

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および実構造物への適用検証

Validation by Actual Application of a Self-Compacting Concrete Mix Design Method that Contributes to Productivity Improvement

松 本 修 治 荒 川 遥 水 野 浩 平
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、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、安価で汎用的な締固め不要コンクリートの開発を進めている。本稿では、新しい評価試験方法を含む、締固め不要コンクリートの配合設計手法を提案し、実構造物に適用することにより、これらの妥当性を明らかにした。

目 次

- I. はじめに
- II. GP-SCC の基本的な考え方
- III. GP-SCC の配合設計手法の提案
- IV. 実構造物での検証
- V. おわりに

I. はじめに

近年、建設工事では、技能労働者の高齢化・離職に伴う労働力不足から生産性向上が強く求められている。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。また、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種類として、スランプフロー45、50、55 および 60 cm が新たに設定された。さらに、土木学会では 2020 年に締固めを必要とする高流動コンクリートの配合設計・施工技術研究小委員会より委員会報告書¹⁾が発刊されるなど、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²⁾など多数の研究が行われ、締め固めることなく型枠内へ自己充填ができる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、特殊な構造条件・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、製造コストを抑えつつ締固めを不要とする品質を有し、一般的な構造・施工条件の RC 構造物の生産性向上に資するコンクリート（以下、GP-SCC : General Purpose Self-Compacting Concrete と記す）の検討³⁾を行っている。本稿では、GP-SCC の配合設計手法と実構造物への適用結果について述べる。

II. GP-SCC の基本的な考え方

1. 配合を考える上での条件

GP-SCC は、最小鋼材あきが 75~200mm 程度、鋼材量の目安が 100~250 kg/m³ 程度の一般的な RC 構造物を適用対象とする（条件①）。そのため、施工条件としては、スランプで管理する一般的な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てコンクリートを間配ることを前提とし、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]⁴⁾（以降、示方書と称する）の施工標準で示される 3.0m 程度以下とする（条件②）。また、コストの増加を抑制するためには、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。このことから、特殊な材料を使用せず、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）、細骨材、粗骨材、混和剤で構成されることを配合設計上の条件とする（条件③）。

2. 新しい評価試験を含む目標品質

(1) 流動性

スランプフローの中心値については、条件②、すなわち水

キーワード : GP-SCC, 配合設計手法, 細骨材, 粒度分布, 単位粗骨材絶対容積

Keywords : General Purpose Self-Compacting Concrete, mix design method, fine aggregate, particle size distribution, absolute volume of coarse aggregate

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ことから、土木学会の「高流動コンクリートの配合設計・施工指針」⁵⁾ (以降、指針と称する)における自己充填性のランク3の目標値下限相当である450~550mm程度とする。

(2) 自己充填性および間隙通過性

条件①におけるGP-SCCの対象構造物は、指針に従えば、Table 1に示す自己充填性のランクと構造物の条件から最小鋼材あきが60~200mm程度、鋼材量の目安が100~350kg/m³程度、自己充填性のランク2とされている通常のRC構造物に該当する。その充填性および間隙通過性の評価は、Fig.1a)に示す装置を用いJSCE-F 511「高流動コンクリートの充填試験方法(案)」(以降、U形充填性試験と称する)で行う。流動障害ランク2(Photo 1b)とした時の充填高さ(以降、U形充填高さと呼ぶ)300mm以上がフレッシュコンクリートの目標品質となる。しかし、通常のRC構造物などを対象とする流動障害ランク2は、ランク1(Photo 1a)と同様に鋼材の最小あきが35mmとなっており、実構造物の鋼材の最小あきに対して狭く設定されている。その理由として、指針では、高流動コンクリートの流動距離を5~8mまで許容しており、流動先端部においても間隙通過性を確保できるように安全側の評価を行うためと推察される。しかしながら、GP-SCCは鋼材の最小あき75mm、打込みの間隔を3.0m程度としていることから、GP-SCCを配合設計する際に流動障害ランク2を用いると施工上問題のない品質を有するものを排除する評価結果となることが懸念される。また、ランク2の次の条件としてランク3があるが、これは、無筋構造物を対象としている。一般的なRC構造物に対しては、施工できないものを適するものとして評価してしまう可能性が高い。そこで筆者らは、GP-SCCを対象に、鋼材の最小あきを75~200mm、鋼材量の目安を100~250kg/m³程度の一般的なRC構造物を対象に、ランク2と比べて間隙通過性の条件を緩和させた自己充填性のランク2.5を考案した。その流動障害ランク2.5は、Photo 1c)に示すように異形棒鋼を2本配置し、鋼材のあきを75mmとしている。このランク2.5でのU形充填高さ300mm以上をフレッシュコンクリートの目標品質とすることを提案している⁶⁾。

(3) 材料分離抵抗性

GP-SCCは、製造コストを抑えるために、所要の強度を確保した上で、単位セメント量が350kg/m³程度以下の比較的少ない量でスランプフロー450~550mmを得ようとしている。そのため、材料分離抵抗性を適切に評価することが重要になる。そこで、日本建築学会「高流動コンクリートの材料・調査・製造・施工指針(案)・同解説⁷⁾」(以降、建築指針と称する)に準拠したFig.1b)に示す装置を用いた材料分離抵抗性を評価する円筒貫入試験に着目した。本試験は、円筒貫入計をコンクリートに挿入し、試験器の孔から流入するモルタル量(流入モルタル値)を測定するものである。流入モルタル値が高いと分離傾向にあると考えられている⁷⁾。筆者らは、間隙を通過する前後の状態変化を比較し、材料分離

