

ジオポリマーの圧縮強度及び流動性に及ぼす炭酸ナトリウムの影響

UBE 三菱セメント(株) 正会員 ○久保 雄暉
UBE 三菱セメント(株) 正会員 石田 剛朗

1. はじめに

国内において、ジオポリマー（以下、GP）は、セメントを使用せず、産業副産物であるフライアッシュや高炉スラグ微粉末などの活性フィラーと、アルカリ刺激剤の組合せで生成する硬化体の総称、と一般に定義される。刺激剤には水ガラスや水酸化ナトリウムを使用するが多いが、高 pH であるため、取り扱い上、安全面の課題がある。本稿では、既往の研究¹⁾で高炉スラグ微粉末の刺激剤として実績のある炭酸ナトリウムを、水酸化ナトリウムの一部と置換し代替使用した検討について報告する。

2. 実験概要

使用材料を表 1 に、GP モルタルのベース配合を表 2 に、試験水準を表 3 に示す。本報告における GP は、水ガラスの代わりにシリカフューム（以下、SF）を溶解させて Si を供給する方法²⁾で作製しており、SF はアルカリ溶液（L）に完全に溶解するものとして配合計算を行った。なお、炭酸ナトリウム（以下、SC）についても同様に、完全溶解を仮定し L に含めて配合計算を行った。活性フィラー（F）にはフライアッシュ（以下、FA）及び高炉スラグ微粉末（以下、BS）を使用した。配合設計上の空気量は 2 %とした。遅延剤（GNa）は細骨材に置換して添加し、減水剤（Ad）及び消泡剤

表 1 使用材料

材料名	記号	密度(g/cm ³)	備考
炭酸ナトリウム	SC	2.54	試薬、高杉製薬製
苛性ソーダ ³⁾ (35%)	SH	1.38	高杉製薬製
水	w	1	実験用水
シリカフューム	SF	2.27	BET比表面積16.9m ² /g
フライアッシュ種	FA	2.29	ブレン比表面積4120cm ² /g
高炉スラグ ⁴⁾ 微粉末	BS	2.88	ブレン比表面積4850cm ² /g
海砂	S1	2.57	佐賀県唐津産
砕砂	S2	2.66	山口県美祿産
遅延剤	GNa	—	試薬、ケルコン酸ナトリウム
AE減水剤	Ad	—	主成分:リグニンスルホン酸塩
消泡剤	DF	—	主成分:非イオン界面活性剤

表 2 GP モルタルのベース配合

A/W	Si/A	単位水量	L/F	BS/F	単位量(kg/m³)						
					L			F		S	
					SH	w	SF	FA	BS	S1	S2
(mol比)	(mol比)	(kg/m³)	(vol.比)	(vol.%)							
0.20	0.30	206	1.20	30	261	36	45	328	177	679	703
				70	261	36	45	140	414	679	703

※Gna : 1.0(F×wt.%), Ad : 0.4(F×wt.%), DF : 0.012(F×wt.%)

表 3 試験水準

水準	BS/F (vol.%)	アルカリ構成比		NaOH濃度
		SC (%)	SH (%)	(SH+w) (%)
SC0	30, 70	0	100	30.7
SC30		30	70	23.7
SC50		50	50	18.2
SC70		70	30	11.8
SC90		90	10	4.3

SC 及び水酸化ナトリウム水溶液（SH）に含まれる Na の合計量を基準としたときの、SC に由来する Na の割合を変化させた水準（表 3）で検討及び評価を行った。表 3 に示すとおり、SH と水（w）の合計量中の NaOH 濃度は、SC の置換割合が増加するほど低下する。

練混ぜにはホバートミキサを使用した。SC、FA、BS、SF 及び細骨材を投入して 30 秒間空練りした後、SH、水及び混和剤を投入して 90 秒間練り混ぜを行い、かき落としを行った後、再度 90 秒間練混ぜを行った。

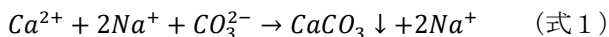
15 打フロー（JIS R 5201 準拠）及び材齢 28 日の圧縮強度（Φ 5×10cm）を測定した。養生条件は、20℃封かん養生と、最高温度 60℃ 3 時間の蒸気養生後に 20℃ 気中養生を行う 2 種類とした。

キーワード ジオポリマー、刺激剤、炭酸ナトリウム、圧縮強度、流動性

連絡先 〒755-8633 山口県宇部市小串沖の山 1-6 UBE 三菱セメント(株) 研究所 コンクリート研究室 TEL0836-22-6153

3. 実験結果及び考察

門田ら³⁾は、練混ぜ直後の SC と BS の反応について、以下の式のように、溶解した CO_3^{2-} と BS から溶出した Ca^{2+} が反応して CaCO_3 が沈殿し、液中の Na^+ 濃度が増加 (pH が上昇) すると考察している。



