

論文 Flexibility 法を用いた長大スパン RC アーチ橋の地震応答の評価

河野 直也*¹・中野 友裕*²・中村 光*³・田邊 忠顕*⁴

要旨：長大スパン RC アーチ橋の地震時応答特性を把握するために、軸力-曲げモーメント相関に着目した非線形動的解析を実施した。解析に要素内の力の分布をもとにして剛性マトリクスを作成する Flexibility 法を用いることで、各時刻での断面力応答を求め、評価を行った。その結果、長大スパンアーチ橋では部材内軸方向力の変動幅が極めて大きく、降伏モーメントや降伏曲率の判定の際には軸方向力の影響を考慮することの重要性が示された。

キーワード：長大スパン RC アーチ橋, 降伏モーメント, 降伏曲率, Flexibility 法

1. はじめに

アーチ橋は、地震時の挙動が極めて複雑な形式であり、地震応答特性が十分に解明されていないという課題がある。最近の研究により 600m クラスの長大アーチ橋の設計が可能であることが明らかとなってきている¹⁾。文献²⁾では、地震動の入力方向を単一で行っているが、既往の研究³⁾において、連続桁橋のような単純な形式であっても、入力方向により応答が大きく変化することが示されている。これは、入力方向の相違によって、部材断面に生じる 2 軸曲げ状態が変化するために発生するものであるが、アーチ橋のように、軸力と 2 方向モーメントを受けられる場合には、挙動の予測を単一の入力方向のみで行うことだけでは、十分ではないと考えられる。

本研究では、入力方向を変化させて解析を行い、挙動の変化がどの程度生じるかについて解析的検討を行い、力の釣合いから剛性マトリクスや等価節点力を算定する Flexibility 法⁴⁾を用いることで断面力状態を評価し、長大スパンアーチ橋の損傷評価に関する検討を行った。

2. 解析対象とする RC アーチ橋およびそのモデル化と入力地震動

2.1 解析対象構造物

解析対象とするのは、文献¹⁾で試設計されたスパン長 600m、ライズ 100m を有する長大 RC アーチ橋であり、スパンライズ比は 6.0 である。アーチ橋では地震時に水平方向の応答と上下方向の応答が連成するため、3 方向地震力を同時に作用させることの重要性が指摘されていることから²⁾、本研究では水平 2 方向と上下方向の地震力を同時に作用させることとした。

解析橋梁の構造および断面諸元を図-1 に示す。アーチリブは 3 室の箱型変断面で、アーチ中央部に近づくほど断面が小さくなっている。

コンクリートの圧縮強度は 60MPa、圧縮強度時のひずみは 0.004、鉄筋の降伏強度は 685MPa としている。

各方向の 1 次固有周期を表-1 に示す。

表-1 各方向の 1 次固有周期

	固有周期 [秒]
橋軸方向	6.971
橋軸直角方向	4.310
鉛直方向	0.777

*1 大分工業高等専門学校専攻科 機械・環境システム工学専攻 (正会員)

*2 大分工業高等専門学校助手 都市システム工学科 博(工) (正会員)

*3 名古屋大学大学院教授 工学研究科社会基盤工学専攻 工博 (正会員)

*4 名古屋大学名誉教授 J C I 中部支部技術支援機構専務理事 工博 (正会員)

