

◇報 告◇

少量混合成分を10%まで増量したセメントを用いて
製造したコンクリートの諸特性Characteristics of Concrete Using Ordinary Portland Cement
containing 10% Minor Additional Constituents

米 山 暁*, 深 谷 竣 平*, 石 田 征 男**

YONEYAMA, Akira*; FUKATANI, Shumpei*; ISHIDA, Masao**

要 旨

セメント業界では、セメント製造における CO₂ 排出削減を目的として、少量混合成分の増量に向けた検討が行われている。本検討では、少量混合成分を 10%まで増量した試製セメント（100PC）を用いたコンクリートの基本性状および耐久性について、現行 OPC 相当品（OPC）との比較による評価を行った。その結果、フレッシュコンクリートの流動性および空気連行性は、100PC と OPC でほとんど差がなく、凝結時間は、OPC と比較してわずかに早くなった。コンクリートの圧縮強度は、100PC の粉末度を高めることで、環境温度が 10～30℃において OPC と同等となることを確認した。コンクリートの耐久性は、100PC と OPC で同等であり、セメント設計を最適化することで、現行 OPC と同等品質のコンクリートが製造できることを確認した。

キーワード: 普通ポルトランドセメント, 少量混合成分, 石灰石微粉末, フレッシュ性状, 強度特性, 耐久性

*中央研究所 セメント・コンクリート研究部 コンクリートソリューションチーム

Concrete Solution Team, Cement & Concrete Research Department, Central Research Laboratory

**中央研究所 セメント・コンクリート研究部 コンクリートソリューションチーム リーダー

Manager, Concrete Solution Team, Cement & Concrete Research Department, Central Research Laboratory

ABSTRACT

With the aim of reducing CO₂ emissions, the cement industry has been studying the possibility of increasing the amount of minor additional constituents used in ordinary portland cement (OPC) from the current level. In this study, the authors evaluated the properties of fresh and hardened concrete and durability of concrete using the test cement that contained 10% minor additional constituents (10OPC), and compared them with the quality of concrete using the current OPC. The results showed that the fresh concrete properties with 10OPC were equivalent to those with the current OPC, with the setting time being slightly earlier than that with the current OPC. With the fineness of cement increased, 10OPC achieved the same compressive strength of concrete as the current OPC at any test age at ambient temperatures of 10, 20°C and 30°C. These results showed that the properties of concrete using 10OPC were equivalent to those using the current OPC, and that concrete of the same quality as with the current OPC could be produced by optimizing the cement design.

Keywords : *Ordinary portland cement, Minor additional constituents, Limestone powder, Fresh properties, Strength characteristics, Durability*

1. はじめに

2015 年のパリ協定採択に伴い、セメント協会は、2020 年 3 月に「脱炭素社会を目指すセメント産業の長期ビジョン」を策定した。この中では、2050 年カーボンニュートラルの実現に向け、セメント産業として克服すべき課題や、対策の方向性等が示されている¹⁾。セメント産業において CO₂ 排出量の削減し、カーボンニュートラルを実現するためには、ポルトランドセメント中のクリンカー比率を低減させることが効果的である。近年では、クリンカーの使用量を低減することを目的として、ポルトランドセメント中の少量混合成分の増量に向けた検討が行われている^{2), 3)}。ポルトランドセメント中の少量混合成分を増量した場合、クリンカー比率の低下に伴い、コンクリート強度が低下する可能性がある⁴⁾。他方、アルミネート相 (C₃A) を増量したセメントにおいては、少量混合成分の置換率を 10%まで増量した場合でも、現行の普通ポルトランドセメントと同等以上のセメント強さが得られることが報告されている⁵⁾。当社では、これまで少量混合成分を 10%まで増量したセメント (10OPC) を用いて製造したコンクリートの各種性状について、現行 OPC 相当品 (OPC-L5) との比較により評価を行ってきた^{例えば 6), 7)}。本報では、

実機製造した 10OPC を用いたコンクリートのフレッシュ性状、力学特性、および耐久性に関する一連の検討で得られた知見について報告する。

2. 実験概要

2.1 使用材料およびコンクリート配合

試製セメントの基材クリンカーは、現行の普通ポルトランドセメントと同等の鉱物組成を想定した場合 (OPC クリンカー) および Bogue 式によって算定する C₃A 量を OPC クリンカーに対して約 1.5%高めた場合 (HAC クリンカー) の 2 種類とした。本検討で使用するセメントは、セメントとして OPC クリンカーを使用し、JIS R 5210 (2019) の普通ポルトランドセメントに適合するよう、少量混合成分として石灰石微粉末 (LSP) をクリンカー質量に対して内割 5%以下で混合したセメント (現行 OPC 相当品, OPC-L5), HAC クリンカーを基材とし、少量混合成分として LSP をクリンカー質量に対して 10%内割混合したセメント (HAC-L10), および少量混合成分の増量に伴うコンクリート強度の低下を補うことを目的として HAC-L10 の粉末度を高めたセメント (HAC-L10-BL) の 3 種類とした。なお、少量混合成分として使用した LSP は、国内で安定的に自給可能な石灰石を原料

