

# 論文 白華の再現方法および画像解析による定量評価方法の検討

福岡 紀枝<sup>\*1</sup>・酒井田 直樹<sup>\*2</sup>・齋藤 尚<sup>\*1</sup>・福手 勤<sup>\*3</sup>

**要旨:** プレキャストコンクリート製品における白華の発生は、外観上大きな問題となっているが、白華の発生度合を定量的に評価する方法が確立されておらず、効果的な抑制策の検討が求められている。本研究では、実環境下の白華再現、画像解析ソフトを用いて白華発生度合の定量化を行うとともに、市販の白華抑制剤を用いて白華抑制効果を検討した。その結果、実環境下の白華は室内試験において砕氷を用いることにより再現可能であり、また、RGBによる画像解析を行うことにより白華発生度合を定量的に評価できることを確認した。さらに、白華抑制剤には白華抑制効果が得られる塗布量に閾値が存在することも明らかにした。

**キーワード:** 白華, プレキャストコンクリート製品, 白華再現方法, 画像解析, 白華抑制剤

## 1. はじめに

コンクリート構造物に要求される性能として、力学性能・耐久性能の他に、景観・外観に対する性能も求められるようになってきている。プレキャストコンクリート製品（以下、PCa 製品）も例外ではなく、気泡や色むら等の外観も重要な項目となっている。PCa 製品における外観不良の1つとして、主に冬期に発生する白華が挙げられる。PCa 製品工場で発生している白華は、降雪や降雨といった外部からの水の浸入が原因で発生する白華と考えられる。白華成因は、炭酸カルシウムのみの場合と、水酸化カルシウムとアルカリの炭酸塩・硫酸塩を含む複合的な成分の場合がある。その中でも、水酸化カルシウムが溶出して表面に滲出し、その後炭酸化して生成された炭酸カルシウムは、水に対して難溶性であるため、表面に固着すると除去が困難である<sup>1)</sup>。

白華に関する研究を行うにあたり、試験室規模で白華再現を行う必要があり、多くの研究機関において5%硫酸ナトリウム水溶液や蒸留水に半浸漬させる方法が用いられている<sup>2), 3)</sup>。しかし、これらの試験においては、試験期間が3~91日と様々であり、配合においても実際のPCa 製品の水セメント比よりも大きい値が用いられている。また従来の試験では、目視により白華発生の有無の確認、および白華発生の程度を定性的に評価しており、白華発生度合を定量的に評価する方法は確立されていない。そのため、PCa 製品のコンクリート配合を用いて、実環境下の白華を短期間に室内で再現し、白華の発生度合を定量的に評価する方法を確立することが望まれてきた。さらに、定量的に評価する方法を確立した上で、白華抑制剤などの白華抑制効果について評価することができれば、PCa 製品において効果的な白華発生の対策を講ずることができる。

