

## 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

## Mix Design Method for Self-compacting-Concrete that Contributes to Productivity Improvement

松本 修治      六本木 日菜子      水野 浩平      荒川 遥  
橋本 学      渡邊 賢三      柳井 修司      坂井 吾郎

## 要 約

コンクリート躯体工における生産性向上の手段として高流動コンクリートの適用が考えられるが、石灰石微粉末や増粘剤といった使用材料の種類が増えることからコストや製造の複雑さが課題となり、一般的な RC 構造物にはほとんど適用されていないのが実状である。これらの課題に対し、筆者らは、安価でかつ汎用性の高い締固め不要コンクリートの開発を進めている。本稿では、この締固め不要コンクリートに関し、モルタル中に含まれる 0.6mm 以下の粒子の容積割合と単位粗骨材絶対容積が、充填性をはじめとするフレッシュコンクリートの性状に与える影響について明らかにした。

## 目 次

- I. はじめに
- II. 汎用締固め不要コンクリートの基本的な考え方
- III. 細骨材微粒分の影響
- IV. 単位粗骨材絶対容積の影響
- V. 骨材形状および粒子間距離による考察
- VI. まとめ

## I. はじめに

近年、建設工事における問題点として、依然として改善しない生産性や、技能労働者の高齢化・離職に伴う労働力不足が挙げられている。これらに対応するために、国土交通省により i-Construction が提唱され、推進されている。そのうち、コンクリート工における取組みの一つとして、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。

また、2019年に改正された JISA 5308 においては、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、新たに生産性向上に寄与するスランプフロー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たコンクリートの普及が推し進められている。ただし、これらのコンクリートは、バイブレータによる振動締固めを行うことを前提としており、さらなる生産性向上を図っていくためには、将来的に締固め作業の排除、すなわち自己充填性を有し、締固めを必要としないコンクリートのさらなる活用が最も効果的である。

コンクリートの締固め不要を実現する技術としては、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>をはじめとして、多くの研究開発がなされ、筆者らも併用系高流動コンクリート「NV コンクリート」を実用化し多くの現場に適用してきた<sup>3)</sup>。これらは、自己充填性を有する「高流動コンクリート」の範疇に位置づけられるが、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量を増加させる場合が多く、大幅なコストの上昇を伴う。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、特殊な施工条件のもとで限定的に適用される場合が多く、一般的な構造条件・施工条件の鉄筋コンクリート構造物（以降、RC 構造物と称す）への展開はほとんど実現していないのが現状である。

こうした状況を踏まえ、筆者らは、締固めが不要で、一般的な RC 構造物の生産性向上に資する安価なコンクリート（以降、汎用締固め不要コンクリートと称す）の検討を行っている<sup>4)</sup>。本稿では、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の一環として、モルタル中に含まれる 0.6mm 以下の粒子の容積割合<sup>5)</sup>（以降、 $V_{0.6}/V_m$  と記す）と単位粗骨材絶対容積（以降、 $G_{vol}$  と記す）が、充填性をはじめとするフレッシュコンクリートの性状に与える影響について検討した結果を述べる。

## II. 汎用締固め不要コンクリートの基本的な考え方

## 1. 配合条件の整理

汎用締固め不要コンクリートは、一般的な RC 構造物を適用の対象としている。一般的な RC 構造物とは、土木学会の

**キーワード**：汎用締固め不要コンクリート、配合設計手法、細骨材、粒度分布、単位粗骨材絶対容積

**Keywords** : self-compacting concrete, mix design method, fine aggregate, particle size distribution, absolute volume of coarse aggregate

「高流動コンクリートの配合設計・施工指針」<sup>6)</sup> (以降、指針と称す) によれば、(1)最小鋼材あきが 60~200mm 程度、鋼材量の目安が 100~350 kg/m<sup>3</sup> 程度とされている。汎用締固め不要コンクリートの配合とその性能を考える上での構造条件は、これに準ずるものとした。施工条件としては、一般的な普通コンクリートを用いる施工と同様に、ポンプの筒先を移動させて、コンクリートを間配することを前提とし、(2)打込みの間隔は土木学会コンクリート標準示方書[施工編]<sup>7)</sup> (以降、示方書と称す) の施工標準で示される 3.0m 程度以下とした。また、広く普及させるためには、市中の一般的なレディーミクストコンクリート工場で容易に製造できることが重要であることから、特殊な材料は使用せず、(3)水、セメント (普通ポルトランドセメント、高炉セメント B 種など)、細骨材、粗骨材、高性能 AE 減水剤および空気量調整剤によって構成されることを配合設計上の条件とした。

### 2. フレッシュコンクリートの目標性能

前述の構造条件より、U 形容器での充填高さ (以降、U 形充填高さとして記す) は、指針に従い、最小鋼材あきが 35mm となるように異形棒鋼 D13 を 3 本配置した障害 R2 において 300mm 以上をフレッシュコンクリートの目標性能として設定した。また、指針には、これに付随する目標値としてスランプフロー、500mm フロー到達時間 (以降、SF<sub>500</sub> と称す) および V<sub>75</sub> 漏斗流下時間 (以降、V 漏斗と称す) の目標値が示されている。このうちスランプフローについては、前述の施工条件、すなわち水平方向の流動距離を期待しないことを勘案すると、締固めを行うことなく自己充填を実現できる最低限のものであればよいと考えられる。そこで、本検討では、スランプフローの目標値を 500~600mm とした。SF<sub>500</sub> および V 漏斗の目標値は、指針に従い、ランク 2 相当の 3~15 秒、7~13 秒とした。

