

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 RC 柱部材の耐震性能に及ぼす主筋強度の影響

竹内 崇^{*1}・小山 智幸^{*2}・藤永 隆^{*3}・孫 玉平^{*4}

要旨: 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の解明を目的として、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、主筋強度の異なる試験体による既往の研究結果との比較を行った。超高強度鉄筋を主筋に用いた本試験体は、普通強度鉄筋を主筋に用いた試験体と異なり、大変形時まで水平耐力が上昇し続け、残留変形の小さな履歴性状を示すことを明らかにした。また付着すべりを考慮した部材解析手法によって、超高強度鉄筋と FA 外割混合コンクリートを使用した本試験体の耐震性能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, 耐震性能

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、石炭灰の 85~95% を占めるフライアッシュ (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ことから自然環境保護に大きく貢献することが可能な上、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)}。

しかしながら、FA を活用した 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 外割混合コンクリートを使用した 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が FA 外割混合コンクリート柱へも適応できることを明らかにしてきた⁴⁾。また FA 外割混合コンクリートを使用したせん断破壊先行型の RC 柱試験体に対する載荷実験を実施し、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

証を行ってきた⁵⁾。本研究では、それらの既往の研究の続きとして、FA 外割混合コンクリートを用いた RC 部材に関する実験データの蓄積と、FA 外割混合コンクリートを用いた RC 部材の耐震性能に及ぼす主筋強度の影響の解明を目的として、1275N/mm²級の超高強度鉄筋を主筋に用いた RC 柱の載荷実験を行い、主筋強度の異なる試験体を用いた既往の研究結果との比較を行った。また、付着すべりを考慮できる部材解析を実施し、超高強度鉄筋と FA 外割混合コンクリートを用いた RC 部材の耐震性能評価を行った。

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。せん断スパン比 a/D を実験変数とし、 $a/D=2.0, 2.5, 3.0$ の 3 体の試験体を作成した。柱脚から水平載荷位置までの距離はそれぞれ 500mm, 625mm, 750mm である。いずれの試験体も、加力時に柱脚付近の加力スタブに生じるひび割れを防止するために、加力スタブ軸方向に PC 鋼棒を通し、PC 鋼棒に約 260kN の張力を導入している。

表-1 試験体一覧

試験体名	a/D	主筋の規格	f_c' (N/mm ²)	N (kN)	n	配筋	p_w (%)	ρ_h (%)	eQ_u (kN)	eR_u ($\times 10^2$ rad.)
FC244S20-U	2.0	SBPDN 1275/1420	29.0	598	0.33	□-D6@30	0.85	2.05	260.8	2.74
FC244S25-U	2.5								215.6	3.79
FC244S30-U	3.0								183.4	3.98

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, n : 軸力比($=N/bDf_c'$), p_w : せん断補強筋比, ρ_h : せん断補強筋体積比, 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 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-2 コンクリート調合表

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		
40	65	35	185	285	603	244	924	5.29

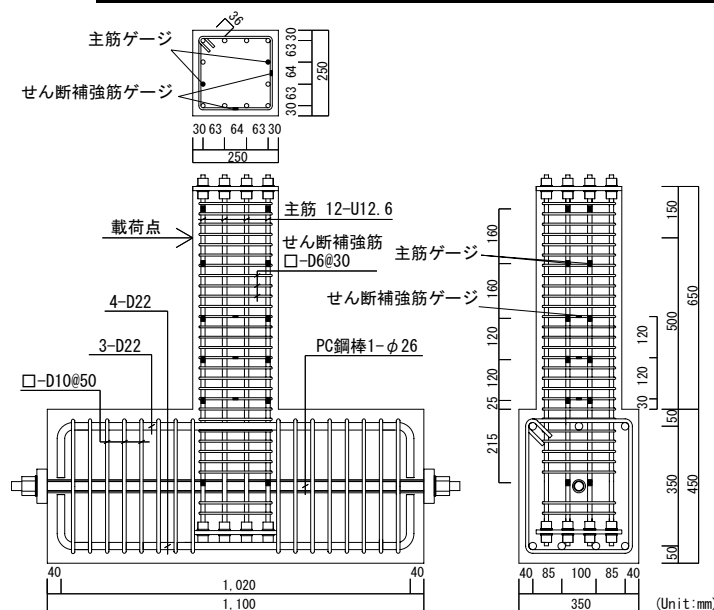


図-1 試験体詳細及びひずみゲージ貼付位置 (a/D=2.0)

