

ステンレススラグを混和して炭酸化養生したアルカリ活性材料の圧縮強度と CO<sub>2</sub> 固定量

東北大学 学生会員 ○音田 大翔  
 東北大学 正会員 皆川 浩 宮本 慎太郎 久田 真  
 JFE スチール(株) 正会員 田 恵太 松永 久宏

## 1. はじめに

カーボンニュートラルの達成に向けて、建設材料の分野でも各種の検討が行われている。コンクリート分野では、製造時の二酸化炭素排出量の多いポルトランドセメントの使用量を減じたり、結合材を高炉スラグ微粉末などの産業副産物に置き換えた硬化体（アルカリ刺激剤を添加させることによって硬化させるアルカリ活性材料、以下 AAM）が事例として挙げられる。その他にも、 $\gamma$ -2CaO $\cdot$ SiO<sub>2</sub> ( $\gamma$ -C<sub>2</sub>S) をポルトランドセメントに混和して硬化体を炭酸化養生することで、二酸化炭素を硬化体内に固定化する技術<sup>1)</sup>もある。この技術は、二酸化炭素が  $\gamma$ -C<sub>2</sub>S と反応して炭酸塩として硬化体内に固定化され、空隙を閉塞することで硬化体の圧縮強度の増加に寄与するものである<sup>1)</sup>。ステンレススラグはこの  $\gamma$ -C<sub>2</sub>S を含有することが知られている。

本研究ではステンレススラグ微粉末単味を高濃度の二酸化炭素雰囲気暴露し、ステンレススラグ微粉末の炭酸化の可能性について検討した。さらに、ステンレススラグ微粉末を混和した高炉スラグ微粉末を主結合材とする AAM 硬化体を炭酸化養生し、その圧縮強度と二酸化炭素固定量について評価した。

## 2. 実験概要

## 2.1 使用材料

結合材として高炉スラグ微粉末 (GB, 密度 2.90 g/cm<sup>3</sup>) とステンレススラグ微粉末 (SLS770, 1450, 5340) を用いた。SLS770, 1450, 5340 の特性として主要な化学組成、密度および比表面積を表-1 に示す。刺激剤は 48% 水酸化ナトリウム溶液 (48%NaOH) を、凝結調整剤として 50% グルコン酸溶液 (A<sub>G</sub>) を用いた。

## 2.2 試料作製

SLS 単味の炭酸化の可能性を評価するために、SLS5340 に水を徐々に加えて練り固め、プラスチック製の皿に薄く敷き均し、40℃ $\cdot$ 33%rh $\cdot$ CO<sub>2</sub> 濃度 20% の環境下で炭酸化養生を 5 日間行った。

表-1 ステンレススラグ微粉末の特性

種類	T.Fe	SiO <sub>2</sub>	Cl	CaO	MgO	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)
SLS770	4.8	19.3	<0.02	45.2	10.9	3.12	770
SLS1450	4.4	19.6	<0.02	45.8	12.1	3.12	1450
SLS5340	3.4	19.9	<0.02	46.6	12.5	3.40	5340

表-2 配合（空気量は除く）

水準	W/P* [%]	単位量[kg/m <sup>3</sup> ]						
		GB	SLS			W	48% NaOH	A <sub>G</sub>
			770	1450	5340			
AAM770	43.5	879	377	0	0	401	277	1.46
AAM1450	43.5	879	0	377	0	401	277	1.46
AAM5340	43.5	879	0	0	377	401	277	1.46

