

論文 振動締固め時間および粗骨材の単位体積量・実積率が材料分離に与える影響

西村 和朗*1・古川 翔太*2・加藤 佳孝*3・江口 康平*4

要旨：振動締固めがフレッシュコンクリートの材料分離に与える影響を整理するために、振動締固め時間が材料分離の程度に与える影響と、粗骨材の単位体積量・実積率が材料分離の程度に与える影響を検討した。その結果、振動締固め時間の増加に伴いセメントペーストの浮上する量は増加し、細骨材や粗骨材の沈降する量も増加することが分かった。また、過剰な振動締固め（60秒）では、粗骨材の単位体積量の増加に伴い、単位水量が大幅に増加する供試体の高さ方向の範囲は小さくなることが分かった。加えて、粗骨材の実積率の低下に伴い、材料分離の程度は大きくなることが分かった。

キーワード：配合推定, 材料分離, 締固め, ブリーディング

1. はじめに

一般的なコンクリート構造物の施工では、型枠内にフレッシュコンクリートを打ち込み、振動機で締め固める。この際、フレッシュコンクリートの粘性が高いと材料分離は生じにくい、打込みや締固めの作業性が低下し、充填不良が生じやすくなる。一方、フレッシュコンクリートの粘性が低いと打込みや締固めの作業性は向上するが、材料分離が生じやすくなる¹⁾。このことから、均質なコンクリート構造物を建設するためには、フレッシュコンクリートの粘性に対して適切な振動締固めの程度を選定する必要がある。これに対して鈴木ら²⁾は、振動締固め時間が材料分離に与える影響を検討している。その結果、振動締固め時間の増加に伴い粗骨材の沈降量が増加することを報告している。また、流田ら³⁾は、振動締固め時間がブリーディングに与える影響を検討している。その結果、振動締固め時間の増加に伴いブリーディングによる水の浮上量は増加し、上部の圧縮強度が低下することが報告されている。以上より、振動締固め時間の増加に伴い、位置ごとのコンクリートの配合の変動は大きくなり、硬化コンクリートの品質に影響を与えることが予想される。

振動締固めによって生じる材料分離は、振動によってコンクリート中のモルタルが液状化することで粗骨材の沈降が引き起こされる⁴⁾と報告されている。ここで、粗骨材に着目して振動締固めに伴う材料分離を把握した検討した研究はあるが、その他の材料に着目した検討は殆どない。これに対して著者ら⁵⁾は、振動締固めに伴うフレッシュコンクリートの材料分離を、提案した配合推定試験を用いて実験的に把握した。打込み高さ 400mm の

供試体（断面 150×150mm）に対して棒状パイプレータで 15 秒間を振動締め固めた結果、水またはセメントペーストが浮上し、粗骨材が沈降することを明らかとした。

液相中の固相の沈降現象は、懸濁液中の微粒子（固相）の沈降を対象としたものが多い。その際に、固相の沈降速度は、一般的にストークスの沈降式⁶⁾で表現される。ストークスの沈降式は、固相の沈降速度を液相の粘性係数、固相の粒径、液相と固相の密度差で表現されるが、梅景ら⁷⁾は、固相となる粒子が複数の場合、粒子間に生じる相互作用力が沈降の抵抗になることを報告している。また、粒子間に生じる相互作用力は粒子間距離によって決定することから、液相と固相の割合や粒子の実積率が固相の沈降速度に影響すると考えられている⁸⁾。これをフレッシュコンクリートとして考えると、粗骨材の単位体積量や粗骨材の実積率が振動締固め時の材料分離に影響することが考えられる。

本研究では、振動締固めに伴う材料分離に影響する要因を整理するために、次の 2 つの検討を実施した。3 章では振動締固め時間が材料分離の程度に与える影響を、4 章では粗骨材の単位体積量・実積率が材料分離の程度に与える影響を検討した。

