

令和元年6月21日現在

機関番号：53101

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K14295

研究課題名（和文）打込み面から得られる情報に基づくコンクリートの締固め判定評価手法の確立と実装

研究課題名（英文）Evaluation of compaction degree based on the information on concrete surface during vibration compaction of concrete

研究代表者

村上 祐貴（MURAKAMI, YUKI）

長岡工業高等専門学校・環境都市工学科・准教授

研究者番号：70509166

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,900,000円

研究成果の概要（和文）：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時間変化から締固め程度の定量的評価を行った。その結果、配合の違いや鉄筋の有無によらず、締固めエネルギーの増加に伴い、打込み面の輝度値は増加し一定値に収束する傾向が確認された。また、締固めを複数回行った場合においても輝度値と累積した締固めエネルギーには一義的な関係が認められ、打ち込み面の輝度値から、締固め程度を定量的に評価できる可能性がある。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果により、これまで作業員の暗黙知であったコンクリートの締固め判断が可視化され、作業員の技能に依存することなく適切な締固め判定が実現できる可能性がある。打ち込み面の輝度情報に基づくことで、面的な締固め評価が可能であることも大きな成果である。本研究の成果により、誰もが卓越した技能を必要とすることなく、コンクリートの適切な締固め判定が可能となり、このことは社会的に大きな意義を持つ。

研究成果の概要（英文）：In this study, we conducted the evaluation of compaction degree based on the time change in brightness value on concrete surface during vibration compaction of concrete. As a result, the brightness value on concrete surface increases as the compaction energy increases. This tendency does not depend on concrete mixture and the existence of rebar. Moreover, the relationship between the brightness and compaction energy with multiple times compaction is almost the same as one time compaction. There is a possibility that the degree of compaction can be quantitatively evaluated from the brightness value of the concrete surface.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：締固め 技能

1. 研究開始当初の背景

コンクリート構造物に要求される強度や耐久性等の品質を確保するためには、打込みの際に、内部振動機等を用いて締固め作業を適切に行うことが肝要である。コンクリート標準示方書において、締固め完了の目安として示されている指標は、いずれも目視判断によるところが大きく、作業員の経験に基づく判断に任されている部分が多い。コンクリートの締固めの良否は供用後の耐久性に大きな影響を及ぼすことに議論の余地はない。締固めを含む施工の良否が、構造物の品質確保に極めて重要であることは共通認識であり、近年では、各自治体が主導し、建設関連業全体で施工状況を体系的に把握する取組がなされてきている。

他方、2020年代までに技能労働者は、現在の6割程度まで落ち込む推計がある。近い将来コンクリート構造物の締固め作業に重要な役割を担ってきた、卓越した施工技能を有する労働者を確保できなくなる恐れがあり、コンクリート構造物の品質の担保には、作業者の技能に依存しない、客観的かつ定量的な締固め判断手法の確立が必要不可欠である。

2. 研究の目的

コンクリートの締固め完了の判断は、作業員の技能に依存する。これは適切な締固め時間が、材料や環境条件等によって異なり、一義的な締固め判断を提示できないためである。熟練作業員は材料、環境条件等を総合的に勘案し、コンクリートの質感や内部振動機の振動音等の特徴量変化から、自身の五感を駆使して締固めの状態を判断している。

他方、2020年代までに技能労働者は、現在の6割程度まで減少するという報告がある。近い将来、コンクリート構造物の締固め作業に重要な役割を担う卓越した作業員を確保できない恐れがあり、コンクリート構造物の一定水準の品質確保には、作業員の技能に依存しない、客観的かつ定量的な締固め判定手法の確立が必要不可欠である。

そこで、本研究では、打ち込み面のコンクリートの色情報からコンクリートの締固め程度を定量的に評価する手法の確立を目指す。

3. 研究の方法

3.1 試験体概要

試験体概要を図-1に示す。横900mm×縦900mm×高さ180mmの床版試験体である。図-1に示す領域1から領域7の中心位置の深さ90mmの位置に加速度センサを埋設し、締固め中のコンクリート内部の振動加速度を0.001秒間隔で計測した。計画配合を表-1に示す。

