

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

渡邊 隼平*1・村上 祐貴*2・上村 健二*3・外山 茂浩*4

要旨：本研究では、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を定量的に評価することを最終目的として、これまで未検討であった配合の違いや鉄筋の有無を実験変数とし、締固め中の輝度値の時間変化と締固めエネルギーとの関係について検討した。その結果、配合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した。そして、輝度値の増加が鈍化した時点からは、締固めが進行していない可能性があることが示唆された。また、締固めを複数回行った大型試験体においても輝度値と累積した締固めエネルギーには相関が認められた。

キーワード：締固め, 締固めエネルギー, 吸水率, 輝度値

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コンクリート構造物の品質確保に極めて大きな影響を及ぼす。土木学会標準示方書¹⁾においては締固め完了の目安が記述されているが、定性的な記述にとどまっている。

このような背景から、著者らは締固めによってブリーディング水が上昇し、打込み面の輝度値が上昇することに着目し、コンクリート表面の輝度値から締固め程度を評価することを試みている^{2), 3)}。著者らの既往の研究では、締固め時間、バイブレータの挿入深さ等を実験変数とし、締固め中の打込み面の輝度値と吸水率を指標として締固め程度との関係性について検討した。その結果、締固め時間やバイブレータの挿入深さによらず、締固め終了時の打込み面の輝度値と輝度値を計測した領域のコンクリートの吸水率との間には一義的な線形関係が認められた。しかしながら、この結果は、単一の配合で得られた結果であり、配合が異なる場合については未検討であった。また、既往の研究では無筋コンクリートでの検討であり、鉄筋の影響についても未検討であった。加えて、圧縮強度や吸水率等といった硬化後の物理特性で締固め程度を評価しており、締固め過程での締固め程度と輝度値の関係については未検討であった。

そこで本研究では、打込み面の輝度値の時間変化から、締固め程度を定量的に評価することを目的とし、これまで未検討であった配合や鉄筋の有無を実験変数として、締固め中における打込み面の輝度値の時間変化を測定した。その際、試験体内部には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計測し、打込み面の輝度値の時間変化との関係について検討した。

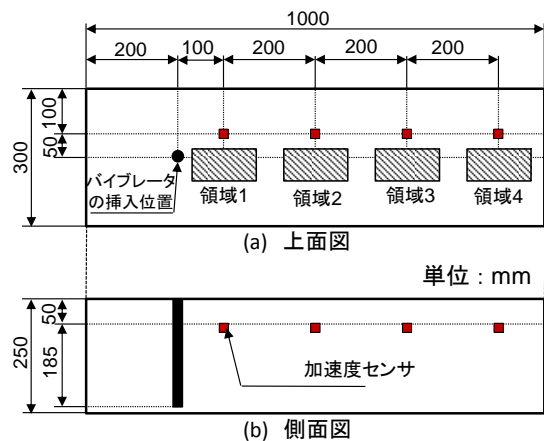


図-1 小型試験体概要

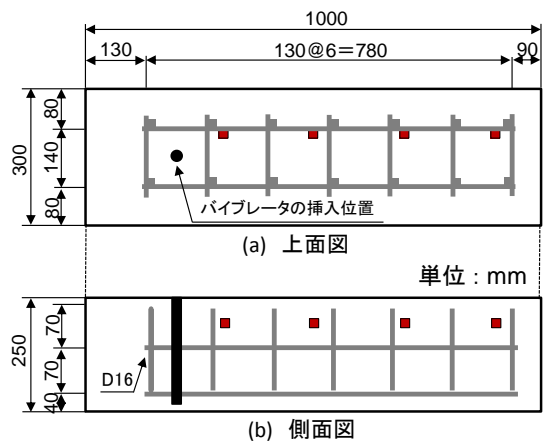


図-2 鉄筋配筋図

2. 実験概要

2.1 試験体概要

(1) 小型試験体

小型試験体概要を図-1に示す。横 1000mm×縦 300mm×高さ 250mm の角柱試験体である。セメントは

*1 長岡工業高等専門学校 環境都市工学専攻 (学生会員)

