コンクリート工学年次論文集，Vol.42，No.1，2020

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定量評価

渡邊　隼平[*1]・石沢　公清[*2]・村上　祐貴[*3]・上村　健二[*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目的として，異なる配合に対し，振動締固め中の打込み面の輝度値とコンクリート内部の締固めエネルギーの時間変化を測定した。締固め完了エネルギーに到達した時点の打込み面の輝度値から，締固め範囲を推定した結果，ある程度妥当性のある結果が得られた。一方，締固め中の試験者等の影による照度の変化や打込み面の表面粗さについての補正方法を検討する必要のあることが明らかとなった。

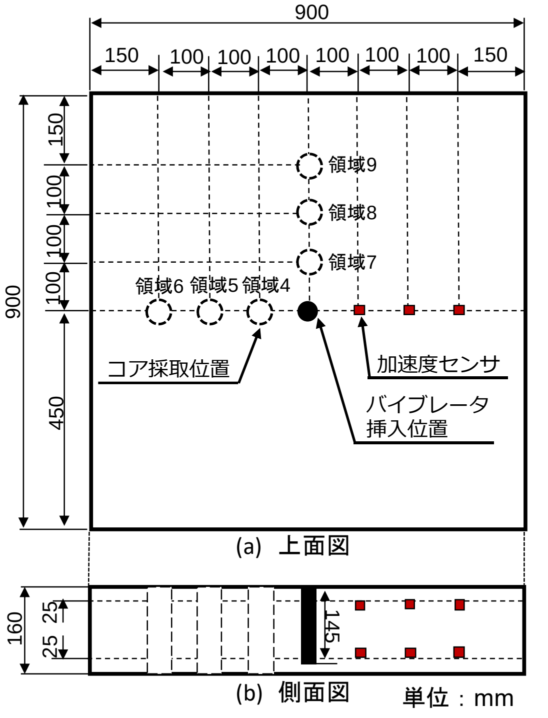
キーワード：振動締固め，締固めエネルギー，輝度値

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て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), 4)]。著者らの既往の研究では，締固め時間の増加に従い，打込み面の輝度値は増加することが示された。そして，輝度値は締固め初期に急激に増加し，その増加量は徐々に鈍化する傾向が認められた。また，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締固め程度との関係性について吸水率を指標として検討を行った。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。

そこで本研究では，試験体内に加速度センサを埋設して測定した締固めエネルギーと試験体から採取したコア試験体の密度との関係から，締固め完了エネルギーを算出した。この締固め完了エネルギーから締固め完了時の輝度値を同定し，打込み面の輝度値に基づく打込み面の面的な締固め程度の評価について検討した。



図－1　試験体概要

表－1　計画配合

	W/C (%)	s/a (%)	air (%)	単位量(kg/m^3)					
				W	C	S	G	AE減水剤	AE剤
SL12	55	42	4.5	168	305	763	1061	3.05	0.61
SL8				165	300	768	1068	3.00	0.60

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体概要を**図－1** に示す。試験体は床版形状とし，横 900mm×縦 900mm×厚さ 160mm である。セメントは普通ポルトランドセメント（3.16g/cm^3）を使用し，細骨材は陸砂（2.63g/cm^3），粗骨材は砕石（2.65g/cm^3）を使用した。試験体の計画配合は**表－1** に示すように，目標スランプが 8cm および 12cm の 2 種類である。

2.2 実験方法

実験パラメータは**表－2** に示すように締固め時間とした。**表－1** に示した計画配合で混錬したコンクリートを型枠内に入れ，直径 28mm，振動数 12500~15000rpm

*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
*3 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)
*4 長岡工業高等専門学校　電子制御工学科准教授　博(工)

