

# 論文 収縮・クリープを考慮した超高強度鉄筋コンクリート柱の短期水平挙動の FEM 解析

堀川 真之\*1・田嶋 和樹\*2・白井 伸明\*3

**要旨**：コンクリートの時間依存挙動が RC 構造物の破壊メカニズムに及ぼす影響を解明することは、非常に重要である。本研究では、約 4 年間にわたる高強度 RC 柱部材の長期軸圧縮載荷実験を解析対象に収縮およびクリープを連成可能とする解析モデルを構築し、解析結果の妥当性を確認した。また、時間経過解析から予測された応力状態を初期応力として瞬間解析に反映することで、収縮・クリープを考慮した RC 柱の破壊過程を概ね模擬できた。

**キーワード**：超高強度コンクリート、鉄筋コンクリート柱、収縮、クリープ、3次元 FEM 解析

## 1. はじめに

我が国では、1980 年代から鉄筋コンクリート（以下、RC）造建物の高層化に伴い、高強度コンクリートが使用されるようになった<sup>1)</sup>。しかし、高層 RC 造建物の下層柱には高軸力が作用するため、コンクリートの時間経過に伴うクリープ変形が顕著となることが問題視されている。このような背景から近年では小室ら<sup>2)</sup>や高森ら<sup>3)</sup>により高層 RC 造建造物の下層階柱を想定した軸方向力長期載荷実験が行われ、クリープを原因とした軸力保持限界の低下や繰返し載荷による耐力低下が顕著になることが示されている。また、A.E.Schultz ら<sup>4)</sup>は、軸方向の長期圧縮載荷により RC 柱の曲げ・せん断耐力、せん断ひび割れ時強度およびエネルギー散逸の低下が生じることを実験的に確認しており、これらの原因として軸応力再分配のメカニズムおよび帯筋拘束の影響を挙げている。

本研究の目的は、種々のコンクリートの時間依存挙動が RC 構造物の破壊メカニズムに及ぼす影響を力学的に解明することである。本報では、特にクリープの問題に着目し、高森らの実験<sup>3)</sup>を対象として、収縮・クリープ解析モデルを構築するとともに、長期載荷の影響が RC 柱の耐震性能に及ぼす影響を解析的に検討する。

## 2. 収縮・クリープ解析概要

### 2.1 解析対象試験体概要

表-1 に材料特性、図-1 に試験体の概要を示す。実験では、凝結始発とともに自己収縮の計測が始まり、脱型後には乾燥収縮の計測も始まった。続いて、材齢 28 日における軸力載荷時からクリープひずみの計測も開始され、材齢 1400 日まで収縮ひずみおよびクリープひ

表-1 材料特性

コンクリート			
材齢 [日]	28		
圧縮強度 [N/mm <sup>2</sup> ]	150.7		
ヤング係数 [ $\times 10^4$ N/mm <sup>2</sup> ]	4.34		
圧縮強度時ひずみ [ $\mu$ ]	3713		
割裂引張強度 [N/mm <sup>2</sup> ]	7.33		
ポアソン比 [-]	0.201		
コンクリート			
材齢 [日]	1443		
圧縮強度 [N/mm <sup>2</sup> ]	177		
ヤング係数 [ $\times 10^4$ N/mm <sup>2</sup> ]	4.70		
圧縮強度時ひずみ [ $\mu$ ]	4046		
割裂引張強度 [N/mm <sup>2</sup> ]	7.70		
ポアソン比 [-]	0.22		
鉄筋			
鉄筋種類	D13	D16	U6.4
降伏点 [N/mm <sup>2</sup> ]	720.2	739.7	1374.0
弾性係数 [ $\times 10^5$ N/mm <sup>2</sup> ]	1.91	1.99	2.10
降伏ひずみ度 [ $\mu$ ]	3777	3716	6540
引張強さ [N/mm <sup>2</sup> ]	931.2	931.2	1431.0
伸び [%]	9.6	11.9	10.7