とするものである。Table 1 に OPC-L5, HAC-L10 および HAC-L10-BL によるセメントの圧縮強さ試験 (JIS R 5201) の結果を示す。

コンクリート試験に使用する材料を Table 2 に、配合を Table 3 に示す。練混ぜ水は上水道水とし、細骨材および粗骨材はそれぞれ山砂およびコンクリ

ート用砕石 2005 とした。化学混和剤として市販の AE 減水剤および AE 剤を使用した。コンクリートの水セメント比 (W/C) は、45%, 50%, および 55% とした。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 12.0 ± 1.0 cm および空気量 4.5 ± 0.5 % を満足するよう、AE 減水剤の添加量を $C \times 1.0$ % として、それぞれ単位水量および AE 剤の添加量を調整した。

Table 1 Compressive strength of test cements
(試製セメントの圧縮強さ)

Cement	Compressive strength (N/mm ²)		
	3 days	7 days	28 days
OPC-L5	28.2	43.8	62.9
HAC-L10	27.2	42.3	58.8
HAC-L10-BL	29.2	44.8	61.3

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、水平二軸形の強制練ミキサ (公称容量 60L) を使用した。なお、使用材料は試験前日より所定の温度 (10, 20, 30℃) に管理された恒温室内で温度管理を行った。

Table 2 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	OPC-L5	3.15	Test cement (OPC); SSA*: 3,080cm ² /g; LSP content: 5%
	HAC-L10	3.11	Test cement; SSA*: 3,130cm ² /g; LSP content: 10%
	HAC-L10-BL	3.11	Test cement; SSA*: 3,400cm ² /g; LSP content: 10%
Fine aggregate	S	2.58**	Pit sand; Kakegawa, Shizuoka; Absorption: 2.08%; Fineness Modulus: 2.87
Coarse aggregate	G	2.64**	Crushed sandstone; Sakuragawa, Ibaraki; Size: 20mm-5mm; Absorption: 0.80%; Solid volume percentage: 60.1%
Chemical admixture	SP	—	Polycarboxylic acid-based air entraining and water reducing agent
	AE	—	Air entraining agent

* Specific Surface Area by Blaine's method

**Saturated surface-dry condition

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

W/C (%)	s/a (%)	Cement	Unit content (kg/m ³)				Chemical admixture (C×%)		Slump (cm)	Air content (%)
			W*	C	S	G	SP	AE		
45	44.0	OPC-L5	164	364	767	1000	1.00	Control	12.0±1.0	4.5±0.5
		HAC-L10	164	364	766	998				
		HAC-L10-BL	164	364	766	998				
50	45.0	OPC-L5	164	328	797	998	1.00	Control	12.0±1.0	4.5±0.5
		HAC-L10	164	328	796	997				
		HAC-L10-BL	164	328	796	997				
55	46.0	OPC-L5	164	328	797	998	1.00	Control	12.0±1.0	4.5±0.5
		HAC-L10	164	328	796	997				
		HAC-L10-BL	164	328	796	997				

*Control with slump value

2.3 評価項目および試験方法

Table 4 に評価項目およびコンクリート試験方法を示す。コンクリートのフレッシュ性状として、スランプ試験 (JIS A 1101), 空気量試験 (JIS A 1128), ブリーディング試験 (JIS A 1123), および凝結時間試験 (JIS A 1147) を行った。なお、スランプ試験については、練上り直後に加えて、練上りから 30 分、

60 分、90 分が経過した時点においても計測を行い、時間の経過に伴うスランプ値の変化を確認した。コンクリートの力学特性として、圧縮強度 (JIS A 1108) を材齢 3 日、7 日、28 日および 91 日において、静弾性係数 (JIS A 1149) を材齢 7 日、28 日および 91 日においてそれぞれ試験を実施した。コンクリートの耐久性として、乾燥収縮量 (JIS A 1129-2), 促進

