

報告 石灰石微粉末を用いたコンクリートの物性および色彩評価に関する実験検討

鈴木 澄江*1・瀬古 繁喜*2・柳田 直*3・上河内 貴*4

要旨: 石灰石微粉末をセメントの外割で混合したコンクリートを用いて L 型擁壁を实施工し, 石灰石微粉末の種類や品質などの違いがコンクリートの品質および色調に及ぼす影響を確認した。本実験の結果, 材齢 91 日までの圧縮強度については, 石灰石微粉末の種類, 粉末度および混合率により差が生じる傾向を示した。また, 材齢 5 か月までの色彩測定 (L*a*b*値) の結果では, いずれの供試体においても明度 (L*値) は材齢とともに高くなる傾向を示し, 石灰石微粉末の種類, 粉末度などの違いが及ぼす影響は認められないものの, 彩度 (a*値・b*値) については種類, 粉末度および混合率により差が生じる傾向を示した。

キーワード: 石灰石微粉末, 粉末度, 混合率, 人工炭酸カルシウム, トリイソプロパノールアミン, 色彩測定

1. はじめに

持続可能な社会の実現に向けて温室効果ガスの削減が建設分野においても進められており, CO₂排出量が削減される様々な材料をコンクリートに使用する取組みが推進されている(例えば 1)。コンクリート用混和材料である高炉スラグ微粉末など JIS で製品規格が定められているものは利用が推進されているが, JIS 化されていない材料については学会規準案 2)などが定められているものの, その利用が十分に促進されていないのが現状である。

本研究は, カーボンニュートラル材料としても石灰石微粉末をコンクリート製品に活用していくうえで, その種類や品質などがコンクリートに及ぼす効果や影響を確認することを目的として L 型擁壁を实施工し, その物性およびコンクリート製品の色彩変化を確認した。

2. 実験概要

実験は, 石灰石微粉末を混和材料として混合したコンクリートを用いてコンクリート製品 (L 型擁壁) を作製した。実験の組合せは, 石灰石微粉末の種類, 粉末度, 混合率, 反応促進剤の有無とし, コンクリート製品工場で日常的に使用している配(調)合をベースにコンクリートを製造した。コンクリートの練混ぜは, (株)日東・黒羽工場で実機 (練混ぜ量 1.0~1.35m³) により実施した。L 型擁壁は 1 配(調)合当たり 2 体作製し, 黒羽工場の場内で保管して定期的に表面仕上り性 (色彩変化) を確認した。また, 力学的性質の確認は供試体を材齢 3 週で工学院大学へ搬入し, 所定の材齢で試験を実施した。

2.1 使用材料

使用材料を表-1 に示す。石灰石微粉末は 3 種類の粉末度の炭酸カルシウムと 1 種類の人工炭酸カルシウムを

使用した。また, 反応促進剤についても添加の有無による品質などへの影響を確認した。その他の使用材料については, 実機製造した工場で日常的に使用しているものを用いた。

表-1 使用材料の種類と主な品質

使用材料	種類	生産者および主な品質
セメント	普通 ポルトランド セメント	T 社製, 密度 3.16 g/cm ³
細骨材	硬質砂岩砕 砂	福島県東白川郡棚倉産 表乾密度 2.62 g/cm ³ , 吸水率 1.84%, 粗粒率 2.84, 粒形判定実積率 55.6%
粗骨材	硬質砂岩砕 石 2005A	福島県東白川郡棚倉産 表乾密度 2.62 g/cm ³ , 吸水率 1.33%, 粗粒率 6.63 粒形判定実積率 61.0%
練混ぜ水	地下水	栃木県大田原市
炭酸 カルシウム	4000 プレーン	T 社製 密度 2.7±0.1 g/cm ³ , 比表面積 3960 cm ² /g, 炭酸カルシウム 98.45%
	3000 プレーン	S 社製 密度 2.7±0.1 g/cm ³ , 比表面積 3270 cm ² /g 炭酸カルシウム 98.9%
	1000 プレーン	U 社製, 密度 2.58 g/cm ³ , 粗粒のため粒度表示 300 μ mm 通過 96.4%, 150 μ mm 通過 55.2%
人工炭酸 カルシウム	6000 プレーン	SO 社製, 密度 2.58g/cm ³ , 比表面積 6620 cm ² /g CaCO ₃ 純度 93.8%
化学 混和剤	高性能減水剤	ポリカルボン酸系化合物 密度 1.02~1.08g/cm ³
	反応促進剤	MK 社製 トリイソプロパノールア ミン 85%水溶液

