

論文 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

堀井 夏鈴^{*1}・高橋 凌^{*2}・上村 健二^{*3}・村上 祐貴^{*4}

要旨：本研究では、内部振動機を用いた締固めによる打込み面の色情報の変化とコンクリートの強度特性の関係を明らかにすることを目的とし、人間が知覚できるほとんどの色を忠実に取得可能な XYZ カメラを用いて、振動締固め中の打込み面の色相や反射輝度を計測した。その結果、加振時間の増加に従い振動機から近い程、打込み面の Y 値（反射輝度）が増加する傾向にあり、その変化は目標スランプによって相違した。また、締固め直後の Y 値で正規化した締固めの終了時の Y 値とコンクリートの圧縮強度には相関が認められ、正規化した Y 値が増加するに従い、コンクリートの圧縮強度は増加する傾向にあった。

キーワード：締固め、XYZ カメラ、打込み面の色情報、振動加速度

1. はじめに

コンクリートの品質確保において、コンクリート打込み時の締固め作業は、重要な施工管理項目の一つであり、内部振動機等を用いて締固め作業を適切に行うことが、要求される品質確保には不可欠である。コンクリート標準示方書では、締固め時間の目安は示されているが、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¹⁾。このように、締固め完了の目安として示されている指標は、目視判断によるところが大きく、作業員の経験に委ねられているのが現状であり、作業員の培ってきた技能や経験に締固め作業の質が左右する。

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。このような背景から近年では各種センサーを用いた客観的な締固め判定手法が提案されている^{2), 3), 4)}。

前述したように、締固め程度は打込み面の様相によって判断することが経験的に行われている。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強度特性を定量的に評価することを目的として、人間が知覚できるほとんどの色を忠実に取得可能な XYZ カメラを用いて計測した締固め中の打込み面の色情報の変化と強度特性との関連性について検討した。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体は図-1に示すように、長さ 1000mm×幅 300mm×高さ 250mm である。セメントには普通ポルトランドセメントを使用した。細骨材は陸砂（表乾密度 2.63g/cm³）を使用し、粗骨材には砕石を使用した（表乾密度 2.65g/cm³）。コンクリートの配合を表-1に示す。本研究で用いた配合は 2 水準であり、目標スランプがそれぞれ 8cm および 12cm である。

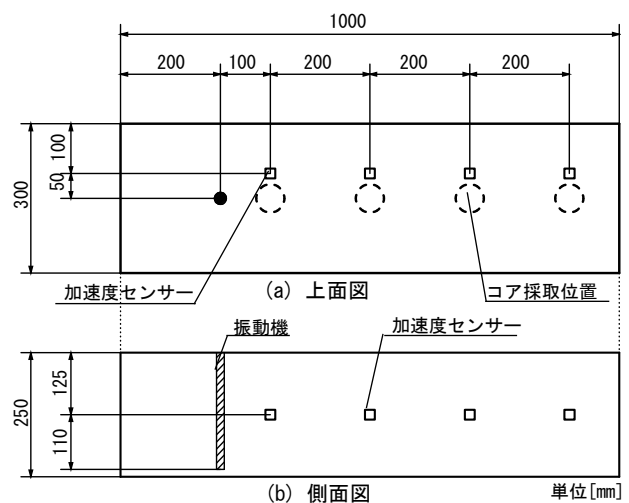


図-1 試験体概要

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 ンプ [cm]	単位量[kg/m ³]				
					水	セメ ント	細骨 材	粗骨 材	AE 減水剤
25	55.0	42.0	4.5	8	150	273	793	1104	2.73
				12	162	294	774	1077	2.94

*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)

表-2 実験パラメータ

試験体名	目標スランプ [cm]	振動時間 [s]
SL8-5s	8	5
SL8-20s		20
SL8-60s		60
SL12-5s	12	5
SL12-20s		20
SL12-60s		60

