

論文 石炭灰を多量に用いたコンクリートの素材特性

中谷 誠*1・椋山 健二*2・荒木 秀夫*3・菅野 俊介*4

要旨：本研究は石炭灰を多量に混入したコンクリートという新材料を建築物の構造部材等に適用することを目的とし、石炭灰を含んだコンクリートの力学的特性を明らかにしようとするものである。本論文では石炭灰の混入方法を実験変数として、テストシリンダーを用いた圧縮試験、割裂試験と実大スケールの無筋コンクリート柱試験体を用いた静的圧縮試験を実施し、石炭灰を混入しない同形状の普通コンクリートと力学的特性について比較検討を行なった。その結果、石炭灰の混入による特性の劣化は見られず、石炭灰を多量に使用したコンクリートの建築構造材料への早期実用化に向けて有用な基礎的データが得られた。

キーワード：石炭灰，有効利用，建築構造物，力学的特性，実大試験，寸法効果

1. はじめに

現在、日本における電力事情として石炭火力発電は重要な柱として位置づけられており、産業副産物として生産される石炭灰は数年後には1000万トン/年に達すると言われている。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¹⁾。

このような要求に対し、フライアッシュやフライアッシュ以外の石炭灰を骨材や粉体として使用したコンクリート(以下、石炭灰コンクリート)についても研究が進められている^{2)~4)}。しかし石炭灰コンクリートは施工性や長期強度増大など多くの優れている点を持つ反面、初期強度の低さや中性化の懸念から、現実の使用状況は人工漁礁などの直接強度や剛性を要求されないものに限定されている。その用途を建築分野に拡大し、建築構造材料として有効利用できれば石炭灰の大量消費が実現でき、石炭灰の埋立て処分量および自然界からの骨材採取量を減少することができ、環境負荷の低減に貢献できる。

本研究の目的は石炭灰コンクリートの建物躯体等構造物への実用化に向け、その力学的特性について基礎的データを得ることである。このような新材料の有効利用の早期実現には実物大の検証が不可欠と考え、本研究では実大スケールの試験体を含めて材料試験を実施した。主な実験変数は石炭灰の混入方法および設計強度とし、最大強度、ヤング係数およびポアソン比を含むコンクリートの力学的特性や寸法効果の影響に関して検討した。

2. 使用材料と実験変数

2.1 石炭灰

使用した石炭灰は中国電力(株)新小野田発電所および三隅発電所で産出された2種類の原粉である。それぞれコンクリート強度 $F_c=36\text{N/mm}^2$ (以下 F_c36)および $F_c=27\text{N/mm}^2$ (以下 F_c27)のものに使用している。その各種性状は表-1に示す通りで、原粉ではあるが新小野田産はJISフライアッシュⅡ種に、三隅産はⅢ種に相当する。粒度分布を比較すると図-1に示すように度数は粒径 $100\mu\text{m}$ あたりに差がみられるものの、累積度数に差異はない。

*1 広島大学大学院 工学研究科社会環境システム専攻 (正会員)

*2 広島大学大学院助手 工学研究科社会環境システム専攻 博(工)(正会員)

*3 広島大学大学院助教授 工学研究科社会環境システム専攻 工博(正会員)

*4 広島大学大学院教授 工学研究科社会環境システム専攻 工博(正会員)

表-1 使用した石炭灰の性状

産出発電所	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)	備考
新小野田	0.1以下	3.2	2.13	3,200	101	0.44	Fc36用
三隅	0.1以下	2.3	2.16	2,840	91	0.47	Fc27用

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	石炭灰混入方法
NC	普通コンクリート	なし
CA20	石炭灰コンクリート(20%)	細骨材置換(体積比20%)
CA40	石炭灰コンクリート(40%)	細骨材置換(体積比40%)
HF	石炭灰コンクリート(高流動)	粉体代替(重量比約50%)

表-3 コンクリートの調査表

試験体	設計強度	単位量(kg/m ³)					混和剤(%)	
		水	セメント	石炭灰	細骨材	粗骨材	AE剤	高性能減水剤
NC	36 N/mm ²	187	435	0	748	921	1.2	-
CA20		180	360	121	591	1022	6.0	1.0
CA40		180	330	247	475	1016	2.3	1.2
HF		175	285	285	694	789	2.0	1.9
NC	27 N/mm ²	186	358	0	810	927	0.5	-
CA20		180	300	124	569	1062	12.2	0.7
CA40		180	300	259	452	1051	3.6	1.2
HF		175	250	300	697	791	7.2	1.9

