

## 論文 高強度 RC 柱に生じる初期応力が 2 方向曲げ性能に及ぼす影響

堀川 真之\*1・浅里 和茂\*2・漆原 秀明\*3・清水 健次\*4

**要旨**：高強度 RC に生じる初期応力が、高層 RC 造建物の弾塑性挙動に及ぼす影響を解明することは重要である。本論文では、RC 柱（中柱）に着目し、ファイバーモデルを用いた初期応力導入手法を具体的に提案し、既往の手法による結果と比較してその妥当性を確認した。また、繰り返し荷重を受ける 1・2 方向曲げ性能について考察した。その結果、高強度 RC 柱に生じる初期応力は、①柱の初期剛性、耐力および履歴面積を増大させること、②同一部材角での耐力低下を引き起こすことが確認され、③破壊モードに影響を及ぼす可能性が示唆された。

**キーワード**：初期応力、高強度 RC 柱、2 方向水平載荷、釣合い軸力、ファイバーモデル

## 1. はじめに

NewRC 構造設計ガイドライン（案）では、梁崩壊形のメカニズムを想定し、下階および最上階柱にのみヒンジの形成を許容している<sup>1)</sup>。降伏ヒンジを計画する柱では、確実にせん断破壊を防止し、靱性を確保しなければならない。しかし、高軸力を受ける下層階柱では、高強度コンクリートに生じる自己収縮ひずみや長期軸力によるクリープひずみに起因して、曲げ降伏後にせん断破壊に至ることや変形性能が低下することが指摘されている<sup>2)</sup>。このような時間依存性は、上述したガイドライン（案）では取り扱われておらず、それらが建物全体の挙動に及ぼす影響を解明するための試みもきわめて少ない。

筆者らは、FEM により高強度の鉄筋コンクリート（以下、RC）柱について時間依存性を考慮した弾塑性挙動の解明を試みている<sup>3)</sup>。しかし、高層の RC 造建物全体を対象とする場合、数値解析モデルの選定が重要となる。とりわけ、建築構造分野では、実務への展開を見据えマクロモデルをベースとした解析的研究が主流である。当該分野では、時間依存性に対するマクロな性能評価モデルの構築を大きな課題として残しており<sup>4)</sup>、初期応力導入の手続きについては検討の余地が残されている。

丸山ら<sup>5)</sup>は、小室ら<sup>6)</sup>のファイバーモデルをベースとして、自己収縮ひずみ等の体積変化を考慮できるよう拡張した。1 方向繰返しによる検討解析の結果、自己収縮ひずみは曲げ耐力にほとんど影響を及ぼさない事を明らかにした。しかし、長期にわたるクリープひずみは考慮されていない。小室ら<sup>6)</sup>は、ファイバーモデルを用いて、自己収縮ひずみとクリープひずみを考慮したプッシュオーバー解析の結果を報告している。初期応力の考慮により、圧縮主筋の早期降伏や引張主筋降伏の遅れが解析上

表現できることを示した。しかし、初期応力を導入する詳細な手法までは明らかにされていない。両者とも検証過程が残されているものの、モデルの仮定とそれに基づく知見は、斬新かつきわめて重要である。

本研究の最終目標は、ファイバーモデルを用いて高強度コンクリートの時間依存性が RC 造建物全体の弾塑性挙動に及ぼす影響を解明することである。その前段階として、本論文では、標準的な主筋比を有する高強度 RC 柱に焦点を当て、具体的に初期応力導入手法を示し、既往の研究との比較を通じて提案手法の妥当性を確認する。また、中柱に着目し、初期応力を考慮した水平 2 方向の挙動について考察する。なお、現状では、モデルの検証に必要な実験事例が見当たらないため、2 方向入力モデル化については辰巳ら<sup>7)</sup>の実験を対象に検証を行う。

## 2. シミュレーション・フロー

図-1 にシミュレーション・フローを示す。フローは、①初期応力の計算、②初期応力の導入ならびに③短期荷重解析に大別される。さらに、初期応力の計算は、若材齢時初期応力の計算と長期クリープによる初期応力の計算に分類される。若材齢時は、力学的特性が著しく変化するため、初期応力を簡易的に求めることが難しい。そこで、本論文では、筆者らが提案した高強度 RC 柱の応力解析<sup>8)9)</sup>から全主筋が負担する軸方向力  $N_{s-E}$  を計算する。本解析手法は、自己収縮ひずみのみならず線膨張係数の経時変化、若材齢クリープ、コンクリートのひび割れおよび付着すべり特性を考慮可能であり、この点が丸山ら<sup>5)</sup>および小室ら<sup>6)</sup>の研究と大きく異なる。長期クリープによる初期応力の計算は、小室らの手法<sup>6)</sup>と概ね同様である。まず、次式によりコンクリートに生じる長期

