

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 柱の耐震性能に及ぼす主筋配筋形式の影響に関する研究

竹内 崇*1・藤永 隆*2・東山諒太*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配筋形式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、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、大変形域まで安定した耐力を維持し、残留変形を小さく抑えることが出来ることと、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。

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, せん断耐力

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¹⁻⁴⁾。

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 となる大変形域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明らかにした⁵⁾。柱中央部に滑り止めを設けない場合、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が、すべり止めを設けた場合は、その位置の定着板に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。これまでの研究で、柱中央定着として上下主筋間に定着鋼板を挟み込んだだけの試験体は、部材角が 0.015rad 程度で柱中央定着部付近

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、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^{5,6)}。

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、主筋の配筋形式の影響を明らかにすることを目的として、主筋の一部を X 形配筋とした試験体の耐震性能を実験的に調べた。主筋を折り曲げて X 形に配筋することで、柱頭側と柱脚側の圧縮鉄筋どうしおよび引張鉄筋どうしが接続されるため、柱中央で主筋のすべり止め対策を講じる必要なく、主筋応力が発生し、柱中央定着部で柱断面を拘束しなくても安定した履歴性状を期待できる。

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 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。

主筋には、規格降伏強度 1275N/mm^2 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、

*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	帯筋	追加 横拘束	Q_{exp} (kN)	R_{exp} ($\times 10^{-2}$ rad.)
DC-N	2	42.9	0.33	12-U12.6 ($p_g=2.4\%$)	直線	D6@30 ($p_w=0.85\%$)	—	219	1.49
DC-2DX		40.4			X形(2D区間)		—	244	2.75
DC-4DX		40.4			X形(4D区間)		—	232	3.00
DC-2DXT		42.5			X形(2D区間)		鋼管 PL4.5	357	4.99

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、 p_w ：帯筋比、 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）

