

# 論文 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

吉田 祐麻\*1・渡邊 賢三\*2・温品 達也\*3・石田 哲也\*4

**要旨：**コンクリートの表面気泡の発生メカニズムを明らかにする取組みの一環として、せき板表面の撥水性と粗度が表面気泡面積率に与える影響について、実験的に検討した。コンクリートの表面気泡はせき板表面の撥水性と粗度の影響を受けており、せき板表面の撥水性が高いと表面気泡は低減し、せき板表面の粗度が大きいと表面気泡は増大する傾向が確認された。また、その影響度は算術平均粗さより接触角の方が大きいことが示唆された。

**キーワード：**撥水性, 粗度, 表面気泡, 接触角, 算術平均粗さ, 画像解析, 表層品質

## 1. はじめに

コンクリート施工時の初期欠陥の一つとして、表面気泡がある。表面気泡は、せき板とコンクリートの界面にエントラップトエアや余剰水が残留することによって生じ、コンクリート構造物の美観や景観を損ねる<sup>1),2)</sup>。三田ら<sup>3)</sup>は表面気泡や砂すじなどの表面部における欠陥が塩分浸透性に与える影響について実験的に検討を行った。その結果、これらの欠陥が塩分浸透性を高め、欠陥が無い場合と比べて鋼材腐食発錆年数が表面気泡の存在により半分程度となることを示している。つまり、表面気泡は構造物の耐久性を低下させる要因となる。

そのため近年、表面気泡に対する関心が高まっており、表面気泡の低減に関するさまざまな技術開発が行われている。例えば、依田ら<sup>4)</sup>はせき板表面を改質し、高い撥水性を付与させて、空気や余剰水の残留を無くすことによって表面気泡の低減を図っている。秋山ら<sup>5)</sup>は型枠にフィルムを貼付し、粗度を小さくした型枠を用いて表面気泡の低減効果を示している。また、筆者ら<sup>6)</sup>は粗度が小さく、撥水性を有する樹脂製シートをせき板表面に貼付することで、合板と比較して表面気泡の低減が可能であることを実験的に示している。

このように、コンクリートの表面気泡がせき板表面の撥水性と粗度の影響を受けている可能性は高いと考えられる。しかし、それぞれの要因が表面気泡の発生にどの程度の影響を与えているかは明らかになっていない。

そこで、本論文では、せき板表面に貼付する熱可塑性樹脂シート（以下、シートと称す）の撥水性と粗度を要因として表面気泡面積率を測定し、これらの影響度を実験的に検討した結果とその考察について述べる。

## 2. 実験概要

### 2.1 型枠表面の撥水性と粗度の制御

本実験では、撥水性は接触角を、粗度は算術平均粗さをパラメータとし、これらのパラメータを型枠表面に与えるため、シートを型枠表面に貼付して試験体を作製した。表-1に、本実験の実験要因を示す。実験要因は、撥水性が92.9°～93.1°のもの（以下、Hと称する）、71.6°～73.5°のもの（同M）、55.5°～60.7°のもの（同L）の3水準、粗度が0.087μm～0.094μm（以下、滑と称する）、0.535μm～0.559μm（同中）、0.947μm～0.977μm（同粗）の3水準に、化粧合板（シート無し）を加えて10要因とした。シートの材質は同一であり、撥水性は、Hのシートにコロナ処理（高周波高電圧を基材表面に与え、コロナ放電を生じさせ、気体成分をプラズマ状態とする

表-1 各要因における接触角と算術平均粗さ

ケース	接触角 (°)		算術平均粗さ (μm)	
1	H	93.1	滑	0.094
2	M	71.6		0.091
3	L	57.0		0.087
4	H	93.8	中	0.535
5	M	73.3		0.555
6	L	60.7		0.559
7	H	92.9	粗	0.977
8	M	73.5		0.947
9	L	55.5		0.956
10 (合板)		70.9		0.263

\*1 鹿島建設株式会社 技術研究所 土木材料グループ 研究員 修士(工学) (正会員)

\*2 鹿島建設株式会社 技術研究所 土木材料グループ 上席研究員 博士(工学) (正会員)

