

# 論文 顔料を用いたカラーコンクリートの基本物性に関する実験的研究

溝渕 麻子<sup>\*1</sup>・小林 利充<sup>\*2</sup>・吉田 理紗<sup>\*3</sup>

**要旨**：本研究は、コンクリートの意匠的な観点として適用されている、顔料を用いたカラーコンクリートを対象に、その基本物性を把握することを目的とした。カラーコンクリートは、ベースセメントを白色または普通ポルトランドセメントとし、有彩色3種類、無彩色は成分の異なる2種類の計5種類の顔料を混入させた。顔料の種類と混入率を要因とし、フレッシュ性状、凝結時間、圧縮強度、硬化性状等を実験的に検討した。その結果、顔料の形状の違いによりスランプに差があり、顔料混入率が高いほど圧縮強度が高くなり、顔料種類および混入率によっては、耐久性状にも影響があることが分かった。

**キーワード**：カラーコンクリート、顔料、スランプ、中性化、乾燥収縮、凍結融解、凝結時間

## 1. はじめに

コンクリートは耐震性、耐久性、耐候性、遮音性などに優れ、容易に自由な形状を創ることが可能であり、一般的な建設材料として広く使用されている。一方、打放しコンクリートは、木材や石材などの天然素材と比較すると、無彩色で単調な印象を受け、適用する部位によっては心理的に圧迫感を与えることがある。このような背景をもとに、国土交通省 国土技術政策総合研究所では、トンネル等に配置する換気所（塔）について「圧迫感の軽減」が課せられており、コンクリートに対し性能のみならず、心理的な配慮についても重要となる場合がある。

一方、カラーコンクリートはコンクリートの意匠的な観点から、打放しコンクリートのデザイン的な付加価値技術の一つとして挙げられる。コンクリート素材感を活かしつつ、それにカラーや形状などのテクスチャーを加えることにより、圧迫感を軽減し、景観に調和することが可能となる。

カラーコンクリートは欧米では多用されているが、日本国内での適用実績は多くはなく、多種類の顔料を用いて、複数の混入率によって一連の基本物性を報告された研究例はあまりないのが現状である。

本研究では顆粒顔料を混入したカラーコンクリート（以下、顔料混入コンクリート）の基本物性を確認するために、顔料の種類や混入率がフレッシュコンクリートおよび硬化コンクリートに及ぼす影響を実験的に検討を行った。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料および調合条件

実験に用いた使用材料を表-1に、調合表を表-2にそれぞれ示す。

セメントは、顔料の色彩に応じて、白色ポルトランド

表-1 使用材料

区分	記号	種類、銘柄	名称、物理的性質など
セメント (C)	WC	白色ポルトランドセメント	密度3.05g/cm <sup>3</sup> , 比表面積3480cm <sup>2</sup> /g
	NC	普通ポルトランドセメント	密度3.16g/cm <sup>3</sup> , 比表面積3320cm <sup>2</sup> /g
細骨材	S	陸砂	表乾密度2.63g/cm <sup>3</sup> , 吸水率1.60%, 粗粒率2.77, 実積率69.6%
粗骨材	G	碎石2005 (硬質砂岩)	表乾密度2.65g/cm <sup>3</sup> , 吸水率0.92%, 粗粒率6.61, 実積率58.9%, 混合比率:2010:1005=60:40
化学混和剤	HWR	高機能型 AE減水剤	リグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸エーテルの複合体
	SP	高性能 AE減水剤	ポリカルボン酸エーテル系化合物
水	W	水	上水道水
顔料	GR YE RE BL CB	緑 黄色 赤 黒 黒	表-3参照

