

論文 付着強度の低い超高強度鉄筋を用いた RC 柱の耐震性能に及ぼす主筋定着詳細と横拘束方法の影響に関する研究

竹内 崇*1・藤永 隆*2・吉森裕樹*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正方形断面 RC 柱の耐震性能に及ぼす主筋定着詳細および横拘束方法の影響を明らかにすることを目的として、逆対称曲げ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。その結果、柱中央定着部においては、十分なせん断補強を行った上で柱中央定着を 2 段にすることで柱中央定着を起点とした割裂ひび割れの発生および進展を遅らせ、部材角 $R=0.03\text{rad}$ まで耐力低下を起こさせないことを確認した。鋼管拘束試験体に対して、鋼管の幅厚比が 80 程度であれば、残留変形を小さく抑えながら、大変形まで高い耐力を維持できることを明らかにした。

キーワード：レジリエンス, X 形配筋, 付着すべり, 鋼管横拘束

1. はじめに

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/mm^2 の超高強度鉄筋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により、主筋の降伏をできるだけ遅らせることで、レジリエンスの高い RC 部材の開発を目指した研究を行ってきた¹⁻³⁾。

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し、除荷後の残留部材角を小さく抑えられることが明らかになった。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示した⁴⁾。柱中央定着として上下主筋間に定着鋼板を設置しただけの試験体は、柱中央定着部付近に割裂ひび割れを生じ、水平抵抗力が頭打ちとなるが、柱を炭素繊維シートあるいは鋼管で拘束した試験体は、柱中央定着部付近での割裂ひび割れの発生および進展を抑えられることを明らかにした^{4, 5)}。また、主筋配筋形式を X 形配筋とすることで、柱中央定着部を簡潔にした上、柱中央定着部を起点とした割裂ひび割れによる影響を抑えられ、さらに鋼管拘束を施せば、柱中央定着部付近での割裂ひび割れを抑

えることが出来、柱に大変形域での高い 2 次剛性を持たせることが出来ることを示した⁶⁾。しかしながら、帯筋拘束の試験体においては、部材角 0.02rad 程度で平行配筋主筋の柱中央定着部近傍で割裂ひび割れが生じ、耐力増加が鈍くなる傾向が見られるため、柱中央定着部の詳細を検討する余地が残されている。また、X 形配筋を施した上で鋼管拘束することが有効であること確認されたが、鋼管厚さや帯筋量などの横拘束量が及ぼす影響については明らかではない。

そこで本研究は、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 RC 柱の耐震性能に及ぼす主筋定着詳細および横拘束方法の影響を明らかにすることを目的として、帯筋拘束試験体における柱中央定着詳細の影響に関する検討および鋼管拘束試験体における鋼管厚さの影響に関する検討を実験的に行った。帯筋拘束試験体に対しては、平行配筋した主筋の柱中央定着部を 2 段に分割することを検討する。2 段に分割することで、定着部に加わる力が分散し、割裂ひび割れが生じにくくなることが期待できる。鋼管拘束試験体に対しては、鋼管厚さをパラメータとした実験を行い、その影響を検討する。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

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/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

*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 神戸大学 都市安全研究センター 准教授 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 ²)	n	主筋	主筋 配筋形式	横補強形式	p_w (%)	柱中央 定着段 数	Q_{exp} (kN)	R_{exp} ($\times 10^{-2}$ rad.)
DC-2FN	2	41.6	0.33	12-U12.6 ($p_g=2.4\%$)	平行配筋	帯筋拘束 D6@30	0.85	2 段	245	2.50
DC-2FX		41.8					0.85		238	2.50
DC-XT12		43.3			X 形配筋	鋼管拘束 PL1.2 ($D/t=210$)	0.95	1 段	236	1.00
DC-XT32		43.3				鋼管拘束 PL3.2 ($D/t=80$)	2.56		297	5.00