の電棒タイプのバイブレータを試験体中央の位置に深さ 145mm まで鉛直に挿入し，所定の時間加振した（**図－1** 参照）。なお，締固め程度に影響を及ぼす可能性があることから，締固め終了後の打込み面のコテ均しは行っていない。締固め時間が 20 秒の試験体は再現性を確認するため，2 回実験を実施しており，これらを区別するため試験体名称の末尾に通し番号を付した。また，本測定は測定時の照度の影響を受けるため，SL12-20-3 を除くすべての試験体の設置位置は固定し，カメラの位置も同一とした。SL12-20-3 は，測定時の照度の影響を評価するため，試験体設置場所を変えて試験を実施した。ここで，SL12-20-3 を除く試験体の型枠上面に設置した反射板の輝度値の大きさ（2.4 参照）は，平均で 420.8 であり，SL12-20-3 における反射板の輝度値の大きさは平均で 579.3 であった。

2.3 締固め中のコンクリート中の振動加速度

図－1 に示すように，バイブレータの挿入位置から 100mm, 200mm および 300mm 離れた位置で深さ 25mm および 135mm の位置に加速度センサ（容量 500m/sec^2）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。

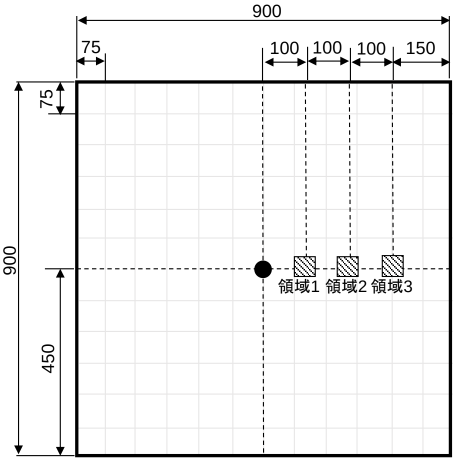
2.4 締固め中のコンクリート表面の色と反射輝度

本研究では，人間の知覚する色を定量化する必要があるため，知覚する色をすべて正値として表現することのできる CIE-XYZ 表式系を使用する。撮影には CIE-XYZ 表式系で規定されている XYZ 値を直接取得することができ，人間の目に近い幅広い色域の色情報が得られる 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，色度座標 xy と輝度値 Y を用いてわかりやすい色表現を行う。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。本研究では，締固め中の打込み面を XYZ カメラを用いて 0.1 秒間隔で撮影した。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，色度情報を示す x 値，y 値の変化は小さいことが明らかとなっていることから，本研究では反射輝度（以降，Y 値と称する）のみを取り扱うこととした [2), 3), 4)]。

打込み面の Y 値は**図－2** に示すようにバイブレータの挿入位置から 100mm（領域 1），200mm（領域 2）および 300mm（領域 3）の位置を中心とした縦 50mm×横 50mm の領域から抽出した。また，面的な Y 値の挙動を確認するため，打込み面を 75mm×75mm の領域に分割し，領域ごとに Y 値を取得した。なお，Y 値は照度の影響を受けるため，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)。

表－2 実験パラメータとフレッシュ性状

試験体名	パラメータ		フレッシュ性状					
	目標スランプ (cm)	締固め時間 (sec)	スランプ(cm)		空気量(%)		圧縮強度(N/mm^2)	
			バッチ1	バッチ2	バッチ1	バッチ2	バッチ1	バッチ2
SL12-20-1	12	20	12.5	13.0	4.5	4.8	26.5	25.7
SL12-20-2	12	20	13.5	14.0	5.0	5.2	22.5	24.4
SL12-20-3	12	20	12.0	12.5	4.5	4.8	23.3	23.4
SL8-20-1	8	20	10.0	9.0	4.8	5.0	31.8	29.0
SL8-20-2	8	20	9.0	9.0	4.5	4.8	28.4	27.5
SL12-5	12	5	13.5	14.0	4.5	4.8	25.7	24.8
SL8-5	8	5	10.0	10.0	5.5	5.3	28.3	27.6