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

Test item		Test method	Temperature (°C)			Remarks*
			10	20	30	
Property of fresh concrete	Slump	JIS A 1101	◎	◎	◎	Age of measurement: 0, (30), (60), (90) min after mixing
	Air content	JIS A 1128	◎	◎	◎	—
	Bleeding	JIS A 1123	○	○	○	—
	Setting time	JIS A 1147	○	○	○	—
Mechanical property	Compressive strength	JIS A 1108	○	◎	○	Specimen: $\phi 100 \times 200$ mm, N=3 Age of measurement: (3), 7, 28, 91d
	Static modulus of elasticity (Young's Modulus)	JIS A 1149		◎		Specimen: $\phi 100 \times 200$ mm, N=3 Age of measurement: (7), 28, (91)d
Durability of concrete	Drying shrinkage	JIS A 1129-2		○		Specimen: $100 \times 100 \times 400$ mm, N=3 Age of Measurement: 1, 4, 8, 13, 26w after drying start period.
	Carbonation depth (Accelerated carbonation)	JIS A 1152 JIS A 1153		○		Specimen: $100 \times 100 \times 400$ mm, N=3 Age of Measurement: 1, 4, 8, 13, 26w
	Freezing and thawing test	JIS A 1148		○		Specimen: $100 \times 100 \times 400$ mm, N=3 Age of Measurement: ~ 300 cycles
	Apparent diffusion coefficient of chloride ion	JSCE-G572 JSCE-G574		○		Specimen: $\phi 100 \times 200$ mm, N=3 Age of Measurement: 6, 12months

◎: W/C=45, 50, 55%; ○: W/C=50%

*(number): measured by W/C=50%

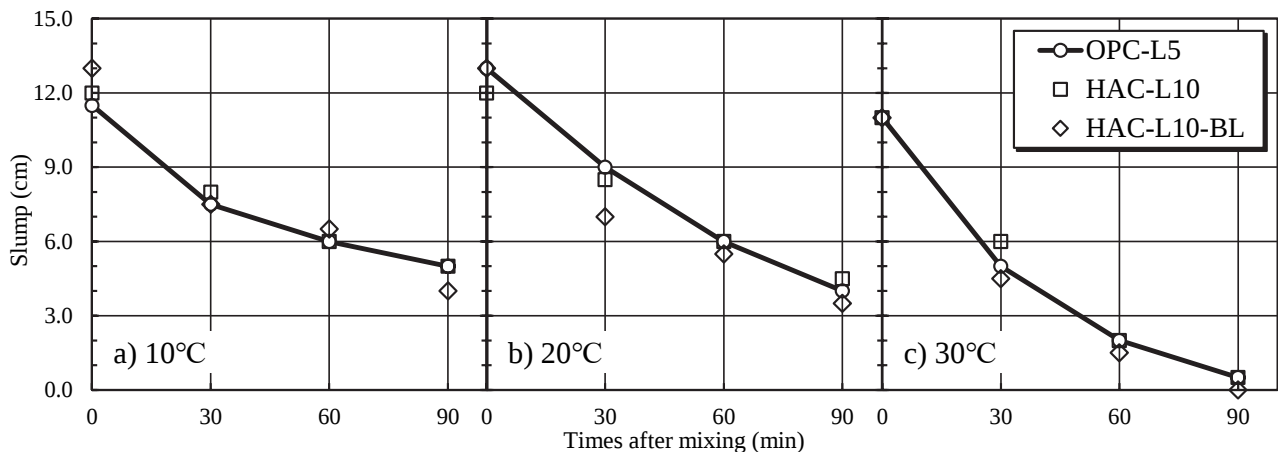


Fig.1 Changes of slump after mixing (W/C = 50%)
(スランプ値の経時変化 (W/C=50%))

中性化 (JIS A 1152 および JIS A 1153), 凍結融解 (JIS A 1148) および塩分浸透抵抗性 (JSCE-G572 および JSCE-G574-2013) の各試験を行い, セメント種類による比較評価を行った. コンクリートのフレッシュ性状は 10, 20℃および 30℃環境で行った. 力学特性に関する試験に用いた試験体は, コンクリートの打込み後, 材齢 24 時間まで各環境温度下で保管した後に脱型し, 脱型後は所定の材齢まで各温度で水中養生を行った. その他の試験に供する試験体は, それぞれの試験方法に準拠して実施した.

