

論文 付着強度の低い超高強度鉄筋を主筋に用いた逆対称曲げ RC 柱の耐震性能に関する実験的研究

竹内 崇*1・張 建偉*2・藤永 隆*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た逆対称曲げせん断変形を受ける RC 柱の耐震性能に及ぼす反曲点位置での主筋定着の詳細の影響を明らかにすることを目的として、逆対称曲げ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、柱全体に鋼管あるいは炭素繊維シートによる横補強を施すことで部材角 0.03rad.まで耐力が上昇し続けると共に残留変形を小さく抑えることのできる、安定した履歴性状を示すことが明らかになった。また反曲点位置での主筋定着部周辺のコンクリートに生じる割裂ひび割れを抑制する方法として、鋼管横補強は炭素繊維シートによる補強と同程度に有効であることを示した。

キーワード：レジリエンス, RC 柱, 付着すべり, 鋼管横補強, 炭素繊維シート補強

1. はじめに

現行の耐震設計は、極めて稀な大地震に対して、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、地震後の建物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きたし、地域社会の早期復旧と復興を妨げる恐れがある。今後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。

著者らは表面にスパイラル溝を有し、規格降伏強度が 1275N/mm² の超高強度鉄筋（SBPDN1275/1420）の付着すべりの生じやすさに着目し、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 部材の開発研究を行ってきた¹⁻⁴⁾。これまでに片持ち柱を対象とした実験を行った結果、主筋の端部に機械式定着を施せば、RC 柱は部材角が 0.04rad.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、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。

さらに、考案した RC 柱部材が逆対称曲げを受ける状況下での、耐震性能を明らかにすることを目的とした実験的研究を行い、逆対称曲げを受ける状況下で高いレジリエンスを保つには、柱反曲点近傍において主筋にすべり止め策を講じる（以下、これを柱中央定着と称す）ことと、さらに同位置に生じるかぶりコンクリートの割裂

ひび割れ及び剥離を防ぐことが必要であることを明らかにした⁵⁾。柱反曲点近傍で主筋のすべりが止められていない場合、主筋に生じる応力は付着すべりにより柱頭から柱脚までほぼ均一化され、逆対称曲げモーメントに対する抵抗力が著しく低下する。また、すべり止めを設けた箇所には上下鉄筋の応力が合力として作用し、それが周辺かぶりコンクリートに割裂ひび割れを生じやすくする原因となる。そのため、柱中央定着部の詳細は試験体の耐震性能に大きく影響することが推定される。

本研究ではそれらの研究の続きとして、付着強度の低い超高強度鉄筋を主筋に用いた逆対称曲げを受ける RC 柱の耐震性能に及ぼす、柱中央定着部の詳細の影響を明らかにすることを目的として、柱中央定着部の定着鋼板の厚さ、鋼板縁からコンクリート表面までの距離、及び試験体の横補強形式を変数とした実験的研究を行う。横補強形式として先行研究においては、炭素繊維シートを用いた横補強を行い、柱中央定着部近傍の割裂ひび割れを抑えたが、本研究では鋼管横補強の有効性を検証する。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

本研究に用いた試験体の一覧を表-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、上下に加力スタブを持つ 250mm の正方形断面でせん断スパン比 2 の RC 柱である。

コンクリートには調合強度 40N/mm² 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-1 に示す。

*1 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）

*2 北京工業大学 建築工程学院 教授 工博

*3 神戸大学 都市安全研究センター 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 試験体一覧

試験体名	a/D	f'_c (N/mm ²)	n	主筋	帯筋	柱中央定着部		追加 横補強	Q_{exp} (kN)	R_{exp} ($\times 10^{-2}$ rad.)
						鋼板厚 (mm)	鋼板のかぶり 厚さ(mm)			
DC-T6D25N	2	41.6	0.33	12-U12.6	D6@30	6	25	-	231	1.4
DC-T6D25T		43.1			D6@60			鋼管	267	3.0
DC-T12D18T		43.1			D6@30	12	18	PL4.5	274	2.7
DC-T12D18CF		41.8			D6@30			CFシート	281	3.0

