

# 論文 SBPDN 鉄筋を円環状に配置した正方形断面プレキャスト RC 柱の耐震性能に関する研究

武田 恭典\*1・木村 弘基\*2・竹内 崇\*3・孫 玉平\*4

**要旨:** 付着強度の低い超高強度鉄筋である SBPDN 鉄筋を主筋に円環状に配置した正方形断面 RC 柱の耐震性能および、プレキャスト柱として用いた際の耐震性能ならびに主筋の埋め込み深さの影響を明らかにするために、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、本提案柱は大変形域まで残留変形を小さく抑えると共に drift-hardening 性状を有することを明らかにした。また、本提案柱をプレキャスト柱として製作した場合においても、十分な主筋埋め込み長さを確保すれば、主筋の引き抜きによるコーン状破壊を防ぐことができ、一体打ち柱と同等の性能を有することを明らかにした。

**キーワード:** レジリエンス, SBPDN 鉄筋, プレキャスト柱, コーン状破壊, 付着すべり

## 1. はじめに

近年生じた巨大地震による被害において、倒壊を免れ、大きな変形を残した建物の取り壊しや補修に多大な費用を要したことから、建築物には地震時の安全性のみならず、地震後の使用性や修復性を確保し、早期復旧を可能とする構造的な性能としてのレジリエンスも重要視されるようになった。孫らは、正方形断面 RC 柱の主筋に、規格降伏強度が  $1275\text{N/mm}^2$  でスパイラル状の溝を有し、通常の異形鉄筋より付着強度が低い超高強度鉄筋 (SBPDN 1275/1420, 以下 SBPDN 鉄筋) を用いれば、早期の主筋降伏を回避することで、変形能を確保しつつ残留変形を抑制でき、RC 柱に優れたレジリエンスをもたらせることを報告している<sup>1-3)</sup>。

仲井らは、SBPDN 鉄筋を主筋に用いたせん断スパン比 2.5 の矩形断面 RC 柱の耐震性能を実験的に調べ、このような柱は、残留変形が抑えられ、大変形域まで耐力を維持できることを報告している<sup>4)</sup>。蔡らは、SBPDN 鉄筋を主筋に用いたせん断スパン比 2 および 3 の円形断面 RC 柱の耐震性能を実験的に調べ、このような柱は、残留変形が抑えられるだけでなく、大変形域まで耐力が継続的に上昇し続ける drift-hardening 性状を示すこと<sup>5)</sup> を報告している。SBPDN 主筋の配筋形式として、矩形配筋より円形配筋とした方が、円形帯筋あるいはスパイラル筋を用いることができるため、コンクリートを効果的に拘束し、柱の drift-hardening 性状を高めることができる。しかしながら、施工性や施工後のスペースの使用性などに関しては矩形断面柱の方が優れている。そこで、SBPDN 主筋を円形配筋しながらも断面形状を矩形とすることで、高い drift-hardening 性状を有しつつ、施工性、使用性に優れた

部材となることが考えられる。また、本提案柱は配筋形式が複雑であり、施工に時間やコストを要するため、実用化においてはプレキャスト柱としての利用が望ましく、そのように施工した際の耐震性能への影響を解明する必要がある。また、本柱をプレキャスト柱として施工する際には既往の研究<sup>4, 5)</sup>の柱部材のように主筋下端部に定着板を用いた機械式定着を施すことが出来ないため、より簡略化させた定着を設ける必要があるが、その際、スタブへの柱主筋の埋め込み深さが柱の耐震性能に大きく影響することが予想される。

そこで、本研究では、SBPDN 鉄筋を主筋に円環状に配置した正方形断面 RC 柱の耐震性能を明らかにするとともに、本柱をプレキャスト柱として施工した際の耐震性能への影響および、柱主筋の埋め込み深さが本柱の耐震性能に及ぼす影響を明らかにすることを目的として、実験的研究を行った。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体概要

本研究に用いた 4 体の試験体の一覧を表-1 に、配筋詳細を図-1 に示す。試験体は中低層建物の下層階の柱を模擬した縮小モデルで、直径 300mm の矩形断面を有する片持ち柱である。せん断スパン比に関しては、実際の建物への利用を想定し、 $a/D=1.7$  と設定した。

コンクリートには調合強度  $40\text{N/mm}^2$  のレディーミックスコンクリートを使用した。粗骨材の最大粒径は 20mm で、使用したセメントは普通ポルトランドセメントである。実験時材齢の圧縮強度を表-1 に示す。

柱の主筋としては、公称直径 12.6mm (呼び U12.6) の

\*1 トヨタ T&S 建設株式会社 学士 (正会員)

