

# 論文 レジリエントな円形 RC 柱の耐震性能に関する研究

Sargsyan Grigor\*1・竹内 崇\*2・田中 祐太郎\*3・孫 玉平\*4

**要旨**：付着強度の低い超高強度鉄筋を主筋に用いると共に幅厚比 150 程度の薄肉鋼板を用いて鋼板拘束を施したスレンダーな円形断面 RC 柱の耐震性能を明らかにするために、せん断スパン比と軸力比を実験変数に、片持ち柱形式の試験体の一定軸力下における繰り返し載荷実験を実施した結果、薄肉鋼板で局部拘束された本試験体は軸力比 0.45 あるいはせん断スパン比 4 においても、部材角  $R=0.05\text{rad}$  まで原点指向性の履歴性状を示すと共に、耐力が上昇し続け、優れたレジリエンスと高い 2 次剛性を有することを明らかにした。また柱の残留部材角は、部材角  $R=0.04\text{rad}$  においても、経験部材角の 15% 程度以下に抑えられることを示した。

**キーワード**：レジリエンス、円形断面柱、付着すべり、鋼板横拘束、残留変形

## 1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震や2011年の東北地方太平洋沖地震において、残留変形の大きかっ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、正方形断面の鉄筋コンクリート柱の主筋に、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(SBPDN1275/1420、以下SBPDN鉄筋)を用いることで、変形能を確保しつつ残留変形を抑制でき、優れたレジリエンスをもたらすことを報告している<sup>1)</sup>。これは付着強度の低い鉄筋を用いれば、主筋周りのコンクリートをあまり損傷させずに適度に付着すべりを起こすことで、柱脚付近へのひずみ集中を防ぎ、早期の主筋降伏を回避するためである。

また、円形断面RC柱は、横拘束材によるコンクリートの拘束効果が大きく、効果的に靱性を高めることが可能である。蔡らは、SBPDN鉄筋を主筋に用いたせん断スパン比2あるいは3の円形断面RC柱の耐震性能を実験により調べ、このような柱は、残留変形を抑えるだけでなく、大変形域まで耐力が継続的に上昇し続ける傾向を示すことを明らかにした<sup>2)</sup>。さらに、蔡らは柱に幅厚比80程度の薄肉鋼板による鋼板拘束を施すことで、耐力の上昇度を高め、より優れたレジリエンスを示すことを報告している<sup>3)</sup>。一方、高層建築物の最下階の柱は、曲げモーメントの反曲点が柱頭寄りにシフトするため、せん断スパン比がより大きくなることが想定される。このようなよりスレンダーなRC柱の大変形域における2次剛性は、P- $\Delta$ モーメントの影響を大きく受けるが、それに関する研究は乏しいのが現状である。

そこで、本研究では SBPDN 鉄筋を主筋に用いたスレンダーな鋼板拘束円形断面 RC 柱の耐震性能を明らかにすることを目的として、せん断スパン比 3 および 4 の幅厚比 150 程度の薄肉鋼板で拘束された片持ち柱試験体の耐震性能を実験的に調べた。

## 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。試験体は高層建築物の下層階の柱を模擬した 1/3 縮小モデルで、直径 250mm の円形断面を有する片持ち柱である。

コンクリートには調合強度  $40\text{N/mm}^2$  のレディーミ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。

文献 5 と 6 の試験体と同じく、柱の主筋には、SBPDN 鉄筋を用いた。公称直径 12.6mm (呼び U12.6) のものを断面縁から 30mm の位置に均等に 8 本配置した。主筋比は約 2.0% である。本鉄筋は、丸鋼にスパイラル溝を加工した異形鉄筋で、通常の異形鉄筋と丸鋼の中間的な付着性状を有する。コンクリート強度が  $40\text{N/mm}^2$  前後の場合は、本鉄筋の付着強度は約  $3.0\text{N/mm}^2$  である<sup>4)</sup>。付着強度が低く、主筋すべりを生じやすいため、主筋の上下端部に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た。

柱脚から 1.5D (D は柱せい) の区間に鋼板拘束を施した。鋼板拘束は、厚さ 1.6mm の薄肉鋼板を折り曲げ加工し、2 枚を高力ボルトで接合することで施し、型枠として予め配置した。鋼板に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に、鋼板と加力スタブの間には

\*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 助教 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 大学院生

