

論文 高流動コンクリートの表面気泡におよぼす加振の効果

一宮 一夫^{*1}・ 出光 隆^{*2}・ 山崎 竹博^{*3}・ 渡辺 明^{*4}

要旨：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、製造時の締固め工程で発生する振動や騒音の大幅な低減が可能となる。しかし、締固め作業をしない場合にはコンクリート表面に大きな気泡が多数発生することがある。このような表面気泡の除去には、一般に微振動をかけることが有効であると考えられているが、高流動コンクリートの場合、振動による気泡除去の効果や材料分離への影響などについては不明な点が多い。

本研究は、上記のうち微振動による気泡除去の効果を、離型剤の種類、練り上がり直後の空気量および加振時間を変化させて、実験的に検討したものである。

キーワード：高流動コンクリート、表面気泡、微振動、コンクリート製品

1. はじめに

コンクリート製品製造時の締固め工程で発生する振動や騒音は、締固め不要の高流動コンクリートを使用することにより大幅に低減できる¹⁾。しかし、高流動コンクリートは、粘性が高いことから、締固め作業をしない場合にはコンクリート表面に大きな気泡が多数発生することがある。この表面気泡は、製品の美観上から好ましくない。表面気泡の除去には、一般に微振動をかけることが有効であると考えられるが、高流動コンクリートの場合、振動による気泡除去の効果や材料分離への影響などについては不明な点が多い。

筆者らは、既に表面気泡の状態の数値的評価方法を提案し、離型剤の種類、スランプフロー、打設速度などの打設条件が表面気泡の状態にあたえる影響を検討してきた^{2)~4)}。同時に、コンクリート表面を研磨し、表面近傍に集中する気泡（以下、隠れ気泡とよぶ）の存在を確認した。

本研究は、表面気泡ならびに隠れ気泡の除去に対する微振動の効果を検討するために、微振動下での表面気泡ならびに隠れ気泡の性状を調

べたものである。なお、実験要因は離型剤の種類、練り上がり直後の空気量および加振時間の3種類とした。

2. 実験概要

2.1 使用材料およびコンクリートの配合

高流動コンクリートは、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とした。スランプフローは63cmとし、高性能AE減水剤で調整した。表-1に使用材料、表-2にコンクリートの配合を示す。

練り上がり直後の空気量は5%と1.5%の2水準とし、ポリカルボン酸系の高性能AE減水剤に消泡剤を添加して調整した。

離型剤は、石油系炭化水素のベースオイルに各種の界面活性剤を添加した、市販の油性離型剤と水性離型剤を使用した。

2.2 供試体の製作方法

コンクリート打設の1時間前に、離型剤を鋼製型枠（高さ50cm×幅30cm×奥行き8cm）の内面に塗布した。その際、離型剤が均一に分布するように、霧吹きで噴霧し脱脂綿で拭きぬい

*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 工学部建設社会工学科，博士（正会員）

*3 九州工業大学助教授 工学部建設社会工学科，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）

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6000cm ² /g，比重2.91
細骨材	海砂，比重2.51，F M2.90，実積率67.5%
粗骨材	碎石，最大寸法20mm，比重2.67，F M7.01，実積率58.1%
高性能A E減水剤	ポリカルボン酸系

表－２ 高流動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
20	63	1.5	31.6	51.6	178	236	327	804	816	5.9

にならした。練混ぜには水平２軸強制練りミキサーを用い、骨材と結合材を入れ30秒間空練りした後、水と高性能A E減水剤を入れ120秒間本練りをした。練り上がり後すぐにスランプフロー、Vロート流下時間、空気量などのコンクリートの諸性状を調べた。コンクリートの充填は型枠の天端位置から連続して行った。充填時間は90秒間とし、その後、振動数25Hz、振幅0.9mmのテーブルバイブレータで60秒または120秒間の締固めを行った。打設の翌日に脱型し、表面気泡の状態を測定した。なお、テーブルバイブレータの振動条件を決定するために予備実験を行い、騒音レベルが通常の会話程度の60dBA以下であること、材料分離しにくく型枠の隅々までコンクリートが行き渡ることなどを確認した。

隠れ気泡の評価のために、コンクリート表面をグラインダーで浅く研磨した。研磨深さは、レーザー変位計で測定した結果、平均0.24mmであった。

2.3 気泡の状態の測定方法

50cm×30cmの供試体側面をデジタルカメラで撮影し、気泡の状態を画像解析により数値化した。撮影に先立ち、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、黒色油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。