### 3. 各材料の単位量の設定と配合設計上の課題

単位水量は、高流動コンクリートや一般に中流動コンクリートと称されるスランプフロー 400~600mm 程度のコンクリートにおける実績を勘案して 175 kg/m<sup>3</sup> に設定した。

単位セメント量は、温度ひび割れに対するリスク低減のため、締固め不要を実現できる範囲で、できるだけ小さくする必要がありと考えられる。耐久性が求められる一般的な RC 構造物の水セメント比 (以降、W/C と記す) は、50~55% 程度であることから、上述の単位水量を踏まえ、単位セメント量は 350 kg/m<sup>3</sup> 以下とした。

単位細骨材量は、セメント以外の粉体を用いない汎用締固め不要コンクリートにおいて、材料分離抵抗性を確保するための重要な要素である。特に、単位セメント量を 350 kg/m<sup>3</sup> 以下とすることにより不足する材料分離抵抗性を補う意味で、細骨材中の微粒分量が配合設計を行う上で重要な因子となる。

単位粗骨材量は、間隙通過性や充填性に大きな影響を及ぼす。一方で、流動性や耐久性の観点から単位水量および単位セメント量が決まったとき、前述の構成材料の条件から、粗骨材量の増減は材料分離抵抗性に寄与する細骨材量の増減

を意味する。そこで粗骨材量は、間隙通過性や充填性の観点のみならず、細骨材中に含まれる微粒分量と粗骨材の絶対容積に着目して定めることとした。以降、その検討の内容及び結果について述べる。

## III. 細骨材微粒分量の影響

### 1. 概要

汎用締固め不要コンクリートは、スランプフロー 500~600mm であるのに対し、単位セメント量 350 kg/m<sup>3</sup> 以下の条件としたため、粉体量が不足するものと考えられる<sup>5)</sup>。しかし、本検討では使用材料の種類を増やさないことから、増粘剤等を用いないことを前提としている。そこで、対策として、単位粉体量だけでは不足する材料分離抵抗性を細骨材中の微粒分量の増加で補うことを考えた。その方法として、モルタル容積中におけるセメントの容積と V<sub>0.6</sub>/V<sub>m</sub> に着目し、これを配合要因として調整することとした。

本実験では、Table 1 に示す材料 A、B および C を用いて、細骨材の混合比率から微粒分量を調整することで、V<sub>0.6</sub>/V<sub>m</sub> を材料 A では 41~51%、材料 B では 41~56%、材料 C では 44~51% の範囲で変化させて、練混ぜに供した。V<sub>0.6</sub>/V<sub>m</sub> がコ

Table 1 コンクリートの材料 (Concrete Material)

種別	材料名	記号	摘 用
共通	水	W	上水道水
	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:3340cm <sup>2</sup> /g
材料 A	細骨材	S1	砕砂、表乾密度:2.64 g/cm <sup>3</sup> 、吸水率:1.16%、粗粒率:2.97
		S2	山砂、表乾密度:2.57g/cm <sup>3</sup> 、吸水率:2.24%、粗粒率:1.95
		S3	石灰砕砂、表乾密度:2.65 g/cm <sup>3</sup> 、吸水率:1.39%、粗粒率:2.97
	粗骨材	G1	碎石、表乾密度:2.66 g/cm <sup>3</sup> 、粗粒率:6.65、実積率:63.5%
	混和剤	SP1	高性能 AE 減水剤、ポリカルボン酸化合物
		Ad1	AE 剤、樹脂酸塩系界面活性剤
材料 B	細骨材	S4	砕砂、表乾密度:2.58g/cm <sup>3</sup> 、粗粒率:3.04、吸水率:2.52%、微粒分量:0.9%
		S5	石灰砕砂、表乾密度:2.67g/cm <sup>3</sup> 、粗粒率:3.59、吸水率:1.05%
		S6	山砂、表乾密度:2.58g/cm <sup>3</sup> 、粗粒率:1.60、吸水率:1.15%
	粗骨材	G2	混合碎石 2005 (硬質砂岩と石灰石)、表乾密度:2.65g/cm <sup>3</sup> 、実積率:62.9%
	混和剤	SP2	高性能 AE 減水剤、ポリカルボン酸エーテル化合物と増粘性高分子化合物とブリーディング低減成分の複合体
		Ad2	AE 剤、変性ポリリン酸化合物系陰イオン界面活性剤
材料 C	細骨材	S7	砕砂、表乾密度:2.63 g/cm <sup>3</sup> 、粗粒率:3.06
		S8	山砂、表乾密度:2.60 g/cm <sup>3</sup> 、粗粒率:1.66
	粗骨材	G3	碎石 2005、表乾密度:2.64 g/cm <sup>3</sup> 、実積率:62.0%
	混和剤	SP3	高性能 AE 減水剤、ポリカルボン酸化合物
Ad3		AE 剤、樹脂酸塩系界面活性剤	

Table 2 材料 A でのコンクリートの配合  
(Concrete Mix Proportions of Concrete using Material A)

種別	実験ケース	S.F. (mm)	W/C (%)	s/a (%)	Air (%)	G <sub>vol</sub> (L/m <sup>3</sup> )	V <sub>0.6</sub> /Vm (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					SP1 (C×%)	
								W	C	S1	S2	S3		G1
材料 A	No.1	550 ±50	54.7	51.3	4.5	330	41	175	320	347	246	319	878	1.00
	No.2						43			274	319	319		1.00
	No.3						45			209	382	318		1.10
	No.4						47			136	454	318		1.15
	No.5						49			54	534	317		1.15
	No.6						51			0	588	317		1.20

