

論文 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

小室 努^{*1}・今井 和正^{*2}・是永 健好^{*3}・渡邊 史夫^{*4}

要旨：超高強度コンクリートの圧縮クリープ算定法を用い、RC柱の長期圧縮性状について検討を行った。算定の結果、軸方向筋の負担軸力は、弾性計算と比較し大きく、軸力比 1/3 の場合、長期許容圧縮応力度を超えた。また、軸方向筋に普通強度鋼材を使用すると地震時に早期圧縮降伏し、高強度鋼材を使用することで回避できた。さらに、圧縮強度 150N/mm² のコンクリートを用いた柱試験体を 2 体製作し、一方は材齢 1 年まで軸力を載荷し、もう一方は無載荷とし、両柱の曲げせん断実験を実施した。軸方向筋に高強度鉄筋を使用しているため、著しい差は見られず、長期載荷後においても十分な耐震性能を有していることがわかった。
キーワード：超高強度コンクリート、圧縮クリープ、高強度鉄筋、許容応力度、自己収縮

1. はじめに

著者らは、圧縮強度 150N/mm² クラスの超高強度コンクリートの圧縮クリープを主な対象として、鉄筋コンクリート (RC) 柱の長期圧縮性状予測法の検討を行ってきた^{1),2)}。この予測法は、CEB-FIP model code 1990³⁾を部分的に修正したクリープ算定法を基本とし、施工過程に対応した段階載荷の影響を考慮した長期圧縮性状が把握できることが特徴である。本論文では、この予測法を用い、長期軸力を与えた RC 柱の軸方向ひずみを算定し、長期圧縮特性の把握と設計上の問題点を考察する。さらに、長期載荷をした RC 柱と無載荷の RC 柱の曲げせん断実験を実施・比較し、長期載荷が及ぼす耐震性能への影響を検討した。

2. 長期圧縮性状予測法

2.1 長期ひずみおよび軸力負担の算定法

長期荷重および収縮による RC 柱の軸方向のひずみ (ϵ_{total}) は式(1)で与えられる。このうち、鉛直応力に依存するひずみは、弾性ひずみとクリープひずみの和 ($\epsilon_{elastic} + \epsilon_{creep}$) であり、この量は、クリープ係数 ($\phi(t, t_0 - i)$) を用い、コンクリートの等価ヤング係数法および重合法⁴⁾により、段階載荷に対し、式(2)で求められる。ここでは、軸方向筋とコンクリートは完全付着を仮定する。クリープ係数 ($\phi(t, t_0 - i)$) は、CEB-FIP model code 1990³⁾を基に、超高強度コンクリートに対応できるように、コンクリート圧縮強度の影響係数を修正した方法により求めるものとし、その内容は、文献 1), 2) に示す。

収縮によるひずみ ($\epsilon_{shrinkage}$) は、超高強度コンクリートの場合、材齢 7 日程度までに生じる自己収縮による影響が大きく、水結合材比が低い高強度ほどその量は大きくなると報告されている⁵⁾。配合や収縮低減剤の有無、断

面寸法や拘束状態などで RC 柱における自己収縮ひずみは異なり、これらの影響を含めて定量的に示す資料はない。ここでは文献 5), 6) を参考に、 F_c150 の RC 柱の $\epsilon_{shrinkage}$ は、軸力載荷以前に 300 μ 生じるとし、載荷以降は生じないとする。

$$\epsilon_{total} = \epsilon_{shrinkage} + \epsilon_{elastic} + \epsilon_{creep} \quad (1)$$

ϵ_{total} : 全ひずみ

$\epsilon_{shrinkage}$: 収縮によるひずみ

$\epsilon_{elastic}$: 弾性ひずみ

ϵ_{creep} : クリープによるひずみ

$$\epsilon_{elastic} + \epsilon_{creep} = \sum \frac{N_i}{A_s E_s + \frac{A_c E_{c56}}{1 + \phi(t, t_0 - i)}} \quad (2)$$

N_i : i ステップに加わる長期 軸力

A_s : 軸方向筋断面積

E_s : 鋼材ヤング係数

A_c : コンクリート断面積

E_{c56} : コンクリートヤング 係数(材齢56日)

