

論文 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

汪 俊華*1・竹内 崇*2・小山 智幸*3・孫 玉平*4

要旨: 付着強度の低い超高強度鉄筋 (SBPDN 鉄筋) を主筋に用い、鋼板拘束を施した FA 円形 RC 柱の耐震性能に及ぼす、鋼板の接合方法と柱中央における主筋定着部の詳細及び主筋の定着長さの影響を解明することを目的として、逆対称曲げ柱形式の試験体に対して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、ボルトで接合された鋼板拘束柱は溶接鋼板拘束柱とほぼ同等の柱極限履歴性能を有することが明らかとなった。また、柱中央部での主筋の定着は柱の大変形までの二次剛性を保有するために、重要な役割を果たすことが分かった。

キーワード: フライアッシュ, 円形 RC 柱, レジリエンス, 残留変形, 極限履歴性能

1. はじめに

近年、フライアッシュ (以下 FA と略す) の排出量増加の対策として、その有効利用に関する研究が進められており、その一つとして、細骨材の一部を FA で代替したコンクリートの研究が進められている。小山ら^{1,2)}は FA を外割混合したコンクリートの材料性能を実験的に調べ、FA を外割混合することで、コンクリートの強度と耐久性が上昇することを示している。

一方、近年の大地震による被害を受けた建築物において、倒壊は免れたが損傷が甚大であるため、地震後の建築物の修復および都市の復興が困難となるケースが報告されている。そのため高い変形能力と復元性 (レジリエンス) を有し、地震後の残留変形を抑制できる、次世代の耐震構造の研究が重要な課題となっている。孫らはスパイラル状の溝を有し、通常の異形鉄筋と比べ付着強度の小さい超高強度鉄筋 (以下、SBPDN 鉄筋) を RC 柱の主筋に使用することで、柱の変形能力を確保しつつ残留変形を抑制することが可能であることを報告しており³⁾、このような柱は部材角 0.04rad. の大変形域まで、安定した履歴性能と高い二次剛性を有することを示している⁴⁾。

それらを踏まえて、環境負荷が小さく、大変形まで安定した履歴応答と高いレジリエンスを有し、地震後容易に修復できる次世代型の RC 部材の開発を目的として、著者らは SBPDN 鉄筋を用い、FA を外割混合した円形 RC 柱の耐震性能に関する実験的研究を行ってきた⁵⁾。その結果、折り曲げ加工した 2 枚の鋼板をボルトで接合して柱を拘束することにより、柱の耐力は大変形まで上昇し続け、残留変形を更に小さく抑制できることを明らか

にした。しかしながら、ボルト接合による拘束効果や、柱中央定着部詳細および主筋の定着長さが柱の耐震性能に及ぼす影響については十分に解明されていない。

本研究では文献 5) の研究の続きとして、SBPDN 鉄筋と鋼板拘束を併用した FA 円形 RC 柱の耐震性能に及ぼす、鋼板の接合方法と柱中央における主筋の定着部の詳細及び主筋の定着長さの影響を明らかにすることを目的として、逆対称曲げ変形下にある円形 RC 柱を対象に、鋼板の接合方法、柱中央部での主筋のすべり止め用帯板の有無及び梁柱接合部を模擬する加力スタップ内での主筋の定着長さを実験変数とした実験的研究を行った。得られた実験結果に基づき、FA 円形断面 RC 柱の履歴性状、残留変形及びエネルギー吸収特性などに関する考察を行う。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

試験体は、高層建築物の最下層柱を想定した縮尺 1/3 程度の縮小試験体で、上下に加力スタップを持ち、せん断スパン比が 2.0 で、直径 250mm の円形断面 RC 柱である。試験体の一覧を表 1 に、配筋詳細を図 1 に示す。

試験体は合計 4 体で、拘束鋼板の接合方法、主筋の柱中央での定着詳細及び主筋の加力スタップ中での定着長さを実験変数とし、試験体 CFABY26 を基準として、それぞれの変数対して、CFAWY26, CFABN26, CFABY13 の試験体を作成した。鋼板の接合方法は、厚さ 1.6mm の薄肉鋼板を折り曲げ加工し、2 枚を片側 23 本の M12 高力ボルトで接合する方法と、同薄肉鋼板 2 枚を突合せ溶接して接合する方法の 2 種類とした。これはボルト接合と

