

# 論文 特殊界面活性剤を利用したコンクリート硬化体表面美観性向上検討

島田 恒平\*1・谷本 理勇\*2・指原 慶彰\*3・佐川 桂一郎\*4

**要旨**：コンクリート硬化体表面の気泡痕は、コンクリート製品表面の“美観性”を損なう大きな原因の一つである。我々は、セメントペースト（コンクリート）、型枠（離型剤）と空気泡の界面現象に着目し種々の検討を行う中で、セメントペーストの型枠への親和性を向上させ、表面気泡痕を大幅に低減する特殊界面活性剤を見出した。この技術を応用することで、表面補修工程の短縮・コスト削減が期待される。本報では、特殊界面活性剤を配合した高性能減水剤の表面美観性向上効果や型枠離型剤としての応用について報告する。

**キーワード**：表面美観，表面気泡，コンクリート製品，界面活性剤，高性能減水剤，離型剤，補修

## 1. はじめに

コンクリート製品業界で改善要求の声が最も大きい課題の一つが、コンクリート製品の「表面美観性（表面欠陥の発生に伴う補修工程の削減）」である<sup>1)</sup>。

コンクリート製品業界においては、製品表面美観がコンクリート製品そのものの品質に関わると考えられており、表面美観性悪化の原因となる表面欠陥は、脱型後の表面補修工程において従業員の手作業によって補修される。そのため、この補修工程には無視できない労務費が割かれており、コスト面からも表面美観性を高めることへの要望が高まっている。

中でも技術的なハードルが高い表面欠陥として「表面気泡痕」が挙げられる。この表面欠陥はフレッシュコンクリートの混練・充填という必要不可欠な工程が原因となるため、根本から解決することが難しい課題である。コンクリートの充填工程では、コンクリートの流動性が乏しいために生じる未充填部を埋める、もしくは混練の際に巻き込まれた空気泡を脱泡するために充填終了後の型枠に振動をかけるのが一般的だが、未充填部や巻き込み空気泡がコンクリートと型枠との間に残ると、型枠を取り去った時に表面気泡痕として表出してしまう。

既往の報告によれば、型枠とコンクリートの界面に存在する空気泡は図-1のように表され、コンクリート中の気泡の移動を妨げる流体抵抗  $F_R(N)$ は以下の式により説明される<sup>2)</sup>。

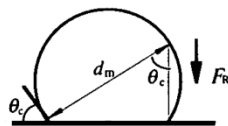


図-1 型枠とコンクリートの界面に存在する空気泡  
(参考文献2) 図-7より抜粋)

$$F_R = \frac{7\pi^2}{2} \left( \frac{d_m}{2\sin\theta_c} \right)^2 \tau_y$$

ここに、 $d_m$ ：セメントペースト中の気泡直径(mm)、 $\theta_c$ ：セメントペーストの型枠に対する接触角、 $\tau_y$ ：セメントペーストの降伏値(Pa)であり、コンクリート中の気泡の流体抵抗は、セメントペースト接触角と降伏値に依存することが分かる。そのため、コンクリートの流体抵抗低減、転じて表面気泡痕低減のためには、①セメントペースト降伏値を低下させる、②セメントペーストの接触角を低下させるという二つのアプローチが考えられる。

セメントペースト降伏値を低減する主要なアプローチの一つに、コンクリートの“高流動化”が挙げられる<sup>3),4)</sup>。この手法においては、コンクリート混和材料、分散剤種・添加量の最適化により、スランプフローを600mm程度まで向上させることでセメントペースト降伏値 $\tau_y$ を低減させ、気泡の移動・脱泡を促進し、表面気泡痕を低減させることが可能である。しかし既往の報告<sup>2)</sup>によれば、十分に脱泡を促すことが可能なレベルまで降伏値を低減するためには、スランプフローを700mm以上まで高める必要があり、材料管理やコンクリートコストの観点から適用が限定されるケースも少なくない。

