

# 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 柱部材の力学性状

谷 昌典\*1・孫 玉平\*2・小山 智幸\*3・小山田 英弘\*4

**要旨:** 石炭火力発電所から発生する石炭灰は年々増加しており, 大量消費が可能な用途での利用促進が望まれている。そこで, 石炭灰の大部分を占める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 柱部材の力学性状の把握を目的として, せん断スパンを実験変数とした片持ち形式の縮小試験体 3 体に対する載荷実験を行った。通常の RC 部材を対象とした既存の曲げ終局耐力, 骨格曲線に関する耐震性能評価法を適用した結果, 得られた実験結果を良好な精度で予測することができた。

**キーワード:** フライアッシュ, 外割混合, RC 柱, 曲げ終局耐力, 骨格曲線

## 1. はじめに

近年, 供給安定性や経済性などの観点から, 石炭火力発電による石炭消費量は増加の一途を辿っており<sup>1)</sup>, それに伴って発生する石炭灰も年々増加している<sup>2)</sup>。文献 2)によれば, 日本における石炭灰発生量の平成 19 年度実績は約 1,200 万トンで, その約 97%が有効利用されており, 以前と比較して, 廃棄物として埋立処分される石炭灰は大幅な減少傾向にある。しかし, 有効利用の大半を占めるセメント原材料(粘土代替)としての利用も, 近年の建設需要の低迷に伴うセメント消費量の減少により, セメント製造分野への石炭灰供給が飽和状態に近付いている<sup>3)</sup>との指摘もある。このような背景から, 石炭灰を大量消費できる用途での利用促進が望まれている。

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コンクリート混和材としての利用法は, 大量に石炭灰を消費することができ, さらに, 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である。また, FA はコンクリート混和材として, 長期強度増進, 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, その調合法も確立されてきている。しかし, 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)の JIS 規格における位置付けは明確ではなく, 実構造物への適用はあまり進んでいないのが現状である。

FA 外割混合コンクリートの応力-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<sup>4), 5)</sup>ことから, FA 外割混合コンクリートが同じ圧縮強度の普通コンクリートとほぼ同じ力学性状を有すると考えてよい。また, FA を大量に混合したコンクリートの建築 RC 部材への適用性の確認を目的とした研究

例えば<sup>6), 7)</sup>は, これまでもいくつか行われており, 普通ポルトランドセメント単味のコンクリートに比べて圧縮強度が上昇することにより, 部材としての変形能が改善されることや, 曲げ終局耐力及びせん断終局耐力が通常の評価法で可能であることなど, 一定の知見が得られている。一方で, 過去の研究において, 復元力特性や変形性能に関する検討はほとんど行われておらず, その履歴性状は明らかになっていない。すなわち, FA を大量に混合したコンクリートを実部材に適用するには, 未だ研究例が十分であるとは言えず, 更なるデータの蓄積が必要である。そこで, 本研究では, FA 外割混合コンクリートを用いた RC 柱の曲げせん断性状を確認することを目的とした載荷実験を行う。また, 得られた実験データを用いて, 通常の RC 部材を対象とした既存の耐震性能評価法(曲げ終局耐力及び骨格曲線)の, FA 外割混合コンクリートを用いた RC 柱への適用性を検証する。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体概要

本研究で用いる試験体は, 表-1 に示す 3 体の縮尺が 1/3 程度の縮小 RC 柱 3 体である。試験体は図-1 に示す片持ち柱部材で, 柱断面は幅  $b$ , せい  $D$  が共に 250mm の正方形断面である。本実験では, せん断変形やせん断

表-1 試験体一覧

試験体名	コンクリート種類	せん断スパン比	軸力比
FC244S20N33	FA 外割混合 コンクリート	2.0	0.33
FC244S25N33		2.5	
FC244S30N33		3.0	

\*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 神戸大学大学院 工学研究科建築学専攻 教授 工学博士 (正会員)

\*3 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)

\*4 九州大学大学院 人間環境学研究院都市・建築学部門 助教 博士(工学) (正会員)