Table 3 材料 B でのコンクリートの配合  
(Concrete Mix Proportions of Concrete using Material B)

種別	実験ケース	S.F. (mm)	W/C (%)	s/a (%)	Air (%)	G <sub>vol</sub> (L/m <sup>3</sup> )	V <sub>0.6</sub> /Vm (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					SP2 (C×%)	
								W	C	S4	S5	S6		G2
材料 B	No.7	550 ±50	58.3	51.8	4.5	330	41	175	300	356	331	240	875	1.60
	No.8						43			457	189	276		1.70
	No.9						45			393	189	340		1.80
	No.10						47			356	189	377		1.90
	No.11						49			294	189	439		1.90
	No.12						51			80	331	516		2.10
	No.13						56			0	284	641		2.20

Table 4 材料 C でのコンクリートの配合  
(Concrete Mix Proportions of Concrete using Material C)

種別	実験ケース	S.F. (mm)	W/C (%)	s/a (%)	Air (%)	G <sub>vol</sub> (L/m <sup>3</sup> )	V <sub>0.6</sub> /Vm (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				SP3 (C×%)	
								W	C	S7	S8		G3
材料 C	No.14	550 ±50	53.0	51.1	4.5	330	44	175	330	696	208	872	1.25
	No.15						46			633	271		1.25
	No.16						47			588	316		1.45
	No.17						48			533	371		1.48
	No.18						49			497	407		1.65
	No.19						51			432	468		1.75

ンクリートの自己充填性に及ぼす影響を確認するため、指針に準じた各種試験を実施した。

2. 使用材料およびコンクリートの配合

Table 1 に使用材料を示す。水とセメントの共通材料と市中のレディーミクストコンクリート工場で使用されている材料 A に加え、水セメント比や骨材などの条件が異なる場合を確認するために、材料 B、材料 C を用いた。セメントは、普通ポルトランドセメント、細骨材は、いずれも粒度分布の異なる 2 種類以上を混合して用いた。粗骨材については、材料 A と材料 C は硬質砂岩系の砕石、材料 B は石灰砕石と硬質砂岩系の砕石を混合したものを用いた。混和剤は、いずれもポリカルボン酸化合物を主成分とする高性能 AE 減水剤を用いた。

Table 2 に材料 A でのコンクリートの配合を示す。目標スランプフローを 550±50mm、目標空気量を 4.5±1.5% とし、水セメント比 55% 程度になるように単位水量を 175 kg/m<sup>3</sup>、単位セメント量を 320 kg/m<sup>3</sup> とした。G<sub>vol</sub> は、指針における自己充填性ランク 2 における標準値を参考に 330 L/m<sup>3</sup> とした。また、V<sub>0.6</sub>/Vm を変化させるため、3 種類の細骨材の混合比率を調整した。石灰砕砂の混合率を一定とし、砕砂と山砂の比率を調整して、V<sub>0.6</sub>/Vm を 41、45、47、49 および 51% の 5 水準で検討を行った。

Table 3 に材料 B でのコンクリートの配合を示す。単位セメント量 350kg/m<sup>3</sup> 以下の範囲で、材料 B において U 形充填

Table 5 試験項目  
(Test Items)

試験項目	試験方法	目標値
スランプフロー(SF)	JIS A 1150	550±50 mm
500mm フロー到達時間(SF <sub>500</sub> )	同上	3~15 秒
空気量(Air)	JIS A 1128	4.5±1.5%
U 形充填高さ	JSCE-F 511 障害ランク 2	300 mm 以上
V <sub>75</sub> 漏斗流下時間 (V 漏斗)	JSCE-F 512	7~13 秒

高さ 300mm を満足するために最低限必要と考えられる単位セメント量として 300 kg/m<sup>3</sup> とし、V<sub>0.6</sub>/Vm を 41、43、45、47、49、51 および 56% の 7 水準で検討を行った。

Table 4 に材料 C でのコンクリートの配合を示す。材料 B を用いた場合と同じ思想で、単位セメント量を 330 kg/m<sup>3</sup> とし、V<sub>0.6</sub>/Vm を 44、46、47、48、49 および 51% の 6 水準で検討を行った。

3. 試験方法および試験項目

コンクリートの練混ぜは、二軸強制練りミキサを使用し、1 バッチあたりの練混ぜ量を 50L として行った。粗骨材、細骨材、セメントを投入後に空練り 15 秒を行った後、混和剤を混入した水を投入し、90 秒間練り混ぜた。その後、5 分間静置させた後、再度 60 秒間練り混ぜた。試験項目は、指針に準じた Table 5 に示すとおりである。

4. 試験結果および考察

Table 6 にスランブフローと空気量の試験結果を示す。各ケースともスランブフローおよび空気量の目標値を満足するものであった。

Table 7 に No.1 (材料 A,  $V_{0.6}/V_m$  : 41%), No.5 (同 49%) および No.6 (同 51%) の配合におけるスランブフローの外観を示す。 $V_{0.6}/V_m$  が 41%の配合におけるスランブフローの形状は、円形が崩れており、粗骨材の偏りが確認でき、材料分離抵抗性に劣るものであった。一方で、 $V_{0.6}/V_m$  が 49%および 51%の配合のスランブフローは、形状が円形に近く、流動先端に水やペーストなどの材料分離の傾向は認められなかった。また、粗骨材が偏ることなく端部まで移動していることが目視により確認された。ただし、 $V_{0.6}/V_m$  が 51%のケースは流動する際、 $V_{0.6}/V_m$  が 49%と比べ、止まっては動くを繰り返す不規則な動きで  $SF_{500}$  が比較的長くなる状態であった。

