

化学成分が異なる GGBFS の置換率に着目した 高炉セメントの反応メカニズムの一考察

芝浦工業大学大学院

芝浦工業大学 工学部 先進国際課程 兼任 土木工学科

○宮崎幹太

伊代田岳史

1. はじめに

製鉄の産業副産物である高炉水砕スラグを粉砕した高炉スラグ微粉末（以下：GGBFS）はコンクリート用の混和材として広く用いられている。一方で産業副産物であるため製造時に化学成分を調整することが困難である。そのため JIS では GGBFS の反応性を推定する値として、塩基度($\text{CaO}+\text{MgO}+\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$) が採用されている。筆者ら¹⁾は、塩基度が異なる GGBFS を用いた高炉セメント硬化体の自己収縮において、高炉セメント B 種においては、塩基度が高い GGBFS を用いた高炉セメントほど自己収縮が大きくなるが、高炉セメント C 種においては、塩基度の違いに関わらず同程度の自己収縮量を示すことを確認した。高炉セメントは OPC と比較して自己収縮が大きくなることから、高炉セメントの自己収縮は GGBFS の反応性に依存していると考えられることから高炉セメントの置換率により GGBFS の反応が異なることが考えられる。

本研究では、塩基度が異なる GGBFS を用いた、各種高炉セメント硬化体の反応性について検討を行った。

2. 試験概要

2. 1 使用材料および試験体概要

表-1 に本研究で用いたセメントペーストの配合を、表-2 に今回用いた結合材の化学組成を示す。GGBFS は BFSL（塩基度 1.75）と BFSH（塩基度 1.83）を用いた。セメント中の SO_3 量は 2% とし GGBFS に対して無水石膏を内割で添加した。高炉セメントの記号は「セメント種類(BB、BC)GGBFS 種類(L,H)」と表記する。また、試料はいずれも封緘養生 7 日として、アセトンにより水和停止後 40℃乾燥炉にて乾燥させた後に 150 μm のふるいを全通するよう粉砕したものを試料として用いた。

2. 2 選択溶解法

高炉セメント中の GGBFS の反応率をサリチル酸アセトンメタノール溶液による選択溶解法により算出した。

2. 3 XRD

高炉セメント中の OPC の反応性の確認のため、OPC の主要鉱物であるエーライト (C_3S) の定量を実施した。標準物質である $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ を 10% 内割りで置換した試料を用いて内部標準法により、試料中に残存している C_3S の定量を行った。

2. 4 TG-DTA

OPC の水和生成物である水酸化カルシウム (CH) の定量を実施した。

3. 実験結果および考察

3. 1 GGBFS の反応率

高炉セメント中の GGBFS の反応率を図-1 に示す。GGBFS の反応率は高炉セメント A 種>B 種>C 種となり OPC が多いほど高くなった。また、高炉セメント A 種および B 種においては塩基度が高い GGBFS が高い反応率を示した。一方で、高炉セメント C 種においては塩基度に関わらず反応率は同程度となった。

3. 2 XRD

高炉セメント中の残存 C_3S および OPC 試料中の $\text{C}_3\text{S}/\text{Al}_2\text{O}_3$ と高炉セメント中の OPC 割合の積から算出し

表-1 計画配合

	GGBFS 置換率	W(g)	OPC(g)	GGBFS(g)	CaSO ₄ (g)
OPC	0%	225	450		
BA	30%	225	315	130.4	4.6
BB	50%	225	225	217.4	7.65
BC	70%	225	135	304.3	10.7

表-2 結合材の化学組成

	化学組成 (mass %)											塩基度	ブレン 比表面積
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	ig-loss		
OPC	21.28	5.09	3.15	65.36	1.01	0.32	0.41	0.25	0.14	0.1	0.84		
BFSL	35.22	14.21	0.69	41.95	5.48	0.16	0.26	0.74	0.04	0.24	0.05	1.75	4330
BFSH	34.52	14.65	0.36	43.25	5.13	0.15	0.21	0.6	0.01	0.14	0.18	1.83	4280

た仮想残存 C_3S 量を図-2 に比較した。高炉セメント中の C_3S 量は仮想 C_3S 量と比較小さい値を示している。 C_3S 量が小さいということは、水和が進み C_3S が消費されていることを表す。このことから高炉セメント中の OPC の反応が活性していることが示唆される。また、各配合において塩基度が高いほど残存 C_3S 量が少なくなっていることから、塩基度が高い GGBFS と共存する OPC ほど反応性が活性化していることが示唆される。

