

論文 産地の異なる高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの特性

橋野 哲郎*1・河中 涼一*2・藤井 隆史*3・綾野 克紀*4

要旨: 既往の研究では、高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートのクリープ・乾燥収縮は砕砂を用いたものに比して小さく、耐久性も高いとの報告がある。しかし、製造元や産地が異なる高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの特性を、同時に比較した事例は多くない。そこで本研究では、製造元や産地の異なる 5 種類の高炉スラグ細骨材を用いてコンクリート供試体を作製し、これらの特性について試験を行った。その結果、いずれの高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートも、クリープ・乾燥収縮は砕砂を用いた場合より小さく、耐久性も高い傾向にあることが分かった。

キーワード: 高炉スラグ細骨材, 乾燥収縮, クリープ, 強度特性, 凍結融解抵抗性, 塩分浸透抵抗性

1. はじめに

高炉スラグは、鉄鉱石から銑鉄を製造する過程で発生する副産物である。高炉水砕スラグは、高炉から生成する熔融スラグを急冷固化させたガラス質のスラグで、セメント原料やコンクリート用骨材として、その多くが用いられている。高炉スラグを建設資材へ適用した歴史は古く、1925 年に高炉セメントの規格が制定されて以降、1977 年には高炉スラグ粗骨材、1981 年には高炉スラグ細骨材がそれぞれ JIS に制定された。近年では、環境問題や持続可能な開発への取り組みと、高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの高い耐久性¹⁾への関心が相まって、高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートを塩害環境下のコンクリート構造物に適用する事例も増えている。また、比較的富配合のコンクリートを用いるプレストレストコンクリート橋に、細骨材の全量を高炉スラグ細骨材に置換して用いた新たな事例も報告されている²⁾。その背景には、プレストレストコンクリート構造部材は、クリープ・乾燥収縮による変形が拘束されて生じる不静定力が問題となることが挙げられ、既往の研究で、高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートのクリープ・乾燥収縮が砕砂を用いた場合に比して小さいと報告されたためである。しかし、全国に点在する製鉄所から供給される高炉スラグ細骨材は、それぞれ特性が異なり、これらを用いたコンクリートのクリープ・乾燥収縮特性を同時に試験した報告は多くないのが実情である。そこで、本研究では、製造元および産地の異なる種々の高炉スラグ細骨材を用いて、比較的富配合のコンクリートが用いられるプレストレストコンクリートを想定して供試体を作製し、クリープ・乾燥収縮を中心に、種々の特性について実験を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

本研究では、製造元および産地が異なりコンクリート用細骨材として出荷されている 5 種類の高炉スラグ細骨材を用いた。また、比較のために硬質砂岩砕砂（以下、砕砂）を用いた。本研究で用いた細骨材の諸物性を表-1 に示す。表中の CS が砕砂を、BFS-A~E が高炉スラグ細骨材を示す。表-2 に、本実験に用いたコンクリートの配合を示す。高炉スラグ細骨材を用いた配合では、細骨材の全量に高炉スラグ細骨材を用いた。水セメント比は、プレストレストコンクリートのプレキャスト製品に用いるコンクリートを想定して 36% に設定した。セメントには、早強ポルトランドセメント（密度: 3.13g/cm³, ブレーン値: 4,600cm²/g）を用いた。粗骨材には、砕砂と同一産地の硬質砂岩砕石（最大寸法: 20mm, 表乾密度: 2.69g/cm³, 吸水率: 0.44%, 粗粒率: 6.42）を用いた。化学混和剤には、増粘剤一液タイプ高性能 AE 減水剤（ポリカルボン酸系化合物と界面活性剤系特殊増粘剤の複合体）および AE 助剤を用いた。

表-1 細骨材の諸物性

種類	区分など	表乾密度 (g/cm ³)	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	粗粒率
CS	硬質砂岩 砕砂	2.68	2.63	1.62	3.14
BFS-A	BFS5	2.72	2.70	0.71	2.77
BFS-B	BFS1.2	2.71	2.70	0.39	1.98
BFS-C	BFS2.5	2.71	2.69	0.80	2.35
BFS-D	BFS1.2	2.67	2.64	1.03	2.28
BFS-E	BFS5-0.3	2.85	2.80	1.71	3.15

*1 (株)ピーエス三菱 大阪支店土木技術部 (正会員)

