

論文 分級フライアッシュを用いた吹付けコンクリートの諸特性

油野 邦弘*¹・石井 光裕*²・国久 清司*³・富加見 徳治*⁴

要旨：石炭灰原粉から、高度な風力分級技術により選別抽出した分級フライアッシュ（JIS I種）を混和材として使用した吹付けコンクリートの各種配合について、配合試験を行うとともに、模擬トンネルでの吹付け試験と吹付けコンクリートの強度、耐久性試験を行い、施工性、強度発現性、耐久性の諸特性について検討した。その結果、分級フライアッシュを細骨材置換で100kg/m³混入した吹付けコンクリートでは、非混入の場合と比べ、粉塵量とリバウンド率が低減し良好な施工性の改善が図れ、初期、中長期の強度が増加するとともに耐久性が向上することが明らかとなった。

キーワード：分級フライアッシュ、混和材、低粉塵、低リバウンド、強度発現、耐久性

1. はじめに

全国の石炭火力発電所から発生する石炭灰量は、現在の年間約 540 万ト (1997 年度実績) から 2005 年頃には約 1,000 万トと大幅に増加するものと予想されており¹⁾、石炭灰の有効利用が益々重要となっている。本研究は、石炭灰の有効利用技術の開発研究の一環として実施しているものであり、石炭灰原粉から、高度な風力分級技術により選別抽出した分級フライアッシュ（JIS I種）を吹付けコンクリートの混和材として使用し、施工性の改善（低粉塵、低リバウンド）や強度発現、耐久性の向上等を図ることによって、高品質の吹付けコンクリートを開発し実用化することを目的としている。

分級フライアッシュは、球形の微粒子であることから、吹付けコンクリートに混入しその特性を活用することにより、①フレッシュコンクリートに発生する適度な粘性による施工性の改善、②空隙充填効果やポゾラン効果等により硬化体を緻密化して強度、耐久性等の向上、③これら改善効果による作業環境の改善、経済性の

向上等を図ることが可能と考えられる。

本論文では、分級フライアッシュを混和材として使用した各種配合の吹付けコンクリートの配合試験と模擬トンネル（高さ 3.5m、幅 3.5m、長さ 7.0m）による吹付け試験および強度、耐久性試験を実施し、施工性の改善、強度発現性、耐久性などの諸特性について基本検討を行った。

2. 分級フライアッシュの特性

最近のフライアッシュの品質変動要因の一つとして、海外炭の使用増大や環境対策に伴う燃焼条件の変化等により、粒径の良くないフライアッシュが増加したことが挙げられている²⁾。このフライアッシュの品質変動要因となる不定形の粗粒子を高度な風力分級技術でとり除き、20 μm 以下の良質な球形微粒子を選別抽出したものが分級フライアッシュであり、従来のフライアッシュの品質の向上と高機能化を図ったものである^{3), 4), 5)}。平成 11 年 2 月に改訂された JIS A 6201「コンクリート用フライアッシュ」

*1 テクノ・リソース(株)環境事業本部企画開発部次長 (正会員)

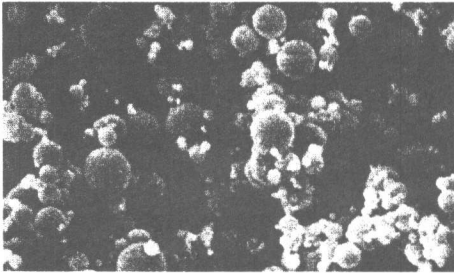
*2 テクノ・リソース(株)環境事業本部企画開発部長 工博 (正会員)

*3 四国電力(株)中村支店副支店長 (元勤務先：テクノ・リソース(株))