2. 配合推定試験方法

本研究では、フレッシュコンクリートの配合変化から材料分離の程度を把握した。ここで、加賀谷ら⁹⁾は、配合推定試験の結果から、振動締固めによってセメントペーストが浮上する際の水セメント比の変化は微小であることを報告している。このため、本研究では、振動締固めに伴う単位水量の変化を把握することで、間接的にセ

*1 東京理科大学 理工学研究科土木工学専攻 (学生会員)

*2 東京理科大学 理工学研究科土木工学専攻 (学生会員)

*3 東京理科大学 理工学部土木工学科 教授 博(工) (正会員)

*4 東京理科大学 理工学部土木工学科 助教 博(工) (正会員)

表-1 配合（振動締固め時間が材料分離に与える影響）

G _{max} (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単体量(kg/m ³)						スランプ(cm)		空気量(%)	
			W	C	S	G	AE 剤	AE 減水剤	目標	実測	目標	実測
20	50	45	165	330	808	1021	0.00924	0.792	10.0	9.0	5.0	5.5

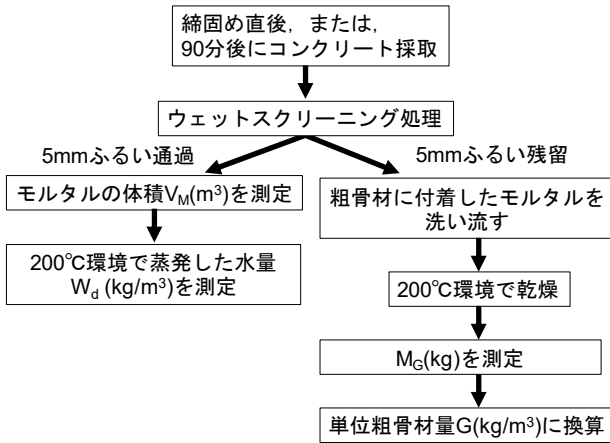


図-1 試験手順

メントペーストの浮上量を把握できると考えた。また、既報⁵⁾より、15秒間の振動締固めでは、供試体の高さによって単位水量および単位粗骨材量は変化した。単位細骨材量は変化しなかったため、単位水量に加えて単位粗骨材量も測定した。

著者らが提案した配合推定方法⁵⁾を参考に、振動締固めに伴う単位水量および単位粗骨材量の変化を把握した。試験手順を図-1に示す。まず、高さ400mmまでコンクリートを型枠(断面150×150mm)に打込み、中央部に棒状パイプ(直径28mm, 振動数12000~15000min⁻¹)で締め固め、振動締固め直後および振動締固め90分後(以降、ブリーディング発生時と称する)に8分割で試料を採取した。また、90分後の試料の採取は、コンクリート表面に浮上した水をスポイトで取水した後に実施した。採取した試料に対してウェットスクリーニング処理することで、試料をモルタルと粗骨材に分類し、粗骨材に対して洗い分析試験を実施した。ここで、本研究では、ウェットスクリーニング処理した粗骨材に付着した細骨材は微小であった。このため、ウェットスクリーニング処理後の粗骨材に付着したモルタルの影響は少ないと仮定した。洗い分析試験は既往の研究¹⁰⁾を参考に5mmふるいの上で粗骨材に付着したモルタル分を水で洗い流し、ふるい上に留まった粗骨材を質量変化がなくなるまで105°Cの環境に静置した。これを絶乾状態と判断し、式(1)より、コンクリート単位体積あたりの粗骨材質量を算出した。

$$G = \frac{M_G / \rho_{Gd} \times \rho_{Gs}}{V_M + V_G} \quad (1)$$

ここに、 G はコンクリートの単位体積あたりの粗骨材

量(kg/m³)、 V_M はモルタルの体積(m³)、 V_G は粗骨材の体積(m³)、 M_G は粗骨材の絶乾質量(kg)、 ρ_{Gs} は粗骨材の表乾密度(kg/m³)、 ρ_{Gd} は粗骨材の絶乾密度(kg/m³)とした。