*1 工学院大学 建築学部建築学科教授 博士 (工学) (正会員)

*2 愛知工業大学 工学部建築学科教授 博士 (工学) (正会員)

*3 (株)日東 代表取締役

*4 住友大阪セメント (株) セメント・コンクリート研究所 副主任研究員 修士 (工学)

2.2 実験の要因

実験の要因と水準を表-2に示す。実験の要因は、石灰石微粉末の種類、粉末度、混合率および反応促進剤の有無の4項目とした。

2.3 実験の組合せ

実験の組合せを表-3に示す。実験は、石灰石微粉末の種類（炭酸カルシウムまたは人工炭酸カルシウム）とその混合率および反応促進剤（トリイソプロパノールアミン）の有無の組合せとし、粉末度4000ブレインと混合率10%を主として7種類で実施した。

2.4 コンクリートの配（調）合

コンクリートの計画配（調）合を表-4に示す。配（調）合条件は、目標スランブ15±2.5cm、目標空気量4.5±1.5%とし、スランブの目標値が得られない配（調）合については、高性能減水剤の添加率を概ね一定とし、得られたスランブでコンクリート製品および供試体の作製を行った。

2.5 フレッシュコンクリートの試験方法および結果

フレッシュコンクリートの試験方法を表-5に、試験結果を表-6に、打込み状況などの例を写真-1に示す。

表-5 フレッシュコンクリートの試験方法

試験項目	試験方法
スランブ	JIS A 1101（コンクリートのスランブ試験方法）
空気量	JIS A 1128（フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法）
コンクリートの温度（CT）	JIS A 1156（コンクリートの温度測定方法）の抵抗温度計による。

表-6 フレッシュコンクリートの試験結果

No	記号	スランブ (cm)	空気量 (%)	CT (°C)
1	4000N	12.5	4.3	29
2	4000-10	17.5	3.8	30
3	4000-15	20.0	3.7	31
4	4000-10A	18.0	4.3	31
5	3000-10	14.5	4.8	31
6	1000-10	13.0	4.2	31
7	人工炭酸-10	17.5	5.8	31

表-2 実験の要因と水準

要因	水準
石灰石微粉末の種類	炭酸カルシウム 人工炭酸カルシウム
石灰石微粉末の粉末度	6000,4000,3000,1000 ブレイン
石灰石微粉末の混合率	0, 10, 15 %
反応促進剤の有無	なし, あり

表-3 実験の組合せ

石灰石微粉末の種類 [粉末度]	反応促進剤の有無	炭酸カルシウムの混合率 (%) (セメントの外割)		
		0	10	15
炭酸カルシウム [4000ブレイン]	なし	○	○	○
	あり*	—	○	—
炭酸カルシウム [3000ブレイン]	なし	—	○	—
炭酸カルシウム [1000ブレイン]	なし	—	○	—
人工炭酸カルシウム [6000ブレイン]	なし	—	○	—



写真-1 L型擁壁への打込み・試験状況の例

表-4 コンクリートの計画配（調）合

No	記号	W/C (%)	s/a (%)	単位水量 (kg/m³)	目標スランブと許容差 (cm)	単位量 (kg/m³)				化学混和剤 ^{*1} ((C+LS) × %)	
						C	LS	S	G	高性能減水剤	反応促進剤 (トリイソプロパノールアミン)
1	4000N	44.0	38.5	170	15±2.5	384	0	704	1122	1.10	—
2	4000-10	44.0	38.5	170	15±2.5	384	38.4	689	1122	1.05	—
3	4000-15	44.0	38.5	170	15±2.5	384	57.6	671	1122	0.95	—
4	4000-10A ^{*2}	44.0	38.5	170	15±2.5	384	38.4	689	1122	1.00	0.03
5	3000-10	44.0	38.5	170	15±2.5	384	38.4	689	1122	1.00	—
6	1000-10	44.0	38.5	170	15±2.5	384	38.4	689	1122	1.05	—
7	人工炭酸-10	44.0	38.5	170	15±2.5	384	38.4	689	1122	1.25	—

