

# 論文 乾燥収縮とクリープを受ける柱の曲げ性状に関する解析的研究

河東 宏樹\*1・渡部 嗣道\*2・富田 耕司\*3・佐藤 知明\*4

**要旨**：鉄筋コンクリート構造物は、長期高軸力下におけるクリープや乾燥収縮などによって、柱などの鉛直部材は長期的なひずみが生じる。本研究では、これら長期的な変形が構造部材の構造性能に与える影響を評価するために、非線形の3次元FEM解析ソフトを用いて、逐次積分法による乾燥収縮と軸力が作用する場合の長期的な性状を解析するとともに、柱の曲げせん断性状を評価するためのPushover解析を行った。その結果、特にクリープひずみは構造性能に少なからず影響を及ぼすことが明らかとなった。

**キーワード**：柱, Pushover, 乾燥収縮, クリープ, FEM, 逐次積分法

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物では、乾燥収縮やクリープが長期にわたり継続的に生じる。現行の建築構造物の構造設計では、乾燥収縮の影響はスラブの長期載荷時のひび割れやたわみの設計法に考慮されているものの、柱や梁などからなる骨組の耐震解析などについてはほとんど考慮されていない。また、クリープについては、許容応力度設計において、ヤング係数比としてその影響が弾性設計の範囲内で考慮されている。一方、保有水平耐力計算法では、特にクリープの影響を考慮することは盛り込まれてなく、1次設計での配筋状態で非線形領域を含めた安全確認を実施している<sup>2)</sup>。これらは、乾燥収縮やクリープが大地震時における構造性能に与える影響は小さいものと判断されていると考えられるが、その影響の大きさについては明確ではない。

近年では、乾燥収縮ひずみやクリープひずみなどの予測式が国内学会<sup>3)4)</sup>でも精力的に定式化され、その実用に対する信頼が増している。著者らは、これらを適用し、長期的な構造性状の変化を評価できる3次元静的非線形有限要素法ソフトウェア「Soft OCU」<sup>5)</sup>を開発した。同ソフトでは、乾燥収縮ひずみやクリープひずみの発生とともに、ひび割れなどの弾塑性解析を長期的に逐次実施することができ、これに連成させて長期変形状態のままPushover解析などの短期解析を可能とする。既報<sup>6)</sup>では、乾燥収縮ひずみを生じる場合の単純梁について、乾燥収縮ひずみを生じる場合の曲げ性状について検討している。

本研究では、高軸力下を想定した場合の柱モデルを作成し、乾燥収縮やクリープがこれらのせん断曲げ性状に与える影響を解析的に評価したので、その結果を報告する。

## 2. 解析計画

### 2.1 解析方法

コンクリート要素は8節点アイソパラメトリック要素とし、ひび割れ解析には分散ひび割れモデルを用いた。鉄筋要素はトラス要素とし、離散鉄筋モデルとした。鉄筋とコンクリートとの接点間は、主筋・せん断補筋ともに、完全一体とした。図-1に示すように、本解析では既報<sup>2)</sup>と同様に、長期解析用(非線形逐次積分法(Step by step法))と短期解析用(静的非線形増分解析(Pushover))の2つの解析ツールを有するプログラムを連成し、長期解析による変形や応力をそのまま残した状態で短期解析に移行した。

本解析では、乾燥収縮ひび割れやクリープひずみなどによって生じる長期的ひび割れやたわみなどの変形状態を解析するために、非線形解析を伴う逐次積分法(Step by step法)を適用した。本解析法は、逐次積分によるNeville等らによって提案された弾性応力解析法を塑性解析にまで拡張したものである。長期解析における逐次積分法の計算式の概要を(1)~(4)式に示す。

$$\begin{aligned} \varepsilon_{total}(t_{i+1/2}) &= \varepsilon_e(t_{i+1/2}) + \varepsilon_{cr}(t_{i+1/2}) + \varepsilon_p(t_{i+1/2}) \\ &+ \varepsilon_{sh}(t_{i+1/2}, t_0) + \sum_{j=1}^{i-1} \{\Delta\sigma(t_j) \cdot J(t_{i+1/2}, t_j) \\ &+ \varepsilon_p(t_{i+1/2})\} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \sigma(t_{i+1/2}) &= \frac{1}{J(t_{i+1/2}, t_j)} \{ \varepsilon_{total}(t_{i+1/2}) - \varepsilon_e(t_{i-1/2}) - \varepsilon_e(t_{i-1/2}) \\ &- \varepsilon_{cr}(t_{i-1/2}) - \varepsilon_p(t_{i+1/2}) - \varepsilon_{sh}(t_{i+1/2}, t_0) \} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\Delta\sigma(t_i) = \sigma(t_{i+1/2}) - \sigma(t_{i-1/2}) \quad (3)$$