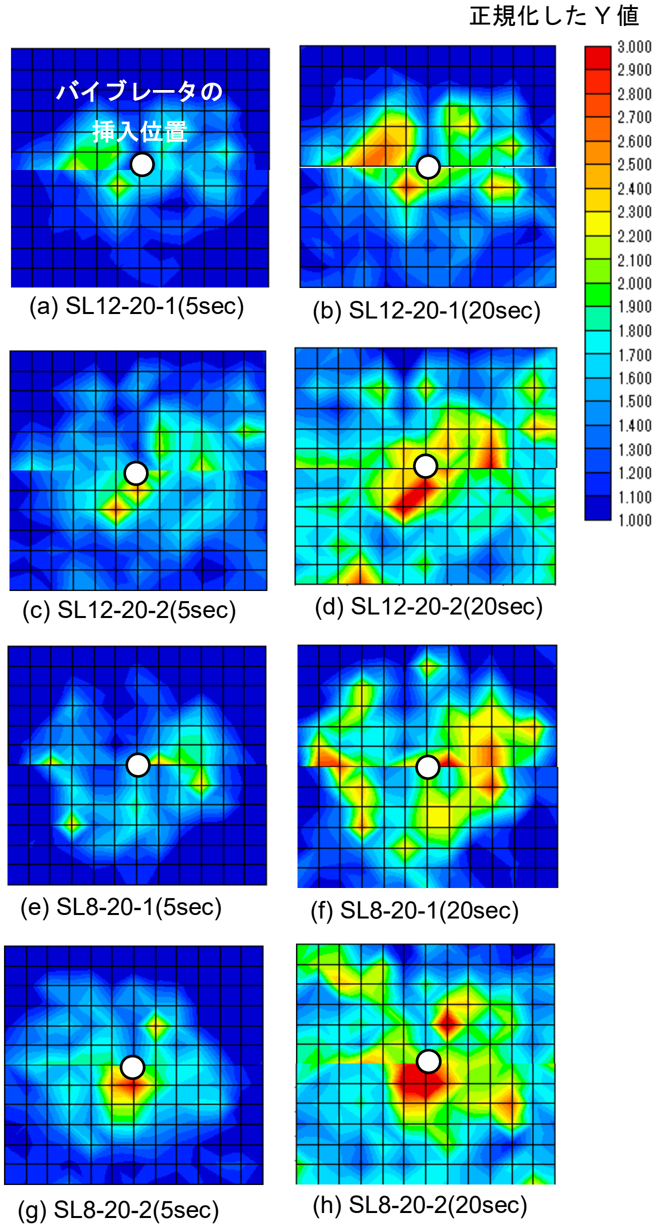
(a) 上面図　単位：mm

図－2 輝度値取得領域

2.5 硬化後のコンクリートの密度

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。そこで本研究では，試験体から採取した小径コアの密度から締固め程度を評価した。

試験体は材齢 1 日の時点で脱型し，脱型後 28 日間気中養生（室温約 20℃）を行った。材齢 29 日の時点で**図－1** に示した領域 4~9 から φ50×160mm のコアを採取した。上述の通りコアは締固め程度の評価に用いることから，本来であれば加速度センサを埋設した位置からコアを採取するべきであるが，試験終了後にコンクリートを掘り起こして加速度センサを取り除いており，当該領域からはコアを採取することができない。そのため，バイブレータからコンクリート中に伝播する振動は同心円状に分布する [6] と考えられるため，**図－1** に示したようにバイブレータと加速度センサの距離と同距離から採取した領域 4~9 の小径コアの密度で関連付けを行った。採取したコアは，試験体底面から 45mm 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 110℃乾燥炉内で 24 時間乾燥した後，質量，高さ，直径を測定し，密度を算定した。また各層の密度は，試験体底面（0mm）から 45mm を密度（低層），45mm から 90mm を密度（中層），90mm から 135mm を密度（高層）と称する。



