

論文 モルタルの粘性と粗骨材量が流動性の高いコンクリートの材料分離に与える影響

古川 翔太*1・加藤 佳孝*2・鈴木 将充*3・高橋 駿人*4

要旨：モルタルの粘性と粗骨材量が、フレッシュコンクリートの鉛直方向と水平方向の材料分離に与える影響を把握することを目的に実験的に検討した。実験では、モルタルの粘性と粗骨材量を変化させ、材料分離の程度については、鉛直方向の場合は最上層の粗骨材の分布、水平方向の場合は全体の粗骨材の分布から定量的に測定した。結果として、モルタルの塑性粘度の増加に伴い、鉛直方向および水平方向ともに粗骨材量の分布の変動は小さくなったことが確認された。

キーワード：材料分離, 粘性, 締固め

1. はじめに

2019年にJIS A 5308が改正され、一般強度（呼び強度が45N/mm²まで）のスランブフロー管理コンクリートが追加された。コンクリート標準示方書（以下、示方書）では、施工標準で対象とするコンクリートはスランブ16cmまでであり、流動性の高いコンクリートとしては、特殊コンクリートとして高強度コンクリート、自己充填性を有する高流動コンクリート（以下、SCC）の技術情報が整理されている。JISの改正に伴って追加された一般強度のスランブフロー管理コンクリートについては、締固めを必要とする高流動コンクリート（以下、HFCC: High-Fluidity Concrete with Compaction）として定義はされているが、その技術情報は整理されていないのが現状である。

コンクリート構造物の構築では、適切なワーカビリティを有するコンクリートを使用する必要がある。示方書の施工標準では、ワーカビリティについて、充填性、圧送性、凝結特性を取り上げて記述されている。このうち、充填性は流動性と材料分離抵抗性の相互作用からなる。HFCCのような流動性が高いコンクリートでは、材料分離抵抗性が低下することが想定される。材料分離を理解するには、打込み時に水平方向への移動距離が普通コンクリートより長くなることで発生する分離や、振動で鉛直方向に発生する分離を定量的に把握する必要があるが、材料分離抵抗性を議論した研究は少ない。数少ない研究のうち、依田ら²⁾は普通コンクリートとHFCCの水平方向の分離程度について、粗骨材の分布に着目して比較している。また、HFCCではないが、Safawiら³⁾は材料分離と粘性の関係を理解するために、SCCに長時間の振動を与えた後の試料中の粗骨材の分布から材料分離

の程度を定量的に把握している。このように材料分離の程度を把握している既往の研究はあるが、材料分離の機構が明らかになっているとは言い難い状況にある。

本研究では、フレッシュコンクリートをモルタルと粗骨材の2相と捉え、モルタルの粘性と粗骨材量が、コンクリートの水平方向または鉛直方向の材料分離に与える影響について検討した。なお、材料分離の程度を議論するために、振動を与えた時の材料分離の程度を粗骨材量の分布で把握する手法を用いた。

2. モルタルの粘性測定

2.1 使用材料および配合

セメントは普通ポルトランドセメント（密度3.15g/cm³、比表面積3410cm²/g）、細骨材は川砂（表乾密度2.63g/cm³、F.M. 2.89）、粗骨材は碎石（表乾密度2.72g/cm³、F.M. 6.55）を用いた。

配合はW/C=50%、S/C=1.5(M-VL)、2.0(M-VM)、2.5(M-VH)の3水準とし、AE剤(Ad₁)をC×0.003%、AE減水剤(Ad₂)をC×0.25%とした。また、表-3中のC-Tで用いるコンクリートのモルタル分として、W/C=50%、S/C=2.56、消泡剤(Ad₃)をC×0.001%、増粘剤含有高性能AE減水剤(Ad₄)をC×0.9%の配合(M-T)も測定した。

2.2. モルタルの粘性測定方法と結果

振動時のモルタルの粘性は、西村ら⁴⁾の研究を参考に求めた。試験では、スランブコーンを引き上げるのと同時にスランブ板の下に設置した加振機で振動を加えた。

振動時の塑性粘度（以下、塑性粘度と称する）と降伏応力は、図-1のように測定したスランブフロー値から、フロー速度(dx/dt)とスランブの容器を円柱と仮定したときの鉛直外力(F(y))を算出し、式(1)の回帰結果から算出

*1 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)

