

# 報告 フレッシュコンクリートの材料分離に関する実験的検討

古川 翔太\*1・西村 和朗\*2・加藤 佳孝\*3・江口 康平\*4

**要旨：**材料分離抵抗性を定量的に議論することを最終目的とし、その基礎的な段階として、締固めを受けたフレッシュコンクリートが横方向に流動する際の材料分離の程度を検討した。材料分離に影響を与える要因として、コンクリート中のモルタルの粘性と粗骨材の体積割合を変化させた。その結果、モルタルの粘性が小さいほど材料分離の程度が大きくなり、 $W/C=50$ ,  $S/C=2.5$  の配合では、粗骨材割合が低いほど、材料分離の程度は大きくなり、締固め位置に近くなるほど粗骨材量が減少することが確認された。

**キーワード：**材料分離, 粘性, 締固め

## 1. はじめに

フレッシュコンクリートは、構造物の種類や施工箇所に応じた充填性を有していることが望ましい。充填性の確保には、フレッシュコンクリートが型枠の隅々まで流れる流動性と、打込みに際して構成材料の分布が変動しない材料分離抵抗性を兼ね備える必要がある。一般のコンクリートでは、コンクリート標準示方書【施工編】に（以降示方書と称する）示されているように、スランブの増大により流動性は高くなるが、材料分離抵抗性は低くなる（図-1 参照）。ここで、示方書の施工標準では、打込み時の最小スランブ値の上限が 16.0cm であり、この様な一般的なコンクリートでは、施工中にフレッシュコンクリートの材料分離が問題になることは少ないと想像され、既往の研究もそれほど多く存在しない。

数少ない既往の研究を参考にすると、材料分離抵抗性を粘性で議論している報告があり、例えば、森田ら<sup>1)</sup>は、振動締固めにより同一のスランブ値であっても粘性の違いで材料分離の程度が異なると報告している。ただし、材料分離と粘性の関係は定性的な議論にとどまっており、確実に材料分離しない範囲で流動性を確保したフレッシュコンクリートを用いているのが現状であると推察される。実際に従来のコンクリートを対象とした研究では、

横方向に流動する際にモルタルと粗骨材は分離せず、一体となって流動することが報告されている<sup>2)</sup>。現在、コンクリート構造物の設計、施工、維持管理では、従来の仕様規定から性能規定に移行しており、フレッシュコンクリートの充填性に関しても、材料分離抵抗性を定量的に議論できるようにする必要がある。

本研究では、材料分離抵抗性を定量的に議論することを最終目的とし、その基礎的な段階として、締固めを受けたフレッシュコンクリートが横方向に流動する際の材料分離性状を実験的に観察することを目的とした。なお、横方向に流動に着目した理由は、示方書の施工標準を参照すると、コンクリートは移動させるごとに材料分離を生じる可能性が高まることから「打ち込んだコンクリートは型枠内で横移動させてはならない。」との記述があり、材料分離を理解しやすい現象であると考えたことによる。本研究では、コンクリートをモルタルと粗骨材の2相と簡易的に捉え、モルタルの粘性と粗骨材量に着目して実験要因を設定した。なお、本研究で対象としているコンクリートの配合や試験方法は、フレッシュコンクリートの材料分離性状を把握することを目的に設定しているため、実施工で想定される配合や締固め条件とは異なる条件を設定している。

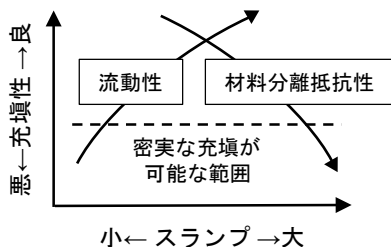


図-1 充填性の概念図

## 2. 実験概要

### 2.1 モルタルの粘性測定試験の概要

本研究では、モルタルの粘性が横方向に流動する際のモルタルと粗骨材の材料分離に与える影響を把握するために、まず、モルタルの粘性を把握した。なお、本研究ではモルタルをビンガム流体と仮定したため、粘性の指標は降伏応力および塑性粘度とした。ここで、流体の粘性の把握は、回転粘度計が用いられることが多い。しか

