

# 論文 高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの強度, 収縮, クリープおよびアルカリシリカ反応抑制効果に関する研究

藤井 隆史\*1・綾野 克紀\*2

**要旨:** 本研究では, 細骨材の全量に高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの圧縮強度, 静弾性係数, 引張強度, 曲げ強度, 乾燥収縮, クリープおよびアルカリシリカ反応抑制効果について, 砂岩砕砂を用いたものと比較検討した。高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの静弾性係数は, 同じ圧縮強度の砂岩砕砂を用いたものに比べて大きくなるが, 引張強度および曲げ強度は, 砂岩砕砂を用いたものと同程度である。一方, 高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮およびクリープは, 砂岩砕砂を用いたものに比べて小さくなる。また, 細骨材に高炉スラグ細骨材を用いれば, 粗骨材のアルカリシリカ反応による膨張が抑制される。

**キーワード:** 高炉スラグ細骨材, 静弾性係数, 引張強度, 曲げ強度, 乾燥収縮, クリープ, ASR

## 1. はじめに

高炉で鉄鉄を製造される際に副産される高炉水砕スラグは, その多くがセメント原料やコンクリートの材料として用いられている。高炉水砕スラグは, 主にスラグを微粉化した高炉スラグ微粉末を結合材もしくは混合セメントとしてコンクリートの材料に用いられることが多い。一方で, 高炉水砕スラグは, 粒度分布を調整したものをコンクリート用骨材として用いることも可能である。高炉スラグ細骨材をコンクリートの細骨材として用いることで, 塩化物イオンの浸透抑制<sup>1)</sup>, 耐硫酸性の向上<sup>2)</sup>, AE 剤を用いることなく凍結融解抵抗性が得られる<sup>3)</sup>等, コンクリート構造物を長寿命化することが可能なことが示されている。

本研究は, 細骨材に高炉スラグ細骨材のみを用いたコンクリートの強度, 収縮, クリープおよびアルカリシリカ反応抑制効果に関して結果を取りまとめたものである。細骨材に高炉スラグ細骨材のみを用いたコンクリートの引張強度および曲げ強度は, 同じ圧縮強度の砕砂を用いたコンクリートに比べて同程度であること, 静弾性係数は同じ圧縮強度の砕砂を用いたものと比べて大きいこと, 乾燥収縮およびクリープは小さいことを示す。また, 高炉スラグ細骨材には, 粗骨材のアルカリシリカ反応による膨張を抑制する効果があることも示す。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料および配合

本実験に使用した骨材の表乾密度, 吸水率および粗粒率を表-1 に示す。高炉スラグ細骨材は, 製造工場の異なる3種類の高炉スラグ細骨材を実験に用いた。A工場, B工場およびC工場で生産される高炉スラグは, それぞれ, JIS A 5011-1 の BFS1.2, BFS5 および BFS5-0.3 の粒

度に区分されるものである。比較には, 硬質砂岩砕砂(以下, 砂岩砕砂)を用いた。粗骨材には, 硬質砂岩砕石(以下, 砂岩砕石)を用いた。また, アルカリシリカ反応の抑制効果に関する実験では, 粗骨材に, アルカリシリカ反応性を有する砕石(以下, 反応性砕石)および川砂利(以下, 反応性川砂利)を用いた。セメントには, 普通ポルトランドセメント(密度: 3.15g/cm<sup>3</sup>, ブレーン値: 3,350cm<sup>2</sup>/g)を用いた。

本実験に用いた砂岩砕砂および砂岩砕石を用いた配合を表-2 に示す。水セメント比は25~65%とし, 単位水量は 175kg/m<sup>3</sup> および 155kg/m<sup>3</sup> とした。単位水量が 175kg/m<sup>3</sup> のものは, 高性能 AE 減水剤および AE 助剤を用いた AE コンクリートとした。単位水量が 155kg/m<sup>3</sup> のものは, 高性能減水剤を用いた Non-AE コンクリートとした。砂岩砕砂および砂岩砕石以外の骨材を用いる場合には, 細骨材および粗骨材の全量を体積一定として置換して用いた。

