

# デジタルカラー画像解析による 締固め過程のコンクリート表面気泡の評価†

前田 智之\* 原田 沙里\*\* 森内 麻衣\*\*  
藤原 正稔\* 吉武 勇\*\*\*

## Digital Image Analysis of Concrete Bugholes under Vibrating Consolidation

by

Tomoyuki MAEDA\*, Sari HARADA\*\*, Mai MORIUCHI\*\*\*,  
Masanori FUJIWARA\* and Isamu YOSHITAKE\*\*\*\*

The present study aims to improve surface quality of tunnel lining concrete. The study developed an image analysis to detect and evaluate bugholes on concrete surface. The developed system calculates RGB value of colored images of concrete having bugholes. The study examines the accuracy and effectiveness by comparing the system to a binary image analysis. The comparative result shows that the developed system has higher accuracy than the binary image analysis. To examine generation of concrete bugholes, the developed system was employed in a vibrating consolidation test. The primary observation is that relatively small bugholes remained on concrete surface while large bugholes disappeared by vibrating consolidation.

### Key words:

Bugholes, Digital image analysis, Tunnel lining concrete, Surface quality

## 1 緒 言

高度経済成長期に構築された社会資本が一斉に老朽を迎え、効率の良い維持管理が必要とされる中、新設するコンクリート構造物は、ライフサイクルコストの最小化や第三者に対する事故防止を目的に長期的な耐久性の確保が求められている。コンクリートの耐久性には物質移動抵抗性が関わり、表層品質と密接な関連性があるといわれており、耐久性とあわせて表層品質が注目されている。またコンクリートの表層品質を検査診断する技術は種々あるが、リバウンドハンマー試験や表層透気試験法 (Torrent 法) などがしばしば用いられる。近年では目視調査が再注目され、コンクリートの表層品質をグレーディングによって評価する手法も提案されている<sup>1)</sup>。

コンクリートの表層品質の目視調査で評価する項目には、「ひび割れ」、「コールドジョイント」、「目違い」、「砂すじ」、「豆板」、「表面気泡」などがある<sup>2)</sup>。そのうち「表面気泡」は、打込み中の締固め不足が要因のひとつといわれ、様々な対策がとられているが<sup>3),4)</sup>、トンネル覆工コンクリート側壁部において、表面気泡が発生しやすいにも関わらず、気泡を低減する実用的な方法が確立されていないのが現状である<sup>5)</sup>。また、一般的な構造物においても一部では対策がとられるものの、コンクリートの仕上がり面が傾斜している箇所や締固めが困難な箇所、打設高さの高い箇所では表面気泡が発生しやすく、さらなる施工技術の改善が求められるものと考えられる。そこで本研

究では、コンクリート表面気泡の発生特性を調べることで、その効率的な低減法に寄与するため、振動締固め過程における表面気泡の発生量を定量的に調査した。具体的には、トンネル覆工側壁部を模擬した試験型枠<sup>6)</sup>を用いてコンクリート供試体を作製し、型枠の調査面に透明アクリル板を用いて可視化することで、経時的な気泡発生量の変化を定量的に調べ、締固め過程における表面気泡発生特性の評価を試みた。

これまで、コンクリート表面気泡の定量化にあたり、目視調査に加え、撮影画像の二値化処理や感圧紙による測定による画像解析が行われてきた<sup>7)</sup>。目視調査では評価者によって評価結果にばらつきがあり、定量評価に限界があった。また、従来の画像解析法では表面気泡以外のコンクリート表層の不具合、汚れや影等、表面気泡以外の状態を誤検出することなどの課題も残されていた。

そこで本研究では、表面気泡発生量の定量評価と評価結果の誤差の影響を低減するため、デジタルカメラで撮影したカラー画像のRGB値を用いて表面気泡を検出する方法を考案した。本手法を用いて、締固め過程におけるコンクリート表面の状態を透明アクリル板型枠越しに撮影した画像を解析することで、従来手法にみられた表面気泡の誤検出を低減し、締固め過程のコンクリートの表面気泡を測定・定量評価を可能とした。本研究で開発したコンクリート表面気泡判定ソフトウェア (以下、気泡判定ソフトと略記) を使用した調査、評価に先立ち、従来の手法

† 原稿受理 平成28年 3月 28日 Received Mar.28,2016

©2016 The Society of Materials Science, Japan

\* 五洋建設(株)〒112-8576東京都文京区後楽, Penta-Ocean CO., Bunkyo-ku, Tokyo, 112-8576.

