

論文 微振動下における高流動コンクリートの表面気泡の挙動

一宮 一夫*1・出光 隆*2・山崎 竹博*3・渡辺 明*4

要旨:本研究では、表面気泡を少なくすることを目的に、高流動コンクリートに微振動を加えた場合の表面気泡の挙動を、表面気泡に作用する力の釣合いから説明した。

すでに筆者らは、静止コンクリート中の表面気泡の最大直径や発生量などがモルタル相のレオロジー一定数で説明できることを理論と実験で確認している。今回は、振動を加えた際のレオロジー一定数の変化に着目し、振動下における表面気泡の挙動を説明した。併せて、振動が粗骨材とモルタルの分離に及ぼす影響についても考察をした。

キーワード:高流動コンクリート、表面気泡、微振動、レオロジー一定数、降伏値

1. はじめに

工場製品に高流動コンクリートを使用すると、振動締固め工程の省略や簡略化が可能となり、従来から問題となっている労働環境や周辺隣家への騒音・振動の問題が解決できる。その一方で、打設時に巻き込んだ空気が脱型後に表面気泡となって現れ、商品価値の低下を招くことがあり、多くの工場に対応に苦慮している。

表面気泡を少なくする方法として、コンクリートのスランプフローが大きい流動性の良い配合にする、型枠表面へのコンクリートの付着の程度(以下、濡れ性という)を良くする、振動数20~30Hz程度の微振動を加えて表面気泡の移動を促進する方法などがある。

そのうち微振動を与える方法は、振動の効果がコンクリートの使用材料や配合ごとに異なり、最適な振動条件を見いだすためには実験を繰り返す必要がある。このため、フレッシュ時のコンクリートの特性と振動条件の関係を知らなければ合理的な施工方法を比較的簡単に見いだせ、高流動コンクリートの発展に寄与できるものと考えられる。

本研究では、表面気泡を少なくすることを目的に、高流動コンクリートに微振動を加えた場合の表面気泡の挙動を表面気泡に作用する力の釣合いから説明した。

すでに筆者らは、静止コンクリート中の表面気泡の最大直径や発生量などがモルタル相のレオロジー一定数で説明できることを理論と実験で確認している¹⁾。今回は、振動を加えた際のレオロジー一定数の変化に着目し、振動下における表面気泡の挙動を検討した。併せて、振動が粗骨材とモルタルの分離に及ぼす影響についても考察をした。

2. 振動条件と表面気泡特性

2.1 表面気泡に作用する力

静止したコンクリート中の気泡には上方向に浮力 F_B 、下方向に流体抵抗 F_R と重力 F_G が作用する。作用力のうち、 F_R はモルタル相のレオロジー一定数と密接な関係がある。また、モルタルの密度に対して空気の密度は極めて小さいためこれを無視すると、気泡の運動は、 F_B と F_R の釣合いで決まる。

一方、表面気泡は型枠面に付着しており、気泡には前述の作用力の他にもコンクリート液相の表

*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)

面張力による型枠面への付着力 F_s が作用する。そのため、コンクリート内部の気泡に比べると移動しにくくコンクリート中に残存しやすい。図-1は、表面気泡とそれに作用する浮力 F_B 、流体抵抗 F_R 、付着力 F_s ならびに離脱した気泡（以下、離脱気泡という）を示したもので、各作用力は式(1)、(2)、(3)で表される。

$$F_B = \frac{\pi D^3}{6} \rho_1 g \quad (1)$$

$$F_R = \frac{7}{8} \pi D'^2 \tau_y \quad (2)$$

$$F_s = \frac{\pi d \sin \theta_c \gamma_L}{2} \quad (3)$$

ここに、 D ：離脱気泡の直径 (mm)、 ρ_1 ：モルタル密度 (g/mm^3)、 g ：重力加速度 (mm/s^2)、 D' ：表面気泡凹部の直径 (mm)、 τ_y ：モルタル降伏値 (Pa)、 d ：表面気泡の直径 (mm)、 γ_L ：モルタル液相の表面張力 (N/mm)、 θ_c ：表面気泡の接触角 ($^\circ$)