$$J(t_{i+1/2}, t_j) = \frac{1 + \theta(t_{i+1/2}, t_j)}{E(t_i)} \quad (4)$$

ここで、 $\varepsilon_{total}(t_{i+1/2})$ ：ステップ  $t_{i+1/2}$  の全ひずみ、

\*1 大阪市立大学生活科学部居住環境学科 (学生会員)

\*2 大阪市立大学大学院 生活科学研究科教授 博士(工学) (正会員)

\*3 ソフトエボリューション株式会社 (正会員)

\*4 阪神高速技術株式会社 技術部 技術統括・開発課 博士(工学)

$\varepsilon_e(t_{i+1/2})$ : ステップ  $t_{i+1/2}$  の弾性ひずみ,  $\varepsilon_p(t_{i+1/2})$ : ステップ  $t_{i+1/2}$  の塑性ひずみ,  $\varepsilon_{cr}(t_{i+1/2})$ : ステップ  $t_{i+1/2}$  のクリープひずみ,  $\varepsilon_{sh}(t_{i+1/2}, t_0)$ : コンクリートにおけるステップ  $t_0$  乾燥開始のステップ  $t_{i+1/2}$  の乾燥収縮ひずみ,  $\Delta\sigma(t_i)$ : ステップ  $t_i$  の増分応力,  $\phi(t_{i+1/2}, t_j)$ : ステップ  $t_j$  載荷におけるステップ  $t_{i+1/2}$  の時点でのコンクリートのクリープ係数,  $E(t_i)$ : ステップ  $t_i$  のヤング係数, である。

上式は、ひずみの適合条件として、弾性ひずみ・塑性ひずみ (ひび割れひずみ)・乾燥収縮ひずみ・クリープひずみの4種のひずみの重ね合わせが成立するものとしている。

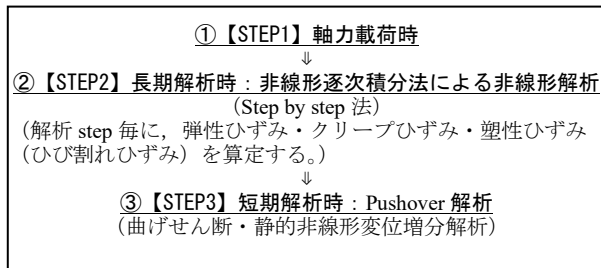


図-1 解析プロセス

## 2.2 解析条件

解析条件を表-1に示す。本解析では、柱を対象としている。乾燥開始から最終解析時までの乾燥収縮ひずみは  $400 \times 10^{-6}$  とし、長期解析における乾燥収縮期間を50年とした。乾燥収縮ひずみならびにクリープひずみの履歴は、国内学会の代表的なものとして日本建築学会<sup>3)</sup>や土木学会<sup>4)</sup>などのものがあるが、今回の解析ではすでに実用構造物に設計用として適用されている土木学会によるものに準拠した。なお、クリープひずみ  $C(t, t')$  の予測式は ( $t$ : 経過材齢,  $t'$ : 載荷材齢), 日本建築学会および土木学会とも、係数  $CR$  の算定式は異なるものの次式のような対数形式で表現されている。

$$C(t, t') = CR \cdot \log_e(t - t' + 1) \quad (5)$$

また、載荷材齢や解析期間によってクリープ係数は異なり、本解析における解析期間50年での載荷開始から最終値は、3.3~3.8となった。また、本解析は逐次積分法を適用しているため、乾燥収縮ひずみが増加するたびに応力が発生し、その都度クリープひずみや塑性ひずみを算定する必要がある。

また、想定したコンクリートの圧縮強度は、24ならびに  $36 \text{ N/mm}^2$  とした。さらに、係数  $CR$  は、コンクリートの調合条件も影響を受ける。本解析では、単位水量の小さな高性能 AE 減水剤による実用的なコンクリートを適用し、その調合 (標準調合表<sup>7)</sup>) を表-2に示す。

