

## 論文 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

孫 玉平\*<sup>1</sup>・竹内 崇\*<sup>2</sup>・奥田 隼也\*<sup>3</sup>・大畑 雄俊\*<sup>4</sup>

**要旨**：性能回復性の高い層降伏先行型コンクリート骨組み構造の開発研究の一環として、規格降伏強度  $1275\text{N/mm}^2$  の超高強度鉄筋を主筋に使用した正方形 RC 柱部材に対し、柱の反曲点付近における主筋のすべり止め方法と柱に対する拘束方法を実験変数に取り、一定軸力下における正負繰り返し水平力載荷実験を行った。その結果、異形鉄筋と丸鋼の中間的な付着性状を有する超高強度鉄筋の材料特性を生かしてコンクリート柱に高いレジリエンスを確保するための基本条件を明らかにした。また、著者らがこれまでに提案してきた鉄筋の付着すべりの影響を考慮した解析手法のレジリエントな柱の履歴性状解析への適応性を検証した。

**キーワード**：レジリエンス, 超高強度鉄筋, コンクリート柱, 残留変形, 付着すべり

## 1. はじめに

21世紀に入って以来、人類社会はこれまでの耐震設計基準において想定されていなかった、再現周期1000年を超えるレベルの所謂「想定外」の巨大地震に幾度襲われた。日本においても「南海トラフ巨大地震」の発生が想定されているなか、想定外の巨大地震による建築物の巨大被害を最低限に抑える施策の策定と執行が焦眉の急を要する課題となる。

現行の耐震設計は、再現周期が約475年の極めて稀な巨大地震に対して、人命保護を最優先に考え、建物は倒壊に至らなければ、部材のある程度の損傷あるいは塑性化を許容するものである。しかしながら、構造部材が損傷または塑性化することで地震エネルギーを吸収するということは、地震後の部材ないし構造局部または全体の残留変形が大きくなり、地震後の使用性及び修復性に支障を来し、地域社会の早期復旧と復興を妨げる恐れがある。このようなことは想定外の巨大地震を受ける際に、より顕著に現れることが容易に想定できる。したがって、想定外の巨大地震に備えるためには、建築物は従前の粘り強さに加え、地震後の使用性や修復性に優れたレジリエンス（復元性）を併せ持つ必要がある。

鉄筋コンクリート構造（以下RC造と称す）のレジリエンス性を高めることは巨大地震を経験した後の部材における残留変形および残留ひび割れ幅をできるだけ小さく抑えることに帰結できる。2000年以後、RC造構造物のレジリエンス性を高めるための工法に関する研究が行われ始めた。これまでに提案された各種工法はRC造部材にプレストレスを加える圧着接合方法と鉄筋のアンボンド化を図る方法の二つに分類できる。前者に関しては中塚らや西山らの研究が、後者に関しては江崎らの研究が挙げ

られる<sup>1-3)</sup>。

著者らは表面にスパイラル溝を有し、規格降伏強度が  $1275\text{N/mm}^2$  に達する超高強度鉄筋SBPDN1275/1420の滑り易さに着目して、それをRC部材の主筋に使用することを考案し、特別な技術または特殊な処理を施さず、主筋の降伏をできるだけ遅らせることによって、レジリエンスの高いRC造部材の開発研究を行ってきた<sup>4-6)</sup>。これまでの研究は、全体降伏機構を形成する骨組み構造の下層柱の履歴性状の究明を目的に、主に片持ち柱を対象とした実験を行った。その結果、SBPDN鉄筋の端部に機械式定着を施せば、それを主筋に用いたRC柱は部材角が $0.04\text{rad}$  となる大変形まで水平抵抗力が低下することなく非常に安定的な履歴挙動を示すことと、部材角が $0.02\text{rad}$  までの変形から除荷後の残留部材角が経験部材角の約10分の1程度に抑えられることなどが明らかになった。また、SBPDN鉄筋を主筋に用いたRC造部材の実用化に必要な不可欠な、主筋の付着滑りの影響を考慮できる部材の履歴性状の解析手法を提案し、実験結果との比較によって提案手法の妥当性を検証した<sup>7)</sup>。