ふるいを通過したモルタルに対しては、以降の試験で得られる蒸発水量を単位体積あたりの水量に換算するため、著者らが提案した方法⁵⁾で、モルタルの体積を測定した。その後、質量変化がなくなるまで200°C環境に静置し、その時の質量減少量を蒸発水量として測定し、式(2)より、コンクリートの単位体積あたりの水量を算出した。

$$W = \frac{W_d / \rho_w}{V_M + V_G} \times 1000 \quad (2)$$

ここに、 W はコンクリートの単位体積あたりの水量(kg/m³)、 W_d は蒸発水量(kg)、 ρ_w は水の密度(kg/m³)、 V_M はモルタルの体積(m³)とした。

3. 振動締固め時間が材料分離に与える影響

3.1 配合および振動締固め時間

セメントには普通ポルトランドセメント(以降Cと称する:密度3.15g/cm³, 比表面積3410cm²/g)、細骨材には山梨県富士川産川砂(以降Sと称する:表乾密度2.65g/cm³, 絶乾密度2.62g/cm³, F.M.2.73)、粗骨材には埼玉県秩父産砕石(以降Gと称する:表乾密度2.72g/cm³, 絶乾密度2.67g/cm³, F.M.6.74、実績率57.5%)、化学混和剤にはアルキルエーテル系AE剤およびグリニンスルホン酸系AE減水剤を用いた。検討した配合を表-1に示す。

振動締固め時間が材料分離に与える影響を把握するため、振動締固め時間は示方書に記載されている範囲の最小と最大である5秒と15秒にした。加えて、振動締固めによる材料分離の程度を顕著にするため、60秒間振動締固めた場合も実施した。

3.2 試験結果

振動締固め時間5秒後の各供試体の各高さ位置の単位水量および単位粗骨材量を図-2に、振動締固め時間15秒後の各供試体の各高さ位置の単位水量および単位粗骨材量を図-3に示す。なお、縦軸は、採取した各層のコンクリートの体積から各層の高さに換算し、各層の中心位置を測定高さとしている。また、横軸は、分割して採取した各試料の推定配合を、それらの平均値で除した値を基準配合に対する比を表している。ここで、分割した各試料中の空気量が把握できていないため、推定配合の