\*2 神戸大学大学院 工学研究科建築学専攻 大学院生

\*3 神戸大学大学院 工学研究科建築学専攻 助教 博士 (工学) (正会員)

\*4 神戸大学大学院 工学研究科建築学専攻 教授 工博 (正会員)

表-1 試験体一覧

試験体名	D (mm)	a/D	$f_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_{cck}$ (N/mm <sup>2</sup> )	n	主筋	埋め込み深さ (mm)	横補強形式			$Q_{exp}$ (kN)	$R_{exp}$ ( $\times 10^{-2}$ rad.)
								Type	帯筋	$p_w$ (%)		
RC-L	300	1.7	46.9	-	0.1	8-U12.6 ( $p_g=1.1\%$ )	400	Spiral	D10@55	0.86	310	4.94
RC-S			200	309			4.01					
PCaRC-L			429	330			4.44					
PCaRC-S			214.5	324			3.25					

注、D：柱直径、a/D：せん断スパン比、 $f_c$ ：コンクリートシリンダー強度、 $f_{cck}$ ：グラウト材のシリンダー強度、n：軸力比、 $p_g$ ：主筋比、 $p_w$ ：横補強筋比、 $Q_{exp}$ ：最大水平力実験値（正負平均）、 $R_{exp}$ ： $Q_{exp}$ 時部材材角（正負平均）

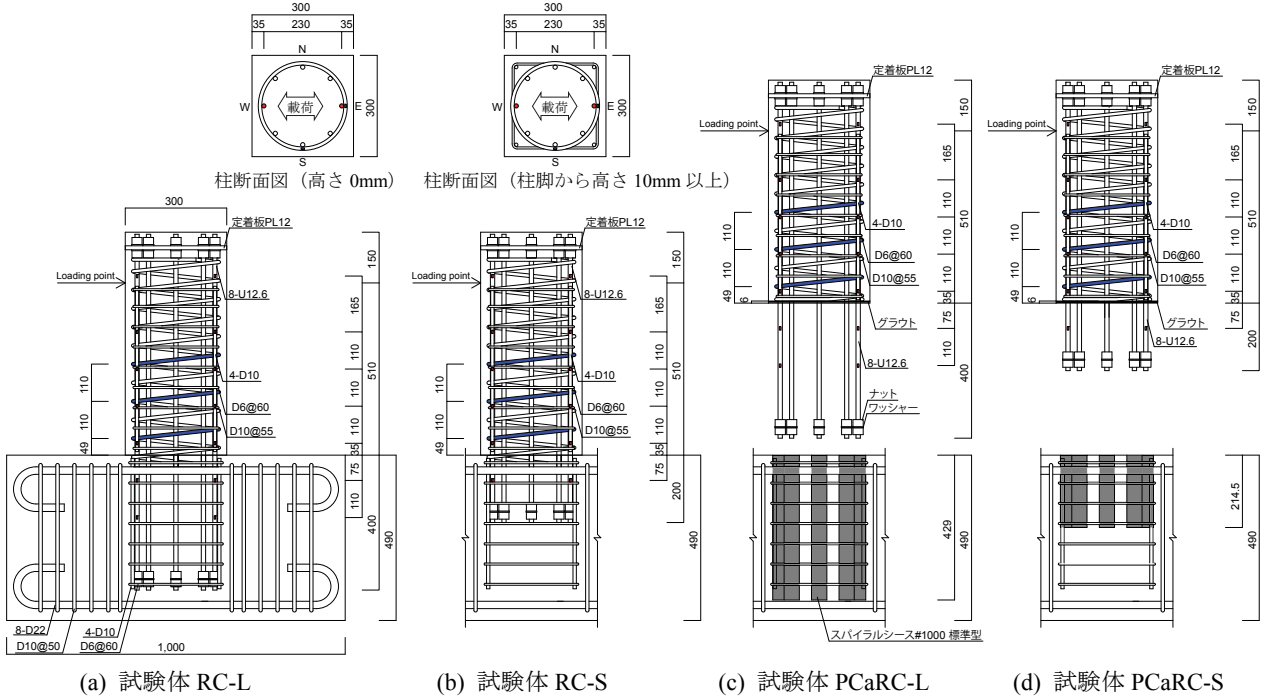


図-1 試験体の配筋詳細（寸法の単位は mm）

SBPDN 鉄筋 8 本を断面中心から半径 110mm の円周上に 45 度間隔で配置した。SBPDN 鉄筋は、通常の異形鉄筋と丸鋼の中間的な付着性状を有しており、主筋比は約 1.11% である。既往の研究における鉄筋の引抜試験において、コンクリート強度が 40N/mm<sup>2</sup> 前後の場合の SBPDN 鉄筋（ただし鉄筋径は 12.6mm）の付着強度は約 3.0N/mm<sup>2</sup> であると報告されている<sup>3)</sup>。付着強度が低く、主筋すべりを生じやすいため、主筋の上端部にはねじ切り加工を施し、ナットと鉄板を用いて機械式定着とし、下端部にはねじ切り加工を施し、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の役割を期待した（図-1 参照）。

