

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

一宮一夫¹・出光隆²・山崎竹博³

¹正会員 博(工) 大分工業高等専門学校助教授 土木工学科 (〒870-0152 大分市大字牧 1666)

²フェロー会員 博(工) 九州工業大学教授 工学部建設社会工学科 (〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町 1-1)

³正会員 工博 九州工業大学教授 工学部建設社会工学科 (〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町 1-1)

高流動コンクリートは材料分離抵抗性を高くした締固め不要なコンクリートであるために表面気泡を発生しやすい。本研究では、表面気泡発生に係る影響要因のうち、はく離剤の種類、型枠の材質、型枠の傾斜角度などに注目し、表面気泡の発生メカニズムを検討した。実験の結果、深さと直径の比が大きい表面気泡ほどコンクリート内部に発生することを確認した。次に、水平型枠面上の液滴の最大高さから接触角を測定し、型枠表面の濡れを数値化した。この手法で、型枠表面ごとの濡れを測定し、それらがモルタルの表面気泡に及ぼす影響を調べた。更に、人工的に型枠表面に気泡を発生させて、型枠に付着する気泡の最大容積と型枠角度との関係を調べ、表面気泡の低減方法について検討した。

Key Words: self-compacting concrete, surface void, wettability, surface tension, angle of form

1. はじめに

優れた自己充てん性と材料分離抵抗性を有する高流動コンクリートは、一般に薄肉断面に鉄筋が密に配置されることが多いプレキャストコンクリート(以下、工場製品という)への使用に適している。また、高流動コンクリートの使用により振動締固め工程が省略でき、打込みに伴う騒音や振動の問題を根本から解決することができる^{1,2)}。さらに、製品の寸法精度の向上、型枠の維持管理費の削減、工場機械のシステム化と省人化に伴う製造コスト低減なども可能となる³⁾。

一般に、高流動コンクリートの材料分離抵抗性は、増粘剤や鉱物質微粉末を用いてペーストの見掛けの粘性を高くすることによって発現される。その一方で、見掛けの粘性の増大と締固めの省略により、打込み時に巻き込んだ空気が脱型後に気泡として残存し、表面美観を低下させることがある。このように、表面気泡は製品の商品価値の低下を招くため、高流動コンクリートの使用にあたってそのメカニズムの解明と対策が求められている。

一般に、普通コンクリートの表面気泡に関する従来の考え方として、締固め不足が主な原因であることが指摘されており^{4,5)}、この場合は粗骨材間などのコンクリー

ト内部にも同程度の間隙が存在していると考えられる。つまり表面気泡の発生状況は締固め度の目安と考えられる。それに対して高流動コンクリートの表面気泡は、例えば液体の入ったコップの内側に発生する気泡のように、型枠とコンクリート界面に限った現象と考えられる。また、その外観はそれぞれが独立したほぼ円に近い形状をしているなどの特徴を持つ。すなわち、良好な流動性をもつ高流動コンクリートでは、表面気泡の発生原因は型枠とコンクリート間の界面現象、特に型枠面の濡れと吸着力の関係にあると考えられる。

表面気泡の発生要因を大別すると(1)コンクリート、(2)混和剤、(3)はく離剤、(4)製造などがあり、それぞれ(1)にはコンクリートの材料、配合、スランブフローや空気量、(2)には混和剤の表面張力、はく離剤との界面張力、消泡剤の使用量、(3)にははく離剤ならびに界面活性剤の種類、(4)には型枠の形状や材質、打込み高さや速度、微振動による締固めなどがある⁶⁾。なお、上記でコンクリートに関する要因を(1)コンクリートと(2)混和剤とで表して物理的要因と化学的要因を区別したが、高流動コンクリートでは混和剤の使用量が多いこと、異なる種類の混和剤を同時に使用する場合もあること、今後も混和剤の高性能化や多様化が予想されるなど、混和

表-1 使用材料

種類	特性
セメント	普通ポルトランドセメント, 密度 3.15 g/cm^3
高炉スラグ微粉末	ブレン値 $6000 \text{ cm}^2/\text{g}$, 密度 2.91 g/cm^3
細骨材	海砂, 密度 2.58 g/cm^3 , FM2.80, 実積率67.5%
粗骨材	碎石, 最大寸法20mm, 密度 2.73 g/cm^3 , FM6.77, 実積率59.8%
混和剤	ナフタリン系の高性能A E減水剤

表-2 コンクリートの配合

最大寸法 (mm)	スランパー (cm)	空気量 (%)	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m^3)					
					W	C	BS	S	G	SP
20	63±3	1.5±0.5	31.6	51.6	178	236	327	826	819	5.9

