

コンクリート構造物における気泡消失理論の提案と実験的検証

Disappearance of Air Bubbles in Concrete Structures (Theoretical Suggestions and Experimental Verification)

| | |
|-------|---|
| 倉田 幸宏 | 株式会社 IHI 建材工業 事業開発本部技術開発部 部長 博士(工学) 技術士(建設部門) |
| 塩 永亮介 | 技術開発本部基盤技術研究所構造研究部 課長 技術士(建設部門) |
| 木作 友亮 | 技術開発本部基盤技術研究所構造研究部 課長 博士(工学) 技術士(建設部門) |
| 黒澤 隆 | 株式会社 IHI 建材工業 土木・建築統括部土木部 課長 |
| 武藤 香穂 | 株式会社 IHI 建材工業 土木・建築統括部土木部 |
| 伊藤 祐二 | リブコンエンジニアリング株式会社 代表取締役社長 |

コンクリート構造物の耐久性については、材料が緻密化されていることが重要な要素であるが、コンクリート表面についても緻密で滑らかであることが、美観的な問題のみならず外部有害因子の内部への侵入を防ぐうえでも重要である。表層部に発生する気泡については、直ちに構造性能を損なう原因となる可能性が低いため、表面気泡に関する研究的な取組みは少ない。本稿では、コンクリート気泡の発生・消失原因について物理学的理論を提案し、これらに対して実験で検証した成果について報告する。

Regarding the durability of concrete structures, it is an important that the internal material is highly densified. Furthermore, the surface of concrete should be densified and smoothed — not only for good appearance but also to prevent materials from deteriorating. However, there is little research on reducing air bubbles on the concrete surface because it does not affect the structural performance. In this paper, the theoretical phenomenon for deforming air bubbles in concrete is proposed and verified by some experimental approaches.

1. 緒 言

コンクリート構造物は、土木分野および建築分野で重要な役割を果たしてきた。当社グループでは、① SEC (Sand Enveloped with Cement) コンクリート製造技術⁽¹⁾② 高強度繊維補強コンクリートなどの材料技術⁽²⁾③ 継手・ずれ止めなどの鋼-コンクリート複合構造技術⁽³⁾、⁽⁴⁾④ ひび割れ解析、疲労解析などの解析技術⁽⁵⁾、⁽⁶⁾を研究してきた。

一方、国内やほかの先進国においては、社会インフラの老朽化問題が顕在化するようになった。現在では、コンクリート構造物を新設する際に、耐久性が着目される時代へと変化している。こうした背景のもと、近年土木業界において、コンクリート構造物の表面気泡に注目が集まっている。国土交通省は、コンクリート構造物の品質向上を目的に、竣工した新設構造物のコンクリート表層を目視で検査していく方針を打ち出している⁽⁷⁾。こうした取組みがなされる理由を以下に述べる。

(1) コンクリートの表層部に発生する気泡は、直ちに構造性能を損なう原因となる可能性が低く、美観上

の問題だと考えられてきた。しかし、近年の研究では、コンクリート表面に気泡を発生させないことが、劣化因子の侵入抑制に有効であるとの報告がされる⁽⁸⁾ようになった。このことは、コンクリートの表面気泡が減少すれば、コンクリート構造物の耐久性が向上することを意味している。

(2) 工場でコンクリート製品を製造する際に表面気泡が発生した場合、表面気泡を埋める作業が要求される。この作業がコンクリート製品の製造コストを増加させる原因となっており、利益確保の面でも表面気泡の発生量を低減することが重要である。

当社グループでは、表面気泡の対策に関する研究実績が少なかったため、オープンイノベーションに活路を見いだす狙いで、株式会社 NejiLaw (以下、NL) と共同研究を実施することにした。本研究では、コンクリートに生じる表面気泡の消失メカニズムに関して、NL の道脇氏が提唱した物理学的理論 (以下、CB 理論)⁽⁹⁾ を実験的に検証する。本稿では、これまでに得られた CB 理論に関する成果を報告する。

2. コンクリート気泡の消失に関する理論 (CB 理論)

CB 理論の概要を以下にまとめる。本研究では、表面気泡を含むコンクリート中の気泡をコンクリートバブル（以下、CB）と呼ぶ。CB 理論では、CB の消失現象には以下の三つのメカニズムが存在するという仮説を立てている。各メカニズムの詳細は、2.1～2.3 節で詳しく述べる。

- ・ CB 消失第 1 メカニズム：変動的慣性力による低摩擦化と流動崩壊の連鎖
- ・ CB 消失第 2 メカニズム：変動的慣性力による CB の分裂・微細化
- ・ CB 消失第 3 メカニズム：キトラ古墳型 CB の共振崩壊による CB の微細化

変動的慣性力とは、コンクリートに単振動などを付与した際に生じる大きさや方向が変動する慣性力を指す。

2.1 CB 消失第 1 メカニズム：変動的慣性力による低摩擦化と流動崩壊の連鎖

CB 消失第 1 メカニズムの概要を第 1 図に示す。変動的慣性力の印加により、振動の上下ピーク間の中間において、コンクリートが瞬間的に無重力に近い状態となる。このとき、コンクリートを構成する粗骨材、細骨材、セメントペースト間にそれぞれ作用する摩擦力はほぼゼロとなる。振動のピークに達すると、これら粗骨材、細骨材、セ