図－3　正規化した Y 値のコンター図

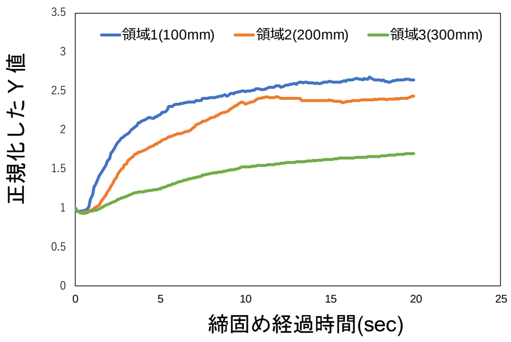
3. 実験結果

3.1 コンクリートのフレッシュ性状と圧縮強度

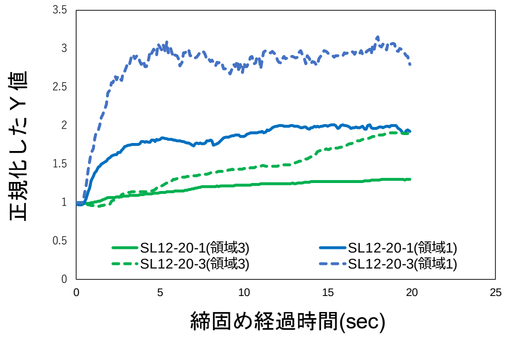
表－2 に各配合におけるフレッシュコンクリートのスランプ試験，空気量試験および圧縮強度試験の結果を示す。すべての試験体において，JIS A 5308 に規定される目標値に対する許容差であるスランプ±2.5cm 以内，空気量±1.5%以内に収まった。また，材齢 28 日における圧縮強度の結果は，SL12cm より SL8cm の方が平均で 4.3N/mm^2 大きくなった。

3.2 締固め中の輝度値の経時変化

一例として，SL12-20-1 および SL12-20-2，SL8-20-1 および SL8-20-2 の締固め経過時間 5 秒および 20 秒時点の正規化した Y 値のコンター図を**図－3** に示す。配合によらずバイブレータ近傍から正規化した Y 値が増加する傾向が認められた。また，正規化した Y 値が増加している領域は SL12 より SL8 のほうが大きい。これは，SL8 の配合は SL12 の配合に比べて硬練りであり，撮影画像の目視観察よりコンクリートを型枠に打込んだ際の打込み面の凹凸面が大きいことが要因であると考えられる。打込み面の凹凸が大きいと，凹凸な面で光が多重に散乱し，光沢や艶のない物質に見られる拡散反射特性を示し，締固め前の輝度が小さくなる。これにより，締固め前後の輝度値の変化率は，SL8 の方が大きくなったと考えられる。



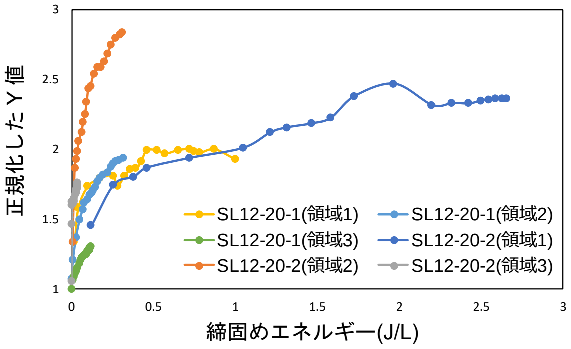
図－4　正規化した Y 値の経時変化(SL8-20-1)



