

論文 石炭灰を使用した鉄筋コンクリート部材の耐震性能

梶山健二^{*1}・荒木秀夫^{*2}・嶋津孝之^{*3}・福島恒和^{*4}

要旨：石炭火力発電所で排出される廃棄物である石炭灰は再生資源として注目され有効利用の促進が求められている。そこで、石炭灰を使用した鉄筋コンクリート部材の耐震性能を把握することを目的として、準実大鉄筋コンクリート柱の載荷実験を実施した。実験変数は石炭灰の混入方法とし、柱型試験体に一定軸力を加えながら水平方向の変位漸増正負交番繰り返し載荷を行った。ひび割れの進展や水平耐力等に関して実験結果を比較検討したところ、石炭灰を混入した場合も普通コンクリートと同等の性能を示しており、鉄筋コンクリート部材への適用の有効性を確認することができた。

キーワード：石炭灰、鉄筋コンクリート部材、耐震性能、載荷実験、再生資源

1. はじめに

石炭灰は石炭火力発電所において排出される廃棄物であり、近年、石炭火力発電の需要の伸びに応じてその量が増しており、今後も更に増加することが確実視されている。平成3年制定の「再生資源の利用の促進に関する法律」（通称、リサイクル法）では石炭灰は指定副産物に定められ、再生資源として有効利用を促進することが求められている。セメント材料の他、フライアッシュコンクリートへの使用等、一部は既に利用されているものの、残りは埋め立て処分されているのが現状で、上記の背景から一層の有効利用拡大が急務の課題である¹⁾。石炭灰を混入したコンクリートを建築物の躯体に使用することができれば大量の消費を見込めることから、石炭灰を粉体代替または粒度構成改良材として細骨材置換して利用する研究が成されており、普通コンクリートに比べ遜色のない材料特性を有していることが確認されている^{2), 3)}。実用化に向けた次の段階として部材レベルでの有効性の検証が必要である。石炭灰を混入する

と普通コンクリートに比べ粒度構成が異なることから、鉄筋コンクリート部材に適用した場合、その復元力特性や損傷の進展状況などの耐震性能が影響を受ける可能性がある。そこで本研究では、石炭灰を混入したコンクリートを用いた建物構造部材の耐震性能を把握することを目的に、石炭灰の混入方法を実験変数とした準実大鉄筋コンクリート柱の静的載荷実験を実施し、得られた結果の比較検討から、石炭灰を用いた鉄筋コンクリート部材の有効性を検証する。

2. 使用材料と実験変数

2.1 石炭灰

石炭灰には中国電力（株）三隅発電所で産出された原粉を使用した。その各種性状を表-1に、粒度分布を図-1にそれぞれ示す。

表-1 使用した石炭灰の性状

湿分 (%)	強熱減量 (%)	密度 (g/cm ³)	ブレン値 (cm ² /g)	フロー値比 (%)	MB 吸着量 (mg/g)
0.1 以下	2.30	2.16	2,840	91	0.47

*1 広島大学助手 工学部第四類 博(工)(正会員)

*2 広島大学助教授 工学部第四類 工博 (正会員)

*3 広島大学名誉教授 工学部第四類 工博 (正会員)

*4 中国電力（株）技術研究センター

2.2 実験変数と調査設計

実験変数は石炭灰の混入方法とし、表-2に示すように石炭灰を混入しない NC (普通コンクリート)、細骨材置換して混入する CA (石炭灰コンクリート)、粉体代替として混入する HF (石炭灰高流動コンクリート) の 3 種類を設定し、それぞれ 28 日強度 26.5N/mm²、空気量 4.5%、スランブ値 18cm、スランブフロー値 65cm を目標に調査設計を行った。調査表を表-3に示す。既往の研究に基づき、CA では細骨材体積の 2 割を、HF では粉体重量の 5 割強を石炭灰で代替している。なお、セメントには普通ポルトランドセメント、砂には加工砂と陸砂の混合物、粗骨材には砕石を使用しており、混和剤として AE 剤と高性能減水剤を添加した。