*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 九州大学大学院 人間環境学研究院都市・建築学部門 准教授 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. 試験体詳細一覧

試験体名	f'_c (N/mm ²)	主筋	P (kN)	P_{PC} (kN)	n	横補強 (鋼板)			柱の定着詳細		Q_{exp} (kN)	R_{exp} (0.01rad)
						t (mm)	D/t	接合 方法	柱中央 定着鋼板	スタップ内 定着長さ(mm)		
CFABY26	65	8-U12.6	1040	263	0.33	1.6	156	ボルト	有り	260	300	4.97
CFAWY26	70		溶接	有り	260			312	4.96			
CFABN26	65		ボルト	無し	260			257	3.48			
CFABY13	72		ボルト	有り	130			287	5.00			

ここに、 f'_c : コンクリートシリンダー強度、P: 軸力、 P_{PC} : プレストレス力により導入した軸力、n: 軸力比、t: 鋼板の厚さ、D/t: 柱直径と鋼板厚さの比、 Q_{exp} : 最大水平力実験値、 R_{exp} : Q_{exp} 時部材角。

表-2 コンクリートの調合

Fly Ash (kg/m ³)	W/C	水 (kg/m ³)	セメント (kg/m ³)	細骨材		粗骨材 (kg/m ³)	混和剤(kg/m ³)
				砂 (kg/m ³)	砕砂(kg/m ³)		
455	0.65	185	285	334	146	833	5.92

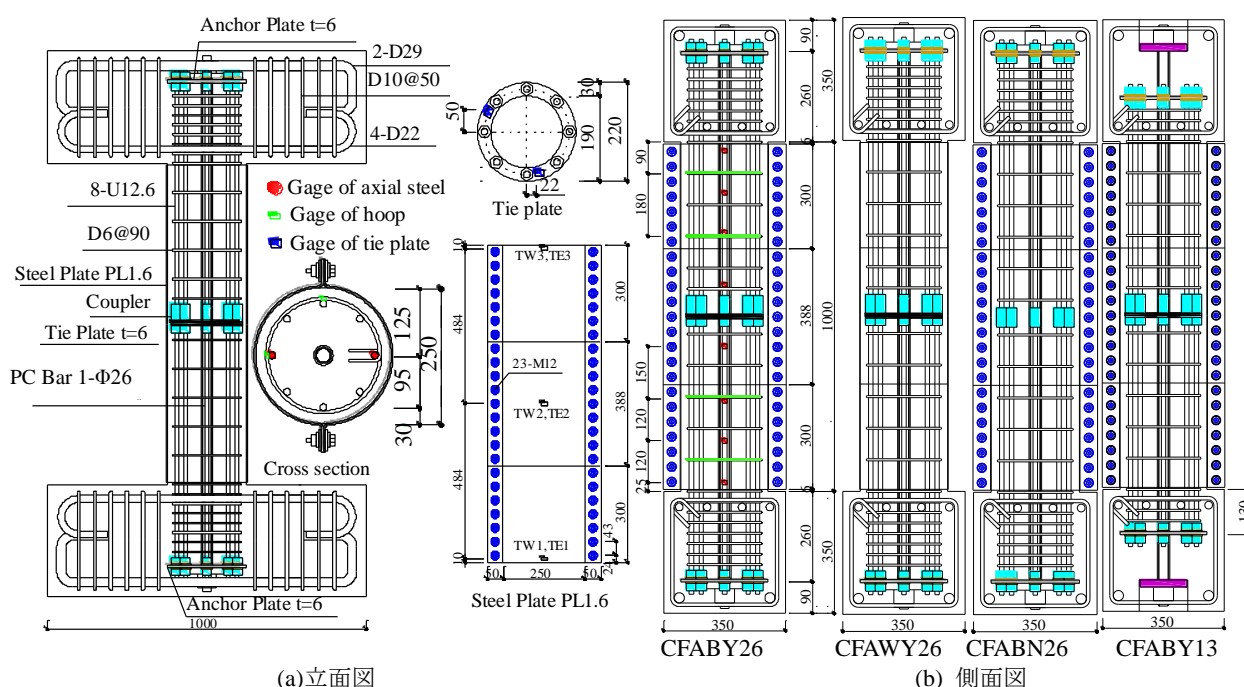


図-1 試験体の配筋詳細(Unit: mm)