3.2 実験方法

締固めは、直径28mm、振動数12500~15000rpmの電棒タイプのバイブレータを深さ165mmの位置まで鉛直に挿入して所定の時間締固めを行った。締固めは、図-1中の各締固め位置付近に示した( )内の数字の小さい順番に締固めを行った。締固め時間は20秒を基本とし、(3)のみは締固め時間の違いによる輝度値の上昇量を調べるため3秒とした。

3.3 締固め中のコンクリート表面の色度情報の測定

コンクリート表面の色情報の測定にはXYZカメラを使用した。このカメラは、人間の知覚できる色を忠実に取得可能なカメラであり、撮影した画像はCIE-XYZ表色系で表される。CIE-XYZ表色系は色を定量的に扱う際の利便性を考慮して、国際照明委員会で定義された色の表し方であり、CIE-RGB表色系に比べ、知覚する色を全て正值で表現でき、色変化を評価し易いメリットがある。X、Y、Z値は直感的ではないため、本研究では、輝度を示すY値と明るさを無視した色度座標(x、y)で表されるYxy表色系を用いる。ただし、コンクリートは無彩色であるため、締固め中の色度情報を示すx値、y値の変化は小さくY値のみを取り扱うこととした。

3.4 締固め中の振動加速度

加速度センサで計測した振動加速度を基に締固めエネルギーについて検討した。締固めエネルギーは式(1)で表される。

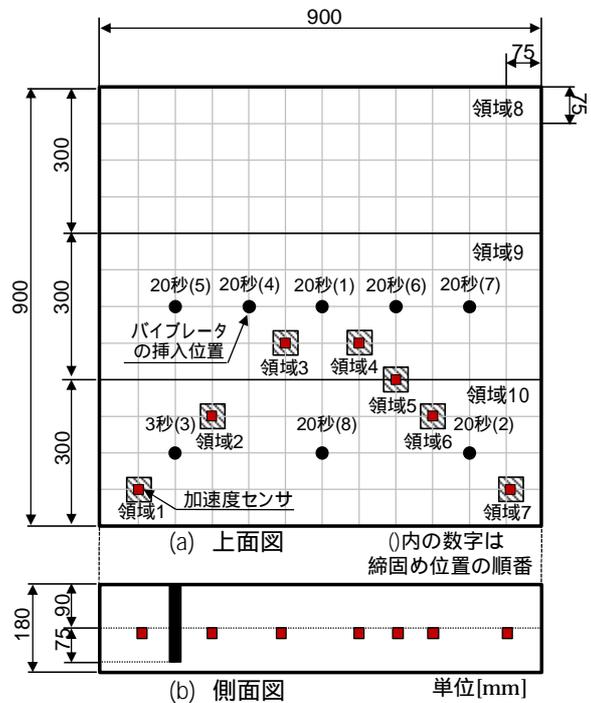


図-1 大型試験体

表-1 計画配合

W/C	目標スランプ	空気量	単位量					
			kg/m <sup>3</sup>					
%	cm	%	水	セメント	細骨材	粗骨材	AE減水剤	AE剤
55	12	4.5	168	305	763	1061	3.05	0.61

$$E_t = \frac{\rho_0 \alpha_{\max}^2}{4\pi^2 f} t \quad (1)$$

ここで、 $E_t$ :  $t$  秒間に受ける締固めエネルギー (J/L),  $t$ : 振動時間 (秒),  $\alpha_{\max}$ : 最大加速度 (m/s<sup>2</sup>),  $f$ : 振動数 (Hz),  $\rho_0$ : 単位容積質量 (kg/L)