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, p_g :主筋比, D/t :幅厚比,

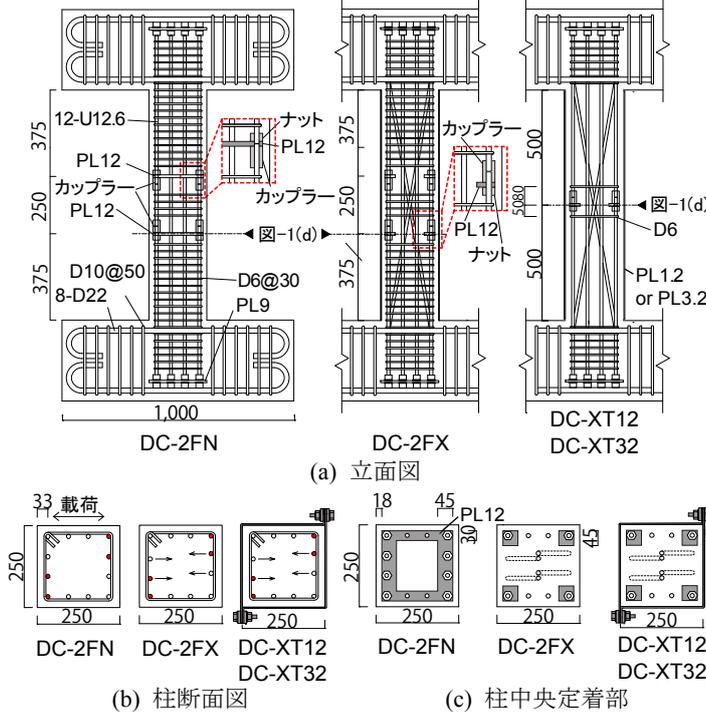


図-1 試験体の配筋詳細

表-2 鋼材の力学的特性

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	1357	0.83	1473	215
D6	SD295A	366	0.20	484	184
PL1.2	SS400	231	0.14	316	182
PL3.2		327	0.19	422	198

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 :引張強さ, E_s :弾性係数

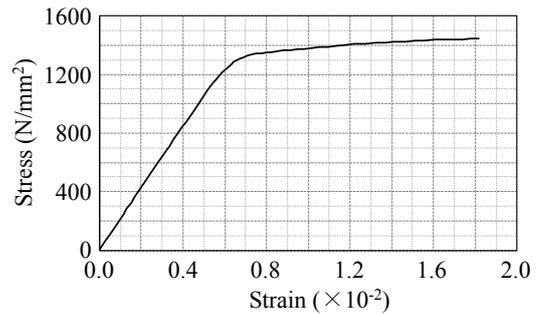


図-2 超高強度鉄筋の応力ひずみ関係

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。柱を立てた状態で打設が行えるように型枠を組み、縦方向に打設を行った。

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附着性状を有する。主筋すべりを生じやすく、折り曲げ定着のみでは十分に定着できないため、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。試験体は 1 体が全て平行配筋の試験体で、残り 3 体が最外縁内側の主筋を X 形配筋にした試験体である。X 形配筋は上下スタブ主筋位置間を折り曲げた。柱中央定着部に関して、帯筋拘束の試験体 2 体は 2 段設け、鋼管拘束の試験体 2 体は 1 段設けた。試験体 DC-2FN は、厚さ 12mm の 1 枚の定着鋼板 (SS400) を配し、この鋼板を介して、荷重方向に対して 1 列目と 4 列目の主筋に

ついては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。荷重方向に対して、2 段目と 3 段目に位置する主筋は、柱中央定着を設けず、通し鉄筋とした。その他 3 体の試験体に関しては、4 隅の主筋に対して、それぞれに定着鋼板 (SS400) を配し、機械式定着とした。帯筋拘束の試験体は、異形鉄筋 D6 を 30mm 間隔で配筋した。鋼管拘束の試験体は、帯筋をほとんど配さず、鋼管のみで横拘束しており、試験体 DC-XT12 は厚さ 1.2mm (幅厚比 210)、試験体 DC-XT32 は厚さ 3.2mm (幅厚比 80) の鋼管で拘束した。また鋼管拘束は、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施した。ボルトは M12 を片側 23 個取り付け、それぞれ 100Nm のトルクを導入した。鋼管横拘束は、コンクリートの拘束と共に柱中央定着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。表-2 に使用した鋼材の力学特性を、図-2 に超高強度鉄筋の応力ひずみ関係を示す。