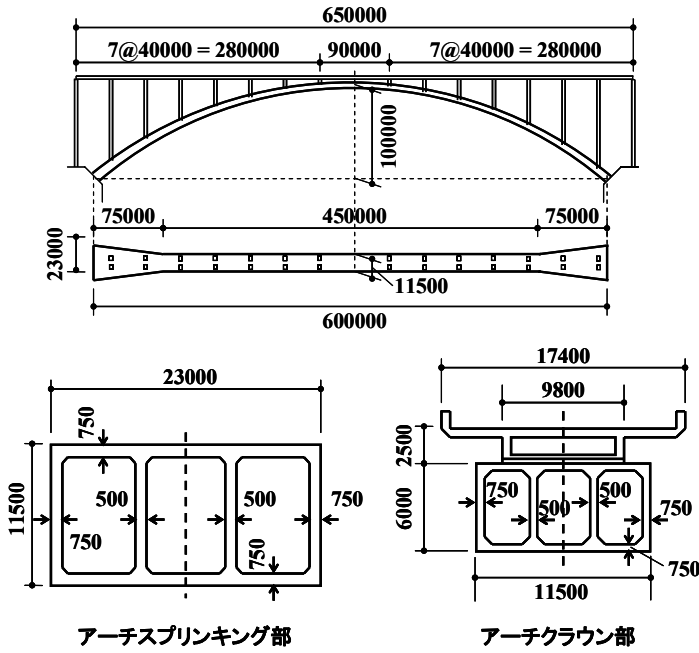


図-1 解析対象とする長大アーチ橋

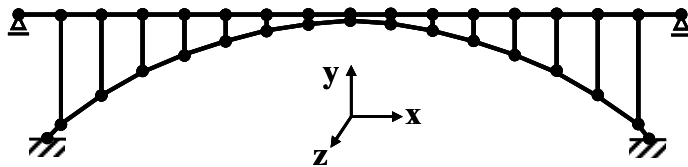
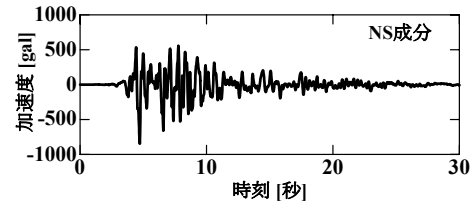
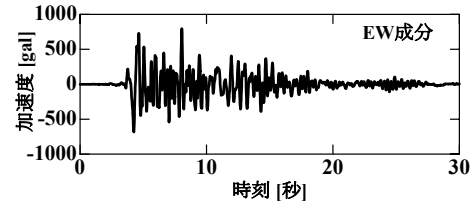


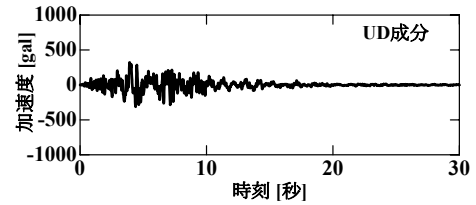
図-2 解析対象橋のモデル化



a) NS成分(振幅調整あり)



b) EW成分(振幅調整あり)



c) UD成分(振幅調整なし)

図-3 入力地震動

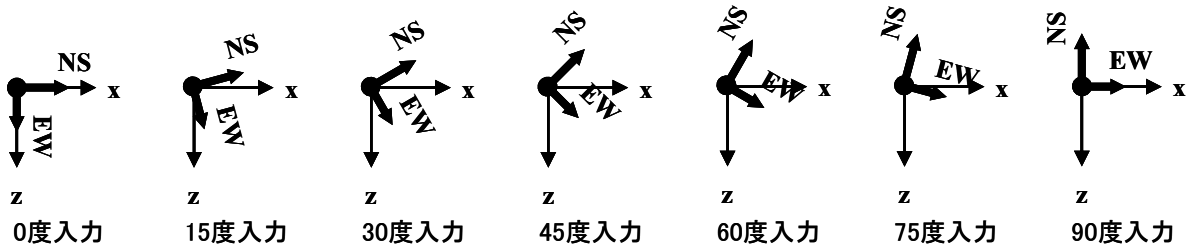


図-4 地震動の入力方向

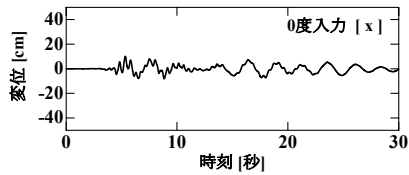
2.2 構造物のモデル化

上記の長大アーチ橋を、3次元はり要素を用いて33節点46要素にモデル化するが、解析に用いるはり要素として部材内の断面力分布を基礎にして剛性マトリクスや等価節点力を算定するFlexibility法を用いる⁴⁾。文献¹⁾に示されている長大アーチ橋の解析結果によれば、いずれの部材も鉄筋降伏に至っておらず、部材は大きな非線形性を示していない。このような場合には、剛性法に基づく動的解析であっても要素分割なしでおおむね正しい解を得ることができるが、

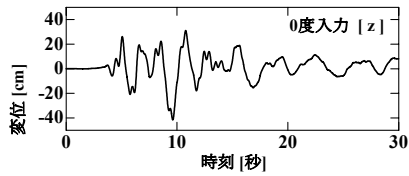
本研究では鉄筋降伏後の挙動が発生した場合も検討対象とするため、断面力分布の直線性が成立するFlexibility法を用いることとしたものである。なお、軸力変動の影響に着目するため、部材はFiber-Model⁵⁾でモデル化している。ただしアーチクラウン付近の鉛直材6本は、上床版とアーチリブの距離が近くほぼ一体となっており、曲げ耐力が大きいいため、剛体と仮定している。