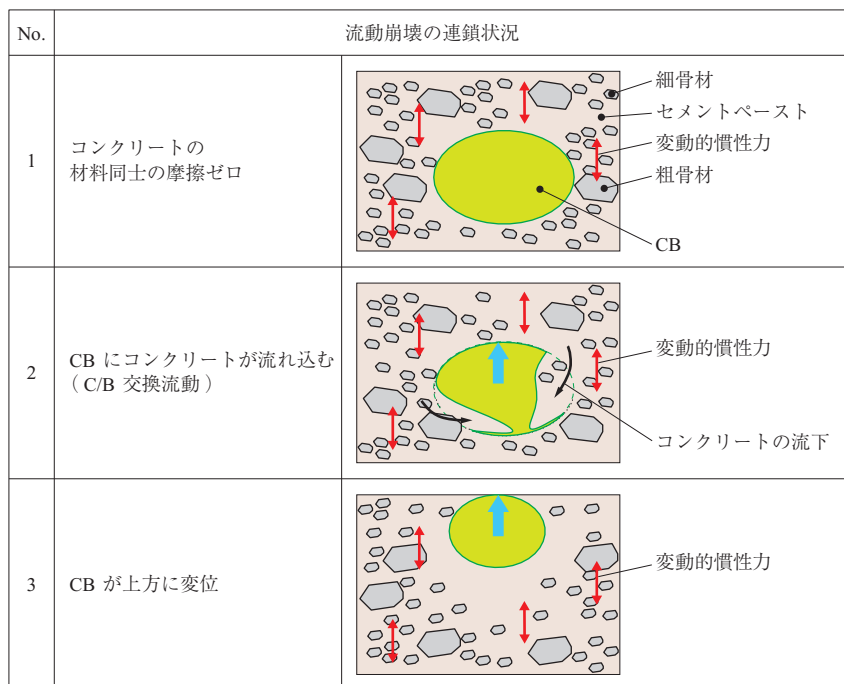
メントペーストが互いに接触し再配置される。この過程で、材料間に作用する摩擦力が最大値に向かって変化する。最大値に至る途中の段階では、より位置エネルギーが低くなる安定状態に向かって、コンクリートが液相的に流下する。これを繰り返すことにより、コンクリート内で最も密度の小さい気泡が、コンクリートの最上部まで到達して大気中へ解放される。

2.2 CB 消失第 2 メカニズム：変動的慣性力による CB の分裂・微細化

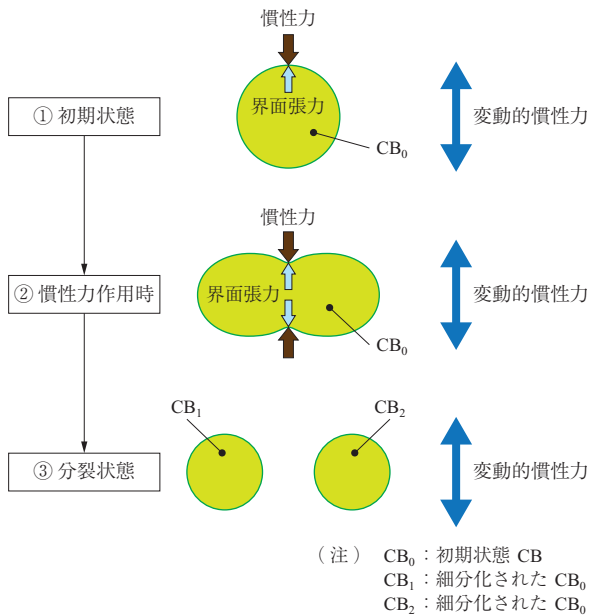
CB 消失第 2 メカニズムの概要を第 2 図に示す。変動的慣性力の印加により、CB とコンクリートとの質量差からもたらされる慣性力差によって CB を崩壊させ、二次の分裂 CB、三次の分裂 CB のように高次の CB へと分裂させる。これを継続して CB を微細化させ、所望レベルのサイズに到達させる。このとき、CB の総体積は分裂前後でほとんど変化せず、CB はコンクリート中に微細化して残存する。したがって、CB の高次化分裂を進行させれば、粗大なエントラップドエアをコンクリートにとって有用なエントレインドエア（ ϕ 約 25 ～ 250 μm ）に変化させることも理論的には可能であると考えられる。

2.3 CB 消失第 3 メカニズム：キトラ古墳型 CB の共振崩壊による CB の微細化

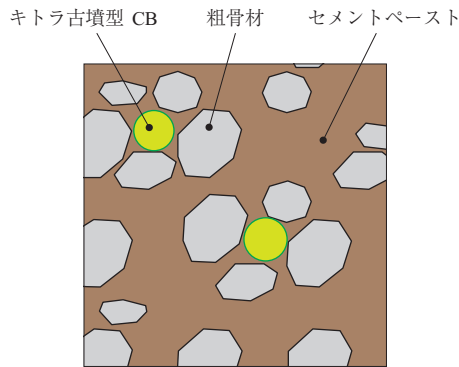
CB 消失第 3 メカニズムの概要を第 3 図に示す。CB 理論では、CB 消失の第 1 メカニズムおよび第 2 メカニ



第 1 図 CB 消失第 1 メカニズム
Fig. 1 First mechanism of CB disappearance



第2図 CB消失第2メカニズム
 Fig. 2 Second mechanism of CB disappearance



第3図 CB消失第3メカニズム
 Fig. 3 Third mechanism of CB disappearance

ズムで消失させることができないCBが存在すると仮定している。この残存CBのことを、本研究ではキトラ古墳型CBと呼ぶことにする。キトラ古墳型CBは、キトラ古墳のように複数の粗骨材で囲まれた空隙が存在し、それらの粗骨材にエアが捕捉されることによって生成されると推測される。

キトラ古墳型CBは、密度が比較的近い粗骨材同士が寄り集まり、かつこれら粗骨材と密度の近いセメントペーストをバインダ材として集合体を成している。このことから、キトラ古墳型CBは、第1メカニズムおよび第2メカニズムでは崩壊できないと考えられる。キトラ古墳型CBを消失させるメカニズムは、キトラ古墳型CBを構成する粗骨材に対して、粗骨材自身の固有振動数に近い振動を印加し、粗骨材を共振させることが有効であると予測している。

3. 小型試験体による加振試験の概要

3.1 試験目的

本試験では、2章で述べた物理学的な考察から発案されたCB理論について、特に変動的慣性力の効果を実験的に検証した。本試験では、振動条件をパラメータとした加振試験を実施し、株式会社IHI建材工業(IKK)の工場で実際に用いられているセグメント製品用のコンクリート配合に対して、最適な加振条件を見いだすことを目的とする。気泡を消失させる加振条件は、気泡の大きさに依存することが予想される。これは、さまざまな大きさの気泡を単一の加振条件で消失できないことを意味する。しかし、最初から複雑な加振条件の設定は難しいため、本試験では前工程と後工程の2段階に分けて、加振条件を設定した。

