

論文 二方向載荷を受ける付着強度の低い超高強度鉄筋を用いた RC 柱の耐震挙動に関する研究

大仲 菜保子*1・竹内 崇*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 RC 柱が、逆対称二方向曲げせん断変形を受ける場合の耐震性能を明らかにすることを目的とし、配筋形式と載荷方向を実験変数として一定軸力下における繰り返し逆対称曲げ実験を実施した。その結果、X 形配筋かつ幅厚比 80 程度の鋼板拘束試験体において、45 度載荷時でも残留変形を小さく抑えることができることを明らかにした。また、付着すべりの影響を簡易に模擬した簡易解析法を提案し、詳細解析および本論の試験体の挙動との比較を行い、簡易解析法では水平力一部材角関係の包絡線を精度よく評価できることを示した。

キーワード：レジリエンス, X 形配筋, 付着すべり, 鋼板横拘束, M- ϕ 解析

1. はじめに

巨大地震に備えるために、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 部材の開発研究を行ってきた¹⁻³⁾。

片持ち柱形式の実験では、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した履歴挙動を示し、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²⁾。さらに、逆対称曲げの実験結果では、本主筋の付着強度が低く、主筋定着間で主筋ひずみが均一化されるため、主筋ひずみを伸ばし、柱に高いレジリエンスを持たせるには、柱反曲点近傍で主筋のすべり止め策(以下、これを柱中央定着と称す)を講じる必要があることを実験研究により示した⁴⁾。柱中央定着として鋼製定着板を設置しただけの試験体では、定着部の上下主筋から応力が伝達され、定着部付近のコンクリートに大きな支圧力がかかるため、柱中央定着部付近に割裂ひび割れが生じ、水平抵抗力が部材角 $R=0.02\text{rad}$ から頭打ちとなるが、柱全体を炭素繊維シートあるいは鋼板で拘束した試験体では、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、主筋の一部を X 形配筋することで、柱中央定着を簡素化し定着部での割裂ひび割れを抑制でき、さらに鋼板拘束により柱中央定着部付近での割裂ひび割れを抑えられ、柱が大変形域でも正

の 2 次剛性を有することを示した⁶⁾。また幅厚比 80 程度の鋼板拘束と X 形配筋を併用する場合、帯筋をほとんど配置せずとも、柱の残留変形を小さく抑えながら、大変形域まで水平抵抗力を維持できることを明らかにした⁷⁾。

しかしながら、これまでの研究は一方向載荷を受ける柱について行われたものである。X 形配筋を用いた柱の場合、二方向載荷時には主筋の上下端部において生じるひずみが一軸曲げ載荷時と異なるため、X 形配筋が有効に働くことを明らかにする必要がある。また、付着すべりの低い超高強度鉄筋を主筋に用いた柱の履歴性状に関して、文献 8 にて付着すべりの影響を考慮した部材解析で精度良く評価できることが明らかにされているが、同形式の柱を設計するためには部材詳細解析を用いずとも、簡単に性能を評価できる手法が必要であると思われる。

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 RC 柱が二方向の逆対称曲げ変形を受ける時の耐震性能を明らかにすることを目的として、2 種類の載荷方向で実験的研究を行った。また、付着すべりの影響を考慮した部材詳細解析による耐震性能の評価を行うと共に、付着すべりの影響を簡易に模擬した簡易解析法を提案し、提案手法の精度を検証した。

2. 実験概要

2.1 試験体

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。上下スタブの材軸方向の載荷を 0 度として、0 度方向と 45 度方向の 2 種類の

*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 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	f'_c (N/mm ²)	主筋	主筋 配筋形式	帯筋配筋	鋼板 横補強	中央定着		載荷方向	Q_{exp} (kN)	R_{exp} ($\times 10^{-2}$ rad.)
						段数	形状			
DC-2F-T32	46.4	12-U12.6 ($p_g=2.4\%$)	平行配筋	D6@90	PL3.2	2段	口形	0	292	2.26
DC45-2FN	45.5			D6@30				45	266	2.49
DC-X2-T32	45.8		2方向 X形配筋		PL3.2	1段	隅部独立	0	282	2.02
DC45-X2-T32	47.1							45	261	2.00