表面処理したコンクリート面を垂直方向から撮影し、コンピューター画像解析装置を用いて、気泡の面積と気泡径分布を計測した。

3. 実験結果および考察

3.1 空気量1.5%の場合

コンクリート製品の空気量として1.5%が一般的であるので、空気量1.5%のコンクリートを製造して表面気泡の状態を調べた。

(1) 表面気泡の状態

図－１にコンクリート表面積に対する表面気泡面積比と加振時間の関係を示す。図中の実線が表面気泡、破線が表面研磨後の気泡面積比を表わす。油性離型剤を使用した場合は、加振時間が長いほど表面気泡面積比は減少する。一方、水性離型剤の場合は、加振時間に関わらず表面気泡面積比はほぼ一定で小さい。このように離型剤の種類で表面気泡の状態が異なるのは、セメントペーストに対する両者の濡れ特性が異なるためである。図－２は濡れが良い場合と悪い場合を模式図で表したものである。図中の(a)は濡れが良い場合で h/d が大きく、(b)は濡れが悪い場合で h/d は小さい。既往の筆者らの研究³⁾において、水性離型剤の場合は $h/d = 0.86$ 、油性離型剤の場合は $h/d = 0.44$ となり、離型剤の種類によって濡れ特性が大きく異なることを確認した。

以上のことから、油性離型剤の場合は微振動を加えても表面気泡が除去されにくいのは、型枠への吸着力が水性離型剤の場合よりも大きいためと考えられる。このことを説明するために、いま表面気泡を球の一部と仮定する。静的な安定状態では、表面気泡内部の圧力と、型枠と表

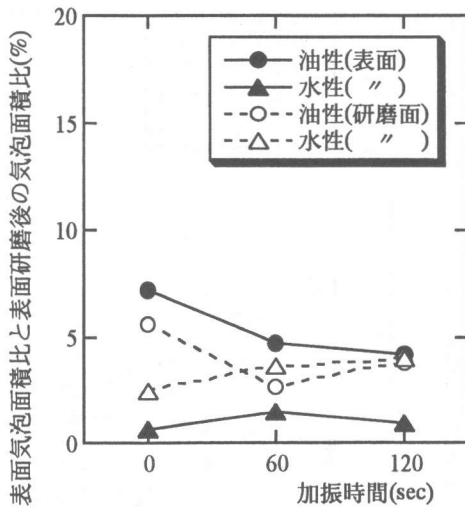


図-1 加振時間と面積比
(空気量1.5%の場合)

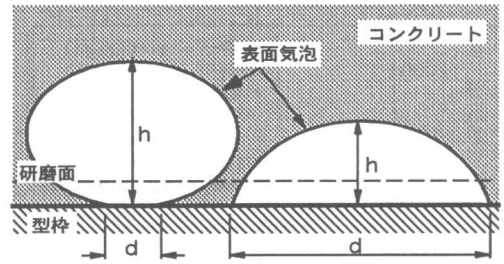
面気泡が接触する円周に沿って作用する表面張力が釣り合っているが、微振動などの外力を加えるとある条件以上では上記の釣り合いが壊れ、表面気泡が除去されると推察される。ところが、油性離型剤のように濡れが悪い場合は、型枠と表面気泡が接触する円周が長いうえに、表面張力の型枠面に対する垂直方向の成分が大きいため、表面気泡は除去されにくいと考えられる。

(2) 表面研磨後の気泡の状態

高流動コンクリートには、表面気泡以外にも、表面近傍にあるが脱型後表面に開口しない、いわゆる隠れ気泡が存在する。隠れ気泡は、コンクリート表面に触れるだけでペースト膜が破壊され開口するものが多い。

コンクリート表面研磨後の気泡面積比と加振時間との関係を図-1に破線で示す。水性離型剤を用いて微振動をかけた場合は、表面研磨後の気泡面積比は表面気泡の場合よりも大きくなり、加振時間が長いとわずかながら増加する。表面研磨後に気泡面積比が増加するのは、研磨前では目視できなかった隠れ気泡が多数現れたためである。また、加振時間が長いと気泡面積比が大きくなるのは、コンクリート内部の気泡の再配置が促進されるためと考えられる。