\*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 東京理科大学大学院 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)

し、一般的なモルタルの降伏応力は回転粘度計の適用範囲 (3Pa 未満) を超えている場合が多く、この場合、側壁面と試料間にすべりが生じ、適切に測定できないことが指摘されている<sup>3)</sup>。

本研究では、テーブルフロー試験を物理的に解釈した橋本らの研究<sup>4)</sup>を参考に、降伏応力および塑性粘度を算出した。テーブルフロー試験は JIS R 5201 に準拠し、モルタルに打撃を与えた際のフロー値の変化から式(1)、(2)によって、ずり応力およびずり速度に換算した。図-2のように、複数点算出したずり応力とずり速度の近似直線の切片から降伏応力を、傾きから塑性粘度を算出した。

$$\sigma_n = F_H \div \left( \frac{\pi}{4} \times L_{n-1}^2 \right) \quad (1)$$

$$= \frac{\rho \times V \times t}{\Delta t} \times K \div \left\{ (L_{n-1})^2 \times \frac{\pi}{4} \right\}$$

$$r_n = \frac{L_n^2 - L_{n-1}^2}{L_{n-1}^2} \div \Delta t \quad (2)$$

ここに、 $\sigma_n$  : n 打目に試験体に作用するずり応力(Pa),  $r_n$  : n 打目に生じるずり速度(1/s),  $K$  : 鉛直方向の力を水平方向の力に換算する係数(=0.05),  $\rho$  : 試験体の密度(kg/m<sup>3</sup>),  $V$  : 試験体の体積(=0.1141m<sup>3</sup>),  $v$  : テーブルの落下速度(=0.4434m/s),  $t$  : 1 打に伴い試験体が作用する時間(=1s)である。

試験は練混ぜたモルタルをフローコーンに2層に詰め、各層を突き棒で15回ずつ突き固め、フローコーンを垂直に引き抜いた。その後、JIS R 5201では15回打撃を与えた際のフロー値を測定している。ここで、本研究では前述した橋本らの研究<sup>5)</sup>に基づいて、降伏応力と塑性粘度を算出するため、フロー値の測定は1打毎とし、伸び量が2mm以下となるまで打撃を与え、フロー値の経時変化を測定した。

セメントは普通ポルトランドセメント(密度3.15g/cm<sup>3</sup>, 比表面積3410cm<sup>2</sup>/g, 以降Cと称する), 細骨材は山梨県富士川産川砂(表乾密度2.62g/cm<sup>3</sup>, 絶乾密度2.58g/cm<sup>3</sup>, FM2.89, 以降Sと称する)を用いた。配合は、水セメント比(以降W/Cと称する)は50%, 細骨材セメント比(以降S/Cと称する)は1.5, 2.0, 2.5の計3水準のモルタルとした。配合を表-1に示す。化学混和剤の添加率は、AE剤をC×0.01%, AE減水剤をC×0.25%で一定とし

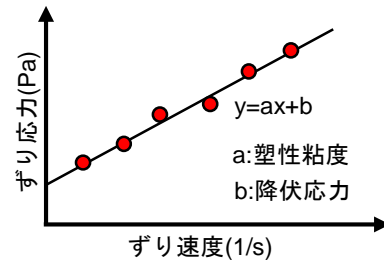


図-2 塑性粘度および降伏応力の測定例

た。

## 2.2 粗骨材の材料分離測定試験の概要

本研究では、モルタルの粘性または粗骨材の体積割合が、締固めによって横方向に流動する際のモルタルと粗骨材の分離に与える影響を把握することを目的とした。試験は、次のような方法で粗骨材の分離の程度を測定した(以降材料分離測定試験と称する)。なお、表-2に示した配合の一部について細骨材変動割合を測定した結果、大きな変動はなかったため、本研究の範囲内ではモルタル自体は分離しないとした。