剤の影響が他の要因と同様に大きいことを考慮したためである。

以上のように表面気泡の発生要因は多岐にわたるが、本研究では、はく離剤の種類、型枠の材質、型枠の傾斜角度に注目し、各影響要因ごとに表面気泡の発生メカニズムを明らかにした。

2. 実験概要

(1) はく離剤の種類と表面気泡の性状

a) 使用材料と配合

高流動コンクリートは工場製品として使用実績の多い粉体系とし、結合材容積の60%を高炉スラグ微粉末で置換した。そして表-1に示す使用材料で、目標スランプフローが63cm、目標空気量が1.5%となるような表-2の配合を用いた。

b) 供試体の製作

コンクリートの練混ぜには容量55ℓの水平2軸強制練りミキサーを用い、1回の練混ぜ量を35ℓとした。練混ぜ方法は、骨材と結合材を投入して30秒間の空練りをした後、ミキサーを停止して水と高性能A E減水剤を投入して再び120秒間攪拌した。

供試体寸法は幅30×厚さ8×高さ50cmで、鋼製型枠を用い、縦打ちで製作した。

はく離剤は、ベースオイルの主成分がパラフィン系炭化水素の市販の油性タイプ2種(以下、ベースオイルのみのものを油性タイプA、ベースオイルに界面活性剤を添加したものを油性タイプBという)と、水性タイプの合計3種類を使用した。型枠への塗布は、コンクリート打込みの1時間前に霧吹きと脱脂綿で均一になるように丁寧に行った。

コンクリートの打込みは、型枠の天端位置(底板か

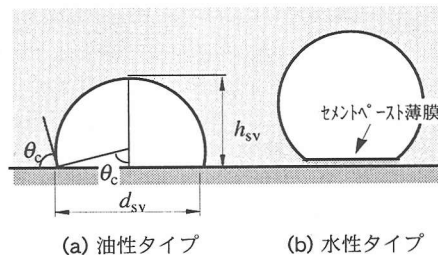


図-1 はく離剤のタイプと表面気泡の深さ方向の形状

ら高さ50cm)から行った。打込み時間は、高流動コンクリートを使用している製品工場での打込み面上昇速度の実績 0.5 cm/s を参考にして型枠高さ50cmに対して90秒間(打込み面上昇速度 $v_c=0.56 \text{ cm/s}$)とし、連続して自己充てんさせた。

c) 表面気泡の数値化

表面気泡の評価は、 $30 \times 50 \text{ cm}$ の2面を対象に行った。まず、コンクリート表面をアセトンで洗浄して黒色油性インクを全面に塗布した。インク乾燥後、コントラストを明瞭にするために、表面気泡部に高炉スラグ微粉末を充てんして白色にし、デジタルカメラで評価対象面を撮影した。

表面気泡の数値化には画像解析法を用い、円換算直径 $d_{sv}=1.0 \text{ mm}$ 以上の表面気泡を対象に面積の累計とコンクリート面積の比(以下、表面気泡面積比 A_{sv} という)、表面気泡直径の最大値(以下、最大表面気泡直径 d_{svm} という)、表面気泡数 N_{sv} を測定した。

また、 $d_{sv}=2.0 \text{ mm}$ 程度以上の表面気泡を対象に、レーザー変位計で測定した最大深さ(h_{sv})と画像解析で測定した d_{sv} の比 h_{sv}/d_{sv} から深さ方向の形状を推定した。

d) 隠れ気泡の数値化

隠れ気泡とは、表面気泡がセメントペースト(以下、

ペーストという)の薄膜で覆われ、目視できないがワイヤーブラシなどで表面清掃後に現れる気泡である。一般に油性と水性のはく離剤のタイプで表面気泡の深さ方向の形状は異なり、油性タイプを用いると図-1(a)のように表面気泡が開くのにに対し、水性タイプでは図-1(b)のようにコンクリート内部に発生して隠れ気泡となる。隠れ気泡は表面気泡測定後に、コンクリート表面に塗った黒色インクが完全に除去できるまでグラインダで研磨し、表面気泡同様の方法で画像解析により数値化した。研磨深さをレーザー変位計で測定したところ平均で0.24mmであった。

(2) 型枠表面の濡れの数値化

型枠表面の濡れは、はく離剤のタイプや型枠の材質で異なると考えられる。図-2のように、液滴の表面張力を γ_L 、型枠の表面張力を γ_S 、両者の界面張力を γ_{LS} とすると、型枠の濡れの程度は、液滴の接触角 θ_c で数値化できる。

液滴の θ_c を正確に測定するには、固体面上の液滴を球と仮定して直接測定する方法がある。しかし、液滴を球と仮定できるのは液滴容積が $1.5\mu\ell$ 以下で極めて細かいため、測定には顕微鏡を備えた特殊な装置が必要となる⁹⁾。