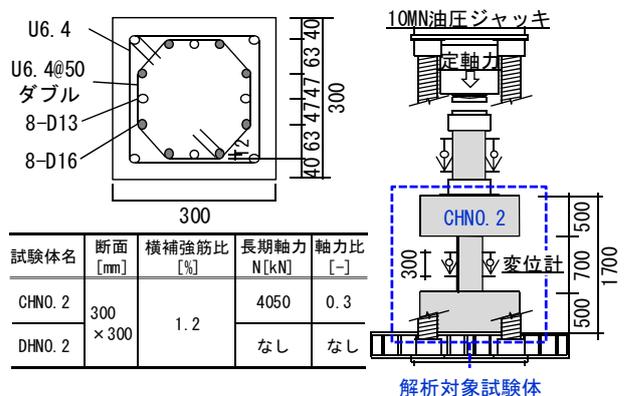


図-1 試験体概要

\*1 日本大学大学院 理工学研究科建築学専攻 (正会員)

\*2 日本大学 理工学部建築学科助教 博士 (工学) (正会員)

\*3 日本大学 理工学部建築学科教授 工博 (正会員)

ずみの計測が継続された。その後、長期軸圧縮荷重を一旦徐荷した後、正負交番繰り返し水平荷重を実施している。試験体寸法は実大寸法の約 1/3~1/4 であり、材齢 28 日の圧縮強度が 150[MPa]の超高強度 RC 造柱 (DHNO.2 および CHNO.2)を解析対象試験体とした。実験では、コンクリート打設後 7 日間は湿布とシートにより養生され、材齢 8 日目に型枠が脱型された後、実験室に放置された。長期軸力荷重は材齢 28 日目より開始され、軸力比 0.3(4050kN)を保つように約 1400 日間制御された。なお、変位は、柱試験区間内表面に埋設したボルト間の相対変位を変位計により測定され、これを測定区間内長さで除して平均ひずみとしている。また、試験体内部の柱高さ中央の位置に埋設した埋め込みひずみ計および鉄筋各所に貼付したひずみゲージよりコンクリートならびに鉄筋のひずみを測定している。

## 2.2 解析モデルの概要

図-2 に FEM 要素分割図を示す。コンクリート要素には、8 節点ソリッド要素を用いた。鉄筋はトラス要素とし、完全付着を仮定している。試験体のスタブは剛体とした。また、材齢 28 日目に定軸力(4050kN)を試験体上部に与える。境界条件は、スタブ下面を全面ピンとした。また、スタブ上面は、クリープ解析時に面外および面内方向の自由度を拘束した。なお、解析は汎用解析コード DIANA9. 4<sup>9)</sup>を用いた。

### 2.2.1 自己収縮ひずみおよび乾燥収縮ひずみ

高強度コンクリートの場合、全収縮量の大部分が若材齢時に生じる自己収縮で占められることが報告されている<sup>1)</sup>。本報では、自己収縮ひずみは材齢 7 日目までに実験により計測された軸ひずみ約 350[μ]を解析モデルに与え、以後一定とした。また、乾燥収縮ひずみは、材齢 8 日目から実験終了時まで CEB-FIP model code 1990<sup>6)</sup>に示される式(1)により算定した。

$$\varepsilon_{cs}(t, t_s) = \varepsilon_{cs0} \cdot \beta_s(t - t_s) \quad (1)$$

ここで、 $\varepsilon_{cs0}$  は概念収縮係数、 $\beta_s$  は時間に伴う収縮の発達を記述する係数、 $t$  はコンクリート材齢、 $t_s$  は収縮の開始時におけるコンクリート材齢を表している。

### 2.2.2 クリープひずみ

DIANA では、クリープ関数を記述するために Kelvin チェーンモデルおよび Maxwell チェーンモデルを組み込んでいる。特徴としては、前者は、クリープに伴うひずみを記述し、後者は、応力の弛緩を記述するものである。本研究では、クリープひずみに着目した研究であるため Kelvin チェーンモデルを採用することにする。例えば、直接入力である Kelvin チェーンモデル (図-3)におけるクリープ関数は式(2)のように Dirichlet 級数として表現される。