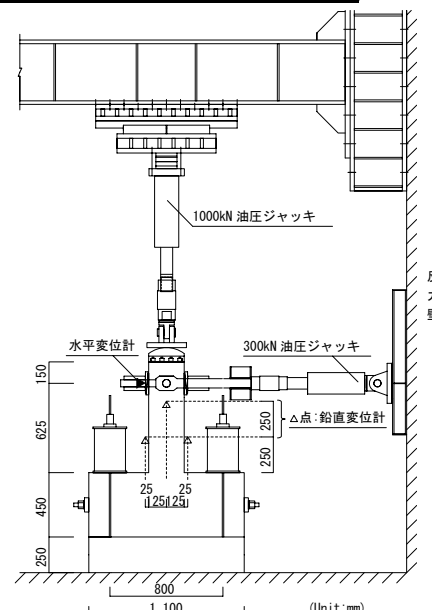


図-2 荷装置 (a/D=2.5)

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 40N/mm^2 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/cm^3) を使用し、その混合量は 244kg/m^3 である。混和剤は高性能 AE 減水剤を使用した。表-3 に実験時のコンクリートの材料試験結果を示す。荷重実験は打設から 4 週間経過した後の 1 週間以内に行った。実験時材令のシリンダー強度 f'_c が F_c を大きく下回ったのは、試験体の脱型が早かったこととフライアッシュを添加した後のコンクリートの攪拌時間が既往の試験体⁴⁾ 製作時より短かったこととによって、ポズラン反応が十分できなかったことが考えられる。

主筋には、規格降伏強度 1275N/mm^2 の超高強度鉄筋を用いた。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附着性状を有する。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 本配置した。横補強筋として、D6 異形鉄筋を 30mm 間隔で配筋した。表-4 に鉄筋の材料試験結果を示す。また、本試験体は主筋の附着強度が低いため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、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。

各試験体について、598kN (軸力比 0.33) の一定軸力下で繰り返し曲げせん断荷重を行った。試験体の設計で

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)
29.0	0.22	23.3

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	1447	0.88	1501	213.1
D6	SD295A	311	0.37	508	184.7

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

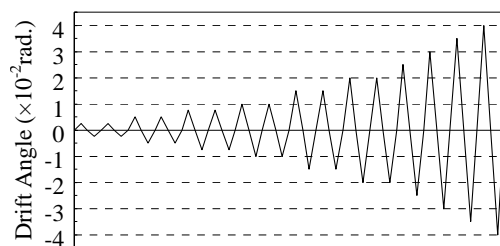


図-3 荷履歴

は、曲げ破壊を先行させるために、文献⁶⁾に推奨されている終局曲げ耐力の算定式及び、修正大野・荒川式⁷⁾に基づき、柱のせん断余裕度が 1.0 以上となるようにした。

2.2 荷重方法および測定方法

図-2 に荷装置および変位計設置位置を示す。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。荷重は部材

角制御で行い、図-3 に示す荷履歴を目標とした正負交番繰り返し荷を行った。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。水平変位は図-2 中に示す位置での計測値であり、スタブに対する荷点位置の相対水平変位である。また柱脚から高さ 250mm と 500mm の位置に鉛直変位計を取り付けている。なお、せん断スパン比 2.0 の FC244S20-U では、荷装置設置の都合上、高さ 500mm の位置の鉛直変位計を設けていない。鉄筋のひずみは、2 本の主筋に対して 6 箇所ずつ、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。また FC244S30-U の試験体は、制御の不具合により、 $R=\pm 0.035\text{rad}$. サイクルの荷を行っていない。