表-2 調合表

記号	セメント種類	W/C (%)	S/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						HWR C×%	
				W	WC	NC	S	G	顔料		
WC	WC	50	48.6	165	330	0	861	928	0	1.1	
GR-1		50	48.6	165	330	0	860	928	3.3	1.3	
GR-3		50	47.9	165	330	0	856	938	9.9	1.1	
GR-5		50	48.5	165	330	0	854	928	16.5	1.3	
YE-1		50	48.6	165	330	0	860	938	3.3	1.3	
YE-3		50	47.8	165	330	0	854	938	9.9	1.1	
YE-5		50	48.5	165	330	0	851	928	16.5	1.5	
RE-1		50	48.6	165	330	0	860	928	3.3	1.3	
RE-3		50	47.9	165	330	0	856	938	9.9	1.1	
RE-5		50	48.5	165	330	0	853	928	16.5	1.3	
NC		NC	50	48.9	165	0	330	871	938	0	1.3
BL-1			50	48.8	165	0	330	870	928	3.3	1.3
BL-3			50	48.1	165	0	330	865	938	9.9	1.1
BL-5			50	48.8	165	0	330	863	928	16.5	1.5
CB-1			50	48.8	165	0	330	867	928	3.3	1.5
CB-3	50		47.9	165	0	330	856	938	9.9	1.5	
CB-5	50		48.5	165	0	330	847	928	16.5	1.5	

※ 記号のアルファベットに続く数字は顔料混入率を示す。S/a=細骨材率

\*1 大林組 技術研究所 副主任研究員 (正会員)

\*2 大林組 技術研究所 主任研究員 博士(工学) (正会員)

\*3 大林組 技術研究所 研究員 修士 (正会員)

セメントまたは普通ポルトランドセメントを選定して用いた。緑 (GR)、黄色 (YE)、赤 (RE) の有色系顔料には白色ポルトランドセメントを、黒には普通ポルトランドセメントを用いた。

白色ポルトランドセメントは、普通ポルトランドセメントの呈色成分である酸化鉄 (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) や酸化マグネシウム (MgO) を生産原料や工程中から極減することにより白色化させている。セメント中の鉱物として C<sub>4</sub>AF が生成されず、その分、C<sub>3</sub>A の生成量が増える。化学成分や組成化合物以外の品質については、普通ポルトランドセメントの規格を満足している<sup>2)</sup>。

化学混和剤は高機能型 AE 減水剤を用いた。なお、凝結試験については、スランプの目標値を満足させるために、高性能 AE 減水剤を用いた。

実験に用いた顔料の物性値を表-3に、顔料の外観を写真-1に示す。平均粒径は、0.1~0.6 μm であり、黒 (CB) が 0.10 μm で最小である。これらの顔料は、扱いやすくするために顆粒状としている。顆粒粒径はいずれも 50~300 μm である。また、顔料の顕微鏡写真および走査型電子顕微鏡 (SEM) 画像を写真-2に示す。倍率は顕微鏡が 100 倍、SEM 画像が 20,000 倍とした。なお、顕微鏡写真は、顔料が顆粒状態のものである。

顔料の主成分は、黄色 (YE)、赤 (RE)、黒 (BL) は酸化鉄であり、緑 (GR) は酸化クロム、黒 (CB) は炭素である。顔料の製造工程は、黄色 (YE) は酸化鉄を苛性ソーダと反応させて水酸化鉄 (FeO(OH)) を生産し、赤 (RE) は屑鉄を粉砕し不純物を取り除き焼成して生産し、黒 (BL) はシュウ酸と酸化鉄を加熱生成することで生産する。緑 (GR) は、クロム鉱石から無水クロム酸とし、クロム酸顔料を生産する。黒 (CB) は灯油と綿芯の連続焼成ラインでランプブラックを生産する。

顔料の形状は、緑 (GR) は六方晶系、黄色 (YE) は針状、赤 (RE) は球状、黒 (BL) は立方、黒 (CB) は球状に近い不定形である。なお、顔料を球状と仮定し、粒径から表面積および体積を算定し、表面積を質量 (= 密度 × 体積) で除すことにより概算で得られた比表面積は 1.63~34.29m<sup>2</sup>/g となり、黒 (CB) が最も大きい。黒 (CB) は屋外での使用を制限されているが、これは、粒子が細かいため、雨水等により、顔料粒子が流出しやすく、退色しやすい課題がある。

水セメント比は 50% 共通とし、粗骨材かさ容積は、0.602m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> 共通とした。なお、顔料混入率はセメント質量に対して 0%, 1%, 3% および 5% とし、全 17 ケース

