

## 論文 石炭灰を有効利用した実大鉄筋コンクリート柱の耐震性能

椋山 健二<sup>\*1</sup>・中谷 誠<sup>\*2</sup>・荒木 秀夫<sup>\*3</sup>・菅野 俊介<sup>\*4</sup>

要旨：石炭火力発電所から排出される石炭灰をコンクリートに混入し建築構造材料としてリサイクルする資源循環型技術の開発を目指す研究の一環として、石炭灰の混入とコンクリート強度および軸力比を変数に実大鉄筋コンクリート柱の静的載荷実験を実施した。実験結果から軸圧縮性能、水平抵抗性能、エネルギー吸収能力に関して石炭灰を混入した場合も普通コンクリートによる柱と同等の性能を有することを実大サイズで検証して、現状では処理に苦慮している石炭灰を建築構造分野において大量に有効利用できることを示した。

キーワード：石炭灰、建築構造材料、リサイクル、実大鉄筋コンクリート柱、耐震性能

## 1. はじめに

石炭火力発電所から産出される石炭灰は今日の電力事情から今後その量が世界規模で急増することが確実視されている。日本においては、その発生量が近年中に年間1千万トンを超えると試算されているが、現状ではその60%程度しか有効利用されていない。その結果、大量の石炭灰が埋め立て処分されており、今日の最重要課題である環境保全の観点から社会問題となっている<sup>1)</sup>。したがって、環境保全対策および有限な資源の循環利用促進の観点から、石炭灰の有効利用拡大が模索されている状況にある。一方、建築分野においては、陸砂の減少および海砂採取禁止の動きを受け、砂、砂利といったコンクリート用骨材の不足が懸念されており、代替材料の開発が求められている。

石炭灰もしくは精製分級したフライアッシュを粉体代替材または細骨材置換材としてコンクリートに混入し活用する技術は既に提案され、これまでにその物性に関する研究が国内外で進められてきた。これらの研究から、石炭灰を混入した場合も適切な調合と練混を実施することで、普通コンクリートに匹敵する材料特性を実

現できることが確認されており<sup>2)</sup>、この技術の実用化を目指すべき段階に至っている。筆者らは実用先としてコンクリートを大量に消費している建築分野に注目し、石炭灰を活用した鉄筋コンクリート(以下、RC)建築物の実現に向け、実験的研究を展開してきた。これまでに石炭灰を混入したコンクリートの建築構造材料としての力学的特性を把握し<sup>3)</sup>、各種の縮小RC部材の載荷実験を実施して、石炭灰の混入が構造安全性に及ぼす影響を検討した<sup>4)</sup>。しかしながら、石炭灰を混入することで発生するコンクリート内部での粒度構成の変化は、試験体のサイズに応じて、その力学的特性に顕著な影響を及ぼす可能性があるため、実用に供するためには実大サイズでの検証が必要である。

本研究の目的は、石炭灰を建築構造材料としてリサイクルする資源循環型技術の実用化を目指し、石炭灰を大量に混入したRC部材の耐震性能を実大サイズで検証することである。そのため、石炭灰混入の有無およびコンクリート強度を変数として実大RC柱3体を製作し、静的載荷実験の結果から軸圧縮性能および水平抵抗性能に注目して比較・検討した。

---

\*1 広島大学助手 大学院工学研究科 博(工) (正会員)  
 \*2 広島大学大学院生 大学院工学研究科 (正会員)  
 \*3 広島大学助教授 大学院工学研究科 工博 (正会員)  
 \*4 広島大学教授 大学院工学研究科 工博 (正会員)

## 2. 実験概要

### 2.1 実験変数

本研究では表 - 1 に示す3体の実大RC柱を試験体とした。変数は石炭灰混入の有無，コンクリート強度と軸力比である。低層建物の最下層中柱を想定したFS27CAでは石炭灰を細骨材置換材として混入し，コンクリート設計基準強度 $F_c$ を $27\text{N/mm}^2$ とした。載荷実験では実建物における軸力を勘案し，軸力比 $\eta$ を0.1とした一定軸力 $N$ を導入する。FS36CAとFS36NCでは中層建物の最下層中柱を想定し， $F_c$ を $36\text{N/mm}^2$ ， $\eta$ を0.2とする。FS36CAでは石炭灰を細骨材置換材として混入し，FS36NCでは石炭灰を混入せず普通コンクリートを用いており，石炭灰混入の効果を検討するための比較対象である。