ここに、 f'_c :コンクリートシリンダー強度、 p_g :主筋比、 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)

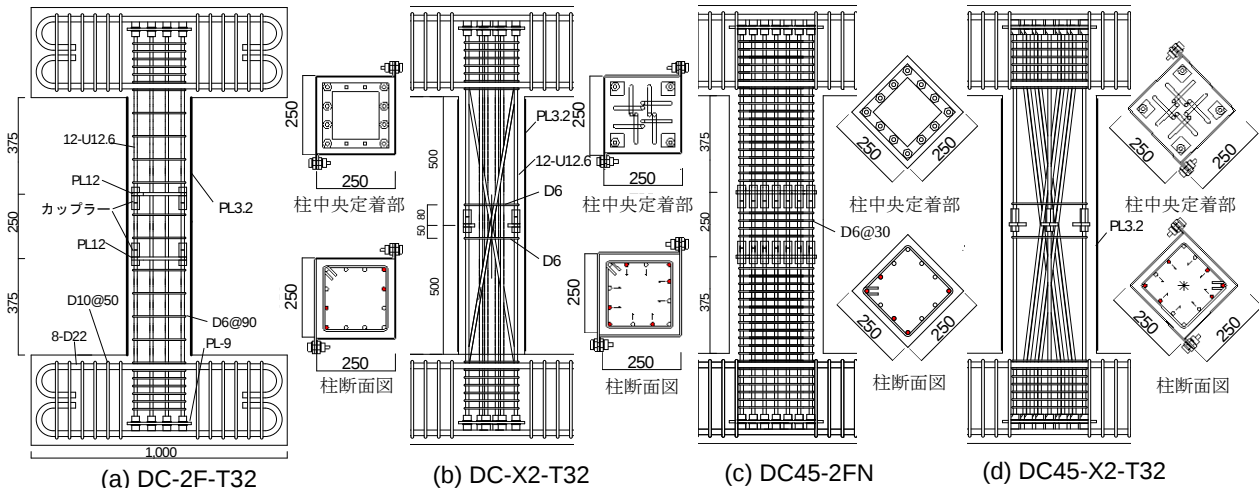


図-1 試験体

載荷を行った。45度方向の載荷の試験体は、柱断面を図-1に示すように45度回転させて作成した。

コンクリートは調合強度 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。実際の柱と同方向の打設となるよう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 (呼び名 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。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ず、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機械式定着とした。

試験体のうち 2 体は全て平行配筋の試験体で、残り 2 体は最外縁内側の主筋を 2 方向共 X 形配筋にした試験体である。X 形主筋は上下の加力スタブの柱側の主筋位置を起点として折り曲げている。柱中央部の定着は、主筋を分割し、定着鋼板を挟むことで実施し、平行配筋の試験体は 2 段、X 形配筋の試験体は 1 段設けた。試験体 DC-2F-T32 は、厚さ 12mm の連続した定着鋼板 (SS400) を配し、載荷方向に対して 1 列目と 4 列目の主筋の上下

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 ($\times 10^{-2}$ N/mm ²)
U12.6*	SBPDN 1275/1420	1372	0.84	1469	215
D6	SD295A	407	0.21	545	191
PL3.2*	SS400	311	0.36	462	196

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

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り、2 段目と 3 段目の主筋は、通し鉄筋とした。試験体 DC45-2FN も同様に連続した定着鋼板を配しているが、すべての主筋を機械式定着としている。X 形配筋の試験体は、隅角部の 4 本の主筋をそれぞれ独立した定着鋼板 (SS400, PL12) に機械式定着とした。

