

# 論文 SBPDN 鉄筋を正形状に配置した円形断面 PCaRC 柱の耐震挙動に関する研究

羅 京\*1・袁 士宇\*1・竹内 崇\*2・孫 玉平\*3

**要旨:** 付着強度の低い超高強度鉄筋である SBPDN 鉄筋を正形状に配置し、ボルトで接合された薄肉鋼板で拘束された円形断面プレキャスト(PCa)鉄筋コンクリート造(RC)柱の耐震性能を明らかにすることを目的として、SBPDN 鉄筋の埋め込み深さと柱の施工方法と軸力比を実験変数に、計 6 体の片持ち柱形式の試験体について、一定軸力下における繰り返し載荷実験を実施した。その結果、提案した PCaRC 柱は、同じ実験条件の下では、一体打ち柱と同等のレジリエンス性を有することを明らかにした。また、部材解析により得られた各試験体の履歴挙動は実験で得られた履歴性状を良好な精度で予測できることを示した。

**キーワード:** SBPDN 鉄筋, 薄肉鋼板, PCaRC 柱, 耐震性能, レジリエンス性

## 1. はじめに

現行規準で想定される設計地震動(再現周期約 500 年)を超越するとされている南海トラフ地震や首都直下型地震などのような巨大地震に備えるために、今後の建築物には地震時の人命保護の観点からの崩壊を防ぐことのみならず、地震後の早期復興の観点からの復元性や修復性を包括したレジリエンス性が求められる。

RC 構造あるいは部材のレジリエンス性を測る指標としては、ドリフト硬化性(水平抵抗力が部材角の増大に伴い緩やかに上昇していく特性)と復元性(残留部材角が小さく抑制される特性)が挙げられる。著者らは RC 造柱に高いレジリエンス性を確保するための手法として、表面にスパイラル溝を有し、通常の異形鉄筋より付着滑りの生じやすい規格降伏強度が  $1275\text{N/mm}^2$  の超高強度鉄筋(以下 SBPDN 鉄筋)を RC 柱の主筋に使用する工法を提案している<sup>1-3)</sup>。この工法の特徴は、超高強度鉄筋の長い弾性変形能力を生かしつつ、鉄筋の降伏を遅延することにより、柱の水平耐力が変形に伴い上昇し続けると同

時に、大変形を経験した後の残留変形が小さく抑えられ、優れたレジリエンス性をもたらすことができる<sup>4,5)</sup>点である。また、SBPDN 鉄筋を用いた円形断面柱に鋼板拘束を施すことで、コンクリートに高い拘束効果をもたらし、より優れたレジリエンス性が期待できることを明らかにした<sup>6)</sup>。一方、SBPDN 鉄筋を円環状に配置すると、柱梁接合部にて梁主筋との干渉が生じやすくなるため、施工性の観点からは正形状に配筋の方が望ましい。

また、品質の安定化や工期の短縮を図る目的から、RC 柱のプレキャスト化が望まれている。SBPDN 筋を正形状に配置した本提案柱のプレキャスト化に際しては、SBPDN 鉄筋を強固に定着させるために必要となる主筋の埋め込み深さを明らかにする必要がある。そこで、本研究では SBPDN 鉄筋を正形状に配置し、ボルト接合鋼板拘束を施した円形断面 RC 柱の耐震性能を解明し、本柱をプレキャスト柱として施工した際の主筋の埋め込み深さと軸力比が柱の耐震性能に与える影響を明らかにすることを目的として、柱の作製及び載荷を行った。

表-1 試験体一覧

試験体名	$a/D$	$f'_c$ ( $\text{N/mm}^2$ )	$n$	主筋	$l_e$ (mm)	帯筋	鋼板拘束	施工方法	$Q_{exp}$ (kN)	$R_{exp}$ ( $\times 0.01\text{rad.}$ )
C20S	1.7	38.1	0.20	8-U12.6 ( $p_g=1.41\%$ )	20d	D6@100 ( $p_w=0.2\%$ )	PL2.3 ( $D'/t=132$ )	一体打ち	309.7	4.91
C20L		37.9			30d				305.7	5.99
PCa20S		38.5			20d			プレキャスト	306.0	5.90
PCa20L		37.5			30d				314.8	5.90
PCa33S		38.4	20d		309.7				5.88	
PCa33L		38.0	30d		330.1				5.91	

ここに、 $a/D$ :せん断スパン比、 $f'_c$ :実験時のコンクリートシリンダー強度、 $n$ :軸力比、 $p_g$ :主筋比、 $l_e$ :主筋埋め込み深さ、 $p_w$ :帯筋比、 $D'/t$ :幅厚比( $= (D+2t)/t$ )、 $Q_{exp}$ :最大水平力実験値(正負平均)、 $R_{exp}$ : $Q_{exp}$ 時部材角(正負平均)

