

論文 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

竹内 崇*1・小山 智幸*2・吉野 健太郎*3・孫 玉平*4

要旨: フライアッシュを 455kg/m³ と大量に外割混合したコンクリートを用いた RC 柱に対し鋼管横補強を施した部材の耐震性能の解明を目的として、鋼管横補強の有無および鋼管横補強の範囲を実験変数とした超高強度鉄筋を主筋に用いた片持ち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、フライアッシュを大量混合することでコンクリート強度が 70N/mm² となった RC 柱全体に鋼管横補強を施せば、0.03rad. 以上の大変形域でのせん断破壊を防げることを明らかにした。また付着すべりを考慮した部材解析手法によって、本試験体の終局耐力を精度よく評価できることを示した。

キーワード: フライアッシュ, RC 柱, 付着特性, 残留変形, 鋼管横補強, 曲げ耐力

1. はじめに

石炭火力発電に伴い発生する石炭灰の有効利用の方法として、松藤ら¹⁾は、フライアッシュ（以下 FA）をセメントに対して外割で混合する混和材としての利用法を提案している。FA を外割混合したコンクリート（以下、FA 外割混合コンクリート）は、大量に石炭灰を消費し、砂の使用量を大幅に低減できるうえに、長期強度促進、アルカリ骨材反応抑制、乾燥収縮低減などの面で有用であり、その応力-ひずみ関係や割裂引張強度は、普通コンクリートを対象とした式で評価可能であることが明らかにされている^{2),3)}が、FA 外割混合コンクリートを用いた RC 部材の曲げ性状やせん断性状などに関する研究は不十分であり、さらなる実験データの蓄積が必要である。

著者らは、これまでに FA を 244kg/m³ 外割混合したコンクリートを用いた RC 柱試験体について載荷実験を実施し、通常の RC 部材を対象とした既存の曲げ終局耐力および骨格曲線の算定式の FA 外割混合コンクリート柱

への適応性の検証⁴⁾やせん断破壊性状や既往の終局せん断強度式の適用性について検証⁵⁾を行ってきた。また 1275N/mm² 級の超高強度鉄筋を主筋に用いた FA 外割混合コンクリート RC 柱の耐震性能を実験により検証し、超高強度鉄筋を主筋に用いた試験体は大変形時まで水平力が上昇し続け、残留変形の小さな履歴性状を示すことを明らかにするとともに、その履歴挙動は、付着すべりを考慮した部材解析手法によって精度よく評価できることを示した⁶⁾。本研究ではそれらの研究の続きとして、FA の外割混合量を 455kg/m³ と増やした FA 外割混合コンクリートを用いた RC 部材についての耐震性能を検討する。試験体の主筋には 1275N/mm² 級の超高強度鉄筋を用いており、大変形域まで増加し続ける水平抵抗力に対して、変形の増大に伴ってせん断耐力は減少することから、大変形域でのせん断破壊が想定される。これを防ぐための方法として、柱部分にボルト接合による鋼管横補強を施し、その有用性を検証した。

表-1 試験体一覧

試験体名	a/D	主筋規格	f' _c (N/mm ²)	n	N _{total} (kN)	N _{PC} (kN)	帯筋配筋	鋼管横補強範囲	管厚 (mm)	eQ _u (kN)	eR _u (rad.)
FC455N	3.0	SBPDN 1275/1420	71.2	0.30	1324	384	□-D6@30	—	—	230.7	0.025
FC455P			71.2	0.29	1303	363	柱脚上部1.5D: □-D6@120 1.5Dより上部: □-D6@60	柱脚上部 1.5D	4.5	241.5	0.028
FC455F			73.7	0.29	1335	395	□-D6@60	柱脚上部 2.5D		232.4	0.027

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(=N_{total}/bDf'_c), N_{total}: 軸力載荷後のジャッキによる軸力とプレストレス力の合計値, N_{PC}: 軸力載荷後のプレストレス力, eQ_u: 最大水平力実験値 (正負平均), eR_u: eQ_u時部材角 (正負平均)

*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 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)

*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)

