

論文 原粉石炭灰を大量に使用した吹付けコンクリートの吹付け実験

佐藤幸三*¹・五十嵐心一*²・秋田有一*³・小林智仁*⁴

要旨：品質のばらつきが大きい原粉石炭灰を細骨材の一部として、吹付けコンクリートに適用した結果について報告する。未燃カーボン量、粒度分布の異なる3種類の原粉石炭灰を用いて、模擬トンネルにおいて吹付け実験を行った。原粉石炭灰を細骨材の20～30%程度と大量に置換した場合の、圧縮強度、リバウンド、粉じん等の緒性状を確認した。全ての石炭灰の吹付けは可能であり、かつ、諸性状の改善効果も認められた。これによって、吹付けコンクリートへの原粉石炭灰の大量添加の可能性が確認された。

キーワード：原粉石炭灰、吹付けコンクリート

1. はじめに

火力発電所から排出される石炭灰の発生量は年々増加する傾向である。これらの石炭灰は、セメントの原料やコンクリート混和材料として有効に利用されているものの、その大半は埋め立て処分されているのが現状である。

これら大量に発生する石炭灰の有効利用を図るため、コンクリート用フライアッシュに関するJISが改訂された。これは、フライアッシュを品質別に4種類に分類し、使用目的に応じて使い分けることが出来るようにしたものである。しかし、発生する石炭灰を分級しないで原粉のまま利用できれば、設備およびコスト上有利である。

石炭灰を大量に土木構造物に使用する研究開発は、電力会社を中心として大学、建設会社で行われている¹⁾²⁾。数例を除いて混入率も比較的小さく、使用する石炭灰の種類も限定されている。本研究では、コンクリート性状の変動に対して施工上の対応が比較的容易であると判断される湿式吹付けコンクリートを対象として、細骨材の20～30%程度を置換したもので吹付け実験を行った。本報告は、模擬トンネルで行った吹付け実験に関するものである。

2. 実験概要

2.1 使用材料

原粉石炭灰

石炭灰は、A～C3箇所の火力発電所から発生したものを分級等の操作をせずに使用した。原粉石炭灰の物理試験結果を表-1、化学分析結果を表-2に示す。

原粉石炭灰Aは、強熱減量も小さく良質な石炭灰といえるが、原粉石炭灰B、Cは、強熱減量が大きく、コンクリート性状への影響が懸念された。

その他の材料

原粉石炭灰以外は、通常の吹付けコンクリートに用いられるような材料を使用した。フレッシュ性状の悪化に対しては、高性能AE減水剤

表-1 原粉石炭灰の物理試験結果

		A	B	C
密度(g/cm ³)		2.30	2.25	2.20
ブレン値(cm ² /g)		4,000	4,500	4,800
強熱減量(%)		2.32	5.20	10.59
フロー値比		95.8	90.5	86.3
活性度 指数 (%)	材齢28日	80.1	76.5	102.5
	材齢91日	89.7	92.6	101.5

*1 西松建設(株) 技術研究所 (正会員)

*2 金沢大学助教授 自然科学研究科 工博 (正会員)

*3 金沢大学大学院自然科学研究科環境基盤工学専攻 (学生会員)

*4 電気化学工業(株)セメント・特殊混和材研究所

を使用して対処した。これは、現場適用を考慮した選択であった。

表 - 2 原粉石炭灰の化学分析結果

項 目	含有率(%)		
	A	B	C
SiO ₂	51.85	52.80	45.53
Fe ₂ O ₃	3.58	5.68	2.87
Al ₂ O ₃	31.81	29.16	27.13
CaO	5.59	2.97	7.50
MgO	1.26	0.88	1.37
TiO ₂	1.08	1.21	1.40
T-C	2.13	5.06	10.85

表 - 3 に石炭灰以外の使用材料一覧を示す。

表 - 3 石炭灰以外の使用材料

材料	仕様等	密度 (g/cm ³)
セメント	普通ポルトランドセメント	3.16
細骨材	川砂(FM=2.82)	2.62
粗骨材	川砂利 G _{max} = 13mm	2.64
化学混和剤	高性能 AE 減水剤	-
急結剤	粉体急結剤	2.6
水	水道水	1