*2 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)

*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 電子制御工学科教授 博(工)

普通ポルトランドセメントを使用し、細骨材は陸砂 (2.63g/cm³) を使用し、粗骨材は碎石 (2.65g/cm³) を使用した。また、図-1 に示すように、バイブレータの挿入位置から 100mm, 300mm, 500mm および 700mm 離れた位置で深さ 50mm 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 0.00016 秒間隔で計測した。試験体は材齢 1 日の時点で脱型し、脱型後 27 日間気中養生 (室温約 20℃) を行った。また、鉄筋が締固め中の輝度値の時間変化に及ぼす影響を確認するため、一部の試験体には、図-2 に示すように D16 異形鉄筋を配筋した。

(2) 大型試験体

大型試験体概要を図-3 に示す。横 900mm×縦 900mm×高さ 180mm の角柱試験体である。材料は小型試験体と同様である。また、図-3 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。

2.2 実験方法

(1) 小型試験体

小型試験体の実験パラメータを表-1 に示す。締固め時間は 20 秒および 60 秒の 2 水準、配合は 3 水準とした。各試験体の計画配合を表-2 に示す。細骨材率 (s/a) 42%、単位水量 168kg/m³ の配合を基準配合 (目標スランプ 12cm) として、単位水量が同じで s/a52% とした配合および s/a を基準配合と同じ 42% とし、単位水量を 10kg 減じた配合でそれぞれ試験体を作製した。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図-1 に示すように深さ 235mm の位置まで鉛直に挿入し所定の時間加振した。

(2) 大型試験体

大型試験体の配合は基準配合 (s/a42%、単位水量 168kg/m³) と同様である。締固めは、小型試験体で用いたバイブレータと同様のものを深さ 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-3 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。

2.3 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。XYZ カメラで取得される X, Y, Z 値は、色との関連が直感的ではないため、xyY 表式系を用いることとした。ここで、Y 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、色度座標を示す。締固め中の打込み面を XYZ カメラを用いて 0.3 秒間隔で撮影し、打込み面の色度情報を取得

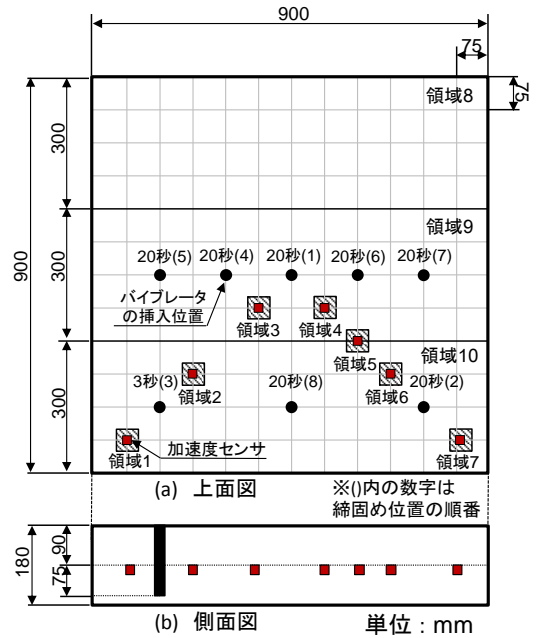


図-3 大型試験体

表-1 実験パラメータ

試験体名	締固め時間(s)	s/a(%)	単位水量(kg/m ³)	鉄筋
s/a42%-20s	20	42	168	無
s/a52%-20s		52		
s/a42%-60s		42		
s/a42%-60s	60	52	158	
w-10kg-60s		42		
s/a42%-60s-r			168	

表-2 計画配合

	W/C (%)	s/a (%)	air (%)	単位水量(kg/m ³)				AE減水剤	AE剤
				W	C	S	G		
s/a42%	55	42	4.5	168	305	763	1061	3.05	0.61
s/a52%		52		944	878				
W-10kg				158	287	780	1085		