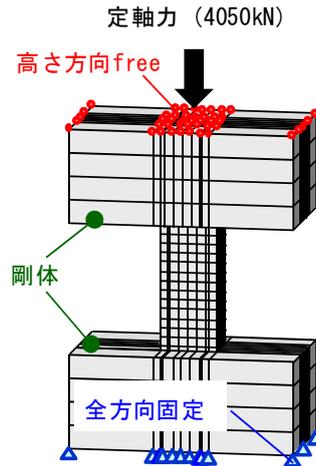


図-2 FEM 要素分割図

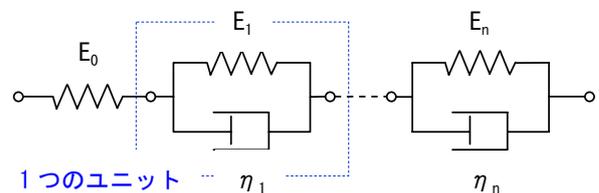


図-3 Kelvin チェーンモデル

$$J(t, \tau) = \sum_{\alpha=0}^n \frac{1}{E_{\alpha}(\tau)} (1 - e^{-\frac{t-\tau}{\lambda_{\alpha}}}) \quad (2)$$

ただし、

$$\lambda_{\alpha} = \frac{\eta_{\alpha}}{E_{\alpha}} \quad (3)$$

ここで、 $J(t, \tau)$  はクリープ関数、 $E_{\alpha}(\tau)$  はモデルの剛性、 $\eta_{\alpha}$  はダッシュポットの粘性係数、 $\lambda_{\alpha}$  は遅延時間を示す。遅延時間  $\lambda_{\alpha}$  は、Kelvin チェーン内の各ユニットのバネの剛性およびダンパーの粘性から決定される。直接入力の場合、実験によりユニットの各パラメータを確認する必要がある。

一方、間接入力である CEB-FIP model code 1990 も提供されている。CEB-FIP model code 1990 では、クリープ関数およびクリープ係数を式(4)および式(5)により定義している。

$$J(t, t_0) = \frac{1}{E_c(t_0)} + \frac{\varphi(t, t_0)}{E_{c28}} \quad (4)$$

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_0 \cdot \beta_c(t - t_0) \quad (5)$$

ここで、 $J(t, t_0)$  はクリープ関数、 $E_c(t_0)$  は荷重時のコンクリート材齢における弾性係数、 $E_{c28}$  はコンクリート材齢 28 日における弾性係数、 $\varphi(t, t_0)$  はクリープ係数、 $\varphi_0$  は概念クリープ係数、 $\beta_c$  は荷重後の時間に伴うクリープの発

達を記述するための係数、 $t$  は考慮する時点におけるコンクリート材齢、 $t_0$  は載荷時におけるコンクリート材齢を表している。CEB-FIP model code 1990 では、クリープ係数を求めることで簡易的にクリープ関数を決定できる。なお、DIANA においてモデルコードによるクリープ関数を利用する場合、モデルコードから算出されたクリープ関数に Kelvin チェーンモデルを最小二乗法により曲線適合させることで自動的にチェーンモデルの各ユニットのパラメータを決定している。本報では、クリープひずみは、載荷材齢 28 日目より実験終了時まで、CEB-FIP model code 1990 を用いてクリープ関数を算出し、Kelvin チェーンモデルを曲線適合することで各ユニットの材料特性を決定した。

### 2.2.3 曲線適合の検討

モデルコードを用いて Kelvin チェーンモデルに曲線適合する際、作成されるチェーン内のユニット数を指定する必要がある。ここでは、ユニット数の違いが解析結果に及ぼす影響を把握するために、ユニット数をパラメータとした要素解析を行う。表-2 に材料特性、表-3 に解析パラメータ一覧、図-4 に要素解析モデルを示す。コンクリート要素には、8 節点のソリッド要素を用いた。クリープひずみは、クリープ関数を CEB-FIP model code 1990 から算出し、Kelvin チェーンモデルに曲線適合させることでモデル化した。また、軸力は節点荷重として材齢 28 日目に各節点に与え、以後一定とした。図-5 に解析結果を示す。計算値に対して、CASE1 および CASE2 は、凹凸のある曲線として適合されているのが分かる。一方、CASE3 では、計算値と良い対応を示している。よって、曲線適合される際にユニット数が少ないと、解析精度が低下することが分かる。以上のことから、本報では、クリープ曲線を Kelvin チェーンモデルに曲線適合させる場合には、ユニット数を 10 個として解析を行う。