ここに、 a/D ：せん断スパン比、 f'_c ：コンクリートシリンダー強度、 n ：軸力比、 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）

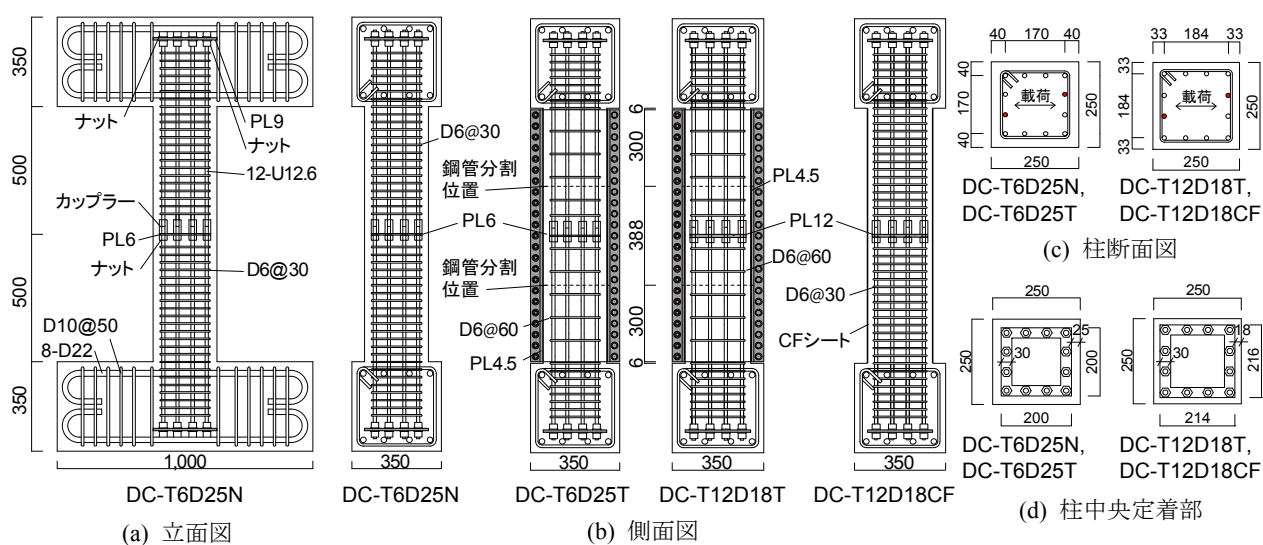


図-1 試験体の配筋詳細

主筋には、規格降伏強度 1275N/mm² の超高強度鉄筋（SBPDN1275/1420）を用いた。公称直径 12.6mm（呼び U12.6）のものを断面周辺に沿って均等に 12 本配置し、主筋比は 2.4% 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。付着強度が低い主筋すべりを生じやすいことが想定されるので、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。また柱部材の反曲点近傍に幅 30mm の帯状の定着鋼板（SS400）を配し、この鋼板を介して上下鉄筋をナット及びカップラーを用いて機械的に接合することで主筋の定着を図った。

試験体 4 体は、柱中央定着部の定着鋼板の板厚、定着鋼板縁からコンクリート表面までの距離、及び試験体の横補強形式を実験変数としている。柱中央定着部の定着鋼板は、厚さ 6mm (PL6) と 12mm (PL12) の 2 種類とした。定着鋼板縁からコンクリート表面までの距離は 18mm と 25mm の 2 種類とし、主筋の中心間距離がそれぞれ 187mm と 170mm となっている。