表-3 顔料の諸物性

記号	色	主原料	含有率 (%)	SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	水可溶性 (%)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	平均粒径 (μm)	比表面積 (m <sup>2</sup> /g)
GR	緑	酸化クロム Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	94~98	<3	<5	5.2	0.30	3.85
YE	黄色	酸化鉄 Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	83~87	<3	<5	4.1	0.1×0.8	1.63
RE	赤	酸化鉄 Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	91~97	<3	<5	5.1	0.60	1.96
BL	黒	酸化鉄 Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	88~95	<3	<5	4.8	0.13	9.62
CB	黒	炭素 C	92~97	<3	<5	1.75	0.10	34.29

※ 比表面積は密度と粒径を用いた算定値。



写真-1 顔料の外観

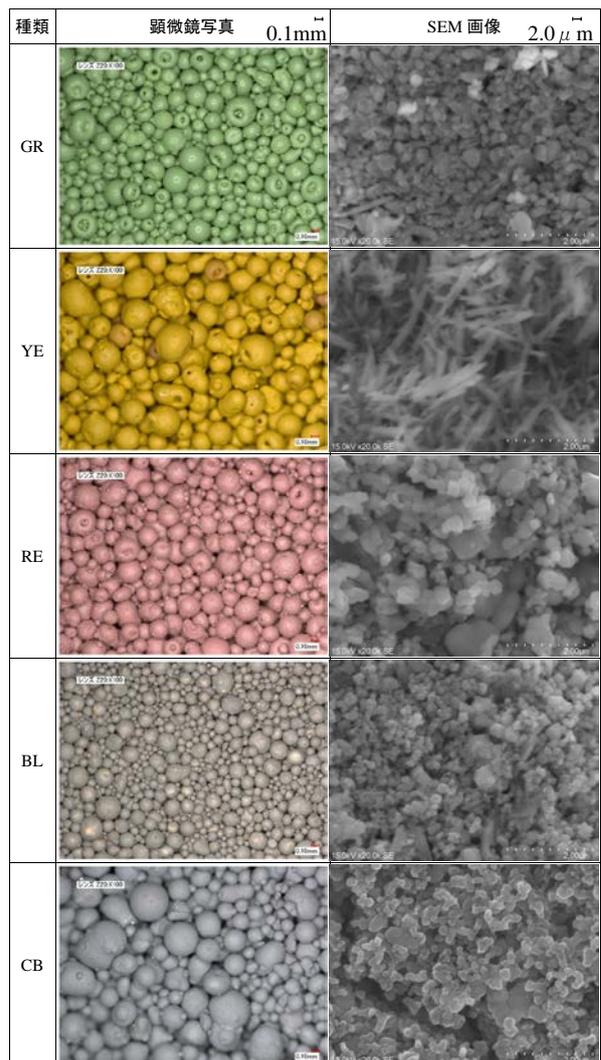


写真-2 顔料の顕微鏡写真および SEM 画像

とした。スランブは  $18 \pm 2.5\text{cm}$ 、空気量は  $4.5 \pm 1.5\%$  を、それぞれ目標値として設定した。

## 2.2 コンクリートの製造

コンクリートは、公称容量 60L の強制 2 軸練りミキサーを用いて、練混ぜ量 40L 骨材、セメントおよび顔料を投入後、10 秒の空練りを行い、混和剤および水を投入し、60 秒間練り混ぜた。

## 2.3 試験項目および試験方法

試験項目および試験方法を表-4 に示す。顔料の影響を確認するために、フレッシュ性状としてスランブ、空気量、温度、単位容積質量を測定した。また別途、凝結時間の測定を行った。

硬化性状は、圧縮強度試験を材齢 1 日、7 日、および 28 日について実施した。養生は標準養生としたが、材齢 1 日については、 $20^\circ\text{C}$  封かん養生とした。また、促進中性化、長さ変化および凍結融解試験を実施し、顔料種類および顔料混入率による影響を確認した。

## 3. 実験結果

### 3.1 フレッシュ性状

フレッシュ性状の試験結果を表-5 に示す。スランブは、概ね目標値の  $18 \pm 2.5\text{cm}$  を満足した。ただし、黄色 (YE) 顔料混入率 3% および 5%、黒 (BL) および黒 (CB) 顔料混入率 5% は、化学混和剤の添加率を  $C \times 1.5\%$  としても、目標値を満足できなかった。

スランブ形状の違いを写真-3 に示す。黄色 (YE) は顔料の形状が針状であることに起因して、スランブが小さくなったと推測する。一方、黒 (BL, CB) については、他の顔料に比べ、比表面積が大きいことが影響していると推測する。