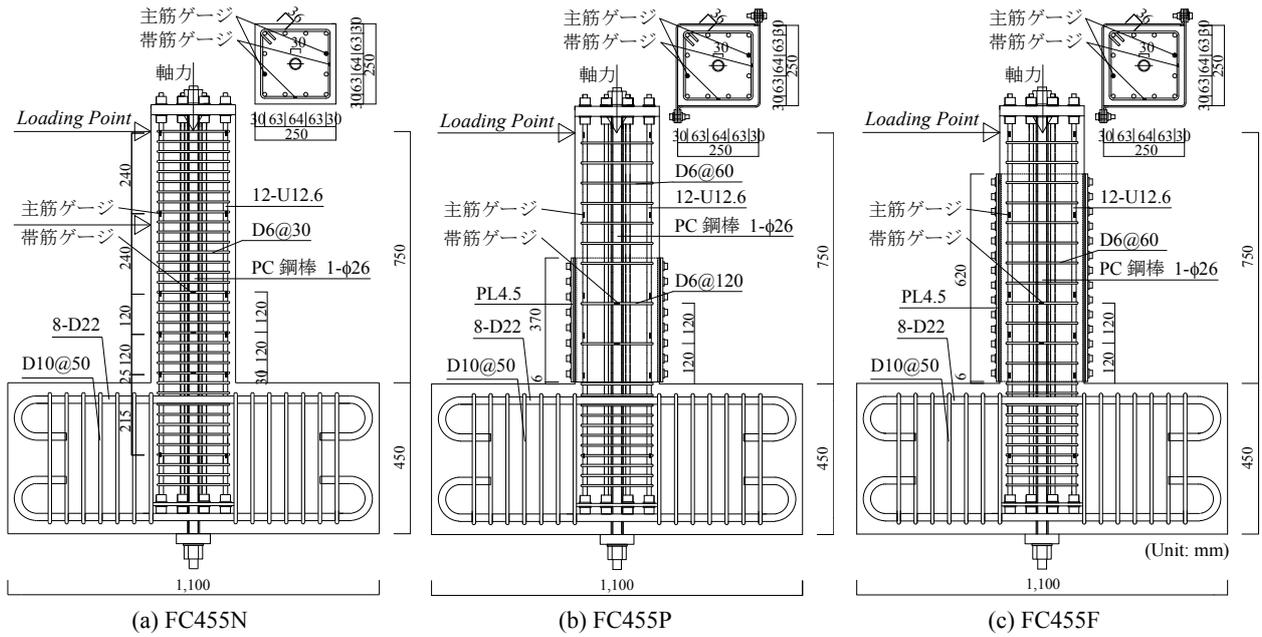


図-1 試験体詳細及びひずみゲージ貼付位置

表-2 コンクリート調査表

F_c (N/mm ²)	水セメント比 (%)	水結合材比 (%)	水 (kg/m ³)	セメント (kg/m ³)	細骨材(kg/m ³)		粗骨材 (kg/m ³)	混和剤 (kg/m ³)
					砂	FA		
60	65	25	185	285	459	455	833	5.85

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、試験体の配筋詳細を図-1に示す。試験体は実部材に対して縮尺が1/3程度の縮小片持ちRC柱で、250mmの正方形断面を有する。せん断補強筋量および鋼管横補強範囲を実験変数とし、3体の試験体を作製した。いずれの試験体も曲げ先行型となるように、NewRC等価応力ブロック⁷⁾を用いて算出した曲げ耐力を修正大野荒川式⁸⁾により算出したせん断耐力が上回るよう設計した。せん断スパン比 a/D はいずれの試験体も3.0で、柱脚から水平載荷位置までの距離は750mmである。各試験体ともに、軸力比は0.3を目標としたが、本実験での軸力載荷装置では所定の圧縮力を加えることができないため、試験体中央に内径30mm、外径36mmの塩化ビニル管を配し、φ26のPC鋼棒を通して初期導入張力を約360~400kN加えた。プレストレス力はPC鋼棒に貼付したひずみゲージの値より管理し、表-1に軸力載荷後のプレストレス力および合計の軸力を示す。

