

# 論文 超高強度プレキャスト鉄筋コンクリート柱に関する実験的研究

熊谷 仁志<sup>\*1</sup>・黒瀬 行信<sup>\*2</sup>・徳田 浩<sup>\*3</sup>

要旨：圧縮強度  $120\text{N/mm}^2$  クラスの超高強度コンクリートを用いたプレキャスト鉄筋コンクリート柱の施工実験および構造実験を行った。その結果、超高強度コンクリートを用いた場合でも、目地部グラウトの有無にかかわらず、部材として在来の鉄筋コンクリート柱と同等の構造性能（剛性，耐力，履歴性状）を発揮することが確認された。スリーブ継手の存在によって局部的に主筋のひずみが増加するが、最大でも在来の鉄筋コンクリート柱の2倍程度であった。  
 キーワード：超高強度コンクリート，柱，プレキャストコンクリート，グラウト

## 1. はじめに

最近，都心部の超高層集合住宅の建設が活況を呈しており，設計基準強度が  $100\text{N/mm}^2$  の超高強度コンクリートや高強度主筋 USD685 を用いることによって，50 階を超える高さの鉄筋コンクリート造集合住宅が実現している。

普通強度の材料を用いたプレキャスト鉄筋コンクリート柱（以下 PCa 柱）については，目地部グラウトがコンクリートに比べてはるかに強度が高く，在来工法の鉄筋コンクリート柱（以下 RC 柱）と同等の構造性能があることが確認されているが，超高強度コンクリートを用いた場合については実験データがほとんどない。そこで今回，圧縮強度が  $120\text{N/mm}^2$  クラスの超高強度コンクリートを用いた PCa 柱の施工実験および構造実験を実施した。

## 2. 実大施工実験

図 - 1 のような幅・せいが 1000mm，高さが 1000mm（柱脚部）の柱を製作し，主筋 32-D41 をスリーブ継手により接合した。目地の厚さは 20mm とし，高強度無収縮モルタル（以下，単にグラウトとする）を継手と同時に注入した。グラウトの目標フロー（JIS R5201 凝結試験コーン使用）は 230mm とした。コンクリートには高ビ

ーライト系セメントを使用し，水セメント比 26%，目標スランプフロー 650mm とした。細骨材には山砂，粗骨材には硬質砂岩砕石（最大寸法 20mm）を使用した。

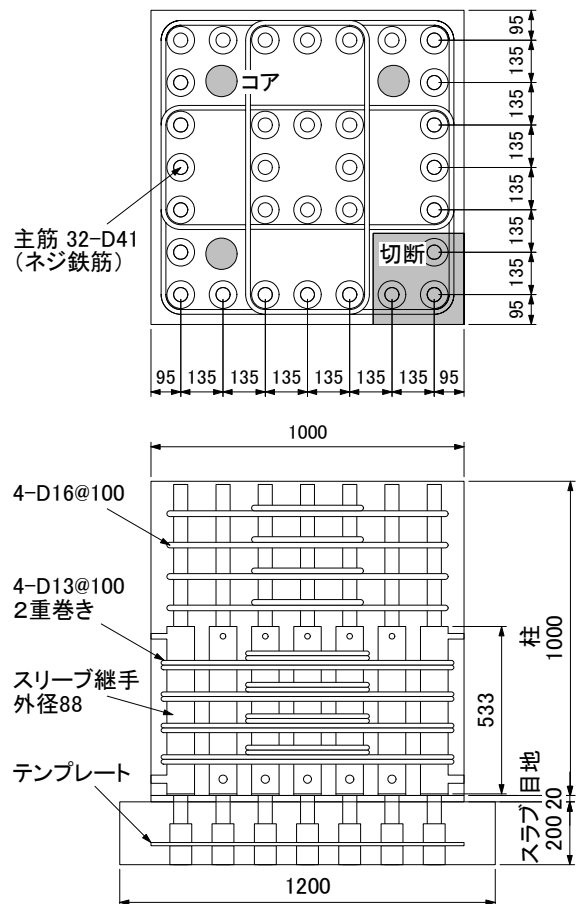


図 - 1 実大施工試験体

\*1 清水建設(株)技術研究所主任研究員 工修 (正会員)

