

# 論文 高炉スラグ微粉末を使用したクリンカーフリーポーラスコンクリートの基本物性に関する研究

阿部 珠子\*1・今本 啓一\*2・エ ルドンオチル\*3・田中 章夫\*4

**要旨:** 本研究では、高炉スラグ微粉末 (BFS) を用いた、クリンカーフリーポーラスコンクリート (CF-POC) の硬化性状、圧縮強度、透水性、保水性、揚水性に関して検討を行った。BFS のアルカリ刺激材に、膨張材と炭酸ナトリウムを使用した。粗骨材は 6 号相当の砕石、高炉スラグ粗骨材、人工軽量粗骨材を用いた。材齢 28 日における圧縮強度試験の結果、設計空隙率 25% の炭酸ナトリウムを用いた CF-POC 試験体の強度が、同空隙率の普通ポルトランドセメントを使用した試験体に近い値を示した。透水性、保水性、揚水性については結合材による性能の大きな差は確認されなかった。

**キーワード:** ポーラスコンクリート、クリンカーフリー、圧縮強度、透水性能、保水性能、揚水性能

## 1. はじめに

毎年、世界では 40 億トン以上のセメントが製造されており、世界の年間 CO<sub>2</sub> 排出量の約 8% を、セメント製造過程の排出が占めている<sup>1)</sup>。脱炭素化への取り組みとして、セメントの代わりに高炉スラグ微粉末 (以下、BFS と略記) を用いたクリンカーフリーコンクリートの研究が行われており<sup>2)</sup>、実構造物への応用が期待されている。表-1 に、普通ポルトランドセメント (以下、OPC と略記) と BFS の製造過程の CO<sub>2</sub> 排出量<sup>3)</sup> を示す。OPC と比べ、BFS の CO<sub>2</sub> 排出量は著しく低く、BFS の積極的な利用により環境負荷低減効果が得られると考えられる。

また、環境共生ができる建築材料として、ポーラスコンクリート (以下、POC と略記) が挙げられる。POC は、内部に連続もしくは独立した空隙を有する形状特性から、透水性、保水性、植生などの多様な機能を設計することができる。現在、河川護岸、道路舗装、法面被覆材料として多く運用されている<sup>4)</sup>。これまで、POC の結合材として高炉セメントを使用しその性能を評価した研究<sup>5)</sup>はあるが、OPC を使用しないクリンカーフリー結合材を POC に適用した研究例は少ない。クリンカーフリー結合材はセメントを使用することなく、混和材の潜在水硬性を利用して硬化させるため、低アルカリ性の生体親和性の高い POC を製造できる可能性がある。

そこで、結合材に BFS のみを使用した、環境負荷低減効果の高い POC (以下、CF-POC と略記) の基本物性を実験的に検討することを目的とし、水和熱測定試験、圧縮強度試験、透水試験、保水試験、揚水試験を行い、OPC を使用した POC との相違を検討した。

表-1 製造に伴う環境負荷量 (単位: kg/t)

	CO <sub>2</sub>	SO <sub>x</sub>	NO <sub>x</sub>	ばいじん
OPC	771.0	0.080	1.369	0.033
BFS	26.5	0.008	0.010	0.002

表-2 使用材料物性一覧

種類	記号	品質
結合材	高炉スラグ微粉末	BFS 密度 : 2.91 g/cm <sup>3</sup> 比表面積 : 4020 cm <sup>2</sup> /g 石膏添加 : 無
	無水石膏	Ca 密度 : 2.96 g/cm <sup>3</sup>
	普通ポルトランドセメント	OPC 密度 : 3.16 g/cm <sup>3</sup> 比表面積 : 3340 cm <sup>2</sup> /g
アルカリ刺激材	膨張材	EX 密度 : 3.05 g/cm <sup>3</sup>
	炭酸ナトリウム	CN 密度 : 2.53 g/cm <sup>3</sup>
粗骨材	硬質砂岩砕石	CS 最大粒径 : 15 mm 表乾密度 : 2.65 g/cm <sup>3</sup> 絶対密度 : 2.64 g/cm <sup>3</sup> 吸水率 : 0.53 % 実積率 : 60.3 %
	高炉スラグ粗骨材	BFSG 最大粒径 : 15 mm 表乾密度 : 2.58 g/cm <sup>3</sup> 吸水率 : 1.98 % 実積率 : 56.9 %
	人工軽量粗骨材	LG 最大粒径 : 15 mm 絶対密度 : 1.29 g/cm <sup>3</sup> 吸水率 : 28.0 % 実積率 : 60.4 %
混和剤	高性能 AE 減水剤 (1 種)	Ad ポリカルボン酸系化合物 リグニンスルホン酸塩

