

# 論文 鉄筋座屈が RC 柱の地震応答に及ぼす影響評価解析

安藤 嵩久<sup>\*1</sup>・中村 光<sup>\*2</sup>・上田 尚史<sup>\*3</sup>・国枝 稔<sup>\*4</sup>

**要旨:** 軸方向鉄筋座屈による鉄筋コンクリート (RC) 構造物の履歴挙動ならびに周期特性の変化が RC 柱の応答に及ぼす影響を検討することを目的として、鉄筋の座屈モデルを導入したファイバーモデルを用いて静的繰り返し解析および地震応答解析を行った。その結果、鉄筋の座屈モデルを導入することで、座屈後の履歴挙動の変化を適切に再現することができることを示した。また履歴挙動の変化により、周期特性が変化し、最大加速度以降において動的応答が増大する場合があることを確認した。

**キーワード:** 座屈, RC 柱, 地震応答解析, ファイバーモデル, 履歴挙動

## 1. はじめに

曲げ破壊卓越型の RC 部材は、最大荷重後にかぶりコンクリートの剥落、軸方向鉄筋の座屈が生じ、耐力が低下して終局を向かえることが知られている<sup>1)</sup>。したがって RC 構造物のポストピークから終局時にいたるまでの耐震性能を精度よく解析するためには、軸方向鉄筋の座屈挙動を正確に評価する必要がある。また、RC 構造物は損傷により非線形挙動を呈するにつれ、履歴挙動や周期特性が変化していく。特に鉄筋座屈後には、復元力が低下するとともに内部履歴挙動も逆 S 字型へと変化する。そのため地震時には、最大加速度作用後においても履歴挙動の変化により応答が増大することが予想される。

そこで本研究ではファイバーモデルによる非線形有限要素解析に、軸方向鉄筋の座屈モデルを導入し、鉄筋座屈が RC 柱の応答に及ぼす影響の検討を行った。具体的には、RC 橋脚模型の正負交番載荷実験ならびに振動台加振実験を解析対象とし、鉄筋座屈の影響を評価した。さらに、余震による地震応答を模擬するために、地震波を 3 波連続入力する地震応答解析を行い、鉄筋座屈による損傷が応答に及ぼす影響について検討を行った。

## 2. 解析概要

### 2.1 解析理論

本研究では、はり要素の非線形有限要素解析手法<sup>2)</sup>にファイバーモデルを適用し、材料非線形性を考慮して解析を行った。構造物が地震動を受ける場合の多自由度の運動方程式は、一般的に式(1)のように表される。

$$[M]\{\ddot{y}\} + [C]\{\dot{y}\} + [K]\{y\} = -[M]\{\ddot{y}_0\} \quad (1)$$

ここで、 $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ は、それぞれ構造物の質量マトリクス、減衰マトリクス、剛性マトリクスである。式(1)に対して数値積分は Newmark の  $\beta$  法を用いた。本研究においては、減衰マトリクスは考慮せず、 $\beta=0.49$  として数値減衰を考慮して行った。

### 2.2 材料モデル

#### 2.2.1 コンクリートモデル

コンクリートは図-1に示すように圧縮応力領域では、最大圧縮応力まで二次放物線で増加し、それ以降は終局ひずみ ( $\epsilon_{cu}$ ) まで直線的に減少するモデルとし、圧縮破壊エネルギーを考慮した<sup>3)</sup>。一方、引張応力領域では、応力は最大引張応力までは線形弾性体とし、それ以降は Tension stiffening 効果を考慮して徐々に低減するモデルとした。また履歴挙動は、圧縮応力下では前川ら<sup>4)</sup>の提案式よ

\*1 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 (正会員)  
 \*2 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 教授 博(工) (正会員)  
 \*3 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 助教 修(工) (正会員)  
 \*4 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 准教授 博(工) (正会員)