A20, CA40), 粉体代替材として混入する高流動コンクリート(HF)の4種類を設定した。4週の設定強度に対してFc36およびFc27の2種類を設定し、空気量4.5%, NCとCA20, CA40はスランプ18cm, HFはスラ

ンプフロー65cmを目標に試験練を行い調査を決定した。調査表を表-3に示す。細骨材置換材とする場合には、細骨材体積の20%を石炭灰で代替したもの(CA20)と40%で代替したもの(CA40)の2種類とし

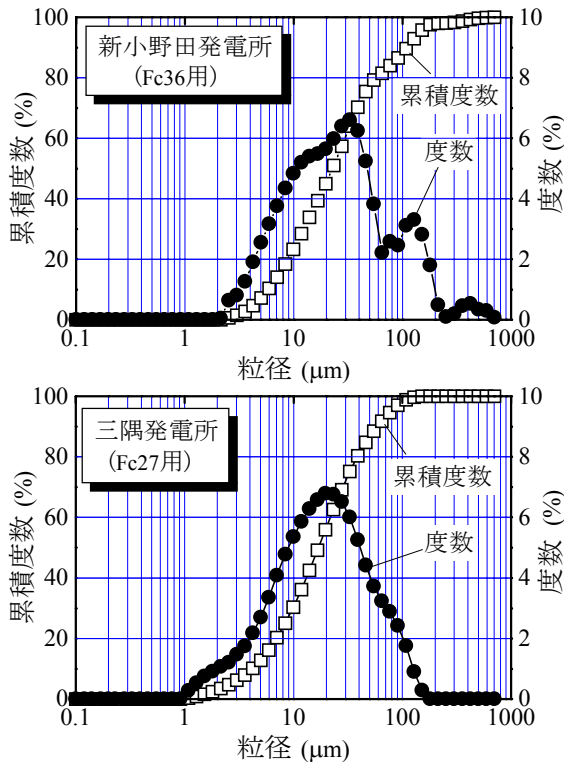


図-1 石炭灰の粒度分布

2.2 実験変数と調査設計

実験変数は石炭灰の混入方法および設計強度とした。表-2に示すように混入方法として石炭灰を混入しない普通コンクリート(NC), 石炭灰を細骨材置換材として混入するコンクリート(C

た。既往の研究で施工性の面から限界値とされている20%とその倍の場合の特性を把握するためである。粉体代替材として混入するHFでは既往の研究に基づき、粉体重量の50%程度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、砂には砕砂(表乾比重2.58, 吸水率1.01%, FM3.13)と陸砂(表乾比重2.58, 吸水率1.51%, FM1.68)の混合物、粗骨材には砕石(表乾比重2.72, 吸水率1.01%, FM6.74)を使用しており、混和剤はAE剤(サンフローAE-9)と高性能減水剤(HS-700S)を使用し、粉体重量(セメント+石炭灰重量)に対して添加した。

3. テストシリンダーの力学的特性

3.1 試験方法

テストシリンダー(φ×h=100×200mm)(以下、シリンダー)は打設後3日で脱型し、気中養生した。所定の材齢時においてアムスラー試験機を用いて2~3本の圧縮試験を行い、圧縮強度、ヤング係数(1/3強度時の等価剛性)およびポアソン比(コンプレッソメーターを使用)を算定した。また同時に割裂試験を実施し引張強度を求めた。

3.2 圧縮強度

材齢と圧縮強度の関係を図-2に示す。初期材齢時における圧縮強度はコンクリート種類に拘わらずほぼ同じ値となっている。材齢28日における強度はほぼ設計強度かそれ以上になっている。Fc36の場合、コンクリート種類に拘わらず材齢28日以降の強度上昇があまり見られない。一方、Fc27の強度は石炭灰コンクリートが28日以降も上昇傾向にある。既往の研究によると、石炭灰を混入したコンクリートでは、ポズラン反応が長期間継続するため、長期にわたって強度が増進するとされているが、このことは養生方法が関係していると考えられ、180、360日の長期材齢強度も含め、更なる検討が必要であると思われる。