\*\* 山口大学大学院〒755-8611宇部市常盤台, Grad. School of Yamaguchi Univ., Tokiwadai, Ube, 755-8611

\*\*\* 鉄道・運輸機構 (元 山口大学工学部) 〒532-0003大阪市淀川区, Japan Railway Const. Trans. and Tech. Agency, Yodogawa-ku, Osaka, 532-0003

\*\*\*\* 正 会 員 山口大学大学院〒755-8611宇部市常盤台, Grad. School of Yamaguchi Univ., Tokiwadai, Ube, 755-8611.

との調査結果を比較することで、気泡判定ソフトによる検出精度を確認した。

## 2 実験概要

### 2・1 実験装置

本実験で使用した型枠をFig.1に示す。型枠は表面気泡が発生しやすいトンネル覆工コンクリートの側壁部<sup>3), 8)</sup>を模擬し、コンクリート仕上がり面(型枠角度)を30°に傾斜させ、内空断面側に相当する型枠上面を評価対象面とした。型枠の材質は、底面を含む全5面のうち4面は実際のトンネルの覆工に用いられる移動式型枠(セントル)に使用する鋼板を、評価対象とする型枠にはコンクリート充填過程の状態を観察するため、透明で表面が平滑なアクリル板(10mm厚)を使用した。コンクリート供試体の寸法は高さ750mm、幅300mm、厚さを標準的な覆工コンクリート設計厚である300mmとした。なお、コンクリートの打込みは実験室内で行った。

### 2・2 実験方法

実験室内で、コンクリートを前述した型枠に打ち込み、供試体を作製した。1層の打込み高750mmでコンクリートを型枠上面から打ち込んだ。振動締固め過程における表面気泡の発生状況を観察するため、通常の締固め時間より長い420秒間(60秒×7回)締固めた。振動締固めには棒状バイブレータ(径28mm、周波数220~280Hz)を用い、打込み完了後は室内で気中養生し、約18時間後に脱型した。

振動締固め中は、デジタルカメラ(3264×2448画素)を用いて評価対象面を10秒間隔で撮影した。この撮影画像について表面気泡判定ソフトを用いて解析し、表面気泡を検出した。Fig.2に示すように評価領域を供試体下端から75mm上方の300×300mmとし、気泡判定ソフトにより評価領域中の表面気泡面積率(表面気泡と判定された面積/評価領域全面積)および表面気泡の個数を求めた。

### 2・3 コンクリート配合と練混ぜ方法

使用した材料の物性値をTable.1に示すとともに、実験用コンクリート配合をTable.2に示す。実トンネルに採用された覆工コンクリートの配合を参考に設定し、目標強度を21N/mm<sup>2</sup>(材齢28日)、目標スランプを15±2.5cm、空気量を4.5±1.5%とした。粗骨材の質量混合比はG<sub>1</sub>:G<sub>2</sub>:G<sub>3</sub>=4:3:3とした。コンクリートの練混ぜには、容量50Lの二軸強制練りミキサを使用した。練混ぜは、細骨材とセメントを30秒空練りした後、水を加えて60秒、その後粗骨材を加えて120秒、合計210秒間とした。

### 3 撮影画像を用いた表面気泡の検出・評価方法

これまで表面気泡の定量評価方法として、圧力測定フィルムを用いた方法<sup>6)</sup>やデジタルカメラ撮影画像の二値化(モノクロ化)処理による方法などが用いられてきた。しかし、圧力測定フィルム法はコンクリート表面の凸部に対応できないことや数mm以下の小さな気泡の誤認識、撮影画像の二値化処理法では、コンクリート表面の汚れ、色むらや影の誤認識などの課題があった。そのため測定

