

低塩基度高炉スラグ微粉末の高炉セメントへの適用

前橋工科大学 学生会員 ○間島迅哉
正会員 佐川孝広

1. 研究の背景と目的

高炉セメントは、鉄鋼を製造する過程で副産される高炉水砕スラグを粉砕した高炉スラグ微粉末(BFS)を、普通ポルトランドセメント(OPC)に所定量混合して製造されたセメントであり、近年建設業界において産業副産物の有効利用、CO₂排出量削減の観点から利用拡大が望まれている¹⁾。高炉セメントに用いる BFS の反応性は、塩基度 $(CaO+MgO+Al_2O_3)/SiO_2$ の値によって算定され、JIS規格では塩基度が 1.6 以上のものが用いられる¹⁾。

現在、高炉セメントに用いられる BFS は一般的に塩基度 1.8 程度であるが、今後の動向によっては塩基度が 1.6 以下の JIS 規格を満たさない BFS(低塩基度 BFS)の使用が求められる可能性がある。また低塩基度 BFS を使用した高炉セメントの強度以外の知見は現在ではまだ少ない。

このことから、本研究では低塩基度 BFS を用いた高炉セメントを作製し、ブレン、石こう量、石灰石微粉末の有無を変量として、圧縮強度や凍結融解抵抗性などの耐久性を評価することで低塩基度 BFS の高炉セメントとしての利活用の方策を検討する。

2. 実験概要

2.1 使用材料と配合

本研究では、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)相当とした。BB の材料構成は、SO₃ で 2%の無水石こう(CS)を BFS に内割置換した基準配合と、強度の改善を目的として SO₃ を 3.5%、OPC に対して 5%の石灰石微粉末(LSP)を BFS に内割置換した改良配合の 2 種類とした。図 1 に高炉セメントの材料構成を示す。上記の基準配合、改良配合のいずれも使用した BFS は、市販品(ブレン 4570cm²/g、塩基度 1.90)及び低塩基度品(ブレン 4580、5940cm²/g、塩基度 1.45)の 3 種類とした。表 2 に使用材料と試料名を示す。

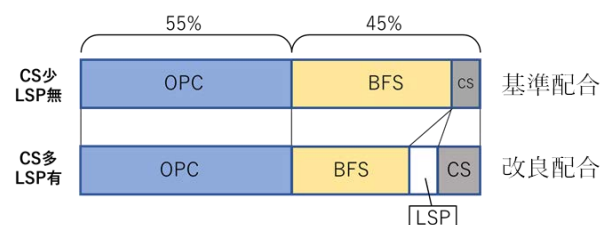


図 1 高炉セメントの材料構成

表 1 使用材料と試料名

	市販品4000	低塩基度品4000	低塩基度品6000
基準配合	BB1	S4-1(未改良)	S6-1(ブレン改良)
改良配合	BB2	S4-2(配合改良)	S6-2(ブレン・配合改良)

ペーストとモルタルの水セメント比は 50%とした。モルタルは細骨材比 3.0 で標準砂を用い、BB に対して 0.1%の消泡剤を外割で添加した。

2.2 圧縮強度試験及び凍結融解試験

上記 6 種類の高炉セメントを用いたモルタルの圧縮強度試験を行った。試験体は Φ50×100mm の円柱供試体とし、24 時間の封緘後脱型し 20℃の水中養生を行った。測定材齢は 3、7、28、91 日とした。

凍結融解試験は、圧縮強度試験と同一のモルタルを使用した。供試体は 15cm³のスチロール棒瓶に成型し、24 時間の封緘後脱型し材齢 28 日まで 20℃の水中養生を行った。その後 3%の NaCl 水溶液に 48 時間浸漬した後に表乾質量を測定し、24 時間を 1 サイクルとした凍結(-20℃で 16 時間)と融解(+20℃で 8 時間)を行い、試験開始前の表乾質量を 100%とした質量残存率を評価した。

2.3 水和反応解析

上記 6 種類の高炉セメントを用いたセメントペーストの水和反応解析を行った。試験体は厚さ 3 mm 程度の板状に成型し、24 時間の封緘後脱型して、チャック付きポリ袋にて 20℃の水中養生を行った。測定材齢は 3、7、28、91 日とした。材齢に達した供試体はイソプロパノールに 3 時間浸漬し水和停止した後、30 分間の真空脱気を行った。次に 40℃で 24 時間乾燥した。乾燥後の試料は遊星ミルにて粉砕し、900℃の強熱減量試験と XRD 測定を行った。

キーワード 高炉セメント、塩基度、圧縮強度、結合水率、凍結融解抵抗性

連絡先 〒371-0816 群馬県前橋市上佐鳥町 460-1 TEL : 027-265-0111

3. 結果

図2にBB1に対する圧縮強度比を示す。未改良のS4-1は全材齢でBB1を下回ったが、ブレン改良のS6-1、配合改良のS4-2のいずれも材齢28日まではBB1と同等以上の強度を発現し、材齢91日においてはBB1の9割程度の強度を発現した。また表2、3に各改良前に対する改良後の圧縮強度比を示す。ブレンと配合の両項目において、改良後は初期強度の増加が確認できる。