表-3 BFS の化学組成

結合材	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)	MgO (%)	SO <sub>3</sub> (%)	強熱減量 (%)
BFS	2.91	4020	5.52	0.05	0.02

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料および調査

表-2 に実験で使用した材料とその物性値を、表-3 に BFS の化学組成を示す。アルカリ刺激材にはクリンカーフリーコンクリートに関する既往研究<sup>6)</sup>を参考に、膨張材と炭酸ナトリウムを使用した。

\*1 東京理科大学大学院 工学研究科建築学専攻 (学生会員)

\*2 東京理科大学 工学部建築学科教授 工博 (正会員)

\*3 東京理科大学 工学部建築学科助教 工博 (正会員)

\*4 日本工業大学 建築学部建築学科准教授 工博 (正会員)

表-4 ペースト供試体の調査

記号	W/B (%)	結合材	石膏混合率 (B×%)	刺激材	刺激材混合率 (B×%)	混和剤添加率 (B×%)
OPC	30	OPC	-	-	-	-
BFS-CN	30	BFS,Ca	1.5	CN	3.5	0.30
BFS-EX	30	BFS,Ca	1.5	EX	3.5	0.08

本研究では、ペーストの水粉体比 W/B を 30%とし、POC 供試体の設計空隙率を 25%に設定した。使用した BFS は石膏無添加であるため、全結合材質量に対し 1.5%の無水石膏を混合した。結合材量に対するアルカリ刺激材の置換率は、既往研究<sup>9)</sup>を参考に 3.5%とした。なお、アルカリ刺激材、石膏の置換量は質量比で算出した。本研究におけるペースト供試体の調査を表-4 に、POC 供試体の調査を表-5 に示す。CF-POC の粗骨材による物性の違いを把握するために、BFSG ならびに LG を用いた CF-POC のアルカリ刺激材に EX を使用した。

## 2.2 供試体の作製方法

表-6 に、供試体寸法を示す。練混ぜ方法は、強制 1 軸パン型ミキサ (容量 100L) を使用し、ペースト先練り方法を採用した。練混ぜは、初めに粉体をハンドミキサで 15 秒間混ぜ、水と混和剤を投入し、さらに 300 秒間混ぜた。ペーストフロー試験を行い、適切なフロー値が得られたことを確認した後、パン型ミキサに粗骨材とペーストを入れ、40 秒ごとに掻き落とし、計 120 秒間混ぜた。ペーストが粗骨材全体を覆っていることを確認し、練混ぜ完了とした。POC 供試体は、空隙率 25%とするために、1 体当たりの打込み質量を調査から算出し、すべて 2 層打ちにより行った。締固めは、突き棒を使用し、層ごとに棒突きを行った後、表層をコテにより仕上げた。ペーストの垂れを防ぐために、ジグギングを控え、設計空隙率+5%を許容範囲として作製した。ペースト供試体は、2 層打ちとし、各層ジグギングにより締固め、表層をコテにより仕上げた。

## 2.3 実験項目および方法

### (1) 簡易断熱による水和熱測定試験

BFS にアルカリ刺激材を添加したペーストの硬化過程に関する研究は少なく、凝結試験による評価は困難である。そこで、アルカリ刺激材による POC の硬化性状の違いを把握するために、簡易断熱による水和熱測定を行った。図-1 に水和熱測定容器概要を示す。断熱材の継目にはアルミテープを二重に貼り、熱の流出を防いだ。被覆を 30mm 程度剥がし、ペースト、POC 供試体ともに上面から約 100 mm の位置に熱電対を差し込んだ。ペースト供試体について OPC, BFS-CN, BFS-EX を、POC 供試体について OPC-CS, BFS-CS-CN, BFS-CS-EX を対象とした。練上がり試験開始時刻とし、水和熱が低下し、供試体自体の硬化を確認した時点で、試験終了とした。