$\phi(t, t_0 - i)$: i ステップ $t_0 - i$ 日載荷の材齢 t 日のクリープ係数

本検討での、コンクリートおよび軸方向筋の負担軸力の推移状況 (一括載荷の場合の概念) を図 - 1 に示す。載荷前では、コンクリートの自己収縮により、軸方向筋は、コンクリートとの付着を介して、コンクリートの自由収縮を抑える働きとなり、圧縮ひずみおよび圧縮力 (N_{s-0}) が生じる。一方、コンクリート側は、軸方向筋の圧縮力とつりあう引張力 (N_{c-0}) が生じる (式(3)、式(4))。載荷軸力に対しては、軸方向筋側は、式(2)で求められた弾性ひずみとクリープひずみの和 ($\epsilon_{elastic} + \epsilon_{creep}$) に軸方向筋の軸剛性 ($E_s \cdot A_s$) を乗じた圧縮力

*1 大成建設株式会社 設計本部 構造グループ 博士 (工学) (正会員)

*2 大成建設株式会社 技術センター 建築技術研究所 博士 (工学) (正会員)

*3 大成建設株式会社 技術センター 建築技術研究所 博士 (芸術工学) (正会員)

*4 京都大学大学院 工学研究科建築学専攻 教授 博士 (工学) (正会員)

を負担し、それ以外をコンクリートが負担することとなる(式(5),式(6))。最終的な軸力は、軸方向筋が $N_{S-O} + N_S$ を、コンクリートが $N_{C-O} + N_C$ を負担する。本来であれば、自己収縮によるコンクリートの軸力(N_{C-O} , (引張))は、クリープひずみを算定する際に影響すると思われるが、荷重軸力によるコンクリートの負担軸力(N_C)と比較し、十分小さいので、クリープひずみ算定には考慮していない。

$$N_{S-O} = \varepsilon_{shrinkage} \cdot E_S \cdot A_S \quad (3)$$

$$N_{C-O} = -N_{S-O} \quad (4)$$

$$N_S = (\varepsilon_{elastic} + \varepsilon_{creep}) \cdot E_S \cdot A_S \quad (5)$$

$$N_C = N - N_S \quad (6)$$

- N_{S-O} : 自己収縮による軸方向筋の軸力
- N_{C-O} : 自己収縮によるコンクリートの軸力
- N_S : 荷重軸力における軸方向筋の負担軸力
- N_C : 荷重軸力におけるコンクリートの負担軸力
- N : 荷重軸力
- $\varepsilon_{shrinkage}$: (自己)収縮によるひずみ Fc150で300 μ とする。
- E_S : 鋼材のヤング係数
- A_S : 軸方向筋の断面積
- $\varepsilon_{elastic} + \varepsilon_{creep}$: 弾性ひずみとクリープひずみの和

式(2)より算出

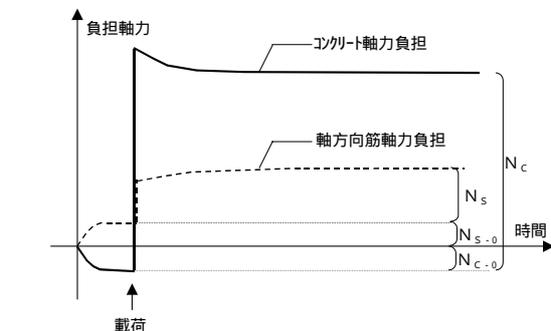
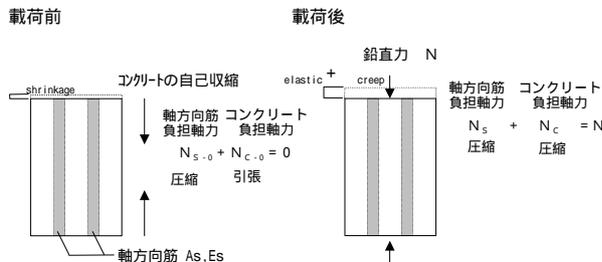


図 - 1 コンクリートおよび軸方向筋の軸力の推移状況

2.2 検討柱断面

検討するRC柱の断面を図-2に示す。コンクリートの設計基準強度はFc150,長期軸力の軸力比 $\rho_s=0.33$ とす

る。軸方向筋は主筋比で2.94%とし、材料強度を変数とし、規格降伏強度390N/mm²のSD390(Case-1)および規格降伏強度685N/mm²のUSD685(Case-2)とした。

