

# 論文 コンクリートの振動締固め時における打込み面の輝度値の変化に基づく締固め程度の評価に関する基礎的研究

渡邊 隼平\*1・品川 大成\*2・上村 健二\*3・村上 祐貴\*4

**要旨**：本研究では、打込み面のコンクリートの輝度値から、コンクリートの締固め程度を定量的に評価することを目的として、これまで未検討であったバイブレータの挿入深さや締固め回数等を実験変数とし、締固め中の打込み面の輝度値の変化とコンクリートの締固め程度の関係について吸水率を指標として検討した。その結果、締固め振動時間に加えて、バイブレータの挿入深さや締固め回数が打込み面の輝度値の変化に影響を及ぼすことを明らかとした。また、締固め程度の指標として用いた吸水率と輝度値には相関性が認められた。

**キーワード**：締固め, XYZカメラ, 打込み面の輝度, 吸水率

## 1. はじめに

コンクリートの打込み時における締固め作業は、水密性、耐久性、美観等のコンクリート構造物の品質に大きく影響する。土木学会コンクリート標準示方書において、締固め完了の目安は「コンクリートとせき板との接触面にセメントペーストの線が現れること」や「コンクリートの容積が減っていくのが認められなくなり、表面に光沢が現れてコンクリート全体が均一に溶け合ったように見える」といった定性的な記述にとどまっている<sup>1)</sup>。上述したようにコンクリートの締固めは、コンクリート構造物の品質を左右するため、客観的かつ定量的な締固め判断手法の確立が、今後のコンクリート構造物の品質向上に必要不可欠である。

このような背景から近年では加速度センサを型枠内に設置して、バイブレータから内部に伝播される振動の大きさから、締固め程度を判定する手法が提案されている<sup>2)</sup>。この方式は、フレッシュコンクリート内部に加速度センサを設置する必要があるため、計測にはセンサを設置するための時間を要すること、センサは基本的に残置のため、再利用出来ないことが課題である。これに対し、露木らは、挿入式の加速度センサプローブを挿入することで、締固め時におけるコンクリート内部での振動加速度を直接、簡便に計測できる方法を提案している<sup>3)</sup>。また平田らは、締固め管理手法には簡便性や汎用性が必要であることから、棒状バイブレータの加速度変化から、推定したコンクリート中の加速度分布を用いて、締固め範囲や締固め完了時間を推定する手法を提案している<sup>4)</sup>。このように、コンクリートの締固め程度の評価に際しては、バイブレータから伝播されるコンクリート中の振動

を各種センサで直接計測する手法が多い。

一方、著者らは、打込み面の輝度値の変化から締固め程度を評価することを試みている<sup>5)</sup>。これは、バイブレータによるコンクリートの締固めは液状化によってコンクリートの自重による流動と沈下の結果であることに基づいている<sup>6)</sup>。すなわち、締固めによって、コンクリートが液状化すれば、密度の小さい気泡や水は上昇し、表面の輝度値が増加することとなる。著者らの既往の研究では、締固め経過時間に応じて打込み面の輝度が増加することを示したが、この研究では振動時間や配合を実験変数として、打込み面の輝度値の変化について検討が行われており、バイブレータの挿入深さや、締固め回数の影響については未検討であった。加えて、締固め中の輝度値の増加率と圧縮強度について関連付けを行ったが、圧縮強度は締固め程度に対して冗長性を有しており、一義的な関係は認められなかった。

そこで、本研究では、打込み面のコンクリートの輝度値から、コンクリートの締固め程度を定量的に評価することを目的として、これまで未検討であったバイブレータの挿入深さや締固め回数等を実験変数として、締固め中の打込み面の輝度値の変化とコンクリートの締固め程度の関係について検討した。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体

試験体は、図-1に示すように長さ 350mm×幅 150mm×高さ 200mmの角柱試験体である。試験体は、各実験パラメータにつき3体作製した。3体の試験体は同一バ

\*1 長岡工業高等専門学校 環境都市工学科 (学生会員)

\*2 長岡工業高等専門学校 電子制御工学科

\*3 長岡工業高等専門学校 電子制御工学科准教授 博(工)

\*4 長岡工業高等専門学校 環境都市工学科准教授 博(工) (正会員)