表-5 POC 供試体の調査

記号	W/B (%)	V <sub>R</sub> (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )										Ad (B×%)
			W	OPC	BFS	Ca	EX	CN	CS	BFSG	LG		
OPC-CS	30	25	72	238	-	-	-	-	1598	-	-	-	
BFS-CS-CN	30	25	69	-	217	3.4	-	8.0	1598	-	-	0.30	
BFS-CS-EX	30	25	69	-	217	3.4	8.0	-	1598	-	-	0.08	
BFS-BFSG-EX	30	25	84	-	267	4.2	9.8	-	-	1468	-	0.08	
BFS-LG-EX	30	25	68	-	215	3.4	7.9	-	-	-	997	0.08	

※V<sub>R</sub> : 空隙率

表-6 供試体寸法

用途	形状	寸法 (mm)
POC 圧縮強度試験, 水和熱測定 保水試験, 揚水試験	円柱	φ 100×200
ペースト圧縮強度試験		φ 50×100
透水試験		φ 107×200

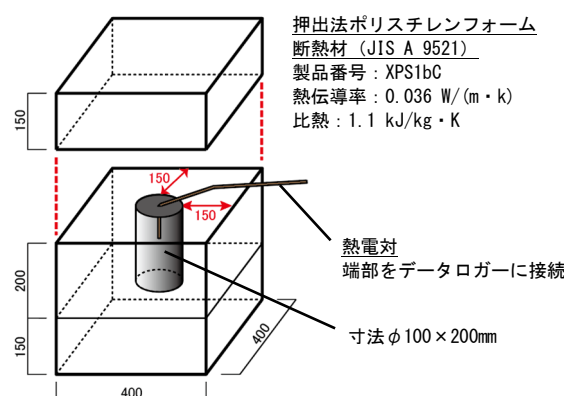


図-1 水和熱測定容器概要 (単位 : mm)



写真-1 キャッピングの様子

### (2) ペーストフロー試験および空隙率測定

ペーストフロー試験方法は、JIS R 5201 に準拠した。空隙率測定方法は、JC1-SPO2-1 に準拠し、質量法により算出した。

### (3) 圧縮強度試験

POC の結合材による圧縮強度の違いを把握するために、ペースト供試体および POC 供試体の圧縮強度試験 (JIS A 1108 に準拠) を行った。材齢は 28 日とし、養生方法を表-7 に示す。供試体寸法はペースト供試体を φ 50×100mm, POC 供試体を φ 100×200mm とした。ま

た、試験前に、ペースト供試体の端面を研磨した。POC 供試体は写真-1 に示すようにセメントペーストキャッピングを施した。

#### (4) 透水試験

透水試験の測定方法は、JCI-SPO3 に準拠し、図-2 に示す透水試験装置を作製した。水位調整用の越流口には内径 20mm の VP20 塩ビ管 (JIS K 6742) を使用し、水位差は 10cm, 20cm, 30cm の 3 水準とした。蛇口から貯水槽に注水し、吐出し量 80L/min のポンプによってくみ上げた。POC は内径 107mm の VU100 塩ビ管 (JIS K 6741) に高さ 200mm となるように直接打設した。打設直後から試験開始まで封緘養生を行い、試験後に塩ビ管から取り出し空隙率を測定した。試験はまず越流水槽内の水温と初期水位を測定し、水位差 30, 20, 10cm の順で行った。本実験では、図に示す透水用越流口から排出された水量を越流量とした。透水の測定時間は 10 秒とし、各水準 3 回ずつ行った。得られた越流量より流速  $v$  を式(1)、動水勾配  $i$  を式(2)により算出した。

$$v = \frac{Q}{A \times (t_2 - t_1)} \quad (1)$$

$$i = h/H \quad (2)$$

ここに、 $v$  : 流速 (cm/s),  $Q$  : 時刻  $t_1$  から  $t_2$  までの越流量 (cm<sup>3</sup>),  $A$  : 供試体の断面積 (cm<sup>2</sup>),  $i$  : 動水勾配,  $h$  : 実測水位差 (cm),  $H$  : 供試体高さ (cm)