\*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	$a/D$	$f_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	$P$ (kN)	$n$	主筋	拘束鋼板			$Q_{exp}$ (kN)	$R_{exp}$ ( $\times 10^{-2}$ rad.)
						板厚(mm)	$D/t$	$f_{yh}$ (N/mm <sup>2</sup> )		
RS30N33T	3	43.2	699	0.33	8-U12.6	1.6	158	273	134	4.99
RS30N45T		43.1	953	0.45					131	4.98
RS40N10T	4	42.5	209	0.10					86	5.00
RS40N33T		43.2	700	0.33					83*	3.75*

ここに、 $a/D$ :せん断スパン比、 $a$ :せん断スパン、 $f_c$ :コンクリートシリンダー強度、 $P$ :軸力、 $n$ :軸力比( $=P/0.25\pi D^2 f_c$ )、 $D/t$ :幅厚比、 $f_{yh}$ :拘束鋼板の降伏強度、 $Q_{exp}$ :最大水平力実験値(正負平均)、 $R_{exp}$ : $Q_{exp}$ 時部材角(正負平均)、\*: 載荷装置の不具合の影響を受けずに計測できた最大部材角

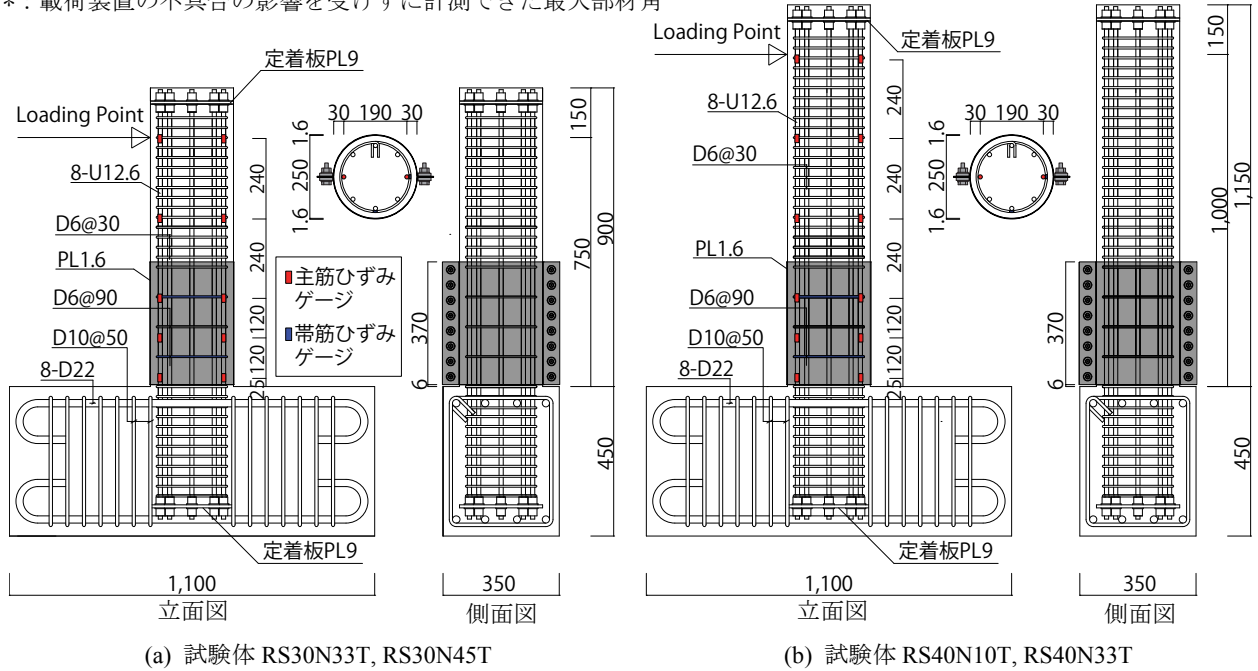


図-1 試験体の配筋詳細

表-2 鋼材の材料特性

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	1377	0.84	1463	215
D6	SD295A	394	0.21	522	197
PL1.6*	SS400	273	0.32	405	201