一方、セメントペースト接触角低減のアプローチについては、コンクリート製品型枠離型剤による手法が一般的である<sup>5),6)</sup>。この手法においては、型枠に塗布する離型剤中にセメントペースト接触角 $\theta_c$ を低減する効果を有する界面活性剤を配合することで、ペーストの型枠に対する親和性を向上させ、気泡をペースト内部に押し込む、もしくはセメントペーストの自由水中の多価金属イオンと反応することによりコンクリート硬化体表面を被覆する効果を有する界面活性剤を配合することで、“おしろい（ファンデーション）”様の効果によりコンクリート表面

\*1 花王（株） テクノケミカル研究所 研究員 農修（正会員）  
 \*2 花王（株） テクノケミカル研究所 研究員 理修  
 \*3 花王（株） テクノケミカル研究所 研究員 理修  
 \*4 花王（株） テクノケミカル研究所 研究員 理修

気泡痕を低減する。しかしながら、上記の効果が十分でない、脱型時の衝撃や風雨により気泡痕が表出する“隠れ気泡”の原因となることが知られている<sup>5)</sup>。

本報では、表面気泡痕の発生が、フレッシュコンクリート、型枠（離型剤）と気泡間の界面現象に基づくことに着目し、特殊界面活性剤を使用した表面美観性向上について検討した詳細について報告する。

## 2. 実験概要

### 2.1 セメントペースト試験

#### (1) 使用材料

水粉体比(W/P) 50%，材料はすべて 20℃に調整した。

- ・セメント(P)：普通ポルトランドセメント 400 g  
(太平洋セメント株式会社製/住友大阪セメント株式会社製=50/50wt%，密度 3.16 g/cm<sup>3</sup>)
- ・水(W)：上水道水 200 g (下記界面活性剤を含む)
- ・各種界面活性剤 6 mmol (HLB 値が異なるノニオン系界面活性剤 7 種類，脂肪酸系界面活性剤 3 種類，特殊界面活性剤 3 種類)

#### (2) セメントペーストの調整

各種界面活性剤を水に溶解し練り水とした後、セメントに添加、ハンドミキサーにより 620rpm, 1 分混練することによりセメントペーストを調整した。

#### (3) セメントペースト接触角の測定・算出

一般的な油性離型剤に含まれるベースオイル（流動パラフィン）を主成分とする、動粘度 10 mm<sup>2</sup>/s を塗布した平滑金属板表面に、2.1(2)の通り調整したセメントペーストを 100 μL 分注し、実際の打設時に発生する振動を再現するため金属平板を 1 cm/秒の上下運動で 10 秒間加振した後、セメントペースト液滴をデジタルカメラにより撮影した。得られた画像を画像処理オープンソースソフトウェアの Image J を用いて画像解析し、液滴高さから底面の長さから接触角を算出した。同様の実験を同一水準で計 3 回実施し、その平均値を各界面活性剤添加時の接触角とした。

### 2.2 モルタル試験

#### (1) 使用材料

水粉体比(W/P) 35%，すべての材料は 20℃に調整し、骨材は表面乾燥状態に調整した。

- ・セメント(P)：普通ポルトランドセメント 400 g  
(太平洋セメント株式会社製/住友大阪セメント株式会社製=50/50wt%，密度 3.16 g/cm<sup>3</sup>)
- ・水(W)：上水道水 140 g (下記高性能減水剤，界面活性剤及び消泡剤を含む)
- ・細骨材：城陽産山砂 700 g，表乾密度 2.55 g/cm<sup>3</sup>
- ・市販ポリカルボン酸系高性能減水剤
- ・各種界面活性剤 (2.1(1)記載のもの) 各 6 mmol