*2 東京理科大学 理工学部土木工学科 教授 博(工) (正会員)

*3 東急建設(株) 技術研究所土木研究 G 修(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)

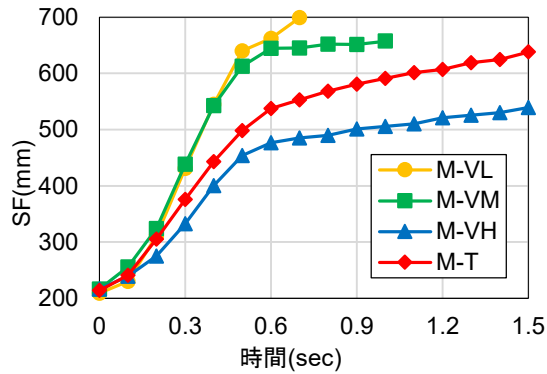


図-1 スランプフローの経時変化

表-2 モルタルの粘性試験結果

記号	塑性粘度 (Pa·s)	降伏応力 (Pa)
M-VL	452	0
M-VM	460	0
M-VH	1013	0
M-T	717	0

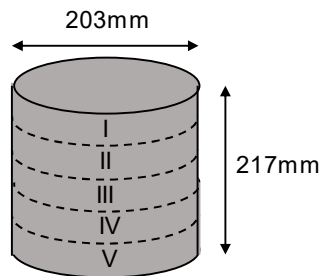


図-2 鉛直方向の材料分離試験

した。

$$\frac{dx}{dt} = x(t) \times \frac{\gamma y + 2\{F(y) - F(0)\} - 4\tau_{yd}}{4\eta} \quad (1)$$

ここに、 $x(t)$ ：スランプフロー(mm)、 t ：時間(sec)、 γ ：試料の単位体積質量(N/m³)、 $F(y)$ ：高さ y で作用する鉛直外力(Pa)、 τ_{yd} ：降伏応力(Pa)、 η ：塑性粘度(Pa·s)である。

試験結果を表-2 に示す。振動時のモルタルの粘性は降伏応力がゼロとなり、塑性粘度は、M-VL と M-VM が同程度で、M-T、M-VH の順に大きくなった。

3. フレッシュコンクリートの材料分離試験

3.1 配合

配合を表-3 に示す。粘性を測定したモルタルに対して、粗骨材の体積割合を 27%とした配合を設定した。M-VH と M-T では、粗骨材の体積割合を 30%、32.8%とした配合も設定した。

3.2 鉛直方向の材料分離試験の概要および結果

図-2 に示す空気量試験の容器(7L)に試料を打ち込んだ後、棒状パイプレータを容器の中心に挿入した状況から振動を与えた。試験方法を決定するため、4 つの配合(C-VL-27、C-VM-27、C-VH-27、C-T-32.8)を対象として、所定の振動を与えた後に試料を 5 等分にして、それぞれの試料について洗い分析した。なお、振動時間は 0、3、5、10、15 秒とした。

実験結果は、各箇所を試料中に粗骨材が占める体積割合を式(2)から算出した。それを全採取箇所の粗骨材割合の平均値で除した値(以降 Y_n と称する)を式(3)から算出した。

$$X_n = \frac{V_{Gn}}{V_n} \times 100 \quad (2)$$

$$Y_n = X_n \div X_{nave} \quad (3)$$

ここに、 X_n ：採取箇所 n の粗骨材の体積割合(%)、 V_{Gn} ：採取箇所 n の粗骨材体積(m³)、 V_n ：採取箇所 n のコンク

表-3 コンクリートの配(調)合

記号	W/C	S/C	粗骨材の 体積割合 (%)	単位量(kg/m ³)				単位量(g/m ³)				[SL](cm) SF(mm)	Air(%)
				W	C	S	G	Ad ₁	Ad ₂	Ad ₃	Ad ₄		
C-VL-27	50	1.50	27.0	263	526	785	734	124	413	-	-	600	1.0
C-VM-27	50	2.00	27.0	231	463	880	734	139	463	-	-	515	1.5
C-VH-27	50	2.50	27.0	206	413	987	734	124	413	-	-	410	3.7
C-VH-30	50	2.50	30.0	198	396	945	816	119	396	-	-	[22.0]345	5.0
C-VH-32.8	50	2.50	32.8	190	380	906	891	114	380	-	-	[22.0]335	5.8
C-T-27	50	2.56	27.0	191	382	978	734	-	-	38	3440	575	4.5
C-T-30	50	2.56	30.0	183	366	937	816	-	-	37	3290	465	8.3
C-T-32.8	50	2.56	32.8	175	350	897	891	-	-	35	3150	450	4.9