試験体 DC-T6D25N の横補強形式は帯筋補強のみで、異形鉄筋 D6 を 30mm 間隔で配筋した。試験体

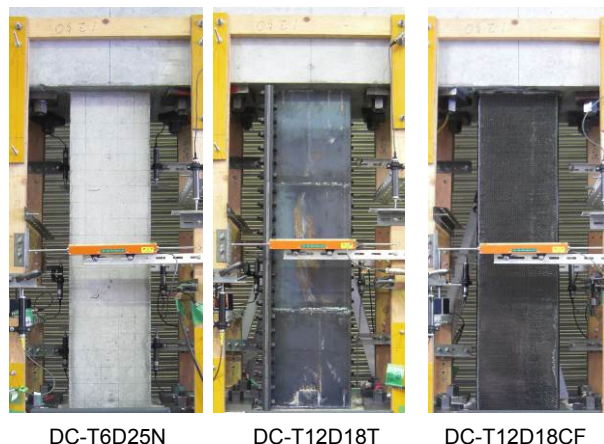


図-2 試験体の外観

DC-T6D25T と DC-T12D18T の 2 体は、柱外部を厚さ 4.5mm の鋼板を折り曲げたものを 2 枚組み合わせ高力ボルトで接合した鋼管で補強しつつ、柱内部の帯筋として D6 を 60mm 間隔で配筋した。鋼管横補強は、コンクリートの拘束と共に柱中央部のコンクリートの損傷低減を目的としており、鋼管に曲げ及び軸力による軸方向応力を直接負担させない。そのため鋼管と加力スタブの間には 6mm 程度の隙間を設けている。また横補強鋼管は、

試験体作製時に鋼製型枠として兼用したものであり、施工性の向上を計るために鋼管を柱軸方向に3分割している。試験体 DC-T12D18CF は、D6 を 30mm 間隔で配筋した上に、柱全体を炭素繊維シートによる補強を行った。炭素繊維シートは2層巻きとし、使用した炭素繊維シートは厚みが 0.167mm、引張弾性率が 230kN/mm²、引張強さが 3400N/mm²である。各試験体の外観を図-2 に示し、表-2 に使用した鉄筋の力学特性を示す。

2.2 加力及び測定方法

図-3 に荷重装置を示す。1000kN 油圧ジャッキで所定の軸力を与えてから、500kN 油圧ジャッキ（押し：500kN、引き：300kN）を2台使用して正負交番繰り返し水平力を作用させた。荷重は柱の部材角 R により制御し、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8箇所（柱頭及び柱脚からそれぞれ 25mm, 145mm, 265mm, 415mm の位置）、図-1(c)中に赤で示す2本の主筋に計16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4箇所（柱頭及び柱脚からそれぞれ 60mm, 300mm）に計8枚のゲージを貼付した。試験体 DC-T6D25T 及び DC-T12D18T については、鋼管のウェブ側の面及びフランジ側の面の周方向の中央部にひずみゲージを貼付した。ウェブ面については7箇所（柱頭及び柱脚からそれぞれ 20mm, 180mm, 340mm, 500mm の位置）に、フランジ面については3箇所（柱頭及び柱脚からそれぞれ 20mm, 500mm）の位置に2軸のひずみゲージを貼付し、鋼管の周方向ひずみの計測と鋼管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

図-4 に試験体 DC-T6D25N の各変位振幅レベルでの損傷状況の変遷、および試験体 DC-T6D25T と試験体 DC-T12D18T の荷重終了後に鋼管を取り外した後の損傷状況を示す。なお、図中のグリッド間隔は 50mm で、図中の赤線と青線はそれぞれ正側荷重時と負側荷重時に発生したひび割れを示す。試験体 DC-T6D25N は部材角 $R=0.0025\text{rad.}$ の時点で曲げひび割れが確認された。その後、 $R=0.01\text{rad.}$ の荷重サイクルで、かぶりコンクリートの圧壊

表-2 試験体一覧

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	1423	0.86	1499	216
D6	SD295A	426	0.23	517	190
PL4.5*	SS400	288	0.34	452	203