*2 (株)ピーエス三菱 大阪支店土木技術部 博(工) (正会員)

*3 岡山大学 学術研究院環境生命科学学域准教授 博(工) (正会員)

*4 岡山大学 学術研究院環境生命科学学域教授 博(工) (正会員)

表-2 コンクリートの配合

細骨材 種別	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				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
CS	4.5	36.0	41.3	162	450	716	1,018	1.00	0.005
BFS-A						725			0.010
BFS-B						723			0.010
BFS-C						759			0.010
BFS-D						722			0.010
BFS-E						711			0.005

2.2 試験方法

(1) 圧縮強度試験および静弾性係数試験

圧縮強度試験および静弾性係数試験は、φ100×200mmの円柱供試体を用いて、JIS A 1108:2018「コンクリートの圧縮強度試験方法」および JIS A 1149:2018「コンクリートの静弾性係数試験方法」に準拠して行った。

(2) 凍結融解試験

凍結融解試験は、100×100×400mmの角柱供試体1本を用いて、JIS A 1148:2010「コンクリートの凍結融解試験方法」に規定される水中凍結融解方法(A法)に準拠して行った。凍結融解の1サイクルは、供試体の中心部温度が、5℃から-18℃に下がり、また、-18℃から5℃に上がるものとし、1サイクルに要する時間は、3時間以上、4時間以内とした。材齢7日から試験を開始し、凍結水には水道水を用いた。

(3) 塩化物イオン浸透性試験

塩化物イオン浸透性試験は、JSCE-G 572-2018「浸せきによるコンクリート中の塩化物イオンの見掛けの拡散係数試験方法(案)」に準拠して行った。試験には、φ100×200mmの円柱供試体の両端部から25mmを切断したφ100×150mmの供試体を用いた。供試体は、成形後、1日室内で乾燥させた後、円形の1面を残して他の円形の1面および側面をエポキシ樹脂で被覆し、試験開始材齢28日から濃度10%の塩化ナトリウム水溶液に浸漬させた。滴定は、JIS A 1154:2020「硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法」に規定される電位差滴定法に従って行った。

(4) 乾燥収縮試験

乾燥収縮ひずみの測定には、100×100×400mmの角柱供試体を用いて、JIS A 1129-2:2010 附属書 A (参考) に示される「モルタル及びコンクリートの乾燥による自由収縮ひずみ試験方法」に準拠して試験を行った。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 1129-2:2010 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。

(5) クリープ試験

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、持続応力導入用のPC鋼棒(φ17mm, B種1号 SBPR 930/1080)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、材齢14日に初期載荷を行った。初期載荷時には、同条件で養生を行ったφ100×200mmの円柱供試体3本の平均圧縮強度を求め、その25%の圧縮応力を載荷した。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応力の減少が5%以内になるように、初期載荷後2日目、9日目、30日目、72日目および128日目に圧縮応力の再導入を行った。再導入は、供試体に与えた圧縮力を一度除荷し、初期載荷時と同じひずみを与える方法で行った。クリープひずみは、本試験で得られたひずみから、前述の乾燥収縮試験で得られたひずみを減じることで求めた。長さ変化の測定方法は前述の乾燥収縮試験と同様である。

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、細骨材に砕砂または高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの材齢2日および28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。図中の●は砕砂を用いたコンクリートの結果を示している。■, ▲, ○, □および△は、それぞれ、BFS-A, BFS-B, BFS-C, BFS-D および BFS-E の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。図中の実

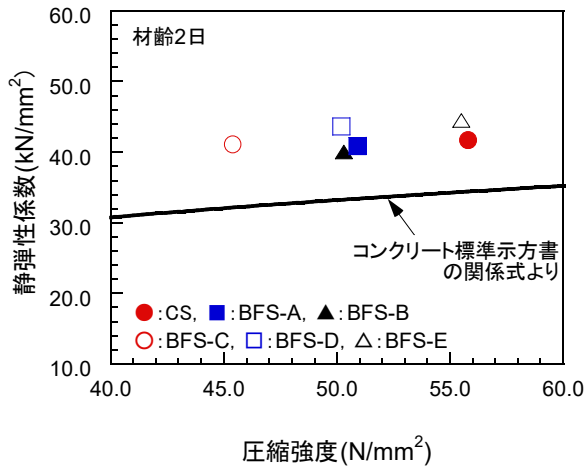


図-1 圧縮強度と静弾性係数の関係 (材齢 2 日)