一方、油性離型剤の場合は、表面研磨で面積比が全体的に下方に移動しているが、研磨する



(a) 濡れが良い場合 (水性離型剤) (b) 濡れが悪い場合 (油性離型剤)

図-2 型枠の濡れと h/d の関係

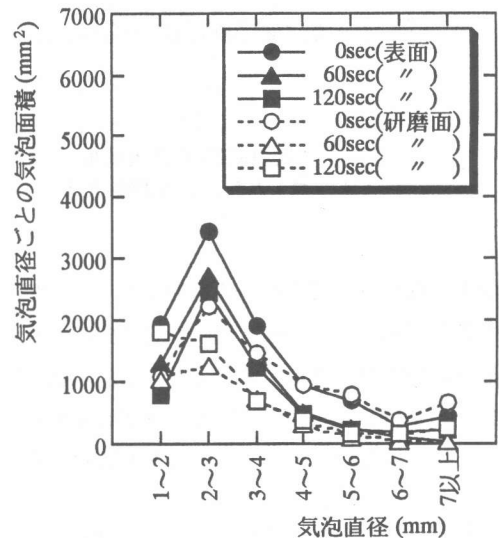


図-3 気泡直径の分布状態
(空気量1.5%, 油性離型剤)

ことで図-2 (b) のように気泡の直径が減少したことで、比較的小さな気泡が除去されたためである。これらの結果から、油性離型剤を使用した場合は隠れ気泡は発生していないことがわかる。

(3) 気泡直径ごとの気泡面積の分布状態

表面気泡と表面研磨後の気泡直径の分布状態を、油性離型剤の場合と水性離型剤の場合との別に図-3、図-4に示す。

油性離型剤の場合、表面気泡面積の分布は、気泡直径2~3mmで最大となり、これを境に減少する。また、加振時間が長くなるとわずかではあるが分布は下方にシフトする。つまり、微振動をくわえることで大きな気泡から小さなものまで均等な面積比で減少したことを示してい

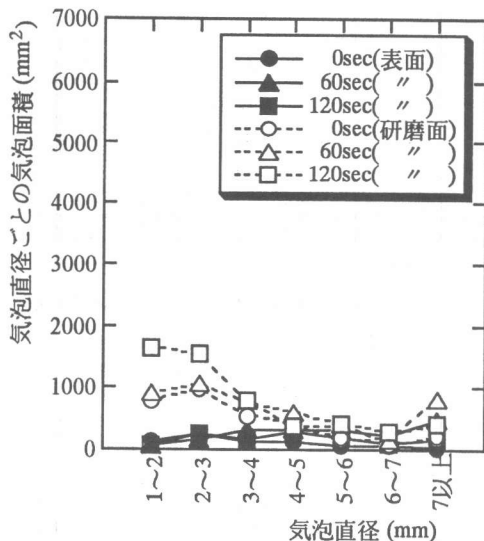


図-4 気泡直径の分布状態
(空気量1.5%, 水性離型剤)

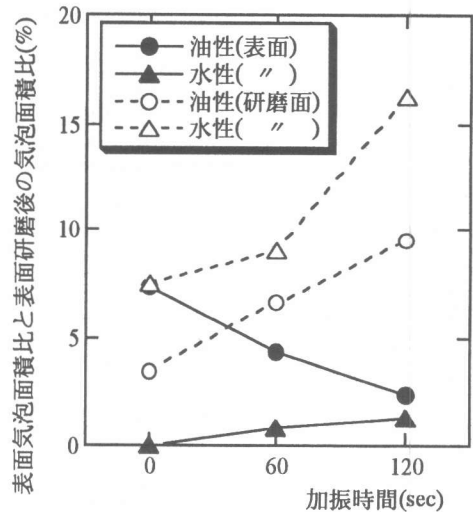


図-5 加振時間と面積比
(空気量5.0%の場合)

る。

表面研磨後も上記と同様の傾向であるが、気泡直径2~3mmと3~4mmについては気泡面積が研磨前の半分程度まで減少している。これは、図-1で表面研磨により小さな気泡が減少することで気泡面積比が小さくなる説明を裏付けるものである。

一方、水性離型剤を使用した場合、気泡直径ごとの表面気泡面積はどの気泡直径の場合もほぼ均一に分布している。また、表面研磨後は直径4mm以下の気泡の面積が若干増加している。

