論文　湿式動圧ろ過装置によるフライアッシュ改質分級とその評価に関する研究

高田　龍一[*1]・中村　博[*2]・神門　誠[*2]・周藤　将司[*3]

要旨：フライアッシュのコンクリートへの混和材としての活用は，過去多くの試みが検討されてきたがコンクリートの物性に及ぼすバラツキや経済性の課題によって十分に普及しているとはいいがたい現状にある。この度，湿式動圧ろ過装置を用いて経済的かつ効率的な化学的，物理的に安定したフライアッシュの改質方法を提案する。これにより，流動性およびポゾラン活性において原粉に比較して優れた性状のフライアッシュコンクリートの提供が可能であることが明らかとなった。

キーワード：動圧ろ過装置，フライアッシュ，粉末度，活性度指数，フロー値比，ポゾラン活性

1. はじめに

フライアッシュを混合したコンクリートは，ポゾラン反応に起因した長期強度の増進，耐久性の向上，セメントの使用量を抑えることによる乾燥収縮の低減，水和熱の減少，またフライアッシュセメントのB種C種においてはASRの抑制効果が確認されている。その他，C-S-Hの増加に伴う水密性の向上，化学抵抗性の向上などの効果も明らかにされている。さらに固有の効果としてフライアッシュが球状態であることからボールベアリング効果によりワーカビリテイーの向上，ひいては単位水量の低減を可能にする。

こうした効果にもかかわらず，現在フライアッシュの総排出量に対して生コンへのコンクリート混和材としての利用は1%にも満たない状況にある。その原因として，燃料石炭の産炭地，燃焼ボイラなどに起因して発生するフライアッシュの品質のバラツキが原因となってコンクリート配合を困難にしていることがあげられる。さらにそれに伴うワーカビリテイーのコントロールの不安定さなどフレッシュ性状に及ぼす影響や比表面積のバラツキによる強度発現の不安定さ，型枠脱型強度に影響を及ぼす初期強度発現などの課題があげられる。

これまで，こうした課題に対して多くの配合の工夫，フライアッシュの品質の安定化など多くの研究検討がなされてきたが，経済性の観点やフライアッシュコンクリートの品質の安定性などの課題を抱える中で十分な解決を見ることなく現在に至っている。

本研究では，湿式動圧ろ過装置を用いて改質分級を行うことにより化学的・物理的性質が安定化した微粒分を分級する，経済的かつ効率的な改質フライアッシュの製造方法を開発したのでその概要を報告し，さらにこの改質フライアッシュを用いて評価検討を行ったので報告する。

2. フライアッシュの改質方法と改質フライアッシュの性状

これまでのフライアッシュの改質方法を大別すると，乾式法と湿式法に分けることができる。乾式法では，加熱改質により未燃カーボンや窒素，硫黄分などの不純物を除去し強熱減量を下げる方法[1)]や，北陸電力管内のボイラシステムで，灰中未燃分低減対策の2段分級器MRSミルを組合わせた最新低未燃分燃焼システム導入し，微粉炭ボイラからのフライアッシュを強制渦遠心分級方式により乾式分級して比表面積を高める方法[2)]が検討されている。湿式法では，浮遊選鉱によりフライアッシュの中の未燃カーボンを除去し，強熱減量値を低下させるとともにスラリー化を実現する方法[3) 4)]や未燃炭素を主体とするフライアッシュの細孔構造がAE剤，減水剤を吸着する性質を改質する方法として，界面活性剤による未燃カーボンの不活性化を図る方法[5)]などがあげられる。

未燃カーボンによる減水剤やAE剤の吸着は従来から懸念されてきたところであるが，一方でフライアッシュのpHに着目した報告があげられており，低pHのフライアッシュは界面活性剤の機能を大きく損ないフライアッシュコンクリートの流動性を阻害していることが考えられる[6) 7)]。

本報告の改質手法はpH値のコントロールに着目し，湿式法を用いることによりpH値の課題を解決し，併せて動圧ろ過分級により，ポゾラン活性とワーカビリテイーに有効なフライアッシュの微粒子を選別し比表面積の増加とフライアッシュの品質の安定化を図るものである。

*1 松江工業高等専門学校　名誉教授　農学博士　(正会員)
*2 （株）フジイ・ケミカルズ
*3 松江工業高等専門学校　環境・建設工学科　講師　博士（農学）　(正会員)

図－1 に動圧式ろ過装置を用いたフライアッシュの改質手法の模式図を示す。図に示すように，湿式処理となっており，中和装置による pH 調整と，マグネットストレーナによるマグネタイトの除去さらに分級機による動圧ろ過の 3 つの工程からなっている。