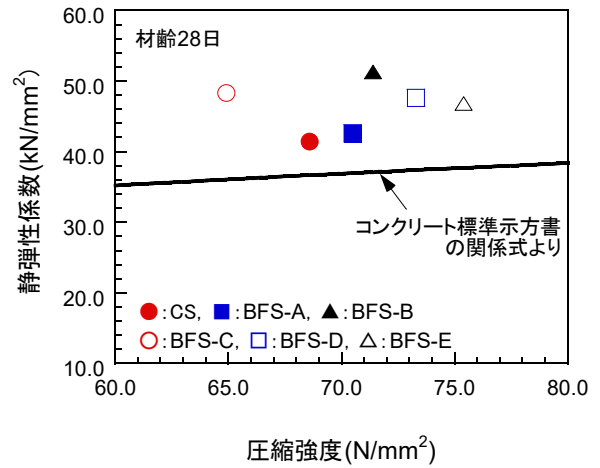


図-2 圧縮強度と静弾性係数の関係 (材齢 28 日)

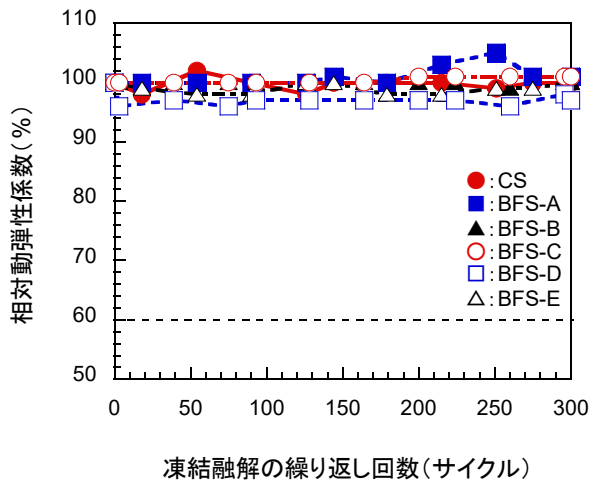


図-3 凍結融解抵抗性

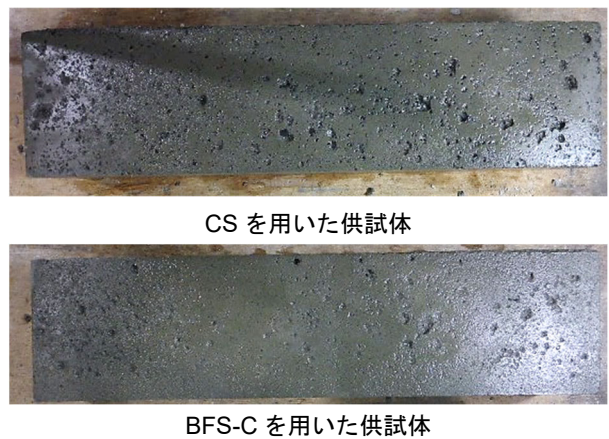


写真-1 凍結融解試験終了時の供試体外観

線は、コンクリート標準示方書[設計編]に示される圧縮強度と静弾性係数の関係³⁾を示している。この図より、いずれの細骨材を用いた場合でも、静弾性係数はコンクリート標準示方書に示される圧縮強度から求まる計算値よりも高い値を示していることが分かる。また、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、材齢 2 日程度の若材齢時では砕砂を用いたコンクリートと同程度であるが、既往の研究と同様⁴⁾、材齢 28 日では砕砂を用いた場合より大きくなる傾向にあることが分かる。圧縮強度は、材齢 2 日程度の若材齢時では砕砂を用いたコンクリートより最大で 20%程度小さいが、材齢 28 日では砕砂を用いた場合より大きくなる傾向にある。高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの強度発現性が若材齢において砕砂を用いたコンクリートに比べて劣る傾向にあるのは、高炉スラグ細骨材の出荷時に添加される固結防止剤の影響を受けているためと推察される⁵⁾。