Fig.1 に  $V_{0.6}/V_m$  と U 形充填高さの関係を示す。本実験の範囲では、いずれの材料においても  $V_{0.6}/V_m$  が 47~51%付近の配合において、指針の自己充填性ランク 2 の目標値の目安である U 形充填高さ 300mm を上回り、材料 A, C では 49%, 材料 B では 51%のとき、U 形充填高さが最も高くなった。これは、 $V_{0.6}/V_m$  49%を下回る領域において、0.6mm 以下の細骨材を増加させることでコンクリートの粘性が増加して材料分離抵抗性が大きくなり、結果として自己充填性が向上したものと推察される。一方で、 $V_{0.6}/V_m$  49%を越えて 0.6mm 以下の細骨材を増加させると、細骨材中の細かい粒子同士の干渉が大きくなり、充填性が低下する傾向があるものと考えられる。特に、材料 C は 0.6mm 以下の細骨材を増加させた際の充填性の低下傾向が著しい結果であった。

Fig.2 に  $V_{0.6}/V_m$  と V 漏斗の関係を示す。 $V_{0.6}/V_m$  49%を下回る領域において、いずれの材料においても  $V_{0.6}/V_m$  が大きくなるほど V 漏斗は短くなった。これは、U 形充填高さの考察と同様に、 $V_{0.6}/V_m$  が大きくなるほどコンクリートの粘性が付与され、粗骨材の干渉が緩和されたものと考えられる。一方、 $V_{0.6}/V_m$  が 49%を越えて大きくなると V 漏斗は、同程度か長くなる傾向が確認された。その傾向は、 $V_{0.6}/V_m$  49%を

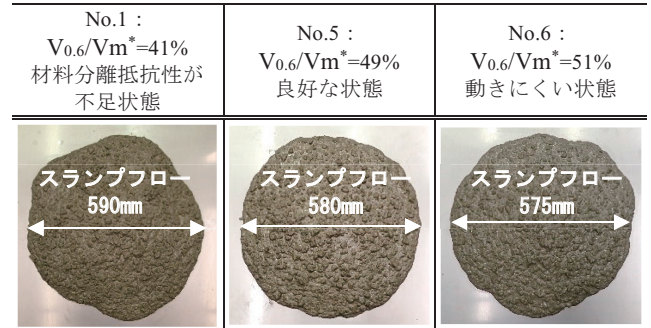
越えて 0.6mm 以下の細骨材を増加させると、間隙通過時の細骨材の粒子同士の干渉が大きくなり、V 漏斗を指標とした間隙通過性が低下する傾向があるものと考えられる。また、その低下傾向は U 形充填高さの結果と同様に材料 C におい

Table 6  $V_{0.6}/V_m$ に関する試験結果  
(Test Results for  $V_{0.6}/V_m$ )

種別	実験ケース	$V_{0.6}/V_m^*$ (%)	SF (mm)	$SF_{500}$ (s)	Air (%)
材料 A	No.1	41	590	3.7	6.0
	No.2	43	580	3.4	5.6
	No.3	45	585	3.2	5.6
	No.4	47	600	3.5	3.0
	No.5	49	580	3.0	4.2
	No.6	51	575	4.2	5.0
材料 B	No.7	41	595	5.5	5.2
	No.8	43	555	7.6	4.9
	No.9	45	570	6.0	5.0
	No.10	47	600	4.3	4.2
	No.11	49	585	4.2	4.8
	No.12	51	550	6.1	5.5
材料 C	No.13	56	580	6.3	4.5
	No.14	44	510	10.7	5.0
	No.15	46	550	5.2	3.6
	No.16	47	565	5.5	5.9
	No.17	48	600	7.3	3.1
	No.18	49	575	6.2	4.8
	No.19	51	565	6.8	3.8

\* : モルタル中の 0.6mm 以下の粒子の容積割合

Table 7 スランブフローの外観性状  
(Appearance of Sump Flow)



\*モルタル中の 0.6mm 以下の粒子の容積割合

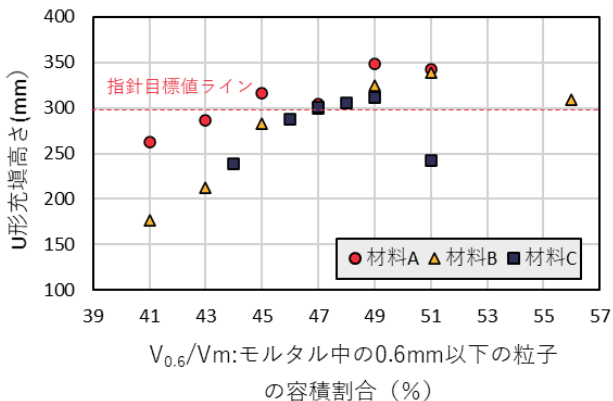


Fig.1  $V_{0.6}/V_m$  と U 形充填高さの関係  
(Relationship between  $V_{0.6}/V_m$  and U-shaped Filling Height)