\*1 日本大学 工学部建築学科 助教 博士（工学）（正会員）

\*2 日本大学 工学部建築学科 教授 博士（工学）

\*3 日本大学大学院 工学研究科建築学専攻 博士前期課程

\*4 （株）開発設計コンサルタント 建築事業部

クリープひずみを算出する。

$$\varepsilon_{cc}(t, t_0) = \frac{\sigma_c(t_0)}{E_c} \phi(t, t_0) \quad (1)$$

ここで、 $\varepsilon_{cc}$ はクリープひずみ、 $t_0$ は軸力荷重材齢(日)、 $t$ は任意材齢(日)、 $\sigma_c$ はコンクリートの作用軸応力度(N/mm<sup>2</sup>)、 $E_c$ は材齢28日のヤング係数(N/mm<sup>2</sup>)、 $\phi$ はクリープ係数である。本論では、 $\phi$ をCEBモデルコード<sup>10)</sup>より算出する。求めたクリープひずみは、ひずみの適合条件より主筋にも等しいひずみが累積される。このひずみに鉄筋のヤング係数および断面積を乗じて主筋に累積される軸方向力 $N_{S-L}$ を求める。最後に、 $N_{S-E}$ と $N_{S-L}$ を足し合わせ、初期応力が求められる。

初期応力の導入手続きは、力の釣合条件を利用して、次式に示す柱内部の負担軸力を求めることから開始する。

$$N_s(t, t_0) = N_{SE} + N_{S-E} + N_{S-L} \quad (2)$$

$$N_c(t, t_0) = N - N_s(t, t_0) \quad (3)$$

ここで、 $N_s(t, t_0)$ は任意時間の主筋に生じる軸力(N)、 $N_c(t, t_0)$ は任意時間のコンクリートに生じる軸力(N)、 $N$ は作用軸力(N)、 $N_{SE}$ は主筋に生じる弾性軸力(N)である。得られた各軸力は、コンクリートの時間依存性により再分配された初期応力に対応するものである。続いて、求めた軸力の負担割合が弾塑性構成則の弾性範囲内にて再現されるように主筋の応力-ひずみ関係を修正する。図-2に初期応力の導入方法を示す。本論文では、圧縮側のヤング係数のみを修正し、係数 $\alpha$ が引張時の曲げ剛性に寄与しないよう配慮するため、除荷時剛性、応力反転後の引張剛性および引張側初期剛性は修正しないこととする。図中の係数 $\alpha$ は、次式により算出する。

$$\alpha = \frac{N_s(t, t_0)}{\varepsilon_c(t, t_0) \times A_s} / E_s \quad (4)$$

ここで、 $A_s$ は主筋の全断面積(mm<sup>2</sup>)、 $E_s$ は主筋のヤング係数(N/mm<sup>2</sup>)である。 $\varepsilon_c(t, t_0)$ は任意時間に生じたコンクリートのひずみであり、次式により算出する。

$$\varepsilon_c(t, t_0) = \frac{N_c(t, t_0)}{A_c \times E_c} \quad (5)$$

ここで、 $A_c$ は主筋を除いた柱断面積(mm<sup>2</sup>)、 $E_c$ は材齢28日のコンクリートのヤング係数(N/mm<sup>2</sup>)である。続いて、修正モデルに軸力を載荷し、弾性解析を実施する。その結果、式(3)が満足されれば、初期応力が導入されたこととなる。一方、式(3)を満足しない場合は、反復的に係数 $\alpha$ を修正する。最後に、短期解析を実施して全フローが終了する。なお、本論文ではSNAP Ver.7を使用する。