柱の乾燥収縮ひずみおよびクリープ係数は、竣工直後を解析開始するとし、長期的に作用する軸力をコンクリ

ート材令の1年後に作用させ、その大きさは柱断面の平均圧縮応力度で設計基準強度の1/3とした。乾燥収縮ひずみの発生による長期解析は、この軸力作用と同時に実施した。この場合も長期解析期間内に生じる乾燥収縮ひずみの大きさは、 $400 \times 10^{-6}$  とした。乾燥収縮ひずみの履歴は、土木学会基準式を実数倍して、50年間でこの所定の値となるようにした。

また、土木学会式に適用する調合条件として、下表の単位水量、セメント水比、圧縮強度などのほか、骨材の品質の影響を表す係数を4、骨材中の水分量  $\Delta\omega$  に関わる吸水率を細骨材  $\omega_s$  では2.2%、粗骨材  $\omega_g$  では0.8%と仮定した。また、温湿度条件は  $20^\circ\text{C} \cdot \text{RH65}\%$  とし、有効部材厚  $d$  は後述のモデル寸法より求めた。図-2に柱に適用した場合の乾燥収縮ひずみの経時変化の例を、図-3にクリープ係数の経時変化の例をそれぞれ示す。

表-1 解析条件

解析対象	長期軸力	乾燥収縮ひずみ	乾燥開始材齢	解析開始材齢	長期解析期間	クリープ係数	圧縮強度
	※1	$\times 10^{-6}$	日	日	年	※2	$\text{N/mm}^2$
柱	1/3	400	365	365	50	3.32, 3.85	24, 36

※1: 長期軸力は、コンクリートの設計基準強度に対する比1/3とし、柱の載荷材齢は乾燥開始材齢と同じ。  
 ※2: 載荷開始から50年間におけるクリープ係数を示す。

表-2 コンクリート調合表<sup>8)</sup>

呼び強度	粗骨材最大寸法	スランブ	単位水量	水セメント比	細骨材率	単位粗骨材量
	mm	cm	$\text{kg/m}^3$	%	%	$\text{kg/m}^3$
24	20	18	175	57	48.8	924
36				44	45.4	940

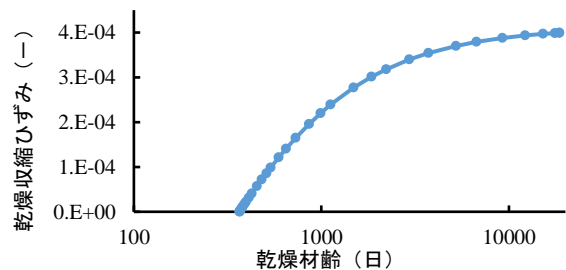


図-2 乾燥収縮ひずみの履歴

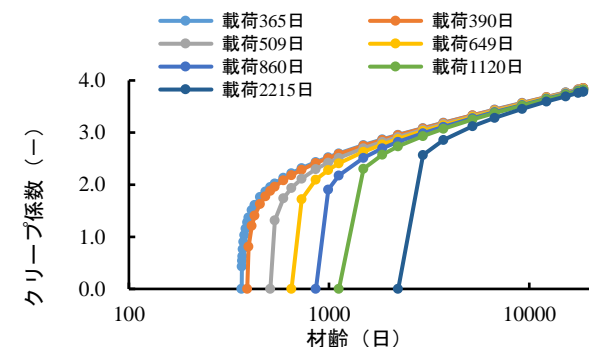


図-3 クリープ係数の履歴

### 2.3 材料構成則

本解析における材料構成則について、コンクリートの物性は長期的に大きく変化しないものとした。コンクリートの応力ひずみ関係を図-4に示す。応力ひずみ関係に関連する引張および圧縮破壊エネルギーほか各種力学的性質は、(公社)土木学会『コンクリート標準示方書〔設計編〕(2012)』に準拠した。なお、引張応力ひび割れによるせん断剛性の低下は、Al-Mahaidi モデル<sup>8)</sup>を適用した。なお、本解析ではせん断補強筋のコンクリートに対する拘束効果は考慮しなかった。また、鉄筋は離散鉄筋モデルとし、バイリニア型の完全弾塑性とした。