### 2.2 試験方法

#### (1) 圧縮強度, 静弾性係数, 引張強度, 曲げ強度

圧縮強度および静弾性係数の測定は, φ100×200mm の

表-1 骨材の諸物性

種類	表乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	吸水率 (%)	粗粒率
BFS (A 工場)	2.72	0.58	2.16
BFS (B 工場)	2.67	0.87	2.90
BFS (C 工場)	2.73	2.61	3.78
砂岩砕砂	2.65	1.77	3.04
砂岩砕石	2.74	0.64	6.87
反応性砕石	2.64	1.09	—
反応性川砂利	2.61	1.34	—

\*1 岡山大学大学院 環境生命科学研究科環境科学専攻准教授 博士(工学) (正会員)

\*2 岡山大学大学院 環境生命科学研究科環境科学専攻教授 博士(工学) (正会員)

表-2 コンクリートの配合

W/C (%)	空気量 (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				混和剤 (C×%)		
			水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	高性能 AE 減水剤	AE 助剤	高性能 減水剤
25	4.5	39.0	175	700	592	932	1.2	0.006	0.0
35		41.0		500	693	1,004	0.8		
45		42.0		389	750	1,043			
55		43.0		318	794	1,060			
65		45.0		269	850	1,047			
25	2.0	40.0	155	620	683	1,033	0.0	0.000	1.0
30		41.0		517	737	1,069			
35		42.0		443	782	1,088			
40		43.0		388	821	1,096			
50		45.0		310	889	1,095			
60		47.0		258	950	1,079			

円柱供試体を用い、JIS A 1108 および JIS A 1149 に従って行った。コンクリートのひずみの測定には、コンプレッソメータを用いた。引張強度の測定は、φ100×200mm の円柱供試体を用い、JIS A 1113 に従って行った。曲げ強度の測定には、100×100×400mm の角柱供試体を用い、JIS A 1106 に従って、支間長を 300mm とした 3 等分点载荷によって行った。いずれの供試体も、水中養生完了後に直ちに試験を行った。

(2) 乾燥収縮およびクリープ

乾燥収縮ひずみの測定には、100×100×400mm の角柱供試体を用いた。供試体は、脱型直後から材齢 7 日まで水中で養生を行った。水中養生完了後、直ちに変位を測定するための測定用ゲージを、打設面およびその反対面を除く 2 面にそれぞれ 2 対貼り付けて、長さ変化の測定を開始した。長さ変化の測定は、JIS A 1129-2 に示されるコンタクトゲージ法により、ホイットモア式ひずみ計(検長:250mm, 最小目盛り:1/1,000mm)を用いて測定した。乾燥収縮ひずみの測定は、温度が 20±2℃で、相対湿度が 60±5%の恒温恒湿度室内で行った。

クリープひずみの測定には、100×100×380mm の角柱供試体を用いた。供試体の中心には、拘束用の PC 鋼棒を通すために、塩化ビニル管(外径 24mm, 内径 20mm)を埋め込んだ。供試体は、脱型直後から材齢 7 日まで水中養生を行い、その後は、温度が 20±2℃, 相対湿度が 60±5% の恒温恒湿度室内に設置した。クリープひずみ測定用供試体への持続応力の導入には、PC 鋼棒を用いた。クリープ測定用供試体への载荷は、材齢 14 日に行った。クリープ測定用供試体には、同じ条件で養生を行ったφ100×200mm の円柱供試体 3 本の平均圧縮強度の 20%の応力を载荷した。コンクリートの乾燥収縮、クリープおよび PC 鋼棒のリラクゼーションなどによる持続

荷重の減退が 5%以内になるように、初期载荷後 2 日目、9 日目、30 日目、72 日目、128 日目、182 日目および 245 日目に応力を再度導入した。長さ変化の測定は、JIS A 1129-2 に示されるコンタクトゲージ法により、ホイットモア式ひずみ計(検長:250mm, 最小目盛り:1/1,000mm)を用いて測定した。