*1 空気量調整剤は全ての配（調）合で (C+LS) × 0.02%とした。 C；セメント, LS；石灰石微粉末, S；細骨材, G；粗骨材

*2 記号Aは、反応促進剤ありを示す。

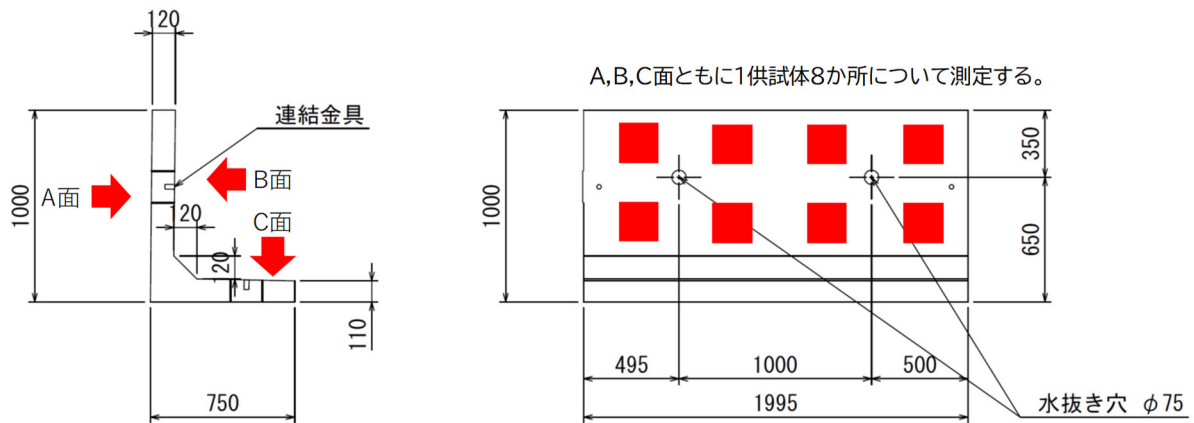


図-1 L型擁壁の色彩測定箇所の概念図

2.6 硬化コンクリートの試験項目および方法

硬化コンクリートの試験項目および方法を表-7に示す。試験項目は、力学的性質として見掛けの密度、動弾性係数、圧縮強度および静弾性係数を材齢28日および91日で測定した。また、L型擁壁の表面仕上げ性については脱型時、材齢1か月、3か月および5か月において目視による外観観察と色彩測定(L*a*b*値)を図-1に示す型枠面の3か所(A,B,C面)の各8箇所について行った。L型擁壁の曝露状況などの例を写真-2に示す。

2.7 L型擁壁の色彩の測定方法

L型擁壁の表面仕上げ性の観察は、JASS 10の箇条3.2.8プレキャスト部材の仕上がり状態に規定されている評価指標を参考に美観上の色むら、気泡などの仕上がり状態を視覚的に観察するとともに、色彩測定器を用いて色彩(L*a*b*値)を測定した。色彩測定器は基準となる「白」のシート情報を読み込みゼロ点を確認した後、測定するコンクリート表面に写真-2に示す色彩測定器の読取り部を押し当てL*a*b*値を計測した。L*値は明度を、a*値およびb*値は色相・彩度を求める値をそれぞれ示している。