2.3 材料特性

(1) コンクリート

試験体と同時に作成したコンクリートシリンダの材令と圧縮強度 σ_B の関係を図-2に示す。石炭灰を混入すると強度発現が遅れる場合があることがこれまでに指摘されているが⁴⁾、本研究においても NC に比べ CA と HF では強度発現が緩やかであった。柱の実験は表-4に示すように圧縮強度 σ_B が目標値 26.5N/mm² 付近に達した時点で実施した。その際の応力-ひずみ関係を図-3に例示する。同図から石炭灰の混入が応力-ひずみ関係に与える影響は大きくないことがわかる。

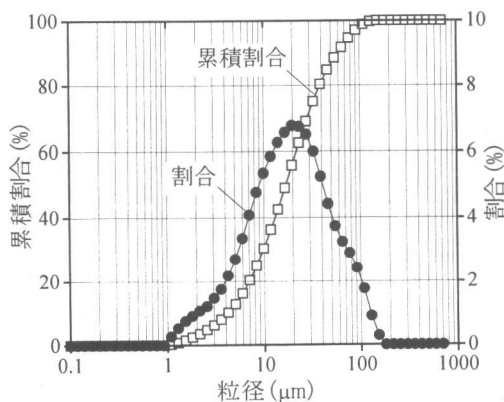


図-1 使用した石炭灰の粒度分布

表-2 試験体名と石炭灰混入方法

試験体名	石炭灰混入
NC (普通コンクリート)	なし
CA (石炭灰コンクリート)	細骨材置換
HF (石炭灰高流動コンクリート)	粉体代替

表-3 コンクリート調査表

試験体名	水セメント比 (%)	単体量 (kg/m ³)					粗骨材
		水	粉体		細骨材		
			セメント	石炭灰	砂	石炭灰	
NC	52	186	358	0	810	0	927
CA	60	180	300	0	569	124	1,062
HF	70	175	250	300	697	0	791

表-4 実験実施時のコンクリート圧縮強度 σ_B 、引張強度 σ_t とヤング係数 E_C

試験体名	材令(日)	σ_B (N/mm ²)	σ_t (N/mm ²)	E_C (N/mm ²)
NC	15	27.7	3.05	2.58×10^4
CA	28	26.3	1.84	2.29×10^4
HF	15	27.9	2.26	2.40×10^4

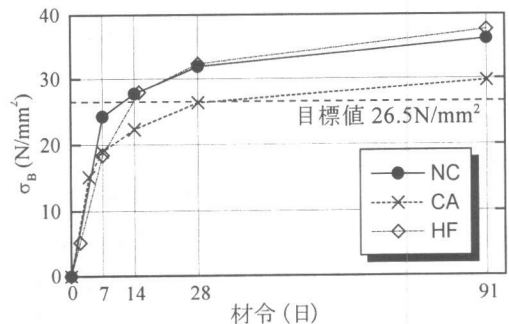


図-2 コンクリートの材令と圧縮強度 σ_B

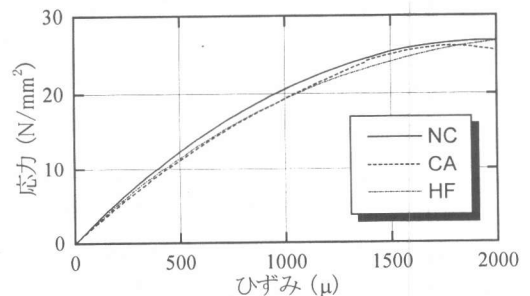


図-3 コンクリートの応力-ひずみ関係

(2) 鉄筋

試験体柱部分の鉄筋には D6, D16, D19 の 3 種類を用いた。引張試験から得られた応力-ひずみ関係を図-4に示し、降伏強度 σ_Y 、最大強度 σ_U およびヤング係数 E_S を表-5にまとめる。

3. 実験方法

3.1 試験体

試験体は図-5に示すように断面 40cm 角、高さ 1m の準実大 (約 2/3 スケール) の柱と固定用のスタブから成る。柱の主筋には 8 本の D16 と 4 本の D19 を組み合わせて使用し、帯筋には D6 を 50mm 間隔 (帯筋比 $p_w=0.32\%$) で配しており、曲げ破壊先行型となるよう設計している。試験体の製作においてコンクリートの打設は木製型枠を使用し縦打ちとした。