本研究では、加速度の最大値の部分の締固め時間中の加速度振幅の平均値の二乗に振動時間を乗じたものを便宜的に締固めエネルギーとした。

#### 4. 研究成果

打込み面の輝度値を加速度センサを設置した領域 1 から領域 7 の位置を中心位置として、縦 80mm × 横 80mm の領域から取得した。また、縦 300mm × 横 900mm の領域 8, 9 および 10 をそれぞれ縦 75mm × 横 75mm のメッシュごとに輝度値を取得した。なお、 $Y$  値は締固め直前の輝度値  $Y_0$  で正規化した。締固め経過時間と正規化した  $Y$  値の関係を図 - 2 に示す。図中に示す枠線は、インターバルの 10 秒を示す。締固め中に正規化した  $Y$  値が急激に変化する領域がいくつかあるが、これは締固め中に作業員の影が打込み面にかかってしまったことが原因である。そのため、各締固め終了時後のインターバルの間で作業員の影が打込み面にかかっていないフレームでの輝度値の平均値を各締固め終了時の輝度値とした。各締固め終了時の正規化した  $Y$  値の時間変化を図 - 3 に示す。全体的な傾向として (1), (2) および (3) では締固め位置から近い領域において正規化した  $Y$  値の増加量が大きい。例えば、締固め位置 (2) の時は、(2) の位置から近い領域 6, 7 において正規化した  $Y$  値が急激に増加している。ここで、締固め時間 3 秒の締固め位置 (3) においても正規化した  $Y$  値の上昇量は (1) や (2) とほとんど差異が無いことから、締固め時間の違いによる正規化した  $Y$  値の上昇量の違いは、本研究の範囲内では認められなかった。また、(4) 以降はどの位置でも正規化した  $Y$  値の増加は鈍化しており、計測領域の締固めは完了している可能性がある。

次に、試験体を 3 分割した領域 8, 9 および 10 (図 - 1 参照) における (1), (2) および (8) の位置の締固め終了後の正規化した  $Y$  値のコンター図を図 - 4 に示す。(1) の締固め後は、その範囲を含む領域 9 の正規化した  $Y$  値が大きいことが分かる。同じように (2) の締固め後はその範囲を含む領域 10 の正規化した  $Y$  値が大きくなる

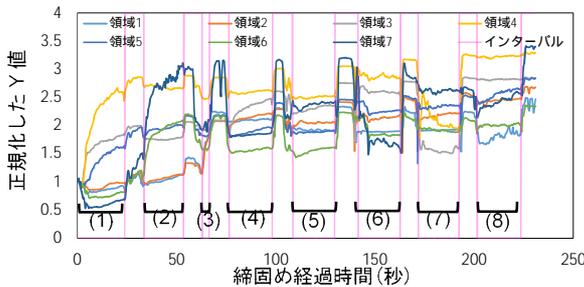


図 - 2 打込み面の輝度の時間変化

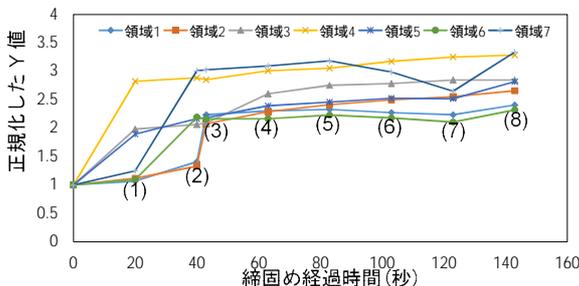


図 - 3 打込み面の輝度(各締固め終了時)