3.3 圧縮強度と引張強度

材齢28日における圧縮強度と引張強度の関係を図-3に示す。同図中に日本建築学会RC規準式⁵⁾も併せて示す。Fc27のCA20で引張強度が低い値となっているが、その他の試験体は学会RC規準式との良好な対応がられる。また、コンクリート強度、石炭灰混入量による大きな相違は見られない。

3.4 圧縮強度とヤング係数

材齢28日における圧縮強度とヤング係数の関係を図-4に示す。図中に学会RC規準式およびNew RC式⁵⁾を併せて示す。ややばらつきがみられるものの、コンクリートの種類、強度に拘わらず普通コンクリートに対する既存の推定式と良好な対応がみられる。

3.5 圧縮強度とポアソン比

材齢28日における圧縮強度とポアソン比の関係を図-5に示す。図中には文献⁵⁾に示される一般的なポアソン比の値 $\nu=0.167\sim 0.20$ の範囲を併せて示す。コンクリート種類に拘わらず上記の範囲内に入る結果となったが、どちらかといえば $\nu=1/6(0.167)$ 付近に多く分布している。

以上のシリンダーによる試験結果から、石炭灰の有無に拘わらずコンクリートの力学的特性はほぼ同等であることを検証した。

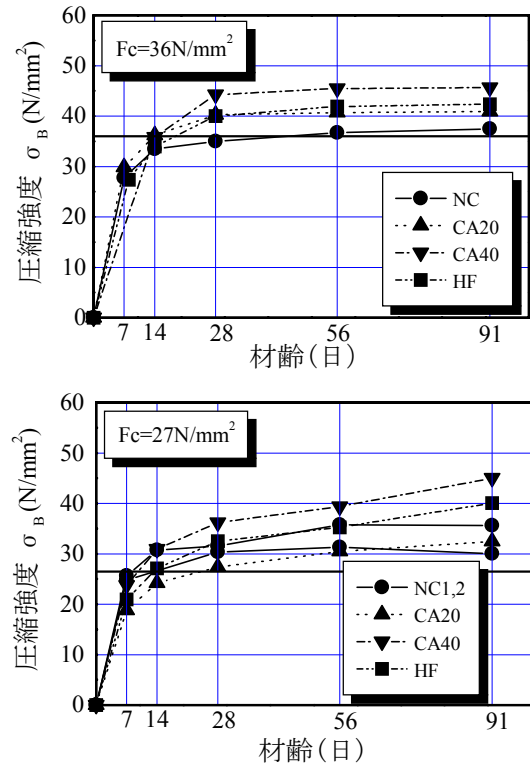


図-2 材齢と圧縮強度の関係

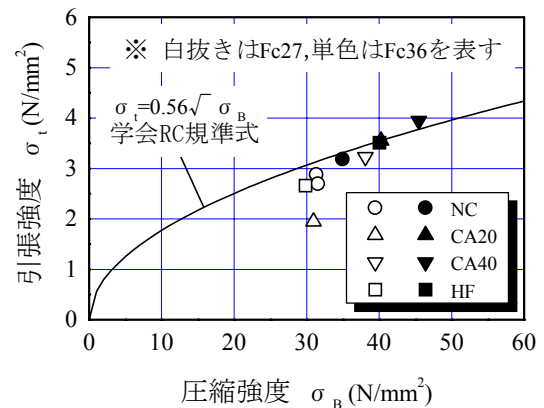


図-3 圧縮強度と引張強度の関係

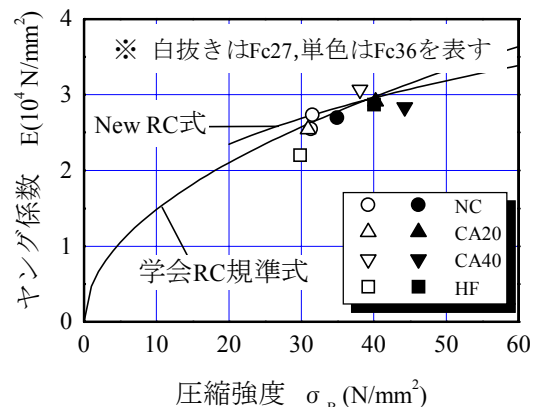


図-4 圧縮強度とヤング係数の関係

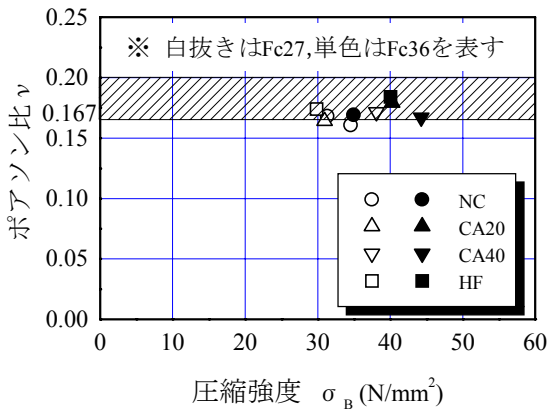


図-5 圧縮強度とポアソン比の関係

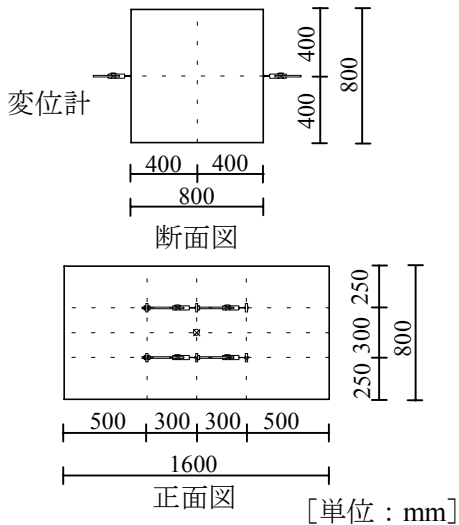


図-6 試験体形状および変位計



図-7 大型強度試験装置

4. 実大無筋コンクリート柱の力学的特性

4.1 試験方法

実大試験体は実構造物の柱を想定した図-6に示す断面 $800 \times 800 \text{mm}$ 、長さ 1600mm の無筋コンクリート柱である。試験体の作製にあたって、生コンはプラントからミキサー車で搬送し、鋼製型枠を用いて横打ちで打設した。3日後脱型し気中養生した。Fc36の試験体数は前項で述べたコンクリート種別に従って4体である。