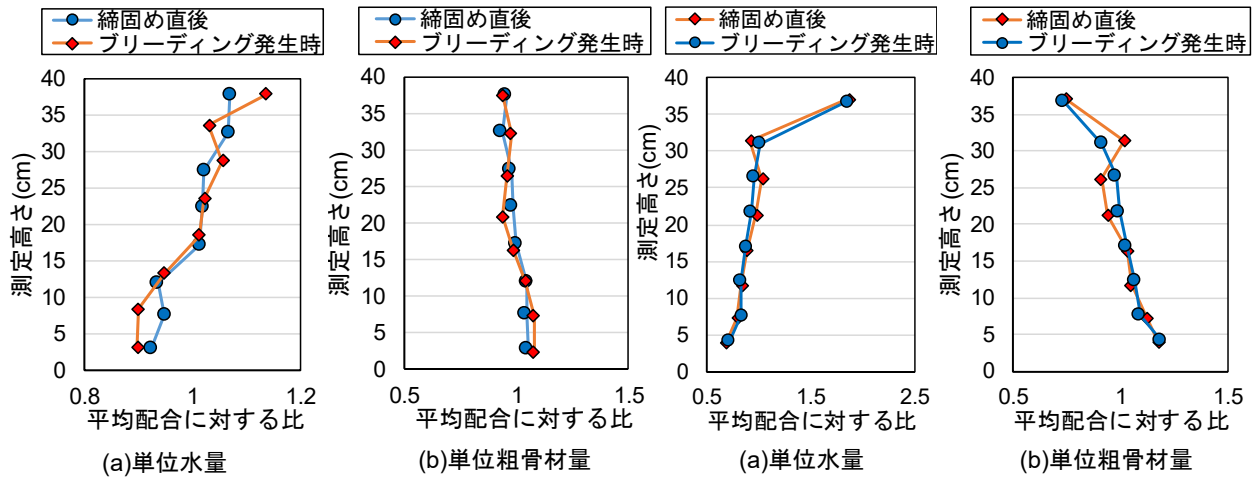


図-2 振動締固め 5 秒後の材料分離の程度

図-3 振動締固め 15 秒後の材料分離の程度

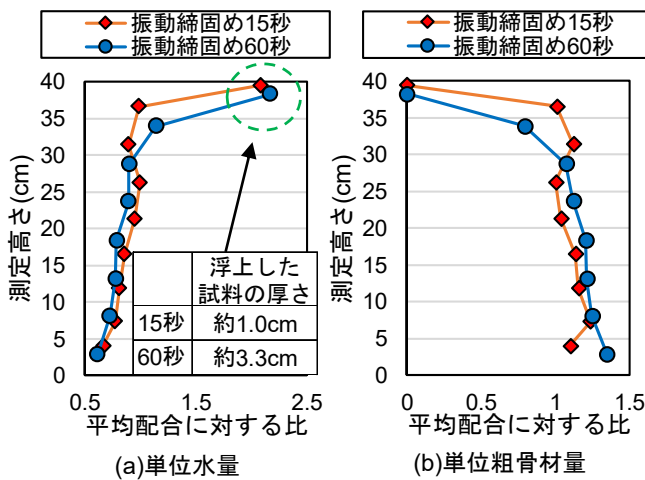


図-4 振動締固め直後の材料分離の程度

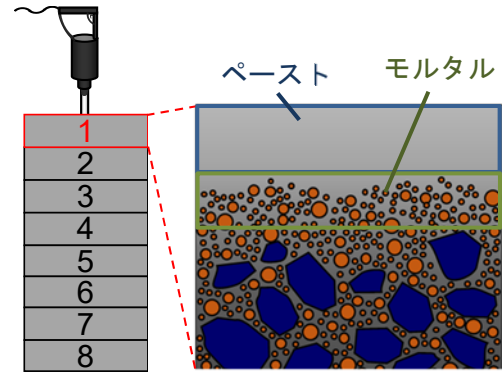


図-5 振動締固め 60 秒のコンクリート表面

平均値を基準配合とした。振動締固め時間 5 秒と比較して、15 秒の単位水量および単位粗骨材量の平均配合に対する比の最大値と最小値の差は大きくなった。これは、振動締固め時間の増加に伴い材料分離の程度が大きくなっていることが考えられる。また、いずれの振動締固め時間でも、採取位置が高いほど、単位水量の平均配合に対する比は大きく、単位粗骨材量の平均配合に対する比は小さくなった。振動締固め時間 5 秒の単位水量では、振動締固め直後とブリーディング発生時で最上部の単位水量に差が確認されたが、振動締固め時間 15 秒では確認されなかった。ここで、本手法で測定された結果は 5cm 間隔で採取した試料の平均配合であるため、供試体表面から 5cm 以内で生じるブリーディングによる水の浮上は確認できない。締固め直後とブリーディング発生時で差がなかった振動締固め時間 15 秒では、ブリーディングによる水の浮上の多くは供試体表面から 5cm 以内の範囲で生じ、本手法ではブリーディングの影響が確認できなかったと考えられる。一方、振動締固め時間 5 秒では、供試体表面から 5cm 以上の範囲でブリーディングによる

水の浮上が生じたことで、本手法でもブリーディングの影響が確認されたと予想される。以上のことから、振動締固め 15 秒では振動締固め 5 秒に比べて、最上部に多くのセメントペーストが浮上したと予想される。