一体打ちの試験体 RC-L と RC-S は柱主筋の埋め込み深さをそれぞれ 400mm、200mm とした。プレキャストの試験体 PCaRC-L と PCaRC-S は柱部分とスタブ部分を別打ちし、コンクリート打設の 7 日後にグラウトを打設し一体化させた。その際、柱部分とスタブ部分の接合面には目荒らしを施した。柱部分とスタブ部分間の目地の厚

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	1361*	0.84	1474	212
D10	SD295A	347	-	504	-

注、 $f_y$ ：降伏点応力（\*は 0.2% オフセット耐力）、 $\epsilon_y$ ： $f_y$  時ひずみ、 $f_u$ ：引張強さ、 $E_s$ ：弾性係数

さは 6mm である。実験時材齢のグラウトの圧縮強度を表-1 に示す。プレキャストの試験体 PCaRC-L と PCaRC-S のスタブ部分に埋め込んだシース管には内径 42mm、外径 45mm のスパイラルシース#1000 標準型を用いた。シース管の埋め込み深さは試験体 PCaRC-L と PCaRC-S において、それぞれ 429mm、214.5mm である。いずれの試験体も D10 のスパイラル筋による横拘束とし、スパイラル筋間隔は 55mm とした。また、かぶりコンクリートが早期に剥落してしまうことが考えられるため、柱断面の四隅に D10 の異形鉄筋を配置し、D6 のフープを 60mm 間隔で配置した。ただし、D10 は曲げモーメン

トに直接抵抗しないように、柱脚 10mm から 500mm の区間でのカットオフ筋としている。表-3 に使用した鉄筋の力学特性を示す。

## 2.2 加力及び荷重方法

図-2 に荷重装置の概要を示す。PC 鋼棒にプレストレスを導入することにより、試験体上部に設置した荷重梁を媒体として、試験体に軸力比が 0.1 となるように所定の軸力を与えてから、アクチュエータを使用して正負交番繰り返し水平力を作用させた。導入した緊張力ならびに荷重中の変化はロードセルを用いて計測した。荷重中の軸力はいずれの試験体も 0.09~0.16 の間で変動していた。荷重は柱の部材角  $R$  により制御した。部材角  $R$  は、荷重点位置で計測したスタブに対する荷重点位置の相対水平変位をせん断スパンで除することにより算出した。荷重プログラムは部材角 0.0025, 0.005, 0.0075, 0.01, 0.015 と 0.02rad の各変位振幅での 2 回ずつの正負交番繰り返し荷重と部材角 0.025, 0.03, 0.035, 0.04 と 0.05rad の変位レベルでの 1 回ずつの正負交番荷重である。

主筋および横拘束筋にひずみゲージを貼付し、鉄筋のひずみを測定した。主筋については、図-1 に示すよう

に、材軸方向に沿って 6 箇所あるいは 7 箇所の位置に、赤点で示す最外縁に位置する 2 本の主筋にひずみゲージを貼付した。横拘束筋については、図-1 に示すように、材軸方向に沿って青塗りで示す 3 箇所の位置に各箇所 2 枚ずつのゲージを貼付し、横拘束筋に応力が発生しているかを確認した。