溶接接合の拘束効果を比較するためであり、そのため溶接接合においては裏当て金を用いていない。鋼板は組み立てやすさを考え、3つに分かれている。またSBPDN鉄筋を用いた逆対称曲げを受けるRC柱において、大変形域での二次剛性を確保するには、柱中央付近で主筋の付着すべりを止める必要があるため⁹⁾、柱中央部における主筋の定着詳細の影響を明らかにすることが重要である。そこで、本試験では、柱中央部での主筋の定着方法として、ねじ切り加工した主筋を接続するカップラー(対角距離30mm、長さ55mm)のみによる主筋定着と、厚さ6mmの定着帯板による定着の2種類を設けた。また柱梁接合部における主筋の定着長さによって、主筋のすべり出し量が異なり、柱の履歴性状に影響を及ぼすことが考えられる。そのため、主筋の加力スタップ内での定着長さを260mmとした試験体と、実際の柱梁接合部で

上下階の主筋と接続することを考慮して主筋の定着長さを半分の130mmとした試験体を作成した(表-1と図-1を参照)。

本研究で使用したコンクリートの調合を表-2に示す。FAの混合量は455kg/m³であり、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。

柱の主筋には、規格降伏強度が1275N/mm²の超高強度鉄筋(SBPDN 1275/1420)を用い、公称直径12.6mmの同鉄筋8本を断面縁から30mmの位置に均等配置した。SBPDN鉄筋は、丸鋼にスパイラル溝加工した異形鉄筋で、通常の異形鉄筋に比べ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。主筋端部の上下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。表-3に鉄筋の材料試験結果を示す。

主筋の位置を確保するために D6 円形帯筋を 90mm 間隔で配筋した。鋼板横拘束は、コンクリートへの拘束と、柱中央定着部でのコンクリートの損傷低減、および柱のせん断抵抗力の上昇を目的としており、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。そのため、鋼管と上下加力スタップの間には 6mm 程度の隙間を設けている。また拘束鋼板は、試験体作製時の型枠を兼用できるものであり、施工性を図るため、鋼板を柱軸方向に 3 分割している。

いずれの試験体も軸力比 0.33 の下で、繰り返し載荷実験を計画した。1000kN 油圧ジャッキのみでは所定の圧縮軸力を加えることができないため、部材中央に呼び名 26 の PC 鋼棒を通し、初期導入張力を加えることによって所定の圧縮軸力を確保した。PC 鋼棒のプレストレス力は、貼付した歪みゲージの値により管理し、その大きさは全軸力の約 20%~30%であった。

2.2 加力方法及び測定方法

図-2 に示す載荷装置を用いて、一定軸力下における正負交番繰り返し載荷を行った。1000kN 油圧ジャッキによって所定の軸力を加えた状態で、押し 500kN 引き 300kN の油圧ジャッキにより試験体両側から水平力を加えた。ジャッキの先端に設置したロードセルによりそれぞれの荷重を測定している。載荷プログラムは、部材角 $R=0.0025, 0.005, 0.0075, 0.01, 0.015, 0.02rad$ の変位レベルでは 2 回ずつ、 $R=0.025, 0.03, 0.035, 0.04, 0.05, 0.06rad$ の変位レベルで 1 回ずつの正負交番繰り返し載荷であった。試験体の主筋と横補強筋に歪みゲージを貼付し、鉄筋の歪みを測定しており、主筋、帯筋、および拘束鋼板への貼付位置を図-1 に示す。拘束鋼板には 2 軸ゲージを貼付し、鋼板の周方向歪みを計測すると共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