\*3 徳山工業高等専門学校 土木建築工学科 修士(工学) (正会員)

\*4 東京大学大学院 工学系研究科 社会基盤学専攻 教授 博士(工学) (正会員)

ことにより、基材表面に極性基を生じさせて撥水性を落とす処理)を施すことで与え、粗度はシート表面に対して機械的に与えた。

表-1 に示した各実験要因における各シートの接触角および算術平均粗さは、実験的に求めたものの平均値である。接触角の測定は JIS R 3257 に準拠し、1 $\mu$ L~4 $\mu$ L の水滴を型枠上のシートに乗せて横から高精度カメラで撮影し、液滴の形状を真球として、液滴の高さおよび接触面における半径から幾何学的に算出した。測定は、各要因 10 $\times$ 10mm のシート 3 枚にそれぞれ 5 回ずつ計 15 回行い、合板型枠に貼付けたシートに対して、打設直前に行った。また、算術平均粗さは、触針式表面粗さ測定機を用いて、0.6mm/s の速度で 10mm の粗さ曲線を計測し、粗さ曲線から算術平均粗さを JIS B 0601 に準拠して求めた。粗さ曲線の測定は、各要因 3 回ずつ行い、シート作製時に製品検査として実施した。

## 2.2 試験体概要

本実験では、中型試験体と小型試験体の 2 種類の試験体を用いた。中型試験体は通常の施工に極力近い条件で作製することとした。小型試験体は、締固め作業等の施工に起因する誤差を可能な限り除くように作製した。それぞれの試験体の作製方法を以下に示す。なお、中型試験体および小型試験体いずれの試験体においても、合板に剥離剤の塗布は行っていない。

### (1) 中型試験体

中型試験体は、各要因につき 2 体ずつ作製し、評価面は各要因につき 8 側面とした。試験体寸法は 400 $\times$ 400 $\times$ 400 mm で無筋とし、小型試験体と同様に側面の 4 面にシートを貼り付けた後、コンクリートを 1 層で打ち込んだ。型枠表面への影響が無いようコンクリートの投入は中心に盛るように行った。そのため、型枠の半層ほどの量に達した時と全量打ち込んだ時に、山崩しを径が $\phi$  30mm、振動数 12000vpm の棒状バイブレータを用いて中心に 3 秒間振動を加えて行った。その後、締固めを山崩しの時と同じバイブレータを用いて図-1 に示す位置にそれぞれ 15 秒ずつ振動を加えることで行った。試験体の脱型は材齢 7 日で行った。

### (2) 小型試験体

小型試験体は、各要因につき 3 体ずつ作製した。試験体寸法は 100 $\times$ 100 $\times$ 100 mm とし、側面の 4 面にシートを貼り付けて評価面とした (各要因につき 12 側面)。締固めは、コンクリートを 1 層で打ち込み、鋼棒で 10 回突

いたのち、JIS R 5201 に準拠したテーブルバイブレータ上に 1 体ずつ設置して、20 秒間振動を加えることで行った。試験体の脱型は材齢 7 日で行った。

## 2.3 配合・材料

試験体に使用したコンクリートの材料および配合を表-2 および表-3 に示す。中型試験体と小型試験体は同バッチのコンクリートを使用した。なお、使用したコンクリートのスランプ実測値は 8.5cm、空気量は 3.8%、JIS A 1123 に準じたブリーディング率は 1.2%であった。