3. 実験結果

3.1 ひび割れ及び破壊性状

図-4 に $R=0.005\text{rad}$., 0.01rad ., 0.02rad . のサイクル終了時における各試験体の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、左向きが正荷荷方向である。いずれの試験体も $R=0.0025\text{rad}$. サイクルで曲げひび割れが確認され、 $R=0.005\sim 0.01\text{rad}$. サイクル途中で曲

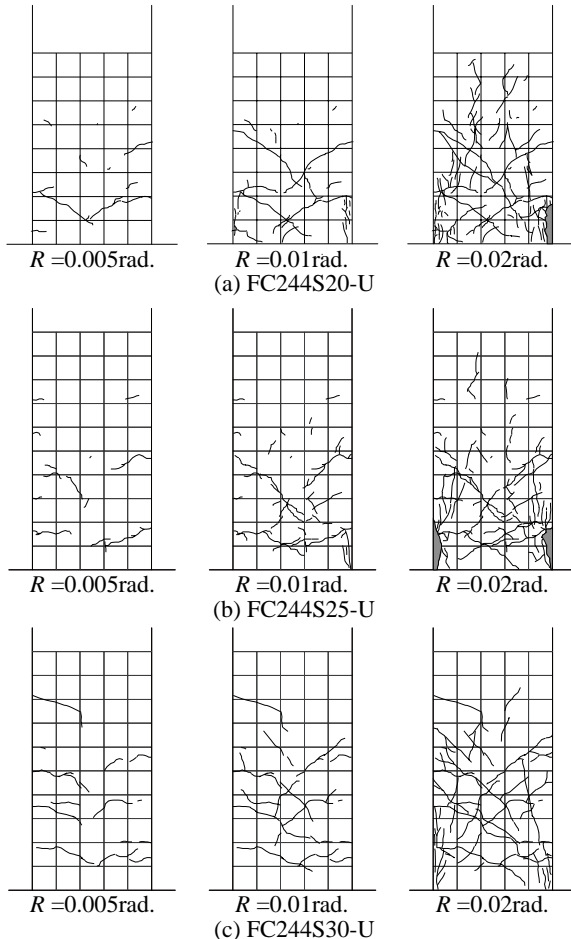


図-4 損傷状況

げひび割れが斜め方向に進展し始めた。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、 $R=0.015\sim 0.02\text{rad}$. サイクルで、かぶりコンクリートの剥離が始まった。試験体 FC244S20-U は、 $R=0.02\text{rad}$. サイクル時にせん断ひび割れが発生し、 $R=0.035\text{rad}$. 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。他の 2 体の試験体は、せん断破壊することなく所定の荷履歴を終えた。

3.2 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、○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。図-5 から分かるように、いずれの試験体も $R=\pm 0.025\text{rad}$. サイクルまで原点指向性の履歴ループを示した。FC244S25-U と FC244S30-U は、その後も残留変形の小さな履歴ループを示し、水平力も $R=0.04\text{rad}$. サイクルまで上昇し続けた。この 2 体の耐力は、所定の荷後に追加で行った $R=0.05\text{rad}$. サイクルの荷においても、大きく低下しなかった。一方で、せん断スパン比が 2.0 の FC244S20-U は $R=0.03\text{rad}$. で最大耐力を發揮して、その後は耐力が低下し、他の試験体より残留変形が増大した。超高強度鉄筋を用いた本試験体は、大変