### 2.2 石炭灰とコンクリートの性質

使用した石炭灰は中国電力（株）新小野田発電所で産出された原粉で，その物理的性質と化学構成を表 - 2 に，粒度分布性状を図 - 1 にそれぞれ示す。原粉ではあるが，その性状はJISフラ

イアッシュII種にほぼ匹敵するもので，本研究では精製分級せずに原粉をそのまま使用した。各試験体用のコンクリート調合を表 - 3 に示す。 $F_c$ はFS27CAで $27\text{N/mm}^2$ ，FS36CAとFS36NCで $36\text{N/mm}^2$ を目標値とし，いずれの場合もスランプ値 $18 \pm 2.5\text{cm}$ ，空気量 $4.5 \pm 1.0\%$ を目標として試験練りに基づき調合を決定した。FS27CAとFS36CAでは細骨材全体積の20%を石炭灰で置換している。セメントには普通ポルトランドセ

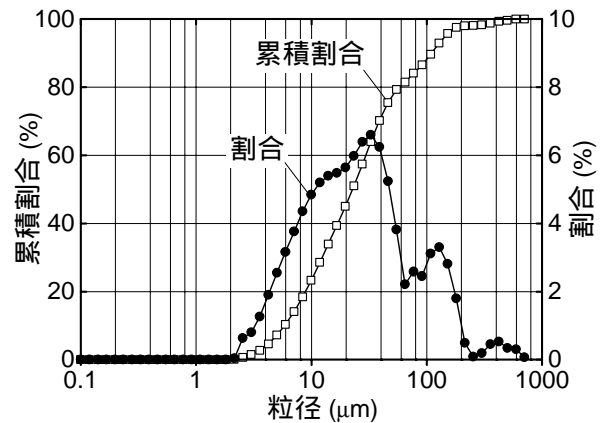


図 - 1 石炭灰の粒度分布

表 - 1 試験体の諸元

試験体名	石炭灰の混入方法	柱の想定位置	$F_c$ ( $\text{N/mm}^2$ )	軸力比; $\eta$
FS27CA	細骨材置換材 (体積比20%)	低層建物の1階中柱	27	0.1
FS36CA		中層建物の1階中柱	36	0.2
FS36NC	なし(普通コンクリート)			

$F_c$  ; コンクリート設計基準強度

$\eta = N / (bDF_c)$  ただし， $N$  ; 軸力， $b, D$  ; 柱断面の幅と全せい

表 - 2 石炭灰の物理的特性と化学構成

湿分 (%)	強熱減量 (%)	密度 ( $\text{g/cm}^3$ )	ブレン値 ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )	フロー値比 (%)	MB吸着量 ( $\text{mg/g}$ )			
0.1以下	3.20	2.13	3,200	101	0.44			
化学成分 %	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O
	59.7	21.0	8.8	2.2	2.5	0.4	0.3	3.5
化学成分 %	SrO	ZrO <sub>2</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	BaO	Na <sub>2</sub> O	MgO	
	0.2	0.2	0.1	-	-	0.4	0.5	

表 - 3 コンクリート調合表

試験体名	W/C (%)	水(W) ( $\text{kg/m}^3$ )	セメント(C) ( $\text{kg/m}^3$ )	細骨材 ( $\text{kg/m}^3$ )		粗骨材 ( $\text{kg/m}^3$ )
				砂	石炭灰	
FS27CA	56	180	320	600	124	1,023
FS36CA	45	180	400	577	124	983
FS36NC	41	180	439	725		947

メント，砂には砕砂と海砂の混合物，粗骨材には砕石を使用した。実験実施時におけるコンクリートの材料特性を表 - 4に示す。実大RC柱と同時に作製したコンクリート供試体(直径10cm，高さ20cmの円柱)の材料試験をJISに準拠して行い，圧縮強度 $\sigma_B$ の1/3の点を弾性限界としてヤング係数Eとポアソン比 $\nu$ を求めた。いずれの特性も石炭灰混入の有無に関わらず既往の研究による普通コンクリートと同様の傾向にある。ただし，FS36NCの圧縮強度は目標値を超え，他より大きな余裕率を示した。石炭灰を混入するコンクリートの調合において，圧縮強度目標値に対する余裕率に関して今後の検討を要する。