一方、床スラブの影響などで全体降伏機構の完全実現は非常に困難であるので、十分な粘りとレジリエンスを有する柱で構成される骨組みには層降伏機構を許容してもよいと思われるが、層降伏機構骨組みの柱部材へのSBPDN鉄筋の適用性と効果を検証した研究は皆無である。そこで、本研究は超高強度SBPDN鉄筋の双曲率変形状態下にあるRC造柱への適用性と問題点を検証するため、4体のRC柱について一定軸力下における繰り返し載荷実験を行い、片持ち柱と同等なレジリエンスを確保するための基本条件を探ることを目的とする。また、著者らが文献7で片持ち柱を対象に提案した、主筋の付着滑

\*1 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 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）

\*3 大和ハウス工業（株）（元 神戸大学大学院工学研究科建築学専攻 大学院生）

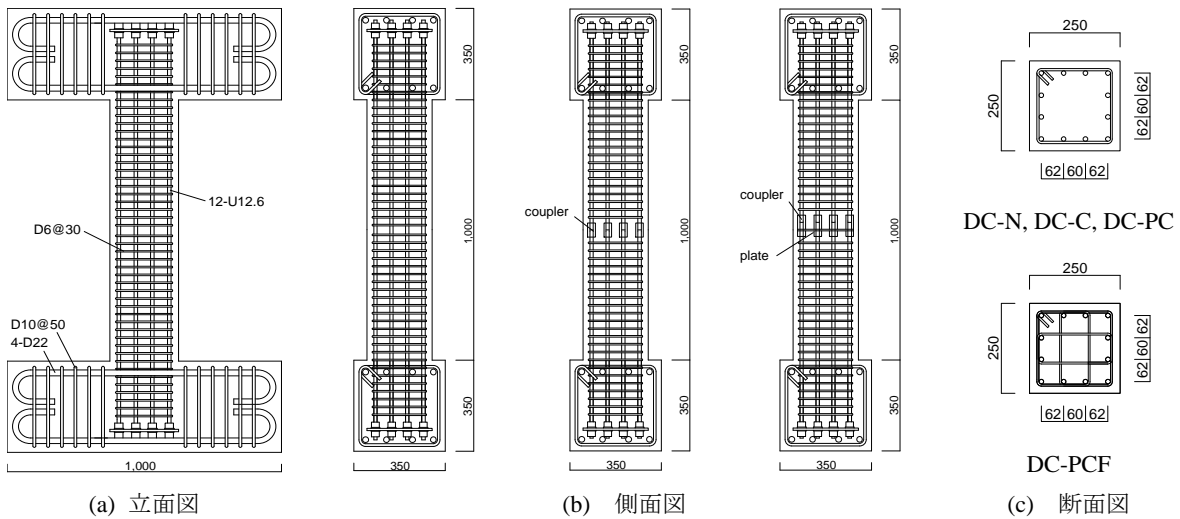
\*4 神戸大学大学院工学研究科建築学専攻 大学院生

表一 試験体一覧および主な実験結果

Specimen notations	$a/D$	$f_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	Longitudinal rebar connecter	Hoop		$n$	$P$ (kN)	$Q_{exp}$ (kN)	$R_{exp}$ (×0.01rad.)
				Type	$p_w$ (%)				
DC-N	2.0	42.3	null	Single D6@30	0.85	0.33	872	192.0	0.74
DC-C		41.5	coupler				856	228.0	1.43
DC-PC		40.9	coupler + plate	Multi-type RB5.0@40	0.80		844	232.7	1.96
DC-PCF		42.5					877	294.6	3.51

注)  $f_c$ : コンクリート強度,  $P$ : 軸力,  $n$ : 軸力比,  $p_w$ : 帯筋比

$Q_{exp}$ : 最大水平力実験値 (正負側の平均値),  $R_{exp}$ :  $Q_{exp}$  時部材角 (正負側の平均値)



図一 試験体の配筋詳細

表二 鉄筋の力学特性一覧

Steel type	$f_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\epsilon_y$ (%)	$f_u$ (N/mm <sup>2</sup> )	$E_s$ (kN/mm <sup>2</sup> )
U12.6	1390	0.86	1486	210
D6	328	0.37	526	192
RB5.0	1452	0.90	1535	209

注)  $f_y$ ,  $\epsilon_y$ : 0.2% オフセット降伏点応力及びひずみ,  $f_u$ : 引張強さ,  $E_s$ : 弾性係数

りの影響を考慮できる解析手法が双曲率変形状態下にあるRC柱材の履歴挙動の評価へ適用できるかどうかについての検討を行う。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体概要