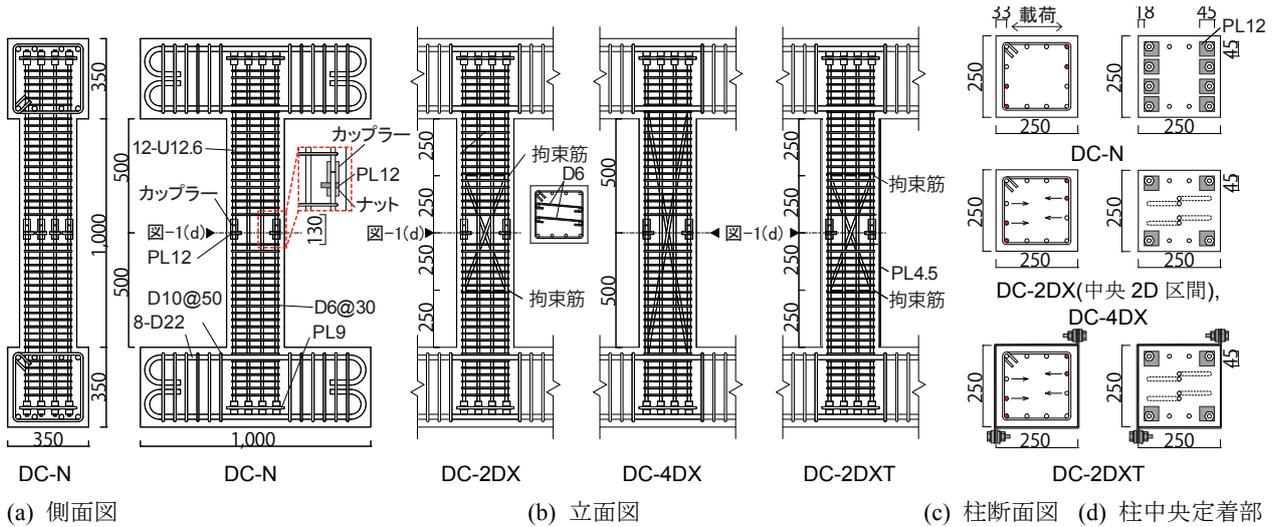


図-1 試験体の配筋詳細

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。4隅の主筋は、柱中央部に幅45mm厚さ12mm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。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。最外縁内側の主筋の配筋形式が実験変数であり、1体は従来の直線状の配筋とし、4隅と同様の柱中央定着を設けた。残り3体はX形配筋とし、2体は柱中央2D（D：柱せい）区間を折り曲げ、1体は上下スタブ主筋位置間のおよそ4D区間を折り曲げた。いずれの試験体も帯筋として、異形鉄筋D6を30mm間隔で配筋したが、柱中央定着部近傍はカップラーや定着鋼板により帯筋を配置できなかったため、130mm程度帯筋間隔が空いている。2D区間をX形配筋とした試験体は、折り曲げ開始位置に拘束筋として、帯筋と同じD6を追加で配置している。また、試験体DC-2DXTは、さらに柱外部を厚さ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拘束した。鋼管横拘束は、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。表-2に使用した鋼材の力学特性を示す。

2.2 加力及び測定方法

図-2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り返し荷重である。

主筋、せん断補強筋および拘束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、隅部の鉄筋は材軸方向に沿って6箇所、内側の鉄筋は材軸方向に沿って9箇所（試験体DC-Nは8箇所）、図-1(c)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6箇所に計12枚のゲージを貼付した。拘束筋は材軸に沿って2

個所に計2枚のゲージを貼付した。試験体 DC-2DXT 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-3に試験体 DC-N, DC-2DX および DC-4DX の損傷状況の変遷, および試験体 DC-2DXT 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, $R=0.0075\sim 0.01\text{rad}$ の載荷サイクルで, 柱脚および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-N は部材角 $R=0.01\text{rad}$ のサイクルで柱中央部の主筋定着部付近で割裂ひび割れが発生した。部材角 $R=0.015\text{rad}$ のサイクルで斜めひび割れが発生し, 部材角 $R=0.03\text{rad}$ のサイクルで, $R=+0.03\text{rad}$ 到達直前に, 柱中央部から $-150\sim +200\text{mm}$ の位置に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-2DX は部材角 $R=0.02\text{rad}$ のサイクルで隅部主筋定着部付近での割裂ひび割れおよび斜めひび割れが発生し, 部材角 $R=0.035\text{rad}$ のサイクルで X 形主筋の折り曲げ位置付近のかぶりコンクリートの浮き上がりを確認した。その後, 部材角 $R=0.05\text{rad}$ のサイクルにおいて, 部材角 $R=+0.039\text{rad}$ で柱頭から 300mm の区間に発生してい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-4DX は部材角 $R=0.02\text{rad}$ のサイクルで割裂ひび割れおよび斜めひび割れが発生し, その後, 損傷が進展していったが, 大きな耐力低下はなく, 所定

の載荷を終了した。試験体 DC-2DXT は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 $R=+0.08\text{rad}$ まで片振り載荷を行い, 部材角 $R=+0.075\text{rad}$ 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, 柱頭および柱脚部からせん断ひび割れが発生していることが確認された。ただし, せん断ひび割れが1方向にのみ発生していることから, このひび割れは追加載荷時に生じたものと思われる。

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	1377	0.84	1463	215
D6	SD295A	384	0.22	510	191
PL4.5	SS400	376	0.20	462	208