材料分離測定試験は、高流動コンクリートのL形フロー試験方法(案)JSCE-514-2007(以降L形フロー試験と称する)を参考に、練り混ぜ後、水平に設置した試験器にコンクリートを打込んだ。その後、仕切りゲートを引き上げると同時に棒状バイブレータ(振動数235~285Hz)で振動を与え、コンクリートを横方向に流動させた。締固めは600mmに達するまで行い、その後、コンクリートを等間隔で採取し、各箇所を測定した(図-3参照)。採取したコンクリートを5mmふるいの上で水洗いすることで、粗骨材を採取した。ふるいの上に留まった粗骨材は110°Cの乾燥炉に24時間静置した状態を絶乾状態とし、絶乾質量を測定した。測定した各箇所の粗骨材の絶乾質量を絶乾密度で除すことで体積を算出し(式(3)), 各箇所のコンクリート中の粗骨材の体積割合とそれを全採取箇所の粗骨材割合の平均値で除した値(以降変動割合と称する)を算出した(式(4))。図-3に材料分離測定試験の寸法と採取位置を示す。ここでコンクリート投入箇所の寸法は、棒状バイブレータが型枠に接触しないように幅を100mmとし、奥行を200mmとした。

表-1 モルタルの配合

記号	配合条件		単位量(kg/m <sup>3</sup> )					初期フロー値 (mm)	15打フロー値 (mm)
	W/C	S/C	W	C	S	AE	AE減水剤		
A	50	1.5	360	719	1079	0.0216	1.80	218.6	273.1
B	50	2.0	316	633	1265	0.0190	1.58	173.1	230.6
C	50	2.5	282	564	1411	0.0169	1.41	135.6	218.2

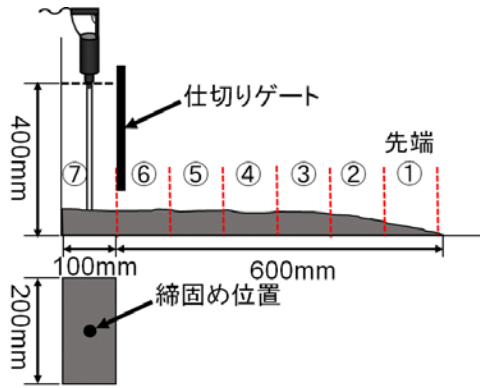


図-3 材料分離測定試験の概要

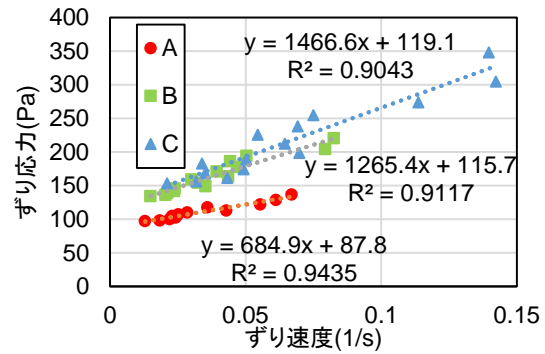


図-4 モルタルの粘性測定試験結果

$$X_n = \frac{V_{Gn}}{V_n} \times 100 \quad (3)$$

$$Y_n = X_n \div \frac{\sum X_n}{n} \quad (4)$$

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( $m^3$ ),  $V_n$ :採取箇所  $n$  のコンクリート体積( $m^3$ ),  $Y_n$ :変動割合である。

ここで実施工を考えると、適切な締め固め時間および締め固め間隔を設定し、フレッシュコンクリートは締め固められる。例えば、図-3 に示した試験の場合、設定した締め固め時間  $T$  で⑦、⑤、③の位置で順次締め固める方法などが考えられる。本研究の最終的な目標は、このような実施工を想定した材料分離を理解することにあるが、ここでは、その基礎的段階として、締め固め箇所を固定し、

ある一定の距離に到達するまで締め固める方法を採用した。なお、到達距離は、本研究で対象としたスランブフローが大きいコンクリートで、ある程度の締め固め時間が確保できる距離として 600mm とした。繰り返しになるが、本研究で提案する材料分離測定試験は、実施工で生じる材料分離を把握するための試験では無く、一定の条件下で異なるフレッシュ性状のコンクリートの特性を把握するための試験であることに留意されたい。