\*1 神戸大学大学院 工学研究科建築学専攻 大学院生 (学生会員)

\*2 神戸大学大学院 工学研究科建築学専攻 准教授 博士(工学) (正会員)

\*3 神戸大学大学院 工学研究科建築学専攻 教授 工博 (正会員)

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体概要

試験体の一覧を表-1に、寸法及び配筋詳細を図-1にそれぞれ示す。試験体は建物の下層柱を模擬した縮小モデルで、直径300mm、せん断スパン比1.7の円形断面RC柱である。主筋埋め込み深さと施工方法と軸力比を実験変数として計6体の試験体を作製した。4体のプレキャスト試験体の柱部分と下スタブ部分を別打ちし、コンクリート打設の7日後に、SBPDN筋を下スタブ内に設けた#1000標準型のスパイラルシース管内に挿入し、グラウトを注入することで一体化させた。なお、グラウトを注入する際、柱部分と下スタブ部分の接合面には目荒らしを施した。柱部分と下スタブ部分間の目地の厚さは6mmで、目地部にもグラウト材は充填されている。

柱の主筋には、公称直径12.6mmの規格降伏強度が1275N/mm<sup>2</sup>のSBPDN鉄筋を用い、4隅の主筋を芯々間距離が163mmとなるように配筋し、その正方形の周上に均等に8本を配置した。主筋の上端部はナットと鉄板を用いて機械式定着とし、下端部は直径32mmのワッシャーを通し、その上下からナットで締め付けることで定着する。横補強筋には異形鉄筋D6を100mm間隔で配筋した(図-1を参照)。

平板を半円状に折り曲げた2枚の厚さ2.3mmの鋼板を高力ボルトにより接合しすべての試験体を拘束した。ボルト接合部では、鋼板の引張力によって生じるボルト間の変形を防ぐため、重ね合わせた2枚の鋼板のさらに外側から厚さ9mmの2枚の平鋼を添板として、鋼板を挟み込むような形でボルトを締め付けた。拘束鋼板には

曲げ及び軸力による軸方向応力を直接負担させないため、鋼板と上下加力スタブの間には6mmの隙間を設けている。使用した鋼材の力学特性を表-2に示す。コンクリートは設計基準強度 $F_c=27\text{N/mm}^2$ のレディーミクストコンクリートを使用した。粗骨材の最大粒径は20mmであり、実験時のシリンダー圧縮強度を表-1に示す。

### 2.2 载荷及び測定方法

図-2に载荷装置の概要を示す。1000kN油圧ジャッキで所定の軸力を与えてから、500kNジャッキを2台使用して正負交番繰り返し水平力を作用させた。载荷は柱の部材角Rにより制御し、载荷プログラムは部材角0.0025, 0.005, 0.0075, 0.01, 0.015と0.02radの変位レベルでは2回ずつ、部材角0.025, 0.03, 0.035, 0.04, 0.05と0.06radの変位レベルで1回ずつの正負交番繰り返し载荷である。図-3に変位計の設置位置を示す。下スタブに対する载荷点の相対水平変位は、図中1,2で示す2本の水平変位計で計測し、载荷点高さで除して部材角を算出した。また、柱の平均軸方向変形を算出するため、柱脚から310mmの4か所の位置に3~6番の鉛直変位計を取り付けた。

表-2 鋼材の力学的特性

呼び	規格	$f_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\epsilon_y$ (%)	$f_u$ (N/mm <sup>2</sup> )	$E_s$ (kN/mm <sup>2</sup> )
U12.6	SBPDN 1275/1420	1401	0.86*	1478	212
D6	SD295A	400	0.22	525	197
PL2.3	SS400	391	0.20	465	201