\*2 清水建設(株)設計本部副部長 工博

\*3 清水建設(株)建築本部主査 工修

試験体をウォールソーで切断し、目地部グラウトの充填状況について観察した。また試験体から鉛直にコアを抜き取り、グラウトを中間に含んだ供試体とグラウトを含まない供試体を採取して圧縮試験を行った。

写真 - 1 に示すようにグラウトは空隙無く充填されていた。表 - 1 に圧縮試験結果の一覧を、図 - 2 に応力度 - ひずみ関係を示す。グラウトを中間に含んだ供試体は、分離せずに一体となって破壊し、圧縮強度はグラウトを含まない供試体と同等であった。本試験体ではコンクリートに比べて、グラウトの弾性係数が若干低くなっているが、圧縮試験の応力度 - ひずみ関係にグラウトの有無による影響はほとんど見られなかった。

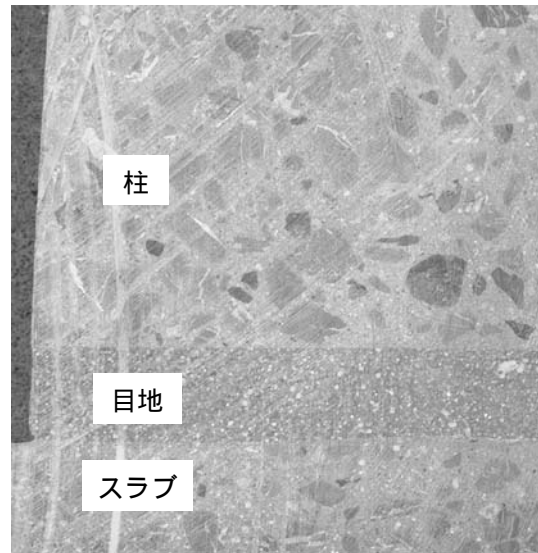


写真 - 1 試験体切断面

### 3. 曲げせん断実験

#### 3.1 実験概要

試験体は図 - 3 に示す PCa 柱と RC 柱の 2 体で、幅  $b$ ・せい  $D$  は 350mm、加力点高さは 875mm である。主筋 16-D16 (USD685) をネジスリーブ継手 (上側はネジ定着部、下側はモルタル定着部) により接合した。横補強筋には高強度せん断補強筋 6mm (SBPD1275) の溶接閉鎖型フープ (外周フープ + 中子フープ 2 方向) を 50mm 間隔に配した。鉄筋およびネジスリーブ継手の縮尺は約 1/2.5 であり、試験体全体の縮尺約 1/3 よりも若干大きくなっている。目地の厚さは施工上の理由から実際と同じ 20mm とし、グラウトを継手と同時に注入した。PCa 底面にコッター

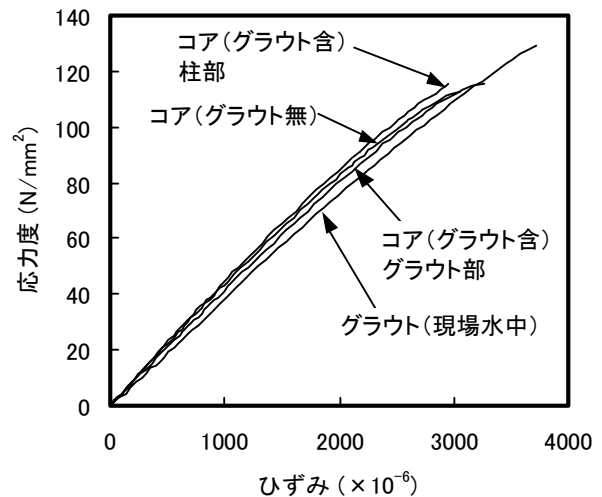


図 - 2 応力度 - ひずみ関係

は設けていない。柱のコンクリートにはシリカヒュームプレミクスタップのセメントを使用し、水セメント比 20%、目標スランプフロー 650mm

表 - 1 コンクリート圧縮試験結果 (実大施工実験)

供試体	部位	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )
コンクリート ( 100×200 標準養生)	柱およびスラブに使用	116	—
グラウト ( 50×100 現場水中養生)	目地および継手に使用	132	37200
実大施工試験体から採取したコア ( 100×200, 図1の位置)	グラウトを含まない柱部	115	41800
	グラウトを中間に含む	115	柱部 41500 グラウト部 37800