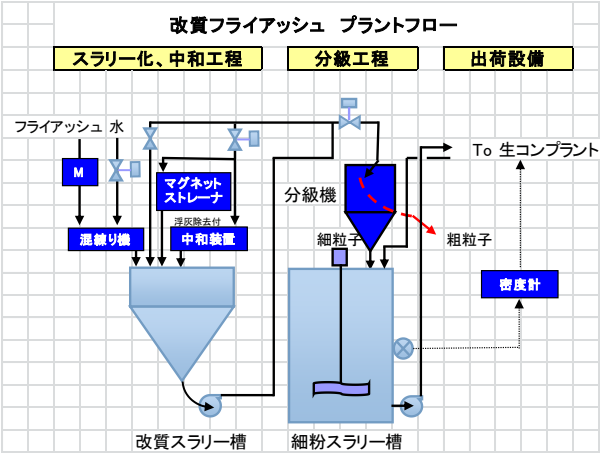
過去の研究から明らかにされているように低 pH 値のフライアッシュは界面活性剤の機能を低減させる。そこで，コンクリート用混和剤の陰イオン系界面活性剤の解離状態の存在率を高めるために中和処理を行う。この工程によって，フライアッシュの性質に関わらず pH 値を 7～8 と一定とすることができる。また，フライアッシュ中のマグネタイトは黒色微粉でありそれ自体がコンクリートの化学的，物理的性状に及ぼす影響は少ないと考えられるが，除去することで，意匠性の観点では従来から言われていた黒みがかったコンクリートの色合いを大きく改善することができる。さらに，超微細ウェッジワイヤースクリーン分級処理によるフライアッシュの動圧ろ過分級は，ポゾラン反応に有益なシリカ，アルミナ系の微細な球形微粒子を取り出すとともに，比較的大粒径の未燃カーボンを取り除くことが期待され，これにより強熱減量の低下と比表面積の増加が期待される。

フライアッシュの光学顕微鏡観察写真によると，**写真－1** に示すように大粒径の未燃カーボンと球形微粒子の混在が見られるが，分級後は**写真－2** に示すような球形微粒子が大半となる性状を示している。

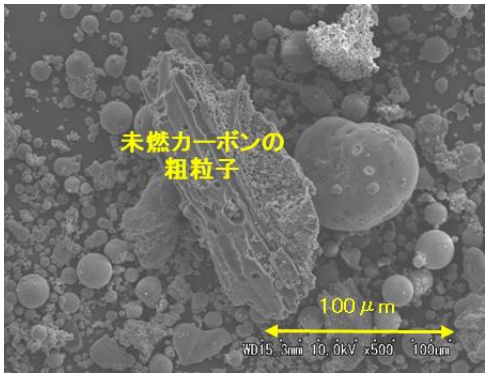
表－1 にスクリーンのスリット幅 75μm と 50μm とした場合のフライアッシュの分級後の物性値を原粉と比較して示している。ここで分級に供した原粉は，三隅火力発電所から排出された JIS Ⅱ種相当灰を使用した。表からも明らかなようにスリット幅を狭くすることで微粒分の回収率は低下するが，粗粒な不純物が取り除かれることにより密度が高くなり，比表面積が増加することが明らかになった。また，未燃カーボンに由来する強熱減量も低下することが明らかとなった。

表－2 にそれぞれのスリット幅で回収されたフライアッシュのフロー値比と活性度指数を原粉の結果と比較して示している。表から明らかなように，原粉と比較してフロー値比，活性度指数ともに向上することが明らかとなった。

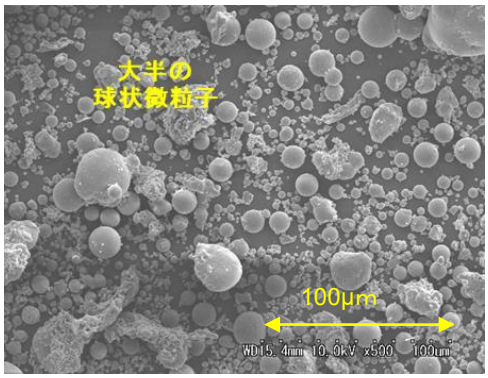
既往の乾式分級においてもブレーン値の向上によりフロー値比，活性度指数の向上が示されており [2] フライアッシュを分級することによる流動性，活性度に及ぼす効果が明らかとされているが，本改質方法からも同様の所見を得ることができた。本改質方法では動圧ろ過装置を用いて湿式分級を行うことにより，過去に指摘されている低 pH に伴う混和剤の機能の低下 [6] [7] を防止することと同時に，炭種，燃焼方法に関わらず多様な品質規格のフライアッシュに適応できることに併せて，そこから一定規格のフライアッシュを取り出すことが期待でき，本改質方法の有意性を見出すことができる。