3.2 凍結融解抵抗性

図-3 は、細骨材に砕砂または高炉スラグ細骨材を用

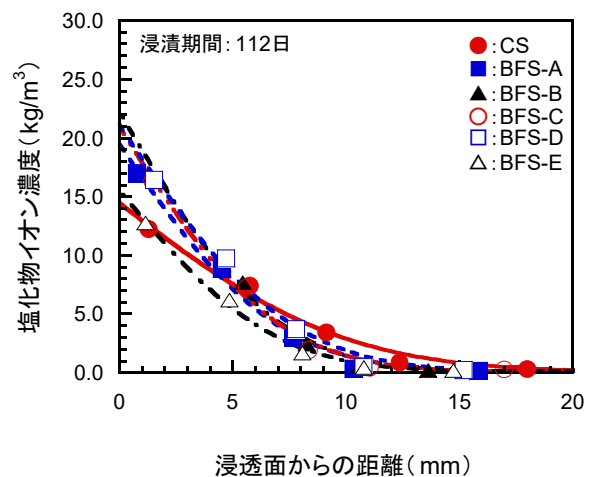


図-4 浸漬期間 112 日における塩化物イオン濃度分布

いたコンクリートの凍結融解試験で得られた相対動弾性係数を示したものである。この図より、高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの相対動弾性係数も、砕砂を用