3.2 空気量5%の場合

高流動コンクリートは普通コンクリートよりも耐久性能が優れていると考えられているが、藤井らの研究⁹⁾によると、耐凍害性を確保するには少なくとも3%程度の空気量は必要のようである。

本研究では、上記の藤井らの研究と普通コンクリートで耐凍害性を確保できる空気量が5%程度であることを参考に、空気量5%の場合でも同様の実験を行った。

(1) 表面気泡の状態

表面気泡面積比と加振時間の関係を図-5に示す。油性離型剤の場合は加振することで表面気泡面積比は減少する。一方、水性離型剤の場合

合の表面気泡面積比は、1%以下で極めて小さく、加振時間が長くなると若干増加する傾向にある。

(2) 表面研磨後の気泡の状態

表面研磨後の気泡面積比は、空気量1.5%の結果とは大きく異なっている。

油性離型剤の場合は、表面気泡とは逆に長く加振すると気泡面積比は増加する。水性離型剤の場合も同様に微振動をかけることで気泡面積比が増加している。理論的には、ある断面での気泡の面積比はコンクリート中の空気の種類比と同じである。つまり空気量5%の場合は、ある断面に現れる気泡の面積比も5%となるはずであるが、図-5によると油性離型剤の加振時間120秒の場合と水性離型剤で加振した場合には、表面研磨後の気泡面積比が5%を大きく上回っている。このような、表面研磨後の隠れ気泡を含む表面気泡の性状には実験的誤差は含まれるものの、その定性的な性状については以下のように考察することができる。

(3) 気泡直径ごとの気泡面積の分布状態

油性離型剤の場合の気泡直径ごとの気泡面積の分布を図-6に、水性離型剤の場合の分布を図-7に示す。

油性離型剤の場合の表面気泡は、図-6に示

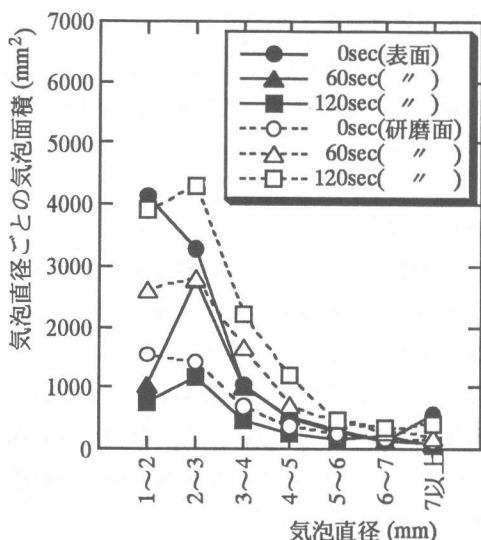


図-6 気泡直径の分布状態
(空気量 5 %, 油性離型剤)

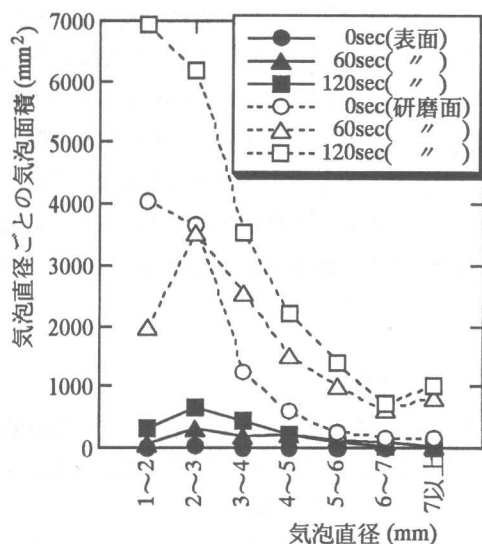


図-7 気泡直径の分布状態
(空気量 5 %, 水性離型剤)

すように加振時間が長いほど気泡直径5mm以下の小さな気泡が減少している。一方、表面研磨面の気泡の分布は、加振時間が長いほど5mm以下の気泡が増えており、表面気泡の分布性状とは逆の傾向である。

