

論文 高流動コンクリートの打設条件が表面気泡特性に及ぼす影響

一宮 一夫*¹・ 出光 隆*²・ 山崎 竹博*³・ 渡辺 明*⁴

要旨: 高流動コンクリートをコンクリート製品に使用した場合、コンクリートの型枠面に生じる気泡が問題となる。しかしながら、この気泡の程度を評価する方法や基準は確立されていない。本研究では、この気泡を表面気泡と称し、その状態を数値化して評価する方法を提案した。また、スランプフロー、打設速度、離型剤の特性などの打設条件を変えて供試体を製作し、本方法の適用性について検討するとともに、それらの打設条件と表面気泡発生メカニズムとの関係についても言及した。研究の結果、本方法の有用性を確認した。

キーワード: 高流動コンクリート, コンクリート製品, コンクリート型枠面の気泡

1. はじめに

コンクリート製品に高流動コンクリートを使用することで、振動締め固め時の騒音を著しく減少させることができ、労働環境の大幅な改善が可能となる [1]。一方で、高流動コンクリートは、普通コンクリートに比べると粘性が高く、打設時に巻き込んだ空気が抜けにくいために、打設条件によってはコンクリートの型枠面に多数の気泡が生じることがある。この気泡は、美観を損なうばかりではなく、耐久性の低下をもたらすが、その程度を数値的に評価する合理的な方法や基準は確立されていない。

筆者らは、高流動コンクリートを使用したコンクリート製品を対象に、コンクリートの型枠面に発生する気泡（以下、表面気泡と呼ぶ）の程度を評価する合理的な方法作りに関する研究を行ってきた [2]。本論文では、表面気泡の状態を数値化して評価する方法として、コンクリート表面の写真を画像解析する方法とレーザー変位計を用いて表面気泡の深さを測定する方法を併用したものを提案するとともに、スランプフロー、打設速度、離型剤の特性などの打設条件と表面気泡の状態との関係について検討した。

2. 実験概要

2. 1 使用材料およびコンクリートの配合

コンクリートの流動化には、普通ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末を60%体積置換した、粉体系の配合を使用した。スランプフローは、目標値55cm、63cm、70cmの3水準とし、高性能減水剤を添加して調整した。表-1にコンクリートの使用材料を、表-2にスランプフロー63cmのコンクリートの配合を示す。

離型剤は、石油系炭化水素をベースオイルに用いた油性離型剤と水性離型剤を使用した。表-3に離型剤の特性を示す。油性離型剤はベースオイルのみ（以下、油性1とする）、混合率の異

* 1 大分工業高等専門学校助教授 土木工学科（正会員）
 * 2 九州工業大学教授 工学部設計生産工学科，工博（正会員）
 * 3 九州工業大学助教授 工学部設計生産工学科，工博（正会員）
 * 4 九州共立大学教授 工学部開発学科，工博（正会員）

なる数種類の界面活性剤からなる添加剤をベースオイルに加えたものを2種類（以下、油性2、油性3とする）、合計3種類を使用した。水性離型剤の標準水希釈濃度の最高は15%であるが、本実験では5%、10%、15%、20%の合計4水準の水希釈濃度で使用した。

2. 2 供試体の製作方法

コンクリートの練混ぜは、水平2軸強制練りミキサー（容量55ℓ）を用い、1回の練り混ぜ量を35ℓとした。練り混ぜ方法は、骨材と結合材をミキサーに入れ30秒間空練りし、水と高性能減水剤を入れ120秒間本練りをした。型枠は、内寸法で高さ50cm×幅30cm×奥行き8cmの鋼製のものを使用した。離型剤の塗布は、コンクリート打設の一時間前に、霧吹きと脱脂綿を用いて均一になるように行った。コンクリートの充填は、締固めを行わず型枠天端位置から連続して自己充填させた。充填時間は90秒、180秒、240秒の3水準とした。これを打ち込み面上昇速度に換算すると、それぞれ33.3cm/min、16.7cm/min、12.5cm/minとなり、以下これを打設速度とする。打設の翌日に脱型し、供試体の型枠面の表面気泡を測定した。

