

論文 締固めを必要とする高流動コンクリートの締固め方法に関する基礎的検討

鈴木 将充*1・古川 翔太*2・早川 健司*3・加藤 佳孝*4

要旨: 本研究では、スランプフロー45cm程度のコンクリートの締固め方法を把握することを目的に、その基礎段階として、振動締固め時の充填状況、棒状バイブレータからの振動伝搬、振動締固めによる粗大な気泡の残留量と材料分離の程度を測定する実験を行った。併せて、これらが圧縮強度と静弾性係数に及ぼす影響について検討した。その結果、スランプフロー45cm程度のコンクリートの振動締固めは、充填することに加え、密実とすることを目的とした粗大な気泡の除去が必要であることが確認された。また、棒状バイブレータからの振動伝搬は普通コンクリートと同程度であり、挿入間隔は同程度とすることがよいと考えられた。

キーワード: 高流動コンクリート, 振動締固め, 粗大な気泡, 材料分離

1. はじめに

土木分野では、現場打ちコンクリートの施工の効率化を図るため、従来のスランプ8cmのコンクリートよりも流動性を高め、良好なワーカビリティを有するコンクリートの活用が推進され始めている¹⁾。一方、一般的に流動性を高めたコンクリートは、材料分離抵抗性が低くなり²⁾、施工欠陥が発生するリスクが高まる。このような背景から、近年、材料分離を抑えるため、増粘成分が配合された高性能 AE 減水剤が開発され、粉体量の増加や増粘剤の別添加を行わずにスランプフロー管理のコンクリートが製造可能となった。そのなかでも、スランプフロー45cm程度のコンクリートは、締固めを必要とする高流動コンクリートに分類される²⁾が、自己充填性を有する高流動コンクリートと比較して、安定供給が可能かつ材料コストが低減できるため、その利用が望まれている。既に、トンネル覆工やケーソンの充填コンクリート等、部材や部位を限定した利用が行われている³⁾。一方、2019年のJIS A 5308の改正により、普通強度領域のスランプフロー区分が追加され、利用しやすい環境となったが、締固め方法等の標準的な施工方法が定まっていない。

参考文献⁴⁾では、「締固めの目的は、コンクリート中の空隙をできるだけ少なくし、鉄筋や埋設物とよく密着させ、コンクリートを型枠の隅々までいきわたらせ、均質で密実なコンクリートにすることにある」と記載されている。本論文内では、振動締固めを、コンクリートを型枠の隅々までいきわたらせる「充填」と、空隙を少なくして密実にする「気泡抜き」とする。普通コンクリートでは、打込みのみで充填しないため、振動締固めによってコンクリートを充填させるとともに、密実にするため気泡を抜いている。一方、自己充填性を有する高流動コンクリートでは、自重で充填され、締固めなくとも密実

であるため⁵⁾、気泡を抜く振動締固めが不要である。締固めを必要とする高流動コンクリートに分類されるスランプフロー45cm程度のコンクリートでは、振動締固めによって充填とともに気泡抜きが行われるが、その流動性から短い時間で締め固められるが材料分離も生じやすいと考えられるため、締固め時間や棒状バイブレータ挿入間隔等の締固め方法を適切に設定する必要がある。

そこで、本研究では、スランプフロー45cm程度のコンクリートの締固め方法を把握することを目的に、その基礎段階として、振動締固め時の充填状況、棒状バイブレータ（以降、バイブレータ）からの振動伝搬、振動締固めによる粗大な気泡の残留量と材料分離の程度を測定する実験を行った。併せて、これらが圧縮強度と静弾性係数に及ぼす影響について検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

表-1 に使用材料、表-2 にコンクリートの配合およびフレッシュ性状の試験結果を示す。コンクリートの配合は、高性能 AE 減水剤と増粘剤含有高性能 AE 減水剤を用いてコンクリートの粘性を変えた目標スランプフロー45cmの3配合 (No.2, No.3, No.4) に、比較用の目標スランプ12cmの普通コンクリート (No.1) および目標スランプフロー65cmの自己充填性を有する高流動コンクリート (No.5) を加えた計5配合とした。目標空気量は4.5%とした。コンクリートのフレッシュ性状試験は、それぞれ JIS A1101 スランプ試験, JIS A 1150 スランプフロー試験, JIS A 1128 空気量試験 (圧力法) に準拠して行った。なお、スランプフロー試験は3層5回突きによる方法で行い、空気量試験は突き棒と木槌により詰める方法で行った。

