

# ファイバー要素により変動軸力の影響を考慮したRCアーチ橋の地震応答解析

堺淳一<sup>1</sup>・川島一彦<sup>2</sup>・渡邊学歩<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 博(工) 東京工業大学大学院 (日本学術振興会特別研究員)

(〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

<sup>2</sup>フェロー会員 工博 東京工業大学大学院教授 理工学研究科土木工学専攻 (同上)

<sup>3</sup>学生会員 修(工) 東京工業大学大学院理工学研究科土木工学専攻博士後期課程 (同上)

RC アーチ橋に地震力が作用すると、主要構造部材に降伏を超える曲げモーメントが作用すると同時に作用軸力が変動するため、RC アーチ橋では、変動軸力が RC 部材の曲げ復元力特性に及ぼす影響を考慮してその耐震性を評価することが重要である。そこで、本研究では、変動軸力の影響を見込んだ場合の RC アーチ橋の地震応答特性を解明することを目的として、RC アーチ橋に対する非線形動的解析を行った。その結果、RC アーチ橋の耐震性を評価する際には、変動軸力の影響を取り入れないとアーチリブの塑性化の箇所やその度合いを適切に評価できないことを明らかにした。

**Key Words:** seismic response, reinforced concrete arch bridge, varying axial force, fiber element

## 1. はじめに

道路橋示方書<sup>1)</sup>では、アーチ橋、斜張橋、吊橋などの耐震設計に際しては、動的解析を必要としている。これらの橋は、地震時の挙動が複雑であり、まだ地震応答特性が十分に解明されていないため、近年、こうした橋の地震応答特性に関して様々な検討が行われている。

RC アーチ橋においては、例えば、Kawashima and Mizoguti が兵庫県南部地震によって観測された地震動を作用させると RC アーチリブに曲げ塑性化が生じること、さらに RC アーチリブに作用する軸力が変動し、引張力さえ生じることが非線形動的解析に基づいて指摘している<sup>2)</sup>。また、森ら<sup>3)</sup>、畑ら<sup>4)</sup>による RC アーチ橋の地震応答解析例も報告されている。これらの研究では、いずれもリブに作用する変動軸力に注意する必要があることを指摘している。

そこで、本研究では、変動軸力の影響を見込んだ場合の RC アーチ橋の地震応答特性を解明することを目的として、RC アーチ橋に対する非線形動的解析を行ったので、その結果を報告する。

## 2. 解析対象とするRCアーチ橋およびそのモデル化

解析対象とするのは、図-1に示す谷部横断タイプの上路式固定 RC アーチ橋の橋軸方向の応答である。本橋は昭和 55 年の道路橋示方書に基づいて設計されており、橋

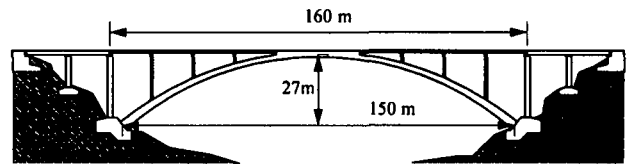
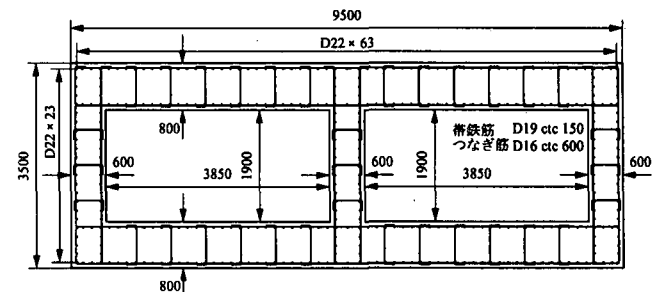
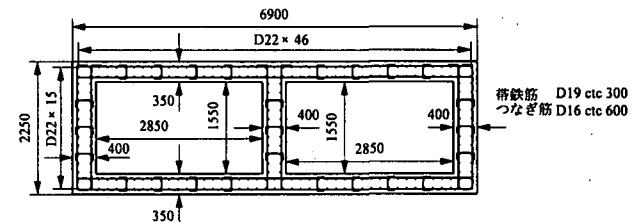