そこで、型枠面上に製作した液滴の最大高さ(以下、最大液滴高さ h_{max} という)と液滴の表面張力 γ_L から、後述の式(5)で液滴の接触角 θ_c を計算した。

コンクリートの場合、 γ_L はペーストの表面張力(以下、ペーストの表面張力も γ_L で表す)となる。そこで、ペーストの表面張力に影響すると考えられる液体の表面張力をディニューイ式表面張力計で測定した。対象とした液体は、蒸留水、水道水、ポリカルボン酸系高性能AE減水剤、高性能AE減水剤を溶解した水道水(以下、SP溶液という)、ペーストの上澄水の5種類とした。なお、高性能AE減水剤と水道水の混合比率はSP/W=0.05、ペーストの水結合材容積比は $V_w/V_B=0.90$ とした。表面張力の測定結果を表-3に示す。表より水道水に高性能AE減水剤を溶解すると表面張力は高性能AE減水剤の水準になること、練り上がりからの経過時間で上澄水の表面張力の変化はないことなどから、セメントの水和に伴う溶出物質はペーストの表面張力に影響しないことを確認した。そしてこれらの結果から、液滴をつくる液体には高性能AE減水剤を溶解した水道水(SP溶液)を使用した。

実験要因として型枠の材質、はく離剤の種類を選んだ。型枠は製品工場で一般に使用される鋼板と、濡れにくい材質で液滴の θ_c が大きいテフロン板を使用した。はく離剤は製品工場での使用実績がある前出の油性タイプBと水性タイプとした。表-4に実験条件を示す。

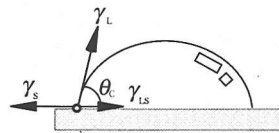


図-2 液滴の接触角と界面張力

表-3 液体の表面張力

液体の種類	表面張力 γ_L (N/mm)
蒸留水	73
水道水	64
高性能AE減水剤	54
SP溶液	54
上澄水(練り直後)	54
上澄水(30分後)	54
上澄水(60分後)	54

表-4 実験条件(液滴の接触角)

実験番号	型枠	はく離剤	液滴
①	テフロン	なし	蒸留水
②	鋼	油性	SP溶液
③	鋼	水性	SP溶液
④	鋼	なし	SP溶液
⑤	テフロン	なし	SP溶液

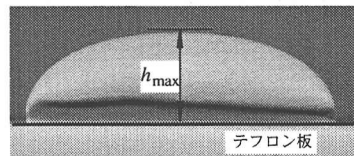


図-3 テフロン板上の液滴画像
(蒸留水、 $450\mu\ell$)

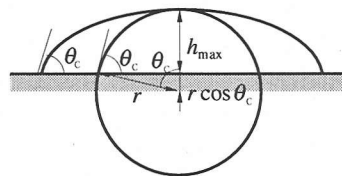


図-4 歪んだ液滴の最大高さ and 接触角

液滴は、水平に設置した型枠面上に容積表示のついた小型注射器で $50\mu\ell$ ごとに液量を増加させた。図-3はテフロン板上の液滴の例であり、容積ごとにマクロレンズを装着したデジタルカメラで液滴の水平画像を撮影し、パソコン上で画像解析して最頂部の高さ

h_{\max} を測定した。なお、図中の液滴は透明な楕円体であるがテフロン板の色が反射して撮影されている。

型枠面上の液滴の h_{\max} と γ_L および θ_c の関係は、重力で歪んだ液滴に作用する力のつり合いとその幾何学的な形状から以下の方法で定式化した⁷⁾。

図-4に液滴が h_{\max} に達してからさらに液量を増加させたときの歪んだ液滴の h_{\max} と θ_c の関係を示す。一般に液滴のような閉じこめられた液体は、表面張力 γ_L で圧縮されるために内部圧の方が高くなる。この圧力差から表面圧 Δp が求められ、その圧力 Δp は曲率半径を r とすると式(1)で表される。

$$\Delta p = \frac{2\gamma_L}{r} \quad (1)$$

また、液滴の頂点部分を含む液柱の自重から式(2)の関係が成立し、両式より、液滴の高さ h_{\max} は式(3)のようになる。すなわち、液滴の最大高さ h_{\max} は重力と表面圧との釣合いで決まり、液量に無関係な一定値となる。

$$\Delta p = \rho g h_{\max} \quad (2)$$

$$h_{\max} = \frac{2\gamma_L}{\rho g r} \quad (3)$$

また、図-4からわかるように r と h_{\max} の間には式(4)の関係が成立する。さらに式(3)、(4)から r を消去すると式(5)となり、 γ_L と歪んだ液滴の h_{\max} から θ_c を計算することができる。

$$r = r \cos \theta_c + h_{\max} \quad (4)$$

$$\cos \theta_c = 1 - \frac{\rho g h_{\max}^2}{2\gamma_L} \quad (5)$$

(3) 型枠の材質と表面気泡の性状

表面気泡の性状に及ぼす型枠の材質の影響を、モルタル供試体で鋼とテフロンに対して調べた。なお、コンクリートとの関連を確認するために油性タイプBと水性タイプのタイプの異なるはく離剤を鋼製型枠に塗布した場合についても供試体を製作した。