2.2 加力及び測定方法

図-3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、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。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2回ずつ、部材角0.025, 0.03, 0.035, 0.04と0.05rad.の変位レベルでの1回ずつの正負交番繰返し載荷である。また、主筋、帯筋および鋼管にひずみゲージを貼付し、ひずみを測定した。主筋については、隅部の平行配筋の主筋は材軸方向に沿って6箇所(試験体DC-2FNとDC-2FXは8箇所)、X形配筋の主筋は材軸方向に沿って5箇所、図-1(b)中に赤で示す4本の主筋に1枚ずつ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7箇所にゲージを貼付した。試験体DC-XT12とDC-XT32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5箇所に、フランジ面については3箇所の位置にひずみゲージを貼付した。

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-2FNおよびDC-2FXの損傷状況の変遷、および試験体DC-XT12とDC-XT32の載荷終了後に鋼管を取り外した後の損傷状況を示す。鋼管拘束を施していない試験体は、いずれも部材角 $R=0.0025\text{rad.}$ のサイクルの途中で曲げひび割れが確認され、その後、 $R=0.0075\text{rad.}$ のサイクルで、柱脚あるいは柱頭において圧縮側で縦ひび割れが確認された。試験体DC-2FNは部材角 $R=0.0075\text{rad.}$ のサイクルで2列目の主筋に沿うようなひび割れが発生し、部材角 $R=0.01\text{rad.}$ のサイクルで下段主筋定着部付近に割裂ひび割れが発生した。部材角 $R=0.015\text{rad.}$ のサイクルで圧縮側コンクリートの損傷が顕

著になった他、柱上部に斜めひび割れが発生した。部材角 $R=0.025\text{rad.}$ のサイクルでかぶりコンクリートが大きく剥離し、割裂ひび割れの幅も大きくなった。部材角 $R=0.05\text{rad.}$ で柱頭から上段定着部にかけて生じたせん断ひび割れが大きく開き、せん断破壊に至った。

試験体DC-2FXは部材角 $R=0.01\text{rad.}$ のサイクルで2列目の主筋に沿うようなひび割れの発生が確認された。部材角 $R=0.015\text{rad.}$ のサイクルで圧縮側コンクリートの損傷が顕著になり、斜めひび割れが多数発生した。部材角 $R=0.02\text{rad.}$ のサイクルで下段主筋定着部付近に割裂ひび割れが発生し、以降、割裂ひび割れ幅は急増し、2列目主筋に沿ったひび割れと繋がった。その結果、2段の柱中央定着間の領域のコンクリートが、2列目と3列目の主筋に沿ったひび割れで縦に3分割したように、コンクリートが分かれ、柱中央部でせん断破壊した。

試験体DC-XT12は部材角 $R=0.01\text{rad.}$ のサイクルで水平耐力が急激に低下した。載荷後、鋼管を取り外して観察したところ、大きなせん断ひび割れが生じており、この時点で鋼管内部においてコンクリートのせん断破壊が生じたものと思われる。また部材角 $R=0.025\text{rad.}$ のサイクルからは、鋼管の南北面に波状のせん断座屈が現れた。試験体DC-XT12は帯筋拘束試験体と p_w が同程度になるように鋼管厚さ1.2mmと設定したが、幅厚比が210と大きいため、拘束効果を得られなかったものと思われる。試験体DC-XT32は部材角 $R=0.04\text{rad.}$ のサイクルで鋼管端部がスタブと接触するのを確認した。所定の載荷を終了しても、耐力低下が見られなかったため、追加して部材角 $R=+0.075\text{rad.}$ まで片振り載荷を行い、部材角 $R=+0.07\text{rad.}$ で耐力低下し始めることを確認した。載荷後、鋼管を取り外し、損傷状況を確認したところ、柱頭および柱脚部のコンクリートの損傷が顕著であった他、柱中央定着部を起点とした割裂ひび割れや斜めひび割れが発生していることを確認した。