本研究で製作した試験体の一覧を表一に、試験体の寸法及び配筋詳細を図一にそれぞれ示す。試験体は、高層建築物の下層階柱を模擬した1/3縮小モデルとなる、幅250mmの正方形断面柱である。

柱の主筋には規格降伏強度1275N/mm<sup>2</sup>の超高強度鉄筋(SBPDN1275/1420)を使用し、公称直径12.6mm(呼

び名U12.6)の鉄筋12本を断面周辺に沿って均等配置した。主筋比は約2.4%である。主筋端部にはねじ切りを施し、ナットと鉄板を用いて機械式定着とした。SBPDN鉄筋は丸鋼にスパイラル溝加工された異形鉄筋で、通常の異形鉄筋に比べて表面の凹凸が小さく、丸鋼と異形鉄筋の中間的な付着性能を有するのが特徴である。

コンクリートには設計基準強度 $F_c=40\text{N/mm}^2$ 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、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一に示す。

著者らの片持ち柱に関する研究成果から、双曲率変形状態下にある柱のレジリエンスは柱の反曲点近傍におけるSBPDN鉄筋のすべり止めに強く依存することが推測される。そこで、本実験では、主筋の柱の反曲点近傍におけるすべり止め方法を実験変数に取った。図一に示すように、プロトタイプ試験体DC-N以外の3体の試験体ではすべての主筋が柱中央部でカプラによって接着されている。また、反曲点付近での主筋のすべりをより有効に止める方法として、江崎らの研究<sup>3)</sup>を参考にして試験体DC-PCとDC-PCFに厚さ6mm、幅30mmの帯板(SS400)を設けた。さらに、反曲点近傍で上下鉄筋の

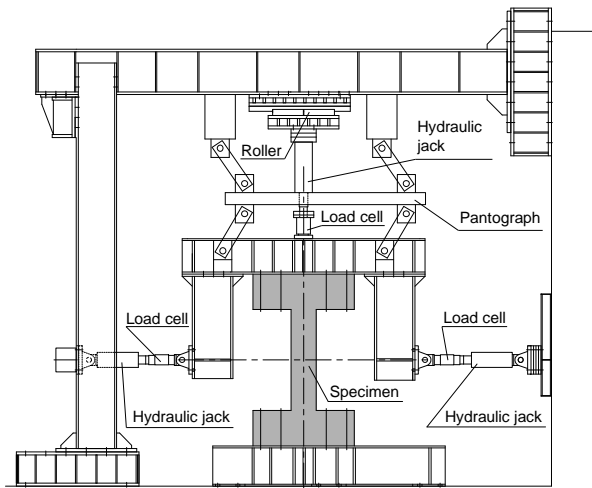


図-2 載荷装置概要

合力がカブラに集約され、それによって周辺かぶりコンクリートに割裂ひび割れが引き起こされることとその割裂ひび割れが材長に沿って進展していくことを防ぐために、試験体 DC-PCF は全長にわたってカーボンファイバシート (CFS) を二層巻きした。使用した CFS は厚みが 0.11mm, 引張強さが 3400N/mm<sup>2</sup> である。

4 体の試験体のうち、3 体はせん断補強筋として異形鉄筋 D6 (SD295A) を 30mm 間隔で配筋したのに対して、試験体 DC-PCF には複合配置形式を有する超高強度鉄筋 RB5.0 を 40mm 間隔で配筋した。表-2 には使用した鉄筋の力学特性を示す。

## 2.2 加力および測定方法

図-2 に載荷装置を示す。1000kN 油圧ジャッキで所定の軸力を与えてから、押し引き能力がそれぞれ 500kN と 300kN の油圧ジャッキ二台を駆使して正負交番繰り返し水平力を作用させた。載荷は柱の部材角  $R$  により制御し、

載荷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載荷と部材角 0.025, 0.03, 0.035, 0.04 と 0.05rad. の変位レベルでの 1 回ずつの正負交番載荷である。

主筋及びせん断補強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、材軸方向に沿って 7 箇所、一箇所に正負フランジ側に 1 枚ずつ、計 14 枚のひずみゲージを貼付した。せん断補強筋については、材軸方向に沿って 6 箇所に計 12 枚のゲージを貼付した。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 損傷状況と実験経過

