

論文 人工軽量粗骨材を用いたプレキャスト部材用高流動軽量コンクリートの材料分離に関する一考察

原 勝哉*1・西野 誠一郎*2・佐々木 亘*3・富山 茂樹*4

要旨：建設現場の生産性向上のためにプレキャスト部材の活用が推進されている。プレキャスト部材は運搬重量の制限により部材重量を考慮した割付計画が求められる。近年の土木構造物の大規模化に鑑みると部材分割数の増加により製作工程の圧迫が懸念される。本稿ではプレキャスト部材の軽量化に着目し、人工軽量粗骨材を用いた高流動コンクリートの製造から運搬・打込み前までの各過程において、配合条件やフレッシュ性状が人工軽量粗骨材の浮上りに与える影響を確認した。その結果、高炉スラグ微粉末 50%置換, $w/p=85\% \sim 100\%$, $V_g=0.300\text{m}^3/\text{m}^3$, スランプフロー640~660mm の条件で浮上りの程度が小さくなることがわかった。

キーワード：人工軽量粗骨材, 高炉スラグ微粉末, 高流動コンクリート, 材料分離

1. はじめに

建設現場の生産性向上に資する施策の1つとして、プレキャスト部材の活用が推進されている。国土交通省では、コンクリート生産性向上検討協議会を設置し重点的に取組みが進められ、各種ガイドラインが策定された。これらの取組みにより、建設現場におけるプレキャスト製品の採用が一般化し、適用範囲が拡大している。著者らもこれまで、工場で作成したプレキャスト部材を活用して橋脚の急速施工に取り組んできた¹⁾²⁾。

工場で作成するプレキャスト部材は運搬時の重量に制限があり、部材重量を考慮した割付計画が求められる。近年の土木構造物の大規模化に鑑みると、部材分割数の増加が予想され工場製作の圧迫や分割数増による工程への影響が懸念される。解決策の一つとして、プレキャスト部材の軽量化が挙げられる。プレキャスト部材の軽量化により、従来に比べて、運搬車の荷台寸法制限内で最大限に形状を大きくすることができ、大規模構造物における分割数の増加を抑制することができる。プレキャスト部材の軽量化は、これまで行われてきたプレキャストを用いた急速施工法の更なる高度化につながる。

プレキャスト部材の軽量化の方法として、コンクリート強度を大きくしプレキャスト部材を薄くする方法、または、コンクリートの単位容積質量を小さくする方法等が考えられ、本稿では後者の方法に着目する。また、筆者らが取り組んできた橋脚の急速施工¹⁾²⁾は、予め帯鉄筋を内蔵した薄肉のプレキャストパネルで橋脚表面を形成し、内部に中詰めコンクリートを打設して橋脚を構築する工法である。このプレキャスト部材では薄肉の断面内に鉄筋やインサートを配置するため、製作には高い間

隙通過性と自己充填性を有する高流動コンクリートを使用してきた。プレキャスト部材の軽量化について、軽量化の方法と高流動コンクリートによる製作を踏まえ、本稿では、人工軽量粗骨材を用いた高流動コンクリートの軽量化を対象とした。一方、軽量コンクリートのデメリットの1つとして、骨材密度が小さいことにより、締固め作業等の振動を受けた際に人工軽量粗骨材が上面に浮き上がりやすくなることが挙げられる。プレキャスト部材に高流動コンクリートを使用した場合は、締固め作業による振動は受けないが、工場内のコンクリート運搬等で振動を受けるため、打込み前に人工軽量粗骨材が浮き上がる可能性がある。既往の研究報告³⁾では、配合条件が材料分離抵抗性に及ぼす影響が報告されているが、工場で作成されるプレキャスト部材への適用を前提とした実際の製作過程を考慮した報告は少ない。

本稿では、配合条件およびフレッシュ性状がプレキャスト用高流動コンクリートの製造から運搬・打込みまでの各過程における人工軽量粗骨材の浮上り性状に与える影響について考察する。軽量化について、従来¹⁾²⁾の工場製作で使用したコンクリートの単位容積質量：約 $2300\text{kg}/\text{m}^3$ に対して、本実験では $2000\text{kg}/\text{m}^3$ 程度を目標値とした。

2. 実験概要

2.1 使用材料・配合

本研究では、人工軽量粗骨材を使用した軽量コンクリート1種を対象とすることとした。使用材料を表-1に示す。セメントは早強ポルトランドセメントを、混和材として高炉スラグ微粉末を使用した。人工軽量粗骨材(最