Table 1 自己充填性のランクと構造物の条件 (Self-Filling Ranks and Structural Conditions)

自己充填性 ランク	1	2	2.5	3
鋼材の最小あき (mm)	35~60	60~200	75~200	200以上
主な対象構造物	高密配筋部材	通常のRC構造物	一般的なRC構造物	無筋構造物
鋼材量目安 (kg/m ³)	350以上	100~350	100~250	100未満
流動障害	Photo1a)	Photo1b)	Photo1c)	なし

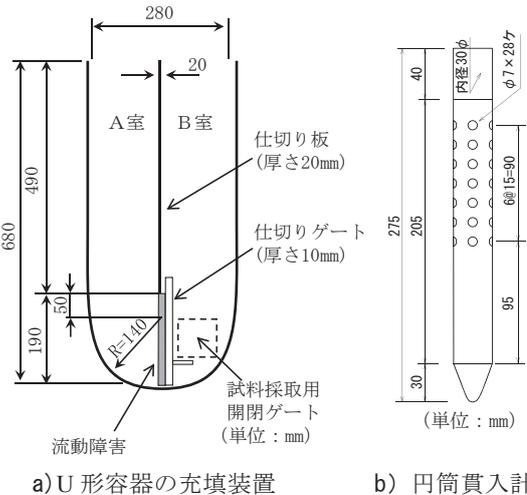


Fig.1 U形容器の充填装置と円筒貫入計の形状・寸法 (Shape and Dimensions of Ushape Filling Equipment and Cylinder Penetration Tester)

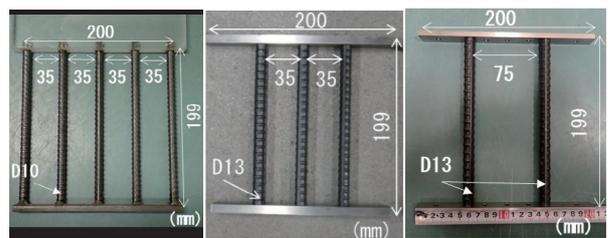


Photo 1 各自己充填性ランクの流動障害 (Flow Disorders of Each Self-Filling Rank)

抵抗性を評価するために、U形充填試験後のA室とB室における円筒貫入試験の結果を比較して評価する手法(以降、U形円筒貫入試験と称する)を提案している⁶⁾。ここでは、この試験で得られるA室、B室の流入モルタル値の差が±10mm以内を目標値とした。

(4) 新しい評価試験を用いた目標品質の妥当性検証

(a) 実験概要

新しい評価試験である自己充填性のランク2.5および材料分離抵抗性の評価試験であるU形円筒貫入試験の妥当性を確認するために、一般的なRC構造物の壁を模擬した実規模の打込み実験を実施した。GP-SCCは、Table 2に示す配合と

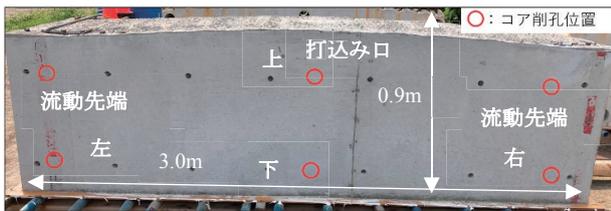
Table 2 コンクリートの配合
(Concrete Mix Proportions)

No.	スランプ (cm)	後添加後の スランプフロー (mm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	Gvol (L/m ³)	単位量(kg/m ³)					Ad1	Ad2	後添加 AD-P
							W	C	S1	S2	G			
1	15±2.5	500±50	4.5	58.3	50.9	336	175	300	624	289	891	1.90	0.2	0.16
2	15±2.5	500±50	4.5	58.3	52.7	324	175	300	655	290	859	1.80	0.2	0.16

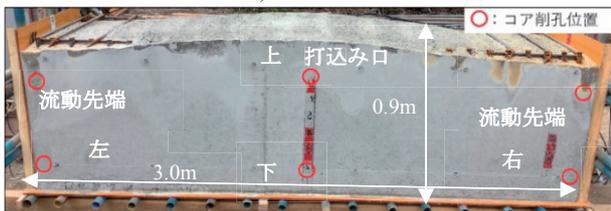
W:上澄水,C:普通ポルトランドセメント,密度:3.16 g/cm³ S1:砕砂,表乾密度:2.63 g/cm³ S2:山砂,表乾密度:2.59 g/cm³ G:砕石 2005, 表乾密度:2.65g/cm³ 実積率:63.8%, Ad1:AE 減水剤,リグニルスルホン酸系, Ad2:AE 剤, 樹脂酸系界面活性剤, AD-P:後添加粉末分散剤, リグニルスルホン酸塩系

Table 3 フレッシュコンクリートの試験結果
(Test Results of Fresh Concrete Properties)