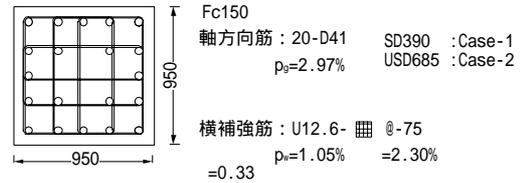


図 - 2 検討RC柱断面

2.3 検討手順

検討手順は、まず長期軸ひずみおよび軸力負担を算定し、次にその軸力負担を初期状態として、平面保持解析によるモーメント-曲率関係を求めることとした。

長期軸ひずみおよび軸力負担の算定は、2.1に示した方法により行い、コンクリートの収縮およびクリープを考慮した。仮定した荷重履歴条件を図-3に示す。実際の施工を想定し、材齢14日から16日刻みの30ステップを等荷重で、最終軸力が $\rho_s=0.33$ となるようにした。また、軸力負担算定のための最終材齢は、クリープによる軸力移行が十分に落ち着く材齢として、3000日とした。なお、長期軸ひずみの解析では、軸方向筋の応力レベルが低く、SD390においても弾性範囲内であるため、Case-1およびCase-2とも、同じ結果になる。

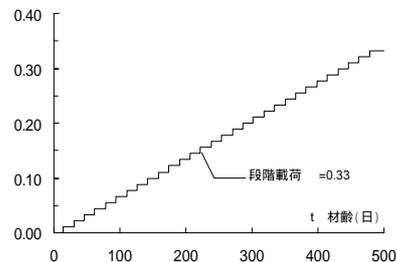


図 - 3 検討RC柱断面

2.4 長期ひずみおよび軸力負担の算定結果

Case-1およびCase-2の長期軸ひずみ推移を図-4に示す。図中には、軸ひずみの内訳($\varepsilon_{shrinkage}$, $\varepsilon_{elastic}$, ε_{creep})を示す。材齢7日までに $\varepsilon_{shrinkage}$ が生じ、材齢14日から478日までで荷重割合に応じて $\varepsilon_{elastic}$ が生じ、材齢14日以降 ε_{creep} が漸増している。軸力負担推移を図-5に示す。図中の点線は、弾性計算による軸力負担を示す。Case-1およびCase-2では、初期材齢にコンクリートの自己収縮により、軸方向筋には圧縮力が生じ、コンクリート側は、引張力が生じている。荷重時には軸剛性に応じて、軸力が分担されるが、クリープの影響でコンクリートから軸方向筋に軸力が徐々に移行している。また、弾性計算による軸力負担と比較し、計算結果は、軸方向筋の負担が大きくなっている。

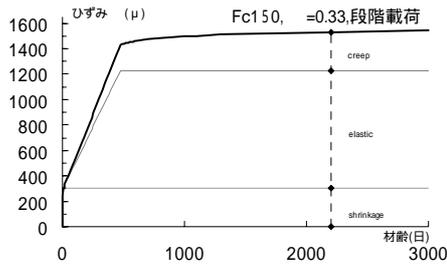


図 - 4 軸ひずみの推移

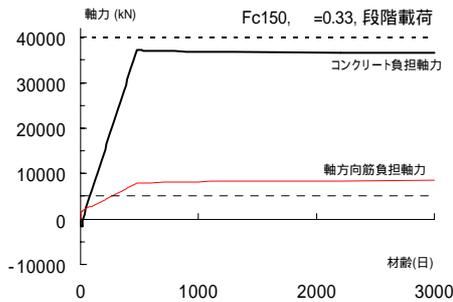


図 - 5 軸力負担の推移

長期軸力最終負担を表-2に示す。弾性解析の場合では、長期軸力は、軸剛性に応じて分担され、軸方向筋の負担が11%、コンクリートの負担が89%である。これに対し、コンクリートの収縮およびクリープを考慮したCase-1およびCase-2では、弾性軸剛性による軸力の分担から、収縮およびクリープによるコンクリートから軸方向筋への軸力移行が生じる。この結果、軸方向筋の負担が19%と大きくなっている。また、弾性解析では、軸方向筋の応力度が190N/mm²であるのに対し、収縮およびクリープを考慮した場合には316N/mm²である。この値は、鉄筋コンクリート構造計算規準⁷⁾に示されるSD390までの太径鉄筋の許容圧縮応力度200N/mm²を大きく超えている。また、SD390の規格降伏応力度に対して0.81倍、SD685の規格降伏応力度に対して0.46倍である。