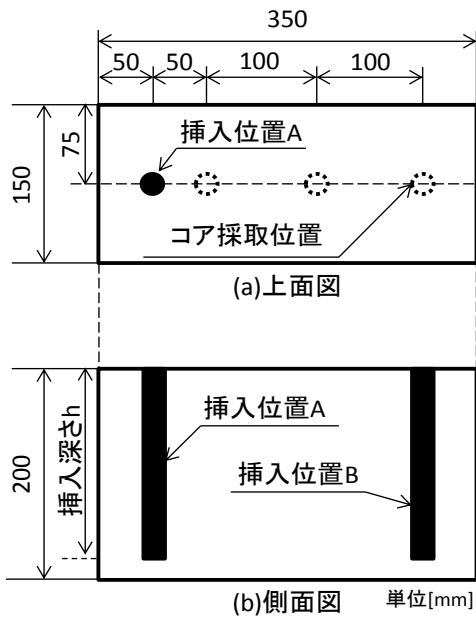


図-1 試験体概要

ッチで作製することから、所有する練混ぜミキサの容量上の制約を受け、試験体は比較的小型である。コンクリートの示方配合を表-1に示す。目標スランブは12cmであり、セメントには、普通ポルドランドセメントを使用した。試験体は材齢1日の時点で脱型し、脱型後48日間気中養生(室温約20℃)を行った。

## 2.2 実験パラメータ

実験パラメータは表-2に示すように、バイブレータによる振動時間、バイブレータの挿入深さおよび挿入回数である。振動時間は5秒、10秒、60秒の3水準、挿入深さhは50mm、100mm、190mmの3水準、締固め箇所は1箇所および2箇所とした。

## 2.3 締固め方法

直径28mm、振動数12500~15000r.p.mの電棒タイプのバイブレータを、図-1に示すように、締固め箇所が1箇所の場合は挿入位置Aに、2箇所の場合は挿入位置A→Bの順に所定の深さまで鉛直に挿入し、所定の時間加振した。なお、締固め後の打込み面はバイブレータによる締固め程度を評価するため、打込み面のコテによる均しは行っていない。

## 2.4 締固め中のコンクリート表面の色情報の測定

打込み面の色や明るさの測定にはXYZカメラを使用した。XYZカメラで取得されるX、Y、Z値は色との関連が分かりにくいため、本研究ではxyY表色系を用いることとする。ここで、Y値は反射輝度、x値とy値はXYZ値の総和に対するX値とY値の割合を表したものであり、色度情報を示す。なお、著者らの既往の研究<sup>5)</sup>において、締固め中の色度変化(x値,y値の変化)は小さく、本実験においても同様の傾向を示したことから、Y値のみを取り扱うこととする。締固め中の打込み面をXYZカメラで

表-1 示方配合

| 粗骨材の最大寸法 [mm] | 水セメント比 [%] | 細骨材率 [%] | 空気量 [%] | スランブ [cm] | 単位量[kg/m <sup>3</sup> ] |      |     |      |       |
|---------------|------------|----------|---------|-----------|-------------------------|------|-----|------|-------|
|               |            |          |         |           | 水                       | セメント | 細骨材 | 粗骨材  | AE減水剤 |
| 25            | 55.0       | 42.0     | 4.5     | 12        | 162                     | 294  | 774 | 1077 | 2.94  |

表-2 実験パラメータ

| 試験体名     | 振動時間 (s) | 挿入深さ h(mm) | 締固め箇所 |
|----------|----------|------------|-------|
| 0-0-0    | 0        | 0          | 0     |
| 5-50-1   | 5        | 50         | 1     |
| 10-50-1  | 10       | 50         |       |
| 60-50-1  | 60       | 50         |       |
| 5-100-1  | 5        | 100        |       |
| 10-100-1 | 10       | 100        |       |
| 60-100-1 | 60       | 100        |       |
| 5-190-1  | 5        | 190        |       |
| 10-190-1 | 10       | 190        |       |
| 60-190-1 | 60       | 190        |       |
| 5-50-2   | 5        | 50         |       |
| 10-50-2  | 10       | 50         |       |
| 60-50-2  | 60       | 50         |       |
| 5-100-2  | 5        | 100        |       |
| 10-100-2 | 10       | 100        |       |
| 60-100-2 | 60       | 100        |       |
| 5-190-2  | 5        | 190        |       |
| 10-190-2 | 10       | 190        |       |
| 60-190-2 | 60       | 190        |       |



図-2 XYZカメラによる打込み面の撮影

インターバル0.25秒で撮影し、打込み面の色情報を取得する。図-2に示すように、3体の試験体を順番に所定の位置まで移動させ、締固め中の打込み面を撮影した。また、締固め終了後は、2分おきに10分間撮影を行った。なお、表-2に示した試験体10-50-1は、測定に不具合があり、試験体数は2体である。