図-1 解析対象とするRCアーチ橋



(a) スプリング部



(b) アーチリブ 1/4 点, 3/4 点付近

図-2 RCアーチリブの配筋

長 160m、幅員 9.5m の一等橋である。耐震設計は震度法によって行われており、設計水平震度は橋軸方向、橋軸直角方向ともに 0.18 である。アーチ支間長は 150m、ア

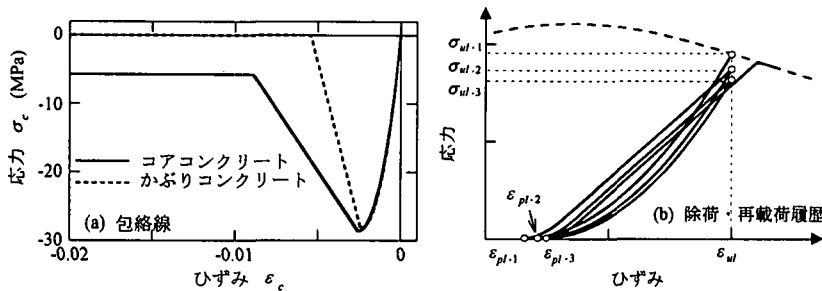


図-3 コンクリートの応力～ひずみモデル

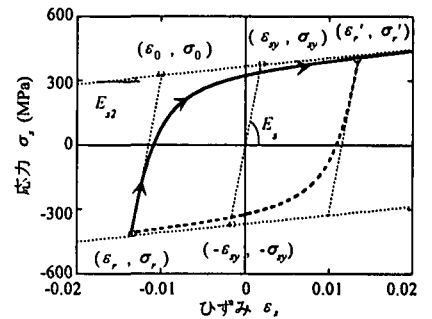
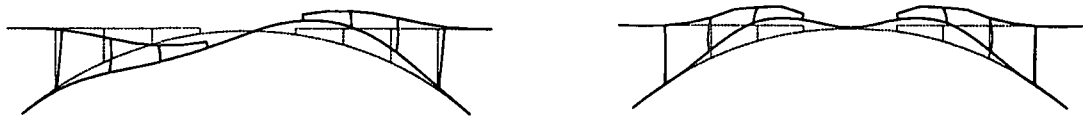


図-4 Menegotto-Pinto モデル



(a) 1次モード ( $T=1.07$  秒)

(b) 4次モード ( $T=0.32$  秒)

図-5 主要な固有振動モード (リブの剛性を全断面有効剛性とする場合)

一チライズは27mであり、スパンライズ比は5.6と標準的な形状となっている。

図-2に示すようにアーチリブは中空箱形断面で、アーチ基部に近づくほど断面が大きくなっている。アーチクラウン部では、アーチリブの断面を変化させずに補剛桁と一体化することにより死荷重や活荷重の大部分をアーチリブに分担させている。補剛桁はエンドポストにおいて可動支承によって支持されている。また、鉛直材はアーチリブには剛結、補剛桁にはピン結合されている。コンクリートの設計基準強度はアーチリブでは30MPa、補剛桁および鉛直材では27MPaであり、軸方向鉄筋にはSD345が用いられている。アーチスプリングング部では、軸方向鉄筋としてD22が150mm間隔で配置されており、軸方向鉄筋比は0.76%である。また、帯鉄筋にはD19が150mm間隔で配置されている。中間帯鉄筋は配置されておらず、D16のつなぎ筋が600mm間隔に配置されているだけである。ここで、つなぎ筋も横拘束筋とみなすと、横拘束筋体積比 $\rho_s$ は0.84%である。