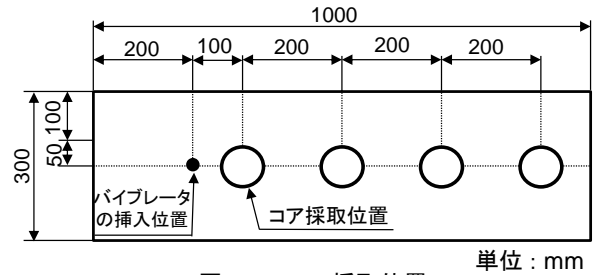


図-4 コア採取位置

した。著者らの既往の研究において、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、本研究でも同様の傾向を示すことから、本研究では Y 値のみを取り扱うこととした^{2), 3)}。

2.4 コア試験体の吸水率試験

コンクリートは締固めによって内部が密実になることから、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。本研究では、試験体の 3 次元的な締固め評価を行うために試験体から小径コアを採取して締固め程度を評価した。しかしながら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。対象とした試験体は s/a42%と s/a52%の締固め時間 20 秒および 60 秒の試験体である。

材齢 28 日の時点で図-4 に示すように、バイブレータから 100mm, 300mm, 500mm および 700mm 離れた位置を中心として φ50×250mm 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。切断したコアを材齢 29 日の時点で、片平らの研究⁴⁾を参考に以下に示す方法で吸水率試験を行った。切断したコアを水中（水温約 20℃）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℃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。

$$Q = \frac{m_s - m_d}{m_d} \quad (1)$$

切断したコアのうち試験体底面(0mm)から 200mm までの 4 領域の平均値を吸水率(内部)と称する。次に 200mm から 250mm までを吸水率(表層)と称する。

3. 小型試験体の実験結果

3.1 コンクリートのフレッシュ性状

表-3 に各配合におけるフレッシュコンクリートのスランブ試験、空気量試験の結果を示す。基準となる配合 (s/a42%, 単位水量 168kg/m³)は、JIS A 5308 に規定される目標値に対する許容差であるスランブ±2.5cm 以内、空気量±1.5%以内に収まった。またその他の配合においても空気量は、許容差である±1.5%以内に収まった。

3.2 締固め中の輝度値の変化

本実験では、打込み面の輝度値を図-1 に示すようにバイブレータの挿入位置から長手方向に 100mm, 300mm, 500mm および 700mm の位置を中心とした縦 40mm×横 160mm の領域から抽出した。また、屋内環境において 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 で正規化した(以降、正規化した Y 値と称する)。一例として試験体 s/a42%-60s の正規化した Y 値の時間変化を図-5 に示す。締固め経過時間の増加に伴い、正規化した Y 値は増加傾向にある。また、バイブレータからの距離が近くなるほど同一締固め時間での正規化した Y 値は大きくなる傾向にある。これは、バイブレータからの距離が近いほど、バイブレータの振動によってコンクリート内が振動され、上昇するブリーディング水が相対的に多いためであると考えられる。また領域 1 と領域 2 の正規化した Y 値は締固め終了時には、ほぼ同様の値を示しており、一定以上の値となると正規化した Y 値がほとんど増加しなくなることが分かる。これは、当該領域に作用する締固めエネルギーで発生するブリーディング水

表-3 コンクリートのフレッシュ性状

試験体名	スランブ(cm)	空気量(%)
s/a42%-20s	13.0	4.5
s/a42%-60s	12.5	5.2
s/a52%-20s	6.0	4.8
s/a52%-60s	6.5	4.8
w-10kg-60s	10.0	4.5
s/a42%-60s-r	13.0	5.0
大型試験体1/バッチ目	11.0	4.5
大型試験体2/バッチ目	12.0	4.4

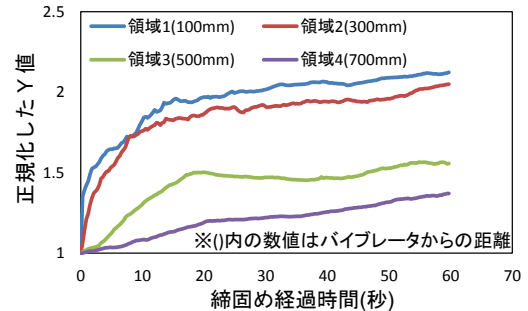


図-5 輝度値の時間変化(s/a42%-60s)