## 2.5 コア試験体の吸水率試験

締固めによってコンクリートは密実になるため、締固め程度と直接的に関係する物理量は密度であると考えられるが、本研究では最終的に、試験体の3次元な締固め程度の評価を行うために試験体から小径コアを複数採取して締固め程度を評価した。密度を指標とした場合、算出には試験体高さが必要となるため、小径コアの切断に高い精度が要求される。そのため、本研究では、締固め程度を評価する指標として、吸水率を用いることとした。材齢48日の時点で図-1(a)に示すように、バイブレータの挿入位置Aから50mm、150mm、250mm離れた

表-3 コンクリートのフレッシュ性状

| 試験体名     | 目標        |         | 測定結果      |         |             |
|----------|-----------|---------|-----------|---------|-------------|
|          | スランプ (cm) | 空気量 (%) | スランプ (cm) | 空気量 (%) | 練上がり温度 (°C) |
| 0-0-0    | 12.0      | 4.5     | 13.0      | 3.9     | 22.0        |
| 5-50-1   |           |         | 12.0      | 5.1     | 21.0        |
| 10-50-1  |           |         | 12.0      | 3.7     | 18.0        |
| 60-50-1  |           |         | 11.0      | 3.6     | 18.0        |
| 5-100-1  |           |         | 13.5      | 5.4     | 19.0        |
| 10-100-1 |           |         | 11.0      | 5.0     | 19.0        |
| 60-100-1 |           |         | 11.0      | 3.8     | 17.0        |
| 5-190-1  |           |         | 11.0      | 3.8     | 19.0        |
| 10-190-1 |           |         | 12.5      | 3.5     | 18.0        |
| 60-190-1 |           |         | 11.5      | 3.6     | 18.0        |
| 5-50-2   |           |         | 11.0      | 4.5     | 13.5        |
| 10-50-2  |           |         | 13.5      | 3.0     | 19.0        |
| 60-50-2  |           |         | 10.5      | 5.6     | 13.0        |
| 5-100-2  |           |         | 13.0      | 3.6     | 17.0        |
| 10-100-2 |           |         | 14.0      | 4.0     | 18.0        |
| 60-100-2 |           |         | 14.0      | 4.8     | 17.5        |
| 5-190-2  |           |         | 10.0      | 5.3     | 14.0        |
| 10-190-2 |           |         | 10.5      | 5.5     | 14.0        |
| 60-190-2 |           |         | 11.0      | 5.3     | 14.0        |

位置でφ50mm×200mmのコアを採取した。採取したコアは、試験体底面から50mm間隔毎にコンクリートカッターで切断した。切断したコアは材齢63日まで気中養生後、以下に示す方法で吸水率試験を行った。片平らの研究<sup>7)</sup>を参考に、切断したコア試験体は水中に24時間浸漬し、表面をウェスで拭いた後、湿潤質量 $m_s$ を測定した。その後105°Cの乾燥炉内で24時間乾燥した後、絶乾質量 $m_D$ を測定した。吸水率 $Q$ は式(1)より算出した。

$$Q = \frac{m_s - m_D}{m_D} \times 100 \quad (1)$$

### 3. 締固めによる輝度値の変化

#### 3.1. コンクリートのフレッシュ性状

表-3にフレッシュコンクリートのスランプ試験および空気量試験の結果を示す。JISA5308で規定される目標値に対する許容差は、スランプが±2.5cm以内、空気量が±1.5%であり、全ての試験体において規定の範囲内であった。また、スランプおよび空気量の標準偏差はそれぞれ1.2cm、0.8%であった。

#### 3.2. 締固め中による輝度値の変化

打込み面の輝度値は、任意の領域から抽出することが可能である。本実験では図-3に示すように締固め箇所から長手方向へ50mm (ROI4)、100mm (ROI5)、150mm (ROI6) および250mm (ROI7) 離れた位置を中心とした24mm×24mmの領域から抽出した。また、屋内環境におけるY値は照明の影響を大きく受けるため、締固め直前の輝度値 $Y_0$ で正規化をした(以降、正規化したY値と称する)。一例として、図-4に試験体10-50-1の締固め経過時間と正規化したY値との関係を示す。全体的な傾向として、締固め経過時間が長くなるほど正規化したY値が増加する傾向にある。また、バイブレータか