### 2.3 試験体の概要と製作

試験体の外形は同一であり，断面80cm角，高さ2.4mの実大柱の上下に荷重装置へ固定するためのスタブが取り付け。試験体の詳細を図 - 2に示す。配筋では，主筋は同仕様とし，水平荷重に対して曲げ降伏先行型崩壊形となるよう，せん断余裕度1.1を目標として帯筋を設計した。

試験体製作時のコンクリート打設では，全試験体とも同一の鋼製型枠を使用し縦打ちとした。実施工を想定して，生コンクリートプラントで練混したコンクリートをミキサー車で運搬し，ポンプ圧送車で打設している。脱型は湿潤状態確保のために打設後7日以上経過の後とし，脱型後は気中養生した。温度管理は行っていない。

### 2.4 荷重方法

荷重実験は福山大学ハイテクリサーチセンター所有の大型荷重装置を用いて実施した。実験装置の全景を図 - 3に示す。まず，軸力を目標の一定軸力Nに至るまで荷重し，その際の軸圧縮性能を検討した。軸力比 $\eta$ はFS27CAで0.1，FS36CAとFS36NCで0.2である。その後，図 - 4に示すように一定軸力Nを保ちつつ，水平方向に逆対称加力方式で正負漸増繰り返し荷重を与えた。水平荷重では所定の変形角を2回ずつ繰り返し，その後，正方向に押し抜いた。荷重中は軸力，水平力に加えて，試験体の各点において変位およびひずみを計測している。

## 3. 実験結果と考察

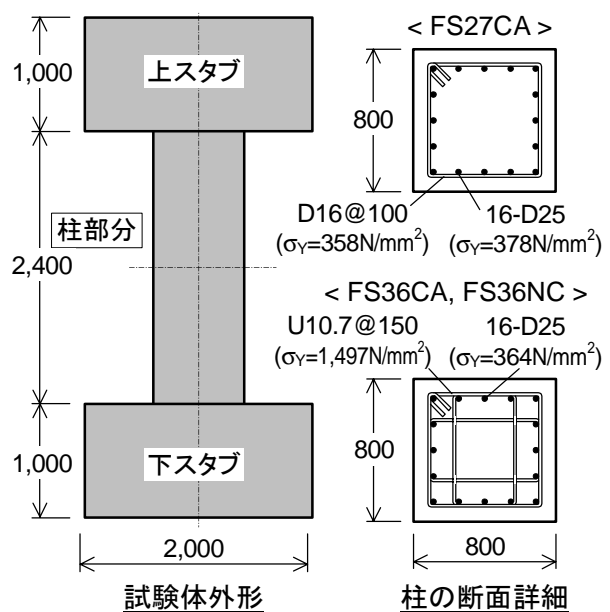
### 3.1 軸圧縮性能

一定軸力を導入した際の軸方向に関する応力 - ひずみ関係を図 - 5に示す。ここで，応力とは軸力を柱断面積で除した値であり，鉄筋の影響は考慮していない。ひずみは柱表面および主筋に添付したひずみゲージの計測値の平均である。いずれの実大RC柱ともに比較のために示したコンクリート供試体と同様に直線的な挙動であり，弾性範囲にあることが確認できる。この軸力荷重時のヤング係数とポアソン比を算出し，文献<sup>5)</sup>の中に示されているコンクリートのヤング係数算定式に基づく曲線およびポアソン比の範囲を併せて図 - 6に示す。コンクリート供試体の値は実大RC柱と同じ軸応力までのデータで算定し直しており，表 - 4に示した材料特性と比較してヤング係数は約5%高く，ポアソン比は

表 - 4 コンクリートの材料特性

試験体名	材齢(日)	$\sigma_B$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_t$ (N/mm <sup>2</sup> )	E(N/mm <sup>2</sup> )	$\nu$
FS27CA	36	27.1	2.5	2.10×10 <sup>4</sup>	0.177
FS36CA	33	33.3	2.8	2.40×10 <sup>4</sup>	0.169
FS36NC	28	43.6	3.3	3.03×10 <sup>4</sup>	0.170