2. 3 表面気泡の状態の測定方法

(1) 表面気泡面積および分布の測定

表面気泡面積および分布は、50cm×30cmの供試体側面の写真をコンピュータに取り込み、画像解析により測定した。写真撮影に先立ち、表面気泡部のコントラストが明瞭となるように、アセトンでコンクリート表面を洗浄し、黒色水性インクを塗布した後、気泡部分へ高炉スラグ微粉末を充填した。

コンクリート面の表面処理後、垂直方向から写真を撮影した。写真はフラットヘッドスキャナーでコンピュータに取り込み、画像編集ソフトで画像の修正・編集をした。画像解析には、フリーソフトの画像解析プログラムを使用した[3、4、5]。画像解析では表面気泡を円に換算し、直径が1mm以上の表面気泡の面積と圆心のX、Y座標を測定した。また、表計算ソフトを用いて、表面気泡の合計面積や表面気泡径ごとの面積分布などを計算した。

表面気泡の特性は、式(1)、(2)、(3)を用いて表面気泡面積比、累積表面気泡率、表面気泡粗さ係数として表すこととした。

(2) 表面気泡ごとの最大深さの測定

表面気泡部分に充填した高炉スラグ微粉末を、ダスト除去スプレーで取り除いた後、表面気泡ごとの最大深さをレーザー変位計で測定した。表面気泡ごとの最大深さ（以下、表面気泡深さと

表-1 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント, 比重3.15
高炉スラグ微粉末	ブレン値6000, 比重2.91
細骨材	海砂, 比重2.58, FM2.85, 実積率67.5%
粗骨材	碎石, 最大寸法20mm, 比重2.73, FM2.73, 実積率60.0%
高性能減水剤	ナフタレン系

表-2 コンクリートの配合

	粗骨材の最大寸法(mm)	スランプフロー(cm)	空気量(%)	水結合材比(W/B)(%)	細骨材率(S/a)(%)	単位量(kg/m ³)					
						水W	セメントC	高炉スラグBS	細骨材S	粗骨材G	減水剤SP
重量(kg)	20	63±3	1.5±0.5	31.6	—	178	236	327	826	819	5.9
体積(ℓ)	—	—	—	95.2	51.6	178	75	112	320	300	5.9

表-3 離型剤の特性

種類	ベースオイル(混合率)	添加剤(混合率)
油性1	石油系炭化水素(100%)	なし
油性2	石油系炭化水素(96%)	非イオンおよびアニオン界面活性剤ほか(4%)
油性3	石油系炭化水素(97%)	非イオンおよびアニオン界面活性剤ほか(3%)
水性5%	石油系炭化水素(75%)	非イオンおよびアニオン界面活性剤ほか(25%)
水性10%	〃	〃
水性15%	〃	〃
水性20%	〃	〃

$$\text{表面気泡面積比} = \frac{\text{表面気泡の合計の面積}}{\text{コンクリートの表面積}} \times 100 (\%) \quad (1)$$

$$\text{累積表面気泡率} = \frac{\text{ある気泡径以下の表面気泡の合計の面積}}{\text{表面気泡の合計の面積}} \times 100 (\%) \quad (2)$$

$$\text{表面気泡粗さ係数} = \frac{(100 - \text{ある気泡径以下の累積表面気泡率}) \text{の合計}}{100} \quad (3)$$

呼ぶ)の測定は、作業の都合上から表面気泡径が2mm程度以上のものを対象とした。測定状況を図-1に示す。

3. 実験結果および考察

3.1 スランプフローと表面気泡の関係

図-2に、スランプフローが異なる場合の気泡径ごとの表面気泡面積比の累計と表面気泡径の関係を示す。以下、表面気泡面積比の累計の最大値を表面気泡面積比、表面気泡径の最大値を最大表面気泡径と呼ぶ。実験の結果、スランプフローが大きいほど表面気泡面積比、最大表面気泡径ともに小さくなる事が分かる。

