

◇ 報 告 ◇

高炉セメントC種を使用したコンクリートの各種物性

Properties of Concrete Made of Portland
Blast-furnace Slag cement Type C

藤 原 有 彩*, 石 田 征 男**, 林 建 佑***,
米 山 暁****, 小 畠 明*****, 梶 屋 敬一郎*****,
中 村 敦 士*****, 中 村 美 咲*****

FUJIWARA, Arisa*; ISHIDA, Masao**; HAYASHI, Kensuke***;
YONEYAMA, Akira****; OBATAKE, Akira*****; KAJIYA, Keiichirou*****;
NAKAMURA, Atsushi*****; NAKAMURA, Misaki*****

要 旨

当社は、建設業界における環境負荷低減型コンクリートの需要拡大に伴い、2025年9月より高炉セメントC種を販売開始しており、高炉セメントC種の販売に向け、適正かつ有効な利用を促進することを目的とした技術資料の整備を行った。本報では、当社が販売している高炉セメントC種(BC)を用いて作製したコンクリートのフレッシュ性状、強度特性、および各種耐久性の評価で得られた結果について報告する。BCを使用したコンクリートにて所定のスランプおよびスランプフローを得るために必要な高性能 AE 減水剤 (SP) 量は、いずれの環境温度においても、標準的な使用量であり、普通ポルトランドセメント (N) の場合と比較して必要な SP 量が少なくなった。BC を使用したコンクリートは、N を使用したコンクリートと比較して材齢初期の圧縮強度は低いものの、長期にわたる強度増進が大きかった。また、環境温度が高いほど材齢 7 日の圧縮強度は大きく、材齢 7 日以降の圧縮強度の増進は環境温度が 5℃ の場合は 20℃ の場合と同程度であるが、35℃ の場合は小さくなった。BC を使用したコンクリートの耐久性として、乾燥収縮試験では N の場合と比較して、質量減少率が小さく、乾燥期間 26 週における長さ変化率は同等以下であった。BC を使用したコンクリートは、N を使用した場合と比較して明確に耐硫酸性が優れていることを確認した。

キーワード：高炉セメントC種、フレッシュ性状、力学特性、耐久性、耐硫酸性

* 研究開発本部 セメント・コンクリート研究所 コンクリートソリューショングループ

Concrete Solution Group, Cement & Concrete Research Laboratory, Research & Development Division

** 研究開発本部 セメント・コンクリート研究所 コンクリートソリューショングループ リーダー

Manager, Concrete Solution Group, Cement & Concrete Research Laboratory, Research & Development Division

*** 研究開発本部 セメント・コンクリート研究所 固・不溶化技術グループ

Solidification & Immobilization Technology Group, Cement & Concrete Research Laboratory, Research & Development Division

**** 太平洋マテリアル株式会社 開発研究所

Research & Development Laboratory, Taiheiyo Materials Corporation

***** セメント事業本部 営業部 技術グループ リーダー

Manager, Technical Support Group, Sales Department, Cement Business Division

***** セメント事業本部 営業部 技術グループ

Technical Support Group, Sales Department, Cement Business Division

ABSTRACT

In response to the growing demand for environmentally friendly concrete in the construction industry, Taiheiyo Cement has been selling Portland blast-furnace slag cement type C since September 2025. As part of preparation for the launch of the product, technical documentation was developed to promote its proper and effective use.

This report presents the results of evaluations of the fresh properties, strength characteristics, and various durability aspects of concrete produced using the Portland blast-furnace slag cement type C (BC) product of Taiheiyo Cement.

The admixture dosage required to achieve the target slump and slump flow for BC-based concrete was found to be within a standard range at all ambient temperatures, being lower than that required for concrete using ordinary Portland cement(N).

Although the compressive strength was lower at early ages compared to N-based concrete, the BC-based concrete showed greater long-term strength development. In addition, higher ambient temperatures resulted in greater 7-day compressive strength. The increase in compressive strength after 7 days was similar between 5°C and 20°C, but was significantly smaller at 35°C.

Regarding the durability, the BC-based concrete exhibited a lower mass loss ratio than that of N-based concrete in drying shrinkage tests, and its length change at 26 weeks of drying was equal to or smaller than that of N-based concrete. Furthermore, the BC-based concrete was found to have significantly higher resistance to sulfuric acid compared to N-based concrete.

Keywords : *Portland blast-furnace slag cement type C, Fresh properties, Mechanical property, Durability, Sulfuric acid resistance*

1. はじめに

近年、建設分野における低炭素化に向けた取り組みとして、セメントの一部を高炉スラグ微粉末や石灰石微粉末などの混和材で多量置換した混合セメントの開発、およびそれらを利用した環境負荷低減型コンクリートの実用化に向けた検討が進められている。

当社では、カーボンニュートラル実現に向けた取り組みとして、2025年9月より低炭素型混合セメントである高炉セメントC種(BC)の販売を開始した¹⁾。

高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートの特徴として、普通ポルトランドセメント(N)の場合と比較して、初期材齢での強度発現が遅いものの、高炉スラグ微粉末の潜在水硬性により中・長期強度発現に優れること²⁾や、強度発現性に及ぼす養生温度の影響が大きく、特に若材齢において顕著であること³⁾が知られている。また、高炉スラグ微粉末を多量添加することで、セメント鉱物の水和により生成する水酸化カルシウムや化学抵抗性の小さいアルミネー

ト系水和物が減少することから水密性や化学抵抗性に優れること⁴⁾などが知られている。しかしながら、これらの物性は、基材セメントおよび高炉スラグ微粉末の化学組成や粉末度などの特性によっても異なることが報告されている⁵⁾。

そこで、当社で製造し販売を開始したBCを対象に、適正かつ有効な利用を促進することを目的として、コンクリートデータの整備を実施した。本報では、当社で製造したBCを使用したコンクリートのフレッシュ性状、力学特性、発熱特性、および耐久性を報告する。

2. 試験概要

2.1 試験材料およびコンクリート配合

使用材料をTable 1に示す。練混ぜ水は上水道水とした。セメントは市販のNを高炉スラグ微粉末を68mass%混合したBCとし、比較対象としてNを使用した場合についても試験を実施した。それぞれのセ

メントの品質試験結果を **Table 2** に示す。また、細骨材は山砂、粗骨材には砕石 2005 をそれぞれ使用した。化学混和剤として市販の高性能 AE 減水剤 遅延形（混和材高含有コンクリート用粘性低減タイプ;SP1）、高性能減水剤（コンクリート製品用;SP2）、高性能 AE 減水剤 標準形（SP3）、AE 減水剤 遅延形（超保持型高機能タイプ;AD）、および AE 剤（AE）を目的に応じて使い分けた。