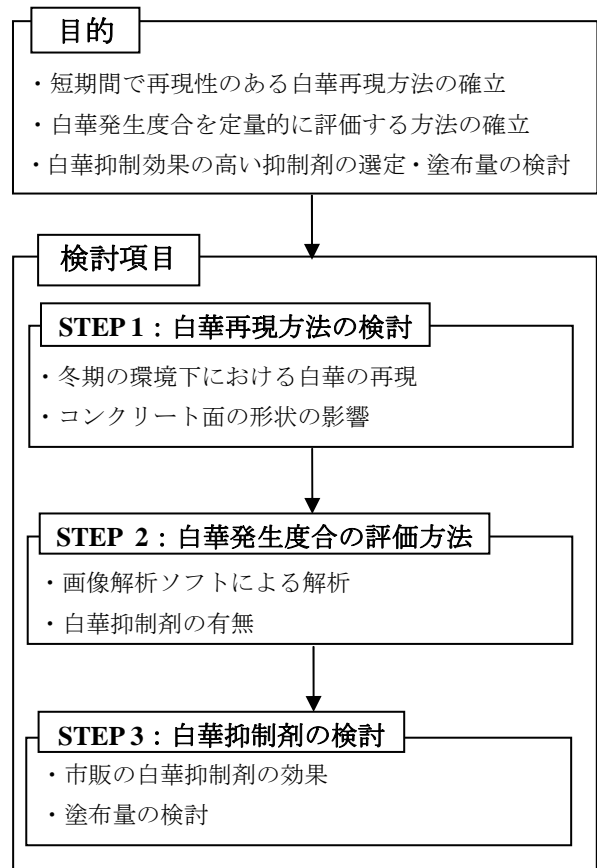


図-1 検討フロー

筆者ら<sup>4), 5)</sup>はこれまでに白華再現方法および白華発生度合の定量的評価方法の検討を行ってきた。しかし、白華発生度合を定量的に評価できたものの、現状のPCa 製品で問題となっている白華抑制に至るまでの検討は行っていない。そこで、本研究は、図-1に示す検討フローに従い、効果的な白華抑制方法を検討することを目的とし、既報<sup>4), 5)</sup>に加え、市販の白華抑制剤を用いた白華抑制効果の検討に関する一連の実験を行った。

\*1 住友大阪セメント株式会社 セメント・コンクリート研究所 修(工) (正会員)

\*2 丸栄コンクリート工業株式会社 品質保証部

\*3 東洋大学 理工学部 都市環境デザイン学科教授 工博 (正会員)

## 2. 試験概要

### 2.1 供試体概要

供試体は 100×100×50mm の角柱供試体とし、対象面のテクスチャの違いを検討するため、白華発生対象面を鋼製型枠に接した面（以下、滑面）と、対象面に模様を施すためにゴム型枠に接した面（以下、化粧面）の 2 種類とした。

表-1 に試験に使用したコンクリートの配合およびフレッシュ性状の一例を示す。配合は、設計基準強度 30N/mm<sup>2</sup> とし、フレッシュ性状は目標スランプを 21±1.5cm、目標空気量を 2.0±1.0% に設定した。使用材料は、普通ポルトランドセメント、石灰石微粉末、陸砂および砕石とした。また、供試体表面に発生した白華を見易くするため、赤色の顔料(べんがら, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)を外割りで単位セメント量の 10% 添加した。なお、コンクリートは 20±2℃の恒温室で製造した。

養生方法は蒸気養生とし、養生条件を図-2 に示す。土木学会コンクリート標準示方書<sup>6)</sup>を参考に、前養生時間 2 時間、昇温速度 20℃/h、最高温度 60℃、最高温度保持時間 3 時間、降温速度 10℃/h とした。

### 2.2 白華再現方法

検討を行った 3 種類の白華再現方法を図-3 に示す。図-3(a) に示す方法 1 は、供試体高さの半分(ii)まで水に浸漬させ、供試体底面から水分の移動により溶解している白華成分を対象面に濃縮させることで白華発生を促す方法とした。方法 2 は、方法 1 と同じ高さまで 5% 硫酸ナトリウム水溶液に浸漬させ、供試体底面から白華の要因となる硫酸イオンを、対象面に供給することで白華発生を促す方法とした。方法 1 および方法 2 の供試体側面(ii) はひずみゲージコーティング用のワックスを用いてコーティングを行い、水分の移動が供試体の底面から上面へのみ生じるようにした。方法 3 は図-3(b) に示すように、供試体上面に砕氷(iii)を載せ、PCa 製品に雪が積もった状態を模擬する事で白華が発生し易い状況を再現する方法とした。図-4 に方法 3 の試験状況を示す。また、供試体数は各方法につき 2 体とし、白華再現試験は供試体作製を行った翌日の脱型直後から開始し、PCa 製品工場の出荷材齢を参考に材齢 15 日まで、5±2℃の恒温室にて行った。