2.3 入力地震動

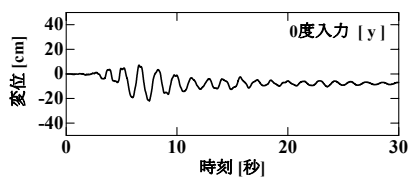
アーチ橋の架橋地点の地盤は、一般に堅固で



a) 橋軸方向変位応答

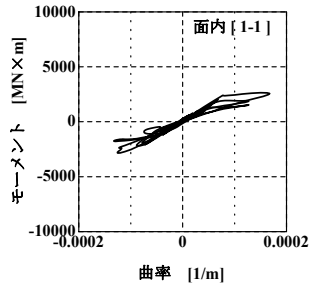


b) 橋軸直角方向変位応答

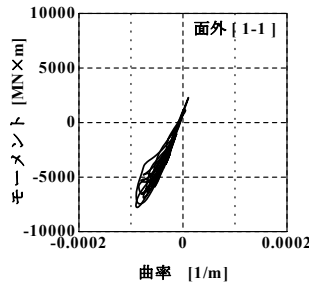


c) 上下方向変位応答

図-5 アーチクラウン部
変位応答
(0度入力)



a) 面内 M-φ履歴



b) 面外 M-φ履歴

図-6 スプリング部
の M-φ履歴

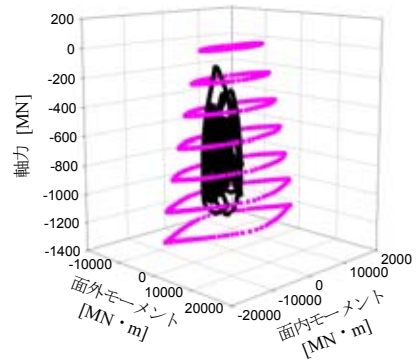


図-7 スプリング部の
M-M-N 図

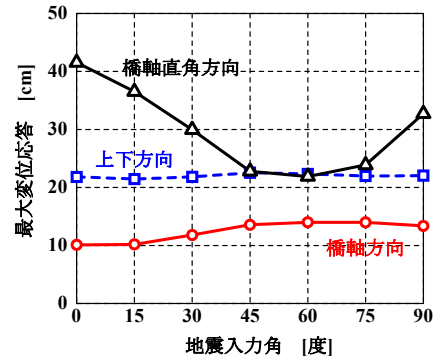


図-8 地震入力角による各方向
の最大応答変位

あるので、入力地震動として、図-3に示す1995年兵庫県南部地震時の神戸海洋気象台波形の水平2成分を、道路橋示方書1種地盤のタイプ2標準加速度応答スペクトルに近い特性を有するように振幅調整した波形を用いる⁶⁾。なお、上下動については観測波形をそのままもちいることとする。

これら3成分の波形を、図-2のモデルに入力するが、水平2方向の入力方向による応答の差異を検討するために、図中に示す0度から90度まで15度ずつ入力方向を変化させることとする(図-4)。

3. 地震応答解析

3.1 解析条件

時刻歴応答解析はNewmarkの β 法($\beta=0.25$)により行い、質量マトリクスとして集中質量を用いた。減衰マトリクスはWilson-Penzienの方法⁷⁾により、初期剛性に対する全固有モードを考慮することとした。

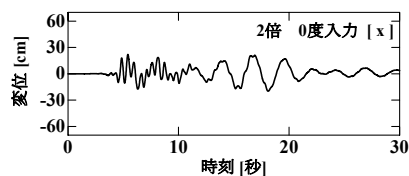
コンクリート構成則には、道路橋示方書⁶⁾に

基づいて作成したモデルを用いた。また鉄筋には、Bi-linearモデルを用いている。

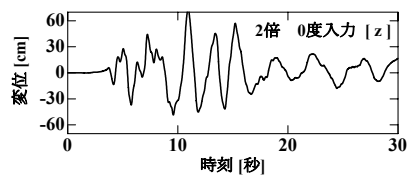
3.2 時刻歴変位応答

図-5に0度入力の場合のアーチクラウン部における変位応答を示す。

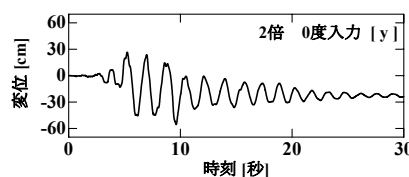
図から明らかなように、橋軸直角方向に大きく変位が生じていることが分かる。また、上下方向の変位応答を見ると、振幅中心線が徐々に下方向に変化し、最終的には残留変位が生じている。ここで左のスプリング部の固定端側断面の履歴に着目すると、図-6のようになっている。また図-7にM-M-N図を示す。最大曲率は面内曲げで $160\mu/m$ 、面外曲げで $90\mu/m$ 程度であり、非線形性は表れているものの大きな塑性化には至っていない。実際この応答中に降伏した鉄筋は存在せず、M-φ関係の非線形性はコ