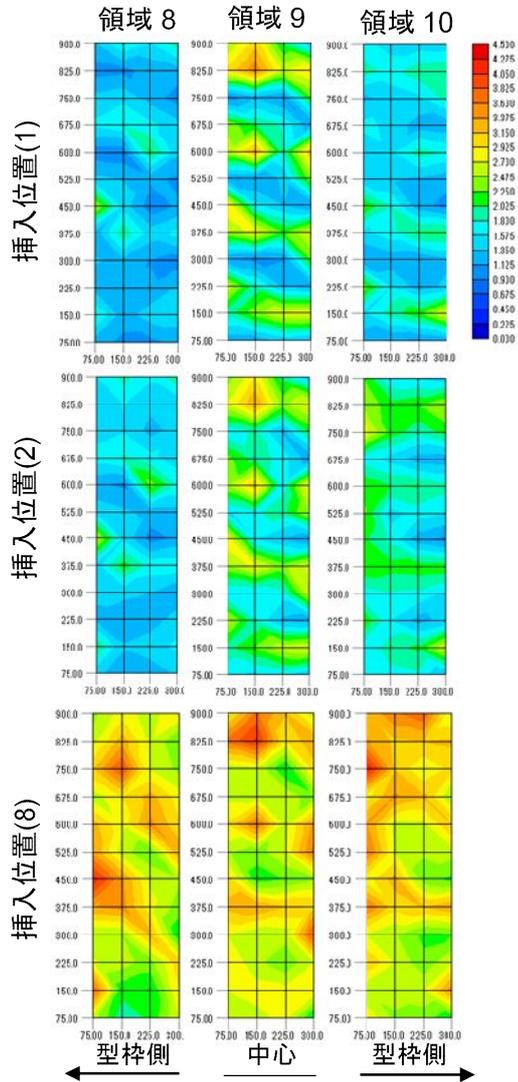


図 - 4 コンター図

Y 値が増加したと考えられる。領域 8 から領域 10 の正規化した Y 値の時間変化を図 - 5 に示す。領域 8 においても(4)を締めめた後の 63 秒時点からは他の領域とほぼ同じ値まで正規化した Y 値が増加している。(4)の位置から領域 8 の中心位置までの距離は約 300mm であり、パイプレータの距離がある程度近くなれば振動は伝わると考えられる。(4)から(7)箇所目の締めエネルギーとパイプレータからの距離の関係を図 - 6 に示す。パイプレータからの距離が離れるに従い、締めエネルギーは減衰傾向にあるが、パイプレータの挿入位置から 300mm 離れた位置においても締めエネルギーがあることが確認できる。

#### 4.2 輝度値と締めエネルギー

各締め終了後の加速度センサ埋設位置における締めエネルギーの累積と正規化した Y 値の関係を図 - 7 に示す。なお、正規化した Y 値の挙動は乱れがあるため、正規化した Y 値の経時変化を、最小二乗法を用いて式(2)でカーブフィッティングし、同定した近似曲線から算出した締め終了時点での正規化した Y 値を用いることとした。

$$\frac{Y}{Y_0} = A \tanh\left(\frac{t}{B}\right) + 1 \quad (2)$$

ここで、t：経過時間(秒)、A、B：係数である。

式(2)の係数 A、B は最小二乗法を用いて決定した。全体的な傾向として、締めエネルギーの増加に従い、正規化した Y 値が増加していることが分かる。また、この傾向は、締めの回数によらず一義的な関係を示しており、複数回の締めを行う施工現場においても正規化した Y 値から締めエネルギーを推定できる可能性がある。一方で、輝度値が一定になってからは輝度値に基づいた締め評価が困難であり、過度な締めについて評価ができない可能性がある。また、今回の実験はすべて室内実験であり、外気温や天候等の影響が、今後も検討を続けていく予定である。

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1)締め経過時間が長いほど、パイプレータからの距離が近いほど、パイプ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)締め直後と締め終了から 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、正規化した Y 値が大きくなった。
- (4)配合の違いや鉄筋の有無による正規化した Y 値の挙動は多少の変化があるが、最終的には一定値に収束する。
- (5)正規化した Y 値が一定値に収束し始めてからは吸水率(内部)の変化は小さくなる。
- (6)締めエネルギーの増加に伴い正規化した Y 値も増加し、正規化した Y 値はやがて増加しなくなるという一義的な関係が認められた。

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計3件)