表-2 長期軸力最終負担

	軸方向筋負担 (kN)	コンクリート負担 (kN)	軸方向ひずみ (μ)
弾性解析	$N_{S,E} = 5,091$ [11.3%, $s=190\text{N/mm}^2$]	$N_{C,E} = 40,034$ [88.7%, $c=45.7\text{ N/mm}^2$]	926
Case-1 Case-2	$N_S = 8,470$ [18.8%, $s=316\text{N/mm}^2$]	$N_C = 36,655$ [81.2%, $c=41.9\text{ N/mm}^2$]	1,541

() 内には、軸力負担割合および応力度を示す。

2.5 長期載荷後のRC柱の耐震性能

上記軸力をコンクリートおよび軸方向筋に負担させ、平面保持を仮定し、断面の曲率を漸増させるファイバーモデルによる断面解析を行った。ファイバーモデルは、かぶりコンクリート部分(プレーンコンクリート)とコアコンクリート部分(拘束コンクリート)を考慮したモ

デルとする。材料の応力-ひずみ関係は、プレーンおよび拘束コンクリートについては100~180N/mm²を対象として著者らが提案したモデル⁸⁾を、鉄筋については完全弾塑性モデルを用いる。図-6にプレーンおよび拘束コンクリートの応力-ひずみ関係を示す。

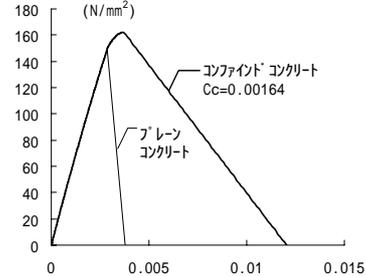


図 - 6 コンクリートの応力 - ひずみ関係

モーメント-曲率関係を図-7に示す。図中には軸方向筋の圧縮および引張降伏時およびカバーコンクリートの剥離時を示す。カバーコンクリートの剥離は圧縮緑ひずみが3000μに達した時点と定義した。図中の細線は、長期軸力を軸方向筋およびコンクリートの弾性剛性に応じて分担させた場合の解析結果である。

軸方向筋にSD390を使用したCase-1では、1次ピークであるカバーコンクリートの剥離以前に軸方向筋の圧縮降伏が生じている。軸方向筋の圧縮降伏が1次ピーク時耐力の約35%時点と早期に生じている。これは、長期軸力設定時に、収縮およびクリープを考慮して、軸方向鉄筋の応力度が、SD390の規格降伏応力度の0.81倍と高くなっていったためである。軸方向鉄筋にSD685を使用したCase-2では、1次ピークと2次ピークの間で軸方向筋の圧縮降伏が生じている。また、軸方向筋およびコンクリートの弾性剛性に応じて分担させた場合(細線)と収縮およびクリープを考慮した場合(太線)の比較では、モーメント-曲率関係で大きな差異が無い。

2.6 考察

軸力比1/3相当の長期軸力を負担する超高強度コンクリートを用いたRC柱において、軸方向筋に普通強度鋼材を使用した場合、低い水平力レベルで、圧縮鉄筋が降伏をする可能性がある。これは、大地震時における軸方向筋の座屈と中小地震後の損傷の可能性が考えられる。これに対し、軸方向鉄筋の高強度鋼材を用いると、早期の圧縮降伏が回避できる結果となった。超高強度コンクリートを用いたRC柱の長期設計においては、コンクリートの収縮やクリープの影響を考慮して軸方向ひずみを算定した上で、以下のことが適していると考えられる。