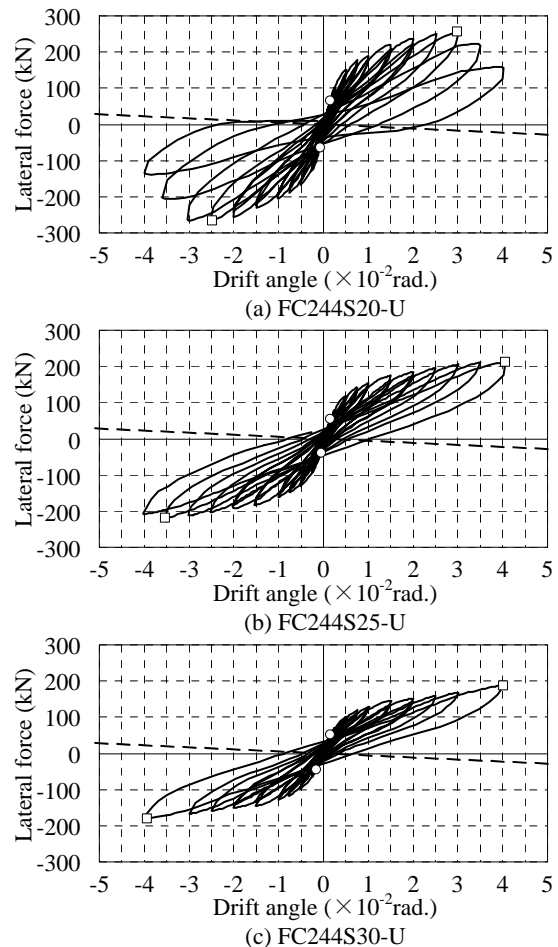


図-5 水平力-部材角関係

形時まで水平抵抗力が上昇し続けるため、FC244S20-Uでは $R=0.03\text{rad.}$ 時に変形の増大に伴い減少するせん断耐力⁸⁾を上回り、せん断破壊に至ったと考えられる。

4. 主筋強度が柱の耐震性能に及ぼす影響

4.1 比較対象の試験体の概要

本節では、谷らが文献4で報告した実験結果との比較を行い、主筋強度がFAコンクリート柱の耐震性能に及ぼす影響を検討する。谷らの試験体は、本実験と同じく軸力比0.33でせん断スパン比が2.0, 2.5, 3.0の3体のFA外割混合コンクリートを用いた曲げ破壊を示した片持ち柱である。本実験との大きな違いは主筋の降伏強度で、谷らの試験体では、SD345の異形鉄筋を主筋に用いている。また主筋の表面形状が異なるため付着性状にも差がある。なお、谷らのコンクリート強度が 39.8N/mm^2 である点も本実験との相違点である。詳細な実験概要および結果については文献4)を参照されたい。

4.2 履歴挙動の比較

主筋強度が柱の履歴挙動に及ぼす影響を調べるために、本実験と谷らの実験の履歴包絡線の比較を行う。両実験ではコンクリート強度が約 10N/mm^2 異なるため、実験結

果の水平耐力の差異には、主筋強度とコンクリート強度の両方の影響が含まれている。本論では、柱の曲げ耐力計算値を用いて実験結果を基準化することで、計算耐力時の材料強度の影響を除去してから比較を行っている。曲げ耐力の算出には、ACI基準の手法⁹⁾(以下、ACI法)を用い、コンクリートの終局圧縮ひずみは0.003として、鉄筋の応力-ひずみ関係は完全弾塑性を仮定した。

図-6に実験で試験体柱脚断面に生じる曲げモーメントと部材角関係の包絡線をACI法による計算耐力値で除して基準化したグラフを示す。図-6より分かるように、普通強度鉄筋を用いた試験体の実験結果は、 $R=0.01\text{rad.}$ 前後で最大耐力を迎え、その後は緩やかな耐力低下を辿っている。それに対して、超高強度鉄筋を用いた試験体の実験結果は、用いた鉄筋が通常の異形鉄筋より付着すべりを生じやすいため、部材角が小さい領域では普通強度鉄筋の実験結果よりも低い抵抗力を示しているが、 $R=0.015\text{rad.}$ 前後から鉄筋のひずみないし応力の増加に伴って、普通強度鉄筋の実験結果を上回り、抵抗力が増え続けた。せん断スパン比が2.5以上の試験体では抵抗力の上昇が $R=0.04\text{rad.}$ まで続いており、せん断スパン比2.0の試験体でも耐力上昇が $R=0.03\text{rad.}$ まで続いた。