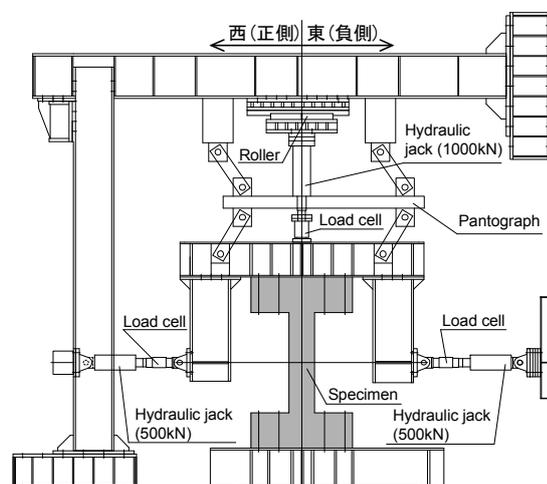


図-3 載荷装置概要

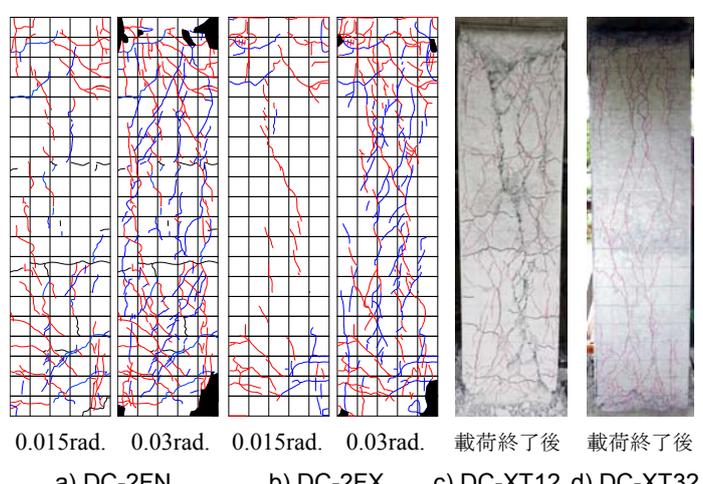


図-4 損傷状況

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-部材角関係を示す。図中の破線は P- Δ 効果による耐力の低下ラインを示す。試験体 DC-2FN と DC-2FX は前述のように破壊性状は異なるが、 $R=0.025\text{rad}$ のサイクルで最大耐力に達し、その後耐力が低下していくなど、同様の履歴性状を示した。試験体 DC-XT12 は $R=0.01\text{rad}$ のサイクルでせん断破壊し、急激な耐力低下を起こしたが、DC-XT32 は部材角 $R=0.04\text{rad}$ のサイクルまで耐力を維持し続け、その後、鋼管端部がスタブと接触し、さらに水平抵抗力が増加した。

柱中央定着を分割した影響および鋼管厚さの影響を検討するために、図-6 に本実験の試験体と既往の研究の試験体の水平力-部材角関係の包絡線の比較を示す。比較対象とした3体の試験体は文献6で報告されている試験体であり、試験体 DC-N と試験体 DC-4DX は帯筋拘束

の試験体であり、それぞれ主筋を平行配筋としたものと X 形配筋としたもので、柱中央定着は共に1段のみである。試験体 DC-2DXT は D6 を 30mm 間隔で帯筋拘束した上で厚さ 4.5mm の鋼管で追加拘束した試験体である。また主筋は X 形配筋としているが、主筋の折り曲げ区間は柱中央部付近の 2D 区間のみである。その他の条件は本実験と同等であり、詳細については文献6を参照されたい。図-6a から帯筋拘束かつ平行配筋の試験体においては、柱中央定着を1段から2段にすることで、柱中央定着を起点とした割裂ひび割れの発生および進展を遅らせることが出来、最大耐力発揮部材角が大きくなったことが分かる。図-6b に示すように帯筋拘束かつ X 形配筋の試験体においては、柱中央定着を2段にすることで、早期の耐力低下を引き起こす結果となった。これは損傷状況で記述したように、定着部を2段に分けることで、柱中央部のコンクリートを分割する割裂ひび割れが発生

