

## 論文 締固め不要コンクリートの自己充填性に及ぼす骨材特性の影響

松本修治\*1・橋本 学\*2・渡邊賢三\*3・橋本紳一郎\*4

**要旨:** 一般的な RC 構造物に適用しやすい締固め不要コンクリートの開発を指向している。多様な使用材料に応じた配合設計手法を確立するための検討の一環として、本稿では、細骨材の相違がコンクリートのフレッシュ性状に与える影響、粗骨材の実積率の違いがコンクリートの充填性に与える影響について検討した。その結果、細骨材の粒子間距離および形状が本検討での締固め不要コンクリートに適した細骨材として重要な要因であること、いずれの実積率の粗骨材でも、充填高さが最も高くなる粗骨材かさ容積の一定値があることを明らかにした。

**キーワード:** 汎用締固め不要コンクリート, 配合設計手法, 粒子間距離, 細骨材形状, 粗骨材かさ容積

## 1. はじめに

近年、建設工事では、生産性向上の必要性や、技能労働者の高齢化・離職に伴う労働力不足が課題として挙げられている。これらに対応すべく、国土交通省により *i-Construction* が提唱され、現在、様々な取組みが進められている。その一つに流動性の高いコンクリートの積極的な活用が挙げられている。同様に、2019年に改正された JIS A 5308 においては、生産性向上に寄与するレディーミクストコンクリートの普通コンクリートの区分において、新たにスランプフロー45, 50, 55 および 60 cm が設定されるなど、流動性が高く施工性に優れるコンクリートの普及が推し進められている。

施工性に優れるコンクリートとして、従来よりハイパフォーマンスコンクリート<sup>1)</sup>やフローイングコンクリート<sup>2)</sup>など多数の研究が行われ、高流動コンクリートが実用化されている。しかし、既存の高流動コンクリートは、高い流動性と材料分離抵抗性を両立させるために、使用材料の種類や粉体量などを増加させる必要があり、製造コストが大幅に増加する。そのため、高密度な配筋箇所や振動締固めを行うことができない閉塞空間への充填など、特殊な施工条件で限定的に適用される場合がほとんどである。こうした状況を踏まえ、筆者らは、単位セメント量が  $320\text{kg/m}^3$  程度で、締固めを不要とする性能を有し、一般的な RC 構造物の生産性向上に資する汎用的なコンクリート（以下、汎用締固め不要コンクリートと称す）の検討<sup>3)</sup>を行っている。これまでに、一種類の材料を用いて、モルタル中に含まれるセメントと細骨材中の  $0.6\text{mm}$  以下の粒子の容積割合（以下、 $V_{0.6}$  と称す）が 49% となるように配合することで、最も高い充填性が得られることを明らかにしている。

本稿では、産地や種類が異なる材料にも適用できる汎用締固め不要コンクリートの配合設計手法を確立するための検討の一環として、 $V_{0.6}$  を 49% に統一した条件下で、細骨材の種類の違いがコンクリートのフレッシュ性状に与える影響をモルタルの実験で、粗骨材の実積率の違いがコンクリートの充填性に与える影響をコンクリートの実験で検討した結果について述べる。

## 2. 検討対象とするコンクリート

本検討の対象とする汎用締固め不要コンクリートは、一般的な構造条件、施工条件の RC 構造物を対象とし、打込み間隔を 3m 程度以下にすることを前提に、単位セメント量  $320\text{kg/m}^3$  程度、スランプフロー 500mm 程度で締固め不要の性能を有するものと定義している。また、土木学会「高流動コンクリートの配合設計・施工指針<sup>4)</sup>」の自己充填性ランク 2 を満足するものである。これにより、締固め作業が不要となり省人化・省力化によって施工の工程確保や高速化が実現し、生産性の向上が図れる。

