# 論文 石炭灰を活用した実大コンクリート柱の材料特性分布

小林 正和\*1·椛山 健二\*2·荒木 秀夫\*3·前川 晴郁\*4

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、石炭灰混入の有無を変数と して実大無筋コンクリート柱を製作し、そこからコア抜きしたシリンダーの材料試験を行っ た。実験結果から応力-ひずみ関係、強度、ヤング係数、ポアソン比等の材料特性分布に関 して、普通コンクリートの場合と比較検討し、石炭灰を混入した場合の影響を検証した。 キーワード:石炭灰、建築構造材料、実大コンクリート柱、コア抜き、材料特性分布

#### 1. はじめに

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, 普通コンクリートと同等の材料特性を実現 できることが確認されており<sup>1)</sup>,これらの技術の 実用化を目指すべき段階に至っていると考えら れる。筆者らは石炭灰の有効利用先としてコン 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 ートの構造材料としての力学的特性を把握し<sup>2)</sup>, 各種の小型 RC 部材の載荷実験により石炭灰の 混入が構造安全性に及ぼす影響を検討した<sup>3)</sup>。さ らに、実大 RC 柱の静的載荷実験を実施し、石炭 灰を活用した場合も普通コンクリートと同等の 耐震性能を有することを確認した4)。しかし、実 用に供する場合の確認事項の一つとして、部材 内部での強度等のばらつきを検討する必要があ ると考えられる。

本研究の目的は,石炭灰を建築物用の構造材 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,石炭灰を混入した部材の材料特性 分布を把握することである。そのため,石炭灰 混入の有無を変数として実大無筋コンクリート 柱 2 体を製作し,そこからコア抜きしたシリン ダーの材料試験を行い,部材内部における材料 特性分布に関して比較・検証した。

#### 2. 実験概要

#### 2.1 使用材料

本研究で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 性質を表-1に示す。原粉ではあるが,その性 状は同表に示す通り,JISフライアッシュ II種の 規格を満足している。そこで本研究では精製分 級せず原粉をそのまま使用した。セメントには 普通ポルトランドセメント,砂には砕砂と海砂 の混合物,粗骨材には砕石を使用した。

# 2.2 試験体一覧および調合

本研究では, 表-2に示す2体の実大無筋コ ンクリート柱を作製した。実験変数は石炭灰混 入の有無である。試験体の外形は同一で, 図-1に示す通り, 断面 800×800mm, 高さ2350mm

*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	工学研究科社会環境システム専攻助手 博(工)	(正会員)
*3	広島大学大学院	工学研究科社会環境システム専攻助教授 工博	(正会員)
*4	福山大学大学院	工学研究科建築学専攻	

表-1 使用した石炭灰の物理特性

湿分 (%)	強熱減量 (%)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	ブレーン値 (cm²/g)	フロー値比 (%)	MB吸着 (mg/g)
0.1以下	3.20	2.13	3,200	101	0.44
[1.0以下]	[5.0以下]	[1.95以上]	[2,500以上]	[95以上]	[規定なし]

[]内はJIS フライアッシュ II 種の規格値

表-2 試験体一覧

試験体名	石炭灰の混入方法	設計基準強度 F <sub>C</sub>	試験体の形状
CA	細骨材置換材(体積比20%)	$26 \mathrm{N/mm}^2$	断面 800×800 mm
NC	なし(普通コンクリート)	30 IN/IIIII	高さ 2350 mm

表-3 コンクリート調合

試驗体名	W/C 水(W)		セメント (C)	細骨材 (kg/m <sup>3</sup> )		粗骨材	混和材 (kg/m <sup>3</sup> )	
	(%)	(kg/m <sup>3</sup> )	$(kg/m^3)$	砂	石炭灰	(kg/m³)	高性能減水剤	AE剤
CA	45	180	400	573	119	975	4.00	1.60
NC	44	180	409	771		913	3.35	-



であり、いずれも設計基準強度 F<sub>c</sub>=36N/mm<sup>2</sup>,ス ランプ値 18±2.5cm,空気量 4.5±1.0%を目標と し、石炭灰を混入するコンクリートに関しては 事前に試し練りを行い調合を決定した。両試験 体の調合を表-3に示す。CA は細骨材体積の 20%を石炭灰の原粉で置換し、NC 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 混入の影響を検討するための比較対象である。