表-2 に実験パラメータを示す。スランプ 8cm, 12cm ともに, 実験変数は内部振動機による締固め時間であり, 締固め時間は 5 秒, 20 秒および 60 秒の 3 水準とし, 計 6 体の試験体を作成した。試験体は材齢 1 日の時点で脱型し, 脱型後 35 日間標準養生 (水中 20℃) を行い, その後は室内で気中養生 (室温約 20℃) とした。

2.2 締固め方法

図-1 に示すように、電棒タイプの内部振動機（直径：28mm、振動数：12500～15000r.p.m.）を型枠端面から200mm離れた位置に235mmの深さまで鉛直に挿入した。型枠内にスコップでコンクリートを打込み後、コンクリートを内部振動機で所定の時間加振した。締固め終了後、打込み面はコテで均した。

2.3 締固め中のコンクリート内部の振動加速度の測定

図-1 に示すように、試験体内部には、加速度センサー（容量 500m/s²）を 125mm の深さに、内部振動機から 100mm, 300mm, 500mm, 700mm 離れた位置に設置した。締固め開始から締固め終了まで 80μ 秒間隔で加速度を計測した。

2.4 締固め中のコンクリート表面の色情報の測定

作業員の目視による締固め判断を機械によって置き換えるためには、人間の知覚する色を定量化する必要がある。本研究では知覚する色を全て正值として表現することのできるCIE-XYZ表色系を使用する。また、撮影にはCIE-XYZ表色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カメラを使用する。XYZ値は直感的ではないため、本研究では色度座標 xy と輝度値 Y を用いて分かりやすい色表現を行う。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る。以下、反射輝度 Y と色度座標 xy をまとめて Yxy と呼ぶ。

コンクリートを加振している間、打込み面を XYZ カメラで撮影し（4 フレーム/秒），打設面の色情報を取得する。図-2 に示すように，コンクリートの打込み面画像に 30×30 ピクセル（約 15mm×約 15mm）の領域を設定し，各領域での色情報を取得する。

2.5 コア試験体による圧縮強度試験

試験体は材齢 35 日の時点で、内部振動から 100mm, 300mm, 500mm, 700mm 離れた位置から、 $\phi 50\text{mm} \times$

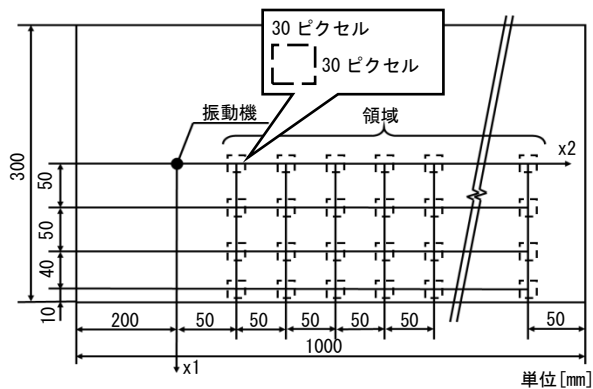


図-2 色情報を取得する領域

表-3 コンクリートのフレッシュ性状

試験体名	振動時間 [s]	目標		測定結果		
		空気量 [%]	スランプ [cm]	空気量 [%]	スランプ [cm]	練上がり温度 [℃]
SL8-0s	0	4.5	8	3.5	5.5	22.0
SL8-5s	5			3.3	5.0	18.5
SL8-20s	20			3.8	5.5	21.5
SL8-60s	60			4.1	6.5	18.0
SL12-0s	0		12	3.0	9.5	22.0
SL12-5s	5			3.4	11.0	13.0
SL12-20s	20			3.5	10.5	22.0
SL12-60s	60			4.3	12.0	18.0

250mm のコアを採取した（図-1 参照）。採取したコア底面から高さ 125mm の位置を中心とし、その中心から上下に 50mm の位置をコンクリートカッターで切断し、強度試験用の供試体（ $\phi 50\text{mm} \times 100\text{mm}$ ）とした。コア供試体の圧縮強度試験は、材齢 38 日の時点で実施した。