本研究で使用したコンクリートの調合を表-2に示す。コンクリートの設計基準強度 F_c は60N/mm²とした。セメントには普通ポルトランドセメントを、細骨材には海砂と砕砂の混合物を、粗骨材には砕石(最大粒径20mm)をそれぞれ使用した。FAはJIS A6201のII種に適合するもの(密度2.29g/cm³)を使用し、その混合量は455kg/m³

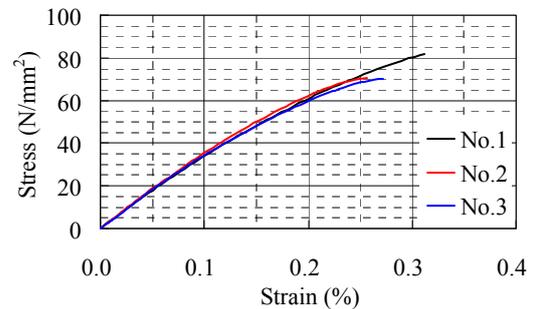


図-2 コンクリートの応力ひずみ関係

表-3 コンクリートの材料特性

f_c' (N/mm ²)	ϵ_c (%)	E_c (kN/mm ²)
74.3	0.28	35.9

ここに、 f_c' : コンクリート圧縮強度,
 ϵ_c : 圧縮強度時ひずみ, E_c : $1/3 f_c'$ 割線弾性係数

表-4 鉄筋の材料特性

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	1390	0.86	1486	210.4
D6	SD295A	328	0.37	526	192.3
PL4.5 (FC455P)	SS400	279	0.34	439	192.8
PL4.5 (FC455F)	SS400	277	0.32	429	191.9

ここに、 f_y : 降伏点応力(0.2%オフセット耐力), ϵ_y : 降伏点ひずみ($0.002 + f_y/E_s$), f_u : 引張強度, E_s : 弾性係数

である。混和剤は高性能 AE 減水剤を使用した。本コンクリートの水結合材比は小さいが、既往の研究⁹⁾において、FA 外割混合コンクリートの自己収縮ひずみは同程度の水結合材比のセメントのみのコンクリートと比較して小さいことが明らかにされているため、自己収縮への特別な対応は行っていない。図-2 に材齢 4 週のコンクリートの材料試験時のシリンダー 3 体の応力ひずみ関係を、表-3 に平均を示す。載荷実験は材齢 4 週から 8 週の間に行っており、表-1 に各試験体の載荷実験時に行ったシリンダー試験の圧縮強度を示す。

表-4 に鉄筋および鋼管横補強に用いた鋼板の材料試験結果を示す。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。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。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。本試験体は主筋の付着強度が低いと主筋定着部で引抜き現象が発生する可能性があるため、主筋端部にねじ切り加工を施し、鋼板プレートに主筋を通した後、プレートと主筋を高力ナットによって締め付けることで定着を確保した。せん断補強筋には D6 異形鉄筋を用い、試験体 FC455N は 30mm 間隔で配筋し、試験体 FC455P は柱脚からその上部 1.5D までの区間は 120mm 間隔、それより上部の区間は 60mm 間隔で配筋し、試験体 FC455F は 60mm 間隔で配筋した。鋼管横補強は厚さ 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することで行った。鋼管に圧縮力が作用しないようにするために、鋼管と柱脚の間に 6mm 程度の隙間を設けている。鋼管横補強を施した範囲は、試験体 FC455P では柱脚上部 1.5D までの間で、試験体 FC455F では柱脚上部 2.5D までの間である。

2.2 載荷方法および測定方法

図-3 に載荷装置を示す。1000kN 油圧ジャッキで所定の圧縮軸力を与えた状態で、300kN 油圧ジャッキで水平力を作用させた。載荷は部材角制御で行い、 $R=0.0025, 0.005, 0.0075, 0.01, 0.015, 0.02\text{rad}$ の変位レベルで 2 回ずつ、 $R=0.025, 0.03, 0.035, 0.04\text{rad}$ の変位レベルで 1 回ずつの正負繰返し載荷を行う。部材角 R は、計測した水平変位をせん断スパンで除することにより算出した。水平変

