

# RC部材の非線形モデル化による地震応答特性の違いに関する考察

大塚 久哲<sup>1</sup>・水取 和幸<sup>2</sup>・首藤 政徳<sup>3</sup>・浜崎 大輔<sup>4</sup>

<sup>1</sup>フェロー 工博 九州大学大学院教授 工学研究科建設システム工学専攻 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

<sup>2</sup>正会員 (株) 銭高組 技術本部技術研究所 主席研究員 (〒160-1011 東京都新宿区西新宿3-7-1)

<sup>3</sup>正会員 (株) 銭高組 技術本部技術研究所 研究員 (〒163-1011 東京都新宿区西新宿3-7-1)

<sup>4</sup>正会員 (株) 長大 東日本事業本部構造事業部 (〒114-0013 東京都北区東田端2-1-3)

RC部材の非線形特性のモデル化には、梁部材として曲げモーメントと曲率の関係により定義し、武田モデルなどの履歴特性を構成則として与える手法と、ファイバー要素として定義する手法がある。本報告は、単柱のRC部材を解析対象とし、曲げモーメントと曲率の関係により非線形特性を定義した非線形梁要素と、RC断面をコンクリート部分と鉄筋部分の応力-ひずみ関係により非線形特性を定義したファイバー要素にモデル化した、2種類の非線形解析モデルによる応答特性の違いから、ファイバー要素を用いた応答に含まれる軸力について考察したものである。

**Key Words :** RC member, fiber model, nonlinear beam model, axial force fluctuation

## 1. はじめに

RC部材の非線形特性をモデル化する手法として、平面保持の仮定に基づき、曲げモーメントと曲率の関係(M- $\Phi$ )により定義した非線形梁要素がある。非線形梁要素は、構成則として武田モデルなどの履歴特性を与えたものである。また、RC断面をコンクリート部分と鉄筋部分に区分して、各々の応力-ひずみ関係( $\sigma$ - $\epsilon$ )により非線形特性を定義したファイバー要素を用いる手法がある。ファイバー要素は、2軸曲げ及び軸力変動を考慮することができ、RC部材の非線形特性をモデル化する有効な手法と考えられている。

ここでは、単柱のRC部材を対象として、非線形梁要素とファイバー要素にモデル化し、静的正負交番漸増解析と地震震応答解析を行った。本文は、RC部材の非線形特性のモデル化の手法により現れる、非線形応答特性の違いについて考察したものである。

## 2. 解析対象のRC部材

図-1に示すように、3.0m×5.0mのRC矩形断面を解析対象とし、解析方向は、Z軸方向についての検討を

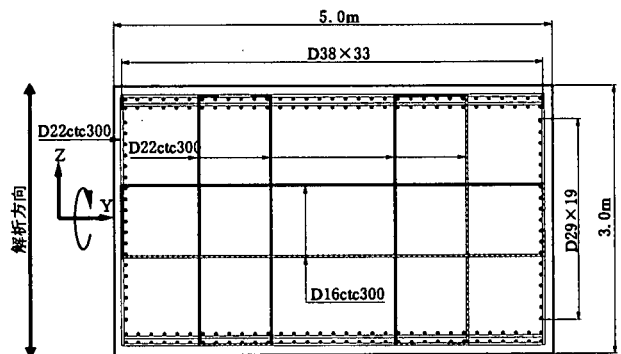


図-1 解析対象のRC断面

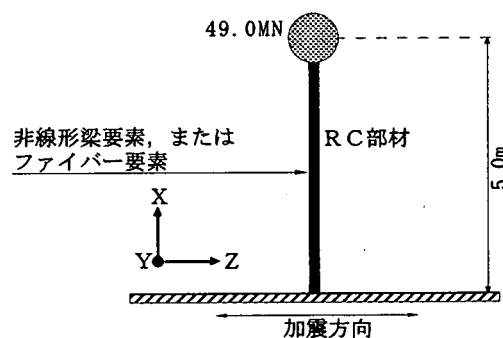


図-2 解析モデル

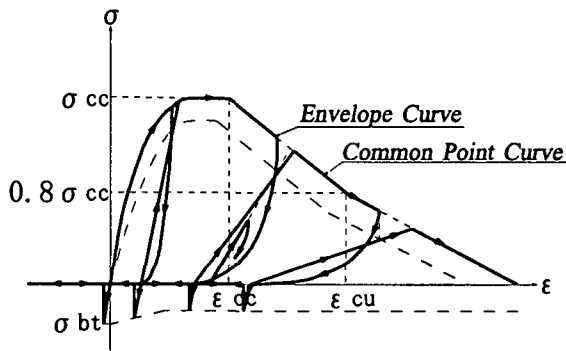


図-3 コンクリートの復元力特性(指数関数モデル)