り算定した塑性ひずみ ( $\varepsilon_z$ ) を用いて応力が直線的に減少するものとし、その後引張側へ移行する。引張応力下では長沼ら<sup>5)</sup>のモデルを参考に、**図-1**に示すように直線的に圧縮側へ移行するものとした。その際、局部接触による影響を考慮した。

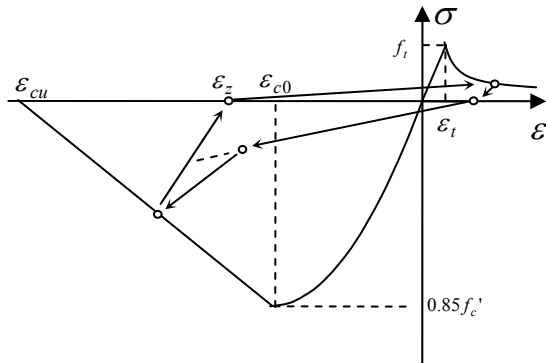


図-1 コンクリートモデル

### 2.2.2 鉄筋モデル

鉄筋の応力-ひずみ関係は田上ら<sup>6)</sup>により提案された座屈モデルを用いた。このモデルは、座屈が生じない場合の応力-ひずみ関係は**図-2**に示すような等方硬化ならびに移動硬化を考慮したTri-Linearモデルである。一方、座屈後の挙動は、座屈応力をオイラーの理論式、エンゲッサ・カルマンの理論式、降伏応力を用いて理論式により決定する。座屈応力到達後、圧縮応力域では座屈長さに従い応力が徐々に減少するモデルであり、引張応力域では座屈の程度に従い凸型ならびに、逆S字型の挙動を示すものである。**図-3**に座屈した鉄筋の繰り返し履歴モデルを示す。また、地震時の最大応答以降に一般的に生じると推測される、漸減繰り返し载荷のように包絡線内で繰り返しを受ける場合の挙動は**図-4**に示すように包絡線に

漸近する挙動を表す。

### 2.3 座屈解析

本研究では座屈は柱基部に発生するものと仮定し、柱基部一要素の最外縁の軸方向鉄筋において上記の座屈モデルを適用し、それ以外の要素の鉄筋には**図-2**に示すTri-Linearモデルの応力-ひずみ関係を用いた。なお圧縮応力下の座屈モデルは軟化型の応力-ひずみ関係となるため、要素寸法の影響を考慮して、座屈長さを用いて式(2)より座屈後の鉄筋のひずみを変換した。

$$\varepsilon' = \varepsilon_b + (\varepsilon - \varepsilon_b) \cdot \frac{L}{L_p} \quad (2)$$

ここで  $\varepsilon'$  は変換後の鉄筋のひずみ、 $\varepsilon_b$  は座屈開始時のひずみ、 $\varepsilon$  は変換前のひずみ、 $L$  は柱基部の要素長さ、 $L_p$  は軸方向鉄筋の座屈長である。

座屈長さの決定には浅津ら<sup>7)</sup>による座屈長さの簡易算定式を用いた。

$$L_p = C_2^4 \sqrt{E_0 I_0 / \beta_n} \quad (3)$$

$$I_0 = \pi \phi^4 / 64$$

ここで  $L_p$  は軸方向鉄筋の座屈長(mm)、 $E_0$  は軸方向鉄筋の弾性係数(N/mm<sup>2</sup>)、 $I_0$  は軸方向鉄筋の断面2次モーメント(mm<sup>4</sup>)、 $\beta_n$  は等分布バネ定数(N/mm<sup>2</sup>)、 $C_2$  は定数であり、本研究では  $C_2=2.7$  とする。