柱の横拘束の方法を以下に示す。帯筋拘束のみ試験体 DC45-2FN は、異形鉄筋 D6 を 30mm 間隔で配筋した。試験体 DC-2F-T32 は異形鉄筋 D6 を 90mm 間隔で配筋し、厚さ 3.2mm (幅厚比 80) の鋼板で拘束した。X 形配筋の試験体は、帯筋をほとんど配さず、鋼板のみで横拘束しており、試験体 DC-X2-T32 と DC45-X2-T32 は厚さ 3.2mm (幅厚比 80) の鋼板で拘束した。3 体とも鋼板拘束

の方法は、既往の研究^{5,6,7)}と同様に、鋼板を折り曲げたものを2枚組み合わせ高力ボルトによる接合である。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。鋼板横拘束は、コンクリートの拘束と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。そのため鋼板と加力スタブの間には6mm程度の隙間を設けている。表-2に鋼材の力学特性を示す。

2.2 荷重方法

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返し荷重である。その後、 $R=+0.075\text{rad.}$ まで片振り荷重を行い、実験を終了させた。

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DC45-2FNの損傷状況の変遷、及び試験体DC-2F-T32, DC-X2-T32及びDC45-X2-T32の荷重終了後に鋼管を取り外した後の損傷状況を示す。試験体DC45-2FNは、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、 $R=0.005\text{rad.}$ のサイクルで、柱脚および柱頭の曲げ圧縮側で縦ひび割れが確認された。 $R=0.01\text{rad.}$ のサイクルで柱脚部にせん断ひび割れが発生し、部材角 $R=0.02\text{rad.}$ のサイクルで2列目3列目の主筋に沿って中央定着部で割裂ひび割れが発生した。部材角 $R=0.035\text{rad.}$ のサイクルで柱頭柱脚の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。

鋼板補強を施した試験体3体ともに部材角 $R=0.035\text{rad.}$ のサイクルで鋼管端部とスタブとの接触が確認された。荷重後に鋼板を取り外して損傷状況を確認したところ(図-3参照), 柱頭および柱脚部のコンクリートの顕著な

損傷が確認された。試験体DC-2F-T32は、柱中央定着部付近で主筋に沿った割裂ひび割れ、柱頭および柱脚にせん断ひび割れが確認された。試験体DC-X2-T32は、柱中央定着部付近でコンクリートの剥離、柱頭および柱脚でのせん断ひび割れが確認された。試験体DC45-X2-T32は、柱中央定着部付近でのコンクリートの剥離と、柱全体には主筋に沿った割裂ひび割れが確認された。

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-部材角関係を示す。図中の破線は $P-\Delta$ 効果による耐力の低下ラインを示す。鋼板拘束の試験体3体は、共に $R=0.02\text{rad.}$ のサイクルで最大耐力に達し、その後軸力の影響により水平耐力が低下し、 $R=0.035\text{rad.}$ のサイクルで鋼管端部がスタブと接触し、 $R=0.05\text{rad.}$ のサイクルで再び耐力が上昇するなど、似た履歴性状を示した。試験体DC45-2FNは $R=0.025\text{rad.}$ のサイクルで最大耐力を示し、その後、耐力が $P-\Delta$ 効果の影響分より大きく低下した。荷重方向、拘束形式および柱中央定着を分割した影響を検討するために、図-5に本論の試験体と既往の研究の試験体^{5,7)}の水平力-部材角関係の包絡線の比較を示す。比較した試験体のうち、試験体DC-2FNは主筋の配筋形式が平行配筋で、横拘束は帯筋拘束、柱中央定着は2段で、本論の試験体DC45-2FNの荷重方向を0度としたものと同様であるが、試験体DC-2FNは柱中央定着部がフランジ側に位置する8本のみの定着である。試験体DC-t12d18TはD6を60mm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り、主筋の配筋形式は平行配筋であり、柱中央定着は1段のみである。その他の条件は本実験と同等である。図-5a)より、主筋がX形配筋で鋼管拘束の試験体は、45度方向荷重の試験体よりも0度方向荷重の試験体の方が耐力は全体的に20kN程度大きい、ほぼ同等の履歴性能を示していることがわかる。図-5b)より、主筋が平行配筋で帯筋拘束の試験体では、 $R=0.03\text{rad.}$ までは45度方向荷重の試験体の方が大きな耐力を示し、その後同様に耐力低下の履歴を示していることがわかる。一般的に45度方向荷重の方が最大耐力は小