配合は、スランプフローが63cmとなる高流動コンクリートの配合を参考に、結合材容積の60%を高炉スラグ微粉末で置換し、水結合材容積比を $V_w/V_B=0.90$ 、細骨材モルタル容積比を $V_s/V_m=0.45$ とし、静置フロー値が 220 ± 10 になるようにポリカルボン酸系高性能AE減水剤の使用量を調整した。供試体寸法は幅 $15 \times$ 厚さ $7 \times$ 高さ 30cm の直方体とした。

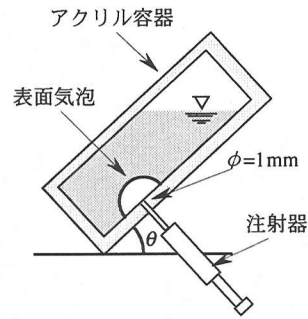


図-5 モデル実験

表面気泡の数値化はコンクリート供試体と同様の方法で行った。

(4) 型枠傾斜角度と表面気泡の性状

型枠傾斜角度 θ で表面気泡の発生量が異なるため、 θ と表面気泡として型枠に付着できる最大容積 V の関係をモデル実験で調べた。実験には、直径 1mm の孔を設けた透明なアクリル容器 ($6 \times 6 \times 15\text{cm}$) と容積表示のついた小型注射器 (容量 $250\mu\text{l}$) を用いた。表面気泡は図-5のように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、容器の傾斜角度 θ ごとに容器の壁面から離脱する最小の気泡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、ポリカルボン酸系高性能AE減水剤を溶解した蒸留水の3種類で、高性能AE減水剤と蒸留水の混合比率は $SP/W=0.05$ とした。

なお、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タイプBのはく離剤を塗布し、実際の高流動コンクリートと型枠の界面と同じ条件にした。

3. 実験結果および考察

(1) はく離剤の種類と表面気泡の性状

図-6は、コンクリート面積に対する表面気泡面積の比率を直径 $d_{sv}=1.0\text{mm}$ ごとに累計で表したもので、鋼製型枠に種類の異なるはく離剤を塗布した結果である。図から水性タイプ、油性タイプB、Aの順で表面気泡の発生量や大きさともに少なく、特に水性タイプでは表面気泡はほとんど見受けられない。なお、それぞれの表面気泡面積比は $A_{sv}=0.1\%$ 、 2.5% 、 3.2% 、最大表面気泡直径は $d_{svm}=5.5\text{mm}$ 、 10.5mm 、 13.0mm であった。

図-7は同供試体の表面気泡の深さ h_{sv} と直径 d_{sv} の関

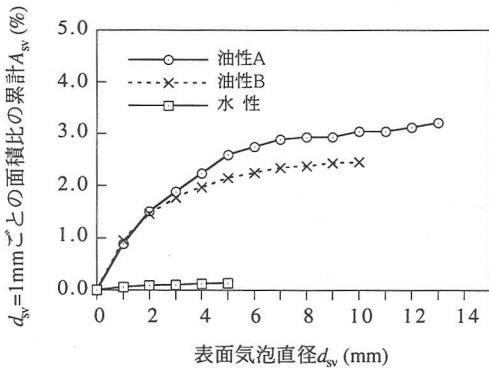


図-6 表面気泡直径1mmごとの面積比の累計

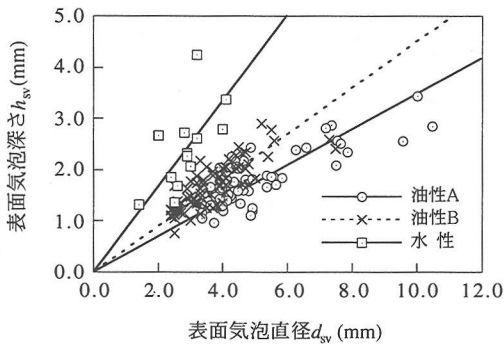


図-7 表面気泡の直径と深さ

係である。 h_{sv}/d_{sv} ははく離剤の種類で異なり、水性タイプ、油性タイプB、Aの順でそれぞれ $h_{sv}/d_{sv}=0.86, 0.44, 0.36$ であった。表面気泡の凹部を球と仮定して図1(a)の関係から計算した接触角は $\theta_c=60^\circ, 97^\circ, 109^\circ$ であり、水性タイプ、油性タイプB、Aの順で型枠面の濡れが良いことがわかる。