3.2 荷重方法

荷重は図-6に示すようにスタブを反力床に PC 鋼棒にて緊結し、2 基の油圧ジャッキにより行った。柱の軸方向力は 441kN で一定としており、低層建物における軸力比 0.1 程度に相当する。水平方向は変位制御の正負交番繰り返

し荷重とした。その荷重プログラムを図-7に示す。水平ジャッキが押す方向を正、引く方向を負とする。ジャッキ能力の限界から 1/50 は正加力 1 回のみとし、その後に押し抜いた。なお、本実験では水平変位測定用変位計のうち最上部に設置した変位計の測定値をその変位計の高さ 605mm で除した値を柱の変形角 R とした。

3.3 計測方法

荷重は図-6に示したように各ジャッキに設置したロードセルにより、試験体の水平変位は同図にあるように柱 5 点とスタブ 1 点について設

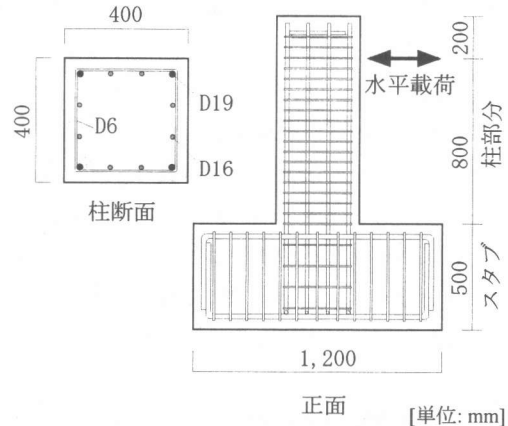


図-5 試験体の外形と配筋詳細

表-5 鉄筋の降伏強度 σ_Y 、最大強度 σ_U およびヤング係数 E_S

種類	σ_Y (N/mm ²)	σ_U (N/mm ²)	E_S (N/mm ²)
D 6	383	552	1.74×10^5
D16	393	558	1.87×10^5
D19	387	549	1.91×10^5

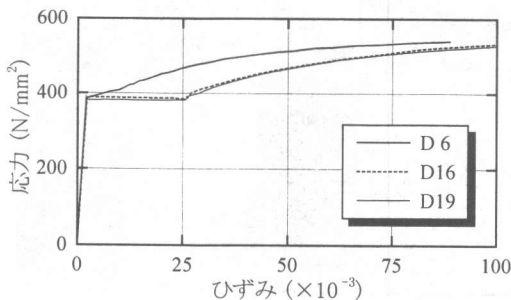


図-4 鉄筋の応力-ひずみ関係

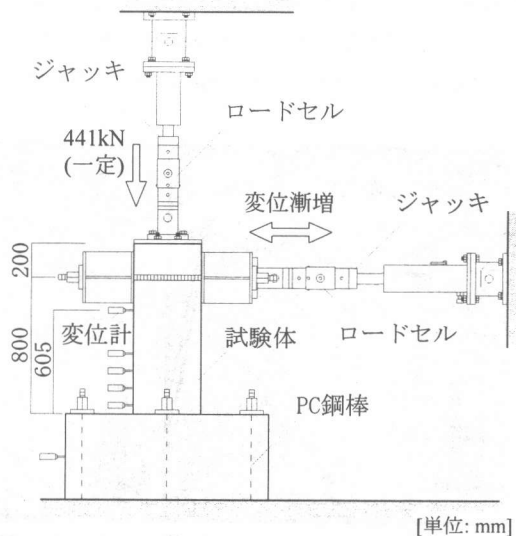


図-6 実験装置 (正面)

置した変位計により測定した。この他にも柱の軸方向変位および曲率を測定するための変位計を設置しており、また、主筋および帯筋の約50点にひずみゲージを貼付し鉄筋のひずみの進展状況を計測している。これらのデータはスイッチボックスとデータロガーを介してパソコンに収録した。

4. 実験結果と検討

4.1 ひび割れと破壊性状

ひび割れの進展は各試験体ともに同様の性状を示し、変形角 $1/800$ までに柱脚部に曲げひび割れが生じ、変形角 $1/200$ までに曲げせん断ひび割れが発生した。変形角 $-1/200$ 載荷終了時点のひび割れを比較し図-8に例示する。ひび割れ性状はいずれもほぼ同様であり、柱脚部を中心に曲げおよび曲げせん断ひび割れが発生している。なお、付着ひび割れは発生しなかった。