*1 三井住友建設(株) 土木本部土木設計部プロジェクト設計グループ (正会員)

*2 三井住友建設(株) 土木本部土木設計部構造設計グループ

*3 三井住友建設(株) 技術開発本部 R&D センター第二グループ 主任研究員 博(工) (正会員)

*4 三井住友建設(株) 土木本部土木設計部構造設計グループ長

表-1 使用材料

材料		特性	記号
水		上水道水	W
粉体	早強ポルトランドセメント	密度：3.13g/cm ³	H
	高炉スラグ微粉末	密度：2.88g/cm ³ ，比表面積：6050cm ² /g	BF
細骨材	多賀町四手産石灰砕砂	表乾密度：2.68g/cm ³ ，吸水率：0.92%，粗粒率：2.81	S
粗骨材	人工軽量骨材	最大寸法：15mm，表乾密度：1.67g/cm ³ ，絶乾密度：1.31g/cm ³ ，吸水率：27.0%	G
化学混和剤	高性能減水剤	ポリカルボン酸エーテル系化合物	SP
	AE剤	変性アルキルカルボン酸化合物系陰イオン界面活性剤	AE

表-2 配合表

No.	w/p-Vg	水結合材比 W/B [%]	水粉体容積比 w/p [%]	単位粗骨材絶対容積 Vg [m ³ /m ³]	モルタル細骨材容積比 s/mor [%]	目標空気量 [%]	単位量 [kg/m ³]						単位容積質量 [kg/m ³]
							W	B		S	G		
								H	BF				
1	110-300	35.0	110	0.300	49.6	5.5	170	486	486	0	854	501	2011
2	100-300	33.3	100	0.300	47.2	5.5	170	510	266	244	814	501	1995
3	90-300	29.9	90	0.300	45.0	5.5	168	561	293	268	774	501	2004
4	85-300	28.3	85	0.300	45.0	5.5	163	576	300	276	774	501	2014
5	80-300	26.6	80	0.300	45.0	5.5	158	594	310	284	772	501	2025
6	90-325	30.0	90	0.325	45.0	5.5	161	537	280	257	748	543	1989
7	90-350	30.0	90	0.350	45.0	5.5	155	516	269	247	716	585	1972
8	100-350	33.3	100	0.350	47.2	5.5	157	471	246	225	750	585	1963

大寸法 15mm) は、膨張性頁岩を造粒、焼成したものを使用した。

コンクリートの配合を表-2 に示す。配合 No.1 は、筆者らがこれまで実構造物に適用してきた普通骨材を使用した高流動コンクリートの配合に対して、粗骨材を全量人工軽量粗骨材に置き換えた配合であり、水粉体容積比(以降 w/p と称す)が 110%、単位粗骨材絶対容積(以降 Vg と称す)が 0.300 m³/m³ の配合である。配合 No.2~8 は既往の研究報告³⁾を参考に配合指標を設定した。すなわち、配合 No.2~5 は Vg を 0.300 m³/m³ とし、w/p を 100~80% の範囲で変化させた配合である。配合 No.6~7 は w/p を 90% とし Vg を 0.325 m³/m³ と 0.350 m³/m³ に変化させた配合、配合 No.8 は w/p を 100% とし Vg を 0.350 m³/m³ とした配合である。加えて、モルタル細骨材容積比(以降 s/mor と称す)を配合 No.3~7 では 45%、配合 No.2, 8 では 47% 程度となるよう単位水量を調整した。粉体には早強ポルトランドセメントに加え、結合材の軽量化と環境負荷低減の観点から高炉スラグ微粉末を使用し、粉体容積の 50% を置換した。高性能減水剤の添加率は後述するフレッシュ性状と併せて表-3 に示した。

コンクリートの練混ぜには公称容量 100 リットルの強制二軸ミキサを使用した。モルタル練りを 90 秒行った後、人工軽量粗骨材を投入し 90 秒練り混ぜた。人工軽量骨材は表面水を持った状態でビニール袋詰めされたものを練混ぜ直前に開封し使用した。練混ぜ水および人工軽量骨材の計量値は表面水率による補正を行った。練り混ぜたコンクリートを用いて後述する各種試験を行った。

2.2 試験方法

練り混ぜたコンクリートに対して、U 形容器(流動障害 R1)を用いた充填試験(JSCE-F 511-2011)、スランブフロー試験(JIS A 1150)、空気量試験(JIS A 1128)、漏斗