ひび割れの発生の有無が復元力特性に及ぼす影響を確認するため、せん断スパン比  $a/D$  を実験変数とし、2.0, 2.5, 3.0 の3種類とした。柱脚危険断面から水平力載荷位置までの距離はそれぞれ 500mm, 625mm, 750mm である。

本実験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  $50\text{N/mm}^2$  とし、文献8)に基づき調合を定めた。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  $2.29\text{g/cm}^3$ )を、混和剤は高性能 AE 減水剤を使用した。なお、コンクリ

ートの練混ぜはレディーミクストコンクリート工場で行った。表-3 に実験時のコンクリート材料試験結果を示す。 $f'_c$  が  $F_c$  を大きく下回った原因については、使用した材料や設備の違いなどが考えられるが、現在確認中である。なお、実験時の材齢は 28~36 日であった。

主筋として、D13 異形鉄筋 (SD345) 12 本をかぶり厚 30mm の位置に均等に配置した。また、横補強筋として、D6 異形鉄筋 (SD295A) を 30mm 間隔で配筋した。主筋比  $p_g$  及び横補強筋比  $p_w$  は、それぞれ 2.43% 及び 0.84% である。表-4 に鉄筋の材料試験結果を示す。

試験体に作用させた軸圧縮力は  $821\text{kN}$  で、これはコンクリートの長期許容圧縮応力度  $1/3f'_c$  に相当する。なお、

表-2 コンクリート調合表

$F_c$ (MPa)	水セメント 比(%)	水結合材比 (%)	水 ( $\text{kg/m}^3$ )	セメント ( $\text{kg/m}^3$ )	細骨材( $\text{kg/m}^3$ )		粗骨材 ( $\text{kg/m}^3$ )	混和剤 ( $\text{kg/m}^3$ )
					砂	FA		
50	65	35	185	285	603	244	924	2.91

表-3 コンクリート材料特性

$f'_c$ ( $\text{N/mm}^2$ )	$\epsilon_c$ (%)	$E_c$ ( $\text{kN/mm}^2$ )
39.8	0.24	29.9

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

表-4 鉄筋材料特性

呼び	規格	$f_y$ ( $\text{N/mm}^2$ )	$\epsilon_y$ (%)	$f_u$ ( $\text{N/mm}^2$ )	$E_s$ ( $\text{kN/mm}^2$ )
D13	SD345	378.2	0.225	535.5	168.4
D6	SD295A	440.4	0.219	549.5	201.3

ここに、 $f_y$ ,  $\epsilon_y$ : 降伏点応力及びひずみ,  $f_u$ : 引張強度,  $E_s$ : 弾性係数

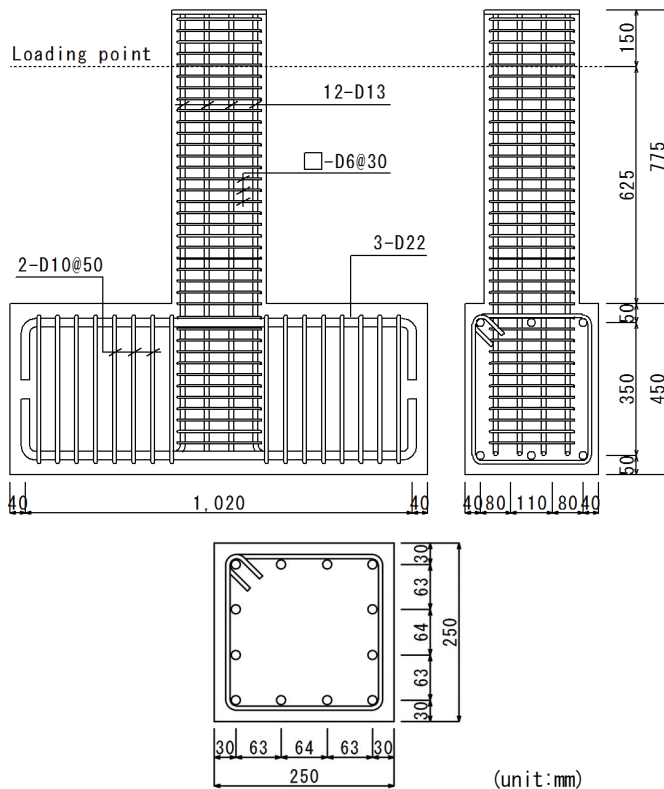


図-1 試験体詳細 ( $a/D=2.5$ )