### 3. 既往の初期応力導入結果との比較

本節では、既往の手法と前節に示したフローを比較し、

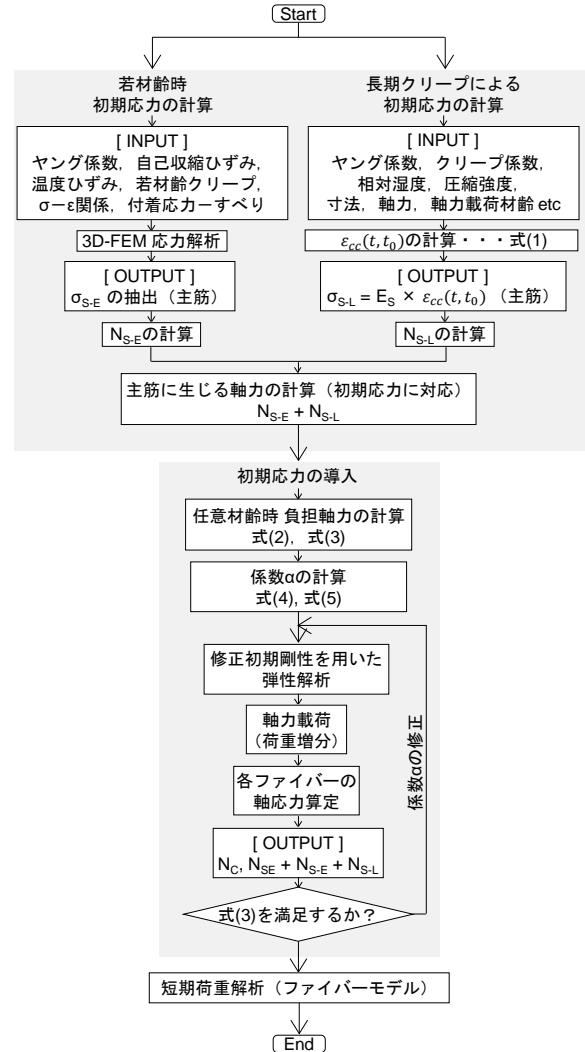


図-1 シミュレーション・フロー

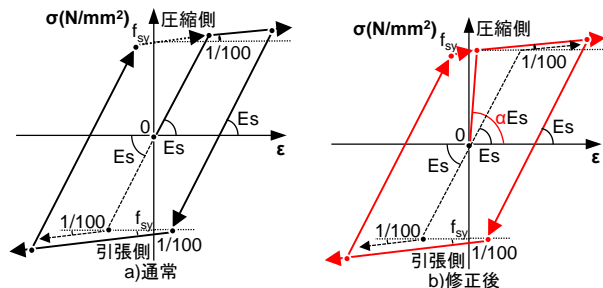


図-2 初期応力の導入方法

提案手法の妥当性を確認する。本論文では、小室らによる初期応力を考慮したプッシュオーバー解析<sup>6)</sup>の結果と比較することとした。

#### 3.1 解析対象試験体<sup>6)</sup>

図-3に解析対象試験体の概要を示す。対象とする柱は実大寸法(950mm×950mm)である。試験体の上下にスタブを配し、軸力を載荷した後、曲率を1方向に漸増させている。コンクリートの材料特性について、圧縮強度は150(N/mm<sup>2</sup>)、ヤング係数は61302(N/mm<sup>2</sup>)である。主筋の材料特性は、降伏強度が390(N/mm<sup>2</sup>)、ヤング係数は