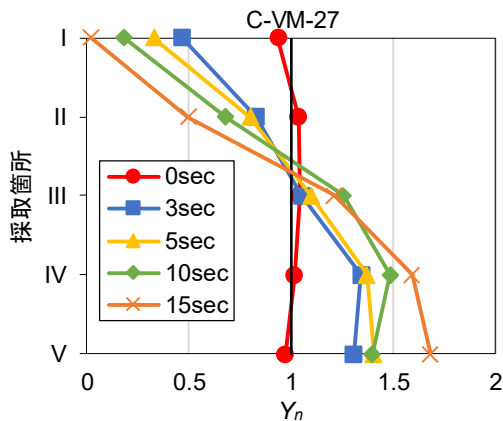


図-3 実験結果の一例

リート体積(m³), i : 採取箇所数, Y_n : 粗骨材の体積割合と X_n の比率である。

実験結果の一例を図-3 に示す。結果では、いずれの配合でも同様に粗骨材の沈降が確認できた。 Y_I と Y_{II} に着目した結果を図-4 に示す。 Y_I と Y_{II} は振動時間に応じて小さくなっており、 Y_I は Y_{II} に比べて全体的に変化が大きい。

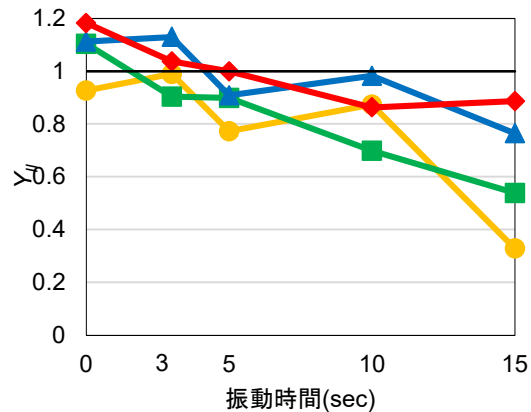
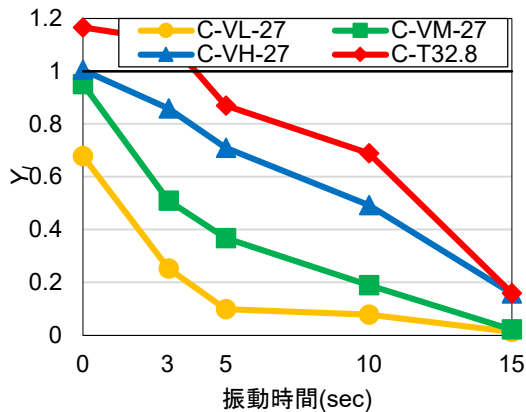