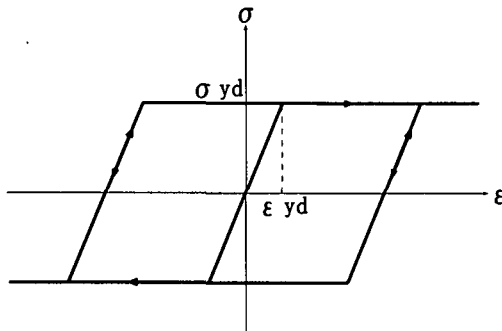


図-4 鉄筋の復元力特性

行った。軸方向鉄筋は、Z軸方向には、D38が、Y軸方向にはD29がそれぞれ配置されている。また、中間帯鉄筋は、Y軸方向に対しD16が間隔300mm、Z軸方向に対してD22が間隔300mmとなっている。さらに、コンクリートの設計基準強度は39.2MPa、曲げ引張強度は2.7MPaである。

### 3. 解析モデル

解析モデルを図-2に示す。単柱のRC部材を解析対象としており、上部構造の重量として、49.0MNを初期軸力として考慮し、図中のRC部材を非線形要素としてモデル化した。

非線形梁要素は、曲げモーメントと曲率関係(M-Φ)により非線形特性を定義し、ひび割れモーメントと降伏モーメントによりスケルトンを設定した。M-Φ関係は、平面保持の仮定が成り立つものとして、道路橋示方書・耐震設計編のコンクリートの応力度-歪み曲線をもとに算出した。また、復元力特性は、武田モデル(トリニア型)を用いた。ファイバー要素は、RC断面のコンクリート部分と鉄筋部分に区分し、各々の応力度と歪み関係により非線形特性を定義した。コンクリート部分の応力度-歪み関係は、道路橋示方書・耐震設計編のコンクリートの応力度-歪み曲線を用い、引張応力に対しては曲げ引張強度(σ<sub>bt</sub>)までを負担し、以降は応力を負担できないものとした。なお、コンクリートと鉄筋の復元力特性を、図-3および図-4に示す。

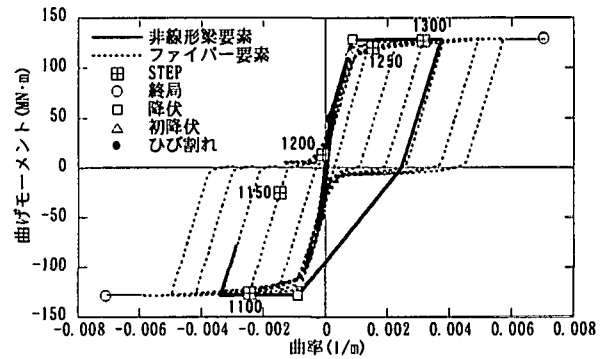


図-5 静的正負交番漸増解析のM-Φ履歴曲線

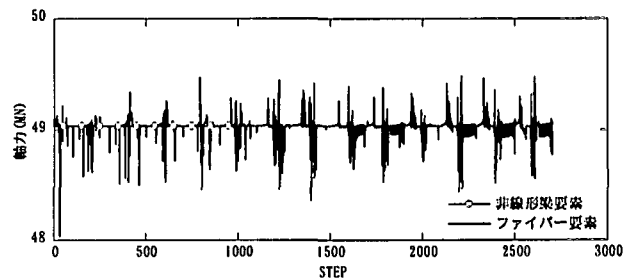


図-6 静的正負交番漸増解析の応答軸力

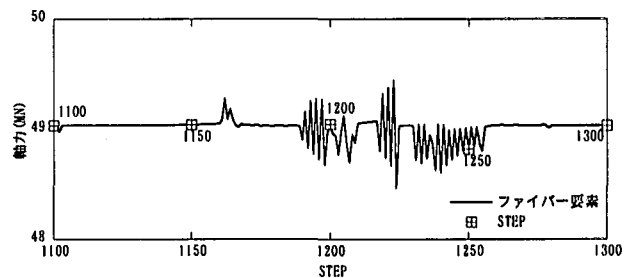


図-7 ファイバー要素の応答軸力(1100~1300STEP)