*1 東急建設 (株) 技術研究所 土木材料 G 修 (工) (正会員)

*2 東京理科大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (学生会員)

*3 東急建設 (株) 技術研究所 土木材料 G グループリーダー 博 (工) (正会員)

*4 東京理科大学 理工学部土木工学科 教授 博 (工) (正会員)

加速度計には、パイプレータ表面で容量 5000m/s² を、100～300mm の位置で容量 500m/s² を、400～500mm の位置で容量 200m/s² を用い、サンプリング周期は 5000Hz とし測定した。測定された加速度は、振動締固め 15 秒間の加速度振幅の平均値として整理し、締固めエネルギーは式(1)により求めた⁶⁾。締固めエネルギーに用いた加速度は、対象としたコアの範囲で加速度の減衰傾向が一定でないため、例えば、コア範囲 150-250 で 150, 200, 250 の 3 点を平均、のように加速度の平均値を用いた。加速度を測定していない点については、測定結果を線形近似して値を求めた。なお、50mm ではパイプレータ表面の加速度との線形近似で、550mm では加速度を 0 と仮定して求めた。

$$E = \frac{\rho \cdot \alpha^2 \cdot t}{4\pi^2 \cdot f} \quad (1)$$

ここに、 E : t 秒間にコンクリートが受ける締固めエネルギー (J/l), t : 締固め時間 (15sec), ρ : 試料の単位容積質量 (kg/l), α : 加速度振幅の平均値 (m/s²), f : 振動数 (s⁻¹)

(3) コアの圧縮強度試験・静弾性係数試験

コアの圧縮強度試験は、JISA 1107 に準拠して行った。コア供試体は、両端面を 25mm ずつ切断、研磨し、高さ 150mm を目標に仕上げた。養生方法は、試験材齢まで封緘養生とし、試験材齢は 28 日とした。圧縮強度比は、封緘養生した $\phi 100 \times 200$ mm の供試体を基準として求めた。

コアの静弾性係数試験は、JIS A 1149 に準拠して行った。コアのひずみは、ひずみゲージにより測定した。

(4) 粗大な気泡および粗骨材分布の測定

材料分離については、主に振動締固めによる鉛直方向を対象として、森田ら⁷⁾の研究を参考にモルタルと粗骨材の分離に着目し、粗骨材の分布を測定した。粗大な気泡については、参考文献⁸⁾で施工が硬化後の気泡分布に及ぼす影響を把握するために、目視にて視認可能な 1mm 以上の気泡を観察しており、本実験でも 1mm 以上の気泡を対象に測定した。

気泡と粗骨材の分布の測定は、 $\phi 100$ コアを用いて行った。図-2 にコアの観察面を示す。粗骨材は 5mm 以上の骨材を、気泡は 1mm 以上の窪みを対象にトレースし、二値化処理して面積を算出した。算出した面積は、高さ方向に 5 分割し、各範囲の面積で除して面積率を求めた。