## 2.4 中型試験体における試験方法の概要

中型試験体の表面気泡面積率は、無色透明の OHP シートを用いて直径 1mm 以上の気泡を目視にてトレース

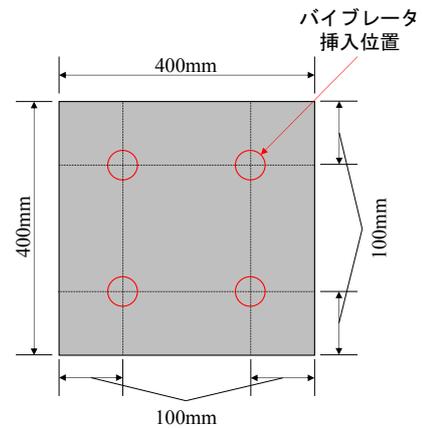


図-1 中型試験体バイブレータ挿入位置

表-2 使用材料

材料	記号	摘要
水	W	地下水及び上澄水
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 密度=2.62g/cm <sup>3</sup> , F.M.=3.00
		S2 山砂 密度=2.56 g/cm <sup>3</sup> , F.M.=1.80
粗骨材	G <sup>*2</sup>	G1 碎石 密度=2.65 g/cm <sup>3</sup> , 実積率=59.5%
		G2 碎石 密度=2.70/cm <sup>3</sup> , 実積率=59.5%
		G3 碎石 密度=2.66/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、ポリカルボン酸エーテル

\*1 : S は S1:S2=70:30 の割合

\*2 : G は G1:G2:G3=30:40:30 の割合

表-3 コンクリート配合

W/C (%)	s/a (%)	Air (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )							
			W	C	S1	S2	G1	G2	G3	Ad
52.0	43.5	4.5	171	329	539	231	308	409	308	2.80

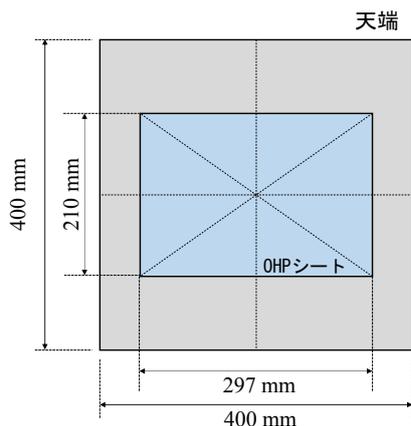


図-2 表面気泡評価面（中型試験体）

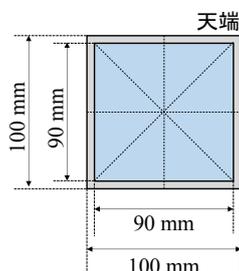


図-3 表面気泡評価面（小型試験体）

し、その OHP シートをスキャナーで画像データに取り込んで2値化処理することにより面積を集計して求めた。気泡のトレースは測定者の個人差による誤差を低減するため1名で行った。

評価範囲は、図-2 に示すように、コンクリート表面と評価範囲の中心を一致させ、横方向が長手となる A4 サイズ (297×210mm) の領域とした。中型試験体の表面気泡面積率は式(1)のとおりに算出した。

$$R_{air} = \frac{A_{air}}{A_{sur}} \times 100 \quad (1)$$

ただし、 $R_{air}$  : 表面気泡面積率 (%)、 $A_{air}$  : 評価範囲内でトレースした表面気泡の面積 (mm<sup>2</sup>)、 $A_{sur}$  : 評価範囲の面積 (=297×210mm<sup>2</sup>)

## 2.5 小型試験体における試験方法の概要

### (1) 小型試験体の撮影前処理

小型試験体を脱型後材齢 21 日まで温度 20℃、相対湿度 60% の環境に静置し、1 回目の撮影を行った。1 回目の撮影ではコンクリート表面の色むらが強く、表面気泡とコンクリート表面を画像解析で分離することが困難であった。そこで、撮影後に1日間水道水に浸漬させた後、温度 50℃、相対湿度 60%、CO<sub>2</sub> 濃度 20% の中性化環境に 7 日間試験体を暴露して表面を白華させ、2 回目