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

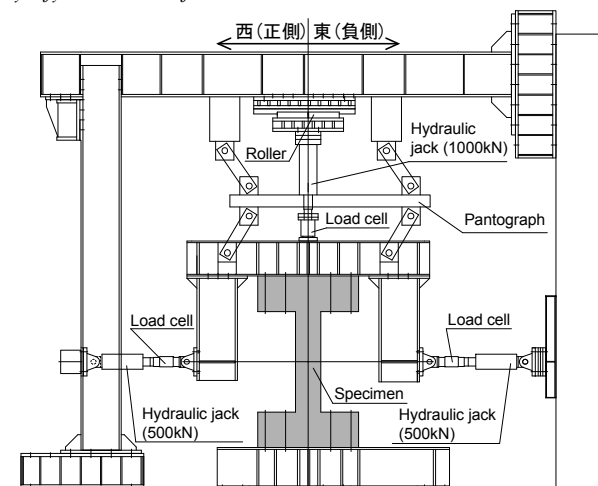


図-3 荷重装置概要

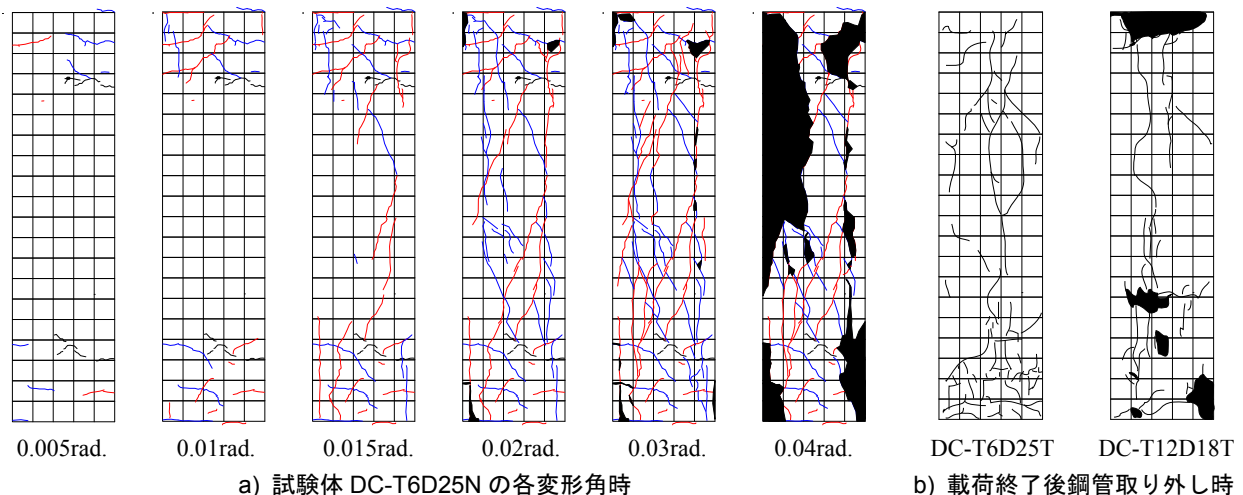


図-4 損傷状況

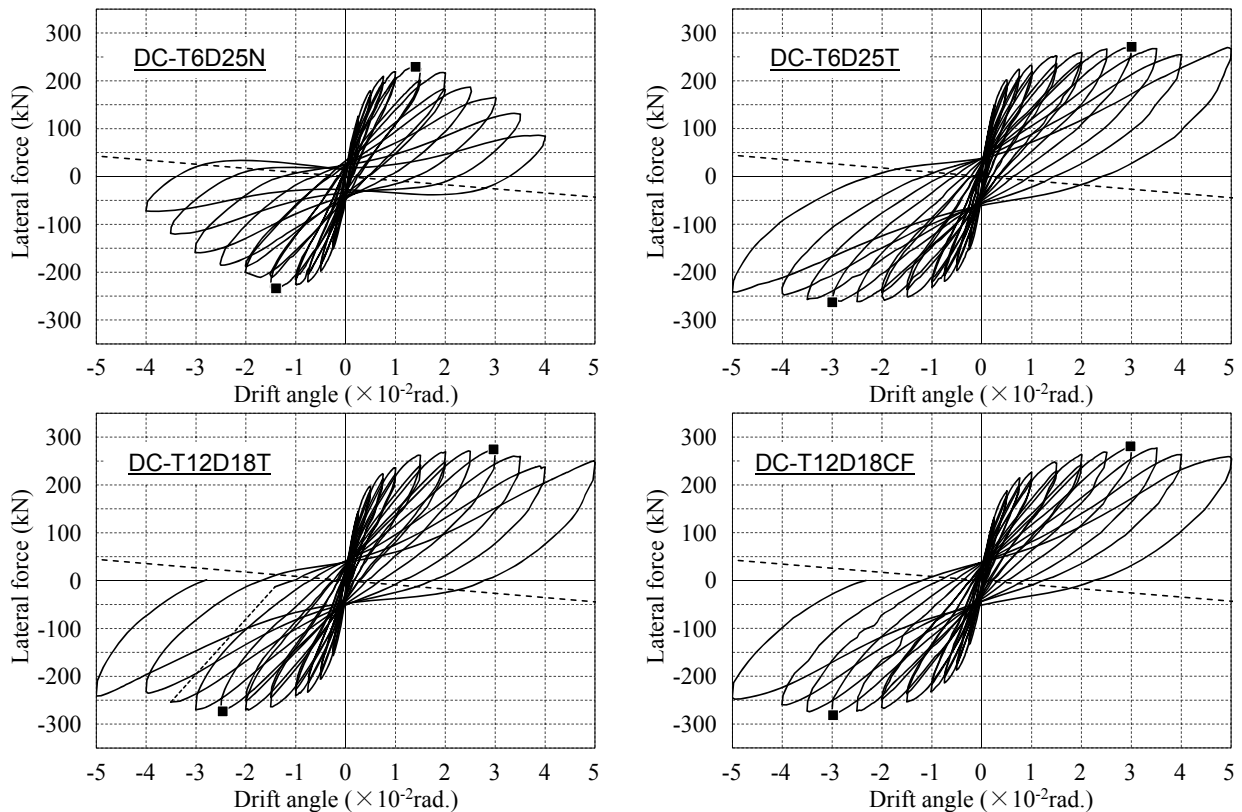


図-5 水平力—部材角関係の実験結果

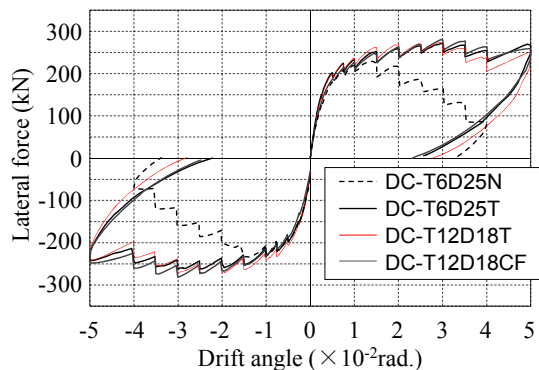


図-6 水平力—部材角関係の包絡線の比較

と剥離が確認された。 $R=0.015\text{rad}$ サイクルの载荷において、柱中央定着部付近に割裂ひび割れが発生し、そこからひび割れは上下とも斜め方向に大きく進展した。また、この载荷サイクルで試験体は正負ともに最大耐力に達し、その後耐力が低下し始めた。変形角の増大に伴い耐力低下が進行し、軸支持能力を維持したまま、最大耐力の3割程度となったため、実験を終了した。鋼管横補強を施した試験体 DC-T6D25T と DC-T12D18T は、载荷途中の損傷状況は確認できなかったが、载荷終了後に鋼管を取り外したところ、柱中央定着部において割裂ひび割れが確認された。ただし、いずれの試験体においても鋼管を接合させるボルトの緩みは見られなかった。炭素繊維シート補強を施した試験体 DC-T12D18CF においても、载荷途中の損傷状況は確認できなかったが、载荷終了後に炭素繊維シートを剥がしたところ、柱中央定着部におい

て割裂ひび割れが観察された。しかしながら、図-4 に示すように、鋼管拘束あるいは CF シート補強を施した試験体は、試験体 DC-T6D25N と比較すると、割裂ひび割れの進展は抑制されていることが分かる。