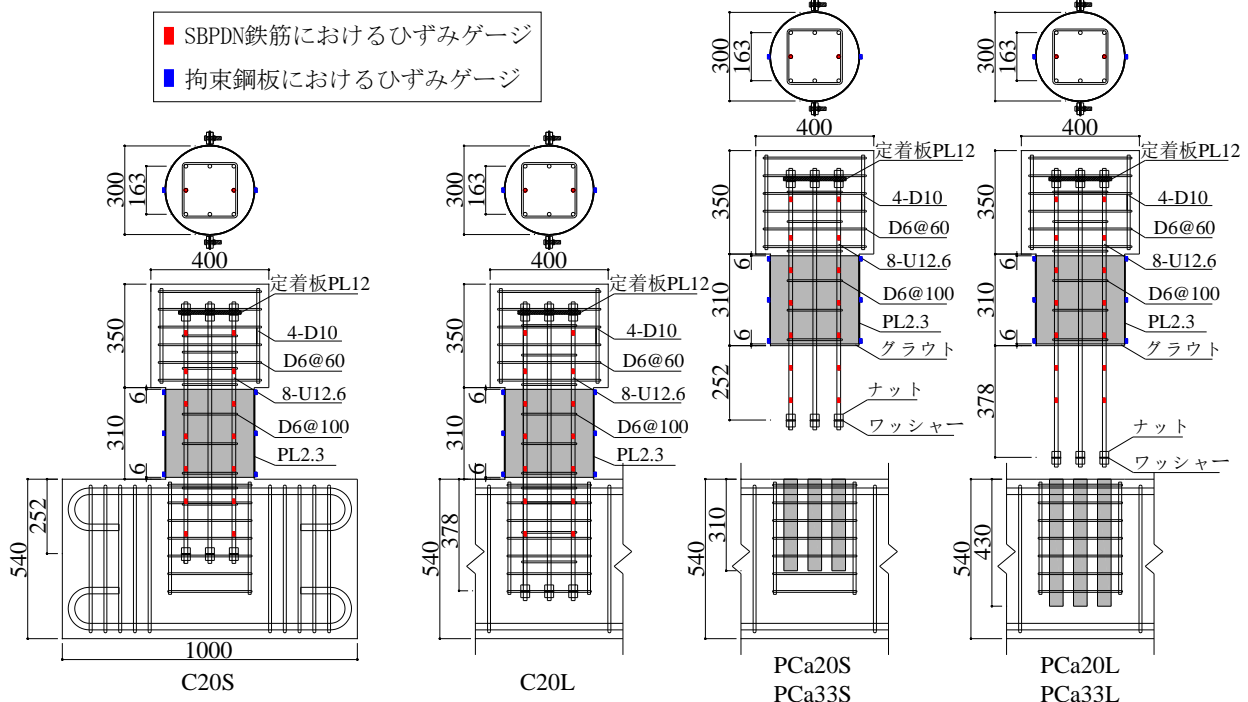


図-1 試験体の寸法及び配筋詳細(寸法の単位mm)

主筋及び拘束鋼板にひずみゲージを貼付し、ひずみを測定した(図-1を参照)。主筋については、材軸方向に沿って柱脚から-185mm, -75mm, 35mm, 145mm, 255mm, 365mm, 495mmの位置に赤点で示す最外縁の中央に位置する2本の主筋にひずみゲージを貼付した。拘束鋼板については、鋼板の周方向ひずみの計測と共に鋼板の軸方向の応力が発生しているかを確認するため、拘束鋼板の東西面中央の、柱脚から16mm, 155mm, 294mmの位置に青点で示す2軸ひずみゲージを貼付した。

### 3. 実験結果と考察

#### 3.1 破壊性状

本試験体の柱部分は拘束鋼板に覆われており、各载荷サイクルでの損傷状況を確認できないため、载荷終了後に拘束鋼板を取り外した後の各試験体の損傷状況を図-4に示す。灰色に塗られた部分はコンクリートの剥落を示している。すべての試験体においては部材角  $R=0.06\text{rad}$ 。

(試験体 C20S のみ  $R=0.05\text{rad}$ .) までの繰り返し载荷が行われた。

すべての試験体の拘束鋼板が試験体の最大耐力になる前に横方向降伏ひずみに達し、部材角  $R=0.05\text{rad}$  近傍でスタブと拘束鋼板の接触を確認した。所定の载荷プログラムが終了するまで、いずれの試験体においても、耐力低下は生じなかった。接合部ならびにスタブに大きな損傷は発生しておらず、いずれの試験体も载荷終了まで柱主筋はスタブ内に強固に定着されていたと考えられる。

また、いずれの試験体においても曲げ変形は柱脚部に集中し、柱の損傷は東西面(フランジ側)に集中した。主筋埋め込み深さ及び施工方法によるコンクリートの損傷の差異は見られなかった。一方、軸力比が大きいほど、圧縮側のコンクリートの損傷が顕著になり、損傷範囲が広がる傾向が見られた。