3. 実験結果

3.1 コンクリートのフレッシュ性状

Table 5 にコンクリートのフレッシュ性状試験結果を, **Fig. 1** にスランプ値の経時変化を示す. 練上り直後において, 目標とするフレッシュ性状を満足するための単位水量および AE 剤添加量は, それぞれの環境温度および配合条件において, セメント種類による差は認められなかった. スランプの経時変化は, 使用したセメント種類の影響は認められず, おおむね同様の低下量であることを確認した. フレッシュコンクリートのブリーディング量は, いずれの環境温度においても $HAC-L10-BL \leq HAC-L10 < OPC$ -

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

Temp. (°C)	W/C (%)	Cement	Unit content of water (kg/m ³)	Chemical admixture (C×%)		Slump value (cm)	Air content (%)	Bleeding (cm ³ /cm ²)	Setting time (h-min)	
				SP	AE				initial	final
10	45	OPC-L5	157	1.00	0.0025	12.5	4.8	—	—	—
		HAC-L10	157		0.0025	11.5	4.4	—	—	—
		HAC-L10-BL	157		0.0025	11.0	4.1	—	—	—
	50	OPC-L5	160	1.00	0.0025	11.5	4.7	0.27	16-35	21-00
		HAC-L10	160		0.0025	12.0	4.9	0.19	15-35	20-10
		HAC-L10-BL	160		0.0025	13.0	4.2	0.18	15-10	19-45
	55	OPC-L5	160	1.00	0.0020	11.5	4.2	—	—	—
		HAC-L10	160		0.0020	12.0	4.1	—	—	—
		HAC-L10-BL	160		0.0020	11.0	4.0	—	—	—
20	45	OPC-L5	162	1.00	0.0020	12.0	4.6	—	—	—
		HAC-L10	164		0.0020	12.5	4.3	—	—	—
		HAC-L10-BL	164		0.0020	13.0	4.1	—	—	—
	50	OPC-L5	164	1.00	0.0020	13.0	4.3	0.19	8-10	10-35
		HAC-L10	164		0.0020	12.0	4.4	0.15	7-40	10-05
		HAC-L10-BL	164		0.0025	13.0	4.6	0.16	7-45	10-15
	55	OPC-L5	164	1.00	0.0020	12.0	4.9	—	—	—
		HAC-L10	164		0.0020	12.5	4.4	—	—	—
		HAC-L10-BL	164		0.0020	12.0	4.3	—	—	—
30	45	OPC-L5	164	1.00	0.0017	11.0	4.8	—	—	—
		HAC-L10	164		0.0017	11.0	4.6	—	—	—
		HAC-L10-BL	164		0.0017	11.5	4.3	—	—	—
	50	OPC-L5	164	1.00	0.0010	11.0	4.2	0.11	4-45	6-00
		HAC-L10	164		0.0010	11.0	4.7	0.09	4-20	5-50
		HAC-L10-BL	164		0.0010	11.0	4.3	0.06	4-05	5-20
	55	OPC-L5	168	1.00	0.0017	11.5	4.5	—	—	—
		HAC-L10	168		0.0017	12.5	4.2	—	—	—
		HAC-L10-BL	168		0.0017	12.0	4.1	—	—	—

L5 の順に小さく、特に低温環境で顕著であった。
HAC-L10およびHAC-L10-BLを使用したコンクリートの凝結時間は、いずれの環境温度においても OPC-L5と比較して早くなった。

3.2 力学特性

Table 6 に 20℃で作製および養生を行ったコンクリートの力学特性を、Fig. 2 に各温度で水中養生を行ったコンクリートの圧縮強度を、Fig. 3 に 20℃で

Table 6 Mechanical properties of concrete at 20℃ (20℃におけるコンクリートの強度特性)

W/C (%)	Cement	Compressive strength (N/mm ²)				Young's Modulus (kN/mm ²)		
		3days	7days	28days	91days	7days	28days	91days
45	OPC-L5	—	34.8	49.6	59.5	—	31.5	—
	HAC-L10	—	35.3	50.3	57.7	—	31.7	—
	HAC-L10-BL	—	37.8	51.4	59.5	—	31.5	—
50	OPC-L5	19.3	29.9	44.7	53.0	27.8	30.2	33.9
	HAC-L10	17.2	28.1	43.7	52.6	26.0	30.2	33.2
	HAC-L10-BL	20.9	32.3	44.8	51.1	27.5	30.6	33.5
55	OPC-L5	—	23.9	37.4	45.7	—	29.7	—
	HAC-L10	—	24.4	36.4	42.9	—	29.5	—
	HAC-L10-BL	—	26.8	37.7	45.0	—	30.5	—