カーボンファイバシートを巻きつけた試験体 DC-PCF 以外の試験体の主な部材角振幅での損傷進展状況を図-3 に示す。図中のグリッドの間隔が 50mm である。図-3 より分かるように、いずれの試験体においても、 $R=0.005\text{rad.}$  の載荷時に材端部 1.0D の範囲内で曲げひび割れが確認された。 $R=0.01\text{rad.}$  までほぼ同じ損傷状態であったが、部材角が 0.01rad. を超えてから、カブラの有無によって異なる損傷状況が見られた。

反曲点近傍でカブラなしの試験体 DC-N は、部材角の増加に伴って、かぶりコンクリートの剥離が顕著になっていくが、曲げひび割れとせん断ひび割れがともに上下材端部約 1.0D の範囲内に集中しており、主筋に沿う割裂ひび割れは見られなかった。それに対して、柱中央部でカブラにより主筋を接着した試験体 DC-C は、部材角が 0.01rad. を超えた時点から、カブラの上端部から割裂ひび割れが現れ始め、柱変形の増大に伴って割裂ひび割れが進展しつつ、材端部の隅へと斜めせん断ひび割れを誘発し、部材角が 0.02rad. になった際にせん断ひび割れと割

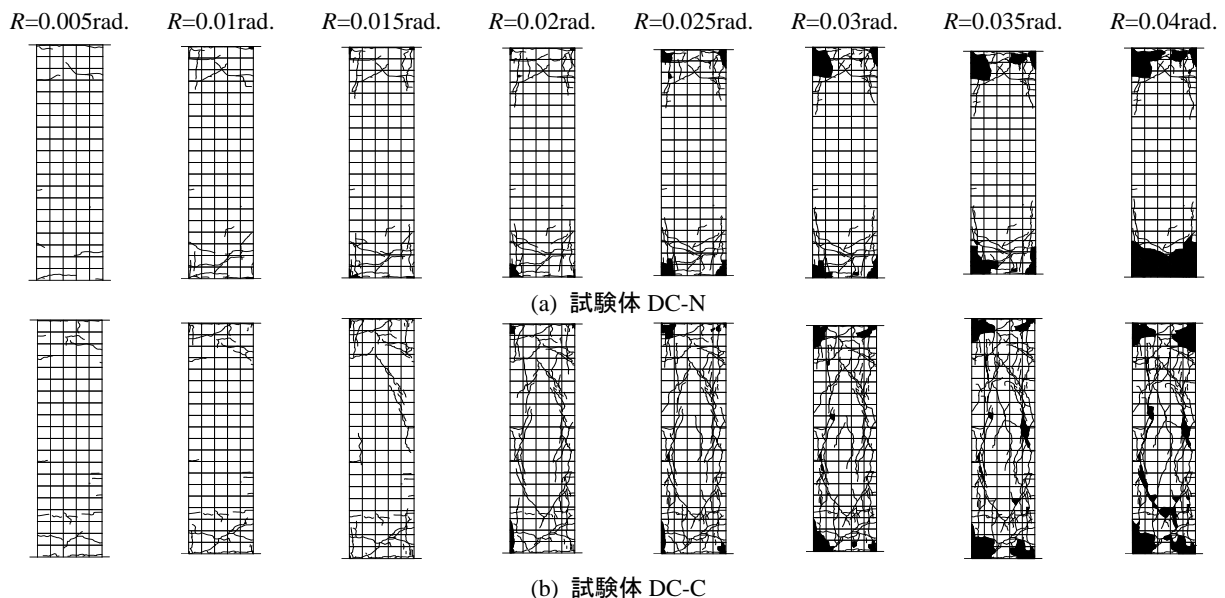
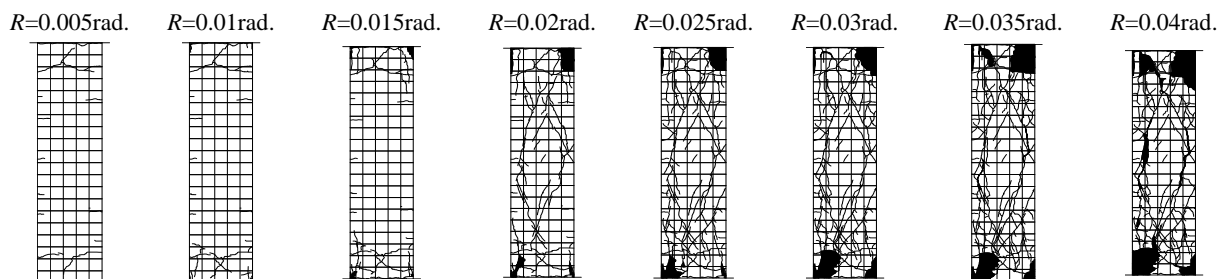