また、型枠の傾斜角 θ ($\theta=0^\circ$ は水平上面、 $\theta=90^\circ$ は垂直面) でも各作用力の釣合い条件が異なり、 θ で表面気泡の大きさが変化すると考えられる。そこで、 θ と離脱気泡の容積 V の関係を知るためのモデル実験を行った。実験には、直径1mmの孔を設けた透明な容器 ($6 \times 6 \times 15\text{cm}$) と容積表示のついた小型注射器 (容量 $250 \mu\text{l}$) を用いた。表面気泡はアクリル容器の直径1mmの孔に注射器で空気をゆっくり注入して製作し、容器から離脱するときの空気の容積を注射器の表示より読みとった。使用した液体は、蒸留水、シリコンオイル、高性能AE減水剤を溶解した蒸留水の3種類とした。高性能AE減水剤を溶解した蒸留水の場合は、表面気泡を製作する容器の内面に油性はく離剤を塗布し、実際の高流動コンクリートと型枠界面と同じ状態とした。各液体の表面張力と粘度をそれぞれディニューイ式表面張力計とB型回転粘度計で測定した。その結果を表-1に示す。

容器の傾斜角 θ と離脱気泡の容積 V の関係を図-2に示す。図のように蒸留水は $\theta=0 \sim 120^\circ$ 、シリコンオイルおよび高性能AE減水剤を溶解した蒸留水は $\theta=0 \sim 150^\circ$ で離脱時の気泡の容積はほぼ一定で θ の影響は少ない。それに対し、 $\theta=120^\circ$ ま

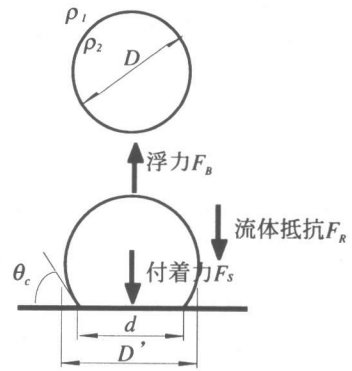


図-1 表面気泡に作用する力と離脱気泡

表-1 液体の表面張力と粘度

| | 蒸留水 | 蒸留水+SP | シリコンオイル |
|------------|-------|--------|---------|
| 表面張力(N/mm) | 74.0 | 40.0 | 26.3 |
| 粘度(Pas) | 0.012 | 0.02 | 0.2 |