試験材令はコンクリート 56 日、グラウト 51 日、ひずみゲージはコンクリート用 60mm、グラウト用 20mm を使用

とした。細骨材には山砂，粗骨材には硬質砂岩碎石（最大寸法 20mm）を使用した。グラウトの圧縮強度は柱のコンクリートよりも高くなるように調合した。スタブのコンクリートは 2 章の実大施工試験体と同一の調合である。使用材料の力学的性質を表 - 2 に示す。

超高層集合住宅の低層部柱脚を想定し，せん断スパン比を 2.5 として，曲げ破壊がせん断破壊に先行するように計画した。一定軸力  $N$  ( $N = 0.25N_u = 4300\text{kN}$ ,  $N_u = bD_B + a_g y$ ,  $B$ : コンクリート圧縮強度,  $a_g$ : 全主筋断面積,  $y$ : 主筋降伏強度) を保持しながら，水平力を片持ち梁形式で作用させ，部材変形角  $R$  ( $R = \delta / h$ ,  $\delta$ : 水平変位,  $h$ : 加力点高さ) で制御する図 - 4 に示すサイクルで正負交番繰返しを行った。せん断力  $Q$  は水平力から軸力ジャッキ端部のローラー支承の摩擦力，軸力による  $P - \delta$  効果を補正して求めた。

### 3.2 実験結果

実験結果および計算値の一覧を表 - 3 に示す。RC 試験体は， $R=0.25\%$  で柱脚に曲げひびわれ発生， $R=0.7\%$  で曲げ圧縮部に圧壊発生， $R=1\%$  で主筋圧縮降伏という順序で破壊が進展し， $R=2\%$  で最大耐力に達した。最大耐力は曲げ耐力計算値をやや上回っていた。その後  $R=3\%$  まで加力したが耐力低下は小さく，軸力も保持していた。PCa 試験体は， $R=0.25\%$  で PCa 底面とグラウトの境界で曲げひびわれ（肌分かれ）が発生した。また主筋の圧縮降伏よりも引張降伏が先に発生していた。その他の破壊状況については RC 試験体

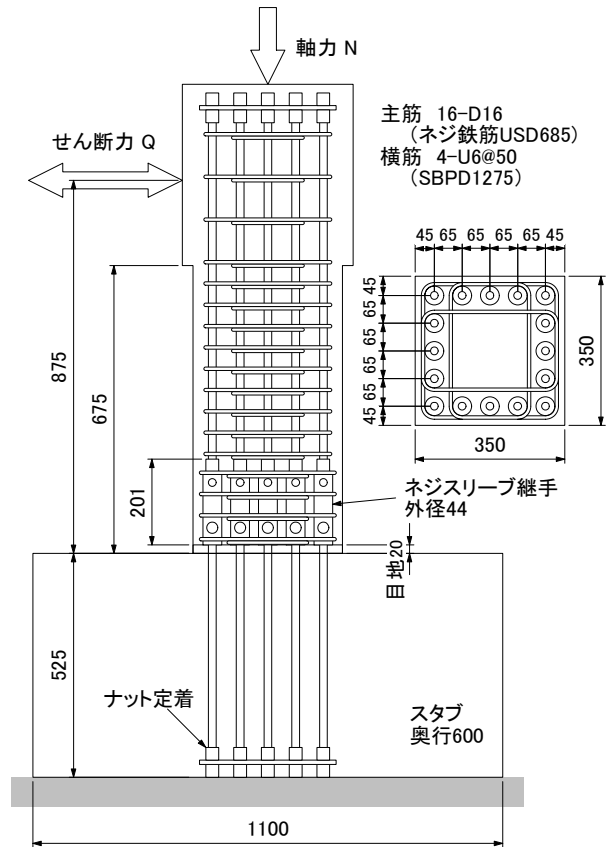


図 - 3 曲げせん断実験試験体 (PCa)