位は載荷点位置での計測値であり、スタブに対する載荷点位置の相対水平変位である。また鉛直変位計を、試験体 FC455N では柱脚から高さ 250mm と 500mm の位置に、試験体 FC455P では柱脚から高さ 500mm の位置に、試験体 FC455F では柱脚から高さ 630mm の位置に取り付けた。鉄筋のひずみは、2 本の主筋に対して 6 箇所ずつ、2 本 (試験体 FC455N は 3 本) の横補強筋に対して 2 箇所ずつ貼付したひずみゲージにより計測した。それぞれのひずみゲージ貼付位置を図-1 に示す。

3. 実験結果

3.1 ひび割れ及び破壊性状

図-4 に試験体 FC455N の $R=0.005, 0.01, 0.02, 0.03, 0.035, 0.04\text{rad}$ のサイクル終了時における損傷状況および試験体 FC455P の $R=0.03, 0.035, 0.04\text{rad}$ のサイクル終了時における損傷状況をそれぞれ示す。なお、図中のグリッド間隔は 50mm で、右向きが正載荷の方向で、図中の赤線は正側載荷時に発生したひび割れ、青線は負側載荷時に発生したひび割れを示す。試験体 FC455N は $R=0.0025\text{rad}$ サイクルで曲げひび割れが確認された。その後、 $R=0.0075\text{rad}$ サイクルで縦方向のひび割れが発生し、かぶりコンクリートの圧壊が確認され、 $R=0.01\text{rad}$ サイクルで、かぶりコンクリートの剥離が始まった。 $R=0.035\text{rad}$ サイクル時にせん断ひび割れが発生し、 $R=0.04\text{rad}$ サイクル時に大きな耐力低下を示し、せん断破壊の性状を示した。試験体 FC455P は柱脚から 1.5D の範囲が鋼管で覆わ