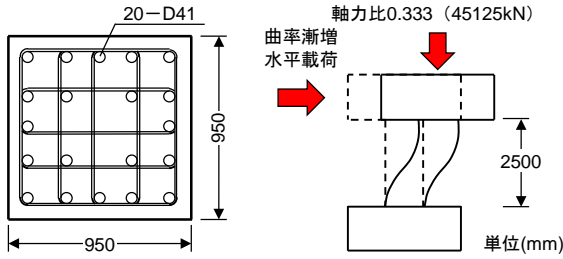


図-3 解析対象試験体の概要

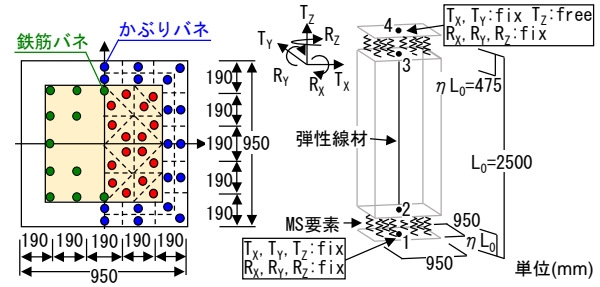


図-4 離散化および境界条件

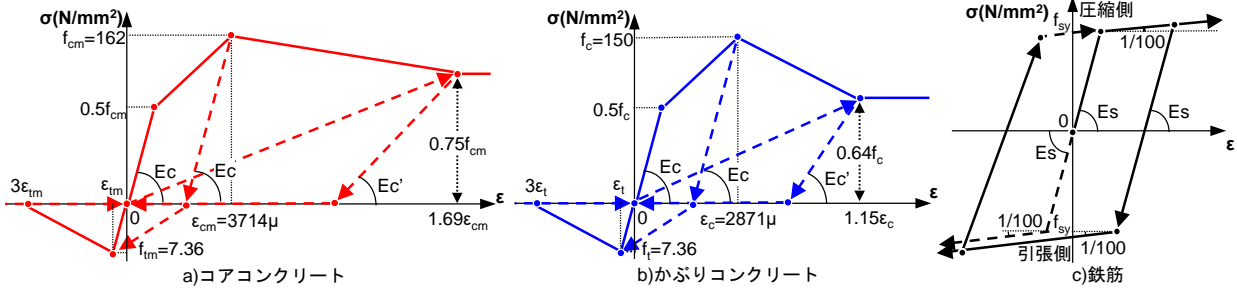


図-5 各バネの応力-ひずみ関係と履歴

表-1 軸力移行の確認 (軸力载荷による弾性解析)

		軸力比:0.333 (45125kN)	主筋負担 (kN)	コンクリート負担 (kN)
初期応力 なし	本解析	4194 ( 9.3 %)	40931 ( 90.7 %)	
	文献(6)	5091 ( 11.3 %)	40034 ( 88.7 %)	
初期応力 あり	本解析	8895 ( 19.7 %)	36230 ( 80.3 %)	
	文献(6)	8470 ( 18.8 %)	36655 ( 81.2 %)	

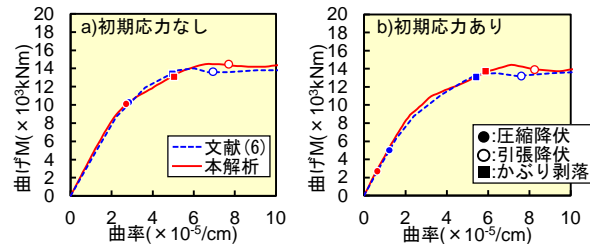


図-6 文献(6)の断面解析結果と本解析結果

205000(N/mm<sup>2</sup>)を仮定した。また、帯筋 (U12.6) の降伏強度は記載がないため、1275(N/mm<sup>2</sup>)を仮定した。

### 3.2 解析モデルの概要

図-4 に離散化および境界条件を示す。モデルは、ヒンジ領域長さについて Li と Otani<sup>11)</sup>を参照して材端から 0.5D (D は柱せい) の範囲と仮定し、当該範囲にマルチスプリング要素 (以下、MS 要素) を配置する。なお、柱中央は弾性線材とし、せん断剛性は弾性と仮定した。断面の離散化は、かぶりとコアに分けて各々32個の要素とし、重心位置にバネを配置した。また、試験体の配筋と同様の位置に鉄筋バネを配置した。境界条件について、柱脚は全方向の併進・回転方向を固定した。柱頭は変位制御により荷重を行うため X 方向の併進自由度を拘束し、軸力を荷重制御により荷重するため Z 方向併進を自由とした。その他は柱脚と同様とした。図-5 に各バネの応力-ひずみ関係を示す。圧縮側は4直線により表現し、コアは次式に示す小室ら<sup>6)</sup>のモデルに従った。

$$\sigma_{cm} = (1 + 49C_c) \cdot f'_c \quad (6)$$

$$\varepsilon_{cm} = (1 + 179C_c) \cdot \varepsilon_m \quad (7)$$

$$\varepsilon_{cu} = (-1.44 + 1890C_c) \cdot \varepsilon_u \quad (C_c \geq 0.0013) \quad (8)$$

ここで、 $\sigma_{cm}$  は強度上昇後の圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>)、 $\varepsilon_{cm}$  は  $\sigma_{cm}$  に対応するひずみ、 $\varepsilon_{cu}$  は終局ひずみ、 $C_c$  は拘束係数である。引張側は2直線により表現し、 $f_t$  は高強度コンクリートの引張強度を算出可能な次式<sup>12)</sup>により算出した。

$$f_t = 4 \times \left( \frac{\sigma_B}{60} \right)^{2/3} \quad (9)$$

ここで、 $f_t$  は引張強度(N/mm<sup>2</sup>)、 $\sigma_B$  は圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>)である。なお、履歴則については Li<sup>13)</sup>に従う。

### 3.3 手法の比較結果

表-1 に負担軸力の推移を示す。ここでは、材齢28日に軸力を荷重し、3000日間クリープひずみが進行した場合を想定する。若材齢時に主筋に生じる初期応力は、実大の高強度柱を対象とした既往の応力解析結果<sup>8)</sup>から、80(N/mm<sup>2</sup>/本)とした。その結果、軸力荷重時と比較して、10%の軸力移行が確認された。本結果は小室らの検討結果と同等である。図-6 に解析結果を示す。a)は初期応力を無視した場合であり、モーメント-曲率関係、主筋の降伏およびかぶりコンクリートの剥落について良好に一致している。また、b)は初期応力を考慮した場合であり、