#### (5) 保水試験および揚水試験

表-8 に各試験の概要を、図-3 および-4 に各試験装置図を示す。試験装置は既往研究<sup>7)</sup>に従い、金網を用いて水平面に供試体底面を付着させないようにした。保水試験は、試験前に 48 時間水槽中で養生し、供試体を取り出し、吸水性のある布の上に軽く転がして水が垂れないようにした。その後、恒温恒湿室 (温度 20°C, 湿度 60%) に静置し、一定時間毎に供試体の質量を測定した。保水率  $W_R$  は式(3)により算出した。なお、保水量  $R$  は供試体質量と絶乾質量の差と定義した。骨材部分の空隙体積  $v_s$  の算出において、試験終了後に供試体を 105°C の乾燥炉に 24 時間静置し、取り出した時点の質量を絶乾質量として扱った。揚水試験は、絶乾状態にした供試体を 72 時間恒温恒湿室 (温度 20°C, 湿度 60%) で気乾状態にし、供試体底面から 10mm の高さに給水を行い、一定時間毎に供試体の質量を測定した。また、定水位を保つため、一定時間毎に水槽への給水を行った。揚水率  $W_P$  は式(4)により算出した。なお、揚水量  $P$  は骨材の吸水も含めた測定開始からの供試体質量の増加量と定義した。

$$W_R = \frac{R/\rho}{v_s} \times 100 \quad (3)$$

$$W_P = \frac{P/\rho}{v_s} \times 100 \quad (4)$$

表-7 円柱供試体の養生方法

供試体	材齢 (日)	脱型 (日)	養生方法	個数 (体)
OPC-CS	28	3	水中 (20°C)	3
BFS-CS-EX		5	水中・封緘 (20°C)	
BFS-BFSG-EX				
BFS-LG-EX				
BFS-CS-CN	7			

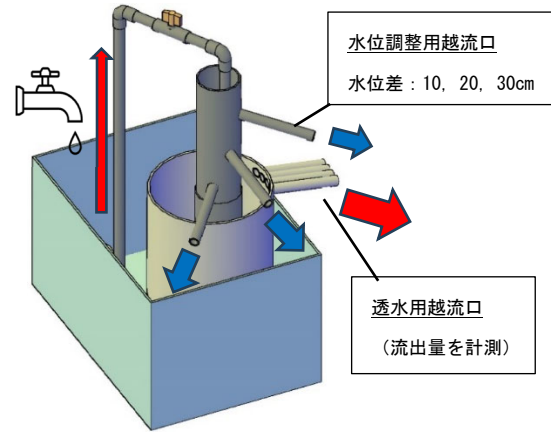


図-2 透水試験装置図

表-8 保水・揚水試験概要

	保水試験	揚水試験
供試体	OPC-CS, BFS-CS-CN, BFS-CS-EX, BFS-BFSG-EX, BFS-LG-EX	
測定間隔	0, 3, 6, 9, 12, 24, 48, 72, 168 (h)	
測定項目	保水量	揚水量

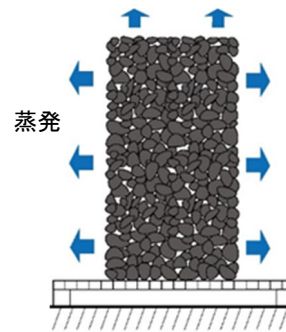


図-3 保水試験装置

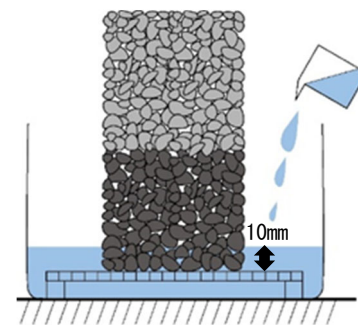


図-4 揚水試験装置

$$v_s = \frac{m_s - m_d}{\rho} \quad (5)$$

ここに、 $W_R$ ：保水率(%),  $R$ ：保水量(g),  $\rho$ ：水の密度(=1.0g/cm<sup>3</sup>),  $v_s$ ：骨材部分の空隙体積(cm<sup>3</sup>),  $W_p$ ：揚水率(%),  $P$ ：揚水量(g),  $m_s$ ：供試体の表乾質量(g),  $m_d$ ：供試体の絶乾質量(g)

