

論文 石炭灰を多量に用いた RC 部材の力学的特性

桃山健二^{*1}・菅野俊介^{*2}・荒木秀夫^{*3}・荒谷俊介^{*4}

要旨：石炭火力発電所から排出され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。石炭灰を使用した鉄筋コンクリート部材の性能を把握することを目的として、せん断破壊が先行する鉄筋コンクリート柱の載荷実験を実施した。石炭灰の混入方法を実験変数として一定軸力を加えながら水平方向の漸増正負交番繰り返し載荷を行った。せん断耐力や変形能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すことを確認し、その特性を把握することができた。

キーワード：石炭灰、鉄筋コンクリート部材、せん断破壊、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）において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。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、大量に埋め立て処分されているのが現状であり、上記のような背景から一層の有効利用拡大が急務の課題となっている¹⁾。そこで、多量の石炭灰をコンクリートにおいて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、石炭灰を混入したコンクリートが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これまでに確認されている^{2),3)}。

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、石炭灰の大量消費を見込めることから、現在、筆者らは石炭灰を多量に混入したコンクリートの建物躯体等構造物への

実用化を目的とした研究を進めており、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、これまでに曲げ降伏先行型の梁および柱を試験体とした載荷実験を実施した^{4),5)}。本研究はこれに続くもので、せん断破壊が先行するよう設計された鉄筋コンクリート柱の一定軸力下での水平載荷実験を実施し、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せん断抵抗特性を検証した。

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)新小野田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。

2-2. 実験変数と調査設計

実験変数はコンクリートへの石炭灰の混入方法とし、試験体を4体作成した。石炭灰を混入しないNC（普通コンクリート）、石炭灰を細骨材置換材として混入する石炭灰コンクリートについてはCA20（細骨材置換率体積比20%）、CA40（細骨材置換率体積比40%）の2体、および石炭灰

*1 広島大学助手 工学部第四類 博(工)(正会員)

*2 広島大学教授 工学部第四類 工博(正会員)

*3 広島大学助教授 工学部第四類 工博(正会員)

*4 広島大学大学院 工学研究科 構造工学専攻

を粉体代替として混入する HF（高流動コンクリート）である。表-2 に試験体名とコンクリート種類および石炭灰混入方法を示す。それぞれ 28 日強度 36N/mm^2 ，空気量 4.5%を目標に調合設計を行った。調合表を表-3 に示す。既往の研究⁵⁾に基づき，HF では粉体重量の 5 割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

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の関係を図-2 に示す。鉄筋コンクリート柱の載荷実験は表-4 に示すように圧縮強度が目標値 36N/mm^2 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。

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	3.2	2.13	3,200	101	0.44

表-2 試験体名と石炭灰混入方法

試験体	コンクリート種類	石炭灰混入
NC	普通コンクリート	なし
CA20	石炭灰コンクリート	細骨材置換20%
CA40	石炭灰コンクリート	細骨材置換40%
HF	石炭灰高流動コンクリート	粉体代替

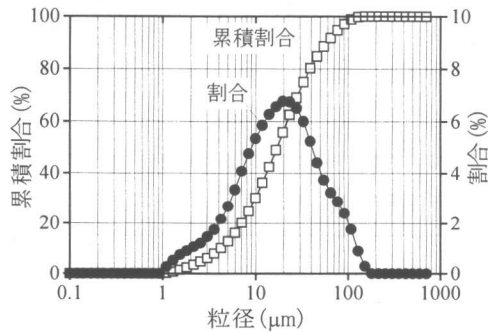


図-1 使用した石炭灰の粒度分布

鉄筋コンクリート試験体の柱部分の鉄筋には 4 ϕ と D10 の 2 種類の鉄筋を用いた。引張試験から得られたそれぞれの降伏強度，最大強度およびヤング係数を表-5 にまとめる。

