

# 論文 高強度アンボンド主筋を用いた最下層柱脚の履歴性状に及ぼす軸力の影響

李 文聰\*1・江崎 文也\*2・鳥辺 俊介\*3・中原 浩之\*4

**要旨:** ラーメン構造の塑性後の残留変形をできるだけ押さえる目的で、プレキャスト化された片持柱と基礎梁で構成される最下層の柱高中央から柱脚までの柱を想定した試験体3体について、一定軸力比0.3の正負交番繰返し水平力載荷実験を行い、昨年度に行った一定軸力比0.15の3体の実験結果を比較し、最下層柱脚の履歴性状に及ぼす軸力の影響を検討した。また、主筋にアンボンド高強度鉄筋を利用した最下層柱脚の簡易解析モデルを提案した。

**キーワード:** プレキャスト, 最下層柱脚, 高強度アンボンド主筋, 残留変形, 自己復元性

## 1. 序

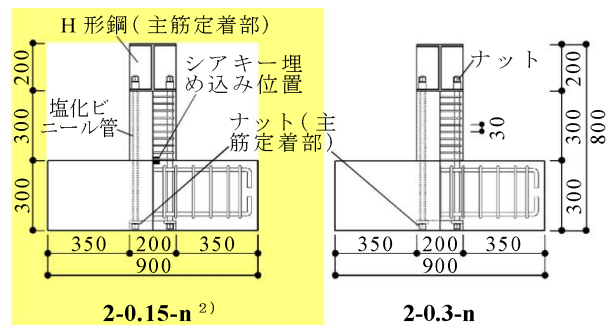
著者らは、大地震で塑性化したRC柱の残留部材角をできるだけ小さくするRC構造の開発を目指すために、主筋にアンボンド高強度鉄筋を用いたRC柱を提案し、一定軸力下の水平力載荷実験より残留変形がほとんど生じないことを明らかにした<sup>1)</sup>。

昨年の研究で主筋にアンボンド高強度鉄筋を利用したRC柱で構成された最下層を想定した十字形骨組及び柱脚部について、軸圧縮力比は長期軸力のみを考慮して0.15とした正負繰返し水平力載荷実験を行い、残留変形はほとんど生じないことが実証され、自己復元性のある履歴性状を示し、柱と梁の接合部のシアキーが残留変形に及ぼす影響はあまり見られないことも分かった<sup>2)</sup>。しかし、隅柱の場合は地震力により大きな軸力がかかる。そこで、本論では軸力比を文献2)の2倍にして、水平力載荷実験を計画し、文献2)の最下層柱脚3体の実験結果に加え、軸力の相違がアンボンドRC柱脚の履歴性状に及ぼす影響の検討を試みたものである。

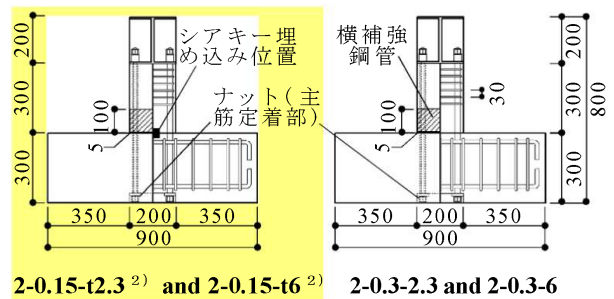
## 2. 実験計画

最下層柱脚試験体形状及び配筋詳細を図-1に、試験体一覧表を表-1に、試験体の使用材料の力学特性などを表-2に示す。文献2)の最下層柱脚試験体と同様に片持柱と基礎梁で構成される最下層の柱高中央から柱脚までの柱を想定した試験体3体を計画し、文献2)の試験体3体を合わせて6体となる。全ての試験体の柱は200mm×200mmの正方形断面で、せん断スパン比 $M/(QD)$  ( $M$ : 部材の最大曲げモーメント,  $Q$ : 部材の最大せん断力,  $D$ : 部材のせい) が2.0で、柱の主筋に13φの高強度鉄筋(以下、PC鋼棒と呼ぶ)を用いた。柱せいの1/2の

柱脚部のせん断補強筋の配筋は、試験体2-0.15-n及び2-0.3-nでは、D6の異形鉄筋を30mmの間隔で配置した。試験体2-0.15-t2.3及び2-0.3-2.3では、厚さが2.3mmの鋼管のみで横補強した。試験体2-0.15-t6及び2-0.3-6では、厚さが6mmの鋼管のみで横補強した。柱せいの1/2の柱脚部以外のせん断補強筋の配筋は、いずれの試験体とも同じで、D6の異形鉄筋を30mmの間隔で配置した。施工方



(1) 鋼管補強無し試験体



(2) 鋼管補強試験体

寸法単位: mm

図-1 最下層柱脚試験体形状および配筋詳細

\*1 福岡大学 工学部建築学科助教 博士(工学)(正会員)