### 4. 静的正負交番漸増解析

繰り返し強制変位による静的正負交番漸増解析結果から、2つの解析モデルのモーメントと曲率の履歴曲線を図-5に、応答軸力を図-6に示す。

図-5のM-Φ履歴曲線より、2つの解析モデルは、初降伏点まで良く一致しており、初降伏点から多少の差が生じているものの、終局耐力はほぼ同等の値を示している。また、ファイバー要素での除荷剛性は、武田モデルとほぼ一致しているが、正負が反転する再載荷時には、モーメントが0近傍で原点指向の履歴となる。図-6は応答軸力を示したもので、非線形梁要素の応答軸力は、初期軸力から一定で推移し変動はあらわれていないのに対し、ファイバー要素の応答軸力には、変動が生じている。この現象は、図-5と図-7に示した解析ステップの対比から、モーメントあるいは曲率が0近傍および降伏点付近で生じているが、その値はわずかであり、不釣合応力の処理によるものである。したがって、剛性の急激な変化に伴って、数値解析上生じるものと考えられる。

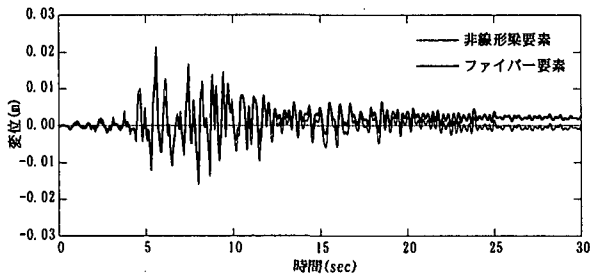


図-8 応答変位波形

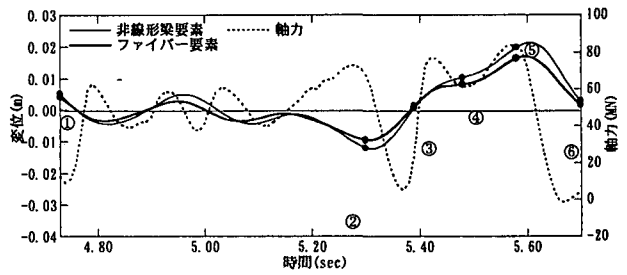


図-11 応答変位波形(4.73秒～5.70秒)

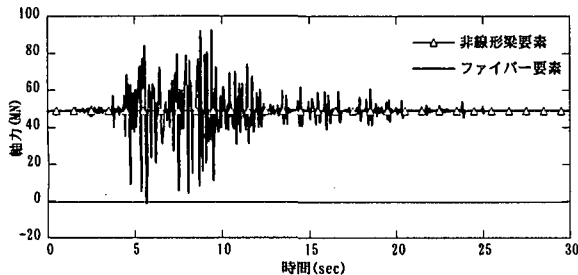


図-9 応答軸力波形

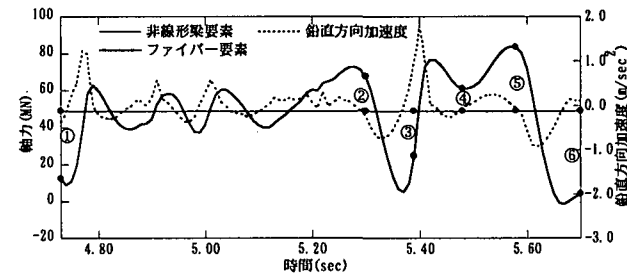


図-12 応答軸力波形(4.73秒～5.70秒)