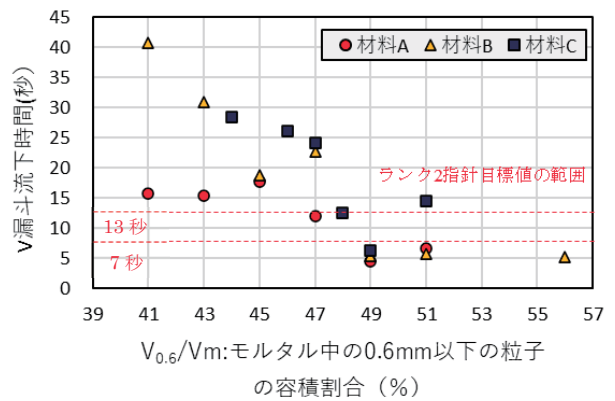


Fig.2  $V_{0.6}/V_m$  と  $V_{75}$  漏斗流下時間の関係  
(Relationship between  $V_{0.6}/V_m$  and Flow Time of V Funnel)

て顕著であった。これらの理由については V 章にて詳述する。

$V_{0.6}/V_m$  が 49% 付近の V 漏斗は、指針の自己充填性ランク 2 の目標値の下限である 7 秒を下回る結果であった。これは、既存の高流動コンクリートより粘性が小さいためと考えられるが、目視評価において材料分離は生じていないこと、ここでは示していないが V 漏斗の自己充填性ランク 3 における目標値の下限である 4 秒については満足していることなどから、汎用締固め不要コンクリートとして問題ないものであると考えられる。以上から、単位セメント量を  $350 \text{ kg/m}^3$  以下という条件においても、 $V_{0.6}/V_m$  を適切に設定することで、自己充填性ランク 2~3 相当の締固め不要コンクリートを製造できることが分かった。

#### IV. 単位粗骨材絶対容積の影響

##### 1. 概要

III 章に示した結果を踏まえ、良好なフレッシュコンクリートの性状であった  $V_{0.6}/V_m$  が 47~51% 程度の範囲のうち、 $V_{0.6}/V_m$  を 49% に固定し、 $G_{vol}$  を変化させ、自己充填性に及ぼす影響を確認するための試し練りを実施した。なお、試験項目は室内検討 1 と同様である。

##### 2. 使用材料およびコンクリートの配合

使用材料は、III 章と同じものとした。材料 A、B および C を用いたそれぞれのコンクリートの配合は、Table 2、Table 3 および Table 4 に示す  $V_{0.6}/V_m$  が 49% で  $G_{vol}$  が  $330 \text{ L/m}^3$  の No.5、No.11 および No.18 の配合を基準に、 $V_{0.6}/V_m$  を 49% 一定として、 $G_{vol}$  を変化させ、その増減を細骨材の容積で調整した。なお、 $G_{vol}$  を材料 A は  $260\sim 350 \text{ L/m}^3$  の範囲で 6 水準、材料 B は  $300\sim 350 \text{ L/m}^3$  の範囲で 4 水準、材料 C は  $310\sim 350 \text{ L/m}^3$  の範囲で 5 水準として検討を行った。

##### 3. 試験結果および考察

Table 8 にスランプフローと空気量の試験結果を示す。スランプフローおよび空気量は、目標値となるように混和剤量で調整した。

Fig.3 に  $G_{vol}$  と U 形充填高さの関係を示す。材料 A は全てのケースで、材料 B は  $G_{vol} 350 \text{ L/m}^3$  を除いた全てのケースで有意な差はなく指針の自己充填性ランク 2 の目標値である充填高さ 300mm を満足する結果であった。一方で、材料 C は、U 形充填高さ  $G_{vol}$  の関係が凸状の傾向を示し、300mm を満足するものは  $320 \text{ L/m}^3$  と  $330 \text{ L/m}^3$  だけであった。これは、 $G_{vol} 310\sim 350 \text{ L/m}^3$  の範囲において、 $G_{vol}$  を減じて細骨材容積を増加させる際、材料 C の骨材形状などの特徴によってコンクリートが流動する際にモルタル中の細骨材粒子の衝突や干渉の影響が大きくなり、充填性が低下したものと推察される<sup>8)</sup>。さらに、流動性を確保するために高性能 AE 減水剤の使用量を増やしたことで分離傾向を示し細骨材粒子の衝突や干渉が助長されたものと推察される。一方、 $G_{vol}$  を増加させると粗骨材粒子同士の衝突や相互干渉が大きくなったことが影響し、これらの骨材同士の干渉の程度も粗骨材の種類が影響していることが考えられる。いずれの材料に

Table 8 単位粗骨材絶対容積に関する試験結果  
(Test Results on Absolute Volume of Coarse Aggregate)

種別	実験ケース	$G_{vol}$ ( $\text{L/m}^3$ )	SF (mm)	SF <sub>500</sub> (s)	Air (%)
材料 A	No.5*	330	580	3.0	4.2
	No.20	260	575	5.8	4.6
	No.21	280	590	5.2	4.1
	No.22	300	550	3.8	5.0
	No.23	340	580	2.1	5.9
材料 B	No.11*	330	600	3.8	4.0
	No.25	300	560	6.2	4.1
	No.26	315	560	5.3	4.5
	No.27	350	575	3.7	3.5
材料 C	No.18*	330	575	6.2	4.8
	No.28	310	570	9.8	3.0
	No.29	320	550	5.5	5.0
	No.30	340	545	5.8	5.1
	No.31	350	510	4.2	3.5