図3にXRDの測定結果の一例を示す。基準配合では、アルミネート系水和物はモノサルフェート(AFm)が主体なのに対し、CSを増量しLSPを添加した改良配合では、エトリンガイト(Aft)の生成量が増大し、ヘミカーボネート(Hc)の生成が認められた。

これは、 SO_3 増大によりAft生成量が増し、加えてLSPの添加によりAftからAFmへの転化反応が抑制された結果と考えられる²⁾。したがって改良配合ではBFSの水和反応が促進し、アルミネート系水和物の生成量が増すため、強度は増大したと考えられる。

また、すべての試験体において、セメントペーストの結合水率と圧縮強度に強い相関がみられた(図4)。

図5に凍結融解試験の結果を示す。未改良のS4-1はサイクル初期においてはBB1を上回る凍結融解抵抗性を示したが、その後崩壊した。25サイクルの質量残存率はブレン改良のS6-1、配合改良のS4-1のいずれもBB1と同程度となり、ブレン・配合改良のS6-2はBB1の3倍程度となった。

また、各試験体の圧縮強度と質量残存率の序列は概ね一致し、圧縮強度が高い試験体ほど質量残存率も高い傾向にあった。特に材齢3日の圧縮強度と18サイクルの質量残存率には相関がみられた(図6)。

4. まとめ

- 1) 低塩基度 BFS にブレンの増加、または LSP を添加し、CS 増量の改良を施すことで、材齢 28 日までの圧縮強度と凍結融解抵抗性は市販品と同等以上となった。
- 2) 結合水率と圧縮強度に強い相関がみられた。
- 3) 圧縮強度が高い試験体ほど凍結融解抵抗性に優れる傾向にあった。

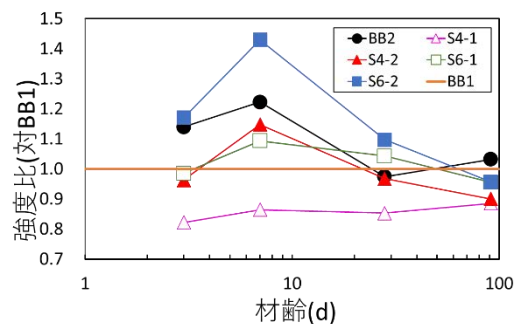


図2 BB1に対する圧縮強度比

表2 ブレン改良後の強度比

	3d	7d	28d	91d
1	1.20	1.26	1.22	1.08
2	1.22	1.25	1.13	1.06

表3 配合改良後の強度比

	3d	7d	28d	91d
BB	1.14	1.22	0.97	1.03
S4	1.17	1.33	1.13	1.02
S6	1.19	1.31	1.05	1.00

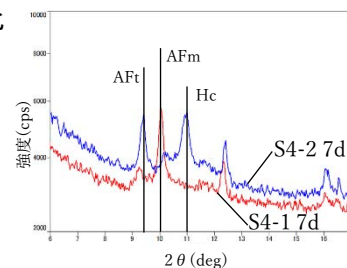


図3 XRD 測定結果(7d)

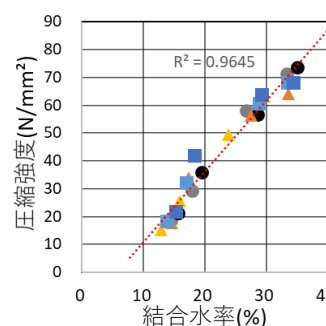


図4 結合水率と圧縮強度

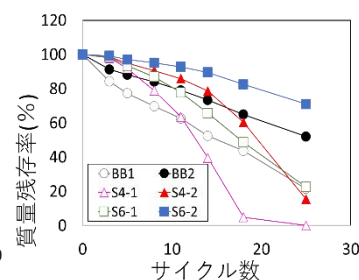


図5 凍結融解試験結果

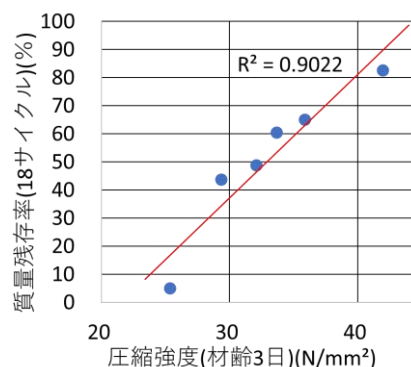


図6 圧縮強度と質量残存率

参考文献

- 1) 鉄鋼スラグ協会：鉄鋼スラグの高炉セメントへの利用，2021
- 2) 佐川孝広，九里竜成，石関浩輔，関田徹志：高炉スラグ高含有セメントの高温履歴下での水和反応に及ぼす無水石こうと石灰石微粉末の影響，第71回セメント技術大会講演要旨，pp.94-95，2017