表-7 硬化コンクリートの試験項目および方法

試験項目	試験方法
見掛けの密度	寸法、質量測定
動弾性係数	JIS A 1127 (共鳴振動によるコンクリートの動弾性係数、動せん断弾性係数及び動ポアソン比試験方法)の縦振動による。
圧縮強度	JIS A 1108 (コンクリートの圧縮強度試験方法)
静弾性係数	JIS A 1149 (コンクリートの静弾性係数試験方法) コンプレッソメーターによる。
表面仕上げ性	1) 表面の仕上がり状況を目視により観察 2) 色彩測定(L*a*b*値) L*値(明度/明るさ) a*値(色相・彩度: +方向で赤色, -方向で緑色が強くなる) b*値(色相・彩度: +方向で黄色, -方向で青色が強くなる)

表-8 力学的性質の試験結果

No	記号	材齢(日)	圧縮強度(N/mm ²)	静弾性係数(kN/mm ²)	動弾性係数(kN/mm ²)
1	4000N	28	33.9	26.9	34.3
		91	37.6	28.2	34.0
2	4000-10	28	39.2	27.2	34.1
		91	37.6	28.4	34.2
3	4000-15	28	35.8	27.1	34.1
		91	39.5	28.0	34.1
4	4000-10A	28	36.1	26.6	33.0
		91	39.5	26.9	32.8
5	3000-10	28	32.2	26.4	33.2
		91	38.0	27.7	33.7
6	1000-10	28	31.9	27.2	33.8
		91	34.6	27.6	34.3
7	人工炭酸-10	28	35.0	26.5	32.8
		91	38.4	27.8	32.6



写真-2 L型擁壁の曝露状況および色彩測定の様子

3.実験結果および考察

3.1 力学的性質

力学的性質の試験結果を表-8 に示す。供試体は材齢 28 日まで封かん養生後脱型し、屋外暴露養生とした。

(1) 石灰石微粉末の粉末度と力学的性質の関係

石灰石微粉末の混合率が 10%の配(調)合の粉末度と圧縮強度の関係を図-2 に示す。炭酸カルシウムの粉末度と圧縮強度の関係をみると材齢 28 日では、粉末度 4000 ブレーンの圧縮強度が他の粉末度のものより大きくなる傾向を示したが、材齢 91 日では 3000 と 4000 ブレーンで概ね同程度の圧縮強度を示した。また、4000 ブレーンの配(調)合は、材齢 28 日から 91 日の強度増進がほとんど認められない結果となった。粉末度 6000 ブレーンの人工炭酸カルシウムの配(調)合では、材齢 91 日で炭酸カルシウムの粉末度 3000 および 4000 ブレーンと概ね同程度の圧縮強度を示した。

石灰石微粉末の粉末度と静弾性係数の関係を図-3 に示す。粉末度と静弾性係数の関係をみると、炭酸カルシウムの粉末度および石灰石微粉末の種類の違いにかかわらず概ね同程度の値を示しており、本実験の範囲では、粉末度および種類の違いが静弾性係数に及ぼす影響は認められなかった。なお、動弾性係数においても静弾性係数と同様の傾向を示した。

(2) 石灰石微粉末の混合率と力学的性質の関係

炭酸カルシウムの粉末度 4000 ブレーンの混合率および反応促進剤の有無と圧縮強度の関係を図-4 に示す。材齢 28 日では混合率 10%の配(調)合が他の配(調)合に比べ若干高い傾向を示したが 91 日では殆ど変化しない結果となった。当該供試体は材齢 28 日で脱型後屋外暴露養生したため圧縮強度に大きな差が生じない傾向を示したものと考えられる。同様に石灰石微粉末の混合率と静弾性係数の関係を図-5 に示す。混合率の違いによる静弾性係数への影響はほとんど認められなかった。なお、動弾性係数においても同様の傾向を示した。

反応促進剤の混入の有無では、反応促進剤を混入していない配(調)合(記号 10)が、混入した配(調)合(記号 10A)よりも材齢 28 日で若干、高い傾向を示したものの 91 日では概ね同程度となった。トリイソプロパノールアミンはコンクリートの水和反応を促進させ早期強度の増大に寄与することが報告^{3)~5)}されているが、本実験結果では既往の研究と異なる傾向を示した。これは、力学的性質を確認する供試体の養生方法が実際のコンクリート製品の養生を考慮し封かん養生あるいは材齢 28 日以降に屋外暴露養生としたため、十分な水分の供給が得られず、未混入の配(調)合よりもやや低い結果となった可能性が考えられる。今後、長期材齢における力学的性質についてもその傾向を確認し検討することを予定している。