終局時における破壊性状は写真-1に示すように、いずれも正負両方向に大きな斜めひび割れを生じたが、せん断破壊や急激な耐力低下を起こすことなく、変形角 $1/20$ を超えるまで変形し、柱脚左端部が圧壊して終局に達した。

4.2 水平変位分布性状

それぞれの変形角における高さ方向についての水平変位の分布を比較し図-9に示す。水平変位には柱に設置した変位計の測定値を用いている。NCにおいては変形角 $-1/100$ 以降で、HFで

は変形角 $1/100$ 以降で試験体の損傷により柱脚付近の変位測定が不能となったため点を除いたが、それ以外では各試験体ともにいずれの変形角においても直線的な挙動を示しており、有意な差はみられない。

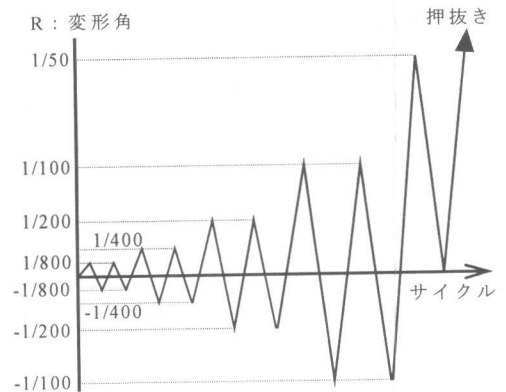


図-7 水平載荷プログラム

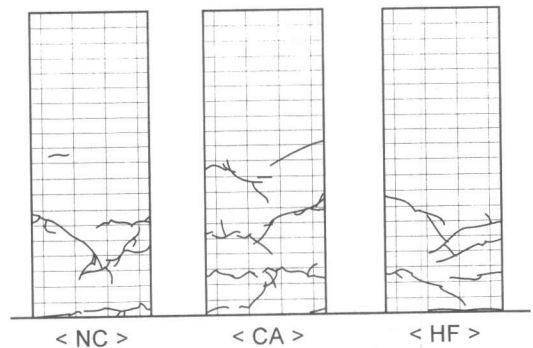


図-8 ひび割れ状況の比較 (-1/200 終了時)

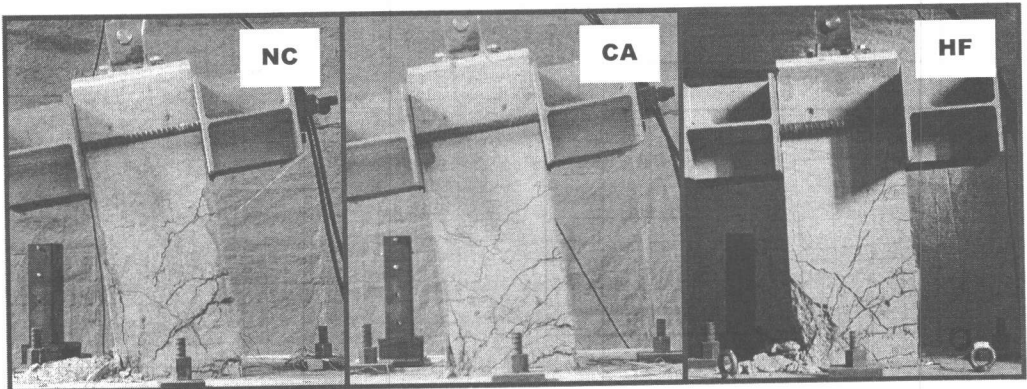


写真-1 終局時における破壊性状の比較

4.3 履歴性状と水平耐力

各試験体の履歴曲線を比較し図-10に示す。ここで横軸 δ は最上部に設置した変位計の水平変位測定値である。また、縦軸 Q は試験体に作用している水平力であり、水平ジャッキにより作用する力に加えて、水平変形によって生じる鉛直ジャッキの荷重の水平成分も考慮している。いずれも各サイクルともに安定した履歴ループを繰り返しており、せん断ひび割れによる履歴のスリップ性状も同様の傾向を示している。HFにおいて変形角 $1/100$ の1サイクル目で目標変位を超えて載荷したために履歴が大きくなっているが、この他に顕著な差はない。