本試験は、ステップ1試験とステップ2試験に分けて行う。ステップ1試験では振幅および振動数をパラメータとした加振試験を実施し、最適な前工程の条件を見いだすことを、ステップ2試験ではステップ1試験の結果を基に加振条件を設定し、加振中に高速度カメラで撮影することで、気泡消失の現象を捉えることを目的とする。また、後工程の決定に向け、前工程と後工程を組み合わせた加振条件も行う。本研究では、こうした試験を行うために、独自の電磁式小型加振機⁽¹⁰⁾を開発した。

3.2 電磁式小型加振機の概要

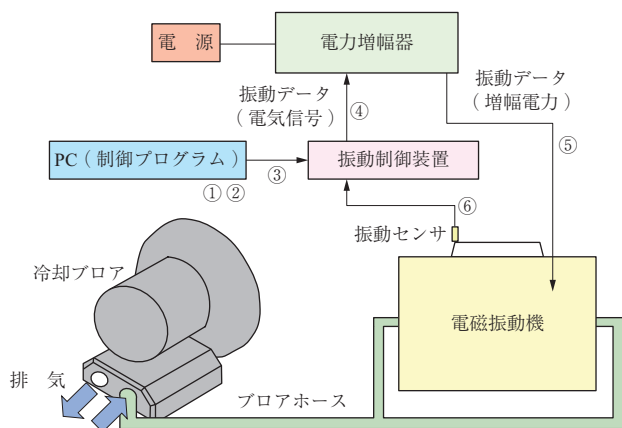
電磁式小型加振機(以下、本装置)は、電気信号を増幅し、機械的振動に変換するもので、仕様範囲内で自由に周波数、振幅、加振時間の設定ができる。第4図に本装置の全体接続関係と試験手順を示す。

本装置に付属する振動パターン設定プログラムを用いることにより、一定の振幅、周波数および加振時間に対して直線的な増減や変動がある条件においても、簡単に加振条件の設定が可能である。第1表に本装置の総合仕様を示す。本装置は、加速度1.0G未満の振動条件での試験も実施できることが特徴である。

3.3 試験方法

3.3.1 試験体

本試験では、加振中においても表面気泡の観察が可能な試験体を用いる必要がある。そこで、コンクリートを150(幅)×150(奥行き)×300(高さ)mm(いずれも内寸)の亚克力製内型枠に充填したものを試験体(第5図-(a))にした。試験体の加振機への設置は、第5図に示す試験体の設置方法に従った。加振機に、あらかじめ



試験手順

- ① 振動パターンを PC で設定
- ② 振動パターン設定プログラムで試験開始を指示
- ③ 振動制御装置に振動データを送信
- ④ 振動制御装置から電力増幅器に振動データを送信
- ⑤ 振動データに従った電力を電磁振動機に供給
- ⑥ 設定した条件下で加振

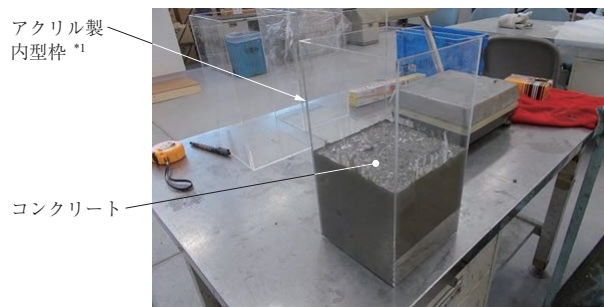
第 4 図 電磁式小型加振機の全体接続関係と試験手順

Fig. 4 System diagram of small-scale electromagnetic vibrator and test procedure

第 1 表 電磁式小型加振機の総合仕様
Table 1 Specifications of small-scale electromagnetic vibrator

| 項目 | 単位 | 仕様 |
|-----------|--------------------|---------------------|
| 周波数範囲 | Hz | 5 ~ 5 000 |
| 加振力 | N | 3 000 |
| 振幅 | mm _{p-p} | 30 |
| 最大荷重 | kg | 100 |
| 可動部質量 | kg | 6 |
| 最大加速度 | m/s ² | 無負荷 500 |
| 振動数範囲 | Hz | 1 ~ 10 000 |
| 定格出力 | VA | 5 000 |
| S N 比 | dB | 50 以上 (10 V 出力時) |
| 最大入力電圧 | V _{r.m.s} | 10 |
| 入力インピーダンス | kΩ | 10 |
| 出力インピーダンス | Ω | 2 |
| 冷却方式 | - | 強制空冷 |
| 保護回路 | - | 過電圧・過電流・オーバーヒート・過振幅 |
| 電源 | - | 3 相 200V |
| 最大消費電力 | kVA | 2.2 |
| 質量 | kg | 20 |

(a) 試験体 (アクリル製内型枠, コンクリート)



(注) *1: (内寸) 150 (幅) × 150 (奥行) × 300 (高さ) mm

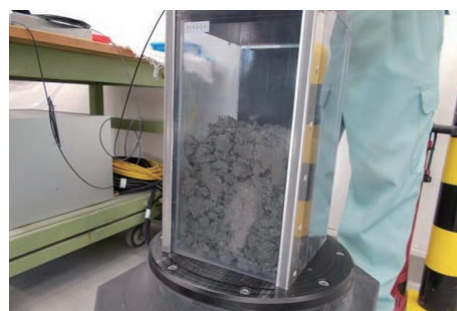
(c) 前面板・上蓋の取付け



(b) 塩化ビニル製外型枠



(d) 試験準備完了



第 5 図 試験体の設置方法
Fig. 5 Installation method of specimen

塩化ビニル製外型枠を固定しておき (第 5 図-(b)), その内部に試験体を挿入する。その後、一体となった前面板および上蓋をボルトで締結する (第 5 図-(c)) ことにより、試験体を加振機に固定する (-(d))。本試験では、アクリル製内型枠 (第 5 図-(a)) を使い捨てとすることで、試験時間が短縮できるように工夫した。