### 3. 収縮・クリープ解析結果の検証

実験結果は、材齢に関して温度履歴を考慮した有効材齢を用いて評価している。しかし、今回は解析結果の検証を目的とするため、実材齢を用いることにする。特に、型枠脱型時（材齢 8 日）、載荷開始時（材齢 28 日目）および実験終了時（材齢 1400 日）に生じたひずみの値に着目して検証する。

自己収縮および乾燥収縮（以下、収縮）ひずみの解析結果を図-6 に示す。材齢 7 日に解析モデルに与えた自己収縮ひずみは、実験値であるためグラフの傾きを破線で示してある。材軸直交方向（以下、横方向）のひずみは実験値の傾向を捉えており、最終的に生じるひずみは実験値とほぼ同等となった。一方、図-7 にクリープひずみの解析結果を示す。計測位置による違いを模擬でき

表-2 材料特性

平均圧縮強度	150	[ N/mm <sup>2</sup> ]
ヤング係数	43400	[ N/mm <sup>2</sup> ]
ポアソン比	0.2	[ - ]
相対湿度	60	[ % ]

表-3 解析パラメータ一覧

CASE	ユニットの数
CASE-1	3
CASE-2	5
CASE-3	10

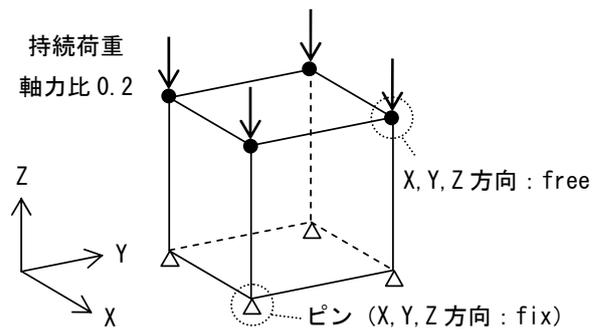


図-4 要素解析モデル

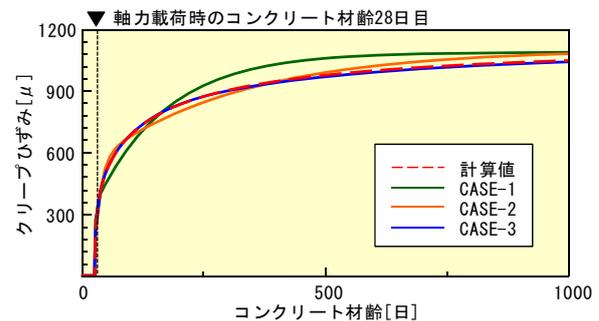


図-5 要素解析結果

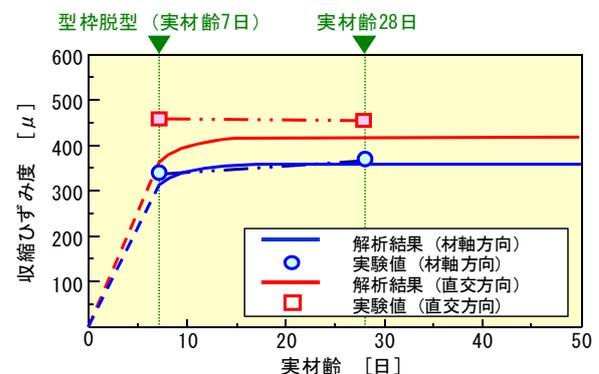


図-6 収縮ひずみ-実材齢

ていないが、実験終了時に生じたひずみの値は、実験値と良い対応を示す結果となった。

図-8 に実材齢 1400 日までの主筋の軸ひずみ度の推移を示す。また、図-9 には、図-8 を拡大した実材齢 100

日までの推移を示す。解析終了時には、コンクリートには軸方向に収縮ひずみが 420[μ]、クリープひずみが 710[μ]、弾性ひずみが 913[μ]生じている。コンクリートと鉄筋のひずみは適合するため、主筋にも同等のひずみが伝達され、軸ひずみ度は 2043[μ]となった。しかし、図-8 からも分かるように実験終了時には、主筋に約 2600[μ]の軸ひずみが生じている。