3. 実験結果

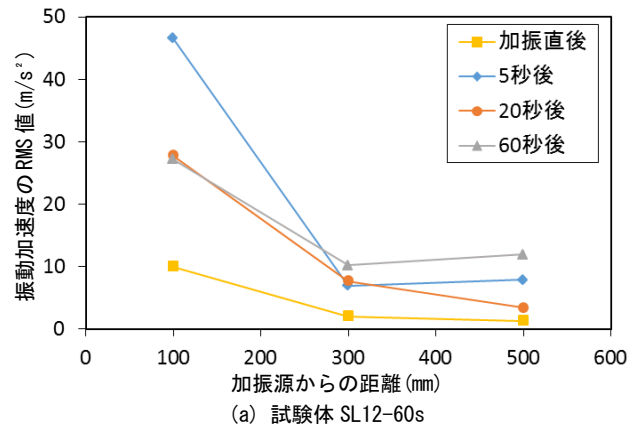
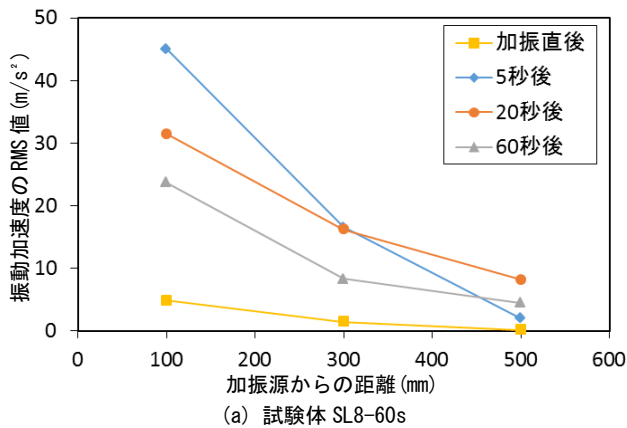
3.1 コンクリートのフレッシュ性状

表-3 にフレッシュコンクリートのスランプ試験結果と空気量試験結果を示す。JISA5308 で規定される目標値に対する誤差は、スランプ値が $\pm 2.5\text{cm}$ 以内、空気量が $\pm 1.5\%$ 以内であり、スランプ値は試験体 SL8-5s を除き、規定範囲内に収まっていた。空気量誤差については全ての試験体で規程の範囲内であった。