# 2.3 試験体打設および養生

試験体の打設には鋼製型枠を使用し,縦打ち とした。実施工を想定し,生コンプラントで練 混したコンクリートをミキサー車で運搬し,ポ

# 表-4 打設時のスランプと空気量

試験体名	スランプ (cm)	空気量 (%)
(目標値)	(18±2.5cm)	$(4.5\pm1.0\%)$
CA	20.0	3.7
NC	16.0	3.8

ンプ圧送車を用いて打設した。表-4に示すよ うに打設時に行った材料試験の結果,両試験体 ともスランプ,空気量とも目標値内に収まって おり,打設時の不具合もなかった。打設終了後, 上端面を厚さ200mmのスタイロフォームで断熱 養生して,湿潤状態を確保するため打設7日後 に脱型を行った。脱型後は気中養生とし,下端 面を同様に断熱養生とした。また,実大柱打設 時にコア抜きシリンダーとの比較対象として, 標準水中養生用のテストピース(¢100mm× h200mmの円柱)を作製した。

### 2.4 試験体形状およびコア抜き位置

試験体を作製するにあたり、内部温度履歴の 推移を計測するため図-1に示すように高さ方 向において上、中央、下部の各断面に3点ずつ 計9点と外気温計測用のため柱外部1点に熱電 対を設置した。計測は打設中には10秒間隔,打 設終了後には10分間隔で脱型直前の7日後まで 行った。また、コア採取は同図に示す位置で材 令28日と91日に4本ずつ行った。コア抜きし た長円柱は $\phi$ 100mm×h2350mm であり、それを ダイヤモンドカッターにて切断し、 $\phi$ 100mm× h200mm の圧縮試験用シリンダーを 7 本ずつ作 製した。シリンダーの記号は柱断面の端部から 中心部に向け順に A~D とし、上部から下部に向 け 1~7 とした。切り出した後に速やかに各シリ ンダーの比重計測および圧縮試験を実施した。

### 3. 実験結果および考察

# 3.1 内部温度履歴

内部温度計測結果を図-2に示す。両試験体 とも温度分布はほぼ同様の傾向を示しており、 断面では中央部から端部、高さ方向では上部か ら下部へ向け温度が低くなる傾向にある。また, 両試験体とも上面中心部 a の点で最高温度を記 録し, CA は打設後 15 時間で 81.8℃, NC は 14 時間で 64.7℃となった。石炭灰を混和剤として 混入する際の特徴として、コンクリートの水和 熱を抑制する効果が挙げられるが
<sup>5)</sup>,本研究では 細骨材の代替として混入しており、セメント量 はほぼ同じで,石炭灰が混入された分だけ粉体 量が増加したため水和反応により発熱量が上昇 したと考えられる。さらに次項の比重の分布で 示す通り, CA では上部端部の比重が非常に小さ く,骨材の沈降により上部ほど粉体の割合が高 くなったことも一因として考えられる。また、 CAでは打設後120時間以降も若干外気温よりも 内部温度のほうが高くなっており、石炭灰の混 入によりポゾラン反応が継続していると考えら れる。なお、打設から脱型までの積算温度を算

定すると CA で 267℃・日, NC で 244℃・日で あり, 養生条件は同等と判断した。

## 3.2 高さ方向における比重の分布

材令91日の高さ方向における比重の分布を図 -3に示す。縦軸は試験体高さであり,横軸は 各シリンダーの比重γを標準水中養生したテス トピース(図中および以下,TP)4本の平均比 重γsで除して基準化している。図中の実線はそ れぞれの高さにおけるシリンダーA~Dの平均値 を結んでいる。いずれも上部ほど比重が小さく, その傾向はCAでより顕著である。スランプ値が 大きかったCAでは流動性が高く,骨材の沈下量 が多くなったことが原因と考えられる。同一断 面内では,ばらつきがあるものの両試験体とも 側端部で比重が小さい傾向が確認できる。材令

# 3.3 高さ方向における圧縮強度の分布

高さ方向における圧縮強度の分布を図-4に 示す。縦軸は試験体高さで、横軸は各シリンダ ーの圧縮強度  $\sigma_B$  を設計基準強度  $F_C$  (36N/mm<sup>2</sup>) で除して基準化した。図中の実線はそれぞれの 高さにおけるシリンダ-A~D の平均値を表し、 破線は4本の TP の平均値である。いずれも上部 ほど圧縮強度が小さい傾向が見られ、材令91日 では比重と同様に CA でより顕著である。CA の 材令28日で、TP の圧縮強度は  $F_C$ の8割程度に 留まったのに対し、シリンダーの値はいずれも それより高く、下部ではほとんどの点で  $F_C$ を満 足した。また CA の91日でも、シリンダーの値 はほとんどの点でTPの値を上回った。TPが20℃