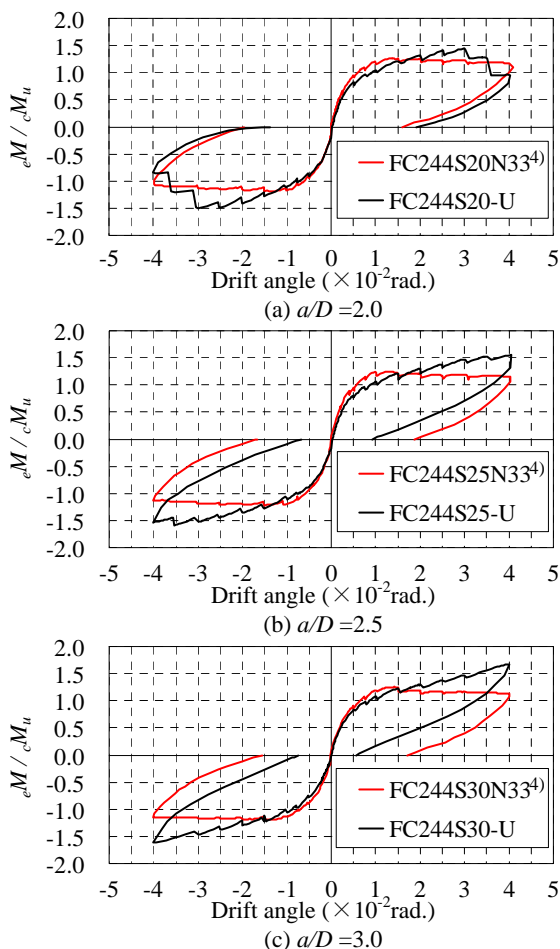


図-6 計算曲げ耐力で基準化した実験結果の曲げモーメント-部材角関係の比較

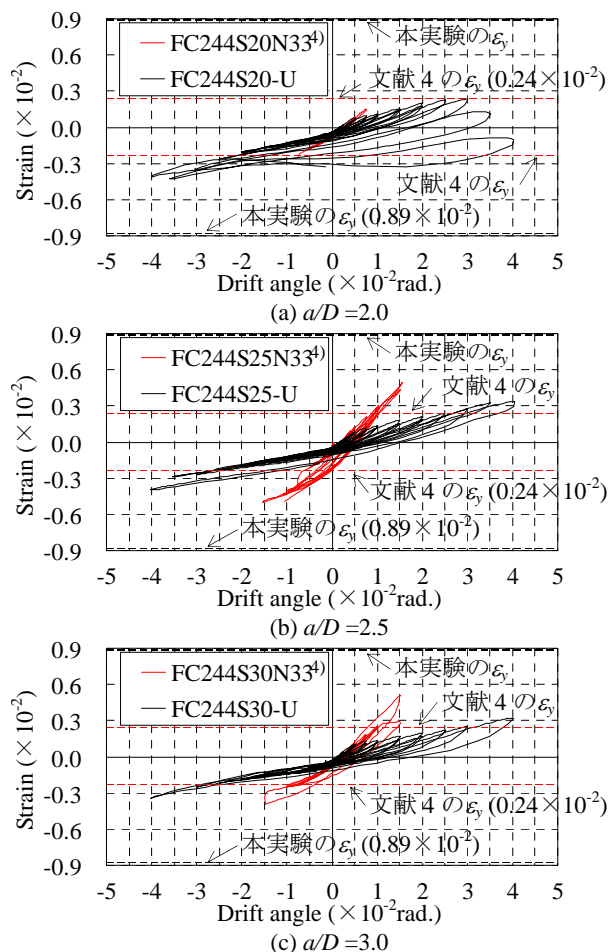


図-7 主筋ひずみの比較(柱脚から145mm位置)

4.3 主筋ひずみの比較

図-7 に普通強度鉄筋を用いた試験体と超高強度鉄筋を用いた試験体の主筋ひずみの比較を示す。グラフは、正側載荷時に引張側となる柱脚から 145mm 離れた位置にある主筋のひずみと部材角の関係を示している。図中の破線は主筋の降伏ひずみを示している。図-7 より明らかのように、普通強度鉄筋を用いた試験体の主筋ひずみは $R=0.0075\sim 0.01\text{rad}$ 辺りで降伏ひずみに達した。一方、超高強度鉄筋のひずみは、付着すべりを起こしやすい性状を有するため、普通強度鉄筋のひずみに比べて、部材角に対して緩やかな勾配で増減しており、 $R=0.01\text{rad}$ 時の値は普通強度鉄筋の値の 50% 程度であり、 $R=0.04\text{rad}$ の大変形時においても降伏ひずみの 40% 程度にしかならなかった。このように超高強度鉄筋を主筋に用いた試験体は、大変形時にも主筋が降伏しないため、部材角の増大に伴い鉄筋が負担する応力は増え続け、その結果、図-6 に示すように大変形時まで柱の抵抗力が上昇し続けることにつながった。

