



AH16203 石井 咲弥  
指導教員 伊代田 岳史

## 1. 研究背景及び目的

高炉スラグは銑鉄を製造する際に生成される副産物であり、冷却方法によって、高炉水砕スラグと高炉徐冷スラグに分けられる。高炉水砕スラグは潜在水硬性を所有することから高炉スラグ微粉末 (GGBFS) として用いられているが、高炉徐冷スラグは、硫黄の含有量が多く、酸化させっこうの生成につながり、セメントと反応し異常膨張を生じる可能性がある<sup>1)</sup>と報告されていることから、コンクリート用細骨材として JIS 化されていない。しかし近年では、1970 年代のこの報告時よりも硫黄の含有量は減少したこともあり、近年の骨材事情に対応すべく、コンクリート用細骨材としての利用の可能性の検討が必要である。その一方で、近年欧州を中心に明らかとなってきたエトリンタイトの遅延生成もせっこうや SO<sub>3</sub> の含有量が大きく関わっているためその検討も急務である。

エトリンタイトの遅延生成 (DEF: Delayed Ettringite Formation) とは、初期に生成したエトリンタイトが蒸気養生などの高温履歴により消失し、長期間湿潤環境下に置かれることでエトリンタイトが再び生成 (二次生成) する現象<sup>2)</sup> である。硬化後に再生成するため、膨張 (DEF 膨張) しひび割れを引き起こすと報告されており、国内でも 2000 年代中頃からプレキャストコンクリート製品での劣化損傷事例<sup>2)</sup> がある。そこで本研究では、コンクリート用細骨材として徐冷スラグ細骨材を用いた際の DEF 膨張挙動を把握することを目的とした。

## 2. 実験概要

### 2.1 配合・供試体概要

本研究では、細骨材種類と GGBFS 置換率が硬化体の膨張率へ与える影響の検討を行った。細骨材として標準砂 (標) と徐冷スラグ細骨材 (徐) を用い、GGBFS 置換率を 0% (B0)、45% (B45)、70% (B70) とし、

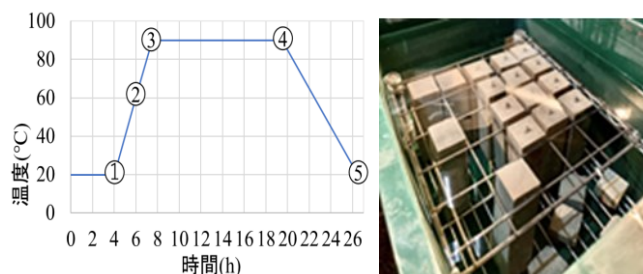


図-1 高温履歴と水中養生の様子

W/C=50%, C:S=1:3 の 40mm×40mm×160mm モルタル供試体を各配合で 6 本作製した。また、DEF 促進のため、硫酸塩として硫酸カリウムを用い SO<sub>3</sub> 量で結合材×2% (K2), 4% (K4) となるように添加を行った。養生方法は、図-1 に示すように 20°C 4 時間の前置き後、20°C/hr で 90°C まで昇温し、90°C で 12 時間保持の蒸気養生を行った。蒸気養生後は、10°C/hr で 20°C まで降温し、その後、図-1 の写真のように 20°C の水中養生を行った。

### 2.2 試験概要

#### (1) 長さ変化試験

水中養生を行った 6 本の供試体のうち 3 本を 1 週間ごとに JIS A 1129-3 に準拠してダイヤルゲージを用いて長さ変化の計測を行った。

#### (2) 粉末 X 線回析試験 (XRD)

水中養生を行った残りの 3 本の供試体を用いて、膨張の有無によるエトリンタイトの生成量を比較するため、供試体を粉碎し 150μm ふるいにかけて細骨材を取り除いた粉末を用いて XRD を実施した。標準物質として α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> を用い、内部標準法によりエトリンタイト量を定量した。また、ここでは細骨材をすべて取り除くことができていなかった場合を考え、試験体から得た粉体中に含まれる細骨材量を内部標準法により定量を行い、細骨材以外つまりセメントペーストあたりのエトリンタイト量で比較を行った。

さらに、温度履歴を受けた際に、標準砂と徐冷スラグ細骨材でエトリンタイトの生成するタイミング

の違いを検討するために、図-1の①～⑤の点(4h, 6h, 7.5h, 19.5h, 26.5h)においても供試体を採取しエトリングタイトの定量を行った。

### 3. 実験結果及び考察

#### 3.1 長さ変化試験結果

図-2, 3に長さ変化試験の結果を示す。標準砂を用いた供試体に大幅な膨張が見られた。一方、徐冷スラグ細骨材では膨張は見られなかった。さらに添加したSO<sub>3</sub>量が多いほど膨張傾向を示した。また、既往の研究<sup>2)</sup>と同様に、GGBFS置換を行うと膨張は見られなかった。