また、白華再現試験で発生した白華が PCa 製品工場で

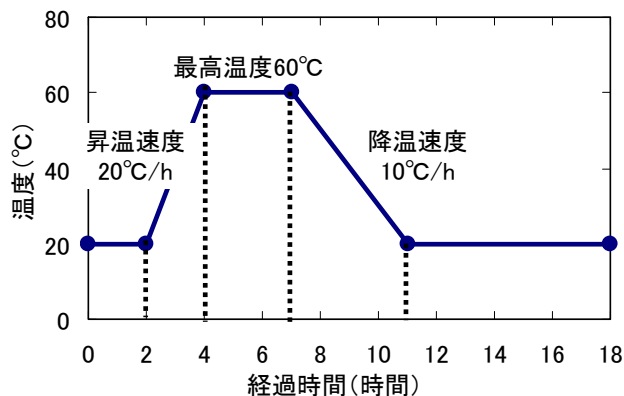
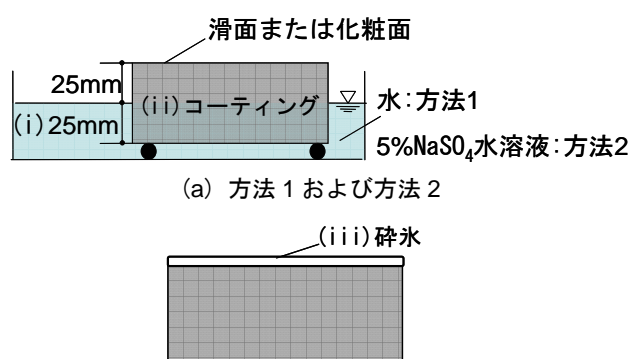


図-2 蒸気養生条件



(b) 方法 3

図-3 白華再現試験方法



図-4 供試体上面に砕氷を積載した様子

発生する白華と同じ成分であるか検証を行うため、粉末 X 線回折による結晶性鉱物の定性分析を実施した。分析用試料は、ステンレス製スパチュラを用いて採取し、乳鉢を用いて微粉砕した。

表-1 コンクリートの配合およびフレッシュ性状の一例

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )							SP 添加率 (C×%)	スランプ (cm)	空気量 (%)
		W	C	LP	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	G <sub>1</sub>	G <sub>2</sub>			
44.6	47.5	165	370	80	666	166	400	530	1.55	22.5	3.0

C:普通ポルトランドセメント(密度 3.15g/cm<sup>3</sup>) LP:石灰石微粉末(密度 2.71g/cm<sup>3</sup>) S<sub>1</sub>:陸砂(表乾密度 2.60g/cm<sup>3</sup>) S<sub>2</sub>:陸砂(表乾密度 2.60g/cm<sup>3</sup>) G<sub>1</sub>:砕石(表乾密度 2.63g/cm<sup>3</sup>) G<sub>2</sub>:砕石(表乾密度 2.63g/cm<sup>3</sup>) SP:ポリカルボン酸系高性能減水剤

## 2.3 画像解析

画像解析には、白華再現試験開始前（以下、脱型直後）の供試体、および材齢 15 日の供試体をデジタルカメラで撮影した JPEG 画像を使用した。なお、撮影場所(光源)、カメラの設定、カメラと供試体との距離などの撮影条件は全て一定とした。

デジタルカメラで撮影した 24bpp でエンコードされた画像は、PC 画面上において全て赤(以下、R)、緑(以下、G)、青(以下、B)の 3 色で表現されている。R、G、B それぞれが 0~255 の 256 段階(8bit)で表示され、その合計値により色が表現される<sup>7), 8)</sup>。R、G、B それぞれの値が 255 の値の時(RGB の合計値が 765)は白色となることから、供試体表面に白華が発生すると、脱型直後の供試体の RGB の合計値より大きくなり、765 に近づくと考えられる。

画像解析フローを図-5 に示す。画像解析ソフトを用いて、デジタルカメラで撮影した 1 枚の画像データに含まれる全ての R、G、B それぞれの平均値を算出した。算出結果の一例として、図-6 に R 平均値 (215) の算出結果を示す。算出した 3 色の平均値を足し合わせることで RGB 合計値とした。なお、画像解析ソフトは(有)デジタル・ピーピング・キッズ社製の Popimaging Ver.4.00 を使用し、解析を行った。