2.2 配合

原粉石炭灰は結合材の一部としても有効であると考えられるが、品質が不安定であることから、今回は細骨材一部として考えた。原粉石炭灰の目標細骨材置換率は細骨材容積の 30%とした。ただし、事前の試験練りにおいて、原粉石炭灰 C を使用したベースコンクリートは粘性が高く、吹付けが不可能と判断された。高性能 AE 減水剤を過剰に添加することは実用上困難であると判断し、置換率を 30%から 20%へ、s/a

を 60%から 48%に変更して行った。比較のために通常使用されている配合（一般配合）も試験した。表 - 4 に配合表を示す。

2.3 設備および吹付け条件

吹付け設備

吹付け実験に使用した設備は、コンクリートポンプ式吹付け機、吹付けロボット、急結剤添加装置である。

吹付け条件

吹付け実験の条件は、表 - 5 の通りである。また、配管システムを図 - 1 に示す。

表 - 5 吹付け条件

コンクリート吐出量 (m ³ /h)	10
急結剤添加率 (C × %)	7
急結剤吐出量 (kg/min)	4.2

模擬トンネルは、高さ 4.5m、幅 5.5m、長さ 20m であり、吹付け試験時はトンネルの片側をシートで塞ぎ、風の吹き抜けを防止した。模擬トンネルの全景を写真 - 1 に示す。



写真 - 1 模擬トンネル全景

表 - 4 配合表

				単位量 (kg / m ³)					
種類	目標 S L (c m)	W/C (%)	s/a (%)	W	C	S	G	石炭灰 FA	SP
一般	8 ± 2.5	60	60	216	360	1053	707	-	-
A	15 ± 2.5	60	60	216	360	758	707	270	C × 0.9%
B		60	60	216	360	760	707	270	C × 1.3%
C		60	48	216	360	664	920	150	C × 1.5%

1 : s/a は石炭灰を細骨材に含め ((S+FA) の容積 / (S+FA+G) の容積) とする。

2 : エア量 0% で配合計算した。

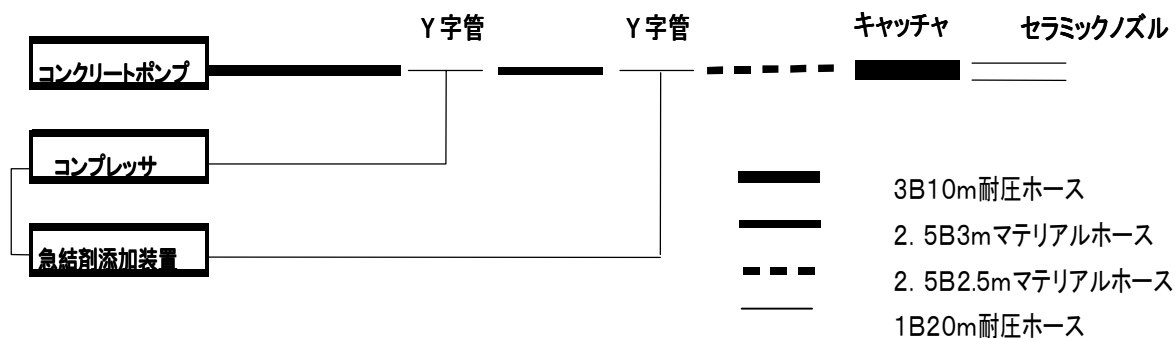


図 - 1 配管システム図

2.4 試験項目および試験方法

今回は、施工性の確認に重点を置いた試験とし、試験項目および試験方法は表 - 6 の通りとした。ベースコンクリートの降伏値および塑性

表 - 6 試験項目および試験方法

試験項目	試験方法
スランプ	JIS A 1101
空気量	JIS A 1128
コンクリート温度	棒温度計で測定
レオロジー試験	NIST R 6094
初期強度	JSCE-G 561 σ_1 プルアウト法
長期強度	JSCE-F 552, JSCE-F 561 コア採取 σ_7, σ_{28} JIS A 1108 圧縮強度
リバウンド	天端下に広げたシートに落ちた質量を測定 (吹付け時間 2~3 分)
粉じん	吹付けノズルから 5m 地点でデジタル粉塵計で測定