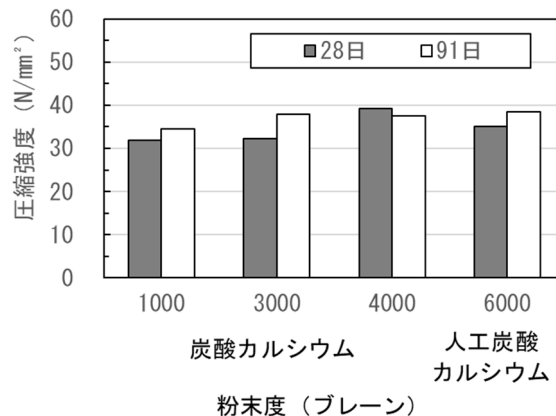


図-2 石灰石微粉末の粉末度と圧縮強度の関係

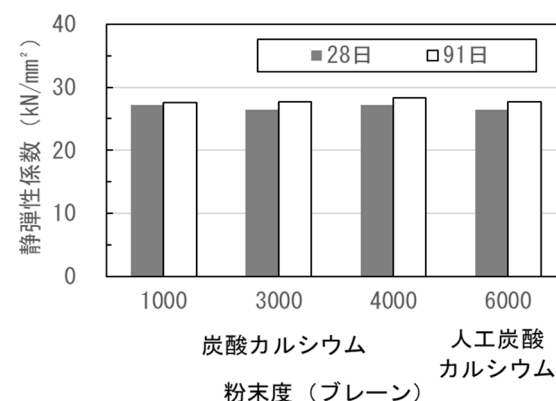


図-3 石灰石微粉末の粉末度と静弾性係数の関係

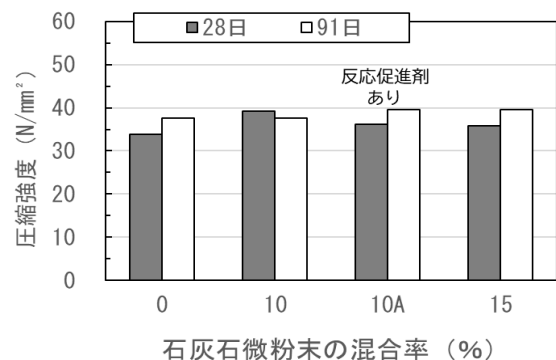


図-4 石灰石微粉末の混合率と圧縮強度の関係

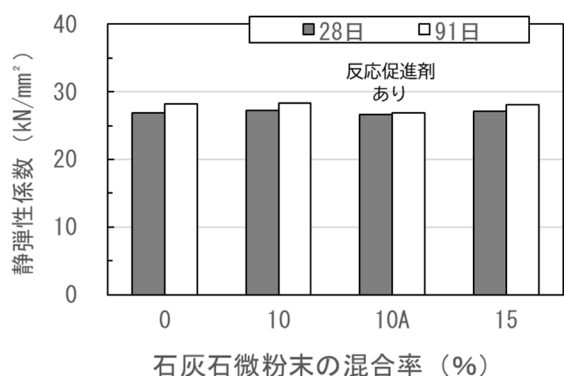


図-5 石灰石微粉末の混合率と静弾性係数の関係

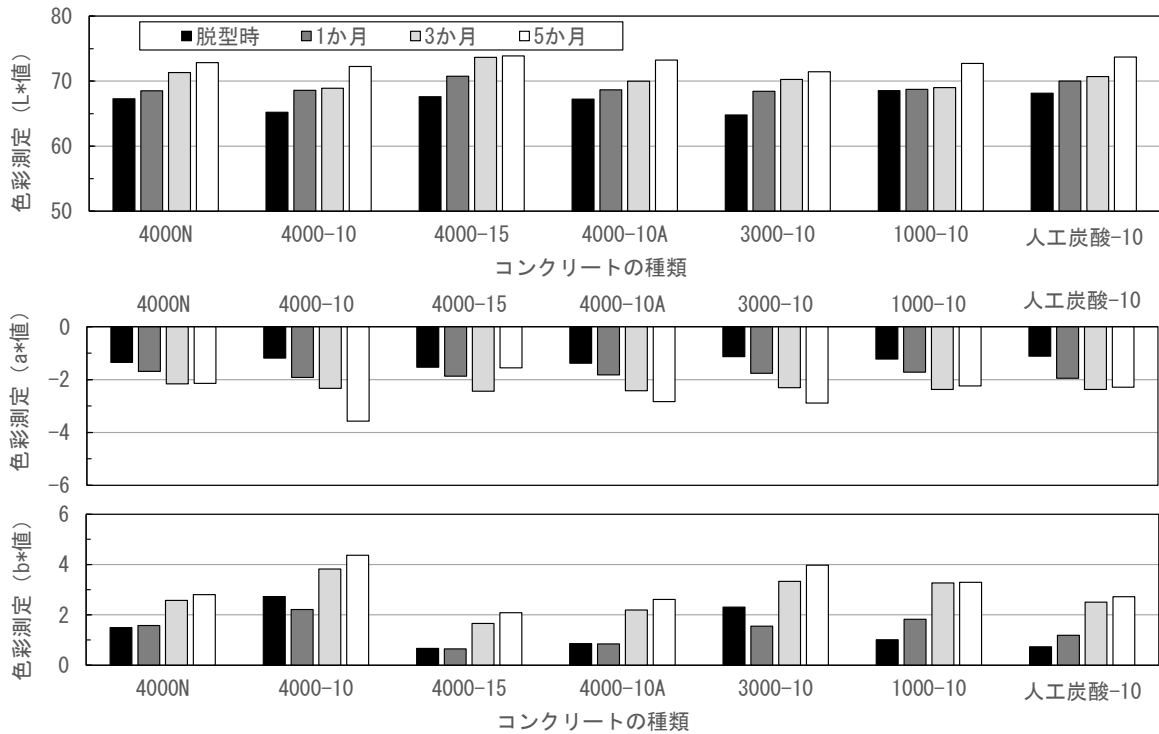


図-6 コンクリートの種類と L*a*b*値の関係

3.2 色彩測定

(1) コンクリートの種類と L*a*b*値の関係

コンクリートの種類と色彩測定 (L*a*b*値) の結果を図-6 に示す。L 型擁壁の脱型時から材齢 5 か月までの結果をみると、全ての配(調)合の明度 (L*値) は、材齢を経ると上昇する傾向を示している。これは、L 型擁壁のコンクリート表面における含水状態が低下したことに伴い、明度が高くなったと考えられる。

また、彩度 ($C^*ab = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}}$) を求めるために計測する a*値, b*値についてみると、a*値は全て (-) の値すなわち緑色系を、b*値は全て (+) の値すなわち黄色系を示し、炭酸カルシウムの粉末度 4000 を混合率 10% とした配(調)合においては、材齢とともにその値がより鮮明になる方向へ数値が増す傾向を示した。普通ポルトランドセメントを用いた材齢 183 日のモルタルの色は、a*値 0 程度、b*値 5 程度とやや黄色みを帯びており、L*値は 70 程度とされている⁶⁾。本実験の石灰石微粉末を混入していない普通ポルトランドセメントのみの配(調)合 (4000N) の材齢 5 か月の値をみると、a*値が約-2、b*値が約 3、L*値は約 72 であり、概ね近い値を示した。

(2) 石灰石微粉末の粉末度と L*a*b*値の関係

石灰石微粉末の粉末度と L*a*b*値の関係を図-7 に示す。粉末度と L*a*b*値の関係をみると、脱型時には粉末度 4000 および 3000 ブレーンの明度 (L*値) が 65 程度と低い傾向を示したものの、材齢とともに粉末度の違いによらず L*値は 70~75 の範囲の値となり、普通ポルト