## 2.4 白華抑制剤の種類

検討を行った白華抑制剤および標準塗布量を表-2 に示す。市販されている白華抑制剤のうち、PCa 製品工場の工程を考慮し、選定基準を脱型直後のコンクリート表面が湿っている状態で塗布可能な白華抑制剤とした。この条件によって、シラン系の抑制剤を 2 種類、ケイ酸塩系の抑制剤を 2 種類の計 4 種類を選定した。また、各白華抑制剤の塗布量は、メーカー推奨の標準塗布量を用いて試験を行い、2.3 節における画像解析結果を基に、最も抑制効果が得られた白華抑制剤については、塗布量を標準塗布量から低減し塗布量の影響について検討した。

供試体上面に塗布した白華抑制剤が乾燥する前に、2.2 節の方法 3 を用いて試験を開始した。

## 3. 試験結果および考察

### 3.1 白華再現方法

#### (1) 再現方法の違い

白華再現方法の違いによる結果の一例として、5%硫酸ナトリウム水溶液に半浸漬させた方法 2 の結果を図-7 に示す。白華発生の有無については、供試体表面が白色に変化しているかを、目視により判定した。方法 2 においては、対象面のテクスチャに関係なく白華は発生しておらず、方法 1 においても同様に白華は確認できなかった。これは、供試体の厚さが大きく、既往の研究<sup>1)</sup>と比較し

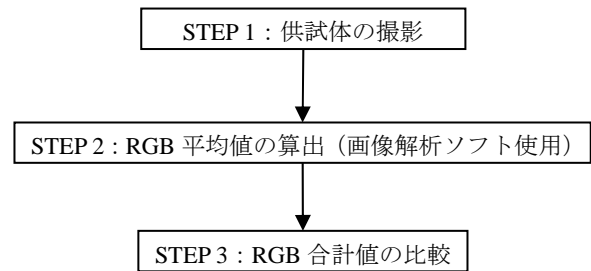


図-5 画像解析フロー

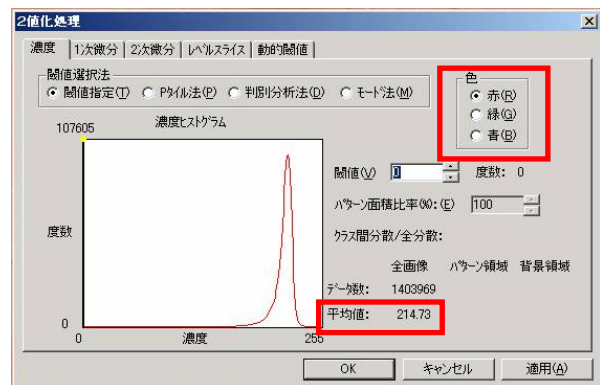


図-6 RGB 出力結果例

表-2 白華抑制剤の種類

No.	記号	種類	標準塗布量 (g/m <sup>2</sup> )
1	A	シラン系	200
2	B	ケイ酸塩系	200
3	C	シラン系	350
4	D	ケイ酸塩系	250



(a) 脱型直後

(b) 材齢 15 日

図-7 方法 2 における白華再現試験結果 (滑面)

て W/C の値が小さいことが、供試体底面からの水または硫酸イオンの供給を妨げられたためと考えられる。

方法 3 においては、図-8 に示すように、滑面と化粧面の両方に白華が発生した。白華が発生した時期については、供試体上面に積載した砕氷が溶け、表面に溜まった水分が蒸発した段階(材齢 2~3 日)で確認することができた。すなわち、供試体上面に砕氷を積載することにより、短期間で白華を再現できたと考えられる。

### (2)対象面のテクスチャの違い

方法1および方法2では、白華発生が確認できず、対象面のテクスチャの違いが比較できないため、方法3の滑面と化粧面における白華発生度合について比較を行った。図-8(b)に示す化粧面は、図-8(a)に示す滑面よりも白華発生面積が大きく、さらに白華の白色をはっきりと確認することができた。これは、供試体作製時に模様を施す目的で鋼製型枠内にゴム型枠を設置しているため、蒸気養生を行った際に型枠から供試体への熱の伝わり方に差が生じ、対象面の表面の緻密さに影響を与えたと考えられる。