配合 No.	添加前		後添加後				流入モルタル 値の差 B室-A室 (mm)
	スランプ (cm)	空気 量 (%)	スランプ フロー (mm)	空気 量 (%)	U形充填高さ (mm)		
					ランク 2.5	ランク 2	
1	17.5	4.4	530	4.5	317	258	-16
2	14.5	3.0	505	3.5	305	244	+2



a) 配合 No.1



b) 配合 No.2

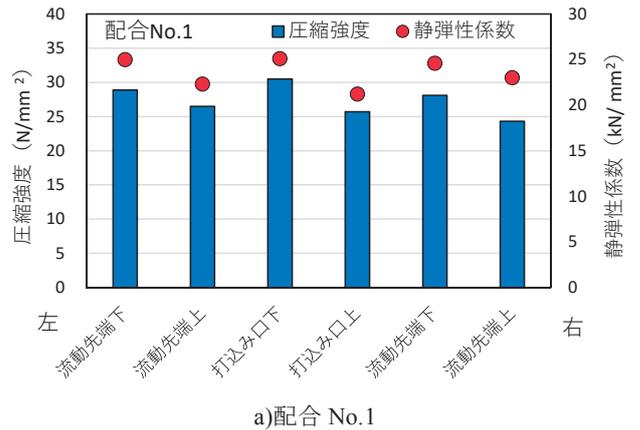
Photo 2 コンクリート打込み後の状態比較
(Comparison of Conditions after Concrete is Poured)

したスランプ 15cm 程度の一般的なコンクリートを製造・出荷し、現場でトラックアジテータのホップから新規の粉末分散剤を添加して製造（以降、後添加製造と称する）した。

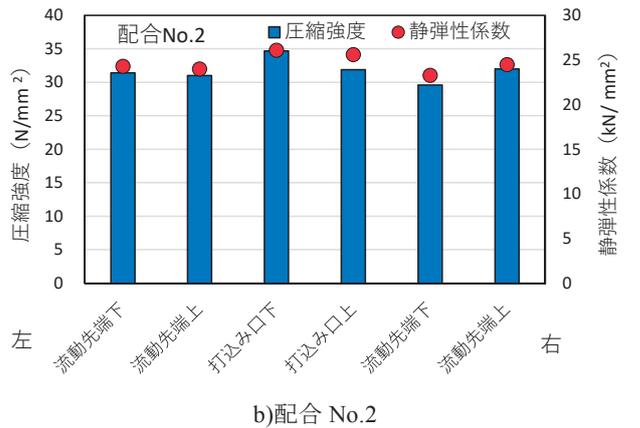
試験体寸法は、幅 0.8m、延長 3m、高さ 0.9m とした。また、配筋は、鉄筋の最小あきが 75mm となるように、主筋となる異形鉄筋 D25 を 100mm 間隔、配力筋 D16 を 300mm 間隔で配置した。

コンクリートの打込みは、コンクリートポンプ車を用いて、平均打込み速度を 30 m³/h 程度とし、試験体の中心（端部から 1.5m の位置）から 1 層の高さを 0.9m とした。また、締固めは一切行わなかった。

コンクリートの流動や充填状況の目視評価を行うとともに、試験体から採取したコア供試体の圧縮強度と静弾性係数を測定し、それぞれの最大と最小の差を算出して評価した。



a) 配合 No.1



b) 配合 No.2

Fig.2 各部位の圧縮強度と静弾性係数
(Compressive Strength and Static Elastic Modulus)

(b) 実験結果および考察

Table 3 にフレッシュコンクリートの試験結果を示す。いずれの配合も所定のスランプフローおよびランク 2.5 の U 形充填高さを満足したが、No.1 はブリーディング水が浮き出るような分離が確認された。また、U 形円筒貫入試験の A 室, B 室における流入モルタル値の差は No.1 では -16mm と大きいのにに対し、No.2 は +2mm と小さく、No.2 の方が材料分離抵抗性が高いと評価された。

Photo 2 に脱型後の状況を示す。分離傾向を示した No.1 のケースであっても豆板等がなく表面の状態は良好であった。

Photo2 に示す No.1 と No.2 の供試体の各所から採取したコア供試体の圧縮強度と静弾性係数を Fig.2 に示す。圧縮強度における最大と最小の差は、No.1 で 6.2 N/mm² に対し、

No.2では5.1 N/mm²であった。静弾性係数における最大と最小の差は、No.1で3.9 kN/mm²に対し、No.2では2.8 kN/mm²であった。圧縮強度、静弾性係数のいずれにおいても、No.2はNo.1と比べ最大と最小の差が小さい結果であった。また、各位置の上下の差においてもNo.2は、No.1と比べ小さい結果である。No.1で生じた各位置での上下の差は、いずれの位置でも上部の方が圧縮強度および静弾性係数が小さい結果であり、粗骨材が沈降している傾向が示された。これらのことから、No.2はNo.1と比べ、圧縮強度、静弾性係数のいずれもばらつきが小さく、材料分離がない均質な状態であると判断された。