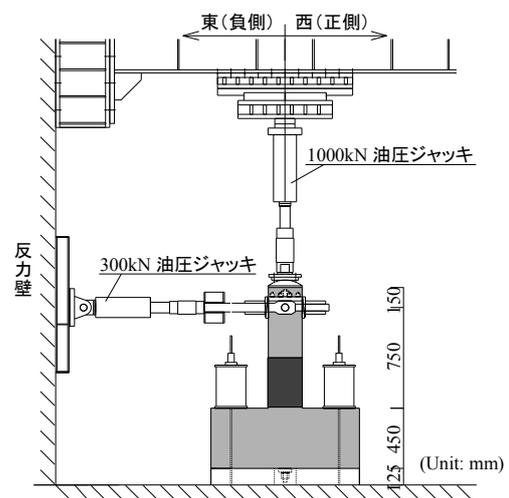


図-3 載荷装置

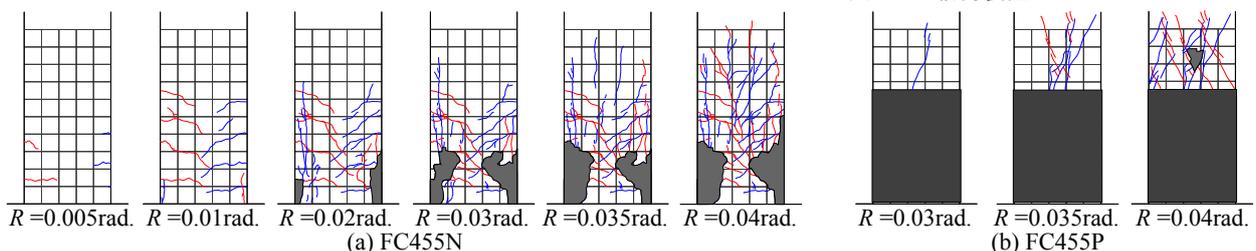


図-4 損傷状況

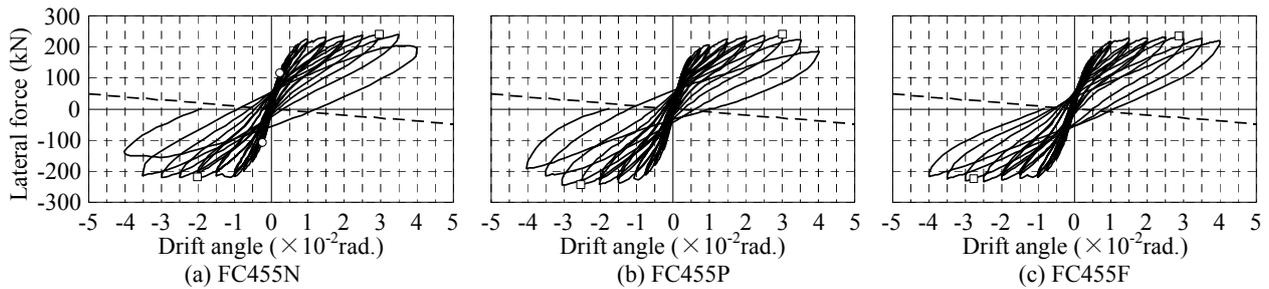


図-5 水平力-部材角関係

れているため、曲げひび割れの観察は行えなかった。 $R=0.03\text{rad}$. サイクルで鋼管上部の柱中央付近でせん断ひび割れが発生し、その後のサイクルで、せん断ひび割れの増加に伴い、水平耐力が低下し、せん断破壊の性状を示した。試験体 FC455F は柱脚から 2.5D の範囲が鋼管で覆われているため、ひび割れの観察は行えなかったが、 $R=0.025\text{rad}$. サイクルで柱脚から 1.0D の範囲で鋼管の膨らみを確認した。 $R=0.04\text{rad}$. サイクルでは、鋼管の膨らみは柱脚から 1.5D までの範囲内に集中しており、それ以上の範囲において鋼管の膨らみは確認されなかった。またいずれの試験体においても鋼管横補強のボルト接合の緩みは見られなかった。試験体に導入したプレストレス力は、変形に伴い柱の軸縮みが増大するため減少したが、所定の載荷終了後の載荷軸力とプレストレス力の和は、軸力比で 0.27 程度であった。

3.2 水平力-部材角関係

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、○印は曲げひび割れが発生した点を、□印は水平力が最大となった点を、破線は P- Δ 効果による耐力低下のラインを示す。ここで PC 鋼棒により導入した圧縮力は鉛直下向きではなく柱の軸方向に向かって作用し P- Δ 効果に寄与しないため、鉛直ジャッキにより加えた軸力のみでの P- Δ 効果による耐力低下のラインを算出している。図-5 から分かるように、いずれの試験体も $R=\pm 0.03\text{rad}$. まで原点指向性の安定した履歴ループを示した。いずれの試験体も $R=0.03\text{rad}$. で正側載荷時の最大耐力を発揮し、負側載荷時の最大耐力は $R=0.02\sim 0.025\text{rad}$. で発揮した。その後、試験体 FC455N は $R=0.035\text{rad}$. サイクルでは耐力を維持していたが、 $R=0.04\text{rad}$. サイクルで耐力が大きく落ち、残留変形の大きな履歴ループを示した。試験体 FC455P は $R=0.035\text{rad}$. サイクルで耐力が減少し始め、大きな残留変形を示すようになった。これらの試験体は部材角 0.03rad. までは耐力が上昇し続ける曲げ型の性状を示したが、その後、変形の増大に伴い減少するせん断耐力¹⁰⁾を水平抵抗力が上回り、せん断破壊に至ったと考えられる。一方で試験体 FC455F は $R=0.03\text{rad}$. で最大耐力を示した後は、緩やかな耐力低下を示しており、せん断破壊を抑えることができ