粘度からレオロジーを評価するために、図 - 2 に示すような試験を行った。本方法 (NIST R 6094)³⁾は、ベースコンクリートのレオロジーを現場で簡便に測定することを目的として、試験項目に加えた。この方法は、JIS A 1101 に準じてベースコンクリートをスランプコーンに詰め

た後、図に示すような上載プレートをベースコ

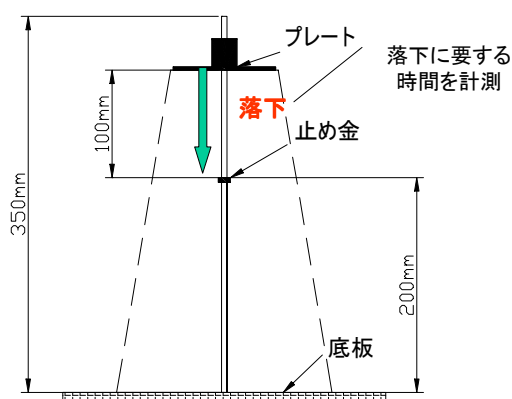


図 - 2 レオロジー試験法

上載プレートがコンクリートのスランプにより、100mm 下の止め金に達するまでの時間を測定し、次式により

降伏値 (τ_0) および塑性粘度 (η) を求めた。

$$\tau_0 = \rho (300 - S) / 270$$

$$\eta = 25 \times 10^{-3} \rho T \quad (S < 200 \text{ mm の場合})$$

ここに、 τ_0 は降伏値 (Pa)、 ρ はコンクリートの密度 (kg/m^3)、 S はスランプ (mm)、 η は塑性粘度 ($\text{Pa} \cdot \text{sec}$)、 T はプレートが止め金に達するまでの時間 (sec) である。

表 - 7 フレッシュ性状

種 類	スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 ()	降伏値 (Pa)	塑性粘度 (Pa·s)
一般配合	10.5	2.5	26.0	1687	15.5
A	17.0	1.6	26.0	1114	23.7
B	17.0	2.2	26.0	1116	35.3
C	13.0	3.5	12.5	1458	38.2

3. 試験結果

3.1 フレッシュ性状

生コン工場からの運搬時間は約 10 分であった。原粉石炭灰 C のみ時期をずらして行ったので、ベースコンクリート温度が低くなっている。

表 - 7 にフレッシュ性状の試験結果を示す。原粉石炭灰 C は目標スランプの下限に近かったが、レオロジー試験結果から吹付け可能と判断して試験を行った。原粉石炭灰 A および B は、スランプ同じであったが、塑性粘度に差が見られた。また、原粉石炭灰 C の降伏値は、一般とかなり近い数値となっていた。

3.2 吹付け性状

全ての配合において吹付け状況は良好であったが、ポンプ吐出圧、リバウンド率、粉じん濃度においては変化が見られた。原粉石炭灰 A、B は 粘性が増大しリバウンド率が低下したが、粉じん量が増加する傾向があった。原粉石炭灰 C については、他の石炭灰と傾向が逆となり一般配合と同等の結果となった。表 - 8 に吹付け性状結果を示す。

表 - 8 吹付け性状結果

種 類	ポンプ吐出圧 (MPa)	リバウンド率 (%)	粉じん濃度 (mg/m ³)
一般	5.0	10.0	5.2
A	8.0	5.5	19.8
B	12.0	5.4	10.3
C	12.5	10.8	1.8