今回の解析モデルでは、①温度ひずみによる影響を考慮していない点、②鉄筋とコンクリート間を完全付着としている点、および③粘弾性モデルとひび割れモデルを併用していないなどの理由から、主筋の軸ひずみ量を過小評価したと考えられる。一方、図-9 からも分かるように、型枠脱型時および軸力載荷時に生じたひずみは実験値と比較的良好な対応を示している。

#### 4. 軸応力の再分配

鉄筋コンクリートは無筋コンクリートとは異なり、コンクリートのクリープ変形を鉄筋が拘束するため、RC柱内部では軸応力の再分配が生じる。図-10 に主筋 D16 (図-1 参照) の 1 本あたりの軸力度の推移を示す。軸ひずみ度の推移に伴い、主筋には圧縮応力が累積され、最終的に約 400[N/mm<sup>2</sup>]の圧縮応力が生じている。この結果から全鉄筋の負担軸力を求めると、軸力載荷時には約 16[%]、最終的には約 25[%]まで負担率が変化していることが確認できる。したがって、コンクリートから鉄筋へ軸力が約 9[%]移行したと言える。一方、実験では軸力が鉄筋へ約 10[%]移行したということが示されており<sup>3)</sup>、解析値は概ね妥当であると考えられる。

#### 5. 帯筋拘束が柱挙動に及ぼす影響

RC造柱に乾燥収縮などの収縮が生じる場合、収縮により生じる横方向ひずみを帯筋が拘束するため、コアコンクリートには横方向に引張応力が生じる。このことは、斜めひび割れの形成に関わると考えられ、柱のせん断強度に影響を及ぼす可能性がある。したがって、収縮・クリープによりコアコンクリートに生じる引張応力の発達を評価する必要がある<sup>4)</sup>。図-11 に高さ方向中央の水平断面内におけるコアコンクリートの x 方向におけるひずみの推移を示す。図中には、収縮のみおよびクリープのみを考慮した解析モデルの結果も示す。ここでは、ひずみの解釈に注意が必要である。収縮が生じると、コンクリートには圧縮ひずみが生じる。その後、鉄筋にひずみが適合し、鉄筋に圧縮応力が生じる。さらに、コンクリートには鉄筋との釣合を保つように引張応力が生じる。図-11 のような外力と直交する方向では、同様のことがコンクリートのクリープひずみと鉄筋との間に成り立つ。材齢 28 日までは、収縮により最大で約 400[μ]