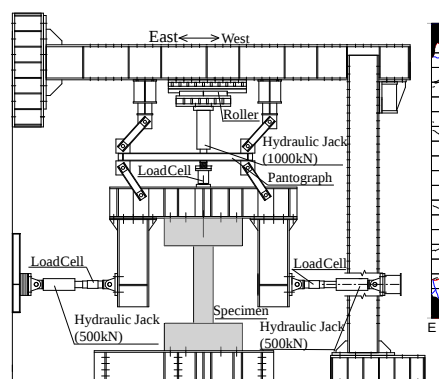


図-2 荷重装置

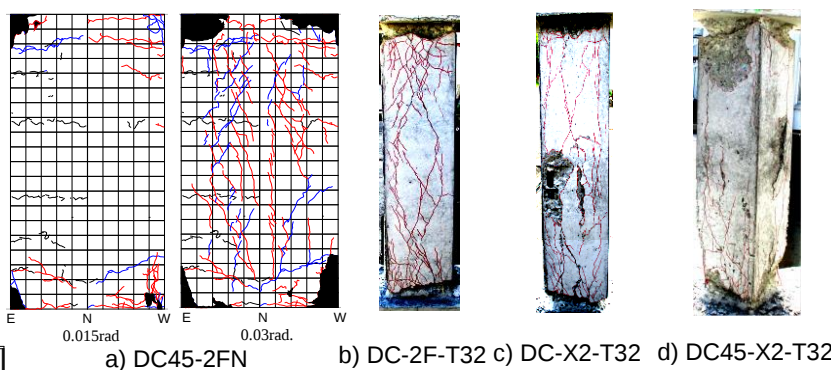


図-3 損傷状況(北面)

さくなるが、試験体 DC45-2FN の方が最大耐力が大きくなった原因として 2 つ考えられる。1 つは試験体 DC45-2FN の方がコンクリート強度が 1 割程度大きいこと(図-5b)参照)、もう 1 つは、前述の柱中央定着部で定着した主筋数の違いによる影響である。図-5c)より、主筋が平行配筋で帯筋拘束かつ鋼管拘束の試験体では、柱中央定着を 2 段にしてもほぼ同じ挙動を示すことがわかる。文献 7 において、柱中央定着を 1 段から 2 段にすることで、柱中央定着部付近で発生する割裂ひび割れによる耐力低下を遅らせることが出来ることが確認されるが、図中の 2 体の試験体はほぼ同じ挙動を示していることから、これらの試験体の耐力低下の要因は、柱上部と下部に入ったせん断ひび割れの影響によるものと考えられる。

図-6 に各試験体の残留部材角の推移を示す。部材角 $R=0.025\text{rad.}$ まで試験体間の差はほとんどないが、主筋が平行配筋の試験体 DC45-2FN と DC-2F-T32 は、 $R=0.035\text{rad.}$ から急激に増加しており、試験体 DC45-2FN は中央定着部付近での割裂ひび割れ、試験体 DC-2F-T32 は鋼管内部におけるせん断ひび割れによるコンクリートの損傷が残

留部材角増加の要因として推測される。X 形配筋を施した試験体 DC-X2-T32 と DC45-X2-T32 はともに残留変形角を低く抑え続けられており、45 度方向载荷が残留変形に及ぼす影響は小さく、X 形配筋が残留部材角の抑制に寄与することが分かる。