図-3 試験体の損傷状況進展図



(c) 試験体 DC-PC

図-3 つづき

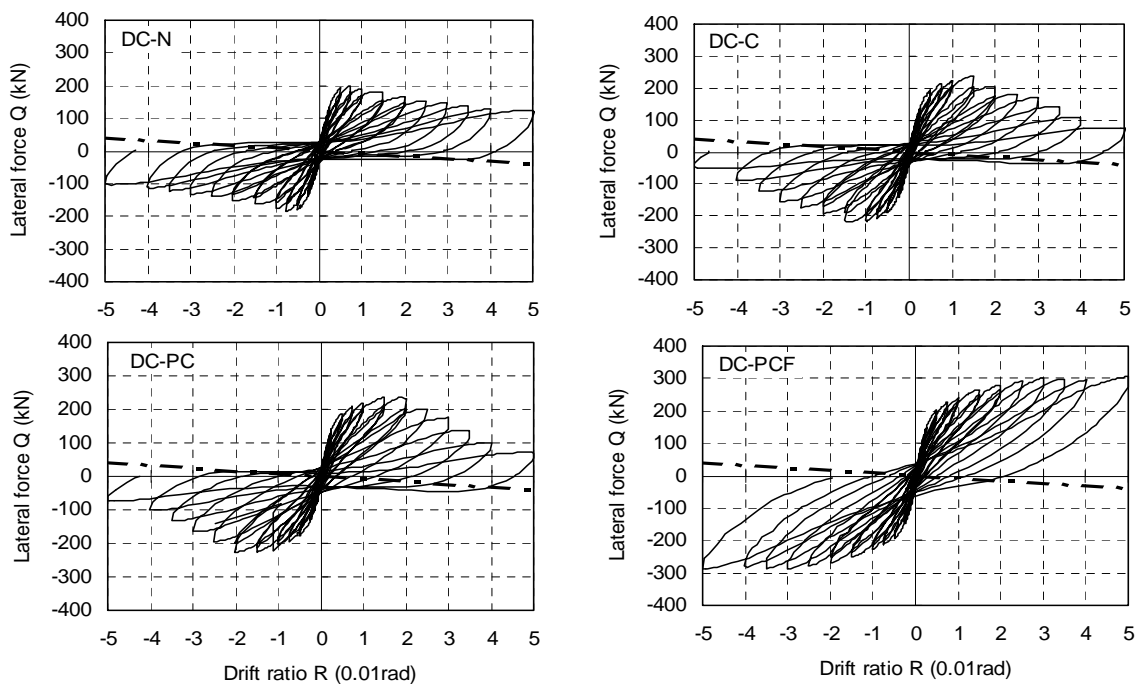


図-4 水平力—部材角関係の実験結果

裂ひび割れが顕著に形成された。一方、カブラと帯板を併用した試験体 DC-PC は、帯板によって主筋の反曲点近傍でのすべりはある程度止められたものの、部材角 0.02rad.以後、カブラ端部周辺から生じ始めた割裂ひび割れの拡大と進展が有効に止められておらず、厚さが 6mm の帯板が折り曲げられ、試験体は最終的に帯板なしの試験体 DC-C と同様の損傷を受けた。

以上に述べた損傷状況から、SBPDN 鉄筋の滑り止めとしてのカブラと帯板の効果を生かすためには、帯板の厚さを増すと同時にカブラ周辺に生じる割裂ひび割れの進展拡大を防ぐ手立てを講じる必要があることが分かる。

### 3.2 水平力—部材角関係

図-4 に実験で得られた各試験体の水平力—部材角関係を示す。図中の一点鎖線は軸力による  $P-\Delta$  効果の影響分を示す。図より明らかなように、カブラなしの試験体 DC-N は部材角 0.0075rad.前後で最大耐力に達してから鉄筋の付着すべりが進むにつれて、水平力が徐々に低下し始めた。部材角が 0.02rad.では水平抵抗力がすでに最大