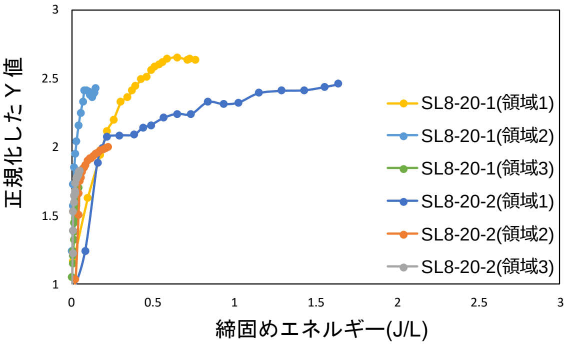
図－5　正規化した Y 値撮影場所の比較

一例として，SL8-20-1 の領域 1，2 および 3 における正規化した Y 値の経時変化を**図－4** に示す。正規化した Y 値は締固め初期に急激に増加した。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 値が大きくなった。これは，締固めエネルギー（3.3 参照）が大きい程，締固めにより打込み面の凹凸の減少とブリーディング水の上昇量が多く，表面反射成分が増加したためであると考えられる。打込み面の凹凸は締固め初期に急激に減少するため，それに伴って正規化した Y 値も急激に増加すると考えられる。また，締固め時間の増加に従い正規化した Y 値の増加量は緩やかになった。これは，締固めによるブリーディング水の上昇量は締固めの進行に伴い鈍化するため，輝度値の増加が緩やかになったと考えられる。

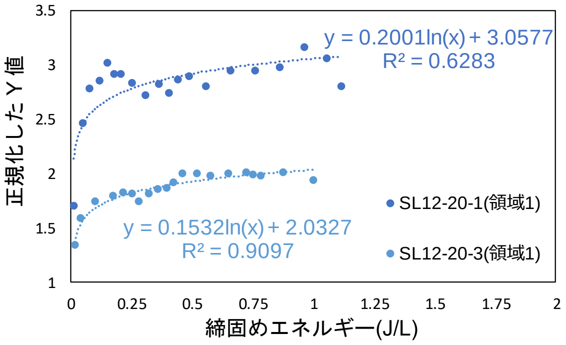
一例として，撮影場所を変化させた場合の SL12-20-1 および SL12-20-3 における領域 1 と領域 3 の正規化した Y 値の経時変化を**図－5** に示す。撮影場所によって照度が異なるため，正規化した Y 値の大きさに差異



図－6　正規化したＹ値と締固めエネルギー (SL12)

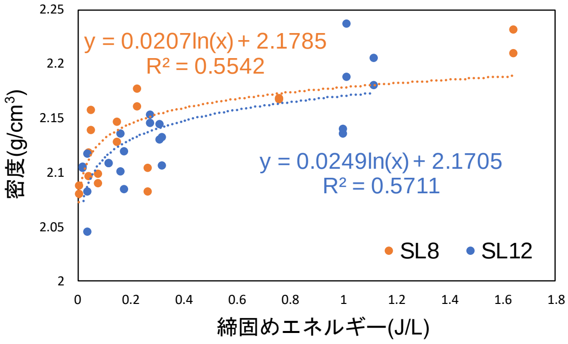


図－7　正規化したＹ値と締固めエネルギー (SL8)



図－8　正規化したＹ値と締固めエネルギー

(SL12-20-1 と SL12-20-3)



図－9　密度と締固めエネルギー

が生じているが，領域 1 に着目すると，正規化した Y 値の増加量は撮影場所によらず締固め経過時間 3~5 秒程度で鈍化した。

3.3 振動加速度の結果

各試験体の締固めエネルギーを式(1)から算出した 5)。

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

ここで，E_t：t 秒間に受ける締固めエネルギー(J/L)，t：締固め時間（sec），α_{max}：最大加速度（m/sec^2），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=229Hz とした。