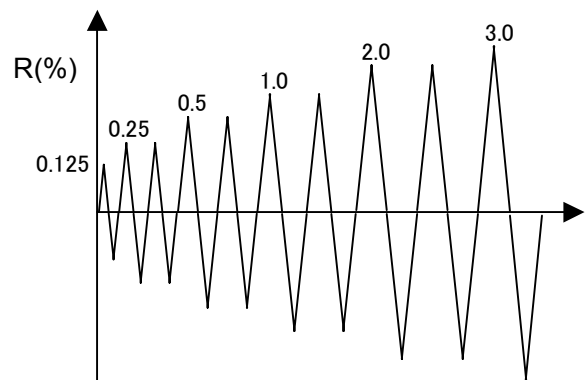


図 - 4 加力サイクル

表 - 2 使用材料の力学的性質 (曲げせん断実験)

(a) コンクリート

部位	供試体	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )
柱	φ 100 × 200 コア	121	5.0	45300
スタブ	φ 100 × 200 現場封緘	107	5.1	40500
グラウト	φ 50 × 100 現場水中	174	—	45800

(b) 鉄筋

呼称	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)
D16	740	960	12.7
U6	1390	1410	8.3

試験材令は柱コンクリート 72 日，スタブコンクリート 92 日，グラウト 64 日

柱コンクリートのコア供試体は 350 × 350 × 700 の無筋コンクリートブロックから採取

コンクリート引張強度は 150 × 200 を用いた割裂試験 (JIS A1113)，鉄筋降伏強度は 0.2% オフセット耐力

表 - 3 実験結果および計算値一覧

試験体	初期剛性 (kN/mm)		曲げひびわれ (kN)		曲げ圧壊 (kN)	主筋降伏 (kN)		最大耐力 (kN)			
	実験値	計算値	実験値	計算値	実験値	実験値 引張降伏	実験値 圧縮降伏	実験値	計算値 曲げ	計算値 せん断	計算値 付着
RC	211	244	493 (0.25)	364	826 (0.66)	907 (1.45)	868 (1.03)	966 (2.01)	799	1008	840
PCa	210		435 (0.25)		812 (0.73)	854 (1.01)	900 (1.36)	-1026 (-2.01)			

( )内はその時点の部材変形角 R(%)

実験値は諸現象が最初に現れる正側加力での値であるが、最大耐力については正負で絶対値の大きいほうとした  
 曲げひび割れ発生荷重はコンクリート引張強度を  $0.56 \sigma_B$  として計算した

曲げ耐力は ACI ストレスブロック法による (終局ひずみ  $\epsilon_u = 0.5\%$ , 文献 1 参照)

せん断および付着割裂耐力は高強度せん断補強筋用設計指針による (有効圧縮強度係数  $\rho_c = 0.35$ , 文献 2 参照)