以上の結果からNo.1とNo.2のように、自己充填性のランク2.5を合格するGP-SCCであれば、一般的なRC構造物を対象としたとき、締固めを行わなくても鉄筋の間隙を通過し、かぶりまで十分に充填されることが分かった。しかし、No.1とNo.2は、スランプフローやU形充填高さが同程度であるにもかかわらず、目視やコア分析において材料分離の程度に差が生じていた。その差は、U形充填試験後のA室、B室における円筒貫入試験による流入モルタル値の差によって定量的に評価できる可能性が示された。

Ⅲ. GP-SCCの配合設計手法の提案

1. 配合設計フロー

Fig.3に、筆者らが考案したGP-SCCの配合設計フローを示す。GP-SCCの配合は、高流動コンクリートと同様に所要のワーカビリティ、強度、耐久性などの必要な品質に加え、締固め不要となる充填性を確保するための流動性、材料分離抵抗性および間隙通過性も得られるように試験によって定

める。具体的には、指針の配合設計フローと同じく、配合条件設定過程、配合検討過程、配合確認過程がある。以下に各々の過程について詳述する。

2. 配合条件設定過程

(1) 対象構造物の種類形状、配合条件の確認

配合設計フローのスタートに位置する本過程においては、対象とする一般的なRC構造物の断面や形状、配筋条件や鋼材量、施工条件、施工者の技術能力などを考慮して、II章1節で述べたGP-SCCの配合を考える上での条件を確認する。

(2) フレッシュコンクリートの要求品質の設定

GP-SCCは、締固め不要コンクリートの製造・施工において最も重要となる要求品質を満足するように決定することが必要である。その品質は、流動性、充填性、間隙通過性および材料分離抵抗性の4項目であり、II章2節に定めている。すなわち、流動性はスランプフロー450~550mm、充填性および間隙通過性はランク2.5のU形充填高さ300mm以上、材料分離抵抗性はU形円筒貫入試験でA室、B室の流入モルタル値の差が±10mm以内を満足することを目標品質としている。

(3) 硬化コンクリートの要求品質の設定

GP-SCCは、設計基準強度と製造するレディーミクストコンクリート工場の実績から強度のばらつきを考慮した割増係数をつける一般的なコンクリートと同様の考え方で配合強度を設定できる。しかしながら、単位セメント量に関しては、流動性に対する材料分離抵抗性やワーカビリティを確保する上で決定することが重要である。また、耐久性、水密性、ひび割れ抵抗性および鋼材を保護する機能などを確保するための材料、配合、施工などの条件は示方書に準拠する。

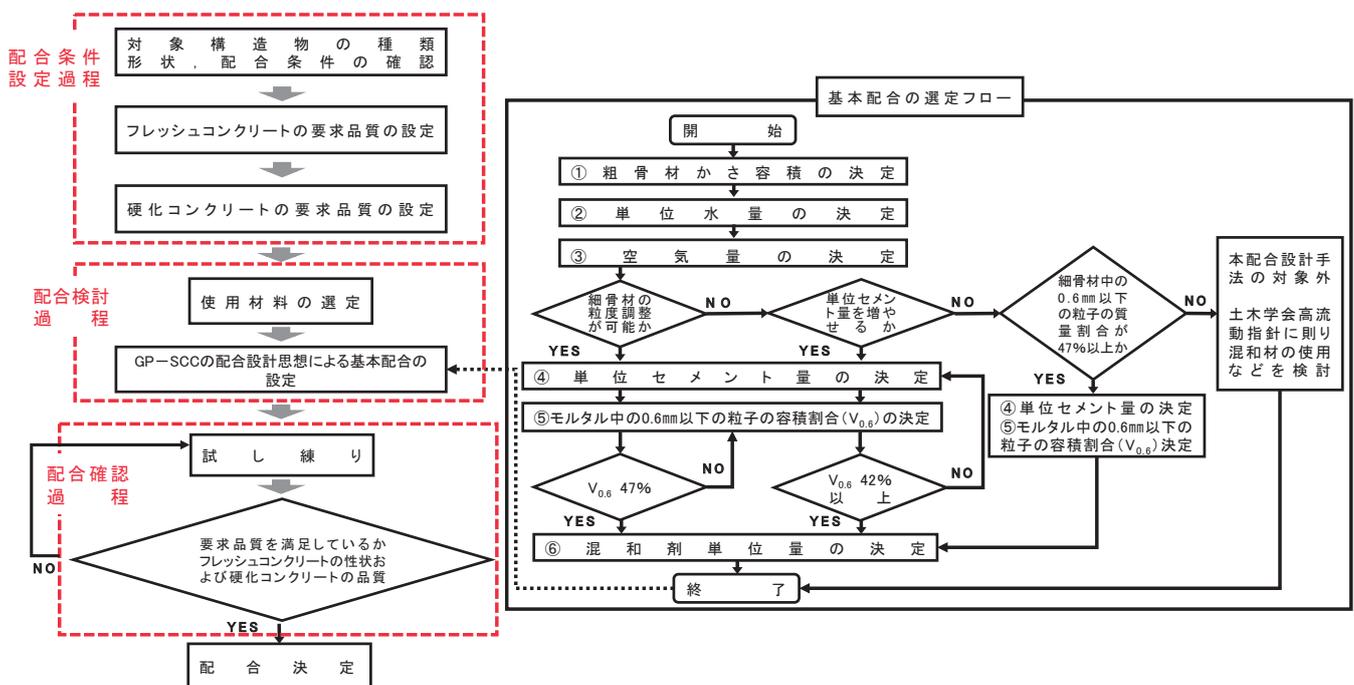


Fig.3 GP-SCCの配合設計フロー
(GP-SCC Mix Design Flow)