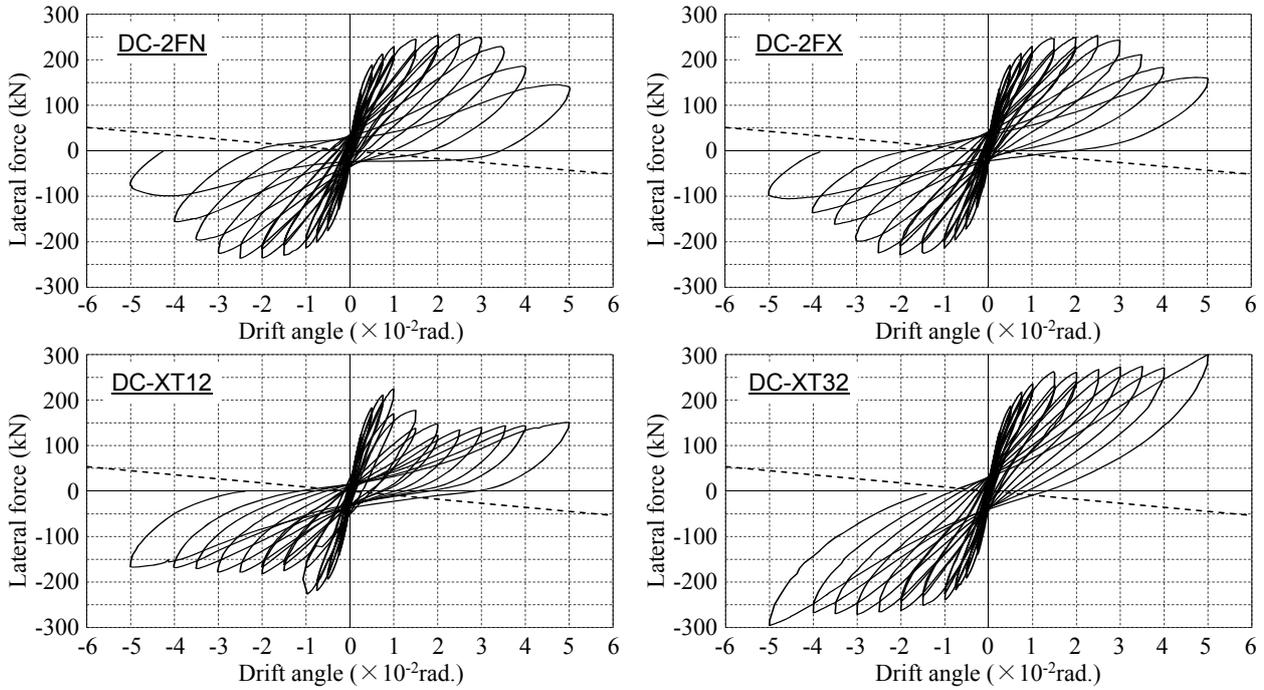


図-5 水平力-部材角関係

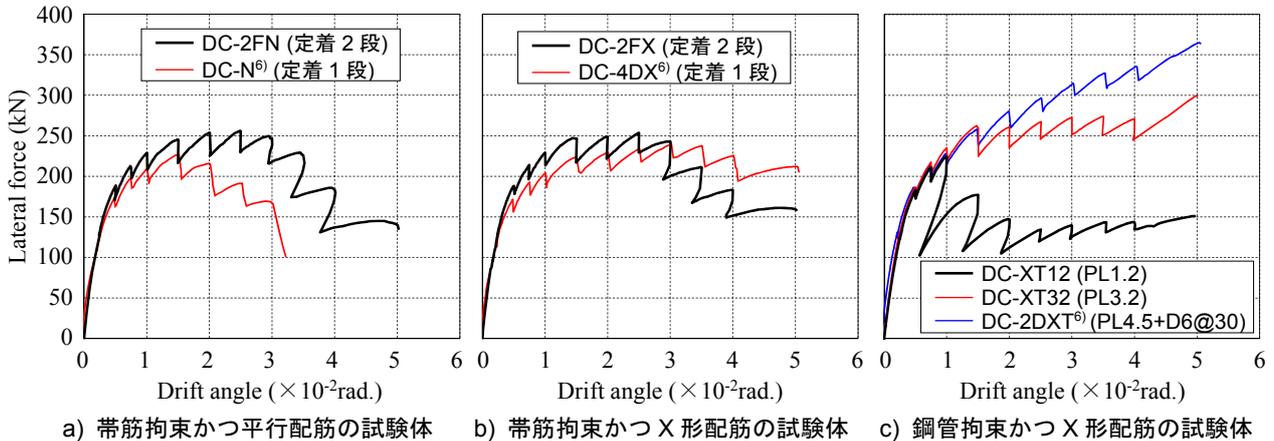


図-6 水平力-部材角関係の包絡線の比較

したためと考えられる。一方で、この破壊形式に及ぼす主筋配筋の影響は小さいものと思われるため、定着板を主筋毎に分割せず試験体 DC-2FN のように 1 枚繋がったものを用いれば、防げるものと思われる。図-6c に示すように、鋼管拘束かつ X 形配筋の試験体は、 $R=0.01\text{rad}$ のサイクルまではほとんど差がないことが分かる。