そこで、振動締固め時間がセメントペーストの浮上量に与える影響を検討するため、浮上した試料の量を測定した。なお、浮上した試料の量は、供試体表面から試料を採取し、粗骨材が表面に現れるまでに採取した試料の体積とした。また、浮上した試料と、残りの供試体に対して配合推定試験を実施し、振動締固め時間が単位水量および単位粗骨材量の変化に与える影響を再検討した。なお、振動締固め時間 5 秒では、振動締固めによって浮上する試料が少なく、測定が困難であった。このため、振動締固め時間 60 秒の配合推定試験を実施し、振動締固め時間 15 秒と比較した。振動締固め直後の各供試体の各高さ位置の単位水量および単位粗骨材量を図-4 に示す。なお、図中の最上部のデータは振動締固めによって浮上した試料の配合を表しており、振動締固め時間 15 秒では残りの供試体を 8 分割し、振動締固め時間 60 秒

表-2 配合（粗骨材の単位体積量や実積率が材料分離に与える影響）

配合 No.	G _{max} (mm)	W/C (%)	S/C	粗骨材 体積率(%)	目標空気量 (%)	単位量(kg/m ³)					
						W	C	S	G	AE 剤	AE 減水剤
1	20	50	2.46	30	5.0	200	400	987	816	0.0112	0.96
2				38		165	330	808	1021	0.0092	0.79
3				45		157	314	776	1224	0.0088	0.75

表-3 粗骨材の粒度分布と実積率

名称	各ふるいに留まる骨材の質量割合(%)				粗粒率	実積率 (%)
	20mm 以上	20~15mm	15~10mm	10~5mm		
実積率 55.7%	2	71	27	0	7.02	55.7
実積率 57.5%	2	10	42	46	6.56	57.5
実積率 57.8%	0	0	18	82	6.18	57.8

では、浮上した試料の量が多かったため、残りの供試体を7分割して測定した。振動締固め時間に関わらず、浮上した試料の単位水量は著しく高かった。さらに、振動締固め時間 60 秒では、浮上した試料の直下である約 34cm のコンクリートの単位水量もやや高くなった。これは、浮上した試料が単位水量を大幅に増加させたことが考えられる。また、振動締固め時間 15 秒と比較して、60 秒の浮上した試料量は多かった。しかし、単位水量の平均配合に対する比は、振動締固め時間 15 秒(0.66~2.18)と 60 秒(0.61~2.21)では概ね同等だった。一方、単位粗骨材量の平均配合に対する比は、15 秒(0.92~1.21)と 60 秒(0.79~1.35)は異なった。これより、振動締固め時間の増加に伴い粗骨材の沈降量が増加し、セメントペーストだけでなく、細骨材も上部に存在することが考えられる。ここで、目視観察や採取した最上部の試料量から、図-5 に示すように、振動締固め時間 60 秒では供試体表面からセメントペーストの層、モルタルの層、コンクリートの層となっていた。しかし、締固め時間 15 秒ではモルタルの層が確認されなかった。

以上のことから、振動締固め時間の増加に伴いセメントペーストの浮上量や粗骨材の沈降量が増加することが分かった。また、60 秒間の振動締固めで細骨材の沈降量は増加するが、振動締固めによって細骨材はしにくいいため、多くの細骨材が上部に存在することが分かった。

4. 粗骨材の単位体積量や実積率が材料分離に与える影響

4.1 配合

単位体積量が材料分離に与える影響を把握するため、表-2 の No.1~3 のように、W/C と S/C を一定にすることでコンクリート中のモルタルの配合を一定とし、粗骨材の単位体積量を変化させた。また、粗骨材の実積率が材料分離に与える影響を把握した。ここで、粗骨材の実

