

改質したフライアッシュがジオポリマーモルタルの性能に及ぼす影響

松江工業高等専門学校 ○伊藤 大悟
 松江工業高等専門学校 正会員 周藤 将司
 松江工業高等専門学校 正会員 高田 龍一
 フジイ・ケミカルズ 神門 誠

1. はじめに

フライアッシュ (以下, FA) は, JIS A 6201 で規格化されており, コンクリート用混和材として用いると長期強度の増進が促されることや流動性が向上することなどが知られている. しかし, FA は石炭の産炭地や, 燃焼方法によって, 同じ JIS 規格品であっても品質のばらつきが発生する可能性がある. これに伴い, フレッシュ性状や強度発現性が安定しないことが課題として挙げられる. そこで, FA の品質の安定化を目的として, 高田らは, 中和処理と分級方法に着目した新たな改質方法である, 湿式動圧ろ過装置¹⁾を開発した. 既往の研究では, この湿式動圧ろ過装置により改質した FA を混和材としてセメントモルタル, セメントコンクリートに用いた場合, 流動性や強度発現性が向上する結果が得られている. これは, 改質した FA は分級によって比表面積が大きくなっていることなどが影響していると考えられている^{1), 2)}.

ここで, FA を多量に使用する固化体としてジオポリマー (以下, GP) がある. FA の品質は, GP の性状に影響を与えることが明らかにされており³⁾, 湿式動圧ろ過装置で改質した FA も GP の流動性や強度発現性に良好な影響を与えることが期待される. そこで本研究では, FA 原粉と改質した FA をそれぞれ用いて, GP モルタルにおける FA の改質効果についての検討を行った. また, 改質した際に副産物として生じる 50 μ よりも粒径の大きい FA についても同様に試験し, 利用の可能性についての検討もあわせて行った.

2. 研究概要

2.1 使用する FA の特性

本研究で使用した FA の原粉は, JIS II 種相当品 (以下, OFA : Original Fly Ash) である. 改質した FA とは, 中和処理とマグネタイトの除去を施した後に動圧によって幅 50 μ m のスリットを通過したもののことであり, ここでは MFAU (Modification Fly Ash Under) と呼ぶ. また, 中和処理とマグネタイトの除去後に幅 50 μ m スリットを通過しなかったものを副産物として扱い, ここでは MFAO (Modification Fly Ash Over) と呼ぶ. MFAU と MFAO は, 試料を乾燥させ, 乾粉の状態で行った. 3 種の FA の蛍光 X 線分析結果を表 1, 物性試験結果を表 2 に示す. 表 1 より, 3 種の FA は, 改質の過程を経ても SiO₂ や Al₂O₃ などの化学成分の比率は, ほとんど変化が生じていないことが分かる. また, 表 2 より, 密度やブレン値などの物性は, 改質することで向上していることが分かる.

表 1 FA の蛍光 X 線分析

項目	OFA	MFAU	MFAO
SiO ₂	58.8	58.31	61.18
TiO ₂	1.60	1.67	1.48
Al ₂ O ₃	29.66	29.92	29.43
Fe ₂ O ₃	3.87	3.59	2.51
MnO	0.02	0.02	0.02
MgO	0.56	0.60	0.48
CaO	1.73	1.71	1.46
Na ₂ O	-0.12	-0.08	-0.15
K ₂ O	0.65	0.77	0.60
P ₂ O ₅	0.39	0.48	0.27

表 2 FA の物性

	OFA	MFAU	MFAO
密度 (g/cm ³)	2.15	2.32	2.04
ブレン値 (cm ² /g)	2910	4380	1800
強熱減量 (%)	3.4	3.0	4.0
平均粒径 (μ m)	28.13	9.967	49.42

