

GGBS を用いたセメント硬化体の空隙構造が DEF 膨張抑制に与える影響

芝浦工業大学 工学部先進国際課程

芝浦工業大学大学院 理工学研究科社会基盤学専攻

山口大学名誉教授

○伊代田 岳史

大橋 優樹

後藤 誠史

1. はじめに

コンクリートの劣化現象の一つにエトリンガイトの遅延生成 (DEF: Delayed Ettringite Formation) があげられる。蒸気養生等の初期に高温履歴を受けたコンクリートにおいて、長期にわたり膨張性のエトリンガイトが内部に生成されることで硬化体が膨張し、ひび割れが生じることでコンクリートの剛性が低下する現象である。DEF 膨張によるひび割れは、十分な硫酸塩量、材齢初期の温度履歴、十分な水分供給の3条件が揃った場合に生じる可能性がある。このような DEF による膨張に対して、高炉スラグ微粉末 (GGBS) の利用は膨張抑制効果があると報告されている^{1,2)}。しかし、そのメカニズムは不明なこともあるため、GGBS を添加した供試体を用いて、AFt 生成量と膨張率の関係より、DEF 膨張メカニズムの解明に向けた考察を行った。

2. 実験概要

2. 1 材料および配合

本研究では、普通ポルトランドセメント (OPC) : N (密度 3.15g/cm^3 、比表面積 $3530\text{cm}^2/\text{g}$ 、 SO_3 量 2.1%)、GGBS : B (密度 2.91g/cm^3 、比表面積 $4060\text{cm}^2/\text{g}$ 、 SO_3 量 2.1%) を使用した。表1にそれぞれのセメントの化学組成、表2にモルタルの配合表を示す。GGBS 置換率は少量添加における DEF 膨張抑制効果の確認、及びそれによる空隙構造を比較するため、5 (B5)、15 (B15)、25 (B25)、70 (B70) wt% とした。モルタルは W/B=55%、S/C=1:3 で一定とし、DEF を促進するため、 K_2SO_4 を添加して SO_3 含有率を 4.0% に調整し、供試体を作製した。

2. 2 試験体作製および膨張率試験

JIS R 5201 に準拠して $40\times 40\times 160\text{mm}$ のモルタルを作製した。図1に蒸気養生時の温度履歴を示す⁴⁾。打込み

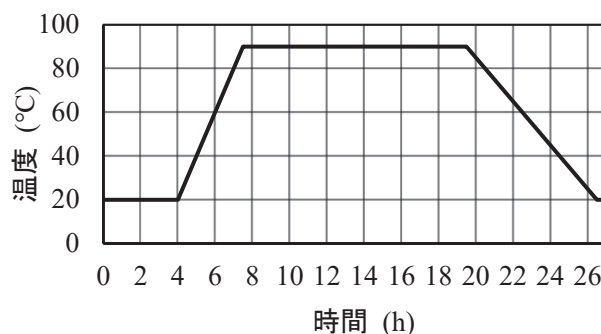


図1 蒸気養生時の温度履歴

表2 配合表

配合	GGBS 置換率	SO_3 /全体	Al_2O_3 /OPC	Al_2O_3 /BFS	Al_2O_3 /全体
N	0%	2.10%	5.18%	-	5.18%
B5	5%		4.92%	0.66%	5.58%
B15	15%		4.40%	1.98%	6.39%
B25	25%		3.72%	3.72%	7.19%
B70	70%		1.55%	9.25%	10.81%

から4時間後に昇温速度 20°C/hr で最高温度 90°C の高温養生を12時間保持し、降温速度 10°C/hr で 20°C まで冷却した。その後、打設から26.5hで脱型し、 20°C の水中で静置した。膨張率の測定はコンタクトゲージ法により脱型時の長さを基長として長さ変化を測定した。

2. 3 AFt の定量評価

エトリンガイト (AFt) 生成量の測定は、試料を粉砕後に $150\mu\text{m}$ のふるいで細骨材を除去した試料を用いた。アセトンで水和停止処理し XRD を実施した。 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ を標

表1 セメントの化学組成

	化学組成(%)									
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_4	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	TiO_2	P_2O_5	SO_3
OPC	20.19	5.18	-	65.01	1.18	0.31	0.36	0.25	0.16	2.1
GGBS	34.66	13.71	0.26	43.83	5.67	0.25	0.26	0.56	0.02	2.1

準物質とし、内部標準法にて温度履歴の昇温時における AFt 生成量を経時的に定量し、AFt の分解が開始されるまでに最も生成された AFt 量 (I_{Et}) を算出した。さらに、材齢 133 日における二次生成された AFt 量 (D_{Et}) を定量した。

3. AFt 生成量と膨張率の関係

図 2 に長さ変化試験の結果を示す。N が最も大きな膨張を示し、GGBS 添加では置換率に伴い DEF 膨張が抑制され、材齢 160 日においても B70 の膨張率は 0.04% 程度に留まった。図 3 に温度履歴の昇温時における AFt 生成量を経時的に定量した結果を示す。GGBS 添加では置換率に伴って AFt 生成量は増加傾向を示した。AFt の分解が開始するとされる養生温度 60℃ (6h) で AFt 生成量がいずれの配合で最大を示し、B70 が最も多かった。さらに、昇温に伴って AFt は分解によって減少し、養生温度 90℃ を 2 時間施した材齢 10 時間時点で AFt は完全に分解されたことが確認された。GGBS 添加では、温度履歴によって GGBS の反応が活性化し、鎖状構造内の Al^{3+} が溶出し、AFt の生成が促進されたと考えられる。