\*2 福岡大学 工学部建築学科教授 工博(正会員)

\*3 福岡大学 大学院修士課程 学士(工学)

\*4 九州大学大学院 人間環境学研究院准教授 博士(工学)(正会員)

表-1 試験体一覧

試験体名	2-0.15-n <sup>2)</sup>	2-0.3-n	2-0.15-t2.3 <sup>2)</sup>	2-0.3-2.3	2-0.15-t6 <sup>2)</sup>	2-0.3-6
柱脚部断面図						
柱横補強筋	D6@30 ( $P_w=1.07\%$ )		□-200×200×2.3 ( $P_w=2.3\%$ )		□-200×200×6 ( $P_w=6.0\%$ )	
柱主筋	4-13φ ( $P_g=1.33\%$ )					
$\eta_j$	0.1	0.25	0.1	0.25	0.1	0.25
$\eta_p$	0.05					
$\sigma_B$	23.9 MPa	22.3 MPa	23.9 MPa	22.3 MPa	23.9 MPa	22.3 MPa
シアキー	埋め込み		埋め込み		埋め込み	

$p_w$ : 柱帯筋比(鋼管部は帯筋無し),  $p_g$ : 柱主筋比,  $\eta_j$ : 鉛直ジャッキによる一定軸力比,  $\eta_p$ : P C 鋼棒の緊張力による軸力比,  $\sigma_B$ : シリンダー圧縮強度, : シアキー埋め込み位置, : 横補強鋼管 寸法単位: mm.

表-2 使用材料の力学的性質

種別	$a$ (cm <sup>2</sup> )	$\sigma_y$ (MPa)	$\sigma_u$ (MPa)	$E_s$ (GPa)	$\epsilon_u$ (%) (試験片)
D6	0.32	378	535	185	14.1(JIS Z 2201 の 2 号)
13φ	1.32	1210	1273	176	11.2(JIS Z 2201 の 2 号)
PL-2.3		225	325	203	32.7(JIS Z 2201 の 5 号)
PL-6		360	502	178	25.2(JIS Z 2201 の 5 号)

$a$ : 断面積,  $\sigma_y$ : 降伏強度,  $\sigma_u$ : 引張強さ,  $E_s$ : 鉄筋のヤング係数,  $\epsilon_u$ : 破断伸び.

法は片持柱と基礎梁を分離して打設を行い, 片持柱および基礎梁に埋め込んだ塩化ビニール管(図-1 参照)に P C 鋼棒を挿入して, 柱の上端に取り付けた P C 鋼棒定着用 H 形鋼と加工した基礎梁にナットで締め付けることにより主筋を定着させて, 片持柱と基礎梁を接合した。いずれの試験体とも実験前にナットの締め付けにより主筋に柱軸応力度  $\sigma_0 = N/(bD)$ ,  $N$ : 軸力,  $b$ : 柱幅,  $D$ : 柱せい) のコンクリート圧縮強度  $\sigma_B$  に対する比が 0.05 となる大きさの初期緊張力を与えた。鉛直ジャッキによる一

定軸力は, 試験体 2-0.15-n と 2-0.15-t2.3 及び 2-0.15-t6 では,  $\sigma_0/\sigma_B=0.1$  となる大きさとし, P C 鋼棒の初期緊張力と合わせて水平力載荷前の一定軸力比の  $\sigma_0/\sigma_B=0.15$  となるようにした。一方, 試験体 2-0.3-n と 2-0.3-2.3 及び 2-0.3-6 では,  $\sigma_0/\sigma_B=0.25$  となる大きさとし, P C 鋼棒の初期緊張力と合わせて  $\sigma_0/\sigma_B=0.3$  となるようにした。試験体 2-0.15-n と 2-0.15-t2.3 及び 2-0.15-t6 は, 打設時に部材接合面の断面中央部に凹を成型し, シアキー(長さ 20mm の □-40mm×40mm×2.3mm の鋼管にモルタルを充填したものを)凹部分に埋め込んだ。

本研究で使用した加力装置を図-2 に, 載荷プログラムを図-3 に示す。部材角  $R$  を 0.5% ずつ増加させ, 限界耐力設計の安全限界変形角 1/75 の 2 倍程度を超えた 3% まで各制御変位で 3 回繰返す鉛直ジャッキによる一定軸力下の漸増変位振幅正負交番繰り返し載荷を行った。制御部材角  $R$  は, 柱高中央部での水平力載荷点の水平変位  $\delta$  を, 柱高中央部から基礎梁上端位置までの高さ  $h$  で除した値である ( $R=\delta/h$ )。