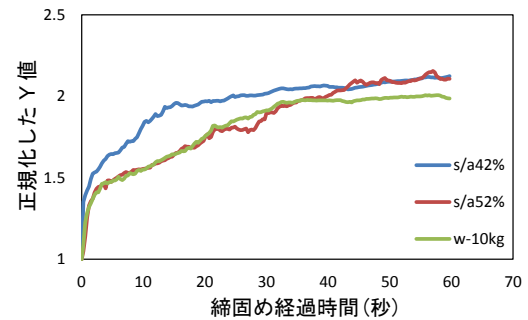


図-6 配合の比較(領域 1)

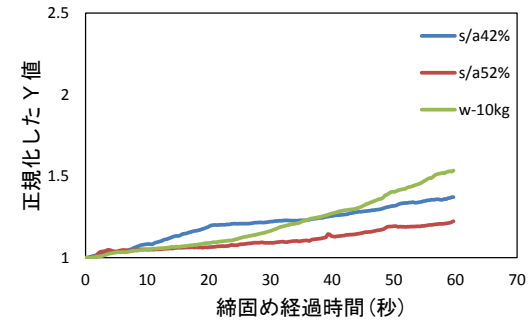


図-7 配合の比較(領域 4)

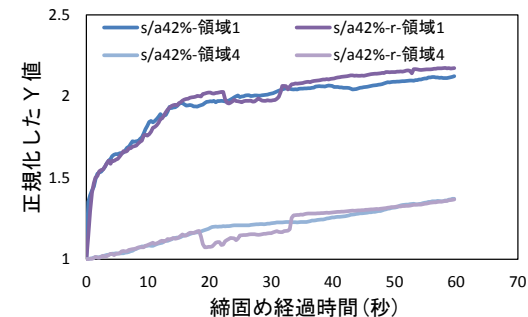


図-8 鉄筋の有無の比較(領域 1 と領域 4)

が上限に到達したこと、あるいは打込み面にブリーディング水が上昇し、水膜が形成され反射面が一様な状態となったことが要因として考えられる。

次に一例として領域 1 と領域 4 に着目し、各配合における正規化した Y 値の時間変化を図-6, 図-7 に示す。

パイブレータから 100mm 離れた領域 1 では、最終的にはすべての配合において正規化した Y 値がほぼ一定の値に収束しているが、s/a42%の試験体は、他の試験体に比べて正規化した Y 値が早期に収束していることが分かる。これは、他の配合に比べてスランブが大きい s/a42%はブリーディング水の上昇速度が速いためであると考えられる。一方、領域 4 では全体的に正規化した Y 値の変化が小さく配合ごとの変化も小さい傾向にある。これは、領域 4 の位置がパイブレータの挿入位置から距離が離れており、いずれの配合においても締固め時間 60 秒の時点では締固めに必要な振動の伝播が領域 1 に比べて相対的に小さいためであると考えられる。

次に、図-8 に同一配合で鉄筋の有無による正規化した Y 値の時間変化の比較を示す。領域 1 および領域 4 の場合でも、鉄筋の配筋の有無で、正規化した Y 値の挙動に差異は認められず、本実験の範囲内では鉄筋が正規化した Y 値に及ぼす影響は小さいと考えられる。

3.3 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以下式(2)で表される⁵⁾。

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

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(s)、 α_{max} : 最大加速度(m/s²)、 f : 振動数(Hz)、 ρ_0 : 単位容積質量(kg/L)である。本研究では、最大加速度加 α_{max} は締固め時間中の加速度振幅の平均値を用いた。また、 $f=229\text{Hz}$ として算定した。