*4 四国電力(株)建設部計画課副長

では、I種の適合品となっている。

分級フライアッシュの電子顕微鏡写真を写真-1に示す。



— 10 μ m

写真-1 分級フライアッシュの電子顕微鏡写真

分級フライアッシュには、最大粒径が 20 μ m の FA20 と、FA20 の効果をより高めるために最大粒径を 10 μ m 以下とした FA10 の 2 種類がある。分級フライアッシュを分級前の原粉と比較すると、品質の変動が小さい、球形の粒子が多い、ポゾラン反応性が高い等の性質を有している。この分級フライアッシュを一般のコンクリートに混入すると、ボールベアリング効果および微粉末効果が発揮され、コンクリートの性能向上を図ることができる。フレッシュコンクリートにおいては、単位水量を減少させブリーディングが抑制されるとともに、ワーカビリティの改善効果が大きく、適度な流動性を確

保することによりポンプ圧送性が向上する。また、硬化コンクリートにおいては、従来のフライアッシュと比べて初期、長期強度の発現性が向上し、緻密なコンクリート硬化体となることから、水密性、耐久性が向上する。

なお、分級フライアッシュは、すでに公的機関から技術評価を受けており⁶⁾、現在のところ主に四国地域において、年間 1 万ト程度が実用に供されている。

3. 配合試験

本研究で吹付けコンクリートの混和材として使用した分級フライアッシュは、最大粒径が 20 μ m の FA20 と分級後に残った粗粒分の分級粗粉 (JIS IV種) である。吹付けコンクリートの配合試験を実施するに当たっては、使用材料、施工法、公的機関の技術基準等に関する現況技術調査を行い、吹付けコンクリートの基準の単位セメント量を 360kg/m³ とし、圧縮強度を、材齢 24 時間強度で 5N/mm² 以上、材齢 28 日強度で 18N/mm² 以上に設定した。

配合試験では、FA20、分級粗粉を混和材として、セメント置換と細骨材置換したケースで各種配合試験を行い、練り上がり性状を確認して吹付け試験の配合を選定するものとした。表-1に配合試験結果を示す。なお、配合試験では、ポリグリコールエステル誘導体を主成分と

表-1 吹付けコンクリートの配合試験結果

配合 No.	混和材 種類	置 換 量		スランブ (cm)	W/C (%)	s / a (%)	単位量 (kg/m ³)					
		細骨材	セメント				水	セメント	細骨材	粗骨材	混和材	混和剤
1		—	—	12±2	54.2	60	195	360	1075	737	—	4.32 C× 1.2%
2		約5%	—		51.4		185	360	1036	748	50	
3	分級7517	約10%	—		51.4		185	360	982	748	100	
4	7517 FA20	約15%	—		51.4		185	360	930	748	150	
5		約20%	—		54.2		195	360	860	737	200	
6		—	約10%		53.1		191	320	1075	737	40	
7	分 級	約10%	—		54.2		195	360	958	737	100	
8	粗 粉	約20%	—		58.3		210	360	816	721	200	

・W/C, s/a, C, sは、セメント、細骨材置換相当分の混和材を含む。

・セメント；普通ポルトランドセメント、密度 3.16g/cm³、細骨材；表乾密度 2.59g/cm³、粗粒率 2.87、粗骨材；最大寸法15mm、表乾密度 2.64g/cm³、粗粒率 6.19

・FA20；密度 2.40g/cm³、比表面積 5,530cm²/g、分級粗粉；密度 2.20g/cm³、比表面積 1,770cm²/g

する吹付けコンクリート用混和剤を使用し、各配合での混和剤使用量を一定($C \times 1.2\%$)とし、分級フライアッシュの混入量の違いによるスランプ変化は、単位水量で調整し $12 \pm 2\text{cm}$ とした。粗骨材は最大寸法 15mm の砕石を使用し、細骨材は陸砂を使用した。

配合試験結果では、FA20 を細骨材置換した配合 No.2 ~ 5 のケースでは、FA20 の置換量 $50, 100, 150\text{kg/m}^3$ の配合において、単位水量が、混和材を混入しない基準配合 No.1 と比べ 5% 程度低減し、粘性は増加するが練り上がり性状は良好であり、FA20 の減水効果が確認された。なお、FA20 の置換量 200kg/m^3 の配合では、単位水量は基準配合と同等となり粘性がかなり大きくなった。また、FA20 をセメント置換した配合 No.6 では、基準配合と比べ 2% 程度の減水効果が認められた。また、分級粗粉を $100, 200\text{kg/m}^3$ 細骨材置換した配合 No.7, 8 では、単位水量は、基準配合と同等かそれ以上となり、減水効果は認められず、配合 No.8 は粘性がかなり大きくなった。