## 3. 細骨材のフレッシュ性状への影響検討

## 3.1 検討概要

本検討は、汎用締固め不要コンクリートのフレッシュ性状に与える影響要因のうち細骨材の諸特性に着目し、モルタルにて実験を行うこととした。実験は、2章で定義したフレッシュコンクリートの品質を満足することを確認している単位水量  $175\text{kg/m}^3$ 、単位セメント量  $320\text{kg/m}^3$ 、水セメント比 54.7%、 $s/a=52.2\%$ 、細骨材容積比（以下、 $V_s/V_m$  と称す）54.8% および  $V_{0.6}=49\%$  の配合を対象とした。まず、良好な汎用締固め不要コンクリートにおけるモルタルのフレッシュ性状を把握するために、表一

\*1 鹿島建設株式会社 技術研究所 土木材料グループ 主任研究員 (正会員)

\*2 鹿島建設株式会社 技術研究所 土木材料グループ 上席研究員 博士 (工学) (正会員)

\*3 鹿島建設株式会社 技術研究所 土木材料グループ長 博士 (工学) (正会員)

\*4 千葉工業大学 創造工学部 都市環境工学科 准教授 博士 (工学) (正会員)

1に示す細骨材Aを用いて、コンクリートの試し練りを行った。自己充填性のランク2のU形容器を用いた高流動コンクリートの充填試験方法(案)(JSCE-F 511-2011)において、充填高さ300mm以上が確保されることを確認したうえで、そのコンクリートをウェットスクリーニングしてモルタルフローおよびV漏斗流下時間の試験を行った。その結果、モルタルフローは250mm、V漏斗流下時間は2秒程度であり、これをモルタルでの評価基準とした。この評価基準と比較することで細骨材のフレッシュ性状への影響について確認するとともに、その結果の原因について分析を加えた。

表-1にモルタルの使用材料を示す。細骨材は、異なるレディーミクストコンクリート3工場にて実際に使用されているものを取り寄せて実験に供した。これらはいずれも粒度分布の異なる2種類以上の砂を混合して使用されており、JIS A 5005およびJIS A 5308に合致するものである。また、細骨材Cに用いている加工砂とは、真砂を粉砕し洗浄によって微粒分を除去するとともに整粒処理された砂である<sup>9)</sup>。本実験においては、3工場とも、前述のV<sub>0.6</sub>が49%となるように砂の混合比を変えている。例えば、細骨材Aでは、混合比を工場標準のS1:S2:S3=30:35:35から表-1に示すようにS1:S2:S3=7:58:35に変更している。混合比変更後の細骨材の粒度分布を図-1に示す。

表-2にモルタルの配合を示す。細骨材A、細骨材Bおよび細骨材Cを用いた配合で、混和剤の添加率をそれぞれ5水準とした。また、モルタルのフレッシュ性状はモルタルフローおよびV漏斗試験で確認し、空気量は5.5~7.0%の範囲となるようにAEの添加率を変え調整した。

### 3.2 結果

図-2に混和剤の添加率とモルタルフローの関係を示す。評価基準の選定に使用した細骨材Aは混和剤の添加率がC×0.70%以上で、モルタルフロー250mmを超える結果であったのに対し、細骨材BはC×1.20%にする必要があった。また、細骨材Cは混和剤の添加率を大幅に増やしてもモルタルフローの増大が緩やかであり、C×1.55%としても250mmには到達しなかった。

図-3に混和剤の添加率とV漏斗流下時間との関係を示す。細骨材Aに対して細骨材Bは添加率が増加するものの、添加率の増大に対するV漏斗流下時間の変化の範

囲は5秒以下と同程度であった。一方、細骨材Cは細骨材Aおよび細骨材Bに比べV漏斗流下時間が大きく、混和剤の添加率を増加させても細骨材Cを評価基準である2秒程度に近づけることができなかった。

図-4にモルタルフローとV漏斗流下時間との関係を示す。細骨材Aおよび細骨材Bは比較的近い位置にプロットされ、混和剤の添加率を適切に調整する(図-3よ

表-1 モルタルの使用材料

名称	記号	摘要					
水	W	水道水					
セメント	C	普通ポルトランドセメント, 密度:3.16 g/cm <sup>3</sup> 比表面積 3260 cm <sup>2</sup> /g					
材料名	記号	種類	表乾密度 g/cm <sup>3</sup>	吸水率 %	F.M.	割合	
細骨材	A	S1	砕砂	2.72	0.77	2.69	7
		S2	山砂	2.57	1.90	2.10	58
		S3	石灰砕砂	2.64	0.95	3.03	35
	B	S4	砕砂	2.64	0.91	2.77	58
		S5	山砂	2.61	1.76	1.69	42
	C	S6	加工砂	2.59	1.60	2.87	75
		S7	陸砂	2.61	1.91	1.54	25
混和剤	SP	高性能 AE 減水剤, ホリカルボン酸系					
	AE	AE 剤, 樹脂酸塩系界面活性剤					