締固め時間が 60 秒の試験体を対象にパイブレータからの距離ごとの締固めエネルギーの結果を図-9 に示す。なお s/a42%は、測定の不備でパイブレータから 500mm の位置の加速度が計測できなかった。全体的な傾向として、パイブレータからの距離が離れるに従い締固めエネルギーが指数関数的に減少する傾向にあり、距離減衰が確認される。また、パイブレータからの距離 100mm の位置について着目すると、s/a52%の締固めエネルギーが一番大きいことが分かる。これは、s/a52%は最もスランブが小さく流動性が低いため、パイブレータ近傍の領域で相対的に多くの締固めエネルギーが消費されているためだと考えられる。

3.4 加速度と輝度値

締固め時間が 60 秒の試験体を対象に、締固めエネルギーと締固め終了直後の正規化した Y 値(式(3)から算定)の関係を図-10 に示す。ここで正規化した 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

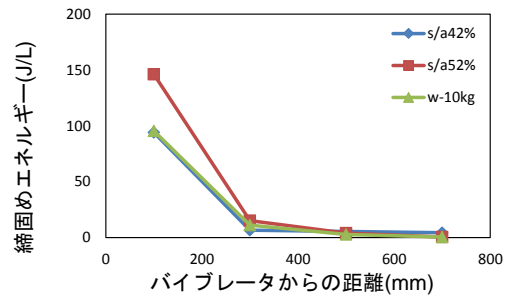


図-9 距離と締固めエネルギーの関係

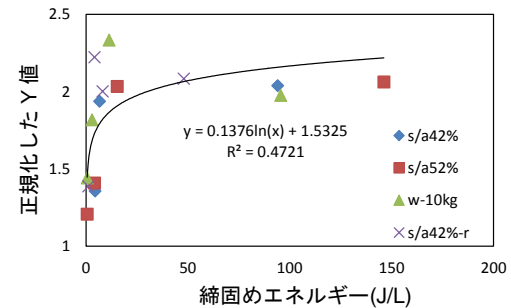


図-10 締固めエネルギーと正規化した Y 値
(式(3)から算定)

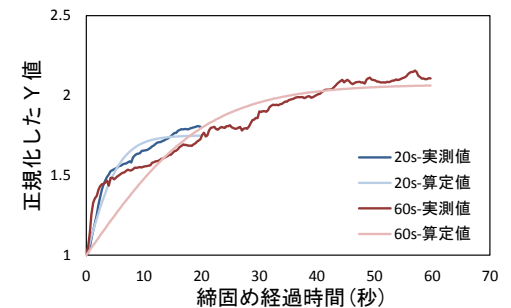


図-11 正規化した Y 値の実測値と計測値
(s/a52%の領域 1)

二乗法を用いて式(3)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固め終了時点での正規化した Y 値を用いることとした。

$$\frac{Y}{Y_0} = A \tanh\left(\frac{t}{B}\right) + 1 \quad (3)$$

ここで、 t : 経過時間(s)、 A 、 B : 係数である。各試験体の係数 A 、 B は最小二乗法を用いて決定した。

図-10 より、いずれの配合においても、正規化した Y 値は急激に増加し、その後は緩やかに増加して一定値に収束する傾向にある。これは、上述したように当該領域に作用する締固めエネルギーで発生するブリーディング水が上限に到達したこと、あるいは打込み面にブリーディング水が上昇し、水膜が形成され反射面が一樣な状態となったことが要因として考えられる。

一例として図-11 に s/a52%の締固め時間 20 秒および 60 秒の試験体の正規化した Y 値の挙動を示す。図中には式(3)より算出した近似曲線も併せて示した。締固め時間

20 秒の時点から締固め時間 60 秒の間の正規化した Y 値の増加は非常に緩やかである。ここで s/a52% の領域 1 の締固め時間 20 秒の吸水率(内部)は 6.35%、締固め時間 60 秒の吸水率(内部)は 6.25%であり、後者の方が若干小さい。しかしながら表層では、締固め時間 20 秒の吸水率(表層)は 6.52%であるのに対し、締固め時間 60 秒の吸水率(表層)は 9.73%であり、表層の品質が大きく低下している。このことから、当該試験体は、締固め時間が 20 秒以降の締固めの進行が少なく、その後は材料分離が進行している可能性がある。輝度値の時間変化と照らし合わせると、輝度値の増加が鈍化した時点が締固め完了と判断できる可能性があり、今後さらなる検討を進めていく。