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

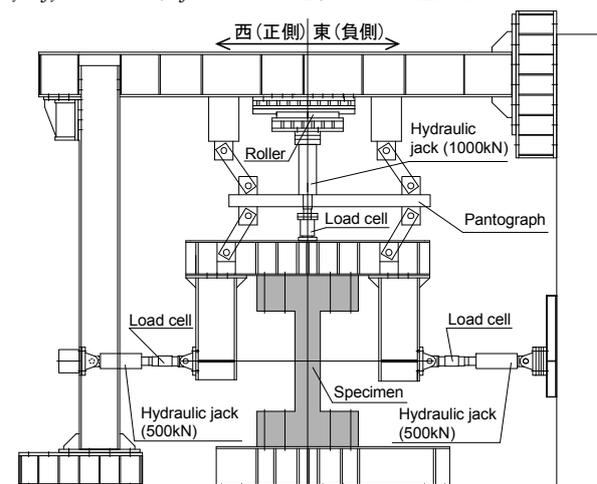


図-2 載荷装置概要

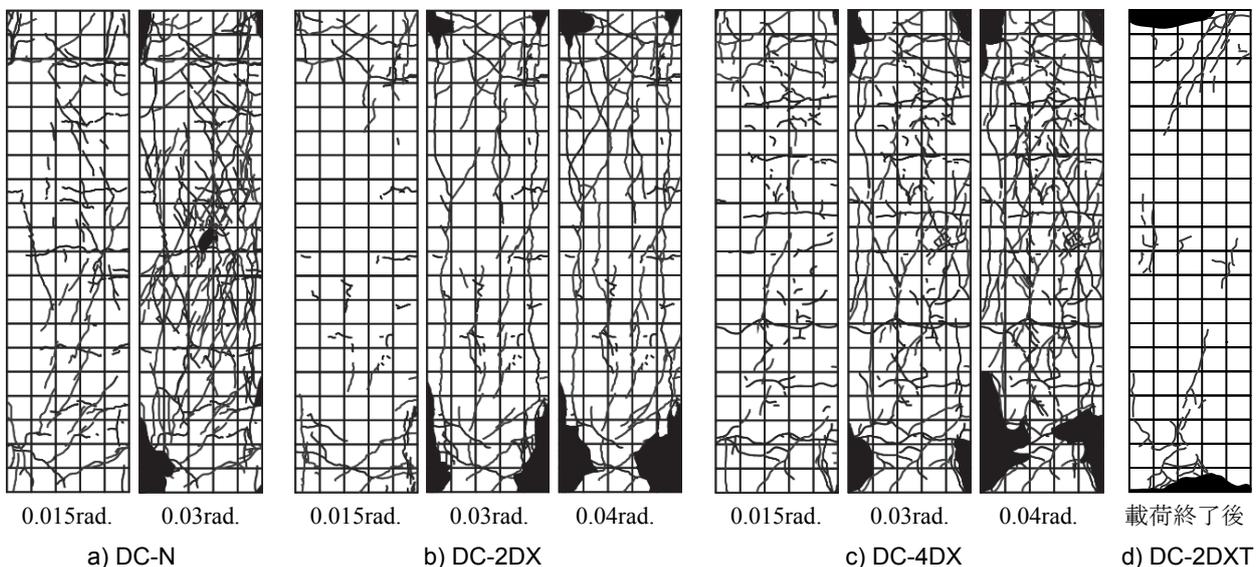


図-3 損傷状況

3.2 繰返し履歴性状

図-4 に実験で得られた各試験体の水平力-部材角関係を、図-5 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-4 中の破線は P- Δ 効果による耐力の低下ラインを示す。 $R=0.015\text{rad}$ 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-N は $R=0.015\text{rad}$ において早期に最大耐力に達し、その後部材角の増大に伴い、水平抵抗力が大きく低下した。これは部材角 $R=0.01\text{rad}$ において発生した柱中央定着部付近の割裂ひび割れにより、柱中央部での主筋の定着の効果が低下したためである。一方で、試験体 DC-2DX と DC-4DX は、一部の主筋を、柱中央定着の影響を受けない X 形配筋としているため、割裂ひび割れ発生後も大きな耐力低下を生じておらず、主筋配筋形式を X 形配筋にすることによ

り、柱中央定着を設けずに水平耐力を維持させることが出来たことが分かる。試験体 DC-2DXT は、最終サイクルまで耐力が上昇し続ける高い 2 次剛性を示した。試験体 DC-2DXT は図-3(d)の損傷状況においても、柱中央定着部の損傷があまり見られなかったことから、鋼管拘束により柱中央定着部の損傷が抑えられ、4 隅の主筋においても大変形時まで柱中央部での主筋の定着効果が続いたものと思われる。