表-3 コンクリート調合表

試験体	単位量 (kg/m^3)				
	水	粉 体		細骨材	
		セメント	石炭灰	砂	石炭灰
NC	187	435	0	748	0
CA20	180	360	0	591	121
CA40	180	330	0	489	247
HF	175	285	285	698	0

表-4 実験実施時のコンクリートの力学的特性

試験体	材令 (日)	圧縮強度 σ_B (N/mm^2)	引張強度 σ_t (N/mm^2)	ヤング係数 E_c (N/mm^2)
NC	34	36.0	2.96	2.65×10^4
CA20	15	36.8	2.85	3.27×10^4
CA40	20	41.8	3.08	2.99×10^4
HF	20	38.4	3.05	2.76×10^4

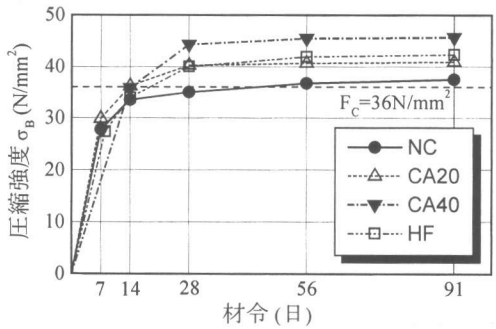


図-2 コンクリートの材齢と圧縮強度 σ_B

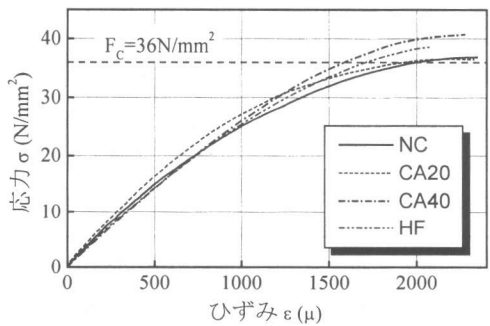


図-3 コンクリートの応力-ひずみ関係

3. 実験方法

3-1. 試験体

試験体は図-4 に示すように断面 $200 \times 200\text{mm}$ 、高さ 400mm の柱と固定用の上下スタブから成る。柱の主筋には 8 本の D10 を使用し（引張鉄筋比 $p_t=0.54\%$ ），帯筋には 4ϕ を 50mm 間隔で配しており（帯筋比 $p_w=0.25\%$ ），せん断破壊が曲げ降伏に先行するように設計している。試験体の製作においてコンクリートの打設の際には鋼製型枠を使用して横打ちとした。

3-2. 荷荷方法

荷荷は図-5 に示すように下スタブを反力床に 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 144kN 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逆対称正負交番繰返し荷荷とした。その荷荷プログラムを図-6 に示す。なお，同図中に示すように，本実験では上スタブに設置した変位計で測定した水平変位 δ を柱部分の高さ h (400mm) で除した値を柱の変形角 R と定義して制御に用いた。

3-3. 計測方法

荷重は図-5 に示したように各ジャッキの先端に設置したロードセルにより，試験体の水平変位は柱 3 点と上下スタブ 2 点について変位計により測定した。この他にも柱の軸方向変位，曲率およびせん断変形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 59 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. 履歴と損傷の進展性

各試験体の履歴曲線を比較し図-7 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 は試験体に水平ジャッキによって作用するせん断力である。水平荷荷を開始後，いずれの試験体においても変形角

表-5 鉄筋の力学的特性

種類	降伏強度 σ_{SY} (N/mm^2)	最大強度 σ_{SU} (N/mm^2)	ヤング係数 E_S (N/mm^2)
4 ϕ	348	481	1.99×10^5
D10	417	545	1.75×10^5