$\sigma_B$ ；圧縮強度， $\sigma_t$ ；引張強度  
E；ヤング係数， $\nu$ ；ポアソン比



備考：単位：mm， $\sigma_y$ ；鉄筋の降伏強度

図 - 2 試験体詳細

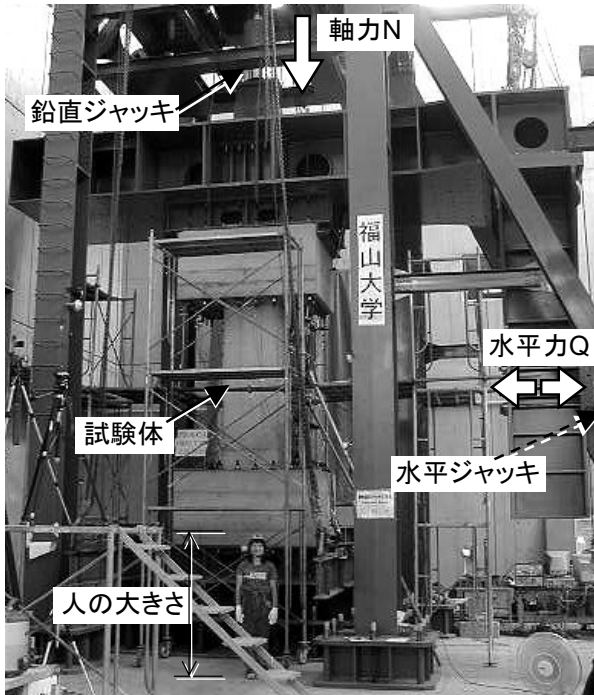
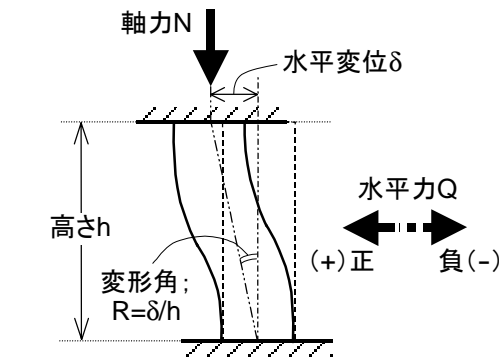


図 - 3 実験装置全景



軸載荷 ..... 一定軸力N

$$N = \eta \cdot F_c \cdot b \cdot D$$

FS27CA;  $\eta = 0.1$ , FS36CA, FS36NC;  $\eta = 0.2$

水平載荷 ..... 正負交番繰り返し載荷

$R = 0.0625, 0.125, 0.25, 0.5, 1.0, 2.0\%$  (各2サイクル)

→ 正方向に押し抜き

図 - 4 荷重方法

同程度となった。いずれの場合も実大RC柱，コンクリート供試体ともにヤング係数については算定式曲線と近接し，ポアソン比についてはばらつきがあるものの提示範囲内かその付近に位置している。石炭灰の混入に拘わらず，本研究における実大RC柱の弾性範囲での軸圧縮に対するヤング係数およびポアソン比はコンクリート供試体の値と同程度であり，既往の普通コンクリート用の提示式で評価できた。