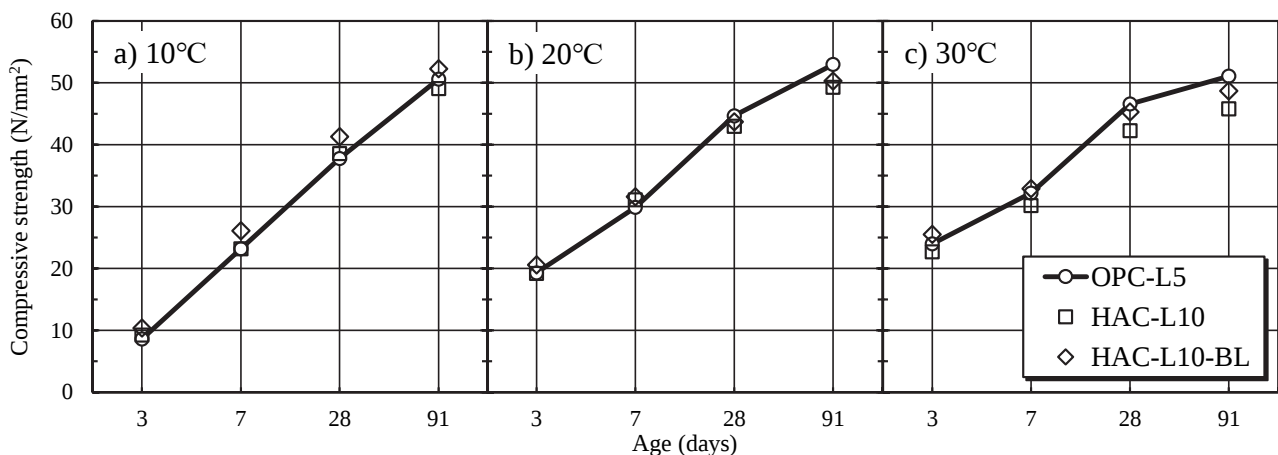


Fig.2 Compressive strength (W/C = 50%)
(コンクリートの圧縮強度 (W/C=50%))

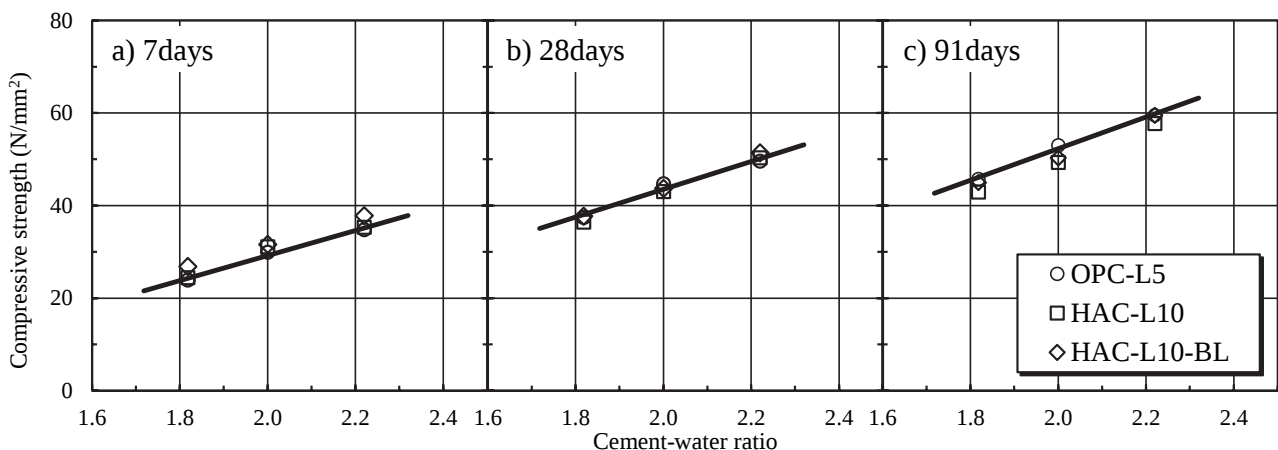


Fig.3 Relationship between compressive strength and Cement-water ratio
(圧縮強度とセメント水比の関係)

水中養生を行った場合の圧縮強度とセメント水比 (C/W) の関係を、**Fig. 4** に静弾性係数と圧縮強度の関係を示す。なお、**Fig. 4** 中には土木学会「2022 年度制定 コンクリート標準示方書[設計編]⁸⁾」に示されている関係式(土木学会式)を併記している。HAC-L10およびHAC-L10-BLを使用したコンクリートの圧縮強度について、10℃および20℃で養生を行った場合は、すべての材齢においてOPC-L5の場合と同等以上の強度が得られることを確認した。30℃で養生を行ったコンクリートの圧縮強度について、HAC-L10を用いた場合は材齢28日以降でOPC-L5よりもわずかに低くなったが、HAC-L10-BLでは、いずれの材齢においてもOPC-L5と同等の強度となることが確認された。コンクリートの圧縮強度とC/Wの関係は、HAC-L10-BLにおいて、すべての材齢においてOPC-L5と同等であり、少量混合成分を10%まで増量した場合