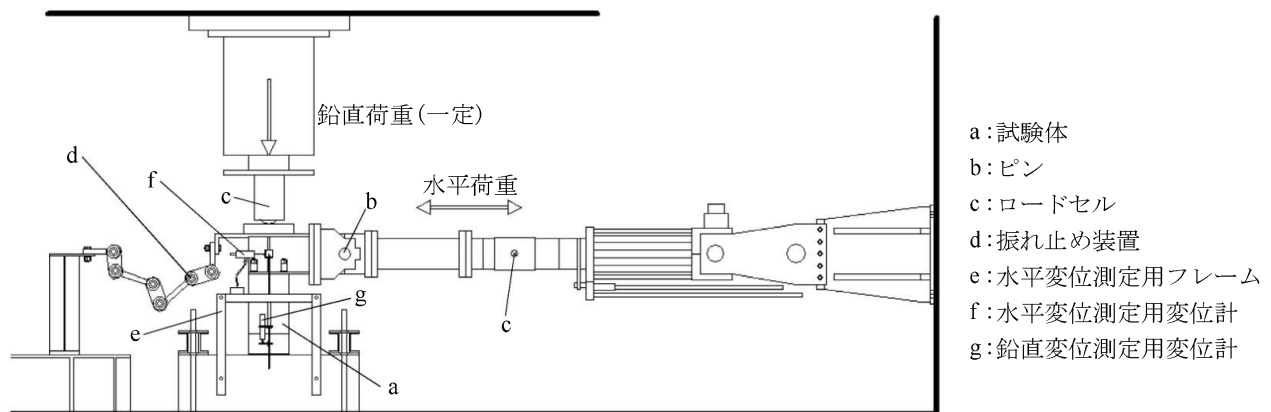


図-2 最下層柱脚試験体の加力装置および測定装置

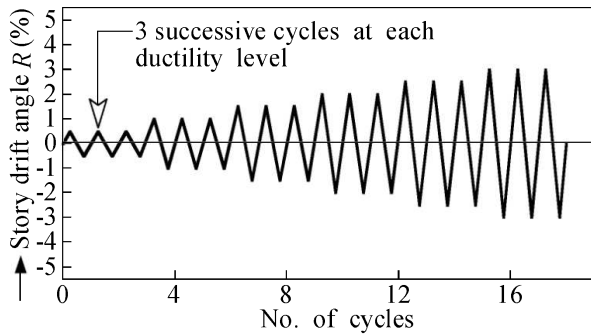


図-3 荷重プログラム

### 3. 実験結果

各試験体の水平荷重 $Q$ と部材角 $R$ の関係を図-4に示す。図-4に破線で示した直線は、曲げ耐力による水平せん断耐力計算値である。ただし、曲げ耐力は引張側のPC鋼棒が降伏し、なお且つ圧縮側のPCの引張力が0となるように仮定して、柱脚部断面のコンクリートに作用する圧縮力による曲げモーメントの負担分とPC鋼棒による曲げモーメントの負担分の累加値である。図-4から分かるように、いずれの試験体も部材角 $R$ の増大と共に水平せん断力が増大し、原点指向に近い履歴性状を示し、部材角が3%まで最大水平せん断力実験値は曲げ耐力による水平せん断耐力計算値に到達していない。これは

PC鋼棒が降伏していないためである。せん断補強筋が同様な試験体2-0.15-nと2-0.3-nの $Q$ - $R$ 曲線を比較すると、2-0.3-nは2-0.15-nより膨らんでいる。このことから、鉛直ジャッキによる一定軸力比が大きくなると、試験体のエネルギー吸収量はわずかではあるが大きくなるのが分かった。また、2-0.3-2.3と2-0.15-t2.3、2-0.3-6と2-0.15-t6の関係も同様である。

図-5に各試験体の軸方向平均みずみ $\epsilon_x$ と $R$ の関係を示す。ただし、 $\epsilon_x$ - $R$ 曲線は、PC鋼棒の初期緊張力及び図-2に示す鉛直荷重装置による一定軸力荷重後の履歴曲線である。図-5によると、軸力比が0.15のシリーズでは部材角 $R$ が増大すると共に、軸方向平均みずみ $\epsilon_x$ はy軸の正方向に増大し、柱が伸びていることが分かった。また、軸力比が0.3のシリーズでは部材角 $R$ が0の付近で、繰り返し回数が多くなると $\epsilon_x$ はy軸の負方向に増大し、脚部の損傷が大きくなっていることが分かる。

図-6に各試験体の $Q$ - $R$ 包絡曲線を示す。図-6から分かるように、包絡曲線には大きくは初期の水平剛性を示す第1直線と二次勾配を示す第2の水平剛性の直線のバイリニア型の履歴性状を示す。これらによると、軸力が大きくなると鉄筋の基部からの抜け出しが抑えられるため、柱の第1直線の初期水平剛性は高くなるが、そ