を用いた流下試験(JSCE-F 512-2011)を実施した。前述した試験によりフレッシュ性状と自己充填性を確認した後、以下に示す 3 つの観点より材料分離(骨材の浮上り)に関する確認試験を行った。材料分離の程度は、各試験時に採取する試料の骨材量により確認した。採取した試料は水洗いし、人工軽量粗骨材を取り出した後、乾燥炉で絶乾状態となるまで乾燥した。その後、絶乾状態の人工軽量粗骨材の重量を計測した。

(1) 静置状況下における材料分離の確認

試料を静置した状況下で、人工軽量粗骨材の浮上りに対して w/p や Vg 等の配合要因が影響するか確認することを目的に実施した。試験方法は、試料を容器に投入し、30 分間静置した後、容器高さ方向に 2 層に分けて採取した。容器は角柱供試体(100mm×100mm×400mm)を用いた。予備実験にて同様の断面の容器に練り混ぜた試料を投入し、静置したところ、人工軽量骨材の浮上りを確認した。また、硬化後に断面を確認したところ、断面内の人工軽量骨材が下層に比べ、上層に多く分布していたことより、角柱供試体でも浮上りを確認できると考えた。試料の採取はハンドスコープを用いて行い、角柱供試体天端から指矩を用いて、試料の採取深さを計測しながら行った。上層の試料採取時には、スコープの先端が下層に入らないように留意した。試験終了後、前述した方法で、採取した試料中の人工軽量骨材の重量を計測し、上・下層の骨材量の違いを確認した。

(2) V₇₅ 漏斗試験装置により模擬したバッチャープラント排出直後の材料分離の確認

プレキャスト製造工場のバッチャープラントからコンクリートを排出・落下した時の材料分離に与える影響の確認を目的とした。試験方法は、バッチャープラントからの排出状況の再現として、V₇₅ 漏斗試験装置を用いて

模擬した。試験は練り混ぜたコンクリートを V₇₅ 漏斗試験装置に静かに流し込み、上端面を均し終わった後に 10 秒以内に吐出口の底蓋を開け、流下させた。流下試験の実施と同時に V₇₅ 漏斗試験装置から排出される試料を V₇₅ 漏斗試験装置容量の 3 等分程となるように採取した。容量は 10L 程度であるため、下層：3L，中層：3L，上層：4L となる箇所にマーキングした容器を準備し流下する試料を各層用の容器に受けながら取り分けた。試験終了後、前述した方法で、採取した試料中の人工軽量骨材の重量を計測し上・中・下層の骨材量の違いを確認した。

(3) 運搬中の振動による材料分離の確認

バッチャープラントから排出されたコンクリートを運搬する時の振動が、材料分離に与える影響の確認を目的とした。試験方法は写真-1 に示すように、パレットに試料を投入した容器 (20L) を乗せてフォークリフトで 5 分間走行し、運搬中の振動による人工軽量粗骨材の浮上りを確認した。走行後、容器内の試料を上・中・下と深さ方向に分けて採取した。試験終了後、前述した方法で、採取した試料中の人工軽量骨材の重量を計測し、上・中・下層の骨材量の違いを確認した。



写真-1 運搬試験実施状況

試料を練り混ぜた。充填試験の結果より、全ての配合において自己充填高さは 300mm を大きく超える結果となった。本実験で検討した条件の範囲において、人工軽量粗骨材を使用した配合は、最も厳しい流動障害 R1 であっても自己充填性を確保できることが確認できた。

図-1 に $V_g=0.300\text{m}^3/\text{m}^3$ の条件におけるスランブフローと高性能減水剤添加率の関係を示す。w/p=110% (H 単味) と w/p=100~80% の高炉スラグ微粉末 50% 置換したものを比較すると、同一のスランブフローを得るために必要な高性能減水剤の添加率は小さくなることがわかった。また、スランブフロー 600~700mm 程度の範囲では、高性能減水剤添加率の変化に対するフロー値の変化が大きい。図-2 にスランブフローと単位粗骨材絶対容積の関係を示す。w/p=100% では V_g がスランブフローに与える影響は小さかった。w/p=90% では、 V_g が増加するとスランブフローは若干低下する傾向にあるが、大きな影響はないと考える。図-3 に $V_g=0.300\text{m}^3/\text{m}^3$ の 500mm フロー到達時間とスランブフローの関係を示す。w/p=80% と