3. 実験結果

3.1 振動締固め時の充填状況

示方書²⁾には、締固めが十分である目安として、コンクリートの体積が減少せず、表面がほぼ水平となり表面に光沢が現われることと記載されている。

No.1 は、振動締固め時間 15 秒でパイプレータからの

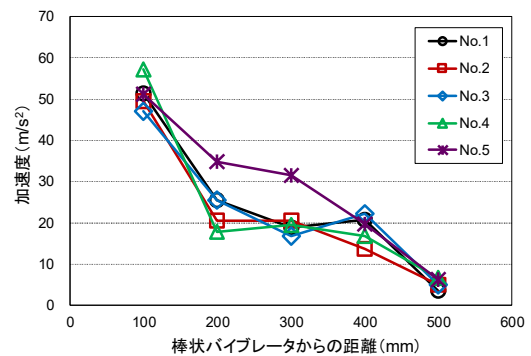


図-3 パイプレータからの距離と加速度の関係

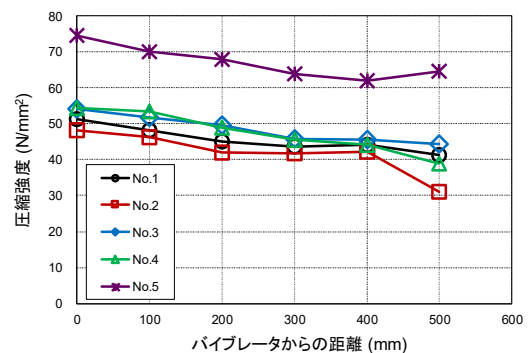


図-4 パイプレータからの距離と圧縮強度の関係

距離 300mm 程度まで体積減少がなく表面が水平になったが、500mm 付近の表面まで水平にならなかった。No.2～No.4 は、振動締固め時間 7～10 秒程度で全体がほぼ水平となり 400～500mm の表面に光沢が現われたため締固めが十分と判断した。No.5 は、打込み時ではほぼ水平であり、パイプレータが所定の深さに達した時点で全体の表面が水平であった。スランプフロー 45cm 程度のコンクリートは、普通コンクリートと比較して短い振動締固め時間で表面が水平となり、光沢が現われた。

3.2 振動の伝搬

図-3 にパイプレータからの距離と加速度の関係を示す。加速度は、パイプレータが所定の深さに到達してから 15 秒間の結果であり、いずれの配合もパイプレータから離れるとともに減衰し、500mm の位置で 10m/s² 未満であった。No.1～No.4 は、コンクリートの応答加速度に大きな差が見られなかった。No.5 は、200～300mm の位置で他の配合より加速度が大きく、既往の研究⁹⁾に近い傾向を示した。

3.3 硬化後の物性

図-4 にパイプレータからの距離とコンクリートコアの圧縮強度の関係を示す。圧縮強度は、各配合ともにパイプレータから距離 0mm、すなわち挿入位置で最大であり、パイプレータから離れるとともに小さくなった。なお、No.2-500mm の試験体には大きな空隙が残留していることが確認でき、圧縮強度が特に小さい原因と考えら