4. 大型試験体の実験結果

4.1 輝度値の時間変化

大型試験体では、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 の位置を中心として、縦 80mm × 横 80mm の領域から抽出した。また、縦 300mm × 横 900mm の領域 8, 9 および 10 では、縦 75mm × 横 75mm のメッシュごとに輝度値を取得した。なお、大型試験体においても、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-12 に示す。図中に示す枠内は、10 秒のインターバルの間である。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。締固め終了後の正規化した Y 値の時間変化を図-13 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。締固め時間 3 秒の締固め位置(3)においては、領域 1, 2 で急激に正規化した Y 値が増加した。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-3 参照)における(1), (2)および(8)の位置の締め固め終了後の正規化した Y 値のコンター図を図-14 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 値が大きくなることが分かる。また、(1), (2)において領域 8 は正規化した Y 値がほとんど変化していない。領域 8 は、(1), (2)から離れておりパイププレートによる振動が十分に伝達してい

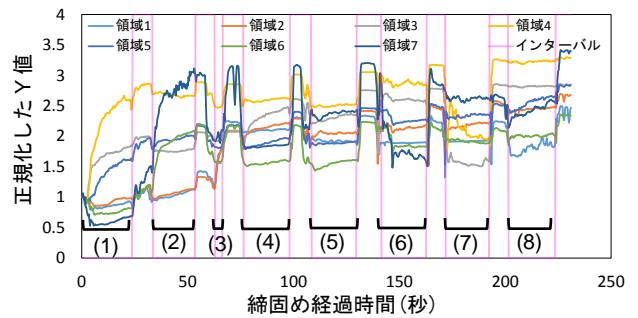


図-12 輝度の時間変化

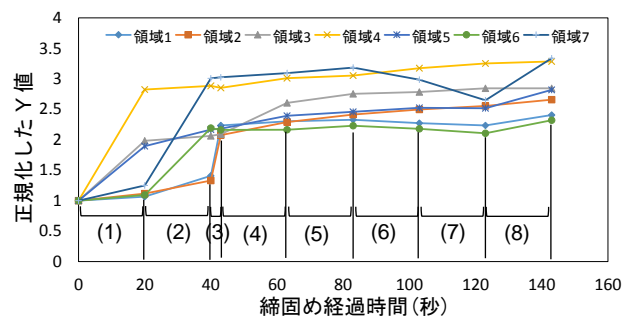


図-13 輝度の時間変化

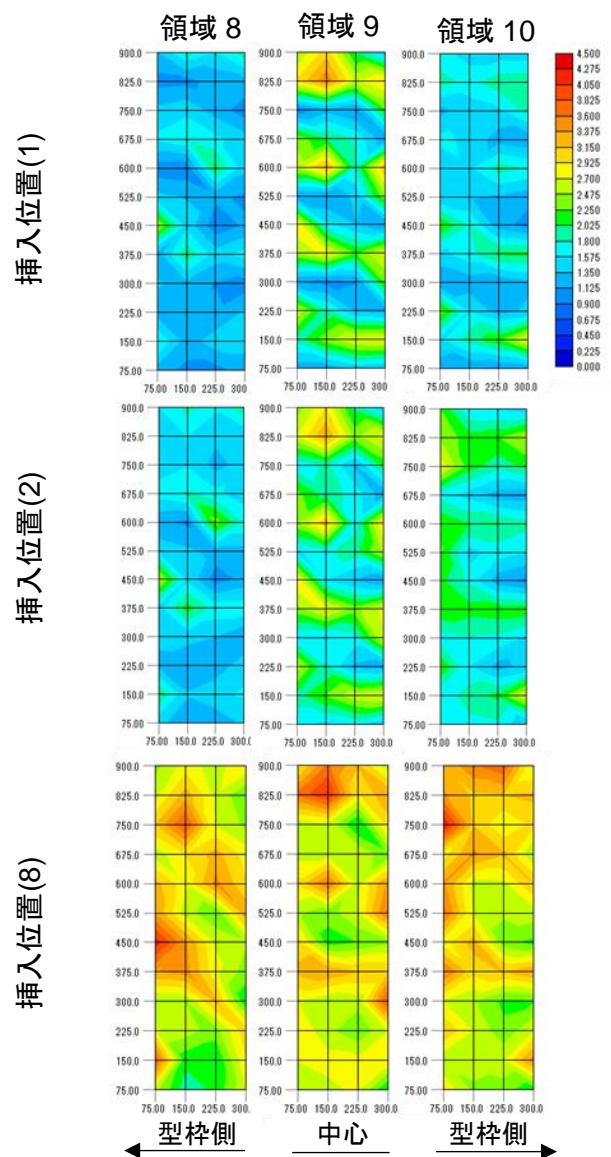


図-14 正規化した Y 値のコンター図

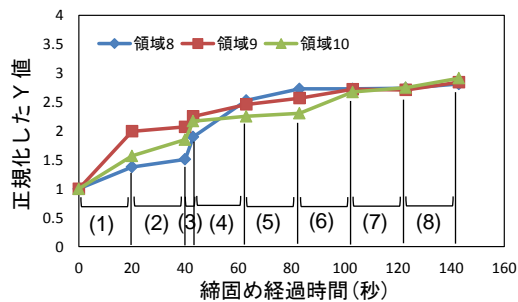


図-15 領域 8、9 及び 10 全体の輝度

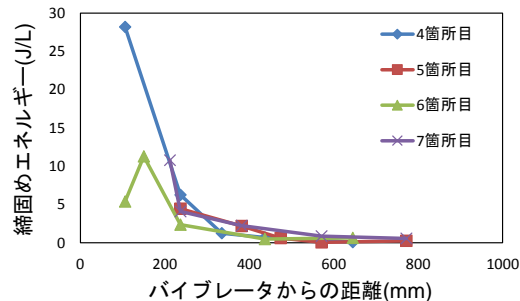


図-16 距離と締めエネルギー

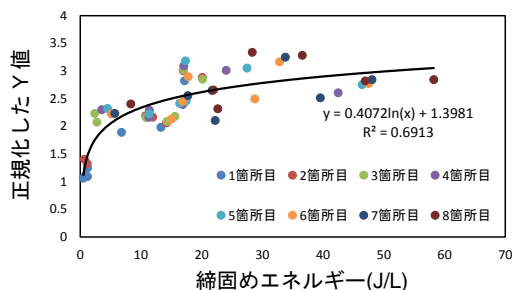


図-17 締めエネルギーと正規化した Y 値
(式(3)から算定)