隠れ気泡の発生状況を確認するために供試体表面を研磨した。隠れ気泡の発生量は、図-8および図-9に示す研磨後の表面気泡の面積比および個数の増加量から求められる。

図-8、図-9に示す結果では、油性タイプでは研磨後に気泡面積比 A_{sv} 、個数 N_{sv} ともに減少している。その原因は、表面研磨により表面気泡の多くを占める $d_{sv}=1.0\text{mm}$ 程度の細かい表面気泡が除かれたためと考えられる。それに対し、水性タイプでは A_{sv} 、 N_{sv} ともに増加し、隠れ気泡の存在を確認した。また、研磨後の N_{sv} は $d_{sv}=1.0\text{mm}$ 以下の微小な表面気泡を除けばどののはく離剤でも同程度であり、巻き込まれた気泡の数はほぼ一定であるといえる。なお、平均研磨深さは 0.24mm で僅かであるが、実際の表面気泡は、モルタルの降伏値の影響で球ではなく型枠に沿って扁平しているため、研磨で

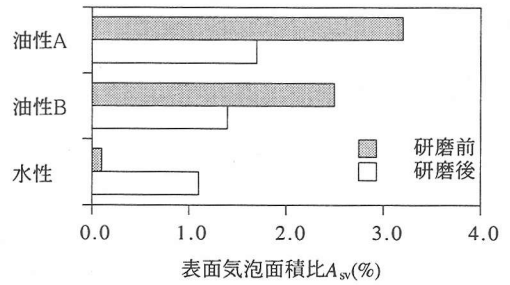


図-8 はく離剤の種類と表面研磨前後の気泡面積比 [コンクリート供試体]

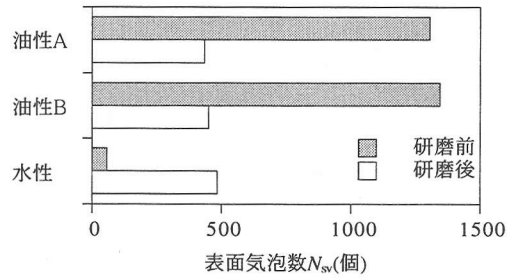


図-9 はく離剤の種類と表面研磨前後の気泡数 [コンクリート供試体]

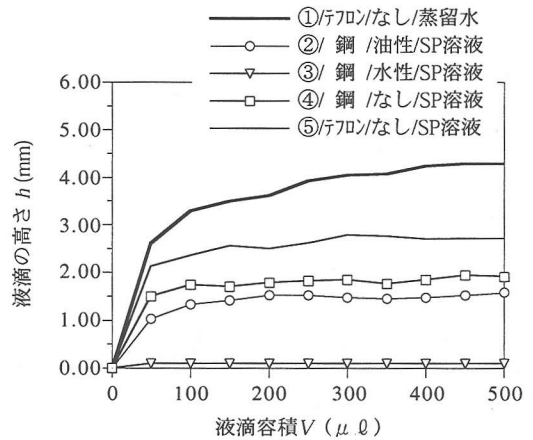


図-10 平板上の液滴の容積と高さ

$d_{sv}=1.0\text{mm}$ 程度の表面気泡が評価対象寸法以下になったと考えられる。

以上のように、見掛けの表面気泡の発生を抑えるには水性タイプのはく離剤を使用すると効果的である。しかし、水性タイプは、脱型後の型枠表面に通称ノロと呼ばれる微粉が付着し、型枠掃除に手間を要する。そのため、コンクリート製品工場では油性タイプのはく離剤が多く用いられる。

表-5 実験条件と液滴の接触角

実験番号	液滴の接触角 $\theta_c(^{\circ})$
①	100
②	39
③	0
④	48
⑤	72

また、隠れ気泡を覆うセメントペーストの薄膜は、極めて脆弱で、外部から進入する有害物質に対する遮蔽能力をほとんど期待できない。従って、耐久性が問題となる場合は、隠れ気泡も表面気泡同様に評価の対象にすべきと考えられる。

(2) 型枠表面の濡れの数値化

平板上の液滴の容積 V と高さ h の測定結果を図-10に示す。図中の太い実線は、本方法の測定精度を確認するための、テフロン板上に蒸留水で作った液滴での結果である。実験では液量 V とともに液滴高さ h は増加し、 $V=400\mu l$ 以上で一定となった。画像解析の結果、最大液滴高さは $h_{max}=4.18mm$ であり、式(5)で計算した液滴の接触角は $\theta_c=100^{\circ}$ となる。この値は、精密な方法で測定したテフロン板上の蒸留水の $\theta_c=107^{\circ}$ よりも幾分小さいが、型枠表面の濡れの評価方法としては十分な精度を有している⁹⁾。