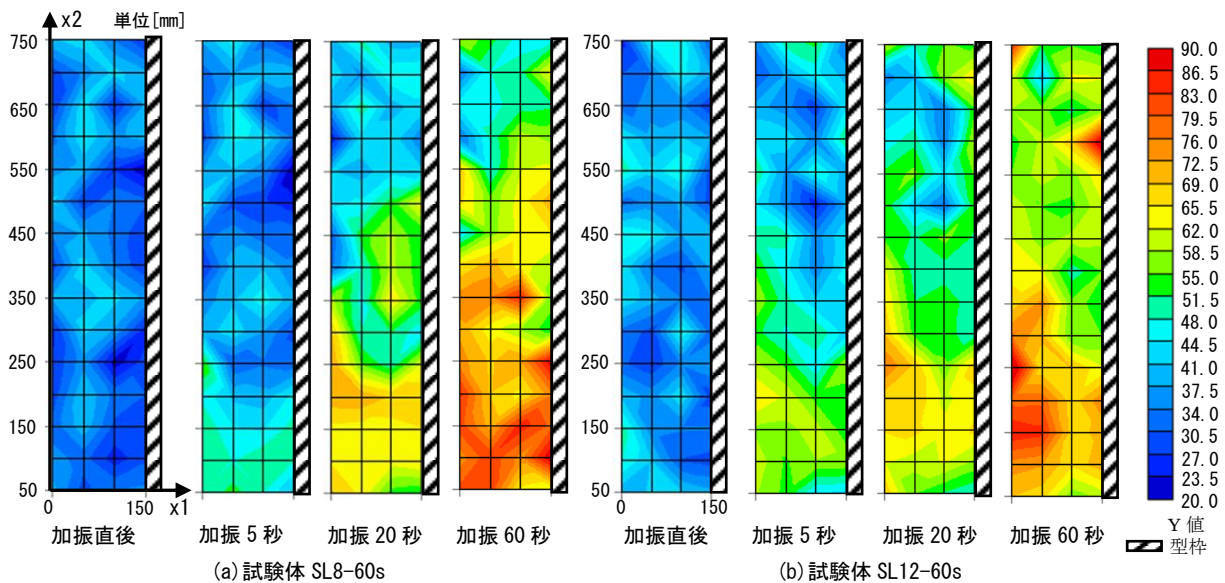
3.2 締固め中のコンクリートの加速度

加速度センサーで計測した加速度波形には時間的な変動が認められたため、加振時間中の加速度データについて二乗平均平方根 (RMS 値) を求めた²⁾。一例として試験体 SL8-60s および試験体 SL12-60s における内部振動機から各測定点までの離隔距離と RMS 値の関係を図-3に示す。なお、図中の加振直後とは、加振開始 0 秒から 0.2 秒間の RMS 値である。また加振開始から 5 秒、20 秒および 60 秒は前後 0.1 秒の計 0.2 秒間の RMS 値である。なお、加振源から 700mm の地点に設置した加速度計が故障し、当該位置における試験体 SL8-60s および試験体 SL12-60s の加速度データを得ることはできなかった。

全体的な傾向として、計測されたコンクリート中の振動加速度は、振動機から距離が離れるに従い、伝播され



図－3 加振中の加速度の RMS 値



図－4 加振時中の打込み面における Y 値のコンター図

る加速度が小さくなる傾向にあり、距離減衰が確認される。各測定位置における RMS 値の時間変化に着目すると、全体的な傾向として加振直後から 5 秒間で加速度が増大し、その後は、加速度が減少する傾向にあった。これは締固めによりコンクリートの一体化が進むことで、振動を受ける系の質量が大きくなったことが原因であると考えられる。また、試験体 SL8-60s の場合は振動機から 300mm と 500mm の間で距離減衰が確認されたが、スランプ 12cm の場合ではその間での距離減衰は認められなかった。スランプ 12cm はスランプ 8cm に比べて相対的に単位水量が多いため、振動が効率よく伝播したためであると考えられる。

3.3 締固め中のコンクリート表面の色情報の変化

(1) Y 値（反射輝度）

図－4 に、一例として試験体 SL8-60s および試験体 SL12-60s の加振中の打込み面における Y 値（反射輝度）のコンター図を示す。なお、加速度計を埋設した側の試験体中央から半分の領域では、打込み面上に加速度センサーのケーブルがあり、色情報の測定が困難であったこ

とから、加速度計を埋設していない側の試験体中央から半分の領域を図示した。ここでは、局所的な色彩情報の変化について検討するため図－4 に示すメッシュ（約 50mm×約 50mm）の各交点を中心とした 30×30 ピクセル（約 15mm×約 15mm）の領域の色情報を取得した。また、図中に示す数値は振動機を挿入した位置からの距離である。図－4 より加振時間の増加に従い、Y 値が変化する領域は拡大しており図－3 に示す加振中の RMS 値の分布と整合する。また、加振 20 秒の時点では、両試験体ともに型枠側の領域の Y 値が試験体中心軸上に比べて奥行き方向の変化が大きい。

図－5 には、試験体 SL8-60s および試験体 SL12-60s における Y 値の経時変化を示す。図中には振動機から試験体奥行き方向に 100mm 離れた位置から 700mm までの Y 値を 100mm 間隔で示した。なお、Y 値はコア供試体の断面の大きさ（φ 50mm）を考慮してコア抜きする領域を中心として、100×100 ピクセル（約 50mm×約 50mm）の領域の平均値である。まず、いずれの試験体においても加振時間の増加に伴い Y 値が増加していることが分か

