

# せき板表面に貼付したシートの撥水性及び粗度がコンクリートの表面気泡に及ぼす影響

## Study on Effects of Repellency and Roughness of a Sheet Attached to the Formwork Surface on the Surface Voids of Concrete

吉田 祐麻      渡邊 賢三      芦澤 良一  
中谷 俊晴      濱田 那津子      坂井 吾郎

### 要 約

美シール®工法は、熱可塑性樹脂シートを予め型枠内面に貼付してコンクリートを打ち込み、脱型した後も熱可塑性樹脂シートをコンクリート表面に残す工法である。本工法によって長期間の湿潤養生と、表面気泡の低減など表面の改質ができることを確認している。表面気泡の減少は熱可塑性樹脂シートの高い撥水性及び小さい粗度によるものと考えられるが、そのメカニズムは分かっていない。本論文では、表面気泡が低減するメカニズムを解明するための一助として、熱可塑性樹脂シートの撥水性と粗度が表面気泡の面積及び直径に与える影響を室内実験で検討した。その結果、撥水性が高く粗度が小さいほど表面気泡が低減され、撥水性が高くなるほど表面気泡の直径が全体的に小さくなる傾向が確認された。さらに、実構造物において熱可塑性樹脂シートをせき板表面に貼付したケースと一般的な化粧合板を用いたケースと比較した結果、熱可塑性樹脂シートを貼付した方が直径の大きい表面気泡がより顕著に低減されることが分かった。

### 目 次

- I. はじめに
- II. 室内実験による検討
- III. 実構造物を対象とした検討
- IV. まとめ

#### I. はじめに

コンクリートの表面気泡の多少は表層品質を表す指標の1つであり<sup>1)</sup>、コンクリート構造物の耐久性に影響する要因と考えられている。既往の論文<sup>2)</sup>では実験的な検討により、表面気泡が物質浸透性を高めることが示されている。これは、表面気泡が局所的なかぶりの減少になりコンクリート構造物上の弱部となることや、締固めの良し悪しに影響される可能性があるためである。

近年、コンクリートの表層品質に対する関心が高まっており、表面気泡の低減に関する様々な技術開発が行われている。例えば、依田ら<sup>3)</sup>はせき板表面を高撥水処理する、秋山ら<sup>4)</sup>は型枠にフィルムを貼付し粗度を小さくするというそれぞれの手法で表面気泡の低減を図っている。筆者らは予め型枠内面に高撥水性の熱可塑性樹脂シート（以下、シートと称する）を貼付してコンクリートを打ち込み、脱型した後もシ-

ートをコンクリートに残置させて、長期間の湿潤養生を可能とする美シール工法を考案した。本来、美シール工法は養生工法であるが、同時に表面気泡の低減効果があることを実験的に確認している<sup>5)</sup>。これは、シートが高撥水性を有し粗度が小さいためであると推測される。

以上のように、表面気泡の発生には、せき板表面の撥水性及び粗度が影響することが示唆される。しかし、せき板表面の撥水性と粗度が表面気泡の発生にどのような影響を与えているか、そのメカニズムは明らかになっていない。そこで、撥水性と粗度を調整したシートをせき板表面に貼付してコンクリート試験体を作製し、表面気泡の面積及び直径を測定する室内実験を実施した。また、実構造物において高い撥水性を有し、粗度が小さいシートを用い、表面気泡の面積と直径を測定した。

#### II. 室内実験による検討

##### 1. 実験概要

##### (1) シートの撥水性と粗度

本実験では、シートの撥水性は接触角を、粗度は算術平均粗さを実験要因とした。接触角と算術平均粗さの実測値をTable 1に示す。接触角の測定はJIS R 3257に準拠して求め

**キーワード:** 表面気泡, 熱可塑性樹脂シート, 撥水性, 粗度, 接触角, 算術平均粗さ, 表面気泡面積率

**Keywords:** surface voids, thermoplastic resin sheet, repellency, roughness, contact angle, arithmetic roughness, surface void area ratio to whole surface

た。算術平均粗さは、表面粗さ・輪郭形状測定機を用いて粗さ曲線を取得し、JIS B 0601 に準拠して計算を行うことにより求めた。実験水準は、接触角が約 93° (H)、約 72° (M)、約 58° (L) の 3 水準、算術平均粗さが約 0.09μm (滑)、約 0.55μm (中)、約 0.95μm (粗) の 3 水準の計 9 水準とした。