- ・市販消泡剤
- ・市販油性離型剤 P：動粘度 10 mm<sup>2</sup>/s

#### (2) モルタルの調整

2.2(1)記載のセメントと砂を JIS R 5201 に規定されるモルタルミキサーを使用して 63rpm の攪拌速度で 10 秒混合したものに、水、分散剤、各種活性剤及び消泡剤を混合した水溶液を加えて、63rpm の攪拌速度で 120 秒混練してモルタルを調製した。続いて、モルタルフローを JIS R 5201 に基づいて測定し、その値が 250±10 mm となるように減水剤添加量を調整した。モルタル空気量について、JIS A 1171 に基づいて測定し、1.0±0.5%となるように消泡剤添加量を調整した。

#### (3) モルタル硬化体の作製

市販油性離型剤をはけにより鋼製型枠（内径 φ 5 cm × 高さ 10 cm の円柱）に均一に塗布し、そこに 2.2(2)の通り調製したモルタルを無振動下で充填し、24 時間、20℃での気中養生の後脱型しモルタル硬化体を得た。

#### (4) モルタル硬化体表面美観性の評価

2.2(3)の通り作製したモルタル硬化体表面をたわしにより研磨した後、デジタルカメラで撮影し、得られた画像をオープンソースソフトウェアの ImageJ を用いて表面気泡占有率(%)を算出し表面美観性の指標とした。モルタル硬化体は一水準につき 2 体作製し、各硬化体について打設面とその対面を撮影した。

表面気泡占有率(%)は、表面気泡総表面積(cm<sup>2</sup>)×100/モルタル硬化体表面積(cm<sup>2</sup>)で求め、同一水準、各供試体、各面の平均値を算出した。

### 2.3 コンクリート試験

#### (1) 使用材料

水粉体比(W/P)：34%，細骨材率(s/a)：46%，すべての材料は 20℃に調整し、骨材は表面乾燥状態に調整した。

- ・セメント(P)：普通ポルトランドセメント 12.0 kg  
(太平洋セメント株式会社製/住友大阪セメント株式会社製=50/50wt%，密度 3.16 g/cm<sup>3</sup>)
- ・炭酸カルシウム微粉末 3.6 kg  
(ネオフロー，清水工業株式会社製，密度 2.70 g/cm<sup>3</sup>)
- ・水(W)：上水道水 5.25 kg (下記高性能減水剤を含む)
- ・市販ポリカルボン酸系高性能減水剤 A：P×0.9 wt%  
(密度 1.07 g/cm<sup>3</sup>)
- ・市販ポリカルボン酸系高性能減水剤 B：P×0.9 wt%  
(特殊界面活性剤 K および消泡剤を含有，密度 1.07 g/cm<sup>3</sup>)
- ・細骨材：西島産砕砂 22.4 kg，表乾密度 2.58 g/cm<sup>3</sup>
- ・粗骨材：西島産碎石 26.9 kg，表乾密度 2.63 g/cm<sup>3</sup>，最大寸法 20 mm
- ・油性離型剤 O：動粘度 10 mm<sup>2</sup>/s のベースオイルに、特殊界面活性剤 K を配合したもの
- ・市販油性離型剤 P：動粘度 10 mm<sup>2</sup>/s

(2) フレッシュコンクリートの調整

2.3(1)記載のコンクリート配合で、強制二軸型ミキサー（KYC 社製）に、砂利、約半量の砂、セメント、残部の砂の順に投入し、40rpm の攪拌速度で空練りを 15 秒間行った。次いで、すばやく前記の練り混ぜ水を添加し、40rpm の攪拌速度で 120 秒間練り混ぜた。

(3) 流動性

JIS A 1150 に準拠し、スランプフローを測定した。

(4) 空気量

JIS A 1128 に準拠し、測定した。

(5) コンクリート硬化体の作製

2.3(1)記載の油性離型剤をはけにより鋼製型枠（高さ 50 cm×幅 20 cm×奥行 10 cm の直方体）に均一に塗布し、そこに 2.3(2)の通り調製したコンクリートを無振動下で充填し、24 時間、20℃での空中養生の後脱型しコンクリート硬化体を得た。