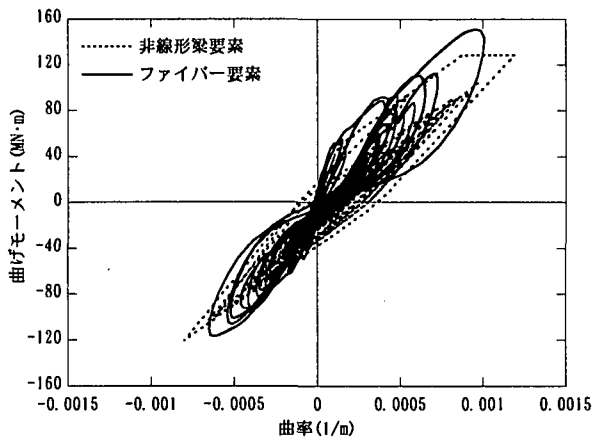


図-10 M-φ履歴曲線

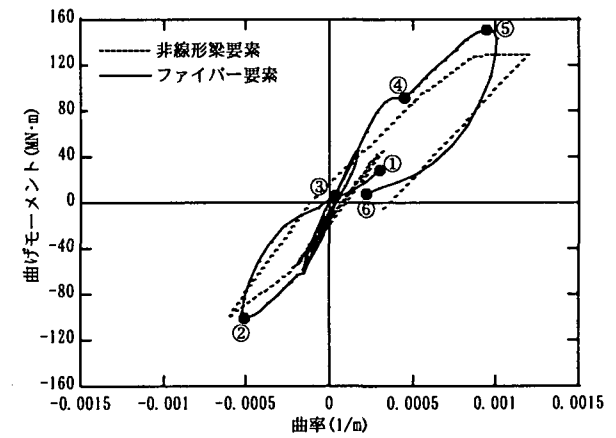


図-13 M-φ履歴曲線(4.73秒～5.70秒)

## 5. 地震応答解析

ここでは、水平方向のみの加震による、地震応答解析を行い、その結果のうち応答変位、応答軸力およびM-φ履歴曲線について、2つの解析モデルでの応答比較を図-8～図-10に示す。応答変位は、非線形梁要素では最大2.1cmの応答が生じるのに対し、ファイバー要素では最大1.7cmで、残留変位が2.4mm程度生じている。また、ここには示していないが、上下方向成分の変位は、非線形梁要素では生じていないが、ファイバー要素には応答があらわれている。

応答軸力は、非線形梁要素では、初期軸力から変動することなく推移している。一方、ファイバー要素では、地震動が水平成分のみを入力しているにも関わらず、初期軸力の2倍近くの応答軸力が生じている。M-φ履歴曲線については、ファイバー要素は、最大151MN・m

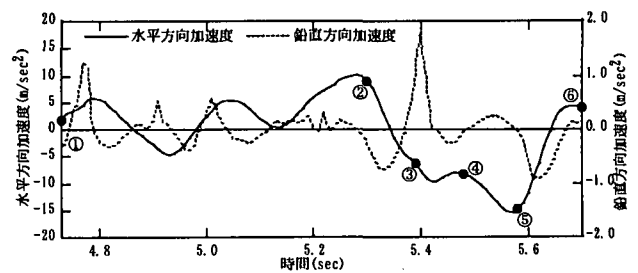


図-14 ファイバー要素の応答加速度波形(4.73秒～5.70秒)

を生じており、非線形梁要素の応答に対して、約17%程度大きめの応答値となっている。また、ファイバー要素では、ひび割れモーメントを越えた後の戻り勾配が原点指向の履歴を示し、その後の応答時の剛性は、非線形梁要素に比べ、ファイバー要素の方が大きくなっている。

この全時刻歴のうちから、4.73秒～5.70秒間の応答変位、応答軸力、M-φ履歴および水平と鉛直方向加

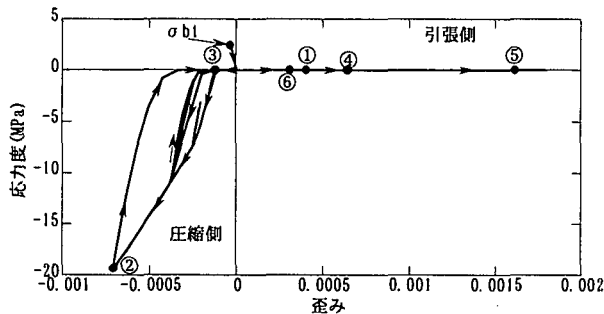


図-15 最外縁コンクリートの応力度-歪み曲線(4.73秒~5.70秒)

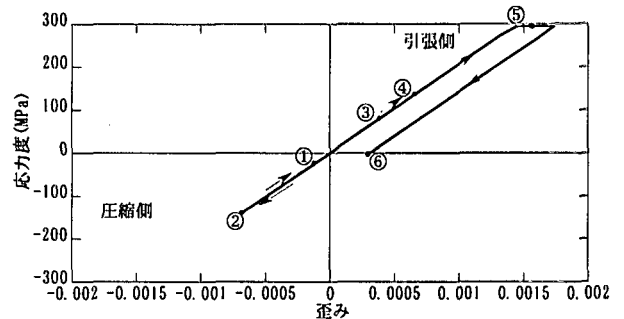


図-16 最外縁鉄筋の応力度-歪み曲線(4.73秒~5.70秒)