しかしながら、試験体 DC-XT12 はせん断破壊により耐力が低下し、試験体 DC-XT32 についても、 $R=0.015\text{rad}$ の 2 回目のサイクルから、試験体 DC-2DXT よりも耐力が劣り始めたことが分かる。

図-7 に各試験体の残留部材角(R_{res})を示す。また比較

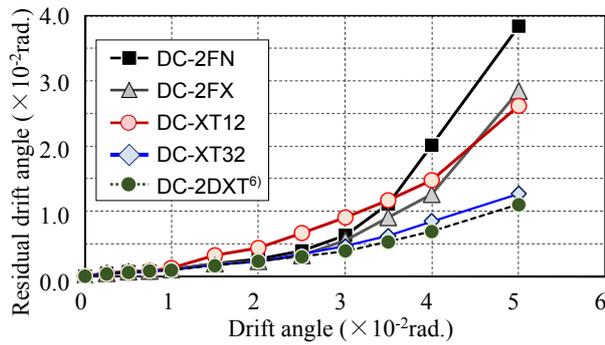
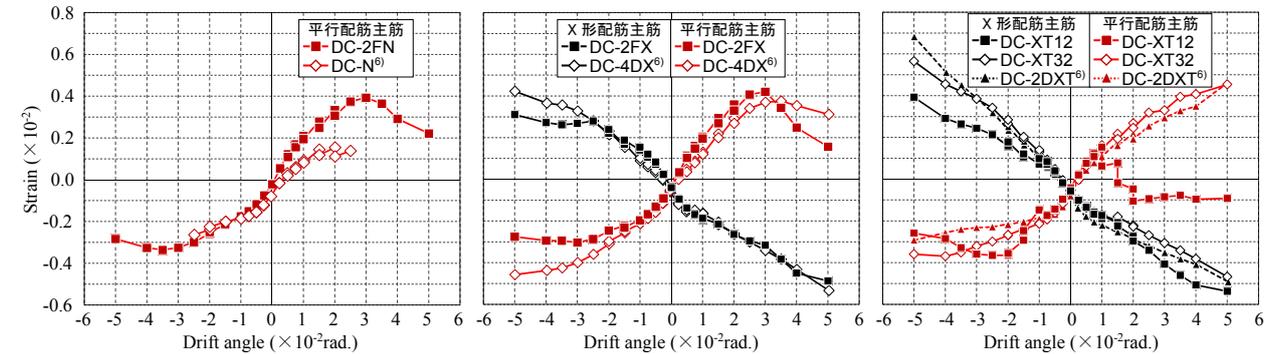


図-7 残留部材角の比較



a) 帯筋拘束かつ平行配筋の試験体 b) 帯筋拘束かつ X 形配筋の試験体 c) 鋼管拘束かつ X 形配筋の試験体

図-8 各サイクルピークでの主筋ひずみの値の比較 (柱頭柱脚から 25mm の位置で計測)