表-3 1mm以上の気泡面積率および粗骨材面積率

	面積率 距離 高さ	1mm以上の気泡 (%)						粗骨材 (%)					
		50-150	150-250	250-350	350-450	450-550	Ave.	50-150	150-250	250-350	350-450	450-550	Ave.
No.1 Gv:374/m ³ Air:4.4%	0-70	1.9	3.0	3.2	4.8	5.7	3.7	32.6	43.4	36.6	38.2	36.4	37.5
	70-140	0.3	1.3	2.1	3.9	6.2	2.8	40.8	51.5	44.6	39.7	34.8	42.3
	140-210	0.8	3.3	4.0	4.5	4.7	3.5	41.4	46.7	42.1	35.5	35.5	40.3
	210-280	0.6	3.6	5.3	4.6	5.3	3.9	47.3	45.9	38.7	36.7	32.3	40.2
	280-350	2.6	2.0	2.9	4.5	4.8	3.3	40.3	45.9	43.4	38.9	33.3	40.4
	Ave.	1.2	2.7	3.5	4.4	5.3	3.4	40.5	46.7	41.1	37.8	34.5	40.1
No.2 Gv:328/m ³ Air:3.1%	0-70	1.0	1.1	2.0	2.6	2.2	1.8	22.8	27.2	26.5	24.1	29.9	26.1
	70-140	2.2	1.0	1.1	2.4	2.2	1.8	34.7	37.4	37.7	38.7	41.3	38.0
	140-210	0.3	1.3	2.2	2.3	2.2	1.7	36.5	39.8	40.5	35.5	35.6	37.6
	210-280	1.1	2.0	1.7	1.9	2.2	1.8	41.0	33.7	36.1	36.8	36.8	36.9
	280-350	0.9	1.8	2.2	2.2	2.1	1.9	42.4	32.3	33.6	31.6	34.6	34.9
	Ave.	1.1	1.4	1.8	2.3	2.2	1.8	35.5	34.1	34.9	33.3	35.6	34.7
No.3 Gv:328/m ³ Air:3.2%	0-70	1.1	1.5	2.2	3.2	2.5	2.1	29.7	33.6	34.8	30.6	34.8	32.7
	70-140	1.8	2.1	2.6	2.1	3.0	2.3	45.1	32.9	34.5	36.3	36.9	37.1
	140-210	1.1	3.0	2.7	4.1	3.1	2.8	35.5	32.1	39.6	29.9	33.4	34.1
	210-280	1.0	1.4	2.7	5.0	3.5	2.7	30.1	41.6	35.2	29.9	33.3	34.0
	280-350	1.4	2.7	4.3	2.9	3.3	2.9	38.9	34.5	34.2	29.8	34.2	34.3
	Ave.	1.3	2.2	2.9	3.4	3.1	2.6	35.9	35.0	35.6	31.3	34.5	34.5
No.4 Gv:328/m ³ Air:3.9%	0-70	1.6	2.3	2.8	2.5	2.9	2.4	25.0	29.5	35.0	34.2	40.7	32.9
	70-140	1.3	1.6	2.4	3.8	4.8	2.8	34.8	38.4	34.8	35.2	31.4	34.9
	140-210	0.9	2.5	2.3	3.1	3.5	2.5	36.4	32.7	34.9	27.8	35.3	33.4
	210-280	0.8	3.2	3.3	3.0	4.6	3.0	42.3	35.0	32.8	43.0	29.9	36.6
	280-350	1.0	2.6	3.5	4.3	4.1	3.1	40.2	33.5	34.1	34.4	34.0	35.2
	Ave.	1.1	2.4	2.9	3.3	4.0	2.7	35.7	33.8	34.3	34.9	34.3	34.6
No.5 Gv:294/m ³ Air:3.2%	0-70	0.7	1.1	1.4	0.8	3.2	1.5	21.9	26.9	25.4	27.2	24.9	25.2
	70-140	1.3	0.8	1.5	1.3	1.4	1.2	35.9	33.9	38.4	36.1	39.2	36.7
	140-210	1.0	1.0	2.3	0.9	2.1	1.5	40.6	34.5	32.9	32.9	27.0	33.6
	210-280	0.4	1.4	3.2	2.2	1.2	1.7	33.2	39.3	30.8	30.0	30.9	32.9
	280-350	0.7	1.8	2.5	2.2	1.6	1.8	41.8	30.3	29.9	31.6	28.7	32.5
	Ave.	0.8	1.3	2.2	1.5	1.9	1.5	34.7	33.0	31.5	31.6	30.1	32.2

れる。

図-5 にパイブレータからの距離とコンクリートコアの静弾性係数の関係を示す。静弾性係数は、各配合ともにパイブレータからの距離と静弾性係数に明確な関係はなかった。なお、No.2-500mmの静弾性係数が特に小さいのは、圧縮強度と同様にコア内に大きな空隙が残留していたことが要因であると考えられる。

3.4 粗大な気泡および粗骨材分布

表-3 に各箇所の 1mm 以上の気泡面積率および粗骨材面積率を示す。普通コンクリートの標準的な施工方法では、パイブレータの挿入間隔が 50cm 以下であるので、所要の締固めが達成されているのは No.1-50-250mm までの範囲程度と想定される(表内赤色、下線部)。まず、水平方向の 1mm 以上の気泡面積率は、No.1 でパイブレータから離れるとともに増加していた。半径 250mm までは標準的な振動締固めが達成できていると考え、標準的な締固めで残留する 1mm 以上の気泡面積率は、No.1-150-250mm の結果から 3.0%程度以下と判断できる。No.5 は、振動締固めの影響がほとんどないと思われる 550mm でも 3.0%以下であり、締固め不要であることが伺える。No.5 もパイブレータ近傍の 1mm 以上の気泡面積率は減少していることから、締固めしなくても所要の密実性は確保されているが、締固めにより気泡は減少す

