

# 化学組成の異なる高炉スラグ微粉末の水和活性と 体積変化に及ぼす養生温度の影響

前橋工科大学 学生会員 ○須藤 菜月  
前橋工科大学 正会員 佐川 孝広

## 1. はじめに

高炉セメントは、産業副産物の有効利用、CO<sub>2</sub>排出量低減の観点から利用拡大が期待されている。しかし、施工条件によっては、普通ポルトランドセメント(OPC)より発熱量や自己収縮ひずみが大きくなり、ひび割れが発生する場合があるという問題点が指摘されている<sup>1)</sup>。さらに、自己収縮に及ぼす養生温度の影響は、セメントの銘柄により大きく異なることも指摘されている<sup>2)</sup>。

以上から本研究では、高炉スラグ微粉末(BFS)6種を用いて高炉セメントB種を作製し、異なる養生温度におけるモルタルの自己収縮を測定した。得られた結果から、高炉セメントの自己収縮に及ぼす養生温度の影響について、BFSの化学組成や水和生成物の観点から検討を行い、体積変化の少ない高炉セメントの材料設計することが本研究の目的である。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料と配合

試験はJIS A 6206での塩基度(CaO+MgO+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)/SiO<sub>2</sub>(CMA/S)が1.73~2.03のBFS6種類を用いたモルタルによって行った。化学組成を表1に示す。配合はOPC(55%), BFS(45%)とし、無水石こう(CS)はBFSの内割で、SO<sub>3</sub>換算で2%混和した。モルタルの水結合材比は35%、5号珪砂を細骨材比1.0、流動性の調整のため、ポリカルボン酸塩系減水剤を結合材の外割0.05%用いた。また、各BFSのブレン粉末度は4200cm<sup>2</sup>/g程度に調整した。

### 2.2 自己収縮の測定

自己収縮の測定はφ50 x 100mmの円柱供試体を用いて行った。型枠とモルタルの間に生じる摩擦を低減するため、型枠内にテフロンシートを敷いた。その後、型枠の中心部に埋込型ひずみゲージ(弾性係数2.75GPa)を設置した。モルタルを打込み後、直ちにパラフィルムで蓋をし、アルミテープで密封した。その後20, 40°Cの恒温槽に設置し、所定の材齢まで測定を行った。

### 2.3 水和試料と水和反応解析

ペーストの配合は、BFS(80%)-水酸化カルシウム(15%)-CS(5%)、水結合材比50%とした。脱型後20, 40°Cの水中養生を行い、測定材齢は3,7,28,91日とした。既往の研究<sup>2,3)</sup>同様に水和反応解析を実施した。

## 3. 実験結果と考察

### 3.1 自己収縮の測定結果

埋込型ゲージは弾性係数が大きく、材齢初期での測定ができないため、測定開始後の各供試体の最大膨張時以降の収縮ひずみを自己収縮ひずみとして整理した。20°Cおよび40°Cの自己収縮の結果を図1, 2にそれぞれ示す。

表1 高炉スラグ微粉末の化学組成(%)

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	TiO <sub>2</sub>	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

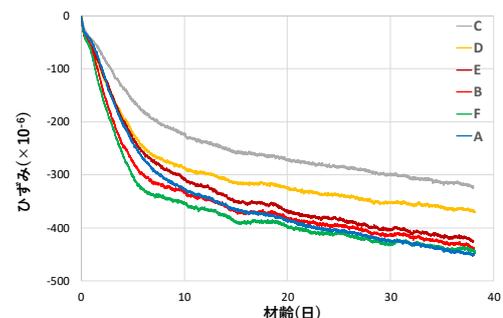


図1 20°Cにおける自己収縮ひずみの測定結果

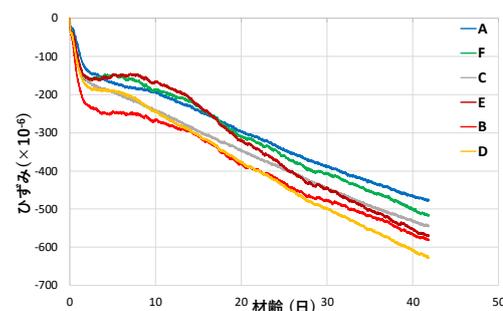


図2 40°Cにおける自己収縮ひずみの測定結果

凡例は測定終了時の最大自己収縮の順とした。各 BFS では自己収縮ひずみの経時変化が異なることがわかる。試験体間の配合は同一で BFS の粉末度も同程度であることから、自己収縮ひずみの差異は BFS の化学組成のみに起因すると判断される。また、20°Cと40°Cでは自己収縮の序列に違いがあり、自己収縮に及ぼす養生温度の影響は、BFS の化学組成により異なると考えられる。