(3) アルカリシリカ反応性試験

アルカリシリカ反応性試験では、粗骨材にアルカリシリカ反応性を有する反応性砕石および反応性川砂利を用いた。アルカリには、試薬特級の水酸化ナトリウムまたは塩化ナトリウムを用い、練混ぜ水に溶かして添加した。試験には、両端面にゲージプラグを埋め込んだ 100×100×400mm の角柱供試体を用いた。コンクリートは、打込み後 24 時間型枠内で養生し、脱型後に直ちに、JIS A 1129-3 に従って基長の測定を行った。供試体は、基長の測定後、十分に水を含ませた布で覆った後、ポリエチレンラップで包み、さらにビニル袋の中で密閉して、温度 40±2℃に保たれた定温器内に貯蔵した。測定は、1 ヶ月毎とし、測定 24 時間前に 20±2℃の恒温室内に移動して温度が一定になった後に、長さ変化の測定を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 圧縮強度および静弾性係数

図-1 および図-2 は、それぞれ、AE 剤を用いたコンクリートの材齢 28 日および 91 日における圧縮強度に細骨材の種類が与える影響を示したものである。図中の●、○および□は、それぞれ、A 工場、B 工場および C 工場で生産された高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの結果を示している。▲は、砂岩砕砂を用いたものの結果を示している。図-1 より、高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの材齢 28 日における圧縮強度は、砂岩砕