3. 配合検討過程

II章に示す GP-SCC の基本的な考え方にに基づき、以下に配合因子ごとに、具体的な設定方法ならびに基本となる数値等を示す。

(1) 使用材料の選定

II章1節で述べたとおり、GP-SCC はコスト増を抑制することが前提であり、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。そのことから、特殊な材料は使用しないことを基本としている。

また、使用材料の一つである混和剤を選定するにあたり、GP-SCC の製造方法を選定する必要がある。まず、①市中の一般的なレディーミクストコンクリート工場での一括練りで、高性能 AE 減水剤を用いてスランプフロー450~550mm程度とする製造方法（以降、プラント一括製造と称する）がある。その方法だと、生コンクリート組合が定める価格設定により、材料の積上げ単価に関係なくスランプフローの設定等に対する製造管理費用が上乘せされ、コスト増を余儀なくされる場合が多い。また、GP-SCC においてもフレッシュコンクリートの性状は、練上がりからの経過時間によって変化する。そのため、レディーミクストコンクリート工場と現場が離れている場合など、コンクリートの場外および場内の運搬に時間を要する場合にはフレッシュコンクリートの性状を保持することが困難な場合などもある。そこで、②生コンクリート工場で練り混ぜる配合を GP-SCC 用に修正を行った上で、AE 減水剤を用いてスランプ 15cm 程度の一般的なコンクリートを製造・出荷し、現場で粉末分散剤をトラックアジテータのホッパに投入する後添加製造とすることが有効と判断される。従来、ポリカルボン酸系の混和剤を後添加するのが主流ではあるが、既往の文献⁸⁾からポリカルボン酸系の混和剤を後添加すると、スランプフローが同じ一括練りのものと比べ塑性粘度の低下が課題であった。GP-SCC は単位セメント量を 350kg/m³ 程度以下としており、材料分離抵抗性が従来の高流動コンクリートよりも劣るため、塑性粘度の低下によって分離を助長させる可能性があった。そこで、粘性付与が期待できる⁹⁾リグニンスルホン酸塩 (Photo 3) に着目した。リグニンスルホン酸塩を単一で使用した場合、多量に添加しても高い流動性が得られないため、少量で高い流動性を付与できるようにポリエチレングルコールを複合化し分子構造等を変更した新規の粉末分散剤^{9) 10)}を使用することとした。参考までに、同一モルタルの配合において、後添加する粉末分散の種類を変えた場合の塑性粘度と降伏値の結果を Fig.4 に示す。リグニンスルホン酸塩を主成分とする新規の粉末分散剤を用いることで、ポリカルボン酸塩を主成分とするものと降伏値は変わらないまま、塑性粘度を増加できることを確認している⁷⁾。

(2) 基本配合の設定

基本配合の選定フロー (Fig.3) では、充填性および間隙通過性を確保するために重要な要素となる粗骨材かさ容積を最初に決める。次に、単位セメント量を最小限としつつ、材料分離抵抗性を付与し充填性を確保するためにモルタルに



Photo 3 新規の粉末分散剤
(New Powder Dispersant)

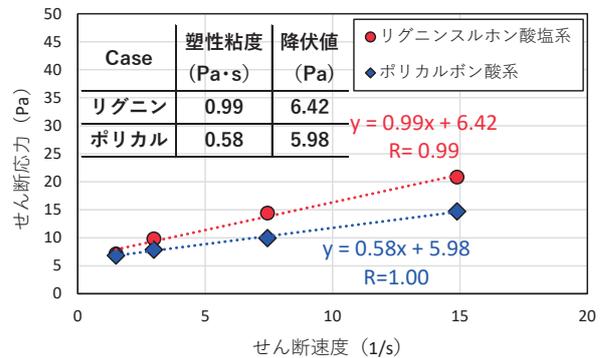


Fig.4 分散剤ごとのせん断速度とせん断応力の関係
(Relationship between Shear Rate and Shear Stress)

対するセメントと細骨材の0.6mm以下の粒子の容積割合(以下、 $V_{0.6}$ と称する)を調整する。最後に、流動性を確保するための混和剤量を定める流れとしている。以降に、それぞれの項目について述べる。

(a) 粗骨材かさ容積の決定

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、粗骨材量の増減は材料分離抵抗性に影響を及ぼす細骨材量の増減を意味する。このため、間隙通過性や充填性の観点から一義的に単位粗骨材量を定めることができない。したがって、単位粗骨材量を合理的に定めることが必要であった。この課題に対し、粗骨材かさ容積を指標として検討を行った。

実積率の異なる2種類の粗骨材を用いたこれまでの検討¹¹⁾では、単位水量、単位セメント量を一定に、粗骨材絶対容積を変えてU形充填性試験を行った。その結果、Fig.5に示すように最も充填高さが高くなる粗骨材絶対容積は2種類の粗骨材で異なる結果となった。ここで、G62、G59はそれぞれ実積率が62%、59%と異なることから、それぞれの実積率から粗骨材かさ容積の指標で整理した。その結果、Fig.6に示すように粗骨材の種類、実積率の違いに関係なく、粗骨材かさ容積が508 L/m³付近で最も充填性が高くなることを確認した。そこで、粗骨材かさ容積を508 L/m³に決定し、粗骨