キーワード ジオポリマー, フライアッシュ, フロー値, 圧縮強度, XRD 分析

連絡先 〒690-8518 島根県松江市西生馬町 14-4 松江工業高等専門学校 TEL 0852-36-5111

表3 GPモルタルの配合表

BFS 置換率 (%)	OFA (g)	MFAU (g)	MFAO (g)	BFS (g)	WG (g)	NaOH (g)	W (g)	S (g)
0	516			0	233	52	64	1223
10	464			70				
0		516		0				
10		464		64				
0			516	0				
10			464	65				

2.2 試験方法

表3にGPモルタルの配合表、表4にGPペーストの配合表を示す。活性フィラーにFAを単独で用いる配合と、FAに高炉スラグ微粉末(BFS:密度2.98g/cm³, 粉末度4000cm²/g, 石こう添加無し)を10%置換した配合で試験を行った。アルカリ溶液には水ガラス(WG:JIS1号), 10mol/Lの水酸化ナトリウム(NaOH), 上水道水(W)の混合液を用い, 細骨材には絶乾状態の加工砂(S:密度2.49g/cm³)を用いた。練混ぜは, 卓上モルタルミキサー(最大練混ぜ容量:15L)にて行なった。

測定項目は, フロー値, 圧縮強度, X線回折(XRD; X-ray diffraction)である。フロー値(0打)は, GPモルタルの練上がり直後にJIS R 5201の試験方法に準拠して測定した。圧縮強度は, φ50×100mmの円柱供試体を用いて行なった。養生方法は気中養生と蒸気養生

とし, 材齢7, 28, 91, 182日で測定した。気中養生では, 材料実験室内で温湿度の管理は行わずに所定材齢まで養生を行った。蒸気養生では, 打設後すぐに恒温恒湿器内で95%R.H.の下で1時間かけて温度60°Cまで上昇させ, 24時間保持し, その後は材料実験室内で所定の材齢まで気中養生を行った。なお, 養生期間中は脱型せずに, 型枠へのGP充填直後から試験直前まで封緘状態を保った。XRDは, 材齢28日のGPペーストを用いて行なった。GPペーストの養生方法は, 強度試験の時と同様である。XRDの測定結果から, 2θ=26°付近に現れるAl₂O₃のピーク強度の変化を読み取り, 反応の進行度合いを評価した。なお, 各測定値を比較するために, 内部標準試料としてMgOを体積で10%置換した試料を測定に用いた。

3. 結果及び考察

3.1 流動性

図1にフロー試験の結果を示す。フロー値は, BFS置換率0% (以下, BFS 0%), 10% (以下, BFS 10%)とともに, MFAUモルタル>OFAモルタル>MFAOモルタルの順に大きな値を示した。MFAUは, 分級によって未燃カーボンを含む粗大な粒子が減少し, その分, 微細な球形粒子が増加しており, ボールベアリング効果がより発揮されたためと考えられる。また, マグネタイトを除去したことによる効果も発揮されていると考える。マグネタイトは, 凝集効果を有しており, 流動性を低下させる要因となっているためである。一方で, MFAOは, MFAUと同様にマグネタイトの除去は施されているものの, 良質の球形粒子が分級により少なくなったことが大きく影響したため, フロー値が低下したと考えられる。これらの結果は, セメントモルタルで得られて

表4 GPペーストの配合表 (BFS 10%)

OFA (g)	MFAU (g)	MFAO (g)	BFS (g)	WG (g)	NaOH (g)	W (g)
913			137	456	102	125
	913		128			
		913	145			