白色ポルトランドセメントを用いたケースでは、空気量調整剤の添加率を同等として、顔料種類および混入率による影響を観察した。その結果、空気量は、いずれも目標値の  $4.5 \pm 1.5\%$  を満足した。

黄色 (YE) および黒 (BL, CB) の顔料を用いる場合は、化学混和剤の添加量を多くするまたは混和剤の種類を変更するなど、考慮する必要がある。

### 3.2 凝結時間

凝結時間は、スランブの目標値を満足させるために、化学混和剤に高性能 AE 減水剤を用いて実施した。その結果、スランブ、空気量ともに目標値を満足した。試験ケースは、顔料混入率がセメント質量の 3% のケース、顔料無混入コンクリート 2 種類の全 7 ケースとした。試験結果を図-1 に示す。

白色ポルトランドセメントは、普通ポルトランドセメントと比較し、始発および終結が 2 時間程度早いことがわかる。これは、前述の通り、白色化させるために  $\text{Fe}_2\text{O}_3$

表-4 試験項目および試験方法

試験項目		試験方法
フレッシュ性状	分離性状	目視
	スランブ	JIS A 1101
	空気量	JIS A 1128
	室温・コンクリート温度	JIS A 1156
	単位容積質量	JIS A 1116
	凝結時間	JIS A 1147
硬化性状	圧縮強度(封かん/標準養生)	JIS A 1108
	促進中性化	JIS A 1153
	長さ変化	JIS A 1132
	凍結融解	JIS A 1148

表-5 フレッシュ性状

調合 No.	セメント種類	スランブ (cm)	空気量 (%)	質量 (kg)	単位容積質量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	温度 ( $^\circ\text{C}$ )	外気温 (室温) ( $^\circ\text{C}$ )
WC	WC	18.0	5.2	23.26	2295	20.6	20.0
GR-1		17.0	5.6	23.14	2277	19.9	20.0
GR-3		18.5	5.5	23.23	2290	20.4	20.0
GR-5		18.5	4.6	23.32	2303	20.0	20.0
YE-1		17.5	5.0	23.19	2285	20.2	20.0
YE-3		14.5	5.8	23.14	2277	20.6	20.0
YE-5		10.5	4.0	23.13	2276	20.3	20.0
RE-1		18.5	5.5	23.15	2279	19.7	20.0
RE-3		18.5	4.3	23.43	2319	20.6	20.0
RE-5		18.0	4.2	23.36	2309	19.5	20.0
NC		NC	18.0	5.8	23.21	2287	20.4
BL-1	16.0		4.5	23.34	2306	19.4	20.0
BL-3	18.0		5.9	23.21	2287	20.3	20.0
BL-5	12.0		4.0	23.47	2325	19.8	20.0
CB-1	17.0		5.5	23.16	2280	19.7	20.0
CB-3	16.0		5.7	23.27	2296	20.9	20.0
CB-5	12.0	3.9	23.41	2316	19.8	20.0	



写真-3 スランブ形状の違い (顔料混入率  $C \times 3\%$ )

を極減したため、セメント中の鉱物として  $\text{C}_4\text{AF}$  が生成されず、その分、水和速度が極めて早い  $\text{C}_3\text{A}$  の生成量が増えていることも要因の 1 つと推察する。白色ポルトランドセメントを用いる際には、凝結時間が早まる可能性があることを考慮する必要がある。

白色ポルトランドセメントを用いた顔料混入コンクリートのケースは、始発時間は一致しており、顔料種類による影響は見られない。顔料無混入コンクリートより始発時間は15分遅く、終結時間は15～40分遅い。普通ポルトランドセメントを用いたケースは、始発時間および終結時間が顔料無混入コンクリートより30分および50分遅い。顔料混入コンクリートを用いる際には、顔料種類によっては凝結が15分～40分程度ベースセメントより遅れることを考慮する必要がある。

なお、始発～終結時間間隔は白色ポルトランドセメントを用いると110～135分、普通ポルトランドセメントを用いると134分でありほぼ同等である。セメント種類や顔料種類など材料の違いに因らず、環境温度にのみ依存すると言う既往の文献<sup>3)</sup>に報告のある通りであった。