#### 3.2 繰り返し履歴性状

図-5に実験で得られた各試験体の水平力-部材角関

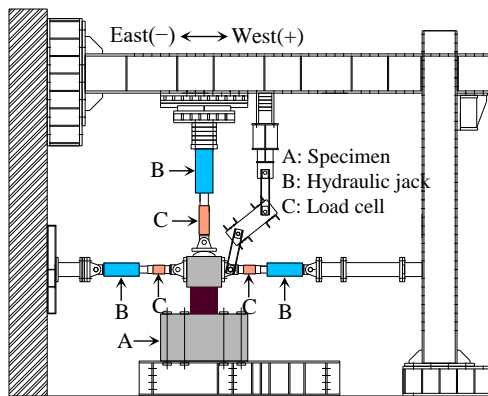


図-2 载荷装置概要

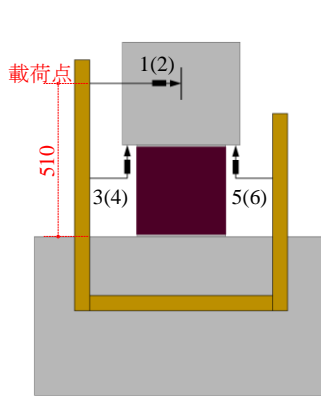


図-3 変位計位置

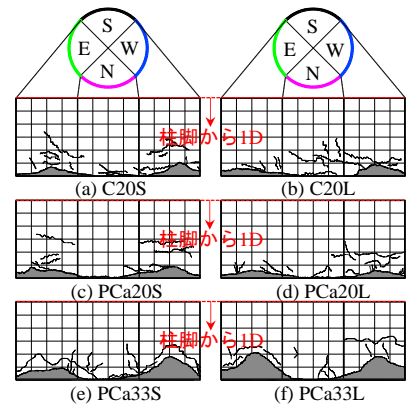


図-4 载荷終了後の損傷状況

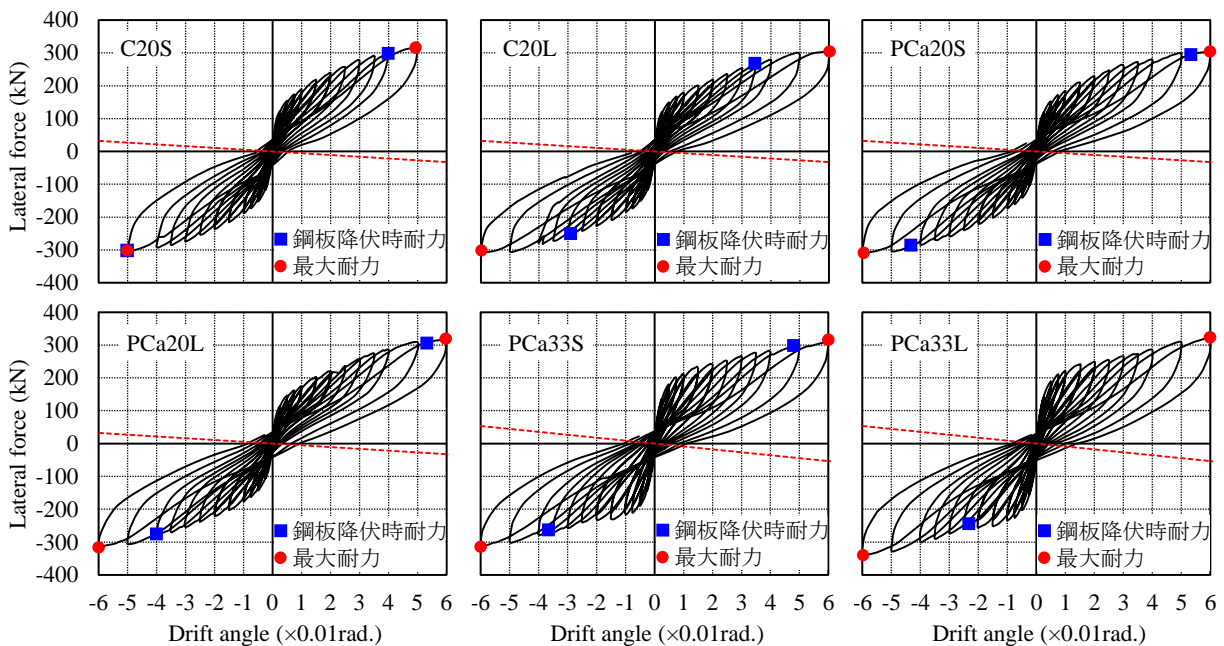


図-5 水平力-部材角関係

係を示す。図中の□印は拘束鋼板が降伏し始めた点を、○印は水平力が最大となった点を、赤色破線は  $P-\Delta$  効果による耐力の低下ラインを表す。試験体間には大きな差が見られず、いずれの試験体も所定の最終サイクルである  $R=0.06\text{rad}$ . (試験体 C20S のみ  $R=0.05\text{rad}$ .) に至るまで、残留変位の小さな原点指向性の強い履歴ループを描き、耐力も伸び続け、高いドリフト硬化性<sup>4)</sup>を發揮した。