ないと考えられる。しかしながら(8)の締め後は、どの領域においても正規化した Y 値は同じような傾向にある。これは、(3)から(7)を締めることによって領域 8 の方にも振動が伝達し、領域 8 の位置においても締めが進行したため、正規化した 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-15 に示す。領域 8 においても(4)を締めた後の 63 秒地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)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-16 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 400mm 離れた位置においても締めエネルギーが発生していることが確認できる。領域 8 においては領域 9 および 10 での締めの振動が伝達し、正規化した Y 値が増加したと考えられる。

4.2 輝度値と締めエネルギー

各締め終了後の締めエネルギーの累積と正規化し

た Y 値(式(3)から算定)の関係を図-17 に示す。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、どの締め位置でも一義的な関係を示しており、締めを複数回行う場合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示唆された。一方で、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については今後の課題である。

5. まとめ

- (1) 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。
- (2) 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。
- (3) 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。
- (4) 大型試験体で 8 箇所締めを行った場合にも(3)の関係が認められた。

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。

参考文献

- 1) 土木学会: 2017 年制定コンクリート標準示方書[施工編]
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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, pp.1599-1604, 2002.
- 5) 梁俊, 國府勝郎, 宇治公隆, 上野敦: フレッシュコンクリートの締めめ性試験法に関する研究, 土木学会論文集, vol.62, No.2, pp.416-427, 2006.