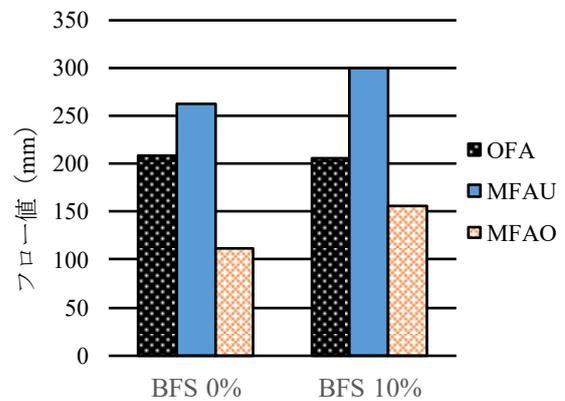
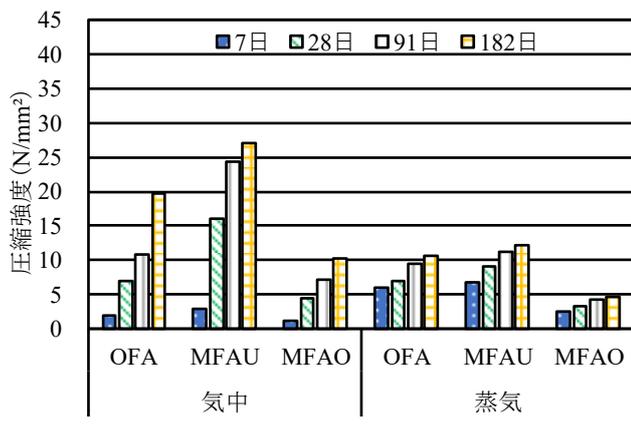


図1 フロー試験結果



長

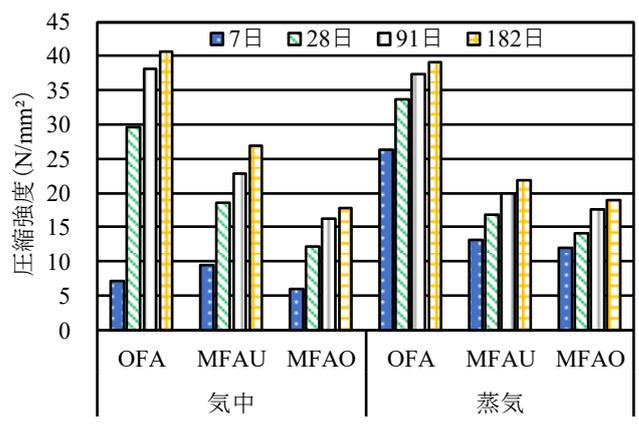


図3 BFS 10%圧縮強度試験結果

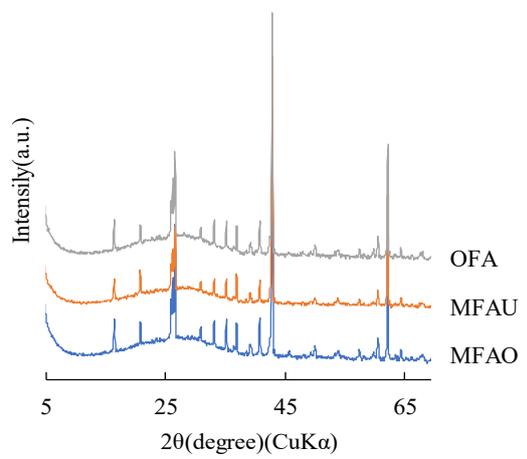


図4 XRD 分析 (気中養生)

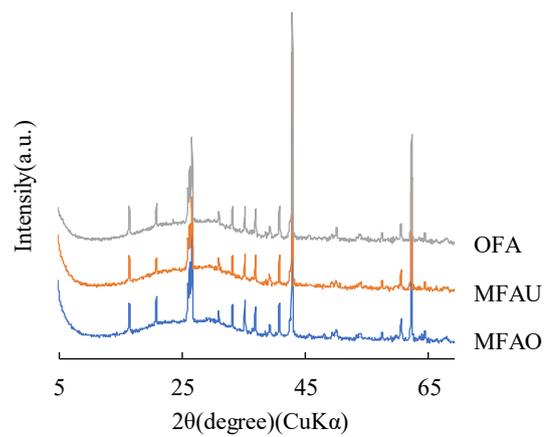


図5 XRD 分析 (蒸気養生)