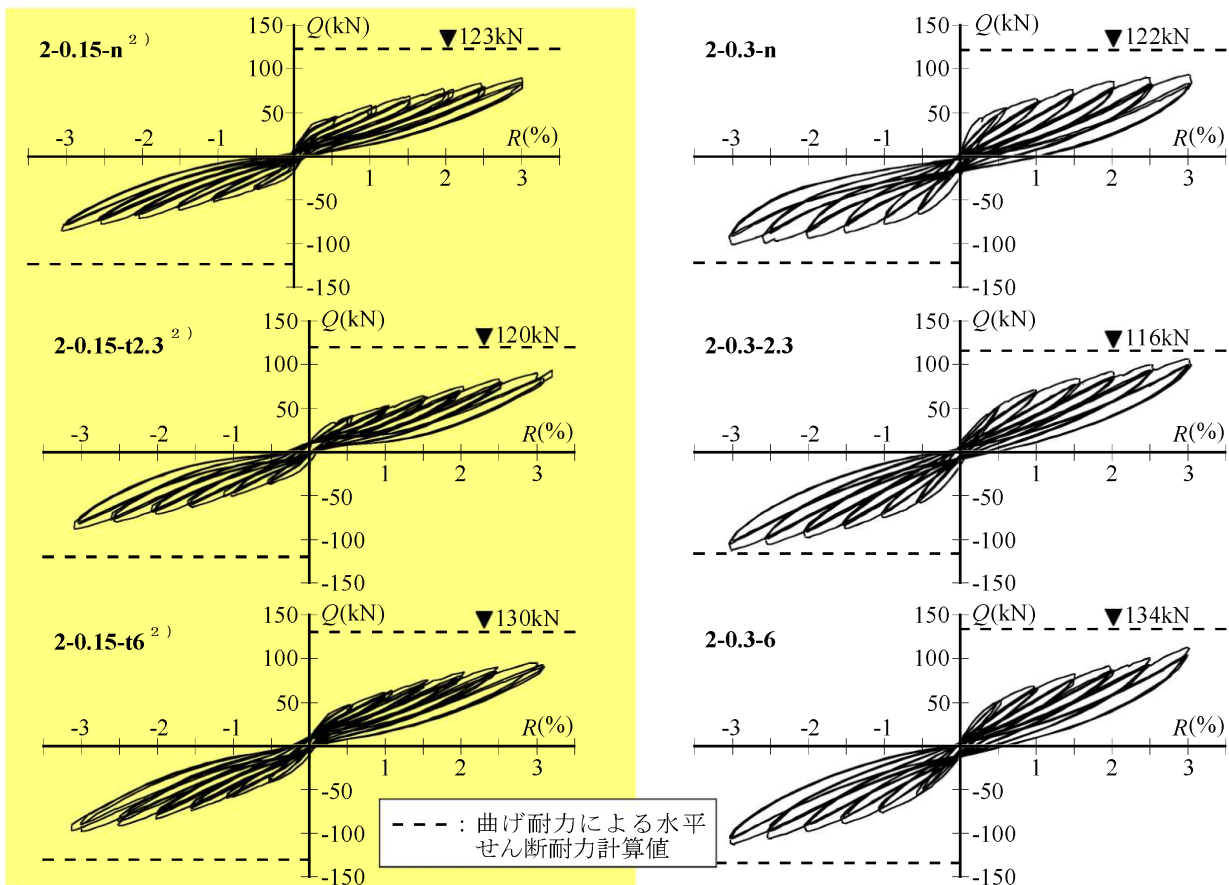


図-4 各試験体の水平荷重 $Q$ と部材角 $R$ の関係

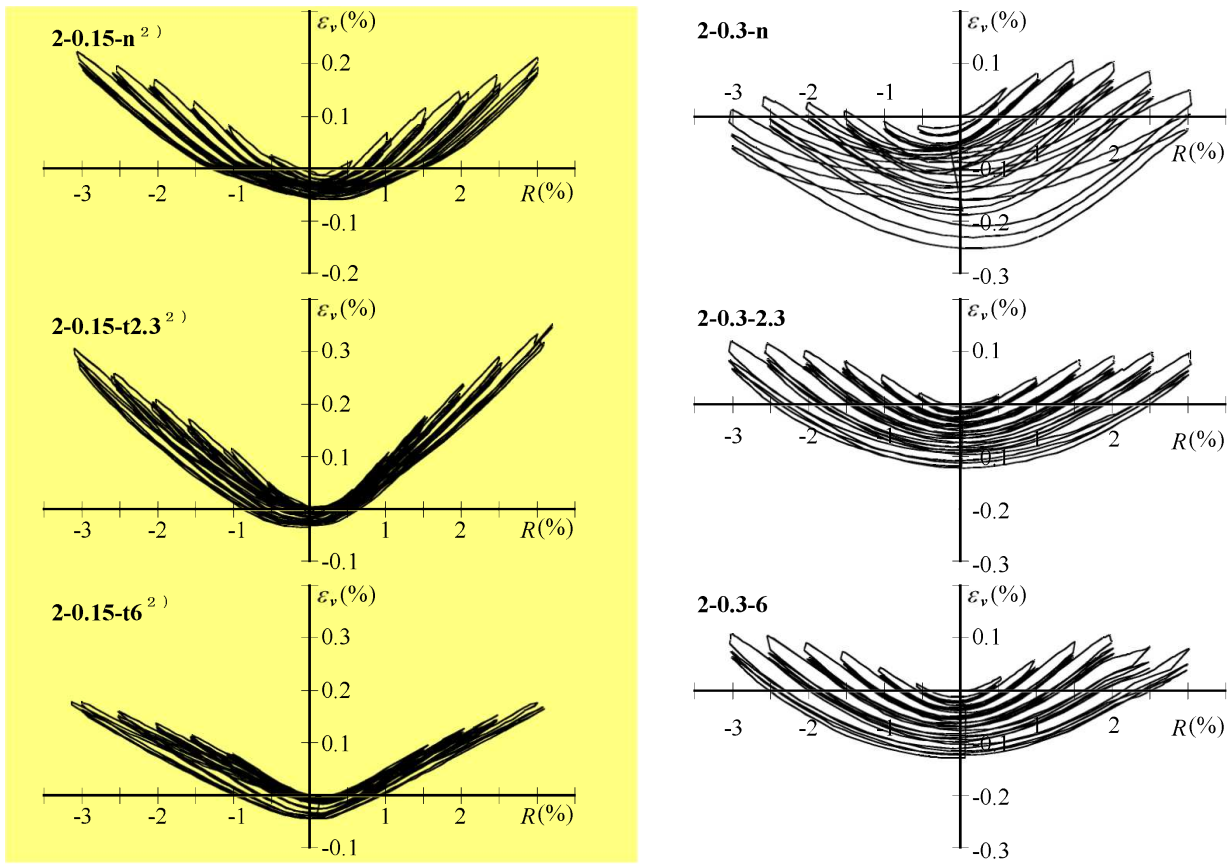


図-5 各試験体の軸方向平均ひずみ $\varepsilon_v$ と部材角 $R$ の関係

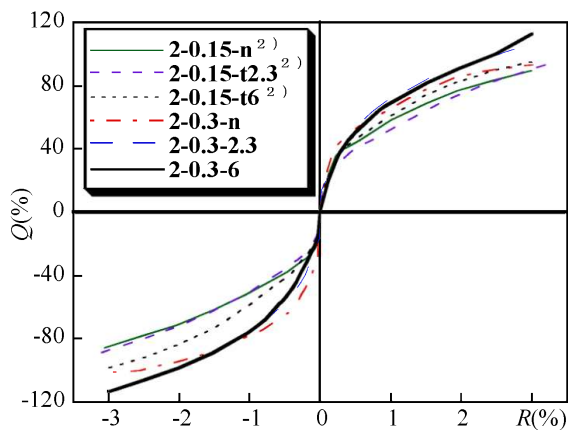


図-6 各試験体の包絡曲線

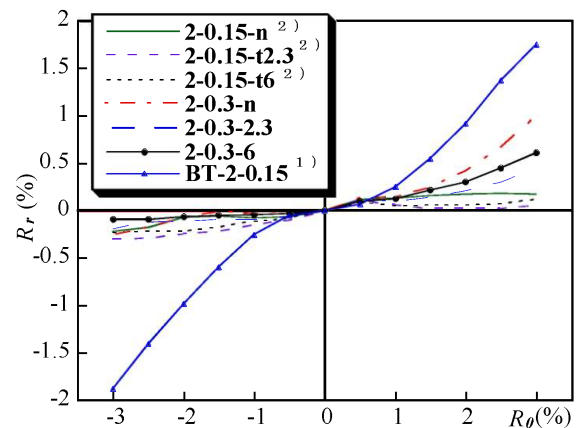


図-7 各試験体の経験部材角 $R_0$ と残留部材角 $R_r$ との関係

の後の第2直線の水平剛性は軸力にかかわりなくほぼ同じとなった。

図-7に経験部材角 $R_0$ と残留部材角 $R_r$ との関係を示す。図中には文献1)で実施した通常のRC柱の実験結果も示している。試験体BT-2-0.15は断面が200mm×200mm、せん断スパン比が2、一定軸力比が0.15、主筋にD13の鉄筋を6本配筋し、帯筋にD6の鉄筋を40mm間隔で配筋し、柱頭・柱脚に柱せいの1/2の長さの鋼管(厚さ2.3mm)で被覆した単独柱である。グラフによれば、主筋にアンボンド高強度鉄筋を利用することにより、軸力比が0.15のシリーズでは、 $R$ が増大してもほとんど残留