コンクリートの配合を **Table 3** に示す。フレッシュ性状および力学特性の評価では水セメント比（W/C）を 35, 45%, および 60% とし、耐久性の評価では材齢 28 日における圧縮強度が 40N/mm² 程度となるよう、BC は W/C41%, N は W/C50% とした。断熱温度上昇試験は、BC を使用し、単位セメント量を 250, 300kg/m³ および 350kg/m³ として実施した。耐硫酸性の評価は、W/C を 45% として評価を行った。

コンクリートのフレッシュ性状は、練上り直後においてスランプ 21.0±1.0cm、スランプフロー42.5

±2.5cm、および空気量 4.5±0.5%を満足するよう、高性能 AE 減水剤、AE 減水剤および AE 剤の添加量を調整した。

2.2 コンクリートの作製方法

コンクリートの練混ぜには、水平二軸型強制練ミキサ（定格容量 60L）を使用した。練混ぜ方法は、セメント、細骨材および粗骨材を 15 秒混合した後に、混和剤を含む練混ぜ水を投入し、さらに 90 秒練り混ぜた後に排出した。なお、使用材料は試験前日より所定の温度（5, 20℃および 35℃）に管理された恒温室内で温度管理を行った。

2.3 評価項目および試験方法

評価項目およびコンクリート試験方法を **Table 4** に示す。コンクリートのフレッシュ性状の評価として、スランプ試験（JIS A 1101）、スランプフロー試験（JIS A 1150）、空気量試験（JIS A 1128）を実施

Table 1 Materials of concrete
(コンクリートの使用材料)

Materials	Symbol	Density (g/cm ³)	Type/Characteristics
Water	W	1.00	Tap Water
Cement	N	3.16	Ordinary Portland Cement
Blast furnace slag	BFS	2.91	Ground Blast furnace slag;SSA*:4,430 cm ² /g,SO ₃ :2.15%
Fine aggregate	S	2.57**	Pit sand; Absorption:2.10%; Solid volume percentage:68.7%
Coarse aggregate	G	2.64**	Crushed sand stone; Size:20mm-5mm; Absorption:0.75%; Solid volume percentage:61.3%
Chemical admixture	SP1	—	Polycarboxylic acid based air entraining and water reducing agent for high admixture content concrete
	SP2	—	Polycarboxylic acid based water reducing agent for concrete products
	SP3	—	Polycarboxylic acid based air entraining and water reducing
	AD	—	Lignosulfonate acid and Polycarboxylic acid based air entraining and water reducing agent
	AE	—	Air entraining agent

*Specific Surface Area measured by Blaine's method

**density in saturated surface-dry condition

Table 2 Cement quality test results
(セメントの品質試験結果)

Cement	Density (g/cm ³)	SSA* (cm ² /g)	Setting			Soundness test	Compressive strength (N/mm ²)		
			Water content (%)	Initial setting (h-min)	Final setting (h-min)	Le Chatelier method (mm)	3d	7d	28d
BC	2.98	4110	30.9	3-35	5-45	1.0	13.3	28.2	49.8
N	3.16	3340	27.4	2-15	3-20	—	30.3	45.1	61.6

*Specific Surface Area measured by Blaine's method

Table 3 Mix proportion of concrete
(コンクリートの配合)

Ambient temperature (°C)	W/C (%)	Cement type	Bulk volume of coarse aggregate (m³/m³)	s/a* (%)	Unit content (kg/m³)				Chemical admixture (C×%)		Curing	Test
					W	C	S	G	SP or AD	AE		
5	45	BC	0.570	—	160	356	837	922	Control	Control	Water	1, 2
		N			160	356	856	922				1, 2
20	35	BC	0.570	—	160	457	750	922	Control	Control	Water	1, 2
		N			160	457	774	922				1, 2
20	45	BC	0.570	—	160	356	837	922	Control	Control	Water	1, 2, 4
											Steam	1, 2
		N			160	356	856	922	Control	Control	Water	1, 2, 4
											Steam	1, 2
20	60	BC	0.570	—	160	267	915	922	Control	Control	Water	1, 2
		N			160	267	928	922				1, 2
35	45	BC	0.570	—	160	356	837	922	Control	Control	Water	1, 2
		N			160	356	856	922				1, 2
20	41	BC	0.570	—	160	390	808	922	Control	Control	Water	3
	50	N			160	320	885	922				3
20	46	BC	—	44	160	350	766	1001	Control	Control	Water	5
		N			160	350	774	1012				5
20	53	BC	—	46	160	300	820	989	Control	Control	Water	5
		N			160	300	828	998				5
20	64	BC	—	48	160	250	877	976	Control	Control	Water	5
		N			160	250	883	983				5

1: Fresh property, 2: Mechanical property, 3: Durability, 4: Sulfuric acid resistance, 5: Thermal property

*sand-total aggregate ratio

した。フレッシュ性状は、5, 20℃および35℃の各温度環境でコンクリートを練り混ぜ、試験に供した。力学特性の評価として、圧縮強度試験 (JIS A 1108) および静弾性係数試験 (JIS A 1149) を実施した。

力学特性に関する試験は、コンクリートの打込み後、水中養生を行った場合および蒸気養生を行った場合のそれぞれについて実施した。水中養生を行う供試体は、材齢 24 時間まで 20℃の恒温室内において型枠内養生を行った。型枠内養生は水分の逸散を防止する目的で上面をビニールでシールした。供試体は、材齢 24 時間で脱型し、所定の材齢まで練混ぜ時の環境温度と同一温度の水中で養生を実施した。蒸気養生条件を Fig. 1 に示す。蒸気養生の条件は、前置き時間を 2 時間または 4 時間とし、昇温速度 20℃/h で 65℃まで昇温し、最高温度を 3 時間保持した後、降温速度 4.5℃/h で 20℃まで降温した。供試体は、蒸気養生後、材齢 24 時間で脱型し、その後