\* : Table 6 中のデータを共有

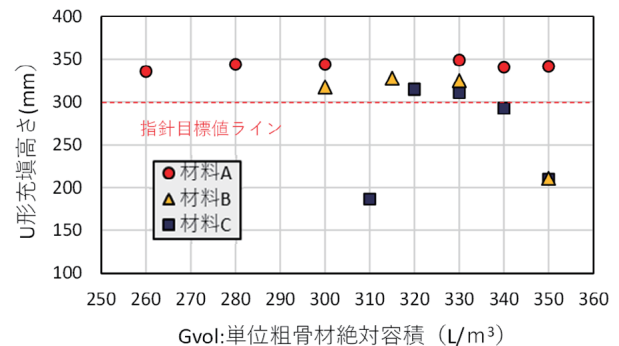


Fig.3 単位粗骨材絶対容積と U 形充填高さの関係  
(Relationship between Coarse Aggregate Volume and U-shaped Filling Height)

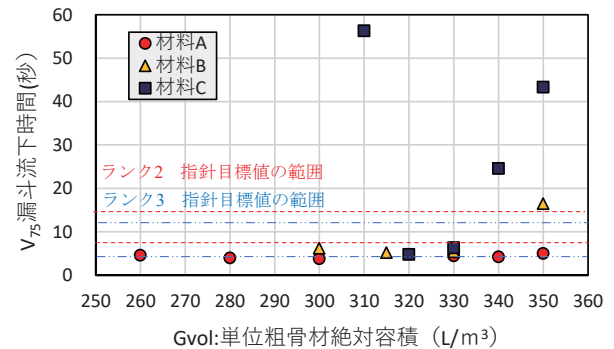


Fig.4 単位粗骨材絶対容積と  $V_{75}$  漏斗流下時間の関係  
(Relationship between Absolute Volume of coarse Aggregate and Flow Time of V Funnel)

においても、 $V_{0.6}/V_m$  と  $G_{vol}$  を適切に設定することで、指針に定める U 形充填高さの目標値を確実に満足できることが分かった。

Fig.4 に  $G_{vol}$  と V 漏斗の関係を示す。U 形充填高さの結果と同じ傾向を示し、材料 A は全てのケースで、材料 B は  $G_{vol} 350 \text{ L/m}^3$  を除いた全てのケースで、 $G_{vol}$  に関わらず指針の自己充填性ランク 2 の V 漏斗における目標値の目安の下限である 7 秒を下回る結果であった。一方、材料 C では  $G_{vol} 320 \text{ L/m}^3$  と  $330 \text{ L/m}^3$  のみで 7 秒を下回る結果であり、U 形充填

高さが高いもののV漏斗が短くなる傾向を示した。V漏斗が7秒を下回ることに関しては、前述のとおりコンクリートの目標性能や性状を鑑みれば問題ないものであると考えられる。

Fig.5にGvolとSF<sub>500</sub>の関係を示す。いずれの材料もGvolが増加に伴ってSF<sub>500</sub>は短くなる傾向であった。これは、粗骨材が増えることで、細骨材が減ると同時に、細骨材中の0.6mm以下の粒子も減り、粘性が小さくなり流動の速度が大きくなったためと考えられる。

以上から、本実験の範囲では、適切なGvolを選定するにあたり、材料CのようにV<sub>0.6</sub>/V<sub>m</sub>やGvolの変化に対しU形充填高さやV漏斗の結果の変動が明確に生じる材料と材料A、Bのように、そうでないものがある結果であった。フレッシュコンクリートの性状に対する全ての目標値を満たすものの中で、弾性係数などの硬化物性を考慮すると、最も単位粗骨材量が多くなるGvol 330 L/m<sup>3</sup>が適切であると判断した。

V. 骨材形状および粒子間距離による考察

1. 骨材形状

本検討におけるフレッシュコンクリートの性状は、材料Aと材料Bは概ね同程度で、材料CのみV<sub>0.6</sub>/V<sub>m</sub>とGvolの変化に対してU形充填高さやV漏斗の結果の変化が大きい傾向を示した。そこで、それら結果で示される材料の相違がフレッシュコンクリートの性状に与えた影響に関して、骨材形状に着目して各種分析を行った。材料A、Cの2種類において、細骨材は、粒径0-0.075, 0.075-0.15, 0.15-0.3, 0.3-0.6, 0.6-1.2, および1.2-5.0mmでふり分け、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、粗骨材は、デジタルカメラで写真撮影を行った。さらに、撮影した骨材の画像から見受けられる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、細骨材はそれぞれの各粒径から12試料を抽出し、粗骨材は最大粒径10~20mm程度の5試料を抽出して梁らの次式<sup>9)</sup>により円形度係数を算出した。

$$Cr = \frac{4\pi A}{L^2} \quad (1)$$

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。

Table 9に材料A、Cの代表的な粒径における細骨材の画像、平均円形度係数および撮影倍率を示す。画像から分かる目視による定性的な評価として、粒径0-0.075mmの範囲では、材料Cに比べ材料Aの微粒分が多く認められる。これは、材料Aの石灰砕砂に起因するものと考えられる。粒径0.15-0.3, 0.3-0.6mmの範囲では、材料Aに比べ材料Cは表中の赤丸で示すような扁平な形状のものが若干多く見受けられた。この傾向は、表中に示していないものの、0.075-0.15mmおよび0.6-1.2mmの範囲においても同様の傾向が確認された。粒径1.2-5.0mmの範囲では、材料Cは材料Aに比べ陰影が多

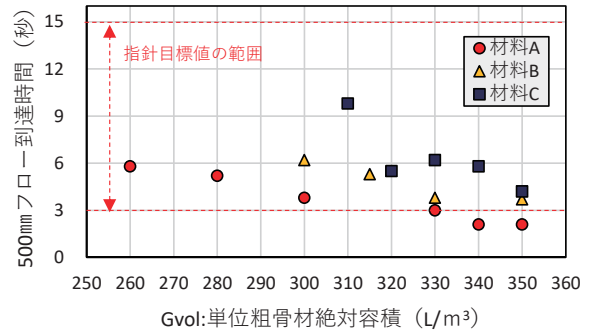


Fig.5 単位粗骨材絶対容積と500mmフロー到達時間の関係

(Relationship between Coarse Aggregate Volume and 500mm Flow Arrival Time)