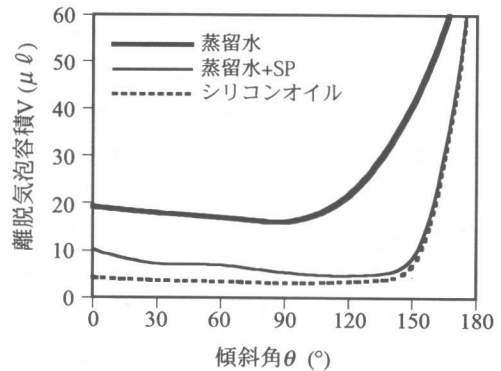


図-2 容器の傾斜角と離脱気泡の容積

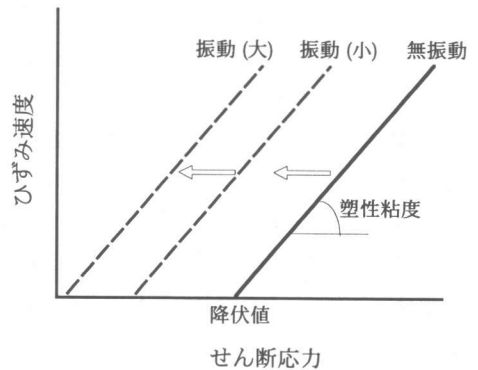


図-3 振動によるレオロジー特性の変化

たは 150° 以上になると θ が大きいほど気泡は型枠から急激に離脱しにくくなるのがわかる。

2.2 加速度

(1)モルタルの降伏値の減少量

振動でコンクリートの流動性が増すが、この現象をレオロジー一定数の変化で説明すると、図-3のように降伏値の低下で表すことができる。

降伏値が低下すると流体抵抗 F_r が減少し表面気泡は抜けやすくなる。従って、加速度 α に対する降伏値の減少量 $\Delta\tau_y$ がわかれば表面気泡の除去の程度を予測できる。両者の関係については三好らの研究があり、 α と $\Delta\tau_y$ の間には式(4)の関係がある²⁾。

$$\Delta\tau_y = a\alpha^{0.3} \quad (4)$$

上式の係数 a は高流動コンクリートの場合 2～8 の範囲にあり、この関係を図示すると図-4となる。図より同一の α でも $\Delta\tau_y$ の範囲は広く現段階では α から $\Delta\tau_y$ を正確に予測することは難しい。しかし、今後の詳細な実験研究により両者の関係を明らかにできれば表面気泡を除去する最小の加速度を推定できると考えられる。

(2)騒音

加速度が大きいほど降伏値の減少量も大きく、表面気泡の放出の点からは有利であるが、その一方で振動にともなう騒音が顕著となる。

労働環境基準によると作業者の聴覚の保護、音声による意思伝達・思考能力の低下を含む作業障害は80dBA以上になると顕著となる。実験室に設置しているテーブルパイプレータの振動数ごとの加速度と騒音の測定値は図-5のようであり、およそ振動数40Hzで騒音は80dBAに達した。また、高流動コンクリートを採用している製品工場の事例でもテーブルパイプレータの振動数は20～30Hz程度である³⁾。加速度は振幅に比例、振動数の2乗に比例することから振動数を制限することで騒音を規制値以下にできると考えられる。

以上より、騒音を考慮して表面気泡の除去を目的にテーブルパイプレータで振動を加える場合の加速度は、振幅1mm、振動数20～30Hzとすると、 $\alpha=1.6 \sim 3.6G$ が一つの目安と考えられる。