このRCアーチ橋を153節点、158要素の離散型骨組みモデルとしてモデル化した。まず、基本的な振動特性を調べるため、アーチリブの剛性を降伏剛性として、鉛直材、補剛桁の剛性を全断面有効剛性としてそれぞれモデル化し、このモデルに対して線形動的解析を行うこととした。ここで、アーチリブの降伏剛性は、自重に相当する軸力を考慮して求めた。

さらに、アーチリブに作用する変動軸力がRCアーチ橋の地震応答特性に及ぼす影響に着目するため、アーチリブをファイバー要素でモデル化することとした。ファイバー要素のコンクリートおよび軸方向鉄筋の構成則には、図-3、4に示すモデルを仮定した。ここで、コンクリートの拘束効果および除荷・再載荷履歴は、著者らの提案モデル<sup>5,7)</sup>に基づき求めている。軸方向鉄筋の構成

則には、Bauschinger効果を考慮するために、Menegotto and Pintoによる提案モデル<sup>5,8)</sup>を用いた。

また、比較のために、変動軸力の影響を曲げ復元力特性に見込めないTakedaモデル<sup>9)</sup>によって、アーチリブの非線形復元力特性をモデル化した場合についても地震応答を求めることとした。リブの曲げモーメント～曲率関係の包絡線を求める際には、自重による軸力を考慮した。

### 3. 固有振動特性および線形動的解析によるRCアーチ橋の地震応答特性

図-5は、本橋の主要な振動モードを示した結果である。ここでは、リブの剛性を全断面有効剛性とした場合の結果を示している。1次の固有周期は1.07秒で、水平方向の応答が卓越する逆対称モードであり、4次の固有周期は0.32秒で、上下方向の応答が卓越する対称モードである。1次モードの累積有効質量は全質量の10%程度に過ぎず、本橋の応答には様々なモードが寄与する。

地震応答解析には、1995年兵庫県南部地震において記録された神戸海洋気象台のNS、UD成分の記録、JR鷹取駅のNS、UD成分の記録、1999年台湾集集地震において記録された日月潭のEW、UD成分の記録を用いた。動的解析には、積分時間間隔 $\Delta t=1/1000$ 秒として、Newmarkの一定加速度法による直接積分を用いた。不つり合いの収束計算は行わず、不つり合い力を次のステップに持ち越すこととした<sup>5)</sup>。

運動方程式の減衰行列を作成する際には、非線形履歴を考慮する部材に対して2%、それ以外の部材に対して5%の減衰定数を仮定し、ひずみエネルギー比例減衰法によって各モードの減衰定数を求めた。こうして得られた1次と4次のモード減衰定数をもとにRayleigh型減衰を仮定した。地震応答を求める前に、自重によってアーチリブに生じる変位、断面力を求め、この結果を初期値と

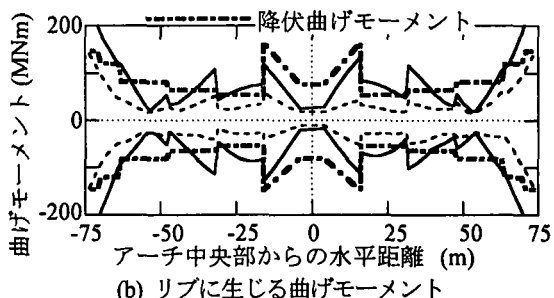
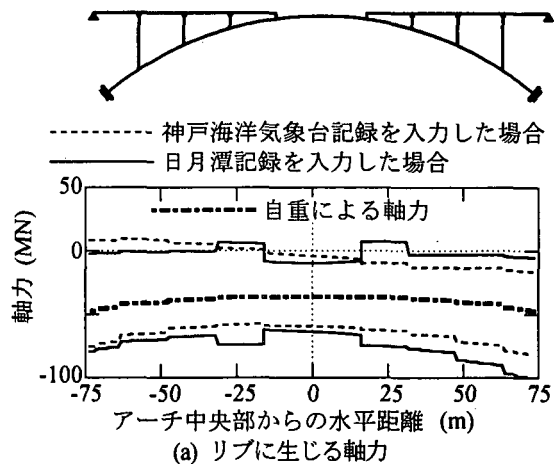