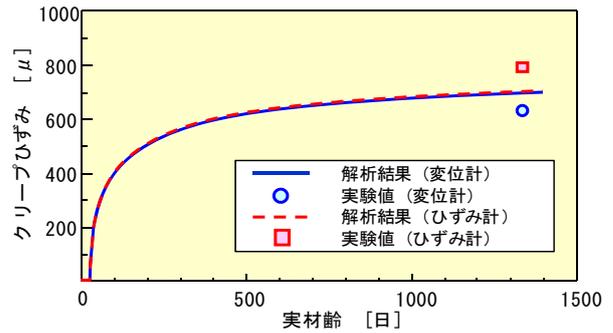


図-7 クリープひずみ-実材齢

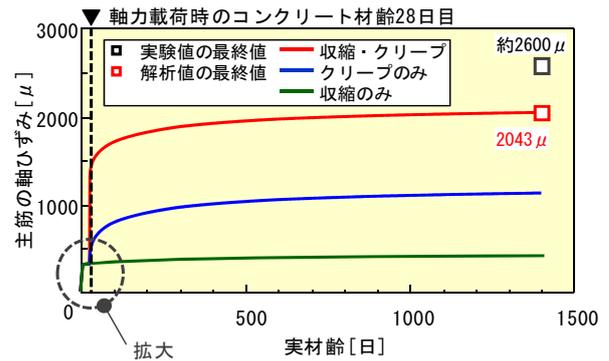


図-8 主筋軸ひずみ度-実材齢

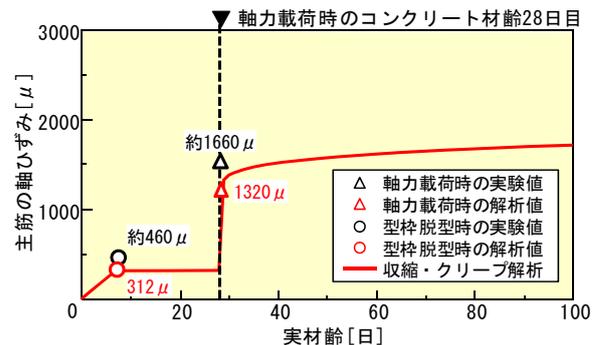


図-9 材齢 100 日までの主筋軸ひずみ度-実材齢

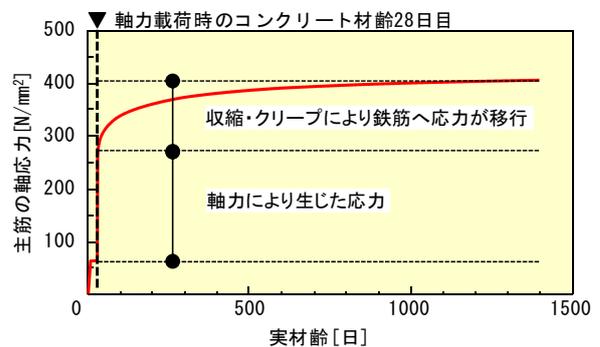


図-10 主筋の軸応力度-実材齢

の圧縮ひずみが生じる。軸力載荷後、断面内では圧縮ひずみが卓越するが、その傾向はモデルにより異なる。収縮のみを考慮した場合、収縮の影響により軸力載荷時に生じた引張方向へのひずみが僅かに減少する。クリープのみを考慮した場合、高軸力によるクリープによりコン

クリートが膨張するため、引張ひずみが増大する。そのため、両者を考慮した場合、クリープにより生じる引張ひずみが収縮により若干緩和されている。なお、今回の検討では、断面内に生じる時間に伴う変化を応力で表現していない。これは、若材齢時においてはコンクリートの強度発現が著しい段階であり、ヤング係数の値が材齢 28 日目と比べて小さいため、材齢 28 日のヤング係数を用いて応力を評価すると過大に評価してしまう可能性があるためである。従って、若材齢時の応力状態を評価するには、コンクリートのヤング係数の評価を今後の課題として検討を行い、コンクリートの応力を正しく評価できる手法を検討する必要がある。また、本研究は、約 1400 日間という長期的な視点に立った研究であるため、若材齢コンクリートに関する議論は行わないことにする。

## 6. 初期応力を考慮した RC 柱の水平変形性能の評価

### 6.1 DHNO.2 の解析概要および結果

#### (1) 解析概要

DHNO.2 試験体は、約 1400 日間実験室に放置されていたため、コンクリートの自己収縮および長期にわたる乾燥収縮により、鉄筋には圧縮応力が生じ、コンクリートには引張応力が生じている。この状態を瞬間解析に反映させるために、収縮解析により主筋および補強筋に生じた応力を各鉄筋の構成則に初期応力として導入することで実現象との整合性を計ることとした。コンクリートの材料特性は表-1 に示す材齢 1443 日目の特性を用いる。瞬間解析では、図-12 に示す構成則を用いた。圧縮側は Parabolic で表現し、下降域で囲まれる面積は、圧縮破壊エネルギー  $G_{fc}$  を要素代表長さ  $L_c$  で除した値である。 $G_{fc}$  は中村らの提案式<sup>7)</sup>より求めた。引張側は下降域に大岡ら<sup>8)</sup>の 3 直線モデルを用い、下降域で囲まれる面積は、引張破壊エネルギー  $G_f$  を要素代表長さ  $L_c$  で除した値である。 $G_f$  は大岡らの提案式<sup>8)</sup>より求めた。要素代表長さ  $L_c$  は、要素体積  $V$  と等価な体積をもつ球の直径とした ( $L_c = 2(3V/4\pi)^{1/3}$ ) とした。鉄筋の応力-ひずみ関係は bi-linear 型モデルとし、降伏後の 2 次剛性は初期剛性の 1/100 とした。非線形反復解析法は、標準 Newton-Raphson 法を採用した。