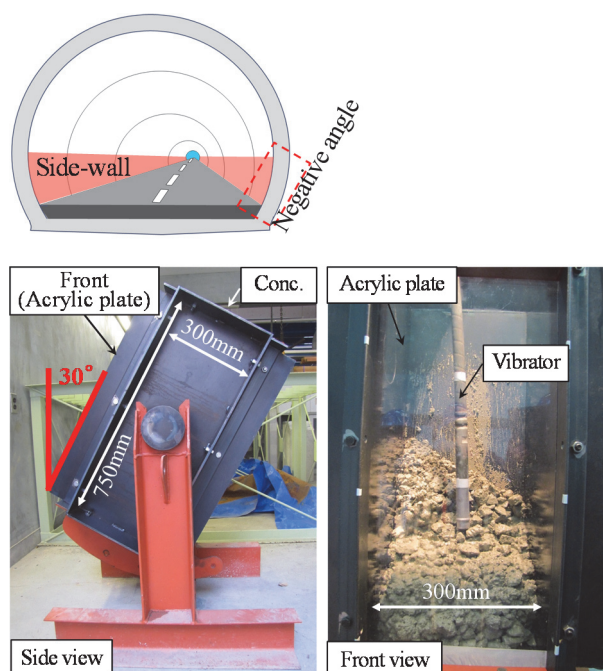


Fig.1 Steel form simulating sidewall of tunnel lining.

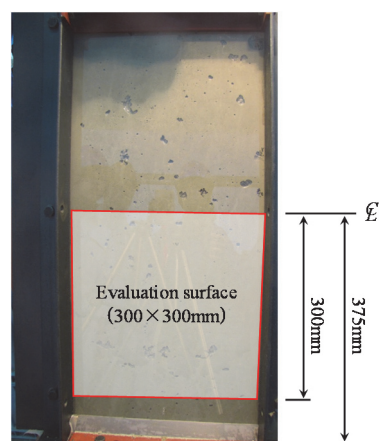


Fig.2 Evaluation area of concrete.

精度が低くなり、結果にばらつきが生じやすいものであった。本研究では、表面気泡判定の精度向上と定量評価を目的に、デジタルカメラで撮影したカラー画像を用いて表面気泡を判定する気泡判定ソフトを開発した。以下に開発した気泡判定ソフトの特徴および解析精度について概説する。

### 3・1 気泡判定ソフトの特徴

気泡判定ソフトは、デジタルカメラで撮影した評価対象面のカラー画像データについて、演算処理することで表面気泡の判定を自動的に行うソフトウェアである。表面気泡の判定には撮影画像のRGB値を用いる。撮影した評価対象面内にある典型的な表面気泡を選定し、選定した範囲内の画像の画素ごとのR値、G値、B値の平均値をそれぞれ求め、表面気泡と判定するための基準値に設定する。気泡の判定は一画素ごとに行い、基準値に対してR値、G値、B値のすべてが下回った場合、その画素を表面気泡と判定する。さらに撮影画像の画素落ち対策として、表面気泡と判定された画素が近接してある場合、表面気泡と判定された画素間の距離に応じて画素同士を結合

Table.1 Materials.

Materials	Symbol	Properties
Cement	C	Blast-furnace slag cement (B), density: 3.04g/cm <sup>3</sup>
Fine aggregate	S	Sea sand, density: 2.60g/cm <sup>3</sup>
Coarse aggregate	G <sub>1</sub>	Crushed sandstone, Max.-Min. size : 40-20mm Density: 2.72g/cm <sup>3</sup>
	G <sub>2</sub>	Crushed sandstone, Max.-Min. size : 20-15mm Density: 2.73g/cm <sup>3</sup>
	G <sub>3</sub>	Crushed sandstone, Max.-Min. size : 15-5mm Density: 2.70g/cm <sup>3</sup>
Admixture	WRA	Water reducing agent
	AE	Air entraining agent

Table.2 Mixture proportion of lining concrete.

W/C	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )							
	W	C	S	G <sub>1</sub>	G <sub>2</sub>	G <sub>3</sub>	WRA	AE
0.59	165	280	726	455	342	342	0.42	0~
							~	0.084
							3.36	

し、ひとつの表面気泡と判定した。本研究では、画素間の距離が1画素分であれば、ひとつの表面気泡と判定し、これらの画素を結合する処理を行った。

RGB値を利用することで、表面気泡の基準値を二値化処理のように二極化せず詳細に設定することができるため、撮影条件等によって異なる表面気泡の色や濃淡に

対応することができる。これにより、二値化処理では誤認識されていたコンクリート表面の汚れ、色むら、影などの表面気泡ではない要素（画素）を排除しながら表面気泡を検出できるようになった。検出精度の詳細は後述する。