\*P=GB+SLS

また、SLS770, 1450, 5340 を混和した AAM 硬化体の各種物性を評価するために、結合材、48%NaOH と A<sub>G</sub> を混和した練混ぜ水をプラスチック製容器に順次投入し、ハンドミキサにて 5 分間の機械練りを行った。練混ぜ後、20 $\times$ 20 $\times$ 80 mm のアクリル製型枠に AAM ペーストを打ち込み、24 $\pm$ 2 時間後に脱型した。その後 20 $\times$ 20 $\times$ 20 mm と 20 $\times$ 20 $\times$ 1 mm に湿式カッターで成型し、40℃ $\cdot$ 43%rh の環境下で気中養生、または 40℃ $\cdot$ 43%rh $\cdot$ CO<sub>2</sub> 濃度 20% の環境下で炭酸化養生をそれぞれ材齢 7 日まで行い、その後 20℃ $\cdot$ 58%rh の環境下で気中養生を行った。AAM ペーストの配合を表-2 に示す。

## 2.3 実験項目

## (1) 粉末 X 線回折

炭酸化養生前後の SLS5340 単味の試料を用いて、粉末 X 線回折法により  $\gamma$ -C<sub>2</sub>S と炭酸塩鉱物である calcite に着目した分析を行った。

(2) CO<sub>2</sub> 固定量

20 $\times$ 20 $\times$ 1 mm の AAM ペースト供試体 (AAM1450) について、材齢 1 日 (炭酸化養生前) および 7 日 (炭酸化養生後) において試料を採取し、24 時間ごとの質量変化率が 0.1% 以下になるまで減圧環境下で 20℃ で乾燥させた。その後、150  $\mu$ m のふるいを全通するように試料をメノウ乳鉢で粉碎し、粉末試料を得た。その粉末試料に対して燃焼触媒酸化方式の全有機体炭素計を用

キーワード  $\gamma$ -C<sub>2</sub>S ステンレススラグ 炭酸化養生 圧縮強度 二酸化炭素固定量

連絡先 〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06 東北大学大学院工学研究科 TEL 022-795-7427

いて全炭素量 (TC) を測定した。1 回あたりの分析に用いた試料量は約 50 mg で、試料の加熱温度は 900 °C とし、炭素が検出されなくなるまで焼成した。

(3) 圧縮強度試験

20 × 20 × 20 mm の AAM ペースト供試体を用い、他条件は JIS R 5201 に準じて材齢 1, 3, 7, 14, 28 日における圧縮強度を測定した。

(4) 細孔径分布 (MIP)

水銀圧入式ポロシメーター(MIP)を用いて、AAM1450 の空隙径分布を測定した。測定用試料は材齢 28 日の 20 × 20 × 5 mm 供試体から 5 mm 角の試料を切出し、多量のアセトンにて水和を停止した後、真空乾燥および凍結乾燥で乾燥させたものを使用した。

3. 実験結果・考察

3.1 SLS5340 単味の XRD 測定結果

炭酸化養生前後の SLS5340 単味の試料の XRD 測定結果を図-1 に示す。図-1 より、炭酸化養生前後の両方で  $\gamma$ -C<sub>2</sub>S と calcite のピークが確認できるが、炭酸化養生後の方が  $\gamma$ -C<sub>2</sub>S のピークは減少し、calcite のピークは増加しており、高濃度の二酸化炭素雰囲気によって calcite が生成されたと考えられる。このことから、ステンレススラグ単味は二酸化炭素と反応し、炭酸塩鉱物のうち少なくとも calcite を生成すると考えられた。

3.2 CO<sub>2</sub> 固定量

AAM1450 における TC 測定の結果より、材齢 1, 7 日における炭素含有率から全炭素が CO<sub>2</sub> に由来するとして計算すると、質量減少率はそれぞれ 2.57 % と 15.7 % であった。この結果より、AAM1450 は炭酸化養生によって CO<sub>2</sub> を硬化体内部に固定化することが確認された。