図-6 に各試験体の残留部材角(R_{res})を示す。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-N は $R=0.015\text{rad}$ 以降で柱中央部での主筋の定着の効果が失われ始めたため、 R_{res} が増加していった。試験体 DC-2DX 及び DC-4DX においても、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。また、試験体 DC-2DX

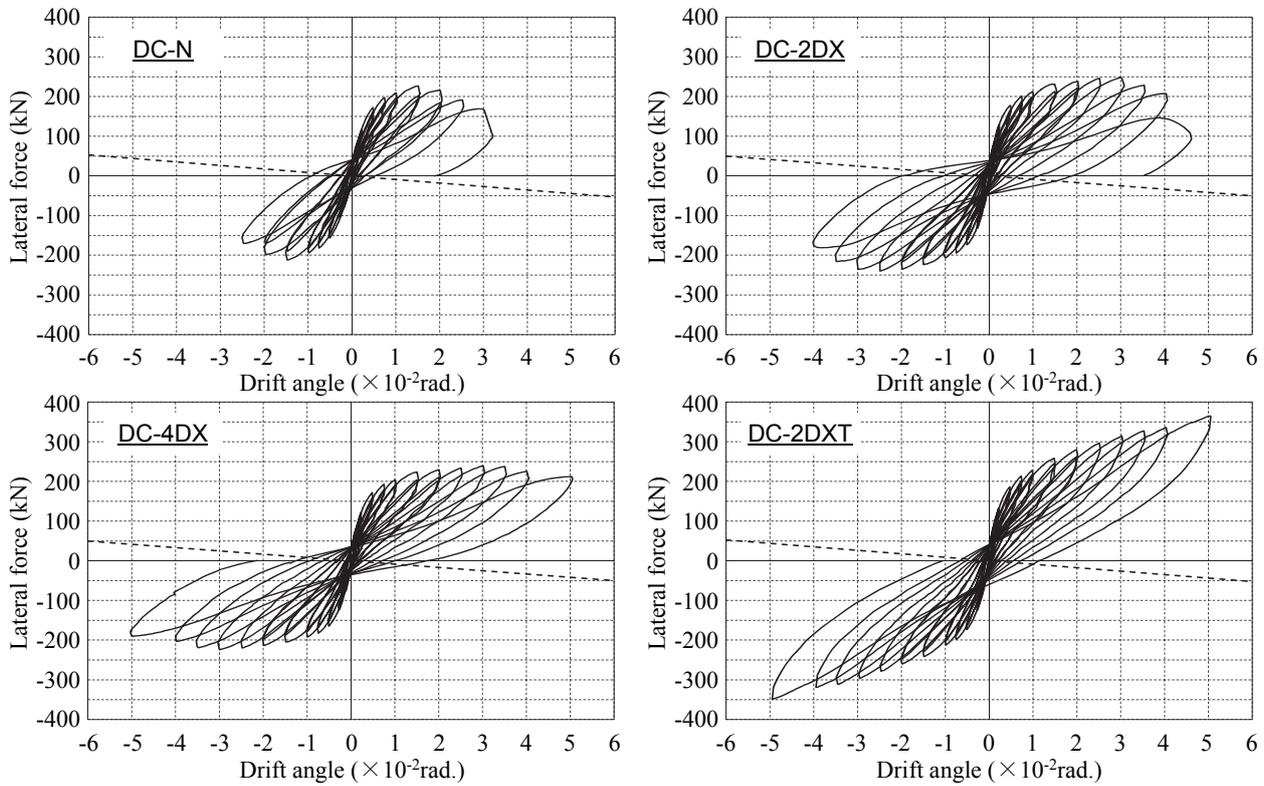


図-4 水平力-部材角関係

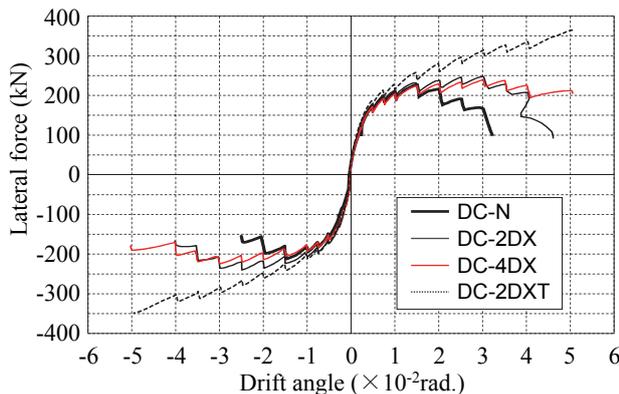


図-5 水平力-部材角関係の包絡線の比較

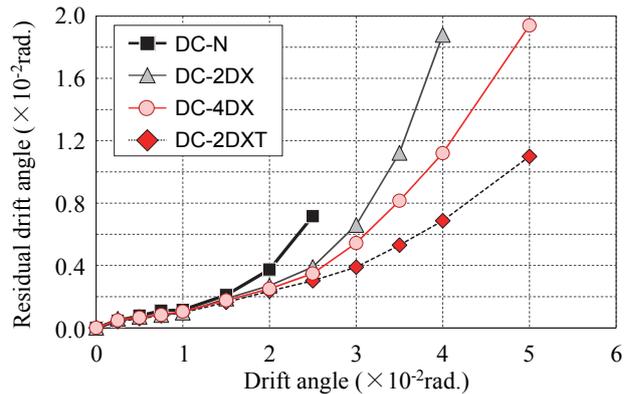


図-6 残留部材角の比較

の方が試験体 DC-4DX より残留変形が大きくなったのは、試験体 DC-2DX においては柱頭および柱脚から 1D の位置で主筋を折り曲げた影響で、同位置のかぶりコンクリートが押し出される形で損傷を受けたためと考えられる。試験体 DC-2DX は残留部材角を低く抑え続け、部材角 $R=0.04\text{rad}$ においても残留部材角を経験部材角の 17% 程度に抑えている。

3.3 主筋ひずみ

図-7 に各試験体の主筋ひずみの履歴を示す。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隅部の主筋および内側の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 0.7% 程度であり、いずれの主筋も降伏しなかった。試験体 DC-N は隅部と内側の主筋共に、部材角 $R=0.015\sim 0.02\text{rad}$ で引張側主筋ひずみが最大となり、その後低下している。