実積率: A 66.7%, B 64.4%, C 62.1%

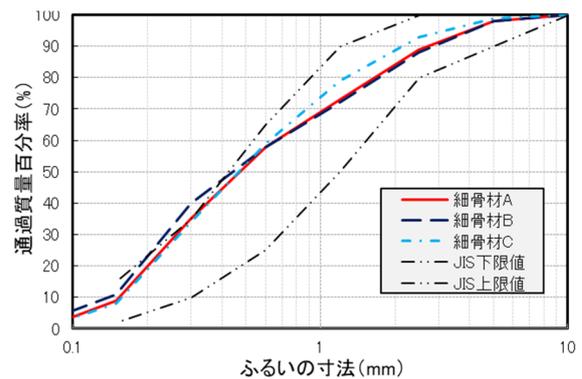


図-1 各細骨材の粒度分布

表-2 モルタルの配合

種類	W/C (%)	Vs/Vm (%)	V <sub>0.6</sub> (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )									SP (C×%)
				W	C	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	
A	54.7	54.8	49.0	267	488	97	761	472	—	—	—	—	0.25~0.80*
B						—	—	—	781	559	—	—	0.60~1.20*
C						—	—	—	—	—	992	333	0.80~1.55*

※混和剤の添加率5水準

り細骨材 A は C×0.7%，細骨材 B は C×1.2%）ことで汎用締固め不要コンクリートを実現できるものと考えられるが、細骨材 C は大きく外れて位置しており、混和剤の添加率の増加だけでは、細骨材 A および細骨材 B と同様の挙動は得られないことが分かる。

以上のことから、細骨材の種類によっては V<sub>0.6</sub> の調整だけでは汎用締固め不要コンクリートに必要なフレッシュ性状が得られない場合があることが明らかになった。

なお、図-4 に示したように、ハイパフォーマンスコンクリートの配合設計<sup>7)</sup>では、モルタルフロー245mm、V 漏斗流下時間は 10 秒が自己充填を実現するために適切とされており<sup>9)</sup>、本検討における汎用締固め不要コンクリートの適切な V 漏斗流下時間と大きく異なることが確認できた。これは、本検討における汎用締固め不要コンクリートが一般的な配筋量の構造物を対象にコンクリートを間配することを前提としていることから、ハイパフォーマンスコンクリートほどの材料分離抵抗性を必要としていないためである。

### 3.3 考察

細骨材の相違がモルタルのフレッシュ性状に与えた影響を検討するために、各種分析を行った。初めに、細骨材の粒子間距離について測定した。細骨材の粒子間距離は、枝松らの次式<sup>7)</sup>で算出しており、その定義は「任意の粒子形状をもつ平均粒径 d の粒子が単位容積中にある体積で存在しているとき、この粒子の配列と粒子形状を変えず、粒径を互いに接触するまで大きくしたとき、両者（拡大する前後）の粒径の差」である<sup>8)</sup>。

$$t = \left\{ \left( \frac{\text{Slim}}{100 \cdot (V_s/V_m)} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right\} \cdot d \quad (1)$$

ここに、t；細骨材の粒子間距離（μm）、d；細骨材の平均粒径（μm）、Slim；細骨材の実積率（%）、V<sub>s</sub>/V<sub>m</sub>；モルタル中の細骨材容積比を表す。各細骨材の平均粒径は通過質量百分率が 50%となる粒径で、細骨材 A は 496μm、細骨材 B は 467μm、細骨材 C は 492μm である。