### 3・2 気泡判定ソフトを用いた表面気泡の測定方法

撮影には解像度が3264×2448画素のデジタルカメラを用いた。撮影は実験室内で実施し、照明等を用いず自然光のみとした。Fig.3に示すように評価対象面からデジタルカメラのレンズまでの距離が約500mmとなるようにカメラを三脚で固定し、評価領域の横に鋼尺を設置して撮影した。撮影画像を気泡判定ソフトで読み込み、撮影画像端部のゆがみによる判定誤差を排除するため測定範囲外をマスキング処理し、自動解析した。撮影画像中の標尺の目盛りから尺度を取得することで、1画素あた

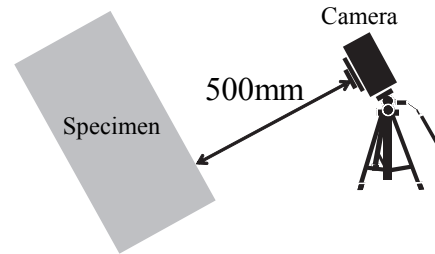


Fig.3 Photographic situation.

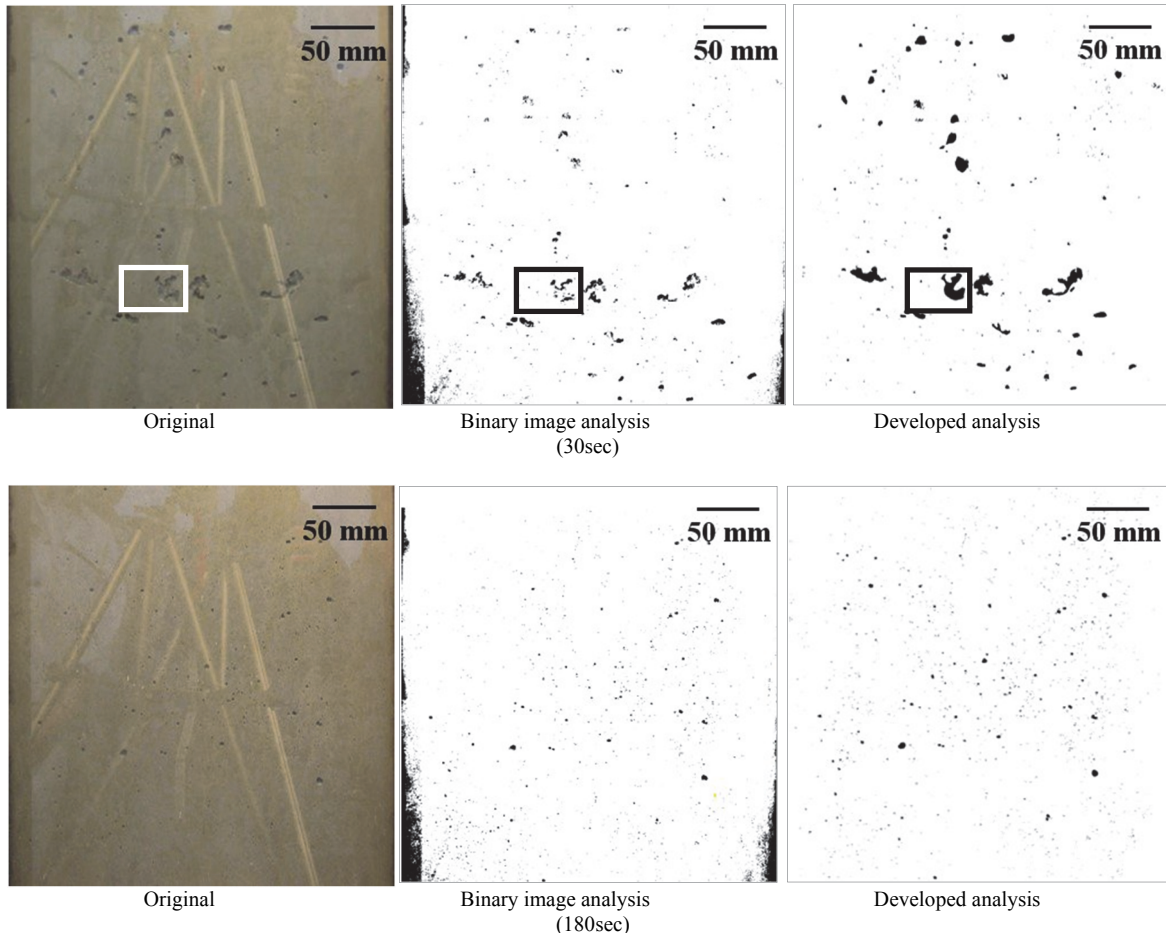
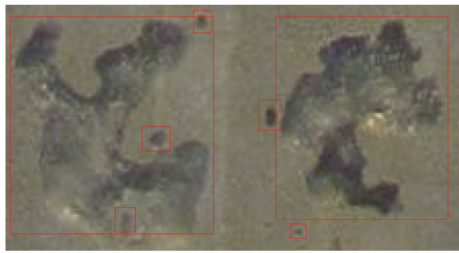
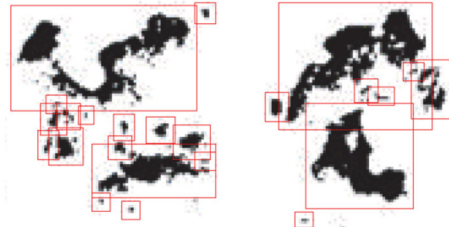