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 ペーストフロー試験結果

表-9 にペーストフロー値を示す。各ペーストは平均160mm 前後のフロー値を得られており、POC 供試体底面のペーストの垂れは僅かだった。

#### 3.2 水和熱測定結果

図-5 に水和熱測定結果を示す。ペースト供試体の最高温度到達時間は OPC, BFS-EX, BFS-CN の順に遅くなり、OPC, BFS-EX は打設 1 日以内に最高温度に到達した。POC 供試体の最高温度到達時間はペーストと同様に、OPC-CS, BFS-CS-EX の順で遅くなった。いずれも OPC を用いた供試体に比べて BFS を用いた供試体の最高温度は低い。なお、BFS-CS-CN の最高温度は観測されなかったが、打設 7 日後に供試体の脱型可能な硬化が確認されたため試験終了とした。一般に、水和の進行とともに水和熱が高くなることから、本実験の範囲内において CF-POC の硬化が早いのは、アルカリ刺激材に EX を用いた供試体であるといえる。これらの結果を踏まえ、以降の試験に用いる供試体の脱型は、BFS-EX を用いた供試体を打設 5 日後、BFS-CN を用いた供試体を打設 7 日後とした。なお、OPC を用いた供試体は実験の都合上打設 3 日後に脱型した。

#### 3.3 圧縮強度試験結果

##### (1) ペースト供試体

図-6 にペースト供試体の圧縮強度 (3 体のデータの平均値) を示す。ペースト供試体の圧縮強度は、CN シリーズが EX シリーズの約 2 倍の値を示した。練り混ぜ後の硬化速度が遅い CN シリーズであるが、強度発現性能は高いことが確認できた。これはアルカリ刺激材に CN を用いた場合、EX に比べて pH が高くなるためと考えられる。

##### (2) POC 供試体

図-7 に POC 供試体の圧縮強度 (3 体のデータの平均値) を示す。図によれば、養生条件による影響について、すべての供試体に対して水中養生の方が封緘養生に比べ、圧縮強度が大きいことが確認できる。また、結合材の種類による影響について、水中養生の OPC-CS, BFS-CS-CN, BFS-CS-EX の圧縮強度を比較すると、BFS-CS-CN の方が OPC-CS と同程度の強度が得られた。図-6 に示したペースト供試体の圧縮強度と同様に、アルカリ刺激材に