図-5 に細骨材の粒子間距離とモルタルフロー、V 漏斗流下時間の関係を示す。ここで、モルタルフローは混和剤の添加率が C×0.8%と同一の場合の値を、V 漏斗流下時間はモルタルフローが 210mm 程度の場合の値を示している。細骨材の粒子間距離とモルタルフロー、V 漏斗流下時間には高い相関があり、粒子間距離が大きいほどモルタルフローが大きく、V 漏斗流下時間が短くなる傾向が確認できた。これは、細骨材の粒子間距離が大きくなることで、細骨材の粒子同士の接触による摩擦が緩和したことによるものと推察される。

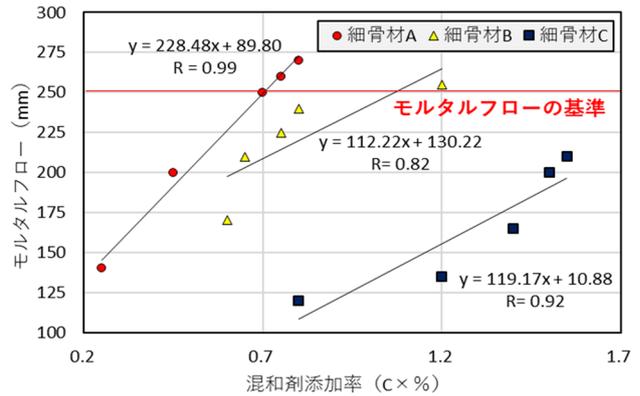


図-2 混和剤添加率とモルタルフローの関係

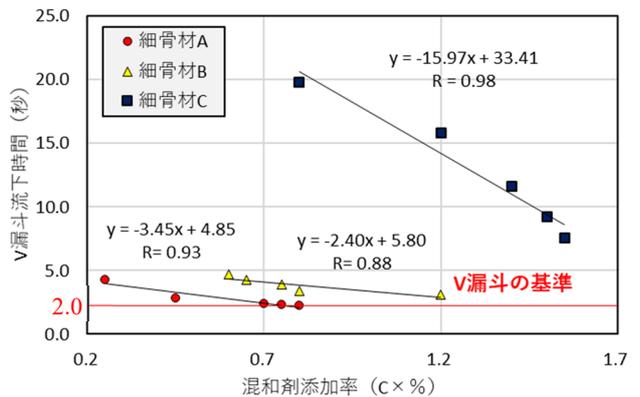


図-3 混和剤添加率と V 漏斗流下時間の関係

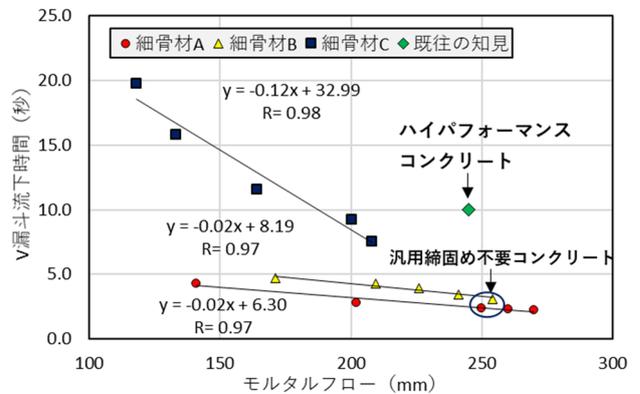


図-4 モルタルフローと V 漏斗流下時間の関係

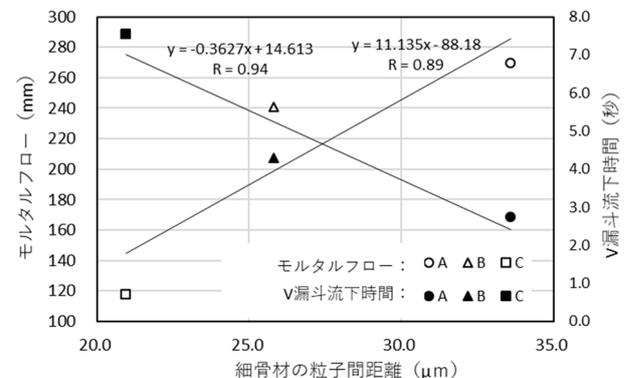


図-5 細骨材粒子間距離とモルタルフローおよび V 漏斗流下時間の関係

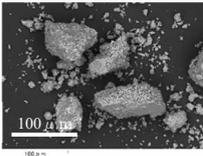
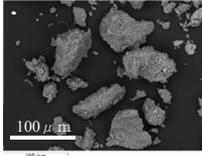
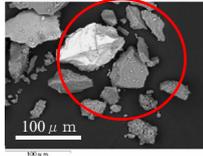
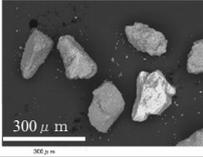
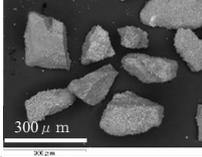
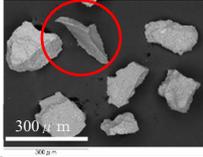
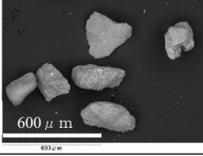
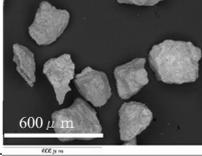
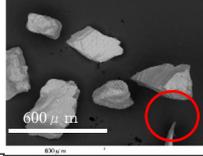
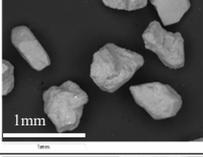
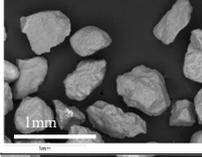
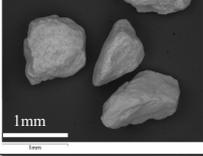