図-4 振動時間と $Y_I \cdot Y_{II}$ の関係

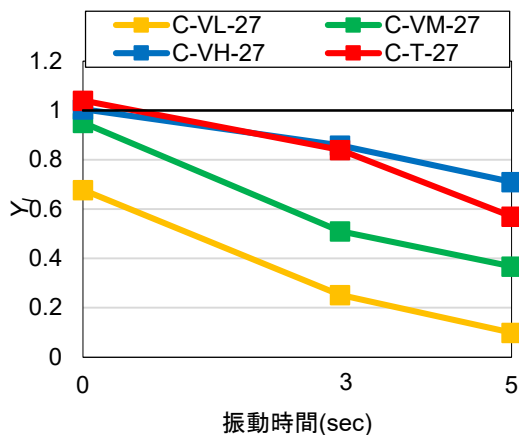


図-5 振動時間と Y_I の関係

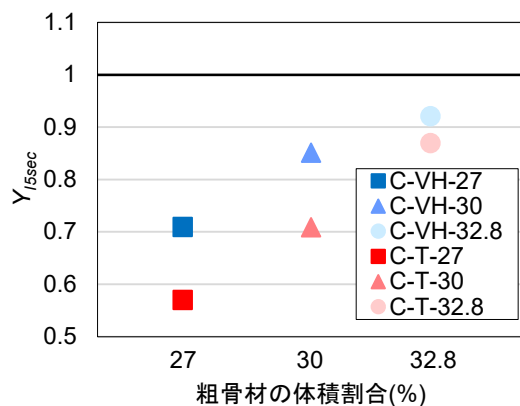


図-6 粗骨材の体積割合と Y_I の関係

かった。また、 Y_I の振動時間 15 秒では、いずれの配合でも同程度になった。これは、振動を与えすぎたことによりほとんどの粗骨材が沈降してしまい、配合毎の差がみられなかったことが考えられる。 Y_I は振動時間 3 秒(C-VL-27)や振動時間 5 秒(C-VM-27)で大きく変化した配合と大きな変化のない配合に区分できる。以上より、試験方法は I 層と II 層のみを採取し、振動時間は配合の分離程度を区分しやすい 0, 3, 5 秒までとした。

コンクリート中の粗骨材量が同一の配合の結果を図-5 に示す。 Y_I は C-VL-27, C-VM-27, C-T-27, C-VH-27 の順に小さいことが確認された。加えて粗骨材の体積割合 27%, 30%, 32.8% を設定した C-VH と C-T の振動時間 5 秒の Y_I (以降 Y_{I5sec} と称する) の結果を図-6 に示す。粗骨材の体積割合の増加に伴い Y_{I5sec} が大きくなることがわかる。また、いずれの粗骨材の体積割合でも C-VH の配合の方が C-T の配合より Y_{I5sec} が大きいことが確認された。

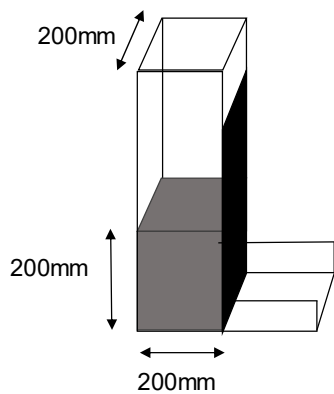
3.3. 水平方向の材料分離試験の概要および結果

既報⁵⁾にて、水平方向の材料分離試験で粗骨材割合が高い配合を用いた場合、仕切りゲートで粗骨材が閉塞し

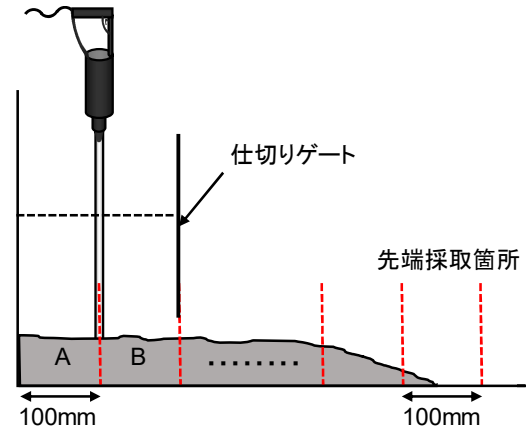
ていることを目視にて確認した。そのため、既報に比べて図-7(a)に示す奥行きを大きくした試験機を用いた。試料を打込んだ後、仕切りゲートを引き上げると同時に振動を与え、試料を水平方向に流動させた。なお、振動の時間は0、5、15秒とした。その後、流動した後の試料は鉛直方向の材料分離試験と同様の手法で粗骨材量の分

布を算出した。なお、振動の時間は0、5、15秒とした。その後、流動した後の試料は鉛直方向の材料分離試験と同様の手法で粗骨材量の分布を算出した。なお、試料は図-7(b)のように締め位置から100mm間隔で採取した。