座屈の判定については島ら<sup>8)</sup>のモデルにより発生条件を決定した。式(4)に示すように、軸方向鉄筋の座屈しようとする力  $S$  が、かぶりコンクリートによる抵抗力  $R_c$  と帯鉄筋による抵抗力  $R_s$  との和を上回ったときに座屈が生じるものとした。

$$S \geq R_c + R_s \quad (4)$$

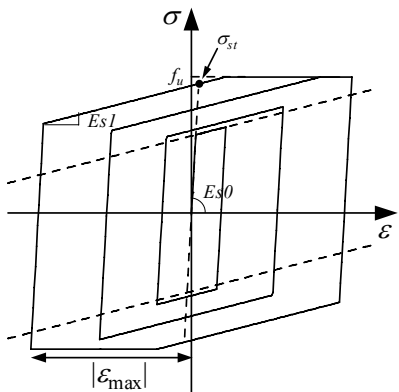


図-2 Tri-Linearモデル

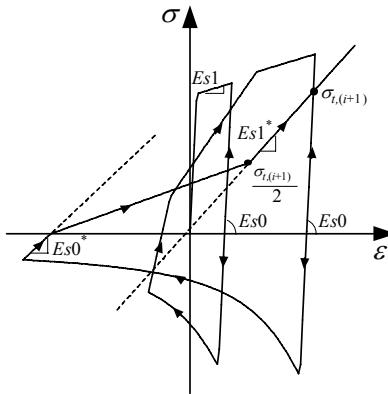


図-3 繰り返し履歴モデル

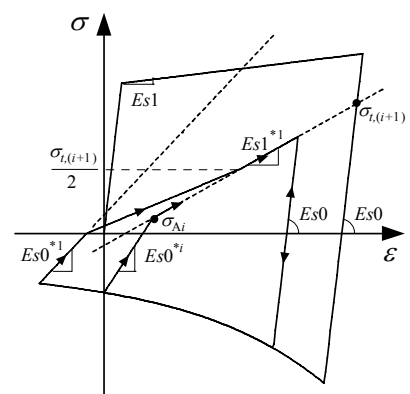


図-4 漸減繰り返し履歴モデル

### 3. 静的繰返し载荷実験に対する座屈モデルの影響評価

#### 3.1 実験概要およびモデル化

星隈らによる曲げ破壊型 RC 橋脚模型の静的正負交番载荷実験<sup>1)</sup>を解析対象に用いた。供試体の概要を図-5に示す。実験では、軸力は軸圧縮応力で 1MPa に相当する 360kN を加えながら、各载荷ステップにおける载荷繰返し回数を 1 回 ( $1\delta_y = 11\text{mm}$ ) とし、正負交番载荷が行われた。

静的繰返し解析を行うに当たり、柱下端部固定としたファイバーモデルで軸方向に 9 要素でモデル化した。要素断面は加振方向に 30 分割とした。また解析に用いた材料定数は実験を参考に、コンクリートの圧縮強度は 29.6MPa、引張強度は 2.2MPa とした。鉄筋の降伏強度は 368MPa、ヤング係数は 182GPa とした。

#### 3.2 実験値と解析値の比較

図-6 (a), (b), (c)に実験により得られた荷重-変位関係ならびに、座屈を考慮しない場合、座屈を考慮した場合の解析により得られた荷重-変位関係を示す。なお、座屈を考慮しない場合の鉄

筋の応力-ひずみ関係は図-2の Tri-Linear モデルとした。

実験では  $6\delta_y$  の载荷で基部から 20cm までの範囲でコンクリートがはらみだし始め、 $7\delta_y$  の载荷でかぶりコンクリートの剥落とともに水平耐力の低下が生じた。荷重-変位関係は紡錘型から逆 S 字型へと変化しながら、変位の増加とともに復元力が低下している。