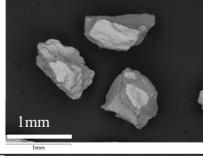
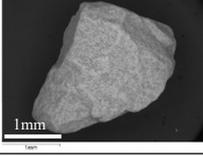
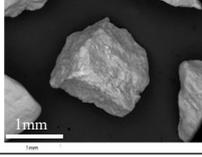
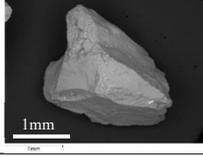
次に、表-3 に示す細骨材の形状に着目し、モルタルのフレッシュ性状に与える影響を分析した。細骨材 A、細骨材 B および細骨材 C の 3 種類を、粒径 0-0.075mm, 0.075-0.15mm, 0.15-0.3mm, 0.3-0.6mm, 0.6-1.2mm, 1.2-5.0mm でふるい分け、それぞれで走査型電子顕微鏡にて細骨材の形状を撮影した。また、画像から見受けられる細骨材の形状の違いを定量的に評価することを目的として、細骨材の 3 種類それぞれの各粒径から 12 試料を抽出し、梁らの次式<sup>9)</sup>により円形度係数を算出した。

$$Cr = \frac{4\pi A}{L^2} \quad (2)$$

ここに、Cr; 円形度係数, A; 骨材画像での平面積 (mm<sup>2</sup>), L; 骨材の周長(mm)を表す。各粒径における細骨材の平均円形度係数, 容積比率, 撮影倍率および画像を表-3 に

示している。画像から、粒径 0-0.075mm の範囲では、細骨材 A の微粒分が比較的多く認められる。これは、石灰砕砂に起因するものと考えられる。また、細骨材 C は、表中の赤丸で示すような鋭利な形状のものが若干多く見受けられた。粒径 0.075-0.15mm, 0.15-0.3mm および 0.3-0.6mm の範囲では、細骨材 A と細骨材 B には顕著な違いは認められないが、細骨材 C には、表中の赤丸で示すような鋭利な形状のものが若干多く見受けられた。粒径 0.6-1.2mm の範囲では、細骨材 C は、細骨材 A および細骨材 B に比べ陰影が多く、表面に細かい凹凸の多いことが認められた。粒径 1.2-5.0mm の範囲では、細骨材 A のみ陰影が若干少なく細骨材表面が滑らかであると考えられた。画像から分かる目視による定性的な評価をまとめると、微粒分は細骨材 A が最も多いが円形の度合いは細骨材 B も同程度であり細骨材 C は鋭利な形状や表面の凹凸が多いものと考えられる。