両者とも概ね同様の性状を示しており提案手法の妥当性が確認できる。b)について、圧縮鉄筋の降伏が早期に生じるのは、主筋の負担軸力が大きいためであり(表-1参照),若材齢時初期応力に自己収縮ひずみ以外の影響を考慮している点や長期クリープひずみの算出過程に違いがあるためである。本論文では、初期応力の精度は検討範囲外であるが、初期応力の有無による結果が小室らの結果と同傾向となることが確認できたため、初期応力導入手法は、本論文の提案フローに従うこととする。

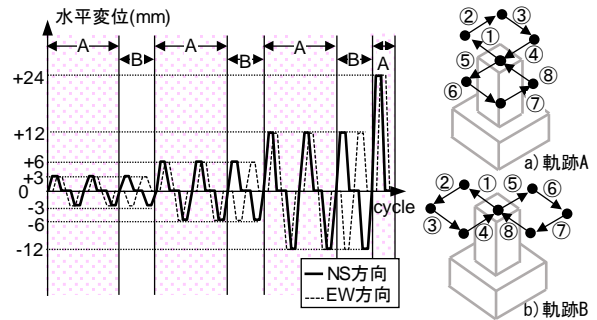


図-7 解析対象実験の概要(辰巳ら)

#### 4. 水平2方向入力を受けるRC柱の解析モデル構築

2方向入力を受ける普通強度RC柱について、境界条件、荷重条件のモデル化および載荷経路の確認等に主眼を置き、辰巳らの実験<sup>7)</sup>を対象にモデルの検証を行う。

##### 4.1 解析対象実験

図-7に解析対象実験の概要を示す。断面200mm×200mm、高さ600mmの片持ち柱である。コンクリートの圧縮強度は28.1(N/mm<sup>2</sup>)、主筋および帯筋の降伏強度は各々330(N/mm<sup>2</sup>)および492(N/mm<sup>2</sup>)である。実験では、柱頭に定軸力(337.2kN、軸力比0.3)を加え、水平2方向繰り返し荷重が載荷された。加力は、変位制御により行われ、3mm、6mm、12mm、24mmの順に漸増させる。各制御変位において、軌跡Aを2サイクル、軌跡Bを1サイクル実施している。24mm時では、軌跡Bは実施せず、軌跡Aを①から④まで実施して全載荷が終了された。

##### 4.2 解析概要

図-8に解析モデルを示す。ヒンジ領域の設定、断面の離散化および柱脚の境界条件は前節と同様である。柱頭は、変位制御により荷重を行うためXおよびY方向の併進自由度を拘束した。図-9に応力-ひずみ関係を示す。コンクリートの圧縮側について、かぶりは軟化域をParkらのモデル<sup>14)</sup>、コアは強度上昇と靱性の増大をManderの手法<sup>15)</sup>によりモデル化した。引張側は2直線とし、 $f_t$ は予測式の適用範囲に留意してCEBモデルコード<sup>10)</sup>より求め3.12(N/mm<sup>2</sup>)とした。なお、コンクリートの履歴則および主筋のモデル化は前節と同様である。

##### 4.3 解析モデルの検証

図-10に解析結果を示す。ここでは、水平2方向をNS方向とEW方向に分けて示す。全体の履歴について、各方向とも実験値と良く対応している。また、主筋の引張降伏位置およびかぶりが剥落した部材角は実験と一致していることが分かる。以上のことから、水平2方向入力を受けるRC柱についてモデルの妥当性を確認できた。