- ・軸力比($N/(B \cdot D \cdot F_c)$)を1/3以下として、コンクリートの圧縮ひずみを制限

- ・軸方向鉄筋の長期圧縮応力度を規格降伏強度の 1/2 程度として、早期の圧縮降伏を防止する。(今回の検討で、長期軸力での軸方向筋の応力度が 320 N/mm²程度 [表 - 2]に対し、降伏強度 685 N/mm²の高強度鉄筋を使用することで圧縮降伏を十分遅らせることができた。)
- ・鉛直荷重により柱に大きな曲げモーメントが加わるような場合(たとえば、ロングスパンが取り付く外注)には、ひび割れ幅を制御するため、引張軸方向筋のひずみを約 1000 μ (文献 7)に示される鉄筋の許容引張応力度に相当する程度)若しくはそれ以下のひずみに制限する。

このようにすれば、軸方向鉄筋に高強度鋼材を使用し、超高強度コンクリートの特性を活かし、軸力比 1/3 程度の長期軸力まで設計可能となり、早期の軸方向筋圧縮降伏を避けることができる。ただし、この場合の長期許容応力は、鉄筋コンクリート構造計算規準⁷⁾に示される太径鉄筋の許容圧縮応力度 200N/mm²を上回る。この点に関し、さらなる実験的な評価や解析が必要と考えられる。

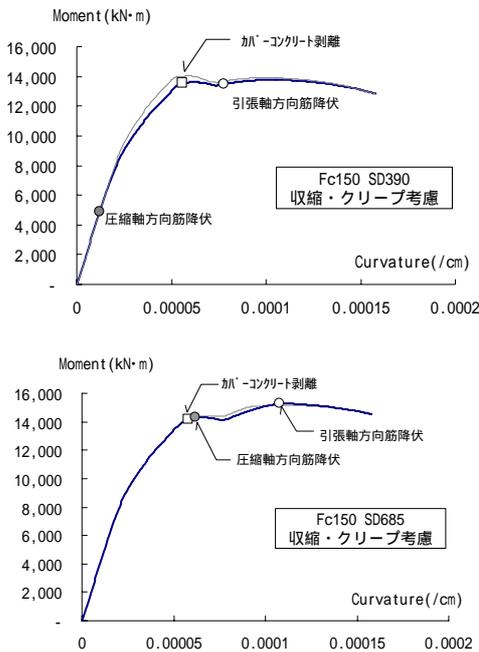


図 - 7 モーメントー曲率関係

3. 構造実験

3.1 試験体および使用材料

圧縮強度が 150N/mm²級のコンクリートを使用した RC 柱に圧縮力を長期載荷した後に、曲げせん断実験を行い、長期載荷による耐震性能への影響を検討する計画とした。試験体一覧を表 - 3 に、試験体配筋図を図 - 8 に示す。試験体は、配筋、使用材料が同一の 2 体を作製し、DL150-1 は約 1 年間の長期軸力を載荷した後に、DL150-0

は無載荷状態で約 1 年間経過させた後に、曲げせん断実験を行う計画とした。

コンクリートは、管理材齢を 91 日、目標強度 150N/mm²とし、水結合材比を 17.0%で調合した。初期の自己収縮を制御するための膨張材等の混入は行わなかった。コンクリート圧縮強度の推移を図 - 9 に示す。コンクリート強度は 91 日で 154 N/mm²、曲げせん断実験を実施した材齢 406 日で 181N/mm²、ヤング係数は同材齢で 45.7 kN/mm²あった。鋼材の引張試験結果を表 - 4 に示す。

表 - 3 試験体一覧

試験体名	加力方法	柱諸元
DL150-0	曲げせん断	Fc = 150 N/mm ² b × D = 275 × 275 mm (構造断面) H = 815 mm
DL150-1	長期圧縮載荷後の曲げせん断	12-D16 (USD685) U6.4-@43