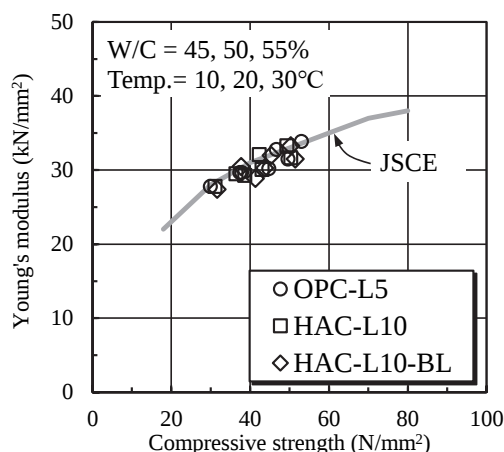


Fig. 4 Relationship between compressive strength and Young's modulus
(圧縮強度と静弾性係数の関係)

においても、従来の OPC により算出した圧縮強度-C/W 直線式が適用できることを確認した。コンクリートの静弾性係数は、それぞれの W/C および材齢においてセメント種類による差は確認されず、圧縮強度との関係において土木学会式とおおむね一致しており、少量混合成分を増量した場合でも、従来の式を十分に適用可能であることを実証した。

3.3 コンクリートの耐久性

Fig. 5 にコンクリートの乾燥収縮量および質量減少率を示す。HAC-L10 および HAC-L10-BL の乾燥収縮量および質量減少率は、いずれの乾燥期間においても OPC-L5 と同等であることを確認した。

Fig. 6 に促進中性化試験の結果を示す。コンクリートの中性化速度係数(単位: $\text{mm}/\text{week}^{1/2}$)⁹⁾は、OPC-L5 が 2.05, HAC-L10 が 2.23, HAC-L10-BL が 2.11 であり、HAC-L10 がわずかに大きく、HAC-L10-BL は OPC-

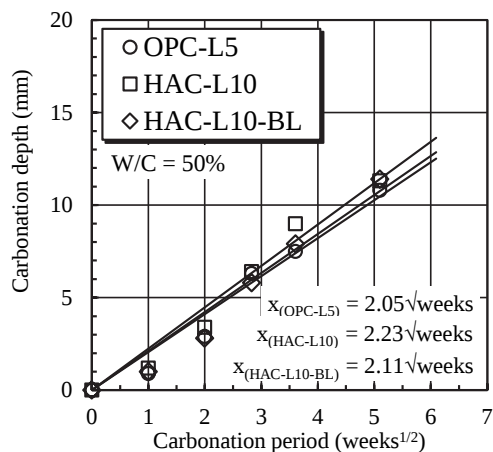


Fig. 6 Carbonation depth
(コンクリートの中性化深さ)

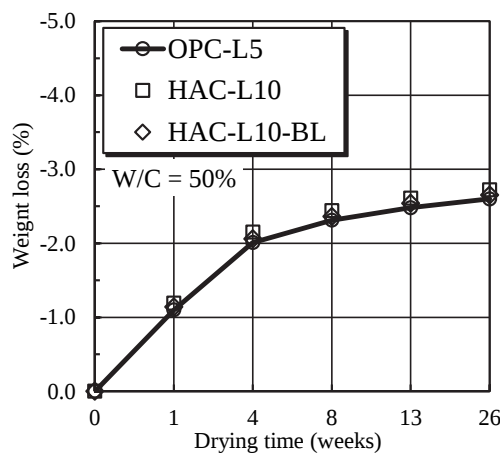
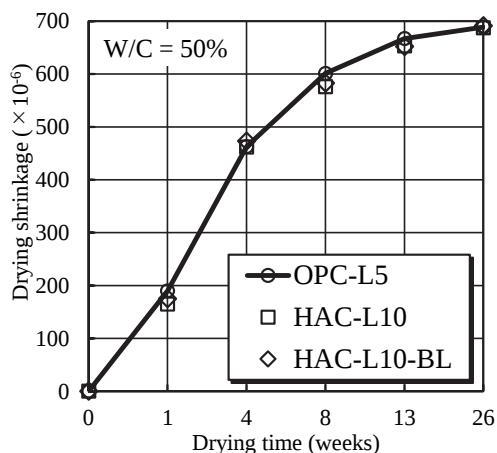


Fig. 5 Drying shrinkage and weight loss of concrete
(コンクリートの乾燥収縮と質量減少率)

L5 と同程度であった。

コンクリートの凍結融解試験結果として **Fig. 7** に相対動弾性係数を, **Fig. 8** に質量減少率を示す。コンクリートの相対動弾性係数は, 凍結融解 300 サイクルを経過した時点においても, セメント種類による明確な差は確認されず, いずれも 90% 程度であった。コンクリートの質量減少率は, いずれのセメントの場合も 300 サイクル終了時点で約 1.0% であり, 明確な差は確認されなかった。