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

6mm程度の隙間を設けている。鋼板拘束区間においては、組み立て筋としてD6のシングルフープを90mm間隔で配置し、それ以外の領域では帯筋として同フープを30mm間隔で配置した。表-2に使用した鉄筋の力学特性を示す。実験変数はせん断スパン比 $a/D$ と軸力比であり、せん断スパン比3の試験体は高軸力下での性状を調べるために、軸力比0.33と0.45の下で実験を行い、せん断スパン比4の試験体は低軸力下での性状についても調べるため軸力比0.10と0.33の下で実験を行った。

## 2.2 加力及び測定方法

図-2に載荷装置の概要を示す。1000kN油圧ジャッキ

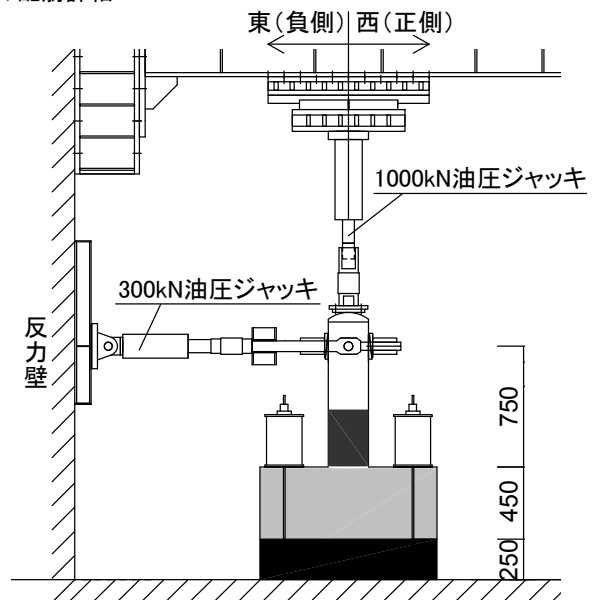


図-2 載荷装置概要 ( $a/D=3$ )

で所定の軸力を与えてから、300kN油圧ジャッキで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 $R$ により制御した。部材角 $R$ は、載荷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。ただし、試験体 RS30N33T は荷重装置の設定の誤りにより、始めの 8 サイクルを部材角 0.0033, 0.0067, 0.01, 0.013rad. で 2 回ずつ実施し、その後予定通りの荷重を行った。

主筋および帯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 5 箇所あるいは 6 箇所の位置に、柱断面図で赤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。帯筋については、材軸方向に沿って 2 箇所（柱脚からそれぞれ 90mm, 270mm）に計 4 枚のゲージを貼付した。また、拘束鋼板の東西面（柱のフランジ側に相当）中央の、柱脚から 16mm, 191mm, 366mm の 3 箇所にひずみゲージを貼付した。最も柱脚に近い箇所では、2 軸のひずみゲージを貼付し、鋼板の周方向ひずみの計測と共に鋼板に軸方向の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

所定の荷重においては、いずれの試験体も大きな損傷は確認されず、耐力が伸び続ける傾向を示した。ただし、試験体 RS40N33T は、部材角  $R=0.04\text{rad.}$  のサイクルにおいて荷重装置に不具合が生じたため、それまでの計測結果を以後示す。他の試験体については、所定の荷重プログラム終了後に、最大耐力を確認するための追加荷重を行い、試験体 RS30N33T, RS30N45T は、それぞれ部材角  $R=0.08\text{rad.}$  と  $0.06\text{rad.}$  で耐力低下し始めたが、試験体

RS40N10T は水平加力ジャッキのストロークの上限であった部材角  $R=0.09\text{rad.}$  まで変形させても耐力低下しなかった。

図-3 に荷重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示す。いずれの試験体においても曲げひび割れ、圧縮縦ひび割れが見られたが、かぶりコンクリートの大きな剥落やせん断ひび割れや割裂ひび割れの発生は見られず、薄肉鋼板による拘束効果が十分得られたものと考えられる。曲げひび割れは、せん断スパン比 3 の試験体においては、柱脚部から約 375mm までの範囲で発生した。せん断スパン比 4 の試験体においては、柱脚部から約 500mm までの範囲で発生し、鋼管拘束範囲外にも見られた。しかしながら、いずれの試験体においても曲げひび割れ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ことが伺える。