材絶対容積は、使用する粗骨材の実積率で算出した値とした。例えば、粗骨材の実積率が60%の場合、粗骨材絶対容積は、 $508 \times 60 / 100 = 305 \text{ L/m}^3$ と設定することを基本とする。

(b) 単位水量の決定

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レート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^3 を基本とする。

筆者らのこれまでの検討では、良質な川砂利または石灰砕石と山砂の組合せにおいては、単位水量を 165 kg/m^3 程度まで低減させても所定の充填性を確保できる場合があった。しかし、全国的に骨材事情が良くない状況で、上述のような骨材を使用することは稀である。単位セメント量を 350 kg/m^3 程度以下で、細骨材量を増やしている GP-SCC においては、ペースト量が不足気味となり、所定のワーカビリティを得られない傾向がある。そのため、川砂利を用いて単位水量を低減する場合でも単位水量は 170 kg/m^3 程度とする。

(c) 空気量の決定

示方書に則り、空気量は、 $4.5 \pm 1.5\%$ を標準とする。また、寒冷地等で長期的に凍結融解作用を受けるような場合には、所要の強度を満足することを確認した上で、最大 7.0% 程度まで空気量を増やすほうが良いとした。

(d) 単位セメント量の決定

GP-SCC の単位セメント量は、コストの抑制と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。一般的な RC 構造物の水セメント比が $50 \sim 55\%$ 程度であることと、前述の単位水量の設定も踏まえて、単位セメント量は $320 \sim 350 \text{ kg/m}^3$ 以下とする。その代わりに、材料分離抵抗性を確保するために、不足する粉体を細骨材中の微粒分で補う配合思想のため、Fig.3 に示す配合設計フローに従い、次節に詳述する方法で、 $V_{0.6}$ の調整を行う。

(e) モルタル中の 0.6mm 以下の粒子の容積割合の決定

単位細骨材量は、セメント以外の粉体を用いない GP-SCC 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。不足する粉体を細骨材中の微粒分で適切に補うことが必要であり、そのための新たな指標を配合設計手法に導入する必要があった。これを解決するために、配合検討過程の基本配合の選定フローにおいて、 $V_{0.6}$ を新たな指標とする。なお、 $V_{0.6}$ は次式 (1) で算出するものである。

$$V_{0.6} = \{ (S \times VS_{0.6} / 100) / (\rho_s + V_c) \} / V_m \times 100 \quad (1)$$

ここに、 $V_{0.6}$; モルタル中の 0.6mm 以下の粒子の容積割合 (%)、 S ; 単位細骨材量 (kg/m^3)、 $VS_{0.6}$; 細骨材粒度分布における 0.6mm 以下の通過質量百分率 (%)、 ρ_s ; 細骨材の密度、 V_c ; セメントの単位容積 (L/m^3)、 V_m ; 空気を除くモルタル容積 (L/m^3) を表す。

材料分離抵抗性を確保し自己充填性を得るための筆者らの検討³⁾では、単位水量、単位セメント量、粗骨材絶対容積を一定にして $V_{0.6}$ を変化させて、U 形充填試験を行った。そ

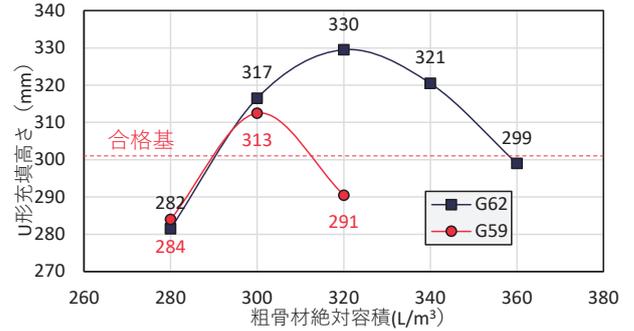


Fig.5 粗骨材絶対容積と U 形充填高さの関係 (Relationship between Coarse Aggregate Volume and U-shaped Filling Height)

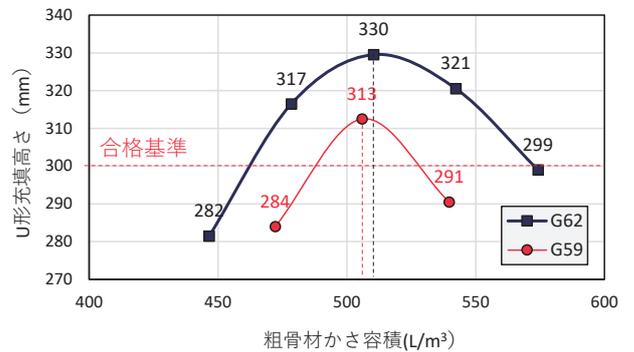


Fig.6 粗骨材かさ容積と U 形充填高さの関係 (Relationship between Coarse Aggregate Bulk Volume and U-shaped Filling Height)