### 3.3 強度性状

圧縮強度試験結果を図-2に示す。白色ポルトランドセメントを用いた顔料無混入コンクリートの圧縮強度は、若材齢での強度発現が高く、その後の強度増進が小さいく、既往の文献<sup>4)</sup>と符合する結果であった。

顔料無混入コンクリートに対する圧縮強度比(=各圧縮強度/顔料無混入コンクリートの圧縮強度)を図-3に示す。顔料無混入コンクリートに対する圧縮強度比は、白色ポルトランドセメントを使用した場合(GR, YE, RE)は0.92～1.12、普通ポルトランドセメントを使用した場合(BL, CB)は0.90～1.05であった。いずれの顔料においても顔料混入率が1%および3%では顔料無混入コンクリートと同等か若干低くなる傾向にあるが、顔料混入率が5%では、粉体量の増加により顔料無混入コンクリートの圧縮強度を若干上回る結果となったと推測する。顔料混入率5%のケースでの強度増加率は、白色ポルトランドセメントを使用した場合(GR, YE, RE)は6%～12%、普通ポルトランドセメントを使用した場合(BL, CB)は3%～5%であり、特に黄色(YE)を用いた場合に強度発現が高いことが分かる。

材齢28日強度に対する各材齢(1日および7日)の圧縮強度発現率(=各材齢の圧縮強度/材齢28日の圧縮強度)を図-4にそれぞれ示す。材齢28日の圧縮強度を1とした場合、各材齢時に圧縮強度がどの程度発現しているかの割合を示す。図中の斜線部が材齢1日、塗りつぶしが材齢7日の圧縮強度発現率を表す。顔料無混入コンクリートの強度発現率は、材齢1日までは、白色ポルトランドセメントが0.22、普通ポルトランドセメントが0.14と白色ポルトランドセメントの方が大きいですが、材齢7日になると逆転し、普通ポルトランドセメントが0.77、白色ポルトランドセメントが0.70となった。顔料混入コンクリートについては、白色ポルトランドセメントを使用した場合(GR, YE, RE)は、材齢1日で0.21～0.26、材