図-6 (b)に示す鉄筋の座屈を考慮しない場合の解析では、大变位領域でも荷重低下をせず、エネルギー吸収の非常に大きい紡錘型となり、荷重-変位関係は実験結果と大きく異なることが示されている。一方、図-6 (c)に示す座屈を考慮したモデルは、 $6\delta_y$  の繰返し時に式(4)の座屈条件を満たし、その後履歴挙動が逆 S 字型に移行するとともに、復元力が徐々に低下する挙動を示した。荷重-変位関係は、復元力を若干大きめに評価するが、荷重低下の開始から座屈後の軟化挙動に至るまで、実験の挙動を概ねとらえている。したがって今回用いた座屈モデルにより、RC 柱における座屈後の履歴挙動の変化を適切に再現できると思われる。

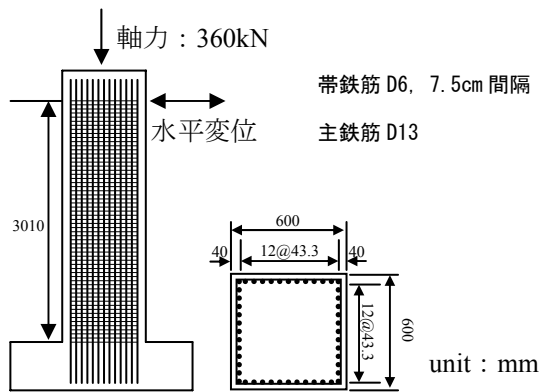


図-5 供試体概要

### 4. 振動台加振実験に対する座屈モデルの影響評価

#### 4.1 実験概要およびモデル化

旧建設省土木研究所で行われた振動台実験<sup>9)</sup>に用いられた RC 道路橋脚を解析対象に用いた。RC 橋脚の概要を図-7に示す。実験模型は橋長 15m、桁総重量 401kN の 2 径間単純桁橋で、桁端部は摩

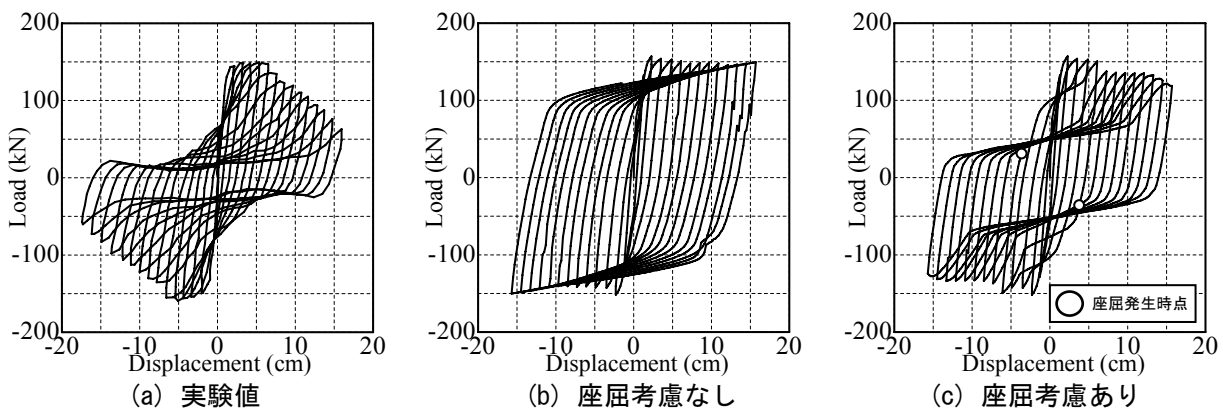


図-6 荷重-変位関係

擦の非常に小さいローラー支承を介して鋼製橋脚に支持されており、上部構造の慣性力はほとんど全て中央のRC橋脚に伝わる構造になっている。振動台の入力には、1983年日本海中部地震において八郎潟干拓堤防上で記録された加速度波形を時間軸で1/2に縮めたものを用いている。実験では加速度を変化させたものを3種類用意し、それぞれ実験A,B,Cとして行っている。本研究では入力加速度の最大値が402galであった実験Cを対象に解析を行った。図-8に実験Cにおける時刻歴入力加速度波形を示す。また、柱頂部の時刻歴応答を図-9に示す。