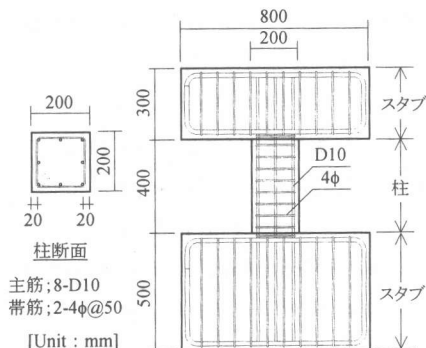


図-4 試験体の外形と配筋詳細

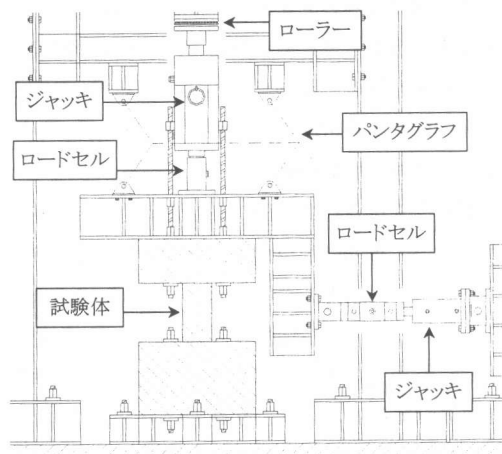


図-5 実験装置（正面）

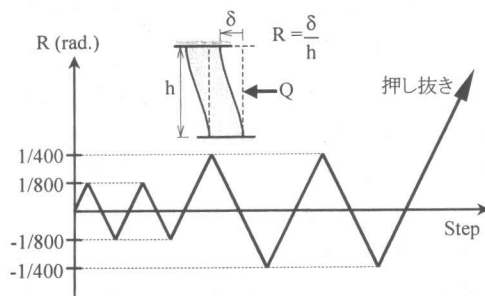


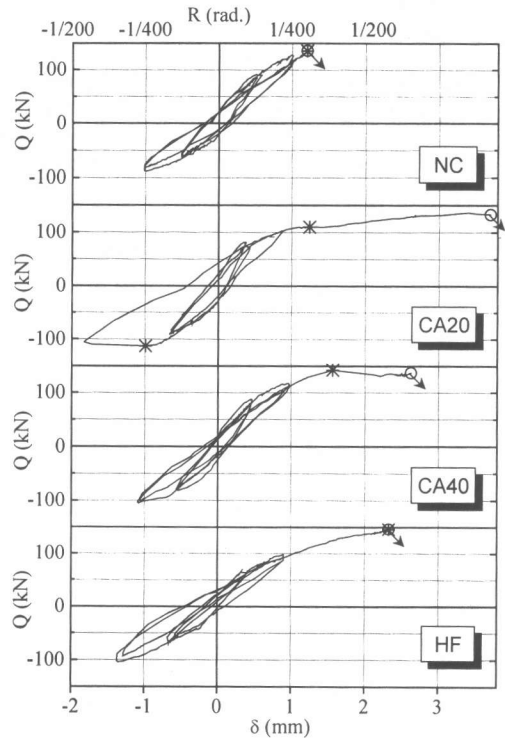
図-6 水平荷荷プログラム

1/800 rad.までに柱脚、柱頭端部に曲げひび割れの発生を確認した。その後、NC では 1/400rad.を、HF では 1/200rad.を過ぎたところで対角方向のせん断ひび割れの発生とともに顕著な耐力低下が起こり終局に到達した。一方、CA20 では負側載荷の-1/400rad.付近および正側の 1/400rad.を過ぎた点で対角方向のせん断ひび割れが発生し、水平変位が進展したが、耐力の顕著な低下は無く、その後もわずかに耐力上昇しながら 1/100rad.の手前で正側の対角方向のひび割れが拡大してせん断破壊を起こした。CA40 では 1/250rad.付近で対角方向のせん断ひび割れが発生したが、耐力をほぼ維持し 1/150rad.付近でそのひび割れが拡大してせん断破壊を起こした。写真-1 に実験終了時の各試験体のひび割れを比較して示す。いずれの試験体においても最終的には柱頭部から柱脚部にかけて対角方向に同様のせん断ひび割れが生じており、破壊性状は類似している。なお、全ての試験体でせん断破壊を起こす以前に主筋は降伏しておらず、破壊形式は曲げ降伏前のせん断破壊であった。

