

高炉スラグ細骨材を使用したコンクリートの収縮低減メカニズムの考察

日本大学	露木 尚光
竹本油脂(株)	正会員 ○木之下光男
JFE ミネラル(株)	正会員 吉澤 千秋
竹本油脂(株)	正会員 齊藤 和秀

1. はじめに

コンクリートの乾燥収縮は主にセメントペースト(以下ペースト)中の水分が乾燥することにより生じる。骨材はセメントペーストの収縮を拘束し、コンクリートの収縮を低減するが、その効果は骨材の種類によって異なる。筆者らは既に高炉スラグ細骨材(以下スラグ細骨材)のコンクリートの収縮低減効果が天然細骨材に比較して大きいことを報告した¹⁾。そのメカニズムについては、スラグ細骨材自体の乾燥収縮が小さいことや潜在水硬性による骨材表面組織の緻密化等が考えられるが、十分には解明されていない。そこで本研究では、モルタル試験により、スラグ細骨材の収縮低減効果を再確認すると共に、モルタル中の骨材界面を分析することにより、スラグ細骨材の収縮低減メカニズムの解明を試みた。

2. 実験概要

2. 1 使用材料

使用材料を表-1 に示す。本研究では、スラグ細骨材として現在その特性を調査中^{2,3)}である粗粒スラグ細骨材(SG)を選定した。

2. 2 試験方法

モルタルの配合は、水セメント比 40%, S/C=1.5(容積比)とした。なお、空気量の影響をなくすため消泡剤を使用して NON-AE とした。モルタルの練混ぜは JIS R 5201 に準拠して行った。乾燥収縮の試験体は 4×4×16cm のサイズ、測定は JIS A 1129-3 に準拠し、供試体成形 24 時間後に脱型し、材齢 7 日まで標準水中養生後の長さを基長として温度 20℃、湿度 60%RH の室内で乾燥期間 8 週まで測定した。分析用の試料は、SG そのものおよび SG を用いた水セメント比 35%, S/C=1.8(容積比)のモルタル試験体(φ5×10cm)を材齢 91 日まで標準水中養生後に破碎し、細骨材粒子を取り出したものとした。

3. 実験結果および考察

3. 1 モルタル試験結果

モルタルの乾燥収縮試験結果を図-1 に示す。SG は天然の陸砂 S1 に対して約 350×10^{-6} 、一般に収縮が小さ

表-1 使用材料

種類	記号	産地・性質
セメント	N	普通ポルトランドセメント(密度 3.16g/cm ³)
細骨材	SG	千葉産高炉スラグ細骨材(JIS A 5011-1 コンクリート用スラグ骨材 第 1 部: 高炉スラグ骨材, 区分 BFS5, 密度 2.79g/cm ³ , 吸水率 1.10%, FM3.45)
	S1	大井川産陸砂(密度 2.59g/cm ³ , 吸水率 2.10%, FM2.84)
	S2	秩父産石灰砕砂(密度 2.66g/cm ³ , 吸水率 1.12%, FM2.81)

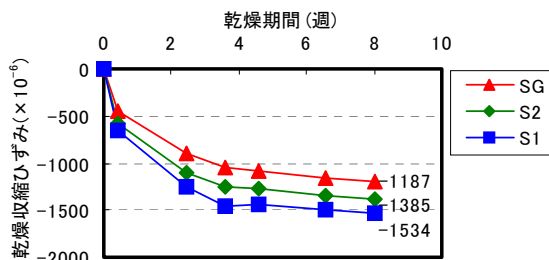


図-1 乾燥収縮試験結果

いとされている石灰砕砂 S2 に対しても約 200×10^{-6} の収縮低減効果を示した。

3. 2 分析結果

骨材粒子表面から 1 ナノメートルの深さの元素を XPS(X 線光電子分光分析)により分析した結果を図-2 に示す。処理前(SG 粒子)では Ca, Si, Al, Na, C, O が、処理後(モルタルから採取した SG 粒子)では処理前の元素に加え、S(硫黄)が同定されたがその量は微量である。このことから、処理前の粒子には S は存在せず、処理後の粒子にはセメント由来の S が存在すると推察される。