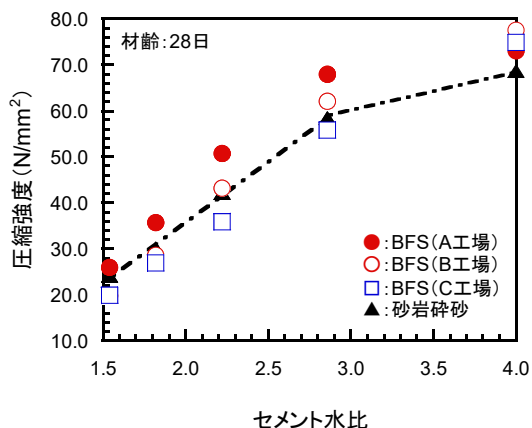


図-1 材齢 28 日における圧縮強度

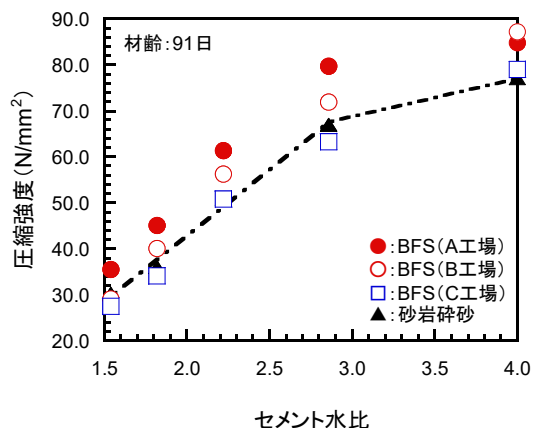


図-2 材齢 91 日における圧縮強度

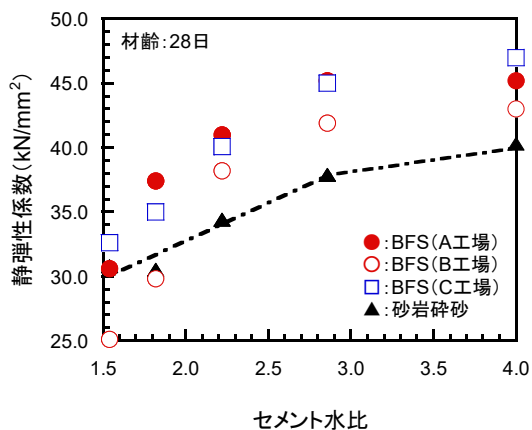


図-3 材齢 28 日における静弾性係数

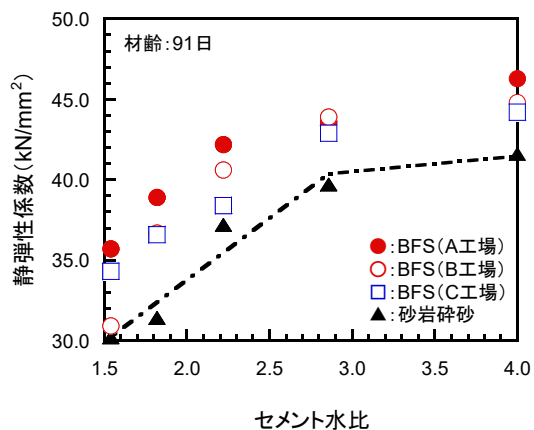


図-4 材齢 91 日における静弾性係数

砂を用いたものと同程度である。一方、図-2 に示す材齢 91 日における圧縮強度では、いずれの工場で生産された高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートも、砂岩砕砂を用いたものと同程度か大きいことがわかる。高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートは、高炉スラグ細骨材が水和反応を生じることで、砂岩砕砂を用いたものよりも長期にわたって強度が大きくなると考えられる。

図-3 および図-4 は、それぞれ、AE 剤を用いたコンクリートの材齢 28 日および 91 日における静弾性係数に細骨材の種類が与える影響を示したものである。材齢 28 日における静弾性係数では、水セメント比が 55% および 65% (セメント水比で 1.82 および 1.54) の B 工場製の高炉スラグ細骨材を用いたものが砂岩砕砂を用いたもの比べて小さくなっているが、概ね高炉スラグ細骨材を用いたものは、砂岩砕砂を用いたもの比べて静弾性係数が大きい傾向にあることがわかる。また、材齢 91 日における静弾性係数では、いずれの工場で生産された高炉スラグ細骨材を用いたものも砂岩砕砂を用いたもの比べて大きくなっている。図-5 は、種々の細骨材を用いたコンクリートの材齢 7 日、28 日および 91 日における圧縮強度と静弾性係数の関係を示したものである。高炉スラグ細骨材を用いたものの静弾性係数は、同じ強度の砂

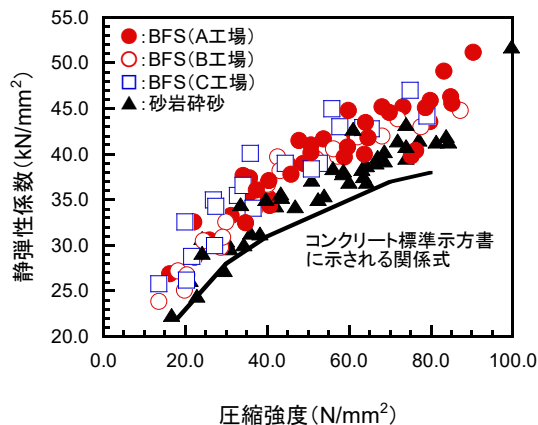


図-5 静弾性係数と圧縮強度の関係

岩砕砂を用いたコンクリートに比べて、大きい傾向にあることが分かる。図中の曲線は、2012 年制定土木学会コンクリート標準示方書 [設計編] に示される普通コンクリートの圧縮強度とヤング係数の関係式であるが、高炉スラグ細骨材を用いたものの静弾性係数は、コンクリート標準示方書に示される関係式に比べて、大きい値になることが、この図からわかる。