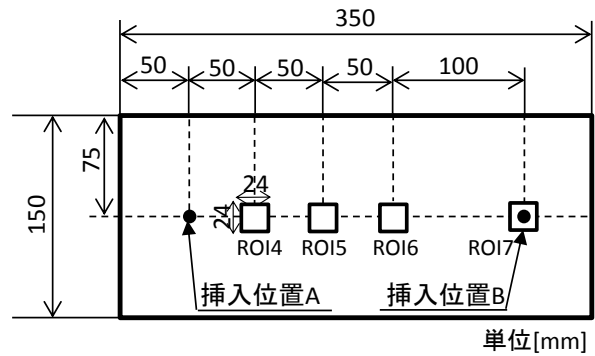


図-3 Y値を取得する領域

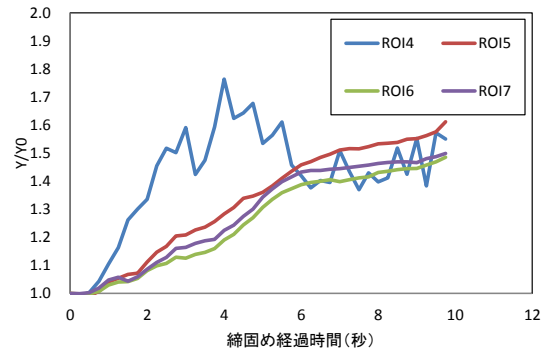
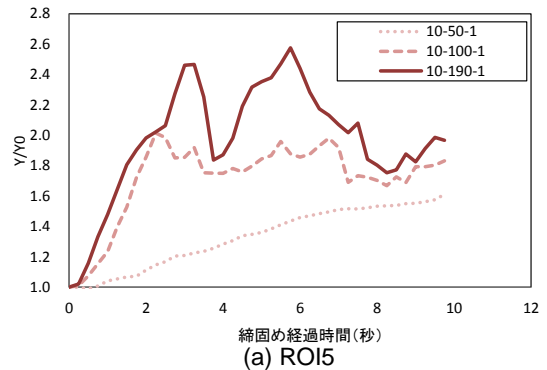
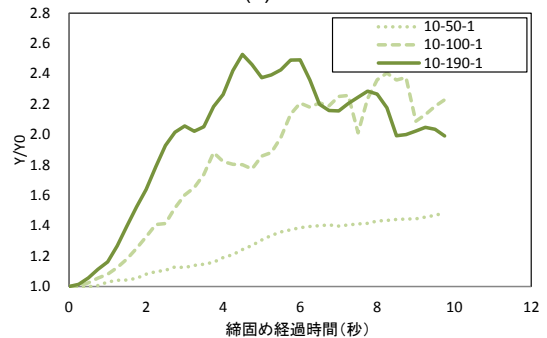


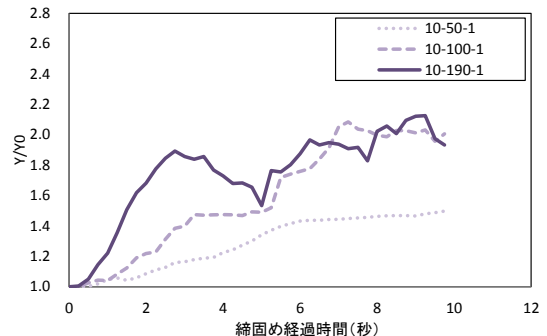
図-4 締固め中の輝度の変化(10-50-1)



(a) ROI5



(b) ROI6



(c) ROI7

図-5 締固め中の輝度の変化(締固め経過時間10秒)

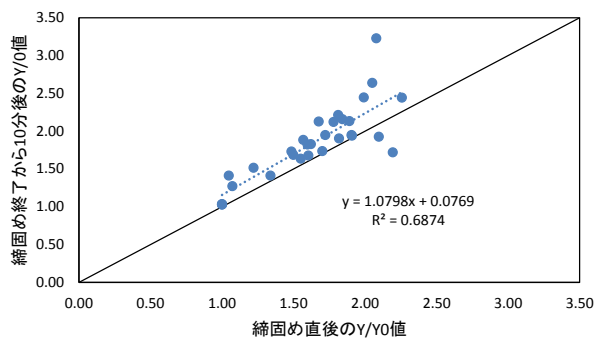
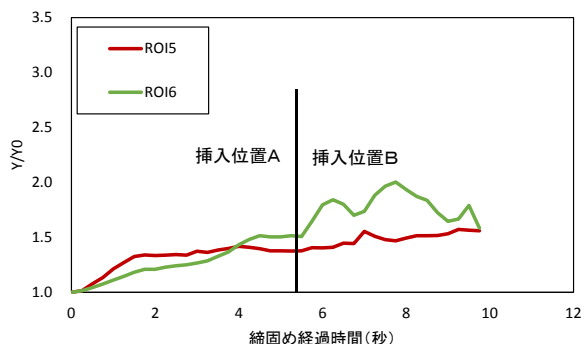
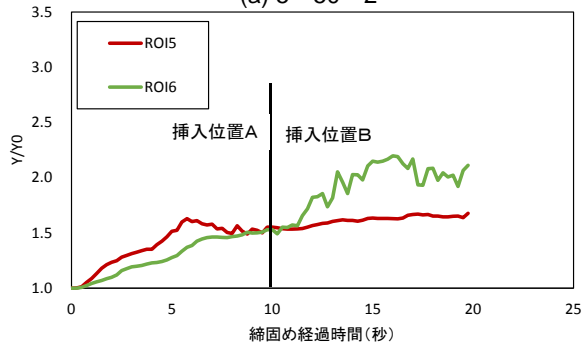