渡邊 隼平, 村上 祐貴, 上村 健二, 外山 茂浩: コンクリートの振動締め時における打込み面の輝度値の時間変化に基づく締め程度の評価に関する実験的研究(2019年7月掲載決定), 査読有り

渡邊 隼平, 品川 大成, 上村 健二, 村上 祐貴: コンクリートの振動締め時における打込み面の輝度値の変化に基づく締め程度の評価に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, vol.40, No.1, pp.1281-1286, 2018, 査読有り

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め時における打

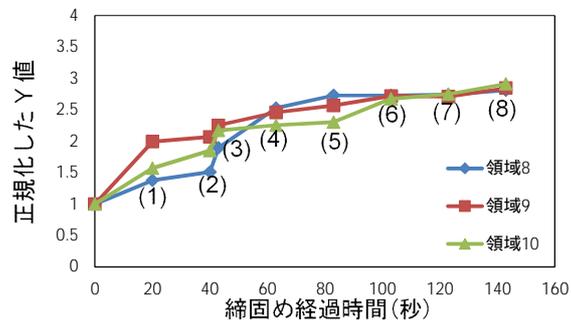


図 - 5 領域 8, 9 及び 10 全体の輝度

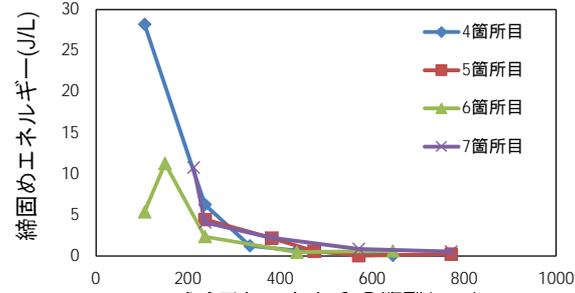


図 - 6 距離と締めエネルギー

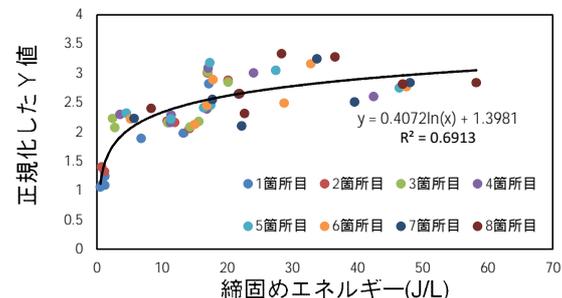


図 - 7 締めエネルギーと正規化した Y 値(式(3)から算定)

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, 査読有り

〔学会発表〕(計3件)

渡邊 隼平, 村上 祐貴, 上村 健二, 外山 茂浩: 打込み面の輝度値の時間変化に基づく締固め程度の評価に関する実験的研究, 土木学会第74回年次学術講演会講演概要集, 2019.9, 香川大学, 査読無し(発表予定)

渡邊 隼平, 品川 大成, 上村 健二, 外山 茂浩, 村上 祐貴: コンクリートの振動締固め中の打込み面の輝度値の変化に基づく締固め程度の評価, 土木学会第73回年次学術講演会講演概要集, V-40, 2018.8.29, 北海道大学, 査読無し

堀井 夏鈴, 高橋 凌, 上村 健二, 外山 茂浩, 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, 土木学会関東支部第34回新潟会研究調査発表会論文集, pp.350-353, 2016.11.2, ハイブ長岡, 査読無し

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

なし

## 6. 研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名: 上村健二

ローマ字氏名: Kenji KAMIMURA

所属研究機関名: 長岡工業高等専門学校

部局名: 電子制御工学科

職名: 准教授

研究者番号(8桁): 80708090

SS

研究分担者氏名: 外山茂浩

ローマ字氏名: Shigehiro TOYAMA

所属研究機関名: 長岡工業高等専門学校

部局名: 電子制御工学科

職名: 教授

研究者番号(8桁): 60642507

### (2)研究協力者

なし

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。