以上の配合試験結果から、吹付け試験を実施する配合を、分級フライアッシュを混入した吹付けコンクリートとの品質比較用の基準配合 No.1 と、FA20 を細骨材置換 100kg/m^3 した配合 No.3, FA20 をセメント置換 40kg/m^3 した配合 No.6 および分級粗粉を細骨材置換 100kg/m^3 した配合 No.7 の 4 配合とした。

4. 吹付け試験 (湿式)

吹付け試験は湿式により、屋外に設けた模擬トンネル(高さ 3.5m 、幅 3.5m 、長さ 7.0m)において実施した。吹付け機械は、ピストンポンプ式のスプリーマ(最大吐出量 $14\text{m}^3/\text{h}$)を使用し、急結剤の添加は、粉体急結剤圧送機 Q ガン(最大吐出量 $3.2\text{kg}/\text{min}$)を使用した。配管条件は、ポンプ出口配管より 3 インチのフレキシブルホースを取り付け、ノズル先端までの搬送延長は約 30m とした。吹付けシステムを図-1 に示す。

吹付け試験は次の要領で実施した。選定した配合の吹付けコンクリートを生コン工場で製造し試験現場まで搬送して、フレッシュ性状を測定するとともに、ベースコンクリートの強度試験用供試体采取了。次に、吹付け機械の吐出量($8\text{m}^3/\text{h}$)と急結剤圧送機の添加量($C \times 6\%$)を調整した。なお、急結剤は、セメント鉱物系の粉体を使用した。

吹付け試験はまず、模擬トンネル内に設置した初期圧縮強度試験(3, 24 時間)用の円盤容器と、強度、耐久性試験供試体作成用のパネル型枠($50 \times 50 \times 20\text{cm}$)に吹付けを行い供試体を作成した。次に、模擬トンネル内にビニールシートを敷設した後、吹付け角度 45° 前後でアーチ部に周方向 2m 程度、トンネル軸方向に 4m 程度の面積に、ノズル先端から 1.5m 程度の距離を保ち 4 分間にわたって人力による吹付けを行い、この間の粉塵量をデジタル粉塵計で測定した。なお、測定時には、模擬トンネルの両出口をシートで覆い、リバウンド材と粉塵のトンネル外への飛散を防いだ。吹付け終了後に、ビニールシートに落下したリバウンド材を回収し、その重量を測定してリバウンド率を算定した。

吹付け試験終了後は、引抜き試験により 3, 24 時間の初期圧縮強度を測定するとともに、パネル型枠から圧縮、曲げ強度試験および耐久性試験用のコア供試体($\phi 10\text{cm} \times 20\text{cm}$)とはり供試

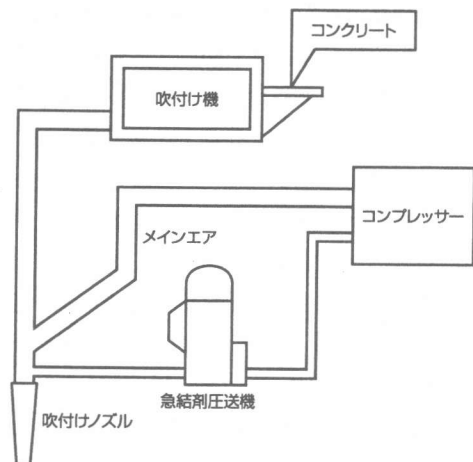


図-1 吹付けシステム (湿式)

