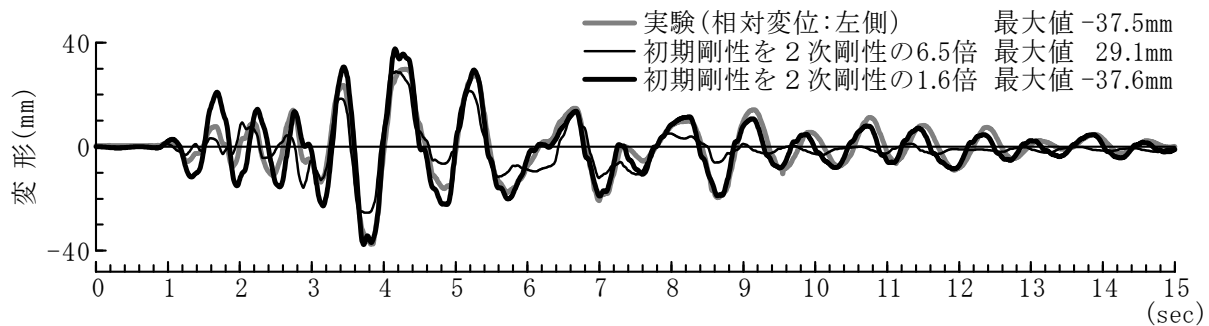


図-4 免震支承の非線形モデルの初期剛性と実験より得られる免震支承の変形の再現性

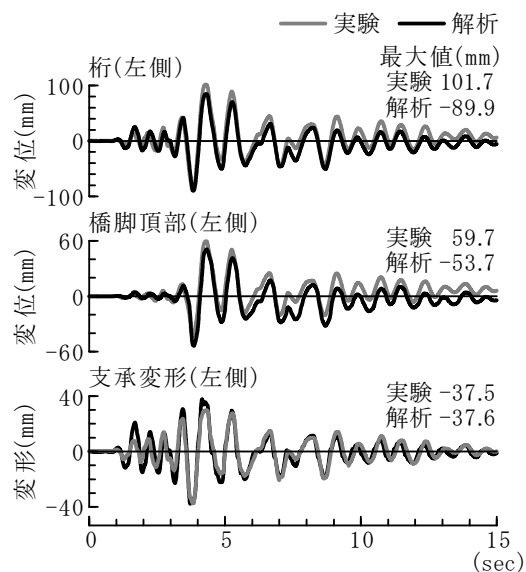


図-5 桁と橋脚頂部の応答変位と免震支承の変形

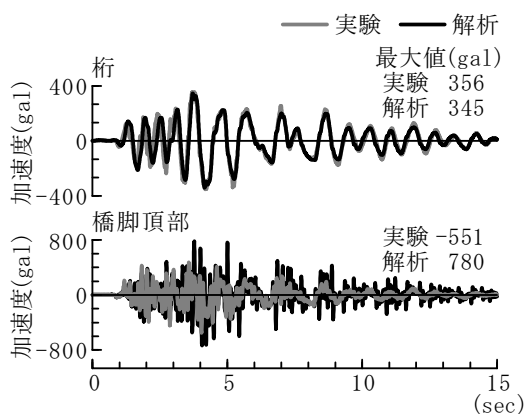


図-6 桁と橋脚頂部の応答加速度

る。図より、初期剛性を免震支承の約 1.6 倍とすると、動的解析と振動実験による変形が一致することがわかる。なお、後述する動的解析では、免震支承

に生じる変形が免震支承の非線形性をモデル化したバイリニアモデル作成時の変形と一致するまで収束計算を行っている。

図-5 は、桁と橋脚頂部の応答変位波形と免震支承頂部と橋脚頂部の相対変位波形を動的解析と振動実験で比較したものである。動的解析は、桁の最大応答変位を約 12%、橋脚頂部の最大応答変位を約 10%過小評価している。主要動後の桁と橋脚頂部の応答変位波形に僅かにズレが生じているが、動的解析は、振動実験で得られた応答変位波形を再現できていることがわかる。

図-6 は、桁と橋脚頂部の応答加速度波形を動的解析と振動実験で比較したものである。免震支承の存在によって短周期成分が少ない桁の応答加速度は、動的解析と振動実験で良く近似しており、最大応答値は動的解析が振動実験より約 3%小さいだけである。橋脚頂部の応答加速度は、動的解析には振動実験よりも短周期成分が強く含まれており、その結果、最大応答値も振動実験の約 140%と大きな値となっている。しかし、波形の主要な振幅の変化は、近似できていることがわかる。

図-7 は、免震支承の水平力－水平変位関係を振動実験と動的解析で比較したものである。最大変形量と原点を結んだ等価剛性は近似しているが、動的解析の履歴ループは、振動実験のそれよりも小さいため、免震支承のエネルギー吸収を過小評価していることがわかる。

図-8 は、RC 橋脚頂部位置での水平力と水平変位の関係を振動実験と動的解析で比較したものである。動的解析は、振動実験より得られた履歴ループを再現できていることがわかる。