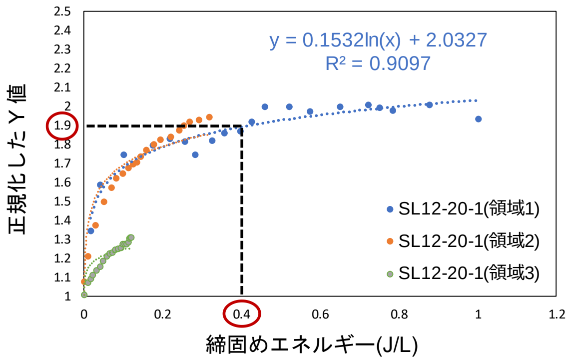
3.4 締固めエネルギーと輝度値

SL12-20-1 および SL12-20-2 の正規化した Y 値と締固めエネルギーの関係を図－6 に示す。ここで，締固めエネルギーは上下の加速度センサそれぞれから算出した締固めエネルギーの平均値であり，1 秒ごとに算出して累積した。図－6 より，締固めエネルギーが約 0.4J/L に到達するまでに正規化した 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。この傾向は，図－7 に示す配合が異なる SL8-20-1 および SL8-20-2 の場合でも同様に認められた。ここで，図－6 に示した SL12-20-2（領域 2）は，他の傾向と大きく異なり，正規化した Y 値が極端に大きいことが分かる。そこで，領域 2 の中心から上下 50mm の位置を中心として輝度値を取得した（領域の大きさは同じ）。その結果，上下で取得した締固め経過時間 20 秒時点での正規化した Y 値の平均値は 1.9 であり，領域 2（締固め経過時間 20 秒時点での正規化した Y 値は 2.8）の正規化した Y 値が極端に大きいことが認められた。本実験ではバイブレータによる締固め程度を評価するために，突き棒による締固めを行っておらず，撮影画像の目視観察より領域 2 の打込み面の凹凸が大きかったことが要因として考えられる。

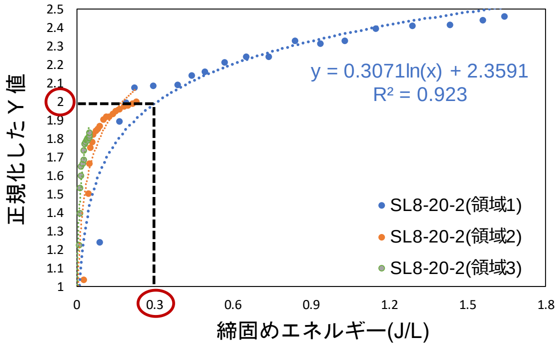
一例として，撮影場所を変化させた場合の SL12-20-1 と SL12-20-3 の領域 1 における 1 秒ごとの正規化した Y 値と締固めエネルギーの累積の関係を図－8 に示す。正規化した Y 値の大きさは撮影場所によって異なるが，正規化した Y 値の増加量が緩やかになる締固めエネルギーの大きさはほぼ同程度であった。

3.5 締固め判定

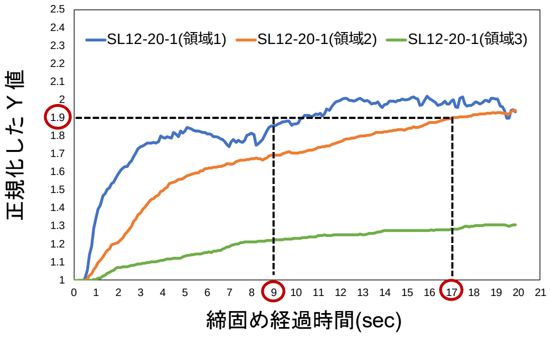
SL12 と SL8 の締固めエネルギーと密度（低層，中層および高層の 3 領域の平均値）との関係を図－9 に示す。なお，図中には締固め時間 5 秒の試験体の結果も含めている。いずれの計画配合においても，締固めエネルギーの増加に従い密度は増加し，一定値に収束する傾向であった。各計画配合に対し，締固め完了エネルギーを定義することは困難であることから，本研究では，図－9 に示した近似曲線から，締固めエネルギーの 1J/L 増加に対する密度の増加割合が 3.0%を下回



図－10　正規化したＹ値と締固めエネルギー（SL12-20-1)