(6) コンクリート硬化体表面美観性の評価

2.3(5)の通り作製したコンクリート硬化体表面をたわしにより研磨した後、デジタルカメラで撮影し、得られた画像をオープンソースソフトウェアの ImageJ を用いて表面気泡占有率(%)を算出し表面美観性の指標とした。コンクリート硬化体は一水準につき 2 体作製し、各硬化体について打設面とその対面を撮影した。

表面気泡占有率(%)は、各供試体、各面の表面気泡面積 (cm<sup>2</sup>)×100/コンクリート硬化体総表面積(cm<sup>2</sup>)で求め、表面気泡痕直径(mm)に対する積算値により解析した。

3. 実験結果および考察

3.1 セメントペースト接触角と表面気泡占有率の関係

横軸に上記界面活性剤添加時のセメントペースト接触角  $\theta_c$  を、縦軸に表面美観性の指標として 2.2(4)の方法により算出されるモルタル硬化体表面気泡痕占有率(%)取った結果を図-2 に示す。2.1 のセメントペースト試験は便宜的により正確な値が得られる W/P=50% で実施しているが、2.2 のモルタル試験の W/P=35% でセメントペースト試験を実施しても界面活性剤添加時のセメントペースト接触角  $\theta_c$  の傾向は変わらないことを確認している。

結果、モルタル硬化体の表面気泡痕占有率(%)は加振後のセメントペースト接触角  $\theta_c$  と負の相関関係にあり、セメントペースト接触角が低下するほど表面気泡痕が低減される、つまり表面美観性が向上することが示唆された。これは、既往の報告<sup>2)</sup>のセメントペーストの型枠への親和性と気泡の浮上性、ひいては表面美観性との関連を支持するものである。また、添加した界面活性剤の種別に着目すると、ノニオン系、脂肪酸系、特殊界面活性剤の順にモルタル硬化体表面気泡痕占有率が低下する傾向が確認された。

さらに図-3 に示すように、同一系列の界面活性剤間では Griffin 法によって算出される HLB 値が低くなるほど、つまり界面活性剤の親油性が高くなるほどモルタル硬化体の表面気泡痕占有率が低下する傾向が確認された。なお、Griffin 法による HLB 値は次の Griffin の式によって算出され、0 に近いほど親油性が高く、20 に近いほど親水性が高くなる。HLB 値=20×Mw/M（ここに、M：界面活性剤の分子量、Mw：該界面活性剤の親水性部分の式量である）