a) 橋軸方向変位応答



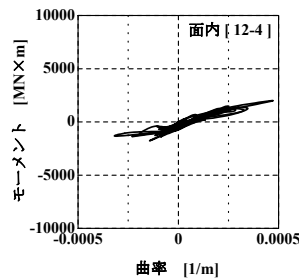
b) 橋軸直角方向変位応答



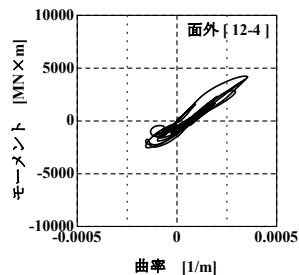
c) 上下方向変位応答

図-9 アーチクラウン部
変位応答

(0度入力：入力振幅2倍)



a) 面内 M-φ履歴



b) 面外 M-φ履歴

図-10 アーチリブの
降伏後の m-φ履歴

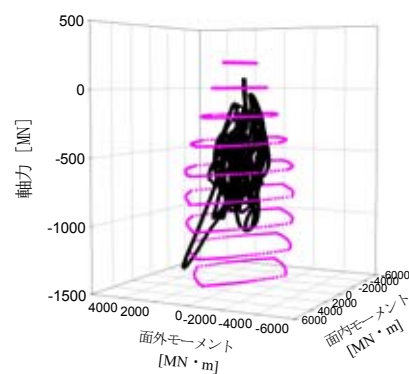


図-11 アーチリブの M-M-N 図

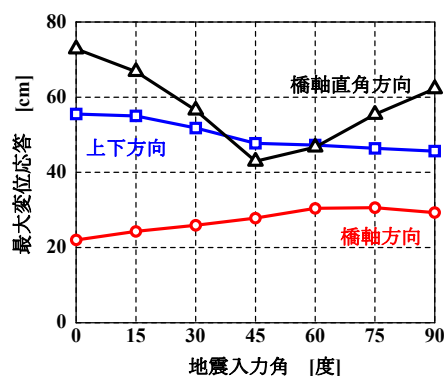


図-12 地震入力角による各方向
の最大応答変位
(入力振幅2倍)

コンクリートの非線形性によるものであると考えられる。これらの結果は、文献¹⁾においても同様の傾向が見られるが、本解析でもアーチリブの非線形化に伴う下方の残留変位が生じていると見ることができる。これは、面内曲げに対する残留曲率が影響していると考えられる。各部分において、非常に小さな残留曲率が生じているが、構造が大きいため、それらの曲率が、アーチクラウン部での残留変位として現れていると考えられる。しかし、スパンが600mであるのに対して、10cm程度の残留変位であり、また、各部材が降伏にまで達していないことから、地震後の使用性に影響を与えないものと考えられる。

図-8には、地震入力方向による3成分の変位応答最大値が示されている。入力角に関わらず橋軸方向・上下方向の変位応答最大値はほぼ同一の値となっているが、橋軸直角方向については最大値と最小値の間に2倍近くの開きがある。

この結果から、同一の地震波による異なる方向からの入力を検討する必要があると考えられる。

3.3 長大アーチ橋の降伏挙動の検討

前節の結果は、現在道路橋示方書で規定されている1種地盤の応答スペクトル適合波形程度の地震動であれば、コンクリートに若干の非線形性は生じるものの、鉄筋の降伏およびその後続く非線形挙動につながることはないという文献¹⁾の報告を裏付けるものである。

一方で、このような複雑な挙動をするアーチ橋の鉄筋降伏後の挙動についても把握することは価値のあることであると考え、故意に入力地震動を2倍とした解析を行った⁸⁾。すなわち、アーチリブもしくは鉛直材に鉄筋降伏が発生する大きさの入力加速度を設定した。