シートの接触角は、表面にコロナ処理をすることにより調整した。ここで、コロナ処理とは高周波高電圧を与え、コロナ放電を生じさせ、気体成分をプラズマ状態とすることで、シート表面に極性基を生じさせて撥水性を低下させる処理である。また、シートの算術平均粗さはシート成型時に微細な凹凸を付けて調整した。

(2) 試験体概要

本実験では、100×100×100mm のコンクリート試験体を作製した。シートは側面の 4 面に貼付し、各要因につき試験体を 3 体ずつ作製することで、12 面を評価対象とした。打込みの 1 層の高さは 100mm とし、突き棒で 10 回突いた後、JIS R 5201 に準拠したテーブルバイブレータで 20 秒間振動を加えて締め固めた。脱型は材齢 7 日で行った。

(3) 使用材料と配合

コンクリートの使用材料を Table 2 に、配合を Table 3 にそれぞれ示す。なお、スランプの実測値は 8.5cm、空気量の実測値は 3.8%、JIS A 1123 に準じて測定したブリーディング量は 0.052 cm<sup>3</sup>/cm<sup>2</sup> であった。

(4) 評価方法

本実験では、脱型後に試験体を強制的に炭酸化し白華させた。表面気泡は影となるため、白華させた場合でも、画像データ上では黒色となる。これを利用し、白華が生じる前後の画像データを比較して、明度の変化が無く、黒色に近いピクセル (本実験では明度 60 以下) を表面気泡として抽出した<sup>6)</sup>。これを面積に変換することで表面気泡の面積と表面気泡の直径を算出した。表面気泡の面積は、式 (1) で定義する表面気泡面積率で評価した。また、表面気泡の直径は、すべての表面気泡を真円と仮定し、個々の表面気泡の面積から式 (2) によって算出した。

$$R_{air} = \sum A_{air}/A_{sur} \times 100 \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$d_{air} = \sqrt{4A_{air}/\pi} \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 $R_{air}$  : 表面気泡面積率 (%)、 $A_{air}$  : 個々の表面気泡の面積 (mm<sup>2</sup>)、 $A_{sur}$  : 評価範囲の面積 (mm<sup>2</sup>)、 $d_{air}$  : 個々の表面気泡の直径 (mm)。

2. 実験結果

(1) 表面気泡面積率

Fig.1 に表面気泡面積率の算出結果を示す。図示したように、接触角が大きく算術平均粗さが小さくなるほど、表面気泡面積率は小さくなる傾向が確認され、「滑-H」のケースで

Table 1 シートの接触角と算術平均粗さ (Contact Angle and Arithmetic Averaged Roughness)

水準	算術平均粗さ(μm)	接触角(°)	
1	0.094	H	93.1
2	0.091	M	71.6
3	0.087	L	57.0
4	0.535	H	93.8
5	0.555	M	73.3
6	0.559	L	60.7
7	0.977	H	92.9
8	0.947	M	73.5
9	0.956	L	55.5

Table 2 使用材料 (室内検討) (Material Used for Indoor Experiment)

材料	記号	摘要
水	W	地下水と上澄水の混合
セメント	C	普通ポルトランドセメント 密度=3.16g/cm <sup>3</sup>
細骨材	S <sup>*1</sup>	S1 砕砂 表乾密度=2.62g/cm <sup>3</sup> , 粗粒率=3.00
		S2 山砂 表乾密度=2.56g/cm <sup>3</sup> , 粗粒率=1.80
粗骨材	G <sup>*2</sup>	G1 砕石 表乾密度=2.65g/cm <sup>3</sup> , 実積率=59.5%
		G2 砕石 表乾密度=2.70g/cm <sup>3</sup> , 実積率=59.5%
		G3 砕石 表乾密度=2.66g/cm <sup>3</sup> , 実積率=59.5%
混和剤	Ad	AE 減水剤 主成分: リグニンスルホン酸化合物

\*1 : S は質量比 S1:S2=70:30 で混合  
\*2 : G は質量比 G1:G2:G3=30:40:30 で混合

Table 3 コンクリートの配合 (室内検討) (Mix Proportion for Indoor Experiment)