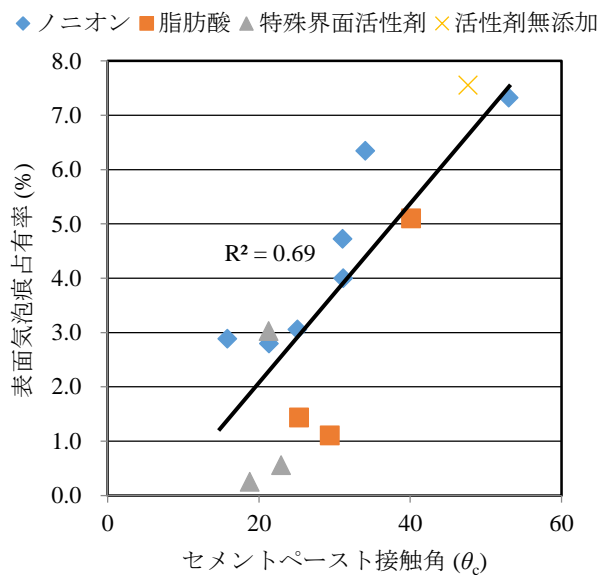


図-2 セメントペースト接触角( $\theta_c$ )とモルタル硬化体表面気泡痕占有率(%)の関係

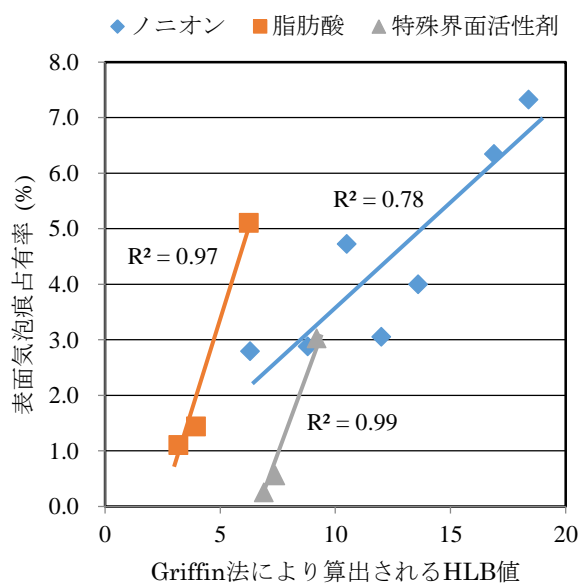


図-3 Griffin 法により算出される各界面活性剤の HLB 値とモルタル硬化体表面気泡痕占有率(%)の関係

これは界面活性剤の親油性が高いほど、界面活性剤が型枠に塗布された油性離型剤とセメントペースト間の界面張力を効果的に低下させるためであると考えられる。

特殊界面活性剤の系列のうち、最も HLB 値が低い特殊界面活性剤 K を使用することによって、表面気泡痕占有率 0.5%以下を達成し、肉眼によってモルタル硬化体表面にほとんど気泡痕が確認されなくなった。本報の特殊界面活性剤はセメントペースト中の多価金属イオンと反応し構造を変化させ、自身の疎水性を向上させる反応性の官能基を有しており、この高い表面気泡痕低減効果は、特殊界面活性剤がセメントペースト由来の多価金属イオンと化学反応を起こすことでセメントペーストのぬれ広がりを促進したためであると考えられる。

### 3.2 特殊界面活性剤を配合した高性能減水剤による表面美観性向上効果の確認

コンクリート製品工場における実運用を想定すると、タンク繰りや添加工程削減の観点から一剤での運用が好ましい。そこで、見出した特殊界面活性剤 K をポリカルボン酸系高性能減水剤と一剤化した際の表面美観性向上効果について、対照として高流動コンクリート領域に適用される一般的な市販のポリカルボン酸系分散剤を用い、コンクリート試験を実施し検証した。特殊界面活性剤 K を配合したポリカルボン酸系高性能減水剤をポリカルボン酸系高性能減水剤 A とし、ポリカルボン酸系高性能減水剤 A によって、市販油性離型剤 P を塗布した型枠に充填し作製されたコンクリート硬化体をコンクリート硬化体 a とした。また対照として、市販ポリカルボン酸系高性能減水剤 B を使用して、市販油性離型剤 P を塗布した型枠に充填し作製したコンクリート硬化体をコンクリート硬化体 b とした。コンクリート試験結果を表-1 に、型枠脱型後の表面美観性の比較写真を図-4 に、画像解析結果に基づいて計算した各硬化体の表面気泡痕占有率(%；気泡痕直径に対する積算値)を図-5 に示す。

表-1 コンクリート試験結果

使用分散剤	ポリカルボン酸系高性能減水剤 A	ポリカルボン酸系高性能減水剤 B
添加量 (P×%)	0.90	0.90
スランプフロー(mm)	625	630
500 mm 通過時間(s)	4.5	4.4
空気量(%)	1.0	0.9

結果、表-1、図-4 及び図-5 に示すように、スランプフローや空気量といった観点からおおよそ同様のフレッ

シュコンクリート性状を示す条件下において、コンクリート硬化体 a は、コンクリート硬化体 b に比べ大幅な表面気泡痕占有率の低下を示し、表面気泡痕占有率 0.17% を達成し、肉眼でコンクリート硬化体表面にほとんど気泡痕が確認されなくなった。すなわち、特殊界面活性剤 K を配合したポリカルボン酸系高性能減水剤 A が優れた表面気泡痕低減、ひいては表面美観性向上効果を示すことを確認した。



図-4 コンクリート硬化体表面美観性の比較 (左:コンクリート硬化体 a, 右:コンクリート硬化体 b)