Fc27の試験体は普通コンクリートを2体とし計5体、併せて試験体総数9体である。

荷重実験は同試験体と同時に打設したシリンダーが設計強度に達した時点で、広島大学所有の30MN大型強度試験装置を使用して実施した。図-7に示すように試験体を横置きとし、単調増加の圧縮力を加え、破壊に至るまで荷重した。変位計を図-6に示すように検長区間 30cm で試験体両側面に4本ずつセットし、ひずみゲージも試験体表面に適宜貼付している。荷重は大型強度試験装置の圧力ゲージから直接取り出して記録した。試験体が横置きであるため重力の影響を受けていることが考えられるが、各荷重段階のひずみ分布状況は試験体断面および長さ方向にほぼ均一であり、重力による有意な影響は無いと判断した。

4.2 実験結果と検討

(1) 破壊状況

試験体 (Fc36) 正面の最終的な破壊状況を図-8に例示する。各試験体とも実大試験にありがちな加力端面での局部破壊は見られず、シリンダーの圧縮試験と同様の対角方向の破壊であった。各試験体間で明確な相違はみられず、また、Fc27の最終破壊形状もほぼ同様であった。

(2) 応力-ひずみ曲線

基準化応力-ひずみ曲線を図-9に示す。図の縦軸は試験体の応力 σ を同日のシリンダー圧縮試験により得られた材料強度 σ_B で除した値であり、横軸は試験体のひずみ ε をシリンダー圧縮試験により得られた最大圧縮応力時におけるひずみ ε_B で除して基準化した値である。ひずみは試験体中央の両側面に取りつけた変位計から求めたひずみの平均値である。Fc36ではいずれの試験体も最大強度および最大強度時ひずみが1より小さくなっているが、4試験体ともほぼ同様の性状を示している。Fc27では石炭灰コンクリートは安定した応力-ひずみ曲線を示し、普通コンクリートとは異なる性状となった。石炭灰の混入によりシリンダー試験に対する強度低下率が改善している。

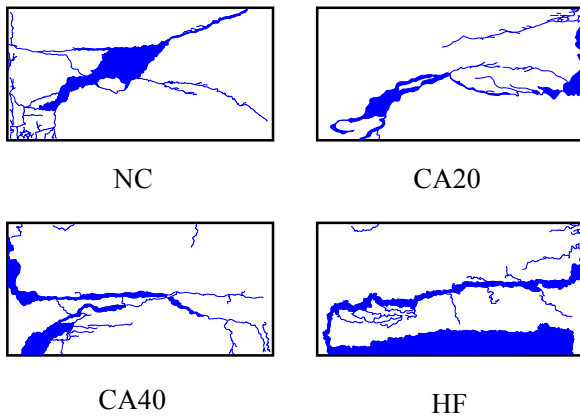


図-8 最終ひび割れ状況 (Fc36)