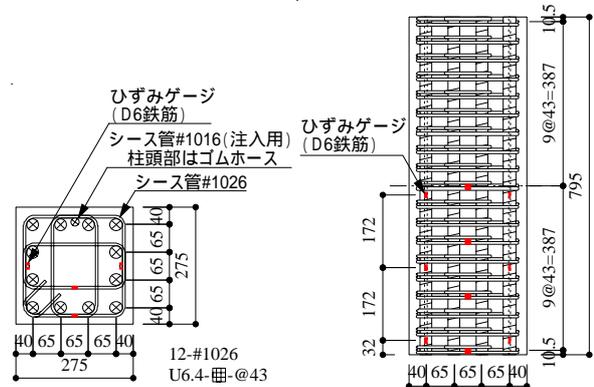


図 - 8 試験体配筋図

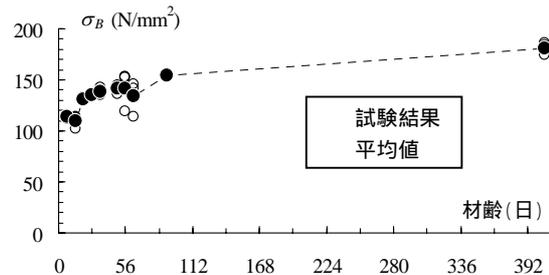


図 - 9 コンクリート圧縮強度の推移

表 - 4 鋼材強度試験結果

鋼材	呼び径	降伏点 [N/mm ²]	引張強さ [N/mm ²]	伸び [%]	ヤング係数 [kN/mm ²]
SD685	D16	730	944	9.6	191
SBPD1275 /1420	U6.4	1380	1455	8.7	205

3.2 載荷および計測方法

試験体 DL150-1 の長期の軸力載荷および計測の状況を図 - 10 に示す。初載荷は材齢 21 日で、その後段階的

に載荷し、最大軸力比 0.20 までを導入した後、材齢 1 年程度まで載荷を行い、その間、無載荷試験体 DL150-0 とともに、柱の軸縮みおよび軸方向鉄筋のひずみを計測した。なお、材齢 21 日までに収縮によって軸方向鉄筋に生じたひずみは 222μ であった。

曲げせん断実験の加力装置を図 - 1 1 に示す。加力は、超高層集合住宅の下層階外柱を想定し、変動軸力下の曲げせん断載荷とした。長期軸力を $0.17 b \cdot D \cdot f_{cB}$ 、最大圧縮軸力を $0.47 b \cdot D \cdot f_{cB}$ 、最大引張軸力を $0.7 n \cdot a \cdot f_{y}$ として (b : 柱幅, D : 柱せい, f_{cB} : 実験時コンクリート強度, n : 主筋本数, a : 主筋断面積, f_{y} : 主筋降伏点), 正側のせん断力加力時に圧縮側に、負側時に引張側に、せん断力に応じて軸力を変動するように加力設定を行った。載荷履歴は、短期許容せん断力 Q_{AS} に対して、 $Q_{AS}/4$ 、 $Q_{AS}/2$ および Q_{AS} で各 3 回の繰り返しを行った後、部材角 $1/200$, $1/100$, $1/50$ で各 3 回の繰り返し載荷を行った。

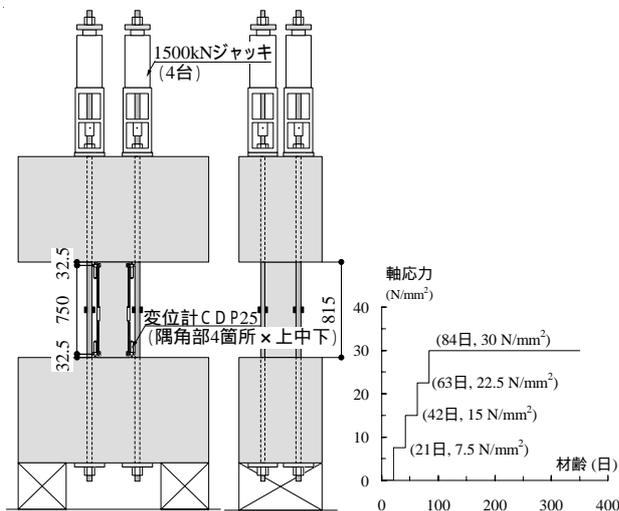


図 - 1 0 長期の軸力載荷および計測

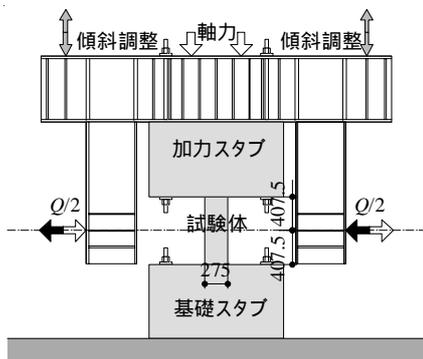


図 - 1 1 曲げせん断実験の加力装置

3.4 実験結果

(1) 長期圧縮実験

試験体 DL150-1 におけるひずみの長期計測結果を図 - 1 2 に示す。載荷時の実験室内気温は $10 \sim 30$ 程度であった。約 1 年間の加力を終了するまで、ひび割れなどの