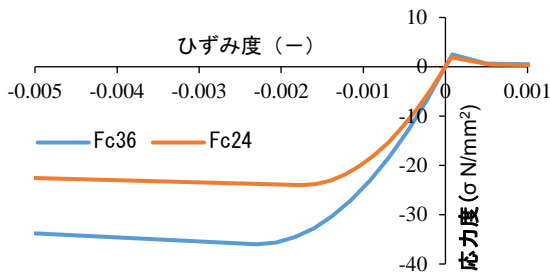


図-4 コンクリートの応力ひずみ関係

### 2.4 FEM 解析モデル

表-3に、解析モデルの仕様を示す。柱の寸法は幅700×せい700×高さ3000mmとし、主筋は各辺とも各4本・計12本設置し、主筋はD16またはD25に鉄筋径を変えて鉄筋量を変化させた。長期軸力は圧縮強度の1/3という高軸力を作用させた。せん断補強筋は、D13@100とし、せん断破壊しないようにした。

解析断面と要素分割を図-5に示す。コンクリート表面と主筋中心との距離は、梁せいの0.1倍した値とした。解析モデルを図-6に示す。柱の上下両端の境界条件は、表-4のように、柱上下端面が平行となるように剛体接合とした。また、解析ステップは3段階とし、軸力解析後(【STEP1】)、乾燥収縮ひずみを作用させて長期クリープ解析し、(【STEP2】)、所定期間後に短期解析としてせん断変形の変位増分解析を行った(【STEP3】)。

表-3 FEM 解析モデル

モデル名	断面寸法 mm	圧縮強度 N/mm <sup>2</sup>	主筋 (SD345)	乾燥収縮ひずみ ( $\times 10^{-6}$ )	クリープ解析	軸力比	主筋比 %
C24-1-0	幅 700 × せい 700	24	D16	0	×	1/3	0.487
C24-1-1				0	○		
C24-1-2				400	○		
C24-2-0			D25	0	×		
C24-2-1				0	○		
C24-2-2				400	○		
C36-1-0	幅 700 × せい 700	36	D16	0	×	1/3	0.487
C36-1-1				0	○		
C36-1-2				400	○		
C36-2-0			D25	0	×		
C36-2-1				0	○		
C36-2-2				400	○		

※軸力比は、圧縮強度に対する比

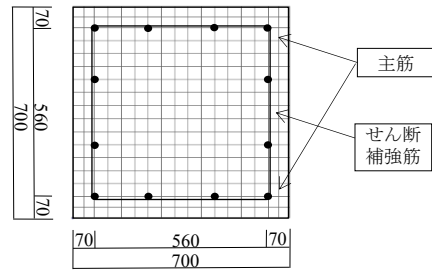


図-5 柱の解析断面と要素分割

表-4 柱上下面の境界条件

解析ステップ	境界条件
【STEP1】 軸力作用時	<ul style="list-style-type: none"> <li>下面の軸方向のみを拘束した状態で上面に軸方向荷重を載荷(並進方向は回転拘束のみ)</li> <li>上下端面の節点は、平面・平行を維持できるように剛体に接合</li> </ul>
【STEP2】 長期解析時	<ul style="list-style-type: none"> <li>上述の拘束条件のまま、非線形の逐次積分法による長期解析を実施</li> </ul>
【STEP3】 短期解析時	<ul style="list-style-type: none"> <li>上述の拘束条件に加え、上下面の並進方向の変位成分も拘束し、変位増分による短期解析を実施</li> </ul>