累積表面気泡率と表面気泡径の関係を図-3に示す。同図は、図-2に示すスランプフローごとの分布状態を、各々の最大値を100%として標準化したもので、横軸の表面気泡径の範囲については7mm以上をまとめて一つの範囲として表示した。これは、本実験では7mm以上の表面気泡径の割合が少なく、また将来、美観への悪影響を7mm以上の大きな表面気泡径の割合で評価できる可能性を考慮したことによる。同図から、スランプフローが大きいほど、分布は上方に位置しており、小さい径の表面気泡が多いことが分かる。この関係を、骨材の粗粒率の考え方を参考した、式(3)に示す表面気泡粗さ係数で表すと、スランプフロー70cmで2.16、63cmで2.69、55cmで3.53となり、表面気泡径の分布状態を数値化することができる。すなわちスランプフローが大きいほど、表面気泡粗さ係数は小さく、大きな径の表面気泡も少ないことが分かる。

本実験では、高性能減水剤を使用してスランプフローを調整した。従って、スランプフローの変化はペーストの流動性の相違によるものであり、表面気泡

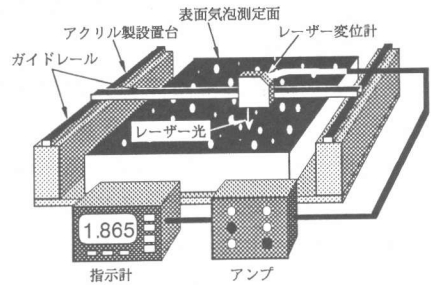


図-1 表面気泡深さ測定状況

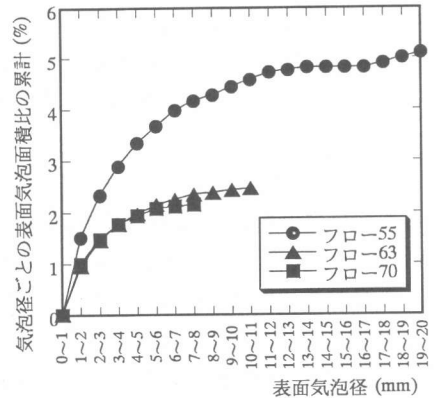


図-2 気泡径ごとの表面気泡面積比の累計と表面気泡径の関係 (離型剤:油性2, 打設速度33.3cm/min)

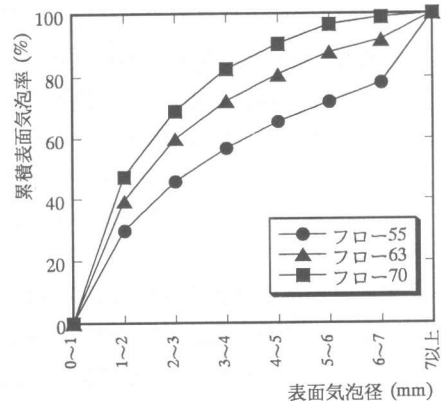


図-3 累積表面気泡率と気泡径の関係 (離型剤:油性2, 打設速度33.3cm/min)

の発生を抑制するにはペーストの流動性を良くすればよい。一般に泡の膜の安定の要因は、第一に液体の表面粘性にあることが知られている [6]。コンクリートをペーストと骨材で構成する固液二相材料と仮定すると、液相のペーストの粘性が高いほど気泡膜が安定的であり、相対的に大きな径の空気泡を内部に存在させ易い。従って、ペーストの粘性が高くスランプフローが小さいほど、打設時に巻き込んだ大きな径の空気泡が残存しやすく、表面気泡の径も比較的大きくなるものと推察される。

3. 2 打設速度と表面気泡の関係

図-4に、打設速度を変化させた場合の気泡径ごとの表面気泡面積比の累計と表面気泡径の関係を示す。同図より、打設速度が遅いほど表面気泡面積比、最大表面気泡径ともに小さいことが分かる。