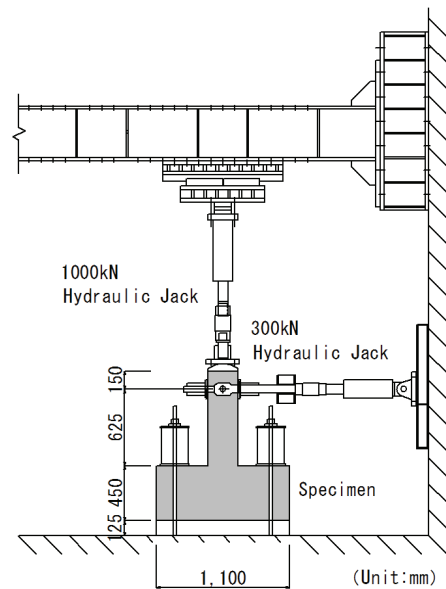


図-2 荷重装置 ( $a/D=2.5$ )

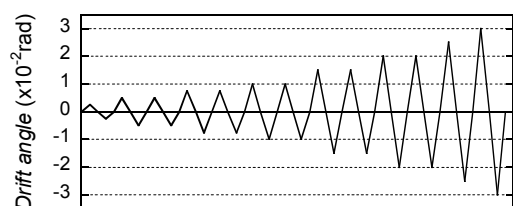


図-3 荷重履歴

3.3 にて後述する中段筋を有する柱断面の曲げ終局耐力略算式<sup>9)</sup>における釣り合い軸力  $N_b$  は 871kN (釣り合い軸力比 0.35) であり、本実験で試験体に作用させた軸圧縮力は釣り合い軸力よりわずかに低い値である。また、本実験では曲げ終局耐力及び復元力特性の把握を目的としており、試験体は3体とも、せん断破壊に対して曲げ降伏が先行するような設計とした。

## 2.2 荷重方法及び測定方法

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、 $R=0.0025\text{rad}$ ,  $0.005\text{rad}$ ,  $0.0075\text{rad}$ ,  $0.01\text{rad}$ ,  $0.015\text{rad}$ ,  $0.02\text{rad}$ ,  $0.025\text{rad}$ ,  $0.03\text{rad}$  を目標部材角とする正負交番繰り返し荷重 (図-3 に示すように、 $R=0.005\text{rad}\sim 0.02\text{rad}$  のサイクルは各2回繰り返し、それ以外は各1回) とした。部材角  $R$  は、水平変位をせん断スパンで除することにより算出した。水平変位はスタブに対する荷重点位置の相対水平変位とし、スタブに固定した治具を介して荷重点位置に設置