4-2. 耐力および変形能

各実験より得られた試験体のせん断ひび割れ耐力およびせん断最大耐力を表-6 にまとめる。また、それぞれの耐力を $b \cdot j$ で除して求めたせん断応力を併せて示す。CA20 以外はせん断ひび割れ点とせん断最大耐力点は同一である。同表に示すように各試験体ともにせん断最大応力とコンクリート引張強度の比率は近似しており、せん断に対して石炭灰を混入した場合も普通コンクリートと同等の強度を有していることが確認できる。

文献^{6),7)}の略算式に準じてせん断ひび割れ耐力、せん断終局耐力および曲げ終局耐力を算出し、実験結果との比率を併せて表-7 に示す。各耐力の算出式は同表の脚注にまとめている。なお、コンクリートおよび鉄筋の特性には材料試験の結果を用いた。せん断ひび割れ耐力については CA20 において計算値と実験値が精度良く一致している他は実験値の方が大きく、コンクリート種類によらずその割合は一様な値を示している。せん断最大



* せん断ひび割れ点 ○ せん断破壊点

図-7 履歴曲線の比較

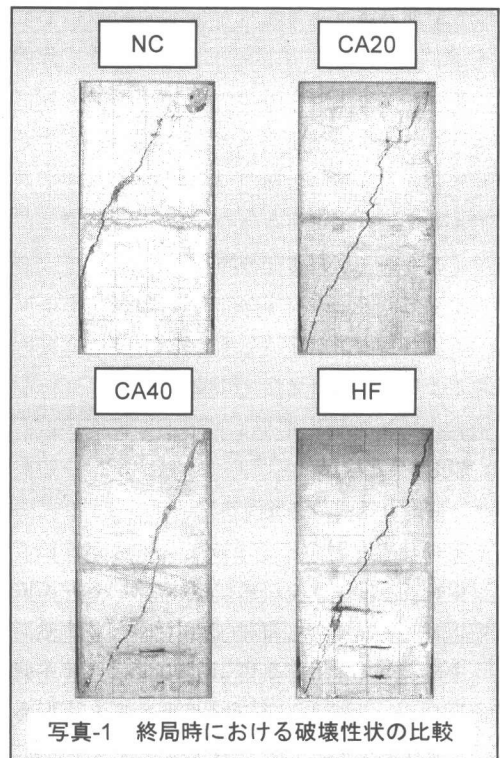


写真-1 終局時における破壊性状の比較

耐力の実験値はいずれの試験体においてもせん断終局耐力と曲げ終局耐力の計算値の間に収まっており、それぞれの比率はほぼ均一である。従って、本研究で試験体とした石炭灰を混入した部材のせん断耐力算定には上記の既往式を適用可能であることが確認できた。

表-6 せん断耐力の実験値の比較

試験体	せん断ひび割れ		せん断最大		$\frac{E\tau_{SU}}{\sigma_t}$
	耐力 EQ_{SC} (kN)	応力 $E\tau_{SC}$ (N/mm ²)	耐力 EQ_{SU} (kN)	応力 $E\tau_{SU}$ (N/mm ²)	
NC	136.1	4.32	136.1	4.32	1.46
CA20	112.6	3.57	136.3	4.33	1.52
CA40	142.5	4.52	142.5	4.52	1.47
HF	146.5	4.65	146.5	4.65	1.52

$$E\tau_{SC} = EQ_{SC} / bj, E\tau_{SU} = EQ_{SU} / bj$$

b, j: 断面の幅, 応力中心間距離

σ_t : コンクリート引張強度

表-7 耐力に関する計算値と実験値の比較

試験体	cQ_{SC} (kN)	cQ_{SU} (kN)	cQ_{MU} (kN)	$\frac{cQ_{SC}}{EQ_{SC}}$	$\frac{cQ_{SU}}{EQ_{SU}}$	$\frac{cQ_{MU}}{EQ_{SU}}$
NC	117.5	120.7	147.2	0.863	0.887	1.082
CA20	114.3	122.1	148.7	1.015	0.896	1.091
CA40	121.0	131.0	157.7	0.849	0.919	1.107
HF	120.1	125.0	151.6	0.820	0.853	1.035

