

ステンレススラグを用いて炭酸化養生したモルタルの諸特性に関する研究

鹿島建設(株) 正会員 ○高浦雄貴 取達 剛 小林 聖 関 健吾 渡邊賢三 坂井吾郎

1. 目的

近年、炭酸化反応によるコンクリートへの CO_2 固定がカーボンリサイクル技術として大きな注目を集めている。筆者らはこれまでに、 $\gamma\text{-}2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (以下、 $\gamma\text{-C}_2\text{S}$) を普通ポルトランドセメントの一部に置換したコンクリートを高濃度の CO_2 環境下で強制的に炭酸化養生することで、無置換のものと同等以上の強度や空隙率を確保しつつ、大量の CO_2 をコンクリートに固定できることを明らかにしてきた¹⁾。また、盛岡らは、製鋼スラグは基本的に水硬性を持たないものの、一部には $\gamma\text{-C}_2\text{S}$ が含まれること、および製鋼スラグの炭酸化によって空隙が緻密化することを報告している²⁾。以上のことを踏まえて本検討では、排出源や採取時期の異なる複数のステンレススラグを用いたモルタルを炭酸化養生させ、その物性を評価した。

2. 試験概要

使用材料を表-1 に、用いた混和材の主要な化学組成と密度を表-2 に示す。排出源や採取時期が異なる5種類のステンレススラグ(SS)を用いた。SS2, SS3, SS4 は同一排出源で採取時期が異なり、SS1, SS2~SS4, および SS5 は排出源が異なるものを使用した。ステンレススラグの化学的な特徴として、SS1 は SiO_2 が少なく、SS1 や SS5 は Al_2O_3 が多い組成である。レーザー回折式粒度分布測定装置にて各混和材の粒度分布を計測するとともに、粉末 X 線回折にて鉱物組成の定性分析を実施した。

モルタルの配合を表-3 に示す。水結合材比 $W/B=45\%$ で一定とし、 $\gamma\text{-C}_2\text{S}$ またはステンレススラグを結合材の50%置換した。容量10リットルのモルタルミキサにて90秒練り混ぜて、JIS R 5201 および JIS A 1128 に準拠し、モルタルフローと空気量を測定した。フレッシュ性状確認後のモルタルを $\phi 50 \times 100\text{mm}$ の型枠に詰めて供試体採取した。打込みから1日間 20°C , $80\%\text{RH}$ にて封緘養生を行い、その後脱型して、さらに1日 20°C 水中養生を行った。材齢2日にて水から取り上げ、温度 50°C , 湿度 $50\%\text{RH}$, CO_2 濃度 20% の環境で炭酸化養生を行った。材齢7日にて JIS A 1108 に準拠して圧縮強度を計測し、材齢5, 7, 9日にて JIS A 1152 に準拠して炭酸化深さを計測した。

表-1 使用材料

材料	記号	摘要
水	W	水道水
セメント	C	普通ポルトランドセメント：密度 $3.16\text{g}/\text{cm}^3$, 比表面積 $3,310\text{cm}^2/\text{g}$
混和材	$\gamma\text{-C}_2\text{S}$	γ-イカルシウムシリケートγ相、密度 $2.85\text{g}/\text{cm}^3$, プレーン比表面積 $2,500\text{cm}^2/\text{g}$
	SS1~SS5	ステンレススラグ：密度 $3.00 \sim 3.04\text{g}/\text{cm}^3$
細骨材	S	砕砂、密度 $2.65\text{g}/\text{cm}^3$, 粗粒率 2.76
混和剤	AE	AE 剤、変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤

表-2 混和材の主要な化学組成(%)と密度

	CaO	SiO_2	Al_2O_3	MgO	Fe_2O_3	密度 g/cm^3
$\gamma\text{-C}_2\text{S}$	61.9	35.0	1.7	0.5	0.1	2.85
SS1	54.0	8.6	13.6	6.3	1.3	3.04
SS2	52.7	25.1	0.7	10.9	0.1	3.02
SS3	54.2	28.6	2.6	8.7	0.5	3.01
SS4	54.1	29.3	3.2	8.0	0.2	3.00
SS5	50.7	22.2	15.8	7.5	1.3	3.02

3. 試験結果

粉末 X 線回折にて得られたステンレススラグの主要な鉱物組成を表-4 に示す。いずれのステンレススラグも Ca を含む鉱物が主成分となっている。SS1 以外のステンレススラグには $\gamma\text{-C}_2\text{S}$ が確認された、また、いずれのステンレススラグにも、 $\text{C}_{11}\text{A}_7 \cdot \text{CaF}_2$

表-3 モルタルの配合とフレッシュ性状

記号	W/B* (%)	W/C (%)	単位量 (kg/m^3)				AE (g/m^3)	モルタルフロー (mm)	空気量 (%)
			W	C	$\gamma\text{-C}_2\text{S}$ or SS	S			
$\gamma\text{-C}_2\text{S}$	45	90	261	290	290	1326	58	150	5.0
SS1			261	290	290	1343	58	150	5.1
SS2			261	290	290	1341	58	155	3.0
SS3			261	290	290	1341	58	178	3.2
SS4			261	290	290	1340	58	179	3.9
SS5			261	290	290	1341	58	180	4.0

※ $B=C+\gamma\text{-C}_2\text{S}$

キーワード：環境配慮型コンクリート、 CO_2 吸収コンクリート、炭酸化、 $\gamma\text{-C}_2\text{S}$ 、 CO_2 、ステンレススラグ
 連絡先：〒980-0802 宮城県仙台市青葉区二日町 1-27 鹿島建設(株)東北支店 TEL 022-261-7111

