フライアッシュの品質と加熱養生条件がジオポリマーモルタルの強度に与える影響

九州大学 学生会員 ○太田 周 九州大学大学院 正会員 佐川 康貴
西松建設（株） 正会員 原田 耕司 大阪ガス（株） 正会員 西﨑 丈能

１．はじめに

ジオポリマー（以下，GP）は，アルカリシリカ粉末（以下，活性フィラー）とアルカリシリカ溶液（以下，GP 溶液）の反応によって形成される非晶質の縮重合体（ポリマー）の総称である。GP は，製造時に大量の CO_2 を排出するセメントを一切用いないため，CO_2 削減ならびに産業副産物の有効利用の点から，次世代の建設材料として期待されている。本研究ではフライアッシュの品質の違いおよび加熱養生条件が GP モルタルの強度特性に及ぼす影響について検討を行った。

２．実験概要

2.1 使用材料および配合

実験で用いた材料を**表－1** に示す。フライアッシュには強熱減量が高い FA-L，JIS A 6201 のフライアッシュ II 種とⅣ種に相当する FA-2 および FA-4 を使用した。FA-L は，FA-2 に比べ強熱減量が高く，未燃カーボンが多く含まれているが，活性度指数と比表面積に大きな差はない。FA-4 は比表面積が小さく，3 つの FA の中で最も強熱減量が低い。また，GP の強度発現向上のために高炉スラグ微粉末 4000（BFS）を使用した。ジオポリマー溶液（GPW）は，水ガラスと苛性ソーダを混合し，密度を 1.27g/cm^3 に調整したものである。細骨材の海砂（S）は，表乾状態で使用した。

GP モルタルの配合を**表－2** に示す。単位細骨材量をすべての配合で同一とし，体積比で BFS/(FA+BFS)の割合を 12%とした。また，フロー値が 190 程度となるよう，GPW の量を調整した。

表－1 使用材料

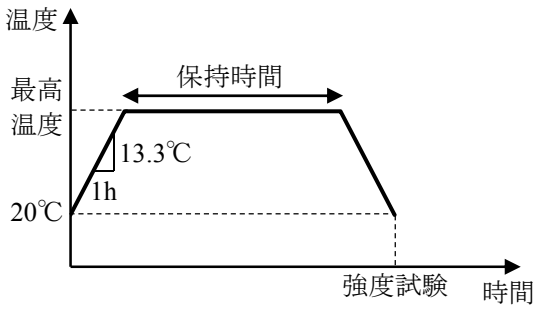
材料	記号	種類および物理的性質
活性フィラー	FA-L	フライアッシュ 密度:2.27g/cm^3，強熱減量:9.1% 活性度指数(材齢 28 日):83 比表面積:4,860cm^2/g
	FA-2	フライアッシュ(JIS II 種) 密度:2.32g/cm^3，強熱減量:3.7% 活性度指数(材齢 28 日):83 比表面積:4,310cm^2/g
	FA-4	フライアッシュ(JISⅣ種) 密度:2.19g/cm^3，強熱減量:2.4% 活性度指数(材齢 28 日):79 比表面積:2,540cm^2/g
	BFS	高炉スラグ微粉末 4000 密度:2.92g/cm^3 比表面積:4,090cm^2/g
GP 溶液	GPW	水ガラスと苛性ソーダと水の混合物，密度:1.27g/cm^3
細骨材	S	海砂，密度:2.59g/cm^3

表－2 GP モルタルの配合（kg/m^3）

FA の種類	GPW	FA	BFS	S
FA-L	342	360	65	1,412
FA-2	317	421	72	1,412
FA-4	310	404	74	1,412

2.2 練混ぜ方法および供試体

ホバート型ミキサ（容量：5 リットル）を用い，細骨材，FA，BFS を入れて空練り 30 秒間した後，GP 溶液を入れて一次練混ぜ 1 分間，掻き落し 15 秒間，二次練混ぜ 2 分間の順で練り混ぜた。その後，JIS R 5201「セメントの物理試験方法」に従い，フロー値を求めた結果，FA-L で 186，FA-2 で 201，FA-4 で 198 であった。供試体はモルタル用三連型枠（40×40×160mm）に打設した。



図－1 養生条件

2.3 養生条件

フライアッシュベースの GP では，強度発現を促進させるために加熱が必要である。本研究では，プログラム式恒温装置を用い，**図－1** に示すように，20℃から最高

キーワード：ジオポリマー，フライアッシュ，活性度指数，比表面積，強熱減量，加熱養生
連絡先：〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744 九州大学大学院 工学府 建設システム工学専攻 TEL: 092-802-3387

温度まで一定の温度勾配（13.3℃/h）で上昇させ，最高温度を保持した後，上昇の時と同じ勾配で 20℃まで温度を下げた。養生条件は最高温度（60℃，80℃，100℃）および最高温度での保持時間（6 時間，12 時間，24 時間）の組み合わせで，合計 9 通りで行った。