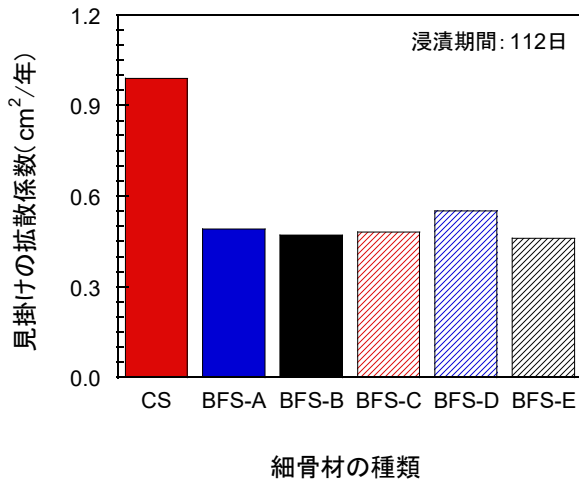


図-5 塩化物イオンの見掛けの拡散係数

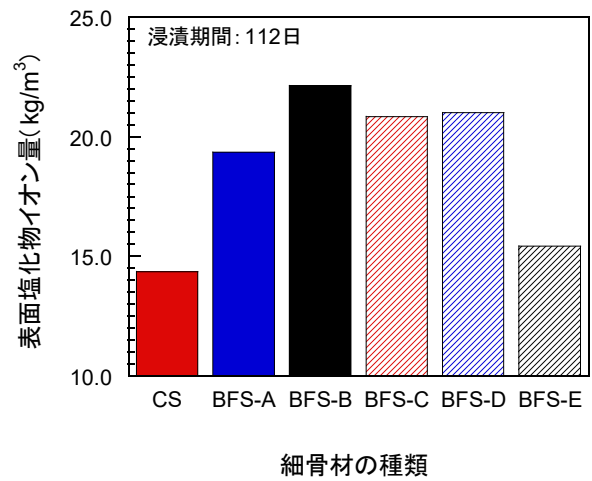


図-6 表面塩化物イオン濃度

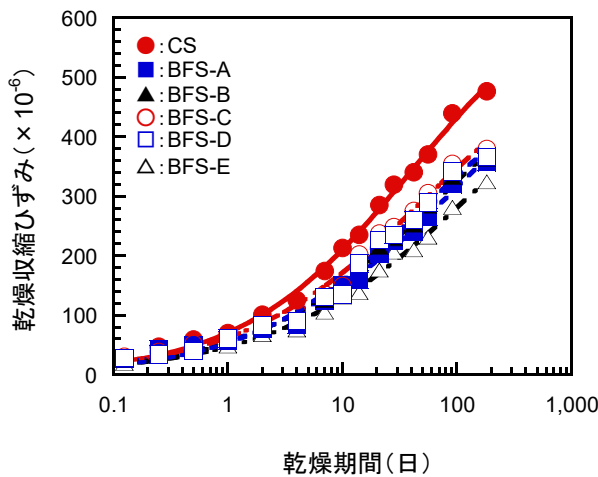


図-7 乾燥収縮ひずみの測定結果

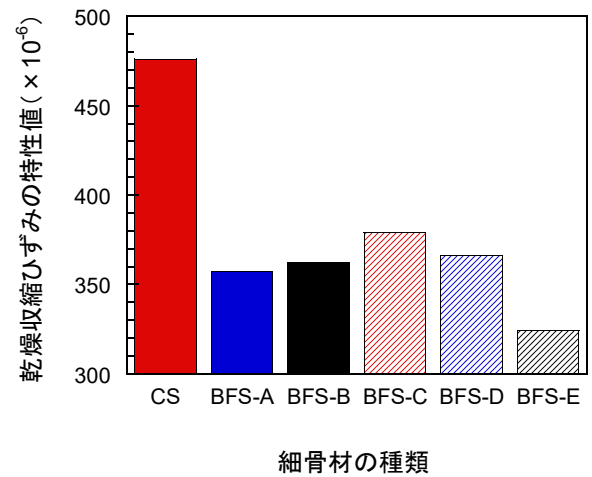


図-8 乾燥収縮ひずみの特性値

いたコンクリートの相対動弾性係数も、凍結融解の繰返し回数が 300 サイクルまで低下しておらず、いずれも高い凍結融解抵抗性を有していることが分かる。写真-1 は、凍結融解試験終了時の供試体の外観を示している。上段は砕砂を用いたコンクリート供試体であり、下段は高炉スラグ細骨材 BFS-C を用いた供試体の外観を示している。BFS-C 以外の 4 種類の高炉スラグ細骨材を用いた供試体も同様の外観であった。これらの写真からも、いずれの供試体も凍結融解試験終了まで顕著な劣化は生じなかったことが確認できる。

3.3 塩化物イオン浸透性

図-4 は、細骨材に砕砂または高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートを 112 日間塩水に浸漬させた後の塩化物イオン濃度の分布を示したものである。この塩化物イオン濃度の分布から求めた見掛けの拡散係数およびコンクリート表面の塩化物イオン濃度を、それぞれ、図-5 および図-6 に示す。塩化物イオンの見掛けの拡散係数お

よびコンクリート表面の塩化物イオン濃度は、塩化物イオン濃度の分布を次式によって回帰して求めた。

$$C(x, t) = C_{a0} \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{0.1x}{2\sqrt{D_{ap} \cdot t}} \right) \right\} + C_i \quad (1)$$

ここに、 $C(x, t)$: 浸漬面からの距離が x (mm) で浸漬期間が t (年) における全塩化物イオン濃度 (kg/m^3), C_i : 初期に含有される全塩化物イオン濃度 (kg/m^3), C_{a0} : 浸漬試験におけるコンクリート表面の塩化物イオン濃度 (kg/m^3), D_{ap} : 浸漬試験による塩化物イオンの見掛けの拡散係数 ($\text{cm}^2/\text{年}$), erf : 誤差関数

図-5 より、細骨材に高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの見掛けの拡散係数は、砕砂を用いた場合の半分程度であり、いずれの高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートも高い塩化物イオン浸透抵抗性を有していることが分かる。図-6 より、高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートは、砕砂を用いたコンクリートに比して表面