Fig.4 Comparison of image analysis.





a) Color image analysis



b) Binary image analysis  
Fig.5 Photographic situation.

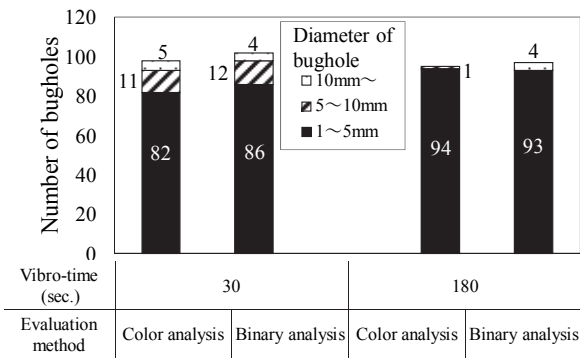


Fig.6 Number of bugholes.

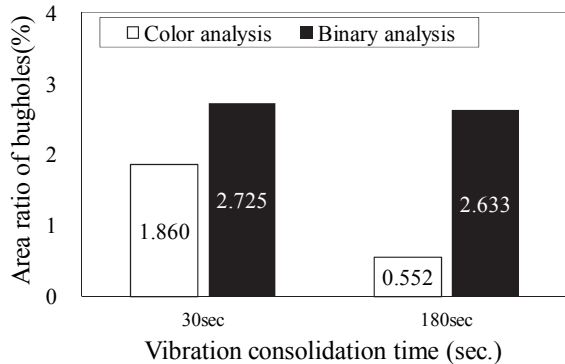
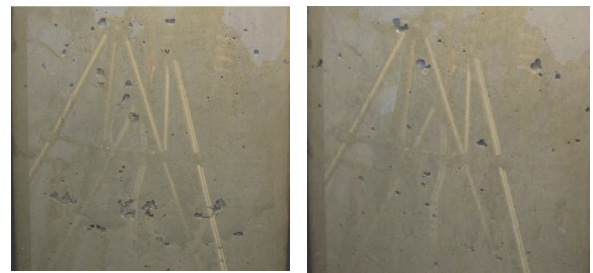


Fig.7 Number and area ratio of bugholes.

りの寸法・面積を求め、表面気泡と判定された画素の集合体の面積 (mm<sup>2</sup>) を算出した。そして取得した気泡面積 (mm<sup>2</sup>) を円換算で気泡径 (mm) に換算し、円換算直径1mm以上の表面気泡個数を気泡径別に求めた。

### 3・3 検出精度

本実験では振動締め中のコンクリート面を、透明アクリル板を介して撮影した。アクリル板を介するため、反射光など多数の色が混在することとなる。コンクリート表面気泡の評価に先立ち、開発した気泡判定ソフトを用いて締め過程におけるアクリル板越しに撮影した画像の気泡検出精度を確認した。アクリル板越しでは、



30sec



60sec



120sec



180sec



300sec



420sec

Fig.8 Photographs of bughole generation.