4. 解析による耐震性能評価

SBPDN 鉄筋を主筋に用いた RC 柱の場合、付着すべりの影響が顕著となるため、従前の平面保持仮定をベースにした解析手法では、履歴挙動を適切に評価できないことが既往の研究で報告されている^{3,9)}。本論では、船戸らの手法³⁾により、鉄筋とコンクリート間の付着-すべり関係を考慮できる分割要素解析を行った(詳細解析)。この解析は、柱をヒンジ領域と付着バネ領域に離散化したうえで、付着バネ領域からの鉄筋抜け出し量を付着応力-すべり量関係を用いて算出してから、ヒンジ領域内の鉄筋のひずみないし応力を求め、ヒンジ領域のコンクリート断面に対してはファイバー法により $M-\phi$ 解析を行うものである。X 形配筋に関しては、主筋の断面積として材

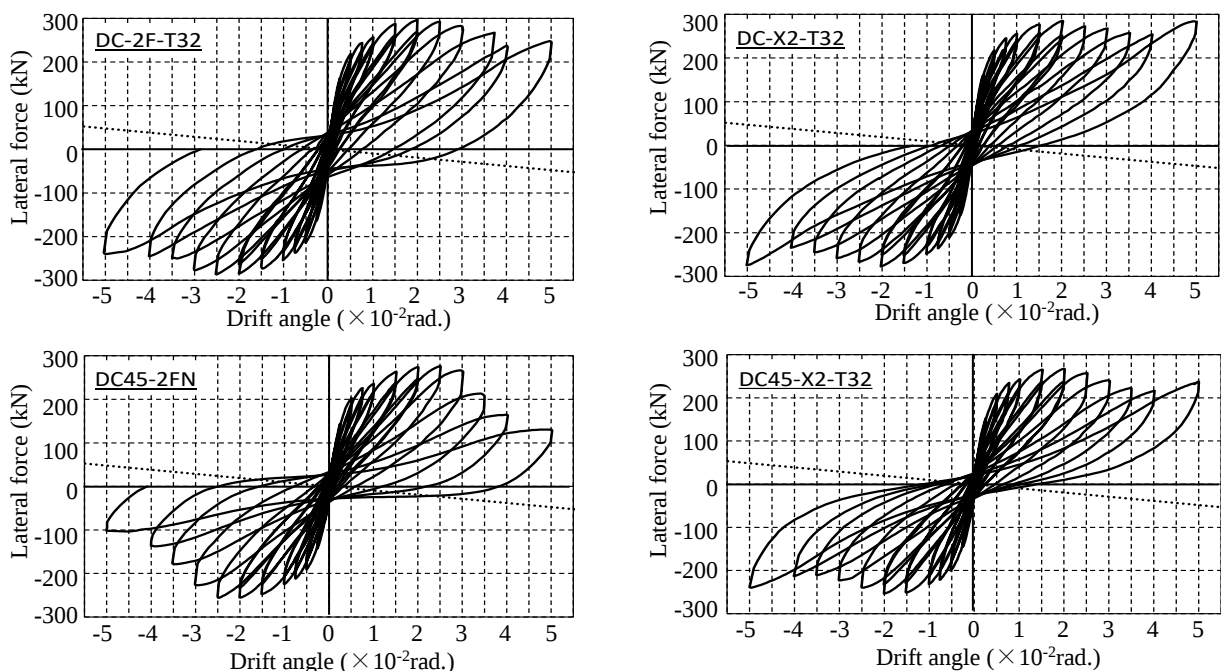


図-4 水平力-部材角関係

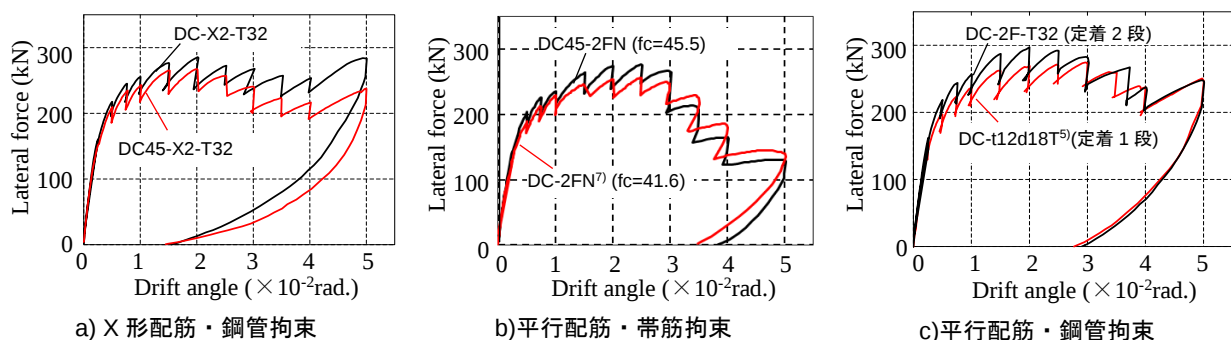


図-5 水平力-部材角関係の包絡線の比較

軸直交断面の鉛直方向投影面積を用いることで考慮した。加えて、付着すべりの影響を簡便に考慮したファイバー法による $M-\phi$ 単調解析を行った(簡易解析)。単調解析における付着すべりを考慮する方法として、柱脚部の集中ヒンジ領域の主筋ひずみが柱全体に分散するものとして主筋のひずみを低減させることとし、次式により付着すべりを考慮した主筋ひずみ ε_{slip} を求めた。