一般に、アクリル製容器にコンクリートを打設しても、容器の壁面と表面気泡の間にセメントペーストが侵入し、容器の外側から表面気泡を観察することは困難である。本試験では、アクリル容器の内側にコンクリート型枠用の剥離剤を塗布することで、加振中でも気泡が観察できるように工夫した。

3.3.2 試験ケース

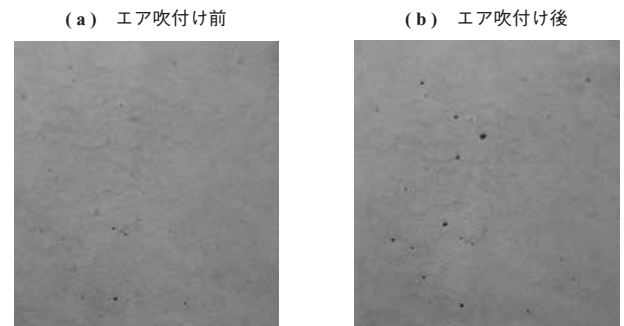
ステップ1 試験の試験ケースを第2表に示す。加振時間を30 sに固定し、振動数と振幅を試験パラメータとした。従来の締固め方法と比較するため、テーブルバイブレータ（振動数40 Hz、振幅約1.0 mm）および棒形バイブレータ（振動数235～285 Hz）を用いた試験ケースも設定した。表現を簡略化するため、以降はステップ1試験の試験体名を振動数-振幅-加速度で表す。例えば、振動数10 Hz、振幅1.0 mm、加速度0.2 Gの試験体は、10-1.0-0.2試験体、テーブルバイブレータや棒形バイブレータを用いた場合は、それぞれTV、CVと呼ぶ。

ステップ2 試験の試験ケースを第3表に示す。ステップ1試験と同様に、従来の締固め法である棒形バイブレータ（第3表の試験体No. B-3）を試験ケースに含めた。またステップ1試験の結果を踏まえ、気泡消失の効果がみられる加振条件を試験ケースとして設定した。さらに、今後に向けて、前工程と後工程で加振条件を変化させる試験も試行的に行った。

3.3.3 表面気泡の観察方法

加振後の試験体は、セメントペーストの膜が表面気泡を覆い隠している場合がある。試験体表面に形成された気泡の面積を正確に把握するため、加振後の試験体表面にエアを吹き付けて表面の膜を除去した。エア吹付けの効果を第6図に示す。

表面の処理が完了した後に、試験体の4側面をデジタルカメラで撮影した。試験体表面の撮影例を第7図に示す。加振試験時に正面を向いた面を試験体の前面、同様に



第6図 エア吹付けの効果
Fig. 6 Effect of air blowing

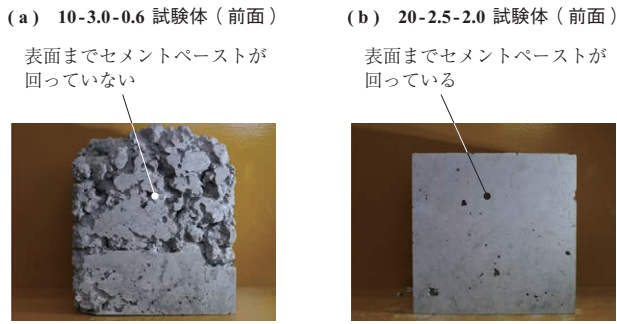
第2表 試験ケース（ステップ1）
Table 2 Test cases (Step 1)

| 項目 | 加 速 度 (G) | | | | | | | | | | | |
|------------|-----------|-----|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|
| | 1.0 | 1.5 | 2.0 | 2.5 | 3.0 | 3.5 | 4.0 | 4.5 | 5.0 | 5.5 | 6.0 | |
| 振 幅 (mm) | 1.0 | 1.5 | 2.0 | 2.5 | 3.0 | 3.5 | 4.0 | 4.5 | 5.0 | 5.5 | 6.0 | |
| 振 動 数 (Hz) | 10 | - | - | - | 0.5 | 0.6 | 0.7 | 0.8 | 0.9 | 1.0 | 1.1 | 1.2 |
| | 20 | 0.8 | 1.2 | 1.6 | 2.0 | 2.4 | 2.8 | 3.2 | 3.6 | 4.0 | 4.4 | 4.8 |
| | 30 | 1.8 | 2.7 | 3.6 | 4.5 | 5.4 | 6.3 | 7.2 | 8.2 | 9.1 | 10.0 | - |
| | 40 | 3.2 | 4.8 | 6.4 | 8.1 | 9.7 | - | - | - | - | - | - |
| | 50 | 5.0 | 7.6 | 10.0 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | 60 | 7.3 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |

(注) 加振時間：30 s

第3表 試験ケース（ステップ2）
Table 3 Test cases (Step 2)

| 試験体 No. | 加 振 条 件 | | | | | | | | | | | |
|---------|----------|----------|---------|----------|----------|----------|---------|----------|----------|----------|---------|----------|
| | 1 回目 | | | | 2 回目 | | | | 3 回目 | | | |
| | 振動数 (Hz) | 振 幅 (mm) | 加速度 (G) | 加振時間 (s) | 振動数 (Hz) | 振 幅 (mm) | 加速度 (G) | 加振時間 (s) | 振動数 (Hz) | 振 幅 (mm) | 加速度 (G) | 加振時間 (s) |
| A-1 | 20 | 4.0 | 3.2 | 30 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| A-2 | 40 | 1.0 | 3.2 | 30 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| A-3 | 30 | 3.0 | 5.4 | 30 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| B-1 | 10 | 6.0 | 1.2 | 15 | 20 | 6.0 | 4.8 | 15 | - | - | - | - |
| B-2 | 10 | 6.0 | 1.2 | 15 | 40 | 3.0 | 9.7 | 15 | - | - | - | - |
| B-3 | 棒形バイブレータ | | | | - | - | - | - | - | - | - | - |
| C-1 | 20 | 6.0 | 4.8 | 10 | 30 | 3.0 | 5.4 | 20 | - | - | - | - |
| C-2 | 30 | 4.0 | 7.2 | 5 | 30 | 2.0 | 3.6 | 25 | - | - | - | - |
| C-3 | 30 | 2.0 | 3.6 | 10 | 30 | 4.0 | 7.2 | 2 | 30 | 2.0 | 3.6 | 18 |