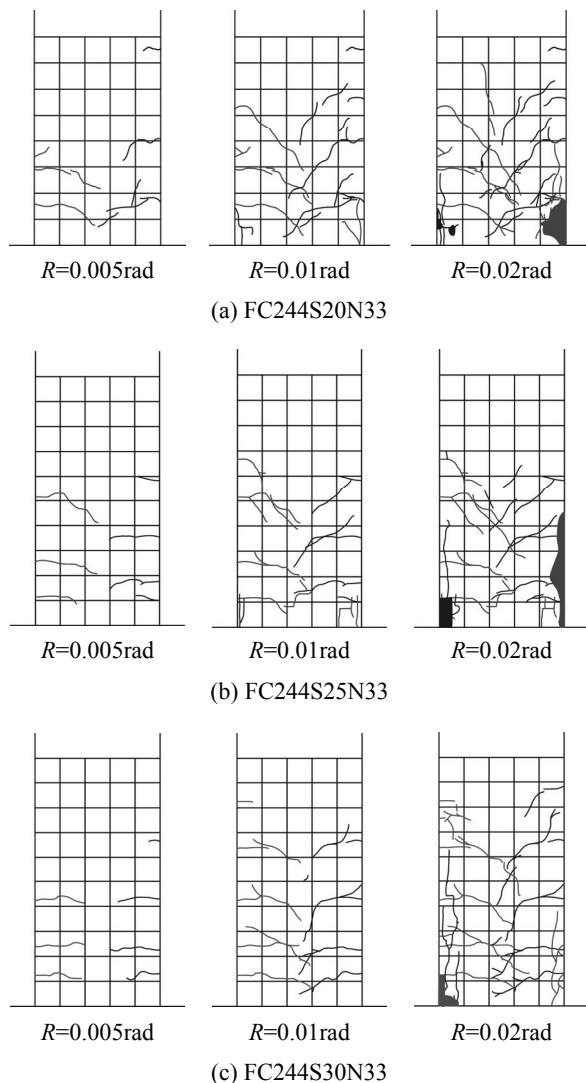


図-4 損傷状況

した変位計により計測した値とした。なお、FC244S25N33 では、制御の不具合により、 $R=\pm 0.0025\text{rad}$  サイクルにおいては、 $R=\pm 0.002\text{rad}$  までの荷重となった。

## 3. 実験結果

### 3.1 ひび割れ及び破壊性状

図-4 に  $R=0.005\text{rad}$ ,  $0.01\text{rad}$ ,  $0.02\text{rad}$  の各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、左向きが正荷重の方向である。

いずれの試験体も  $R=0.0025\text{rad}$  サイクル途中で曲げひび割れの発生が確認され、 $R=0.005\sim 0.01\text{rad}$  サイクル途中で曲げひび割れが斜め方向に進展し、 $R=0.01\text{rad}$  付近で柱脚においてかぶりコンクリートの圧壊が発生した。その後、部材角の増大に伴って、曲げひび割れ、曲げせん断ひび割れ、コンクリート圧壊とも進行したが、荷重終了時まで急激に水平耐力が低下することなく、安定した軸力保持能力を示した。せん断スパン比に関係なく、