表-3 細骨材の円形度係数および画像

粒径 (mm)	細骨材 A			細骨材 B			細骨材 C		
	円形度係数	画像	容積比率 %	円形度係数	画像	容積比率 %	円形度係数	画像	容積比率 %
0-0.075 (400 倍)	0.65		9	0.66		11	0.63		8
0.075-0.15 (170 倍)	0.70			0.67			0.67		
0.15-0.3 (100 倍)	0.76		26	0.74		29	0.74		26
0.3-0.6 (50 倍)	0.82		23	0.81		18	0.78		25
0.6-1.2 (40 倍)	0.79		15	0.81		14	0.80		20
1.2-5.0 (35 倍)	0.86		25	0.81		26	0.80		20

次に細骨材の形状を定量評価するため、それぞれの粒径範囲で円形度係数により数値化し比較を行った。例えば、各粒径の中で、容積比率が最も高い粒径 0.15-0.3mm の範囲における円形度係数は、細骨材 A が最も高く、細骨材 B と細骨材 C は同じであった。これは、上述した定性的な判断とは異なっており、円形度係数では細骨材表面の細かい凹凸が評価できていないものと考えられた。しかし、微粒分が多く最もフレッシュ性状への影響が大きいと考えられる<sup>10)</sup>粒径 0-0.075mm や粒径 0.3-0.6mm の範囲における円形度係数は、細骨材 A と細骨材 B は同程度で、細骨材 C が最も低くなっている。また、各粒径の円形度係数を全粒径で平均すると、各細骨材の円形度係数は、細骨材 A=0.76、細骨材 B=0.75、細骨材 C=0.73 (小数点第 3 位を切り捨て) となり、細骨材 A と細骨材 B はほぼ同じであり、細骨材 C のみ少し小さい結果であった。

図-6 に全粒径の平均円形度係数とモルタルフロー、V 漏斗流下時間の関係を示す。ここで、モルタルフローは混和剤の添加率が C×0.8% と同一の場合の値、V 漏斗流下時間はモルタルフローが 210mm 程度の場合の値である。円形度係数とモルタルフロー、V 漏斗流下時間には相関があり、円形度係数が大きいほどモルタルフローが大きく、V 漏斗流下時間が短くなる傾向が確認できた。これは、細骨材の円形度係数が大きくなる、すなわち骨材が円形に近づくことで細骨材の粒子同士が接触した場合の抵抗を小さくできるためと考えられる。以上から、汎用締固め不要コンクリートの流動性および間隙通過性には、細骨材の物理的な特性が影響していることが確認できた。汎用締固め不要コンクリートの汎用性を高めるためには、様々な細骨材に対して配合設計できることが重要である。今後、細骨材 C のような粒子間距離や円形度係数が小さい材料を汎用締固め不要コンクリートに使用することの可否や、使用を可能とするための具体的な手段について、さらなる検討が必要と考えられる。

#### 4. 粗骨材の充填性への影響検討

##### 4.1 検討概要

3 章の検討で最もフレッシュ性状が良好であった細骨

材 A にて、粗骨材の実積率の違いがコンクリートの充填性に与える影響について検討を行った。表-4 に実験要因でもある粗骨材の物性を、表-5 にコンクリートの配合を示す。実験水準は、実積率の異なる粗骨材 2 種類 (以下、実積率 62.7% を G62、59.3% を G59 と表記する) を用いて、粗骨材絶対容積を 20 L/m<sup>3</sup> の単位で増減させ、G62 で 5 水準、G59 で 3 水準とした。このとき、単位水量、単位セメント量を一定として、粗骨材絶対容積の増減に対し細骨材の容積を調整した。また、スランプロワーは 500±25mm、空気量は 4.5±1.5% に調整し、自己充填ランク 2 の U 形容器を用いた高流動コンクリートの充填試験方法 (案) (JSCE-F 511-2011) を実施した。