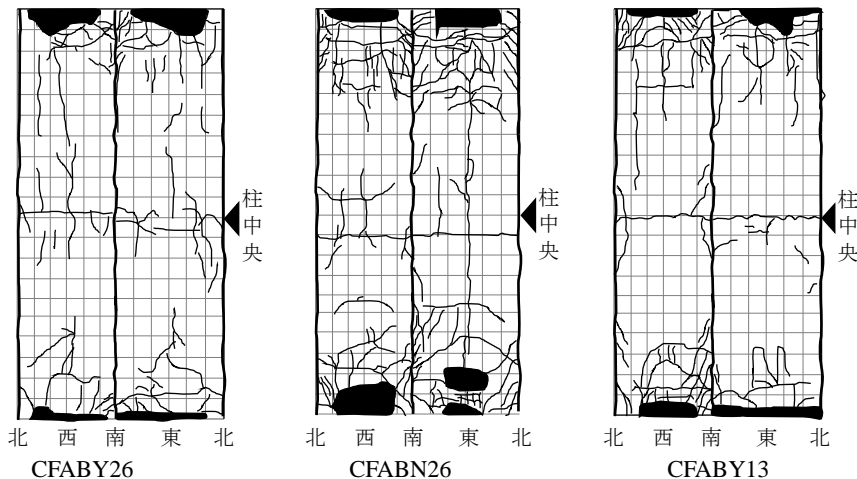


図-3 試験体の破壊状況

表-3 鉄筋の力学的特性

呼び	規格	f_y (N/mm ²)	ϵ_y (%)	f_u (N/mm ²)	E_s (kN/mm ²)
U12.6*	SBPDN 1275/1420	1377	0.84	1463	215
D6	SD295A	394	0.21	522	197
PL1.6*	SS400	273	0.34	405	201

ここに、 f_y : 降伏点応力 (*は 0.2% オフセット耐力)、 ϵ_y : f_y 時歪み、 f_u : 引張強度、 E_s : 弾性係数。

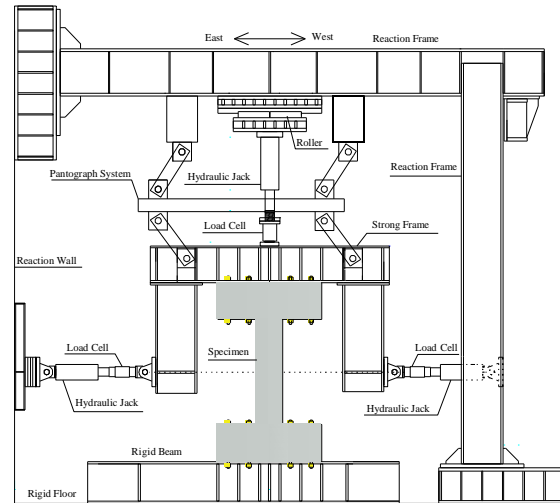


図-2 載荷装置概要

3.1 実験経過

本試験体は柱全体が鋼管に覆われており、各載荷サイクルでの損傷状況を確認することはできないため、実験終了後の試験体の様子を図-3 に示す。図-3(a) に示す、ボルトを外し鋼板を取った後の試験体 CFABY26、CFABY13、CFABN26 のひび割れ展開図を見ると、いずれの試験体も柱頭と柱脚において、曲げ変形による曲げひび割れおよび圧縮ひび割れが支配的であった。また柱中央部での主筋の定着部に沿って周方向にひび割れが入っており、これは柱中央定着部に大きな主筋応力が作用したためと思われる。しかしながら、定着帯板を用いた試験体 CFABY26 と CFABY13 においては、柱中央定着