第 7 図 試験体表面の撮影例
Fig. 7 Example of photographing of specimen surface

左側面、背面、右側面と定義する。本研究では、表面気泡を定量的に評価するため、表面積に占める気泡の総面積の割合を気泡面積率と定義する。加速度が 1.0 G に満たない試験体は、表面までセメントペーストが回っておらず、気泡面積率の算定が困難であった。そこで、10-2.5-0.5、10-3.0-0.6、10-3.5-0.7、10-4.0-0.8、10-4.5-0.9 試験体の 5 体は、気泡面積率算定の対象から除外した。

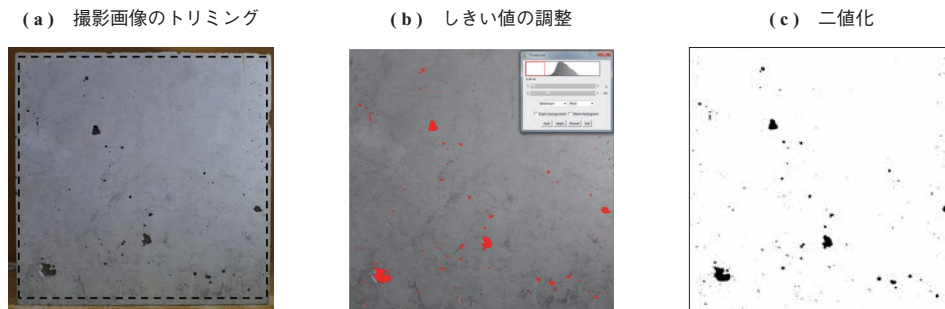
気泡面積率の算定方法を第 8 図に示す。気泡面積率の算定に当たっては、撮影画像をトリミング（第 8 図 - (a)）

し、8 bit グレースケール画像に変換後、しきい値の調整（-(b)）によって画像を二値化（-(c)）した。

3.3.4 コンクリート

本試験に用いるコンクリートの示方配合を第 4 表、使用材料を第 5 表にそれぞれ示す。実際にセグメント工場で使われている圧縮強度 42 N/mm² の中小口径セグメント用の配合を採用した。コンクリートの練混ぜは、20℃の一定した環境で行った。また、コンクリートの練上り温度が 20℃程度となるように材料の温度を調整した。

事前に行った試験練りの結果を第 6 表に示す。フレッシュ性能が所定の管理値（スランプ 21.0 ± 2.0 cm、空気量 2.0 ± 1.5%）内となる高性能減水剤の添加量を求めたところ、単位セメント量の 0.925% が適当であることが確認された。したがって 0.925% の添加量を基本とし、試験日ごとのコンクリートのフレッシュ性状を鑑みて、高性能減水剤の添加量を微調整した。また、スランプの経時変化から判断し、スランプが低下しない 45 分間を同一バッチのコンクリートを使用できる時間の目安とした。



第 8 図 気泡面積率の算定方法
Fig. 8 Method for calculating bubble area ratio

第 4 表 コンクリートの示方配合
Table 4 Specified mix proportion of concrete

| スランプ <i>SL</i> (cm) | 空気量 <i>Air</i> (%) | 水結合材比 <i>W/C</i> (%) | 細骨材率 <i>s/a</i> (%) | 単位量 (kg/m ³) | | | | | |
|---------------------------|--------------------------|----------------------------|---------------------------|--------------------------|------------------|------------------|-----------------|-----------------|-----------------------------|
| | | | | 水 <i>W</i> | セメント <i>C</i> | 混和材 <i>SA</i> | 細骨材 <i>S</i> | 粗骨材 <i>G</i> | 減水剤 <i>A_d</i> |
| 21.0 ± 2.0 | 2.0 ± 1.5 | 36.0 | 46.0 | 155 | 430 | 0 | 832 | 985 | 3.98 |

第 5 表 コンクリートの使用材料
Table 5 Materials of concrete

| 区分 | 記号 | 種類・銘柄 | 密度 (g/cm ³) | 備考 |
|------|----------------------|--------------|----------------------------|--------|
| セメント | <i>C</i> | 普通ポルトランドセメント | 3.16 | |
| 細骨材 | <i>S</i> | 砕砂 | 2.63 | 茨城県桜川産 |
| 粗骨材 | <i>G</i> | 砕石 2005 | 2.66 | 茨城県桜川産 |
| 混和剤 | <i>A_d</i> | 高性能減水剤 | 1.00 | 8000SM |

(注) 圧縮強度 42 N/mm² の中小口径セグメント用の配合を採用

第 6 表 試験練りの結果
Table 6 Results of test mixing

| No. | 高性能減水剤 添加量 | スランブ (cm) | 空気量 (%) | コンクリート練上り温度 (℃) | 備 考 |
|-----|----------------|--|------------|--|-------------------------|
| 1 | C×1.0% | 24.0 | — | 19.2 | A _d 過多, 分離傾向 |
| 2 | C×0.85% | 15.5 | — | 19.8 | |
| 3 | C×(0.85+0.05)% | 21.0 | 1.6 | 19.0 | 0.05%後添加 |
| 4 | C×0.925% | 21.5 (0 min) 20.5 (30 min) 21.5 (45 min) | — | 19.6 (0 min) 18.8 (30 min) 18.3 (45 min) | 経時変化を確認 |

4. 小型試験体による加振試験の結果

4.1 圧縮強度

試験日ごとのコンクリートフレッシュ性状および材齢 28 日における平均圧縮強度を第 7 表に示す。いずれも設計基準強度の 42 N/mm² を上回ることが確認された。