図 - 3 ~ 8 に塑性粘度および降伏値とポンプ圧、リバウンド率、粉じん濃度の関係を示す。

前述した 降伏値および塑性粘度とポンプ圧、リバウンド率および粉じん濃度の関係を検討すると以下の通りとなる。

塑性粘度は流動性に関するパラメータであり、これが大きくなると流動を妨げることとなる。従って、ポンプ圧と大きく関係する事となっている。塑性粘度とリバウンド

率および粉じん量には明確な関連性は見られない。

降伏値は、ポンプ圧には関係していないが、リバウンド率に関係している(相関係数 0.9)。これは、粗骨材量が多いことだけではなく、降伏値が大きくなることで、吹付けられたコンクリートの変形抵抗性が大きくなり、次に吹き付けられたコンクリートをはじいてしまうからではないかと推測される。また、粉じん濃度は降伏値が大きくなるとともに低下する傾向が見られた。

トンネル延長が短いため、周辺の粉じん等の影響を受けたことは否定できないが、傾向はとらえていると考えられる。

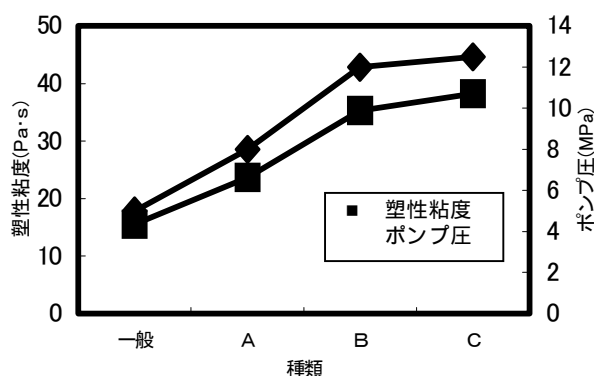


図 - 3 塑性粘度とポンプ圧の関係

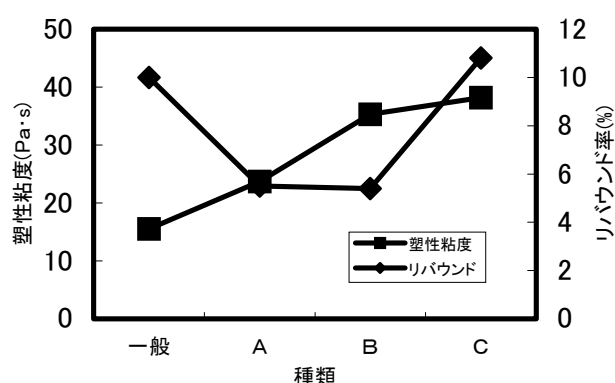


図 - 4 塑性粘度とリバウンド率の関係

原粉石炭灰 C は置換率が小さいため、粗骨材量が増加し単位容積質量が大きくなる。その結果降伏値が大きくなり、塑性粘度が上昇しているにもかかわらずリバウンド率が大きくなっていると考えられる。