変形が生じていないことがわかる。軸力比が0.3のシリーズでは、部材角が正の時のみ残留変形が残りやすくなっている。これは軸力比が大きくなると初期軸力載荷時に水平変位が多少生じ、水平力載荷時にはそれを0にリセットして実験を行った影響によるものと思われる。

図-8にP C鋼棒の緊張応力度と部材角の関係を示す。柱脚部は引張側になると $R$ の増大とともに引張力が大きくなっている。一方、圧縮側になると $R$ の増大とともに引張力が0に近づいている。これらの結果から柱脚部は主筋が曲げモーメントを負担していることがわかる



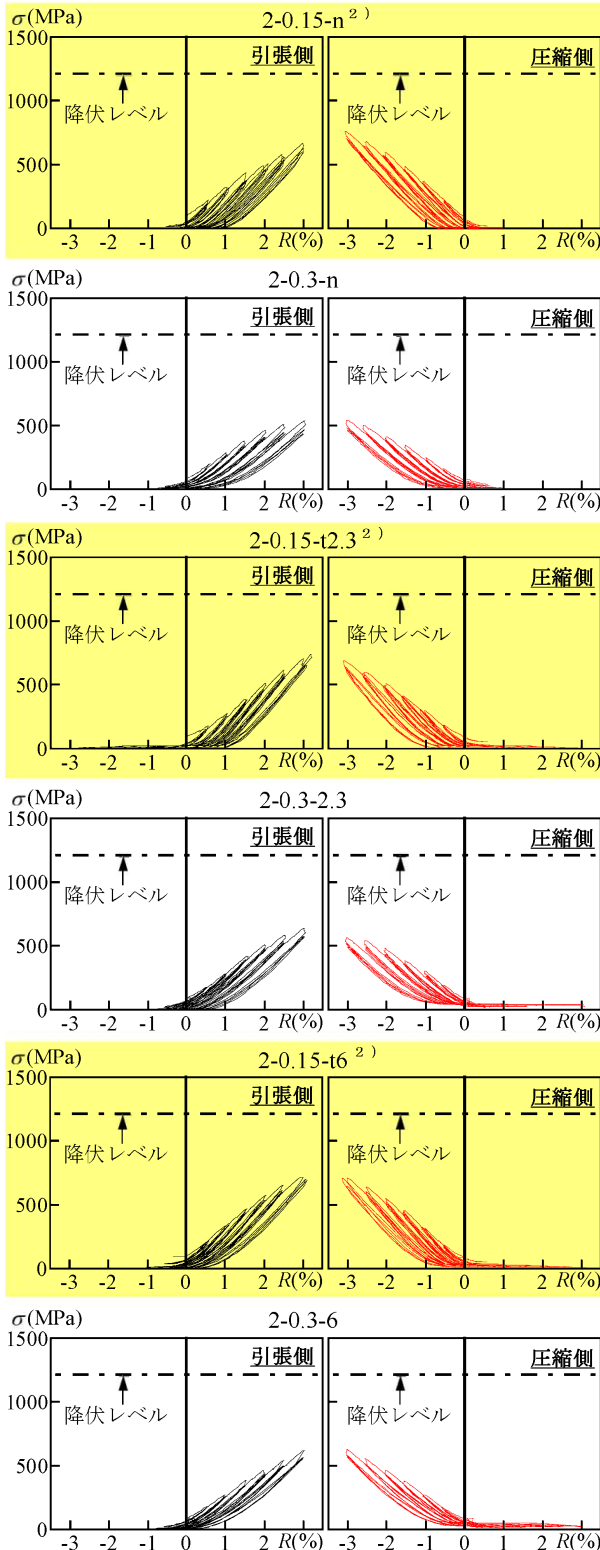
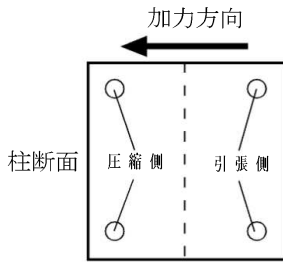