#### 3.2 繰返し履歴性状

図-4 に所定の荷重で得られた各試験体の水平力一部材角関係を示す。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、原点指向性の履歴性状を示している。また、軸力比が 0.45 と高くても、あるいはせん断スパン比 4 と P- $\Delta$ モーメントの影響を大きく受けても水平耐力が上昇し続け、高い 2 次剛性を有することが分かる。既往の研究<sup>9)</sup>において、軸力比 0.5 で帯筋拘束のせん断スパン比 3 の試験体が部材角  $R=0.015\text{rad.}$  程度で最大耐力を示したのに対して、薄肉鋼板拘束とした本試験体 RS30N45T は水平耐力が上昇し続けており、薄肉鋼板による拘束効果が得られたことが分かる。図-5 に各試験体の柱脚曲げモーメント一部材角関係の包絡線の比較を示す。軸力比が共に 0.33 でせん断スパン比のみ異なる試験体 RS30N33T と RS40N33T の包絡線を比べると、試験体 RS30N33T の方が少し高い曲げ耐力値を示していることが分かる。これ

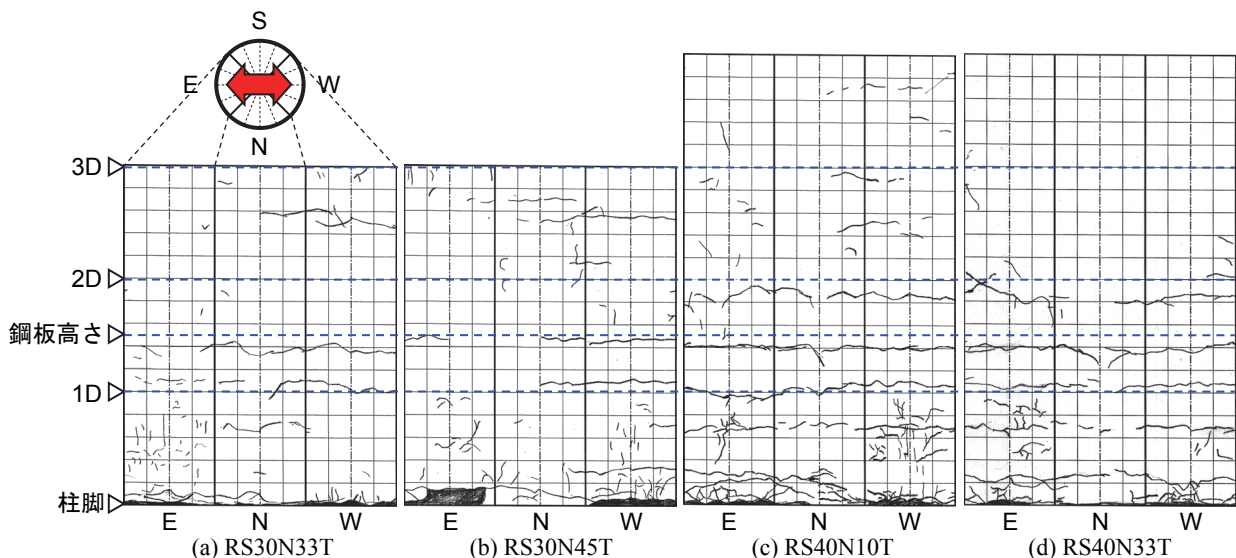


図-3 荷重終了後の損傷状況

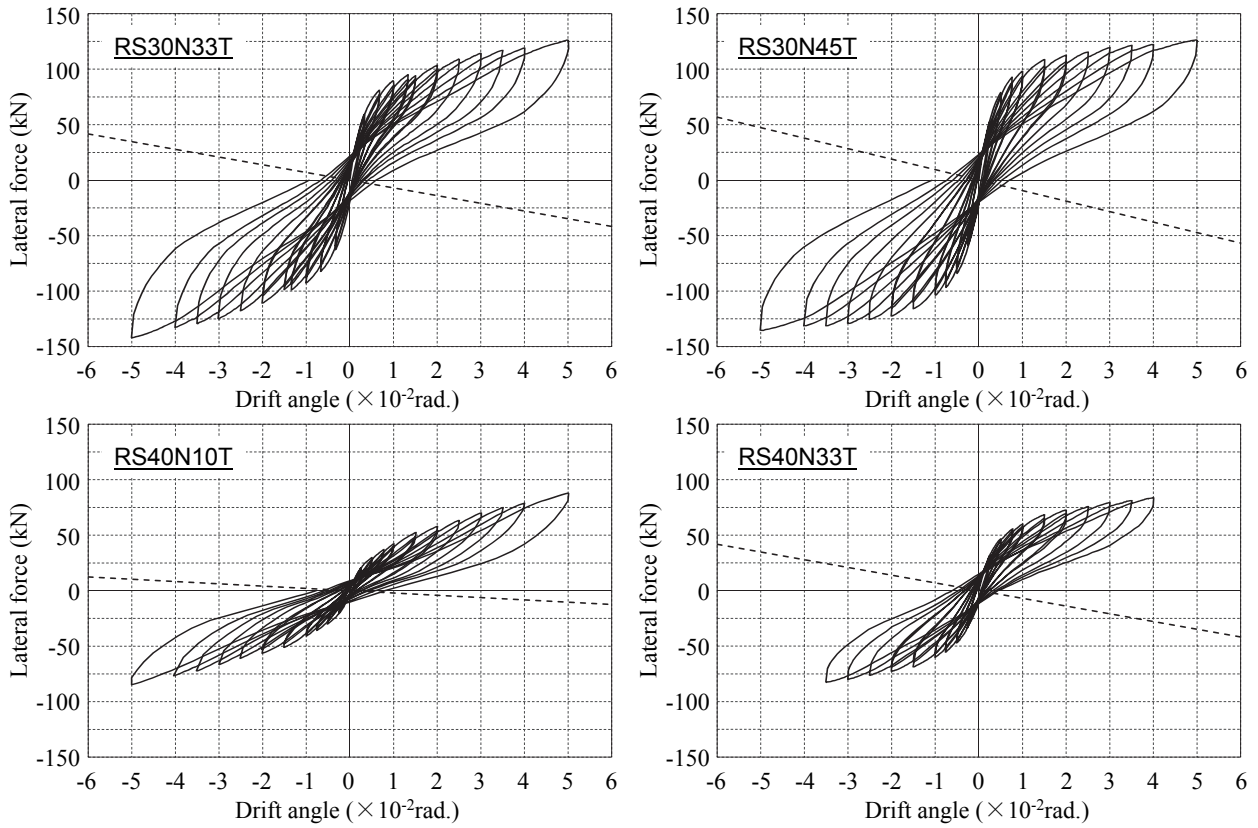


図-4 水平力一部材角関係の実験結果

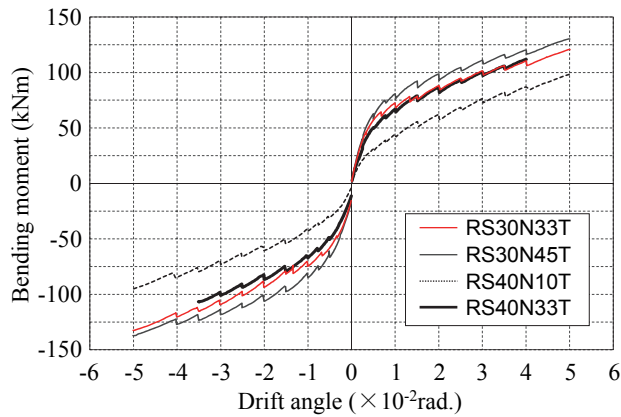