これは前述のように、柱中央定着部付近の割裂ひび割れにより、柱中央部での主筋の定着の効果が失われたためである。試験体 DC-2DX においては、隅部の主筋ひずみは部材角 $R=0.02\text{rad}$ 程度で最大となり低下しているが、X 形配筋とした内側の主筋は部材角 $R=0.035\text{rad}$ 程度まで伸び続けている。その後、主筋ひずみが低下したのは、主筋折り曲げ箇所での損傷の影響と思われる。試験体 DC-4DX は内側の X 形配筋の主筋が部材角 $R=0.05\text{rad}$ まで伸び続けており、大変形時まで主筋の抵抗力が上昇し続けていたことが分かる。試験体 DC-2DX においては、

鋼管拘束により、隅部主筋の柱中央定着部の損傷および、主筋折り曲げ箇所でのコンクリートの損傷が抑えられ、隅部主筋、内側主筋共に、最終サイクルまで主筋ひずみが増加し続けている。このことにより、高い水平耐力を発揮し、残留変形を小さく抑えられたものと考えられる。

4. せん断耐力に関する考察

本研究においては、柱中央定着部を簡潔にすることを目的として一部の主筋を X 形配筋にしているが、それによりせん断耐力の上昇も期待できる。表-3 および図-8 に、試験体 DC-N, DC-2DX および DC-4DX のせん断耐力の一覧、および実験結果との比較をそれぞれ示す。試験体 DC-N のせん断耐力は、式(1)に示す修正大野・荒川式⁷⁾により計算し、試験体 DC-2DX 及び DC-4DX のせん断耐力は式(1)に、式(2)に示す X 形配筋部のせん断耐力⁸⁾を加えて算定した。

$$cQ_{su} = \left\{ \frac{0.115k_u k_p (f'_c + 17.6)}{M/(Qd) + 0.115} + 0.85\sqrt{p_w \sigma_{wy}} + 0.1\sigma_0 \right\} bj \quad (1)$$