体(10 × 10 × 40cm)を切り出して、所定の材齢で強度試験と耐久性試験を行った。

5. 吹付けコンクリートの諸特性

5.1 施工性

吹付け試験で測定した4配合の粉塵量、リバウンド率を図-2に示す。FA20の細骨材置換配合は、基準配合と比べて粉塵量は約70%に低減し、リバウンド率は約60%に低減している。この結果から、FA20の混入により吹付けコンクリートの施工性が良好に改善されることが示された。これは、FA20を吹付けコンクリートに混入することにより、コンクリートの粘性が適度に増加し、この適度に増加した粘性によって得られる粘着力が、コンクリートの付着性を改善するとともに、微粒子の分離、飛散を低減させたものと考えられる。

なお、FA20のセメント置換配合と分級粗粉の細骨材置換配合は、リバウンド率は約75%に低減するが、粉塵量は同程度であり、FA20の細骨材置換配合と比べ施工性の改善度は低くなった。

5.2 強度発現特性

初期圧縮強度は、JSCE-G561の引抜き試験方法に準じて測定した。また、圧縮、曲げ強度は、JIS A1107により、パネル型枠からコア供試体とはり供試体を切り出して、所定の材齢まで20℃、80%RHの養生室で養生を行い測定した。

初期圧縮強度試験結果を図-3に示す。FA20の細骨材置換配合の初期圧縮強度は、基準配合と比べ、3時間強度は2倍以上の強度増加となり、24時間強度は15%程度の強度増加となっている。吹付けコンクリートの初期強度は、一般的に急結剤の添加量と比例することから、当吹付け試験では、各配合の急結剤添加量を一定(C×6%)としたが、上述した良好な初期強度発現は、急結剤によるセメントの水和反応が、FA20の微粉末効果により、さらに促進されたことによるものと考えられる。