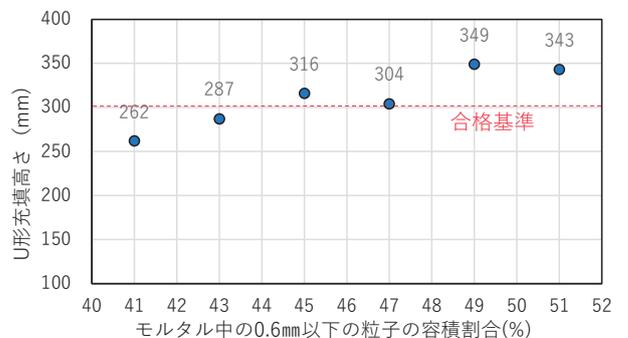


Fig.7 $V_{0.6}$ と U 形充填高さの関係 (Relationship between $V_{0.6}$ and U-shaped Filling Height)

の結果は、Fig.7 に示すように $V_{0.6}$ を $45 \sim 51\%$ の範囲に調整することで、充填高さ 300 mm 以上が得られ、コンクリートの自己充填性を向上させられることが可能であった。GP-SCC における $V_{0.6}$ の調整は、粒度分布の異なる 2 種類以上の細骨材の混合割合を変えて、 $V_{0.6}$ を 47% とする。1 種類みの細骨材を用い、粒度の調整ができない場合は、単位セメント量を増やし、 $V_{0.6}$ を 42% 以上とする。なお、単位セメント量を増やせない場合は、細骨材中の 0.6 mm 以下の粒子の質量割合が 47% 以上であれば、基本配合の選定が可能だが、そうでない場合は GP-SCC の適用範囲外とし、別途、混和

材・混和剤を活用する手法へと移行する必要がある。

(f) 高性能 AE 減水剤または新規の粉末分散剤の量

GP-SCC の製造方法としては、III章 3 節に記した①「プラント一括製造」と②「後添加製造」の 2 つの方法が可能である。①「プラント一括製造」では、検討実績からポリカルボン酸塩を主成分とする「高性能 AE 減水剤」を用いることを基本とし、配合検討過程においては、各混和剤メーカーが定める標準添加率を用いることとしている。②「後添加製造」では、スランブ 15cm 程度のベースコンクリートにリグニンスルホン酸塩あるいは、ポリカルボン酸系化合物との複合体を主成分とする「AE 減水剤」を用いることを基本とし、こちらも使用量は各混和剤メーカーが定める標準添加率を用いる。後添加する新規の粉末分散剤の添加率は、単位セメント量に対し、0.18% を標準とする。

4. 配合確認過程

配合設計手法に従い設定した基本配合で室内試し練りを行い、GP-SCC としての目標品質が得られるかどうかを確認する。試し練りにおいて目標とした品質が得られない場合は、フレッシュコンクリートの性状に応じて、 $V_{0.6}$ 、単位粗骨材かさ容積、単位セメント量の順番に調整する。

IV. 実構造物での検証

1. 検証概要

GP-SCC の配合設計手法の妥当性および後添加製造の製造性の確認を目的に、実現場における Photo 4 に示すような底版コンクリート全 6 区画(約 675m²/区画, 厚さ 0.2m)の内、約 540m³(4 区画分)に後添加製造による GP-SCC を打ち込んだ。また、約 270m³(2 区画分)は、比較としてスランブ 8cm の一般的なコンクリート (18 8 20N,W/C=65%) を締め固めながら打ち込んだ。粉末分散剤の投入方法は、Photo 5 に示すように、新規の粉末分散剤を水溶紙袋 1 袋あたりに 260g 梱包し、現場でトラックアジテータのホッパへ手投入する方法とした。強制二軸ミキサと比べて練混ぜ効率が低いため、既往の文献¹²⁾を参考に、攪拌時間を 5 分とし攪拌速度は高速攪拌 (10~15rpm 程度) とした。

2. GP-SCC の配合設計手法の検証

Table 4 に使用材料を示す。セメントは普通ポルトランドセメント、細骨材は山砂、粗骨材は石灰砕石 2005 を用いた。なお、細骨材の粒度分布は Fig.8 に示すとおり、0.6mm 以下の通過質量百分率が 55%と多いものであった。スランブ 15cm 程度のベースコンクリートに用いる混和剤は、一般的な AE 減水剤 (Ad1) と空気量を調整するために AE 剤 (Ad2)、後添加する粉末分散剤は、新規に開発したリグニンスルホン酸塩を主成分とする粉末分散剤 (AD-P) である。

Table 5 にコンクリートの配合を示す。粗骨材絶対容積は、粗骨材の実積率が 60.1%であることから、基本としている粗骨材かさ容積 508L/m³ から算出した 305L/m³ とした。単位水量は GP-SCC の基本としている 175kg/m³ とした。細骨材は、1 種類であったため、粒度調整ができない。単位セメント量は増やせる条件であったため、まずは、鉄筋コンクリート構



Photo 4 GP-SCC の適用状況
(Application Status of GP-SCC)



Photo 5 粉末分散剤の後添加状況
(Status of Addition of Powder Dispersant)

Table 4 使用材料
(Concrete Materials)