せん断ひび割れ耐力: $cQ_{SU} = \phi \sqrt{\sigma_t^2 + \sigma_t \sigma_0} bD/\kappa$

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

曲げ終局耐力: $cQ_{MU} = 2M_U/h$

$$M_U = 0.8a_t\sigma_{SY}D + 0.5ND(1 - N/bD\sigma_B)$$

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

$$\sigma_0 = N/bD$$

a_t : 引張鉄筋断面積, h: 試験体高さ, D, d: 断面の全せいと有効せい, k_U , k_P : 断面寸法と引張鉄筋比による補正係数, M/Qd: シアスパン比, N: 軸力, p_W : 帯筋比, ϕ : 耐力係数(1.0), κ : 断面形状係数(1.5), σ_t : コンクリート引張強度, σ_{WY} : 帯筋降伏強度, σ_{SY} : 引張鉄筋降伏強度

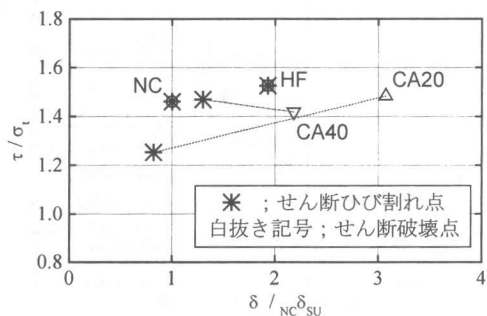
表-8 変形能の比較

試験体	せん断ひび割れ		せん断破壊	
	変位 δ_{SC} (mm)	変形角 R_{SC} (rad.)	変位 δ_{SU} (mm)	変形角 R_{SU} (rad.)
NC	1.20	1/332	1.20	1/332
CA20	0.99	1/404	3.70	1/108
CA40	1.56	1/256	2.63	1/152
HF	2.33	1/172	2.33	1/172

各実験から得られた試験体のせん断ひび割れ点およびせん断破壊点の変位と変形角を表-8 にまとめる。各試験体のせん断ひび割れ点とせん断破壊点の変位を NC のせん断破壊点変位で基準化し、コンクリート引張強度に対するせん断応力の比率との関係として図-8 に示す。せん断ひび割れ点はばらついているが、CA20, CA40, HF とともにせん断破壊点の変位の比率はほぼ 2 以上である。試験体数は少ないが、本研究に関する限り石炭灰の混入によってせん断に対する変形能が低下することはなく、普通コンクリートと同等以上の性能を確保できることを確認した。

4-3. 曲げ変形性状

試験体軸方向に設置した変位計から算定した曲げ変形性状は各試験体で同様の傾向を示した。その例示として柱脚での曲率を変形角との関係として図-9 に示す。せん断ひび割れが発生する以前は試験体によらず直線上に並んでおり、石炭灰の混入による影響は見られない。



δ : 変位, $NC\delta_{SU}$: NC のせん断破壊点変位
 τ : せん断応力 ($\tau = Q/bj$), σ_t : コンクリート引張強度