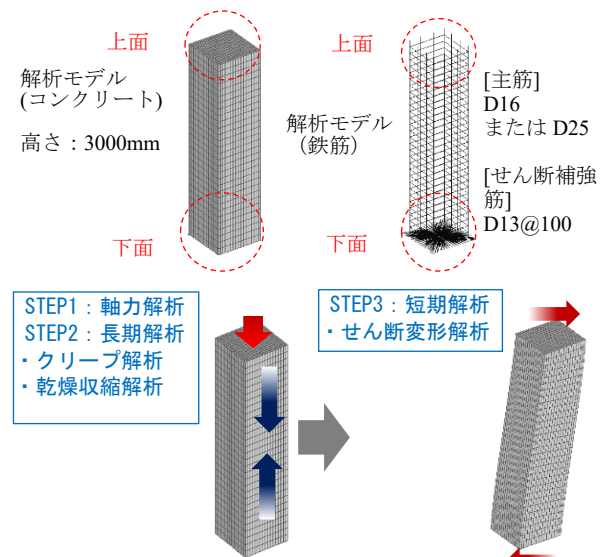


図-6 曲げせん断解析モデルと解析ステップ

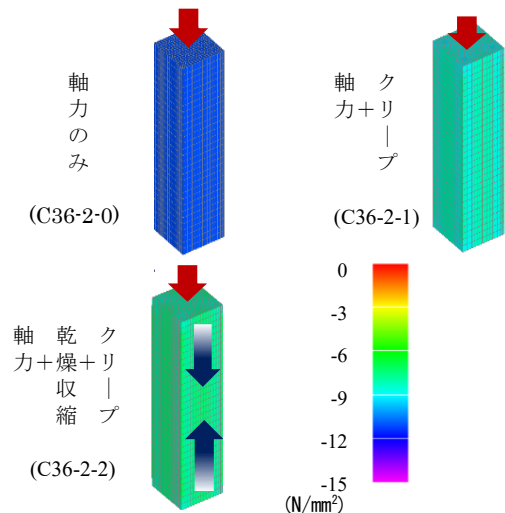


図-7 長期解析終了時のコンクリート応力

### 3. FEM 解析結果

#### 3.1 長期解析

図-7に長期解析終了時のコンクリート垂直応力（軸方向）図の例（C36-1-0,C36-1-1,C36-1-2）を示す。コンクリートの軸載荷初期の圧縮応力はクリープおよび乾燥収縮によって大きく減少した。

図-8および図-9に、コンクリート応力と鉄筋応力の経時変化をそれぞれ示す。長期的にクリープ変形は継

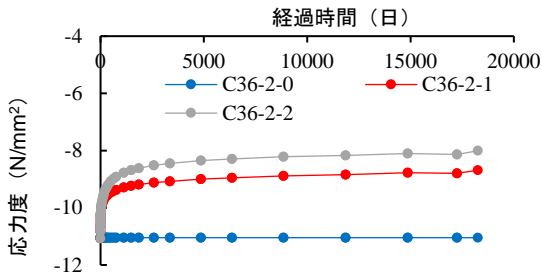


図-8 コンクリート応力の変化

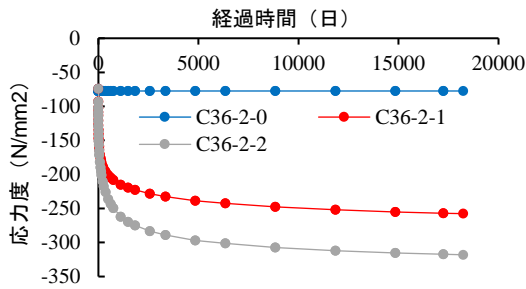


図-9 鉄筋応力の変化

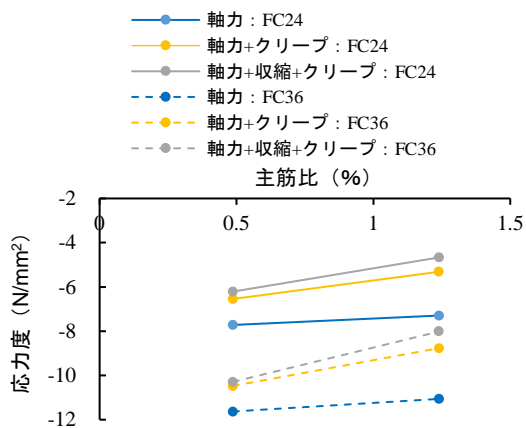


図-10 主筋比とコンクリートの長期圧縮応力

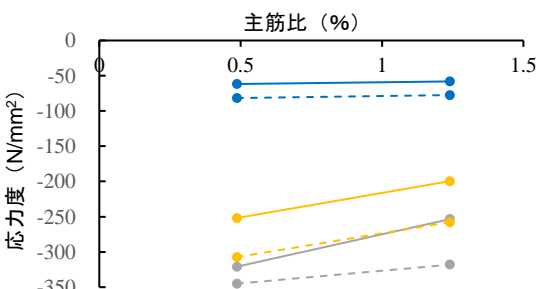


図-11 主筋比と鉄筋の長期圧縮応力

続されるものの、10~20年程度で値の増加は減速する。コンクリート応力は大幅に減少し、鉄筋応力は増大する。特に鉄筋応力は長期許容応力度を超える結果となった。図-10および図-11に、主筋比とコンクリートの長期圧縮応力および鉄筋の長期圧縮応力との関係をそれぞれ示す。クリープや乾燥収縮の影響が大きく、特にコンクリート応力はクリープによって緩和したために減少し、圧縮軸力は一定であるため、鉄筋応力はその緩和分の応力が鉄筋に移動し増大したものと考えられる。これは、コンクリートの見かけ上のヤング係数が小さくなり、鉄筋のコンクリートに対する見かけ上のヤング係数比が大きくなったことによる。そして、鉄筋応力は長期許容応力度を超える結果となった。これは、既往の見解<sup>9)</sup>と同様であり、鉄筋応力については小室ら<sup>9)</sup>による超高強度コンクリートによる解析結果と同様な結果となり、長期性状を考慮する必要性を示している。なお、本解析条件内では、乾燥収縮のないクリープのみ生じる条件でも、その傾向は大きく、乾燥収縮よりもクリープの影響が大きいものと考えられる。