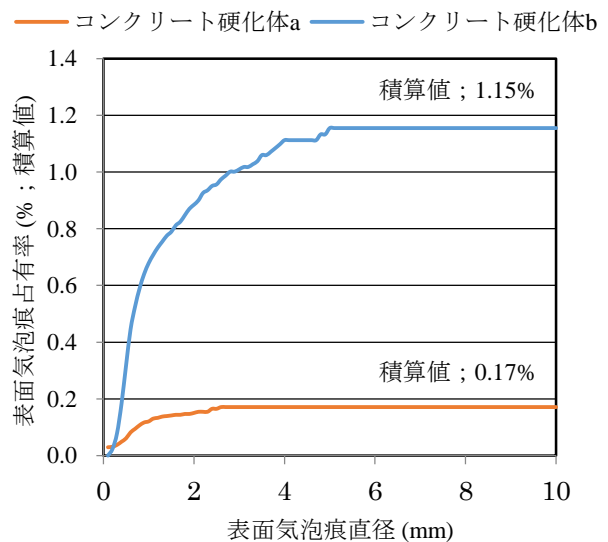


図-5 コンクリート硬化体表面気泡痕解析結果

またこの際、セメントペースト降伏値  $\tau_y$  の観点から、既往の報告<sup>2)</sup>において表面気泡痕を低減しうるに不十分であると考えられた、スランプフロー630 mm 程度でも良好な表面気泡痕低減効果を示すことが示された。このこ

とは、特殊界面活性剤 K を配合したポリカルボン酸系高性能減水剤 A を用いれば、スランブフローの管理値を  $650 \pm 50$  mm 程度に設定しても良好な表面美観性を発現することが期待でき、セメントペースト降伏値  $\tau_y$  の観点から十分な表面気泡低減効果が期待される  $700 \pm 50$  mm 程度の非常に大きいスランブフローを継続して達成する際に懸念される、コンクリート使用材料表面水変動等のコンクリート品質ブレに起因するコンクリート材料分離等のトラブルへのリスクが低減され、“表面美観性に優れたコンクリート製品を、より安定的に生産する”ことに資する可能性を示唆する。

### 3.3 特殊界面活性剤を配合した高性能減水剤と特殊界面活性剤を配合した油性離型剤の併用効果の確認

最後に、3.1 の実験で確認した特殊界面活性剤のセメントペースト接触角  $\theta_c$  低減効果に関する考察から、高性能減水剤のみならず、型枠に塗布される油性離型剤に特殊界面活性剤を配合することによる、コンクリート製品表面美観向上に対する併用効果について検証を実施した。実験に使用したフレッシュコンクリートは 3.2 の実験で調整したものと同一のものを用い、特殊界面活性剤 K を配合した油性離型剤を油性離型剤 O とし、油性離型剤 O を塗布した型枠に充填し作製したコンクリート硬化体をコンクリート硬化体 o とした。また対照として、3.2 の実験で作製したコンクリート硬化体 a を用い、型枠脱型後の表面美観性の比較写真を図-6 に、画像解析結果に基づいて計算した各硬化体の表面気泡痕占有率(%；気泡痕直径に対する積算値)を図-7 に示す。



図-6 コンクリート硬化体表面美観性の比較  
(左:コンクリート硬化体 a, 右:コンクリート硬化体 o)

結果、図-6 及び図-7 に示すように、コンクリート硬化体 o は、コンクリート硬化体 a に比べ表面気泡痕占有

率の低下を示し、表面気泡痕占有率 0.02% を達成し、肉眼によってコンクリート硬化体表面に気泡痕が確認されなくなった。すなわち、特殊界面活性剤 K を配合したポリカルボン酸系高性能減水剤 A と、特殊界面活性剤 K を配合した油性離型剤を油性離型剤 O の併用効果により、さらに優れた表面気泡痕低減、ひいては表面美観性向上効果を示すことを確認した。