図-5 柱脚曲げモーメント一部材角関係の包絡線の比較

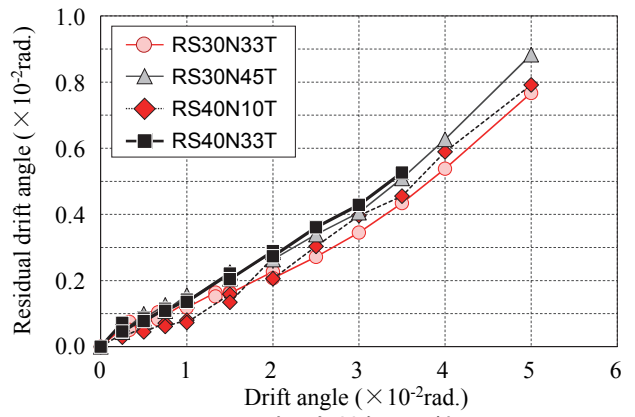


図-6 残留部材角の比較

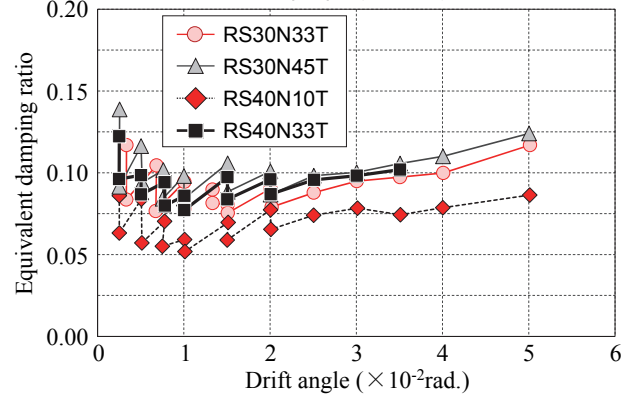


図-7 等価粘性減衰定数の比較

は、後述するように、せん断スパンが異なることで、ヒンジ領域から柱頭側主筋定着部までの主筋の定着長さに差が生じ、定着長さの短い試験体 RS30N33T の主筋の方がより早く主筋端部の定着板まですべり切ること、主筋のひずみ増分が大きくなり、耐力がやや高く出たものと思われる。また、軸力比が異なる試験体を比べてみると、軸力比が高い試験体の方が曲げ耐力が高くなっていることが分かる。これは、軸力比が高いほど鋼板で拘束されたコンクリートの負担する曲げ抵抗力が大きくなったためと思われる。

図-6 に各試験体の残留部材角( $R_{res}$ )の実験結果を示す。いずれの試験体でも残留部材角は低く抑えられ、部材角  $R=0.04\text{rad}$  においても、経験部材角の 15%程度以下にな

っている。また実験変数の影響に関して比較すると、せん断スパン比が大きく、軸力比が高い方が、残留部材角が大きくなる傾向が見られる。図-7 に次式により求め

た各試験体の等価粘性減衰定数( $h_{eq}$ )の実験結果を示す。

$$h_{eq} = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{\Delta W}{W_e} \quad (1)$$