#### 3.2 短期解析

図-12に、短期解析時（部材変形角：1/200）におけるコンクリートの塑性ひずみのコンター図の例（C36-2-0,C36-2-1,C36-2-2）を示す。

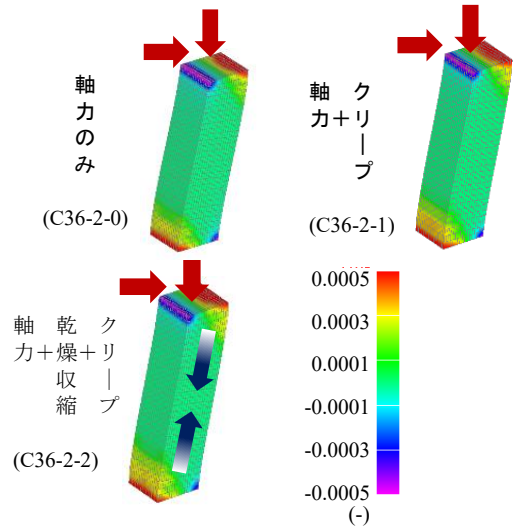


図-12 短期解析時のコンクリート塑性ひずみ (0.005rad)

図-13~16に、部材角と材端モーメントとの関係を示す。乾燥収縮やクリープの影響によって、材端モーメントの最大値は低下した。ただし、大変形になるとその影響はほとんどなく、同一の履歴をたどった。しかし、いずれのモデルについても、初期あるいは最大値近くの変形性状はその影響を大きく受け、クリープおよび乾燥収縮によって曲げ剛性の低下を示す結果となった。この傾向についても、小室ら<sup>9)</sup>によるファーバーモデルによ

る解析結果と同様であった。

そこで、図-17および18に、最大耐力までの力学的コンプライアンスとして、同一条件の乾燥収縮・クリープなしの場合の材端曲げモーメントの計算値（学会式による曲げ終局モーメント）に対する比と部材角との関係例を示す。高い材端モーメントのレベルになると、変形が大きく増大するが、その程度は、乾燥収縮やクリープの無いものよりも、クリープを有するものの方が大きく、さらに乾燥収縮が生じるものの方がより大きくなる。したがって、同図からも乾燥収縮やクリープが曲げ剛性に与える影響を有することがわかる。

図-19～24に、構成材料の応力の推移を示す。鉄筋応力については、乾燥収縮やクリープの影響によって、部材角早期に圧縮鉄筋が圧縮降伏した。引張鉄筋については、その代わり引張降伏する部材角は大きくなった。これらの傾向も小室ら9)による研究結果と同様である。ただし、コンクリート応力については大きな差異は見られなかった。

以上のように、乾燥収縮やクリープなどの長期的な性状によって、柱の短期的な性能に大きく影響を受けるこ

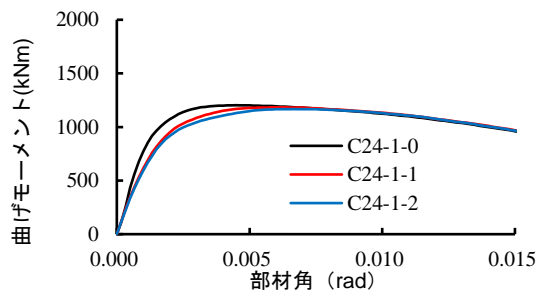


図-13 部材角と材端モーメント (C24-1)

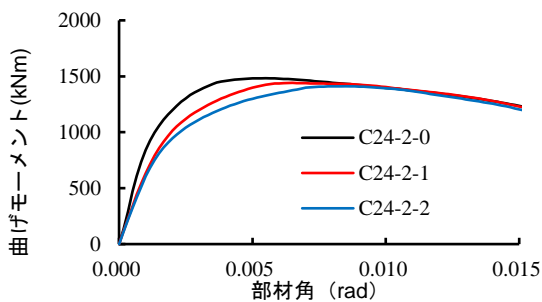


図-14 部材角と材端モーメント (C24-2)