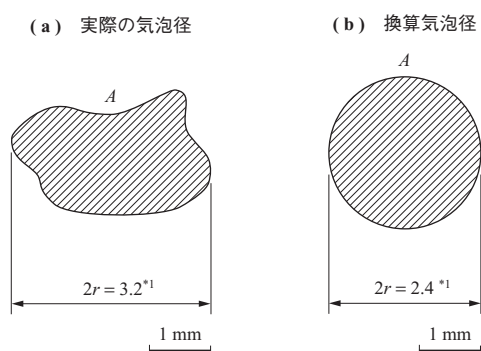
4.2 評価方法

表面気泡の観察方法 (3.3.3 項) に従い, 表面気泡の数および面積を算出した。次に, 気泡面積を真円換算して気泡径を算定した (第 9 図)。こうして求めた気泡径を 1.0 ~ 5.5 mm の範囲で 0.5 mm ごとに分類し, 各区分における気泡数を求めた。φ5.5 mm を上回る気泡も観察されたが, 絶対数が少なかったため, φ6.0 ~ 10.0 mm の気泡は一括して計上した。気泡径別を第 8 表に示す。

第 10 図に気泡径の算出範囲を示す。一部の試験体で

第 7 表 フレッシュ性状および平均圧縮強度 (材齢 28 日)
Table 7 Flesh properties and compressive strength (at the age of 28 days)

| フレッシュ性状 | | | 平均圧縮強度 (N/mm ²) 材齢 28 日 |
|--------------|------------|---------------|---|
| スランブ (cm) | 空気量 (%) | 高性能減水剤 (%) | |
| 22 | 1.3 | C×0.925 | 75.6 |
| 19 | 1.9 | C×0.925 | 70.0 |
| 19 | 2.0 | C×1.000 | 77.3 |



(注) *1: $2r = 2\sqrt{A/\pi}$
A: 気泡面積

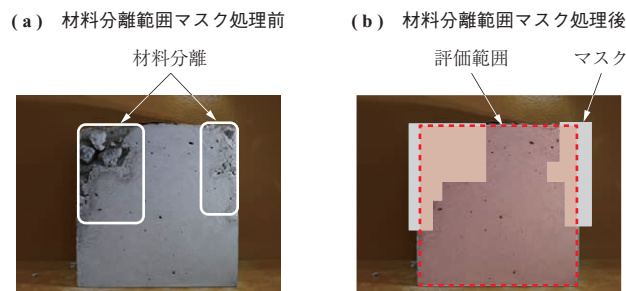
第 9 図 気泡径の算定例

Fig. 9 Calculation of the air bubbles diameter

第 8 表 気泡径別

Table 8 Grade of air bubbles diameter

| No. | 気泡径別 (mm) |
|-----|----------------------|
| 1 | $1.0 \leq 2r < 1.5$ |
| 2 | $1.5 \leq 2r < 2.0$ |
| 3 | $2.0 \leq 2r < 2.5$ |
| 4 | $2.5 \leq 2r < 3.0$ |
| 5 | $3.0 \leq 2r < 3.5$ |
| 6 | $3.5 \leq 2r < 4.0$ |
| 7 | $4.0 \leq 2r < 4.5$ |
| 8 | $4.5 \leq 2r < 5.0$ |
| 9 | $5.0 \leq 2r < 5.5$ |
| 10 | $5.5 \leq 2r < 6.0$ |
| 11 | $6.0 \leq 2r < 10.0$ |



第 10 図 気泡径の算出範囲

Fig. 10 The target area of the air bubbles diameter calculation

は, 加振中に材料分離が生じた (第 10 図 - (a))。こうした試験体は, 画像の材料分離が生じた範囲にマスク処理を施し, その領域を評価対象から除外 (第 10 図 - (b)) した。材料分離の有無は, 目視観察で判断した。これにより, 評価範囲が試験体ごとに異なるため, 本研究では 100 mm 角当たりの気泡数換算で評価した。また, 気泡面積率は 4 側面の平均値を採用した。

4.3 結果および考察

4.3.1 気泡面積率および気泡数と加速度の関係

ステップ 1 試験とステップ 2 試験の結果から, 気泡面積率または気泡数と加速度との関係の評価した。このとき, TV・CV 試験体と試験中に加振条件を変化させた試験体は評価対象から除いた。100 mm 角当たりの気泡数と

加速度の関係を第 11 図に、気泡面積率と加速度の関係を第 12 図に示す。気泡数または気泡面積率と加速度との関係について相関係数を求めた結果、ともに明らかな相関関係が認められた（気泡数 $R^2 = 0.7133$ 、気泡面積率 $R^2 = 0.8708$ ）。したがって、加速度を大きくするほど、気泡数は減少し、気泡面積率が小さくなる傾向が判明した。ただし、本試験に使用したコンクリートは、5.0 G 以上の加速度を加えると材料分離を呈する傾向がみられた。以上の結果によって、表面気泡の発生量を最小化するには、材料分離が生じない範囲で、最大の加速度で加振すればよいことが明らかとなった。

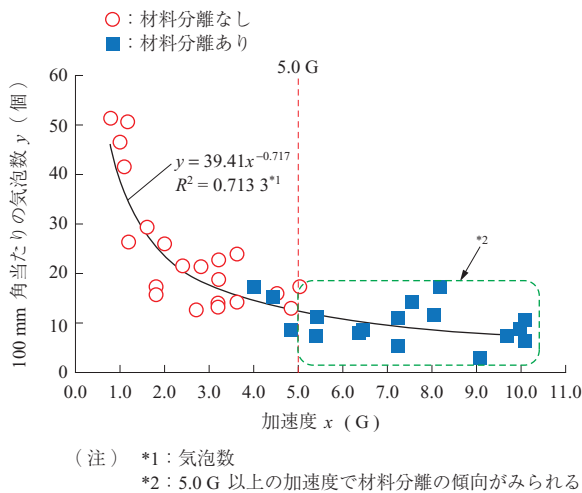
また、NL が独自で行った実験⁽⁷⁾と本試験の結果を比較したところ、表面気泡の面積率と加速度との関係は同一の傾向を示したが、回帰曲線に差異がみられた。これらか