3.2 繰返し履歴性状

図-5 に実験で得られた各試験体の水平力—部材角関係を、図-6 に各試験体の水平力—部材角関係の包絡線の比較を示す。図-5 中の■印は水平力が最大となった点を、破線は P- Δ 効果による耐力の低下ラインを示す。なお、試験体 DC-T12D18T においては、計測の不具合により $R=0.035\text{rad}$ ピーク後の除荷履歴部分はデータが収集できなかったため、破線で示す。 $R=0.01\text{rad}$ のサイクルまでは、試験体間に大きな差は見られず、いずれも原点指向性の履歴性状を示した。しかしながら、試験体 DC-T6D25N は $R=0.015\text{rad}$ サイクルの载荷において柱中央定着部付近で発生した割裂ひび割れにより早期に最大耐力に達し、その後部材角の増大と割裂ひび割れの進展に伴い、水平抵抗力が大きく低下した。それに対して他3体の試験体に関しては、部材角 $R=\pm 0.030\text{rad}$ 前後まで水平抵抗力が上がり続け、ピークを迎えた後も急激な耐力低下は生じなかった。 $R=\pm 0.030\text{rad}$ 前後で耐力が最大となったことから、この時点で鋼管あるいは炭素繊維シート補強柱の中央部付近で割裂ひび割れが発生したと推測できる。しかしながら、横拘束により柱中央定着部付近の割裂ひび割れの進展を抑制し、それ以降の耐力の低

下を抑えられたと考えられる。

また、鋼管あるいは炭素繊維シートによる横補強を施した3体の試験体の履歴性状を比較すると、ほとんど差は見られない。細部を見ると、試験体 DC-T12D18T は最大耐力を発揮した後の耐力低下が他の2体よりやや大きい。これは試験体 DC-T12D18T の中間定着部付近のコンクリート厚さが試験体 DC-T12D25T と比べて小さいため、割裂ひび割れの進行が早かったものと推測される。

図-7 と図-8 はそれぞれ各試験体の残留部材角(R_{res})と等価粘性減衰定数(h_{eq})の実験結果を示す。 R_{res} , h_{eq} ともに $R=0.01\text{rad.}$ までは試験体間の差はほとんどない。しかしながら、試験体 DC-T6D25N は $R=0.015\text{rad.}$ 以降で R_{res} , h_{eq} が増加していった。他の3体を比較すると、試験体 DC-T12D18T は $R=0.03\text{rad.}$ 以降で R_{res} が残り2体よりも大きくなる傾向が見られた。一方で、かぶり厚さがやや大きい鋼管横補強の試験体 DC-T6D25T と炭素繊維

シート補強による試験体 DC-T12D18CF の間にほとんど差は見られず、共に残留変形を小さく抑えている。これらのことから、本実験の範囲においては、柱部材の耐震性能に及ぼす柱中央定着部のパラメータとして、定着鋼板の板厚を増加させることよりも鋼板縁からコンクリート表面までの距離を増加させることの方が、影響が大きいことが伺える。また、柱中央定着部におけるかぶりコンクリートの損傷防止策として、鋼管横補強は炭素繊維シート補強と同程度に有効であると言える。

3.3 主筋ひずみ

図-9 に各試験体の主筋ひずみを示す。各グラフは、正側載荷時に引張側となる主筋の柱脚から高さ25mmの位置で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0.86%であるのに対して、実験で計測した主筋ひずみは最大で0.3%程度であり、いずれの主筋も降伏しなかった。試験体 DC-T6D25N は $R=0.015\text{rad.}$ で引張側