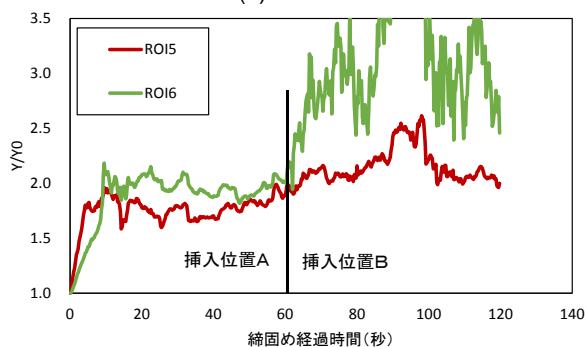
図-6 締固め直後と締固め終了 10 分後の Y 値の関係



(a) 5-50-2



(b) 10-50-2



(c) 60-50-2

図-7 締固め中の輝度の変化 (2 箇所締固め)

らの距離が近いほど正規化した Y 値が大きくなる傾向にある。ROI4 の正規化した Y 値は、振動中の変動が非常に大きい、ROI5、6、および 7 においては、そのような傾向は認められない。ROI4 はパイプレータからの位置が近く、打込み面上の締固め中のペーストの跳ね返り等が要因として考えられる。なお、挿入深さが 100mm および 190mm の場合においては、パイプレータの距離による Y 値の変化は明確には生じなかった。これは、試験

表-4 吸水率データ

| 試験体名     | コア位置 | 吸水率(%)<br>(表層除く) | 吸水率(%)<br>(表層) | Y/Y <sub>0</sub> (直後) | Y/Y <sub>0</sub> (10分後) | 試験体数 |
|----------|------|------------------|----------------|-----------------------|-------------------------|------|
| 0-0-0    | 50   | 5.69             | 6.12           | 1.00                  | 1.04                    | 3    |
| 0-0-0    | 150  | 5.77             | 6.14           | 1.00                  | 1.03                    | 3    |
| 0-0-0    | 250  | 5.81             | 6.32           | 1.00                  | 1.03                    | 3    |
| 5-50-1   | 50   | 5.78             | 6.23           | 1.72                  | 1.95                    | 2    |
| 5-50-1   | 150  | 5.88             | 6.16           | 1.07                  | 1.27                    | 3    |
| 5-50-1   | 250  | 5.49             | 5.77           | 1.05                  | 1.41                    | 3    |
| 10-50-1  | 50   | 5.59             | 6.19           | 1.55                  | 1.64                    | 3    |
| 10-50-1  | 150  | 5.84             | 6.08           | 1.49                  | 1.73                    | 3    |
| 10-50-1  | 250  | 5.91             | 6.22           | 1.50                  | 1.68                    | 3    |
| 60-50-1  | 50   | 5.13             | 7.21           | 1.89                  | 2.13                    | 2    |
| 60-50-1  | 150  | 5.48             | 6.13           | 1.84                  | 2.16                    | 3    |
| 60-50-1  | 250  | 5.57             | 5.89           | 1.60                  | 1.82                    | 2    |
| 5-100-1  | 50   | 5.21             | 6.19           | 1.70                  | 1.73                    | 3    |
| 5-100-1  | 150  | 5.32             | 6.12           | 2.05                  | 2.64                    | 2    |
| 5-100-1  | 250  | 5.18             | 5.78           | 1.68                  | 2.13                    | 3    |
| 10-100-1 | 50   | 5.22             | 6.21           | 1.60                  | 1.68                    | 2    |
| 10-100-1 | 150  | 5.47             | 6.03           | 2.08                  | 3.23                    | 1    |
| 10-100-1 | 250  | 5.32             | 6.83           | 1.81                  | 2.21                    | 1    |
| 60-100-1 | 50   | 5.11             | 8.45           | 1.62                  | 1.83                    | 3    |
| 60-100-1 | 150  | 5.31             | 7.58           | 2.26                  | 2.44                    | 3    |
| 60-100-1 | 250  | 5.18             | 7.41           | 1.78                  | 2.12                    | 2    |
| 5-190-1  | 50   | 5.39             | 5.94           | 1.82                  | 1.90                    | 3    |
| 5-190-1  | 150  | 5.37             | 6.03           | 1.91                  | 1.94                    | 3    |
| 5-190-1  | 250  | 5.36             | 6.34           | 1.34                  | 1.41                    | 2    |
| 10-190-1 | 50   | 5.20             | 6.48           | 1.22                  | 1.52                    | 3    |
| 10-190-1 | 150  | 5.56             | 6.52           | 1.99                  | 2.45                    | 3    |
| 10-190-1 | 250  | 5.58             | 7.49           | 2.10                  | 1.93                    | 2    |
| 60-190-1 | 50   | 4.83             | 10.02          | 1.91                  | 1.95                    | 3    |
| 60-190-1 | 150  | 4.85             | 8.80           | 1.57                  | 1.88                    | 3    |
| 60-190-1 | 250  | 4.67             | 9.83           | 2.19                  | 1.72                    | 3    |