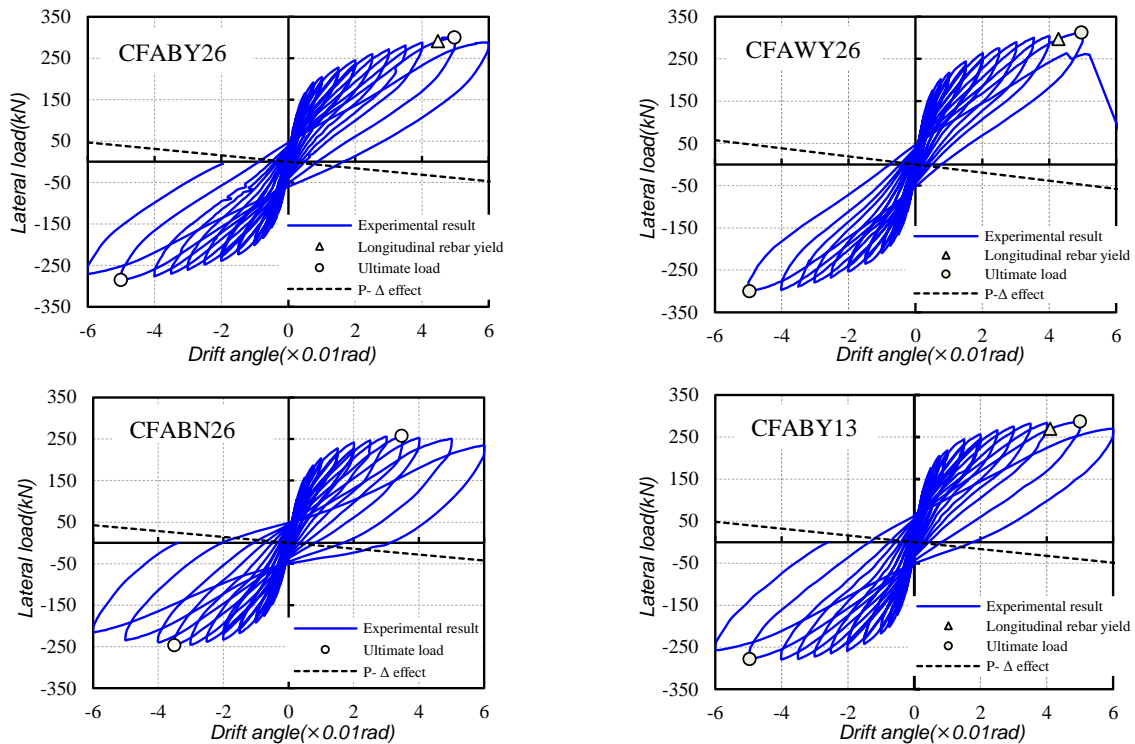


図-4 水平力—部材角関係

部から主筋に沿った縦ひび割れや付近のコンクリートの損傷は小さく、試験終了まで主筋はしっかりと定着されていたものと思われる。一方、試験体 CFABN26 では、柱の東面に主筋に沿った割裂ひび割れが顕著に現れており、大変形領域ではカップラーのみによる定着が十分でなかったものと思われる。また、いずれの柱の南北の軸上においても縦ひび割れが観察された。これは柱拘束鋼板のボルト接合位置上であり、本鋼板拘束では二つの半円板が直接接合されておらず、鋼板を折り曲げてボルト接合しているため、接合箇所の周方向に沿う剛性が板の軸剛性より弱く、ボルトを固定端とする片持ち梁の剛性になり、拘束効果が弱まり発生したものと思われる。溶接接合による鋼板拘束を施した試験体 CFAWY26 は、 $R = -0.04\text{rad}$ において、拘束鋼板の溶接部の一部が切れて、鋼板が開き始めた（図-3(b)上）。その後、部材角 R が 0.06rad に向かう途中の 0.05rad で、鋼板の溶接部が完全に破断すると共に、試験体が急激にせん断破壊した（図-3(b)下）。

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○印は水平力が最大となった点を、△印は主筋が降伏した点を示す。破線は軸力による P-Δ 効果の影響分を示す。

図-4 より分かるように、試験体 CFABY26 と試験体 CFAWY26 及び試験体 CFABY13 は、いずれも $R = 0.04\text{rad}$ の載荷サイクルまでは残留変位の小さな原点指向型のル