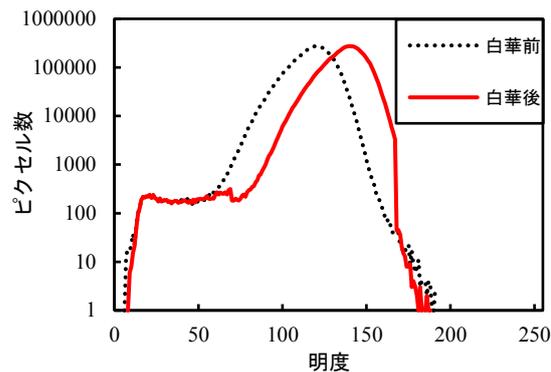


図-4 白華前と白華後におけるヒストグラムの比較

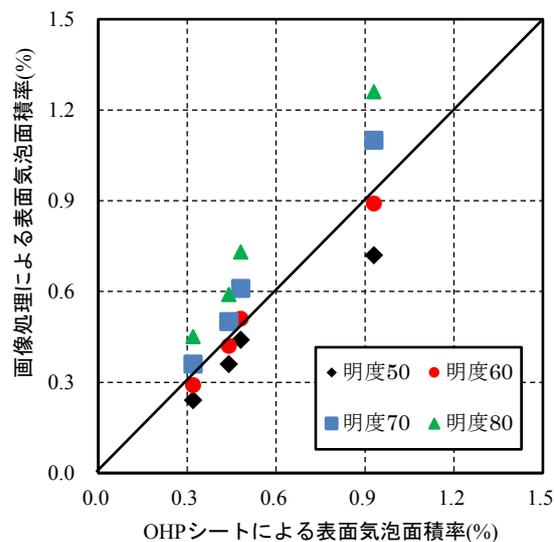


図-5 しきい値の検証

の撮影を行った。

### (2) 小型試験体の撮影方法と評価範囲

小型試験体の表面気泡面積率は、撮影画像を用いた画像解析にて行った。撮影は室内で行い、光量が一定となる環境で行った。その際、カメラは試験体評価面の中心が画像の中心と一致するように三脚で固定した。評価対象面からカメラレンズの中心までの距離を 300 mm、解像度 5184×3456 ピクセルとして、180×120 mm の範囲を撮影した。評価範囲は、図-3 に示すような 90×90 mm (=2592×2592 ピクセル) の正方形領域とした。

### (3) 画像処理方法

表面気泡の画像解析手法として、寺本<sup>2)</sup>は乾燥前と乾燥後のヒストグラムを比較し、表面気泡面積率の推定を行っている。本検討ではこの手法を参考に、白華前と白華後のヒストグラムを比較し、明度にしきい値を設け画素を分割することで表面気泡の抽出を行った。図-4 に白華前と白華後のヒストグラムを示す。図より、コンクリート表面の色を示すピーク部分は白華前後で明度が高い方へシフトするのに対し、明度 60 以下は概ね同じで

あった。白華処理により色が変化するのはコンクリート表面部だけであるため、明度 0 から明度 60 までを示すピクセルは表面気泡を示すものと考えた。

無作為に抽出した 4 つのコンクリート面において、OHP シートにより表面気泡をトレースして表面気泡面積率を算出し、これとしきい値を明度 50, 60, 70, 80 として画像解析から求めた面積率の比較を行った。図-5 にその結果を示す。図より、明度 60 の表面気泡面積率が OHP シートによる表面気泡面積率に最も近くなった。このことから、本検討のしきい値である明度 60 は、表面気泡の抽出に対して妥当であると判断した。また、コンクリート表面の画像とその画像を、明度 60 をしきい値として明度 60 以上を白、以下を黒の 2 色に表示させたものを図-6 に示す。これらを比較すると、表面の気泡を精度よく捉えられることが確認された。以上から、小型試験体の表面気泡面積率は式(2)のとおり算出した。

$$R_{air} = \frac{A_{60}}{A_{sur}} \times 100 \quad (2)$$

ただし、 $R_{air}$  : 表面気泡面積率 (%),  $A_{60}$  : 明度 0 から明度 60 までを示すピクセル数,  $A_{sur}$  : 全ピクセル数 (=2592×2592)

### 3. 中型試験体による表面気泡面積率の結果

#### 3.1 中型試験体の表面気泡面積率

図-7 に、中型試験体における表面気泡面積率の測定結果を示す。棒グラフは各要因における表面気泡面積率の平均値を示し、上下の線はそれぞれ最大値と最小値を示す。図より、各ケースにおけるばらつきは比較的大きいものの、撥水性が低いほど表面気泡は増大する傾向が確認された。この傾向は、既往の研究<sup>7)</sup>における傾向と同様であった。また、H の場合を除いて、粗度が大きいほど表面気泡が若干増大する傾向が確認された。また、合板とシートを用いたケースを比較すると、撥水性が H