#### 3.2 エトリングタイトの生成のタイミングとその大きさの比較

図-4に蒸気養生中の供試体の時間経過・温度によるエトリングタイトの生成量を示す。徐冷スラグ細骨材は標準砂に比べ初期のエトリングタイトの生成量が多いことが明らかになった。標準砂を用いたB0標K4は90℃に達した時点でエトリングタイトが消失しているが、徐冷スラグ細骨材を用いたB0徐K4は90℃に達した点でもエトリングタイトは残存しており、その後消失した。図-5にエトリングタイトの生成量と走査電子顕微鏡(SEM)によるエトリングタイトの二次電子像を示す。XRDによる分析の結果、材齢約125日の供試体では、膨張率に関わらずエトリングタイトは同程度生成していた。また、SEMにより観察を行ったところ、初期のエトリングタイトは小さく細い針状結晶が観察された一方で、材齢約125日の供試体は、膨張率に関係なくどちらにも初期のエトリングタイトよりも大きく太い針状結晶が観察された。これらの結果より、いずれの細骨材においてもDEFは生じているが、DEF膨張は標準砂のみに見られたためDEFはDEF膨張の必要条件ではあるが十分条件ではないと考えられる。

#### 4. まとめ

- (1)標準砂を用いた供試体で膨張が見られたが、徐冷スラグ細骨材では膨張は見られなかった。また、添加したSO<sub>3</sub>量が多いほど膨張傾向を示し、GGBFSを置換すると膨張を抑制した。
- (2)遅延生成後のエトリングタイトは、初期に比べ大きく太い。
- (3)SEM、XRDの結果からDEFが起きてもDEF膨張が必ずしも起きるとは限らない。

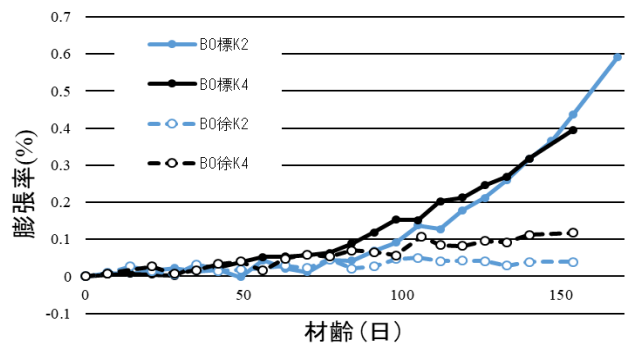


図-2 GGBFS0%の膨張率

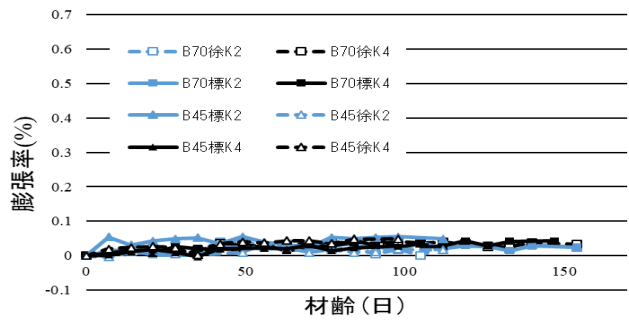


図-3 GGBFS45, 70%の膨張率

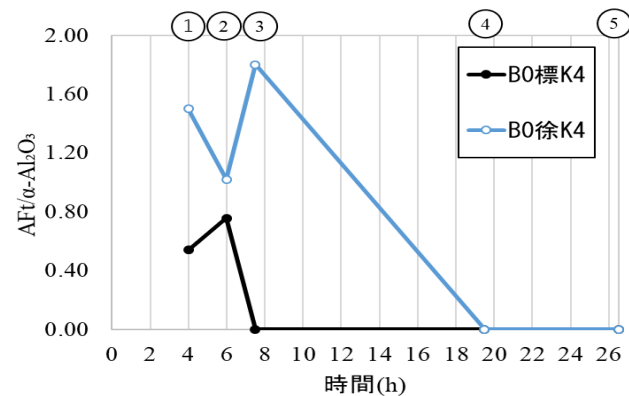


図-4 蒸気養生中の供試体の時間経過・温度によるエトリングタイトの生成量

	標準砂		徐冷スラグ細骨材	
	SEM	AFt- $\text{Al}_2\text{O}_3$	SEM	AFt- $\text{Al}_2\text{O}_3$
6h		0.75		1.02
125日		3.24		3.31

図-5 エトリングタイトの変化

#### 参考文献

- 1) 近藤連一: 鉄鋼スラグの化学, 石膏と石灰, vol.1977, No147, pp.13-21, 1977
- 2) 日本コンクリート工学会, 「DEFのリスクを考える」に関するシンポジウム, 委員会報告書, 2019