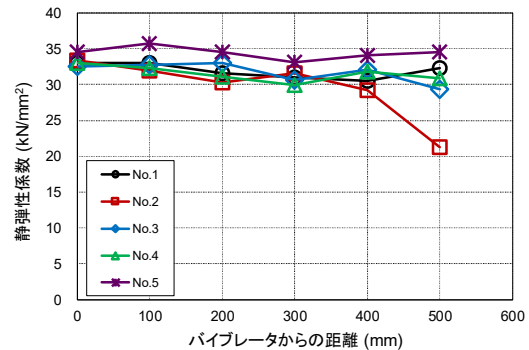


図-5 パイブレータからの距離と静弾性係数の関係

る。No.2~No.4 は、1mm 以上の気泡面積率の全体平均が No.1 より小さく、最大 5.0%と 3.0%を超える部分もあった。No.2~No.4 の 3.0%以下となる距離は、No.2 が 550mm、No.3 と No.4 が 350mm であり、No.1 よりも距離が長い、3.0%以下とするのに最大 2.0%程度の粗大な気泡を除去するための振動締固めが必要である。

次に、粗骨材面積率について比較する。各配合の特徴は、No.1 が水平方向の変動が大きく、No.2 と No.5 が鉛直方向の変動が大きく、No.3 と No.4 が全体的な変動が小さかった。No.1-50-250mm の粗骨材面積率は 32.6~51.5%であり、変動係数 11.9%であった。同範囲の変動係数は No.2 が 17.7%、No.3 が 14.1%、No.4 が 14.6%、No.5 が 18.3%であり、いずれも No.1 よりも大きかった。また、

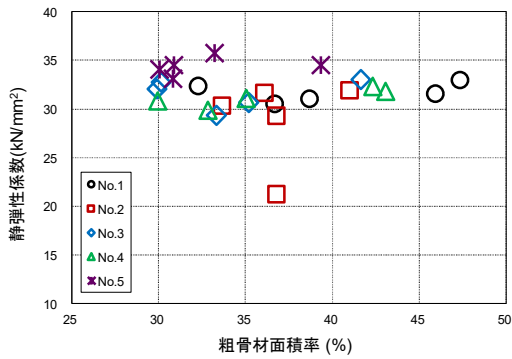


図-6 粗骨材面積率と静弾性係数の関係

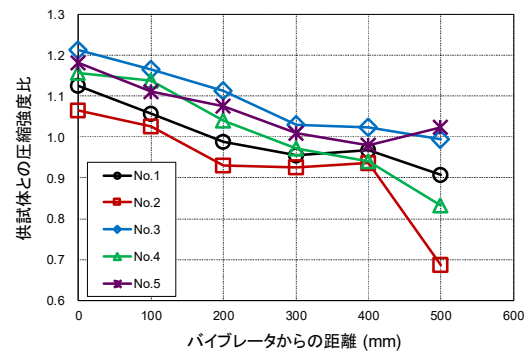


図-8 供試体との圧縮強度比

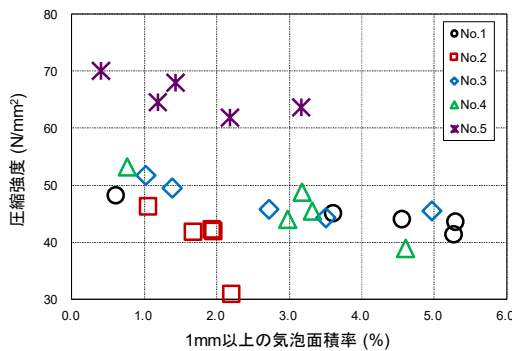


図-7 1mm以上の気泡面積率と圧縮強度の関係

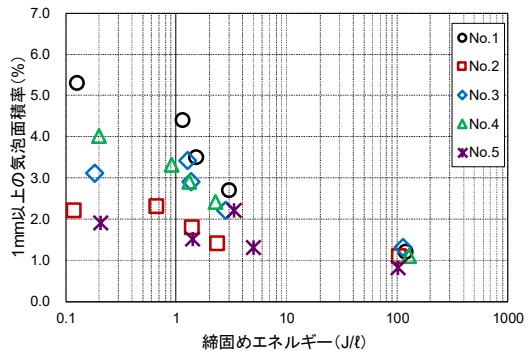


図-9 締固めエネルギーと1mm以上の気泡面積率の関係

バイブレータ近傍の距離 50-150mm の粗骨材面積率は、各配合ともに高さ 0-70mm が最小であり、鉛直方向の粗骨材面積率の最大最小差は、No.1 が 14.7%、No.2 が 19.6%、No.3 が 15.3%、No.4 が 17.3%、No.5 が 19.9%であった。No.2～No.4 は、No.1 より粗骨材の変動が大きかった。