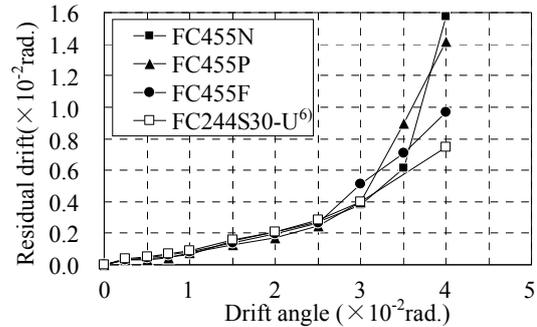


図-6 残留部材角の比較

た。これらのことから、試験体 FC455P のようなせん断補強筋量が少ない部材に対して、柱脚部に鋼管拘束により局部補強を施すことで、試験体 FC455N のようなせん断補強筋を密に配置した部材と同程度のせん断耐力を持たせることが可能であり、さらに柱脚部のみでなく部材全体を補強することで、せん断破壊による耐力低下を抑えることが期待できると考えられる。

3.3 残留部材角

図-6 に試験体の残留部材角を示す。図中の残留部材角は各載荷サイクル 1 回目の正負の残留部材角の平均値である。比較として、本試験体と同種の超高強度鉄筋を主筋に用いた RC 柱に関する既往の実験結果⁶⁾を併せて載せている。この既往の試験体 FC244S30-U は、FA 外割混合コンクリートを用い曲げ破壊を示した片持ち柱で、軸力比は 0.33、せん断スパン比は 3.0 と本実験と共通する点が多いが、コンクリート強度が 29.0 N/mm^2 である点为本実験との大きな相違点である。詳細な実験概要および結果については文献 6 を参照されたい。 $R=0.025\text{rad}$. 程度まではいずれの試験体の残留部材角も最大経験部材角の 10% 程度と小さく、また試験体による差はほとんど無く、コンクリート強度が大きく異なる既往の試験体とも差が見られなかった。その後、試験体 FC455N と FC455P はそれぞれが耐力低下を示し始めた $R=0.04\text{rad}$. と $R=0.035\text{rad}$. から残留部材角が大きくなった。試験体 FC455F は最大耐力を迎えた $R=0.03\text{rad}$. 以降で、既往の試験体 FC244S30-U より、残留変形が大きくなった。このことから試験体 FC455F は $R=0.03\text{rad}$. で鋼管内部で耐力低下の要因となるひび割れが入ったと推察される。ただし、鋼管拘束による作用でひび割れの進展は抑えられた

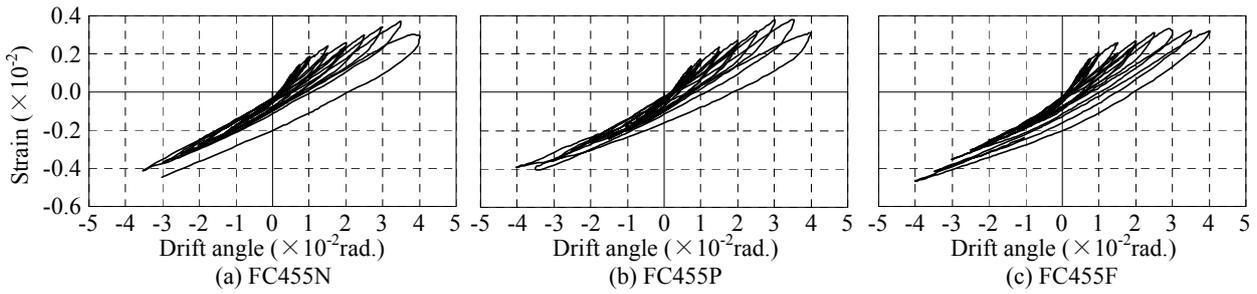


図-7 主筋ひずみの比較(柱脚から 145mm 位置)

と考えられ、残留部材角の増加は、せん断破壊の性状を示した他の2体と比べて、緩やかであった。

3.4 主筋ひずみ

図-7 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 145mm 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 0.5% 程度であるため、いずれの主筋も降伏しなかった。これは超高強度鉄筋の降伏点の高さに加えて、本主筋の付着強度の低さにより付着すべりを生じることで部材角に対する主筋ひずみの勾配が減少することに起因する。試験体 FC455N と FC455P はそれぞれ水平力一部材角関係での耐力低下する部材角と対応する $R=0.04\text{rad.}$ と $R=0.035\text{rad.}$ サイクルで主筋ひずみが低下した。一方で試験体 FC455F は $R=0.03\text{rad.}$ で主筋ひずみが頭打ちとなるが、それ以降の荷重サイクルピークで主筋ひずみが大きく低下することなく、一定の値を保った。