4.4 残留部材角の比較

図-8 に試験体の残留部材角の比較を示す。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

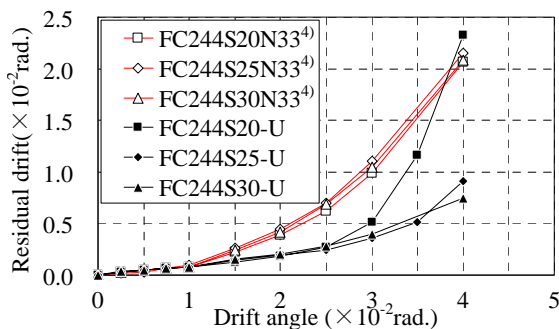
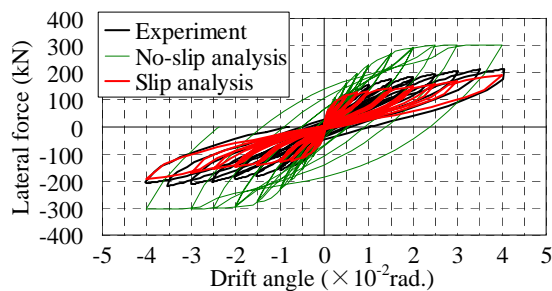
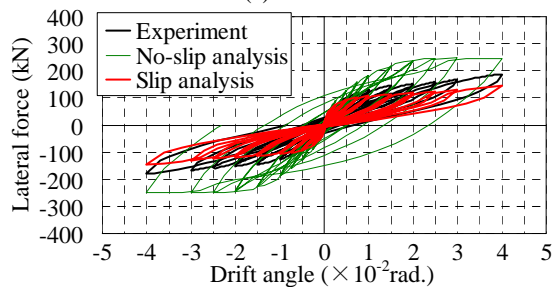


図-8 残留部材角の比較



(a) FC244S25-U



(b) FC244S30-U

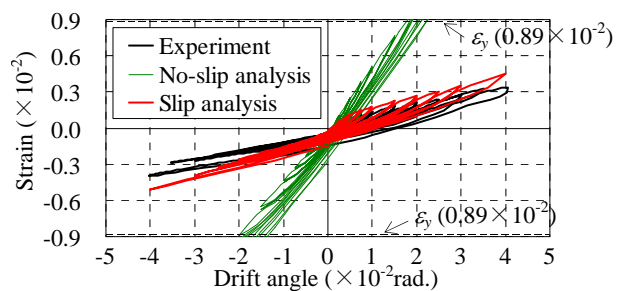
図-9 水平力-部材角関係の実験と解析の比較

平均値である。部材角 $R=0.01\text{rad}$ 程度までは主筋の強度が残留部材角に及ぼす影響はほとんど見られなかったが、部材角 $R=0.01\text{rad}$ 以後では、普通強度鉄筋を用いた試験体の残留部材角が増大する一方、超高強度鉄筋を用いた試験体の残留部材角は低く抑えられている。なお、FC244S20-U において $R=0.03\text{rad}$ 以降、残留部材角が増大する傾向を示しているのはせん断破壊したためである。その他の超高強度鉄筋を用いた試験体は、 $R=0.04\text{rad}$ サイクル時も残留部材角が 0.01rad 以下に抑えられている。