各実験より得られた試験体の水平最大耐力を実験値 Q_E として表-6にまとめる。この値はいずれも正負の最大値の平均である。同表中に文献5)の略算式に準じて算出した曲げ終局耐力 Q_M とせん断終局耐力 Q_S およびそれぞれの実験値との比を併記する。なお、せん断終局耐力算定には下限式を用いた。また、コンクリート強度 σ_B には表-4に示した値の平均を採用した。

実験結果の水平最大耐力 Q_E はいずれも曲げ終局耐力 Q_M をわずかに超え、せん断終局耐力 Q_S を下回る値となった。

各試験体の正加力時について履歴の包絡線を

表-6 水平耐力の比較

試験体名	実験値 Q_E (kN)	計算値 (kN)		計算値/実験値	
		Q_M	Q_S	Q_M/Q_E	Q_S/Q_E
NC	254	251	266	0.99	1.04
CA	263			0.95	1.01
HF	259			0.97	1.03

$$\text{曲げ終局耐力: } Q_M = M_U/h$$

$$\text{せん断終局耐力: } Q_S = (\tau_U + 0.1\sigma_0)bj$$

$$M_U = 0.8a_t\sigma_Y D + 0.5ND \left(1 - \frac{N}{bD\sigma_B}\right)$$

$$\tau_U = \frac{0.092k_U k_P (180 + \sigma_B)}{(M/Qd) + 0.12} + 2.7\sqrt{\rho_W \sigma_{WY}}$$

$$\sigma_0 = N/(bD)$$

h : 加力点高さ, a_t : 引張鉄筋断面積, σ_Y : 引張鉄筋降伏強度, b, D, j : 断面の幅, せい, 応力中心間距離, N : 軸力, k_U, k_P : 断面寸法による補正係数, σ_B : コンクリート圧縮強度, M/Qd : シアスパン比, ρ_W : 帯筋比, σ_{WY} : 帯筋降伏強度

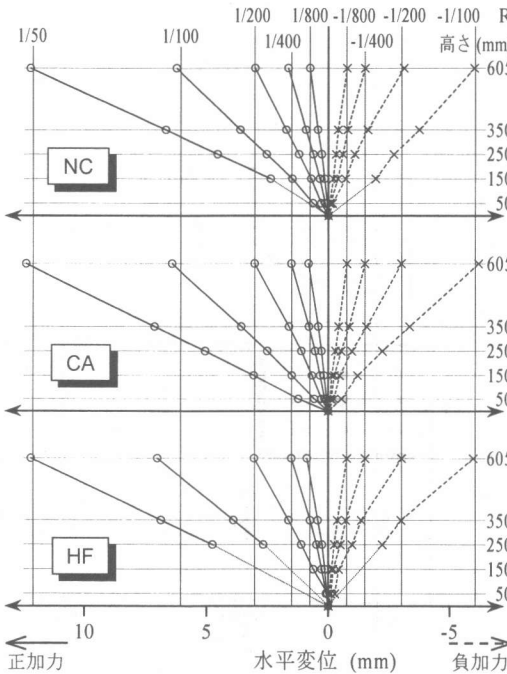


図-9 水平変位分布性状

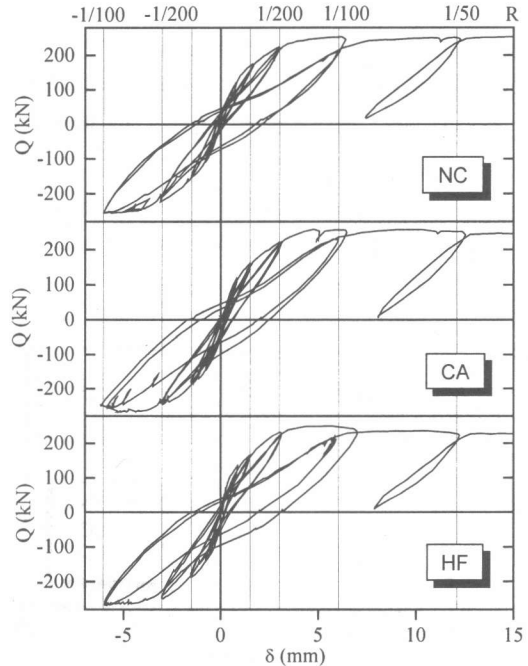


図-10 履歴曲線の比較

比較し、上記の曲げ終局耐力 Q_M とせん断終局耐力 Q_S を併せて図-11に示す。HF において最大点後に耐力低下が比較的大きい点を除けば同様の性状を示している。