$$\varepsilon_{slip} = \varepsilon_{nonslip} \times L_p / L_s \quad (1)$$

ここで、 $\varepsilon_{nonslip}$: 平面保持を仮定した際の主筋ひずみ、 L_p : ヒンジ領域長さ、 L_s : 定着部間の主筋長さ。

材料の応力-ひずみ関係モデルとしてコンクリートは

崎野・孫式を用い、鉄筋は完全弾塑性モデルを用い、ヒンジ領域長さ L_p は $1.0D$ (D は断面せい) と仮定し、せん断変形は考慮しないものとした。

図-7 には正側履歴曲線の実験結果と諸解析結果との比較を示す。ここで提案した略算法の妥当性を検証するために、既往の研究で報告した一方向荷重の柱の実験結果との比較もプロットしている。図中の文献6の試験体 DC-2DXT は主筋の一部が X 形配筋で折り曲げ区間は柱中央部付近の 2D 区間のみの試験体である。横拘束の方法は D6 を 30mm 間隔で帯筋拘束した上で厚さ 4.5mm の鋼板で拘束されている。付着すべりの影響を考慮した詳

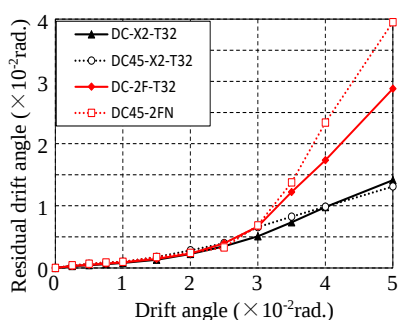


図-6 残留部材角の比較

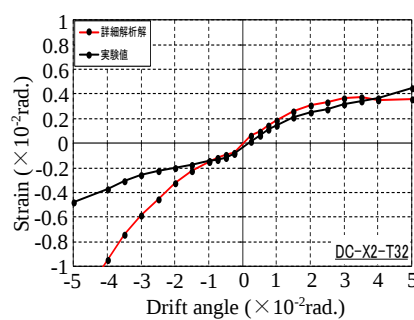
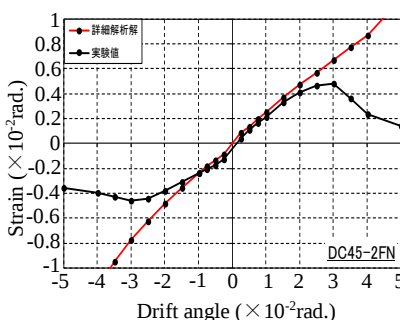