3. 実験結果および考察

3.1 フレッシュ性状

表-3 に高性能減水剤の添加率とフレッシュ性状試験結果を示す。後述する材料分離に関する実験では、w/p や V_g 等の配合指標に加え、スランブフローが骨材の浮上りに与える影響を確認するために、同一配合内で化学混和剤の添加率を変化させ、複数のスランブフロー値となる

表-3 フレッシュ性状

No.	w/p-Vg	化学混和剤	充填試験 (U形-流動障害R1)			スランブフロー試験			V ₇₅ 漏斗試験
		SP [B×%]	充填高さ [mm]	300mm 到達時間 [mm]	停止時間 [s]	スランブフ ロー平均値 [mm]	500mm 到達時間 [s]	停止時間 [s]	流下時間 [s]
1	110-300	0.950	347	6.2	20.6	610	4.8	32	8.8
2	100-300	0.600	350	5.6	18.2	640	5.4	83	16.9
3	90-300	0.850	348	3.3	12.3	755	5.3	118	12.7
	90-300	0.750	361	5.0	23.0	735	5.2	79	16.3
4	90-300	0.725	351	7.2	18.5	650	4.8	52	15.3
	85-300	1.050	356	3.6	12.3	790	6.0	130	15.5
5	85-300	0.800	345	11.3	28.0	705	7.3	76	25.0
	85-300	0.775	349	13.0	39.0	660	9.1	82	30.1
6	80-300	0.850	349	18.1	39.6	605	10.3	58	31.4
7	90-325	0.700	350	15.3	24.1	645	6.7	83	29.6
8	90-350	0.700	341	16.8	31.6	615	9.2	77	34.2
8	100-350	0.600	352	9.4	27.4	665	9.1	88	21.0

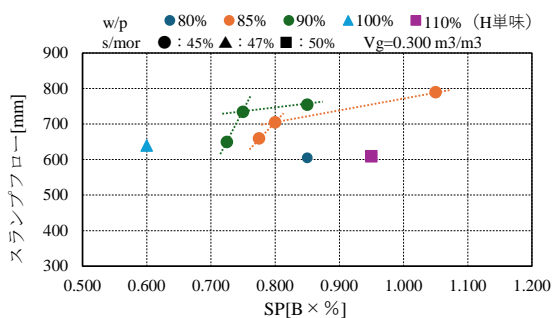


図-1 スランブフローと高性能減水剤添加率の関係

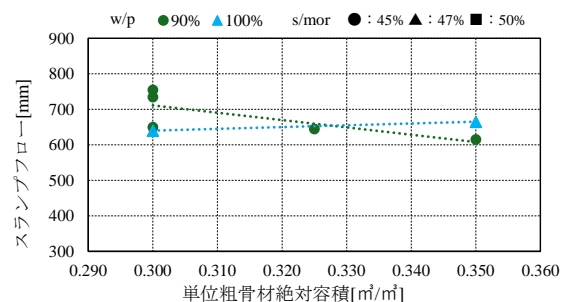


図-2 スランブフローと単位粗骨材絶対容積の関係

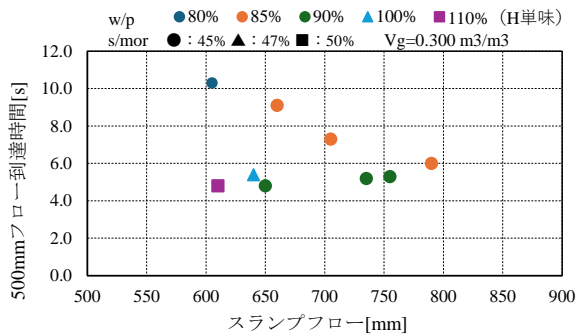


図-3 500mm 到達時間とスランプフローの関係

85%では、スランプフローが大きくなるほど、500m フロー到達時間は小さくなった。また、w/p=90%では、スランプフローの変化に対する500mm フロー到達時間の変化が小さかった。図-4に500mm フロー到達時間と単位粗骨材絶対容積の関係を示す。Vgが大きくなると500mm フロー到達時間も大きくなる傾向にある。

一般的にw/pを小さくすることで、粘性が大きくなり、材料分離抵抗性が向上すると考えられる。粘性が大きくなると500mm フロー到達時間が大きくなるが、同一w/pであってもスランプフローの違いにより500mm フロー到達時間が変わることを確認した。よって、材料分離抵抗性を高めるためには、w/pやVg等の配合的要因に加えスランプフローの管理も必要と考えられる。また、本実験では、スランプフロー600~700mm程度の範囲は、高性能減水剤の添加率の変化に対して、スランプフローの変化が大きい結果となった。