(3)降伏値

上述のように振動でモルタル相の降伏値が低下

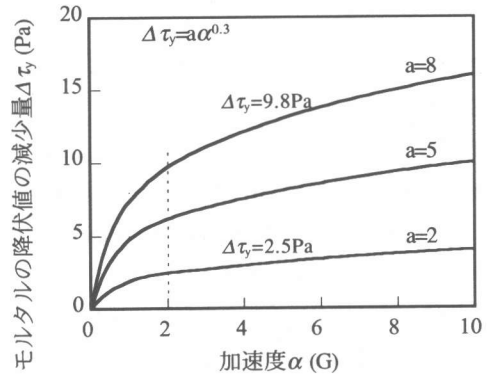


図-4 加速度とモルタルの降伏値の減少量

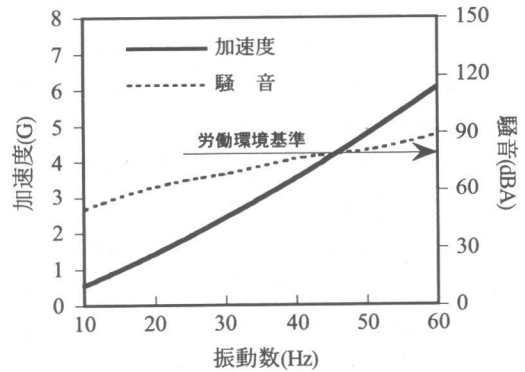


図-5 振動数と加速度・騒音の関係

することで表面気泡は型枠から離脱しやすくなる。物理量である降伏値は工学量であるスランブフローと密接な関係があり、表面気泡を除去するのに必要な降伏値の減少量 $\Delta\tau_y$ はスランブフローごとに異なる。図-6は、 $\Delta\tau_y$ と表面気泡に作用する力の釣合いから計算した表面気泡の最大直径 d (以下、理論表面気泡直径という) との関係を示したものである。 d の計算は、モルタル液相の表面張力を $\gamma_L=73N/mm$ 、型枠面に対する表面気泡の接触角 $\theta_c=90^\circ$ 、モルタルの密度 $\rho_1=2.3 \times 10^{-3}g/mm^3$ の条件で行った。また、図中には自己充填可能となるスランブフロー $S_f=550, 630, 700mm$ のモルタル相の降伏値 $\tau_y=10.0, 5.0, 2.9Pa$ の位置を示したが、それらは次の手順で計算した。

まず、スランブフローごとの降伏値 τ_y を、小門らの研究を参考に式(5)で計算した⁴⁾。

$$\tau_y = \frac{15^3 \rho_g V^2}{4\pi^2 S_f^5} \quad (5)$$

ここに、 τ_y : コンクリートの降伏値(Pa), S_f :

スランプフロー(mm), ρ : コンクリートの単位容積質量(g/mm^3), g : 重力加速度(mm/s^2), V : 試験体容積(mm^3)

計算の結果, スランプフロー $S_f=550, 630, 700\text{mm}$ それぞれに対するコンクリートの降伏値は, $\tau_y=70, 35, 20\text{Pa}$ となる。次に $S_f=630\text{mm}$ のモルタル相の降伏値を $\tau_y=5.0\text{Pa}$ とし, コンクリートの降伏値と同じ比率でモルタルの降伏値を計算し $\tau_y=10.0, 5.0, 2.9\text{Pa}$ を得た。

図より, 無振動の場合の d は, $\tau_y=0.0\text{Pa}$ で最小値の $d=6.2\text{mm}$ であり, スランプフローが小さいほど d は大きい。 $S_f=700, 630, 550\text{mm}$ に対して $d=7.7\text{mm}, 8.9\text{mm}, 12.3\text{mm}$ で, 既報の筆者らの研究において計算値と実験値はほぼ等しいことを確認しており, 本方法で実際の表面気泡の発生状況を説明できるものと考えられる。

一方, 振動を加えた場合の d は, 加速度 $\alpha=2G$, $a=8$ に相当する $\Delta\tau_y=9.8\text{Pa}$ で計算した。図-6より, $\Delta\tau_y=9.8\text{Pa}$ であれば, 3水準のスランプフローで最小の $S_f=550\text{mm}$ でも $\tau_y=0.0\text{Pa}$ の水準まで表面気泡は離脱する。

また同図より, $\tau_y=0.0\text{Pa}$ でも表面気泡は型枠面に付着しており, 振動を加えても全ての表面気泡を除去できるわけではない。

(4)接触角ならびに表面張力

型枠面に対する表面気泡の接触角 θ_c も表面気泡の大きさを決定する重要な要因のひとつである。そして, θ_c が小さいほど表面気泡はコンクリート内部に位置し, 型枠と接触する線分が短く表面張力による付着力が小さいため離脱しやすい。

図-7は, コンクリートで考えられる最大の表面張力の $\gamma_L=73\text{N}/\text{mm}$ での θ_c と d の関係である。図より θ_c が小さいほど d も小さいことがわかる。次に振動を与え, 降伏値が $\tau_y=0.0\text{Pa}$ となった状態では図中の破線のようになり, θ_c が大きいほど d の減少量が大きく振動の効果が顕著である。

図-8に $\gamma_L=40\text{N}/\text{mm}$ の場合を示す。これは高性能AE減水剤の使用が不可欠な高流動コンクリートの一般的な表面張力の水準である。図のように θ_c が大きいほど d が大きく, 振動を加えることで θ_c