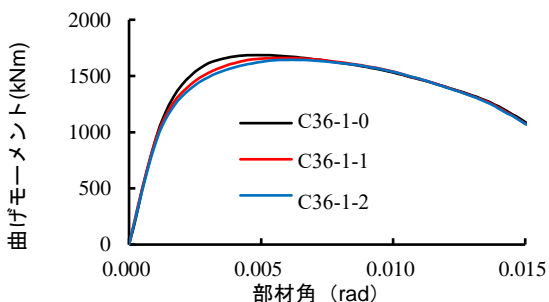


図-15 部材角と材端モーメント (C36-1)

とが分かった。今後は、変形増大の要因について詳細な検討が必要である。

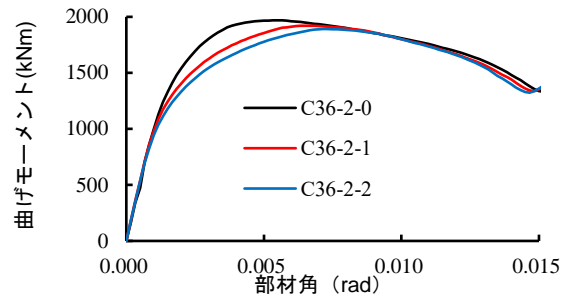


図-16 部材角と材端モーメント (C36-2)

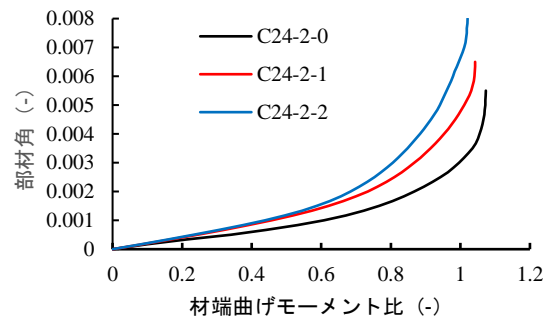


図-17 力学的コンプライアンス (G24-2)

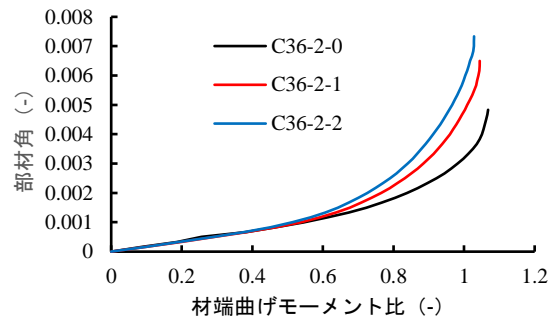


図-18 力学的コンプライアンス (C36-2)

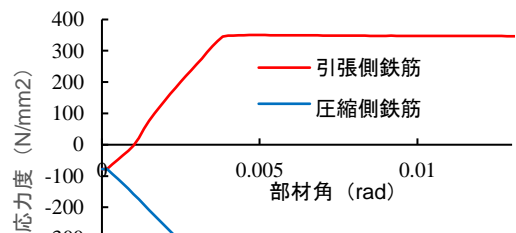


図-19 鉄筋応力 (C36-2-0)

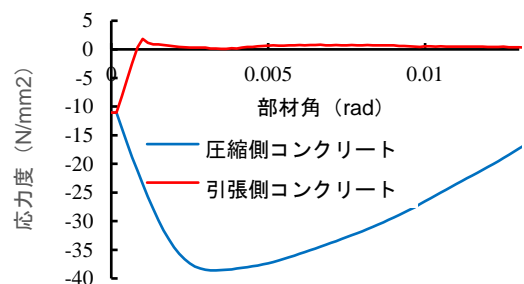


図-20 コンクリート応力 (C36-2-0)

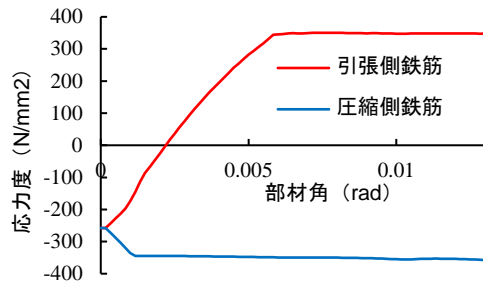


図-2 1 鉄筋応力 (C36-2-1)