既報の研究<sup>6),7)</sup>で用いられた感圧紙による気泡検出ができないため、デジタル撮影画像を用いて、従来の二値化処理した画像解析 (モノクロ解析) および気泡判定ソフトによる画像解析 (カラー解析) で検出した表面気泡の数や面積 (率) を比較した。モノクロ解析では、5mm以上の気泡の検出精度を基準に、グレースケール値 (0~255) のしきい値を100に設定した。締め開始30秒後と180秒後の撮影画像およびモノクロ解析とカラー解析の結果の比較をFig.4に示す。それぞれの解析結果において黒色部分が表面気泡と判定された箇所である。締め30秒を示す画像では、180秒の画像に比べ大きな気泡がみられる。締め30秒後の画像の矩形内にある15mm程度の大きな気泡に着目し、カラー解析とモノクロ解析の結果を比較する (Fig.5参照)。カラー解析の画像から同一気泡内で影による色の濃淡が確認できる。カラー解析では、その色の濃淡の影響なく大きな気泡を一つの気泡として判定し、その周辺にある小さな気泡も別の気泡として判定している。しかしモノクロ解析では気泡内の色の濃淡によって一つの気泡を複数の気泡と判定していることが分かる。RGB値を直接用いて表面気泡を検出するカラー解析では、同一気泡内の色や影の濃淡の差異を詳細に評価できる。一方、モノクロ解析ではカラー画像 (RGB値) を二極化した白黒画像に変換して、しきい値を基に表面気泡を推定するため、カラー解析より検出精度が劣り、誤差が大きくなったものと考えられる。

180秒の画像では同一気泡内で影の濃淡が生じるほどの大きさの気泡がないことから、Fig.4において、気泡そのものの判定に、両解析法の差異がほとんどみられなかった。しかし、モノクロ解析では画像左右両端の亚克力板に反射した影を気泡として判定していることが分かる。

両解析法による気泡数および表面気泡面積率をそれぞれFig.6, Fig.7に示す。気泡数は容易に目視確認ができ、仕上がり面の見映えに影響を与えるとされる径1mm以上の気泡を対象とした。気泡総数は解析方法や締固め時間で差異は認められない。気泡径別に個数をみると、30秒では解析方法別の差異はほとんどないが、180秒ではカラー解析で5~10mmが1個、10mm以上が0個であるのに対して、モノクロ解析では5~10mmが0個、10mm以上が4個と差異がある。Fig.4の180秒の撮影画像では、目視でも径10mm以上の気泡を確認できない。Fig.7に示す表面気泡面積率では、30・180秒ともにモノクロ解析の方が大きく、特に180秒の画像ではモノクロ解析の表面気泡面積率が2.633%に対してカラー解析が0.522%と約5倍の差異が生じている。これは大きな気泡の検出誤差の影響を受けているためと思われる。コンクリートの表面気泡の判定にあたり、カラー画像を用いた気泡判定ソフトによる解析を行うことで、これまでモノクロ画像解析ではしばしばみられた影の濃淡による誤判定を低減することができ、表面気泡の判定精度が向上するものと判断される。さらに、カラー画像解析は、表面気泡を自動判定することから目視調査では困難であった評価者による検出精度のバラツキを少なくし、定量評価ができる。以上より、本研究で開発した気泡判定ソフトにおける径1mm以上の気泡検出精度を確認できた。次章ではこの気泡判定ソフトを用いて検出・解析した表面気泡の結果を基に、振動締固め過程における表面気泡の発生特性について報告する。

#### 4 振動締固め過程における表面気泡の特性

本研究の画像解析で使用した振動締固め過程の写真をFig.8に示すとともに、Fig.9とFig.10にそれぞれ気泡判定ソフトを用いて検出した表面気泡の発生総数および気泡径別発生個数を示す。Fig.9に示す表面気泡数は、締固め後120~180秒間で一旦収束傾向がみられるが、それ以降は振動締固め時間に応じて増加している。Fig.10には径1mm以上の気泡について気泡径別の発生個数をまとめた。径1~5mmの気泡は、締固め後60~180秒で127個から94個に減少し、その後増加に転じ、420秒で267個と60秒後の約2倍になり、増減傾向は気泡総数と類似している。一方、径5~10mmの気泡は、締固め時間が長くなるにつれ減少している。径10~20mmの気泡は、締固め後30秒で5個、60秒で4個発生しているが、それ以降の発生はない。このことから、Fig.9で示した表面気泡発生総数が、一旦は収束傾向にあるが締固め時間が長くなるにつれ増加する現象は、径1~5mmの気泡の影響が大きいといえよう。次に最大気泡径に着目すると、締固め開始後か