4. 考察

4.1 粗大な気泡・粗骨材分布と硬化後の品質の関係

図-6 に粗骨材面積率とコンクリートコアの静弾性係数の関係を示す。なお、粗骨材面積率は、圧縮強度と同じ位置の高さ 210-280mm の結果を用いた。本実験の結果からは、粗骨材面積率とコンクリートコアの静弾性係数に明確な関係はなかった。この理由として、試験位置の粗骨材面積率 29.9～47.3%の範囲では、静弾性係数への影響は小さいものと考えられた。

図-7 に 1mm 以上の気泡面積率とコンクリートコアの圧縮強度の関係を示す。試験位置等は静弾性係数と同様である。コンクリートコアの圧縮強度は、各配合ともに 1mm 以上の気泡面積率の増加に伴い小さくなった。これは、圧縮強度が空気量の増加にほぼ反比例して低下する⁴⁾ ⁸⁾ことと一致する。

図-8 に供試体との圧縮強度比を示す。供試体との圧縮強度比は、No.1-200mm (162.5-237.5mm) でおよそ 1.0 であった。この結果より、3.4 で設定した標準的な施工方法の範囲の妥当性が確認できる。No.5 は、500mm でも供

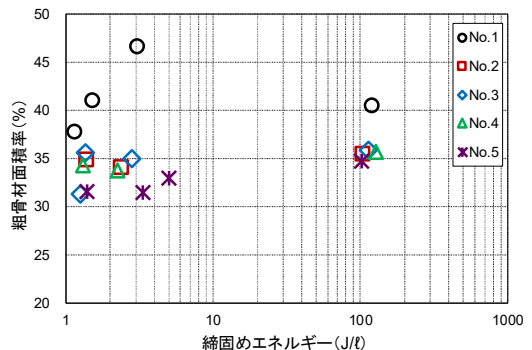


図-10 締固めエネルギーと粗骨材面積率の関係

試体との圧縮強度比が 1.0 程度以上であった。供試体との圧縮強度比が 1.0 以上となる範囲を振動締固めの完了範囲と考えた場合、No.2 が 200mm 未満、No.3 が 500mm 未満、No.4 が 300mm 未満と各配合で異なったが、振動伝搬の観点からは普通コンクリートと同程度であると考えられる。No.2～No.4 のバイブレータ近傍の圧縮強度比は 1.07～1.21 で供試体よりも大きく、500mm の圧縮強度比は 0.69～0.99 で供試体よりも小さかった。以上のことから、粗大な気泡が残留することで、供試体よりも圧縮強度が小さくなることが分かった。

4.2 振動締固めと粗大な気泡・粗骨材分布の関係

図-9 に締固めエネルギーと 1mm 以上の気泡面積率の関係を示す。1mm 以上の気泡面積率は、コアの距離毎

の平均を用いた。各配合の1mm以上の気泡面積率は、締固めエネルギーの増加に伴い小さくなる傾向を示した。No.2~No.4は、No.1と比較して、小さい締固めエネルギーで気泡が除去されており、締固めエネルギー2.0J/l以上で安定して1mm以上の気泡面積率を3.0%以下にできる可能性がある。

図-10に締固めエネルギーと粗骨材面積率の関係を示す。粗骨材面積率は、コアの距離毎の平均を用いた。各配合の粗骨材面積率は、締固めエネルギーとともに大きくなる傾向を示した。No.2~No.4は、パイプレータ近傍の粗骨材沈降が大きいことから、1か所当りの振動締固め時間を短くする必要があると考えられる。なかでも、コンクリートの粘性が小さいと考えられるNo.2は、パイプレータから離れた位置での粗骨材沈降も大きいことから、No.3およびNo.4より振動締固め時間を短くする必要があると考えられる。