図-6 アーチリブに生じる最大断面力（線形解析）

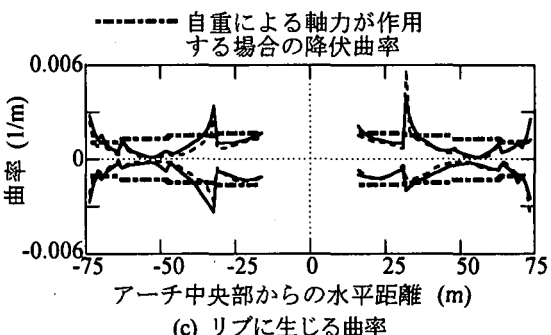
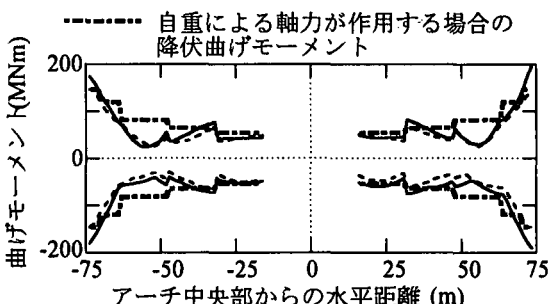
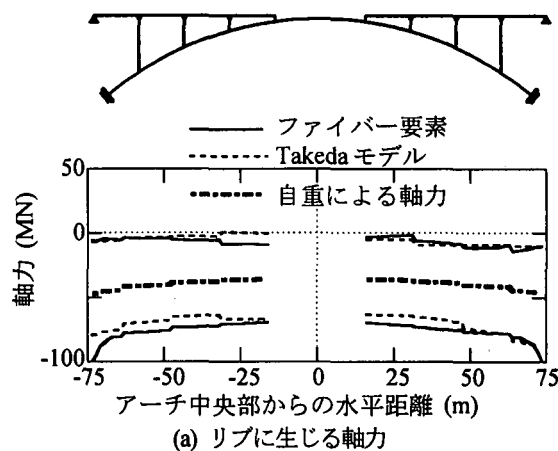


図-7 日月潭記録に対するアーチリブの最大応答

して地震応答を求めることとした。

図-6 は、神戸海洋気象台記録、日月潭記録に対する RC アーチ橋の線形応答をリブの最大応答軸力、最大応答曲げモーメントとして示した結果である。これによれば、軸力は自重による静的圧縮軸力の0~2 倍の範囲で変動すること、神戸海洋気象台記録を入力する場合にはリブは降伏しないが、日月潭記録を入力する場合にはスプリング部およびリブ 1/4、3/4 点付近においてリブが降伏することがわかる。また、ここには示さないが、JR 鷹取駅記録を入力する場合にもスプリング部およびリブ 1/4、3/4 点付近においてリブが降伏する。

#### 4. RC アーチ橋の地震応答特性に及ぼす変動軸力の影響

以上より、JR 鷹取駅記録、日月潭記録を入力するとリブが降伏することがわかったため、日月潭記録を入力する場合を例として、RC アーチ橋の非線形地震応答を示した結果が図-7 である。ここでは、リブの復元力特性をファイバー要素でモデル化した場合と Takeda モデルでモデル化した場合の最大応答断面力を比較している。これより、ファイバー要素を用いる場合には Takeda モデルを用いる場合よりも最大圧縮軸力が10~30%大きいこと、アーチ 1/4 点、3/4 点付近においてリブが塑性化する範囲が大きいことがわかる。