#### 5. 初期応力が繰り返し荷重を受ける高強度RC柱の曲げ性能に及ぼす影響

本節では、3節と同一のRC柱に対して、1・2方向入

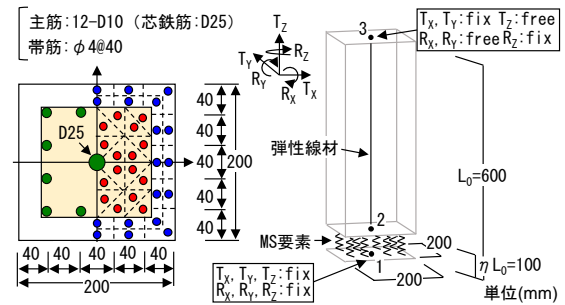


図-8 離散化および境界条件

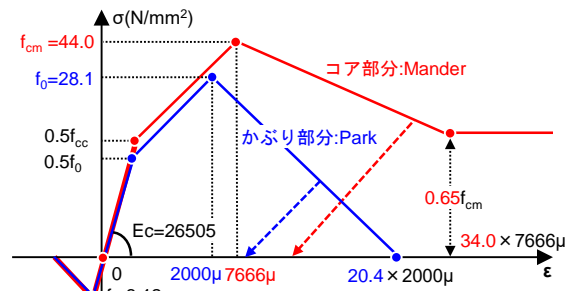


図-9 仮定した応力-ひずみ関係と履歴

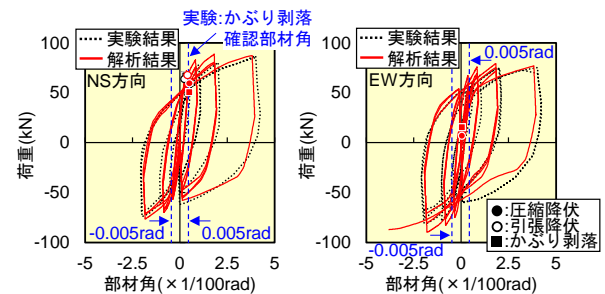


図-10 解析結果

力を行い初期応力の有無が短期挙動に及ぼす影響を考察する。解析モデルは図-4および図-5と同様である。ただし、2方向載荷では、柱頭の境界条件および荷重条件・経路は図-7および図-8に従う。また、与える初期応力は、表-1と同値として、若材齢および長期クリープによる初期応力を考慮する。なお、石川らの手法<sup>16)</sup>より限界変形を求め、当該変形角までを考察の対象とする。

図-11に1・2方向繰り返し載荷結果を示す。初期応力を考慮することで、主筋の早期降伏等が確認されたものの、履歴が若干大きくなる程度であり、耐力や剛性に

大きな違いはない。これは、主筋降伏強度が低く、作用軸力が釣合軸力であるためである。主筋とコンクリートが同時に降伏に至るため、主筋に累積された初期応力が曲げ性能に及ぼす影響は小さい。そこで、丸山らの解析的研究<sup>5)</sup>を参考に主筋の降伏強度を $390(\text{N}/\text{mm}^2)$ から $1000(\text{N}/\text{mm}^2)$ へ変更し、実状に即したRC柱を対象に検討解析を試みる。図-12に1方向繰返し載荷結果を示す。初期応力を考慮すると初期剛性および最大耐力が上昇し、履歴面積が大きく増加する。また、同一部材角における耐力低下が顕著に現れている。この耐力低下は、後述するように初期応力を考慮することで同一部材角の軸縮みが増大することに起因しており(図-16参照)、軸力保持限界を低下させる1要因となり得るものと考えられる。以上の傾向は、既往の実験結果と一致する<sup>2)6)</sup>。続いて、初期剛性および耐力が上昇した理由について考察する。図-13にMS要素における主筋の降伏比およびコアコンクリートひずみ履歴、最大耐力時の断面内の応力分布を示す。初期応力がコンクリートのひずみ履歴に及ぼす影響は小さい。最も顕著な違いは、主筋による抵抗に現れる。圧縮鉄筋が早期に降伏し、平面保持の仮定

により引張鉄筋も早期に降伏する。最大耐力時の断面内応力分布に着目すると、主筋の降伏範囲が2段目主筋まで広がっており、このことが剛性および耐力の上昇を引き起こしたものと考えられる。図-14に2方向繰返し載荷結果を示す。載荷方向が増えることで、剛性、最大耐力および履歴面積の増大がより顕著に現れる。図-15にNS方向およびEW方向について最大耐力時の主筋応力分布を示す。NS方向では、初期応力を考慮することで、中立軸が圧縮側へ大きく移動し、結果として引張主筋による抵抗が大きくなり、中間筋までもが引張抵抗に加担する。EW方向では、中立軸はほとんど移動しないものの、初期応力の影響により主筋が負担する応力は大きくなる。このような抵抗機構の変化が、より大きな耐力等の増大を引き起こしたものと考えられる。図-16に軸ひずみ一部材角関係を示す。初期応力を考慮することで、柱の軸縮みは増大する。その割合は、1方向入力において顕著である。しかし、柱全体の軸縮み量は、2方向入力の方が大きい。この違いは、荷重一部材角関係にも反映されており、1方向入力は2方向入力と比較して、同一部材角での耐力低下が著しい(図-12参照)。