図-9に、2倍の振幅を入力したときの3方向

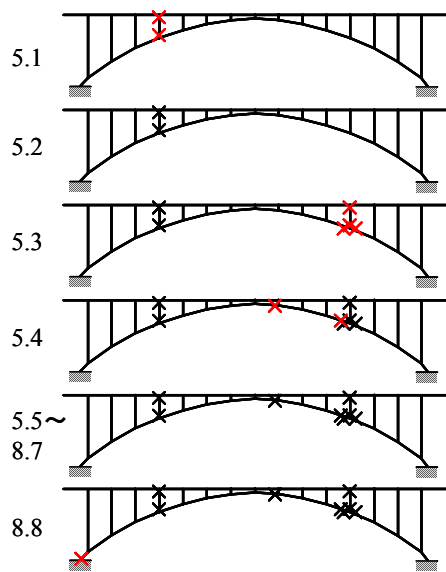


図-13 0度入力の断面降伏位置

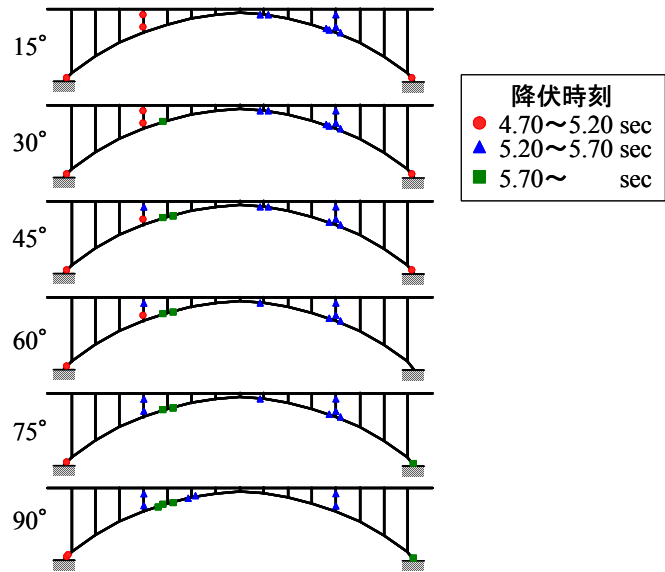


図-14 入力角度による部材降伏の相違

変位応答を示す。いずれの方向も応答値は図-5よりも大きくなっているが、いくつかの部材において鉄筋の降伏が発生している。降伏した部材のうち、アーチリブにおいて最も早く降伏に達した断面の位置ならびにその M- ϕ 関係を図-10に示し、図-11に M-M-N 図を示す。図を見てわかるように、作用モーメントが降伏モーメントを上回っているため、鉄筋が降伏したことが分かる。

図-12に、入力角ごとの変位応答最大値を示す。入力角度により傾向が異なるが、その相違は図-8よりも顕著になっている。

これらの相違を検討するために、鉄筋の降伏が発生した時刻とアーチ橋内の断面降伏位置を図-13および図-14に示す。まず、図-13であるが、0度入力の場合の各時刻における降伏断面位置を×印で示している。この図から0度入力の場合は極めて短い時間中に左右のアーチ 1/4部で降伏が発生し、最終的にはスプリング位置での断面降伏となっている。

この一連の順序を、入力角度ごとにまとめたものが図-14である。降伏する部材断面はどの入力角度でもおおむね同一の位置となっているものの、入力の角度によって降伏する場合としない場合があることが分かる。60度入力の場合、右のスプリング部で断面の降伏は発生しな

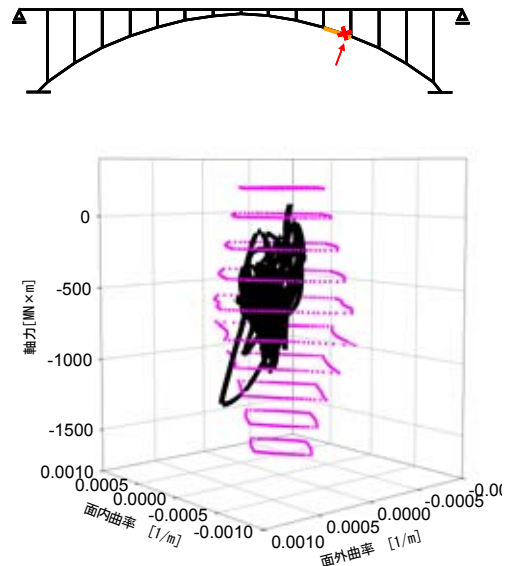


図-15 軸力-2方向曲率関係

いが、0度~45度入力では比較的早期に降伏している。断面の降伏はその後のアーチ橋全体の挙動に影響を与えるものであることから、降伏順序に一定の法則が見られないことは、地震時応答を予測する際に入力方向を変化させる必要のあることを示していると考えられる。

