

高炉セメントの水和発熱速度に及ぼす高炉スラグの化学組成の影響

前橋工科大学 学生会員 ○下条瑞貴
フェロー会員 佐川孝広

1. 研究の背景と目的

近年、CO₂の排出量削減の観点から高炉セメントの使用が推進されている。高炉セメントに用いる高炉スラグ(BFS)の塩基度は(CaO+MgO+Al₂O₃)/SiO₂の値によって算定され、JISの規格では塩基度1.6以上のものが用いられている。しかしながら、BFSの化学組成の相違により自己収縮特性が異なる点や同一JIS塩基度であっても活性度指数が異なる点などが指摘されている。既往の研究では、化学組成の異なる6種類のBFSを用いて、圧縮強度、凍結融解抵抗性、自己収縮、水和反応の評価を行いBFSの化学組成とこれら硬化体特性との関係についての検討が行われている。本研究では、これらに加えて同一のBFSを用いて水和発熱速度の測定を行い、BFSの化学組成の影響について検討するとともに、既往の研究で得られた圧縮強度や水和反応解析結果と比較することで、硬化体特性との関係について考察を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料

本研究では、JIS A 6206 で示される塩基度(CaO+MgO+Al₂O₃)/SiO₂(CMA/S)が1.73~2.03の広範な化学組成を持つ粉末度4300cm²/g程度の6種のBFS(A~F)を用いた。BFSの化学組成を表1に示す。高炉セメントの作製には普通ポルトランドセメント(OPC)を用いた。高炉セメントのスラグ置換率は、45%の高炉セメントB種(BB)相当とし、BBの材料構成はSO₃で2%の無水石こう(CS)をBFSに内割置換した配合とした。

表1 高炉スラグ微粉末の化学組成(%)

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	CMA/S
A	33.16	15.23	0.45	42.09	7.12	0.82	1.94
B	32.66	15.50	0.79	42.56	6.61	0.75	1.98
C	35.55	13.31	1.33	43.13	5.07	0.58	1.73
D	33.58	14.63	0.59	43.74	5.53	0.50	1.90
E	34.53	15.17	0.39	41.65	6.36	0.60	1.83
F	32.26	14.84	0.73	43.67	6.98	0.45	2.03

2.2 水和発熱速度の測定

表1のBFSを用いて、高炉セメントの水和発熱速度を等温熱量計にて測定した。恒温槽にて20°Cで保管した高炉セメント5gと蒸留水を20mlの測定容器に入れ、ボルテックスミキサにて2分間の練混ぜを行った。測定容器を等温熱量計に設置後測定を開始し、材齢7日までの発熱速度を測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 発熱速度

図1にBFS(A~F)を用いたBBの水和発熱速度を示す。材齢24h付近のBBの発熱速度は、BFSの種類により大きく異なった。6種類の試験体の配合は同一でありBFSの粉末度も同程度であることから、発熱速度の差異はBFSの化学組成のみに起因すると判断される。