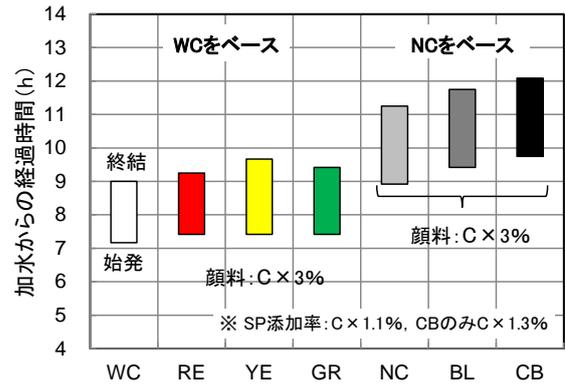


図-1 凝結時間

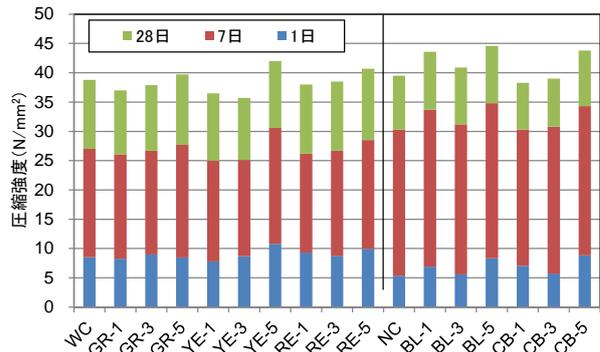


図-2 圧縮強度試験結果

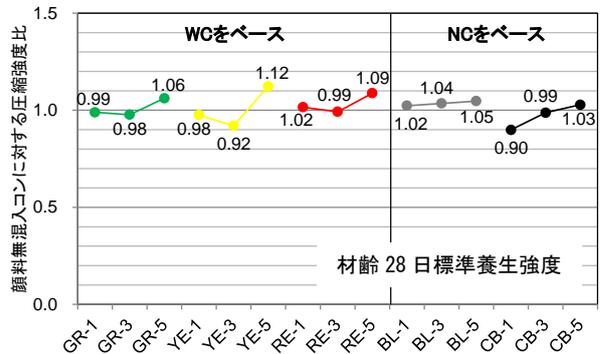


図-3 顔料無混入コンクリートに対する圧縮強度比

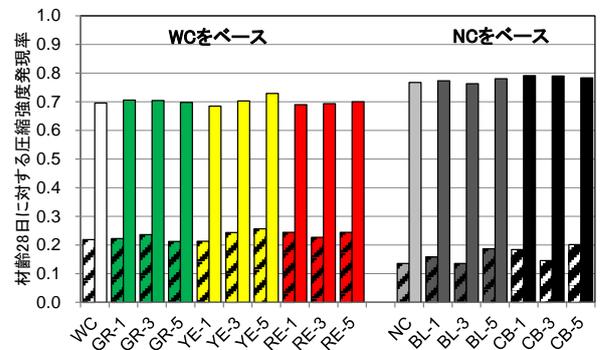


図-4 材齢28日強度に対する各材齢の圧縮強度発現率

齢7日で0.68～0.73であり、普通ポルトランドセメントを使用した場合(BL, CB)は、材齢1日で0.14～0.20、

材齢 7 日で 0.76~0.79 であった。いずれもベースセメントと同等の強度発現率で、顔料種類および顔料混入率による要因よりも、ベースとなるセメント種類に影響されることが分かった。

これより、顔料が圧縮強度に及ぼす影響としては、顔料混入率 1 から 3%までは顔料無混入コンクリートと同程度であるが、顔料混入率 5%では、顔料無混入セメントの 3~12%程度大きくなる傾向にある。

### 3.4 促進中性化試験

促進中性化材齢 182 日における中性化深さを図-5 に、中性化深さから算定した中性化速度係数を図-6 に示す。促進中性化試験方法により得られた中性化深さは、いずれも 25mm 以下であり、高耐久性指針<sup>5)</sup>の規定を満たす結果となった。中性化速度係数では、白色ポルトランドセメントと普通ポルトランドセメントは同等であった。白色ポルトランドセメントを使用した場合 (GR, YE, RE) は、顔料無混入コンクリートと比較すると黄色 (YE) と赤 (RE) の 1%および 3%は中性化速度係数が若干高い傾向がみられた。普通ポルトランドセメントを用いた場合 (BL, CB) は、顔料無混入コンクリートと同等または大きくなる傾向がみられたいずれも中性化速度係数は 2.0mm/√週以下である。促進中性化試験では二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) 濃度を 5.0%として実施しているため、CO<sub>2</sub>濃度を換算することにより、中性化速度係数が 2.0mm/√週とした場合の計画供用期間 65 年とした中性化深さを算定する。算定の結果、屋内 (CO<sub>2</sub>濃度 0.1%) で 16.4mm, 屋外 (CO<sub>2</sub>濃度 0.03%) で 9mm 程度となり、かぶり厚さ 30mm と仮定すると、供用期間中は鉄筋には到達しないと推測できる。

顔料が中性化に与える影響は、顔料無混入コンクリートと同等または若干早くなる傾向が見られた。

### 3.5 長さ変化試験

乾燥材齢と長さ変化率の関係を図-7 に、乾燥材齢 182 日の長さ変化率を図-8 に示す。顔料混入コンクリートの乾燥材齢 182 日の長さ変化率が 800×10<sup>-6</sup>を超えるケースは無かった。また、顔料無混入コンクリートと比較すると、白色ポルトランドセメントを使用した場合 (GR, YE, RE) で -7~103×10<sup>-6</sup>増加, 普通ポルトランドセメントを使用した場合 (BL, CB) で 0~109×10<sup>-6</sup>増加し、黒 (CB) の顔料混入率 5%が最大であった。顔料の種類および混入率による明確な影響は見られず、顔料無混入コンクリートと同等または若干大きくなる傾向であった。試験結果より、白色ポルトランドセメントが乾燥収縮による長さ変化に及ぼす影響はないと考える。また、顔料が乾燥収縮による長さ変化率に与える影響は最大で 100×10<sup>-6</sup>増加程度である。赤 (RE) や黒 (CB) に注意が必要である。