積率は、粗骨材の粒度や形状に影響される¹¹⁾が、本研究では、表-2 の No.2 に対して粗骨材の粒度のみを表-3 のように変化させた。なお、粗骨材の単位体積量と実積率の影響のみに着目するため、いずれの配合でもスランブ値は調整せず、セメントに対する化学混和剤の割合は一定とした(AE 剤:C×0.0028%, AE 減水剤:C×0.24%)。また、材料分離の影響を顕著にするため、振動締固め時間はいずれも 60 秒とした。

4.2 試験方法

3 章より、本研究で用いた配合推定試験ではブリーディングの影響を把握することが困難であることが分かった。このため、本章では、単位水量および単位粗骨材量の材料分離の程度の把握は振動締固め直後のみ実施した。なお、配合推定試験方法や供試体の寸法は 3 章と同様である。また、3 章より、振動締固めによってセメントペーストが浮上ことで、単位水量が増加することも分かった。単位水量が大幅に増加する供試体の高さ方向の範囲を把握するため、浮上したセメントペーストや細骨材の体積を測定した。ここで、浮上したセメントペーストや細骨材の体積は、粗骨材の単位体積質量や実積率によって変化する粗骨材間の相互作用力だけでなく、配合上のモルタルの体積にも影響されることが考えられる。このため、式(3)から得られる指標を用いることで、コンクリート供試体中のモルタルの体積がペーストの浮上量に与える影響を排除した。具体的には、配合計算上得られるモルタルの単位体積割合と供試体寸法を用いて算出したコンクリート供試体中の全モルタルの体積 ($V_{all\ mortar}$) (m³)を分母とし、上部に存在するセメントペーストや細骨材の総体積を分子とした。