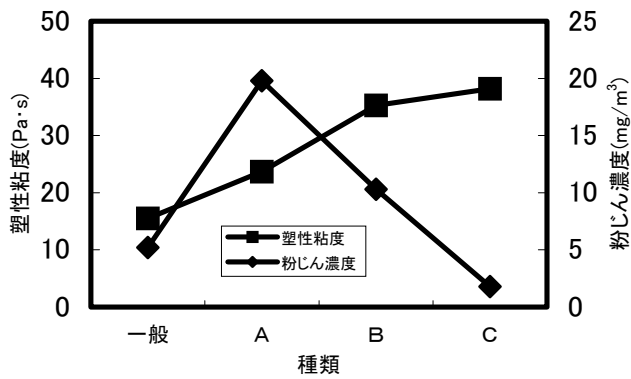


図 - 5 塑性粘度と粉じん濃度の関係

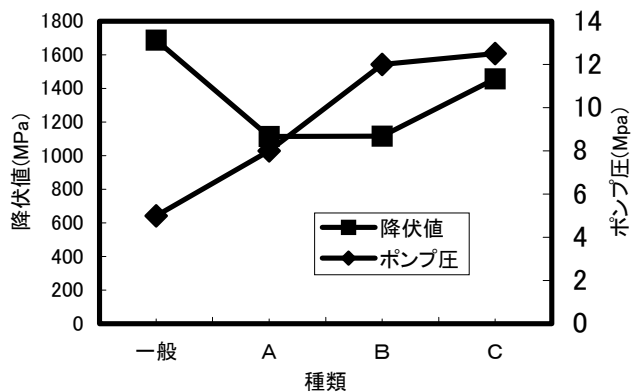


図 - 6 降伏値とポンプ圧の関係

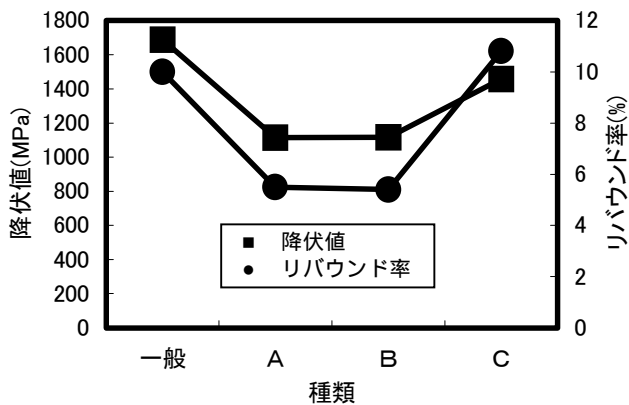


図 - 7 降伏値とリバウンド率の関係

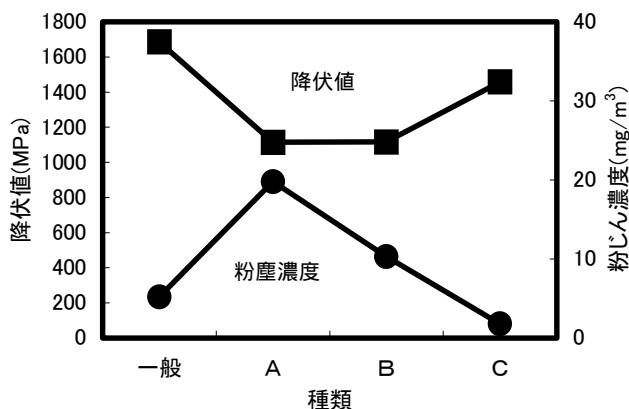


図 - 8 降伏値と粉じん濃度の関係

単位容積質量は、降伏値に大きく影響を与えているので、降伏値とリバウンド率に相関性が得られたと考えられる。

粉じん量に関しては、リバウンド率のような明確な傾向は得られていない。今回のように粉体の急結剤を用いた場合、粉じんの発生は急結剤とベースコンクリートの混合状態の影響を大きく受ける。目視観察によると、塑性粘度が大きくなった場合、急結剤とベースコンクリートの混合状況が悪化し、混合されない急結剤による粉じんが増加する傾向にあった。しかし、原粉石炭灰Cのように、原粉石炭灰の添加率が低く粗骨材量が多い場合には、骨材のせん断効果により混合性状が向上した結果ではないかと推測される。

3.3 硬化性状

プルアウト（1日）およびコア採取の圧縮強度の発現状況図を図 - 9に、テストピースでの圧縮強度発現状況を図 - 10に示す。

原粉石炭灰Cは、テストピースの強度も高く、吹付け後の初期強度、長期強度とも大きな値を示している。

原粉石炭灰A、Bに関しては、テストピースの強度が一般配合に対して大きな値を示しているが、吹き付けたものの初期強度増進は見られない。

テストピースの強度発現性状から、細骨材置換として原粉石炭灰を大量に使用することによって、組織が緻密になり強度を増進させる効果が得られることが分かる。吹付け施工を行った後は、急結剤の混合状況と相殺される形で、初期強度の伸びが一般配合と同等となった可能性がある。長期強度の伸びは一般配合に比べ大きいので、石炭灰の強度増進効果は確認されていると考える。