またはカスピディンという、フッ素を含有する鉱物が同定された。次に、各混和材の粒度分布を図-1に示す。SS1は他に比べて比較的大きな径の粒子が多い結果となった。また、SS2~SS5の粒度は類似しており、 γ -C₂Sと近い粒度分布であった。

各配合のモルタルフローと空気量を表-3に示す。ステンレスラグを用いた場合、 γ -C₂Sに比べるとモルタルフローはやや大きくなるものの、空気量含めて大きな差は見られなかった。また、全ケースでモルタルの凝結は見られなかった。

各配合における炭酸化深さの経時変化を図-2に示す。 γ -C₂Sを用いたモルタルの炭酸化の進行が一番遅い結果となった。これは、既往の研究²⁾と同様に、 γ -C₂Sの炭酸化反応に伴う空隙の緻密化に起因していると考えられる。ステンレスラグを用いた配合においては、同一採取場所で採取時期の異なるSS2, SS3, SS4を用いたモルタルの炭酸化の進行はほぼ同程度であった。SS1やSS5を用いたモルタルの炭酸化速度は、SS2~SS4に比べて大きい結果となった。このことは、SS2~SS4の方が、SS1やSS5よりもCO₂との反応による空隙の緻密化に寄与する可能性を示唆している。

材齢7日の圧縮強度試験結果を図-3に示す。SS2~SS4を用いたモルタルの圧縮強度は、 γ -C₂Sを用いたモルタルの圧縮強度よりも高い結果となった。 γ -C₂SやSS2~SS4のステンレスラグは、CO₂との反応によって空隙が緻密化することから、炭酸化の進行が早いSS2~SS4の方が、 ϕ 50×100mmの供試体における炭酸化領域が多くなり、結果として供試体としての圧縮強度が高くなったと考えられる。一方、SS1やSS5については、強度が非常に低い結果となった。詳細な分析はできていないものの、これらのステンレスラグは、Al₂O₃が多く含有されていたことから、膨張性のある鉱物が生成され、硬化体組織が破壊された可能性も考えられる。

4. まとめ

排出源や採取時期の異なる複数のステンレスラグを用いたモルタルを炭酸化養生させ、その物性を評価した。その結果、ステンレスラグの種類によっては、炭酸化反応による高い活性を示すものが確認された。一方で、採取位置によってはコンクリートの強度低下を引き起こす可能性があるものも存在することが確認された。

参考文献

- 1) 取違ほか： γ -2CaO・SiO₂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，セメント・コンクリート論文集，No.63，pp.161-167，2009。
- 2) 盛岡実，樋口隆行：非水硬性製鋼スラグの中性化抑制効果，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.1，pp.647-652，2003。

表-4 ステンレスラグの主要鉱物組成

	ピーク強度		
	強	中	低
SS1	Ca(OH) ₂	—	C ₁₁ A ₇ ・CaF ₂
SS2	カスピディン	γ -C ₂ S, ムルグナイト	
SS3	γ -C ₂ S	カスピディン	
SS4	γ -C ₂ S, カスピディン	—	
SS5	γ -C ₂ S, C ₁₁ A ₇ ・CaF ₂	—	

カスピディン：3CaO・SiO₂・CaF₂

ムルグナイト：3CaO・MgO・SiO₂

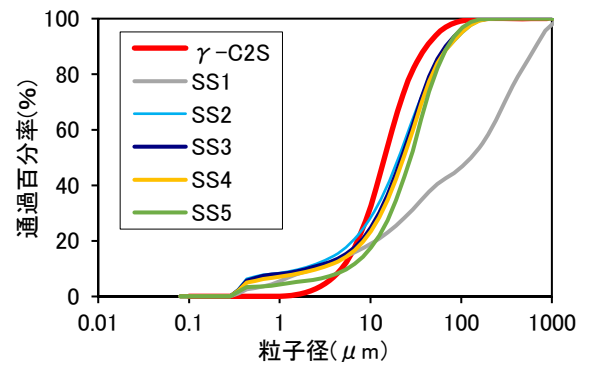


図-1 各混和材の粒度分布

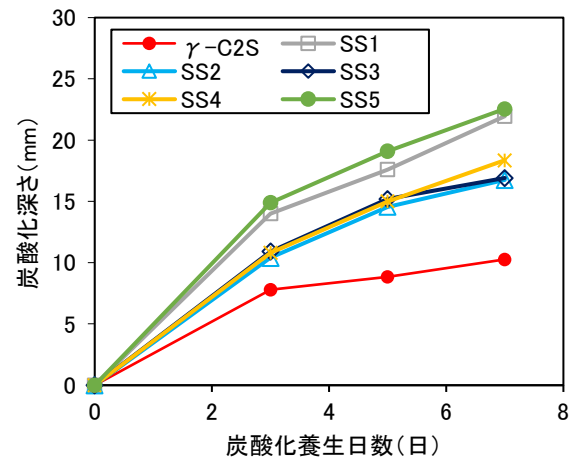


図-2 炭酸化深さの経時変化

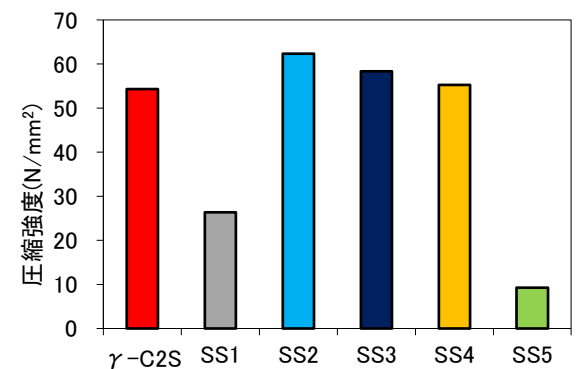


図-3 圧縮強度試験結果