4.3 振動締固め方法について

以上の結果より、スランプフロー45cm程度のコンクリートの振動締固め方法について考察する。

締固めの目的は、粗大な気泡が残留することで供試体よりも圧縮強度が低下したことから、密実に充填させることを目的とした振動締固めが必要であると考えられる。

次に、締固めの完了を1mm以上の気泡面積率が3.0%程度以下になることで判断すると、15秒間の振動締固めでNo.2が550mm、No.3とNo.4が350mmの位置まで締固め完了と判断できるため、普通コンクリートよりも締固め完了範囲を広くできると考えられる。しかし、この時の材料分離の程度を観察すると、パイプレータ近傍の上面で粗骨材沈降が大きく、15秒間の振動締固めでは長いと考えられる。以上のことから、振動締固め時間は、普通コンクリートの標準的な振動締固め時間よりも短くする必要がある。なお、振動締固めによる材料分離の程度は、増粘剤含有高性能AE減水剤を用いた方が小さかった。一方、振動締固め時のコンクリート表面を観察すると、普通コンクリートの標準的な振動締固めと比較して、短い時間で全体がほぼ水平となり、400~500mmの位置の表面に光沢が現われたことから締固めが十分であると判断された。しかし、400~500mmの位置での1mm以上の気泡の面積率は、3.0%より大きかった。以上のことから、表面観察から締固めが十分であると判断する目安は、普通コンクリートと異なる可能性がある。

次に、パイプレータの挿入間隔は、振動伝搬、粗大な気泡の残留、材料分離の観点から、普通コンクリートの挿入間隔と同程度とするのがよいと考えられる。

具体的な振動締固め方法については、例えば、従来のパイプレータを用いて、挿入間隔は標準的な挿入間隔と同程度とし、締固め時間を短くすることが考えられる。

5. まとめ

本研究で得られた知見を次に記す。

- (1) スランプフロー45cm程度のコンクリートの振動締固めは、充填することに加え、密実とするを目的とした粗大な気泡の除去が必要であることが確認された。
- (2) スランプフロー45cm程度のコンクリートの振動締固め時間は、材料分離および圧縮強度の観点から、普通コンクリートの標準的な施工方法よりも、振動締固め時間を短くする必要がある。
- (3) スランプフロー45cm程度のコンクリートのパイプレータ挿入間隔は、振動伝搬、粗大な気泡の残留、材料分離の観点から、標準的な挿入間隔と同程度とするのがよいと考えられる。

本研究では、硬化後の品質を強度特性で評価したが、物質の透過に対する抵抗性など耐久性との関係についても検討が必要である。また、配合条件、振動締固め条件、配筋状態が粗大な気泡の残留と材料分離に及ぼす影響についても今後の検討課題としたい。

謝辞：本研究を実施するにあたり、東京理科大学関係各位の協力を得た。ここに記して、感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 流動性を高めたコンクリートの活用検討委員会：流動性を高めた現場打ちコンクリートの活用に関するガイドライン，pp.1-4，2017.3
- 2) 土木学会：2017年制定コンクリート標準示方書〔施工編〕，2018.3
- 3) 土木学会：コンクリートライブラリー136 高流動コンクリートの配合設計・施工指針 2012年版，2012.6
- 4) 日本コンクリート工学協会：コンクリート便覧（第二版），pp.212-213，pp.373-376，1996.2
- 5) 小澤ほか：ハイパフォーマンスコンクリートの開発，コンクリート工学年次論文報告集，11-1，pp.694-704，1989
- 6) 國府勝郎，上野敦：締固め仕事量の評価に基づく超硬練りコンクリートの配合設計，土木学会論文集，No.532/V-30，pp.109-118，1996.2
- 7) 森田ほか：フレッシュコンクリートの振動締固めによる粗骨材沈下に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.23，pp.313-318，2001.7
- 8) 日本コンクリート工学協会：コンクリート中の気泡の役割・制御に関する研究委員会報告書，pp.80-82，pp.113-121，2016.6
- 9) 安田ほか：準高流動コンクリートの振動締固め方法に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.2，pp.415-420，1999.7