図-6 に各試験体の柱脚部曲げモーメント-部材角関係の包絡線の比較を示す。包絡線は各载荷サイクルの1回目のピーク値の正負平均値を繋いで作製したものである。主筋埋め込み深さと施工方法が試験体の包絡線に及ぼす影響は殆ど見られなかった。このことから、プレキャスト試験体は一体打ち試験体とほぼ同様な曲げ耐力を發揮でき、20dの主筋の埋め込み深さは試験体の耐震性能を十分に發揮させられたと推察される。一方で、部材角  $R=0.0025\text{rad}$ . から  $R=0.020\text{rad}$ . まで軸力比 0.33 の試験体の曲げモーメントが軸力比 0.20 の試験体のそれらより最大 36.2% 高い。これは軸力が高いほど、試験体の中立軸の深さが深くなることにより、拘束鋼板で拘束された圧縮側のコンクリートの負担する曲げ抵抗が大きくなったためと思われる。一方、部材角  $R=0.025\text{rad}$ . 以降では、軸力比が高い方がより顕著な  $P-\Delta$  効果により両者の差が小さくなったものと考えられる。

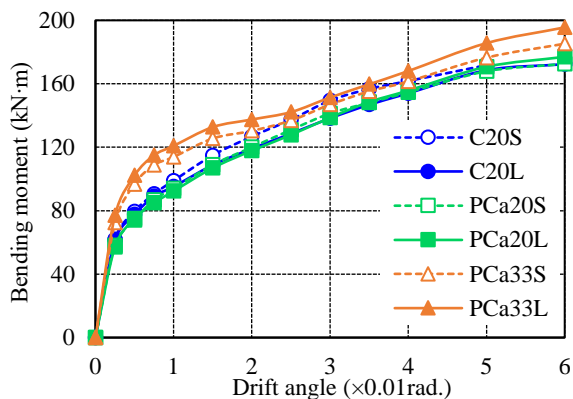


図-6 モーメント-部材角関係包絡線

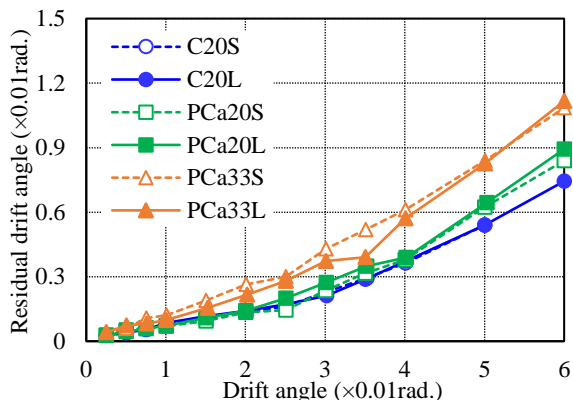


図-8 残留部材角

図-7 に各試験体の各载荷サイクルにおける正側ピークでの柱脚から 35mm 離れた曲げ引張側の主筋ひずみの変遷の比較を示す。軸力比 0.33 の試験体は所定の载荷プログラム ( $R=0.06\text{rad}$ .) まで主筋が引張降伏せず、軸力比 0.20 の試験体は部材角  $R=0.05\text{rad}$ . 近傍で降伏ひずみに達した。これは軸力が高いほど、断面の中立軸深さが深く、断面引張側にある SBPDN 鉄筋のひずみの増加率が緩やかになるためである。

### 3.3 残留部材角

地震後の建物の修復性及び使用性の評価における重要な水平力除荷後の残留部材角 (各サイクル1回目の正負平均) の推移を図-8 に示す。主筋埋込深さが残留部材角に及ぼす影響は殆ど見られなかった。部材角  $R=0.04\text{rad}$ . まで、プレキャスト試験体は一体打ちと同様に残留部材角が低く抑制され、軸力比 0.20 の試験体の残留部材角は経験最大部材角の 1/10 程度に小さかった。一方、軸力比 0.33 の試験体の場合は、 $R=0.015\text{rad}$ . からコンクリートの損傷が進行したことに伴い、残留部材角がやや大きくなったが、部材角  $R=0.04\text{rad}$ . までの载荷を経験した後の残留部材角は経験最大部材角の 1.5/10 に留まっており、十分な復元性を示した。