また、対象面のテクスチャの影響を比較した場合、砕氷が解けた水が滑面は流れ易いのにに対し、化粧面は模様を施した表面に凹凸があるため、凹面に溜まり易い。その結果、化粧面は白華の原因となる水酸化カルシウム等の可溶性成分が多く溶解し、滑面よりも白華の発生が顕著になったと思われる。

### (3) 粉末 X 線回折法 (XRD) による定性分析

図-9 に実際に PCa 製品に発生した白華と、白華再現試験で得られた析出物の粉末 X 線回折法による分析結果を示す。PCa 製品に発生した白華および白華再現試験により得られた析出物は共にピークが同じであり、析出物が炭酸カルシウムであることを示している。これは、低温で溶解度の高い水酸化カルシウムが、外部から供給された水に溶解して供試体表面に滲出したことにより白華が発生したと推察される。これにより、供試体上面に砕氷を積載し白華を再現する方法を用いることで、実際の PCa 製品に発生する白華を再現することが可能であると言える。また、図-9 にシリカおよび長石のピークが見られるが、これは、析出物を採取する際に骨材が混入したものであると思われる。

### 3.2 画像解析

画像解析には、白華抑制剤を塗布および無塗布の供試体を用いて検討を行った。画像解析に用いた供試体写真の一例を図-10 に示す。

#### (1) 白華発生度合

図-11 に供試体対象面ごとに2.3節に示した方法から求めた RGB 合計値を示す。図-11 より、対象面のテクスチャに関わらず、脱型直後の RGB 合計値より白華発生後の RGB 合計値が大きい値を示した。脱型直後の RGB 合計値に着目すると、RGB 合計値の差が10以下と小さく、対象面のテクスチャが同一であれば、供試体間の差はほとんど認められなかった。また、材齢15日の RGB 合計値においては、対象面のテクスチャに関わらず、白華抑制剤を塗布した供試体の RGB 合計値に対し、白華抑制剤無塗布の供試体の RGB 合計値は大きい値を示した。これらの結果により、画像解析を用いて算出した RGB