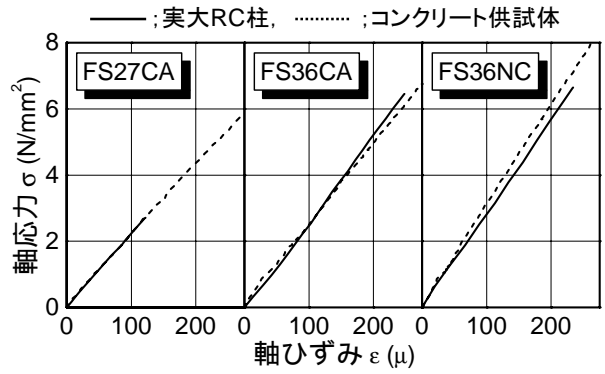


図 - 5 軸応力 - 軸ひずみ関係

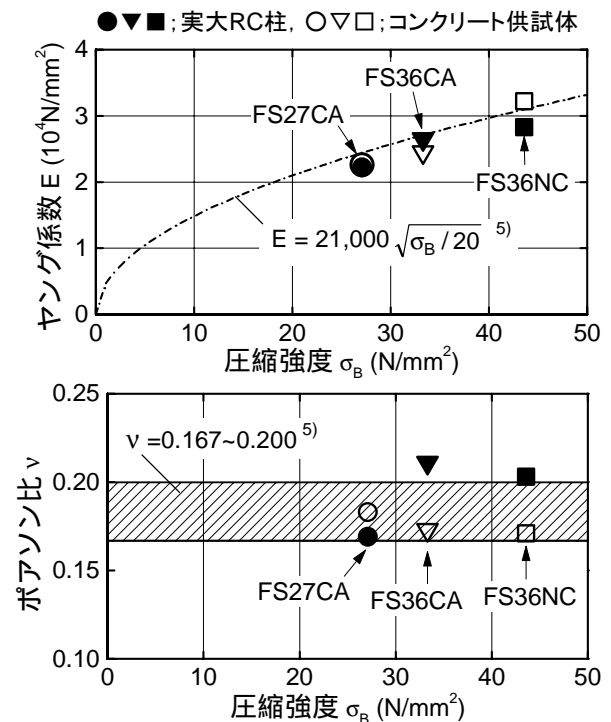


図 - 6 ヤング係数とポアソン比の比較

### 3.2 水平抵抗性能

一定軸力下における水平力荷重によって発生した損傷の進展状況は試験体による差はほとんどなく，変形角Rに応じて同様の傾向を示した。いずれの試験体もR = 2%に向かう途中で試験体全幅に及ぶせん断ひび割れが発生したが，その後の押し抜き荷重でも急激な破壊を起こさず，曲げ降伏先行型崩壊形となった。実験終了時における各試験体の損傷状況を図 - 7に示す。

水平方向に関する荷重 - 変位履歴曲線を図 - 8に示す。縦軸は水平力Qを後述の終局曲げ耐力計算値 $CQ_{MU}$ で除して基準化し，横軸は変形角Rとしている。各履歴には最初の曲げひび割れ発

生点(BC), 曲げせん断ひび割れ発生点(BSC), 最大耐力点( $E_{Q_{max}}$ )をマークし, R=3%での耐力を記した。石炭灰混入に拘わらずFS36CAとFS36NCでは極めて類似した履歴を描いており, R=3%でも最大値の9割近い耐力を保った。なお, FS36NCではR=1%の正加力2サイクル目除荷時に軸力が一時的に抜けたため, その際の剛性とR=2%の正加力1サイクル目の剛性が低下していることを付記する。それらに比べ帯筋による拘束効果が劣るFS27CAではR=3%で耐力が約6割に低下したものの一定軸力は保持しており, いずれの場合も大変形域に至るまで軸抵抗性能の劣化は見られなかった。履歴の各ループに関して等価粘性減衰定数 $h_{eq}$ を算出し, 変形角Rとの関係として図 - 9に示す。いずれも同様の傾向を示しており, 十分なエネルギー吸収能力を持つことが確認できる。

実験による曲げひび割れ点, 曲げせん断ひび割れ点および最大の水平耐力を比較して表 - 5に示す。同表中には文献<sup>(6),(7)</sup>の普通コンクリートによるRC部材用の算定式で求めた各計算値および実験値との比率を併せて示す。いずれの場合も曲げひび割れ点と曲げせん断ひび割れ点の水平耐力は計算値に近似した値であり, 最大耐力は終局曲げ耐力計算値をわずかに超え, 終局せん断耐力計算値と同等の値となった。したがって, 石炭灰を活用した実大RC柱の水平耐力は既往の算定式で評価可能であることがわかる。