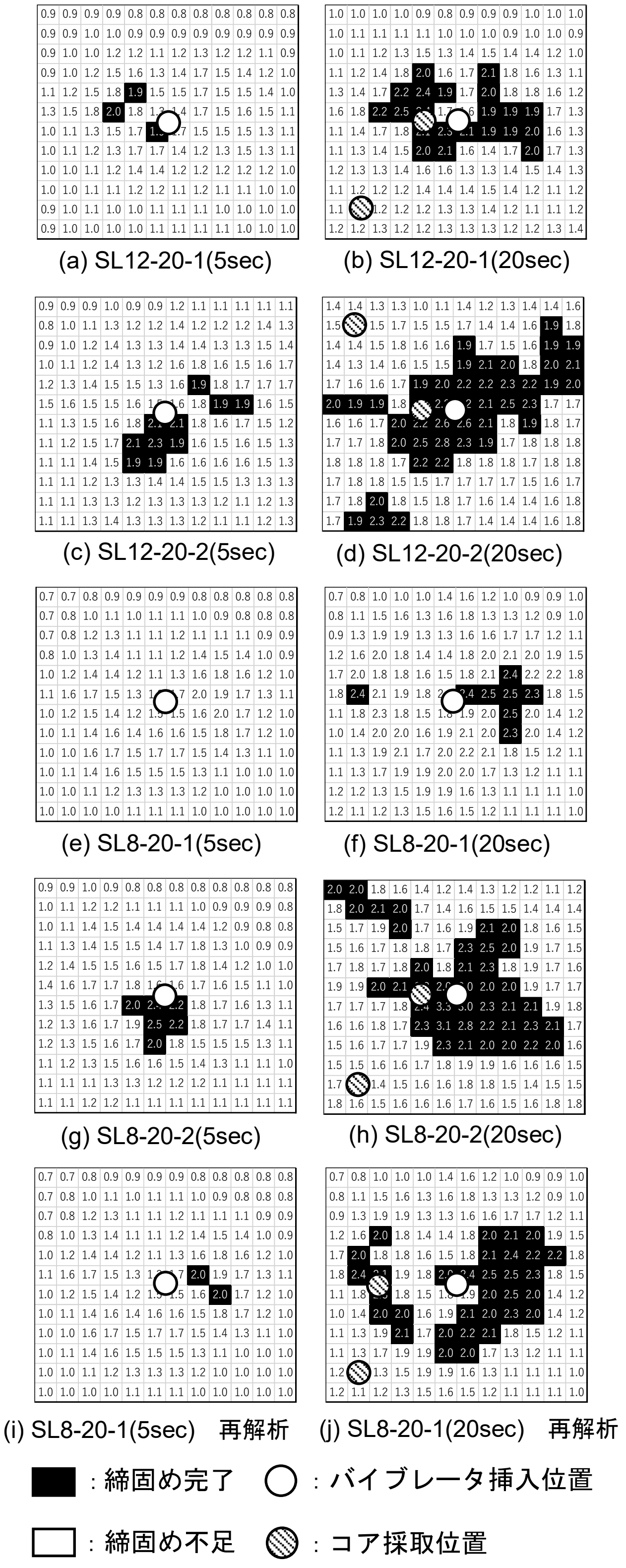
図－11　正規化したＹ値と締固めエネルギー（SL8-20-2)



図－12　正規化したＹ値の経時変化(SL12-20-1)

る時点での締固めエネルギーを算出し，簡易的にこのエネルギーを締固め完了エネルギーとした。算出の結果，SL12 の締固め完了エネルギーは 0.4J/L，SL8 は 0.3J/L となった。**表－1** に示したように目標スランプ 8cm と 12cm の計画配合に大きな差異が無かったため，締固め完了エネルギーは同程度になったものと考えられる。

次に一例として，SL12-20-1 および SL8-20-2 の締固めエネルギーと正規化した Y 値の関係を**図－10** および**図－11** に示す。本研究では，バイブレータからの距離が最も近い 100mm の位置を基準として締固め判定を行うこととした。上述した締固め完了エネルギー（SL12 は 0.4J/L，SL8 は 0.3J/L）時点での領域 1 における正規化した Y 値は図中に示す近似曲線より，SL12-20-1 では 1.9，SL8-20-2 では 2.0 となる。本研究では，この正規化した Y 値を簡易的に締固め完了輝度値とし



図－13　締固め判定図(SL12 と SL8)