損傷は生じなかった。同図には、下記のひずみについて、いずれも無載荷試験体 DL150-0 との相対値(軸力載荷によって生じた値)を示している。

柱中央区間の軸方向変形から求めたひずみ

柱コンクリート内部に設置した鉄筋 (D6) のひずみ

、のひずみはほぼ同程度の値で推移している。同図中にはクリープ予測式による計算結果を併せて示している。上記、の計測による柱ひずみは、計算結果とおおむね同程度となっており、計測終了時点での値は $1100 \sim 1300 \mu$ となっている。

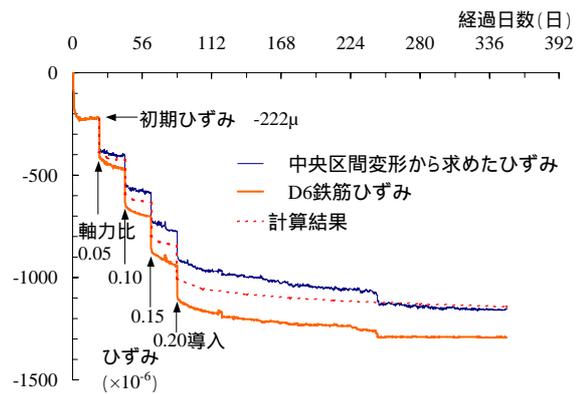
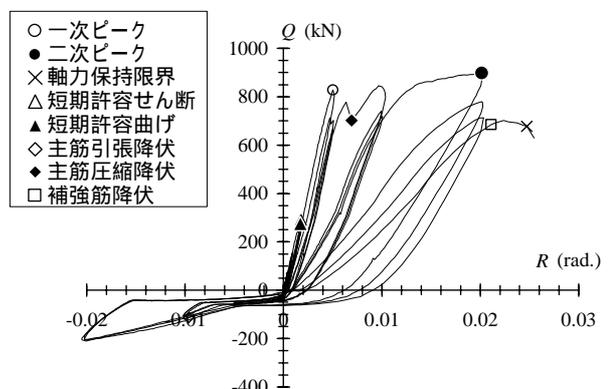
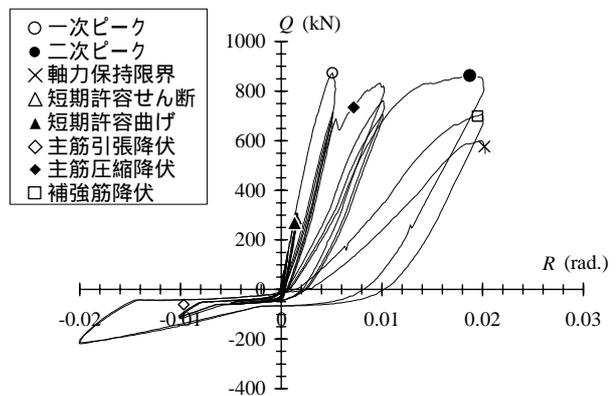


図 - 1 2 ひずみ長期計測結果



(a) DL150-0



(b) DL150-1

図 - 1 3 せん断力(Q) - 部材角(R)関係

(2) 曲げせん断実験

実験で得られたせん断力 Q と部材角 R の関係を図-13に示す。せん断力 Q は、部材変形と軸力によって生じる付加曲げを累加して求めた結果を示している。両図には、実験で得られた1次ピーク、2次ピーク、軸方向筋の降伏時などをプロットしてある。

両試験体とも、0.005 rad. 程度でかぶりコンクリートの圧壊が生じ、荷重が低下した(1次ピーク)。その後荷重が再上昇して0.02 rad. 程度で2次ピークを迎えた後、軸力保持能力を失い、加力を終了した。長期載荷を行った試験体DL150-1は、DL150-0と比較して、初期剛性と一次ピーク耐力はやや高く、2次ピーク耐力と変形性能はやや劣っているが、顕著な差異は見られない。