図-5の結果から、水平方向の材料分離試験では、振



(a)試験機寸法



(b)採取箇所

図-7 水平方向の材料分離試験

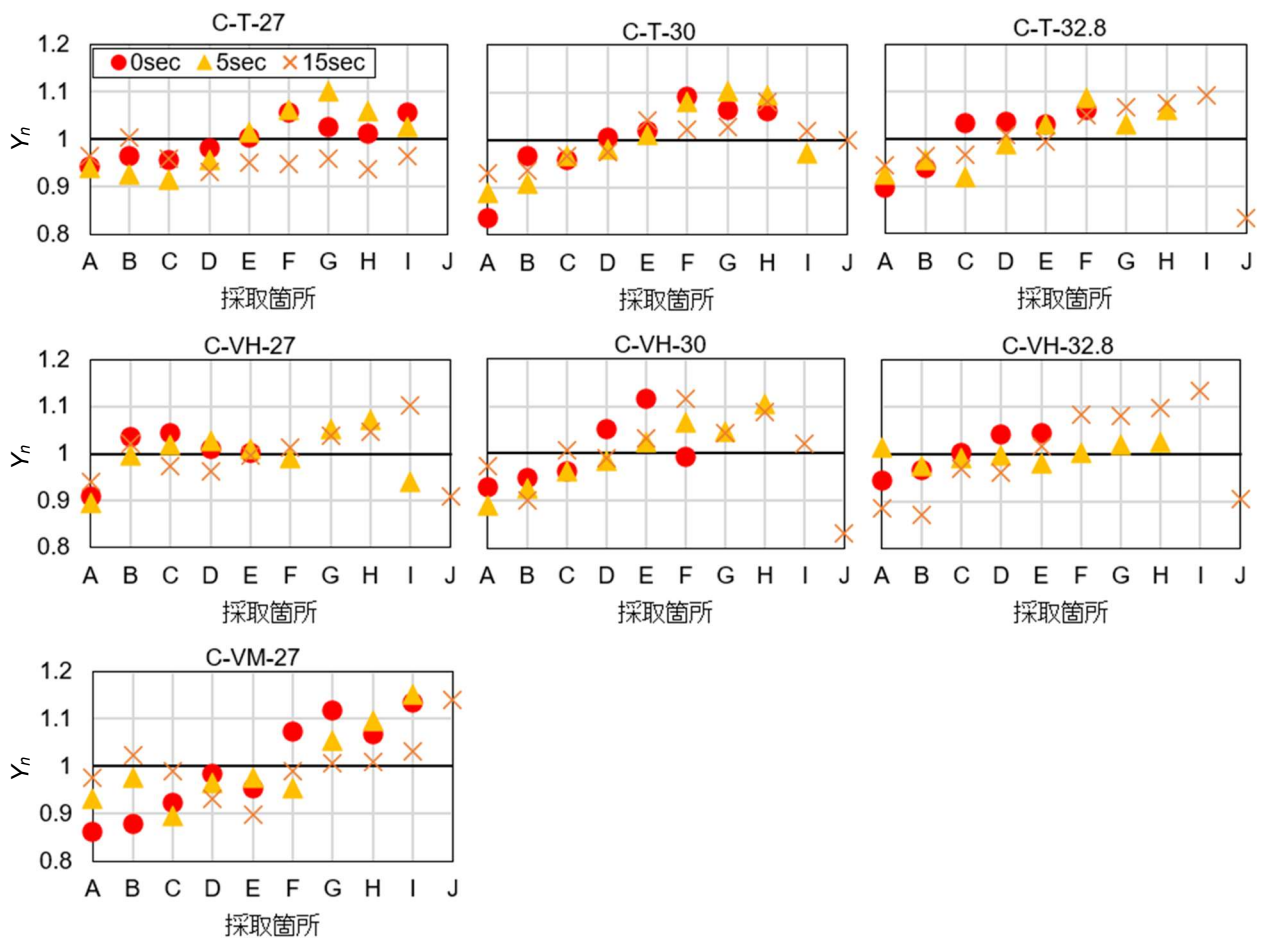


図-8 採取箇所毎の Y_n

動時間が0秒の時点で Y_I の低下が確認されたC-VLは実施しなかった。表-4に採取箇所ごとのコンクリート体積の一例を示す。先端の採取箇所では、採取した試料の体積が極端に小さい結果がある。そのため、試料体積が 300cm^3 以下の結果は参考程度として、全体的な粗骨材量の分布(Y_n)の傾向に基づいて議論した。

図-8に Y_n の結果を示す。いずれの配合でも締めめ位置から先端に向かって Y_n が大きくなることわかる。

4. モルタルの粘性と粗骨材量が材料分離に及ぼす影響

図-9に振動時間3秒の Y_I (以降 Y_{I3sec} と称する) または振動時間5秒の Y_I (以降 Y_{I5sec} と称する) と塑性粘度の関係を示す。 Y_{I3sec} および Y_{I5sec} は塑性粘度の増加に伴い変動は小さくなることが確認された。ここで、振動締めめの影響だけに着目するために、振動時間0秒の Y_I と振動時間3秒または5秒の Y_I の差分 (以降 $Y_{I0sec}-Y_{I3sec}$ 称す