は所定の材齢まで 20℃, 60%RH の恒温室内で気中養生を行った。

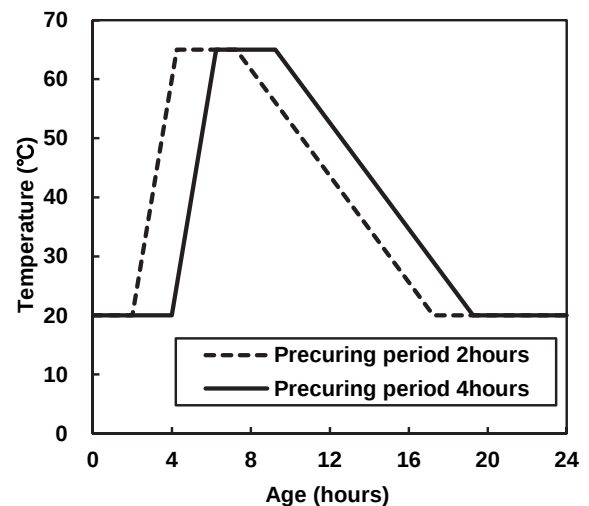
Fig.1 Steam curing conditions
(蒸気養生条件)

Table 4 Test item and method
(試験項目および試験方法)

Test item		Test method	Ambient temperature (°C)			Chemical admixture			Remarks
			5	20	35	W/C (%)			
						35	45	60	
Property of fresh concrete	Slump	JIS A 1101	○	○	○	SP1	SP1	AD	Age of measurement:0 min after mixing
	Slump flow	JIS A 1150	○	○	○	SP1	SP1	AD	Age of measurement:0 min after mixing
	Air content	JIS A 1128	○	○	○	SP1	SP1	AD	Age of measurement:0 min after mixing
	Concrete temperature	JIS A 1156	○	○	○	SP1	SP1	AD	Age of measurement:0 min after mixing
Mechanical property	Compressive strength (Water curing)	JIS A 1108	○	○	○	SP1	SP1	AD	Specimen:φ100×200mm,N=3 Age of measurement: 7,28,56,91days
	Compressive strength (Steam curing)	JIS A 1108	—	○	—	—	BC: SP1 N: SP2	—	Specimen:φ100×200mm,N=3 Age of measurement: 24hours,7,14,28days
	Static modulus of elasticity (Young's Modulus)	JIS A 1149	—	○	—	SP1	SP1	AD	Specimen:φ100×200mm,N=3 Age of measurement:28days
Thermal property	Adiabatic temperature rise	JCI-SQA3	—	○	—	SP1			Age of measurement: ~14days
Durability of concrete	Drying shrinkage	JIS A 1129-2	—	○	—	SP1			Specimen:100×100×400mm, N=3, Age of measurement: 1,4,8,13,26weeks
	Carbonation depth (Accelerated carbonation)	JIS A 1153	—	○	—	SP1			Specimen:100×100×400mm, N=3, Age of measurement: 1,4,8,13,26weeks
	Sulfuric acid resistance	—	—	○	—	—	BC: SP1 N: SP3	—	Specimen:φ75×150mm,N=3 Age of measurement: 28,35,42,56,84days

発熱特性の評価として断熱温度上昇試験 (JCI-SQA3) を実施した。耐久性の評価として、乾燥収縮試験 (JIS A 1129-2)、促進中性化試験 (JIS A 1153) および硫酸浸漬による耐硫酸性試験を実施した。耐硫酸性試験は下水道コンクリート構造物の腐食抑制技術及び防食技術マニュアル⁶⁾を参考に実施し、コンクリート供試体 ($\phi 75 \times h150$ mm) の質量を測定し、浸漬前 (材齢 28 日) からの質量変化率により評価した。

3. 実験結果

3.1 フレッシュ性状

フレッシュ性状の結果を Table 5 に示す。BC を使用したコンクリートにおける所定のスランプおよび

スランプフローを得るために必要な SP 量は、いずれの環境温度においても、標準的な使用量であり、N の場合と比較して必要な SP 量が少なくなった。この結果より、BC を使用した場合は、N の場合よりも流動性が優れている可能性が示唆された。

3.2 圧縮強度

3.2.1 水中養生

コンクリートの圧縮強度を Table 6 に示す。また、20°C 環境における各 W/C の圧縮強度を Fig. 2 に、各環境温度の圧縮強度を Fig. 3 に示す。環境温度が 20°C の場合、いずれの W/C においても BC を使用したコンクリートは、長期にわたり強度が増進していることが確認された。特に W/C60% では材齢 91 日で N が 39.0 N/mm² であるのに対して BC が 41.2 N/mm² と、

Table 5 Experimental results of fresh concrete
(コンクリートのフレッシュ試験結果)

Ambient temperature (°C)	W/C (%)	Cement	Bulk volume of coarse aggregate (m ³ /m ³)	W (kg/m ³)	Chemical admixture (C×%)		Slump (cm)	Slump flow (cm)	Air (%)
					SP or AD	AE			
5	45	BC	0.570	160	0.70	0.001	21.5	41.0	4.1
		N			0.80	0.002	21.0	40.5	4.8
20	35	BC	0.570	160	0.90	0.021	22.0	43.0	4.3
		N			1.25	0.004	22.0	40.5	4.9
20	45	BC	0.570	160	0.75	0.004	21.5	42.0	4.4
		N			0.95	0.004	22.0	44.5	5.0
20	60	BC	0.570	160	1.15	0.010	21.0	40.5	4.0
		N			1.30	0.009	22.0	40.5	4.3
35	45	BC	0.570	160	0.75	0.005	21.5	43.5	4.8
		N			1.00	0.004	21.0	42.5	4.3

Table 6 Compressive strength
(コンクリートの圧縮強度)

Ambient Temperature (°C)	Cement	W/C (%)	Compressive strength (N/mm ²)											
			Water curing				Steam curing							
							Precuring period 2hours				Precuring period 4hours			
			7d	28d	56d	91d	24h	7d	14d	28d	24h	7d	14d	28d
5	BC	45	8.49	27.9	34.1	40.0								
	N		29.4	52.4	58.0	63.5								
20	BC	35	35.6	63.3	68.4	76.3								
	N		57.1	78.0	79.5	85.6								
	BC	45	22.9	40.2	47.4	53.6	19.3	25.7	28.8	31.4	21.9	27.0	29.5	31.6
	N		40.3	54.5	59.6	63.0	20.5	31.6	35.0	36.8	22.1	32.9	36.3	37.3
	BC	60	12.8	26.9	33.4	41.2								
	N		22.9	34.2	37.2	39.0								
35	BC	45	30.5	41.6	46.9	48.5								
	N		40.3	50.9	57.4	60.0								