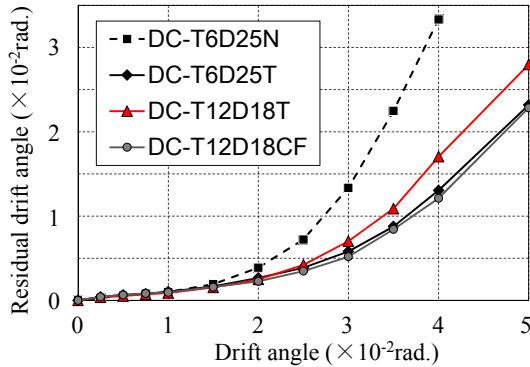


図-7 残留部材角の比較

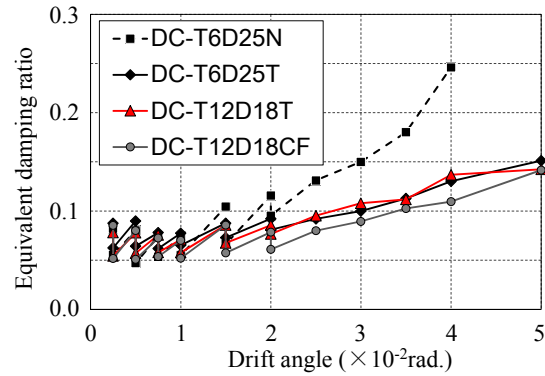


図-8 等価粘性減衰定数の比較

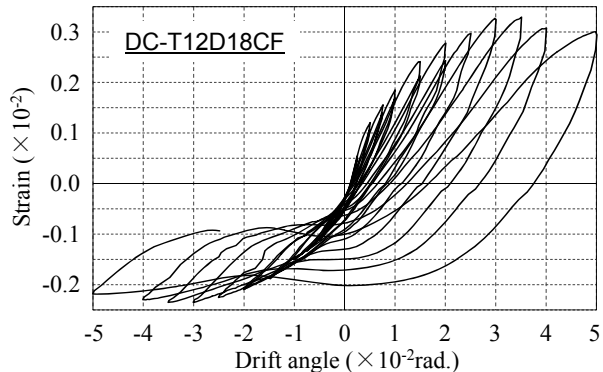
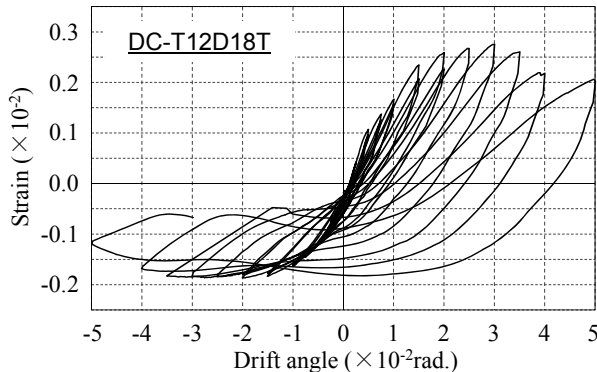
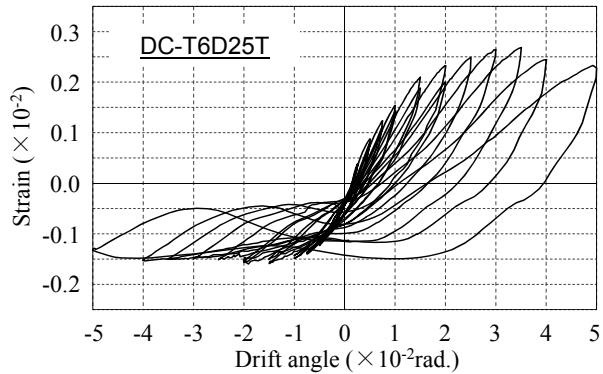
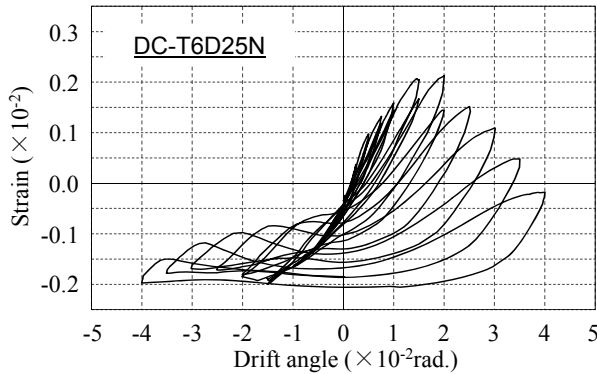


図-9 主筋ひずみの比較 (柱脚から25mm位置)