これを踏まえて以下に考察を行う。15 打フローを図 1 に、圧縮強度を図 2 に、SC0 に対する圧縮強度比を図 3 に示す。

3. 1 流動性

(式1) のように CaCO_3 の沈殿が生じると流動性の低下を招く可能性も考えられたが、SC0 と比較して、SC30, 50 では、いずれの BS 割合でも 15 打フローが増加した。一方、SC70 以降では 15 打フローが大幅に低下し、BS70・SC90 では、流動性の悪化が著しく、練混ぜ不可であった。フロー低下の原因としては、SC の量が過多でその溶解度も高くないため、練混ぜ直後には SC が溶解し切らずフィラーとして残存したこと、更に溶液の pH が上昇せず SF も溶解し難かったことにより、配合設計上よりもフィラー量が多くなったためと考えられる。

3. 2 圧縮強度

SC0 と比較して、BS30 の場合、封かん養生では SC70 まで、蒸気養生では SC50 まで圧縮強度が増加し、以降は急激に低下した。一方、BS70 の場合、いずれの養生条件でも SC の割合が増加するほど、圧縮強度が増加した (ただし、SC90 は前述のとおり練混ぜ不可)。

SC 置換した際の pH 上昇の上限値は SC0 と同じと考えられるにも関わらず、圧縮強度が増加した原因は、本研究の範囲内では明確ではないが、(式1) により生成する CaCO_3 や BS からの Ca^{2+} 溶出の促進、 CO_3 を含む水和物の生成などが影響を及ぼしている可能性が考えられる。

また、SC70 において蒸気養生の BS30 のみ強度が低下したが、この原因については、相対的に BS からの Ca^{2+} 溶出量が少ないために CO_3^{2-} の消費速度が遅く、SC が溶解し切っていない状態のまま、蒸気養生により反応が促進され、硬化体の骨格が早期に形成されたためと推察される。

一方、圧縮強度比は、BS70 よりも BS30 の方が高い傾向が見られる。BS 割合が多い方が Ca^{2+} の溶出量が多いために (式1) の反応が促進されて pH が上昇し、SC の刺激剤としての効果が高まるとも考えられたが、結果は逆の傾向となった。

4. まとめ

SC を水酸化ナトリウムに置換し刺激剤として使用した場合、本研究の範囲内では、SC の割合が 50% までは流動性が向上し、50~70% までは圧縮強度が増加した。よって、SC の GP 刺激剤利用は有用である可能性があるが、その反応機構は不明な点が多く、機構解明や諸物性の評価など、更なる検討が必要と考えられる。

参考文献

- 1) 後藤ほか：高炉水砕スラグーアルカリ刺激剤系セメント硬化体の性質，セメント技術年報，41，pp.50-53，1987
- 2) 上原ほか：ジオポリマー硬化体の種々の配合，作製法における生成物と pH 等諸性質との関係，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.1，pp.2325-2330，2016
- 3) 門田ほか： Na_2CO_3 水溶液の高炉スラグ・フライアッシュ系結合材による固化，セメント・コンクリート論文集，Vol.67，pp.52-58，2013

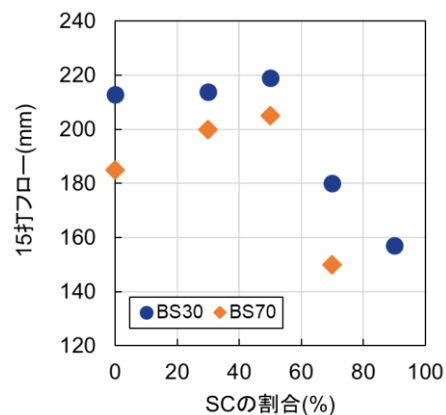


図1 15 打フロー

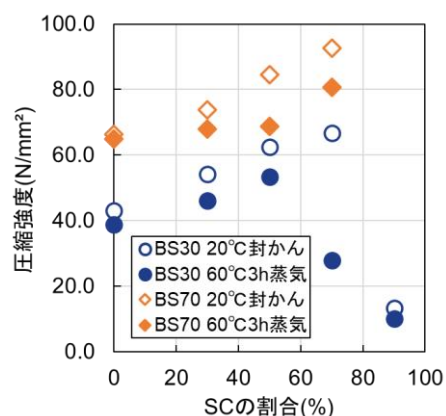


図2 圧縮強度 (材齢 28 日)

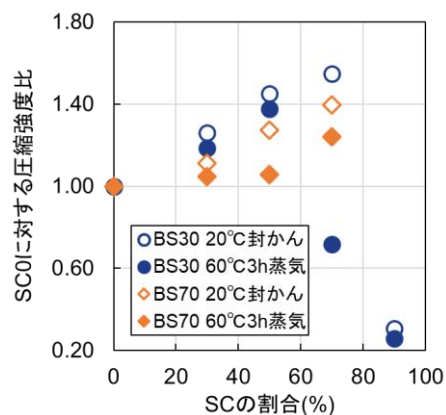


図3 圧縮強度比