実験条件ごとの液滴の θ_c は表-5の通りであり、はく離剤の種類や型枠の材質により濡れが異なることがわかる。そして、図-7に示したようにはく離剤のタイプで h_{sv}/d_{sv} が異なるのは濡れの違いによるものと言える。

以上のように、歪んだ液滴の最大高さ h_{max} から算出した接触角 θ_c で型枠面上の濡れ性能の程度を数値化できた。本方法は、固体と液体の界面の濡れ関係を比較的精度良く評価でき、測定方法も簡易であることから、様々な混和剤を使用する高流動コンクリートと型枠界面の関係を数値化する方法として有効と考えられる。

(3) 型枠の材質と表面気泡の性状

モルタル供試体の表面研磨前後の表面気泡面積比 A_{sv} を図-11に、同供試体の表面気泡数 N_{sv} を図-12に示す。実験②、③は油性タイプと水性タイプのはく離剤を鋼製型枠に塗布した結果であるが、油性タイプ(実験②)では表面研磨しても新たな気泡は開口しないのに対し、水性タイプ(実験③)では研磨に伴い気泡が開口する隠れ気泡が多く発生した。

このようなモルタル試験の結果は、同種のはく離剤を使用したコンクリートでの結果(図-8、図-9の油性タイプBと水性タイプ)と同様な傾向である。従っ

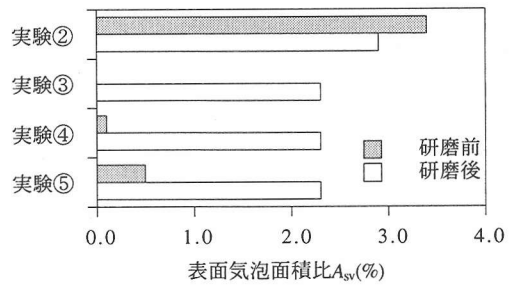


図-11 型枠表面条件と表面研磨前後の気泡面積比 [モルタル供試体]

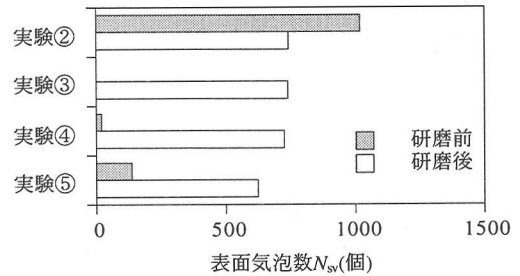


図-12 型枠表面条件と表面研磨前後の気泡数 [モルタル供試体]

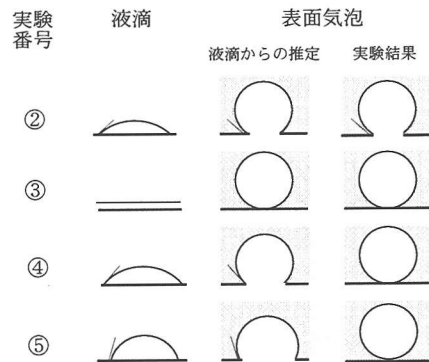


図-13 液滴と表面気泡の形状の比較

て、以下のはく離剤を使用しない場合のモルタル供試体での結果もコンクリートに適用できると考えられる。

型枠に鋼板とテフロン板を用いて、はく離剤を塗布しない実験④、⑤では表面気泡はほとんど発生していない。一方、表面研磨後は気泡が開口し、水性タイプの場合と同様に隠れ気泡となった。筆者らが過去に行った化粧合板の実験でも同様の結果であった⁹⁾。つまり、実験④、⑤の液滴の接触角はそれぞれ $\theta_c=48^{\circ}$ 、 72° であるにも関わらず、ともに隠れ気泡となった。

このことから、鋼やテフロンなどのような平滑で吸水性がない型枠は、材質の違いが表面気泡性状に及ぼす影響はほとんどないと考えられる。

図-13は、液滴の形状と、液滴から推定した表面気泡の形状そしてモルタル供試体の表面気泡の形状を比較したものである。図のように鋼製型枠にはく離剤を塗布した実験②、③で、液滴の接触角から推定した表面気泡の形状と実験結果は類似している。

一方、はく離剤を使用しない実験④、⑤の実験結果は、液滴から推定した表面気泡の形状と異なり隠れ気泡となった。これは、型枠表面にはく離剤の層がない場合は、打込み時のコンクリート移動で型枠とコンクリートの間にペーストが吸着されるために開口部がペーストの薄膜で覆われた隠れ気泡となるためと考えられる。