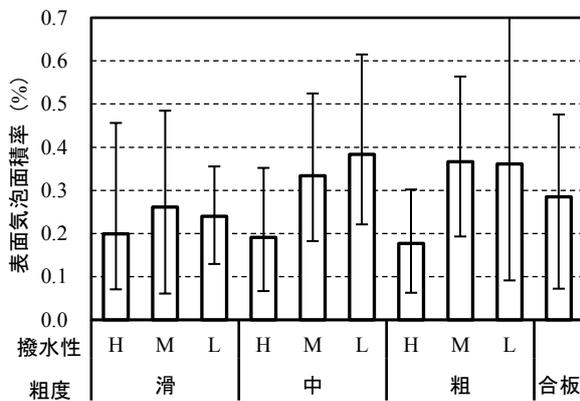


図-7 中型試験体における表面気泡面積率の測定結果 (平均値・最大値・最小値)

である場合はすべて合板よりも表面気泡が少なくなった。

また、特異点を排除する試みとして、検定統計量が 2 を超える ( $\bar{X} \pm 2\sigma$ ) データを外れ値とし、それを除いた。図-8 にその表面気泡面積率の結果を示す。図より、前述と同様の結果が認められた。

以上より、せき板表面の撥水性を高めることは、表面気泡の低減に対して効果がある可能性が考えられる。

#### 3.2 表面気泡面積率に対する要因の考察

表面気泡面積率に対するせき板表面の撥水性と粗度の影響を考察するため、接触角および算術平均粗さと表面気泡面積率の散布図を評価した。分析は、シートの材料と化粧合板の塗装材の材質の差による影響を排除するため、シートを貼付した試験体のみについて行った。図-9 および図-10 に接触角および算術平均粗さと表面気泡面積率の散布図を示す。

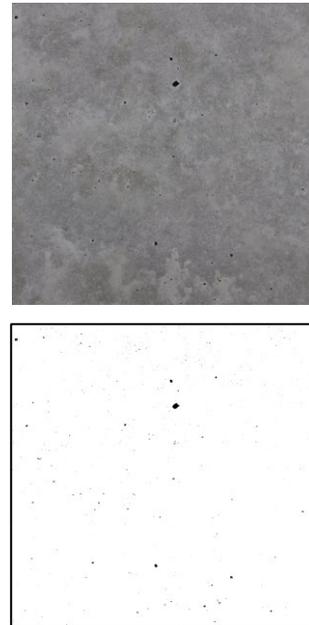


図-6 表面気泡比較 (上: 元画像, 下: 白黒表示)

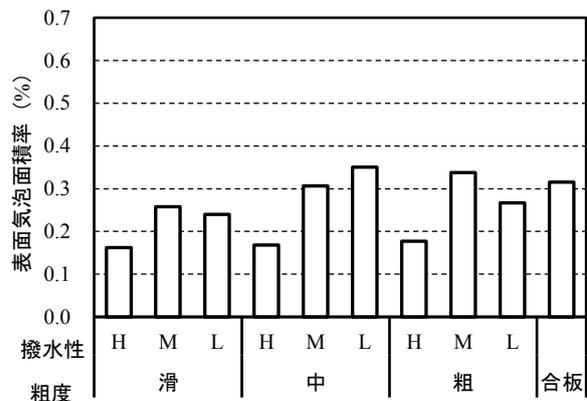


図-8 外れ値を除外した結果

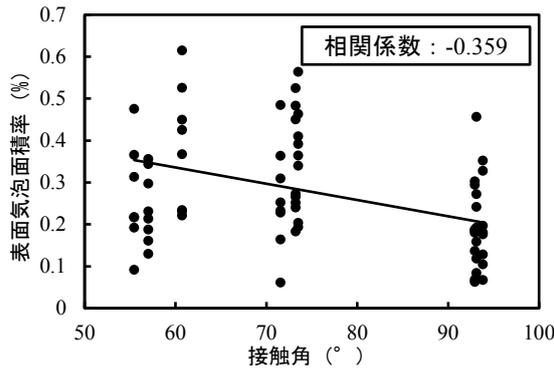


図-9 接触角と表面気泡面積率の関係  
(中型試験体)