## 3. 実験結果と考察

### 3.1 ひび割れ及び破壊性状

試験体 RC-L は、部材角  $R=\pm 0.0025\text{rad}$  のサイクルの途中で曲げひび割れが発生した。部材角  $R=\pm 0.01\text{rad}$  のサイクルでかぶりコンクリートの剥離が始まり、その後、曲げ圧縮側コンクリートの損傷が進行し、部材角  $R=0.02\text{rad}$  のサイクルにおいてかぶりコンクリートが剥落した。その後、かぶりコンクリートの剥落が進行したが、所定の荷重プログラム終了まで水平耐力は伸び続けた。試験体 RC-S は、部材角  $R=\pm 0.0025\text{rad}$  のサイクルの途中で曲げひび割れが発生した。部材角  $R=\pm 0.015\text{rad}$  のサイクルでかぶりコンクリートの剥離が始まり、その後、曲げ圧縮側コンクリートの損傷が進行し、部材角  $R=\pm 0.02\text{rad}$  のサイクルにおいてかぶりコンクリートが剥落した。その後、かぶりコンクリートの剥落が進行したが、所定の荷重プログラム終了するまで、水平耐力は伸び続けた。プレキャストの試験体 PCaRC-L は、部材角  $R=\pm 0.0025\text{rad}$  のサイクルの途中でスタブとグラウト目地の界面および柱部分に曲げひび割れが発生した。部材角  $R=\pm 0.015\text{rad}$  のサイクルでかぶりコンクリートの剥離が始まり、その後、曲げ圧縮側コンクリートの損傷が進行し、部材角  $R=\pm 0.025\text{rad}$  のサイクルにおいてかぶりコンクリートが剥落した。その後、かぶりコンクリートの剥落が進行したが、所定の荷重プログラム終了するまで、水平耐力は伸び続けた。プレキャストの試験体 PCaRC-S は、部材