Y 値はコアが採取できた試験体での平均値

体が比較的小型であり、挿入深さが 50mm の場合に比べて振動エネルギーが大きいためであると考えられる。

次にパイプレータの挿入深さについて検討する。図-5 に締固め時間 10 秒の試験体の ROI5, ROI6 および ROI7 における正規化した Y 値の時間変化を示す。なお、ROI4 は、正規化した Y 値に乱れがあるため検討から除外した。図-5 (a) に示した ROI5 ではパイプレータの挿入深さ 50mm の場合、100mm や 190mm の場合に比べて正規化した Y 値が小さく、挿入深さを深くしていくほど正規化した Y 値が大きくなる傾向にある。この傾向は、ROI6, ROI7 でも同様であった。

### 3.3. 締固め後の輝度値の変化

図-6 に締固め直後と締固め終了 10 分後の正規化した Y 値の関係を示す。締固め直後から締固め終了 10 分間に正規化した Y 値は若干ではあるが増加する傾向にある。これは締固め後に上昇するブリーディング水の影響である。ただし、近似直線の傾きから、締固め終了後と 10 分後の時点で、Y 値の大小関係は概ね保持されていた。

### 3.4. 複数箇所締固めた場合の輝度値の変化

図-7 に 2 箇所締固めた試験体における締固め中の正規化した Y 値の時間変化を示す。2 箇所締固めを行う際は、2 箇所目に締固めを行う挿入位置 B が ROI7 の位置と重なっているため ROI7 を比較対象から除外した。挿入位置 A での締固め時には、ROI5 と ROI6 の正規化した Y 値には差異はあまり生じていないが、2 箇所目の挿入位置 B の締固め時には ROI6 では、正規化した Y 値が急激に増加していることが分かる。この傾向は、締固め経過時間を長くするほど顕著に表れている。

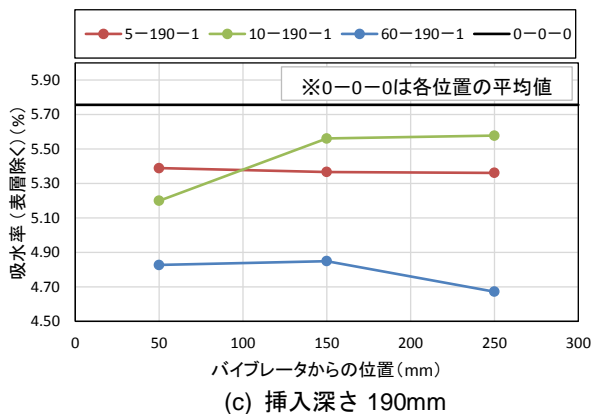
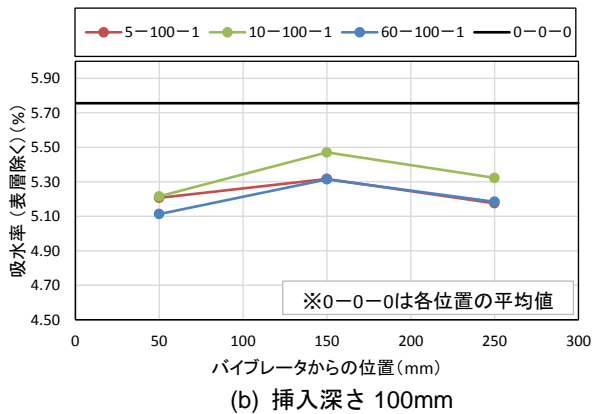
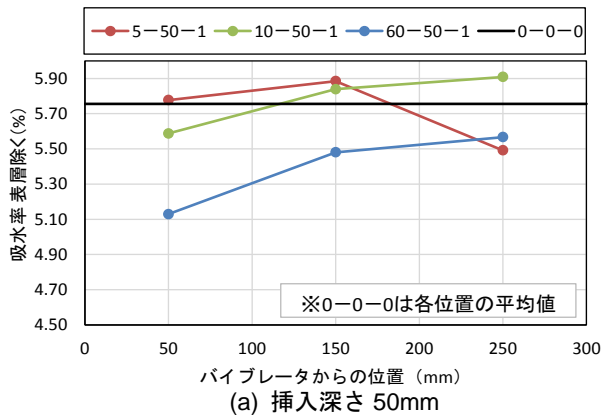