図-4に中長期材齢の圧縮強度試験結果を示

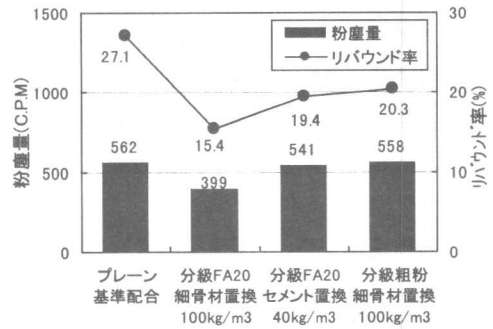


図-2 各種配合と粉塵量およびリバウンド率の関係

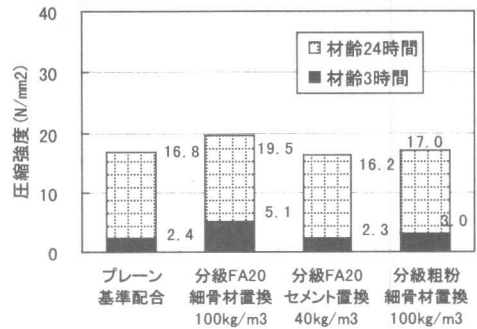


図-3 各種配合の初期圧縮強度試験結果

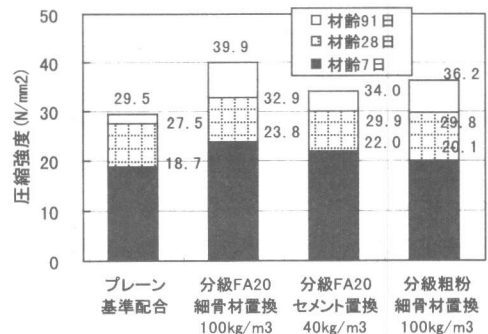


図-4 各種配合の圧縮強度試験結果

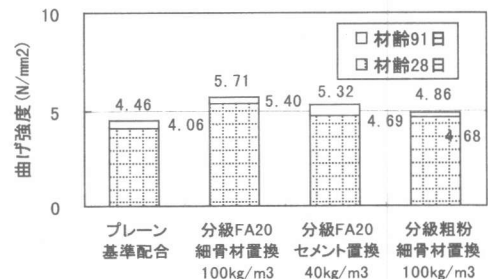


図-5 各種配合の曲げ強度試験結果

す。FA20 の細骨材置換配合の材齢 7, 28, 91 日強度は、基準配合と比べ 27 %, 20 %, 35% 程度の強度増加となっており、良好な強度発現を示している。これは、FA20 の微粉末効果により単位水量が減少するとともに、空隙充填効果とポズラン効果によりコンクリートの硬化体が緻密化し強度発現性が向上したものと考えられる。なお、FA20 のセメント置換配合と分級粗粉の細骨材置換配合の強度発現は、基準配合を上回っているが、FA20 の細骨材置換配合の強度発現には及ばない結果となった。

図-5 に曲げ強度試験結果を示す。各配合の曲げ強度試験結果は、圧縮強度試験結果と同様な傾向を示し、FA20 の細骨材置換配合が優れた強度発現性を示している。

5.3 耐久性

(1) 耐久性試験の概要

耐久性試験は、基準配合と FA20 の細骨材置換配合および分級粗粉の細骨材置換配合の 3 配合について、長さ変化試験、凍結融解試験、透水試験、促進中性化試験を行った。試験用の供試体は、パネル型枠に吹付けてから材齢 1 週間から 2 週間までに切り出して成型を行い、その後、試験まで 20℃水中養生を行った。

長さ変化試験は、はり供試体を切り出した後、ゲージプラグを貼り付け1週間水中養生を行い、JIS A1129 のコンタクトゲージ法により材齢 1 年まで行った。凍結融解試験は、はり供試体を切り出した後、28 日間水中養生を行い開始した。透水試験は、コア供試体を切り出した後、材齢 28 日まで水中養生を行い、両端面を研磨し 20℃, 60% RH の恒温恒湿室に 7 日間設置し乾燥させてインプット法により拡散係数を求めた。促進中性化試験は、はり供試体を切り出した後、4 週間水中養生を行い 20℃, 60% RH の恒温恒湿室で乾燥させて、日本建築学会・高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針(案)の「コンクリートの促進中性化試験方法(案)」(60%RH, 炭酸ガス 5%)により中性化深さを測定した。