地震応答解析を行うに当たり、柱下端部固定としたファイバーモデルで軸方向に8要素でモデル化し、要素断面は加振方向に50分割とした。橋脚が負担する桁重量は200kNの一定軸力として橋脚天端の要素に付加した。また、桁重量は頂部要素に適切な密度を与えることにより考慮した。解析に用いた材料定数は、コンクリートの圧縮強度は

30.3MPa、引張強度は2.2MPaとした。鉄筋の降伏強度は357MPa、ヤング係数は174GPaとした。

#### 4.2 実験値と解析値の比較

図-10(a)、(b)にそれぞれ座屈を考慮しない場合、座屈を考慮した場合の解析により得られた時刻歴応答波形を示す。また、図-11(a)、(b)、(c)に実験により得られた荷重-変位関係、座屈を考慮しない場合、座屈を考慮した場合の解析により得られた荷重-変位関係を示す。また、図-12に

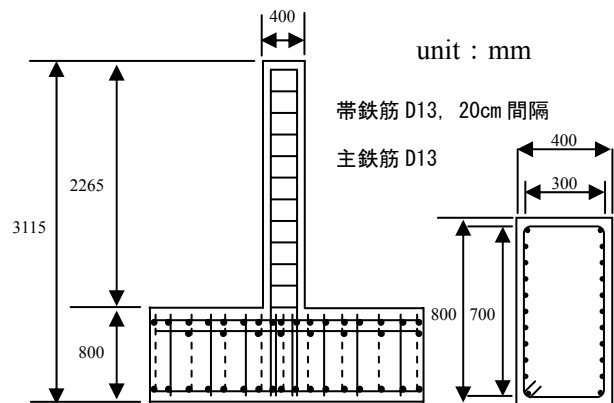


図-7 実験供試体概要

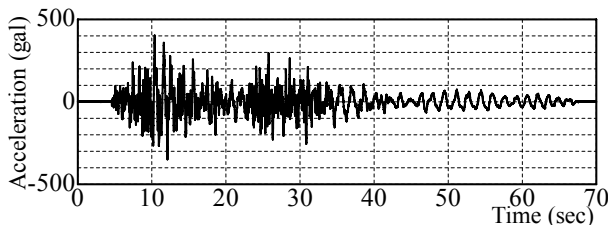


図-8 入力加速度波形

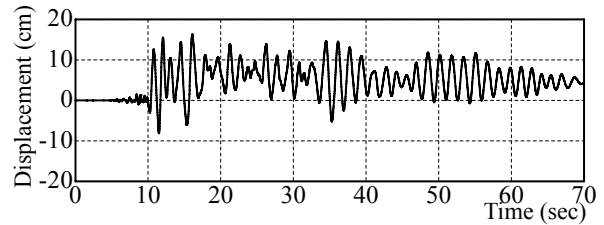
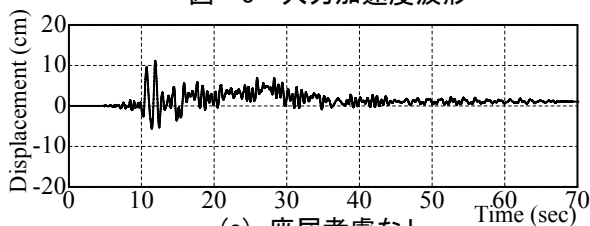
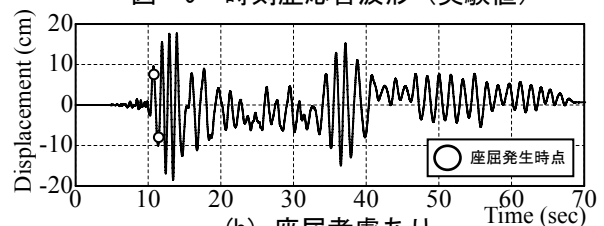