水性離型剤を使用した場合の表面気泡は、加振時間が長いほど小さな気泡が増加する。表面研磨面も、表面気泡と同様に加振時間が長いほど、小さな径の気泡の増加が著しい。

以上のように、実験要因に関わらず、気泡直径の分布は、大きなものの比率は低く小さな気泡の比率が高い。これは次のように説明できる。いま、コンクリートをニュートン流体と仮定し、コンクリート中のある一つの空気泡を考えると、この空気泡の上昇速度 V はストークスの法則から式(1)のように表せる。つまり、上昇速度は直径の2乗に比例し、大きい気泡ほど浮力が著しく大きくなるために放出されやすいが、小さな気泡はコンクリート中に多く残存することになる。実験の結果、この傾向は空気量が多いほど、加振時間が長いほど顕著であるが、空気量が多いほど気泡間隔が狭いために気泡が合一しやすいことや、加振することで見かけ上の粘性係数が減少するために空気泡の上昇速度 V が速くなるなどの原因によるものと考えられる。

$$V = \frac{(\rho_0 - \rho_a)gd^2}{18\eta} \quad (1)$$

ρ_a : 空気泡の密度

ρ_0 : コンクリートの密度

η : コンクリートの粘性係数

d : 空気泡の直径

一方、図-5の空気量5%の場合では、加振時間が長くなると表面研磨後の気泡面積比が増加する。この現象については、本実験では、振動のエネルギーは型枠に近いところほど大きいと考えられ、見かけの粘性係数は、型枠に近いほど小さくなる。このため、気泡は型枠の方向へ移動し、表面気泡が多くなるものと考えられる。

以上のように、コンクリート内部の気泡は、加振することで比較的容易に再配置されることがわかる。一方、表面気泡を型枠表面から離脱させて独立気泡とするには、表面気泡とコンクリートの密度差によって上方にはたらく浮力と、型枠表面との接触部分で表面張力によってはたらく付着力との釣り合いを壊す必要がある。振動をくわえて気泡の合一を促進すると気泡が成長して大きくなるにつれて浮力が増し、ついには付着力に打ち勝つほどになると表面気泡は型枠から離脱し、独立気泡となって浮上すると考

えることができる。このように、表面気泡の除泡メカニズムはコンクリート内部の気泡の場合とは異なり、内部気泡の場合よりも多くのエネルギーが必要である。従って、表面気泡の除去の点からは、より大きな振動加速度で長時間の振動をかけることが有効と考えられるが、過度の振動は材料分離を生じるので実際には限界がある。

4. まとめ

表面気泡と隠れ気泡の除去を目的に、微振動の効果を実験的に検討した。本研究の結果をまとめると以下のようである。

(1) 水性離型剤を使用した場合は、油性離型剤を使用した場合よりも表面気泡は少ない。しかし、加振をすると水性離型剤の場合でも表面気泡が増加する傾向にある。これは空気量が多いほど顕著である。

(2) 隠れ気泡は、水性離型剤を使用すると多く発生するが、微振動をかけても除去することは難しい。

(3) 油性離型剤を使用した場合は、加振時間が長いほど表面気泡が減少するが、水性離型剤を使用した場合ほどには表面気泡は少なくなるらない。これは、セメントペーストに対する離型剤の濡れが、油性の方が水性よりも悪いためである。

(4) 加振することで、コンクリートの見かけの粘性が低下するとともに、気泡が再配置される。その結果、大きな気泡は除去され、小さな気泡がコンクリート中に多数残存する。

(5) 空気量5%の場合、表面研磨後の気泡面積比が空気量を大きく上回ったが、テーブルバイブレータで加振すると、型枠近くが最も振動の影響を受け、コンクリート内部の気泡が型枠近傍に集中したためと考えられる。

以上は、振動数25Hz、振幅0.9mmの一定の加振条件での実験結果である。コンクリート製品に高流動コンクリートを使用する第一の理由は、製造時の振動や騒音の低減であるので、自ずと

加振条件は制限されるが、その範囲内で、今後は、他の振動条件における表面気泡の除去効果も検討するとともに、加振条件と材料分離の関係も調べる予定である。

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) 一宮一夫，出光 隆，山崎竹博，渡辺明：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，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19，pp.61-66，1997.6
- 4) 一宮一夫，出光 隆，山崎竹博：高流動コンクリートの表面気泡と型枠の濡れ性の関係，土木学会第52回年次学術講演会講演概要集，pp.588-589，1997.9
- 5) 藤井学：高流動コンクリートの耐久性能に関する研究，平成6年度科学研究費補助金（一般研究（B））研究成果報告書，平成8年3月