セメントや細骨材は、モルタルの粘性測定試験と同様の材料を用いて、化学混和剤の添加も同率とした。加えて、粗骨材は秩父産砕石(表乾密度  $2.72g/cm^3$ , 絶乾密度  $2.71g/cm^3$ , FM6.58, 以降  $G$  と称する)を用いた。配合は、コンクリート中の粗骨材体積割合を 37, 42, 47%,  $S/C$  を 1.5, 2.0, 2.5 とした。さらに、 $S/C=2.0$  と 2.5 の場

表-2 配合表

記号	配合条件			単位量( $kg/m^3$ )						SL(mm) [SF(mm)]	空気量 (%)
	W/C	S/C	G 割合	W	C	S	G	AE 剤	AE 減水剤		
A-37	50	1.5	37	227	453	635	1006	0.0136	1.13	[600]	1.0
A-42			42	209	417	581	1142	0.0125	1.04	22.5[535]	0.6
A-47			47	191	381	527	1278	0.0114	0.95	17.5[270]	1.1
B-27		2.0	27	231	462	879	734	0.0139	1.15	[515]	1.5
B-37			37	199	399	752	1006	0.0120	1.00	21.0[380]	2.0
B-42			42	183	367	689	1142	0.0110	0.92	17.5[360]	2.1
B-47		47	168	335	626	1278	0.0101	0.84	13.5	2.0	
C-10		2.5	10	254	508	1225	272	0.0152	1.27	[500]	3.0
C-27			27	206	412	985	734	0.0124	1.03	[410]	3.7
C-31			31	195	389	929	843	0.0117	0.97	20.5[295]	3.4
C-33			33	189	378	900	898	0.0113	0.95	19.0[280]	2.6
C-35			35	183	367	872	952	0.0110	0.92	11.5	2.8
C-37	37		178	356	844	1006	0.0107	0.89	13.0	2.4	
C-42	42		164	327	773	1142	0.0098	0.82	8.5	2.3	
C-47	47	150	299	703	1278	0.0090	0.75	7.0	1.2		

合では、スランブフロー（以降 SF と称する）が 550mm 程度になるまで粗骨材体積割合を低下させた配合も対象とした。配合と各配合のスランブまたはスランブフロー試験および空気量試験の結果を表-2 に示す。

### 3. 実験結果

#### 3.1 モルタルの粘性

図-4 に実験結果を示す。S/C を変えた配合 A, B, C の降伏応力はそれぞれ 87.8, 115.7, 119.1(Pa)となり、S/C の増加に伴い、降伏応力は大きくなった。また、塑性粘度は 684.9, 1265.4, 1466.6(Pa・s)となり、S/C の増加に伴い、塑性粘度は大きくなった。以上より、配合 A の粘性は低く、配合 A を用いたコンクリートが最も分離しやすく、配合 B, C の粘性は同程度であるため分離の傾向も近いことが予想される。

#### 3.2 材料分離測定試験

表-3 に材料分離測定試験で締固めに要した時間および締固め後の先端角度を示す。表-4 に採取箇所ごとのコンクリート体積を示す。①, ②では採取した試料の体積が小さい配合がある。そのため、測定結果として掲載はするが、試料体積が小さい結果は参考程度として、①から⑦の全体的な傾向に基づき、材料の分離の程度を把握した。図-5, 6 に材料分離測定試験の結果を示す。縦軸は、変動割合とした。