図-9 時刻歴応答波形 (実験値)

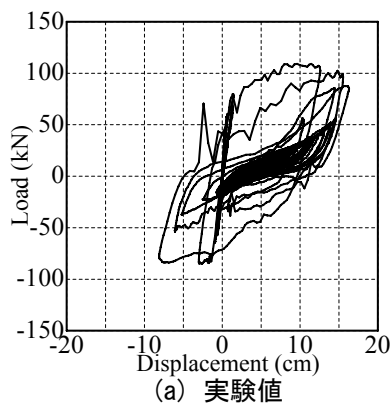


(a) 座屈考慮なし

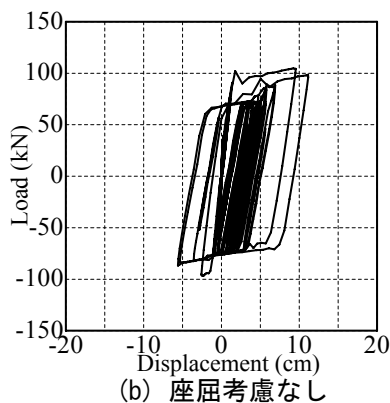


(b) 座屈考慮あり

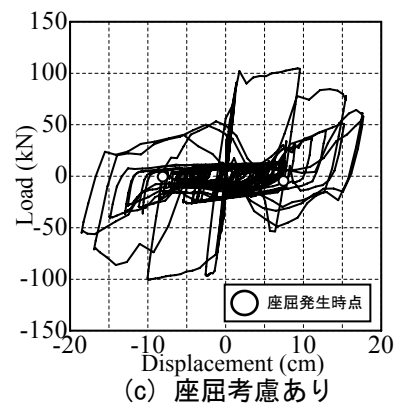
図-10 時刻歴応答波形



(a) 実験値



(b) 座屈考慮なし



(c) 座屈考慮あり

図-11 荷重-変位関係

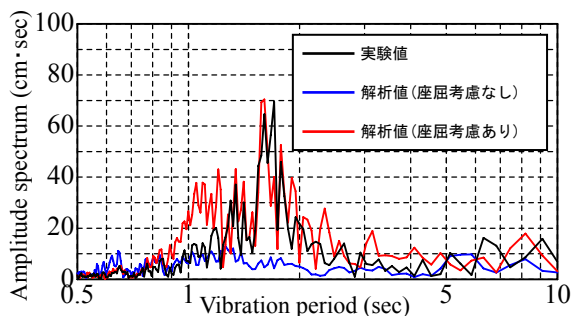


図-12 時刻歴応答波形のフーリエスペクトル  
時刻歴応答波形をフーリエ変換し、応答周期との関係を表したものを示す。

実験では振動後の観察により、橋脚基部でコンクリートがはく離し、軸方向鉄筋の座屈が発生したことが確認されている。また、加振開始約 10 秒後に入力加速度がピークに達したときに残留変位が生じている。荷重-変位関係は最大応答を境として履歴曲線が紡錘型から逆 S 字型に変化し、エネルギー吸収量が低下していることを示している。この橋脚模型の弾性域における固有周期は 0.52 秒であるが、図-12 より、応答周期は約 1.3 秒から 1.7 秒が卓越していることが確認できる。

図-10(a)に示す座屈を考慮しない解析では、最大応答変位記録後、応答は減少している。荷重-変位関係においてもエネルギー吸収量の大きい紡錘型となり、実験結果と大きく異なり、明らかに座屈後の応答挙動をとらえていない。また、図-