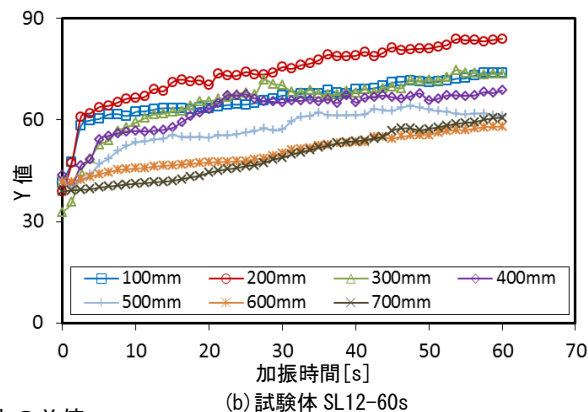
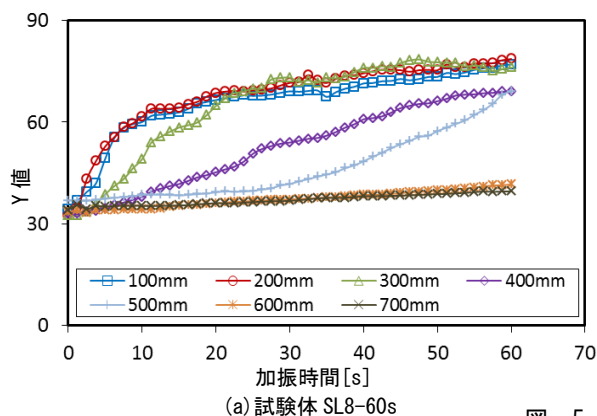


図-5 加振中の Y 値

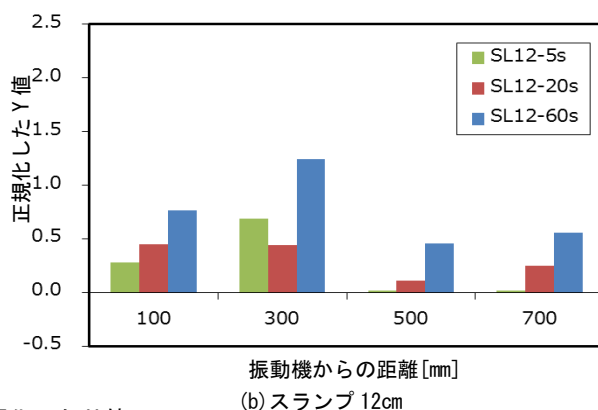
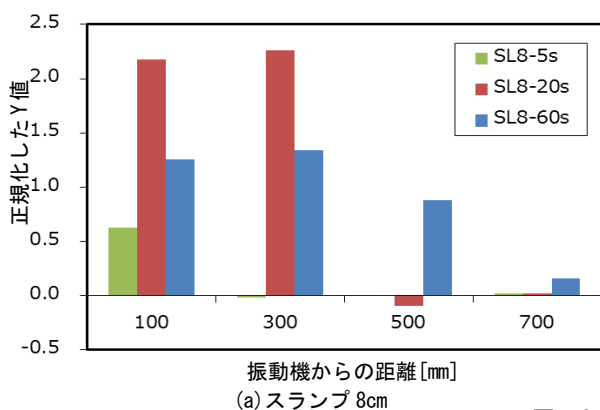


図-6 正規化した Y 値

る。Y 値は加振初期で急激に増加し、加振時間の増加に伴い、Y 値の増加は緩やかとなっている。また、Y 値の初期値は測定位置によってばらつきを有することが分かる。これは、照明、試験体、カメラ間の幾何学的な影響を受け、各計測点で光の当たり方が均一でないことが要因であると考えられる。

図-6 に各試験体の加振直後の Y 値で正規化した加振終了時の Y 値を示す（以下、正規化した Y 値）。スランプ 8cm の場合、試験体 SL8-5s および試験体 SL8-20s では前者は振動機からの距離が 300mm 以上、後者は振動機から 500mm 以上離れた位置において、Y 値が変化しておらず、ペースト分が浮上するだけの振動が伝播していないと考えられる。振動機からの距離が 100mm および 300mm の位置では、加振時間 20 秒の試験体 SL8-20s の方が加振時間 60 秒の試験体 SL8-60s より Y 値の増加率が大きい。これは、前者は後者に比べて一体性がなく、振動機近傍のみの比較的質量の小さいコンクリートが締固められたため、Y 値の増加率が大きくなったものと考えられる。