3.2 材料分離抵抗性

材料分離に関する確認試験により得られた絶乾状態の人工軽量粗骨材の重量を用いて下記式(1)より粗骨材量比率を算出し、材料分離の程度を評価した。

$$\delta = G / G_0 \times 100 \quad (1)$$

ここに、 δ : 粗骨材量比率 (%)

G : 採取試料の絶乾状態の単位粗骨材量 (kg/m³)

G₀ : 配合における絶乾状態の単位粗骨材量 (kg/m³)

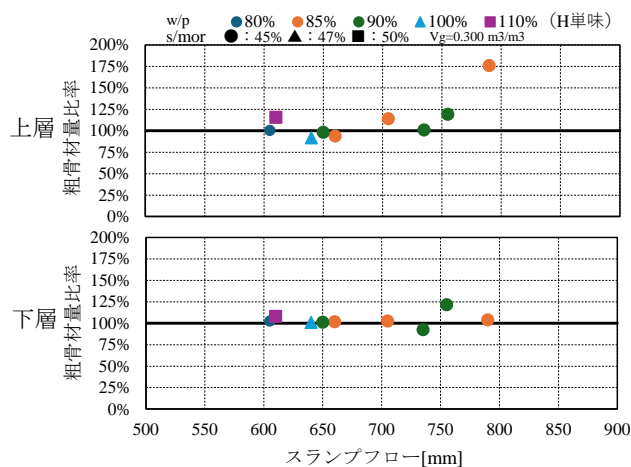


図-5 静置状況下の試料の粗骨材量比率 (粗骨材量比率とスランプフロー/単位粗骨材容積の関係)

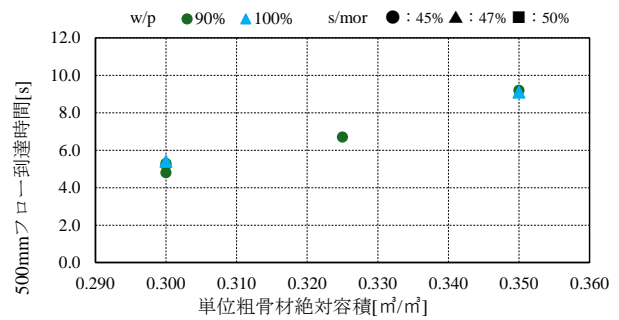


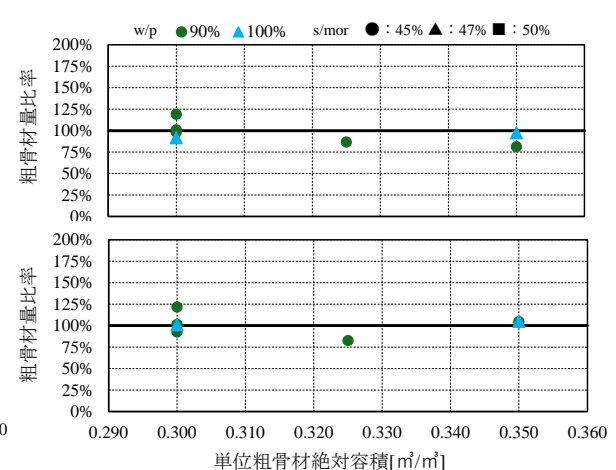
図-4 500mm 到達時間と単位粗骨材絶対容積の関係

粗骨材量比率が100%に近いほど、材料分離が少なく骨材の浮上り量が小さいことを表すものである。ここで、材料分離の程度を表す指標としてコンクリートライブラリー161⁴⁾を参考にした。同指針では、締固めを必要とする高流動コンクリートに対する振動締固めの影響についての検討において、粗骨材割合76%以上が確保されており、構造体全体としての硬化体の品質に過度な変動は確認できなかったという事例が報告されている。本稿では、これを参考に、人工軽量骨材の浮上りを考慮して粗骨材量比率が70~130%の範囲となる場合を顕著な浮上りはなく、均一な試料として考察した。