耐力の 8 割以下に低下していた。カブラを用いた試験体 DC-C と DC-PC では、カブラおよび帯板の滑り止め効果が現れ、最大水平耐力は共に上昇しつつ、耐力時部材角もそれぞれ 0.015rad.と 0.02rad.と大きくなった。しかしながら、カブラ端部から発生した割裂ひび割れとそれに起因するせん断ひび割れの拡大進展を止める方法を施さなかったため、ピーク点後の耐力低下は試験体 DC-N のそれよりも著しかった。一方、試験体 DC-PCF では CFS の拘束効果が顕著に現れ、部材角 0.03rad.まで水平抵抗力が変形の増大に従い増え続け、残留変形も小さく抑えられ、安定した履歴特性と高いレジリエンスを示した。

図-5 と図-6 はそれぞれ各試験体の残留部材角と等価粘性減衰定数の実験結果を示す。これらの図より分かるように、主筋をカブラと 6mm の帯板で接着するのみでは、双曲率状態下にある RC 柱に十分なレジリエンスを確保することができないが、柱のかぶりコンクリートまで拘束するような方法を併用すれば、 $R=0.02rad.$ までの載荷から除荷後の残留部材角を経験部材角の 1/10 程度

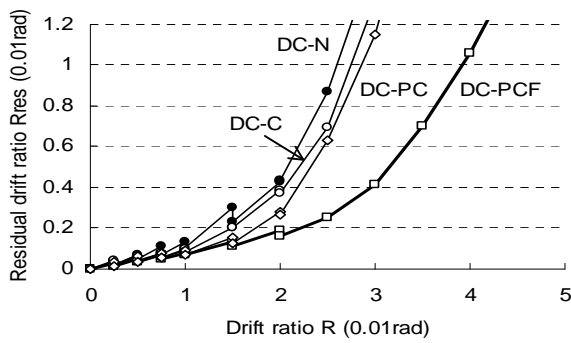


図-5 残留部材角の実験結果

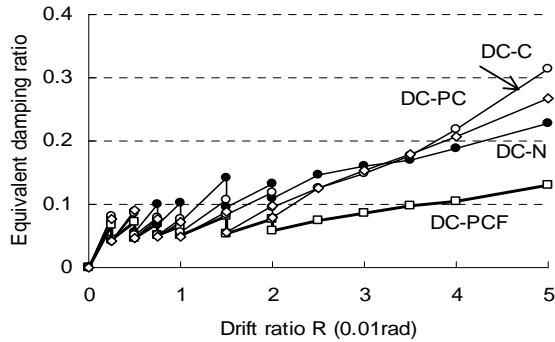


図-6 等価粘性減衰定数の実験結果

に抑えることができると同時に、等価粘性減衰定数を  $R=0.03\text{rad}$  まで  $0.05\sim 0.07$  の間ではほぼ一定値に保つことができ、柱は高いレジリエンスを保有できる。

### 3.3 主筋のひずみ

カブラと帯板の主筋のすべり止め効果を検証するために、各試験体の主筋ひずみの実験結果を図-7に示す。なお、図中に示すひずみは柱脚から 25mm 離れた箇所での初期引張側にある主筋のひずみである。

試験体 DC-N では  $R=0.005\text{rad}$  まで主筋のひずみが他の試験体とほぼ同じ勾配で部材角の増加に伴って増えていたが、 $0.005\text{rad}$  以後、主筋がすべり始め、ひずみの増加率が非常に小さくなり、測定した最大値は  $0.1\%$  に留まった。それに対して、試験体 DC-C と DC-PC ではカブラおよび帯板の滑り止め効果によって主筋の引張ひずみが部材角  $0.015\text{rad}$  と  $0.02\text{rad}$  になるまで増え続けた。さらに、CFS によってカブラ端部に生じた割裂ひび割れを有効に止められ、せん断耐力が向上された試験体 DC-PCF では、部材角が  $0.03\text{rad}$  まで引張ひずみが上昇し続けた。図-4 と図-7 をあわせて見ると、試験体主筋の引張ひずみの挙動は履歴挙動とほぼ対応している。このことは、変形の増大に伴う SBPDN 鉄筋の引張ひずみの上昇を維持させることが双曲率状態下にある RC 柱に高いレジリエンスをもたらすための基本条件であることを示唆している。