4. 付着すべりを考慮した部材解析による曲げ耐力評価

超高強度鉄筋を主筋に用いた場合、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、超高強度鉄筋を用いた RC 柱の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^{6, 11)}。本論では、船戸らの手法¹¹⁾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い、実験結果との比較を行った。この解析は、ヒンジ領域と付着バネ領域から構成される解析モデルにおいて、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、ヒンジ領域内の鉄筋の応力を求め、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。本論では、付着応力-すべり関係モデルはスパイラル状の溝を有する超高強度鉄筋に対して船戸らが提案したモデル¹¹⁾を用いた。最大付着応力時すべり量 $S_{\tau_{max}}$ は、文献 11 に基づき、 0.015mm と設定したが、最大付着応力 τ_{max} については本研究のコンクリート強度が文献 11 での付着引抜き試験と大きく異なるため、本部材実験の結果に基づき以下のように定めた。まず柱脚から 505mm の位置と 745mm

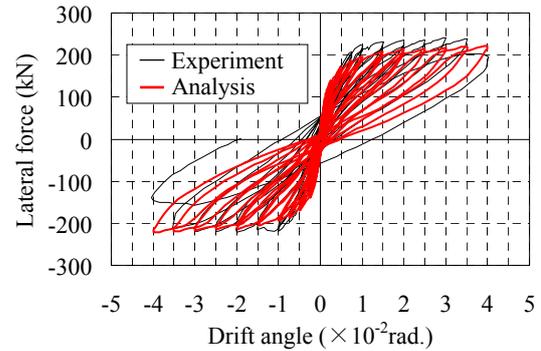


図-8 試験体 FC455N の解析と実験の比較

表-5 各部材角での実験結果と解析結果の耐力の比較

		各部材角での耐力(kN)と耐力比				
		0.005 (rad.)	0.01 (rad.)	0.02 (rad.)	0.03 (rad.)	0.04 (rad.)
FC455N	実験値	172.1	221.3	228.6	230.0	169.9*
	解析値	168.1	191.8	208.2	215.5	219.9
FC455P	実験/解析	1.02	1.15	1.10	1.07	0.77*
	実験値	176.2	214.6	237.5	241.3	187.9*
FC455F	解析値	168.5	194.5	218.1	230.7	238.1
	実験/解析	1.05	1.10	1.09	1.05	0.79*
FC455F	実験値	166.3	217.9	228.7	228.1	216.9
	解析値	173.2	200.0	224.0	236.3	243.6
	実験/解析	0.96	1.09	1.02	0.97	0.89

(注)*の実験値はせん断破壊による耐力低下後の値であるため、参考値である。

の位置で計測した主筋ひずみの差が付着応力によるものであり、付着応力が両ひずみ測定間で様に分布していると仮定して、式 1 より付着応力を算出し、その最大値が付着強度と考える。各試験体のひずみゲージを貼付した 2 本の主筋に対して付着強度を算出し、本解析ではその平均を τ_{max} と見なし、 $\tau_{max}=3.4\text{N/mm}^2$ と設定した。ここで、文献 11 での付着引抜き試験に基づく τ_{max} は 3.0N/mm^2 であり、大きな差はないことが分かる。

$$\tau = \frac{\Delta \epsilon_s \cdot E_s \cdot A_s}{\pi \cdot L \cdot D_s} \quad (1)$$

ここで、 $\Delta \epsilon_s$: 2か所の鉄筋ひずみの差、 E_s : 鉄筋の初期弾性係数、 A_s : 鉄筋の公称断面積、 L : 測定区間長さ、 D_s : 鉄筋の公称直径である。

なお、本解析は付着応力-すべり関係モデルと設定パ

ラメータを変更すれば通常の異形鉄筋を用いた柱部材にも適用可能である。またスタブによる付加拘束の効果についても船戸らの手法¹¹⁾により考慮した。付着特性および解析手法の詳細については文献 11 を参照されたい。