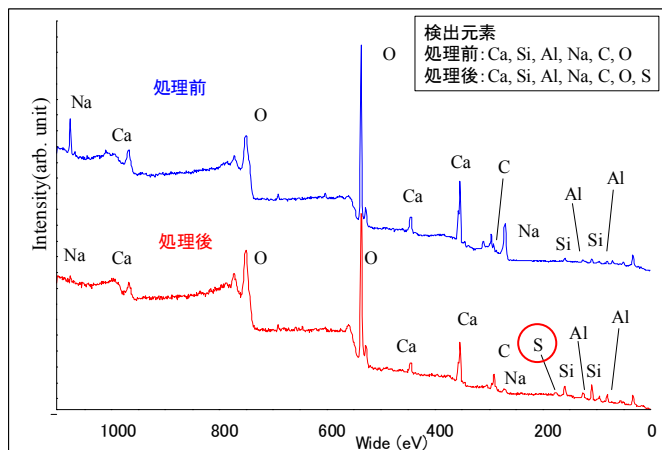


図-2 XPS による表面分析結果

キーワード：高炉スラグ細骨材，乾燥収縮，自己収縮，コンクリート，メカニズム，耐久性

連絡先：〒443-8611 愛知県蒲郡市港 2-5 竹本油脂(株)第三事業部 TEL0533-68-2194 FAX0533-68-1339

骨材表面を SEM により観察し、さらに EPMA(深さ方向 1 マイクロメートル)のカラーマップにより、Ca,Si,Al,S を調べた結果を図-3 および図-4 に示す。Ca,Si,Al が黄色く表示され、含有することが認められるが、S は骨材表面には少なくとも CaSO_4 としてサブミクロン以上の厚みで濃化は認められず、試料内部に偏析して存在することが認められた。このことから、スラグ細骨材の表面には Ca,Si,Al が多く存在することがわかる。

モルタルから採取した SG 粒子の粉末 X 線回折による同定結果を図-5 に示す。解析により $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、ゲーレンナイト水和物(C_2ASH_8)、ゲーレンナイト(C_2AS)、 CaCO_3 、エトリンガイドおよびモノサルフェートの存在が確認された。このうち $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、エトリンガイド、モノサルフ

エートは、セメントの水和により生成したものである。従って、XPS で検出された S はエトリンガイドかモノサルフェート由来であると推察されるが、スラグ細骨材表面にわずかな量しか存在しないと考えられる。一方、 C_2AS はスラグ細骨材中にガラス質および結晶質として存在するもので、 CaO 、 Al_2O_3 、 SiO_2 からなる。結晶質の C_2AS は水和せずこのまま存在するものと考えられる。 C_2ASH_8 はガラス質の C_2AS がセメントのアルカリ刺激によりガラス構造が壊れ水和し、生成したものである⁴⁾。 C_2AS の水和は以下の式で表される。



以上の分析結果をまとめると、スラグ細骨材の収縮低減メカニズムは、スラグ細骨材表面に存在するガラス質の C_2AS が水和して C_2ASH_8 の水和層を形成することによるものと考えられる。すなわち、 C_2ASH_8 は C_2AS よりも体積が大きい(推定約 1.5 倍)ため、骨材表面に緻密な水和層を形成し、乾燥収縮を増加させるポーラスな遷移帯の形成が少ないためである。このことはスラグ細骨材を使用したコンクリートの質量減少率が小さい¹⁾ことの理由の 1 つと考えられる。また、 C_2ASH_8 への水和は長期に渡り持続するため、乾燥収縮の低減効果も長期に渡り持続するものと考えられる。