表-9 ペーストフロー値

記号	0 打(mm)	15 打(mm)
OPC	109	163
BFS-CN	106	165
BFS-EX	114	159

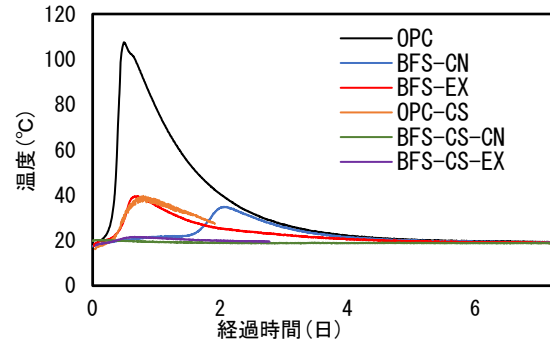


図-5 水和熱測定結果

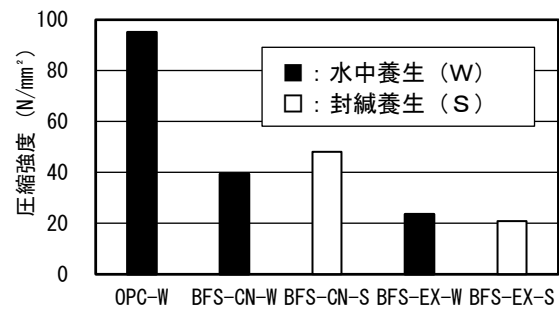


図-6 ペースト供試体の圧縮強度

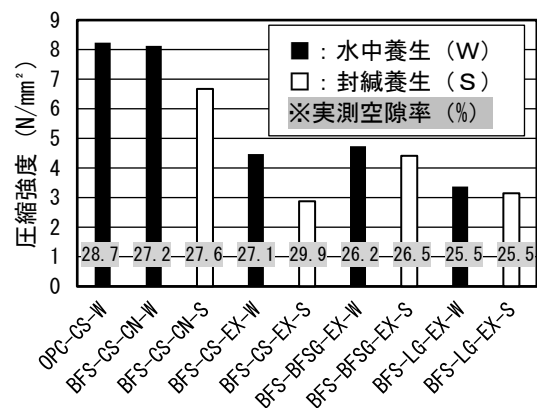


図-7 POC 供試体の圧縮強度

CN を用いた CF-POC の強度発現性能は高い。また、BFS-CS-EX-W と BFS-BFSG-EX-W の圧縮強度が近い値を示したことから、全量高炉スラグ系副産物を使用した CF-POC の強度発現性能は高く、環境負荷低減効果も期待される。既往研究<sup>4)</sup>によると POC の圧縮強度は空隙率の減少とともに指数関数的に増加することが示されており、結合材種類の違いを明確にするには、設計空隙率 25% 以下の CF-POC の強度発現性能を検討する必要がある。

養生条件の違いについて着目すると、骨材にCSを使用したPOC供試体においては、アルカリ刺激材によらず、封緘養生を行うと強度が低下している。一方、骨材にBFSGおよびLGを用いた場合は養生条件による違いの影響が顕著に現れていない。BFSGを用いた普通コンクリートにおける既往研究<sup>9)</sup>ではBFSGの周囲に形成される反応層が強度発現性に及ぼす影響が、LGを用いた普通コンクリートにおける既往研究<sup>9)</sup>では内部養生効果が指摘されており、POC供試体においてもこれらの影響が考えられるが、詳細なメカニズムについては今後の課題としたい。

### 3.4 透水試験結果

図-8に、透水試験結果を示す。同一の動水勾配と比較するとBFS-CS-EXとBFS-BFSG-EXの流速が大きくなったが、これらの実測空隙率が他の供試体と比べて大きいことが要因であると考えられる。また、既往研究<sup>4)</sup>において、複数水準の動水勾配に対して行われた透水性の評価は、式(6)のように非線形透水係数を用いた定量化手法が有効であるとされている。

$$v = k' \cdot i^m \quad (6)$$

ここに、 $k'$ ：非線形透水係数 (cm/s)、 $m$ ：実験定数

そこで、図-8の試験結果より式(6)に示す累乗関数で近似した際の非線形透水係数の比較を図-9に示す。既往研究<sup>10)</sup>によると、 $m$ の値に骨材粒径や空隙率による影響が確認されていないため、本研究では $m$ を0.5に固定し、1変数での比較とした。OPC-CSと同程度の空隙率であるBFS-CS-CNおよびBFS-LG-EXの $k'$ に大きな差がないことから、CF-POCはOPCを用いたPOCと同程度の透水性能を有することが示唆された。

### 3.5 保水試験結果

図-10に保水率の計測結果を示す。168時間後の保水率は、OPC-CSと比較して、BFS-BFSG-EXが10%程度高くなった。また、BFS-CS-EXならびにBFS-CS-CNはOPC-CSと同程度の保水率であることから、CF-POCの保水性能がOPCを用いたPOCと同等であることが示された。

一方、BFS-LG-EXの保水率は他の供試体より低い値を示した。既往研究<sup>11)</sup>によると、CSの比表面積はLGの約2倍であり、表-2より絶対密度も約2倍であることから、同一体積で比較すると表面積は約4倍になる。CSに対しLGの吸水率が極めて大きい点を考慮すると、LG内部の細孔径は大きく、CSより水分が蒸発しやすい構造になっていると考えられる。図-11に供試体の吸水量(絶対質量に対する計測開始時の質量の増加量と定義)と蒸発量の関係を示す。両者の間には高い相関関係が認められ、BFS-LG-EXの保水率低下には、骨材の細孔構造の影響が示唆される。また、図-12に保水量の計測結果を示す。CSシリーズに比べ、BFS-BFSG-EXとBFS-LG-EXの