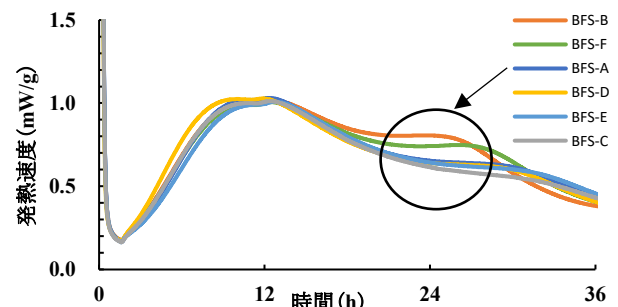


図1 発熱速度

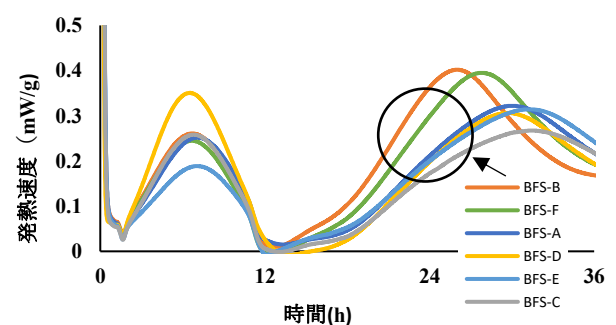


図2 BFS水和由来の発熱速度

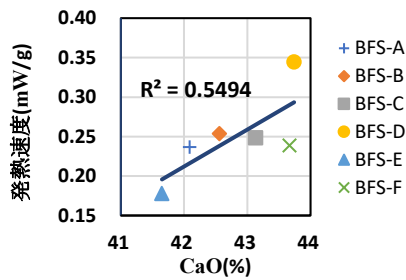


図3 CaOと材齢6hの発熱速度の関係

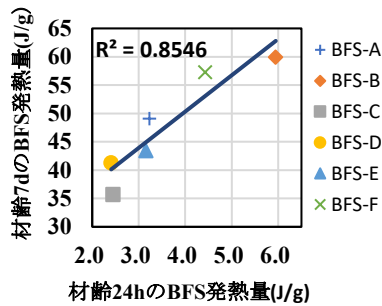


図4 材齢24hと7dのBFS発熱量の関係

ここでBFS水和由来の発熱速度を観測するために、OPC単独の積算発熱量にBB中のOPCの含有率を乗じたものをBBの実測値から差し引いて発熱速度を算出した。図2にBFS水和由来の発熱速度を示す。図1とは異なり、材齢6h程度に発熱速度のピークが確認された。これは、BFSの水和由来の発熱ではなく、BFSの微粉末効果によりOPC中のエアライトの水和反応が促進されたためと考えられる。また、材齢6hのBFS由来の発熱速度とBFSのCaOの量には相関が確認された。図3に材齢6hの発熱速度とCaO量の関係を示す。このことから、BFSのCaO量が多いほど微粉末効果が大きくなると考えられる。また、材齢24h付近にも第二のピークが認められた。これはBFS水和由来の発熱と考えられ、これについては積算発熱量にて評価することとした。

3.2 積算発熱量

BFSの発熱特性は、図2の結果から第一ピークの発熱量を減じた積算発熱量にて評価し、これをBFS発熱量と称することとする。図4にBFS発熱量の材齢24hと7dとの関係を示す。第二のピークが大きく材齢24hのBFS発熱量が多いほど、材齢7dのBFS発熱量も多くなる傾向が見られた。表2には、BFS

表2 BFSの化学組成とBFS発熱量の寄与率

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	CMA/S	MA/S
寄与率(R ²)	0.81	0.53	0.0009	0.64	0.80	0.79

表3 各種データとBBの積算発熱量の寄与率

	AFm(7d)	HT(7d)	自己収縮(7d)	強度(7d)
寄与率(R ²)	0.83	0.64	0.82	0.68

の化学組成と材齢7dのBFS発熱量との回帰分析を行い、その寄与率(R²)を算出した結果を示す。SiO₂(逆相関)、Al₂O₃、MgOとの相関が高く、一方でCaOとの相関がないことが確認された。したがって、Al₂O₃、MgOの割合が高く、SiO₂の割合が低いBFSほどBFS発熱量は多くなると考えられる。また、塩基度CMA/Sとの相関が高いことが確認されたが、その中のCaOとの相関がないことから、CaOを除いた寄与率を算出した。MA/Sの寄与率はCMA/Sと同程度となった。このことから、BFSの水和活性は、発熱量の観点から言えば、塩基度CMA/Sで概ね評価できると考えられる。表4には、既往の研究結果¹⁾を用いて、材齢7dのBBの積算発熱量と各種データとの寄与率を算出した結果を示す。材齢7日のBBの積算発熱量と同一材齢での水和生成物量や圧縮強度、自己収縮量とに高い相関が認められた。

4. まとめ

- (1) BFSに含まれるCaO量が多いほど、微粉末効果が大きくなる。
- (2) 塩基度が高いBFSほど発熱量が多くなる。
- (3) 材齢7日のBBの積算発熱量と水和生成物量や圧縮強度、自己収縮量とに高い相関がある。

参考文献

- 1) 佐川孝広, 山本真奈海: 高炉スラグの化学組成が高炉セメントの硬化体特性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.43, No.1, pp.107-112, 2021
- 2) 岩波光保, 伊藤始, 皆川浩, 佐川孝広: コンクリート工学, 理工図書, p.33, 2021