今後、スラグ細骨材周辺の空隙構造の測定等により収縮低減メカニズムを実証する予定である。

4. まとめ

モルタルによる乾燥収縮測定およびスラグ骨材粒子界面を分析し、本研究の範囲で以下の知見を得た。

- (1) モルタルによる乾燥収縮試験からスラグ細骨材の乾燥収縮低減効果が石灰砕砂および陸砂よりも大きいことが確認できた。
- (2) スラグ細骨材の収縮低減メカニズムの 1 つとして、スラグ骨材表面にゲーレンナイトが生成し、これがさらに骨材表面に長期に渡りゲーレンナイト水和物を生成し緻密な水和層を形成するためと推察された。

【参考文献】

- 1) 齊藤和秀, 木之下光男, 伊原俊樹, 梅原秀哲, 吉澤千秋: 高炉スラグ細骨材を使用した耐久性向上コンクリートの性質(その 1~2), 土木学会第 64 回年次学術講演会, pp.473-476, 2009.9
- 2) 齊藤和秀, 木之下光男, 小林竜平, 吉澤千秋: 粗粒高炉スラグ細骨材を使用したコンクリートの特性, 土木学会第 66 回年次学術講演会, 投稿中, 2011.9
- 3) 吉澤千秋, 齊藤和秀, 木之下光男, 露木尚光: 粗粒高炉スラグ細骨材を使用した高強度コンクリートの特性, 土木学会第 66 回年次学術講演会, 投稿中, 2011.9
- 4) 露木尚光, 小笠原直仁, 笠井順一, 飯島善時: ゲーレンナイト組成ガラスの水和および $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の刺激効果: Gypsum&Lime, No.247, pp.42-48, 1993

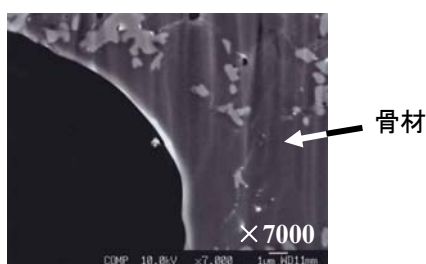


図-3 SEM による骨材表面の状態

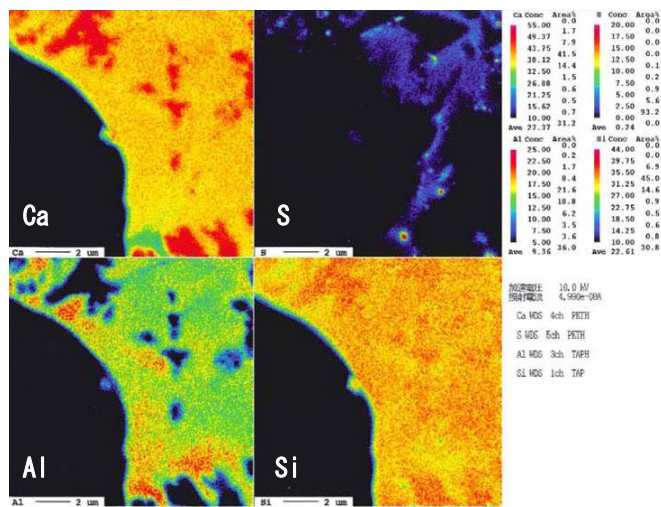


図-4 EPMA カラーマッピング画像

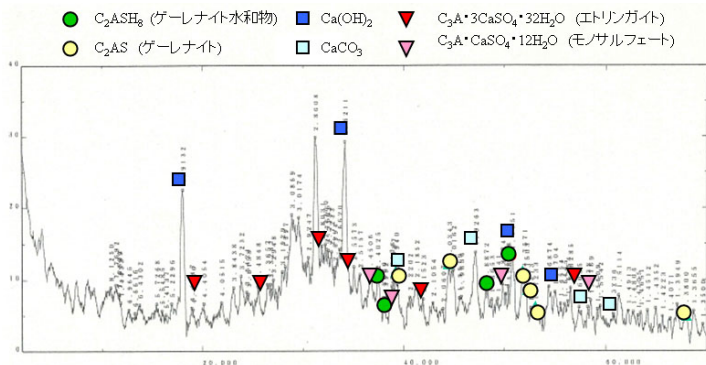


図-5 モルタル中の SG 粒子の粉末 X 線回折による分析結果