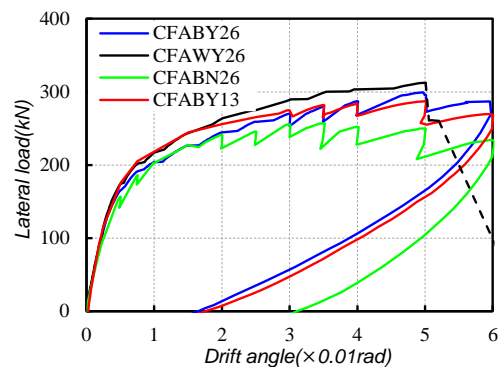


図-5 試験体の包絡線

ープを描き、耐力も伸び続ける傾向にあった。その後、3 体とも $R = 0.05\text{rad}$ で主筋が降伏し始め、耐力が最大値に達し、試験体の残留変形も増加した。各試験体の水平力—部材角関係の包絡線を図-5 に示す。主筋の定着長さの異なる試験体 CFABY26 と試験体 CFABY13 を比較すると、部材角 $R = 0.03\text{rad}$ 以下では、定着長さの短い試験体 CFABY13 の方が耐力がやや高くなっている。これは、定着長さが短い方が早期に付着すべりが主筋端部の定着部まで伝わり、主筋の歪みを増加させて、柱の早期耐力の増加に繋がったものと思われる。拘束鋼板の接合方法が異なる試験体 CFABY26 と試験体 CFAWY26 を比較すると、せん断破壊する前までは溶接接合を施した試験体 CFAWY26 の方が耐力がやや高く現れ、コンクリートへの拘束効果の差が見られた。ボルト接合試験体は前述のように鋼板を折り曲げた部分での変形により拘束効果が

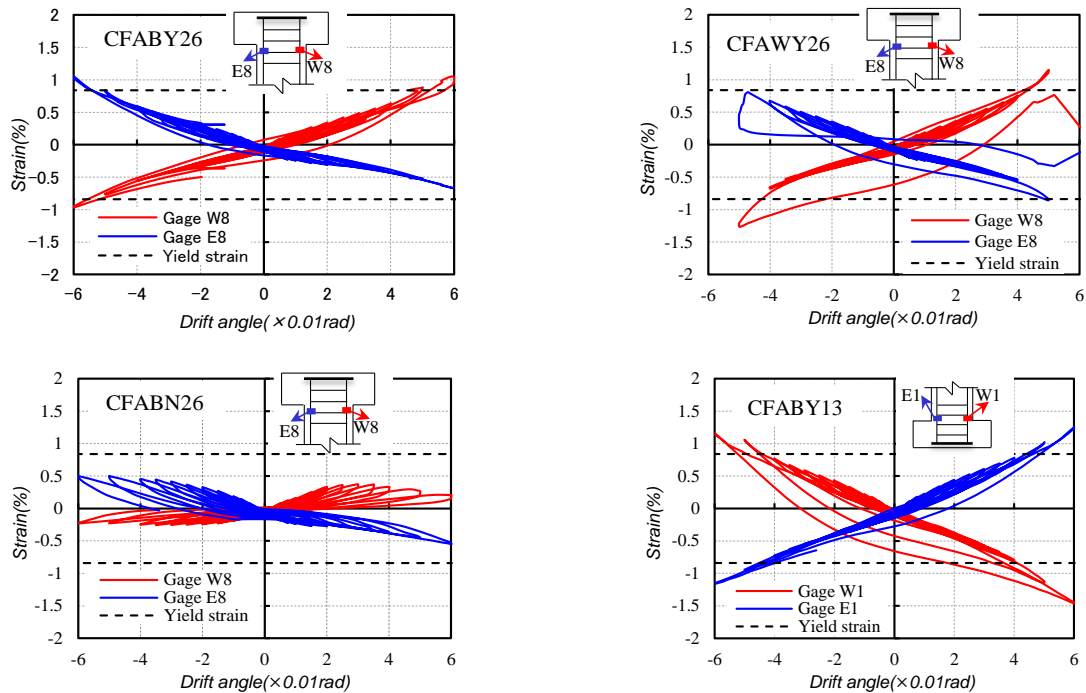


図-6 主筋の歪み

若干低下したものと思われる。しかしながら、その差は $R=0.03\text{rad}$ までで僅かであった。一方、試験体 CFABY26 と試験体 CFABN26 を比較すると、部材角 $R=0.01\text{rad}$ 程度から水平抵抗力に差が生じ始め、試験体 CFABN26 の方が低い耐力を示した。このことから、カップラーのみでは柱中央部における主筋のすべり止めが不十分であったものと思われる。