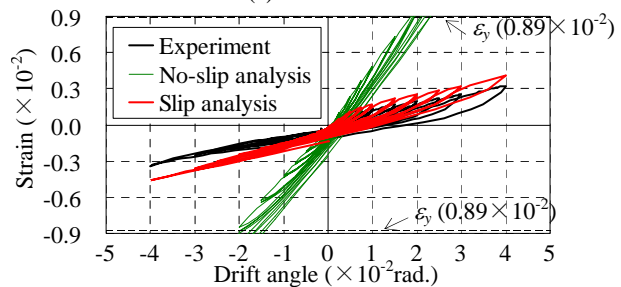
5. 付着すべりを考慮した断面解析による耐震性能評価

前章で述べた通り、付着すべりの影響が顕著な超高強度鉄筋は柱の部材角が 0.04rad になる大変形域でも降伏しなかったことから、以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容易に予想できる。そこで本論では、仲井らの手法⁹⁾を準用し、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用いて本実験をシミュレートし、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。付着特性および解析手法の詳細については文献 9) を参照されたい。

図-9 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。解析結果は付着すべりを無視した結果と付着すべりを考慮した結果の両方を示す。付着すべりを無視した解析結果は、実験結果の耐力を過大評価しており、



(a) FC244S25-U



(b) FC244S30-U

図-10 主筋ひずみの実験と解析の比較

また残留変形の大きな紡錘形の履歴性状を示し、実験結果との乖離が大きい。一方、付着すべりを考慮した解析結果は、実験結果とよく一致しており、水平抵抗力が上昇し続ける傾向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。 $R=0.02\text{rad}$ 時の水平力について解析結果と実験結果を比較すると、付着すべりを無視した解析は実験結果より60%程度高い値を示し、極めて過大な評価をした。これに対して、付着すべりを考慮した解析結果は実験結果より20%程度低く、安全側ではあるが、精度よく評価している。この実験と解析の比較は文献9での比較結果と対応しており、FA外割混合コンクリートを用いた試験体についても普通コンクリートを用いた場合と同等の精度で解析できていることがわかる。

図-10に主筋ひずみ一部材角関係の実験結果と解析結果の比較を示す。付着すべりを無視した解析では、実験結果の6~8倍程度の傾きで主筋ひずみが増えていき、 $R=0.02\text{rad}$ 辺りで降伏ひずみに達している。一方、付着すべりを考慮した解析結果では、実験結果との違いが小さく、主筋ひずみの変動状況を良く追跡できている。このことから仲井らの付着すべりを考慮した解析手法にはまだ改善すべき点があるものの、超高強度鉄筋とFA外割混合コンクリートを用いたRC柱の繰り返し履歴挙動を精度良く評価できることがわかる。

6. 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柱試験体に対する載荷実験を実施し、その耐震性能の検証を行うと共に、既報告の普通強度鉄筋とFA外割混合コンクリートを用いた試験体の実験結果との比較を行い、主筋強度が柱の耐震性能に及ぼす影響について検討した。以下に得られた知見を記す。

- 1) 超高強度鉄筋を主筋に用いた本試験体は、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した。
- 2) 主筋強度によって最大耐力を発揮する部材角が異なり、普通強度鉄筋を主筋に用いた試験体は、 $R=0.01\sim 0.015\text{rad}$ 程度で最大耐力を発揮したのに対して、超高強度鉄筋を主筋に用いた試験体は、 $R=0.04\text{rad}$ 程度まで曲げ耐力が上昇し続けた。これは、本実験に用いた超高強度鉄筋は付着すべりが生じやすく、所定の最大部材角まで降伏せず、鉄筋のひずみないし応力が部材角の増大に伴い徐々に増え続けたためと思われる。
- 3) 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。

以上が本研究の結論であるが、せん断スパン比が2.0の

試験体では $R=0.03\text{rad}$ 前後で、曲げ型の履歴挙動からせん断破壊したことから、超高強度鉄筋を主筋に用いたRC柱の破壊形式を適切に予測するためには、部材角の増大に伴う終局せん断耐力の低下を適切に評価することが必要不可欠であることが明らかである。これを今後の課題としたい。

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、同大学院生・吉野健太郎氏の多大な協力を得た。本実験の試験体に使用した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) ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete (318M-99) and Commentary (318RM-99)," pp.109, 1999
- 7) 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
- 8) 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
- 9) 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