累積表面気泡率と表面気泡径の関係を図-5に示す。打設速度12.5cm/minの場合の分布が最も上方に位置し、打設速度が遅いと小さな表面気泡径の比率が高い。この場合の表面気泡粗さ係数は、打設速度12.5cm/minで2.06、16.7cm/minで2.66、33.3cm/minで2.69となる。

以上のように、打設速度が遅くなるほど表面気泡の合計の面積は小さく、大きな径の表面気泡も少ない。これは、ゆっくり打設した方が、コンクリート充填に伴う打設表面での攪乱が生じにくく、空気が巻き込まれにくいことも一因と考えられる。

3. 3 離型剤の特性と表面気泡の関係

図-6に、離型剤の特性を変化させた場合の気泡径ごとの表面気泡面積比の累計と表面気泡径の関係を示す。同図より、水性離型剤を使用した場合の表面気泡面積比は、油性離型剤を使用した場合に比べると極めて小さいことが分かる。また、油性離型剤を比較すると、ベースオイル単体（油性1）よりも添加剤を加えたもの（油性2、3）の方が表面気泡面積比、最大表面気泡径ともに小さく、添加剤の表面気泡抑制効果がかがえる。

累積表面気泡率と表面気泡径の関係を図-7に示す。同図から水性離型剤の場合は、小さな表面気泡の割合が高く、大きな径の表面気泡は少ないことが分かる。また、油性離型剤の場合は添加剤の内容を調整することで表面気泡の状態を改善できることが分かる。この場合の表面気泡粗さ係数は、水性で2.22、油性3で2.48、油性2で2.69、油性1で3.32となる。

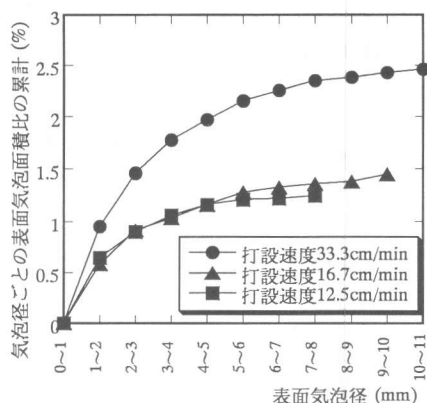


図-4 気泡径ごとの表面気泡面積比の累計と表面気泡径の関係 (スランプ70~63cm, 離型剤:油性2)

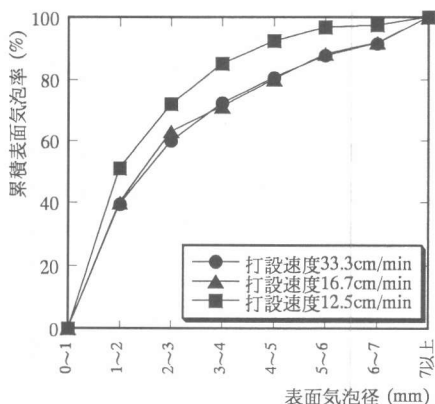


図-5 累積表面気泡率と表面気泡径の関係 (スランプ70~63cm, 離型剤:油性2)

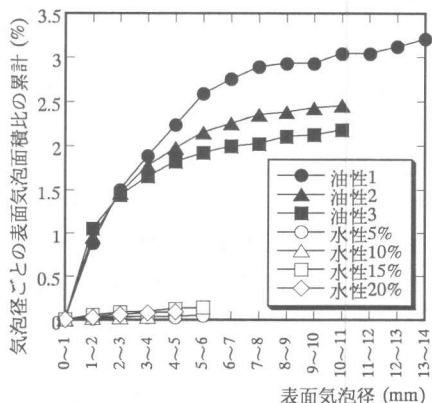


図-6 気泡径ごとの表面気泡面積比の累計と表面気泡径の関係 (スランプ70~63cm, 打設速度33.3cm/min)