##### 4.2 結果および考察

コンクリートのフレッシュ性状の試験結果は、スランプロワー、空気量ともに目標範囲内であった。

図-7 にスランプロワー 500mm 程度での単位粗骨材絶対容積と U 形充填高さの関係を示す。最も充填高さが高くなる粗骨材絶対容積は、G62 では 320L/m<sup>3</sup> であるのに対し、G59 では 300L/m<sup>3</sup> であった。充填高さ 300mm 以上を確保する場合、流動性の阻害要因となる粗骨材は、実積率が低いほど絶対容積を減らす必要<sup>11)</sup>があるものの、粗骨材絶対容積を 280 L/m<sup>3</sup> にすると、充填高さが低くな

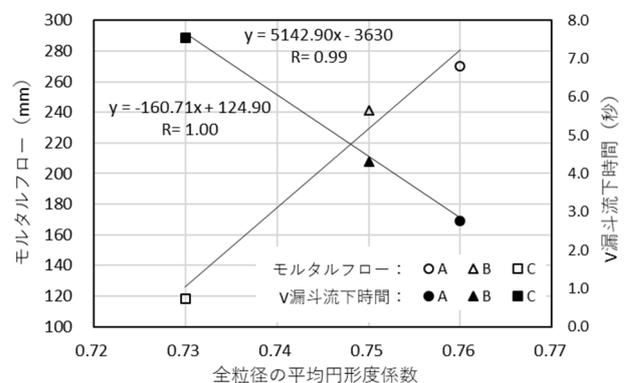


図-6 全粒径の平均円形度係数とモルタルフローおよび V 漏斗流下時間の関係

表-4 粗骨材の物性

記号	摘要
G62	砂岩,表乾密度:2.65 g/cm <sup>3</sup> ,F.M.:6.59,実積率:62.7%
G59	砂岩,表乾密度:2.63 g/cm <sup>3</sup> ,F.M.:6.56,実積率:59.3%

表-5 コンクリートの配合

W/C (%)	スランプロワー (mm)	空気量 (%)	Gvol (L/m <sup>3</sup> )	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )							SP (C×%)
				W	C	S1	S2	S3	G62	G59	
54.7	500±25	4.5±1.5	280	175	320	119	667	267	742	—	1.45
			300	175	320	113	634	254	795	—	1.28
			320	175	320	88	619	240	848	—	1.23
			340	175	320	64	602	227	901	—	1.13
			360	175	320	43	583	214	954	—	1.00
			280	175	320	119	667	267	—	736	1.45
			300	175	320	113	634	254	—	789	1.25
			320	175	320	88	619	240	—	842	1.25

った。これは、モルタルの粘性や細骨材の形状といった物理的な性質が影響しているものと推察された。また、単位水量および単位セメント量を一定としているため、粗骨材絶対容積を減らすことで細骨材量が増え、コンクリートが流動する際にモルタルのせん断抵抗が増加し充填性が低下した可能性も考えられた<sup>11)</sup>。ここで、実積率の影響を考慮するために、単位粗骨材かさ容積と充填高さの関係で整理した結果を図-8に示す。最も充填高さが高くなるものは、G62で510 L/m<sup>3</sup>、G59で506 L/m<sup>3</sup>となった。これは、実積率の異なる粗骨材を用いた場合においても、粗骨材かさ容積を指標とし、510 L/m<sup>3</sup>前後の値とすることで、充填高さが最も高くなる粗骨材絶対容積を設定できる可能性を示唆するものと考えられる。

## 5. まとめ

汎用締固め不要コンクリートの配合設計に関する検討として、骨材特性のフレッシュ性状および充填性への影響について検討を行った。

以下に本検討の範囲で得られた知見を示す。

- 1) 細骨材の種類によっては、モルタル中に含まれるセメントと細骨材中の0.6mm以下の粒子の容積割合V<sub>0.6</sub>の調整を49%としても汎用締固め不要コンクリートとして必要なフレッシュコンクリートの性状が得られない場合がある。
- 2) 汎用締固め不要コンクリートの流動性や間隙通過性に影響を及ぼすものとして細骨材の物理的な特性があり、それは細骨材の粒子間距離や円形度係数により確認できる。
- 3) 細骨材の粒子間距離が大きく、円形度係数が高いもののほど、モルタルフローが大きく、V漏斗流下時間が短くなる。
- 4) 実積率の異なる粗骨材を用いた場合においても、粗骨材かさ容積を指標とし、510 L/m<sup>3</sup>前後の値とすることで、充填高さが最も高くなる粗骨材絶対容積を設定できる可能性が示唆された。