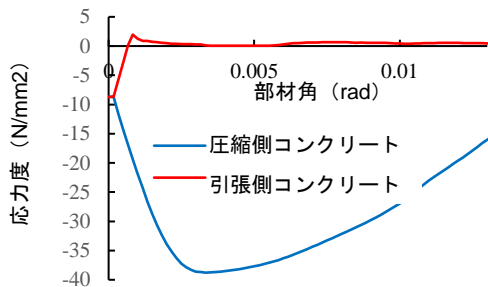


図-2 2 コンクリート応力 (C36-2-1)

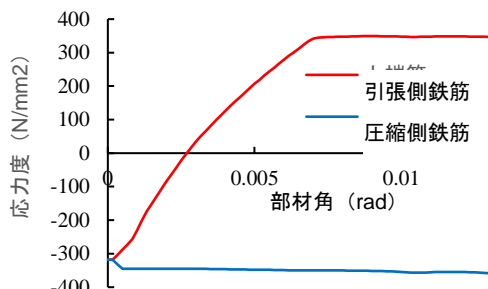


図-2 3 鉄筋応力 (C36-2-2)

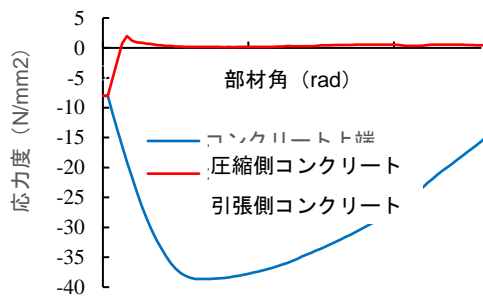


図-2 4 コンクリート応力 (C36-2-2)

#### 4. まとめ

本研究では、柱の圧縮強度の  $1/3$  の高軸力と  $400 \mu$  の乾燥収縮ひずみを作用させ、コンクリートの乾燥収縮ひずみやクリープ変形が生じたときの鉄筋コンクリート柱の曲げせん断性能について、FEM による解析的研究を行った。その結果、以下の知見を得た。

1) 高軸力と乾燥収縮が同時に作用する場合の柱の長期的な性状について、コンクリートの圧縮応力はクリープによって、徐々に鉄筋にその応力が移行し、減少する

結果となった。同時に、鉄筋の圧縮応力は徐々に増大し、圧縮の降伏点に近づき、長期許容応力度を超えてしまう結果が得られた。

- 2) 乾燥収縮やクリープの影響によって、材端モーメントの最大値ならびに最大値前後の曲げ剛性は低下した。ただし、最終的にはその影響はなく同一の履歴をたどった。しかし、いずれのモデルについても最大値近くの変形性状はその影響を大きく受け、クリープおよび乾燥収縮によって大きな変形を生じた。
- 3) 曲げせん断を受けた時の柱の圧縮縁の鉄筋応力は、加力初期に圧縮降伏する恐れがあり、小室らによる既往の研究と同様な結果となった。
- 4) 以上の効果は、本解析条件内については、乾燥収縮よりクリープによる影響の方が大きい傾向がみられた。

#### 謝辞

本研究は、2018 年度大阪市立大学卒業生・井手野由佳氏・渡邊理沙氏（現・大林組）の卒論をまとめたものである。ここに謝意を示す。

#### 参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 (2010)
- 2) 日本建築学会：コンクリート構造保有水平耐力計算規準（案）・同解説, 2016
- 3) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針（案）・同解説, 2006
- 4) 土木学会：コンクリート標準示方書（設計編）, 2017
- 5) 大阪市立大学・ソフトエボリューション社製「Soft OCU (FEM SOFTWARE ORIENTED TO CREEP AND ELASTO-PLASTIC ANALYSIS FOR ULTIMATE PROPERTIES OF CONCRETE STRUCTURES)」, 2015
- 6) 渡部・富田ほか：時間依存性自己ひずみによる劣化ひび割れに関する解析的研究（その 5, 6）, 日本建築学会全国大会講演梗概集, 2018
- 7) 大阪広域生コンクリートホームページ (<https://www.osaka-kouiki.or.jp/>): 普通コンクリート標準調合表（高性能 AE 減水剤）, 2018.3 更新
- 8) Al-Mahaidi, R.S.H.: Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Deep Members, Report 79-1, Department of Structural Engineering, Cornell University, Jan., 1979.
- 9) 小室努・今井和正・是永健好・渡邊史夫：超高強度鉄筋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, Vol.30, No.3, pp223-228, 2008