塩分浸透抵抗性試験の結果として, **Fig. 9** および **Fig. 10** に NaCl 濃度 10% 溶液への浸漬期間 12 か月におけるコンクリートの Electron Probe Micro Analyzer (EPMA) 画像および塩化物イオンの濃度分布をそれぞれ示す。また, **Table 7** に EPMA の結果より算出した塩化物イオンの見かけの拡散係数を示す。塩化物イオンの見かけの拡散係数は, HAC-L10 でわずかに大きく, HAC-L10-BL と OPC-L5 は同程度となった。

少量混合成分を 10% まで増量した場合, クリンカ

ー／セメント比の低下による耐久性低下が懸念されるものの, 本検討においては, クリンカーの C_3A を 1.5%, セメントの粉末度を $300\text{cm}^2/\text{g}$ 程度それぞれ高めることで, コンクリート力学特性と耐久性は現行の OPC と同等となることを確認した。これらの結果より, 少量混合成分を増量した場合においても, セメントの鉱物組成や粉末度を最適化することで, 従来の OPC と同等の性能を確保可能であることを実証した。

Table 7 Apparent diffusion coefficient of Cl^-
(塩化物イオンの見かけの拡散係数)

Cement	Apparent diffusion coefficient of chloride ion (cm^2/year)	
	6 months	12 months
OPC-L5	3.49	2.93
HAC-L10	3.72	3.34
HAC-L10-BL	3.43	3.12

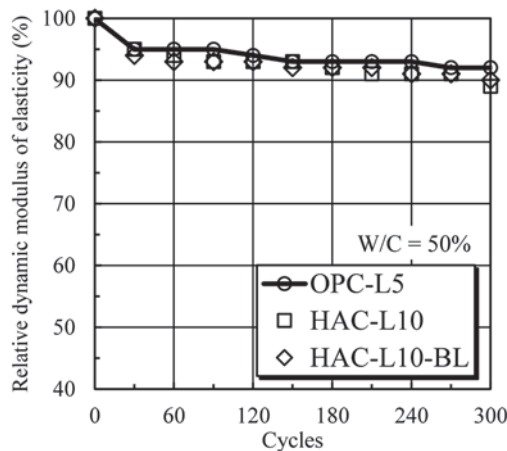


Fig. 7 Relative dynamic modulus of elasticity of concrete
(コンクリートの相対動弾性係数)

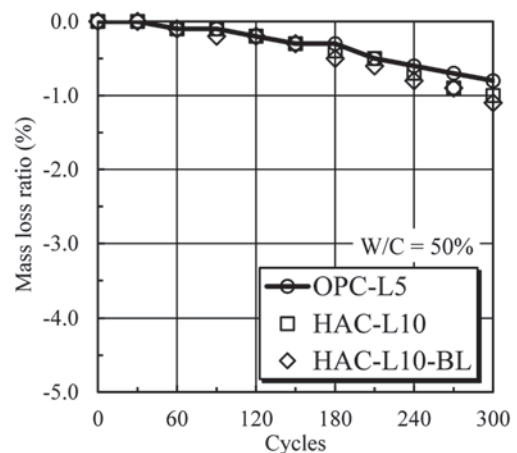


Fig. 8 Weight loss of concrete
(コンクリートの質量減少率)

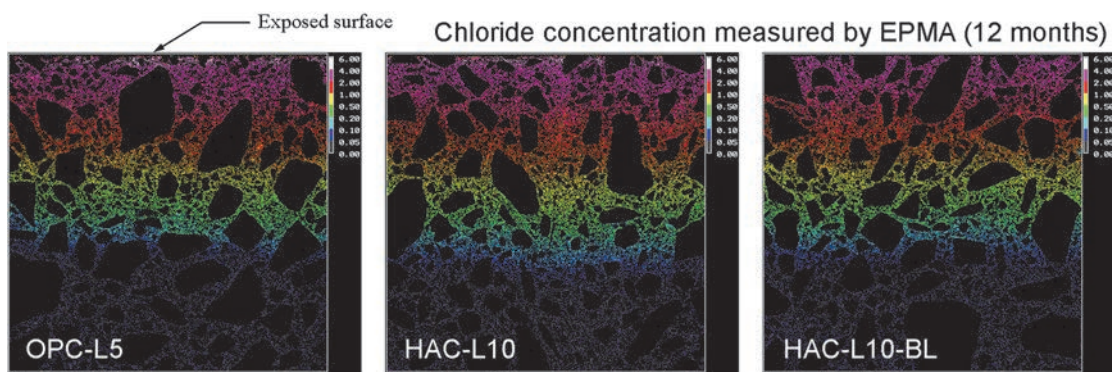


Fig. 9 2D distribution of chloride concentration measured by EPMA
(EPMA による塩化物イオン濃度のマッピング画像)