図-8 変形能とせん断応力の関係

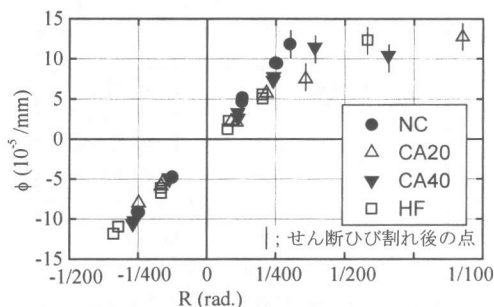


図-9 柱脚での曲率の比較

4-4. せん断変形状

試験体の対角方向に設置した2基の変位計の測定値に基づき図-10に示す手順で各試験体のせん断変形角 γ を算出し、変形角との関係として同図に示す。せん断ひび割れが発生する以前は試験体に関わらず直線上に分布しており、ひび割れ発生後はいずれも値が顕著に増大している。

各試験体のせん断変形角 γ をせん断応力度 τ との関係として図-11に示す。各試験体ともに同様の分布をしており、石炭灰を混入した試験体も普通コンクリートと同様に評価できることがわかる。

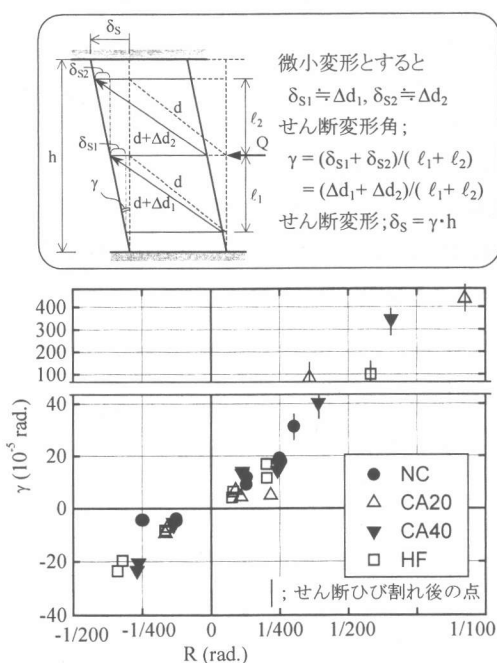


図-10 せん断変形角の分布

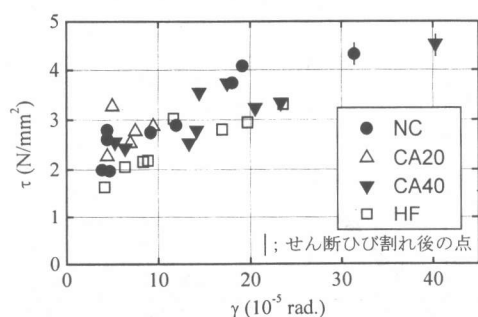


図-11 せん断応力とせん断変形角

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せん断破壊先行型の鉄筋コンクリート柱試験体の載荷実験を実施した。試験体の破壊性状、曲率分布、せん断変形状はいずれの試験体も同様の傾向を示し、石炭灰混入の影響は見られなかった。石炭灰を使用した試験体に関してせん断ひび割れおよび最大耐力は普通コンクリートと同等程度でありせん断に関する既往式で推定できることを確認した。また、変形能についても普通コンクリートと同等以上の性能を発揮した。以上の結果から、試験体数は少ないものの、石炭灰を使用したせん断破壊の先行する鉄筋コンクリート柱においても普通コンクリートによる場合と同様のせん断性能を示すことを検証した。今後は実験データの拡充および曲げ降伏後にせん断破壊を起こす柱の検討等が必要である。

謝辞 本研究では中国電力(株)技術研究センター福島恒和氏、横田英嗣氏、出雲地区生コンクリート協同組合および広島大学工学部耐震工学研究室の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) 梶山健二ほか:石炭灰を使用した鉄筋コンクリート部材の耐震性能,コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.33, pp.1501-1506, 2000
- 5) 福島恒和ほか:石炭灰を大量使用したコンクリートの建物躯体への適用に関する研究その1-その4,日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2分冊, pp.595-601, 2000
- 6) 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(案)・同解説, 丸善, 1997
- 7) 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