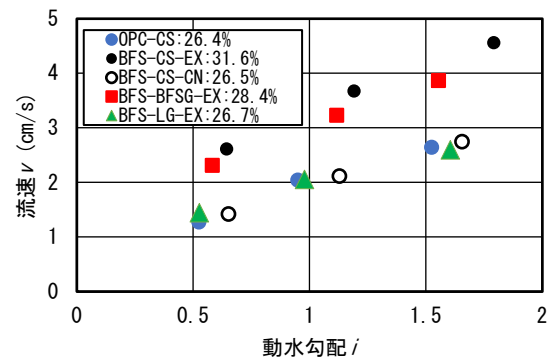


図-8 透水試験結果

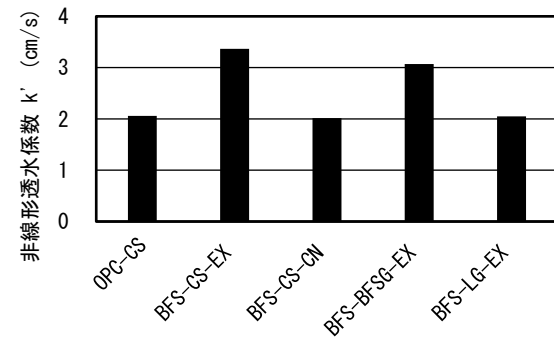


図-9 非線形透水係数の比較

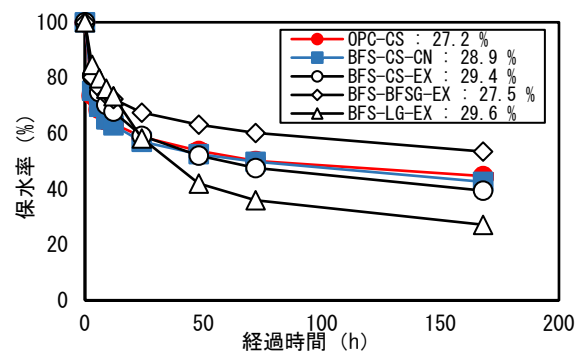


図-10 保水率と経過時間の関係

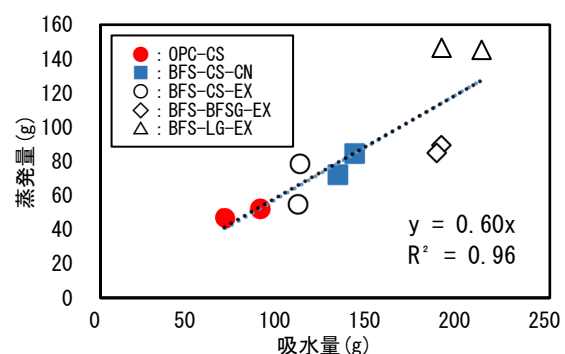


図-11 吸水量と蒸発量の関係

初期の保水量は大きい。しかし、24時間経過後も水分蒸発の影響が大きくみられるBFS-LG-EXに対し、BFS-BFSG-EXの水分蒸発量は小さい。したがって、BFS-BFSG-EXは長期の保水性能に優れていると考えられる。