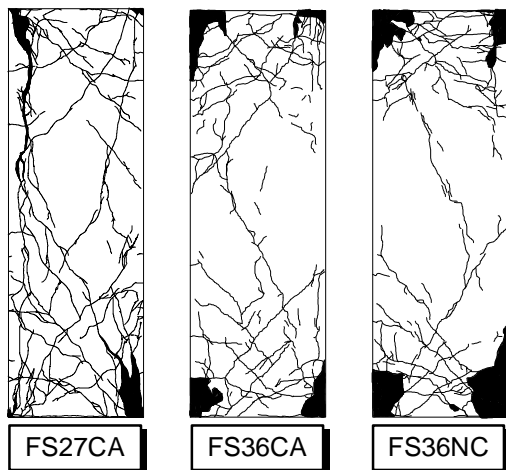
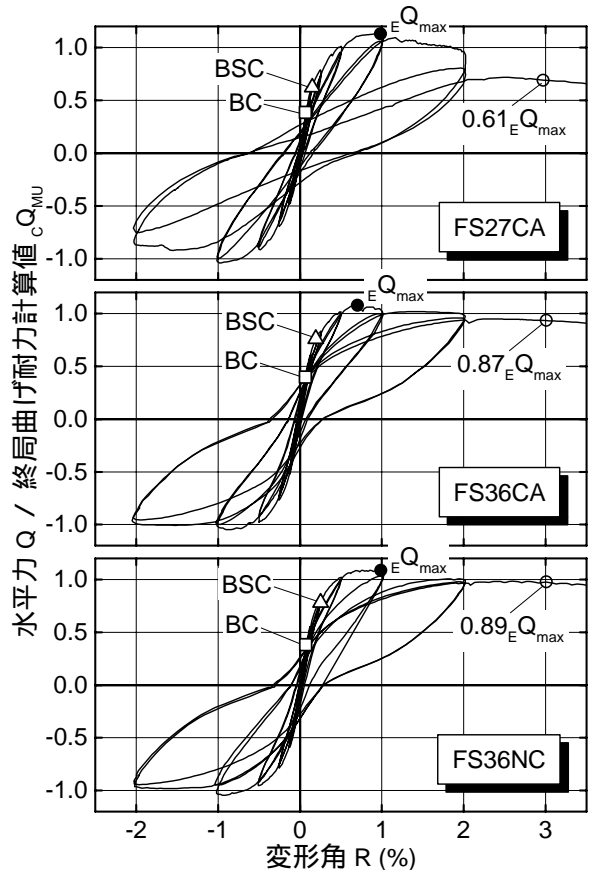


図 - 7 実験終了時における損傷状況

FS36CAとFS36NCにおける主筋のひずみ分布を比較し図 - 10に示す。FS27CAも同様の傾向であるため割愛した。いずれもR=0.5%までは降伏しておらず, R=1%のサイクル以降に試験体上下端部から降伏に達している。主筋の降伏した部分をヒンジ領域と想定すると, R=2%時点において上下端部から柱せいDの高さの範囲がヒンジ領域となっている。



備考: BC; 曲げひび割れ点, BSC; 曲げせん断ひび割れ点,  $E_{Q_{max}}$ ; 水平最大耐力

図 - 8 水平方向の荷重 - 変位履歴性状

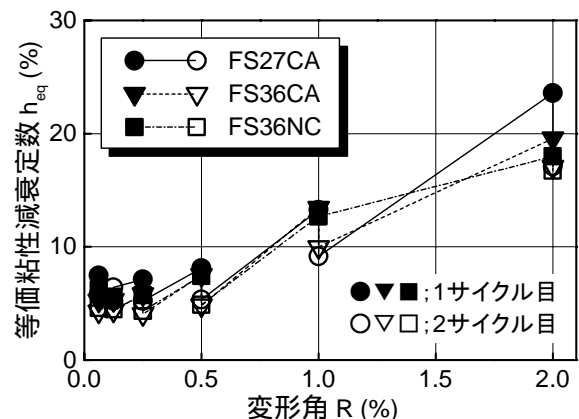


図 - 9 等価粘性減衰定数 $h_{eq}$ の推移

表 - 5 水平耐力の比較

試験 体名	実験値 (kN)			計算値 (kN)				実験値 / 計算値			
	$E_{QBC}$	$E_{QBSC}$	$E_{Q_{max}}$	$c_{QBC}$	$c_{QBSC}$	$c_{Q_{MU}}$	$c_{Q_{SU}}$	$\frac{E_{QBC}}{c_{QBC}}$	$\frac{E_{QBSC}}{c_{QBSC}}$	$\frac{E_{Q_{max}}}{c_{Q_{MU}}}$	$\frac{E_{Q_{max}}}{c_{Q_{SU}}}$
FS27CA	469	758	1,375	459	905	1,216	1,337	1.02	0.84	1.13	1.03
FS36CA	735	1,408	1,997	790	1,427	1,851	1,939	0.93	0.97	1.08	1.03
FS36NC	732	1,495	2,083	841	1,516	1,917	2,091	0.87	0.99	1.09	1.00