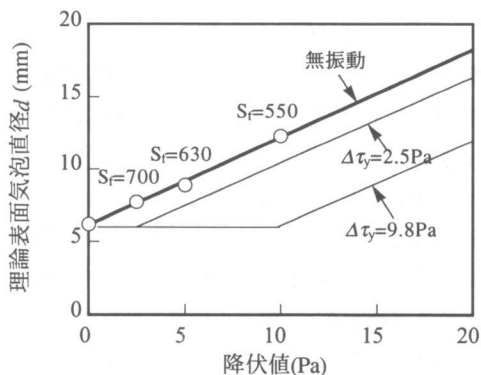


図-6 振動による理論表面気泡直径の減少

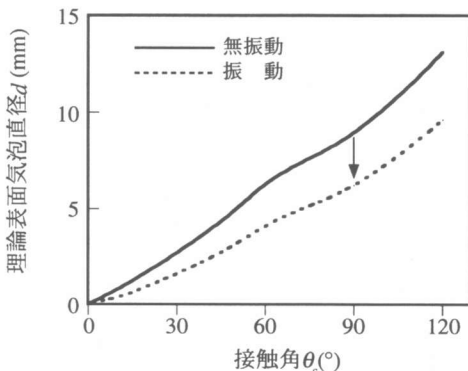


図-7 接触角と理論表面気泡直径 ($\gamma_L=73\text{N}/\text{mm}$)

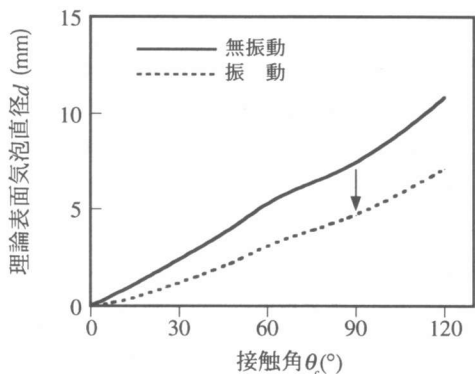


図-8 接触角と理論表面気泡直径 ($\gamma_L=40\text{N}/\text{mm}$)

が大きいものほど d の減少量も大きく, 図-7と同じ傾向となった。

また, 図-7よりも全体的に下方にシフトしているが, 表面張力が低いほど大きな気泡が残存しにくいためである。そして振動による両者の d の減少量は同程度であることから, 表面張力と振動の効果は特別な関係にないようである。

2.3 振動時間

加速度と同様に振動時間は表面気泡の発生量に大きく影響する。練混ぜ直後でセメントの水和の影響が無視できる時は、振動時間がモルタルのレオロジー一定数に直接影響することはないが⁵⁾、この間、降伏値が減少し流体抵抗が小さくなり気泡は移動しやすい。 $\theta=0^\circ$ の水平型枠上面の表面気泡であれば一旦離脱してしまうと表面気泡としては存在しないが、例えば $\theta=90^\circ$ の垂直型枠面では、降伏値の減少で初期の位置から浮力で上昇しても、その後も型枠に沿って上昇を続け、抜け終わるまでに振動を終えると再び型枠面に吸着され表面気泡として残存する。

このような表面気泡の挙動は、モルタル相の粘性とも密接に関係し、粘性が小さな配合では気泡の上昇速度が速く表面気泡は抜けやすい。

振動時間を、0, 60, 120secの3水準に変化させたときの表面気泡の発生状況を実験で比較した。その結果を図-9に示す。図は、評価対象面の面積に対する円換算直径1mm以上の表面気泡の総面積の百分率を表面気泡面積比とし、表面気泡直径1mmごとの累計で表したものである。図のように無振動では $d=13\text{mm}$ であるのに対し、60sec, 120secでは $d=8\text{mm}$ と小さくなった。一方、表面気泡面積比は振動時間を長くする方が小さくなったが、表面気泡の大多数を占める1mm程度の小さな気泡が振動により合一し大きな気泡となりコンクリート表面での面積比が小さくなったことが原因と考えられる。