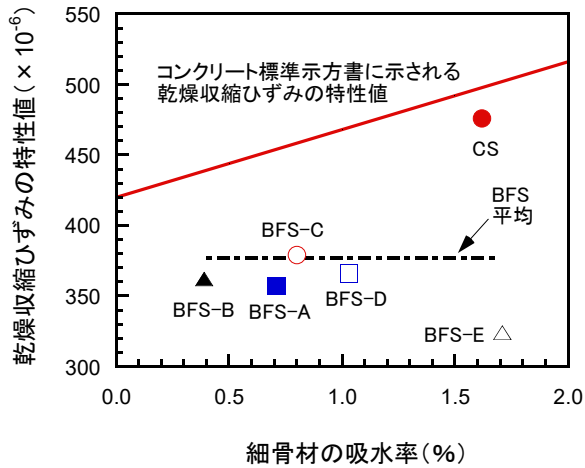


図-9 乾燥収縮ひずみと細骨材の吸水率の関係

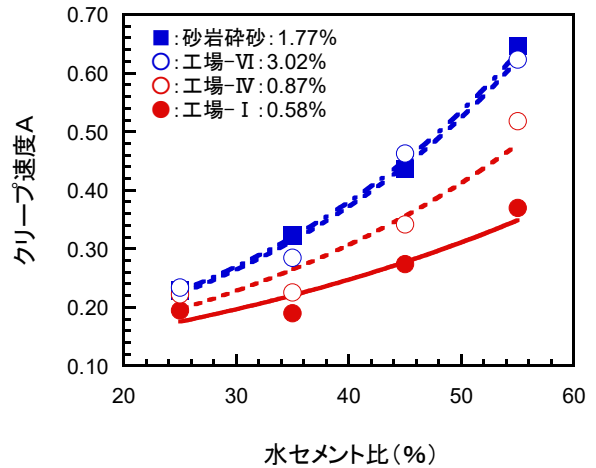


図-10 クリープ速度係数と水セメント比の関係

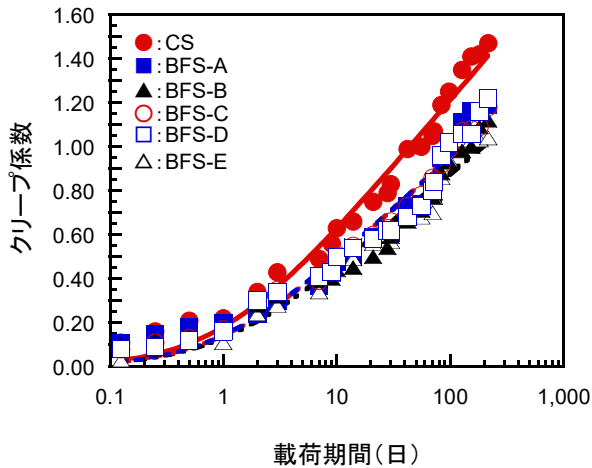


図-11 クリープの測定結果

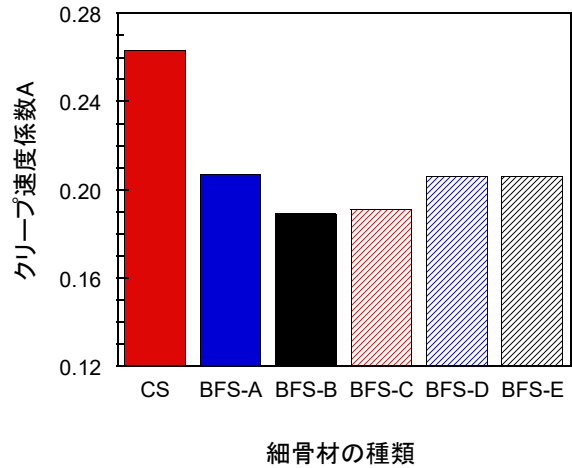


図-12 クリープ速度係数

塩化物イオン濃度が多い傾向にあることが分かる。これは、図-5 に示すとおり高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの見掛けの拡散係数は砕砂を用いたものに比して小さく、コンクリートの内部に塩化物イオンが浸透しにくくなった結果、表面の塩化物量が多くなったものと推察される。

3.4 乾燥収縮

図-7 は、細骨材に砕砂または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測定結果を示したものである。また、図-8 は、コンクリートの乾燥収縮ひずみの特性値である乾燥期間 182 日の値を比較示したものである。これらの図より、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、砕砂を用いたコンクリートよりも小さい傾向にあることが分かる。

図-9 は、図-8 に示した乾燥収縮ひずみの特性値と各細骨材の吸水率との関係を示している。図中に示す実線は、コンクリート標準示方書[設計編]に示される乾燥収縮ひずみの予測式⁹⁾から求まる値を示している。この図に示すとおり、本研究で作製した砕砂を用いたコンク

リートの乾燥収縮ひずみは、吸水率を変数とするコンクリート標準示方書の予測値に近い値であるが、高炉スラグ細骨材を用いた場合は吸水率に大きな影響を受けず、予測式から求まる一般的な骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみよりも小さい傾向にあることが分かる。

3.5 クリープ

図-10 は、既往の研究⁷⁾で示された、細骨材に砕砂または3種類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係数と水セメント比の関係を示したものである。図中の数値は細骨材の吸水率を示している。高炉スラグ細骨材を用いた場合のクリープ速度係数は砕砂を用いた場合に比して小さい傾向にあるが、水セメント比が低いほど、その差は小さくなっていることが分かる。ただし、クリープ速度係数 A は、実験によって得られた載荷期間とクリープ係数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、 $\phi(t)$ ：載荷期間 t (日)におけるクリープ係数、 A ：