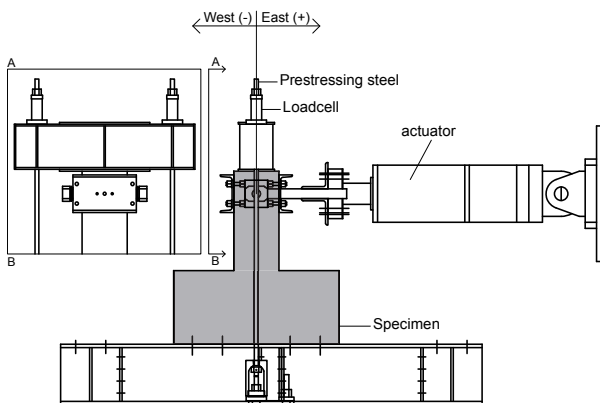


図-2 荷重装置概要

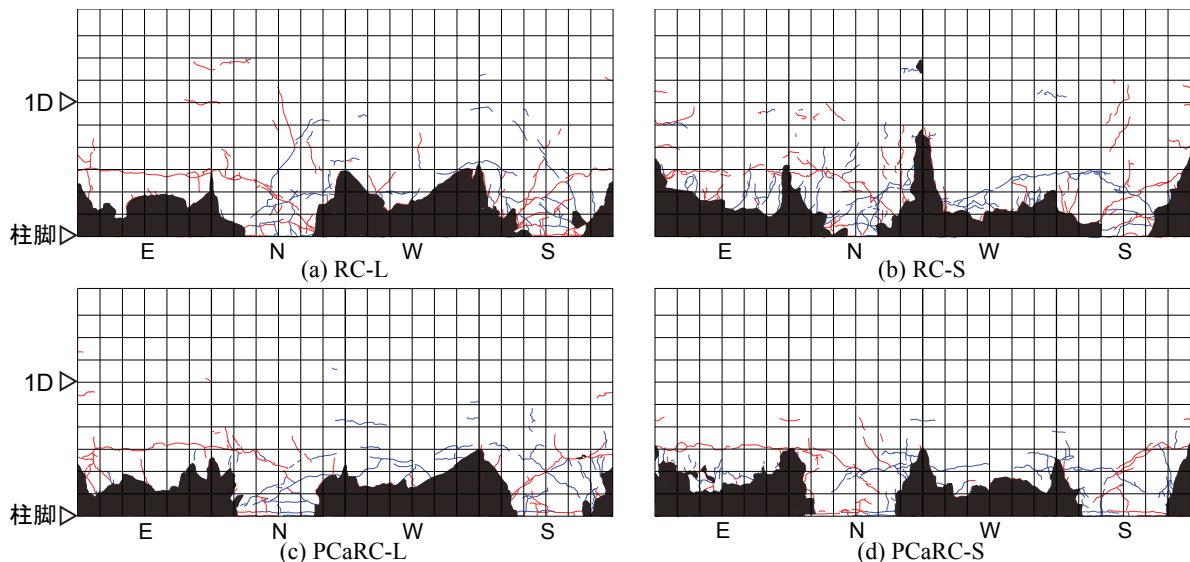


図-3 荷重終了後の損傷状況

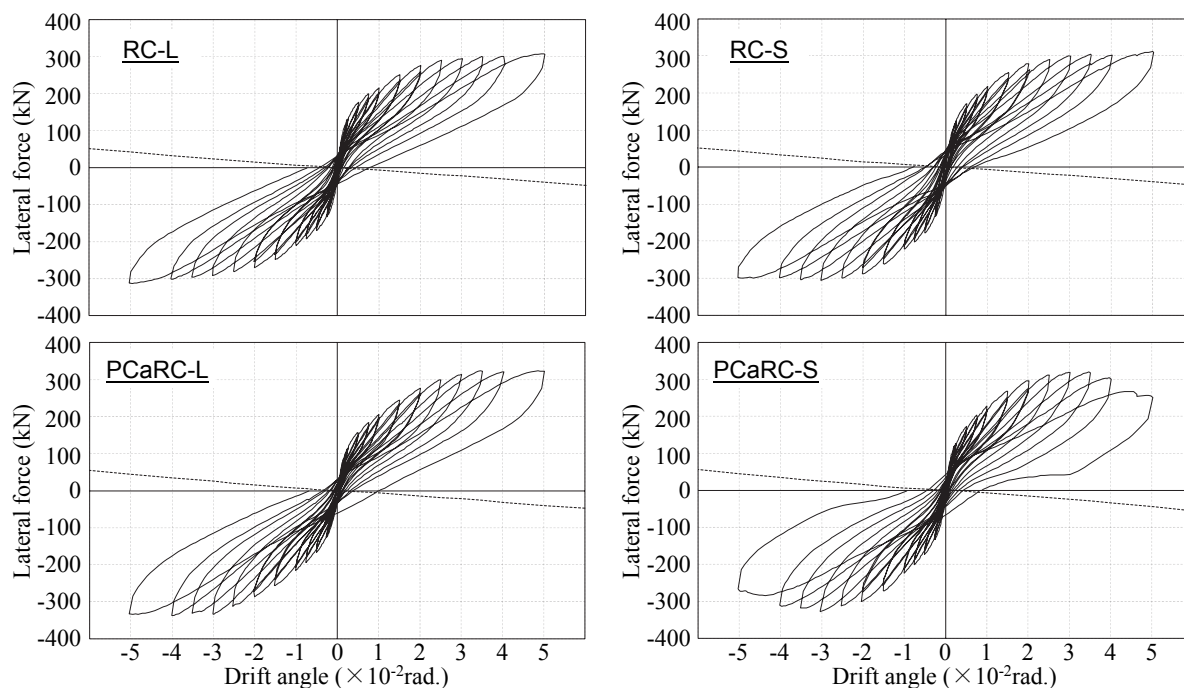


図-4 水平力—部材角関係

角  $R=\pm 0.0025\text{rad}$  のサイクルの途中でスタブとグラウト目地の界面、柱とグラウト目地の界面、ならびに柱部分に曲げひび割れが発生した。部材角  $R=\pm 0.01\text{rad}$  のサイクルでかぶりコンクリートの剥離が始まり、その後、曲げ圧縮側コンクリートの損傷が進行し、部材角  $R=\pm 0.015\text{rad}$  のサイクルにおいてかぶりコンクリートが剥落した。その後、かぶりコンクリートの剥落および、柱脚周辺のスタブ部分のコンクリートの損傷が進行し、部材角  $R=\pm 0.035\text{rad}$  のサイクルで最大耐力に達した。主筋の座屈や降伏、せん断ひび割れの顕著な増大などが見られず、スタブ部分のコンクリートの損傷が顕著であったことから、試験体 PCaRC-S は主筋の引張力によるコーン状破壊により耐力低下したと考えられる。所定の荷重プログラムの終了後に、最大耐力を確認するため、部材角  $0.06\text{rad}$  までの荷重を実施した後に、押切荷重を行い、試験体 RC-L, RC-S および PCaRC-L は、いずれも部材角  $0.05\text{rad}$  で最大耐力を迎えたことを確認した。

図-3 に荷重終了後の損傷状況を示す。一体打ちで埋め込み深さが  $400\text{mm}$  の試験体 RC-L は、柱脚部から約  $390\text{mm}$  までの範囲で曲げひび割れが発生し、高さ  $150\text{mm}$  程度までコンクリートの損傷が見られた。一体打ちで埋め込み深さが  $200\text{mm}$  の試験体 RC-S は、柱脚部から約  $340\text{mm}$  までの範囲で曲げひび割れが発生し、高さ  $180\text{mm}$  程度までのコンクリートの損傷が見られた。プレキャストで埋め込み深さが  $429\text{mm}$  の試験体 PCaRC-L は、柱脚部から約  $370\text{mm}$  までの範囲で曲げひび割れが発生し、高さ  $150\text{mm}$  程度までコンクリートの損傷が見られた。プレキャストで埋め込み深さが  $214.5\text{mm}$  の試験体 PCaRC-S は、柱脚部から約  $220\text{mm}$  までの範囲で曲げひ