### 3.2 化学組成と自己収縮ひずみの関係

BFS の化学組成と材齢 28 日の自己収縮ひずみの寄与率( $R^2$ )を表 2 に示す。

養生温度 20°Cの時、 $\text{SiO}_2$ (逆相関)、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgO}$  と相関が高く、 $\text{CaO}$  や  $\text{TiO}_2$  とは相関のないことが確認された。

一方で、40°Cの時、化学組成と自己収縮ひずみ間での相関は見られなかった。そのため、20°Cと40°Cの自己収縮ひずみの差と化学組成の寄与率を算出した。その結果、 $\text{MgO}$  に高い相関(逆相関)がみられた。 $\text{MgO}$  と自己収縮ひずみの差の関係を図 3 に示す。以上から、 $\text{MgO}$  の含有率が高い BFS 組成が、自己収縮において養生温度の影響を受けにくいと考えられる。

### 3.3 水和生成物量と自己収縮ひずみの関係

材齢 7, 28 日での水和生成物量と自己収縮ひずみの寄与率を表 3 に示す。

養生温度 20°Cの時、材齢 7 日のモノサルフェート

表 2 化学組成と自己収縮ひずみの寄与率

$R^2$	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{CaO}$	$\text{MgO}$	$\text{TiO}_2$	CMA/S
20°C	<b>0.65</b>	<b>0.83</b>	0.53	0.13	<b>0.94</b>	0.10	0.68
40°C	0.01	0.0002	0.01	0.08	0.30	0.07	0.02
diff 20-40°C	0.36	0.39	0.31	0.16	<b>0.90</b>	0.13	0.39

表 3 水和生成物と自己収縮ひずみの寄与率

$R^2$	AFm(7d)	AFm(28d)	HT(28d)	C-S-H(7d)
20°C	<b>0.86</b>	0.14	<b>0.66</b>	0.15
40°C	0.00003	0.02	0.0017	<b>0.89</b>
diff 20-40°C	0.42	0.45	0.38	0.36

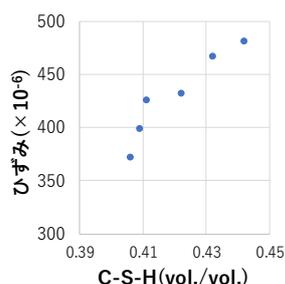
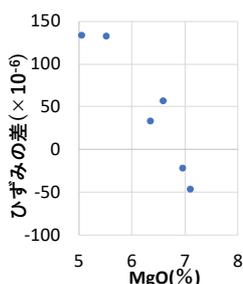


図 3  $\text{MgO}$  とひずみの差 図 4 C-S-H とひずみ

(AFm)と材齢 28 日のハイドロタルサイト(HT)との相関が高いことがわかる。既往の研究において、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  の量が多いと AFm の生成量が多くなるといわれている<sup>3)</sup>。また、20°Cでは自己収縮の序列が材齢 7 日で概ね決定していることから(図 1)、材齢 7 日での AFm の生成量が多いと自己収縮ひずみも大きくなると考えられる。

一方で、40°Cの時、珪酸カルシウム水和物(C-S-H)と相関が高く、図 4 より C-S-H の生成量が多いと自己収縮ひずみも大きくなった。

また、3.2 と同様に、20°Cと40°Cの自己収縮量の差と水和生成物量の寄与率を算出したが、相関は低かった。このことから、20°Cで AFm, HT の生成量が多く、40°Cで C-S-H の生成量が多いと自己収縮ひずみも大きくなり、養生温度の相違で自己収縮に影響する水和物の種類が異なる結果となった。

## 4. まとめ

- (1) BFS の化学組成の相違により自己収縮特性が異なる。
- (2)  $\text{MgO}$  の含有率が高い BFS 組成が 20°Cと40°Cの自己収縮量の差異が小さく養生温度の影響を受けにくい。
- (3) 養生温度 20°Cでは AFm, HT, 40°Cでは C-S-H の生成量多いと自己収縮ひずみは大きくなり、養生温度の相違で自己収縮に影響する水和物の種類が異なると推測された。

## 参考文献

- 1) 白井達哉ほか：異なる養生温度条件下における高炉セメントコンクリートの自己収縮ひずみと収縮応力の特性，大成建設技術センター報 第 47 号，pp. 91-98，2014
- 2) 佐川孝広，前田一誠：高炉スラグ微粉末の塩基度と水和物組成，第 72 回セメント技術大会講演要旨，pp. 72-73，2018
- 3) 佐川孝広：高炉スラグ微粉末の水和活性と体積変化に及ぼす化学組成の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol. 41，No.1，pp.131-135，2019