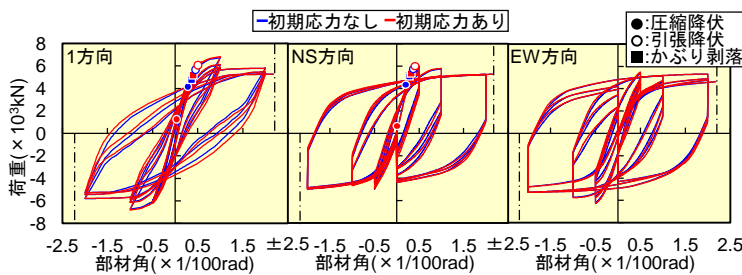


図-11 1方向および2方向繰返し載荷結果

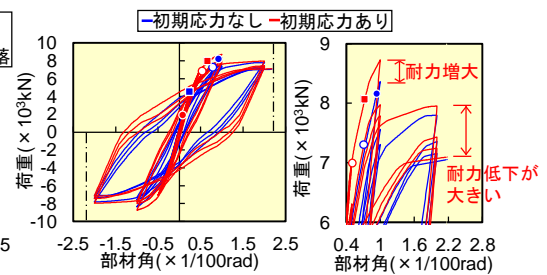


図-12 1方向繰返し載荷結果

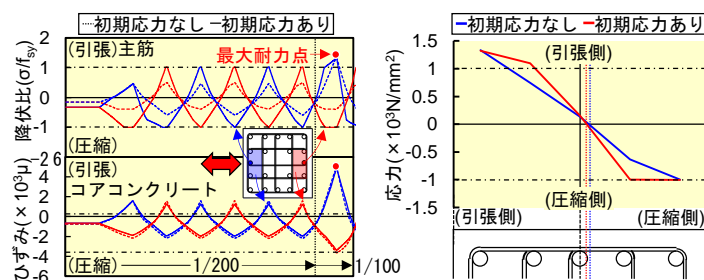


図-13 降伏比、ひずみ履歴および最大耐力時の主筋応力分布

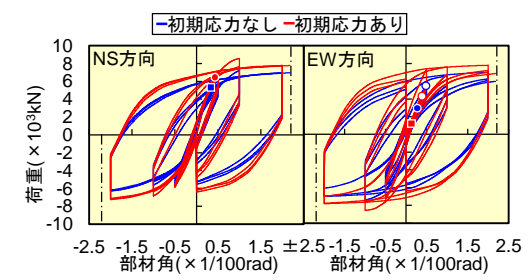


図-14 2方向繰返し載荷結果

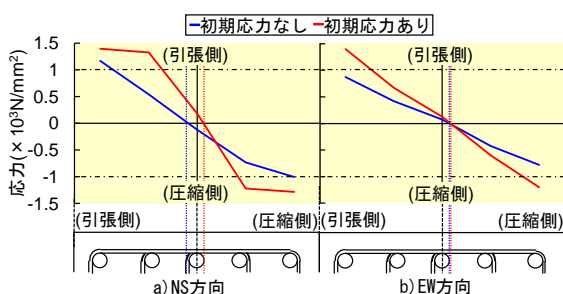


図-15 最大耐力時の主筋応力分布(2方向)

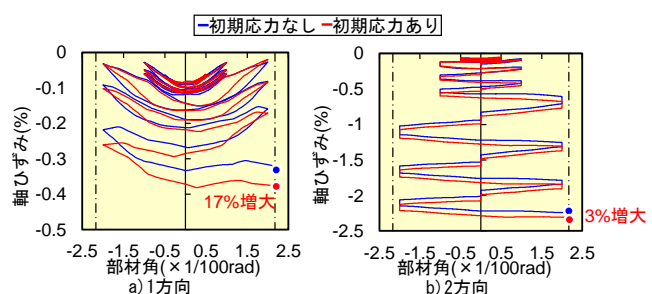


図-16 軸ひずみ一部材角関係(1方向・2方向)

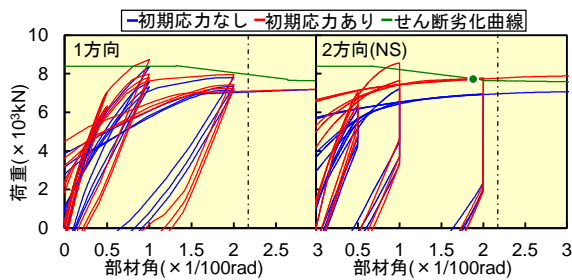


図-17 曲げ降伏後のせん断破壊の検討

図-17 に初期応力と荷重方向数が破壊モードに及ぼす影響を示す。図中のせん断劣化曲線は、Priestley<sup>17)</sup>らの手法により求めた。1 方向荷重の場合、柱は曲げ破壊と判断される。一方、2 方向荷重の場合、初期応力を考慮すると限界変形以前にせん断劣化曲線が柱の履歴を下回る。このことから、2 方向入力を受ける RC 柱では、初期応力の存在により曲げ降伏後にせん断破壊に至る可能性が考えられる。