ら、コンクリートの配合が異なれば、最適な加振条件も変化することが示された。

4.3.2 CB の分裂・微細化

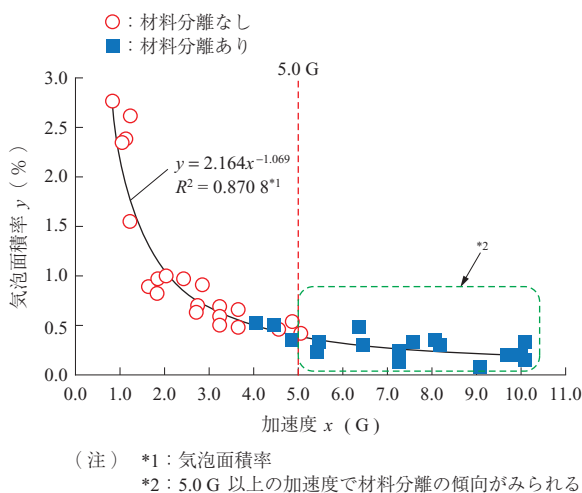
振幅 1.5 mm の加振条件に着目し、気泡面積率を第 13 図に、100 mm 角当たりの気泡数を第 14 図に示す。本グラフは、気泡径の区分ごとに積み上げた棒グラフで表現した。2.7 G、4.8 G、7.6 G と加速度が大きくなるにつれて、総気泡数は増加（第 14 図）し、逆に気泡面積率は減少（第 13 図）する。特に、最小径である $1.0 \leq 2r < 1.5$ mm の気泡数の増加が顕著である。こうした現象が生じるのは、加速度の印加で気泡が細分化する第 2 メカニズム（CB の分裂・微細化）（2.2 節）による影響であると推察される。

しかし、振幅 1.5 mm 以外の加振条件では、加速度が大きいほど気泡面積率・総気泡数ともに減少する結果となった。CB の分裂・微細化現象を明確に捉えることが、今後の課題である。



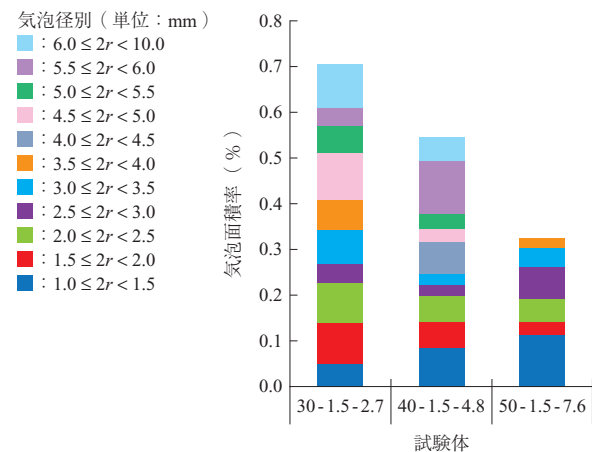
第 11 図 100 mm 角当たりの気泡数と加速度の関係

Fig. 11 The number of air bubbles and acceleration at an area of 100 × 100 mm



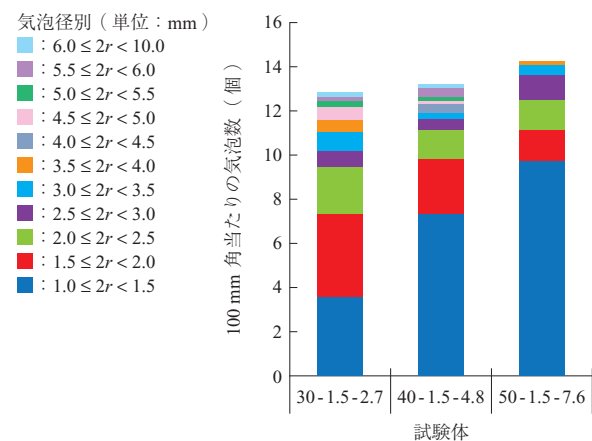
第 12 図 気泡面積率と加速度の関係

Fig. 12 Area ratio of air bubbles and acceleration



第 13 図 振幅 1.5 mm の気泡面積率（気泡径別）

Fig. 13 Area ratio of air bubbles at an amplitude of 1.5 mm



第 14 図 振幅 1.5 mm の気泡数（気泡径別）

Fig. 14 The number of air bubbles at 1.5 mm of the amplitude

4.3.3 高速度カメラによる撮影

ステップ2 試験では、限られた試験体数ではあるが、加振中の試験体を高速度カメラで撮影し、目視で確認できない気泡の挙動を観察した。第15図に本装置およびCVの比較を示す。映像を分析した結果、以下の現象が観察された。

- (1) 基本的に、フレッシュコンクリートに振動を与えると、気泡が上方に移動してコンクリートの上面から抜ける。このとき、気泡が分裂・結合を繰り返したり、左右にふらついたりしながら上方へ移動する。気泡が左右に移動するのは、試験体内の粗骨材を避けながら浮上したためだと考えられる。
- (2) 本装置で振動を付与した場合、表面の気泡が試験体の内部に移動する様子が観察された。試験体内部の気泡分布を把握するため、X線CT(Computed Tomography)法によって内部気泡を確認する予定である。
- (3) 気泡径が大きくなるほど、浮上する速度が大きくなる傾向がみられた。これは、気泡径が大きくなるほど比表面積が小さくなり、浮力に対するセメントペーストの粘性抵抗の影響が相対的に小さくなったためだと考えられる。

以上のように、高速度カメラを用いたことにより、加振中の気泡の挙動および加振方法(棒形バイブレータ、本装置)による差異が確認できた。

4.3.4 材料分離

本研究では、IKKの工場で使用されている中流動コンクリートの配合を用いた。本コンクリートは粘性が高く、一般的なコンクリートに比して材料分離に対する抵抗性を

もっている。しかし本試験では、加速度の大きい試験体で、材料分離(第10図)や粗骨材の露出が確認された。また、加振条件によっては、試験体の上面に粗骨材が飛び出し、跳ね回る現象が確認できた。これは、粗骨材の固有振動数と加振試験の振動が近いことにより、共振が生じたためだと考えられる。このことは、粗骨材の固有振動数に近い加速度で加振すれば、キトラ古墳型CBが破壊できる可能性を示唆し、加振時間は数秒でよいと考えられる。