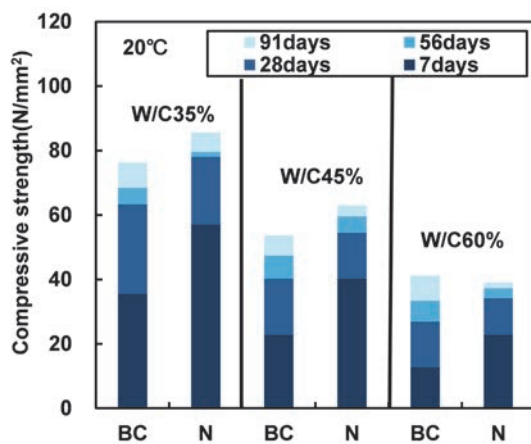


Fig.2 Compressive strength at 20°C for each W/C ratio
(20°Cでの各 W/C の圧縮強度)

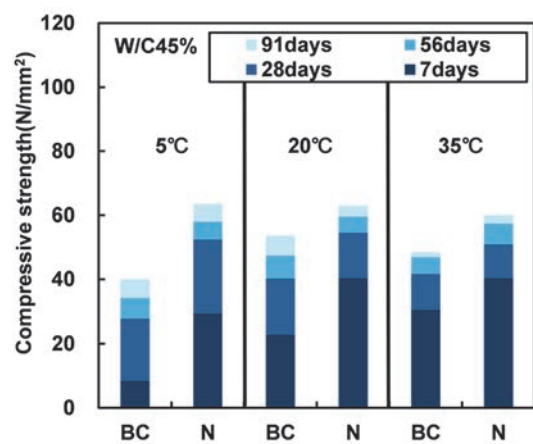


Fig.3 Compressive strength at various temperature
(各環境温度での圧縮強度)

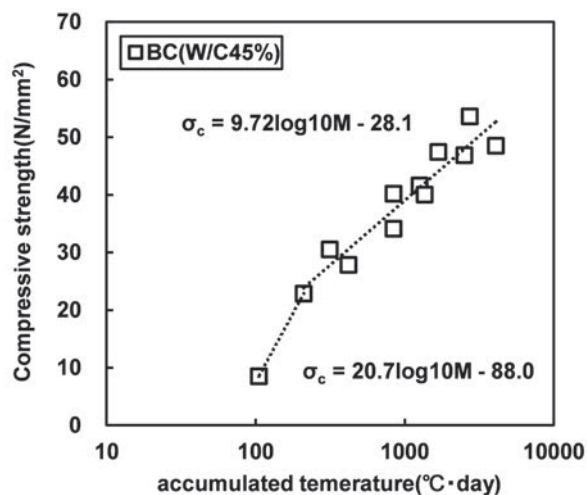


Fig.4 Relationship between accumulated temperature and compressive strength : BC
(積算温度と圧縮強度の関係 : BC)

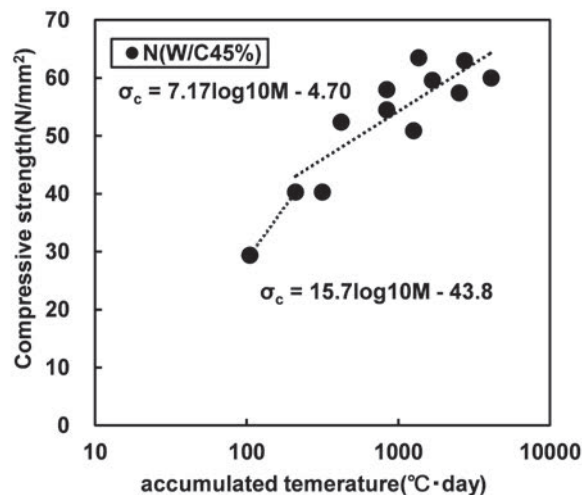


Fig.5 Relationship between accumulated temperature and compressive strength : N
(積算温度と圧縮強度の関係 : N)

BCを使用したコンクリートの長期強度の方がNを使用したコンクリートと比較して大きくなることが確認された。この結果について、既報⁵⁾でも高炉セメントは長期にわたる強度が増進する結果が得られており、BCを使用したコンクリートの長期にわたる強度増進は、高炉スラグ微粉末 (BFS) の潜在水硬性によるものと考えられる。

圧縮強度に及ぼす養生温度の影響について、材齢 7 日では、使用したセメントの種類によらず養生温度が高いほど圧縮強度が大きい結果であった。材齢 7 日以降の圧縮強度に及ぼす養生温度の影響はセメントの種類によって異なり、N を使用したコンクリートは養生温度が低いほど圧縮強度の増進が大きく、材齢 28 日以降では環境温度による強度の差が小さい結果となった。一方で、BC を使用した場合の材齢 7 日以降の強度増進は、養生温度が 5°C および 20°C で同等であり、35°C ではやや小さくなったため、養生温度によって強度差が認められた。

環境温度と材齢から算出した積算温度と水中養生を行った場合の W/C45% の圧縮強度の関係を Fig. 4 および Fig. 5 に示す。積算温度は、-10°C 以下では強度が増進しないと仮定して、式(1)により算出した。BC を使用したコンクリートの積算温度と圧縮強度の関係は、N の場合と同様に 210°C・日程度を境に 2 つの直線で表すことができ、210°C・日以上における傾きは N を使用した場合よりも大きくなった。これは、BC が長期にわたって強度が増進する特性を有することに起因すると考えられる。20°C 水中養生を行った場合における BC および N を使用したコンクリ

ートのセメント水比 (C/W) と圧縮強度の関係を Fig. 6, Fig. 7 に示す。各材齢において C/W と圧縮強度の関係は直線で表すことが可能であり、BC の場合においても C/W による圧縮強度の管理が可能であることが示された。

$$M = \sum_0^t (\theta - A) \Delta t \quad \text{式(1)}$$

M: 積算温度 (°C・日または°C・時)

θ : Δt 時間中のコンクリート温度 (°C)

A: 定数

(-10°Cとし、この温度以下では水和反応が停止するという考え方に基づく)

Δt : 時間 (日または時)

3.2.2 蒸気養生

蒸気養生を行ったコンクリートの圧縮強度を Fig. 8 に示す。前置き時間が圧縮強度に及ぼす影響について、いずれのセメントを用いた場合も、圧縮強度は全材齢において前置き時間の影響は認められなかった。既報⁷⁾では、BC を使用したコンクリートの圧縮強度に及ぼす前置き時間の影響について検討しており、すべての材齢において前置き時間が 4 時間の場合は 2 時間の場合よりも圧縮強度が大きく、その傾向は材齢初期において顕著であることが報告されている。本検討では遅延効果のある混和剤を使用したことで、初期水和が抑制され、前置き時間の