W/C (%)	目標スランプ (cm)	空気量 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
			W	C	S	G	Ad
52.0	8.0	4.5	171	329	770	1025	2.80

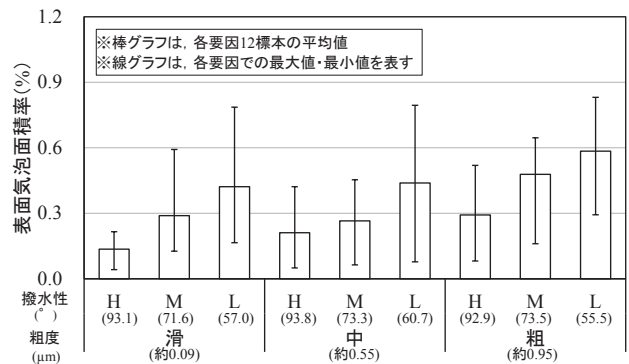


Fig.1 表面気泡面積率の比較 (Comparison of Surface Voids Area Ratio to Whole Surface for Different Repellency and Roughness of Formwork Surface)

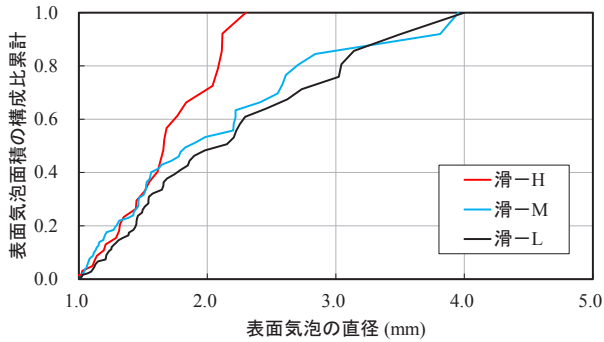


Fig.2 表面気泡の径の構成 (算術平均粗さ：滑)  
(Comparison of Surface Voids Diameter Distribution for Different Repellency of Smooth Formwork)

最も小さくなった。これは、撥水性を高くする、粗度を小さくすることで表面気泡が低減されるという既往の研究<sup>3),4),5)</sup>と同様の傾向となった。

(2) 表面気泡の直径

既往の研究<sup>3),4),5)</sup>では、直径 1.0mm 以上の表面気泡を評価している。これは、直径 1.0mm 以上が直径目視で確認できる大きさを表していること、1.0mm 以下の微細な表面気泡は、かぶりの減少という意味では耐久性に大きな影響を及ぼさないという考えによるものと推察される。そこで、Fig.2 に、算術平均粗さが「滑」の場合について、直径 1.0mm 以上の表面気泡の構成比 (面積の総和に対する各径の気泡が占める面積の割合) の累計と直径の関係を示す。この図では、例えば構成比が 0.4 のとき、「滑-H」の直径は 1.6mm であり、これは直径 1.6mm 以下の気泡が全気泡面積の 40%を占めていることを示す。また、構成比が 1.0 のときの直径はその要因で生じた気泡の直径の最大値を表す。Fig.2 においては、構成比 0.4 程度までは接触角の影響は小さくほぼ同等であるが、それ以上の構成比では接触角によって差が生じ、接触角が大きくなるほどグラフは左側に推移した。これは、撥水性が高くなるほど大きな気泡が少なくなることを表している。以上の傾向は、算術平均粗さが「中」や「粗」の場合も同様であった。

Fig.2 で得られた表面気泡の最大の直径と接触角の関係を Fig.3 に示す。直線は、最小二乗法により算出した近似直線である。ここで、接触角が大きくなるほど直径の最大値は小さくなる傾向であった。例えば、算術平均粗さが「滑」で、接触角の小さい 60°程度の場合、気泡の直径の最大値は 4.0mm であったのに対し、接触角の大きい 90°程度の場合では 2.3mm まで小さくなった。また、算術平均粗さが、「粗、中、滑」と小さくなるほど、直径の最大値が小さくなる傾向であった。例えば、接触角が 90°程度の場合、算術平均粗さが「粗」の最大値は 3.8mm であったのに対し、算術平均粗さが「滑」の最大値は 2.3mm まで小さくなった。以上から、