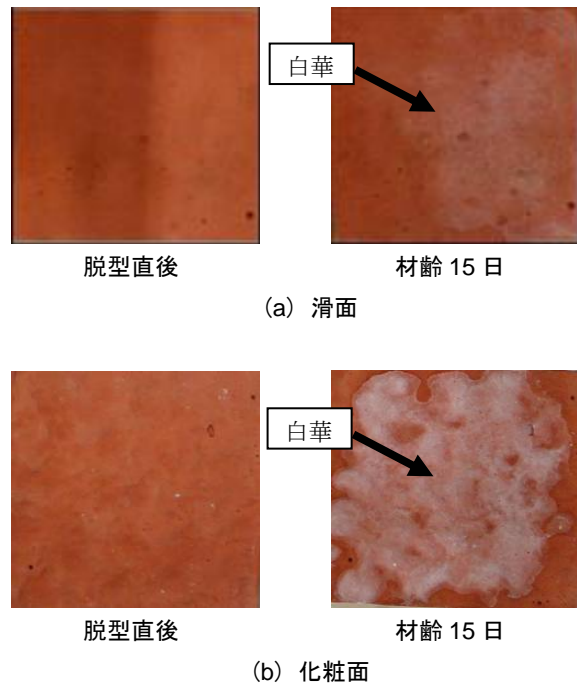


図-8 方法3における白華再現試験結果

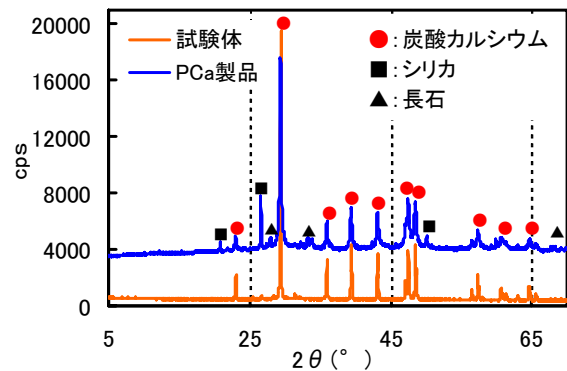


図-9 XRDによる析出物分析結果

対象面	白華抑制剤	脱型直後	材齢15日
滑面	塗布		
化粧面	塗布		

図-10 画像解析に用いた供試体写真の一例

合計値を使用することで、白華発生度合を定量化できる可能性を見出した。

#### (2) 対象面のテクスチャの違い

PCa 製品工場において滑面と化粧面の2種類の型枠が

用いられているため、対象面の違いによる白華発生度合について検討を行った。図-11 より、滑面と化粧面における材齢 15 日の RGB 合計値を比較すると、白華抑制剤を塗布した供試体は (441, 439)、白華抑制剤無塗布の供試体は (568, 555) と対象面のテクスチャによる差が小さい。また、図-10 の供試体写真と白華抑制剤を塗布した供試体の RGB 合計値を比較すると、図-10 の供試体写真は滑面よりも化粧面のほうが白華の発生が顕著であるが、図-11 の RGB 合計値では、化粧面よりも滑面において白華が発生している結果となった。これより、対象面が同じテクスチャである供試体の白華発生度合を比較する際には RGB 合計値で比較可能であるが、対象面のテクスチャが異なる供試体を含めて白華発生度合を比較すると、白華再現試験結果と画像解析結果に矛盾が生じてしまう。そこで、滑面と化粧面のテクスチャの違いが白華の発生に及ぼす影響をより明確にするため、RGB 変化量の検討を行った。ここで RGB 変化量とは、材齢 15 日と脱型直後の RGB 合計値の差とした。対象面における RGB 合計値の変化量を図-12 に示す。RGB 変化量は、白華抑制剤の塗布の有無に関わらず、滑面より化粧面のほうが大きい値を示した。これにより、対象面のテクスチャが異なる供試体を含めて白華発生度合を比較する場合は、RGB 変化量による評価が適切である。

### 3.3 白華抑制剤の検討

#### (1) 白華抑制効果の検討

選定した 4 種類の白華抑制剤を用いて、白華抑制効果の検討を行った結果を図-13 に示す。ここで、対象面のテクスチャが異なる供試体を含めて白華抑制効果の検討を行うため、RGB 変化量を用いて評価を行った。図-13 より、シラン系である A 剤および C 剤においては、対象面のテクスチャに関わらず、無塗布の供試体と比較して RGB 変化量が小さい値を示した。また、ケイ酸塩系の B 剤および D 剤においては、対象面のテクスチャに関わらず、無塗布の供試体よりも RGB 変化量が大きい値を示した。これにより、無塗布の供試体の RGB 変化量と比較して、RGB 変化量が大きい場合は白華抑制効果が得られず、RGB 変化量の値が小さい白華抑制剤は白華抑制を有すると考えられる。しかし、白華抑制効果の指標となる RGB 変化量の閾値は明らかになっておらず、今後検討を行う必要がある。

白華抑制効果の得られた A 剤および C 剤を比較すると、滑面においては RGB 変化量が同じ値であるが、化粧面においては、C 剤が A 剤よりも白華抑制効果の高い結果となった。これは C 剤の撥水効果により、コンクリート表面に撥水層が形成され、供試体上面に積載した砕水の溶けた水が、コンクリート内部まで浸入できなかったため、白華の発生が抑制されたと考えられる。