図-8 に水平力-部材角関係の実験結果と解析結果の比較を示す。ここでは 1 例として試験体 FC455N についての比較を示す。付着すべりを考慮した本解析結果は、実験でせん断破壊を生じた $R=0.04rad$ までは実験結果とよく一致しており、水平抵抗力や履歴ループの原点指向性などを精度よく再現している。各部材角での水平抵抗力を比較するために表-5 に $R=0.005, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04rad$ のサイクルピークでの実験値と解析値の比較を示す。せん断破壊による耐力低下後の比較結果を除けば、解析は 0.89~1.15 の間で実験結果の終局耐力を評価できていることがわかる。このことから、超高強度鉄筋と FA 外割混合コンクリートを用いた RC 柱の曲げ耐力を船戸らの解析手法により精度良く評価できることがわかる。

5. まとめ

本研究では、超高強度鉄筋と FA 外割混合コンクリートを使用した RC 柱に鋼管横補強を施した試験体の耐震性能を実験的に検証すると共に、付着すべりを考慮した部材解析手法により、その履歴性能の評価を行った。以下に得られた知見を記す。

- 1) 本試験体は、いずれも部材角 0.03rad まで耐力が上昇し続ける安定した履歴ループを有する曲げ型の性状を示した。
- 2) 鋼管横補強を局部的に施した試験体では、0.03rad 以降では鋼管横補強されていない箇所でせん断破壊を起こした。それに対して、柱全体を鋼管横補強した試験体は 0.03rad 以降においても大きな耐力低下を示すことはなかった。
- 3) 超高強度鉄筋を主筋に用いた本試験体は、 $R=0.025 rad$ 程度まではいずれも残留部材角が経験部材角の 10% 程度と小さく、試験体による差もほとんど見られなかった。
- 4) 超高強度鉄筋と FA 外割混合コンクリートを使用した RC 柱の履歴ループは、付着すべりを考慮した部材解析手法によって追跡でき、終局耐力は 0.89~1.15 の間で比較的精度良く評価できる。

以上のことから FA を $455kg/m^3$ と大量に外割混合したコンクリートについても通常の RC 部材と同等の性能を期待でき、大変形域でせん断破壊する部材に対して鋼管横補強を全体に施すことが有効であると考えられる。

謝辞

本研究を進めるにあたり、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) 松藤泰典, 小山智幸, 山口謙太郎, 小山田英弘, 伊藤是清: 接続可能な火力発電を実現するための電力産石炭灰の環境負荷低減処理システム, 九州大学大学院人間環境学研究院紀要, 第 2 号, pp.57-68, 2002
- 2) 小山智幸, 孫玉平, 小山田英弘, 藤永隆: フライアッシュを外割混合したコンクリートの圧縮応力-ひずみ関係のモデル化, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.3, pp.85-90, 2008
- 3) 高巢幸二, 松藤泰典: フライアッシュ外割混合コンクリートの諸特性に関する研究(その 2 フライアッシュの強度寄与), 日本建築学会九州支部研究報告, 第 48 号, pp.65-68, 2009
- 4) 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
- 5) 吉野健太郎, 谷昌典, 小山智幸, 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 RC 柱部材の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.33, No.2, pp.181-186, 2011
- 6) 竹内崇, 小山智幸, 藤永隆, 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 RC 柱部材の耐震性能に及ぼす主筋強度の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.2, pp.145-150, 2012
- 7) Sun, Y., Sakino, K. and Yoshioka, T.: Flexural Behavior of High-Strength RC Columns Confined by Rectilinear Reinforcement, 日本建築学会構造系論文集, 第 486 号, pp.95-106, 1996
- 8) 広沢雅也, 後藤哲郎: 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
- 9) 松本尚樹, 松藤泰典, 小山智幸, 伊藤是清: 石炭灰を外割混合したコンクリートの収縮性状に関する研究, 日本建築学会九州支部研究報告, 第 44 号, pp.9-12, 2005
- 10) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説, pp.142, 1999
- 11) 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