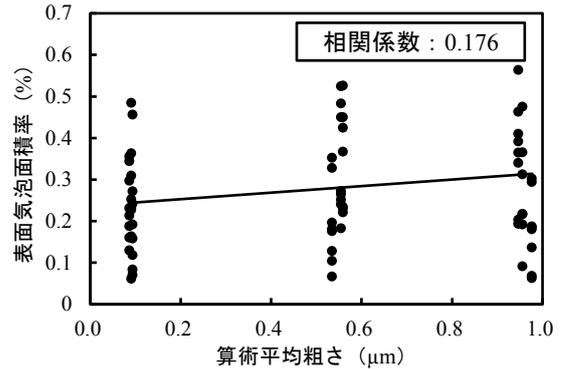


図-10 算術平均粗さと表面気泡面積率の関係  
(中型試験体)

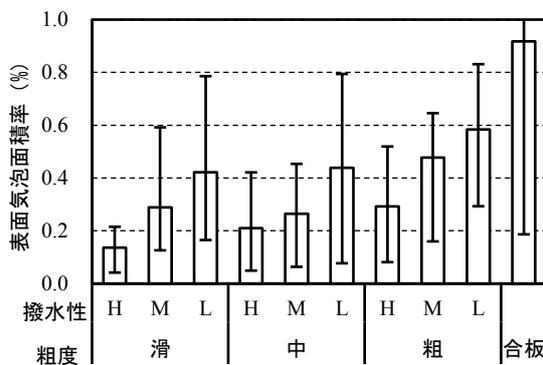


図-11 小型試験体における表面気泡面積率の測定結果  
(平均値・最大値・最小値)

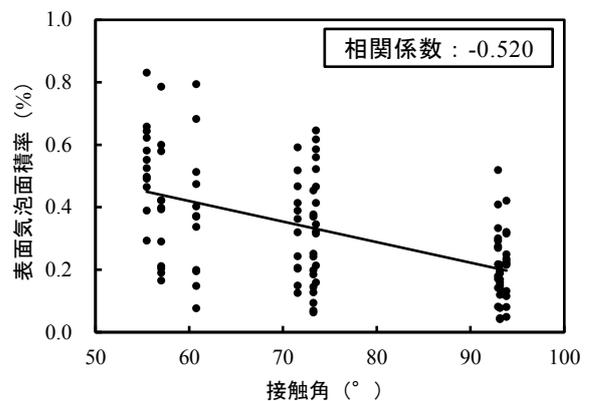


図-12 接触角と表面気泡面積率の関係  
(小型試験体)

図-9 より、せき板表面の接触角は表面気泡面積率に対して、その相関係数は全てのデータについて算出した場合-0.359であり、一方、外れ値を除外した場合は-0.416であった。ここで、相関係数は小さいものの接触角と表面気泡面積率は負の相関を示した。

図-10 より、せき板表面の算術平均粗さは表面気泡面積率に対して、その相関係数は全てのデータについて算出した場合 0.176 であり、一方、外れ値を除外した場合は 0.137 であった。ここで、相関係数が著しく小さく、傾向を論じる値とは言い難いが、算術平均粗さと表面気泡面積率は正の相関を示した。

型枠表面の接触角や算術平均粗さの値の範囲は、本論文で実施するシートを貼付けるような簡易な操作で制御する場合、おおむね図-9 およびに図-10 示す範囲にあると考えられる。この範囲では、接触角の方が算術平均粗さより、回帰直線の傾きの絶対値は大きくなっている。

以上より、コンクリートの表面気泡に与える影響は、粗度と比較して撥水性の方が大きいことが示唆される。すなわち、表面気泡の低減する対策としては、撥水性を高めることが有効であると考えられる。