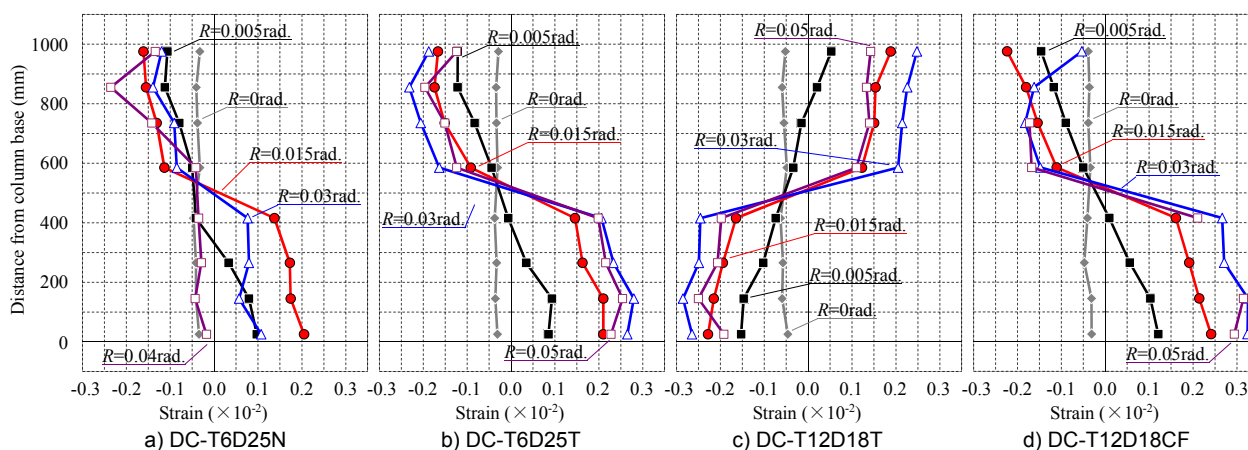


図-10 主筋ひずみ分布

主筋ひずみも最大となり、その後、変形の増加に伴い主筋ひずみは減少していった。その他の3体の試験体については、 $R=0.03\text{rad}$ 程度で引張側の主筋ひずみが最大となり、その後緩やかに減少している。いずれの試験体の主筋ひずみの履歴も図-5に示す水平力の履歴と対応しており、主筋ひずみが伸びなくなった時点で耐力が頭打ちになったことがわかる。

図-10に各試験体の主筋ひずみの鉛直方向分布を示す。なお、図には東側主筋のひずみデータを基本的に用いたが、試験体 DC-T12D18T は東側主筋のひずみデータの取得が一部不調であったため、西側主筋のひずみ分布を用いた。本主筋は付着強度が低く、付着すべりを生じやすいため、 $R=0.005\sim 0.0075\text{rad}$ 程度から柱中央定着部付近の主筋ひずみも増加し始め、 $R=0.015\text{rad}$ では柱中央定着部を境として、上下それぞれの区間でほぼ均一にひずみが発生している。そのため、柱中央定着部には大きな力が作用しており、試験体 DC-T6D25N では $R=0.015\text{rad}$ で割裂ひび割れが入った後に主筋ひずみが減少していた。その他の3体については $R=0.03\text{rad}$ 程度まで全体的に主筋ひずみが伸び続け、その後緩やかに低下した。

4. まとめ

本研究では、付着強度の低い超高強度鉄筋を主筋に用いた逆対称曲げを受ける RC 柱の耐震性能に及ぼす柱中央定着部の詳細の影響を実験的に検証した結果、以下の知見を得た。

- 1) 鋼管あるいは炭素繊維シートによる横補強を施した試験体は、いずれも部材角 0.03rad まで耐力が上昇し続けると共に残留変形を小さく抑える安定した履歴性状を示し、それ以降の変形域でも大きな耐力低下はなかった。
- 2) 柱中央定着部付近での割裂ひび割れの進展を抑制する手段として、柱を鋼管で拘束する手法は炭素繊維シートによる補強手法と同程度に有効である。

- 3) 本柱部材の耐震性能に及ぼす柱中央定着部のパラメータとして、本実験の範囲においては、定着鋼板の板厚を増加させることよりも鋼板縁からコンクリート表面までの距離を増加させることの方が、より効果的である傾向が見られた。

謝辞

本研究を進めるにあたり、神戸大学大学院生・大畑雄俊氏及び神戸大学技術職員・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) 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, 2013.7