### 3.4 軸方向縮み

図-9 に各载荷サイクル終了後の部材角 0 の時点にお

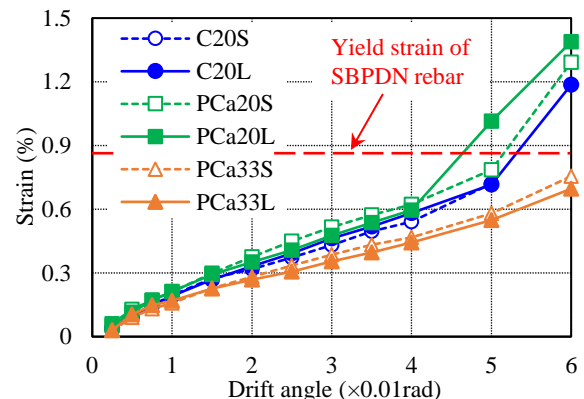


図-7 主筋のひずみ (柱脚から 35mm)

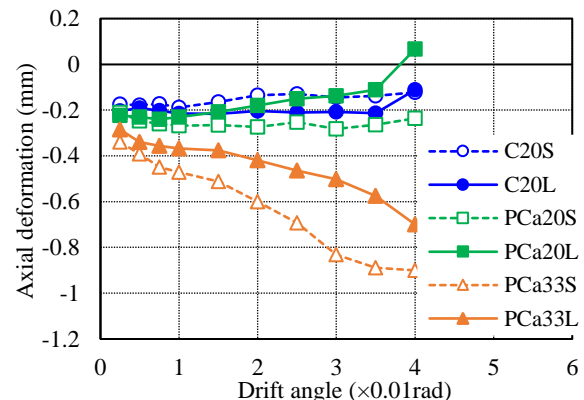


図-9 軸方向変形

ける上下スタブ間（検長は310mm）の平均軸縮みと部材角の関係を示す。図中では、伸び変形を正としている。軸力比0.20の4体の試験体の軸方向変形はいずれも部材角の増大に関係なく、横ばいとなった。一方、軸力比0.33の2体の試験体は高い軸力を受けるため、中立軸深さが深く、部材角の増加に伴い、コンクリートの損傷が進行し、軸方向変形は圧縮方向に進展することが明らかである。しかし、部材角  $R=0.04\text{rad}$ .となる時点での軸縮みが平均1.0mm前後で、計測区間における平均ひずみが0.3%程度に抑えられており、円形鋼管拘束されたコンクリートの強度時ひずみの計算値<sup>7)</sup>(0.92%)より遥かに低く、薄肉円形鋼管による拘束が柱の軸縮みを抑制していることを示唆している。

#### 4. 解析による耐震性能評価

SBPDN 鉄筋を主筋に用いた RC 柱の場合、付着滑りの影響が顕著となるため、従前の平面保持仮定に基づいた解析手法（完全付着）では、履歴挙動を適切に評価できないことが容易に予想できる。本論のレジリエントな PCaRC 柱の履歴挙動を解析するために、船戸ら<sup>3)</sup>が提案した SBPDN 鉄筋の付着すべりの影響を考慮できる解析方法を準用し、実験結果との比較を行った。この解析は、柱部材を柱脚に一樣な曲率を生じる塑性ヒンジ領域と基礎側及び柱頭側の SBPDN 鉄筋の付着性状を取り入れた有限個の付着バネで剛なコンクリートと鉄筋をつないだ付着バネ領域に分割したうえ、付着バネ領域からの鉄筋抜け出し量を付着応力-すべり量関係を用いて算出し、隣り合う付着バネ要素の関係及び端部境界条件によりヒンジ領域内の鉄筋のひずみないし応力を求める手法であ

る。ヒンジ領域のコンクリート断面に対してはファイバー法により  $M-\phi$  解析を行うものである。ページ制限のため、付着特性及び解析手法の詳細については文献3を参照されたい。なお、ボルトで接合した薄肉円形鋼板によるコンクリートへの拘束効果については、文献7で提案した溶接円形鋼板による拘束効果を評価するための算定式を準用することとする。

図-10 と 図-11 にそれぞれ水平力-部材角関係と SBPDN 鉄筋のひずみ挙動の実験結果と解析結果の比較を示す。解析結果は完全付着とした場合の結果 (No-slip analysis) と付着すべりの影響を考慮した結果 (Slip analysis) の両方を示す。図-10 より、完全付着の解析結果は、残留変形の大きな紡錘形の履歴性状を示し、耐力についても実験値を著しく過大評価した。一方、付着すべりを考慮した解析結果は実験で確認された残留変形の小さな原点指向型の履歴性状を適切に予測できた。図-11 より、完全付着の解析結果では、主筋ひずみが早いペースで増え続け、 $R=0.02\text{rad}$ .辺りで降伏ひずみに達していることが分かる。