図-8 主筋ひずみ-部材角関係の実験結果と詳細解析の比較

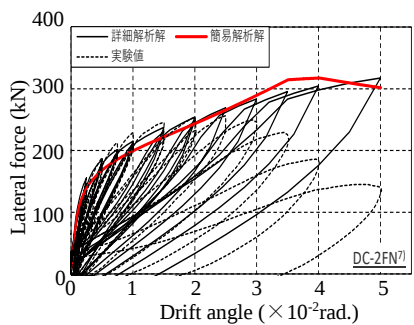
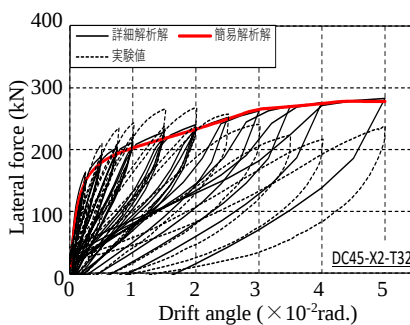
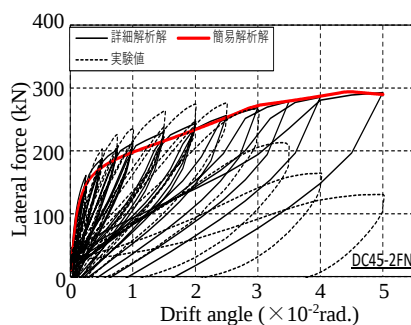
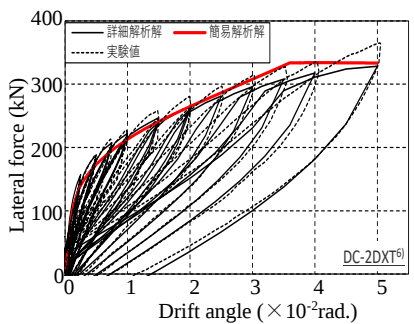
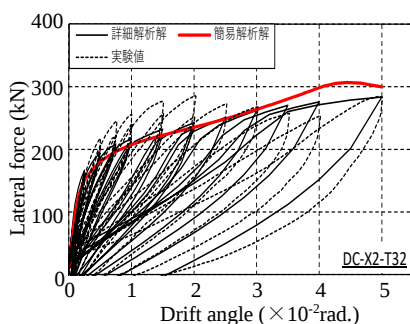
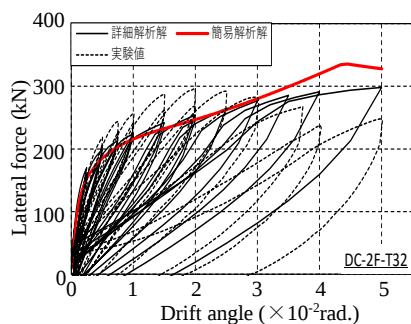


図-7 水平力-部材角関係の実験結果と詳細解析と簡易解析の比較

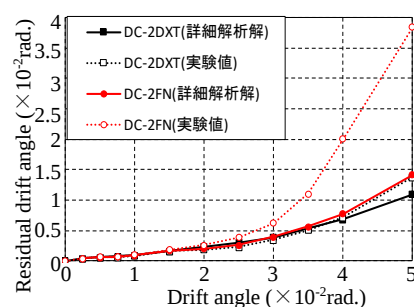
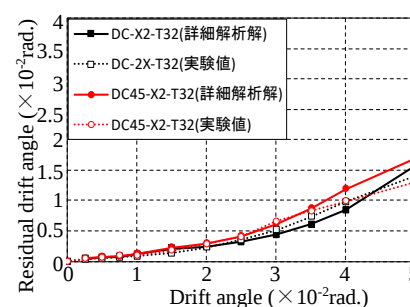
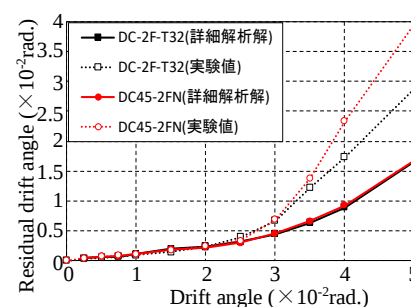