いる既往の知見²⁾と同様の傾向であり、GPモルタルにおいても改質効果が得られることが確認された。

3.2 強度発現特性

図2にBFS 0%の圧縮強度試験結果を示す。強度発現性は、MFAUモルタル>OFAモルタル>MFAOモルタルの順に有利であることが確認された。この結果も、既往のセメントモルタルによる知見²⁾と一致している。表2の物性試験結果より、強度発現性もこの順になることが予想され、GPモルタルにおいてFAの品質の良否が強度発現性に直接的に関係していることが明らかになった。

表5 XRD分析によるCPS強度 (2θ=26°)

	気中	蒸気
OFA	54.1	52.8
MFAU	48.7	42.7
MFAO	55.7	63.1

図3にBFS 10%の圧縮強度試験結果を示す。BFSの置換により、全体的に強度レベルが高くなることが確認された。しかし、MFAUモルタルの圧縮強度においては、気中養生では材齢28日以降、蒸気養生では全材齢で、OFAモルタルを下回り、図2のBFS 0%の結果とは異なる傾向が確認された。ここで、図4、図5にBFS 10%のXRDの結果を示す。また、表5にX線入射角度26度付近のピーク値を示す。この値はAl₂O₃のCPS (Count Per Second) 強度である。GP反応において、Al₂O₃は反応の進行によって消費される。そのため、Al₂O₃のCPS強度が低下すると強度は高くなると考えられる。CPS強度はMFAUペースト>OFAペースト>MFAOペーストの順に高いことが確認された。

BFS 10%の配合において、XRDの結果を鑑みると、圧縮強度はMFAUモルタルの方がOFAモルタルよりも高強度を示すことが予想される。しかし、実際の圧縮強度試験結果は逆の結果を示した。この要因については、現時点で不明であるため今後の検討事項としたい。

4. まとめ

本研究で得られた結果を以下にまとめる。

- (1) MFAU モルタルのフロー値は、OFA モルタルと比べボールベアリング効果がより発揮されたため流動性が高い結果となり、FA の改質効果が確認された。一方で、MFAO モルタルのフロー値は、OFA モルタルと比べて劣る結果となり有効な結果は得られなかった。
- (2) BFS 0%の圧縮強度試験において、MFAO モルタルは OFA モルタルに比べ圧縮強度が低くなった。一方で、MFAU モルタルは OFA モルタルに比べ高強度であった。これらの結果より、湿式動圧ろ過による FA の改質は、FA の物性を向上させ、強度発現性にも有利に寄与することが明らかになった。
- (3) BFS 10%の圧縮強度試験も BFS 0%と同様に、MFAO モルタルは OFA モルタルと比べ圧縮強度が低くなった。一方で、MFAU モルタルについては気中養生では材齢 28 日以降、蒸気養生では全材齢で、圧縮強度が OFA モルタルを下回った。しかし、XRD 分析結果からは MFAU ペーストの $2\theta=26^\circ$ における CPS 強度は OFA ペーストに比べ低くなっており、GP 反応が進行していることが確認された。

これらの結果より、改質された FA である MFAU は、GP に対しても良質な FA であることが確認された。一方で、改質した際に副産物として生じた MFAO については、フロー値、圧縮強度ともに不利になる結果を示しており、現時点では GP への利用は難しいと考える。

参考文献

- 1) 高田龍一，中村博，神門誠，周藤将司：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.41，No.1，pp.173-178，2019
- 2) 宍道亮太，周藤将司，高田龍一，神門誠：湿式動圧ろ過による改質 FA の性能評価に関する研究，農業農村工学会中国四国支部講演会講演要旨集，pp.26-27，2019
- 3) 合田寛基，原田耕司，津郷俊二，日比野誠：フライアッシュII種を用いたジオポリマーの材料特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp.1993-1998，2015