2.4 強度試験

上記の養生が終了後ただちに脱型し，JIS R 5201 に準拠して曲げ強度および圧縮強度試験を行った。

３．実験結果および考察

3.1 フライアッシュの品質が強度に与える影響

加熱養生直後の圧縮強度を**表－3** に示す。なお，上段に FA-L，中段に FA-2，下段に FA-4 の圧縮強度を示している。全体的な傾向として，最高温度が高く，保持時間が長いほど，圧縮強度が高くなった。

次に，圧縮強度比を**図－2** に示す。横軸が FA-2，縦軸が FA-L と FA-4 の圧縮強度を示している。FA-L は FA-2 と活性度指数が同じであるにもかかわらず，65%程度の強度発現にとどまった。GP の固化メカニズムは一般のコンクリートと異なり，FA の活性度指数で強度を推定することは困難であると推察される。また，FA-L が FA-2 よりも強度が大幅に小さかったのは，FA-L の強熱減量が非常に高いことに起因していると考えられる。一方，FA-4 は比表面積が小さいものの，強熱減量が小さいため，FA-2 に対し 90%程度の高い強度が発現したと考えられる。本研究の範囲では，GP モルタルの強度に与える FA の品質として，活性度指数および比表面積よりも，強熱減量の方が大きく寄与するという結果が得られた。

3.2 加熱養生条件が強度に与える影響

最高温度保持時間と圧縮強度の関係を**図－3** に示す。縦軸はそれぞれの最高温度に対して，保持時間 6 時間の圧縮強度を 1 とした時の強度比を示している。すなわち，最高温度一定の条件で養生を 6 時間から延長することによる，強度の増進割合を示したものである。図より，最高温度が低い方が，保持時間の延長により圧縮強度が増大することが分かる。さらに，この傾向は FA-L の方が FA-2 よりも顕著に表れている。最高温度が 100℃の場合は保持時間を長くしても 1.0～1.1 倍の増加率に留まった。

４．まとめ

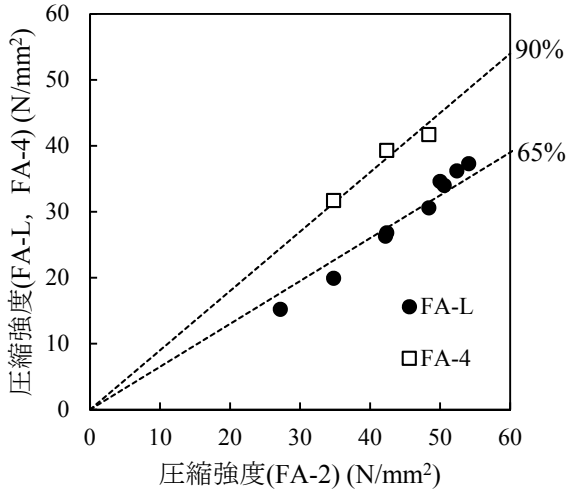
(1) 強熱減量が高い FA-L でも GP モルタルとして固化可能であり，養生条件によっては十分 GP へ適用できることが確認された。

(2) GP モルタルの強度に与える FA の品質としては，活性度指数および比表面積よりも，強熱減量の方が大きく寄与するという結果が得られた。

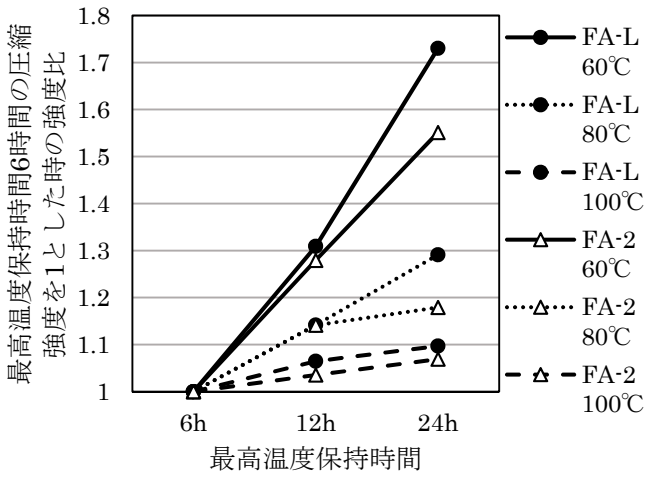
(3) GP モルタルの加熱養生において，最高温度が低い方が，保持時間を長くすることによる強度増進効果が大きいことが明らかとなった。

表－3 GP モルタルの加熱養生直後圧縮強度（N/mm²）
（上段：FA-L，中段：FA-2，下段：FA-4）

		最高温度		
		60℃	80℃	100℃
保持時間	6h	15.2	26.8	34.0
		27.2	42.4	50.6
			39.3	
	12h	19.9	30.6	36.2
		34.8	48.4	52.4
		31.7	41.7	
	24h	26.3	34.6	37.3
		42.2	50.0	54.1



図－2 FA-2 に対する FA-L，FA-4 の圧縮強度比



図－3 最高温度保持時間と圧縮強度比の関係