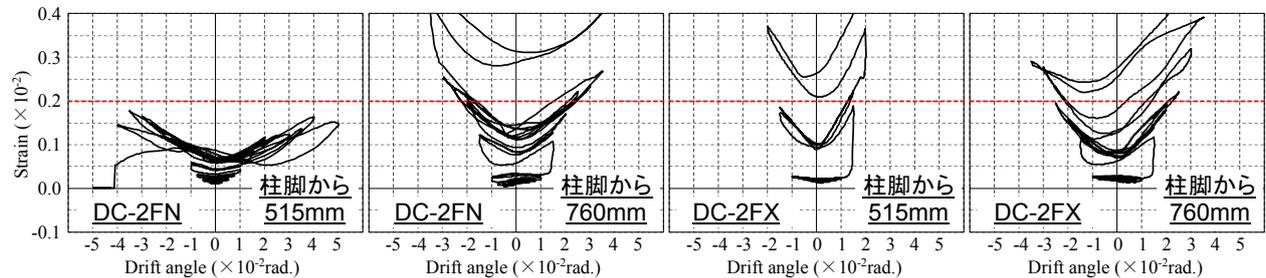


図-9 帯筋拘束試験体の帯筋ひずみの履歴の比較

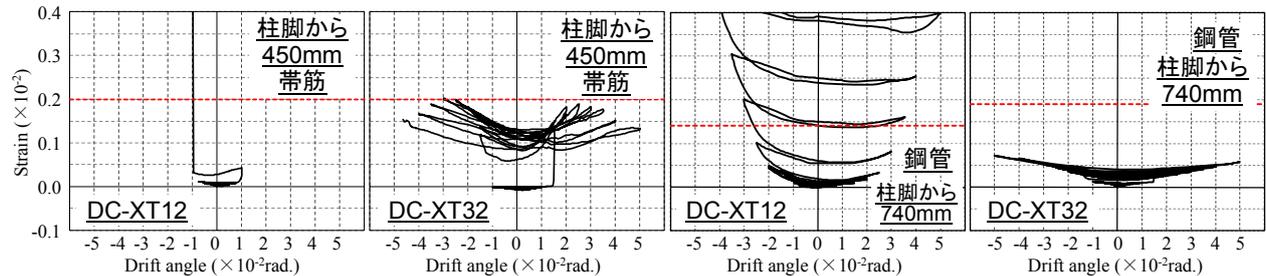


図-10 鋼管拘束試験体の帯筋ひずみおよび鋼管ひずみの履歴の比較

として、既往の研究の試験体 DC-2DXT の結果も併せて示す。部材角 $R=0.01\text{rad}$ までは試験体間の差はほとんどないが、試験体 DC-XT12 は $R=0.015\text{rad}$ 以降でせん断破壊したため、 R_{res} が増加していった。試験体 DC-2FN 及び DC-4FX においても、部材角 $R=0.03\text{rad}$ から増加し始めており、隅部の主筋の定着効果の劣化の影響を受け始めたものと思われる。試験体 DC-XT32 は、試験体 DC-2DXT と同程度に残留部材角を小さく抑え続けられていることが分かる。

3.3 主筋ひずみ

図-8 に各試験体の各サイクル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、柱脚あるいは柱頭から高さ 25mm の断面位置における平行配筋および X 形配筋の主筋のひずみを示している。いずれの主筋も降伏しなかった。帯筋拘束かつ平行配筋の試験体においては、定着を 2 段とすることで、主筋ひずみを部材角 $R=0.03\text{rad}$ まで伸ばし続けることが出来た。帯筋拘束かつ X 形配筋の試験体においては、定着を 2 段としたことによる損傷が生じたため、部材角 $R=0.025\sim 0.03\text{rad}$ で平行配筋と X 形配筋の主筋ひずみが共に低下している。鋼管拘束かつ X 形配筋の試験体においては、試験体 DC-XT12

は早期にせん断破壊したため、主筋ひずみが伸びにくくなっているが、試験体 DC-XT32 と DC-2DXT の主筋ひずみの増加傾向に大きな差は見られず、試験体 DC-XT32 は、試験体 DC-2DXT と同程度に柱中央定着部の損傷を抑制できていたものと考えられる。