(1) 静置状況下における材料分離の確認試験結果

図-5に静置状況下の材料分離確認試験の結果を示す。図-5の左側は、Vg=0.300m³/m³の上・下層の粗骨材比率とスランプフローの関係を示したものである。スランプフロー790mm (w/p=85%) 以外の試料の30分静置後の粗骨材比率は、上・下層ともに約80%~120%の範囲で分布しており、人工軽量粗骨材の顕著な浮上りは確認されなかった。図-5の右側は、上・下層の粗骨材量比率と単位粗骨材絶対容積の関係を示したものである。w/p=90%, 100%でVgが0.300~0.350 m³/m³の範囲の試料であるが、人工軽量粗骨材の顕著な浮上りは確認されなかった。

静置状況下では、w/p, Vg等の配合要因やスランプフ



ローが人工軽量粗骨材の浮上りに与える影響は小さいと考える。ただし、スランプフローが 800mm 近くになると上層の人工軽量骨材の浮上りが顕著になった。この試料は、スランプフロー形状の目視観察より、他の試料に比べてモルタルの先走りが見られたことから、人工軽量粗骨材が分離気味であった可能性がある。

(2) V₇₅ 漏斗試験装置を用いた材料分離確認試験結果

図-6 に V₇₅ 漏斗試験装置を用いた材料分離確認試験の結果を示す。図-6 の左側は、V_g=0.300m³/m³の上・中・下層の粗骨材料比率とスランプフローの関係を示したものである。w/p=100%, 90%, 85%でスランプフロー640~755mm の試料は、上・中・下層の粗骨材料比率が約 80%

~110%の範囲で分布しており、人工軽量粗骨材の浮上りが少ない均一な試料であるといえる。一方、スランプフローが 600mm に近い w/p=80%, 110%の試料は下層の粗骨材量比率が 140%となった。スランプフローが小さい試料は大きい試料に比べて、密度差のあるモルタルと人工軽量粗骨材がある程度一体となって落下したと考える。また、落下状況の目視観察では、スランプフローが小さい試料は大きい試料に比べてモルタルが V₇₅ 漏斗試験装置内に付着し、遅れて落下するような傾向があった。これらの要因により、上層に比べて下層の粗骨材量比率が大きくなったと考えられ、スランプフロー600mm 程度でその傾向が顕著になった。これより、本試験の範囲では、

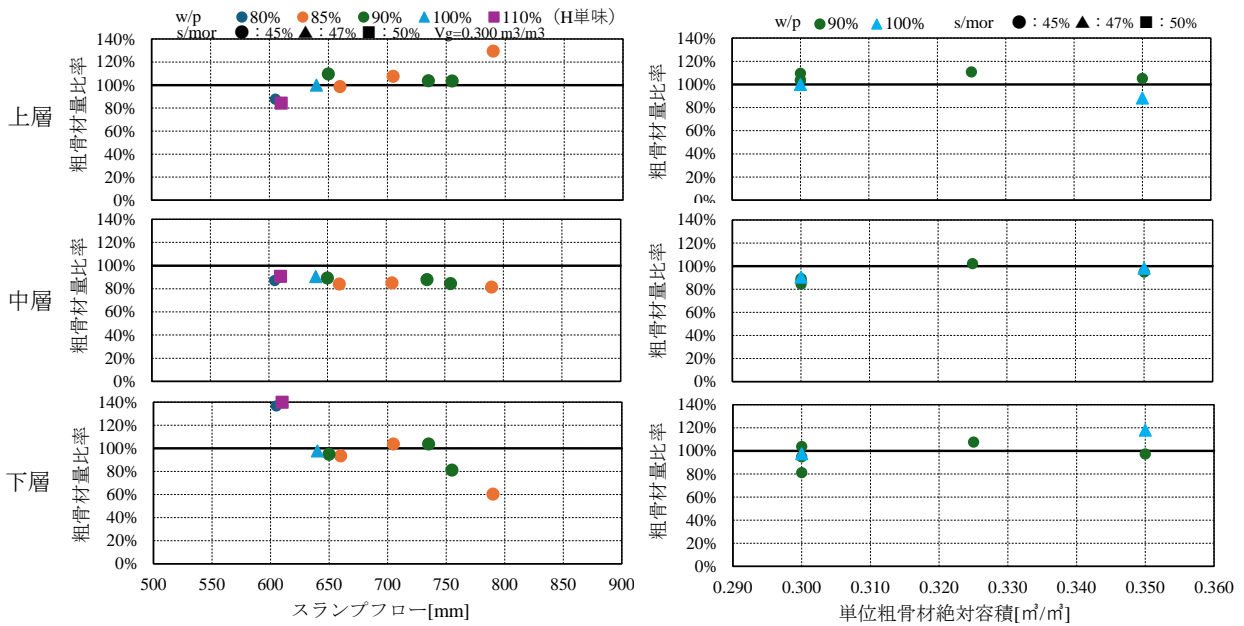


図-6 V₇₅ 漏斗試験装置から排出された試料の粗骨材料比率 (粗骨材量比率とスランプフロー/単位粗骨材容積の関係)