た。一方，試験体 SL12-20-1 におけるバイブレータからの距離 300mm の位置（領域 3）においても正規化した Y 値の増加量は鈍化する傾向にある。これは，入力される締固めエネルギーによって上昇するブリーディング水が上限に達したためであると考えられる。したがって，当該位置近傍で締固めを行うことで輝度値は

表－3　密度の測定結果

	密度(g/cm^3)	
	締固め完了範囲	締固め不足範囲
SL12-20-1	2.14	2.09
SL12-20-2	2.24	2.19
SL8-20-1	2.17	2.10
SL8-20-2	2.21	2.14

上昇すると考えられる。

一例として，SL12-20-1 における正規化した Y 値の経時変化を図－12 に示す。バイブレータからの距離 100mm（領域 1）および 200mm（領域 2）に着目すると，締固め完了エネルギー以降の正規化した Y 値は増加量が鈍化している傾向にある。そのため，正規化した Y 値の経時変化から締固め完了を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。

SL12 と SL8 の締固め経過時間 5 秒および 20 秒時点の締固め完了輝度値をもとに判定を行った締固め判定図を図－13 に示す。ここで，SL12-20-2 および SL8-20-1 も上記と同様の方法で締固め完了輝度値（SL12-20-2 は 1.9，SL8-20-1 は 2.3）を求め，締固め判定を行った。試験体 SL8-20-1 を除き，締固め時間の増加に伴い，締固め完了範囲がバイブレータの挿入位置から約 300mm 程度まで拡大した。全体的な傾向として，試験体右側（3 時方向）の締固めが進行している傾向にあるが，これは試験体左側（9 時方向）から締固めを行ったため，試験体の 9 時方向は，試験者の影が打込み面にかかってしまい，輝度値が低下したと考えられ，この補正方法は今後の課題としたい。

SL8-20-1 は右手側（3 時方向）に卓越して締固め完了と判定される領域が認められた。これは基準となる輝度値を抽出した領域の凹凸面が大きく，正規化した Y 値が極端に大きくなったため，締固め完了と判定される領域が少なくなったと考えられる。そこで，同配合である SL8-20-2 の締固め完了輝度値（締固め完了輝度値は 2.0）をもとに行った締固め判定図を図－13 の（i）および（j）に示す。判定図より，上記に示す傾向と同様にバイブレータの挿入位置から約 300mm 程度の領域まで締固め完了と判定される領域が認められた。そのため，今後は締固め前のコンクリート表面の粗度の補正方法についても検討を行う。

また，図－13 に示す締固め完了範囲と締固め不足範囲でそれぞれ採取した小径コアの密度（低層，中層および高層の 3 領域の平均値）の測定結果を表－3 に示す。いずれの配合においても締固め完了範囲の密度が締固め不足範囲の密度よりも大きいことから，正規化した Y 値の時間変化から締固め程度を評価することがある程度可能であった。

5. まとめ

本研究で得られた知見は以下に示すとおりである。

(1) 配合，撮影場所の違いにより正規化した Y 値の大きさ，挙動は異なるが締固めエネルギーの増加に従い，正規化した Y 値は急激に増加し，やがて一定値に収束した。

(2) 締固めエネルギーと試験体から採取したコア試験体の密度との関係から算出した締固め完了エネルギーから締固め完了時の輝度を同定し，打込み面の面的な締固め程度の評価を行った結果，ある程度妥当な結果が得られた。ただし，試験者等の影や打込み面の表面粗さについての補正方法について検討する必要がある。

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） 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, pp1399-1404, 2017.

3） 渡邉隼平，品川大成，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，コンクリート工学年次論文集，vol.40, No.1，pp1281-1286，2018.

4） 渡邉隼平，村上祐貴，上村健二，外山茂浩：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，コンクリート工学年次論文集，vol41，No1，pp1301-1306，2019

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固め性試験法に関する研究，土木学会論文集，vol.62，No.2，pp416-427，2006.

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内部振動機の作用領域に関する考察，土木学会論文集，No426/V-14，pp1-18，1991