速度波形を拡大し、詳細比較したものを図-11~図-14に示す。図-11~図-14の①~⑥は、それぞれの結果において、同じ時刻に対応している。M- $\Phi$ 履歴曲線からわかるように、負の最大曲げモーメントから反転して、正の最大曲げモーメントに移る時刻間である。

### 5. ファイバー要素の応力度-歪み曲線

地震応答解析結果のうち、コンクリートおよび鉄筋の応力度-歪みの関係から、応力負担の状況について検討した。図-15に最外縁コンクリートの応力度-歪み曲線を、図-16に最外縁鉄筋の応力度-歪み曲線をそれぞれ示す。着目したコンクリートと鉄筋のファイバーは、図-13のM- $\Phi$ 履歴曲線において、正の曲げモーメントが発生したときに、引張応力となる最外縁位置の要素を抽出した。履歴図は図-11~図-14に示したものと同一時間帯のもので、最外縁コンクリートが曲げ引張強度( $\sigma_{bl}$ )に達した時点から5.70秒までを示している。コンクリートは曲げ引張強度を経験すると、それ以降は応力を負担しないものとしており、図-14の①の時点において、鉄筋が引張応力を徐々に負担していることが分かる。その後、②の最大圧縮応力を経験し、再度、引張応力側に反転する際、コンクリートが負担していた応力がなくなるため、急に鉄筋側に引張応力が流れている。また、図-15および図-16の③から④を経て⑤に至る過程において、図-13に示したM- $\Phi$ 履歴の④付近で、急に曲げ剛性に変化があらわれる原因についても、コンクリートに与えた応力度-歪み関係の特性、軸方向鉄筋との応力負担の釣り合いなどから生じているものと考えられる。

### 6. ファイバー要素による応答軸力

ファイバー要素による応答軸力波形は、図-9に示すように非常に短い時間で正負に大きく変動し、その後初期軸力に収束している。また、図-12の応答軸力波形に鉛直方向加速度波形を位相のずれを考慮して重ね合わせると、その周期は一致する。しかし、図-14に示した水平と鉛直方向の応答加速度波形を見ると、全く異なる

周期で応答しており、上下(軸力)の応答は構造系の応答とは考え難い。これは、剛性の急激な変化とそれに伴う不釣合力を処理する過程で生じる歪みの変動と考えられ、不釣合力の処理前後を総合的に評価する必要があると考えられる。

### 7. 結論

静的交番解析では、非線形梁要素とファイバー要素によるM- $\Phi$ 履歴のスケルトンおよび除荷剛性は武田モデルに近い特性である。また、ファイバーモデルで生じる軸力の変動は小さい。地震応答解析では、応答変位は非線形梁の方が大きめの応答を生じるが、ファイバー要素では残留変位が生じた。応答軸力はファイバーモデルの場合に大きな応答値を示した。しかし、ファイバーモデルでは、細分化された要素の剛性変化と不釣合力の処理が短時間に連続して行われるため、軸歪みの変動が衝撃的な挙動を示すと考えられ、不釣合力の処理前後をトータルに評価する必要があると考えられる。

### 参考文献

- 1)道路橋示方書・同解説(V耐震設計編),平成8年12月 社団法人 日本道路協会
- 2)Y.YAMADA,H.IEMURA,T.MATSUMOTO:  
Stress-Strain Inelastic Earthquake Response Analysis of Reinforced Concrete Frame Structures,IABSE COLL OQUIUM DELFT 1987, pp.599~608
- 3)森, 武村他: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, 1998.1.,pp.245~248
- 4)堺淳一,川島一彦:ファイバー要素を用いた地震応答解析における上下方向応答に関する検討,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,1998.12, pp.379~382.
- 5)水取, 首藤, 山花, 大塚:中路的RCアーチ橋の地震応答と耐震性評価,土木学会構造工学論文集,Vol.44A,1998.3, pp.769~778
- 6)水取, 大塚, 浜崎:中路的RCアーチ橋の耐震性向上に対する弾塑性パネの効果,土木学会構造工学論文集,Vol.45A, 1999.3.,pp.975~984
- 7)浜崎, 大塚, 水取:RC部材の非線形モデル化による地震応答特性の違いに関する基礎的考察, 第54回土木学会年次学術講演会概要集, 1999.9.(発表予定)