$E_{QBC}$ ,  $c_{QBC}$ ; 曲げひび割れ点耐力の実験値と計算値<sup>6)</sup>,  $E_{QBSC}$ ,  $c_{QBSC}$ ; 曲げせん断ひび割れ点耐力の実験値と計算値<sup>6)</sup>  
 $E_{Q_{max}}$ ; 水平最大耐力 (実験値),  $c_{Q_{MU}}$ ,  $c_{Q_{SU}}$ ; 終局曲げ耐力計算値と終局せん断耐力計算値<sup>7)</sup>

4. まとめ

本研究では石炭灰を活用したRC建築物の実現を目指し、石炭灰混入の有無とコンクリート強度および軸力比を変数として、実大サイズのRC柱の静的載荷実験を実施し耐震性能を検証した。以下に得られた知見をまとめる。

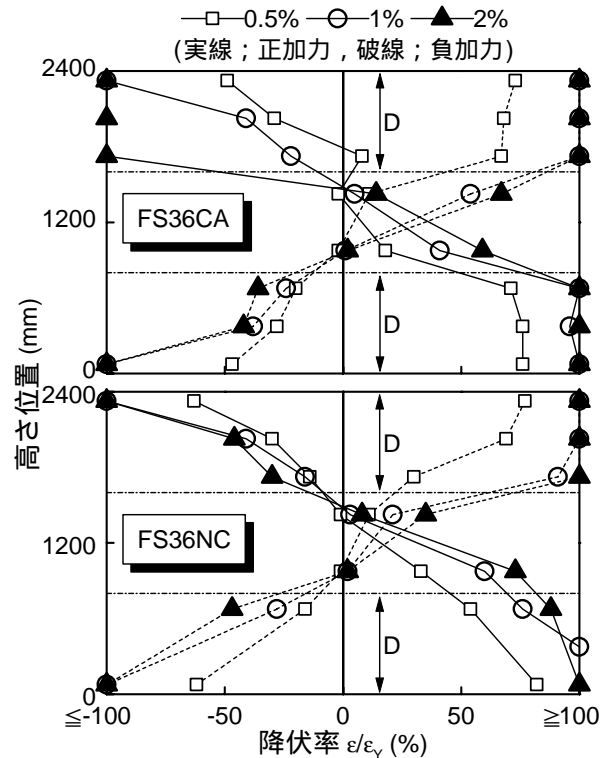
- (1) 石炭灰の混入に拘わらず、実大RC柱の弾性時の軸圧縮性能はコンクリート供試体から評価でき、ヤング係数とポアソン比は既往の普通コンクリート用の算定式で評価できた。
- (2) 石炭灰を活用した実大RC柱の水平耐力は既往の算定式で評価可能である。
- (3) 実大RC柱の大変形時のヒンジ領域は上下端部から柱せい高さ分の範囲であった。
- (4) 石炭灰を活用した実大RC柱は普通コンクリートによる場合と同等の耐力、エネルギー吸収能力、ひずみ性状等の水平抵抗性能を有する。

謝 辞

本研究は平成12年度後期広島大学研究支援金、平成13～14年度鹿島学術振興財団研究助成金、平成14年度中国電力技術研究財団研究助成金および平成13～14年度科学研究費補助金（基盤研究C2、代表；荒木秀夫、No.13650630）の援助を受け実施した。ここに記し深謝の意を表す。

参考文献

- 1) 環境技術協会：石炭灰ハンドブック（平成7年版），1995
- 2) 塩道智晴ほか：石炭灰と砕砂を用いたコンクリートの諸性質について，セメント・コンクリート論文集，No.44，pp.152-157，1990



備考：D=800mm,  $\varepsilon$ ,  $\varepsilon_y$ ; 主筋のひずみと降伏ひずみ  
 図 - 10 主筋のひずみ分布進展性状

- 3) 中谷誠ほか：石炭灰を多量に用いたコンクリートの素材特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.24, No.2, pp.1609-1614, 2002.6
- 4) Araki, H., et al.: Utilization of The Coal Ash to Reinforced Concrete Members for Building Structures, 7th U.S. National Conference on Earthquake Engineering, ST-15, July 2002
- 5) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説（許容応力度設計法），丸善，1999
- 6) 日本建築学会：鉄筋コンクリート終局強度設計に関する資料，丸善，1990
- 7) 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，丸善，1990