3.3 主筋歪み

図-6 に各試験体の柱脚あるいは柱頭から 25mm 離れた箇所での主筋歪みと部材角の関係を示す。主筋の降伏歪みは 0.84% であり、図中に破線で示す。試験体 CFABY13 のみ柱脚側のひずみデータを示しているが、これは、柱頭側と柱脚側のひずみの進展にほとんど差異が無く、柱脚側のデータの方が大変形時まで欠損が少なく取得できたためである。試験体 CFABY26, CFAWY26, CFABY13 は $R=0.05\text{rad}$ で引張側主筋歪みが降伏に達した。しかしながら、試験体 CFABN26 は、柱中央部でカップラーのみによる主筋へのすべり止め作用が弱いため、主筋歪みを上昇させることができず、 $R=0.03\text{rad}$ 以後で更なる耐力上昇が確保できなかった。試験体 CFABN26 の西側の主筋歪み (W8) は部材角 $R=0.03\text{rad}$ 以降で減少していることから、部材角 $R=0.03\text{rad}$ 程度で試験体 CFABN26 の柱中央定着部のコンクリートの損傷が始まったものと思われる。また、 $R=0.02\text{rad}$ 時での試験体 CFABY26 と CFABY13 の東西の主筋ひずみの差はそれぞれ 0.64%, 0.71% であり、試験体 CFABY13 の方が主筋ひずみの増加率が大きいことがわかる。これは、試験体

CFABY13 は他の試験体より主筋のスタップ内での定着長さが短いためと思われる。

3.4 残留部材角

水平力除荷後の各載荷サイクルの残留部材角 (正負加力平均) と最大経験部材角の関係を図-7 に示す。最大経験部材角 $R=0.03\text{rad}$ までは試験体による差異はほとんど見られず残留部材角は非常に小さかった。その後、最大経験部材角が大きくなるに従い、試験体 CFABN26 の残留部材角が他の試験体と比べて大きくなる傾向が見られた。これは、前述のように試験体 CFABN26 の主筋の柱中央での定着部が部材角 $R=0.03\text{rad}$ 程度で損傷し始めたためと考えられる。その他の 3 体の試験体については、ほとんど差は無く、主筋が降伏した部材角 $R=0.05\text{rad}$ まで、残留部材角が小さかった。

図-8 に各載荷サイクルの残留部材角を最大部材経験角で除して得られる残留変形率 R_{res}/R_p と最大経験部材角の関係を示す。いずれの試験体も、部材角 $R=0.0025\text{rad}$ においては、残留変形率は 11% であったが、部材角 $R=0.01\text{rad}$ までは、最大経験部材角が大きくなるほど、残留変形率が小さくなる傾向が見られ、部材角 $R=0.01\text{rad}$ では残留変形率 8% 程度となった。その後の残留変形率の変化傾向は図-7 と同じであるが、試験体 CFABN26 以外の他の三つ試験体においては、部材角 $R=0.04\text{rad}$ においても残留変形率を 10~15% 程度に抑えられており、弾性状態に近い部材角が小さい時から、大変形時まで残留変形率がほとんど変わっておらず、その復元能力が高いことが分かる。なお、 $R=0.05\text{rad}$ から見られた残留変