ここで、 $\Delta W$ ：各サイクルの面積、 $W_e$ ：等価ポテンシャルエネルギー（各サイクルの正負平均）

等価粘性減衰定数においても軸力比が高い方が、やや大きめの値を示す傾向が見られる。また、部材角に伴う等価粘性減衰定数の変化量は小さく、部材角  $R=0.04\text{rad}$  までほぼ一定の値を示している。このことは柱が部材角  $R=0.04\text{rad}$  まで非線形弾性的な挙動を示すことを示唆している。

### 3.3 主筋ひずみ

図-8 に各試験体の主筋ひずみの履歴を示す。各グラフは、柱脚から高さ 25mm の位置での東側と西側に位置する主筋のひずみと部材角の関係を示している。主筋の

降伏ひずみは 0.84% であるのに対して、実験で計測した主筋ひずみは最大で 0.6% 程度であり、いずれの主筋も降伏していない。しかしながら、部材角の増加に伴い、主筋ひずみは上昇し続けており、大変形時まで水平耐力および 2 次剛性を高く維持することに大きく寄与している。また各試験体の結果を比較するために、図-9 に主筋ひずみの各載荷サイクルでのピーク値の比較を示す。軸力比による比較を見ると、図-9(a, b) に示すように、軸力比が小さいほど、主筋ひずみは引張側に全体的にシフトする傾向が見られ、部材角に対する主筋ひずみの変化率にはほとんど差が見られない。一方で、せん断スパン比による比較を示す図-9(c)を見ると、せん断スパン比が大きいほうが、主筋ひずみの変化率が緩やかになる傾向が見られる。