##### 3.2.1 モルタルの粘性が材料分離に及ぼす影響

図-5(a)に粗骨材の体積割合毎の材料分離試験の結果

を示す。粗骨材割合 37%（以降 G-37 と称する）では、全体的に粗骨材の割合に変動はなかった。粗骨材割合 42%（以降 G-42 と称する）では、採取箇所が締固め位置に近いほど、粗骨材の割合が高かった。粗骨材割合 47%（以降 G-47 と称する）では、材料分離の程度が大きい A-47 を除いて、程度は小さいが G-42 と同様の傾向で材料分離が発生していた。ここで、スランブ試験の結果に着目すると、いずれの S/C でも、G-42 と比較して、G-37 のスランブ値が大きかった。示方書の施工標準を参考にすると、G-37 は G-42 よりもスランブが大きいので材料分離が発生しやすいことが想定されるが、結果と一致しなかった。これは、G-37 と比較して、G-42 は多くの締固め時間を要したことが原因と考えられる（表-3 参照）。粗骨材はモルタルの流動の妨げとなるため、粗骨材量の増加に伴い締固め時間が増加したことが考えられる。その結果、G-42 では、締固めに伴いモルタルのみが顕著に流動し、材料分離の程度が大きくなったと考えられる。特に、C-42 では、締固め付近から仕切りゲートにて粗骨材が閉塞を起こしているが目視にて確認され、材料分離の程度も大きかった。本研究では、横方向に流動したコンクリートの材料分離を観察することを目的としており、仕切りゲートでの粗骨材の閉塞による材料分離は観察したい材料分離とは異なるため、これ以降の検討では非常に長い締固め時間が必要であった配合（B-47, C-42, C-47）は除外して議論をすることとした。

全体的な傾向として、本研究の範囲では粗骨材割合に

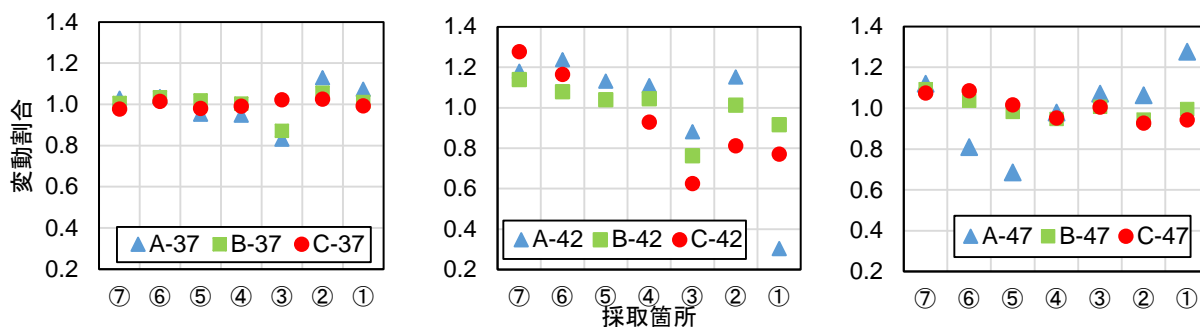
表-3 締固めに要した時間と

締固め後の先端角度

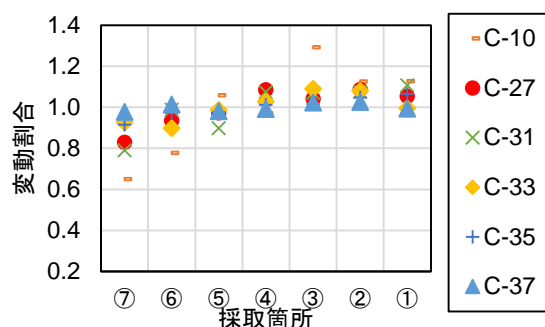
記号	締固め時間 (s)	先端角度 (°C)
A-37	5	8.7
A-42	7	5.3
A-47	23	9.8
B-27	5	14.6
B-37	6	12.1
B-42	18	9.0
B-47	37	11.3
C-10	3.5	12.5
C-27	7	15.3
C-31	17	12.1
C-33	30	13.9
C-35	27	16.6
C-37	25	15.5
C-42	70	15.4
C-47	77	13.8