次に、スランプ 12cm の場合においては、加振時間 20 秒の試験体 SL12-20s において、振動機からの距離が 500mm 以上離れた位置においても Y 値の増加が確認された。これはスランプ 8cm に比べて単位水量が多く、流動性を有するため、振動機から比較的離れた位置まで振

動が伝播したためであると考えられる。

(2) 色度座標 x 値, y 値

図-7、図-8 に一例として試験体 SL8-60s および試験体 SL12-60s において、振動機から 100mm, 300mm, 500mm および 700mm 離れた位置における色度座標 x 値, y 値の推移を示す。色度座標では反射輝度情報が除外され、主波長や色純度といった純粋な色情報を捉えることができる。図中には各測定値の Y 値も併せて示している。いずれの測定位置においても Y 値の変化に応じて x 値, y 値も変化しているが、その変化量は Y 値に比べて小さい。x 値, y 値は光源の変化の影響が小さいので、測定環境が大きく変化する屋外での測定では有効な指標であると思われるが、本研究では、締固め中の変化量の大きい Y 値に焦点を当てて以降の検討を行う。

3.4 Y 値とコンクリート強度の関係

表-4 にコア供試体の圧縮強度試験結果を示す。また、図-9 に振動機からの距離とコア供試体の圧縮強度の関係を示す。コア供試体の圧縮強度は、振動機から 100mm, 300mm, 500mm および 700mm の位置の平均値である。また、各試験体でコンクリートの強度が異なるため、コア供試体の圧縮強度を強度供試体（φ10cm×20cm）の圧縮強度で正規化した。なお、強度供試体の載荷試験材齢はコア供試体と同様、材齢 38 日である。強度供試体は材齢 2 日の時点で脱型し、脱型後 34 日間標準養生（水中

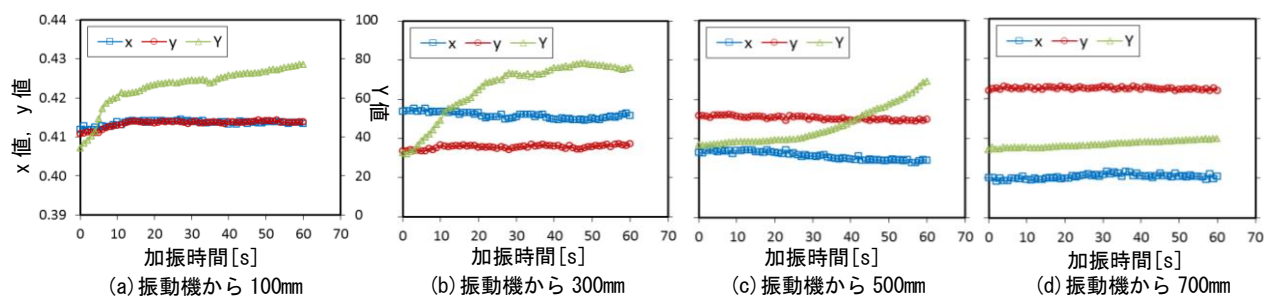


図-7 Yxyの時間的変化(試験体 SL8-60s)

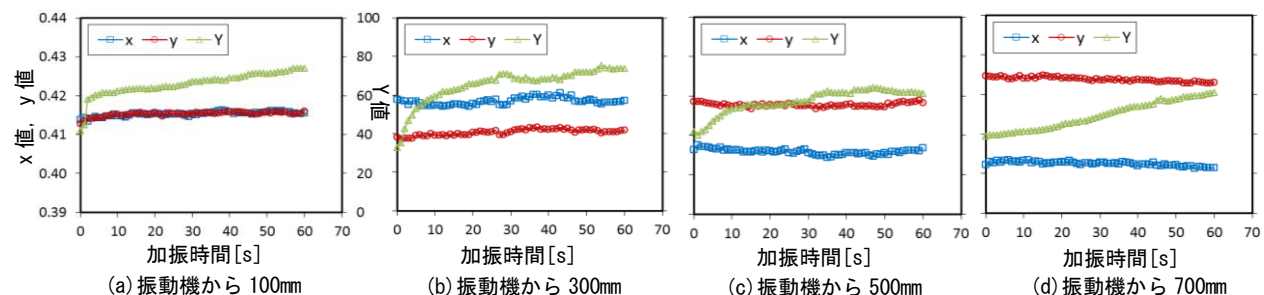


図-8 Yxyの時間的変化(試験体 SL12-60s)