続いて、塑性化する箇所における曲げモーメント~曲率の履歴、軸力~曲げモーメントの履歴を詳しく調べることにした。図-8 はアーチ 3/4 点付近と右岸側スプリ

ング部の曲げモーメント~曲率、軸力~曲げモーメント、軸力~曲率の履歴曲線を示した結果である。ここで、曲げモーメント~曲率の履歴曲線は、ファイバー要素を用いる場合と Takeda モデルを用いる場合を比較し、軸力~曲げモーメント、軸力~曲率の履歴はファイバー要素による結果を初降伏値 ( $N-M_{y0}$ ,  $N-\phi_{y0}$  曲線) およびタイプ II 地震動を想定して道路橋示方書<sup>1)</sup>に基づき求めた終局値 ( $N-M_u$ ,  $N-\phi_u$  曲線) と比較している。

右岸側スプリング部の応答履歴に着目すると、ファイバー要素を用いた場合には正側、負側の最大曲率はおおむね 0.0025/m と同程度であるが、Takeda モデルを用いた場合には正側の最大曲率 0.0012/m に対して負側では 0.0037/m と、負側に偏った応答となる。軸力~曲げモーメントの履歴によれば、曲げモーメントが最大となるときに軸力もおおむね最大となるため、ファイバー要素を用いる場合には、変動軸力の影響により最大曲げモーメントがほぼ 200MNm に達する。これは自重による圧縮