く表面に細かい凹凸の多いことが認められた。一方で、材料

Table 9 材料A、Cの各粒径における細骨材のSEM画像、粗骨材の写真および円形度係数

(SEM images of Fine Aggregates, Photographs of Coarse Aggregates and Circularity Coefficient at Each Particle Size of Materials A and C)

粒径 (mm)	材料A		材料C	
	円形度係数	画像	円形度係数	画像
0-0.075	0.65		0.66	
0.15-0.3	0.76		0.74	
0.3-0.6	0.82		0.78	
1.2-5.0	0.86		0.8	
5-20	0.80		0.77	

Aは円に近い形状であり、細骨材の表面は滑らかである。一方、円形度係数は、いずれの材料においても各粒径の中で、容積比率が最も高かった粒径0.15-0.3, 0.3-0.6mmの範囲で、材料Aに比べ材料Cが小さくなっている。また、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粒径0-0.075mm<sup>10)</sup>の範囲においても同様であった。これは、前述した定性的な判断と同様の結果である。さらに、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、材料 A は 0.76、材料 C は 0.73 (小数点第 3 位を切り捨て) となり、平均においても材料 A に比べ材料 C は、0.03 小さかった。

粗骨材の目視による定性的な評価では材料 C は扁平な粗骨材が多く見受けられるのに対し、材料 A は比較的円形に近いものが多くあった。粗骨材の円形度係数は、材料 A は 0.80、材料 C は 0.77 となり、細骨材の平均円形度係数と同様に材料 A に比べ材料 C は 0.03 小さい結果であった。粗骨材の実積率は材料 A で 63.5%、材料 C は 62.4%であることから、粗骨材の形状は、円形度係数および実積率として表せているものと考えられる。

これらの分析結果から、III章、IV章での U 形充填高さや V 漏斗などのフレッシュコンクリートの性状が  $V_{0.6}/V_m$  や  $G_{vol}$  の変化に伴って大きく変化し、目標性能を満足する範囲が狭い材料 C のようなものは、骨材の円形度係数が小さいものであることが分かった。円形度係数が小さい、すなわち骨材が扁平に近いことで細骨材の粒子同士が接触した場合の抵抗が大きくなっているものと考えられる。

2. 細骨材の粒子間距離

骨材形状の分析結果から、骨材同士の干渉の程度が U 形充填高さおよび V 漏斗などのフレッシュコンクリートの性状に影響しているものと考え、細骨材の粒子間距離に着目し分析を行った。材料 A、材料 B および材料 C のいずれの材料においても指針の U 形充填高さ 300mm より高くなった  $V_{0.6}/V_m$  が 49%の配合において、枝松らの次式<sup>11)</sup>で細骨材の粒子間距離を算出した。この細骨材の粒子間距離の定義は「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>12)</sup>。

$$t = \left\{ \left( \frac{Slim}{100 \cdot (V_s/V_m)} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right\} \cdot d \quad (2)$$

ここに、 $t$ ；細骨材の粒子間距離 ( $\mu\text{m}$ )、 $d$ ；細骨材の平均粒径 ( $\mu\text{m}$ )、 $Slim$ ；細骨材の実積率 (%)、 $V_s/V_m$ ；モルタル中の細骨材容積比を表す。 $V_{0.6}/V_m$  が 49%の配合における各細骨材の平均粒径  $d$  は通過質量百分率が 50%となる粒径で、材料 A は 482 $\mu\text{m}$ 、材料 B は 493 $\mu\text{m}$ 、材料 C は 453 $\mu\text{m}$  である。また、各材料の  $V_{0.6}/V_m$  が 49%のときの実積率は、材料 A 66.7%、材料 B 67.1%、材料 C 64.4%であった。

Fig.6、Fig.7 にそれぞれ各材料 ( $V_{0.6}/V_m=49\%$ 、 $G_{vol}=330\text{L}/\text{m}^3$ ) における細骨材の粒子間距離と U 形充填高さおよび V 漏斗との関係を示す。各材料における細骨材の粒子間距離  $t$  を算出すると、材料 A は 29.7 $\mu\text{m}$ 、材料 B は 28.1 $\mu\text{m}$  と同程度にあるのに対し材料 C は 23.7 $\mu\text{m}$  と小さいことが分かった。また、図から本検討の範囲では、細骨材の粒子間距離が大きいものほど U 形充填高さが高くなり、V 漏斗は短くなっ

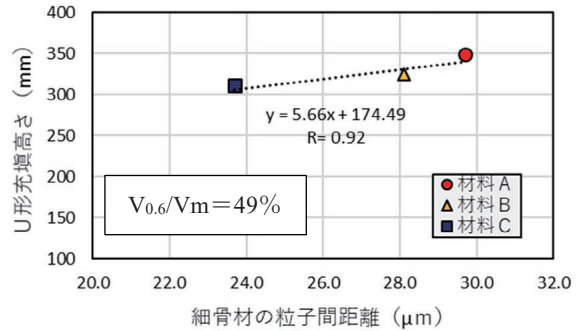


Fig.6 細骨材の粒子間距離と U 形充填高さの関係 (Relationship between Interparticle Distance of Fine Aggregate and U-shaped Filling Height)