4.4 等価粘性減衰定数による検討

各試験体の履歴特性をより詳細に検討するために、各履歴ループごとに等価粘性減衰定数 h_{EQ} を図-12に示す方法により算出した。その値と変形角との関係を同図中に示す。各試験体ともいずれの変形角においても2点ずつプロットしてあるが、上が1サイクル目、下が2サイクル目の値である。等価粘性減衰定数 h_{EQ} はすべて5~20%の範囲に収まっており、各試験体ともに同様の傾向を示していることがわかる。

5. まとめ

石炭灰を使用した鉄筋コンクリート部材の耐震性能を把握するために、コンクリートへの石炭灰の混入方法を実験変数として準実大鉄筋コンクリート柱の載荷実験を実施した。石炭灰を使用するとコンクリート強度の発現に時間を要する場面があったが、硬化後の実験による結果はひび割れや破壊性状、水平耐力、履歴性状等において普通コンクリートに比べ有意な差はみられなかった。試験体の曲げ変形とせん断変形の検討、鉄筋のひずみ性状の分析等、更に実験結果を詳細に検討する必要があるが、これまでの結果から、鉄筋コンクリート部材への石炭灰

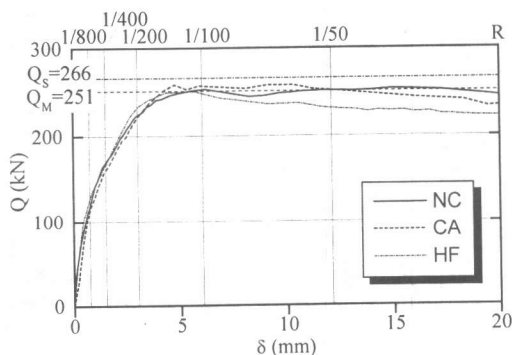


図-11 履歴包絡線の比較

使用の有効性を確認することができた。

今後は鉄筋とコンクリートの付着性能、せん断に対する特性、更には減衰性能等の動的特性などに関して検討が必要であろう。

謝辞：本研究では中国電力（株）技術研究センターの横田英嗣氏、田守弘明氏、出雲地区生コンクリート協同組合、広島大学工学部耐震工学研究室の京泉敬太技官および学生諸君の多大なる協力を得た。ここに深謝の意を表す。

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, 伊藤秀敏ほか：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
- 3) 中村芳弘, 伊藤秀敏ほか：石炭灰と砕砂を用いた高流動コンクリートの耐久性, セメント・コンクリート論文集, No.50, pp.600-605, 1996
- 4) 林稔, 伊藤秀敏ほか：石炭灰を用いた高流動砕砂コンクリートの基礎性状, セメント・コンクリート論文集, No.49, pp.294-299, 1995
- 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

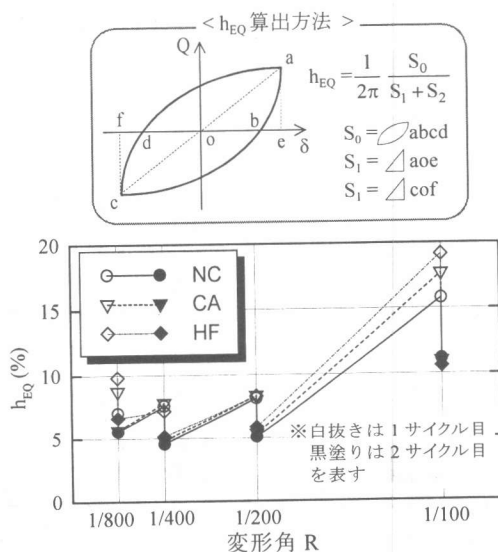


図-12 履歴ループの等価粘性減衰定数 h_{EQ}