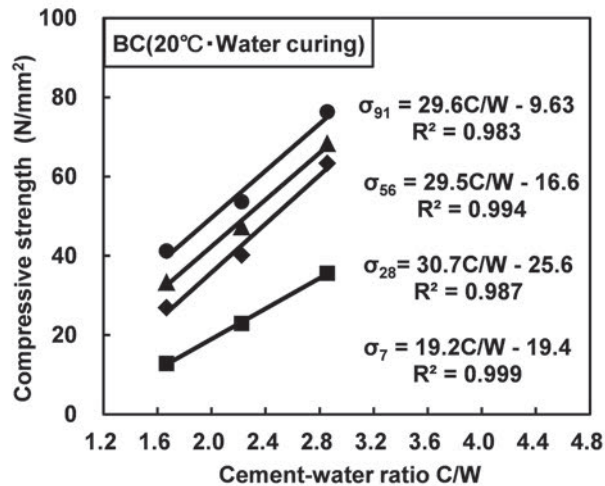


Fig.6 Relationship between cement-water ratio and compressive strength : BC
(セメント水比と圧縮強度の関係 : BC)

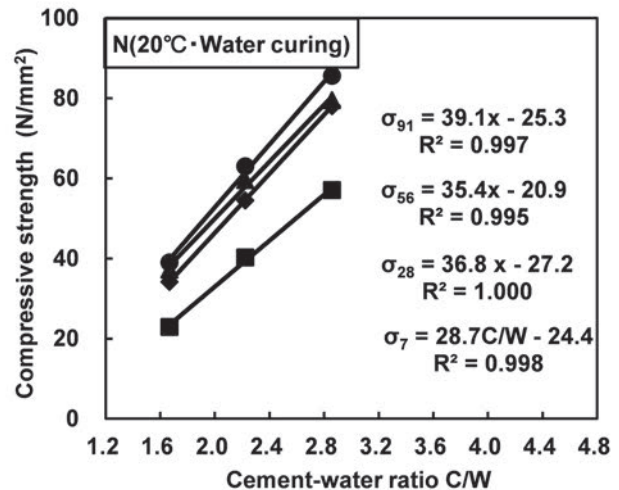


Fig.7 Relationship between cement-water ratio and compressive strength : N
(セメント水比と圧縮強度の関係 : N)

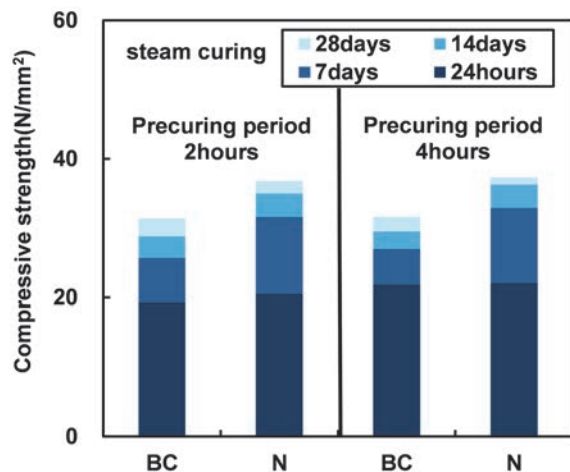


Fig.8 Compressive strength at steam curing
(蒸気養生での圧縮強度)

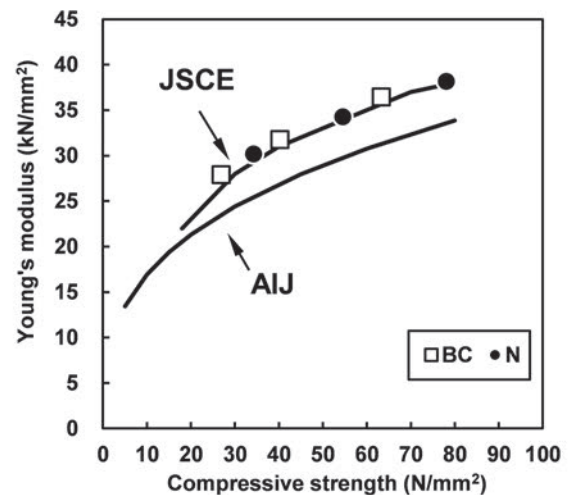


Fig.9 Relationship between compressive strength and Young's modulus
(圧縮強度と静弾性係数の関係)

違いによる影響が小さくなったと考えられる。BC を使用したコンクリートについて、材齢 24 時間における圧縮強度は、N を使用した場合と同程度であったが、材齢 24 時間以降の圧縮強度は、N よりも小さい結果となった。

3.2.3 静弾性係数

コンクリートの静弾性係数を **Table 7** に、圧縮強度と静弾性係数の関係を **Fig. 9** にそれぞれ示す。また、**Fig. 9** には土木学会コンクリート標準示方書〔設計編〕⁸⁾ (JSCE) および日本建築学会 建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事⁹⁾ (AIJ) で示される関係式 (式(2)および式(3)) を併記している。BC を使用したコンクリートの静弾性係数と圧

縮強度の関係は N の場合と同一であり、従来のコンクリートと同様に各種指針式により表すことができた。この結果より、BC を使用したコンクリートにお

Table 7 Young's Modulus
(静弾性係数)

W/C (%)	Cement	Young's Modulus (kN/mm ²)
		28d
35	BC	36.5
	N	38.2
45	BC	31.8
	N	34.3
60	BC	27.9
	N	30.2

いても従来と同一の設計を行うことが可能であると
考えられる。

$$\begin{aligned}
 E_c &= \left(2.2 + \frac{\sigma_c - 18}{20}\right) \times 10^4 & \sigma_c < 30 \text{ N/mm}^2 \\
 E_c &= \left(2.8 + \frac{\sigma_c - 30}{33}\right) \times 10^4 & 30 \leq \sigma_c < 40 \text{ N/mm}^2 \\
 E_c &= \left(3.1 + \frac{\sigma_c - 40}{50}\right) \times 10^4 & 40 \leq \sigma_c < 70 \text{ N/mm}^2 \\
 E_c &= \left(3.7 + \frac{\sigma_c - 70}{100}\right) \times 10^4 & 70 \leq \sigma_c < 80 \text{ N/mm}^2
 \end{aligned}
 \quad \text{式 (2)}$$

$$E_c = 3.35 \times 10^4 \times \left(\frac{r}{2.4}\right)^2 \times \left(\frac{\sigma_c}{60}\right)^{\frac{1}{3}} \quad \text{式 (3)}$$