4.3.5 前工程、後工程の加振条件の変更

第3表に示したC-1~C-3試験体では、30sの加振中に加振条件を変化させた。C-2およびC-3試験体は、基本の加速度を3.6Gとし、キトラ古墳型CBの消失を目的として大きな加速度(7.2G)を数秒間与えた。これらでは、多くの気泡の消失が確認できた。しかし、加速度を一定としたC-1試験体と大きな加速度を与えたC-2およびC-3試験体が同様の結果を示したため、数秒間大きな加速度を与えた影響を正確に把握することはできなかった。

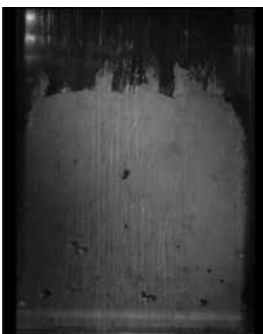
5. 結 言

本研究では、開発した電磁式小型加振機を用いてフレッシュコンクリートの加振試験を実施し、CB理論に基づいたフレッシュコンクリートに変動的慣性力を付与する効果を実験的に検証した。この結果、CB理論が表面気泡の消失に有効であることが確認できた。本研究で得られた成果を以下に整理する。

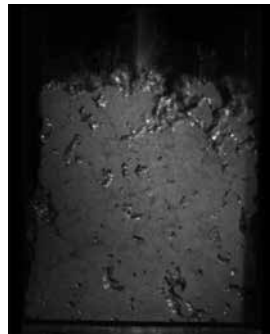
- (1) 気泡面積率、気泡数および加速度に相関関係が確認された。
- (2) 5.0G以上の加速度を与えた場合、コンクリートが材料分離する傾向がみられた。
- (3) (1)および(2)の結果から、表面気泡の量を最小化するには、材料分離が生じない範囲において、最大の加速度で加振すればよいことが明らかとなった。
- (4) コンクリート配合の違いにより、最適な加振条件が変化する可能性が示された。
- (5) CB理論に基づく加振条件を与えた場合、加振中に気泡がコンクリート内部に移動する現象が観察された。この影響を明らかにするため、今後X線CT法によって、内部の気泡分布を確認する予定である。

本研究における小型供試体振動試験は、2017年4月に当社横浜事業所内に開所したIKK研究試験センターで実

(a) 電磁式小型加振機
(40-1.0-3.2)



(b) 棒形バイブレータ*



(注) *1: 第3表の試験体 No. B-3

第15図 電磁式小型加振機と棒形バイブレータの比較
Fig. 15 Comparison between the small-scale electromagnetic vibrator and the bar-shaped internal vibrator

施した。本センターは、コンクリート専用の実験設備であり、さまざまな実験装置やアルカリ排水の処理設備を有している。

本稿では、CB理論の検証を目的とした小型供試体振動試験の結果を中心に報告した。しかし当社では、CB理論を実機に適用する研究も行っている。これは、IKKのシールドセグメント製造工場において、表面気泡の発生量を低減するためのコンクリート打設装置を開発するものである。CB理論を実機セグメントに適用した打設試験の結果については、別の機会に報告する予定である。

— 謝 辞 —

本稿では、コンクリート構造物における気泡消失理論の提案と実験的な検証について報告した。これらは、2017年4月～2019年3月に実施した研究「プレキャストコンクリート差別化技術の開発」の成果の一部を引用したものである。

本研究の中核を担っていただいた株式会社 NejiLaw 代表取締役社長の道脇裕氏には、研究開発における多くの課題のブレイクスルーのみならず、本稿に対してもご指導・ご助言をいただきました。ここに深く感謝いたします。

参 考 文 献

- (1) 塩永亮介, 戸田勝哉, 伊藤祐二, 高橋晴香: SEC工法によるコンクリートの性能改善と微細構造の分析, コンクリート工学(テクニカルレポート), Vol. 53, No. 10, 2015年10月, pp. 874 - 881
- (2) 塩永亮介, 山口隆一, 今村紅音, 仲村 篤, 上田和哉: 高強度繊維補強コンクリートの路線拡幅工事への適用, IHI 技報, Vol. 50, No. 2, 2010年6月,

pp. 85 - 95

- (3) 木作友亮, 藤山知加子: 正負交番載荷および疲労載荷を受ける孔あき鋼板ジベルのせん断ずれ挙動と破壊性状, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol. 72, No. 5, 2016年, pp. II_56 - II_68
- (4) 木作友亮, 保阪拓実, 藤山知加子: X線CT法を用いた孔あき鋼板ジベルのせん断抵抗メカニズムの検証, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol. 73, No. 1, 2017年, pp. 146 - 164
- (5) 塩永亮介, 師山 裕, 倉田幸宏, 田沢雄二郎: コンクリート構造物施工時のひび割れ解析技術, 石川島播磨技報, Vol. 44, No. 2, 2004年
- (6) 木作友亮, 藤山知加子: 合成床版の実験再現解析によるずれ止め分散モデル化手法の検証, コンクリート工学年次論文集, Vol. 39, No. 2, 2017年7月, pp. 1045 - 1050
- (7) 国交省/現場打ちコンクリの初期欠陥抑制・表層品質向上へ/施工中にポイント確認: 日刊建設工業新聞社, <https://www.decn.co.jp/?p=102333>, (参照 2018-12-03)
- (8) 吉田祐麻, 藤岡彩永佳, 渡邊賢三, 坂井吾郎, 石田哲也: 実構造物を対象とした熱可塑性樹脂シートの表面気泡低減メカニズムに関する一考察, 平成30年度土木学会全国大会 第73回年次学術講演会, 2018年8月, pp. 489 - 490
- (9) 道脇 裕: 生コンクリートの気泡の微細化方法, 特開 2018-145089, 2017年2月27日
- (10) 道脇 裕: 変動的慣性力付与装置, 特願 2018-100469, 2018年5月25日