今回の解析では、橋軸方向及び90度方向での損傷が大きく出ているが、他の角度との間で応答に相当な差が認められる。このことは、応答値の推定に地震入力角が影響を及ぼすことを示しており、応答値の推定における入力角検討の必要性があると考えられる。

3.4 断面の降伏挙動に与える軸力変動の影響

前述したように、アーチ橋では軸力変動の影響が極めて大きいとされているが、その軸力変動が断面降伏に及ぼす影響について示したものが図-15である。この図は、0度入力の場合の断面内における、2つの図心軸まわりの曲率履歴と軸力を3次元で表したものである。軸力-2方向曲率関係を取り囲むように示されている10個の丸みがかったひし形は、軸力がある一定値にした状態で2つの曲率の比率を一定にしていた場合に、断面内の鉄筋が降伏する曲率の組合せをプロットしたもの(以降伏曲率曲面)を表している。

この図から、軸力変動は圧縮側-1300[MN]から引張り側 87[MN]となっており、軸力変動によっては部材に引張力さえ発生することが示されている⁹⁾。さらに、このように大きな範囲での軸力変動が存在する場合、降伏曲率曲面の大きさが顕著に変化することになるため、小さな応答曲率であっても断面が降伏する可能性があると考えられる。

以上の解析結果は、道路橋示方書で規定される地震動の2倍の振幅を有するものに対して解析を行ったものであるが、鉄筋の一部は降伏するものの、コンクリートの圧壊などの著しい塑性状態に達することはない点を認識されたい。

4. まとめ

本研究では、長大スパン RC アーチ橋を対象として Flexibility 法を用いた地震応答解析を行い、3方向地震力が作用する場合の長大スパン RC アーチ橋の挙動について、地震入力方向を変化させることで検討した。地震波が限定された条件ではあるが、本研究で得られた知見をまとめると以下のようになる。

1) 長大スパンアーチ橋に道路橋示方書 1 種地盤タイプ 2 地震動クラスの地震力が作用しても、コンクリートの非線形性による若干の非線形化が生じる以外、顕著な損傷は見られなかった。

- 2) Fiber-Model による応答解析の結果、大きな地震力が作用する長大スパン RC アーチ橋には部材断面に極めて大きな軸力変動が生じることとなる。このことは断面の降伏曲率に大きな影響を与えることから、軸力変動を考慮できる部材あるいは断面モデルによる解析が必要である。
- 3) 地震入力方向により、アーチ橋の応答は大きく変化することから、単一方向のみならず、複数の入力方向をも検討する必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 土木学会構造工学委員会：コンクリート長大アーチ橋一空間 600m クラスーの設計・施工，構造工学シリーズ 13，pp.135-258，2003.8
- 2) 堺淳一，川島一彦：軸力変動が RC アーチ橋の地震応答に及ぼす影響，土木学会論文集，No.724/I-62，pp.69-81，2003.1
- 3) 中野友裕，田邊忠顕：地震動の入力方向が RC 連続高架橋の全体系応答に与える影響，応用力学論文集 Vol.6，pp.653-664，2003.8
- 4) 中野友裕，田邊忠顕：コンクリート構造物の数値解析への Flexibility 法の適用に関する研究，土木学会論文集，No.725，pp.15-28，2003.2
- 5) 芳村学，青山博之，川村満：2方向外力を受ける鉄筋コンクリート構造物の解析その1 2軸曲げを受ける RC 柱の解析，日本建築学会論文報告集，第298号，pp.31-41，1980.12
- 6) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説（V 耐震設計編），2002.3
- 7) Wilson, E.L.and Penzien, J. : Evaluation of Orthogonal Damping Matrices, International Journal for numerical methods in engineering, Vol.4, pp.5-10, 1972
- 8) 森下邦宏，宇佐美勉，阪野崇人，葛西昭：鋼製橋脚の動的耐震評価法に関する検討，土木学会論文集，No.710/I-60，pp.181-190，2002.7
- 9) 畑明仁，幸左賢二，渡辺典男，立石章：ファイバーモデルによる RC アーチ橋の耐震設計解析，第10回日本地震工学シンポジウム，pp.2397-2402，1998.11