## 4. 柱の履歴挙動の解析的検討

本研究で開発しようとするレジリエントな RC 柱の履

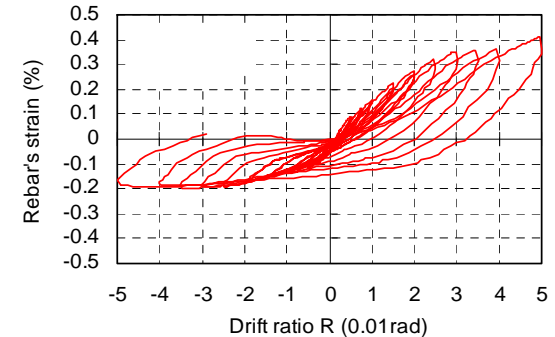
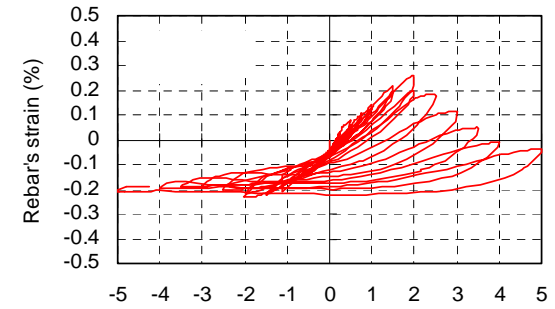
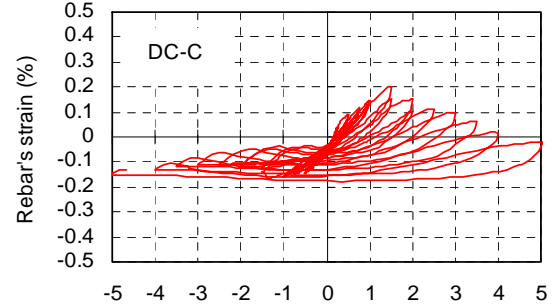
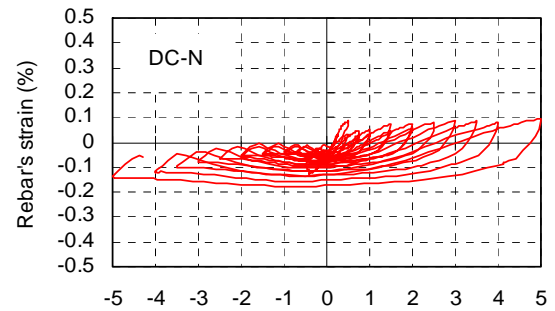


図-7 主筋ひずみの実験結果

履歴挙動を解析するために、船戸らが文献7で提案した、片持ち柱を対象とする、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通じて、その方法の適応性を検討することにする。ページ制限のため、解析方法の詳細については文献7を参照されたい。

図-8には試験体 DC-N と DC-PCF の水平力-部材角関係と引張鉄筋のひずみ挙動に関する実験結果と解析結果との比較を示す。図中の赤い実線と黒い実線はそれぞれ実験結果と解析結果を表す。なお、試験体 DC-PCF の解析結果は柱反曲点での鉄筋のすべりをゼロと仮定して得られたものである。図より分かるように、船戸らの手法による解析結果は Q-R 関係の実験結果を精度よく評価できる。試験体 DC-PCF における鉄筋の引張ひずみについ

