

## 高炉スラグ微粉末の化学組成がモルタルのスケーリング抵抗性に及ぼす影響

前橋工科大学 学生会員 ○山本 真奈海  
正会員 佐川 孝広

## 1. 目的

積雪寒冷地域では、道路付帯構造物に凍結防止剤の散布が行われており、コンクリートが凍結融解作用を受けてスケーリングする劣化現象が顕在化している。しかしコンクリートのスケーリング劣化に関しては、その劣化メカニズムは十分に明らかでなく、劣化対策の手法も確立されていないのが現状である。

本研究では、スケーリング劣化に対する抵抗性を高める方策として、高炉スラグ微粉末(以下、BFS)の活用に着目した。小型試験体を用いたモルタルの凍結融解試験において、BFSの混和によりスケーリング抵抗性が改善されたことが報告されている<sup>1)</sup>。モルタルのスケーリング抵抗性は、養生条件、BFSの粉末度や置換率、水セメント比等の配合条件が複合的に影響すると考えられる。しかし、BFSの化学組成の影響については明らかでない。そこで本研究では、BFSの化学組成がスケーリング抵抗性に及ぼす影響について検討した。

## 2. 実験概要

本研究では、結合材には普通ポルトランドセメント、化学組成の異なる6種類の高炉スラグをブレン粉末度4300cm<sup>2</sup>/g程度に調製後、無水石こうをSO<sub>3</sub>で2%添加して用いた。BFSの化学組成、JIS A 6206での塩基度(CaO+MgO+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)/SiO<sub>2</sub> (CMA/S)を表1に示す。モルタルの作製には標準砂を用いた。結合材は、OPCにBFSを45%置換した。空気量の差異による影響を軽減するため、消泡剤を結合材の0.1%添加した。配合は、水結合材比を50%、標準砂を細骨材比3で用いた。圧縮強度試験はφ5×10cmのモルタルを作製し行った。練り混ぜ後24時間封緘養生を行い、脱型後の試験体は20℃水中養生とした。測定材齢は3、7、28および91日とした。

凍結融解試験は、モルタル小型試験体を用いて行った。既往の研究にて、小片試験体を用いたソ

表1 スラグ化学組成(%)

	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

ルトスケーリングの試験方法が提案されており、本研究ではこれを参考に15cm<sup>3</sup>のストロール棒瓶にモルタルを成型した。試験体は材齢28日まで封緘養生後、3%のNaCl溶液に48時間浸漬させた後に表乾質量を測定し、凍結融解試験を行った。

凍結融解作用は24時間を1サイクルとし、凍結温度-20℃で16時間、融解温度+20℃で8時間とした。所定の凍結融解サイクル終了毎に試験体の表乾質量を測定し、試験開始時の表乾質量を100%とした質量残存率として評価した。

## 3. 実験結果および考察

図1に各BFSを用いたモルタル圧縮強度の平均値と変動係数を示す。変動係数の値から、材齢28日までの圧縮強度はBFSの化学組成に依存して8~11%程度の変動があるのに対し、材齢91日では変動係数は4%程度と半減し、圧縮強度に及ぼすBFSの化学組成の影響は小さくなることが分かった。塩基度式を(aC+bM+cA)/Sと修正し、圧縮強度との寄与率が最も高くなる係数を算出したところ、aの係数が最も大きく、CaOが圧縮強度に影響を与えると分かった。しかし材齢91日の圧縮強度と化学組成の相関は低かった。

図2にBFS種類別の質量残存率を示す。図示されるように、BFSの化学組成に依存してモルタルのスケーリング抵抗性は異なることが分かった。ここで、28サイクルの質量残存率とBFS化学組成、モルタル圧縮強度、同一材料を使用した自己収縮量、水和反応解析結果<sup>2)</sup>との関係について検討する。

質量残存率と各値の寄与率を表2に示す。BFSの化学組成ではAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>と最も相関が高く、塩基度式を

$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$  (A/S) と修正したところ、より高い相関がみられた。

一方、図3に示す通り材齢28日のエトリンガイト (AFt) 生成量とは逆相関が見られた。AFt は  $\text{C}_3\text{A} \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$  と水を多く含む水和物であり、生成量が多いほど凍結融解作用の影響を受けやすいと考えられる。