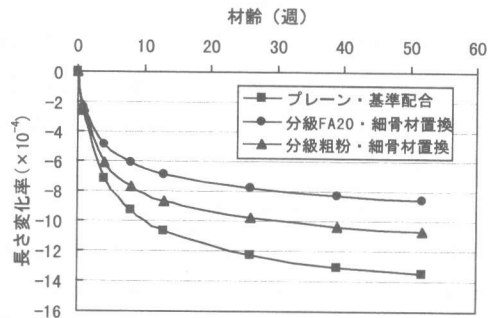


図-6 長さ変化試験結果

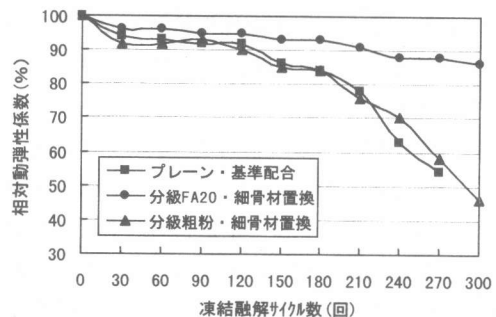


図-7 凍結融解試験結果

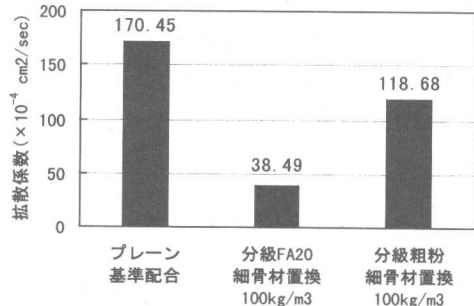


図-8 透水試験結果

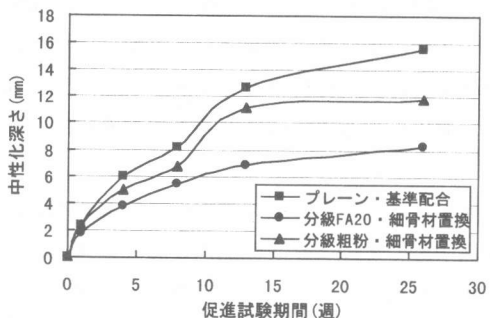


図-9 促進中性化試験結果

(2) 耐久性試験結果

耐久性試験結果を図-6~9に示す。FA20の細骨材置換配合の耐久性を基準配合と比べると大幅に改善されている。各試験結果からみると、材齢1年の長さ変化率は65%程度に低下しており、乾燥収縮性が大幅に改善されている。凍結融解試験では、300サイクルでの相対動弾性係数は85%程度あり、高い耐凍害性を有している。透水試験で測定した拡散係数は、20%程度に低下しており、緻密なコンクリートとなっている。また、促進中性化試験の26週での中性化深さは、50%程度に低下しており、中性化速度が大きく改善されている。

以上の試験結果より、FA20を細骨材置換として100kg/m³程度混入すると、高い耐久性を有する吹付けコンクリートが得られることが明らかになった。これは、通常のコンクリート同様、FA20の空隙充填効果やポゾラン効果等によりコンクリートの硬化体が緻密化されることによるものと考えられる。

なお、分級粗粉の細骨材置換配合の耐久性は、基準配合より改善されたものとなるが、FA20の細骨材置換配合の耐久性には及ばない結果となった。

6. まとめ

本研究では、吹付けコンクリートの混和材として、分級フライアッシュのFA20をセメント、細骨材置換した配合とFA20を分級した残りの分級粗粉を細骨材置換した配合について、模擬トンネルによる吹付け試験および強度、耐久性試験を行い、吹付けコンクリートの施工性、強度、耐久性の改善について基本検討を行った。

これらの試験結果より、分級フライアッシュのFA20を混和材として細骨材置換で100kg/m³混入することにより、非混入の場合と比べ、施工性(低粉塵、低リバウンド化)の改善と、強度、耐久性の向上が図られ、高品質の吹付けコンクリートを得られることが明らかとなった。本研究の範囲で得られた分級フライアッシュ

FA20の混入による吹付けコンクリートの品質改善効果について、以下に示す。

- (1)分級フライアッシュのFA20を細骨材置換で100kg/m³混入すると、FA20の微粉末効果等により、非混入の場合と比べ、単位水量が5%程度減少(スランプ範囲12cm±2cm)するとともに、適度な粘性が発揮されることを確認した。
- (2)模擬トンネルによる吹付け試験では、粉塵量は約70%に低減し、リバウンド率は約60%に低減する結果となり、FA20の混入による粘性増加により、良好な施工性の改善が図れることを明らかにした。
- (3)吹付け試験時に作成した供試体により強度試験、耐久性試験を行い、初期・中長期の圧縮強度が増加するとともに耐久性(長さ変化、耐凍害性、水密性、中性化)が向上することを明らかにした。

参考文献

- 1)日本フライアッシュ協会編：石炭灰、日本フライアッシュ協会、pp.2-3、1999.4
- 2)金津 努、伊藤金通、高橋守男：フライアッシュ JIS 改正の取り組みと品質の現状、電力土木、No.274,pp50-55、1998.3
- 3)浮田和明、石井光裕、重松和男、野尻陽一：分級フライアッシュを混入したコンクリートの基礎物性、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.10,No.2,pp.1-6、1988.6
- 4)石井光裕、浮田和明、高田 誠、梅沢健一：分級フライアッシュを使用した高性能混和材に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.10,No.2,pp.7-12、1988.6
- 5)福手 努、寺野宣成、石井光裕、國府勝郎：転圧コンクリート舗装の性能向上に及ぼす分級フライアッシュの効果、土木学会論文集、Vol.29,No.526,pp85-95、1995.11
- 6)(財)土木研究センター：土木系材料技術・技術審査証明報告書、コンクリート用混和材「ファイナッシュ」、1994.3