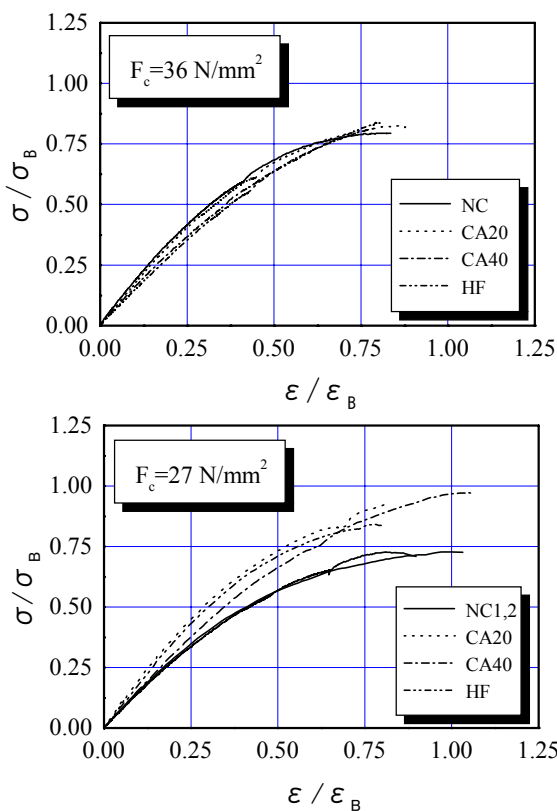


図-9 基準化応力-ひずみ曲線

表-4 力学的特性の比較

設計強度	試験体	$\frac{\sigma_F}{\sigma_B}$	$\frac{E_F}{E_C}$	$\frac{\nu_F}{\nu_C}$
36 N/mm ²	NC	0.79	1.01	1.03
	CA20	0.83	0.91	0.95
	CA40	0.81	1.06	1.34
	HF	0.84	1.03	0.82
27 N/mm ²	NC1	0.73	0.91	1.27
	NC2	0.73	0.93	0.84
	CA20	0.94	1.00	1.06
	CA40	0.97	0.94	1.26
	HF	0.90	0.93	0.83

表-5 力学的特性の寸法効果

種別	石炭灰コンクリート		普通コンクリート	
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
最大強度	0.88	0.08	0.75	0.04
ポアソン比	1.03	0.26	1.06	0.24
ヤング係数	0.98	0.07	0.95	0.06

(3) 力学的特性

実大試験より得られた試験体の最大強度 σ_F 、ヤング係数 E_F 、ポアソン比 ν_F と同日のシリンダー圧縮試験により得られた材料強度 σ_B 、ヤング係数 E_C 、ポアソン比 ν_C のそれぞれの比を表-4 に示す。最大強度の比率はいずれの試験体とも 1.0 を下回り、その範囲は 0.73 から 0.97 となっており、寸法効果の影響を受けていると考えられる。ヤング係数は全ての試験体で 1.0 に近い値で、ポアソン比はややばらつきが大きい。1.0 を中心に分布している。

そこで、試験体を石炭灰コンクリートおよび普通コンクリートの 2 つに分類し、それぞれ最小二乗法を用いて各力学的特性の比について近似直線と平均値、標準偏差を求めた。図-10, 11, 12 に最大強度、ヤング係数、ポアソン比の分布と近似直線を示し、表-5 に平均値と標準偏差をまとめる。

最大強度に関して普通コンクリートは平均値が 0.75 まで低下するのに対して、石炭灰コンクリートは 0.88 であり、図-10 からわかるように石炭灰の混入が寸法効果の影響を低減する可能性があることが考えられる。物理的には粒径の小さな石炭灰を混入することでコンクリートの粒度特性がより密実になり、マイクロクラック等の発生進展が抑制されるのではないかと考えられるが、断面形状の違いなどもあり今後の更なる検討が必要である。

ヤング係数とポアソン比については図-11, 12 からわかるように石炭灰混入の影響は見られず、いずれも平均値は 1.0 に近く、コンクリート種類によらず標準偏差も同程度である。すなわちヤング係数とポアソン比は寸法効果および石炭灰混入の影響を受けていない。