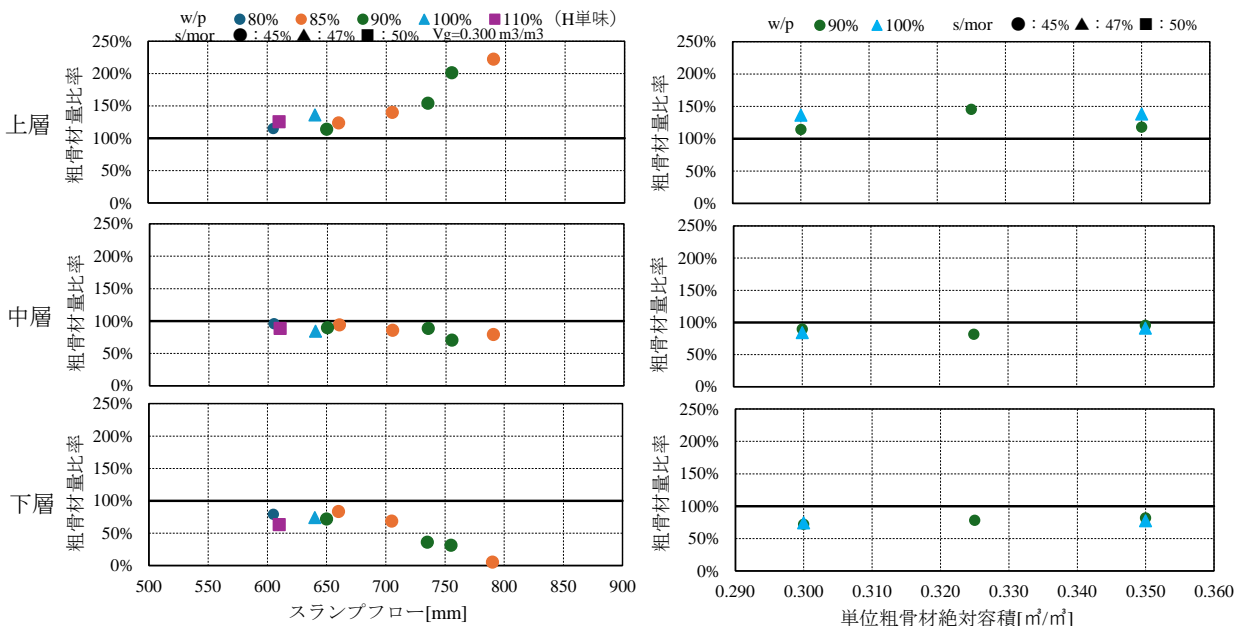


図-7 運搬中の振動を受けた試料の粗骨材料比率 (粗骨材量比率とスランプフロー/単位粗骨材容積の関係)

試料の落下が粗骨材量比率に与える影響はスランプフローが支配的であると考えられる。また、スランプフローが800mmに近い $w/p=85\%$ の試料では粗骨材量比率が上層:130%となり、他の試料より大きい値となった。練上り直後の排出時点ということ踏まえると、その他試料と比べて材料分離に顕著な差が確認されたと言える。(1)の試験でもスランプフローが大きくなると上層の粗骨材量比率が大きく、同様の傾向であった。図-6の右側は、上・中・下層の粗骨材比率と単位粗骨材絶対容積の関係を示したものである。静置状況下の試験と同様に、単位粗骨材絶対容積の違いによる人工軽量粗骨材量の顕著な浮上りは確認されなかった。 V_{75} 漏斗から排出された直後の試料の材料分離に対しては、スランプフローの影響が大きく、 V_g の影響は小さいと考えられる。