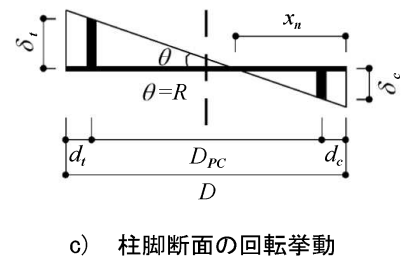
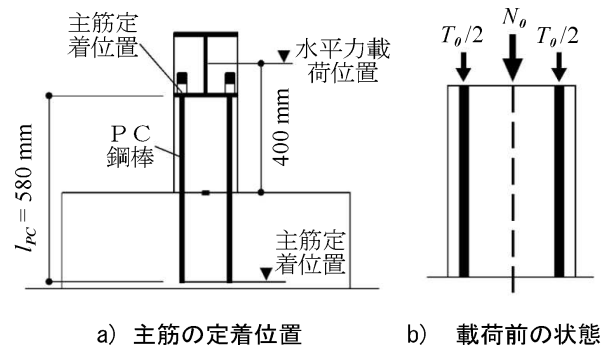
図-8 部材角  $R$  と PC 鋼棒の緊張力との関係

が、 $R=3\%$ までは主筋は降伏していない。また、軸力比が0.15のシリーズのPC鋼棒の引張力は軸力比が0.3のシリーズのものより若干大きくなっている。これは、両シリーズの軸力及びコンクリートの圧縮強度が異なるためである。

#### 4. 解析的検討

本研究では、コンクリートと主筋の付着がない試験体を用いているため、通常のボンドRC柱とは異なる挙動を示す。ボンドRC柱は、付着の存在によりコンクリートと鉄筋は一体となって挙動するので、平面保持の仮定が利用できる。しかし、アンボンドRC柱の場合は、コンクリートと鉄筋の挙動がそれぞれ異なり、断面解析の際に分けて考える必要がある。

図-9に解析モデルを示す。主筋の定着位置は、スタブの下端及び柱の上端(図-9のa)参照)で、主筋の全長が580mmとなる。水平力載荷前柱断面のコンクリートに作用する力の状態は図-9(b)に示すものである。水平荷重がかかると、図-9(c)に示すコンクリートが浮き上がる側のPC鋼棒には部材角 $R$ の増大と共に、伸びが増え、引張力も増える。一方、圧縮側のPC鋼棒には部材角 $R$ の増大と共に、縮みが増え、引張力が減る。



ここで、 $l_{PC}$  : PC 鋼棒の全長、 $T_0$  : PC 鋼棒の初期緊張力、 $N_0$  : 鉛直ジャッキによる一定軸力、 $\delta_t$  : 引張側 PC 鋼棒の伸び、 $\delta_c$  : 引張側 PC 鋼棒の縮み、 $d_t$  : 引張側コンクリートのかぶり厚さ、 $d_c$  : 圧縮側コンクリートのかぶり厚さ、 $D_{PC}$  : PC 鋼棒の芯々間距離、 $x_n$  : 中立軸、 $\theta$  : 柱脚断面の回転角(部材角  $R$  とする)、 $D$  : 柱のせい。

図-9 解析モデル

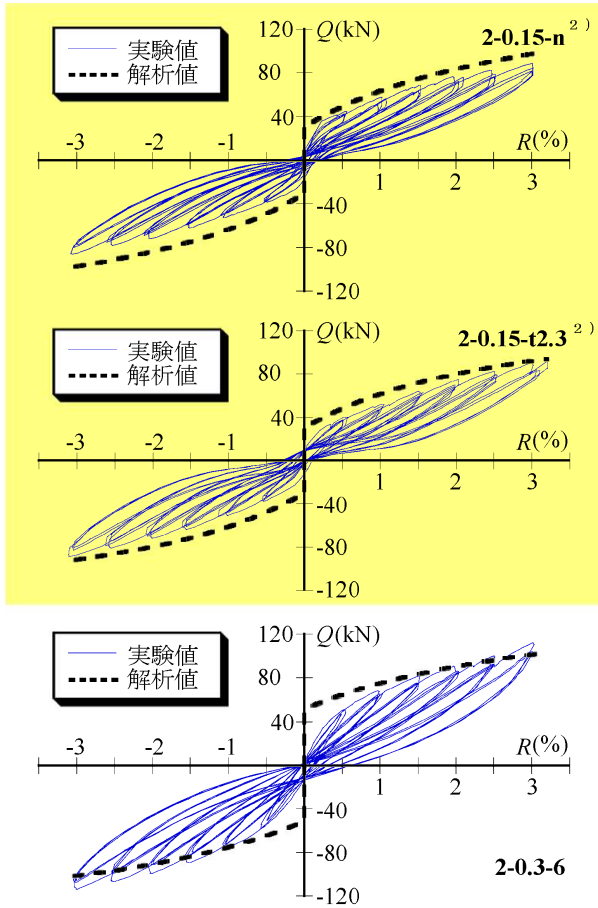


図-10 解析による荷重変形履歴包絡曲線と実験値による荷重変形履歴曲線との比較

圧縮側 P C 鋼棒の引張力が 0 になるまで、式(1)～(5)に基づいて考える。

$$T_t = T_0 / 2 + (\delta_t / l_{PC}) \times E_{SPC} \times a_{PC} \dots (1)$$

$$T_c = T_0 / 2 - (\delta_c / l_{PC}) \times E_{SPC} \times a_{PC} \dots (2)$$

$$R = (\delta_t + \delta_c) / D_{PC} \dots (3)$$

$$N_0 + T_t + T_c = k_1 \times k_3 \times x_n \times b \times \sigma_{CB} \dots (4)$$

$$M = (N_0 + T_t + T_c) \times (D/2 - k_1 \times x_n) + D_{PC} / 2 \times (T_t - T_c) \dots (5)$$