び割れが発生し、高さ  $150\text{mm}$  程度までのコンクリートの損傷が見られた。いずれの試験体においても曲げひび割れ幅は柱脚部に発生したものが最も大きく、曲げ変形は柱脚部に集中していた。

### 3.2 繰返し履歴性状

図-4 に所定の荷重プログラムまでで得られた各試験体の水平力—部材角関係を示す。ここで、縦軸に用いた水平力は、アクチュエータで計測した荷重から、PC 鋼棒の軸力の水平方向成分を差し引いた値である。図-4 中の破線は P- $\Delta$  効果による耐力の低下ラインを示す。いずれの試験体も最終サイクルまで、原点指向型の履歴性状を示しており、特に試験体 RC-L においては、部材角  $R=0.05\text{rad}$  まで耐力が上昇し続けた。試験体 RC-S は、部材角正側においては部材角  $R=0.05\text{rad}$  で、部材角負側においては部材角  $-R=0.03\text{rad}$  で最大耐力に達した後、P- $\Delta$  効果の影響を受けて、水平耐力はわずかに低下したが、その低下度合いは P- $\Delta$  効果による低下分と比べて非常に小さい。このことから、主筋に円環状に配置した正方形断面 RC 柱は、円形断面柱で見られたような高い Drift-hardening 性状<sup>9)</sup>を発揮することが確認できる。また、試験体 PCaRC-L は、部材角正側においては部材角  $R=0.05\text{rad}$  で、部材角負側においては部材角  $-R=0.04\text{rad}$  で最大耐力に達した後、P- $\Delta$  効果の影響を受けて、水平耐力はわずかに低下したが、その低下度合いは P- $\Delta$  効果による低下分と比べて非常に小さい。試験体 PCaRC-S は、部材角正側においては部材角  $R=0.035\text{rad}$  で、部材角負側においては部材角  $-R=0.03\text{rad}$  で最大耐力に達した後、水平耐力は大きく低下した。これは、後節で詳細に記述するが、荷重中にせん断ひび割れの増大や圧縮側コンクリ

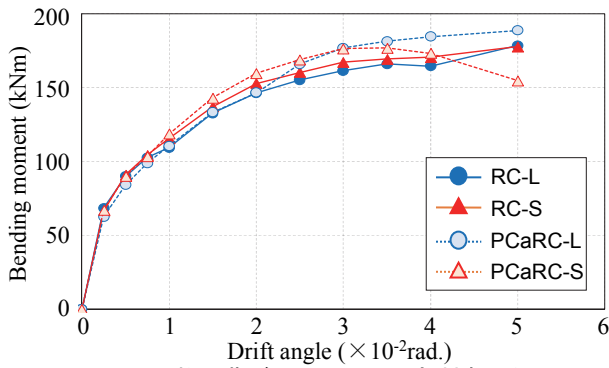


図-5 柱脚曲げモーメント-部材角関係

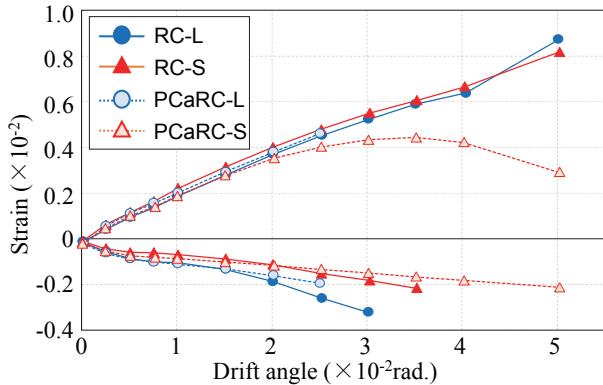


図-7 主筋ひずみのサイクルピーク値の比較

ートの顕著な破壊、シース管とグラウト間での破壊が見られず、耐力低下に伴う主筋ひずみの低下が見られたことから、スタブ部分のコンクリートがコーン状破壊したことに起因する耐力低下と考えられる。

図-5 に各試験体の柱脚断面における曲げモーメント-部材角関係 (各サイクル1回目の正負平均) の比較を示す。一体打ちの試験体 RC-L とプレキャストの試験体 PCaRC-L を比較すると、部材角  $R=0.02\text{rad}$  以降のサイクルで、両者の耐力差が大きくなり始め、一体打ちの試験体よりもプレキャストの試験体の耐力が最大で約 12% 程度高い値となった。この耐力上昇の一因としては、プレキャスト試験体は、柱脚部に強度の高い 6mm のグラウトの層を有することで、危険断面が柱脚から上方に移動したものと考えられる。また、一体打ちの試験体 RC-S とプレキャストの試験体 PCaRC-S を比較すると、部材角  $R=0.01\text{rad}$  以降のサイクルで、両者の耐力差が大きくなり始め、一体打ちの試験体よりもプレキャストの試験体の耐力が最大で約 5% 程度高い耐力を示した。以上のことから、部材角  $R=0.035\text{rad}$  までのサイクルにおいては、プレキャストの試験体は一体打ちの試験体と同等もしくはそれ以上の耐力を発揮することがわかる。