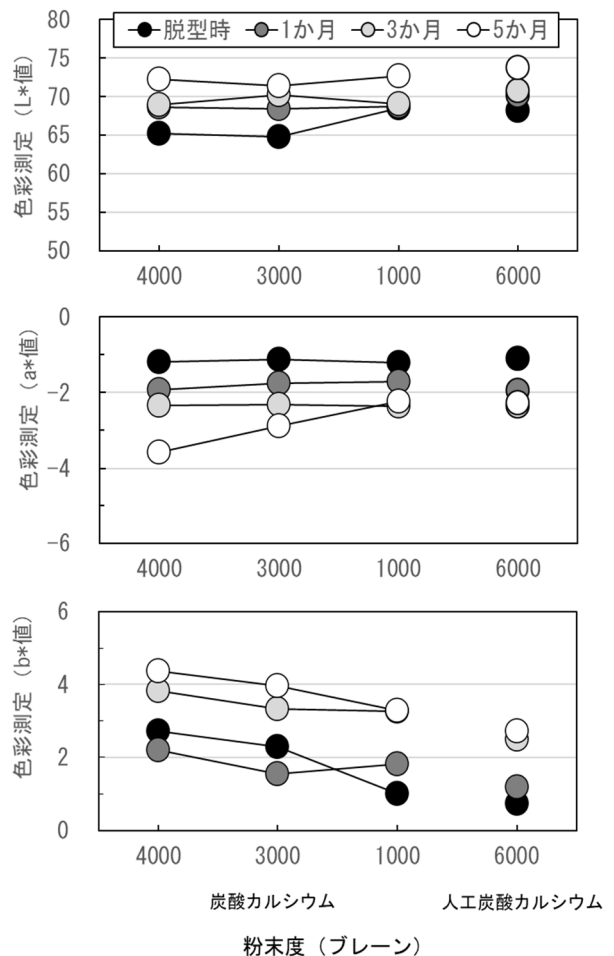


図-7 石灰石微粉末の粉末度と L*a*b*値の関係

ランドセメントのみの配(調)合(4000N)のL*値と概ね、近似した。a*値およびb*値をみると、a*値では、脱型時から材齢3か月までは石灰石微粉末の種類および粉末度で著しい差は認められないものの、材齢5か月では炭酸カルシウムの粉末度が大きくなるに従い(－)の値が大きくなり黄色系が鮮明になる傾向を示した。b*値では材齢とともに数値が増大し、炭酸カルシウムの粉末度が大きくなるとその値は大きくなる傾向を示した。人工炭酸カルシウムについては、CaCO₃純度が炭酸カルシウムよりも低いため、彩度が低い傾向となった可能性もある。

(3) 石灰石微粉末の混合率とL*a*b*値の関係

石灰石微粉末の粉末度 4000 ブレーンの混合率と色彩測定(L*値)の関係を図-8に示す。混合率とL*値の関係をみると、脱型時はコンクリートの含水率が高いこともあり、やや低い傾向を示したものの、材齢5か月では混合率の違いによるL*値の違いは認められない。一方、a*値・b*値では、材齢5か月の混合率10%の値が他の配(調)合よりも彩度が鮮明となる数値を示しており、彩度については、混合率により差が生じる傾向が認められた。

(4) 反応促進剤とL*a*b*値の関係

反応促進剤の有無とL*値の関係を図-9に示す。脱型時は反応促進剤の有無により若干の差が認められたものの、材齢5か月ではほぼ同程度の傾向を示した。なお、彩度(a*値・b*値)は混入していないものの方が若干、高い結果を示した。

4.まとめ

本実験結果により以下の知見が得られた。

- 1) 炭酸カルシウムの粉末度4000ブレーン、混合率10%のコンクリートの材齢91日の圧縮強度は、他の粉末度、種類および混合率よりも高い傾向を示した。
- 2) 材齢5か月までの色彩測定の結果、明度(L*値)は材齢を経ると徐々に高くなる傾向を示し、粉末度および種類の違いが明度(L*値)に及ぼす影響は認められなかったものの、彩度(a*値・b*値)については粉末度4000ブレーンの炭酸カルシウムが他の種類、粉末度、混合率に比べ大きくなる傾向を示した。