以上のように、表面気泡は、油性タイプのはく離剤を用いた場合には油膜上に作られる。一方、水性タイプのはく離剤を用いた場合は、濡れが良いためはく離剤塗膜上にペースト膜が作られ、その上に気泡ができる。また、塗布しない場合には直接型枠表面上に吸着されたペースト膜上に気泡ができるため、型枠と表面気泡が接触することは無く、表面気泡の性状は型枠の材質には影響されないものと考えられる。

(4) 型枠傾斜角度と表面気泡の性状

図-14は型枠傾斜角度 $\theta=0^\circ$ （水平型枠上面）、 $\theta=90^\circ$ （垂直型枠面）、 $\theta=135^\circ$ （傾斜型枠下面）の表面気泡とそれに作用する力を説明したものである。図では、浮力を F_B 、流体抵抗を F_R 、表面張力による型枠への付着力を F_S 、型枠による抵抗を F_F とした。まず $\theta=0^\circ$ では、表面気泡が型枠から離脱する条件は $F_B > F_R + F_S$ で、型枠から離脱後はコンクリート中を上昇する。これに対し、 $\theta=90^\circ$ の表面気泡は、型枠に沿って上昇し、打込み面に達して大気中に放出される。そのため表面気泡の移動現象を説明するには、型枠と表面気泡の摩擦を考慮する必要があり、 $\theta=0^\circ$ のときよりも気泡の離脱メカニズムは複雑である。さらに型枠傾斜角度 $90^\circ < \theta < 180^\circ$ では表面気泡の上昇を型枠が阻害するため型枠傾斜角度が大きくなるほど移動を開始する気泡の容積も大きくなる。

図-15は、型枠傾斜角度 θ と離脱気泡容積 V の関係を調べたモデル実験の結果である。図のように V は、蒸留水が $\theta=0^\circ\sim 100^\circ$ 、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が $\theta=0^\circ\sim 150^\circ$ でほぼ一定で、この範囲であれば θ の影響は殆どないことがわかる。それ以上の角度では、 $\theta=180^\circ$ に近づくほど V は急激に大きくなる。これらの結果より、コンクリートの表面気泡は、水平型枠上面から垂直型枠面との間で発生する最大表面気泡直径 d_{svm} は同水準であるが、

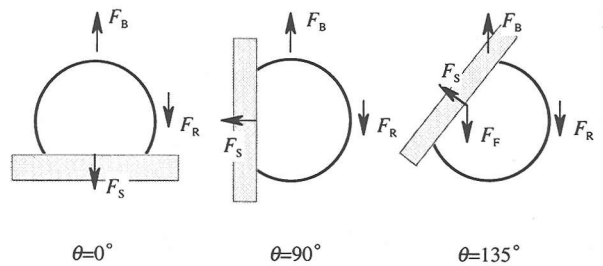


図-14 型枠傾斜角度と表面気泡に作用する力

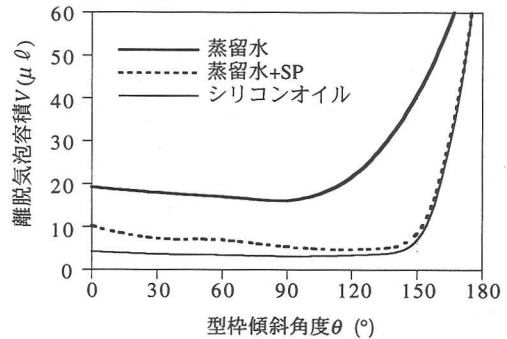


図-15 型枠傾斜角度と離脱気泡容積

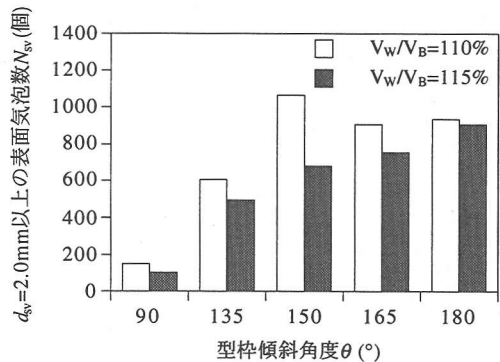


図-16 型枠傾斜角度と表面気泡数¹⁰⁾

その後は $\theta=180^\circ$ に近づくほど大きな表面気泡が残存すると予想される。しかし、実際にはコンクリート中に巻き込まれるエントラップドエアーの量や大きさには上限があり、極端に大きな表面気泡が発生することはないと考えられる。図-16は、既往の実験結果であり、型枠の傾斜角度を調節してコンクリート供試体を製作し、 $d_{sv}=2.0\text{mm}$ 以上の表面気泡数を比較したものである¹⁰⁾。配合は、スランプフロー $60\sim 65\text{cm}$ 、水結合材容積比 $V_w/V_b=110\%$ と 115% の2水準である。実験の結果、 $V_w/V_b=110\%$ 、 $\theta=150^\circ$ を除き、全体としては θ が大きいかほど $d_{sv}=2.0\text{mm}$ 以上の表面気泡数 N_{sv} が増加している。また図中では θ が大きいかほど N_{sv} の増加率