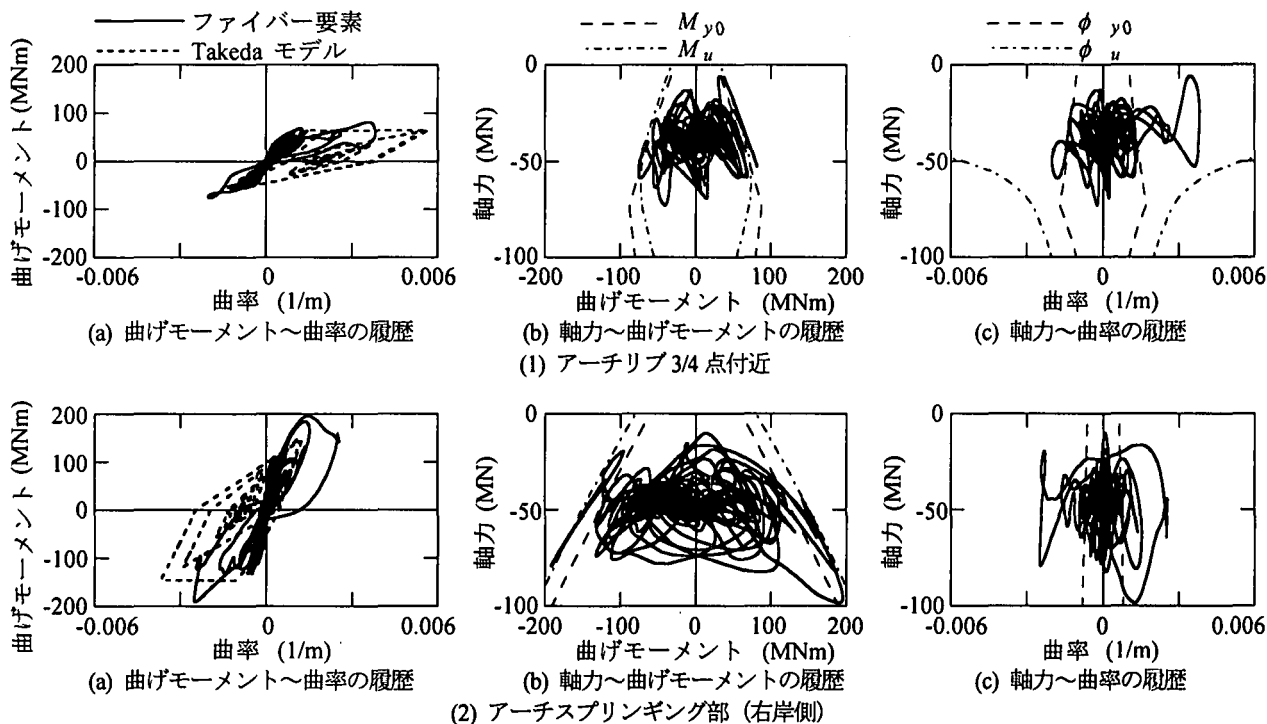


図-8 日月潭記録に対するアーチリブの履歴曲線

軸力が作用した場合の終局曲げモーメント (146MNm) よりも 30%大きい。

また、アーチリブ 3/4 点付近では、引張鉄筋の降伏よりも圧縮鉄筋の降伏が先行するつり合い破壊のレベルまで軸力が達している点の特徴である。このため、図-8 (1) (c) に示すように終局曲率に近い応答が生じる。引張鉄筋の降伏よりも圧縮鉄筋の降伏が先行する場合には、じん性に乏しい破壊モードになる可能性があるため注意が必要である。

## 5. 結論

- (1) 本橋に日月潭記録が作用すると、スプリング部において自重による静的圧縮軸力の 0~2 倍に相当する範囲の変動軸力が作用する。また、両岸のスプリング部とアーチリブ 1/4 点, 3/4 点付近においてリブが降伏する。
- (2) ファイバー要素により変動軸力が曲げ復元力特性に及ぼす影響を考慮して解析すると、これを考慮しない場合に比べて、塑性化する範囲が大きくなるが、塑性化の程度は、曲率にして 30%程度小さくなる。
- (3) アーチリブ 3/4 点付近では、引張鉄筋の降伏よりも圧縮鉄筋の降伏が先行するつり合い破壊のレベルまで軸力が達するため、終局曲率に近い曲率応答が生じる。引張鉄筋の降伏よりも圧縮鉄筋の降伏が先行する場合には、じん性に乏しい破壊モードになる可能性があるため十分注意が必要である。
- (4) 以上より、RC アーチ橋の耐震性を評価する際には、変動軸力の影響を取り入れないとリブの非線形化の箇所

やその度合いを適切に評価できないため、変動軸力の影響を考慮する必要がある。

## 参考文献

- 1) (社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 1996.
- 2) Kawashima, K. and Mizoguti, A.: Seismic Response of a Reinforced Concrete Arch Bridge, 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand, CD-ROM, No. 1824, 2000.
- 3) 森拓也, 武村浩志, 幸左賢二, 松田宏, 永井篤：コンクリートアーチ橋の非線形動的解析, 第 1 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, 土木学会, pp.245-248, 1998.
- 4) 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論文集, pp.2397-2402, 1998.
- 5) 塚淳一：コンクリートの横拘束効果および変動軸力の影響を考慮した橋の地震応答特性に関する研究, 東京工業大学博士論文, 2001.
- 6) 塚淳一, 川島一彦：長方形断面コンクリートに対する中間帯鉄筋の横拘束効果, 第 26 回地震工学研究発表会, 2001.
- 7) 塚淳一, 川島一彦, 庄司学：横拘束されたコンクリートの除荷および再載荷過程における応力度~ひずみ関係の定式化, 土木学会論文集, No.654/I-52, pp. 297-316, 2000.
- 8) Menegotto, M. and Pinto, P. E.: Method of Analysis for Cyclically Loaded R.C. Plane Frames Including Changes in Geometry and Non-Elastic Behavior of Elements under Combined Normal Force and Bending, *Proc. of IABSE Symposium on Resistance and Ultimate Deformability of Structures Acted on by Well Defined Repeated Loads*, pp. 15-22, 1973.
- 9) Takeda, T., Sozen, M. A. and Nielsen, N. M.: Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquakes, *J. Struct. Div., ASCE*, Vol. 96, No. ST12, pp. 2557-2573, 1970.