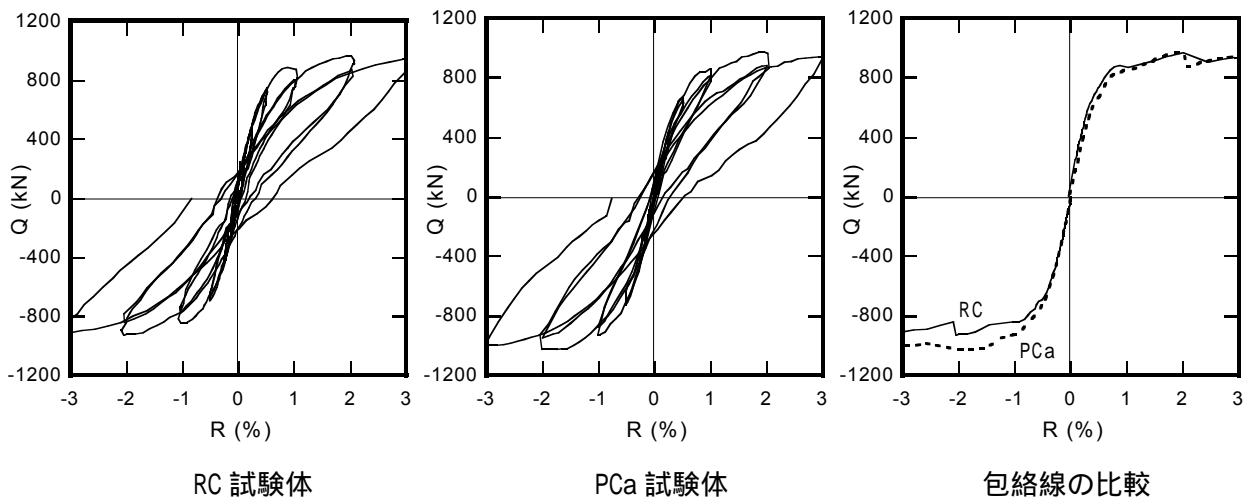


図 - 5 せん断力 - 部材変形角関係

と同様であった。いずれの試験体も横筋のひずみは最大約 0.5%であったが、高強度せん断補強筋を用いているため降伏には至っていない。せん断力 - 部材変形角関係を図 - 5 に、等価粘性減衰定数の推移を図 - 6 に示す。まだひびわれや圧壊の発生していない第 1 サイクル (R=0.125%) のせん断力 - 部材変形角関係を直線近似して初期剛性を求めた。RC 試験体と PCa 試験体の初期剛性は同等であり、弾性梁理論による計算値とほぼ一致した。等価粘性減衰定数については、R=0.5%までは PCa 試験体のほうがやや小さくなっているが、R=1%以降はほぼ同等であ

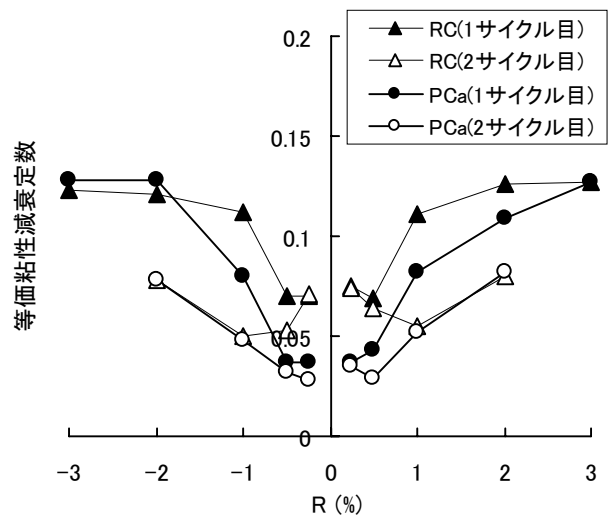


図 - 6 等価粘性減衰定数

る。いずれも等価粘性減衰定数が 0.15 以下と普通強度材料を用いた柱に比べて小さめの値を示しているが、これは高強度主筋を用いて降伏変形が大きくなった場合に特徴的に見られる現象である。以上のように部材全体としての剛性、耐力、履歴性状に関しては、RC 試験体と PCa 試験体でほとんど差がないことが確認された。

図 - 7 はせん断力と柱脚部回転角および柱脚部ずれ変形の関係である。柱脚部回転角については、PCa 試験体のほうが大きくなる傾向がある。これは PCa 試験体ではネジスリーブ継手下部（目地部）の主筋ひずみが増加しているためと考えられる。柱脚部ずれ変形については顕著な差は見られなかった。柱脚部ずれ変形は R=2% で約 1mm であり、全体変形に占める割合は 5% 程度で、部材全体の挙動に与える影響は少ない。

本試験体では PCa 底面にコッターを設けていないため、曲げ圧縮部の摩擦によってせん断力

が伝達されるものと考えられる。最大耐力時の曲げ圧縮力  $C_u$  は次式のように求められる。

$$C_u = M_u / j_t + N / 2$$

ここで、 $M_u$  は最大耐力時曲げモーメント ( $M_u = Q_u h$ ,  $Q_u$ : 最大耐力),  $j_t$  は最外縁主筋間距離とする。本実験の PCa 試験体について最大耐力時のせん断力と曲げ圧縮力の比率を計算すると  $Q_u / C_u = 0.18$  となる。これは設計で一般的に用いられる ACI 規準<sup>3)</sup>のせん断摩擦係数 0.6 よりも十分に小さい範囲にあり、柱脚部に顕著なずれ変形は見られなかったことと符合している。図 - 8 は正側 1 サイクル目ピーク時の主筋のひずみ分布を比較したものである。R=2% の 2 サイクル目以降では前サイクルまでのひずみ履歴の影響が大きいため評価の対象外とした。R=1% までは RC 試験体と PCa 試験体のひずみ分布は同様であるが、R=2% ではネジスリーブ継手の剛性が高いため、圧縮側主筋の継手上端と、引張側主