ここで、 k_u, k_p : 断面寸法による補正係数 ($k_u=0.9, k_p=0.82p_t^{0.23}$), p_t : 引張鉄筋比 (%), d : 有効せい, σ_w : 軸力による平均軸応力度, j : 応力中心間距離 ($=7/8d$)。

$$dQ_{su} = 2\gamma \cdot d_a a_t \cdot d \sigma_y \cdot \sin \theta \quad (2)$$

ここで、 γ : 反曲点高さ比による補正係数 ($\gamma=1$), $d_a a_t$: X 形主筋の引張鉄筋の断面積, $d \sigma_y$: X 形主筋の降伏強度, θ : X 形主筋が材軸となす角。

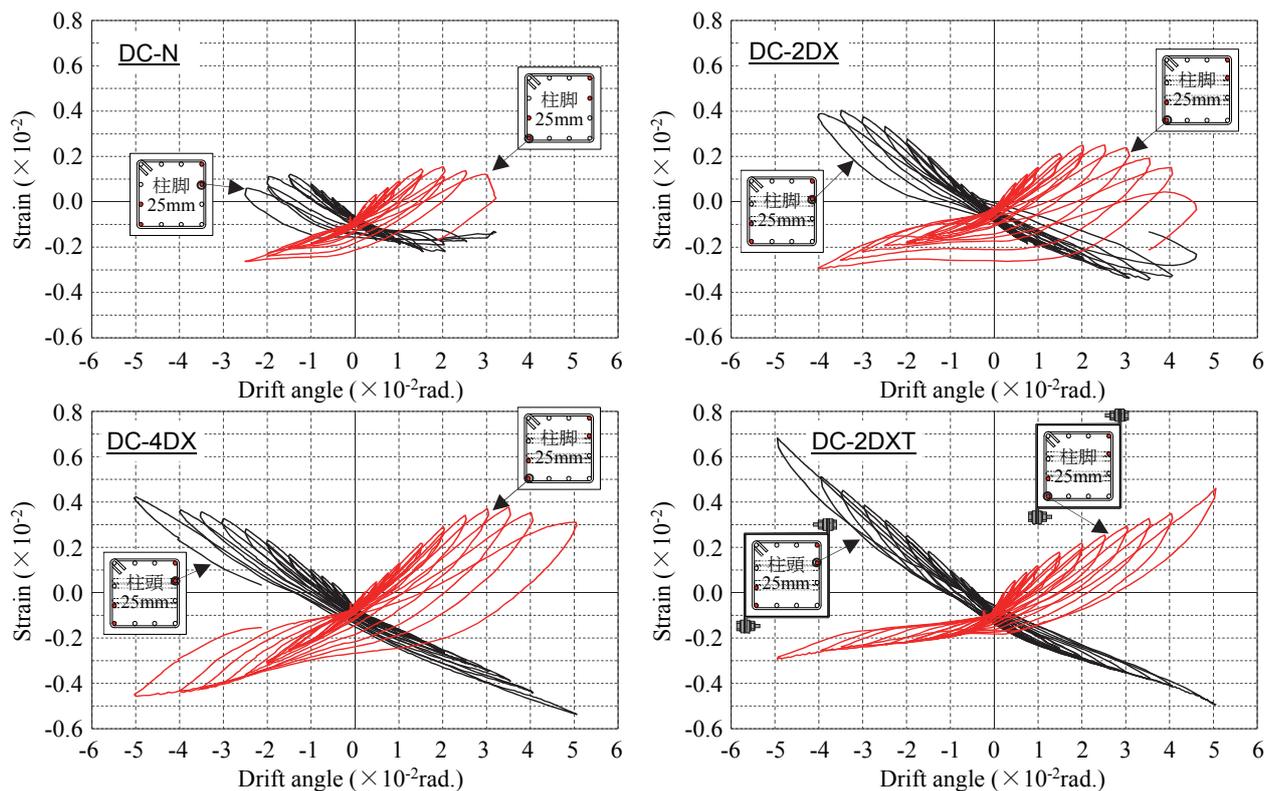


図-7 主筋ひずみの比較

表-3 耐力一覧

試験体名	Q_{exp} (kN)	cQ_{su} (kN)	dQ_{su} (kN)	$cQ_{su}+dQ_{su}$ (kN)
DC-N	219	251	-	251
DC-2DX	244	243 (227*)	238	465
DC-4DX	232	227*	115	342