図-6 に各試験体の残留部材角 ( $R_{res}$ ) の実験結果の比較を示す。部材角  $R=0.015\text{rad}$  まで試験体間の違いは殆どないが、かぶりコンクリートの剥落が始まる部材角  $R=0.02\text{rad}$  から一体打ちの試験体 RC-L および RC-S の残留部材角の増大が顕著になっている。また、プレキャスト

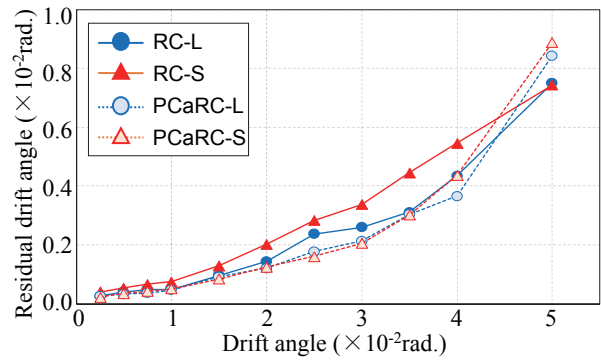


図-6 残留部材角の比較

トで埋め込み深さが短い試験体 PCaRC-S は、部材角  $R=0.035\text{rad}$  でコーン状破壊したものの、それまでは、プレキャストで埋め込み深さが長い試験体 PCaRC-L と同等に残留変形を低く抑えられた。以上のことから、プレキャストの試験体は一体打ちの試験体と同様に残留部材角を低く抑えられることがわかる。

図-7 に各試験体の各サイクルにおける正側ピークでの主筋ひずみの値の変遷の比較を示す。各グラフは、柱脚から高さ 35mm の断面での曲げ引張側および曲げ圧縮側の主筋のひずみを示している。ただし、試験体 RC-L の曲げ引張側、試験体 RC-S の曲げ圧縮側、試験体 PCaRC-S の曲げ引張側主筋のひずみデータに関しては、高さ 35mm でのひずみデータが不調であったため、高さ 145mm でのデータを掲載している。両高さ共に柱脚から 0.5D 内とヒンジ領域内にあり、両高さのひずみデータはほぼ同じ挙動を示すことを他の試験体のデータにより確認している。図より、いずれの主筋も部材角  $R=0.04\text{rad}$  までのサイクルにおいては最大で約 0.65% 程度であり、降伏ひずみ (0.84%) に達していないことがわかる。また、部材角  $R=0.025\text{rad}$  以降のサイクルで試験体 PCaRC-S の主筋ひずみの伸び方が緩やかになっており、部材角  $R=0.035\text{rad}$  でピークに達していることがわかる。これは、耐力低下のタイミングとも一致していることから、スタブ部分のコンクリートがコーン状破壊したことに起因する主筋の抜け出しによる主筋ひずみの低下だと考えられる。

### 3.3 コーン状破壊

前述の 3.2 節において示したように、プレキャストで埋め込み深さが短い試験体 PCaRC-S は、スタブ部分のコンクリートのコーン状破壊により耐力低下した。そこで、定着部がコーン状破壊に至る引張力  $P_a$  を計算により推測すべく、式(1)により計算を行った。<sup>9)</sup>

$$P_a = 0.31\sqrt{f'_c} \cdot A_c \quad (1)$$

ここで、 $f'_c$  はシリンダー強度、 $A_c$  は有効投影面積である。図-8 に有効投影面積  $A_c$  の算定方法を示す。有効投影面積  $A_c$  は図-8 において塗りつぶして示す領域の面積で、引張側最外縁を含む 3 本の主筋  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  を対象と