3.4 表面気泡深さと表面気泡径・表面気泡面積比・表面気泡粗さ係数等との関係

表面気泡深さと表面気泡径の関係の例を図-8に示す。同図から、表面気

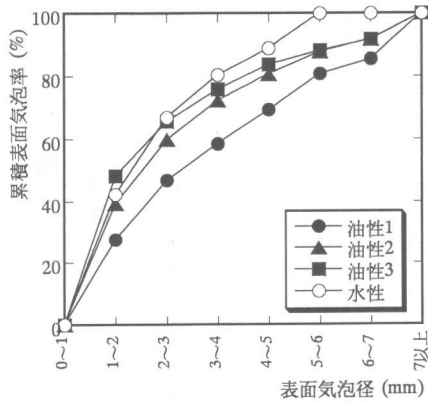


図-7 累積表面気泡率と表面気泡径の関係
(スランプ 70-63cm, 打設速度33.3cm/min)

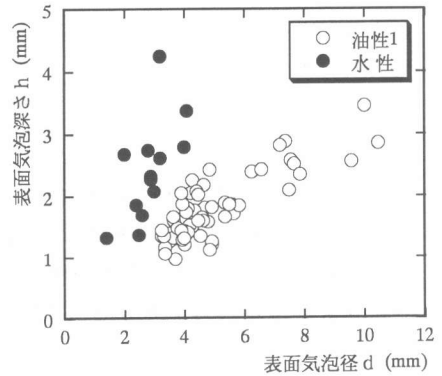


図-8 表面気泡深さと表面気泡径の関係
(スランプ 70-63cm, 打設速度33.3cm/min)

泡深さ(h)と表面気泡径(d)の間には正の相関関係があること、分布の傾きは水性離型剤の方が油性離型剤よりも大きいことが分かる。このようなhとdの関係は型枠表面の濡れを表すものと考え、h/dに着目して型枠の濡れと表面気泡の状態との関係を調べた。いま、表面気泡を球の一部と仮定して、h/dと型枠の濡れの間を模式的に表すと図-9のようになる[7]。また、図-8をもとに離型剤ごとのh/dの実測値のヒストグラムを作成したところ、どの離型剤の場合も正規分布となり、h/dの特性値として平均値を選んだ。

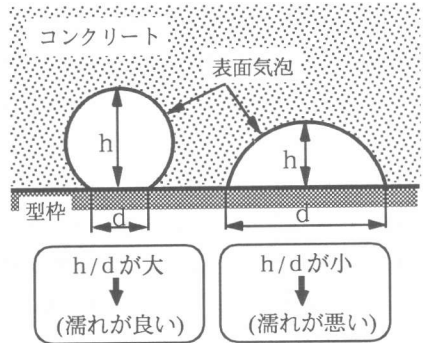


図-9 h/dと型枠の濡れの関係

図-10にh/dと表面気泡面積比、表面気泡粗さ係数との関係を示す。横軸のh/dは離型剤の種類に相当し、h/d=0.36、0.44、0.48、0.86の順で油性1、油性2、油性3、水性である。同図より、h/dが大きく型枠の濡れが良くなると、表面気泡面積比、表面気泡粗さ係数ともに小さくなることから、型枠の濡れと表面気泡の状態との間には密接な関係があると言える。また図中には示していないが、前出の3.1で述べた、離型剤に油性2を使用してスランプフローを55、63、70cmの3水準で変化させた場合は、スランプフローが大きいと表面気泡面積比、表面気泡粗さ係数ともに小さくなった。この場合のh/dは3水準ともにほぼ0.44であり、ペーストの表面粘性がh/dに与える影響は見受けられないようであるが、他のh/dの場合は確認していないので今後検討が必要である。

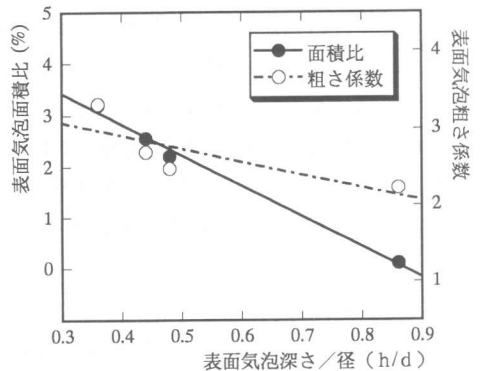


図-10 表面気泡の状態とh/dの関係
(スランプ 70-63cm, 打設速度33.3cm/min)