Q_{exp} : 最大水平力実験値(正負平均)
 cQ_{su} : 式(1)による計算値(*は X 形配筋部の鉄筋を除いた計算値),
 dQ_{su} : 式(2)による計算値

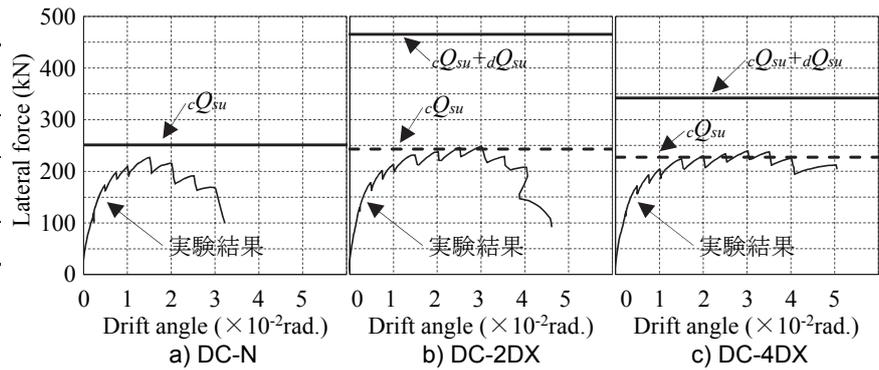


図-8 せん断耐力の比較

試験体 DC-N は式(1)より算出したせん断耐力より低い耐力でせん断破壊に至った。試験体 DC-N のせん断耐力の計算において帯筋間隔を 30mm として計算したが、実験でのせん断破壊は柱中央部の帯筋間隔が 130mm 空いている箇所が起点となっており、そのため計算通りの耐力が出なかったものと考えられる。試験体 DC-2DX は式(1)により計算した耐力と実験結果がほぼ一致した。実験でのせん断破壊も X 形配筋の区間ではない柱頭から 1D の範囲で生じており、この試験体では X 形配筋にすることによるせん断耐力の上昇効果は見られなかった。試験体 DC-4DX は、実験においてせん断破壊していないため、実際のせん断耐力は不明であるが、式(1)により計算した耐力を上回ってもせん断破壊に至っておらず、X 形配筋としたことによるせん断耐力の上昇効果が得られたものと考えられる。

5. 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主筋配筋形式の影響を実験的に検証し、以下の知見を得た。

- 1) 一部の主筋の配筋形式を X 形配筋とすることで、柱中央定着部を簡潔にした上で、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、大変形時まで安定した耐力を維持し、残留変形を小さく抑えることが出来る。またさらに、鋼管拘束を施すことで、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、高い 2 次剛性を持たせることが出来る。
- 2) X 形配筋とした主筋の折り曲げ区間を柱中央付近 2D 区間とした場合、主筋折り曲げ位置でのコンクリートの損傷が発生する他、X 形配筋とすることによるせん断耐力の上昇を得られなかったが、折り曲げ区間を柱全長 4D 区間とした場合は、X 形配筋によるせん断耐力上昇効果が得られた。

謝辞

本研究を進めるにあたり、神戸大学学部生・中村圭貴

氏、神戸大学大学院生・吉森裕樹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
- 6) 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
- 7) 広沢雅也, 他: 軸力をうける鉄筋コンクリート部材の強度と粘り (その 2 既往の資料に関する検討), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造系, pp.819-820, 1971.11
- 8) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート X 形配筋部材設計施工指針・同解説, p.44, 2010