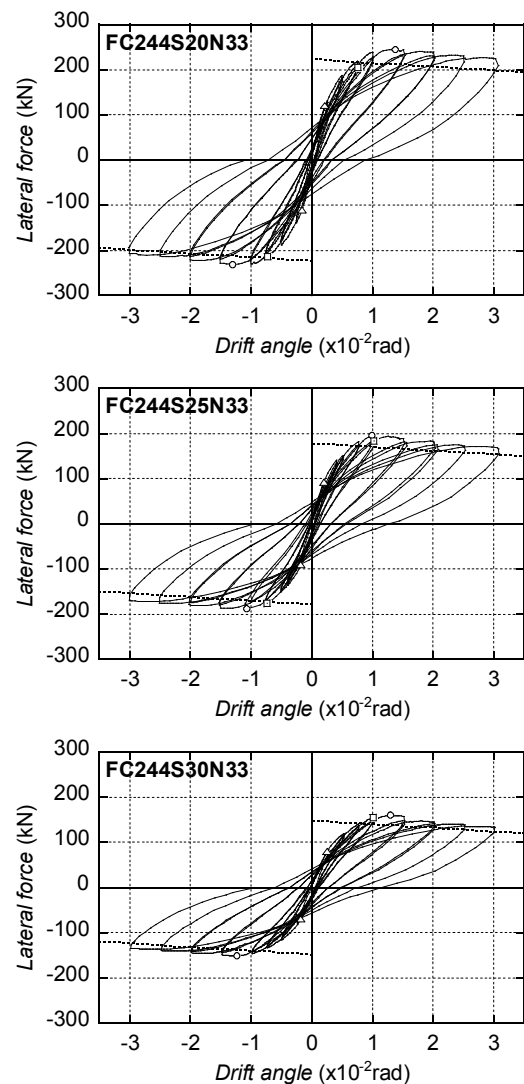


図-5 水平力-部材角関係

コンクリートの損傷は柱脚から 1.0D~1.5D 程度の範囲に集中した。

一方、曲げせん断ひび割れの発生状況については、せん断スパン比の大小でやや異なる傾向が見られた。せん断スパン比が最も大きい FC244S30N33 では、いずれの曲げひび割れも材軸付近で斜め方向に進展したのに対して、せん断スパン比が小さくなるにつれて、危険断面から離れた位置に発生した曲げひび割れが、引張縁に近い位置から斜め方向に進展する傾向が見られた。せん断スパン比が小さな試験体ではモーメント勾配が大きくなるため、ひび割れが集中した柱脚から 1.0D~1.5D 程度の範囲内でもモーメントが大きく異なることが原因であると考えられる。

### 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、△印で曲げひび割れが発生した点を、○印で水平力が最大となった点を、点線で後述の曲げ終局耐力時水平耐力  ${}_cM_{ul}$  をそれぞれ示す。主筋の危険断面付近（柱脚危険断面から上側 25mm の位置）に貼付したひずみゲージの値が初めて降伏ひずみに到達した点を□印で示す。なお、FC244S30N33 の負荷荷時の□印は、ゲージ不調のためプロットしていない。

FC244S20N33 及び FC244S25N33 では、 $R=0.0075\text{rad}$  又は  $0.01\text{rad}$  サイクルにおいて、圧縮側主筋ひずみが先に降伏ひずみに到達し、その後、 $R=0.01\text{rad}$  サイクルにおいて引張側主筋のひずみが急激に増加した。一方、FC244S30N33 では、 $R=0.01\text{rad}$  サイクルにおいて、引張側主筋ひずみが先に降伏ひずみに到達した。いずれの試験体においても、引張側主筋の急激なひずみ増加が確認された後に、剛性が大幅に低下して耐力が頭打ちになり、紡錘型の履歴特性を示しており、曲げ降伏先行型の破壊形式を示した。

### 3.3 耐力比較

表-5 に各試験体の最大曲げモーメント実験値  ${}_eM_u$ 、曲げ終局耐力計算値  ${}_cM_{u1}$ 、 ${}_cM_{u2}$  及び計算値と実験値の比をそれぞれ示す。なお、 ${}_cM_{u1}$  の算出には、中段筋を有す

る柱断面の曲げ終局耐力略算式<sup>9)</sup>（以下、略算式）である式(1)を用いた。

$${}_cM_{u1} = 0.5a_g f_y g_l D + 0.5ND \left( 1 - \frac{N}{bDf'_c} \right) \quad (N_b \geq N \geq 0) \quad (1)$$

ここに、 $N_b$ : 釣り合い軸力 ( $=0.22(1+g_l)bDf'_c$ )、 $g_l$ : 引張鉄筋重心と圧縮鉄筋重心との距離の全せいに対する比、 $N$ : 圧縮軸力、 $a_g$ : 全主筋断面積である。

また、 ${}_cM_{u2}$  の算出には、コンクリート応力分布を ACI コンクリート等価応力ブロック<sup>10)</sup>に置換する平面保持解析（以下、ACI 法）を用いた。コンクリートの終局圧縮ひずみは 0.003 とし、鉄筋の応力-ひずみ関係は完全弾塑性と仮定した。

全ての試験体で曲げ降伏先行型の破壊形式を示したことから、せん断スパン比の大小に関係なく、実験値はいずれの試験体においてもほぼ同じ値となった。実験値と略算式による計算値の比は 1.09~1.15 となり、全体的にやや安全側ながらも精度良く評価できた。一方で、実験値と ACI 法による計算値の比は 1.20~1.27 となり、かなり実験値を過小評価したが、この傾向は Ang らが文献 11) で指摘しているように、普通コンクリートを用いた一般的な RC 柱部材でも見られる傾向である。なお、文献 11) の提案式を用いて ACI 法による計算値を補正すると、実験値と計算値の比は 0.96~1.01 となり、非常に精度良く評価できた。