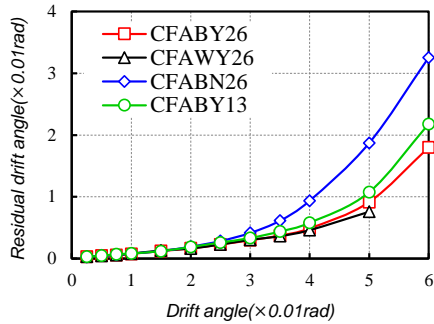


図-7 残留部材角

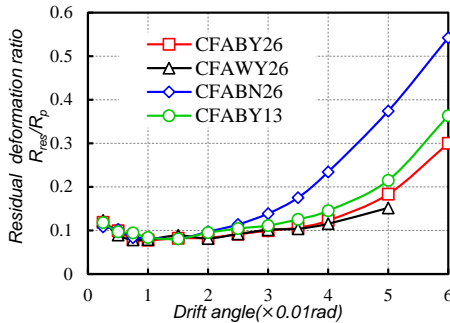


図-8 残留変形率

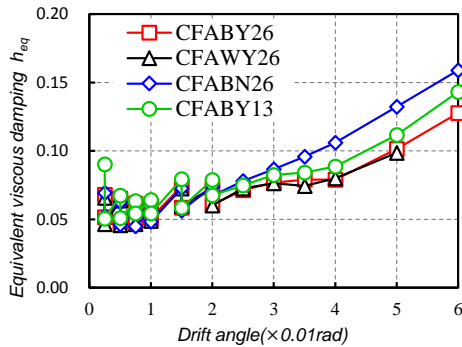


図-9 等価粘性減衰定数

形率の急増は主筋の降伏時期と一致していた。

3.5 等価粘性減衰定数

図-9 に試験体の各载荷サイクルの履歴ループにおける等価粘性減衰定数 h_{eq} の推移を示す。いずれの試験体も最大経験部材角が大きくなるに従い、等価粘性減衰定数が緩やかに上昇しているが、柱中央定着部が損傷したと思われる試験体 CFABN26 を除くと、図-4 中に示す主筋降伏まで、等価粘性減衰定数は小さな値を保っていた。試験体 CFABY26 と CFAWY26 はほぼ同じ等価粘性減衰定数を示し、部材角 $R=0.04\text{rad}$ まで 0.08 とほぼ一定値を保っていた。

4. まとめ

SBPDN 鉄筋を主筋に用い鋼板拘束を施した FA 円形 RC 柱の耐震性能に及ぼす、鋼板の接合方法と柱中央における主筋の定着部の詳細及び主筋の定着長さの影響を実験的に調べ、以下の知見が得られた。

- (1) 柱中央定着部に定着帯板を設けた試験体は、いずれも部材角 $R=0.05\text{rad}$ まで残留変形を小さく抑えなが

ら、耐力が上昇し続け、高い二次剛性とレジリエントスを示した。一方で、カップラーのみで定着した試験体は高い二次剛性とレジリエンスを示す限界部材角 R が 0.03rad 程度でやや小さかった。

- (2) 柱の拘束鋼板をボルトで接合する方法は、溶接接合と比べて、鋼板を折り曲げた部分での変形による拘束効果の低下が若干生じるが、最大耐力や残留変形などに大きな差を生じず、柱はほぼ同等の耐震性能を示した。
- (3) 柱主筋の定着長さが短い方が早期に付着すべりが主筋端部の定着部まで伝わり、初期水平耐力の増加に繋がった。一方、部材角に対する主筋歪みの増加率が大きくなり、 $R=0.03\text{rad}$ 以後の変形域での残留変形の増加はやや大きかった。

謝辞

本研究を進めるにあたり、神戸大学大学院生柴田和幸氏及び神戸大学技術員・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練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) 小山智幸, 孫玉平, 小山田英弘, 藤永隆: FA を外割調合したコンクリート圧縮応力-歪み関係のモデル化, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.3, pp.85-90, 2008
- 2) 松藤泰典, 小山智幸, 船本憲治, 伊藤是清: 石炭灰を外割大量使用するコンクリートの調合に関する研究, コンクリート工学論文集, Vol.12, No.2, pp.51-60, 2001
- 3) Sun YP, Cai GC, Takeuchi T: Seismic Behavior and Performance-Based Design of Resilient Concrete Columns, Applied Mechanics and Materials, No.1453, pp: 438-439, 2013
- 4) 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円形 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
- 5) Wang JH, Takeuchi T, Koyama T, Sun YP: Seismic Behavior of Circular Fly Ash Concrete Column Reinforced by Ultra High Strength Rebars and Steel Plates, Proceedings of the Japan Concrete Institute, Vol.36, No.2, pp.163-168, 2014
- 6) 孫玉平, 竹内崇, 奥田隼也, 大畑雄俊: 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