る)と塑性粘度の関係を図-10に示す。塑性粘度は $Y_{I0sec}-Y_{I3sec}$ と相関があり、塑性粘度の増加に伴い $Y_{I0sec}-Y_{I3sec}$ が減少する傾向がみられた。図-9と図-10では塑性粘度の増加に伴い変動は小さくなる傾向が得られたが、振動時間0秒の時点で Y_I の低下が確認されたC-VL-27の変動の程度は図-10の方が小さかった。以上より、粗骨材量が同一の場合は、振動による垂直方向の粗骨材の分離は、振動の影響を考慮したモルタルの塑性粘度が有効な指標であると考えられる。以降の鉛直方向の材料分離の議論では振動締めめの影響だけに着目した結果のみを議論することとした。

図-11に $Y_{I0sec}-Y_{I3sec}$ と粗骨材の体積割合を27%, 30%, 32.8%に設定したC-VHとC-Tの結果を示す。粗骨材の体積割合の増加に伴い $Y_{I0sec}-Y_{I3sec}$ は小さくなる傾向が確認され、粗骨材の体積割合の増加で振動による Y_n の変化が小さくなることわかる。

表-4 各採取箇所のコンクリート体積の一例

記号	振動時間	コンクリート体積(m ³)									
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
C-VM-27	0sec	1370	1395	1014	1107	857	728	661	478	280 ^b	-
	5sec	969	1028	1225	939	1040	735	770	568	406	-
	15sec	1249	1004	872	1212	905	826	651	554	359	171 ^b

^b: 参考記録

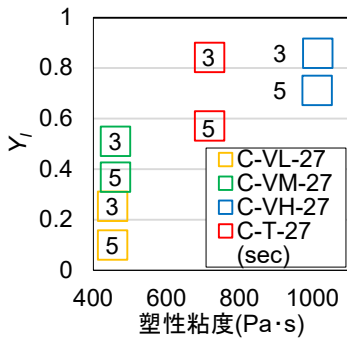


図-9 $Y_{I3sec} \cdot Y_{I5sec}$ と塑性粘度の関係

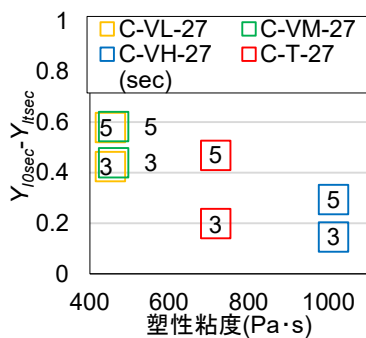


図-10 $Y_{I0sec}-Y_{I3sec}$ と塑性粘度の関係

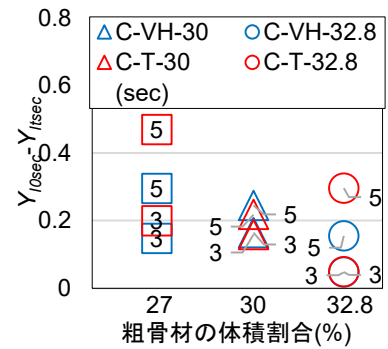


図-11 $Y_{I0sec}-Y_{I3sec}$ と粗骨材の体積割合の関係

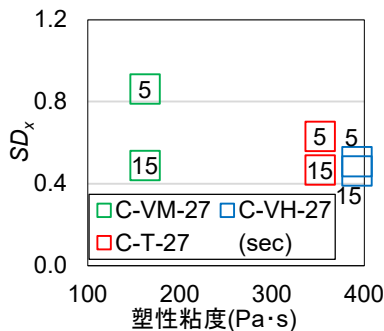


図-12 SD_x と塑性粘度の関係

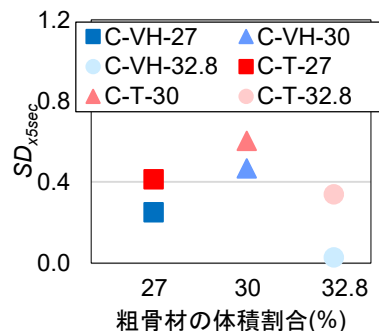


図-13 SD_{x5sec} と粗骨材の体積割合の関係

ここで、振動時間 3 秒と 5 秒の結果に着目する。C-VH-27 と C-T-27 を比較すると、塑性粘度が大きい C-VH-27の方が 3 秒から 5 秒への Y_I の変化が小さい。粗骨材の体積割合の影響では、3 秒と 5 秒の差は 30% で最も小さく、32.8%の方が 3 秒と 5 秒の差は大きくなった。32.8%では 3 秒の $Y_{10sec}-Y_{13sec}$ は小さいことから、振動による分離の影響は小さいが、振動時間が長くなると分離の程度が 30% の配合よりも大きくなる特徴が有ることがわかる。