$R=0.01\text{rad}$  で曲げ終局耐力を発揮すると仮定した場合の曲げ終局耐力（略算式計算値）時せん断力  ${}_cQ_{u1}$ 、せん断終局耐力計算値  ${}_cQ_{su}$  及びせん断余裕度 ( ${}_cQ_{su}/{}_cQ_{u1}$ ) を表-5 に併せて示す。 ${}_cQ_{su}$  の算出には広沢式<sup>12)</sup>である式(2)を用いた。

$${}_cQ_{su} = \left\{ \frac{0.115k_u k_p (f'_c + 17.6)}{M/(Qd) + 0.115} + 0.85\sqrt{p_w \sigma_{wy}} + 0.1\sigma_0 \right\} bj \quad (2)$$

ここで、 $k_u$ 、 $k_p$ : 断面寸法による補正係数 ( $k_u=0.84$ 、 $k_p=0.82p_t^{0.23}$ )、 $p_t$ : 引張鉄筋比 (%),  $d$ : 有効せい、 $\sigma_0$ :

表-5 耐力比較

試験体名		曲げ耐力				せん断耐力				
		${}_eM_u$ (kNm)	${}_cM_{u1}$ (kNm)	$\frac{{}_eM_u}{{}_cM_{u1}}$	${}_cM_{u2}$ (kNm)	$\frac{{}_eM_u}{{}_cM_{u2}}$	${}_cQ_{u1}$ (kN)	${}_cQ_{su}$ (kN)	$\frac{{}_cQ_{su}}{{}_cQ_{u1}}$	
FC244S20N33	正	128.2	111.3	1.15	101.3	214.4	232.0	1.08		
	負	-121.1		1.09						
FC244S25N33	正	127.3		1.14		169.9	214.7		1.26	
	負	-124.1		1.12						
FC244S30N33	正	128.0		1.15		140.2	203.0			1.45
	負	-121.5		1.09						

軸力による平均軸応力度,  $j$ : 応力中心間距離 ( $=7/8d$ ) である。

表-5 に示す通り, 全ての試験体でせん断余裕度が 1 を上回り, 曲げ降伏先行型の破壊形式を示した実験結果と一致することから, 通常の RC 部材を対象とした既往の評価法で本実験の破壊形式を予測することができた。ただし, FA 外割混合コンクリートを用いた RC 部材に対するせん断終局耐力式の予測精度自体については, 現状では実験データが少ないため, 今後, せん断破壊先行型の試験体を用いた実験による検証が必要である。

### 3.4 骨格曲線

RC 部材のモーメント-部材角関係における骨格曲線のモデル化には, 図-6 に示すように, 曲げひび割れ点 (C 点), 曲げ降伏点 (Y 点) を折れ点とするトリリニアモデルを使用するのが一般的である。ここでは, FA 外割混合コンクリートを用いた RC 柱に対するトリリニアモデルの適用性に関して検討を行う。なお, 骨格曲線の各特性値の計算方法は次に示す通りである。

初期剛性

$$K_e = \frac{M}{R} = \frac{3E_c I_e}{a} \quad (3)$$

曲げひび割れ点<sup>13)</sup>

$${}_c M_{cr} = 0.56\sqrt{f'_c} Z_e + \frac{ND}{6} \quad (4)$$

$${}_c R_{cr} = \frac{{}_c M_{cr}}{K_e} \quad (5)$$

曲げ降伏点

$${}_c M_y = {}_c M_{u1} \quad (6)$$

$${}_c R_y = \frac{{}_c M_y}{\alpha_y K_e} \quad (7)$$

$$\alpha_y = (0.043 + 1.64np_t + 0.043a/D + 0.33\eta)(d/D)^2 \quad (2 < a/D < 5) \quad (8)$$

$$\alpha_y = (-0.0836 + 0.159a/D + 0.169\eta)(d/D)^2 \quad (1 < a/D \leq 2) \quad (9)$$