表-4 各採取箇所のコンクリート体積

記号	コンクリート体積(cm³)						
	⑦	⑥	⑤	④	③	②	①
A-37	2248	1164	1250	1022	854	507	530
A-42	3997	1093	1015	656	571	263	150
A-47	1183	1235	1468	980	808	642	234
B-27	1571	898	1462	1245	1166	905	720
B-37	1482	1413	1234	1209	1110	737	490
B-42	2062	1367	1522	1298	1027	549	197
B-47	1689	1305	1375	886	905	692	346
C-10	1604	1117	1020	1065	1041	930	1119
C-27	1398	1066	1335	1334	1268	1050	556
C-31	1441	907	1345	1115	1162	985	668
C-33	1344	1292	1311	1189	1265	1066	543
C-35	1684	1273	1392	1385	1371	1042	351
C-37	1545	1718	1072	1288	1325	916	315
C-42	2072	1392	1190	1172	1111	814	330
C-47	1486	1142	1289	1042	1111	802	331

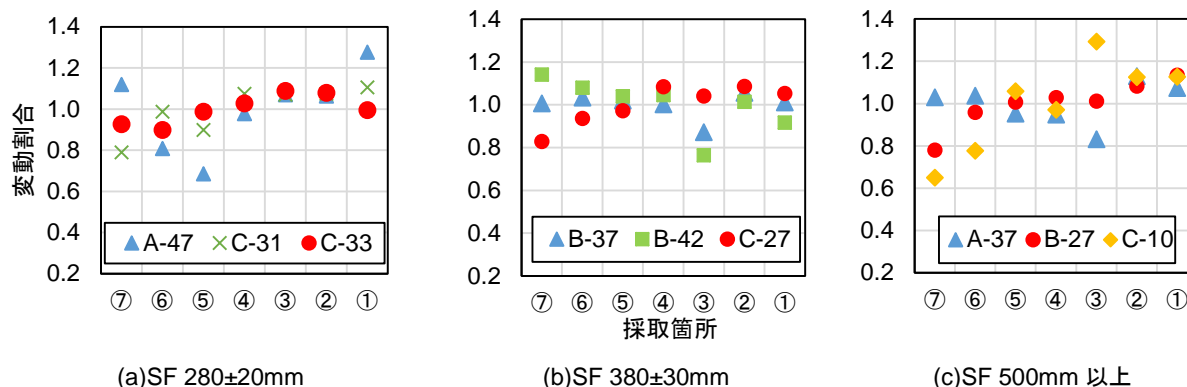


(a)モルタルの粘性が材料分離に及ぼす影響



(b)粗骨材の体積割合が材料分離に及ぼす影響

図-5 粗骨材の分布



(a)SF 280±20mm

(b)SF 380±30mm

(c)SF 500mm以上

図-6 流動性が同程度の場合の粗骨材分布の比較

応じて分離の仕方が同様であることが確認できたが、粘性の低い A は材料分離の程度が大きく、粘性が A よりも高い B, C はいずれも分離の程度は小さいことも確認できた。

### 3.2.2 粗骨材の体積割合が材料分離に及ぼす影響

図-5(b)に粗骨材割合を変化させた結果の比較を示す。分離している配合は C-10, C-27, C-31 が挙げられ、粗骨材割合が低いほど材料分離の程度は大きく、締め位置に近くなるほど、粗骨材量が減少した。原因として、フレッシュコンクリートと鋼板間の摩擦の影響も考えられるが、詳細な現象解明については今後の課題である。また、C-33, C-35, C-37 では、殆ど材料分離は発生しなかった。

### 3.2.3 スランプフローが同程度のコンクリートの比較

流動性が同じ場合を比較するために、スランプフローが同程度の場合を検討した。図-6 にスランプフロー値に近い配合を区分分けした粗骨材分布の結果を示す。

配合群(a)では、粘性が低く、粗骨材割合の高い A-47 は材料分離の程度は大きい。一方で、粘性が高く、粗骨材割合の低い C-31 は材料分離の程度は小さく、C-33 は材料分離が殆ど発生していないことが確認された。

配合群(b)は、粘性が殆ど同じで粗骨材割合が異なる 3 配合から構成されている。粗骨材割合の低い C-27 では、締め位置に近くなるほど粗骨材割合が減少し、粗骨材割合が高い B-42 では、締め位置に近くなるほど粗骨材割合が増加している。