E: コンクリートのヤング係数 (N/mm²)

r: コンクリートの単位容積質量 (t/m³)

σ : コンクリートの圧縮強度 (N/mm²)

3.4 断熱温度上昇量

BC を使用し, 環境温度 20℃の条件で練混ぜを行ったコンクリートの断熱温度上昇試験結果を **Fig. 10** に示す. 図中には, 参考として, 当社のセメント総合技術資料¹⁰⁾に記載される N を使用したコンクリートの断熱温度上昇量を示す. BC を使用したコンクリートの断熱温度上昇量は, 以下に示す式 (4) および式 (5) を用いて回帰し, 近似式を求めた. 総合技術資料では, 式 (4) により近似式を導出されているが, BC を使用した場合は, 材齢初期の温度上昇が緩やかであり, 式 (4) を適用した場合には残差 (誤差) が大きくなったため, 式 (5) により回帰した. 断熱温度上昇式

の係数を用いて最小二乗回帰して求めた各係数と単位セメント量の関係を **Fig. 11** および **Table 8** に示す.

BC を使用したコンクリートの同一セメント量における断熱温度上昇量は N の場合と比較して小さく, 終局断熱温度上昇量を表す K 値は BC を使用した場合の方が小さい結果となった.

$$Q_{(t)} = K(1 - e^{-\alpha t}) \quad \cdots \text{式 (4)}$$

$$Q_{(t)} = K(1 - e^{-\alpha t^\beta}) \quad \cdots \text{式 (5)}$$

$Q_{(t)}$: 材齢 t 日までの断熱温度上昇量 (℃)

K : 断熱温度上昇量の終局値 (℃)

α, β : 発熱速度を表す係数

t : 材齢 (日)

3.5 耐久性

3.5.1 耐久性試験に使用したコンクリートの基本物性

乾燥収縮試験および促進中性化試験は, 材齢 28 日圧縮強度が 40N/mm² 程度となるように W/C を調整して実施した. 試験に使用したコンクリートのフレッシュ性状および圧縮強度を **Table 9** に示す. BC を使用したコンクリートの材齢 28 日における圧縮強度は, N の場合よりもやや大きくなった.

3.5.2 乾燥収縮

コンクリートの乾燥収縮試験の結果を **Table 10**, **Fig. 12** および **Fig. 13** に示す. BC を使用した場合は, N の場合と比較して, 水分逸散を主要因とする質量減少率が小さく, 乾燥期間 26 週における長さ変化率は同等以下であることを確認した.

Table 8 Relationship between unit cement content and the coefficients in the adiabatic temperature rise equation
(単位セメント量と断熱温度上昇式における係数の関係)

Cement	relationship			C=300 kg/m ³		
	K-C	α -C	β -C	K	α	β
BC	K=0.100C+7.35	α =0.0004C+0.450	β =0.0010C+0.985	37.4	0.570	1.285
N	K=0.117C+12.6	α =0.0028C+0.392	—	47.7	1.232	—

Table 9 Compressive strength of specimens used in the durability test
(耐久性試験で使用した供試体の圧縮強度)

Cement	W/B (%)	Chemical admixture (C×%)		Property of fresh concrete		Compressive strength (N/mm ²)	
		SP	AE	Slump (cm)	Air (%)	7d	28d
BC	41	0.80	0.0070	22.0	4.6	26.6	45.9
N	50	0.85	0.0030	20.5	4.9	29.4	41.2

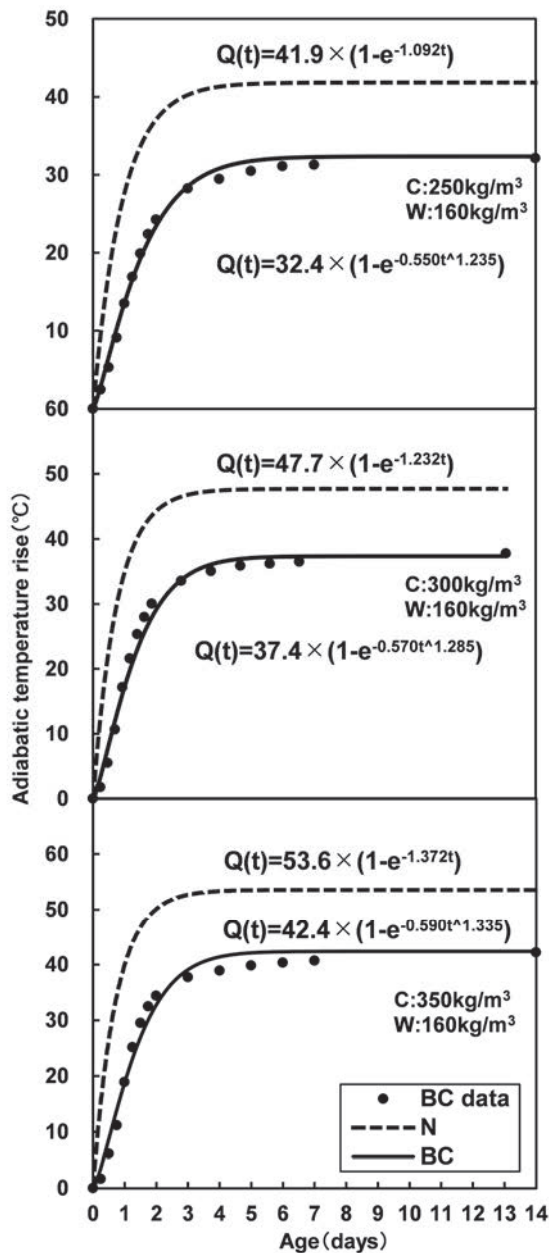


Fig.10 Adiabatic temperature rise (断熱温度上昇量)