図-9 実験結果と詳細解析の残留部材角の推移

細解析と実験の履歴を比較すると(図-7 参照), 最大耐力までは, 既往の研究の試験体は詳細解析で実験結果を精度よく評価できている。それ以降は割裂ひび割れやせん断ひび割れによりコンクリートが損傷するため, 曲げ変形に基づく本解析では再現できない。また, 本論の試験体に関しては詳細解析解が 2 割程度実験値を過小評価している。この原因の考察のために図-8 に詳細解析と実験値の主筋ひずみと部材角の関係の比較を示す。主筋ひずみは $R=0.020\text{rad}$ まで詳細解析により精度良く評価できており, 図-7 における詳細解析解と実験の差はコンクリートの応力の評価精度によるものと考えられる。

図-9 に残留部材角の実験値と鉄筋の付着特性を考慮した解析結果の推移の比較を示す。付着すべりの影響を考慮した解析結果と実験結果の残留部材角の推移を比較すると, いずれの試験体も最大耐力までは解析結果と実験結果がよく一致している。これは主筋ひずみの履歴を精度よく評価できたことに起因する。また, 45 度方向載荷時の履歴挙動についても 0 度方向載荷の履歴挙動と同等の精度で評価できることを明らかにした。また, 付着すべりの影響を簡易に模擬した簡易解析の単調挙動が詳細解析の包絡線を精度よく評価しており, 包絡線に関しては, 付着すべりの影響を考慮した部材の詳細解析を用いずとも本論の簡易解析でその影響を簡略的に考慮することができることが分かった。

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 RC 柱が二方向載荷を受ける際の耐震性能に関して実験的に検討を行った。付着すべりの影響を簡易に模擬した簡易解析法の提案を行い, 実験値および付着すべり領域と付着すべり履歴を考慮した部材詳細解析との比較を行い, 以下の知見を得た。

- 1) X 形配筋した鋼板拘束試験体は, 横拘束鋼板の鋼管としての幅厚比が 80 程度であれば, 45 度載荷でも, 残留変形を小さく抑えながら, 部材角 $R=0.02\text{rad}$ まで耐力上昇し続けることができる。
- 2) 鋼管拘束かつ平行配筋の試験体に対しては柱中央定着が 1 段の場合も 2 段の場合も似た挙動を示した。柱頭部と柱脚部に生じたせん断ひび割れによって耐力低下が起こったため, 柱中央定着部詳細の影響が現れなかったものと思われる。
- 3) 付着すべりの影響を考慮した部材解析手法により, 割裂ひび割れやせん断ひび割れの発生による耐力低下が生じるまでの履歴ループに関して, 既往の研究の試験体については, 耐力・残留変形角共に精度よく評価している。一方, 本論の試験体については 2 割程度実験耐力を安全側に評価するが, 残留変形角

については精度よく評価することができる。

- 4) 付着すべりの影響を簡易に模擬した簡易解析法を提案し, 提案手法による解析結果は最大耐力までの実験値および詳細解析の水平力一部材角関係包絡線とよい対応を示す。

謝辞

本研究を進めるにあたり, 神戸大学学部生・中野魁人氏, 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)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, 橘高将義, 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
- 7) 竹内崇, 藤永隆, 吉森裕樹, 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定着詳細と横拘束方法の影響に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.2, pp.163-168, 2016.7
- 8) 竹内崇, 小山智幸, 吉野健太郎, 孫玉平: フライアッシュを外割混合したコンクリートを用いた鋼管横補強 RC 柱部材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.35, No.2, pp.151-156, 2013.7