ここで、 $T_t$ : 引張側 P C 鋼棒の引張力、 $T_c$ : 圧縮側 P C 鋼棒の引張力、 $E_{SPC}$ : P C 鋼棒のヤング係数、 $a_{PC}$ : 引張側及び圧縮側 P C 鋼棒の断面積、 $k_1$ : 0.85、 $k_3$ : 0.85、 $b$ : 柱の幅、 $\sigma_{CB}$ : 文献 3) をもとに、横補強筋の拘束効果を加えたコンクリートの圧縮強度、 $M$ : 水平荷重による柱脚の曲げモーメントである。

一方、圧縮側 P C 鋼棒の引張力が 0 の場合、式(1)及び式(6)～(9)に基づいて考える。

$$T_c = 0 \dots (6)$$

$$N_0 + T_t = k_1 \times k_3 \times x_n \times b \times \sigma_{CB} \dots (7)$$

$$R = \delta_t / (D - x_n - d_t) \dots (8)$$

$$M = (N_0 + T_t) \times (D/2 - k_1 \times x_n) + D_{PC} / 2 \times T_t \dots (9)$$

式(5)及び(9)の右辺第1項は柱断面の圧縮力による曲げモーメント負担分であるが、式(5)及び式(9)の右辺第2項は P C 鋼棒の引張力による曲げモーメント負担分である。

本解析では、P C 鋼棒の伸びによる R C 脚部の回転変形が生じた後の履歴性状を明らかにするため、柱脚部以外の部分が剛体として考え、柱部材の曲げ変形とせん断変形及びコンクリートのせん断変形を無視し、軸方向 P C 鋼棒の伸びによる剛体回転変形のみ考慮した。そのため加力の初期段階からコンクリートの圧縮力を終局曲げ解析に用いるストレスブロックを仮定して解析した。以上の簡易解析モデル及び式に基づいて解析し、代表した試験体 2-0.15-n と 2-0.15-t2.3 及び 2-0.3-6 の解析による荷重変形履歴包絡曲線と実験値による荷重変形履歴曲線との比較を図-10 に示す。図-10 からわかるように、初期剛性以外の解析値と実験値による荷重変形履歴曲線のスケルトンカーブがほぼ一致し、本簡易解析モデルは概ね試験体の実験値を再現できる。

## 5. 結論

最下層柱脚の一定軸力下の水平力載荷実験を行った結果、以下のことが分かった。

- 1) 部材角が 3% まで主筋は降伏しなかった。
- 2) 荷重変形包絡曲線は第 1 直線を表わす初期剛性と第 2 直線表わす 2 次勾配の剛性の 2 つの直線で表わす履歴性状を示した。
- 3) 荷重変形包絡曲線の第 2 勾配は軸力にかかわらず同じとなった。
- 4) 提案した簡易解析モデルは概ね試験体の実験値を再現できる。
- 5) 本実験で採用したプレキャスト部材の接合法により残留変形の小さい骨組とする見通しが得られた。

**謝辞:** 本研究は平成 18 年度文部科学省科学研究費補助金 基盤研究(A) (課題番号: 18206060, 研究代表者: 崎野健治) の援助を受けた。試験体製作にあたっては、卒論を担当した福岡大学学部学生松本英伸氏ほか研究室の卒論生の協力を得た。加力装置の製作および組み立てにあたっては、福岡大学工学部建築学科技術職員平國久雄氏にお世話になった。ここに、関係各位に感謝します。

## 参考文献:

- 1) 田中 睦, 江崎文也, 小野正行, 河本裕行: 高強度アンボンド主筋を用いた R C 柱の履歴性状, コンクリート工学年次論文集, Vol. 26, No. 2, pp. 181-186, 2004
- 2) 李 文聰, 江崎文也, 中原浩之, 嘉村健太郎: 高強度アンボンド主筋を用いた R C 柱脚と十字型骨組の履歴性状, コンクリート工学年次論文集, Vol. 30, No. 3, pp. 193-198, 2008
- 3) 崎野健治, 孫玉平: 直線型横補強材により拘束されたコンクリート-ひずみ関係, 日本建築学会構造系論文集, 第 461 号, pp. 95-104, 1994