### 3.2 引張強度および曲げ強度

図-6 は、材齢 28 日における引張強度を示したものである。これらのコンクリートは、高性能減水剤が用いら

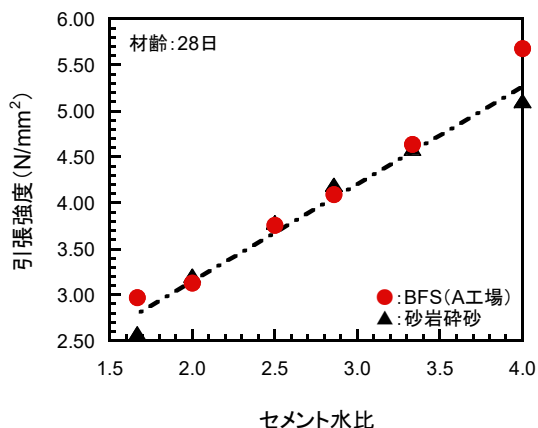


図-6 材齢 28 日における割裂引張強度

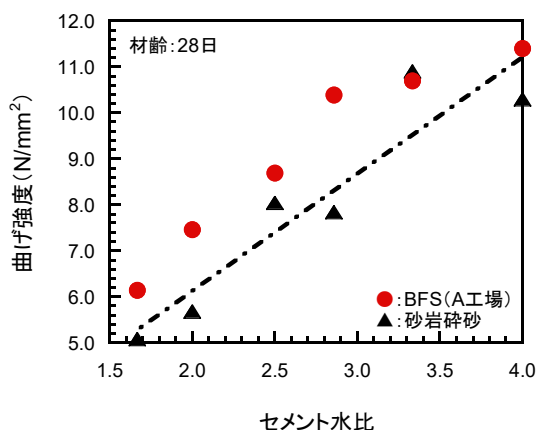


図-8 材齢 28 日における曲げ強度

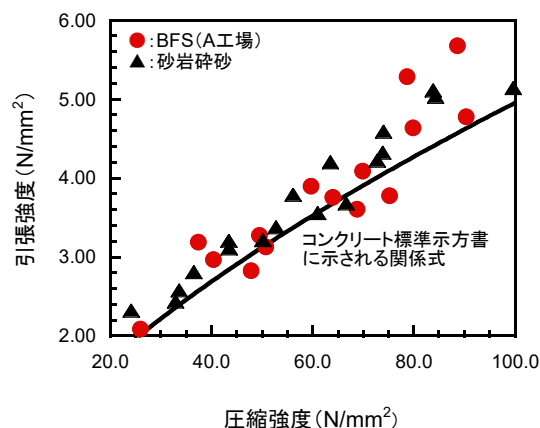


図-7 割裂引張強度と圧縮強度の関係

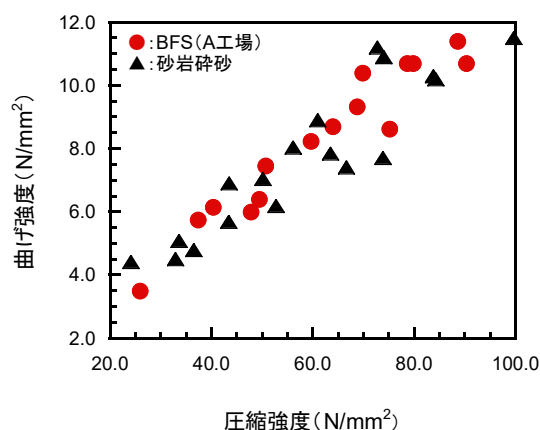


図-9 曲げ強度と圧縮強度の関係

れた単位水量が  $155\text{kg}/\text{m}^3$  の配合のものである。同じ水セメント比の場合、高炉スラグ細骨材を用いたものの引張強度は、砂岩砕砂を用いたものとはほぼ同じであることが分かる。図-7 は、高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの圧縮強度と引張強度の関係を、砂岩砕砂を用いたものと比較して示したものである。この図には、図-6 の結果も含めた材齢 7 日、28 日、91 日の結果が示されている。高炉スラグ細骨材を用いたものの圧縮強度と引張強度の関係は、砂岩砕砂を用いたものと、ほぼ同じであることが分かる。図中の曲線は、2012 年制定土木学会コンクリート標準示方書 [設計編] に示される圧縮強度と引張強度との関係式を示したものであるが、本実験の結果は、いずれの骨材を用いたものも、コンクリート標準示方書に示される関係式とほぼ同じであった。

図-8 は、材齢 28 日における曲げ強度を示したものである。これらのコンクリートは、高性能減水剤が用いられた単位水量が  $155\text{kg}/\text{m}^3$  の配合のものである。同じ水セメント比の場合、高炉スラグ細骨材を用いたものの曲げ強度は、砂岩砕砂を用いたものより同じか若干大きい傾向にある。図-9 は、高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの圧縮強度と曲げ強度の関係を、砂岩砕砂を用いたものと比較して示したものである。この図には、図-

8 の結果も含めた材齢 7 日、28 日、91 日の結果が示されている。高炉スラグ細骨材を用いたものの圧縮強度と曲げ強度の関係は、砂岩砕砂を用いたものと、ほぼ同じであることが分かる。