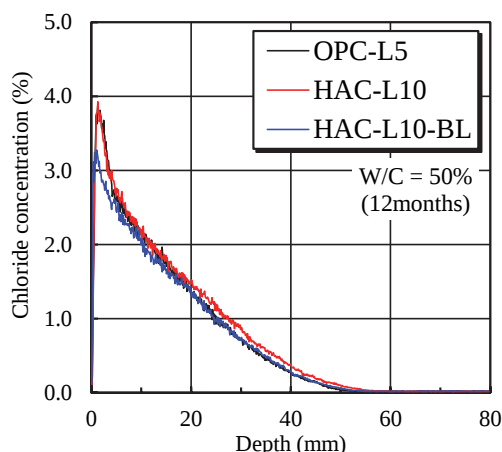


Fig.10 Chloride concentration profile measured by EPMA
(塩化物イオン濃度の分布)

4. ま と め

本報では、少量混合成分を 10%まで増量した試製セメントの性能確認を目的として、コンクリートのフレッシュ性状、力学特性および耐久性を評価した。本検討で得られた知見を以下に示す。

- 1) HAC-L10 および HAC-L10-BL を使用したコンクリートのフレッシュ性状は、OPC-L5（現行 OPC 相当品）と同等であった。
- 2) HAC-L10 および HAC-L10-BL を使用したコンクリートのブリーディング量は、OPC-L5 より減少し、特に、低温環境で顕著であった。
- 3) HAC-L10 および HAC-L10-BL を使用したコンクリートの凝結時間は、OPC-L5 よりも短くなり、ブリーディングと同様に、低温環境で顕著となった。
- 4) 10℃および 20℃で養生を行ったコンクリートの圧縮強度は、いずれのセメントも材齢によらず同等であった。
- 5) 30℃で養生を行ったコンクリートの圧縮強度は、クリンカー中の C_3A 量を増加し、粉末度を高めた HAC-L10-BL を使用したコンクリートにおいて、すべての材齢において OPC-L5 と同等であった。
- 6) HAC-L10 および HAC-L10-BL を使用したコンクリートの静弾性係数と圧縮強度との関係は、土木学会式とおおむね一致した。
- 7) HAC-L10 および HAC-L10-BL を使用したコンクリートの乾燥収縮量および質量減少率は、OPC-L5 と同等であった。

- 8) HAC-L10-BL を使用したコンクリートの中性化速度は OPC-L5 は同等であり、HAC-L10 はわずかに大きくなった。
- 9) HAC-L10 および HAC-L10-BL を使用したコンクリートの凍結融解抵抗性は OPC-L5 と同等であった。
- 10) コンクリートの塩化物イオンの見かけの拡散係数は、HAC-L10-BL と OPC-L5 は同程度であり、HAC-L10 はわずかに大きくなった。

参 考 文 献

- 1) セメント協会. 「脱炭素社会を目指すセメント産業の長期ビジョン」. 2020.
<https://www.jcassoc.or.jp/cement/1jpn/200326.html>, (accessed 2024-10-24).
- 2) 中口歩香, 黒川大亮, 平尾 宙ほか. 少量混合成分を増量したセメントの品質評価. セメント・コンクリート論文集. 2018, 72(1), p. 389-395.
- 3) 田原和司, 森 泰一郎, 黒川大亮ほか. 少量混合成分とアルミネート相を増量したセメントの設計開発～その 2 コンクリートの基礎物性～. セメント・コンクリート論文集. 2019, 73(1), p. 436-442.
- 4) 平尾 宙, 横山 滋. エコセメントの流動性および強度発現性に及ぼす石灰石微粉末の影響. セメント・コンクリート論文集. 2001, (55), p. 97-102.
- 5) 安藝朋子, 新島 瞬, 黒川大亮ほか. 高 C_3A 型省エネセメントの品質設計. Journal of the Society of Inorganic Materials, Japan. 2016, 23(382), p. 156-163.
- 6) 高橋 悠, 石田征男. 石灰石微粉末を混合した普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートの基本物性. セメント技術大会講演要旨. 2023, 77, e1318.
- 7) 金井慎太郎, 米山 暁, 林 建佑ほか. 少量混合成分を増量したセメントを使用したコンクリートのフレッシュ性状および硬化特性. 土木学会年次学術講演会講演概要集. 2024, 79, eV-292.
- 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) 喜多達夫. 中性化 (コンクリート構造物の耐久性シリーズ). 技報堂出版. 1986.