振動は、コンクリート内部にも影響し、内部気泡が降伏値の減少が大きい型枠方向へ移動して行くことが予想されたので、供試体表面をディスクグラインダで薄く研磨し気泡の発生状態を調べた。その結果、図-10のように振動時間が長いほど気泡面積比が大きくなり、コンクリート内部に気泡が多く発生した。この原因としては振動に伴い内部気泡が型枠方向へ移動することや、型枠に塗布したはく離剤の油切れで濡れ性が良くなり、逆に表面気泡がコンクリート内部に移動したことなどが考えられる。いずれにしても、必要以上に振動

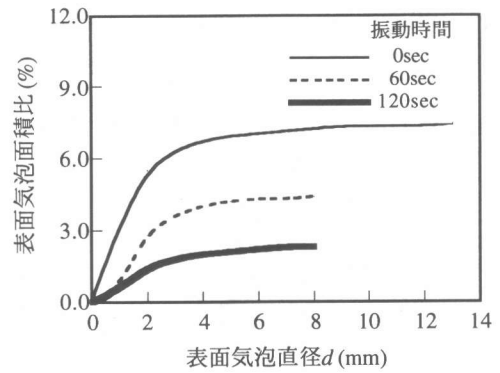


図-9 振動時間と表面気泡面積比

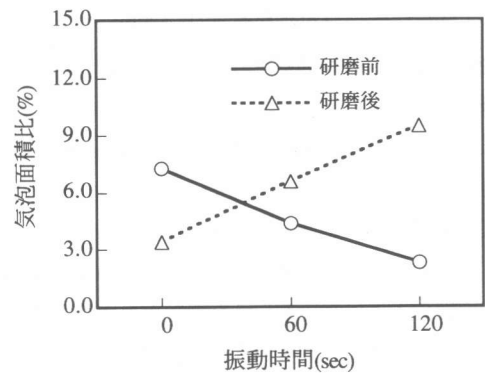


図-10 振動時間と気泡面積比の累計

時間を長くすることはコンクリート表面近傍の内部気泡を増加させ、塩分等の有害物質が浸透しやすくなるので格別な配慮が必要である。

3. 粗骨材とモルタルの分離

ビンガム液体中の球体には式(6), (7), (8)に示す浮力 F_b 、流体抵抗 F_r 、重力 F_G が作用する。従って、粗骨材を球と仮定すると、粗骨材の沈降速度 v は式(9)で表される。

$$F_b = \frac{\pi D^3}{6} \rho_1 g \quad (6)$$

$$F_r = 3\pi D^2 \left(\frac{v\eta_p}{D} + \frac{7\pi\tau_y}{24} \right) \quad (7)$$

$$F_G = \frac{\pi D^3}{6} \rho_2 g \quad (8)$$

$$v = \frac{4D^2 g(\rho_1 - \rho_2) - 21\pi D\tau_y}{72\eta_p} \quad (9)$$

ここに、 D :粗骨材の直径(mm)、 ρ_1 :モルタルの密度(g/mm^3)、 g :重力加速度(mm/s^2)、 τ_y :モルタルの降伏値(Pa)、 η_p :モルタルの塑性粘度

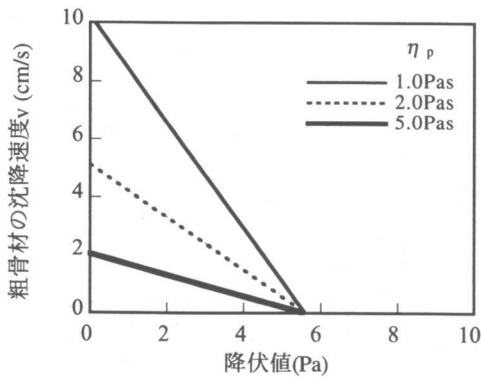


図-11 降伏値と粗骨材沈降速度
(粗骨材直径D=20mm)