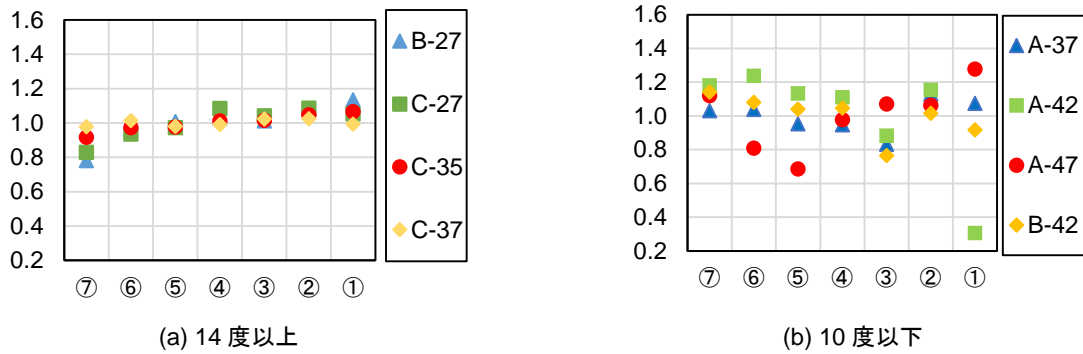


図-7 先端角度が同程度の場合の粗骨材分布の比較

配合群(c)は、配合群(a)と同様に粘性が低く、粗骨材割合の高い配合と、粘性が高く、粗骨材割合の低い配合から構成されている。粘性が低く、粗骨材割合の高いA-37の材料分離は確認されなかったが、粘性が高く、粗骨材割合の低いB-27やC-10では、締固め位置に近くなるほど粗骨材量が減少していることが確認された。

### 3.2.4 締固め後の先端角度が同程度のコンクリートの比較

モルタルと粗骨材が一体となって流動する際に、粗骨材の粒径によってモルタルの厚さが大きくなることで、先端角度が大きくなることが予想される。このため、先端角度が材料分離に与える影響を整理し、同程度の場合を検討した。図-7に先端角度が大きい配合群(a)と小さい配合群(b)に分けた粗骨材分布の結果を示す。先端角度が大きい配合群(a)に着目すると、材料分離の程度が小さいB-27とC-27や、材料分離が生じていないC-35とC-37が含まれている。一方、配合群(b)は、A-37を除き、材料分離の程度が大きい配合が含まれている。このことから、粗骨材が一体となって流動している配合は、先端角度が高くなりやすいことが考えられ、材料分離の発生の有無の判定に用いられる可能性がある。

## 4. まとめ

本実験で得られた知見は次のようになる。

- (1) 測定したモルタルの粘性と材料分離試験の結果から、コンクリート中のモルタルの粘性が低いAでは材料分離の程度が大きく、粘性がAよりも高いB、Cはいずれも分離の程度は小さいことが確認

された。また、 $W/C=50$ 、 $S/C=2.5$ の配合では、粗骨材割合が低いほど材料分離の程度は大きく、締固め位置に近くなるほど粗骨材量が減少することが確認された。

- (2) 振動締固めに伴う流動による材料分離には、流動する締固め位置でモルタルが多くなる場合と、粗骨材が多くなる場合の2種類存在する。

## 参考文献

- 1) 森田篤史, 飯坂武男, 梅原秀哲, 稲熊 唯史: 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, p.313-318, 2001
- 2) 西村和朗, 加藤義孝: 加速度および振動数がフレッシュコンクリートの流動性に及ぼす影響, 第72回セメント技術大会, 2018
- 3) 谷川恭雄, 森博嗣, 増田一幸, 渡辺健治: 回転粘度計によるレオロジー定数測定方法に関する有限要素解析, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.10, p.321-326, 1988
- 4) 橋本永手, 西村和朗, 江口康平, 加藤佳孝: フロー試験の物理的解釈に基づくセメントペーストの粘性評価手法, 土木学会第71回学術講演会, p.645-646, 2016
- 5) 黒川善幸, 谷川恭雄, 森博嗣, 渡辺貴: フレッシュコンクリートの伝播性状に関する実験的・解析的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.22, p.403-408, 2000