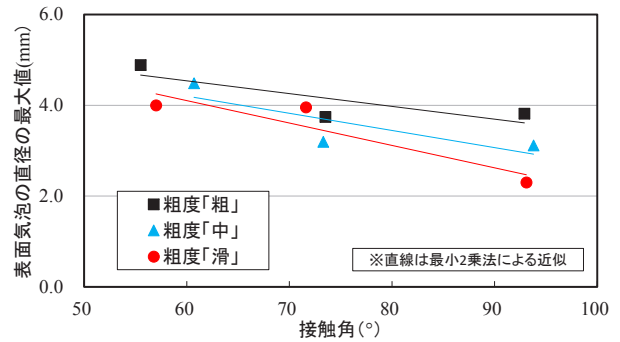


Fig.3 表面気泡の直径の最大値と接触角の関係  
(Relation of Maximum Diameter of Surface Voids and Contact Angle of Formwork Surface)

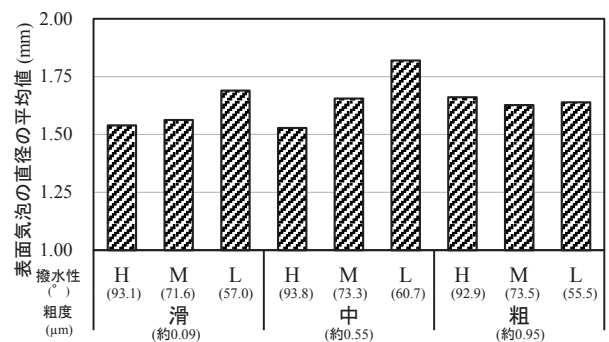


Fig.4 表面気泡の直径の平均値  
(Arithmetical Averaged Diameter of Surface Voids for Each Repellency and Roughness)

撥水性が高く粗度が小さいほど、表面気泡の直径の最大値は小さくなることが明らかとなった。

次に、表面気泡の直径の平均値を Fig.4 に示す。算術平均粗さが「滑」及び「中」で接触角の影響を比較すると、接触角が大きくなるほど直径の平均値は小さくなった。しかし、算術平均粗さが「粗」の場合の平均値は接触角の大小によらずほぼ同じ値となった。ここで、算術平均粗さが「粗」の場合でも Fig.3 では接触角が大きいかいほど直径の最大値が小さくなる傾向が確認されていることから、接触角が小さい場合は、直径が最大値に近い大きな気泡が多く生じるとともに比較的小さな直径の気泡も多く存在していると考えられる。なお、接触角が「H」、「M」及び「L」で算術平均粗さの影響を比較した場合、算術平均粗さの大小による明確な傾向は確認されなかった。

3. メカニズムに関する考察

固液界面における気泡に関する既往の知見では、例えば、園山ら<sup>7)</sup>は水中に存在する単一気泡が平板に接触した場合、平板の撥水性が高くなるほど、気泡と平板の付着面積は大きくなり、その気泡が動き出しにくくなることを実験的に示している。コンクリートについても同様のことが成り立つなら

ば、撥水性が高くなるほど表面気泡は多くなるが、本実験では撥水性が高いほど気泡は減少した。以上から、コンクリート中の気泡は水中と異なる挙動をする可能性が考えられる。

一方で、大谷ら<sup>8)</sup>は炭酸に着目し、粗い界面の方が気泡は生じ易く、かつ大きい気泡ができることを実験と解析で示している。このことが、コンクリートについても成り立つならば、せき板表面の粗度が大きいほど気泡がせき板表面に生じやすくなり、表面気泡の量が多くなると考えられる。本実験では、粗度が大きいほど表面気泡の量が多くなる傾向が確認されたため、上記のような現象により表面気泡の生成をある程度説明できる可能性があると考えられる。ただし、コンクリートの場合は締固めのような、上記の文献では考慮されていない作用があり、本実験の範囲では、気泡の付着を純粋に評価できてはいない。気泡の付着については、更なる検証が必要であると考えられる。