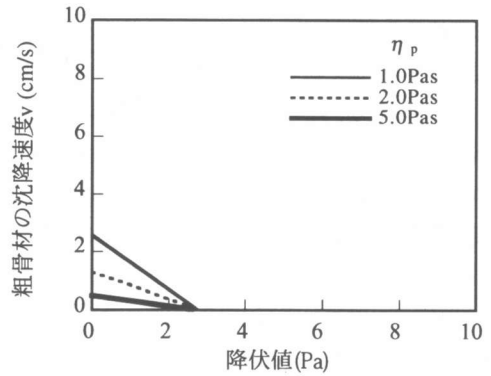


図-12 降伏値と粗骨材沈降速度
(粗骨材直径D=10mm)

(Pas), ρ_2 :粗骨材の密度(g/mm^3), v :粗骨材の沈降速度(mm/s)

上式でモルタルの密度を $\rho_1=2.3 \times 10^{-3} \text{g}/\text{mm}^3$,粗骨材の密度 $\rho_2=2.67 \times 10^{-3} \text{g}/\text{mm}^3$ とし, ρ_1, ρ_2 それぞれに代入して計算すると図-11, 12となる。

まず図-11は粗骨材直径 $D=20\text{mm}$ の場合である。図のように $\tau_y=5.6\text{Pa}$ 以上では重力よりも流体抵抗と浮力の方が大きいため粗骨材は沈降しない。また、塑性粘度 η_p を大きくすることも粗骨材の沈降を防ぐのに効果的である。

一方、図-12の粗骨材直径 $D=10\text{mm}$ の場合は、 $D=20\text{mm}$ よりさらに降伏値の影響は大きく、 $\tau_y=2.6\text{Pa}$ 以上であれば粗骨材は沈降しない。この場合も塑性粘度が小さいほど沈降速度は大きく分離傾向が高いがそれぞれの違いは $D=20\text{mm}$ の場合ほど大きくない。

4. まとめ

本研究により得られた結果を以下に示す。

- (1) 振動の影響はモルタル相の降伏値の低下として表れ、加速度が大きいほど降伏値の減少量が大きく、表面気泡は除去されやすい。
- (2) 型枠面との接触角が大きい表面気泡ほど振動の効果が大きい、残存する表面気泡の最大直径も大きい。表面美観を向上させるには、振動とともに型枠面の濡れ性も良くする必要がある。
- (3) 振動時間はモルタルのレオロジー定数に直接に影響しない。しかし、振動を加えている間は降伏値は低下し、気泡が放出されるまでの距離と

モルタルの粘性がわかれば表面気泡を除去するための最適な振動時間を設定することができる。

(4) 振動に伴う粗骨材とモルタルの分離も、振動時のモルタル相の降伏値の変化量と塑性粘度で予測できる。

参考文献

- 1) 一宮一夫, 出光 隆, 山崎竹博, 渡辺明: 高流動コンクリートの表面気泡性状に及ぼすモルタルの流動性および型枠界面の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, pp.937-942, 2000.6
- 2) 三好征夫, 梶田佳寛, 安田正雪, 荒金直樹: 準高流動および高流動コンクリート中におけるモルタルのレオロジー特性に及ぼす振動の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, pp.499-504, 2000.6
- 3) 長尾 之彦, 竹富 昌之, 遠藤 南志, 渡辺 敬一: 高流動コンクリートを使用したコンクリート製品の表面気泡に関する実験的検討, 土木学会第51回年次学術講演会講演概要集, pp.656-657, 1996.9
- 4) 小門 武, 宮川豊章: スランプフロー試験による高流動コンクリートのレオロジー定数評価法に関する研究, 土木学会論文集, No.634/V-45, pp.113-129, 1999.11
- 5) 岡田正美, 和泉意登志, 井上和政, 稲垣順司: 中流動コンクリートの流動性と基礎物性に及ぼす振動と粗骨材量の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, pp.919-924, 2000.6