3. 3 TG-DTA

高炉セメント中の CH 量および、高炉セメントの OPC 置換率の積から算出した仮想 CH 量を図-3 に示す。高炉セメント中の OPC 量が多いほど、CH 量は大きくなっている。また、高炉セメント A 種においては高炉セメント中の CH 量が仮想 CH 量を上回っている。一方、高炉セメント C 種においては高炉セメント中の CH 量が仮想 CH 量を下回る結果となった。高炉セメント中の OPC は水和が活性化し、OPC 単体で水和するときより多く CH を生成する。一方で GGBFS は反応において CH を消費する。この関係が OPC 割合の高い高炉セメント A 種において、活性化による増加 CH 量 > 消費 CH 量となり、高炉セメント中の CH 量は仮想 CH 量を上回る。一方で高炉セメント C 種においては、活性化による増加 CH 量 < 消費 CH 量となり、高炉セメント中の CH 量は仮想 CH 量を下回る。

4. 高炉セメントの反応メカニズムの一考察

図-4 に前章の結果による高炉セメントの反応メカニズムの一考察を示す。高炉セメントは接水後水和物の生成を開始する。高炉セメント A 種 B 種のような OPC 割合が比較的に高い場合は、OPC から十分な CH が供給されることにより GGBFS の反応性が活性化し、GGBFS が十分に反応できることにより、塩基度による反応性の差が生じる。一方高炉セメント C 種では、OPC の割合が比較的に低いため供給される OPC から共有される CH 量が少ないが、反応の際 CH を消費する GGBFS は多いため CH 不足の状態になる。その結果、GGBFS は十分に反応することができず塩基度による反応性の差が生じないと考えられる。

謝辞

本研究は日本スラグセメント・コンクリート研究会および鉄鋼スラグ協会の助成をいただいて実験を行いました。ここに感謝の意を記します。

【参考文献】

- 1) 宮崎幹太、伊代田岳史：化学組成が異なる高炉スラグ微粉末が各種高炉セメント硬化体に及ぼす影響、第 48 回関東支部技術研究発表会

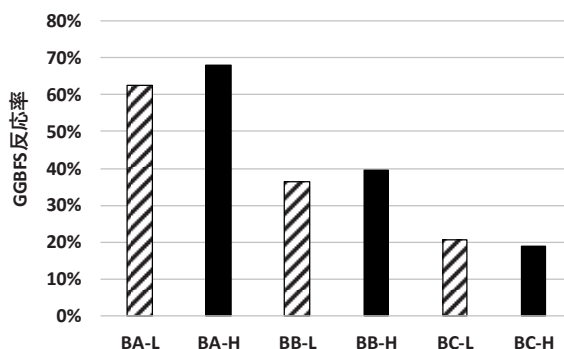


図-1 高炉セメント中の GGBFS の反応率

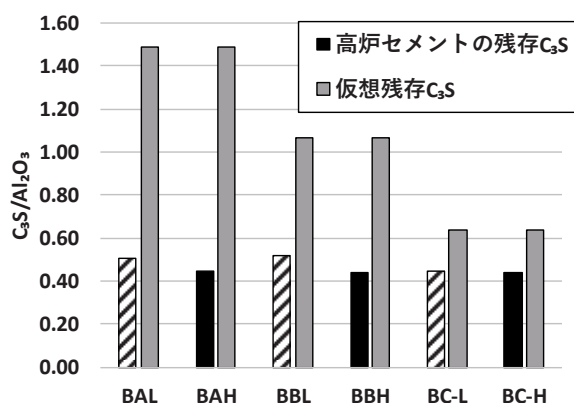


図-2 高炉セメント中の残存 C_3S

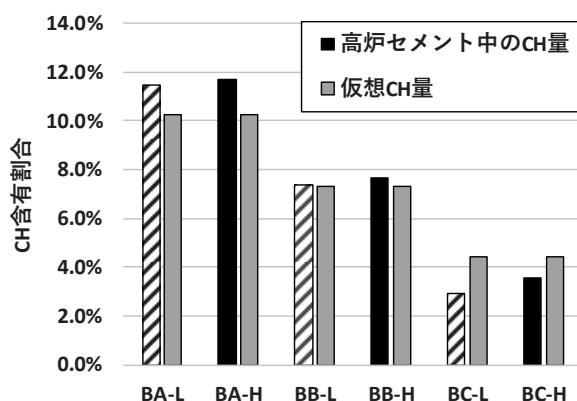


図-3 高炉セメント中の CH 含有割合

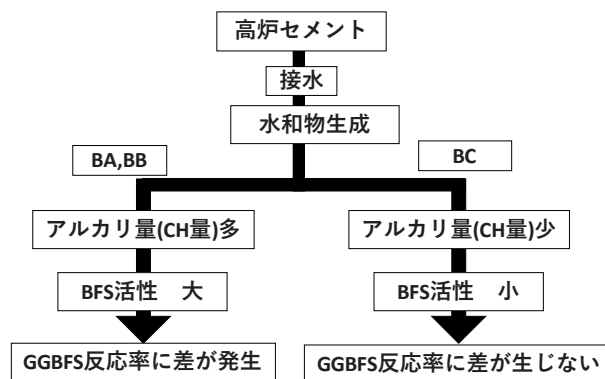


図-4 高炉セメントの反応メカニズムの一考察