$$V' = \frac{V_{paste\ and\ sand}}{V_{all\ mortar}} \quad (3)$$

ここに、 V' はコンクリート中のペーストの浮上率(%), $V_{paste\ and\ sand}$ は振動締固めによって浮上したセメントペー

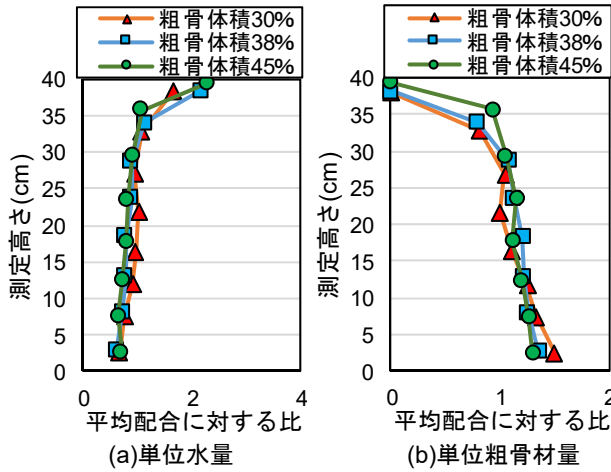


図-6 粗骨材量が材料分離に与える影響

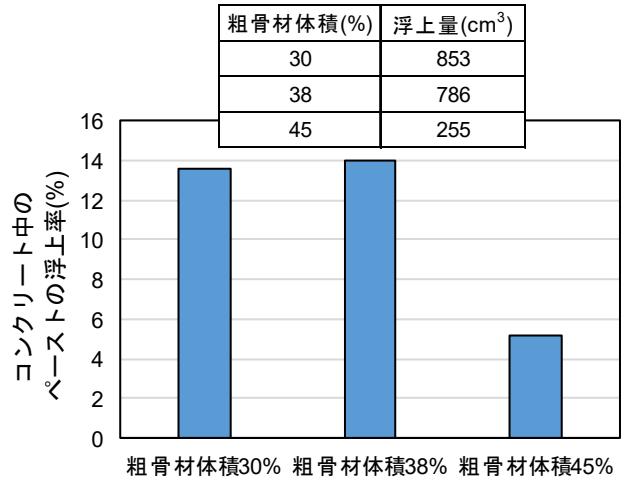


図-7 粗骨材量がペーストの浮上率に与える影響

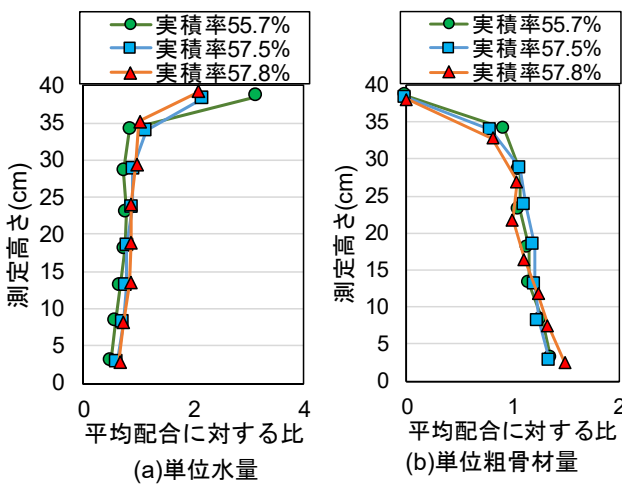


図-8 実積率が材料分離に与える影響

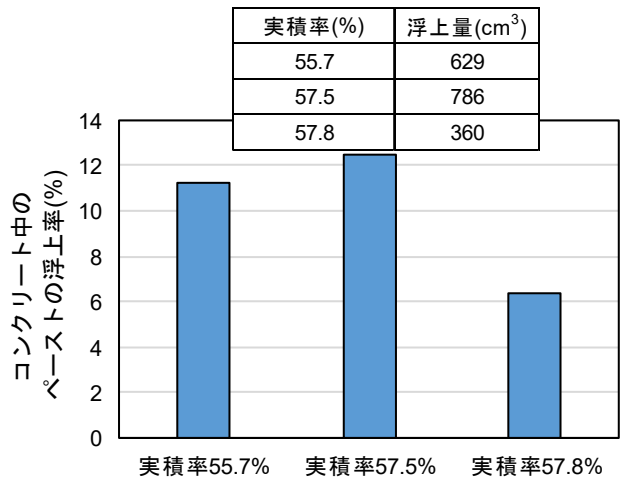


図-9 実積率がペーストの浮上率に与える影響

ストや細骨材の総体積(m³)とした。

4.3 試験結果

粗骨材の単位体積量がコンクリートの材料分離に与える影響を図-6に、粗骨材の単位体積量がコンクリート中のペーストの浮上率に与える影響を図-7に示す。単位水量の平均配合に対する比は、粗骨材の単位体積量38% (0.61~2.21) と45% (0.70~2.29) は概ね同等であるが、30% (0.67~1.66) だけ低くなった。しかし、コンクリート中のペーストの浮上率は大きかった。これは、粗骨材の単位体積量30%では、振動締固めに伴い浮上する細骨材が多く、単位水量の変化が小さかったことが考えられる。一方、コンクリート中のペーストの浮上率は30%と38%が概ね同等だが、45%だけ低くなった。これは、粗骨材の単位体積量45%では粗骨材間で相互作用力が生じ、粗骨材の沈降の妨げとなったことが考えられる。一方、粗骨材の単位体積量30%や38%では単位モルタル量が多く、粗骨材間の距離が一定以上離れていたため、粗骨材間で相互作用力が生じなかったことが予想される。