#### (2) 解析結果および考察

図-13 に DHNO.2 の解析結果を示す。図中の実験結果は骨格曲線であり、シンボルは正側で生じた各現象である。解析結果は、耐力を若干高く評価しているが、ポストピークは良い対応を示しており、概ね実験結果を追従している。さらに、曲げひび割れ点、圧壊点および最大耐力点は、実験結果と同等の変形角で生じており破壊過程をおおよそ模擬していると考えられる。また、収縮を

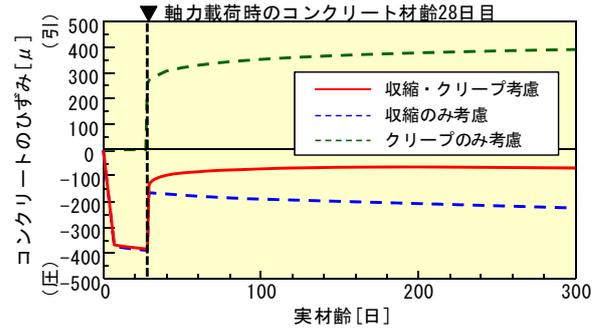
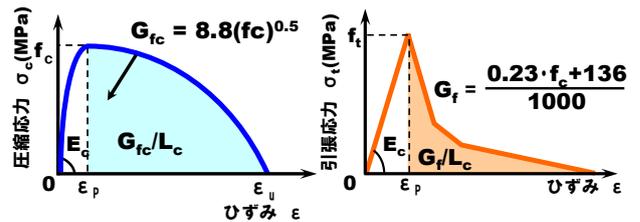


図-11 実材齢-コンクリートひずみ度 (X 方向)



(1) 圧縮側構成則 (2) 引張側構成則

図-12 コンクリート構成則

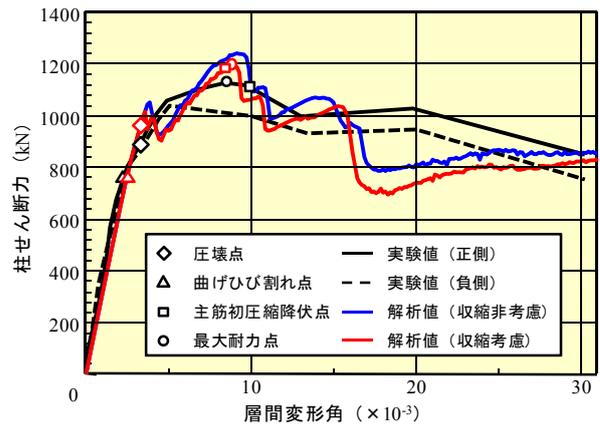


図-13 DHNO.2 の解析結果

考慮した解析では耐力低下が確認できるが、これは収縮により事前に主筋に圧縮応力が存在しており、主筋の曲げ圧縮破壊が早期に生じたためである。

### 6.2 CHNO.2 の解析概要および結果

#### (1) 解析概要

実験では、約 1400 日間の長期軸圧縮荷重後、軸力を一旦徐荷し、その後軸力を再付加させ 1443 日目に正負交番繰り返し水平載荷実験を行っている。従って、解析では、1400 日間にわたり収縮・クリープ解析を行い、軸力を徐荷後、さらに 43 日間の時間経過解析を行い、得られた応力状態を初期応力として瞬間解析に反映させる。瞬間解析では、初期応力を与えた後に軸力を再付加させ、水平変位を強制的に与えていく。ただし、コンクリートの材料特性については、収縮・クリープを受けた一軸の強度特性が不明であるため、今回は材齢 1400 日