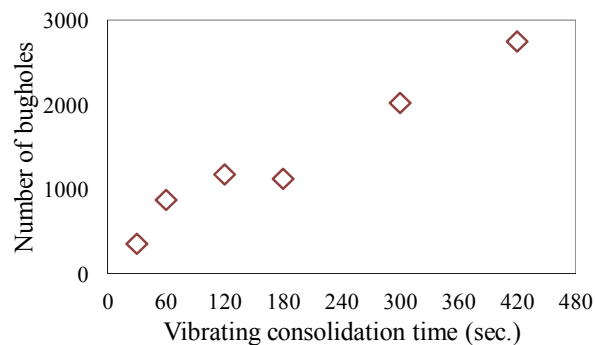


Fig.9 Number of bugholes - vibrating consolidation time.

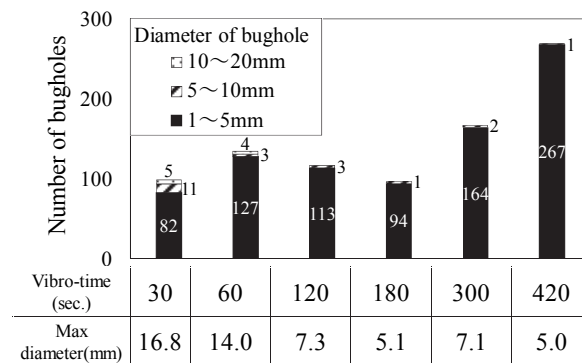


Fig.10 Number of bugholes.

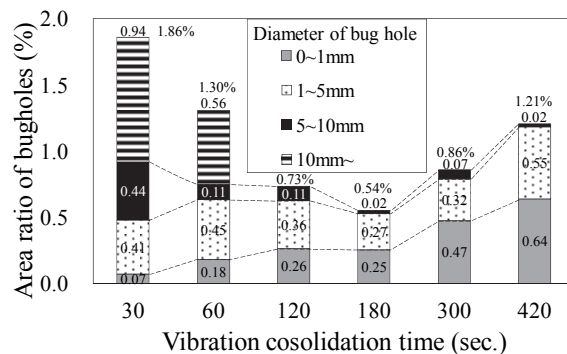


Fig.11 Area ratio of bugholes vibrating consolidation time.

ら120秒までは徐々に小さくなり、それ以降は5~10mm（本画像解析では5~7mm）の表面気泡が最大であった。なお、気泡の移動を連続的に観察したところ、気泡の移動に伴うセメントペーストによる亚克力板の汚れはほとんど生じていない。これまでの研究において、覆工コンクリート側壁部を模擬した30°傾斜させた型枠では、比較的大きな気泡よりも小さな気泡の移動速度が遅く、振動締固め過程において気泡がコンクリート内部から連続的に仕上がり面に出現することや、小さなサイズの気泡が連結して大きな気泡になることが確認されている<sup>9)</sup>。したがって、振動締固め時間が長くなるほど表面気泡発生総数が増える要因の一つとして、振動締固め過程において気泡がコンクリート内部から連続的に仕上がり面に出現することに加え、仕上がり面で移動速度が遅くなる比較的小さい気泡が残存しやすいためと考えられる。このことは、振動締固めの長期化による表面気泡の低減効果に限界があることを示唆している。