### 3.3 乾燥収縮およびクリープ

図-10 は、水セメント比が 35% の AE コンクリートの乾燥収縮ひずみに、細骨材の種類が与える影響を示したものである。高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみは、砂岩砕砂を用いたものに比べて、小さいことがわかる。図-11 は、水セメント比が 25% から 55% の高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみの最終値を、砂岩砕砂を用いたものと比較して示したものである。ただし、乾燥収縮ひずみの最終値は、乾燥収縮ひずみと乾燥期間の実験値の関係を次式に示される双曲線により回帰し、求めたものである。

$$\varepsilon_{sh}(t) = \frac{\varepsilon_{sh\infty} t}{\beta + t} \quad (1)$$

ここに、 $\varepsilon_{sh}(t)$  は、乾燥期間  $t$  (日) における乾燥収縮ひずみ ( $\times 10^{-6}$ ) で、 $\varepsilon_{sh\infty}$  は、乾燥収縮ひずみの最終値 ( $\times 10^{-6}$ ) で、 $\beta$  は、乾燥収縮ひずみの経時変化を表す項である。

いずれの工場で作られた高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートも、砂岩砕砂を用いたものに比べて乾燥

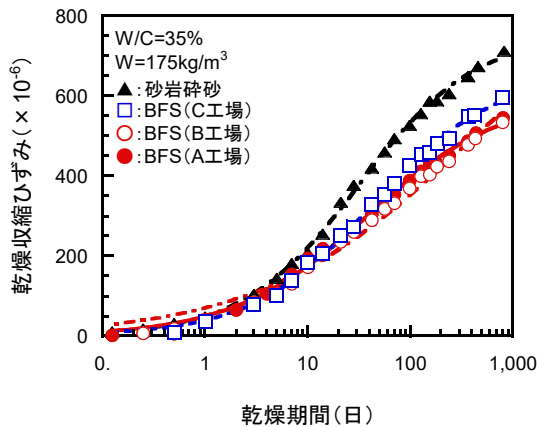


図-10 乾燥収縮ひずみの測定結果

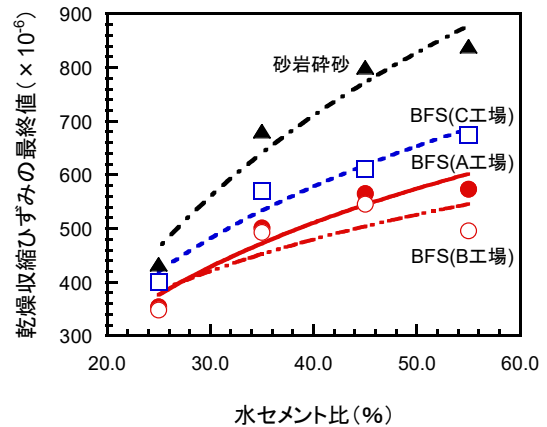


図-11 乾燥収縮ひずみの最終値

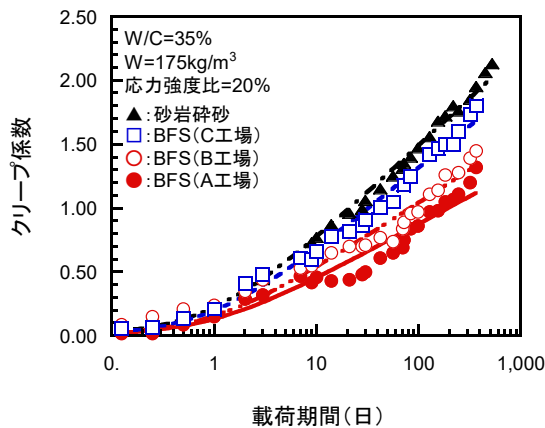


図-12 クリープ係数の測定結果

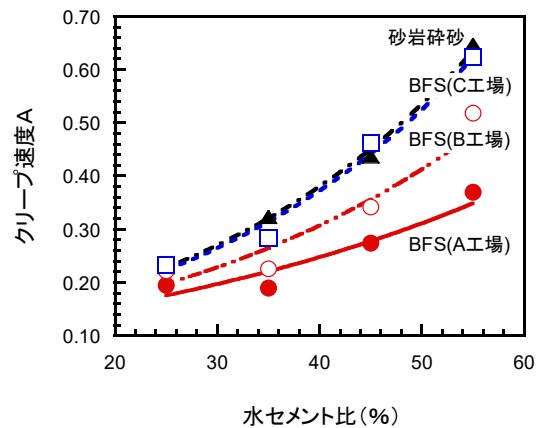


図-13 クリープ速度

収縮ひずみの最終値が小さいことがわかる。A 工場、B 工場およびC工場で生産された高炉スラグ細骨材の吸水率は、それぞれ、0.58%、0.87%および2.61%であるが、吸水率が小さい A 工場製および B 工場製の高炉スラグ細骨材を用いたものの乾燥収縮ひずみの最終値が、より小さいことがわかる。