が低下する。このことから、型枠傾斜角度が $\theta=180^\circ$ に近いほど表面気泡は多数発生するものの、前述の大きさの場合同様に表面気泡数にも上限があることがわかる。

4. まとめ

本研究から得られた知見を以下に示す。

- (1) はく離剤の種類で表面気泡の発生状況は異なり、油性タイプは界面活性剤を添加したものが表面気泡は少ない。また、油性タイプと水性タイプを比較すると水性タイプの方が表面気泡は少なく、表面気泡の開口部がセメントペーストの薄膜で覆われた隠れ気泡となる。さらには、開口部が小さい表面気泡ほど深さ h_{sv} と直径 d_{sv} の比 h_{sv}/d_{sv} が大きくコンクリート内部に発生することを確認した。
- (2) 水平に設置した型枠面上に作った液滴の接触角を液滴の最大高さから算出して型枠面の濡れ特性を数値化した。はく離剤を使用した場合は、この方法で測定した液滴の接触角と表面気泡の接触角がほぼ同じとなり、表面気泡の発生量の違いははく離剤の濡れの影響によるものであることがわかった。
- (3) 型枠に鋼とテフロンを用い、はく離剤を塗布せずに供試体を製作したところ、型枠面の濡れは材質で異なるにも関わらず、どちらとも隠れ気泡が多く発生した。このことより、平滑で吸水性がない型枠では材質が表面気泡に与える影響はほとんどないと言える。
- (4) 型枠から離脱する表面気泡の容積は、型枠傾斜角度 $\theta=0^\circ$ （水平型枠上面）から $\theta=90^\circ$ （垂直型枠面）を少し越える角度まではほぼ同じであるが、それ以上の角度では $\theta=180^\circ$ （水平型枠下面）に近づくほど急激に型枠

から離脱しにくくなり表面気泡の最大直径は大きくなる。また既往の研究によると、表面気泡数についても同様な傾向がある¹⁰⁾。

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) 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, 2000.5.
- 3) 土田信治：プレキャストコンクリートの製造, コンクリート工学, Vol.38, No.5, pp.33-37, 2000.5.
- 4) 丸山巖, 一宮一夫：コンクリート表面の気泡に関する基礎的実験, 第20回セメント・コンクリート研究討論会論文報告集, pp.83-88, 1993.5.
- 5) Thompson, M.S.: Blowholes in Concrete Surface, Concrete, Vol.3, No.2, pp.64-660, 1969.
- 6) 倭富士桜, 辻彰 敏, 国川憲三：コンクリートの表面気泡の低減について, 第8回コンクリート工学年次講演論文集, pp.253-256, 1986.
- 7) 丸井智敬, 村田運詮, 井上雅雄, 桜田 司, 表面と界面の不思議, 工業調査会, 1995.
- 8) 中田敏夫, 細田 力, 藤原良樹, 大山芳文：ぬれにくい平板上の単一液滴形状に関する一考察, 混相流, 10巻, 1号, pp.60-65, 1996.
- 9) 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型枠とコンクリートの界面の影響, 土木学会西部支部研究発表会講演概要集, pp.804-805, 2000.3.
- 10) 伊藤伸一郎, 弘中義昭, 西本憲生, 岡村直利：締固め不要コンクリートを用いたセグメントの製造実験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.15, No.1, pp.211-214, 1993.6.

(2001. 6. 28 受付)

INFLUENCE OF THE WETTABILITY AND ANGLE OF FORM ON THE CHARACTERISTICS OF SURFACE VOIDS IN SELF-COMPACTING CONCRETE

Kazuo ICHIMIYA, Takashi IDEMITSU and Takehiro YAMASAKI

The surface void of self-compacting concrete has a tendency to be generated easily by its high viscosity and non-compaction. In this research, the relation between the generation factor of the surface void and the mechanism of the generations was considered experimentally. The examined items are shown below.

(1) Form release agent's types were changed, and the ratio of depth and diameter of surface void(h/d) was measured. As a result, when h/d was large, the surface void was generated internally concrete. (2) The contact angle was measured from the maximum height of drop of liquid on horizontal form. And, the degree of wettability of form was shown numerically. And, the relation between wettability and surface void was made clear. (3) The void was artificially generated on the surface of form. And, the relation between the maximum volume of void which adhered to form and the angle of the form was measured.