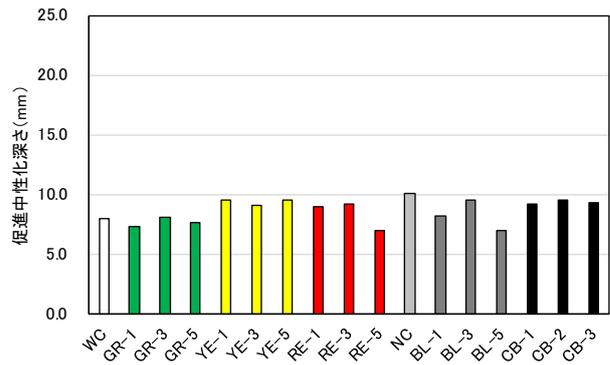


図-5 促進中性化深さ (促進中性化材齢 182 日)

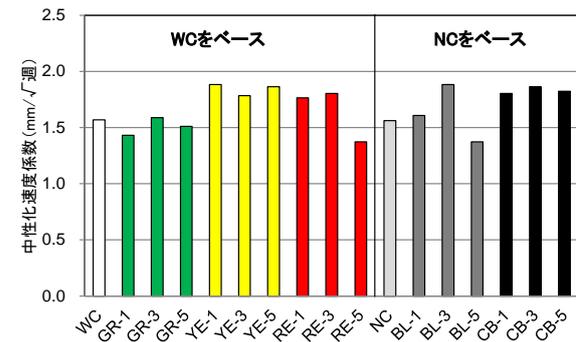


図-6 中性化速度係数

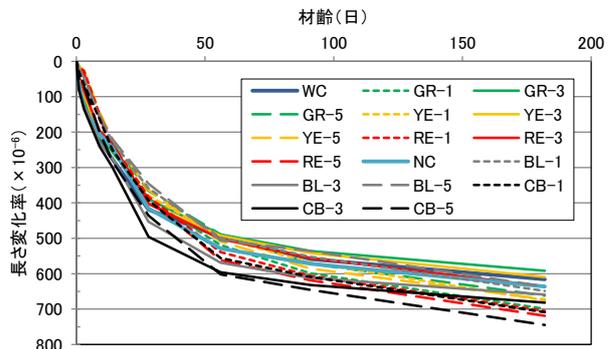


図-7 乾燥材齢と長さ変化率の関係

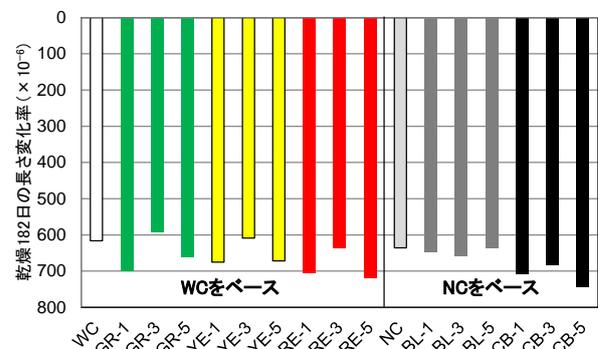


図-8 長さ変化率

### 3.6 凍結融解試験

凍結融解サイクル数と相対動弾性係数の関係を図-9 に示す。顔料混入コンクリートの相対動弾性係数は、概ね、

凍結融解サイクル数が 300 の時点においても、85%以上を維持していた。

ただし、黒 (CB) の顔料混入率 5%については、凍結融解サイクル数が 210 の時点で 77%となり相対動弾性係数が 85%を下回る結果となった。この結果は、顔料の添加率が高い 5%のみであり、1%および 3%では 95%以上を保っていた。黒 (CB) の粒径は他の種類と比較して極端に小さく、雨水等により顔料粒子が抜け出る退色現象が危惧されているが、凍結融解の繰り返し作用により同様の現象により、顔料が抜け出て空隙となった箇所での水の凍結融解により細孔組織が破壊される現象が起こる可能性もあると推察する。このように黒 (CB) は、屋外での使用は規制されているが、使用時には注意が必要である。

なお、赤+黄色の顔料を用いた既往の研究結果<sup>9)</sup>では 95%を維持していたが、顔料混入率の記載は不明であり、W/C が 43.0%、目標スランブが 8.0±2.5cm であり、調査条件の違いによるものと考えられる。