図-12は、水セメント比が35%のAEコンクリートのクリープ係数に、細骨材の種類が与える影響を示したものである。C工場で生産された高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートのクリープ係数は、砂岩砕砂を用いたものに比べて同程度であるのに対し、A工場およびB工場で生産された高炉スラグ細骨材を用いたものでは、砂岩砕砂を用いたものよりも小さいことがわかる。図-13は、水セメント比が25%から55%の高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートのクリープ速度を、砂岩砕砂を用いたものと比較し示したものである。ただし、クリープ速度  $A$  は、クリープ係数と载荷期間の実験値の関係を次式に示される曲線により回帰し、求めたものである。

$$\phi(t) = A \cdot \log_e(t+1) \quad (2)$$

ここに、 $\phi(t)$ は、载荷期間  $t$ (日)におけるクリープ係数で、 $A$ は、クリープ速度である。

吸水率の大きいC工場で生産された高炉スラグ細骨材

を用いたコンクリートのクリープ速度は、砂岩砕砂を用いたものとほぼ同じである。一方、A工場およびB工場で生産された高炉スラグ細骨材を用いたものは、砂岩砕砂を用いたものよりも小さいことがわかる。とくに、吸水率が最も小さいA工場で生産された高炉スラグ細骨材を用いたもののクリープ速度は、より小さくなっている。

### 3.4 アルカリシリカ反応

図-14は、水セメント比が35%のAE剤を用いない単位水量が155kg/m<sup>3</sup>の配合のコンクリートにおいて、粗骨材の全量に反応性砕石を用いたもののアルカリシリカ反応による膨張に細骨材の種類が与える影響を示したものである。アルカリには、水酸化ナトリウムを用い、酸化ナトリウム当量で2.4kg/m<sup>3</sup>、3.6kg/m<sup>3</sup>および4.8kg/m<sup>3</sup>を添加している。砂岩砕砂を用いたものは、水酸化ナトリウムの添加量が増加するにつれて、アルカリシリカ反応による膨張量が大きくなっているのに対し、A工場製の高炉スラグ細骨材を用いた場合には、水酸化ナトリウムを酸化ナトリウム当量で4.8kg/m<sup>3</sup>添加したもののでも、6か月後の膨張量は0.05%程度に抑えられていることがわかる。図-15は、粗骨材の全量に反応性川砂利を用いたコンクリートのアルカリシリカ反応による膨張量に細骨材の種類が与える影響を示したものである。アルカリに