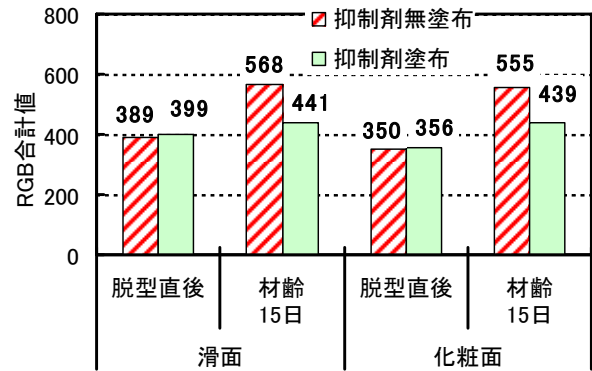


図-11 対象面の違いと RGB 合計値

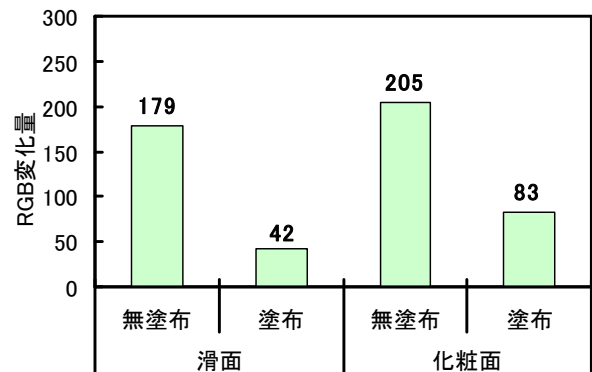
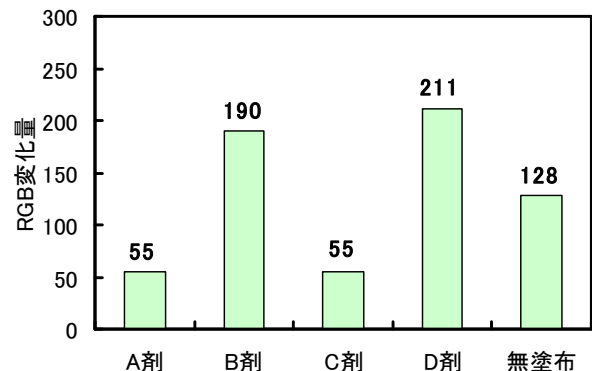
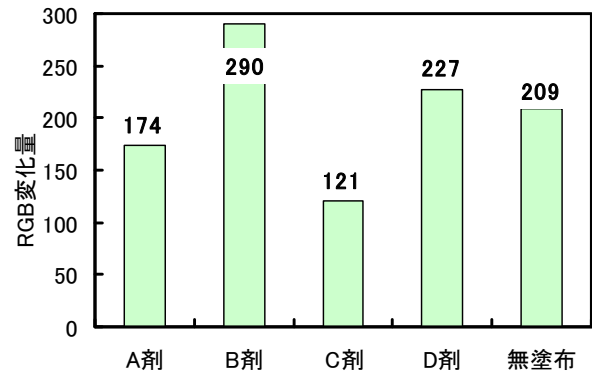


図-12 RGB 合計値の変化量



(a) 滑面



(b) 化粧面

図-13 白華抑制剤別 RGB 変化量

## (2) 塗布量の検討

3.3 節(1)において、最も白華抑制効果が高い結果となったC剤を用いて化粧面における塗布量の影響について検討を実施した。塗布量は標準塗布量の  $350\text{g/m}^2$  から  $25\text{g/m}^2$  まで変化させた。図-14 に塗布量の違いによる RGB 合計値、図-15 に各塗布量における材齢 15 日の状況例を示す。試験を行った対象面のテクスチャは全て化粧面であり、同じ白華抑制剤を用いて検討を行ったため、白華発生度合は RGB 合計値にて評価を行った。図-14 より、脱型直後の RGB 合計値は 403~417 とほぼ同じ値であるが、材齢 15 日の RGB 合計値においては、塗布量を  $100\text{g/m}^2$  より低減させると RGB 合計値が大きくなり、塗布量  $25\text{g/m}^2$  まで変化させると RGB 合計値は無塗布の RGB 合計値とほぼ同じ値となった。図-15 に示す白華発生状況は、塗布量  $50\text{g/m}^2$  の供試体においては、供試体全面に白華が発生しているが、塗布量  $100\text{g/m}^2$  の供試体においては、白華の発生があまり目立たない結果となった。また、塗布量  $100\text{g/m}^2$  と塗布量  $350\text{g/m}^2$  を見比べても白華の発生度合に大きな差は認められなかった。白華抑制剤の塗布量と白華発生度合の関係においては、白華抑制効果の得られる塗布量に閾値が存在すると考えられる。