AFt の生成には  $\text{Al}_2\text{O}_3$  に加え石こう量 ( $\text{SO}_3$ ) も関係するが、 $\text{SO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$  モル比と高い相関がみられた。本実験及び水和反応解析<sup>2)</sup>では、 $\text{SO}_3$  量は6種類の BFS で同一であり、 $\text{SO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$  モル比は BFS の  $\text{Al}_2\text{O}_3$  量に依存する。 $\text{SO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$  モル比が高いほど AFt が安定して存在するため、 $\text{SO}_3$  一定の条件では  $\text{Al}_2\text{O}_3$  が少ないほど  $\text{SO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$  モル比は高くなり、AFt 生成量が増すことでスケーリング抵抗性が低下すると考えられる。またこれらの  $\text{Al}_2\text{O}_3$  や  $\text{SO}_3$  量、AFt の生成量は自己収縮特性にも影響を及ぼすため<sup>2)</sup>、表2に示す通り質量残存率と自己収縮量とに相関がみられた。すなわち、スケーリング抵抗性の高い BFS の組成は自己収縮が大きく、一般に石こうの混和は自己収縮を低減する効果を有するが、相反してスケーリング抵抗性は低下する傾向があると分かった。

表3に質量残存率と圧縮強度の寄与率を示す。いずれの材齢とも相関は低かった。圧縮強度は CaO、スケーリング抵抗性は  $\text{Al}_2\text{O}_3$  とそれぞれ異なる化学組成の寄与が大きく、相関が低くなったと考えられる。

本研究では、凍結融解試験の開始材齢を28日としたが、一方で材齢28日以降の圧縮強度の増進が BFS の塩基度によらず顕著であることも確認された。したがって、凍結融解試験の開始材齢を28日より長期とすることで、本研究とは異なる結果が得られることも考えられる。

#### 4. まとめ

- (1) BFS の化学組成に依存して、モルタルのスケーリング抵抗性は異なる。
- (2) 圧縮強度には CaO、スケーリング抵抗性には  $\text{Al}_2\text{O}_3$  と異なる BFS の化学組成の寄与が大きい。
- (3) BFS に混和される石こうは自己収縮を低減させるが、スケーリング抵抗性を低下させる。

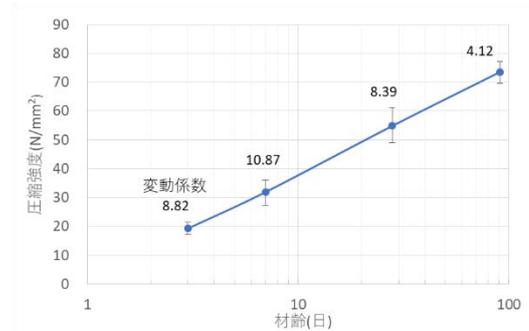


図1 平均圧縮強度

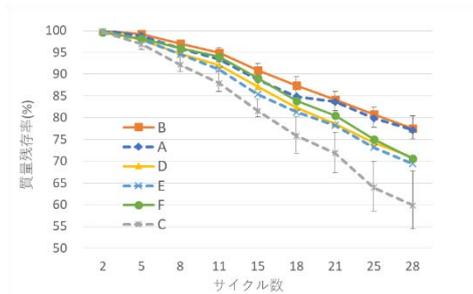


図2 質量残存率

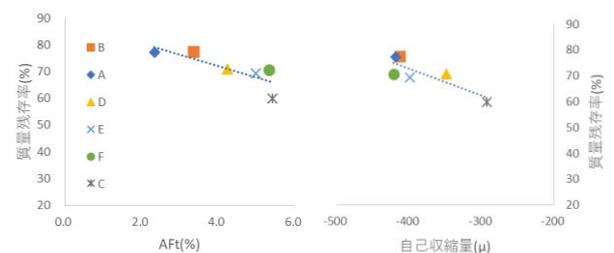


図3 AFt, 自己収縮量と質量残存率の関係

表2 各値と質量残存率の寄与率

$R^2$	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	CaO	MgO	$\text{TiO}_2$
	0.64	<b>0.85</b>	0.47	0.09	0.61	0.33
	CMA/S	A/S	M+A	$\text{SO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$	AFt	収縮量
	0.61	<b>0.88</b>	0.80	<b>0.85</b>	0.66	0.70

表3 圧縮強度と質量残存率の寄与率

$R^2$	3d	7d	28d	91d
	0.30	0.34	0.33	0.10

#### 参考文献

- 1) 佐川孝広：コンクリートのスケーリング抵抗性に及ぼす高炉スラグ微粉末の影響，土木学会第72回年次学術講演，pp. 965-966，2017
- 2) 佐川孝広，須藤菜月：高炉スラグ微粉末の化学組成と養生温度が硬化体の自己収縮に及ぼす影響，第74回セメント技術大会講演要旨，pp. 178-179，2020