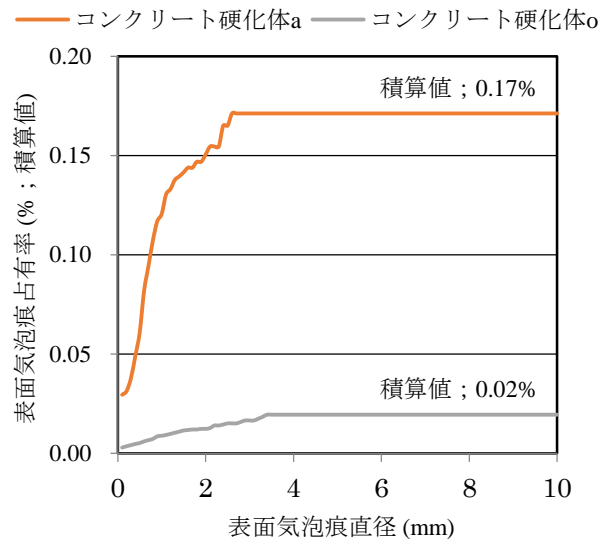


図-7 コンクリート硬化体表面気泡痕解析結果

## 4. まとめ

本検討で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) セメントペーストに界面活性剤を添加した際、セメントペースト接触角  $\theta_c$  は、表面美観性の指標となるモルタル表面気泡痕占有率(%)と相関を示す。
- (2) 構造単位を同じくする同系列の界面活性剤においては、Griffin 法により算出される HLB 値が小さい(界面活性剤が親油的になる)ほど、モルタル表面気泡痕占有率が低下する傾向を示す。
- (3) モルタル表面気泡痕占有率低減効果は、セメントペースト中の多価金属イオンと反応し構造を変化させ、自身の疎水性を向上させる反応性の官能基を有している特殊界面活性剤において最も高くなる。
- (4) 特殊界面活性剤の系列のうち、最も HLB 値が低い特殊界面活性剤 K をポリカルボン酸系高性能減水剤と併用・一剤化したポリカルボン酸系高性能減水剤 A を使用することによって、肉眼でコンクリート硬化体表面にほとんど気泡痕が確認されなくなる表面気泡痕占有率 0.5% 以下を達成する。
- (5) ポリカルボン酸系高性能減水剤 A を使用して得られるフレッシュコンクリートの基本物性は、特殊界面活性剤 K を配合していない一般的なポリカルボン酸

系高性能減水剤 B と遜色のないものである。

- (6) ポリカルボン酸系高性能減水剤 A と特殊界面活性剤 K を配合した油性離型剤 O を併用することで、肉眼でコンクリート硬化体表面に気泡痕が確認されなくなる表面気泡痕占有率 0.05%以下を達成する。

#### 参考文献

- 1) 大塚 秀三, 中田 善久, 藤井 和俊, 西本 好克: プレキャストコンクリート製品における表面仕上がり状態の美観性に対する意識調査, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.1693-1698, 2009
- 2) 一宮 一夫, 出光 隆, 山崎 竹博: 粉体系高流動コンクリートの空気量や流動性評価手法が表面気泡性状に及ぼす影響, 土木学会論文集, Vol.56, No.711, pp.135-146, 2002.08
- 3) 米倉 敬一: コンクリート製品工場における高流動コンクリートの導入と展望, セメント・コンクリート, No.585, pp.9-14, 1995.11
- 4) 川島 満成, 金丸 和光, 張 日紅: 高流動コンクリートによる工場製品の製造, コンクリート工学, Vol.38, No.5, pp.51-54, 2000.05
- 5) 一宮 一夫, 出光 隆, 山崎 竹博: 粉体系高流動コンクリートの表面気泡に及ぼす型枠の濡れと傾斜角度の影響, 土木学会論文集, Vol.55, No.704, pp.143-150, 2002.05
- 6) 片野 啓三郎, 川西 貴士, 近松 竜一: コンクリート表面の美観確保に関する諸技術, 大林組技術研究所報, No.76, pp.1-6, 2012