付着すべりを考慮した解析結果は、軸力比0.20の試験体の実験結果との乖離が非常に小さい。軸力比0.33の試験体の実験結果をやや過大評価する傾向にあるが、その差は最大で13%前後である。実験結果をやや過大評価するための一因としては、既往の研究において、ボルト接合鋼板を施した試験体に比して、溶接接合鋼板を施した試験体の方が水平耐力や高く現れ、コンクリートへの拘束効果に差が見られたこと<sup>8)</sup>が報告されている。本解析では、溶接接合鋼板で拘束されたコンクリートの強度上昇係数<sup>7)</sup>を採用しているため、コンクリート強度を

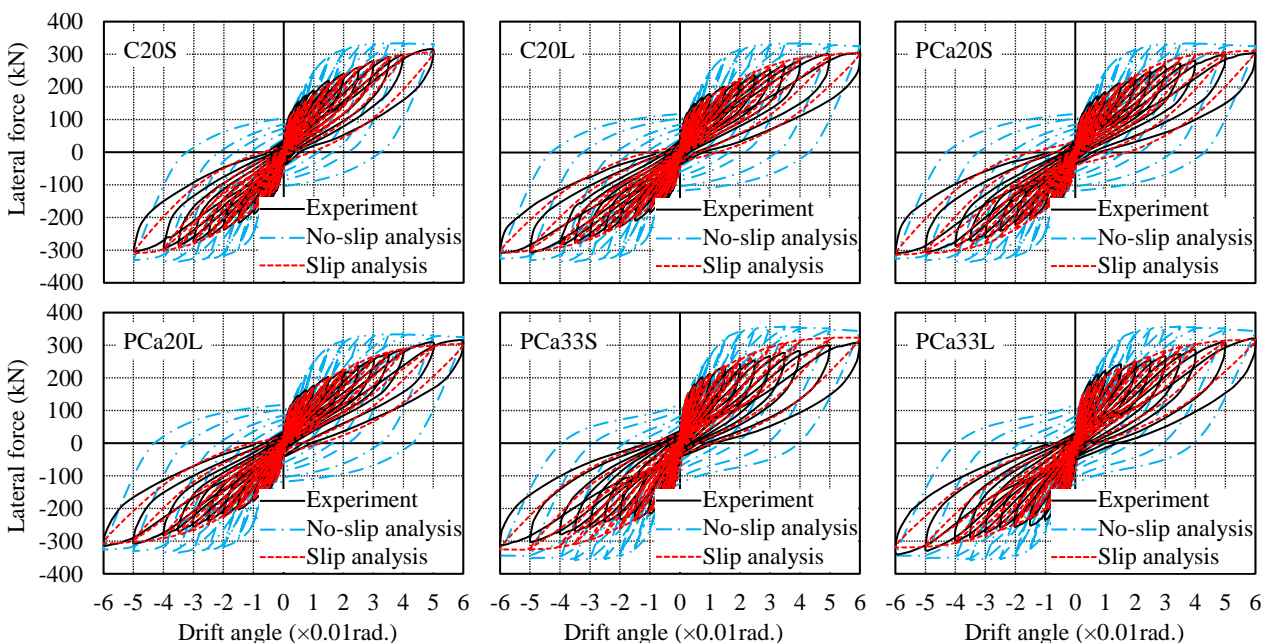


図-10 水平力-部材角関係の実験結果と解析結果の比較

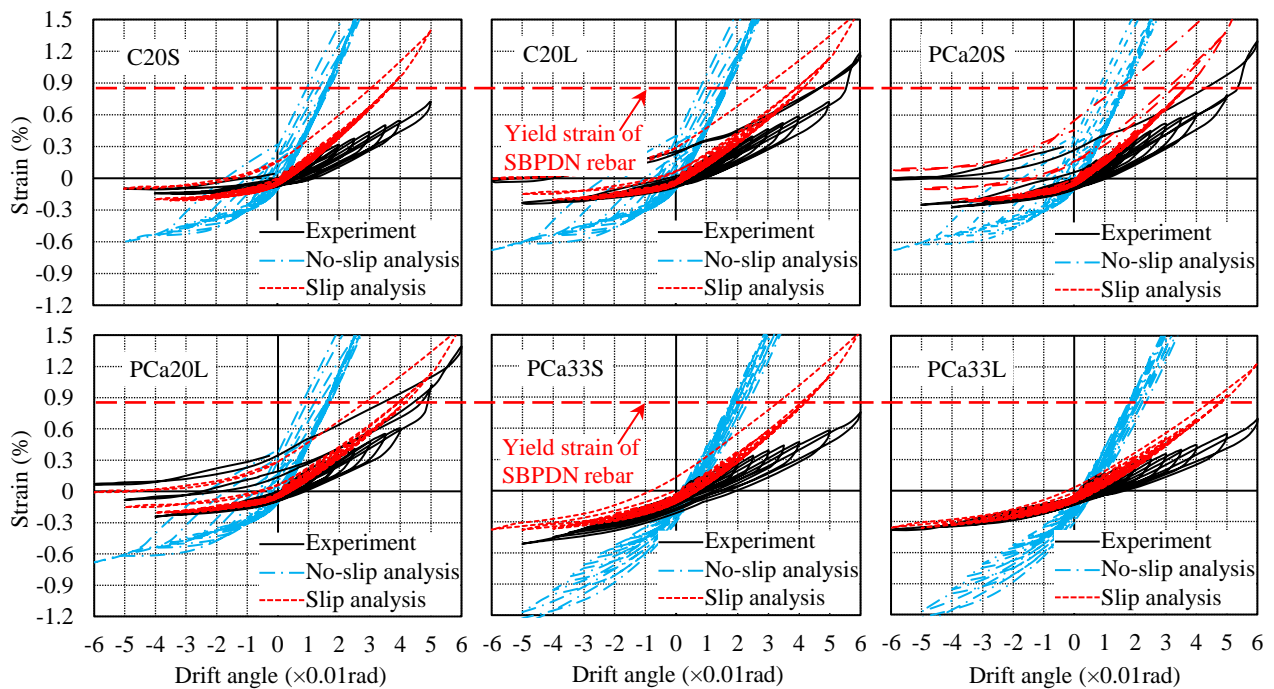


図-11 主筋ひずみの実験結果と解析結果の比較

過大に評価し、その結果として、試験体の耐力をやや過大評価したためと考えられる。

## 5. まとめ

本研究では、ボルト接合鋼板拘束を施し SBPDN 鉄筋を正方形に配置した円形断面 RC 柱の耐震性能の解明を目的として、SBPDN 鉄筋の埋め込み深さなどを実験変数として作製した 6 体の RC 柱の履歴挙動に関する実験的と解析的検討を行い、以下の知見を得た。

- 1) 本提案円形 PCaRC 柱は少なくとも部材角  $R=0.05\text{rad}$  まで残留変形が小さく抑えられ、水平耐力が上昇し続け、優れたレジリエンス性を有する。
- 2) SBPDN 鉄筋の埋め込み深さが公称直径の 20 倍程度であれば、PCaRC 柱は一体打ち柱と同等の優れたレジリエンス性を発揮することができる。
- 3) 本提案円形 PCaRC 柱の履歴性能は、付着すべりの影響を考慮した断面解析法により比較的精度よく評価できる。

今後の課題としては、拘束鋼板の接合方法がコンクリートへの強度上昇係数に及ぼす影響の定量把握と、その影響を考慮した柱の履歴性能評価法の開発が挙げられる。

## 謝辞

本研究は JSPS 科研費 (22H01642) の助成を受けたものである。本研究の実験実施にあたっては、神戸大学の大学院生である李剛剛氏および技術職員の金尾優氏から多大な協力を得た。また、本実験に使用した SBPDN 鉄筋は高周波熱錬株式会社より御提供頂いた。ここに記して謝意を示します。