ここで,  $K_e$ : 初期剛性,  $I_e$ : 等価断面 2 次モーメント,  ${}_c M_{cr}$ : 曲げひび割れモーメント計算値,  $Z_e$ : 断面係数,  ${}_c R_{cr}$ :  ${}_c M_{cr}$  時部材角,  ${}_c M_y$ : 曲げ降伏モーメント計算値,  ${}_c R_y$ :  ${}_c M_y$  時部材角,  $\alpha_y$ : 降伏点剛性低下率<sup>14), 15)</sup>,  $n$ : ヤング係数比,  $\eta$ : 軸力比である。

図-7 に, 実験で得られた各試験体の  $R=0.02\text{rad}$  サイクルまでのモーメント-部材角関係及びその包絡線を細点線及び太点線で, 前述の評価法により得られた骨格曲線を太実線でそれぞれ示す。図中の△印及び○印は, それぞれ曲げひび割れが発生した点及び曲げモーメン

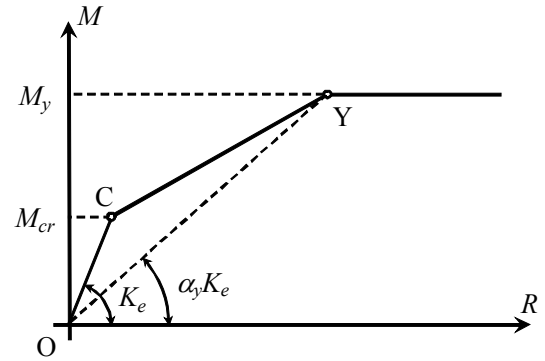


図-6 骨格曲線 (トリリニアモデル)

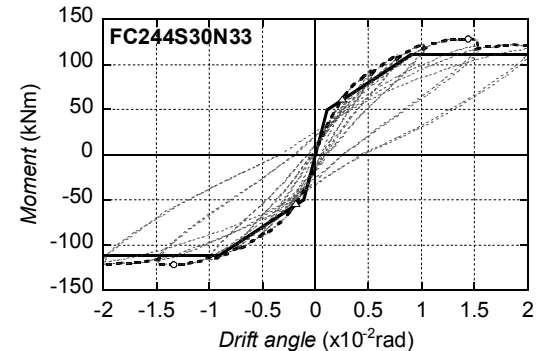
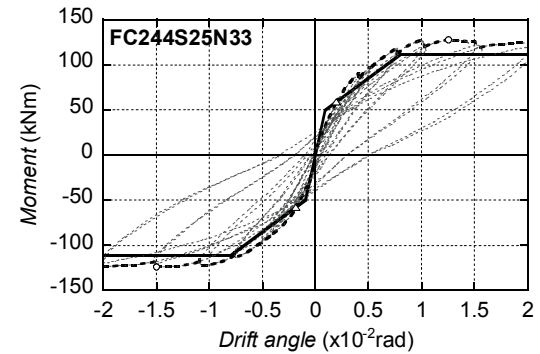
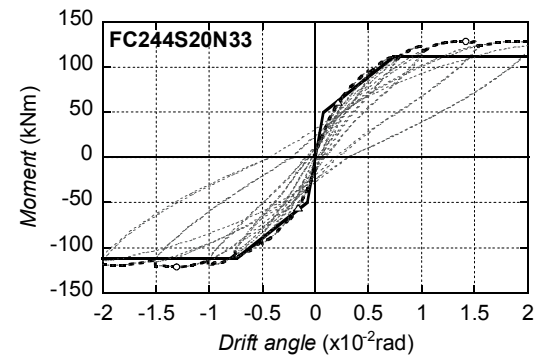


図-7 骨格曲線

トが最大となった点である。モーメント実験値は, 軸力による  $P-\Delta$  効果を考慮した値である。初期剛性をやや大きく評価したものの, 曲げひび割れ発生後の剛性は良好な精度で一致しており, 全体的には実験で得られたモーメント-部材角関係の包絡線を良好に予測できた。すなわち, 通常の RC 部材に対する一般的な骨格曲線の評価