図-9 は、図-5 と図-6 に示した地震応答を周波数領域で比較したものである。時間領域での再現性が最も低かった橋脚頂部の応答加速度も、フーリエスペクトルの形状は動的解析と振動実験で近似しており、動的解析の方が周期 0.2 秒よりも短周期域の成

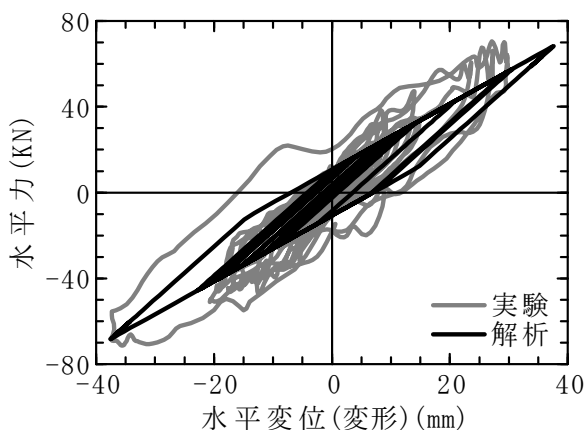


図-7 免震支承の水平力ー水平変位関係

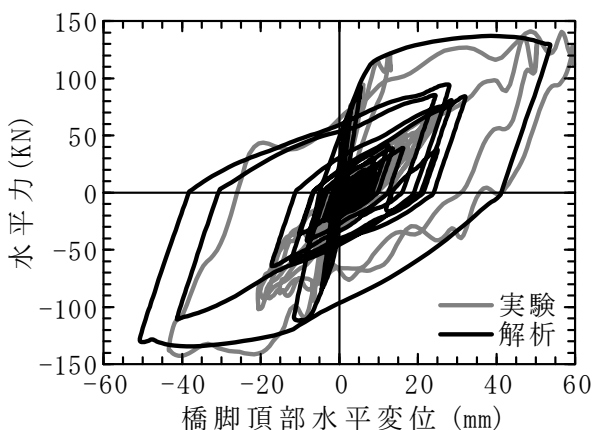


図-8 RC橋脚頂部における水平力ー水平変位関係

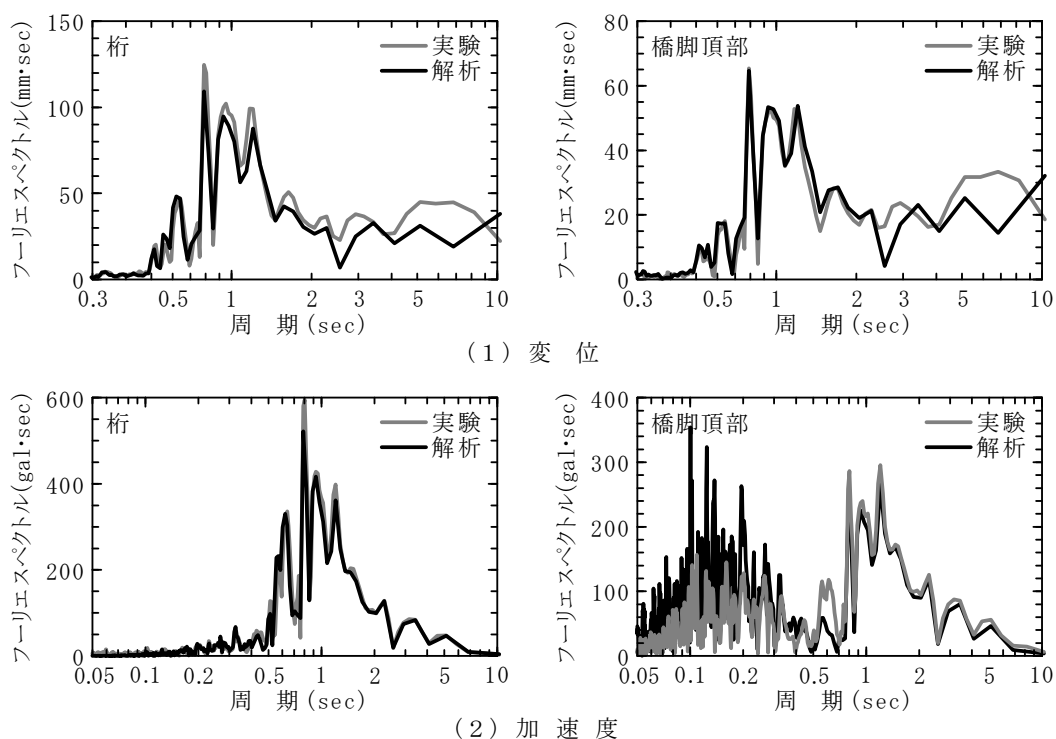


図-9 桁と橋脚頂部における地震応答の周波数分析結果（フーリエスペクトル）

分が強く現れていることがわかる。

5. まとめ

免震支承とRC橋脚がともに非線形化した振動実験を、免震支承の初期剛性が粘性減衰マトリックスに寄与しないようにした要素別Rayleigh型粘性減衰マトリックスを用いた非線形動的解析によって実用上十分な精度で再現できることを示した。本検討で得られた結果を以下に示す。