黒 (BL および CB) (ただし、黒 (CB) の顔料混入率 5%を除く) の顔料混入コンクリートは、顔料無混入コンクリートと比較し、同等またはそれ以上の凍結融解性を持っていることが分かった。また、白色ポルトランドセメントを使用した場合 (GR, YE, RE) は、顔料無混入コンクリートと比較して同等の凍結融解性を持っていることが分かった。

以上より、顔料が凍結融解に与える影響については CB を除けば小さいと考え、凍結融解に対して十分な耐久性をもっているものと考えられる。

#### 4. まとめ

顔料を用いたカラーコンクリートについて、基本物性を得るため、フレッシュ性状および硬性状について各種試験を実施した。その結果、次のことが分かった。

- (1) コンクリートのスランブおよび空気量は、概ね、目標値を満足した。ただし、黄色 (YE) および黒 (CB) は同一の化学混和剤の添加率では目標のスランブが得られにくいため、化学混和剤の種類や添加量を事前に確認する必要がある。
- (2) 凝結時間は、ベースコンクリートと比較して、始発および終結時間は 15 分~40 分程度遅れる傾向にあるが、始発-終結時間の間隔は、ベースコンクリートとほぼ同等であった。
- (3) 材齢 28 日標準養生強度は、顔料無混入コンクリートと比べ、顔料混入率 5%のケースはやや増大するが、その他のケースでは、ほぼ同等であった。また、白色ポルトランドセメントは初期強度の発現が大

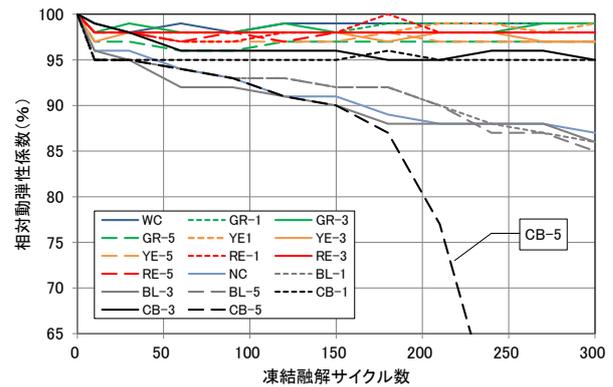


図-9 凍結融解サイクル数と相対動弾性係数の関係

きく、長期強度の伸びが小さい。なお、顔料混入による強度発現率への影響は殆どない。

- (4) 促進中性化試験では黄色 (YE)、赤 (RE) の 1%と 3%、ならびに黒 (BL) の 3%、黒 (CB) では、顔料無混入コンクリートと比較し若干中性化が早い。
- (5) 乾燥収縮ひずみ試験では、顔料無混入コンクリートと比較すると、最大で  $100 \times 10^{-6}$  程度長さ変化率が大きいケースが見られた。顔料混入率による顕著な傾向はみられない。なお、乾燥材齢 182 日において、長さ変化率が  $800 \times 10^{-6}$  を超えるケースは無かった。
- (6) 凍結融解試験では、凍結融解サイクル数が 300 の時点で、黒 (CB) の顔料混入率 5%を除いては、85%以上を維持しており、顔料無混入コンクリートと同等であった。

#### 参考文献

- 1) 福井恒明, 曾根真理, 足立文玄, 並河良治: 換気塔のデザイン, 国土技術政策総合研究所資料, ISSN 1346-7328, 国総研資料第 572 号, 163p, 2010.1
- 2) 柳澤孝彦, 永井久夫, 中根淳, 大池武: ホワイトセメントを用いたコンクリートの打放し施工 (その 1 一般の品質と色調), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.187-188, 1993.9
- 3) 内川陽平, 太田達見, 高田良章, 友澤史紀: 遅延剤を用いたコンクリートの凝結特性とその予測式, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.279-284, 2007
- 4) 榎木隆: ホワイトセメント-その特性と施工事例, セメント・コンクリート, No.753, pp.18-22, 2009.11
- 5) 日本建築学会: 高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針 (案)・同解説, 日本建築学会, pp.84-88, 1991.7
- 6) 菊田学ほか: アーキテクチャルコンクリートを用いた PC 版の打継ぎ性能に関する実験的研究 (その 1 使用コンクリートの基礎物性), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.645-646, 2007.8