粗骨材の実績率がコンクリートの材料分離に与える影響を図-8に、粗骨材の実績率がコンクリート中のペーストの浮上率に与える影響を図-9に示す。単位水量の平均配合に対する比は粗骨材の実績率57.8% (0.65~2.08) と57.5% (0.70~2.29) は概ね同等であるが、55.7% (0.50~3.13) だけ大きくなった。実績率55.7%では、振動締固めに伴い浮上するセメントペーストが多く、単位水量の変化が大きかったことが考えられる。一方、コンクリート中のペーストの浮上率は、実績率55.7%と57.5%は概ね同程度だが、57.8%だけ低くなった。これは、実績率55.7%と57.5%と比較して、57.8%の粗骨材の粗粒率が小さいことが原因と考えられる。ストークスの抵抗則⁹⁾を参考にすると、粒径の縮小に伴い粒子の沈降速度が低下するとされている。このため、実績率57.8%は粗骨材が沈降しにくく、ペーストの浮上率が低かったことが考えられる。

以上のことから、粗骨材の単位体積量の低下に伴い、単位水量の材料分離の程度は小さくなることが分かった。また、粗骨材の実績率の低下に伴い、単位水量の材料分

離の程度は大きくなることが分かった。これは、浮上するモルタル中のセメントペーストと細骨材の構成比が、単位水量の材料分離の程度に影響を与えていることが予想される。浮上するモルタル中のセメントペーストと細骨材の構成比を、今後、確認する必要がある。一方、ペーストの浮上率は、単位体積量 38%~45%、実積率 57.5%~57.8%間で変化したが、データが少なく、粗骨材の単位体積量や実積率がペーストの浮上率に与える影響を考察するには不十分である。このため、単位体積量 38%~45%と実積率 57.5%~57.8%のペーストの浮上率を把握する必要があると考えられる。

5. まとめ

本研究の範囲で得られた知見をまとめると次のようになる。

- (1) 振動締め時間の増加に伴いセメントペーストの浮上量や粗骨材の沈降量が増加することが分かった。また、60秒間の振動締めで細骨材の沈降量は増加するが、振動締めによって細骨材はしにくいいため、多くの細骨材が上部に存在することが分かった。
- (2) 過剰な振動締め（60秒）では、粗骨材の単位体積量の低下に伴い、単位水量の材料分離の程度は小さくなることが分かった。また、粗骨材の実積率の低下に伴い、単位水量の材料分離の程度は大きくなることが分かった。

参考文献

- 1) 公益社団法人 土木学会：コンクリートの施工性能の照査・検査システム研究小委員会（341委員会）第2期委員会報告書，pp.145-147，2013

- 2) 鈴木悠平，伊代田岳史：締め時間の違いが性状の異なるコンクリートの材料分離に及ぼす影響，第43回土木学会関東支部技術研究発表会，V-46，2016
- 3) 流田靖博，飛坂基夫：コンクリートの材料分離に関する研究（その3 試験条件に関する検討），日本建築学会大会学術講演梗要集A，pp.737-738，1992
- 4) 岩崎訓明：振動によるフレッシュコンクリートの液化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，第426号/V-14，pp.1-18，1991
- 5) 西村和朗，加藤佳孝：材料分離の評価を対象とした配合推定方法の提案，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.40，No.1，pp.1119-1124，2018
- 6) 社団法人土木学会：水理公式集，p.416，1949
- 7) 梅景俊彦，湯晋一，中島賢治，杉本理充，椿淳一郎：液中粒子群の沈降及び堆積状態の数値解析と実験による検証，粉体工学会誌，38，pp.140-149，2001
- 8) 椿東一郎，菱本晴行，末次忠司：土石流における粒子間応力と流動特性，土木学会論文報告集，第317号，pp.79-91，1982
- 9) 加賀谷誠，徳田弘，川上洵：各種混和材を用いたコンクリートの振動締めによる材料分離現象，材料，32巻，353号，1983
- 10) 尾上幸造，亀澤靖，松下博通：鉄筋間隙通過によるコンクリートの配合変化，土木学会論文集E，Vol.62，No.1，pp.119-128，2006
- 11) 梁俊，宇治公隆，國分勝郎，上野敦：粗骨材の実積率がフレッシュコンクリートの締め性に与える影響，コンクリート工学論文集，第16巻，第3号，pp.11-19，2005