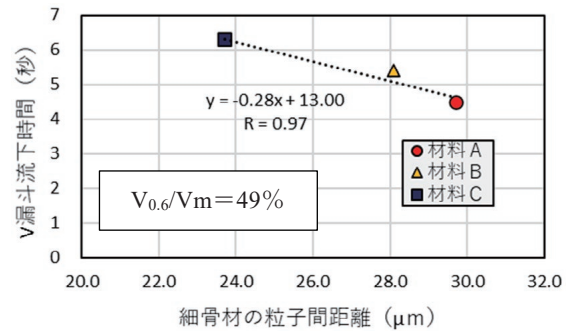


Fig.7 細骨材の粒子間距離と V 漏斗流下時間の関係 (Relationship between Interparticle Distance of Fine Aggregate and V Funnel)

た。U 形充填高さや V 漏斗などで評価されるフレッシュコンクリートの性状が比較的良好であるものは、使用している骨材形状が円形に近く円形度係数、細骨材の粒子間距離が大きいことが確認できた。これは、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が、骨材の物理的な特性に大きな影響を受けることを示していると考えられる。なお、材料 C は、細骨材の形状が扁平に近いことで実積率が低くなっており、式(2)で算出される細骨材の粒子間距離も小さいことから、骨材同士が干渉しやすい状態にあったものと考えられ、これらが U 形充填高さや V 漏斗に影響したものと考えられる。

VI. まとめ

単位セメント量 300~330 $\text{kg}/\text{m}^3$  の範囲、3 種類の材料条件で、汎用締固め不要コンクリートの配合設計手法を検討した。以下に、本実験の範囲において、得られた知見を示す。

- (1) モルタル中の 0.6mm 以下の粒子の容積割合をいずれの材料においても 47~51%付近の範囲に調整することで、コンクリートの自己充填性を向上させることができる。
- (2)  $V_{0.6}/V_m$  が 49%を基準とした場合、材料 A では  $G_{vol}$  260~350 L/m、材料 B では  $G_{vol}$  300~330 L/m、材料 C では  $G_{vol}$  320~330 L/m の範囲で自己充填性を確保でき、全ての目標値を満たすものの中で、弾性係数などの硬化物性を考慮すると最も単位粗骨材量が多くなる  $G_{vol}$  330 L/ $\text{m}^3$  が適切である。
- (3) 汎用締固め不要コンクリートの流動性、充填性および間

隙通過性に大きな影響を及ぼす要因として、骨材の粒子の形状があり、これらは粒子間距離や円形度係数を指標として定量的に評価することができると考えられる。

- (4) いずれの材料においても良好なフレッシュコンクリートの性状であった  $V_{0.6}/V_m$  が 49% で  $G_{vol}$  が  $330L/m^3$  の条件において、細骨材の粒子間距離が大きいものほど、U 形充填高さが大きく、V 漏斗流下時間が短くなる。

今後の課題として、様々な骨材に対して汎用締固め不要コンクリートの配合設計を行えるようにすることが重要である。材料 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手段について、さらなる検討が必要である。また、施工方法に関して、スランプフローを 500～600mm としたとき、普通コンクリートにおける施工と同様に、ポンプの筒先を移動させながら 3m 間隔、1 層 50cm でコンクリートを打ち込むと、コンクリートは 3m 以上流動するものと推察される。それに対するコンクリートの材料分離抵抗性の確認や流動に伴う材料分離を抑制するためのスランプフローの設定および施工上の工夫に関する検討も必要である。汎用締固め不要コンクリートの実現に向けて研究開発を進めていく次第である。

#### 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, 土木学会論文集 No.522/VI-28, 1995.9, pp.23-26.
- 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合・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集, 第 467 号, 1995.1, pp.9-18.
- 3) 坂田昇, 柳井修司: 流動性を安定するウェランガム, その効果に期待 - 信頼性の高い構造物をつくる NV コンクリート工法 -, コンクリートテクノ, Vol.27, No.2, 2008.2, pp.54-59.
- 4) 松本修治, 橋本 学, 柳井修司, 坂井吾郎: 生産性向上に資する安価な締固め不要コンクリートの実現に向けた一実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.1, 2019, pp.1145-1150.
- 5) 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次論文集, Vol.42, No.1, 2020, pp.1037-1042.
- 6) 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.
- 7) 2012 年制定コンクリート標準示方書 [施工編], 土木学会, 2012.3.
- 8) 大内雅博: 高流動コンクリートー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, pp.537-541.
- 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集, 第 16 巻, 第 3 号, 2005.9, pp.11-19.
- 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集, Vol.33, No.1, 2011, pp.143-148.
- 11) 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, 土木学会論文集, No.571, V-36, 1997.8, pp.131-147.
- 12) 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, 1992, pp.27-29.

## Mix Design Method for Self-compacting-Concrete that Contributes to Productivity Improvement

*Shuji Matsumoto, Hinako Roppongi, Kohei Mizuno, Yoh Arakawa, Manabu Hashimoto, Kenzo Watanabe Shuji Yanai and Goro Sakai*

As a method of improving construction productivity, the application of conventional self-compacting concrete can be considered. However, there are problems in terms of cost and ease of manufacturing due to the increase in the types of materials used. Therefore, the authors are developing inexpensive and versatile self-compacting concrete. In this report, regarding this concrete, the effect of the volume ratio of particles 0.6 mm in size or less contained in mortar and the effect of the coarse aggregate volume on the properties of fresh concrete including the filling property are clarified.