### Ⅲ. 実構造物を対象とした検討

室内実験の結果、撥水性と粗度が表面気泡に与える影響を確認した。そこで、実構造物において表面気泡の面積と直径を測定し、室内実験で得られた結果と比較した。

#### 1. 検討概要

##### (1) 検討対象

対象とした構造物は、W:10.4×L:27.9×H:2.5mの橋梁下部工のフーチングである。Fig.5 (a)の赤塗りした位置の型枠に室内実験で用いた「H-滑」のシート（接触角：90.4°，算術平均粗さ：約0.090 μm）を貼付した。それ以外のせき板は一般的な化粧合板（接触角：約70.0°，算術平均粗さ：約0.260 μm）である。

1層の打込み高さを0.5mとし、5層に分けて打ち込んだ。締固めは、φ50mmのフレキシブルバイブレータで1カ所当り約15秒間行うとともに、かぶり部分にはφ30mmのマルチインナーバイブレータを挿入して、1カ所当り約10秒間締め固めた。

##### (2) 使用材料と配合

コンクリートの使用材料をTable 4に、配合をTable 5にそれぞれ示す。コンクリートは、市中のレディミクストコンクリート工場で製造した。打込み直前におけるスランプの実測値は11.5～13.5 cm，空気量の実測値は3.6～5.3%であった。また、φ150×300 mmの円柱容器を用いて実施した簡易ブリーディング試験<sup>9)</sup>によるブリーディング量は0.070 cm<sup>3</sup>/cm<sup>2</sup>であった。

##### (3) 評価方法

Fig. 5 (a) に示したシート貼付位置（赤塗り部分），及びそれに隣接する化粧合板の測定位置（青塗り部分）に対して，Fig.5 (b) に示すような構造物下端から2.5m，1.3m，1.0mの3領域（上，中，下）の表面気泡の面積と直径を測定した。

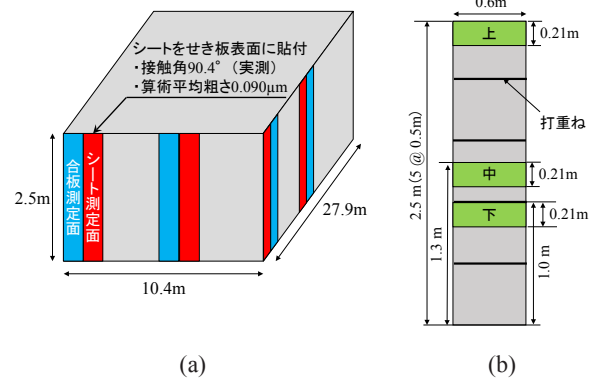


Fig.5 表面気泡の測定位置  
(Position of Surface Voids Evaluation)

Table 4 使用材料（実構造物の検討）  
(Material Used for Indoor Experiment)

材料	記号	摘要
水	W	工業用水と上澄水の混合
セメント	C	低熱ポルトランドセメント 密度=3.22g/cm <sup>3</sup>
細骨材	S*1	S1 砂 表乾密度=2.61g/cm <sup>3</sup> ，F.M.=2.50
		S2 砕砂 表乾密度=2.63g/cm <sup>3</sup> ，F.M.=3.10
粗骨材	G*2	G1 砕石 表乾密度=2.70g/cm <sup>3</sup> ，実積率=61.0%
		G2 砕石 表乾密度=2.71g/cm <sup>3</sup> ，実積率=60.0%
混和剤	Ad	AE減水剤 主成分：リグニンスルホン酸化合物 ポリカルボン酸エーテル

\*1：Sは質量比S1:S2=75:25で混合  
\*2：Gは質量比G1:G2=50:50で混合

Table 5 コンクリートの配合（実構造物の検討）  
(Mix Proportion for Real Structure Validation)

W/C (%)	目標スランプ (cm)	空気量 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
			W	C	S	G	Ad
50.0	12.0	4.5	171	342	824	982	3.42

ここに、「上」、「下」は各々の打込み層（0.5m）の上端部分，「中」は打込み層の中心部分である。

表面気泡の測定に際しては、評価対象の位置に、298×210mmの透明シートをコンクリート表面に当てて径が1.0mm以上の表面気泡をトレースし、スキャナを用いて画像データとした。前掲の式（1）及び式（2）により、画像データから表面気泡面積率及び表面気泡の直径を算出した。