水平方向の材料分離試験で Y_n の変動は、採取箇所毎に異なる傾向がみられた。 Y_n を配合毎に定量的に比較するため、平均偏差値（以降 SD_x と称する）を、式(4)から算出した。

$$SD_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_n - X_{nave})^2}{n}} \quad (4)$$

ここで、 SD_x : 平均偏差値である。

SD_x の結果と塑性粘度の関係を図-12 に示す。塑性粘度の増加に伴い SD_x が小さくなり、すなわち、 Y_n の変動が小さくなった。振動時間 15 秒の SD_x は、いずれの配合でも相関は認められなかった。これは振動時間が影響して採取箇所毎の試料の体積が大きく異なる配合があるためと考えられる。以上より以降の議論では、塑性粘度と相関が認められた振動時間 5 秒の SD_x （以降 SD_{x5sec} と称する）を基に議論する。

図-13 に SD_{x5sec} と粗骨材の体積割合を 27%、30%、32.8% に設定した C-VH と C-T の関係を示す。

C-VH と C-T の SD_{x5sec} は、粗骨材の体積割合 30% で最も大きくなり、粗骨材の体積割合 32.8% では最も小さくなることわかる。

振動締固めがコンクリート材料分離に与える影響を、鉛直および水平方向の粗骨材量の分布で把握した結果、次のことがわかった。モルタルの塑性粘度の増加に伴い、鉛直方向および水平方向ともに Y_n の変動は小さくなった。一方で、粗骨材の体積割合の影響として、鉛直方向の材料分離試験では粗骨材の体積割合の増加に伴い Y_n の変動は小さくなったが、水平方向の材料分離試験では粗骨材の体積割合 30% で全体的な Y_n の変動 (SD_x) が最も大きくなり、粗骨材の体積割合 32.8% では最も小さくなった。このように、粗骨材の体積割合が材料分離に与え

る影響は、鉛直と水平の方向で異なる結果となったが、その理由については今後の課題である。

5. まとめ

鉛直方向の材料分離試験で得られた知見を次に示す。

- ・ 本研究の範囲内では、1 層の振動時間 0, 3, 5 秒の結果で粗骨材量の分布の違いが把握できた。
- ・ 振動時の塑性粘度は $Y_{10sec}-Y_{13sec}$ と相関があり、振動時の塑性粘度の増加と粗骨材の体積割合の増加に伴い $Y_{10sec}-Y_{13sec}$ が減少する傾向が見られた。

水平方向の材料分離試験で得られた知見を次に示す。

- ・ 本研究の範囲内では、締固め位置から先端に向かって粗骨材量の分布が大きくなる。
- ・ 振動時の塑性粘度では、振動時間 5 秒の SD_x と相関が認められ、振動有りの塑性粘度の増加に伴い Y_n の変動が小さくなった。
- ・ 振動時間 5 秒の SD_x は粗骨材の体積割合 30% で SD_x が最も大きくなり、粗骨材の体積割合 32.8% では最も小さくなった。

参考文献

- 1) 2017 年制定コンクリート標準示方書施工編 [施工編], 土木学会, 2018
- 2) 依田和久, 刑部知周, 芹沢良一, 市川裕嗣: 流動化剤コンクリートを用いた柱流動コンクリートの開発, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.1249-1254, 2005
- 3) Mohammad Ibrahim Safawi, Ichiro Iwaki, Takashi Miura: The segregation tendency in the vibration of high fluidity concrete, Cement and Concrete Research, Vol.34, pp.219-226, 2004
- 4) 西村和朗, 加藤佳孝, 江口康平: フレッシュコンクリートの変形に着目した粘性評価に関する基礎的検討, セメント・コンクリート論文集, Vol.71, No.1, pp.264-271, 2017
- 5) 古川翔太, 西村和郎, 加藤佳孝, 江口康平: フレッシュコンクリートの材料分離抵抗性に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.1, 2019