図－1　フライアッシュの改質プラント



写真－1　分級前のフライアッシュ



写真－2　分級後のフライアッシュ

3. コンクリート試験による評価の結果と考察

モルタル試験により一定の有効性は認められるところであるが，混和剤の影響を確認するために 50μm アンダーの改質フライアッシュを用いてコンクリート試験を行った。併せて，50μm オーバーのフライアッシュついても外割り利用の可能性を確認するための試験を行い，

表－1　改質フライアッシュの物性

	細粉回収率（%）	密度（g/cm^3）	比表面積（ブレーン方法）（cm2/g）	強熱減量（%）
フライアッシュ原粉	—	2.14	3150	2.40
スリット幅 75μm 分級後	≒80	2.19	3830	2.17
スリット幅 50μm 分級後	≒70	2.22	4230	1.91

表－2　改質フライアッシュのフロー値比と活性度指数

	モルタルフロー		圧縮強度（N/mm^2）		活性度指数（%）	
	フロー値	フロー値比（%）	材齢 28 日	材齢 91 日	材齢 28 日	材齢 91 日
基準モルタル	213	—	61.6	69.5	—	—
フライアッシュ原粉	212	100	51.7	66.9	84	96
スリット幅 75μm 分級後	221	104	52.2	67.3	85	97
スリット幅 50μm 分級後	223	105	53.4	68.2	87	98

表－3　フライアッシュコンクリートの配合

配合の種類	W/C* (%)	s/a (%)	単位量（kg）								
			C	W	S1	S2	S3	G	AD1	AD2	FA
1-Control	55.0	46.3	298	164	290	124	413	972	2.68	0.89	0
2-内割 20%置換	55.0	46.3	238	164	288	124	405	962	2.68	2.24	60
3-内割 20%置換	55.0	46.3	238	164	288	124	405	962	2.68	4.02	60
4-内割 20%置換（原粉）	55.0	46.3	238	164	288	124	405	962	2.68	6.71	60
5-外割 12kg 置換	55.0	46.3	298	164	285	124	405	972	2.68	0.89	12
6-外割 12kg 置換	55.0	46.3	298	164	285	124	405	972	2.68	1.56	12

*配合 2～4 では W/B

表－4　コンクリート使用材料

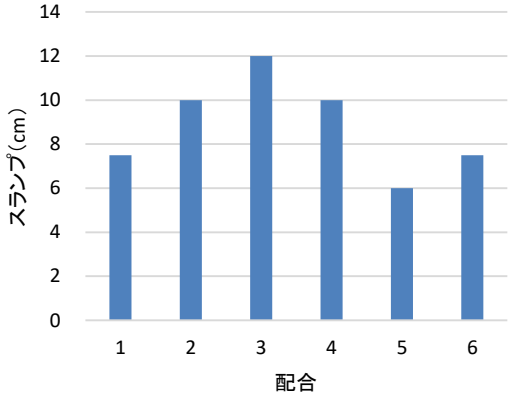
記号	材料の詳細
C	普通ポルトランドセメント，密度 3.16g/cm^3，比表面積 3320cm^2/g
W	上水
S1	細骨材（砕砂），密度 2.57g/cm^3，F.M.3.05-3.35，最大寸法 5mm
S2	細骨材（陸砂），密度 2.58g/cm^3，F.M.1.40-1.80，最大寸法 0.6mm
S3	細骨材（山砂），密度 2.55g/cm^3，F.M.2.50-2.90，最大寸法 5mm
G	粗骨材（安山岩），密度 2.60g/cm^3，F.M.6.40-6.80，最大寸法 20mm
AD1	AE 減水剤 標準型 I 種
AD2	AE 剤　I 種

それぞれ原粉と比較することにより検討を行った。ここで，50μm オーバーのフライアッシュは原粉の性状によっても異なるが，本試験では原粉の 30%程度に相当する量が 50μm のスリットを通過しない。スリットを通過しなかった 50μm オーバーのフライアッシュのフロー値比は 86%，活性度指数（材齢 28 日）は 66%と**表－2** に示す原粉の値よりも小さくなり，明らかに 50μm アンダーとの差別化が図られることとなった。しかし，pH 値の調整とマグネタイトの除去は施されており，有用な混和材となり得る可能性を有していると考える。