試験体名	スランプ [cm]	加振 時間 [s]	コア供試体					強度供試体 圧縮強度 [N/mm ²]	コア供試体圧縮強度/ 強度供試体圧縮強度
			振動機からの 距離[mm]	振動終了時		密度 [kg/m ³]	圧縮強度 [N/mm ²]		
				Y値	正規化したY値				
SL8-5s	8	5	100	46.797	1.628	2327	38.1	43.0	0.886
			300	32.159	0.986	2311	38.8		0.902
			500	36.132	1.008	2290	26.8		0.623
			700	25.291	1.022	2241	22.5		0.524
SL8-20s		20	100	40.042	3.180	2334	39.8	46.1	0.863
			300	47.561	3.262	2334	34.9		0.756
			500	13.314	0.908	2341	31.4		0.681
			700	14.644	1.021	2337	35.0		0.759
SL8-60s		60	100	77.010	2.256	2328	35.1	39.3	0.894
			300	76.095	2.340	2295	36.9		0.939
			500	69.160	1.877	2291	24.7		0.629
			700	39.543	1.161	2320	16.4		0.418
SL12-5s	12	5	100	50.319	1.284	2286	37.2	47.1	0.790
			300	67.630	1.693	2277	26.4		0.560
			500	37.749	1.020	2295	35.3		0.750
			700	36.728	1.022	2268	37.8		0.802
SL12-20s		20	100	50.533	1.454	2344	35.4	38.3	0.926
			300	55.117	1.448	2341	35.6		0.930
			500	47.426	1.110	2328	33.5		0.874
			700	50.550	1.254	2335	35.8		0.934
SL12-60s		60	100	73.847	1.771	2366	38.9	43.0	0.905
			300	73.543	2.243	2348	37.3		0.868
			500	61.089	1.457	2281	33.0		0.767
			700	60.673	1.561	2338	35.4		0.824

20℃)を行い、その後は気中養生(室温約20℃)とした。

表-4より、コア供試体圧縮強度が、強度供試体圧縮強度よりも全て低くなっている。コア供試体は、試験体中心からコア抜きしているため、強度供試体に比べて、養生中に供給される水分が少ないことや寸法効果の影響が考えられる。また、いずれのスランプの場合においても、振動機から500mmまでは、距離が離れるにしたがい、圧縮強度が低下する傾向にある。一部の試験体では

振動機から700mm離れた位置の圧縮強度が500mmの位置よりも圧縮強度が大きい。図-4に示したY値のコンター図を鑑みると、型枠に伝わった振動が750mm側の端面に伝わった影響が考えられ、型枠端面に近い振動機から700mmの位置の圧縮強度が500mmの位置に比べて増加した可能性がある。また、本実験では、コアを採取するため、締固め終了後に打込み面をコテで均したことが強度に影響した可能性もあり、今後更なる検討が必要

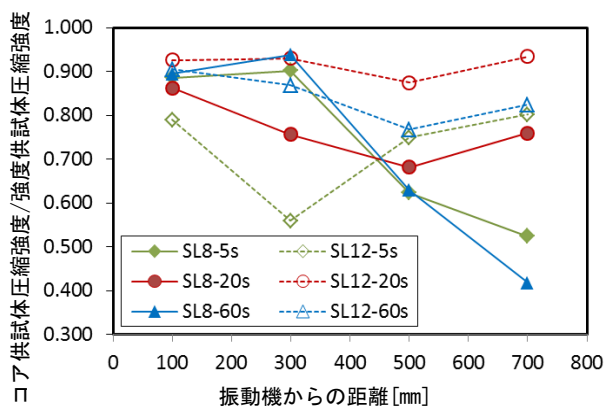


図-9 振動機からの距離と圧縮強度

である。

図-10 に正規化した Y 値とコア供試体の圧縮強度の関係を示す。図-9 と同様、コア供試体の強度は、強度供試体(φ10cm×20cm)の圧縮強度で正規化した。また、図-10 には試験体毎に近似直線を示した。その際、試験体 SL8-20s の振動機から 100mm および 300mm と試験体 SL12-5s の振動機から 300mm における位置は他と傾向が明らかに異なっていたため除外した。このことについては後述する。