次に表面気泡面積率の経時変化をFig. 11に示す。締固め開始後30~180秒の間で1.86%から0.54%まで減少しているが、その後緩やかに増え、締固め後420秒では1.21%まで増加している。気泡径別にその傾向をみると、径0~1mmの表面気泡面積率は締固め時間が長くなるにしたがい増加している。径1~5mmの表面気泡面積率は締固め時間の経過に伴い締固め後180秒までは減少するもののその後増加に転じている。増減の差は少なく、この径を境に径5~10mmおよび10mm以上の気泡面積率は締固め時間の経過に伴い減少している。また、締固め30秒後では気泡径10mm以上の表面気泡面積率が0.94%と全表面気泡面積率の約50%を占めたが、径0~1mmの気泡面積率は0.07%と全体の3.6%と小さい。締固め時間420秒では、径10mm以上の気泡はなく、最も大きい径5~10mmの表面気泡率面積率が0.02%で全体の1.6%、径0~1mmが0.64%で全体の52.9%である。以上より、表面気泡面積率は、締固め開始後は気泡径の大きい気泡の影響を受け、締固め時間が長くなるにしたがい気泡径の小さい気泡の影響を受けることが窺える。

## 5 結 言

本研究は、コンクリート表面気泡の低減法に寄与するため、その基礎的研究として振動締固め過程における表面気泡について、デジタルカラー画像を表面気泡判定ソフトにより検出・解析することで、その発生特性の定量評価を試みたものである。本研究の範囲内で得られた結論を以下に記す。

- (1) カラー画像を用いた表面気泡判定ソフトによる表面気泡の検出は、従来の二値化処理による検出手法に比べ、画像の影や色の濃淡の誤判定を低減できた。同一気泡内で色の濃淡ができる大きさの気泡の判定精度を向上できることが確認された。
- (2) 締固め過程における表面気泡発生総数は、締固め120~180秒間で収束傾向を示したが、その後締固め時間の経過とともに増加した。これは、気泡径5mm以上の気泡は減少しているものの、径1~5mmの気泡が増加したためである。径10mm以上の気泡は締固め60秒後でなくなり、これ以降の最大気泡は径5~7mmであった。
- (3) 振動締固め過程における表面気泡面積率は、180秒までは1.86%から0.55%と約30%まで減少したが、その後増加に転じ、420秒後では1.21%となった。
- (4) 締固め開始30秒後では、気泡径10mm以上の表面気泡面積率が全体の約50%を占めるが、420秒後では気泡径10mm以上の表面気泡がなくなり、気泡径0~1mmの気泡面積率が全体の52.9%、1~5mmが45.5%を占めた。表面気泡面積率は、締固め初期では気泡径が大きい気泡、締固め時間が長くなるほど気泡径の小さい気泡の影響を受けることがわかった。

今後、効率良く表面気泡を低減するには、振動締固めに加え、移動速度が遅い5mm程度以下の小さな気泡を低減・除去することが有効と考える。

## 参 考 文 献

- 1) N. Sakata, K. Watanabe and A. Hosoda, "The improvement of the quality of the concrete structure by a new evaluation method on the surface quality using the visual test", JCI, Vol.50, No.7, pp.601-606 (2012).
- 2) Standard of the Japanese society for non-destructive inspection, NDIS, pp.6-9 (2012).
- 3) K. Katano, T. Kawanishi and R. Chikamatsu, "Technical skills for acquirement of aesthetics concrete surface", Report of Obayashi Corporation Technical Research Institute, No.76, pp.1-6 (2012)
- 4) S. Kawabe, T. Okajima, M. W. Tjaronge and M. Muto, "Proposal of horizontal vibration method for manufacturing precast concrete", Proceeding of JCI, Vol.21, No.2, pp.943-948 (1999).
- 5) I. Yoshitake, H. Komure, M. Kakehi, A. Hiraoka and Y. Inagawa. "Questionnaire investigation of surface deterioration of lining concrete in NATM tunnel", Proceedings of ASEA-SEC1, pp.221-225 (2012).
- 6) M. Hirano, T. Maeda, H. Honma, S. Harada, T. Tanase and I. Yoshitake, "Fundamental experiment for reducing bugholes on sidewall of tunnel lining concrete", Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. F1 (Tunnel Engineering), Vol.71, No.2, pp.95-105 (2015).
- 7) M. Hirano, I. Yoshitake, A. Hiraoka and Y. Inagawa, "Evaluation of air bubbles distributed on concrete surface of side wall of tunnel lining", Cement Science and Concrete Technology, No.67, pp.252-257 (2014).
- 8) T. Maeda, H. Honma, M. Hirano and I. Yoshitake, "Permeability of tunnel lining with air/water bubbles on concrete surface", Proceeding of ASEA-SEC2, pp.321-325 (2014).