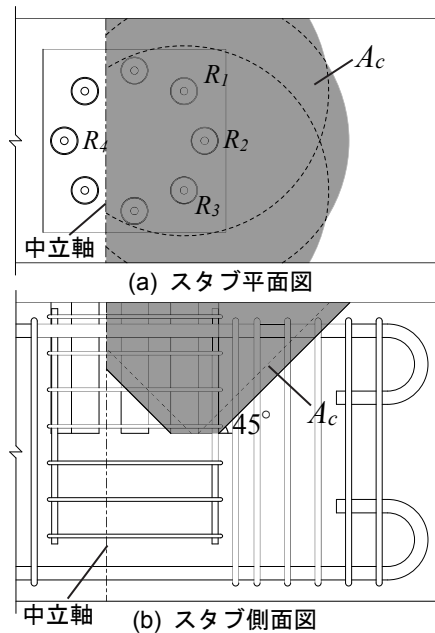


図-8 有効投影面積  $A_c$  の算定

表-3 コーン状破壊に至る引張力

試験体	$f'_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	$A_c$ (mm <sup>2</sup> )	$P_a$ (kN)	$expP_a$ (kN)	$expP_a$ / $P_a$
PCaRC-S	48.9	190013	411.8	301.3	0.73

して算定し、付着すべりの影響を考慮した断面解析手法<sup>3)</sup>により求めた中立軸(図-8中に一点鎖線で示す)までを有効投影面積  $A_c$  とした。計算結果を表-3に示す。ここで、コーン状破壊時の主筋引張力の実験値  $expP_a$  とは引張側最外縁を含む3本の主筋が負担している引張力の和であり、柱脚から高さ35mmの断面で計測した主筋  $R_2$ ,  $R_4$  のひずみの値を用いて、平面保持を仮定の下で線形補間し、主筋  $R_1$ ,  $R_3$  のひずみを算出することにより計算した。なお、主筋ひずみはひずみゲージが不調になる以前の部材角  $R=0.025rad$  でのデータを用いた。

表-3より、式(1)により求めた引張力  $P_a$  は、実験値を約27%過大評価する結果となった。これは、式(1)で想定するコーン状破壊時は鉄筋が単純引張力を負担する状況下での計算式であるのに対し、本実験で鉄筋が負担する引張力は、柱脚部の曲げ応力による引張力であり、すべての主筋に同じ引張力が作用する状況と異なり、荷重方向外縁部に近いほど大きな引張力が作用するため、計算より早期に損傷を生じたものと考えられる。そのため、コーン状破壊を防ぐためには、式(1)に安全率を乗じ、設計する必要がある、適切な安全率の決定には更なる実験結果の蓄積が望ましいと考えられる。

#### 4. まとめ

本研究では、SBPDN鉄筋を主筋に円環状に配置した直径が300mmの正方形断面RC柱の耐震性能に関して実験的検討を行い、以下の知見を得た。

- 1) SBPDN鉄筋を円環状に配置した正方形断面RC柱は、一体打ち柱もプレキャスト柱もコーン状破壊が発生しない範囲では、柱の残留変形が小さく抑えられ、大変形まで水平耐力が上昇し続け、顕著な drift-hardening 性能を有する。
- 2) プレキャスト試験体 PCaRC-L の曲げ耐力は一体打ち試験体 RC-L の曲げ耐力を最大で約12%上回り、一体打ちと同等以上の耐震性能を發揮した。また、定着長さの短い試験体において、プレキャスト試験体 PCaRC-S の曲げ耐力は一体打ち試験体 RC-S の曲げ耐力を最大で約5%上回っていたが、部材角  $R=0.035rad$  以降のサイクルでは、試験体 PCaRC-S はコーン状破壊により耐力が低下した。
- 3) 埋め込み深さ214.5mm(15d)の試験体 PCaRC-S は部材角  $R=0.035rad$  でコーン状破壊により耐力低下した。また、コーン状破壊に至る主筋引張力は、曲げ応力の影響により現行設計指針に示されている算定式では過大に評価される傾向にあるため、設計においては、安全率を乗じる必要がある。

#### 謝辞

本研究を進めるにあたり、神戸大学技術職員・金尾優氏の多大な協力を得た。本実験の試験体に使用したSBPDN鉄筋は高周波熱錬(株)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) 谷昌典, 孫玉平, 小山智幸, 小山田英弘: フライアッシュを外割混合したコンクリートを用いたRC柱部材の力学性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.2, pp.73-78, 2010
- 2) 仲井士門, 橋高将義, 谷昌典, 孫玉平: 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, 孫玉平, 竹内崇, 蔡高創: 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) 仲井士門, 孫玉平, 竹内崇, 藤永隆: スパイラル溝を有する超高強度鉄筋を用いたRC柱部材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.34, No.2, pp.163-168, 2012年7月
- 5) 蔡高創, 孫玉平, 竹内崇, 藤永隆: 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年7月
- 6) 日本建築学会: 各種合成構造設計指針・同解説, pp.36-37, 2010