謝辞

本実験研究は公益社団法人日本コンクリート工学会に設置された委員会(JCI-TC-231A コンクリートにおける石灰石微粉末の実用性に関する研究委員会(委員長 瀬古繁喜・愛知工業大学教授))において実施したものである。実験および測定にあたっては、(株)日東・黒羽工場の皆様、委員会の皆様ならびに工学院大学建築学部建築学科鈴木澄江研究室の学生 旭岡夕緋君、中村友哉君、林朱里君、田中淳平君のご協力を頂きました。関係各位に感謝申し上げます。

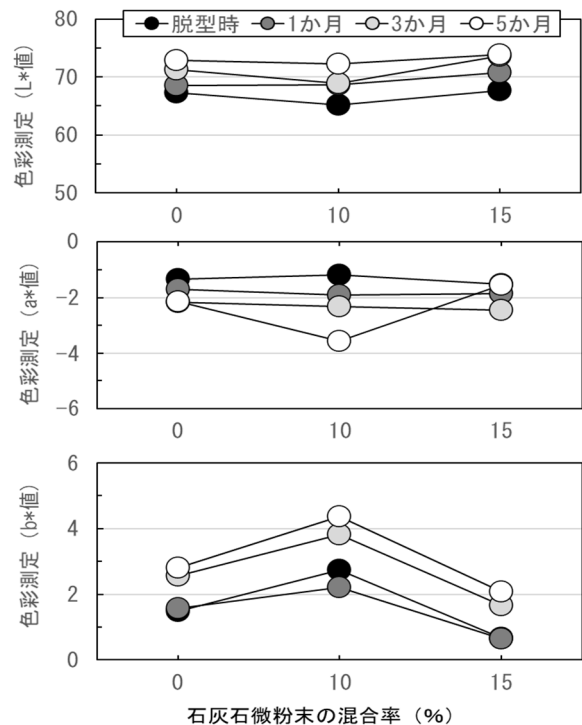


図-8 石灰石微粉末の混合率とL*a*b*値の関係

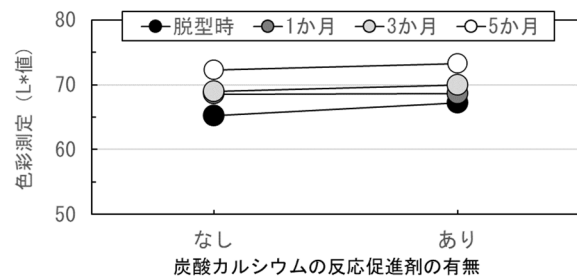


図-9 炭酸カルシウムの反応促進剤の有無とL*値の関係

参考文献

- 1) 浅野博樹, 田中久順, 中西陽一郎, 山下牧生: 石灰石粉を利用した環境負荷の低い次世代型高炉セメントの開発, セメント・コンクリート論文集, pp.184-189, Vo.65, 2011
- 2) 大門正機, 榊田佳寛, 十河茂幸, 坂井悦郎: 委員会報告「石灰石微粉末研究委員会報告」, コンクリート工学年次論文報告集, pp.49-58, Vo.20, No.1, 1998
- 3) (株)セメント協会: 石灰石微粉末専門委員会報告書, pp.124-140, 2001.10
- 4) 宇野光稀, 新大軌, 黒川大亮, 細川佳史: 石灰石微粉末を混合した中庸熱および低熱ポルトランドセメントの反応におよぼすトリイソプロパノールアミンの影響, セメント・コンクリート論文集, pp.76-83, Vol.76, 2022
- 5) 宇野光稀, 近藤早瑛, 細川佳史, 新大軌: 石灰石微粉末を添加した各種ポルトランドセメントの物性および水和反応に及ぼすアミンの影響, セメント・コンクリート論文集, pp.96-104, Vol.77, 2023
- 6) 松山祐子: 講座コンクリート構造物の美観①コンクリート構造物の色の捉え方, pp.541-546, コンクリート工学 Vol.62, No.6, 2024.6