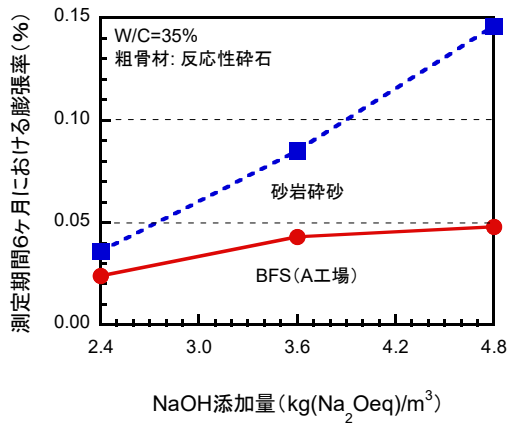


図-14 反応性砕石を用いたコンクリートの膨張量

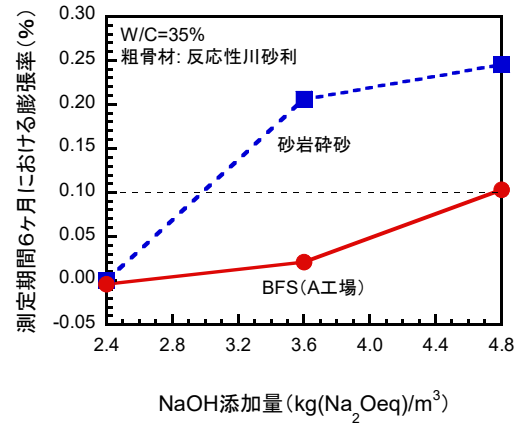


図-15 反応性川砂利を用いたコンクリートの膨張量 (NaOH の場合)

は、水酸化ナトリウムを用い、酸化ナトリウム当量で 2.4kg/m<sup>3</sup>、3.6kg/m<sup>3</sup>および 4.8kg/m<sup>3</sup>を添加している。反応性砕石を用いた場合と同様に、A 工場製の高炉スラグ細骨材を用いたものは、砂岩砕砂を用いたものに比べてアルカリシリカ反応による膨張が抑制されていることがわかる。また、図-16 は、アルカリに塩化ナトリウムを用いた結果を示している。塩化ナトリウムは、酸化ナトリウム当量で 2.4kg/m<sup>3</sup>、4.8kg/m<sup>3</sup>および 9.6kg/m<sup>3</sup>を添加した場合の結果を示している。アルカリに塩化ナトリウムを用いた場合にも、高炉スラグ細骨材を用いたものは、砂岩砕砂を用いたものに比べてアルカリシリカ反応による膨張を抑制していることがわかる。高炉スラグを微粉末として結合材に用いた場合にアルカリシリカ反応による膨張が抑制されることが知られているが、高炉スラグを細骨材として用いても、粗骨材のアルカリシリカ反応による膨張を抑制する効果があるといえる。

#### 4. まとめ

本実験によって得られた知見を以下に示し、本論文のまとめとする。

- (1) 高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートは、砂岩砕砂を用いたものに比べて、長期にわたって圧縮強度が大きくなる。
- (2) 高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの静弾性係数は、砂岩砕砂を用いたものに比べて大きい。
- (3) 高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの引張強度および曲げ強度は、同じ圧縮強度の砂岩砕砂を用いたものと同程度である。
- (4) 高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみおよびクリープは、砂岩砕砂を用いたものに比べて小さくなる。
- (5) 高炉スラグ細骨材は、粗骨材のアルカリシリカ反応を抑制する。

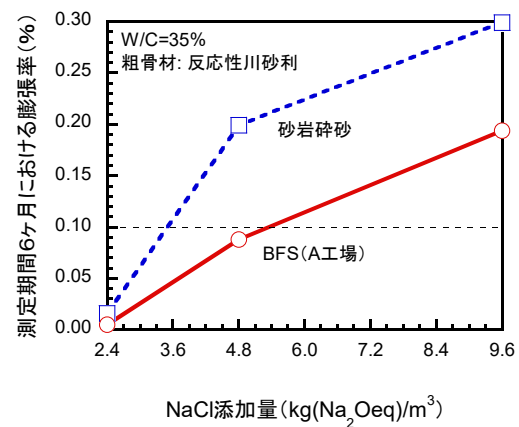


図-16 反応性川砂利を用いたコンクリートの膨張量 (NaCl の場合)

#### 謝辞

本研究は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の「SIP インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」(管理法人: NEDO) によって実施した。ここに謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) 藤原斉, 堀水紀, 細谷多慶, 藤木昭宏: 高炉スラグがコンクリートの塩分浸透性に与える影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.19, No.1, pp.757-762, 2017.6
- 2) Paweena JARIYATHITIPONG ほか: 高炉スラグ細骨材によるコンクリートの耐硫酸性改善に関する研究, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol. 69, No. 4, pp.337-347, 2013. 10
- 3) 綾野克紀, 藤井隆史: 高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの凍結融解抵抗性に関する研究, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol. 70, No. 4, pp.417-427, 2014. 12