クリープ速度係数

図-11は、細骨材に砕砂または高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートのクリープ試験から得られた荷重期間とクリープ係数の関係を示したものである。この図より、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、砕砂を用いたコンクリートよりも小さい傾向にあることが分かる。図-12は、図-11に示したクリープ試験の結果を用いて、式(2)に示される曲線から回帰して求めたクリープ速度係数 A を比較したものである。図-10に示したとおり、水セメント比36.0%で行った本研究の場合、骨材種別による差は小さいと推察されるが、図-12より、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係数 A は、いずれも砕砂を用いたコンクリートのクリープ速度係数よりも小さい傾向にある。

図-13は、図-12に示した細骨材に砕砂または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係数 A と各細骨材の吸水率の関係を示している。この図から、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係数 A は、細骨材の吸水率に大きな影響を受けていないことが分かる。また、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係数 A は、いずれも砕砂を用いた場合に比して小さく、コンクリート標準示方書[設計編]に示されたクリープ速度係数の式⁹⁾から求まる値0.31よりも小さいものである。

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の静弾性係数は、コンクリート標準示方書[設計編]に示される圧縮強度と静弾性係数の関係式から求めた計算値よりも高くなる傾向にある。また、材齢2日程度の若材齢時では砕砂を用いたコンクリートと同程度であるが、材齢28日では砕砂を用いたコンクリートよりも高くなる。
- (2) 高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの圧縮強度は、材齢2日程度の若材齢時には砕砂を用いたコンクリートに若干劣る傾向があるが、材齢28日では砕砂を用いたコンクリートと同程度以上になる。
- (3) 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は、いずれの高炉スラグ細骨材を用いた場合でも高い凍結融解抵抗性を有している。
- (4) 高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートは、塩化物イオンの浸透が抑制され、塩化物イオンの見掛けの拡散係数が砕砂を用いたコンクリートよりも小さくなる。
- (5) 高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮

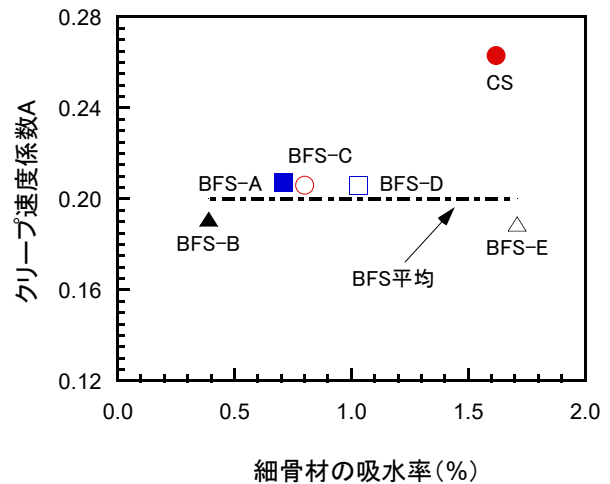


図-13 クリープ速度係数と吸水率の関係

ひずみは、いずれも砕砂を用いたコンクリートよりも小さくなる。また、高炉スラグ細骨材の吸水率が乾燥収縮ひずみに及ぼす影響は小さい。

- (6) 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係数は、水セメント比が比較的小さい場合でも、砕砂を用いたコンクリートよりも小さくなる。また、クリープ速度係数に高炉スラグ細骨材の吸水率が与える影響は小さい。

参考文献

- 1) 藤井隆史, 綾野克紀: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol. 40, No. 1, pp. 99-104, 2018. 7
- 2) 橋野哲郎, 河中涼一, 丹野篤, 福田雅人: 高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートのPC橋幅工事への適用, 第30回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.605-610, 2021.10
- 3) 土木学会: 2017 制定 コンクリート標準示方書[設計編], p.43, 2017
- 4) 土木学会: 高炉スラグ細骨材を用いたコンクリート製品の設計・製造・施工指針(案), コンクリートライブラリー, No.155, pp.41, 2019.3
- 5) 齊藤和秀, 木之下光男, 伊原俊樹, 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.139-144, 2009.6
- 6) 土木学会: 2017 制定 コンクリート標準示方書[設計編], pp.106-110, 2017
- 7) 土木学会: 高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートに関する研究小委員会(354委員会)成果報告書, コンクリート技術シリーズ, No.117, pp.26-27, 2018