原粉石炭灰Cの強度が大きいことに関しては、その反応性の高さのみならず、最適な混入率、レオロジー特性が存在することを示唆するものとなっている。

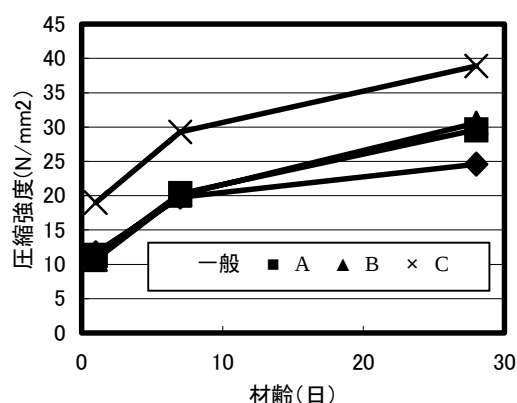


図 - 9 プルアウトおよびコア供試体の圧縮強度発現状況

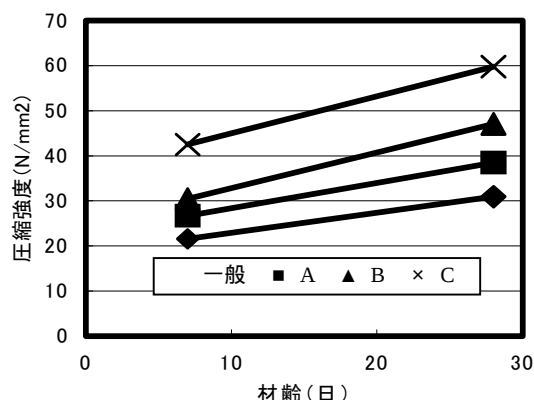


図 - 10 ベースコンクリートの圧縮強度発現状況

4. まとめ

今回の模擬トンネルを使用した吹付け実験に関して、以下の知見が得られた。

- (1) 今回使用した品質範囲の石炭灰であれば、原粉石炭灰を細骨材置換率20～30%と大量に添加しても、吹付けが可能である。
- (2) 塑性粘度とポンプ圧の関係から圧送負荷の推定が可能であるため、今回のレオロジー試験は、施工性の判断に有効である。
- (3) 原粉石炭灰の強熱減量が比較的小さい（5%程度以下）場合は、細骨材置換として大量添加が可能であるとともに、リバウンド等の低減効果が期待できる。
- (4) 細骨材置換として原粉石炭灰を大量に添加することは、急結剤との混合性状が低下し、粉

じん濃度の低減効果が得られない可能性がある。

(5) 細骨材置換として原粉石炭灰を大量に添加することによって、一般配合に比べて強度は増進する。

(6) レオロジー特性を考慮に入れた配合設計は、石炭灰を大量に使用した吹付けコンクリートの施工においては有効であると考えられる。

原粉石炭灰を吹付けコンクリートに大量に添加することによって、リバウンド率低減および強度増進効果が得られる半面、ポンプ圧の増加および粉じんの増大といった問題が確認された。実施に当たっては、品質に基づく最適なる配合検討、液体急結剤の使用を視野に入れた対応をとる必要があると考える。原粉石炭灰の品質は、原料炭、排出発電所の稼働状況によって大きく変化するので本報告が全ての品質を網羅しているとは言えないが、未利用石炭灰の有効活用の参考となれば幸いである。

参考文献

- 1) 細川佳史，魚本健人：吹付けコンクリートの特性に関する基礎的研究(16)，生産研究，52巻11号，pp48-51，2000.
- 2) 寺本勝三，五十嵐心一，川村満紀，渡辺暁央：吹付け用フライアッシュ含有コンクリートの初期強度と細孔構造，コンクリート工学年次論文集 vol.23 No.2 pp139-142，2001
- 3) Ferraris, C.F et al.:Cement , Concrete and Aggregates ,CCAGDP , Vol. 20 ,No. 2 , Dec. pp. 241-247 , 1998.