## 参考文献

- 1) 岡村 甫, 前川 宏一, 小澤 一雅: 自己充填性ハイパフォーマンスコンクリートの開発, 土木学会論文誌 No.522/VI-28, 23-26, 1995.9
- 2) 平石 信也, 笠井 芳夫, 飛内 圭之, 長田 浩治: フローイングコンクリートの調査・流動性・強度・耐久性に関する実験研究, 日本建築学会構造系論文誌, 第467号, 9-18, 1995.1
- 3) 松本 修治, 倉田 和英, 柳井 修司, 坂井 吾郎: 生産性向上に資する汎用締固め不要コンクリートの配合設計手法に関する検討, コンクリート工学年

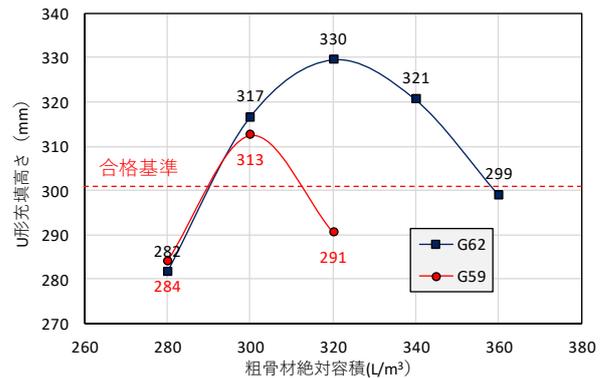


図-7 単位粗骨材絶対容積とU形充填高さの関係

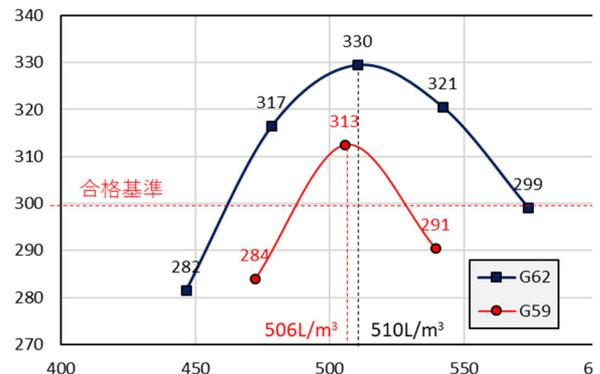


図-8 単位粗骨材かさ容積とU形充填高さの関係

次論文集, Vol.42, No.1, 2020

- 4) 2012年版高流動コンクリートの配合設計・施工指針, 土木学会, 2012.6
- 5) 綾野克紀: 中国・四国地方の骨材事情, コンクリート工学, Vol.46, No.5, 2008.5
- 6) 小澤 一雅, 松尾 茂美, 下川 浩児, 岡村 甫: モルタル試験による自己充填コンクリートに用いる高性能減水剤の評価, セメント・コンクリート論文誌, No.48, p.p.346-351, 1994
- 7) 枝松 良展, 山口 昇三, 岡村 甫: モルタルフローにおける粉体と細骨材の役割と境界, 土木学会論文誌, No.571, V-36, p.p.131-147, 1997.8
- 8) 高田和法: 超高流動コンクリートの充填性予測, 東京大学修士論文, p.p.27-29.1992
- 9) 梁 俊, 宇治 公隆, 國府勝郎, 上野 敦: 粗骨材の実積率がフレッシュコンクリートの締固め性に与える影響: コンクリート工学論文誌, 第16巻, 第3号, 2005.9
- 10) 大西 利勝, 井上 正一, 黒田 保: 微粒分が多い石灰石骨材を用いたコンクリートの配合と物性, コンクリート工学年次論文誌, Vol.33, No.1, 2011
- 11) 大内 雅博: 高流動コンクリートモルタル中の固体粒子間摩擦を緩和して骨材量を確保する技術の変遷, コンクリート工学, Vol.54, No.5, 2016.5