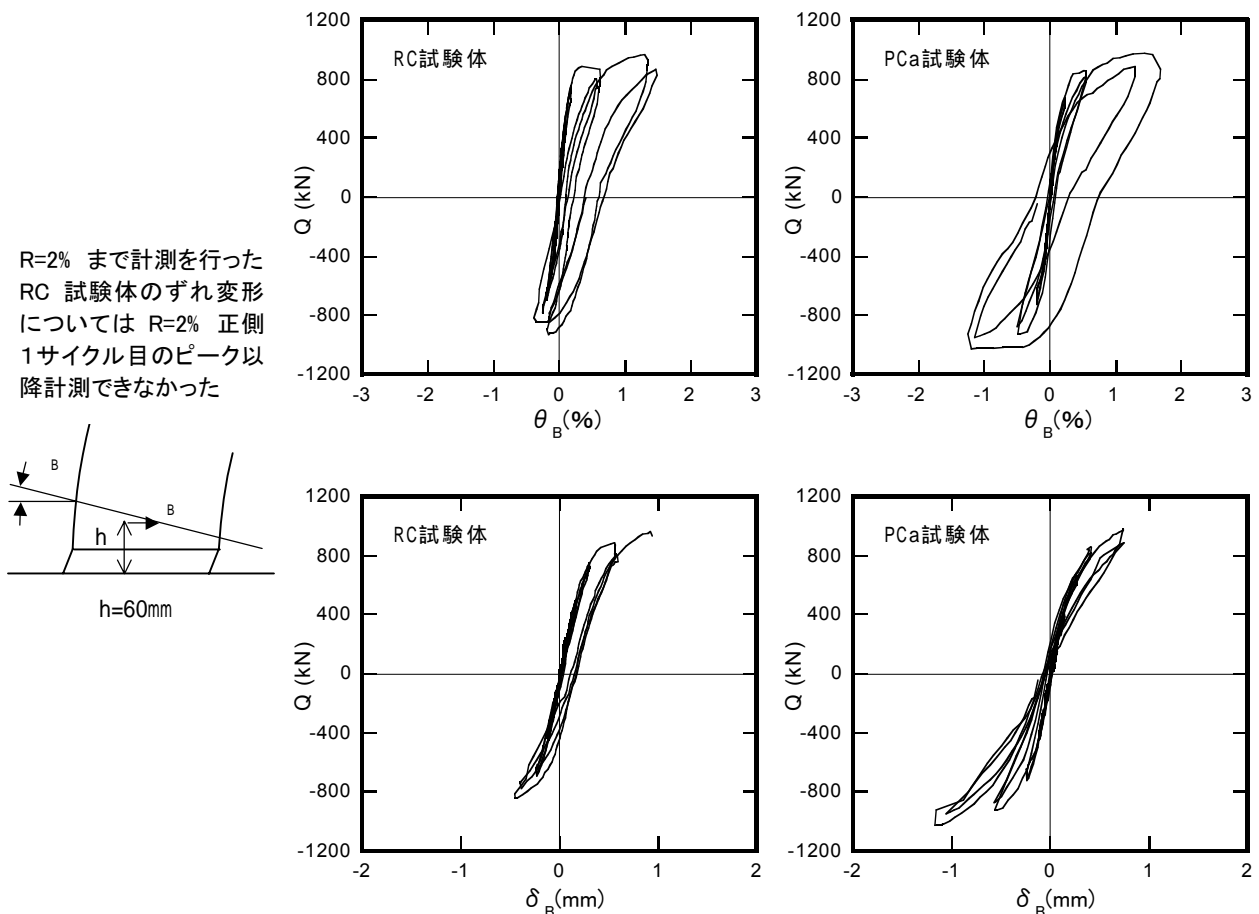


図 - 7 柱脚部回転角およびずれ変形

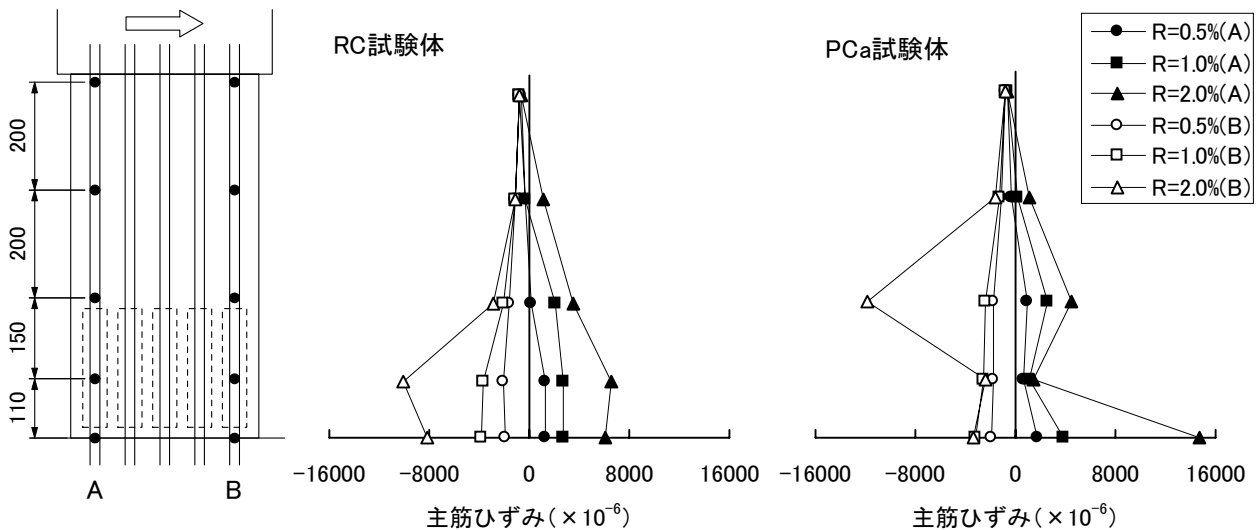
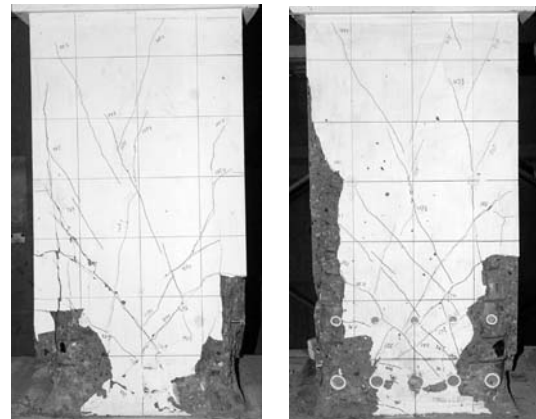


図 - 8 主筋ひずみ分布

筋の継手下端のひずみが増加している。ひずみ分布の最大値で比較すると、圧縮側主筋では RC 試験体の約 1.2 倍、引張側主筋では約 2 倍のひずみ集中が認められた。

試験体の最終破壊状況を写真 - 2 に示す。ひびわれパターンおよび圧壊の程度に関しては、RC 試験体と PCa 試験体で同様であった。主筋に沿ったひびわれが見られ、コンクリートが剥落しているが、これは曲げ圧縮側で発生しており、付着割裂破壊とは異なるものであった。PCa 試験体の目地部グラウトはコンクリートと一体となって破壊している。このことは 2 章の実大施工実験のコア供試験体の圧縮試験の結果と符合している。



RC 試験体 (R=3%)      PCa 試験体 (R=3%)

写真 - 2 最終破壊状況

#### 4. まとめ

圧縮強度  $120\text{N/mm}^2$  クラスの超高強度コンクリートを用いた PCa 柱の施工実験および構造実験を行った結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 目地部グラウトが存在しても、RC 柱と PCa 柱の圧縮破壊性状は同様であった。
- (2) RC 柱と PCa 柱の部材としての剛性、耐力、履歴性状にはほとんど差が無かった。
- (3) スリーブ継手の存在によって継手下端の主筋のひずみが増加するが、最大でも RC 柱の 2 倍程度であった。

#### 参考文献

- 1) 熊谷仁志：超高強度鉄筋コンクリート柱の構造性能，コンクリート工学，Vol.39，No.3，pp.44-50，2001.3
- 2) 高周波熱錬(株)：鉄筋コンクリート造り，柱のせん断補強筋として PC 鋼棒ウルボンを使用する工法 設計指針・同解説，1999.3
- 3) American Concrete Institute：Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI318-95) and Commentary (ACI318 R-95)，1995