12 より、振幅スペクトルの絶対値ならびにそのピーク周期も実験結果と一致していない。

一方、座屈を考慮した解析では加速度入力開始 10.82 秒後に片側の鉄筋が、11.48 秒後に反対側の鉄筋が式(4)の座屈条件を満たし、その後応答は増大し、比較的大きな周期で振動している。荷重-変位関係においては、座屈発生後、荷重低下が始まり、履歴曲線は紡錘型から逆 S 字型へと移行し、エネルギー吸収量が減少している。実験値と比較すると、解析では残留変位が生じなかったため、その分の応答変位が異なるが、加速度入力開始約 15 秒後以降の応答において、振幅は概ね一致している。また、図-12 より、振幅スペクトル値がピークとなる応答周期ならびに、ピーク値前後のスペクトル値も実験値と概ね一致していることから、座屈による振動周期の変化を捉えていると考えられる。したがって今回用いた座屈モデルにより、地震応答時の RC 柱における座屈後の応答、履歴挙動の変化も適切に再現できると思われる。このように、座屈後は、履歴曲線が逆 S 字型へ移行し、剛性、復元力の低下と著しいエネルギー吸収能力の低下により、最大加速度以降の比較的小さな加速度時でもある程度の応答変位が生じることが解析的に確認された。

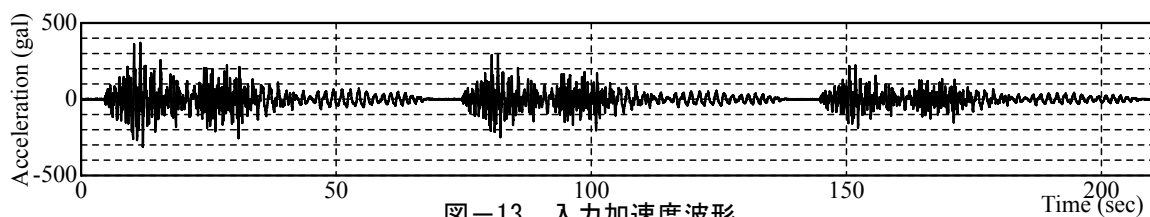
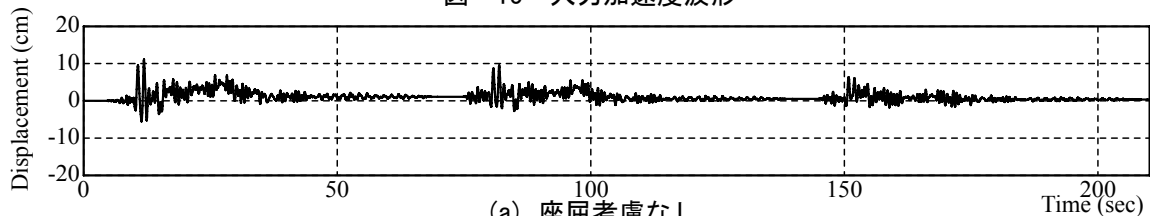
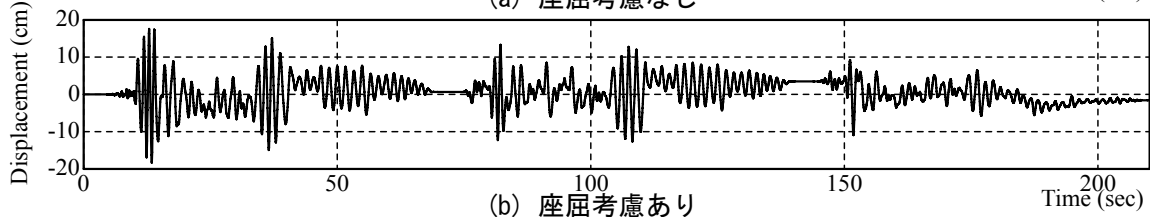


図-13 入力加速度波形



(a) 座屈考慮なし



(b) 座屈考慮あり

図-14 時刻歴応答波形

## 5. 余震による応答の影響評価解析

座屈による損傷が地震応答に及ぼす影響を検討するため、地震波を3波連続入力することにより地震応答解析を行った。解析は、前節で用いた図-7に示すRC橋脚模型を対象とした。また入力地震波も前節で用いた地震波を用い、加速度を2波目は1波目の0.8倍、3波目は0.6倍としたものを連続入力した。図-13に入力加速度波形を示す。