の水中養生に対し,実大柱の内部温度が高かっ たことが影響していると考えられる。一方,NC では28日,91日ともに、シリンダーの点はTP の値を中心に分布している。以上から,石炭灰 を混入したコンクリートでは強度発現性に対す る内部温度の影響が大きくなる可能性があるこ とが推察される。なお、シリンダーの圧縮強度 の変動係数は材令28日のCAで8.5%,NCで8.7%, 材令91日のCAで9.9%,NCで8.5%となり、い ずれも9~10%に収まっており、強度のばらつき に石炭灰混入の影響は見られない。

#### 3.4 圧縮強度-圧縮強度時ひずみの関係

圧縮強度-圧縮強度時ひずみの関係を図-5 に示す。図中には文献<sup>60</sup>に示される既往の研究に よる提案式の線を併せて示す。ばらつきがある ものの, CA では佐伯式と Popovics 式の間付近に 多くの点が集中し, NC では Shah 式を中心に分 布している。本研究では石炭灰を混入した時の 圧縮強度時ひずみが普通コンクリートの場合に 比べ小さい結果となった。

### 3.5 応カーひずみ関係

CA と NC それぞれの材令 91 日における断面 中心位置のシリンダーのうち,上部(D-1),中央 部(D-4),下部(D-7)について応力-ひずみ関係を 図-6に示す。縦軸は応力 $\sigma$ を圧縮強度 $\sigma_B$ で除 し、横軸はひずみ  $\epsilon$  を圧縮強度時ひずみ  $\epsilon_B$ で除 して基準化している。図中には TP の結果と既往 の提案式 <sup>6,7)</sup>による曲線を併せて示す。CA, NC とも中央部(D-4)と下部(D-7)は TP の結果とほぼ 一致したが,上部(D-1)は初期の勾配が大きく, NC でその傾向がより顕著である。既往式との比 較では,CA で上部(D-1)が飯塚・野口式とほぼ-致し,Kent & Park 式は他の曲線よりも初期の勾 配が大きくなった。NC では上部(D-1)が Kent & Park 式とほぼ一致し,中央部(D-4)と下部(D-7)お よび TP は飯塚・野口式とほぼ一致した。

# 3.6 ヤング係数とポアソン比

圧縮強度 σ βの 1/3 の点を弾性限界としてヤン グ係数  $E_{C}$ およびポアソン比  $\nu$  を求めた。  $\mathbf{2} - \mathbf{7}$ にコア抜きしたシリンダーのヤング係数-圧縮 強度の関係を示す。図中には4本のTPの平均値 と文献<sup>8)</sup>の2つの算定式による曲線を併せて示 す。同式中の比重には CA と NC それぞれの採取 したシリンダーの比重の平均値を使用した。結 果の点は NC では算定式(1)付近に分布している のに対し、CA では算定式(2)との対応が良く、 CAのヤング係数が NCに比べ高めとなる傾向を 示した。前項で示した圧縮強度時ひずみの減少 が影響していると推察される。各シリンダーの ポアソン比-圧縮強度の関係を図-8に示す。 図中には文献<sup>8)</sup>に示されるポアソン比の範囲(v =0.167~0.200)を併せて示す。CA, NC ともポ アソン比にはばらつきがあり, 強度との相関性 は見られないものの, ほぼ提示範囲内に含まれ ており、石炭灰混入による影響は見られない。

### 4. まとめ

本研究では石炭灰を活用したコンクリートの 建築構造物への実現を目指し,石炭灰の混入の 有無を変数として,実大無筋コンクリート柱か



らコア抜きしたテストピースの材料試験を実施 し、材料特性分布について検証した。以下に得 られた知見をまとめる。



(1) 石炭灰混入の有無に依らず, コンクリート 構造体中では部材高さが高いほど上部の比重お よび圧縮強度が小さくなる可能性がある。同一 断面内では端部で比重が小さい傾向が見られる が,強度分布の傾向はない。

(2) 石炭灰の混入により強度発現性に対する内部温度の影響が大きくなる可能性がある。

(3) 石炭灰を混入することにより圧縮強度時ひ ずみが減少し,それに応じてヤング係数が上昇 する可能性がある。

### 謝 辞

本研究は平成15年度中国電力技術研究財団研 究助成金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

 塩道智晴ほか:石炭灰と砕石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

- 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
- 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
- 4) 椛山健二ほか: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,コンクリート工学 年次論文集, Vol.25, No.2, pp.241-246, 2003.7
- 5) 環境技術協会:石炭灰ハンドブック(平成 7 年 版), 1995
- 6) 日本建築学会:高強度コンクリートの技術の現 状,1991.1
- 7) 飯塚崇文,野口博:普通強度から高強度コンク リートまでを対象とした圧縮特性の定式化,構 造工学論文集, Vol.37B,pp.329-338,1991.3
- 8) 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),1999.11