

## フライアッシュベースのジオポリマーの高温下における強度特性

九州大学大学院 学生会員 ○上野 貴行, 正会員 佐川 康貴  
 大分工業高等専門学校 正会員 一宮 一夫, 西松建設(株) 正会員 原田 耕司

### 1. はじめに

セメントコンクリートは 500°Cに達すると強度が急激に低下する<sup>1)</sup>。そのため、トンネル等では表面被覆等の耐火工が必要とされているが、メンテナンス上の障害となることから、構造体自体の高温抵抗性を向上させる技術が望まれている。

一方、ジオポリマー（以下、GP という）は、強度低下の主因であるカルシウムを必要としない固化体であることから、耐火性が重要な箇所への適用が期待できるが、GP の高温下における物性に関する知見は十分ではない。そこで、本研究では活性フィラーにフライアッシュ（以下、FA という）と高炉スラグ微粉末（以下、BS という）、アルカリ溶液に Na 系または K 系を使用した GP モルタル（一部、ペースト）を、最高温度 1150°Cで加熱し、普通ポルトランドセメント（以下、OPC という）を使用した場合との比較から GP の高温下での強度特性について検討した。

### 2. 実験概要

表 1 に使用材料、表 2 と表 3 に GP モルタルならびに OPC モルタルの配合を示す。GP では活性フィラーのベースは FA で強度を得るために BS を 0, 10, 20, 30%内割り置換した。養生は蒸気養生として、充填直後から 90%R.H.の下で 3 時間かけて 60°Cまで上昇させ、その後 3 時間保持し、再び 3 時間かけて温度 20°Cまで下げ、その後は室温（20°C, 60%R.H.）で材齢 7 日まで貯蔵した。加熱は電気マッフル炉で行った。最高加熱温度は 500°C, 800°C, 1150°Cの 3 水準とし、供試体冷却後の圧縮強度を測定した。また、ペーストに対して電子顕微鏡（以下、SEM という）を用いた GP 細部の構造観察と示差熱分析装置を用いた熱分析を行った。示差熱分析では

1200°Cまで毎分 10°Cの勾配で温度を上昇させる条件で温度ごとの試料の熱量変化（以下、DTA とする）と質量減少（以下、TGA とする）を測定した。

表 1 使用材料

分類	項目	材料
GP モルタル	活性 フィラー	フライアッシュ I 種, 密度 2.36g/cm <sup>3</sup> 比表面積 5327cm <sup>2</sup> /g
		高炉スラグ <sup>*</sup> 微粉末, 密度 2.92 g/cm <sup>3</sup> , 比表面積 4009cm <sup>2</sup> /g
	アルカリ 溶液	ケイ酸ナトリウムと水酸化ナトリウムと水の混合物, 密度 1.27g/cm <sup>3</sup>
		ケイ酸カリウムと水酸化カリウムと水の混合物, 密度 1.32g/cm <sup>3</sup>
細骨材	標準砂, 密度 2.64 g/cm <sup>3</sup>	
OPC モルタル	セメント	普通ポルトランドセメント, 密度 3.15 g/cm <sup>3</sup>
	水	水道水
	細骨材	標準砂, 密度 2.64 g/cm <sup>3</sup>

表 2 GP モルタルの配合 (kg/m<sup>3</sup>)

記号	BS 置換率 (%)	GPW	FA	BS	S
F100B0	0	244	534	0	1535
F90B10	10	244	480	66	1535
F80B20	20	244	427	132	1535
F70B30	30	244	374	198	1535

表 3 OPC モルタルの配合 (kg/m<sup>3</sup>)

記号	W	OPC	S
OPC	256	512	1535

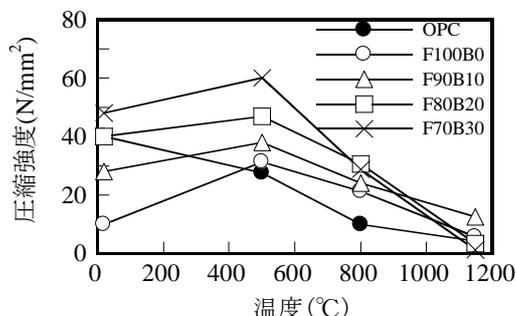


図 1 圧縮強度の変化 (Na 系)

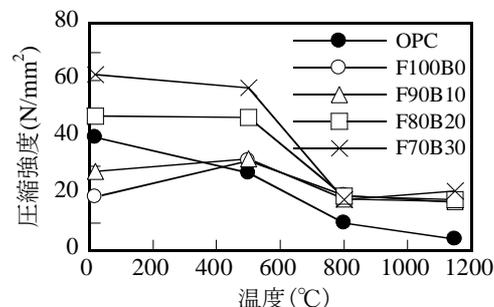


図 2 圧縮強度の変化 (K 系)

キーワード：ジオポリマー, フライアッシュ, 高炉スラグ微粉末, 高温抵抗性, アルカリ溶液

連絡先：〒870-0152 大分市牧 1666 番地 大分高専 都市・環境工学科 TEL097-552-7664

3. 実験結果

図1, 図2にNa系, K系それぞれの加熱後の圧縮強度の変化を示す。OPCは温度上昇に伴い強度が低下するのに対して, GPは500℃において強度が上昇している。800℃からは強度は低下に転じるがOPCよりも強度が高くGPの優位性が伺える。1150℃においてはK系では800℃とほぼ同程度の強度が保持できており,