図-10 に各試験体において、西側の主筋ひずみの負側

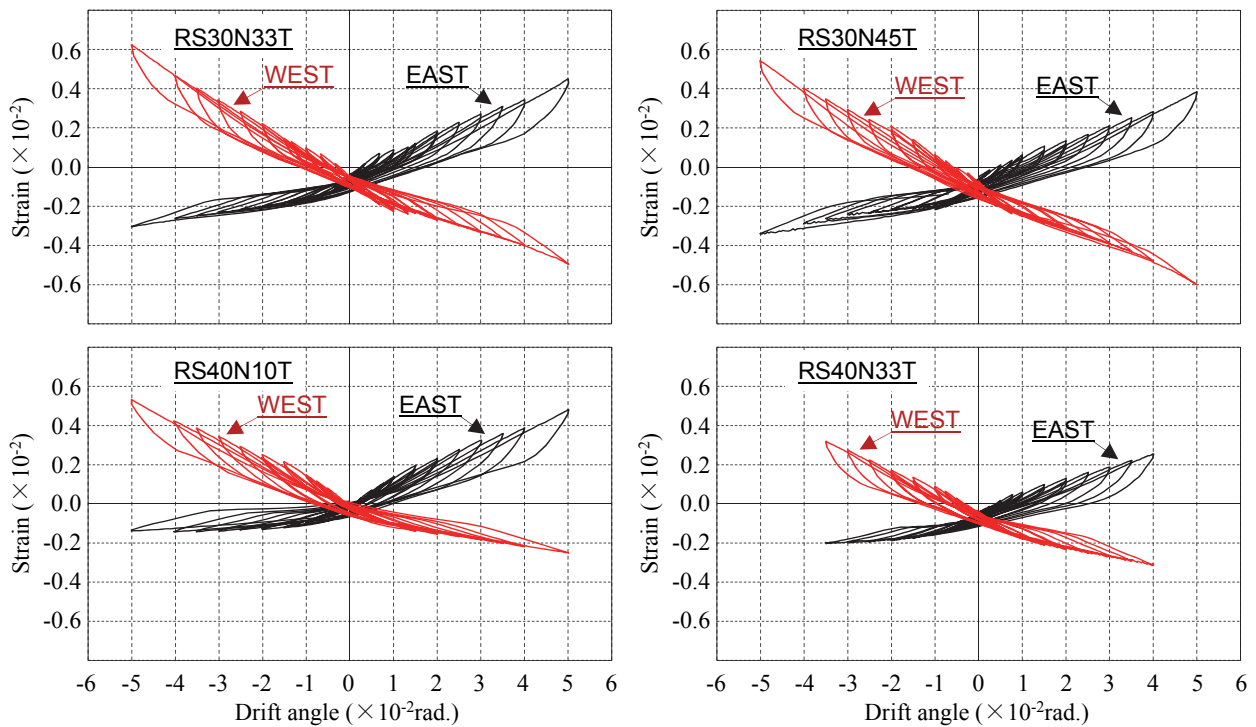


図-8 主筋ひずみの比較（柱脚から 25mm 位置）

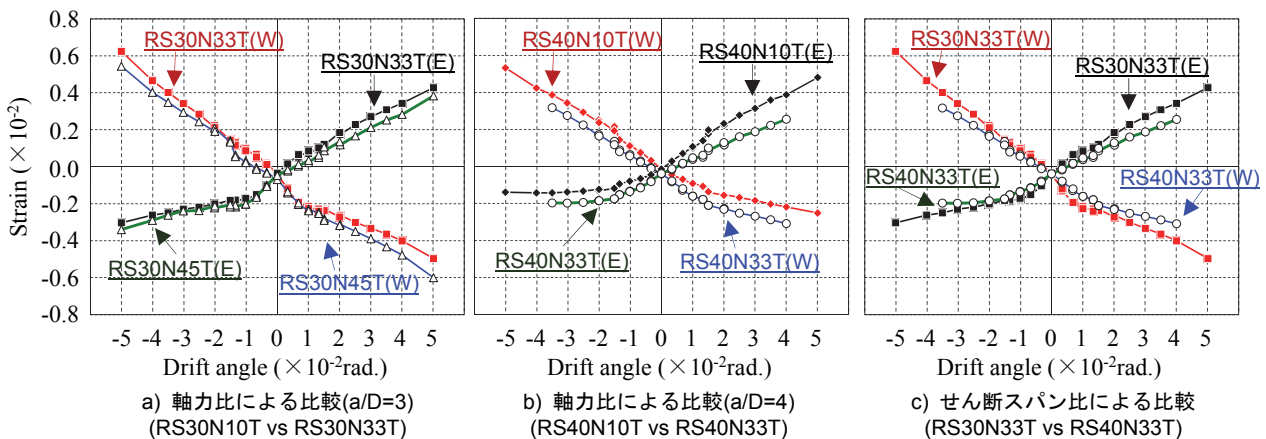


図-9 主筋ひずみのサイクルピーク値の比較

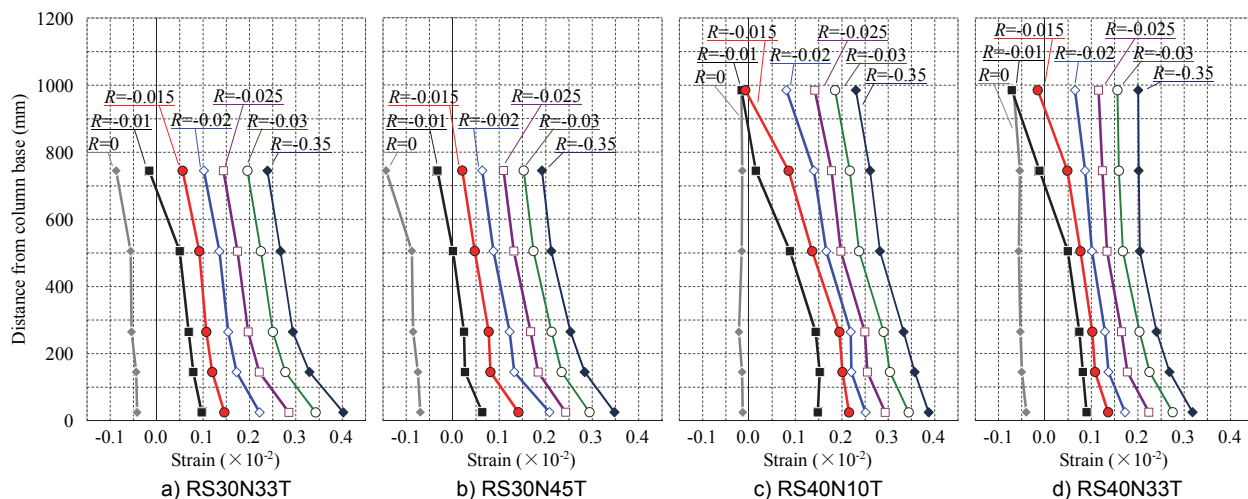


図-10 主筋ひずみ分布

載荷ピーク時の鉛直方向分布を示す。主筋に用いたSBPDN鉄筋は付着強度が低く、付着すべりを生じやすいため、せん断スパン比3の試験体においては、部材角 $R=0.01\text{rad}$ の時点で柱頭付近で計測したひずみも増加し始めている。一方でせん断スパン比4の試験体においては、主筋の定着長さがより長いので、部材角 $R=0.01\text{rad}$ の時点では、端部まで付着すべりが伝わっておらず、最も柱頭寄りのひずみに変化が見られない。一方で、付着すべりが定着まで伝わると、主筋全体のひずみが全体的に増加していく傾向がいずれの試験体においても見られる。そのため、同じ量だけ主筋が伸びようとすると、せん断スパン比が大きいほうがひずみ増分が小さく済むため、図-9(c)に示すように、主筋ひずみの変化率が緩やかになったものと思われる。

#### 4. まとめ

本研究ではSBPDN鉄筋を主筋に用いたスレンダーな鋼板拘束円形断面RC柱の耐震性能に関して、せん断スパン比と軸力比を変数に実験的に調べた結果、以下の知見を得た。

- 1) SBPDN鉄筋を主筋に用いた鋼板拘束円形断面RC柱は、軸力比0.45あるいはせん断スパン比4においても、部材角 $R=0.05\text{rad}$ まで原点指向性の履歴性状を示すと共に、耐力が上昇し続け、高い2次剛性を有することを示した。
- 2) いずれの試験体も残留部材角を低く抑え、部材角 $R=0.04\text{rad}$ においても、経験部材角の15%程度以下に抑えた。せん断スパン比が大きいく、軸力比が高い方が、残留部材角が大きくなる傾向が見られた。
- 3) せん断スパン比が大きいくほど、相対的に主筋定着が長くなるため、部材角に対する主筋ひずみの増加率が緩やかになることを明らかにした。

これらのことから、円形RC柱にSBPDN鉄筋と薄肉鋼

板による局部拘束を併用することで、高軸力下の柱やスレンダーな柱においても高いレジリエンス性能を持たせることが可能であることがわかる。

#### 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超高強度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) 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) 橋高将義, 谷昌典, 孫玉平, 藤永隆: 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
- 3) 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
- 4) 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
- 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, 2013.7  
蔡高創, 孫玉平, 竹内崇, 藤永隆: 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