図-8 位置と吸水率の関係

#### 4. 打込み面の輝度値とコンクリートの締固め程度

##### 4.1. 吸水率

表-4 に各試験体の吸水率を示す。表-4 には試験体底面(0mm)から 150mm までの高さにおける切断されたコア試験体 3 体の平均値 (以降、吸水率 (表層除く) と称する) と試験体底面から 150mm の高さより上の部分のコアの吸水率 (以降、吸水率 (表層) と称する) を示した。図-9 にバイブレータからの位置と吸水率 (表層除く) との関係を示す。バイブレータの挿入深さが 50mm の場合は、締固め経過時間 5 秒を除いてバイブレータからの距離が離れるに従い、吸水率 (表層除く) が若干増加する傾向がみられる。しかしながら挿入深さが 100mm や 190mm の場合は、位置による吸水率の差異はほとんど

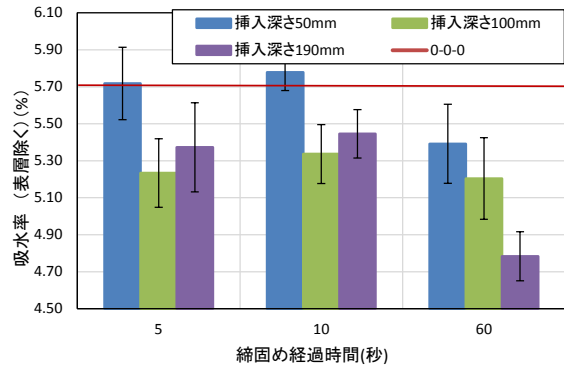


図-9 締固め経過時間と吸水率の関係

ど無いことが分かる。これは、本実験で用いた試験体が比較的小さく、位置による締固め程度の差異が生じなかったと考えられる。

次に、締固め経過時間と吸水率 (表層除く) との関係を図-9 に示す。また、図-9 に示すエラーバーは標準偏差である。前述したように、本実験の範囲内では、バイブレータからの位置による吸水率 (表層除く) の差異は小さかったことから、ROI5、ROI6、ROI7 の位置の平均値を用いた。締固め経過時間で比較してみると、いずれのバイブレータの挿入深さにおいても、締固め経過時間 5 秒および 10 秒では吸水率 (表層除く) に差異はほとんど生じておらず、締固め経過時間が 60 秒の場合に吸水率 (表層除く) は減少する傾向にあった。また、いずれのバイブレータの挿入深さでも締固め経過時間 60 秒の時は、締固め無しの場合と比べて吸水率が大きく低下しており、締固めにより余剰水が上昇し、当該領域のコンクリートが緻密化されたと考えられる。次にバイブレータの挿入深さで比較すると、挿入深さが深くなるほど、同一締固め経過時間における吸水率が低下する傾向にある。これは、挿入深さが深くなる程、バイブレータによって振動されるコンクリート層厚が増え、ブリーディング水が増加するためである。

##### 4.2. 輝度値と吸水率

締固め箇所が 1 箇所の試験体シリーズを対象に、各試験体のコアの表層以外の吸水率 (表層除く) の平均値と各コア位置での正規化した Y 値の平均値との関係を図-10 に示す。図-10 より、吸水率が小さくなる程正規化した Y 値が大きくなる傾向にあった。図中には吸水率 (表層除く) が約 4.70% のデータを除いた近似直線も併せて示しているが、自由度調整済み決定係数は 0.75 であることから、高い相関性を有することが分かる。締固めによって上昇するブリーディング水が増加するほど、正規化した Y 値は増加し、その一方で内部のコンクリートは緻密になるため、吸水率が低下することを示唆している。