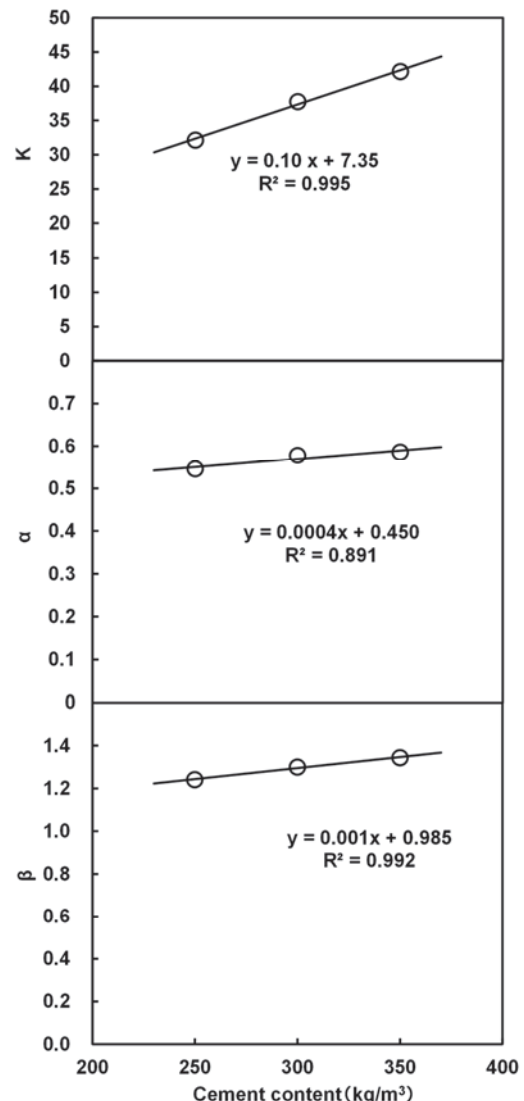


Fig.11 Relationship between unit cement content and the coefficients in the adiabatic temperature rise equation : BC
(単位セメント量と断熱温度上昇式における係数の関係 : BC)

3.5.3 中性化

コンクリートの中性化深さを Table 11 および Fig. 14 にそれぞれ示す。中性化深さが $\sqrt{t}$ 則に従うと仮定して算出した中性化速度係数は、N を使用したコンクリートが 2.32mm/ $\sqrt{\text{週}}$ であるのに対して、BC を使用したコンクリートが 3.13mm/ $\sqrt{\text{週}}$ であり、BC の方がわずかに大きくなることを確認した。これは、高炉スラグ微粉末とセメントの水和反応で水酸化カルシウムが消費されることに加え、高炉スラグ微粉末を添加したことによる希釈効果によって生成

される水酸化カルシウム量も減少するため、N と比較して BC の水和物中の水酸化カルシウムが少なくなることから、中性化が促進されやすいためであると考えられる。

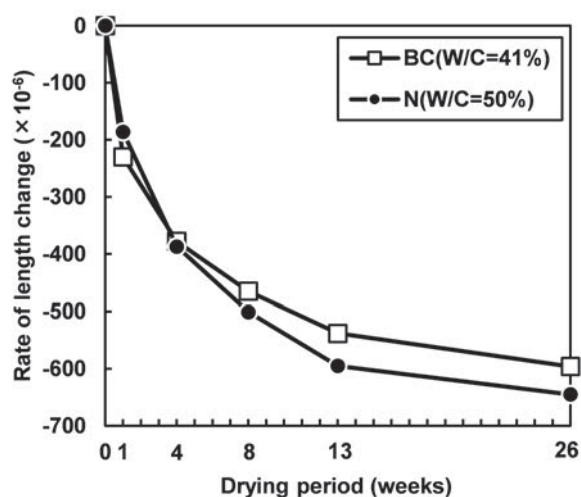
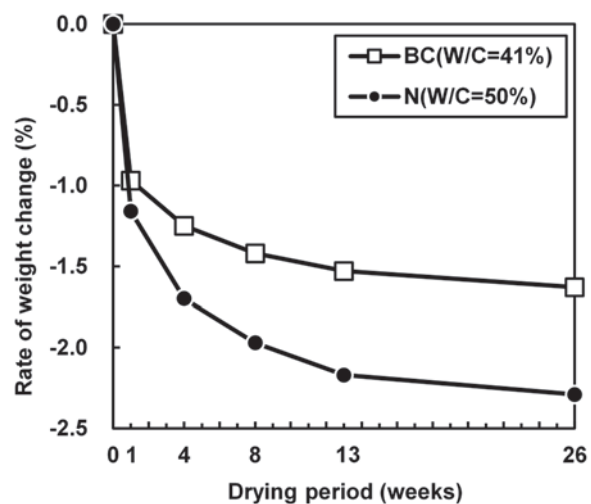
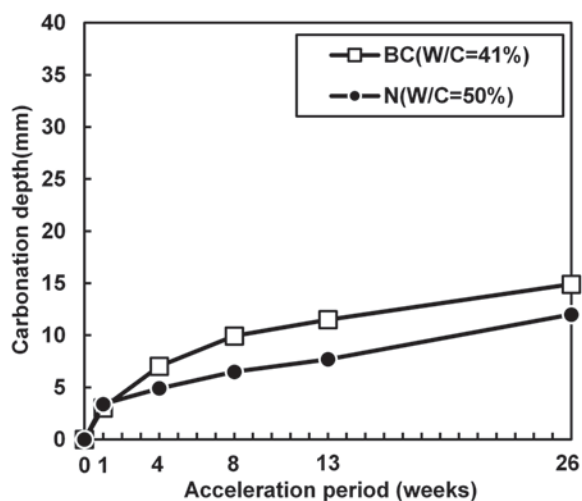
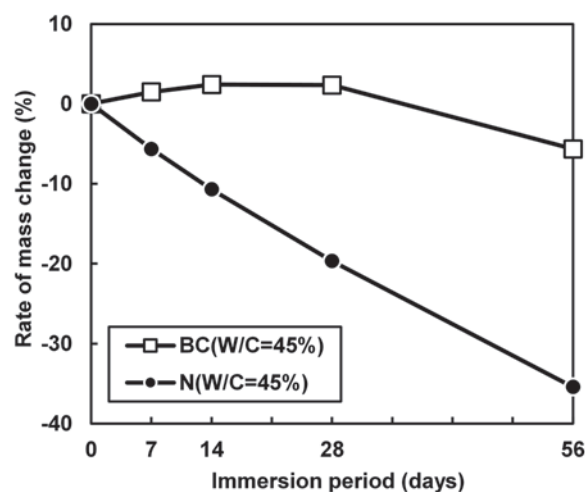
既往の研究¹¹⁾では、促進中性化試験は CO₂ 濃度が高く、かつ常に乾燥状態で行われるため、高炉セメント B 種を用いた場合には N と比較して中性化深さが大きくなる傾向を示すものの、実構造物では、高炉セメントを使用した場合と N を使用した場合で中性化深さの差が小さい結果が報告されている。本検討

Table 10 Drying shrinkage
(乾燥収縮)

Cement	Rate of length change ($\times 10^{-6}$)					Rate of weight change (%)				
	Drying period (weeks)					Drying period (weeks)				
	1	4	8	13	26	1	4	8	13	26
BC	-230	-378	-465	-538	-596	-0.97	-1.25	-1.42	-1.53	-1.63
N	-186	-387	-501	-595	-645	-1.16	-1.70	-1.97	-2.17	-2.29