## 2. 実験結果

### (1) 表面気泡面積率

Fig.6 に表面気泡面積率の平均値及び各測定位置で得られたデータの最大値と最小値を示す。同じ高さで化粧合板とシートの結果を比較すると、シートを用いた方が表面気泡面積率は小さくなった。これは、室内試験と同様の傾向であり、

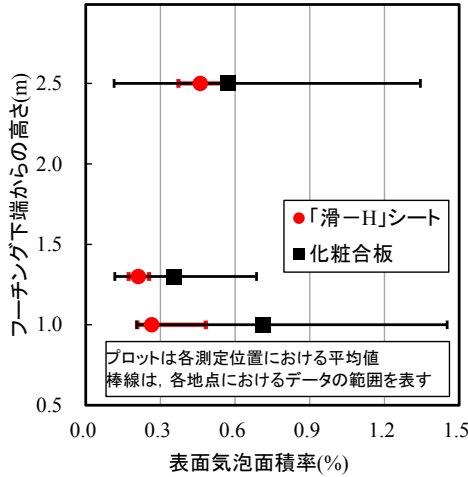


Fig.6 測定位置ごとの表面気泡面積率  
(Surface Voids Area Ratio to Whole Surface on Each Positions)

接触角を大きく算術平均粗さを小さくすることで、表面気泡が減少することを実構造物においても確認できた。また、データの最大値と最小値の差もシートを用いた方が小さくなり、均質なコンクリート表面が得られることが分かった。

高さ方向の違いに着目すると、シートと化粧合板どちらについても、高さ 1.3m と比較して高さ 2.5m と高さ 1.0m の方が表面気泡面積率及びばらつきは大きくなった。これは、高さ 1.3m が打込みリフトの中心であるのに対し、高さ 2.5m・1.0m が打込み層の上端であることから、気泡の上昇は各打込み層の上端、すなわち打重ね線の直下で止まり、上層の締固めによってもさらに上昇することはなく、気泡が打重ね部直下で集中したものと考えられる。

#### (2) 表面気泡の直径

Fig.7 に表面気泡の直径の分布を構成比でまとめて比較したものを示す。これも室内試験と同様に、接触角が大きく算術平均粗さが小さいシートの方が、表面気泡の直径が小さくなる傾向であった。また、Fig.8 に合板に対するシートの表面気泡面積の低減率を表面気泡の直径ごとに示す。気泡径が大きいほど表面気泡面積率の低減率は大きくなり、6.0mm 以上の気泡は約 90%低減した。このことから、撥水性が高く粗度が小さいシートは、室内試験で得られた傾向と同様に、比較的大きな直径の表面気泡の低減に効果的であることが確認された。

#### (3) 検討結果の考察

実構造物においてシートの有無を要因として、表面気泡の面積及び直径を測定した。その結果、シートをせき板表面に貼付することで表面気泡が減少し、表面気泡の直径が低減できることを確認した。つまり、シートによる表面気泡の低減効果は実構造物においても、室内試験と同様に得られることが確認された。また、Fig.6 で確認されたように、せき板表

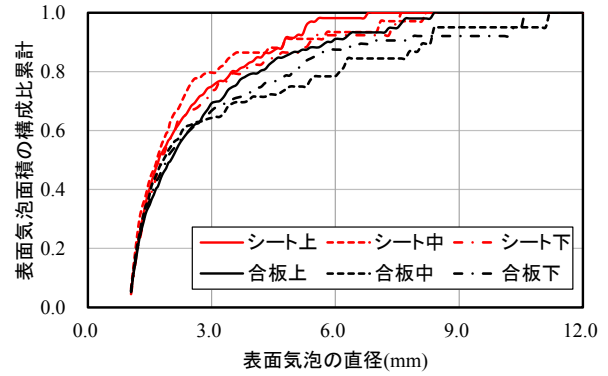


Fig.7 表面気泡の径の分布  
(Surface Voids Diameter Distribution Compared with the Use of Smooth and Repellent Resin Sheet)