方法は、FA 外割コンクリートを用いた RC 柱部材に対しても適用することが可能であると言える。

なお、本論文では、式(3)に示す通り、初期剛性の算出に曲げ弾性剛性のみを用いたが、これにせん断弾性剛性を考慮した場合の初期剛性は、それぞれ約 15% (FC244H20N33)、約 10% (FC244H25N33)、約 7% (FC244H30N33) 小さな値となり、実験結果との差はより小さくなる。

#### 4. まとめ

本研究では、せん断スパン比を実験変数とした FA 外割混合コンクリートを使用した RC 柱試験体 3 体に対する載荷実験を実施し、その耐震性能の検証及び既往の評価法の適用性に関する検討を行った。得られた知見を以下に示す。

- ・ 履歴性状にせん断スパン比の影響はほとんど見られなかった。ひび割れ性状については、せん断スパンが小さな試験体で斜め方向のひび割れが増加する傾向が見られた。
- ・ 最大曲げモーメント実験値と略算式による曲げ終局耐力計算値の比は 1.09~1.15 となり、全体的にやや安全側ながらも精度良く評価できた。一方、最大曲げモーメント実験値と ACI 法による曲げ終局耐力計算値の比は 1.20~1.27 となり、かなり実験値を過小評価したものの、これは文献 11) で指摘されている一般的な RC 柱部材が示す傾向と同様である。
- ・ FA 外割混合コンクリートを用いた RC 柱試験体のモーメント-部材角関係の骨格曲線を、通常の RC 部材に対する評価法である降伏点剛性低下率を用いたトリリニアモデルで精度良く評価することが可能だった。

#### 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・井上卓馬氏、同学部生・杉田ようこ氏の多大な協力を得た。本実験の試験体に使用した鉄筋の一部は京都大学・河野進准教授より御提供頂いた。コンクリートの作製には株式会社溝尾六甲生コン第 2 工場、BASF ポゾリス株式会社大阪支店の多大な協力を得た。ここに記して謝意を示す。

#### 参考文献

- 1) 経済産業省資源エネルギー庁：平成 20 年度エネルギーに関する年次報告（エネルギー白書 2009），pp.114-115，2009

- 2) 財団法人石炭エネルギーセンター石炭灰実態調査 <<http://www.jcoal.or.jp/coalash/coalash.html>> (2009/12/15 参照)
- 3) 松藤泰典ほか：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.57-68，2002.7
- 4) 小山智幸ほか：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
- 5) 高巢幸二ほか：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.65-68，2009.3
- 6) 藤永隆ほか：石炭灰を大量混合した RC 梁の曲げせん断挙動に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.3，pp.247-252，2008
- 7) 荒木秀夫ほか：石炭灰を使用した実大 RC 柱の耐震性能に関する実験的研究，日本建築学会中国支部研究報告集，第 26 巻，pp.41-44，2003.3
- 8) 松藤泰典ほか：石炭灰を外割大量使用するコンクリートの調合に関する研究，コンクリート工学論文集，Vol.12，No.2，pp.51-60，2001.5
- 9) 日本建築学会：建築耐震設計における保有耐力と変形性能（1990），pp.396-398，1990
- 10) ACI Committee 318，“Building Code Requirements for Structural Concrete (318M-99) and Commentary (318RM-99),” pp.109，1999
- 11) Ang Beng Ghee, et al.: Seismic Shear Strength of Circular Reinforced Concrete Columns, ACI Structural Journal, Vol.86, No.1, pp.45-59, Jan.-Feb., 1989
- 12) 広沢雅也ほか：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
- 13) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説（1999），pp.54，1999
- 14) 菅野俊介：鉄筋コンクリート部材の復元力特性に関する研究，コンクリートジャーナル，Vol.11，No.2，pp.1-9，1973.2
- 15) 菅野俊介ほか：鉄筋コンクリート短柱の崩壊防止に関する総合的研究（その 18：初ひびわれ時及び降伏時の剛性），日本建築学会大会学術講演梗概集，構造系，pp.1323-1324，1974.10