図 4 に I_{Et} と材齢 133 日における D_{Et} の AFt 量及び膨張率の関係を示す。いずれの配合で D_{Et} が生成され、DEF が生じていることが確認された。しかし、 I_{Et} の傾向とは異なり、GGBS 置換率に伴い D_{Et} の生成量は抑制された。

4. C-(A)-S-H の生成による DEF の抑制

温度履歴によって分解された AFt から放出された Al^{3+} 、 SO_4^{2-} は液相または C-S-H の表面に表面吸着または電気吸着される^{1,3)}。常温環境下での養生において、CH、C-S-H の表面に吸着していた Al^{3+} 、 SO_4^{2-} が再放出されると AFt の生成条件が揃い DEF が生じる。GGBS 添加の場合、置換率に伴い D_{Et} の生成は抑制されており、これは C-S-H における Si の一部が Al^{3+} に固溶置換されることで C-(A)-S-H が生成されたためと考えられる⁴⁾。C-(A)-S-H が生成されることで、常温環境下での養生において、 Al^{3+} が液相に再放出しないため、DEF の生成条件を満たしにくく、 D_{Et} の生成が抑制されたと考えられる。GGBS 添加において、置換率に伴い I_{Et} が増加することで、温度履歴で分解された AFt から溶出する Al^{3+} も増加する。このため GGBS 高置換ほど、生成される C-(A)-S-H が増加することで、AFt の再生成に必要な Al^{3+} が減少し、 D_{Et} が減少したと考えられる。

5. まとめ

GGBS を添加したセメント硬化体が高温履歴を受けた場合、温度履歴により分解される AFt 量が増加するほど、C-(A)-S-H が多く生成される。よって、常温環境において AFt の再生成に必要な Al^{3+} が液相に存在せず、DEF 量が

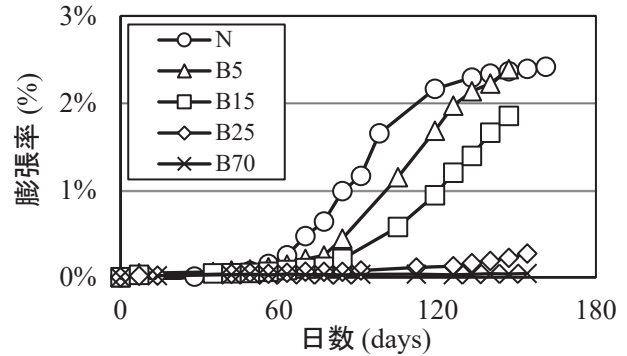


図 2 膨張率

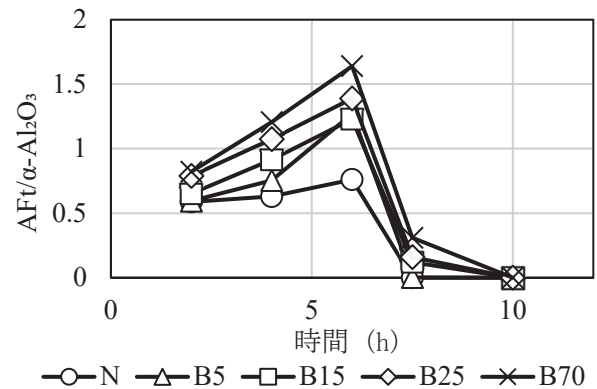


図 3 蒸気養生中における AFt 生成量の推移

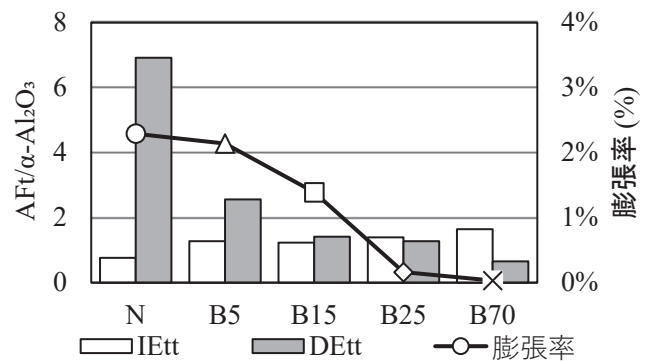


図 4 膨張率と AFt 生成量の関係

減少し、DEF 膨張が抑制されることが考えられるが、C-(A)-S-H の生成など今後更なる検証が必要である。

【参考文献】

- 1) 日本コンクリート工学会：「DEF リスクを考える」に関するシンポジウム、委員会報告書 (2019)
- 2) 川端雄一郎、与那嶺一秀、小川彰市、紫原真仁：DEF 膨張に対する高炉スラグ微粉末の長期抑制効果、第 73 回セメント技術大会 (2019)
- 3) 福田俊也、羽原俊裕、小山田哲也、藤原忠司：コンクリートの蒸気養生条件と DEF 膨張、土木学会東北支部技術研究発表会、V-28 (2006)
- 4) コンクリート中のケイ酸カルシウム水和物(C-S-H)とは何か～キャラクター化と性能発現機構～、一般社団法人セメント協会 (2018)