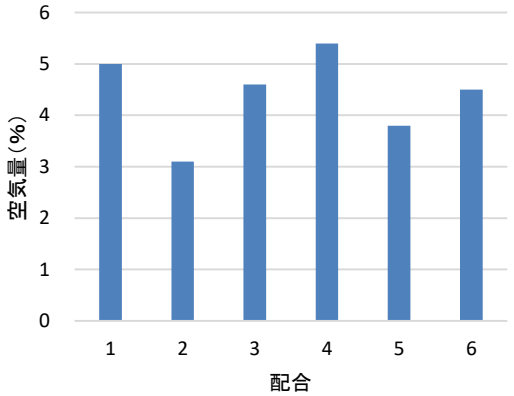
実験に使用したコンクリートの配合を**表－3** に示す。また，使用したコンクリート材料を**表－4** に示す。配合

表－5　フライアッシュコンクリートの試験結果

配合の種類	スランプ (cm)	空気量 (%)	CT (℃)	圧縮強度 (N/mm²)			圧縮強度の伸び		
				σ7	σ28	σ91	σ28/σ7	σ91/σ28	σ91/σ7
1-Control	7.5	5.0	16	22.3	31.5	37.0	1.41	1.17	1.66
2-内割 20%置換	10.0	3.1	15	15.5	27.6	36.6	1.78	1.33	2.36
3-内割 20%置換	12.0	4.6	15	14.5	24.4	33.9	1.68	1.39	2.34
4-内割 20%置換（原粉）	10.0	5.4	15	12.7	22.1	29.7	1.74	1.34	2.34
5-外割 12kg 置換	6.0	3.8	16	24.3	34.2	41.6	1.41	1.22	1.71
6-外割 12kg 置換	7.5	4.5	16	23.3	33.7	40.5	1.45	1.20	1.74

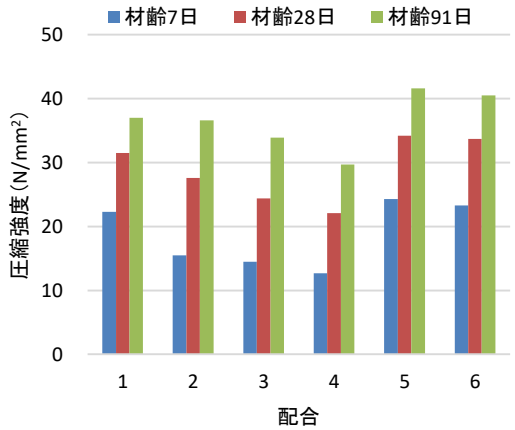


図－2　スランプ試験結果



図－3　空気量試験結果

はコントロール，改質フライアッシュ，原粉の内割り 20%，外割り 12kg，の 4 種類とし，減水剤については一定とし，所定の空気量を得るよう AE 剤をコントロールを基本に調整した配合とした。したがって，改質フライアッシュの内割りと外割り 12kg については AE 剤の量をそれぞれ 2 水準とし，合計 6 水準の配合について実施した。なお，ここでの外割り 12kg については，分級後の 50μm アンダーの回収率から，すべてのフライアッシュを使用することを目的に決定した分量としている。配合-1 をコントロールとし，配合-2，3 は 50μm アンダーをセメントの 20%内割り置換とし，原粉と対比するために



図－4　強度試験結果

配合-4 は，配合-2，3 と同様に原粉を 20%セメントの内割り置換の配合とした。配合-5，6 は 50μm オーバーの粉体を骨材置換とした。評価項目として，フレッシュ性状におけるスランプおよび空気量を測定し，強度発現については材齢 7 日，28 日，91 日の圧縮強度を測定し，初期強度発現の傾向，強度の伸びからポゾラン活性の発現傾向を確認した。なお，混練りに際してフライアッシュはペースト状のフライアッシュを使用したため，あらかじめ炉乾燥機を使用してペースト中のフライアッシュ濃度を求めて配合設計に反映させることとした。

表－5 に試験の結果の一覧を示し，空気量，スランプ，圧縮強度，圧縮強度の伸びを**図－2，3，4** に示している。

まず，内割り配合については，AE 剤の調整によりコントロールに比較し大きくフレッシュ性状が改善されることが明らかとなった。配合-2 の供試体では AE 剤も少なく空気量が少ないにもかかわらず，コントロールに比較し大きくスランプが改善している。配合-5 の供試体では AE 剤の添加量を増し目標空気量に合わせると，スランプはコントロールに比較し 4.5 ㎝も向上していることがわかる。配合-2，3 ともに空気量の許容値を満足しており，大きく流動性が増すことが明らかである。このことから，改質フライアッシュは単位水量の減少に大きく