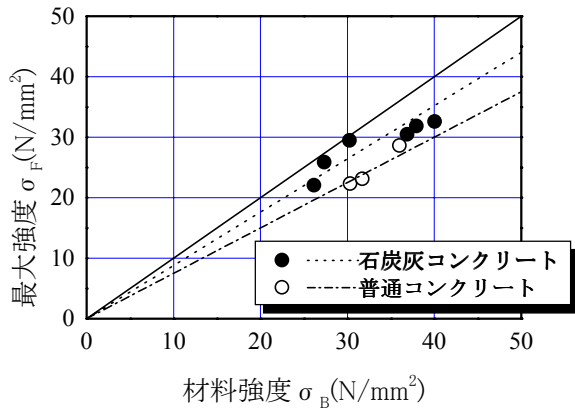


図-10 最大強度-材料強度の比較

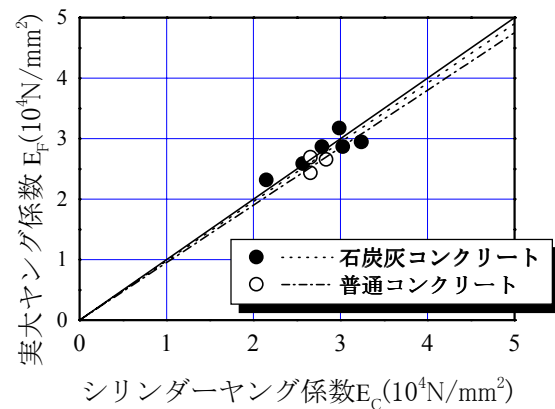


図-11 ヤング係数の比較

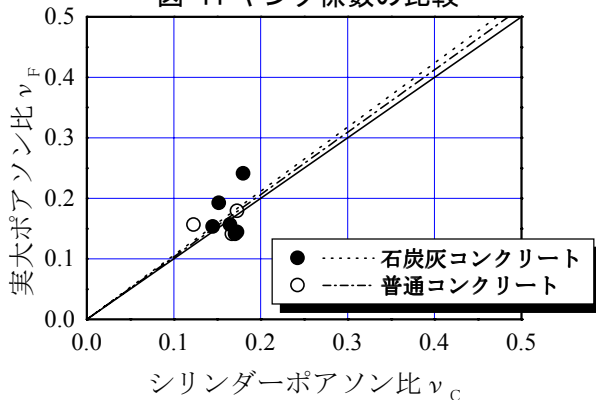


図-12 ポアソン比の比較

5. まとめ

石炭灰を用いたコンクリートの素材特性を調べるために、石炭灰の混入方法および設計強度を実験変数としたテストシリンダーの材料試験および実大無筋コンクリート柱の静的載荷試験を実施し、以下の知見を得た。

- ①材料試験ではFc36の場合、石炭灰の混入、無混入に拘わらず材齢 28 日程で強度上昇がなくなる結果となった。
- ②材料試験による引張強度、ヤング係数、ポア

ソン比について圧縮強度との関係を調べた結果、石炭灰の混入方法およびコンクリート強度に拘わらず大きな違いがないことを確認し、また既往の普通コンクリートに対する推定式が適用可能であることを確認した。

③石炭灰の混入が実大試験体の破壊性状に大きな影響を与えないことを確認した。

④圧縮強度に関して石炭灰の混入が寸法効果の影響を低減する傾向を示した。ヤング係数、ポアソン比は石炭灰の混入および寸法効果の影響を受けなかった。

以上の結果から、本研究の範囲において石炭灰コンクリートは圧縮引張強度、ヤング係数、ポアソン比の力学的性質に関して普通コンクリートと同等の性能を有していることを検証し、石炭灰コンクリートの建築構造材料への実用化に向けた基礎的データが得られた。今後は更に多くのデータ収集を行い、評価範囲の拡充および評価精度の向上を図る必要がある。

謝辞

本研究を行なうにあたり、中国電力(株)技術研究センターおよび出雲地区生コンクリート協同組合にご協力をいただいた。また、本研究の一部を科学研究補助金により実施した。ここに記して謝意を表す。

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) 小谷中昭裕ほか：石炭灰を原料とした人工骨材コンクリートの諸特性に関する検討，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.17，No.1，pp.405-410，1995
- 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