目における強度特性を用いて解析を行う。

## (2) 解析結果および考察

図-14にCHNO.2の解析結果を示す。ここでは、長期軸力を徐荷せずに、連続的に解析を行った結果(case2)も併せて示す。Case1では、圧壊点、主筋初圧縮降伏点および最大耐力は同一変形角で生じており、破壊過程は概ね良い対応を示している。一方、耐力をやや過小評価しているが、これは、クリープひずみにより主筋に圧縮ひずみが累加されていたためであり、解析モデルの都合上、徐荷という現象を正確にとらえきれていない可能性がある。一方、Case2では、圧壊点はCase1と同等である。しかし、主筋が早期に圧縮降伏しはじめ、実験値よりも最大耐力が10[%]低下した。A.E.Schultzら<sup>4)</sup>は、軸力を徐荷せず連続的に水平載荷に移行した実験を行い、持続荷重期間が長い程曲げ耐力が低下し、定性的ではあるが最大で約10[%]の耐力低下が生じる事を報告している。このことから、連続的に解析行ったCase2の結果も妥当であると考えられる。

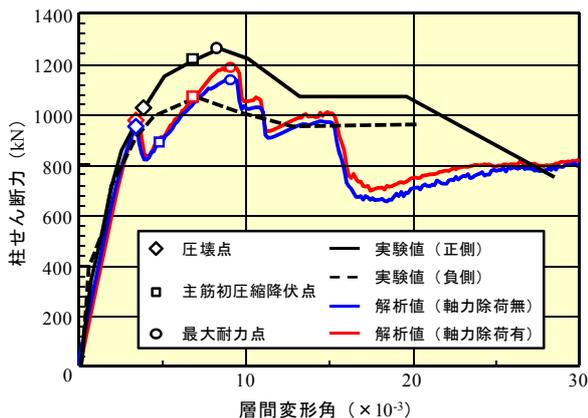


図-14 CHNO.2の解析結果

## 7.まとめ

- 1) 実験値およびCEB-FIP model code1990を用いて、収縮およびクリープを連成可能とする解析モデルを構築できた。
- 2) 収縮・クリープ解析によるRC柱の長期性状の分析を通じ主筋とコンクリート間の軸応力の再分配を確認した。

- 3) 若材齢時コンクリートの応力状態を確認するためには、時間経過とともに変化するヤング係数を評価する必要がある。
- 4) 初期応力を用いて収縮・クリープの影響を考慮した場合、概ね破壊性状を模擬できる事を確認した。

## 謝辞

本研究の一部は科学研究費補助金(基盤研究(C) 代表者:白井伸明)の助成を受けて行われたものである。また、研究の遂行にあたり、株式会社フジタの実験を参考にさせていただきました。ここに感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 社団法人日本コンクリート工学協会: 高強度コンクリート構造物の構造性能研究委員会報告集,2006.7
- 2) 小室努ほか: 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, 2008
- 3) 高森直樹ほか: 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1) RC造柱の収縮および圧縮クリープ特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2009.8
- 4) A.E.Schultz, S.S.Welton, and L.E.Rey: Long-Term Effects on Response of Reinforced Concrete Columns to Cyclic Loading, Journal of Structural Engineering, ASCE, vol.130, No.9, pp.1320-pp1332, 2004.9
- 5) DIANA Foundation Expertise Center for Computational Mechanics: DIANA Finite Element Analysis User's Manual, TNO Building and Construction Research., 2010
- 6) Comite Euro-International du Beton: CEB-FIP Model Code 1990
- 7) Nakamura, H., and Higai, T.: Compressive Fracture Energy and Fracture Zone Length of Concrete, Modeling of Inelastic Behavior of RC Structures under Seismic Loads, ASCE, pp.471~487, 1999.10
- 8) 大岡督尚, 橘高義典, 渡部憲: コンクリートの破壊パラメータに及ぼす短繊維混入および材齢の影響, 日本建築学会構造系論文集, 第529号, pp.1-6, 2000.3