寄与することが明らかであり，フレッシュ性状における優位性を意味するものと考えられる。強度についてみると，AE 剤の少ない配合-2 の供試体では，コントロールに比較して初期では劣るものの 91 日強度においては同程度の強度を示しており明らかに高いポゾラン活性が認められた。配合-3 の供試体についてはいずれの材齢においてもコントロールと比較して幾分劣るものの，コントロールに比較して配合-2 の供試体と同様に高い強度の伸びを示しており，高いポゾラン活性を示している。

次に，配合-4 の原紛との対比を行うと，原粉は AE 剤の使用量を多くすることにより，改質フライアッシュと同程度のフレッシュ性状は確保できるものの，強度発現においては配合-2，3 に劣ることが明らかとなった。空気量が幾分多いことを割り引いても強度値，強度の伸びが改質フライアッシュに比較して劣っており，このことから改質フライアッシュの分級効果が明らかであり，微粒分を分級することによる活性度の高さを裏付けるものと考えられる。以上の評価結果より，動圧ろ過装置を用いたフライアッシュの湿式分級による効果が明らかであり，改質フライアッシュの有効性が明らかとなった。

次に，外割り置換についてみると，コントロールに比較してスランプ，空気量はやや減少するが AE 剤のわずかな調整で所定のフレッシュ性状を得ることができることが明らかとなった。これは，粉体の割合が多くなり水粉体比が下がることによりペーストの粘性が増し空気連行が難しくなったことによると考えられる。しかしながら，コントロールと同量の AE 剤でスランプ空気量ともに許容値内に収まることも明らかになった。強度についてはいずれの材齢においてもコントロールを上回っており，ポゾラン活性，微粉末効果が認められる。特に，材齢を追うごとに強度の増進が明確に表れており，微粉末効果に併せてポゾラン活性が顕著に表れている。これにより，50μm オーバーの粉体についても有効に活用できることが明らかとなり，分級とは言えすべてのフライアッシュを活用することの可能性が明らかとなった。

重要な視点として，改質効果の有効性は改質フライアッシュがどのような原粉に対しても安定したフレッシュ性状と強度発現に対して安定した効果を示すことであり，異なるロットの原紛の下での再現性が求められるところである。今後，試験の継続と評価確認することにより，動圧ろ過装置を用いた改質によるフライアッシュのコンクリートに及ぼすばらつきを解消することができものと考えられる。

4. おわりに

試験評価の結果より，動圧ろ過装置によるフライアッシュの改質手法の有効性と妥当性を確認することができた。

フライアッシュの物性値から明らかなように，原粉と比較して粉末度の向上と強熱減量の減少が明らかとなり，フライアッシュの性状が大きく改善されることが明らかとなった。モルタル試験の結果より，スクリーンメッシュを小さくするほど原粉と比較しフロー値比，活性度指数ともに改善するが回収率との妥当性を検討する必要があると考えられる。コンクリート試験の結果より，フレッシュ性状においては原粉と比較して明らかな改善効果を見ることができた。また，強度発現についても原粉に比較して改善の効果が明らかとなった。さらに，50μm オーバーの粉体についても，流動性は劣るものの強度発現においてはコントロール以上の強度増加が期待でき，有効に活用できることが明らかとなった。

今後，各種の原粉の分級試験を行うことにより，結果の再現性，安定性を確認することにより本改質方法の妥当性を検証していくとともに，フライアッシュコンクリートの配合検討を行うこととする。

参考文献

1) 伊藤七恵，佐藤嘉昭，上田賢司，大谷俊浩：高品質フライアッシュを用いたコンクリートの調合設計に関する研究, コンクリート工学年次論文集 Vol.33, No.1，pp.167-172，2011
2) 橋本徹，参納千夏男，江田明孝，鳥居和之：北陸産分級フライアッシュを用いたコンクリートの配合と強度, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.133-138，2013
3) 松藤泰典，磯部敏幸，小山智幸，重富光人：石炭灰をコンクリートに大量使用するための安定化処理に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.2，pp.115-120，2000
4) 高巣幸二，陶山裕樹，小山田英弘：浮遊選鉱法によるによるフライアッシュ中の未燃炭素除去およびそのフライアッシュスラリーを使用したコンクリートの特性に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，Vol.79，No.697，pp.331-340，2014
5) 特開平 08-337449 号
6) 田野崎隆雄，野崎賢二，白坂優，曽根徳明：コンクリート混和用石炭灰の品質について，コンクリート工学年次論文集，Vol.18，No.1，pp.333-338，1996
7) 江藤弘之，赤塚剛，山本晃：フライアッシュの品質変動がコンクリートに及ぼす影響について，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp.111-116，2002