ところで、吸水率 (表層除く) が約 4.70% であった試験体 60-190-1 における吸水率 (表層) は 9.55% であり、



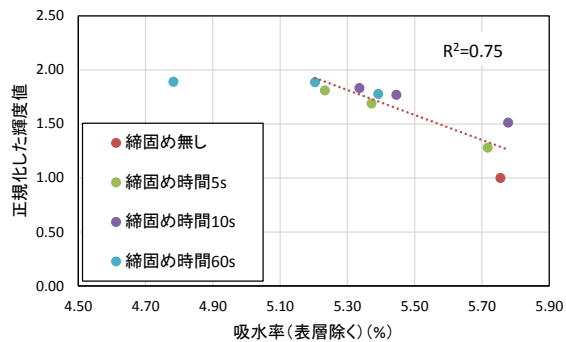


図-10 吸水率と締固め直後の Y 値の関係(表層除く)

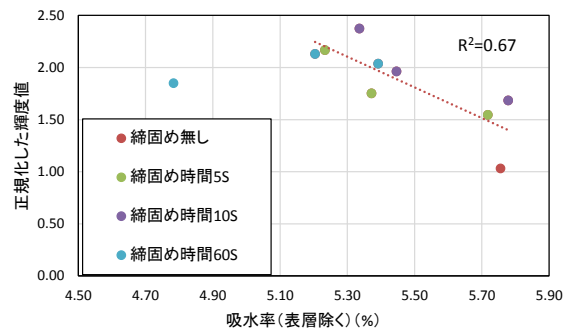


図-11 吸水率と締固め終了 10 分後の Y 値の関係(表層除く)

60 秒間の締固めにより、材料分離を生じた可能性がある。このように、過度な締固めは表層部のコンクリートがポラスになり、耐久性の低下に繋がる恐れがある。

本手法はブリーディング水による輝度値の変化に着目しているため、打込み面に一様な水膜が形成され鏡面反射をするような状態では、輝度値の変化は生じなくなる。したがって、過度な締固めによる材料分離については、現時点では評価することは難しい。しかしながら、実際の現場では、振動時間 60 秒のように長時間同一箇所での締固めを行う場合は現実的にはなく、多くの場合は締固め不足が問題であると考えられ、打込み面の輝度値から締固め程度を評価することに可能性があることが示唆された。また、図-11 に吸水率(表層除く)と締固め終了 10 分後の正規化した Y 値の平均値との関係を示す。図-11 も図-12 と同じ傾向にあることから、締固めから一定時間経過後においても締固め程度を評価可能であることが考えられる。しかしながら、本手法はブリーディング水による打込み面の輝度値の変化に基づいており、コンクリートの配合や外気温の影響を受けるものと思われるため、今後も検討を続けていく予定である。

#### 4. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) 締固め経過時間が長いほど、バイブレータからの距離が近いほど、バイブレータの挿入深さが深い程、正規化した Y 値が大きくなる。
- 2) 締固め直後と締固め終了から 10 分後で正規化した Y 値の大小関係は概ね保持される。
- 3) 吸水率(表層除く)と正規化した Y 値との間には相関があり、吸水率(表層除く)が小さい程 Y 値が大きくなった。

謝辞 本研究の一部は、科学研究費補助金(挑戦的萌芽研究, 課題番号: 16K14295)により行った。ここに記して謝意を表する。

#### 参考文献

- 1) 土木学会: 2012 年制定コンクリート標準示方書[施工編]
- 2) 金子稔, 安田正雪, 末岡英二, 坂井孝: 締固め検知機能を付加したコンクリートの充填検知システムの開発, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp2077-2082, 2009
- 3) 露木健一郎, 林大介, 高木英知, 横関康祐, 曾我部直樹: 加速度計を用いたコンクリート締固め振動の計測, 土木学会第 70 回年次学術講演会, V-221, pp441-442, 2015
- 4) 平田昌史, 白根勇二, 南浩輔, 笹倉伸晃, 中島良光: 棒状バイブレータを用いたフレッシュコンクリート締固め管理法の検討, 土木学会論文集 E2, Vol.73, No.2, p.165-178, 2017
- 5) 堀井夏鈴, 高橋凌, 上村健二, 村上祐貴: コンクリートの振動締固め時における打込み面の色情報の変化, コンクリート工学年次論文集, vol.39, No.1, pp.1399-1404, 2017
- 6) 岩崎訓明: 振動によるフレッシュコンクリートの液状化とバイブレータの作用領域に関する考察, 土木学会論文集, Vol.14, No.426, pp.1-18, 1991
- 7) 片平博, 河野広隆: 小径コアの短時間吸水量に着目したコンクリートの耐久性評価法の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp1599-1604, 2002