## 参考文献

- 1) 橋高将義, 他: 超高強度鉄筋を主筋に用いた RC 柱部材の曲げせん断性状に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.2, pp.79-84, 2010.7
- 2) 仲井士門, 他: 主筋比及び軸力比が超高強度鉄筋を主筋に用いた RC 柱の耐震性能に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.2, pp.157-162, 2011.7
- 3) 船戸佑樹, 他: スパイラル溝を有する超高強度鉄筋の付着特性のモデル化と柱部材の履歴解析への応用, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.2, pp.157-162, 2012.7
- 4) 蔡高創, 他: 付着強度の低い超高強度鉄筋を用いた円形断面 RC 柱の耐震性能に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.2, pp.145-150, 2013.7
- 5) 孫玉平, 他: レジリエントなコンクリート柱の耐震性能に関する基礎研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.2, pp.1501-1506, 2013.7
- 6) 蔡高創, 他: 超高強度鉄筋を用いた円形断面 RC 柱耐震性能に関する研究 その 3 せん断スパン比, 軸力比及び横補形式の影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造IV, pp.533-534, 2013.8
- 7) 孫玉平, 崎野健治: 円形鋼管横補強 RC 柱の曲げ終局強度の算定法, コンクリート工学年次論文集, Vol.20, No.3, pp.1117-1122, 1998
- 8) 汪俊華, 他: SBPDN 鉄筋と鋼板拘束を用いた FA 円形 RC 柱の耐震挙動に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.2, pp.193-198, 2015.7