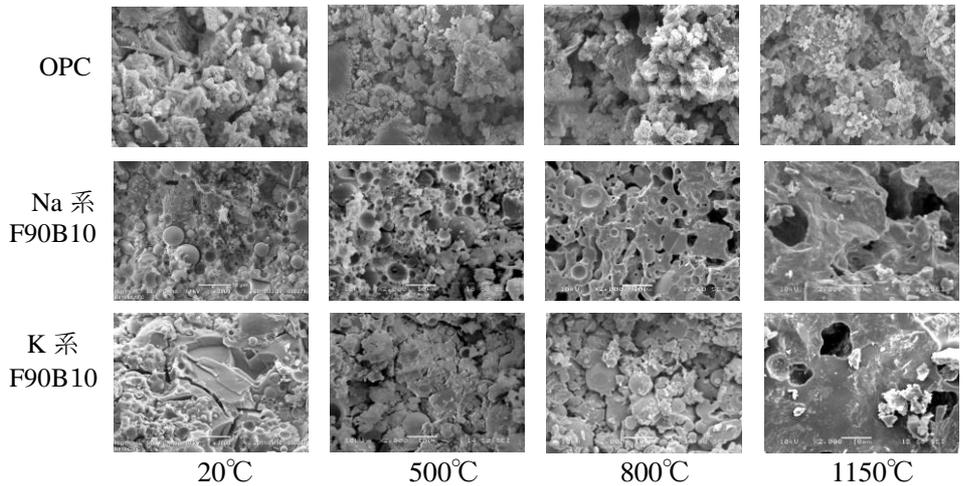


図3 SEM画像(×2000) — 10μ

アルカリ溶液の系の違いからはK系の方が優位な結果となった。

以上は供試体冷却後の強度であり, 高温環境下での耐力を評価したのではない。そこで, モルタルと同じ配合のペースト固化体を製作し, SEMによる細部の構造観察と示差熱分析装置を用いた熱分析を行った。図3に各温度におけるSEM画像を示す。Na系, K系ともに500℃まで変化が見られないが800℃で焼結が発生している様子が見られ, 焼結の程度はNa系の方が顕著である。このことからK系のGPの方が高温抵抗性が高いことが確認できる。1150℃においてはNa系, K系ともに溶解しており, 内部には大きな空隙を生じている。

図4に示差熱分析の結果を示す。(a)図のOPCの場合は, 100℃周辺, 450℃程度, 700℃周辺から900℃程度における3点に吸熱側へのピークが確認できる。これらのピークはそれぞれ遊離水および結晶水の蒸発, 水酸化カルシウムの脱水反応, 炭酸カルシウムの脱炭酸反応を示したピークであり, 一般的に知られるOPCの高温下での示差熱変化と一致する。一方, (b), (c)図のGPの場合は, 500℃以下では100℃付近での遊離水および結晶水の蒸発以外大きな変化は見受けられない。600℃を越えたあたりから吸熱側にDTA曲線が下がり始めるが, TGAの変化はほとんどなく, 従って重量変化を伴わない熔融等の反応が起きていると考えられる。すなわち, GPの熔融ガラス化が始まったものと思われNa系では900℃付近, K系では1000℃付近まで続いている。以上のSEM観察と示差熱分析の結果から, GPは700℃付近から熔融状態にあり, それ以上の高温環境下における強度は図1, 2で示したのものよりも小さい可能性がある。

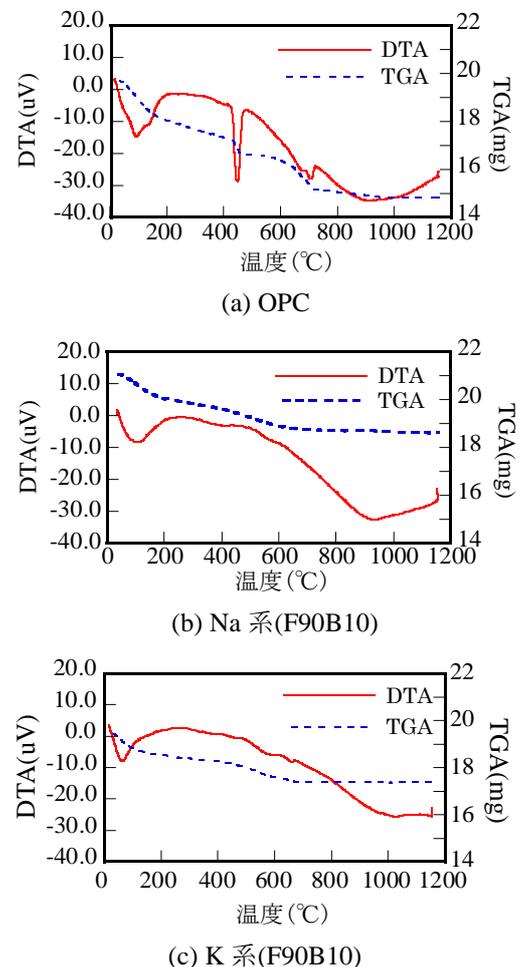


図4 示差熱分析結果

4. まとめ

- (1) GPでは500℃での強度低下はなく, 常温での強度と同等またはそれ以上の強度を担保できる。
- (2) SEMによる細部の構造観察と示差熱分析の結果から, 800℃ではGPは熔融状態にあり, 冷却後に測定される強度は期待できないが, 熔融前の600~700℃以下では20N/mm<sup>2</sup>以上の強度を担保できる可能性がある。

参考文献 1) 日本コンクリート工学会, コンクリートの高温特性とコンクリート構造物の耐火性能に関する研究委員会報告書, 2012