## 4. まとめ

PCa 製品の配合に近いコンクリートを使用し、室内で簡易的に行える白華再現方法、白華発生度合を定量的に評価する方法、および白華抑制剤の抑制効果について検討を行った。以下に、本検討範囲内で得られた結論を示す。

- (1) 冬期の環境下、および供試体に碎氷を積載することにより、一般的な PCa 製品のコンクリート配合において、短期間に室内で白華を再現する方法を確立した。
- (2) 画像解析ソフトを用いることにより、1 枚の画像データに含まれる R、G および B の値の平均値を合計し、白華発生前後の RGB 合計値を比較もしくは、RGB 変化量を加味した評価を用いて比較することで、白華の発生度合を定量的に評価できることを確認した。
- (3) 市販されている白華抑制剤の中で、シラン系の白華抑制剤が、高い白華抑制効果を示した。また、塗布量と白華発生度合に相関があり、白華抑制効果が得られる塗布量には閾値が存在した。

今回提案した「画像解析ソフトを用いた白華の評価方法」が、通常のコンクリートにおいても評価方法として適用可能であるか今後検討を行う予定である。

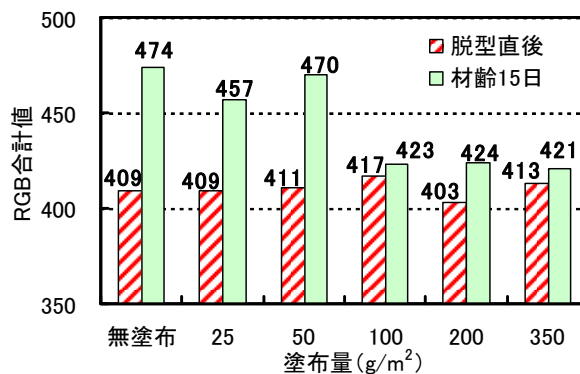


図-14 塗布量別 RGB 合計値

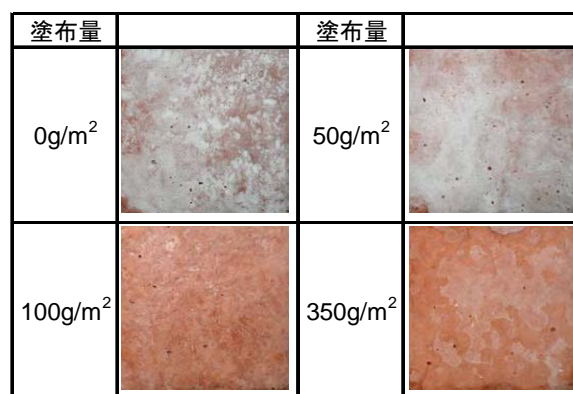


図-15 材齢 15 日の供試体状況

## 参考文献

- 1) 織笠順男, 田代利明: コンクリートの白華とその防止対策について, 月刊生コンクリート, Vol.14, No.7, pp.37-46, 1995
- 2) 真野孝次, 飛坂基夫, 熊原進: セメント系材料の白華試験方法の検討, 建材試験情報, Vol.18, No.7, pp.14-19, 1982
- 3) 長尾敏之, 平塚和男, 橋本親典, 渡辺健: 即脱成型平板の白華試験方法に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.235-240, 2005
- 4) 福岡紀枝, 酒井田直樹, 福手勤, 齋藤尚: 白華再現方法に関する検討, 第 66 回セメント技術大会講演要旨, pp.160-161, 2012
- 5) 福田道也, 福手勤, 酒井田直樹, 小島裕介: 白華発生度合評価に関する一検討: 第 67 回年次学術講演会講演概要集, pp.913-914, 2012
- 6) 土木学会: コンクリート標準示方書施工編, p.430, 2007
- 7) 大田登: 色彩工学第 2 版, 学校法人 東京電機大学 東京電機大学出版局, p.173, 2009
- 8) 篠田博之, 藤枝一郎: 色彩工学入門, 森北出版株式会社, 2007