3.3 圧縮強度および細孔径分布

図-2 より、いずれの水準においても材齢 1 日後から炭酸化養生をすることで圧縮強度は 1.3~1.5 倍ほど増加した。ここで、図-3 より、炭酸化養生によって AAM1450 の細孔径分布は微細になる方向にシフトしていた。ポルトランドセメント硬化体を対象とした既往の報告<sup>2)</sup>では、 $\gamma$ -C<sub>2</sub>S をセメントに混和し炭酸化すると、組織が緻密化し、圧縮強度が増加するとしている。本研究でも AAM 硬化体が CO<sub>2</sub> を固定化していること、細孔構造が炭酸化養生により緻密になっていることから、ステンレススラグに含有する  $\gamma$ -C<sub>2</sub>S が calcite となって硬化体の組織が緻密化した可能性がある。

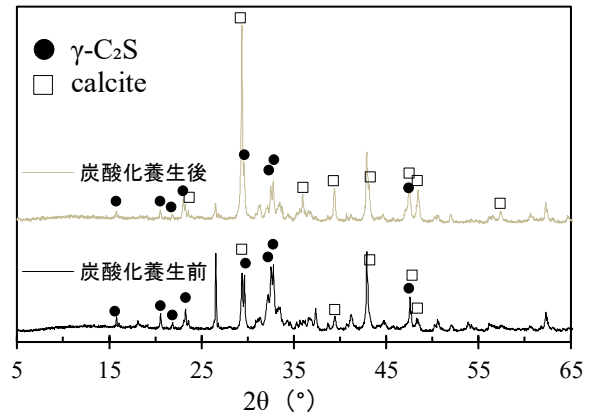


図-1 SLS5340 単味の試料の XRD の測定結果

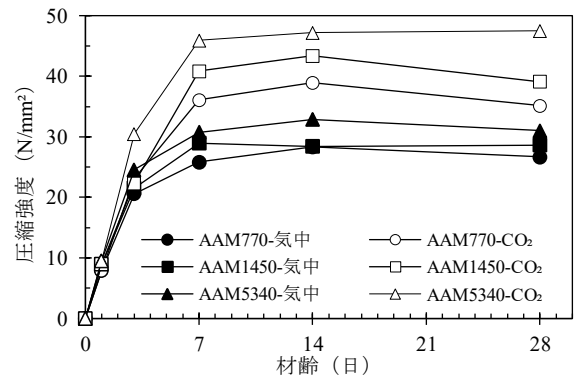


図-2 圧縮強度の試験結果

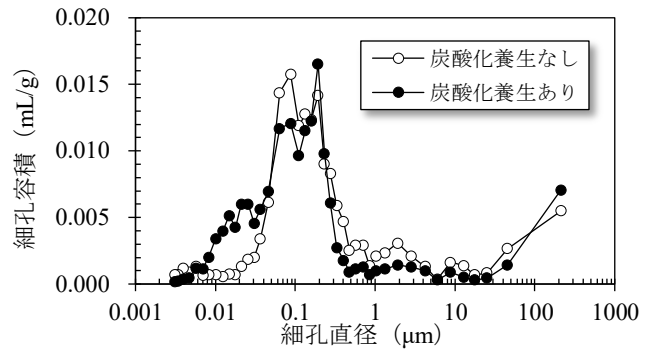


図-3 細孔径分布 (AAM1450)

4. 結論

- (1) 本研究で用いた SLS は二酸化炭素固定能を有する。
- (2) SLS を混和した高炉スラグ微粉末を主結合材とする AAM ペーストを炭酸化養生すると、CO<sub>2</sub> を硬化体内部に固定化するとともに、材齢 28 日の圧縮強度は炭酸化養生なしの硬化体と比較して増加する。

参考文献

- 1) 取達ら： $\gamma$ -2CaO・SiO<sub>2</sub> を混入して強制炭酸化したセメント系材料による環境負荷の低減, Cement Science and Concrete Technology, No.63, 2009
- 2) 宇城ら： $\gamma$ -C<sub>2</sub>S の炭酸化反応における水の影響とセメント水和物が共存した時の挙動, Cement Science and Concrete Technology, Vol.68, pp.186-191, 2014