- 1) 桁と橋脚頂部の応答変位および免震支承の変形という免震設計で重要な量は、非線形動的解析で精度良く近似することができた。
- 2) 免震支承の影響によって短周期成分が弱められた桁の応答加速度は、非線形動的解析によって再現することができた。
- 3) 非線形動的解析は、RC橋脚の履歴ループは精度良く再現できたが、免震支承の履歴ループは、エネルギー吸収（履歴ループの面積）を過小評価していた。
- 4) 対象とする系の地震応答が卓越する方向の固有

振動モードのモード寄与率を重み係数として最小2乗法によって求めたRayleigh型粘性減衰の比例定数の設定法は、多自由度系のRayleigh型粘性減衰の比例定数を客観的に決めることができることを示した。

なお、本報告では記述していないが、図-3に示すように、橋梁のモード減衰定数が2%以下という小さな値であれば、Rayleigh型粘性減衰の比例定数を適切に設定すれば、免震支承の初期剛性がRayleigh型粘性減衰マトリックスに寄与する全体剛性マトリックスに比例するRayleigh型粘性減衰マトリックスでも振動実験を同程度に近似できる²³⁾。

謝辞：国立研究開発法人土木研究所構造物メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループの星隈順一上席（現国土交通省国土技術政策総合研究所道路構造研究部橋梁研究室長）には、文献17)に示された実験データを提供して頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) N.M.Newmark and W.J.Hall : EARTHQUAKE SPECTRA AND DESIGN , EARTHQUAKE ENGINEERING RESEARCH INSTITUTE, Berkeley,Clif., pp.53-57, 1982.
- 2) 田村幸雄：減衰定数の設定，建築雑誌，Vol.110，No.1372，pp.42-43，1995.
- 3) 藤野陽三：巻頭言 この40年変わったこと，変わらなかったこと，計算工学，Vol.17，No.3，pp.2，2012.
- 4) 青柳史郎：地震動の位相差を考慮した長大吊橋の地震応答について，土木学会論文報告集，第190号，pp.37-48，1971.
- 5) 武藤清，小林俊夫：原子炉施設の耐震設計に慣用されている各種減衰理論の比較研究，日本建築学会論文報告集，第255号，pp.35-48，1977.
- 6) 柴田明德，藤沢啓一：異なる減衰をもつ要素からなる構造物のモーダルアナリシスに関する一考察，東北大学建築学報，No.18，pp.25-34，1977.
- 7) AHID D.NASHIF , DAVID I.G.JONES , JOHN P.HENDERSON : VIBRATION DAMPING , JOHN WILEY & SONS, pp.168-169, 1985.
- 8) Halime UMEMURA, Haruo TAKIZAWA : DYNAMIC RESPONSE OF REINFORCED CONCRETE BUILDINGS , Structural Engineering Documents2 , IABSE, 1982.
- 9) 山口隆裕，武村浩志，平陽兵，池田尚治：鉄筋コンクリートの準動的地震応答実験における歪速度および粘性減衰の影響，コンクリート工学論文集，第7巻，第2号，pp.143-155，1996.
- 10) 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，建築学会，構造工学論文集，Vol.33B，pp.103-110，1987.
- 11) 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.
- 12) 土木学会コンクリート委員会：2012年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕，pp.270-275，2013.
- 13) 和田章：構造工学の科学－塑性変形と鋼構造建築の耐震設計，Structures and Mechanics Seminar（2008年10月31日，東京大学工学部一号館14番教室）配付資料，pp.6，2008.
- 14) 公益社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編に関する参考資料，pp.100-103,113-117，2015.
- 15) 社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編，pp.126，2012.
- 16) 公益財団法人鉄道総合技術研究所：平成24年9月鉄道構造物等設計標準・同解説一耐震設計，pp.356-361，2012.
- 17) 足立幸郎，運上茂樹，近藤益央，加賀山泰一：振動台実験による免震支承を有するRC橋脚の非線形地震応答特性に関する研究，土木学会構造工学論文集，Vol.45A，pp.879-890，1999.
- 18) 星谷勝，千葉利晃，草野直幹：地震加速度波の非定常特性とシミュレーション，土木学会論文報告集，第245号，pp.51-58，1976.
- 19) 田村幸雄，佐々木淳，塚越治夫：RD法による構造物のランダム振動時の減衰評価，日本建築学会構造系論文報告集，第454号，pp.29-38，1993.
- 20) 戸川隼人：有限要素法による振動解析，サイエンス社，pp.23-27，1981.
- 21) 臺原直，大月哲，矢部正明：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2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.371-378，1998.
- 22) 山本泰幹，藤野陽三，矢部正明：地震観測された長大吊橋構造系橋梁の動的特性と動的解析モデルによる再現性，土木学会論文集A，Vol.65，No.3，pp.738-757，2009.
- 23) 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.421-432，2003.