3.4 帯筋ひずみおよび鋼管ひずみ

図-9 に試験体 DC-2FN と DC-2FX の柱脚から 515mm (柱中央付近) と 760mm (上部付近) の帯筋ひずみの履歴を示す。図中の赤破線は降伏ひずみを示す。試験体 DC-2FN は $R=0.015\text{rad}$ で柱上部にせん断ひび割れが発生したことと対応するように柱脚から 760mm の位置での帯筋ひずみが増加し始め、 $R=0.025\text{rad}$ で降伏ひずみに達した。試験体 DC-2FX は柱脚から 515mm の位置での帯筋ひずみも降伏した。これは試験体 DC-2FX は柱中央定着部のせん断抵抗性能が劣っていたためと考えられる。

図-10 に試験体 DC-XT12 と DC-XT32 の柱脚から 450mm の帯筋ひずみと柱脚から 740mm の位置での鋼管周方向ひずみの履歴を示す。試験体 DC-XT12 はせん断破壊した $R=-0.01\text{rad}$ で急激に帯筋ひずみが増加していることが分かる。また、試験体 DC-XT32 においても $R=0.015\text{rad}$ で帯筋ひずみが 0.1%程度増加している。このサイクルで耐力の増加が鈍くなったことと併せて考えると、柱内部においてせん断ひび割れ等の柱の耐力に影響を及ぼすひび割れが入り、耐力の増加が鈍くなったものの、鋼管の作用によってひび割れの進展が抑制されたものと考えられる。鋼管ひずみは、図-10 のように試験体 DC-XT12 は降伏しており、また座屈の発生も見られたが、試験体 DC-XT32 は最も大きなひずみが生じた点でも $R=-0.05\text{rad}$ まで降伏ひずみに達しておらず、厚さは十分であったと思われる。

これらのことをまとめると、試験体 DC-2DXT と試験体 DC-XT32 の差異は、主筋ひずみによるものではなく、鋼管内部のコンクリートの損傷により生じたものと思われる。一方で、試験体 DC-XT32 の鋼管ひずみは降伏ひずみに達しておらず、厚さは十分であったと思われる。そのため、試験体 DC-2DXT のような高い 2 次剛性を求めるには、ある程度帯筋を加えることが有効と思われる。

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 RC 柱の耐震性能に関して、帯筋拘束試験体に対する柱中央定着詳細の影響に関する検討および鋼管拘束試験体に対する鋼管厚さの影響に関する検討を実験的に行い、以下の知見を得た。

1) 平行配筋の試験体に対しては柱中央定着を 2 段にすることで柱中央定着を起点とした割裂ひび割れの発生および進展を遅らせ、部材角 $R=0.03\text{rad}$ まで耐力

低下を起こさせないことを確認した。

- 2) X 形配筋の試験体に対しては、定着板を主筋毎に設けたため、柱中央定着を 2 段にした際に、定着部を起点として定着部の間でせん断破壊が生じ、柱中央定着を 2 段にする利点が得られなかった。柱中央定着部においては、十分なせん断補強を行うことに注意する必要がある。
- 3) X 形配筋した鋼管拘束試験体に対して、幅厚比 210(厚さ 1.2mm)では不十分であったが、80(厚さ 3.2mm)であれば、残留変形を小さく抑えながら、大変形まで高い耐力を維持できることを明らかにした。さらに高い 2 次剛性を求める場合は、ある程度帯筋を加えることが有効と思われる。

謝辞

本研究を進めるにあたり、神戸大学学部生・大仲菜保子氏、神戸大学大学院生・直川周平氏及び神戸大学技術職員・金尾優氏の多大な協力を得た。本実験の試験体を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) 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) 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
- 5) 竹内崇, 張建偉, 藤永隆, 孫玉平: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.2, pp.109-114, 2014.7
- 6) 竹内崇, 藤永隆, 東山諒太, 孫玉平: 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 柱の耐震性能に及ぼす主筋配筋形式の影響に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.2, pp.145-150, 2015.7