同図に示すようにいずれのパラメータにおいても Y 値の増加に伴いコア供試体の圧縮強度は増加する傾向にある。Y 値の増加に伴う圧縮強度の増加はスランプ 8cm の試験体の方が大きく、スランプが小さい方が Y 値の変化に伴う強度特性の変化が鋭敏に現れる可能性がある。スランプ 8cm はスランプ 12cm に比べて単位水量が少ない。したがって打込み面の Y 値を変化させるペースト分の浮上に必要な振動エネルギーは大きくなり、スランプ 8cm の方が Y 値の変化に伴う圧縮強度の変化が大きくなったと考えられる。試験体 SL8-20s において、正規化した Y 値が 3.0 を超えている位置は、振動機から 100mm および 300mm の位置であり、締固めによるコンクリートの一体化が進行せず、振動機から近い領域のみに振動エネルギーが供給された可能性がある。すなわち、近似直線を示す際に除外した 3 つの実験結果については、材料分離を生じた可能性がある。一方、試験体 SL8-20s よりも振動時間が長い試験体 SL8-60s においては、局所的な Y 値の増大は認められない。これは、型枠へのコンクリートの打込みの状況によって、振動エネルギーの伝播性状が異なる可能性がある。

このように、コンクリート打ち込み面の Y 値と圧縮強度には相関性が認められたが、同一スランプの中でも Y 値と圧縮強度は一義的な関係ではなかった。前述したように、Y 値は照明、試験体、カメラ間の幾何学的な影響を受けるため、これにより同一スランプにおいても一義的な関係が見いだせなかったと考えられる。しかしなが

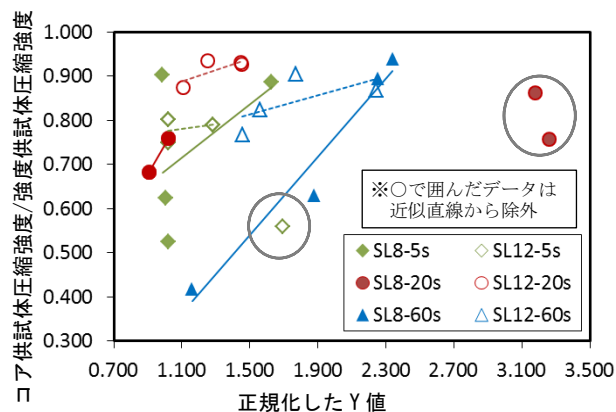


図-10 正規化した Y 値と圧縮強度

ら、試験体個々では圧縮強度と Y 値には相関関係が確認されたため、今後は光度や試験体表面の粗さ等を考慮することで、測定環境の影響を低減することが課題である。

4. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 本実験の範囲内では、Y 値の変化は、側枠側で顕著に生じた。また、型枠を介して振動が伝播し、型枠端面に近い箇所の Y 値が大きくなる場合がある。
- (2) 純粋な色変化である x 値、y 値は Y 値に比べて締固め中の変化は小さい。
- (3) 加振直後の Y 値で正規化した加振終了時の Y 値と圧縮強度には相関性が認められ、正規化した Y 値の増加とともに圧縮強度が増加する傾向にあった。
- (4) Y 値の増加に伴う圧縮強度の増加割合はスランプ 8cm の試験体の方がスランプ 12cm の試験体に比べて大きくなる傾向にあった。

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) 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-221，2015
- 3) 古屋弘，上高克弘，久保貴：ダム用コンクリート締固め判定手法の開発，大林組技術研究所報，No.78，pp.1-8，2014
- 4) 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