3.5 最大表面気泡径と表面気泡面積比の関係

図-11に、最大表面気泡径と表面気泡面積比の関係を示す。同図は、前出の図-2、図-4、図-6に示した打設条件ごとの最大表面気泡径と表面気泡面積比をまとめたもので、両者の間には強い正の相関関係が認められる。このことから、表面気泡の分布の一般的な特徴として、最大表面

気泡径が大きいものは表面気泡面積比も大きいようである。

4. まとめ

以上、表面気泡の状態を数値化して評価する方法を提案し、その適用性について検討した。また、打設条件と表面気泡発生メカニズムとの関係についても言及した。本研究より得られた表面気泡に関する知見を以下に示す。

- (1) コンクリート表面の写真を画像解析する方法とレーザー変位計で表面気泡の深さを測定する方法を併用し、表面気泡の状態を数値化して評価する方法を提案した。本方法を打設条件を変えた場合の表面気泡の状態の評価に適用し、その有用性を確認した。
- (2) 高性能減水剤を添加してスランプフローを変化させて表面気泡の状態との関係を調べた。その結果、スランプフローが大きいほど表面気泡面積比、最大表面気泡径ともに小さくなった。これは、ペーストの粘性が低下すると大きな径の空気泡が残存しにくいためと考えられる。
- (3) 打設速度を遅くすると、表面気泡面積比、最大表面気泡径ともに小さくなる。
- (4) 水性離型剤と油性離型剤を比較すると、水性離型剤の方が著しい表面気泡抑制効果がある。また、油性離型剤は、ベースオイルに界面活性剤などの添加剤を加えたものが表面気泡が少なくなる傾向にある。
- (5) 表面気泡深さ（ h ）と表面気泡径（ d ）を実測した結果、 h と d の間には正の相関関係があることが分かった。また、水性離型剤の方が油性離型剤よりも分布の傾き（ h/d ）が大きくなった。以上から、 h/d は型枠の濡れを表すものと考え、 h/d と表面気泡の状態との関係を調べたところ、両者には密接な相関関係が認められた。
- (6) 最大表面気泡径と表面気泡面積比との関係を、本研究の全ての実験条件での結果を対象に調べた。その結果、両者には強い正の相関関係があった。このことは、一般に表面気泡の最大径が大きいものは表面気泡が多いことを意味する。

参考文献

- [1] 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
- [2] 一宮一夫、出光 隆、山崎竹博、丸山 巖：高流動コンクリートの表面気泡と離型剤の特性との関係、土木学会西部支部研究発表会講演概要集、pp.772-773、1997.3
- [3] 沼原利彦、中川俊文、高岩 堯：画像処理・画像解析・形の科学への誘いー表皮ランゲルハンス細胞空間配置の解析ー、コンピュータサイエンス、Vol.1、No.1、pp.5-16、1994.8
- [4] 沼原利彦、小島清嗣：医学・生物学のための画像解析ハンドブック実践NIHImage講座、羊土社、1995
- [5] 木原 章、阿部道生、清 哲朗：バイオ画像処理の実際、金原出版、1996
- [6] 大澤敏彦：泡のおもしろ科学ーバブルの名誉のためにー、裳華房、1996
- [7] 花王生活科学研究所：洗たくの科学、裳華房、1993

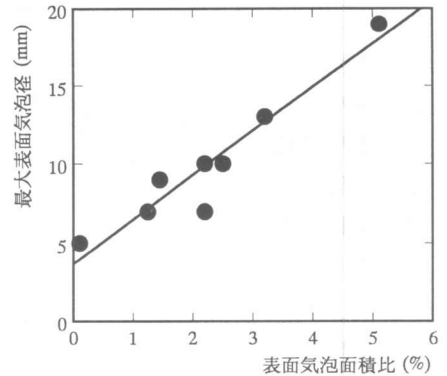


図-1.1 最大表面気泡径と表面気泡面積比の関係