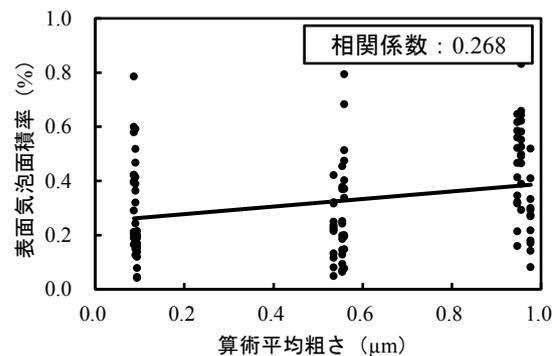


図-13 算術平均粗さと表面気泡面積率の関係  
(小型試験体)

#### 4. 小型試験体による表面気泡面積率の検討結果

##### 4.1 小型試験体の表面気泡面積率

図-11 に、小型試験体における表面気泡面積率の測定結果を示す。図より、撥水性が低くなる、粗度が大きくなるほど表面気泡は増大する傾向が確認された。また、化粧合板における表面気泡は、中型試験における傾向と異なり、シートを用いた場合と比較して著しく増加した。

## 4.2 表面気泡面積率に対する要因の考察

中型試験体と同様に、接触角および算術平均粗さと表面気泡面積率の関係を、シートを貼付した試験体のみについて評価した。図-12 および図-13 に接触角および算術平均粗さと表面気泡面積率の関係を示す。

図-12 より、せき板表面の接触角は表面気泡面積率に対して、相関係数は-0.520 であり、相関係数が大きいとは言い難いものの負の相関する傾向を示した。相関係数が微増したのは、小型試験体の作製において施工に起因する誤差を小さくするように作製したことによると考えられる。

図-13 より、せき板表面の算術平均粗さは表面気泡面積率に対して、その相関係数は 0.268 であり、相関係数は小さいものの正の相関を示した。

中型試験体同様、図-12 および図-13 で示す範囲では、接触角の方が算術平均粗さより、回帰直線の傾きの絶対値は大きくなっている。このことから、コンクリートの表面気泡に与える影響は、粗度と比較して撥水性の方が大きいことが示唆された。

また、中型試験体の結果と比較して、施工に起因する誤差を可能な限り除いた場合、せき板表面の撥水性と粗度の影響がより明確になった。

## 5. まとめ

撥水性と粗度を変化させたせき板でコンクリート試験体を作製し、生じた表面気泡の面積率を測定した。以下に、得られた知見を示す。

- (1) せき板表面の接触角が高いほど、コンクリートの表面気泡は減少する傾向にあることが確認された。
- (2) せき板表面の算術平均粗さが大きいほど、コンクリートの表面気泡は増加する傾向にあることが確認された。
- (3) 中型試験体の場合、せき板表面の接触角が 93° (H 相当) 程度の高値の場合、合板よりも表面気泡が低減されていることが確認された。このことから、せき板表面の撥水性を高めることは表面気泡の低減対策として有効であることが示唆される。

本実験においては、エントラップトエアによる表面気

泡とブリーディング水による表面気泡の区別ができていない。これら異なる要因の表面気泡発生メカニズム解明は今後の課題とする。

謝辞：本実験の実施にあたり、材料を提供して頂いた積水成型工業(株)渋谷能成氏、茶木健志氏、実験に協力して頂いた東京大学細井雄介氏、中山功暉氏をはじめとする多くの皆様に多大なご協力を頂いた。ここに感謝の意を表す。

## 参考文献

- 1) 坂田昇, 渡辺賢三, 細田暁: 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, pp.601-606, 2012
- 2) 寺本篤史: 画像解析による打放しコンクリートの美観評価に関する研究, LIXIL 住生活財団助成研究報告書, 14-62, 2014
- 3) 三田勝也, 加藤佳孝: 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
- 4) 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, pp.131-132, 2015
- 5) 秋山哲治, 鈴木亮, 鈴木達也, 濱田秀則: 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, pp.507-514, 2013
- 6) 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 回学術講演会講演概要集, pp.131-132, 2014
- 7) 齊藤 亮介ら: 打放しコンクリートの美観向上に関する研究: その 3 型枠の撥水性および目地棒の奥行きが表面気泡に及ぼす影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.133-134, 2015