Table 11 Carbonation depth
(中性化深さ)

Cement	Carbonation depth (mm)					Carbonation rate Coefficient (mm/ $\sqrt{\text{week}}$)
	Acceleration period (weeks)					
	1	4	8	13	26	
BC	3.0	7.0	9.9	11.5	14.9	3.13
N	3.4	4.9	6.5	7.7	12.0	2.32

Fig.12 Rate of length change
(長さ変化率)Fig.13 Rate of mass change
(質量変化率)Fig.14 Carbonation depth
(中性化深さ)Fig.15 Mass change due to sulfuric acid immersion
(硫酸浸漬による質量変化)

においても実環境では促進試験とは異なる結果を示す可能性があると考えられるため, 今後, 実環境での試験を実施し, 中性化速度係数について評価を行う予定である。

3.5.4 耐硫酸性

硫酸浸漬によるコンクリート供試体の質量変化を **Table 12** および **Fig. 15** に, 浸漬期間 56 日における供試体の状況写真を **Fig. 16** にそれぞれ示す。N を使用したコンクリートでは硫酸浸漬期間が短い段階で供試体の損傷にともなう質量減少が確認され, 浸漬期間の長くなるほど劣化が進行した。一方, BC を使用したコンクリートでは浸漬 28 日まで質量減少が見られず, 浸漬期間 56 日においても供試体の損傷は軽微であり, 質量減少も小さい結果となった。既報¹²⁾では高炉スラグを配合すると, 未配合品と比較して劣化が少なく耐硫酸性に優れていることが確認されている。また, 硫酸イオンは水酸化カルシウムと反応し, 脆弱な二水石膏が生成することが知られている。BC が N と比較して耐硫酸性に優れている要因としては, 硫酸と反応する水和物中の水酸化カルシウム量が減少することに加え, 長期材齢での高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの空隙構造が高炉スラグの潜在水硬性により緻密な構造を形成する¹³⁾ことが影響していると考えられる。

Table 12 Mass change due to sulfuric acid Immersion
(硫酸浸漬による質量変化)

Cement	Rate of mass change (%)				
	Immersion period (days)				
	0	7	14	28	56
BC	0	1.5	2.4	2.3	-5.7
N	0	-5.6	-10.7	-19.7	-35.4

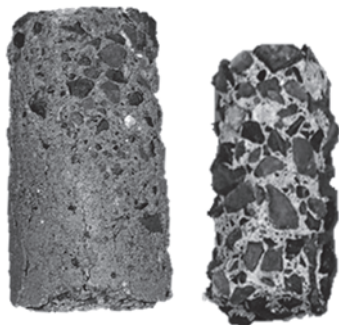


Fig.16 Photograph of specimen after 56 days of immersion (Left : BC, Right : N)
(浸漬期間 56 日における供試体写真
左図 : BC, 右図 : N)

4. ま と め

高炉セメント C 種 (BC) について普通ポルトランドセメント (N) と比較することにより, コンクリートの各種物性について評価した。本検討で得られた知見は以下に示す通りである。

- (1) BC を使用したコンクリートにて所定のスランプおよびスランプフローを得るために必要な SP 量は, いずれの環境温度においても, 標準的な使用量であり, N の場合と比較して必要な SP 量が少なくなった。
- (2) BC を使用したコンクリートは, N を使用したコンクリートと比較して材齢初期の圧縮強度は低いものの, 長期にわたる強度増進が大きかった。
- (3) BC を使用したコンクリートは, 環境温度が高いほど材齢 7 日の圧縮強度が大きい結果であった。材齢 7 日以降の圧縮強度の増進について, 環境温度が 5℃ の場合は 20℃ の場合と同程度であったが, 35℃ の場合は著しく小さくなった。
- (4) BC を使用したコンクリートの同一セメント量における断熱温度上昇量は N の場合と比較して小さくなった。
- (5) BC を使用したコンクリートの乾燥収縮は, N の場合と比較して, 水分逸散を主要因とする質量減少率が小さく, 乾燥期間 26 週における長さ変化率は同等以下であった。
- (6) 耐硫酸性は BC を使用したコンクリートの方が N を使用した場合と比較して明確に優れていることが確認された。

参 考 文 献

- 1) 太平洋セメント. CO₂ 排出量を約 65%削減した低炭素型混合セメント「高炉セメント C 種」の製造・販売開始について. 太平洋セメントニュースレター, 2025-05-13.
https://www.taiheiyo-cement.co.jp/news/news/pdf/250513_3.pdf,
(accessed 2026-05-15)
- 2) 遠藤裕悦, 児玉和巳, 高田 誠. 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの長期強度に関する実験的研究. コンクリート工学年次論文報告集. 1989, 11(1), p. 361-366.
- 3) 土木学会. 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの設計・施工指針 (コンクリートライブラリー 151) . 2018, p. 116.
- 4) 小林一輔. 耐海水コンクリート. コンクリートジャーナル. 1973, 11(7), p. 18-24.
- 5) 日本建築学会. 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの技術の現状. 1992.
- 6) 日本下水道事業団. 下水道コンクリート構造物の腐食抑制技術及び防食技術マニュアル. 下水道事業支援センター, 2023, p. F26-F27.
- 7) 檀 康弘, 近田孝夫, 永浜一孝. 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの蒸気養生特性. セメント・コンクリート論文集. 1991, 45, p. 222-227.
- 8) 土木学会. 2022 年度制定 コンクリート標準示方書[設計編]. 2023.
- 9) 日本建築学会. 建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 : 鉄筋コンクリート工事. 2022.
- 10) 太平洋セメント. セメント総合技術資料 第 2 版. 2016, p. 39-41.
- 11) 松田芳範, 上田 洋, 石田哲也ほか. 実構造物調査に基づく中性化に与えるセメントおよび水分の影響. コンクリート工学年次論文集(CD-ROM). 2010, 32, e1097.
- 12) 佐藤孝洋, 峯 秀和, 梅原秀哲. 高炉スラグによるコンクリートの耐硫酸性の向上に関する研究. 土木学会年次学術講演会講演概要集(CD-ROM). 2005, 60, e5-553.
- 13) 佐川孝広, 石田哲也, Yao LUAN ほか. 高炉セメントの水和物組成分析と空隙構造特性. 土木学会論文集 E. 2010, 66(3), p. 311-324.