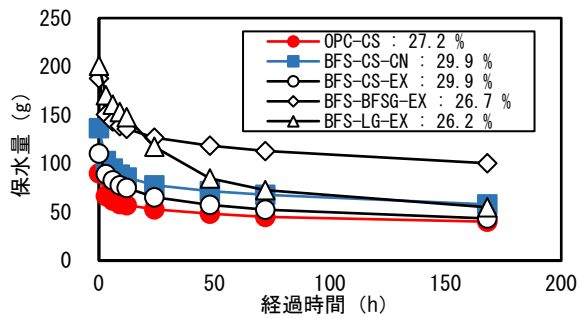


図-12 保水量と経過時間の関係

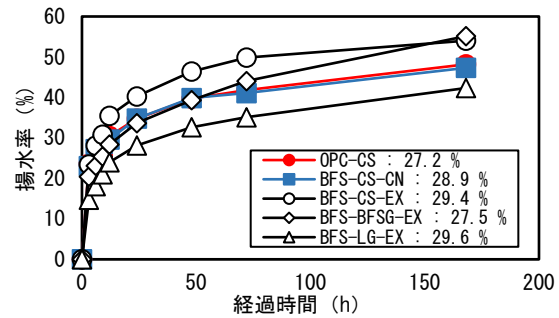


図-13 揚水率と経過時間の関係

### 3.6 揚水試験結果

図-13 に揚水率の計測結果を示す。保水試験と同様、BFS-CS-EX, BFS-BFSG-EX, BFS-CS-CN には OPC-CS と同等もしくはそれ以上の揚水性能が認められる。BFS-LG-EX は、測定開始 24 時間までは OPC-CS と同等の揚水性能を有していたが、以降は低下した。時間経過につれ、供試体表面が水分蒸発の影響を受けたと考えられる。

### 4. まとめ

本研究により得られた知見を以下に示す。

- 1) BFS を使用した CF-POC の硬化発現速度は、EX をアルカリ刺激材に用いることで、打設 5 日後の脱型を可能にする。
- 2) 設計空隙率 25% の BFS-CS-CN は、OPC-CS と同程度の圧縮強度が得られた。CN をアルカリ刺激材に用いることは、CF-POC の強度向上に有効である。
- 3) BFS-CS-EX と BFS-BFSG-EX の圧縮強度が同程度であり、全量高炉スラグ系副産物を使用した CF-POC の活用が期待される。
- 4) 非線形透水係数を比較すると、CF-POC と OPC-CS の透水性能に大きな差はなく、空隙率の影響が大きいといえる。
- 5) 保水・揚水試験の結果、CF-POC は OPC-CS と同等もしくはそれ以上の保水・揚水性能を有していることが判明した。

### 謝辞

本研究を遂行するにあたり、井原大輝氏（日本工業大学卒業生）および清原千鶴氏（東京理科大学プロジェクト研究員）のご助力を得た。また、本研究費の一部は 2022 年度科学研究費若手研究（代表者：エルドンオチル、課題番号：22K14366）によった。付記して謝意を表す。

### 参考文献

- 1) Johanna Lehne, Felix Preston : Making Concrete Change Innovation in Low-carbon Cement and Concrete , Chatham House Report, 2018.6

- 2) 齋藤賢, 藤原浩巳, 丸岡正和, 小倉恵里香 : クリンカーフリーコンクリートの基礎性状に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, 2010.7
- 3) 河合研至, コンクリートの環境負荷評① コンクリートに関する環境負荷, コンクリート工学, Vol.50, No.6, pp.554-561, 2012.6
- 4) 日本コンクリート工学会 : 性能設計対応型ポーラスコンクリートの施工標準と品質保証体制の確立研究委員会報告書, 2015.6
- 5) 武田昌也, 齋藤俊克, 出村克宣, ポーラスコンクリートの静弾性係数推定式における高炉スラグ微粉末およびフライアッシュの混和材係数の検討, セメント・コンクリート論文集, Vol.75, pp.195-201, 2021.3
- 6) チンジョンイ, 今本啓一, 清原千鶴 : 全量高炉スラグ系副産物としたクリンカーフリーコンクリートの基本物性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.44, No.1, pp.1174-1179, 2022.7
- 7) 坂本英輔, 三島直生, 畑中重光 : ポーラスコンクリートの保水・揚水・透水性能に関する基礎的研究, 日本建築学会学術講演梗概集 (東海), 2012.9
- 8) 原品 武, 今本 啓一, 清原 千鶴, 真野 孝次 : 非鉄スラグ細骨材を用いたコンクリートの強度特性および乾燥収縮に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 83 巻, 750 号, pp.1087-1095, 2008.8
- 9) 加藤俊充, 五十嵐心一, 川村満紀 : 軽量骨材による内部養生が高強度コンクリートの内部組織形成に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.675-680, 2004.7
- 10) 夏目実穂, 三島直生, 畑中重光 : ポーラスコンクリートの透水試験結果に及ぼす測定条件の影響に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.1690-1695, 2014.7
- 11) 今本啓一, 石井寿美江, 荒井正直 : 各種骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮特性と骨材比表面積の影響, 日本建築学会構造系論文集, 71 巻, 606 号, pp.9-14, 2006.8