図-14(a), (b)に座屈を考慮しない場合、考慮した場合の時刻歴応答変位を示す。各波が入力された時点の変位を原点として考えると、各波における最大応答変位は、座屈を考慮しない場合1波目11.18cm, 2波目7.40cm, 3波目5.30cmであった。座屈を考慮した場合、それぞれ18.52cm, 12.66cm, 10.98cmであった。座屈による損傷を考慮した場合、加速度を小さくした2波目以降も座屈を考慮しない場合と比較して、非常に大きな応答が生じる結果となった。また、2波目においては最大応答が最大加速度作用後の波の後半に発生しており、内部履歴の変化による周期特性の変化の影響が顕著に生じている。したがって損傷による内部履歴の変化が、RC構造物の固有周期と地震動の周期特性の関係に与える影響についての検討を、今後一層行っていく必要があると考えられる。

## 6. 結論

ファイバーモデルによる有限要素解析に軸方向鉄筋の座屈モデルを導入し、鉄筋座屈がRC柱の応答に及ぼす影響評価を行い、以下の結論を得た。

- (1) RC柱の静的繰り返し載荷解析の結果、鉄筋座屈を考慮して解析を行うことで、軸方向鉄筋の座屈に伴う荷重低下から、エネルギー吸収量の低下による履歴挙動の変化に至るまで、概ね再現することができた。
- (2) 地震応答解析の結果、鉄筋座屈を考慮して解析を行うことで、軸方向鉄筋の座屈による応答変位、応答周期の変化を概ね再現することができた。
- (3) 3波連続入力による地震応答解析の結果、鉄筋座屈を考慮した場合、2波目以降エネルギー吸

収量の低下と固有周期の変化により、座屈を考慮しない場合と比較して非常に大きな応答となった。これにより、最大加速度作用後における応答の増大が確認された。

## 謝辞

本研究は平成18年度科学研究費補助金(基盤研究(B):代表者 梅原秀哲)によって行った。ここに記して謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 星隈順一, 運上茂樹, 川島一彦, 長屋和宏: 載荷繰り返し特性と塑性曲率分布に着目した曲げ破壊型鉄筋コンクリート橋脚の塑性変形性能とその評価法, 構造工学論文集, Vol.44A, pp.877-888, 1998.
- 2) 中村光: コンクリート構造のポストピーク挙動に関する解析的研究, 名古屋大学博士論文, 1992.
- 3) Hikaru NAKAMURA and Takeshi HIGAI : Compressive Fracture Energy and Fracture Zone Length of Concrete, Modeling of Inelastic Behavior of RC Structures under Seismic Loads, ASCE, pp.471-487, 2001.
- 4) 岡村甫, 前川宏一: 鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則, 技報堂出版, 1991.
- 5) 長沼一洋, 大久保雅章: 繰返し応力下における鉄筋コンクリート板の解析モデル, 日本建築学会構造系論文集, 第536号, pp.135-142, 2000.
- 6) 田上和也, 中村光, 斉藤成彦, 檜貝勇: 座屈を考慮した鉄筋の繰返し履歴モデル, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.2, pp.223-228, 2002.
- 7) 浅津直樹, 運上茂樹, 星隈順一: 鉄筋コンクリート橋脚における軸方向鉄筋の座屈長さ算定式, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.3, pp.1477-1482, 2000.
- 8) 島弘, 伊藤圭一, 水口裕之: 曲げ破壊型RC橋脚における鉄筋座屈モデルにおける靱性解析, コンクリート工学年次論文報告集, 12-2, pp.741-746, 1990.
- 9) 建設省土木研究所: 鉄筋コンクリート橋脚の地震時保有水平耐力の照査法の開発に関する研究, 土木研究所報告第190号, 1993.