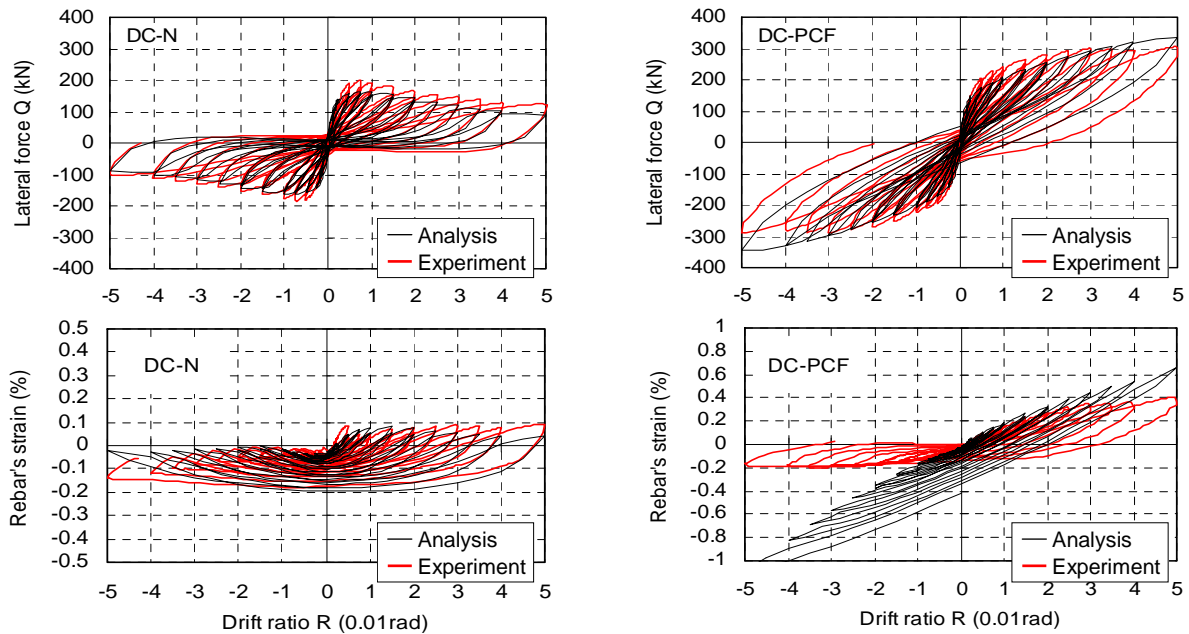


図-8 実験結果と解析結果との比較例

では、部材角0.03radまでは解析結果と実験結果の間に良好な一致が見られたが、以後、薄い帯板が折り曲げられ、すべり止め効果が限界に達したため、計測した引張ひずみの上昇度合いは解析結果より緩やかになった。反曲点近傍での鉄筋の付着すべり止めに関する境界条件を実状に適合するものに設定すれば、解析結果と実験結果とのさらなる一致が期待できると思われる。また、圧縮ひずみが実験結果と一致しなかったのはゲージの貼りかたの精密性にやや欠けたことに起因するものと思われ、これらを今後の課題としたい。

## 5. 結論

SBPND超高強度鉄筋を用いた、双曲率変形状態下にある正方形断面RC柱の履歴性状に関する実験および解析検討を行った結果、以下の知見が得られた。

- 1) 層降伏先行型骨組のRC柱に高いレジリエンス（性能復元性）をもたらすにはSBPND鉄筋を主筋に用いる方法が有効である。
- 2) 層降伏先行型骨組のRC柱は高いレジリエンスを保つための基本条件は、柱反曲点近傍において主筋にカブラと帯板によるすべり止め策を講じることと、かぶりコンクリートの剥離を防ぐことの二点に集約できる。
- 3) 船戸らによる解析手法は双曲率状態下にあるRC柱の履歴挙動を精度よく評価できる。すべり止め効果が十分に得られれば、レジリエントな柱における鉄筋のひずみ挙動の追跡も期待できる。

## 謝辞

本研究の実験にあたっては、神戸大学技術職員・金

尾優氏の多大な協力を得た。また、本実験に用いたSBPND鉄筋は高周波熱錬株式会社よりご提供頂き、超高強度せん断補強筋はJFEテクノワイヤ株式会社よりご提供頂いた。記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 中塚 佑, 他: 丸形PC鋼棒圧着型方持ちPC梁の荷重-変形関係のマクロモデルによる推定, 日本建築学会構造系論文集, No.555, pp.141-148, 2002.5
- 2) 西山峰広, 他: アンボンド圧着接合柱の力学性状に関する研究, 日本建築学会学術講演梗概集, C-2, pp. 1015-1018, 2003.8
- 3) 江崎文也, 他: 高強度アンボンド主筋を用いたRC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, 2004.7
- 4) 谷昌典, 他: 高復元性を有する高強度RC柱部材に関する実験研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.2, pp.565-570, 2009.7
- 5) 橘高将義, 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
- 6) 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
- 7) 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