## 6. まとめ

ファイバーモデルを用いて初期応力導入手法を提案し、既往の手法との整合性を図った上で、1・2 方向荷重を受ける高強度 RC 柱の弾塑性挙動について検討を行い、以下の知見を得た。

- 1) 釣合い軸力が作用する場合、主筋強度が低い程、耐力・変形ともに初期応力の影響はほとんど受けない。
- 2) 初期応力は引張主筋の抵抗に影響を及ぼし、結果として、初期剛性、最大耐力および履歴面積が増大することが明らかとなった。
- 3) 2 方向荷重を受ける場合、初期応力の存在により、曲げ降伏後にせん断破壊に至ることが示唆された。

## 謝辞

本研究は、科学研究補助金（若手研究(B)、課題番号：50794525、代表者：堀川真之）および平成 29 年度日本大学工学部研究費（区分(2)Ⅱ）の助成を受けて行われたものである。研究の遂行にあたり、白井伸明日本大学名誉教授にご助言を頂いた。ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 国土交通省建築研究所：鉄筋コンクリート造建築物の超軽量・超高層化技術の開発、p.131, 2001.2
- 2) 佐々木仁, 高森直樹, 佐藤幸博, 松戸正士, 寺岡勝：超高強度材料を用いた RC 造柱の耐震性能に及ぼす長期性状の影響：その 3 長期圧縮荷重後の曲げせん断実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2, pp.237-238, 2009.7
- 3) Masayuki, H and Nobuaki, S: Evaluation of early age,

- long- and short-term behavior of RC column including shrinkage and creep effect by 3-D FE analysis, Proc. of 11th fib Int. PhD Symp. in Civil Eng., pp.849-856, 2016.8
- 4) 日本建築学会：コンクリート系構造の部材解析モデルと設計への応用, pp.305-308, 2008.3
  - 5) 丸山一平, 勅使川原正臣：超高強度コンクリートの自己収縮が RC 柱の曲げ性能に及ぼす影響, 日本建築学会構造系論文集, 第 73 巻, 第 630 号, pp.1331-1338, 2008.8
  - 6) 小室努, 今井和正, 是永健好, 渡邊史夫：超高強度コンクリート柱の長期圧縮特性に関する考察, コンクリート工学年次論文集, pp.223-228, Vol.30, No.3, 2008.7
  - 7) 辰巳佳裕, 小谷俊介, 青山博之：2 方向水平力と大きな変動軸力を受ける鉄筋コンクリート柱に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.36B, pp.211-218, 1990.3
  - 8) 堀川真之, 新藤辰典, 田嶋和樹, 白井伸明：3 次元 FEM による若材齢挙動を考慮した超高強度 RC 柱の応力解析, 日本建築学会構造系論文集, 第 80 巻, 第 715 号, pp.1447-1457, 2015.9
  - 9) 渡邊湊, 堀川真之, 田嶋和樹, 長沼一洋：若材齢期間のクリープおよび付着すべり特性を考慮した鉄筋コンクリート部材の挙動予測, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.2, pp.439-444, 2017.7
  - 10) CEB: CEB-FIP Model Code 1990, Final Draft, 1991.7
  - 11) Kang-Ning Li and Shunsuke Otani: Multi-spring model for 3-dimensional analysis of RC members, J., Struct. Eng. and Mech., Vol.1, No.1, pp.17-30, 1993.10
  - 12) 日本建築学会：高強度コンクリートの技術の現状 (2009), p.106, 2009.10
  - 13) Li Kang-Ning: CANNY-C, A Computer Program For 3D Nonlinear Dynamic Analysis of Building Structures, research report, National Univ. of Singapore, 1992
  - 14) Park, R., Priestley, M.J.N. and Gill, W.D.: Ductility of Square-Confined Concrete Columns, J., Struct. Eng., ASCE, Vol.108, No.4, pp.929-950, 1982
  - 15) J.B.Mander: Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete, J., Struct. Eng., ASCE, Vol.114, No.8, pp.1804-1826, 1988
  - 16) 石川裕次, 木村秀樹：高強度材料を用いた RC 柱部材の限界変形に関する研究, コンクリート工学年次論文集, 第 16 巻第 1 号, pp.55-66, 2005.1
  - 17) Priestley, M. J. N., Seible, F. and Calvi, G. M. : Seismic Design and Retrofit of Bridges Wiley-Interscience Publication, pp.338-344, 1996