(3) 運搬中の振動による材料分離の確認試験結果

図-7に運搬中の振動による材料分離確認試験の結果を示す。図-7の左側は、 $V_g=0.300\text{m}^3/\text{m}^3$ の上・中・下層の粗骨材比率とスランプフローの関係を示したものである。 $w/p=80\% \sim 100\%$ でスランプフロー605~660mmの試料は、上・中・下層の粗骨材比率が概ね70%~130%の範囲に分布しており、人工軽量粗骨材の浮上りが比較的少ない試料であると考えられる。一方、スランプフローが735mm以上では、上・中・下層の粗骨材比率の差が著しく大きくなった。また、 $w/p=110\%$ でスランプフローが600mmの試料の粗骨材比率は、 $w/p=80\% \sim 100\%$ でスランプフロー605~660mmの試料と同程度であったことより、運搬中の試料における骨材の浮上りには、スランプフローが大きく影響することがわかった。図-7の右側は、上・中・下層の粗骨材比率と単位粗骨材絶対容積の関係であり、スランプフロー615~650mmの試料を示したものである。静置状況下の試験や V_{75} 漏斗試験装置を使用した試験結果と同様に、単位粗骨材絶対容積の違いによる人工軽量粗骨材の顕著な浮上りは確認されなかった。

本稿では、人工軽量粗骨材を使用した高流動コンクリートが、製造から運搬・打込みまでの各過程で受ける作用を考慮し、(1)静置、(2)落下、(3)運搬中の振動を想定した材料分離に関する確認試験を行った。各試験でコンクリートが受ける作用が異なるため、3者で明確な相関関係は確認できなかったが、(2)(3)試験結果より、スランプフローが浮上りを抑えるための重要な要因であることがわかった。

4. まとめ

本稿では、人工軽量粗骨材を用いたプレキャスト用高流動コンクリートの製造から運搬・打込み前までの各過程において、配合条件やフレッシュ性状が人工軽量粗骨

材の浮上り性状に与える影響を確認するために、製造過程を模擬した各種実験を行った。実験に用いたコンクリートの主な条件は、 $w/p=110\% \sim 85\%$ 、 $V_g=0.300 \sim 0.350\text{m}^3/\text{m}^3$ 、混和材として高炉スラグ微粉末を粉体容積の50%置換である。本稿の範囲で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 人工軽量粗骨材を使用した配合は、最も厳しい流動障害R1であっても、 w/p や V_g の配合要因に関わらず高い自己充填性を確保できることを確認した。
- (2) 高炉スラグ微粉末を使用した配合においてスランプフロー600~700mm程度の範囲では高性能減水剤添加率の変化に対するスランプフローの変化が大きい。
- (3) 静置状況下では、配合要因やスランプフローが人工軽量粗骨材の浮上りに与える影響は小さい。 $w/p=80\% \sim 110\%$ 、スランプフロー605~755mmの範囲で、上・下層の骨材分布が均一な傾向であった。
- (4) V_{75} 漏斗試験装置から排出された直後の試料の材料分離に対しては、スランプフローの影響が大きく、 V_g の影響は小さい。 $w/p=85\% \sim 100\%$ 、スランプフロー640~755mmの範囲で、上・中・下層の骨材分布が均一な傾向であった。
- (5) 運搬中の振動を受けた試料の材料分離に対しては、スランプフローの影響が大きく、 V_g の影響は小さい。 $w/p=80 \sim 100\%$ 、スランプフロー605~660mmの範囲で、上・中・下層の骨材分布が均一な傾向であった。

以上の知見より、静置・落下・運搬中の振動の3つの状況に対して、高炉スラグ微粉末50%置換、 $w/p=85\% \sim 100\%$ 、 $V_g=0.300\text{m}^3/\text{m}^3$ 、スランプフロー640~660mmの条件で、人工軽量粗骨材の浮上りの程度が小さくなると考えられる。また、落下・運搬中の振動に対する人工軽量粗骨材の浮上り抑制には、スランプフローが重要な要因であることがわかった。

参考文献

- 1) 村尾光則，富山茂樹：ハーフプレキャスト化による橋脚の急速施工技術，橋梁と基礎，Vol.51，pp.64-67，2017.8
- 2) 小澤隆二，小出譲，原勝哉，平山徹：常磐自動車道北迫川橋（2期線）下部工の急速施工，土木学会全国大会第76回年次学術講演会，VI-520，2021.9
- 3) 柳井修司，坂田昇，信田佳延，岡本享久：高性能軽量・高流動コンクリートに関する研究，土木学会論文集 No.648，V-47，pp.23-32，2000
- 4) 土木学会：コンクリートライブラリー161，締固めを必要とする高流動コンクリートの配合設計・施工指針（案），2022