3.5 考察

材齢1年程度まで長期載荷したRC柱試験体は、鉛直荷重加力を終了するまで、ひび割れなどの損傷は生じず、計測終了時点での軸方向ひずみ(自己収縮ひずみを含む)は、約1200 μ であった。

長期載荷したRC柱試験体の軸方向ひずみは、著者らが提案したクリープ予測式の計算値と同程度であった。

軸方向筋に高強度異形鉄筋を使用していたため、曲げせん断実験では、両試験体において、著しい差は見られなかった。

以上より、著者らが提案したクリープ予測式が、本長期圧縮実験の範囲において適切であることがわかった。また、比較的小さい長期軸力比(0.20)の外柱を模擬し、地震時の変動軸力を大きくした曲げせん断実験であったので、両試験体において軸方向筋の圧縮降伏発生之差が見られなかった。

4. まとめ

(1) 著者らが示したクリープ予測法を用い、超高強度コンクリートを使用したRC柱の常時鉛直荷重に対する軸ひずみを算出し、RC柱部材の長期設計を検討した。

(1-1) コンクリートの収縮やクリープを考慮すると、軸方向筋の負担軸力は弾性計算と比べ大きくなり、鉄筋コンクリート構造計算規準⁷⁾に示される軸方向筋の長期許容圧縮応力度を用いると、適用可能な長期荷重の軸力比が制限される。

(1-2) 軸力比で1/3相当の軸力を長期載荷した場合のコンクリートと軸方向筋の負担軸力を算定し、この状態で曲げ断面解析を行い、耐震性能を評価した結果、軸

方向筋に普通鋼材を使用した場合、低い水平力レベルで圧縮鉄筋が降伏することとなった。

(1-3) 上記に対し、軸方向筋に高強度鋼材(SD685)を使用した場合、早期の圧縮鉄筋の降伏が回避できることがわかった。

(2) 圧縮強度150N/mm²級のコンクリートを使用したRC柱試験体を2体製作し、一方の試験体は軸力比0.2の圧縮力を材齢1年まで載荷し、もう一方の試験体は同材齢まで無載荷とし、その後、曲げせん断実験を行って、耐震性能の比較を行った。

(2-1) 軸方向筋に高強度異形鉄筋(降伏強度685N/mm²級)を使用していたため、曲げせん断実験では、両試験体において、著しい差は見られなかった。

参考文献

- 1) 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を用いた鉄筋コンクリート柱の長期圧縮特性,日本建築学会構造系論文集第577号,pp77-84,2004.3
- 2) 小室努,今井和正,是永健好,超高強度コンクリートを用いた鉄筋コンクリート柱の施工過程を考慮したクリープ予測法,日本建築学会構造系論文集第616号,pp165-172,2007.6
- 3) Comite Euro-International du Beton:CEB-FIP MODEL CODE 1990 (DESIGN CODE), Thomas Telford, pp.52-65, 1998
- 4) 日本建築学会:鉄筋コンクリート終局強度設計に関する資料,P16-17,1987
- 5) 黒岩秀介,渡邊悟士,陣内浩,並木哲:150N/mm²級コンクリートの自己収縮と拘束応力について,日本建築学会学術講演梗概集,A-1,pp.389-390,2005
- 6) 黒岩秀介,渡邊悟士,陣内浩,並木哲:収縮低減剤を用いた150N/mm²級コンクリートの諸特性,日本建築学会学術講演梗概集,A-1,pp.89-90,2006
- 7) 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 日本建築学会,1999
- 8) 小室努,今井和正,村松晃次,是永健好,渡邊史夫:100~180N/mm²の超高強度コンクリートを用いた鉄筋コンクリート柱の圧縮特性,日本建築学会構造系論文集第577号,pp77-84,2004.3
- 9) 村松晃次,小室努,今井和正,是永健好,西山峰広:超高強度鉄筋コンクリート柱の曲げ耐力算定用ストレスブロック係数,日本建築学会構造系論文集, No.604, pp.127-134, 2006.6