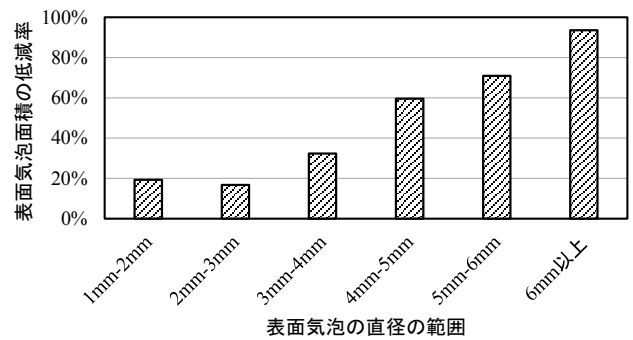


Fig.8 表面気泡の径の大きさごとの表面気泡面積低減率  
(Relation of Reduction Ratio of Surface Void Area and Diameter of Surface Void)

面にシートを貼り付けることで、表面気泡のばらつきが抑えられた。表面気泡は構造物上の弱部と捉えることができ、また構造物の劣化は弱部をきっかけとして生じる。つまり、シートによって、表層品質の向上が図られると考えられる。

#### IV. まとめ

本論文では、表面気泡の面積と直径を室内実験及び実構造物で測定して分析をした。その結果、以下の知見が得られた。

- ① シートの撥水性が高く粗度が小さくなるほど、表面気泡面積率は小さくなる傾向にあった。
- ② 本研究によって、表面気泡の直径は、シートの撥水性が高く、粗度が小さくなるほど小さくなる傾向であることが明らかになった。
- ③ 撥水性を高く粗度を小さくしたシートを用いた場合、通常の場合と比べて表面気泡の面積のばらつきが抑えられた。

#### 参考文献

- 1) 坂田昇ほか; コンクリート構造物の品質向上と表層品質評価手法, コンクリート工学, Vol.30, No.7, 2012, pp.601-606.

- 2) 三田勝也ほか; 表面欠陥の目視評価と塩分浸透性の関係に及ぼす部材形状の影響, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第14巻, 2014.
- 3) 依田侑也ほか; 打放しコンクリートの美観向上に関する研究: その2 超撥水機構を有する型枠を用いたコンクリート表面気泡の抑制メカニズム, 日本建築学会学術講演梗概集, 材料施工, 2015, pp.131-132.
- 4) 秋山哲治ほか; フィルム材を用いた型枠がコンクリート表層の耐久性向上に及ぼす効果に関する検討, セメント・コンクリート論文集, Vol.66, No.1, 2013, pp.507-514.
- 5) 石井明俊ほか; 熱可塑性樹脂シートの有無が表面気泡に与える影響に関する一考察, 土木学会第69回年次学術講演会講演概要集, 2014, pp.131-132.
- 6) 吉田祐麻ほか; せき板表面の撥水性と粗度がコンクリートの表面気泡に与える影響に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, 2017, pp.2155-2160.
- 7) 園山希ほか; 濡れ性の悪い平面壁に衝突する単一気泡の挙動, 鉄と鋼, vol.86, No.4, 2000, pp.203-209.
- 8) 大谷貴美子ほか; ビアカップの特性とビールの泡発生に関する理論的考察, 日本調理科学会, Vol.34, No.4, 2001, pp.356-365.
- 9) 日本コンクリート工学会, 構造物の耐久性向上のためのブリーディング制御に関する研究委員会報告書, 2017.

### Study on Effects of Repellency and Roughness of a Sheet Attached to the Formwork Surface on the Surface Voids of Concrete

*Yuma Yoshida, Kenzo Watanabe, Ryoichi Ashizawa,  
Toshiharu Nakatani, Natsuko Hamada and Goro Sakai*

We developed a new long-term curing method in which thermoplastic resin sheet is attached to the surface of formwork, concrete is placed, and the sheet is left there even after the formwork is removed. The method was shown to reduce surface voids because of the high repellency and low roughness of the sheet, but the mechanism of the effect had not been revealed. In this study, to help clarify this mechanism, an indoor experiment was conducted to analyze the influence of the repellency and roughness of the formwork on the area and diameter of the surface voids. As a result, the higher the repellency and the lower the roughness of formwork, the lower the area of surface voids, and the diameter tended to decrease as the contact angle became smaller. These tendencies were also measured when validating actual structures by comparing the sheet with general plywood formwork. When using the sheet, surface voids of relatively large diameter were greatly reduced.