材料名	記号	摘要
水	W	上澄水
セメント	C	普通ポルトランドセメント, 密度:3.15g/cm ³ 比表面積:3,110cm ² /g
細骨材	S	山砂, 千葉県富津市鶴岡地内産 表乾密度:2.62g/cm ³ , 粗粒率:2.59 吸水率:1.36%
粗骨材	G	石灰砕石 2005, 高知県吾川仁淀川地内 表乾密度: 2.69g/cm ³ , 吸水率:0.36% 実積率:60.1%
混和剤	Ad1	AE 減水剤, リグニンスルホン酸塩および ポリカルボン酸系化合物
	Ad2	AE 剤, 樹脂酸系界面活性剤
	AD-P	後添加粉末分散剤, リグニンスルホン酸塩系

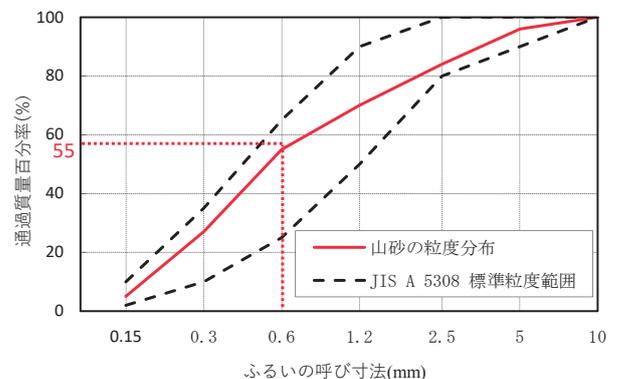


Fig.8 細骨材の粒度分布
(Particle Size Distribution of Fine Aggregate)

Table 5 コンクリートの配合
(Concrete Mix Proportions)

配合	SL or SLF* (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	Gvol (ℓ/m^3)	V _{0.6} (%)	単位量(kg/m ³)				Ad1	Ad2	後添加 AD-P
							W	C	S	G			
ベース	15±2.5	4.5	54.7	55.1	305	47	175	320	981	820	1.00	0.35	—
GP-SCC	50±5.0	±1.5									—	—	0.18

※SL:スランプ, SLF:スランプフロー

Table 6 フレッシュコンクリートの性状試験結果
(Test Results of Quality)

試験 No.	ベースコンクリート		後添加後 GP-SCC						
	スランプ (cm)	空気量 (%)	スランプフロー (mm)			空気量 (%)	コンクリート 温度 (°C)	U形充填高さ ランク 2.5 (mm)	流入モルタル値の差 B室-A室 (mm)
			X	Y	平均				
目標値	15±1.5	4.5±1.5	500±50			4.5±1.5	5~35	300以上	±10mm以内
1	20.5	3.0	541	540	540	3.9	10	356	-2
2	16.5	3.7	505	487	495	4.2	12	325	-7
3	15.0	3.2	463	453	460	4.5	11	313	-3
4	16.0	4.1	500	480	490	5.8	10	335	2
5	17.5	3.8	541	525	535	4.7	12	350	1
6	21.0	5.0	551	550	550	6.0	13	345	-5

造物の水密性を確保する上で、最大とされる水セメント比55%程度に設定した。前述の単位水量の設定から単位セメント量を320kg/m³に仮設定し、前述の(1)式より、V_{0.6}を算出した結果、47%とGP-SCCの基本としている値であった。そのため、細骨材の粒度調整および単位セメント量の増加は不要とした。なお、後添加粉末分散剤の添加率は、単位セメント量に対し0.18%とした。

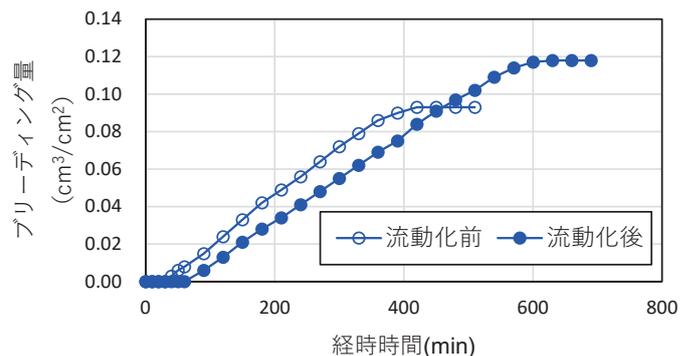
以上、配合設計手法により設定した基本配合にて、事前の室内試し練りを行った結果、スランプフロー487mm、空気量5.3%となり、U形充填性試験の自己充填性のランク2.5における充填高さは330mmと目標値として定めた300mmを満した。また、試験後のA室、B室で実施した円筒貫入試験における流入モルタル値の差は-9mmであり、目標値とした±10mm以内を満した。目視による材料分離抵抗性も良好なものであった。以上から提案する配合設計手法によって、流動性、充填性、間隙通過性および材料分離抵抗性を満する配合(Table 5)を選定できることが確認された。

実機ミキサでの製造時は、ベースコンクリートの運搬によるスランプ低下を考慮して、練上がりのスランプが17cm程度となるように混和剤Ad1を単位セメント量に対して0.85%とし、後添加する新規の粉末分散剤AD-Pは0.18%(0.58 kg/m³)とし、実構造物に適用した。

3. 後添加製造によるGP-SCCの製造性の検証

(1) 検証概要

実施工における後添加製造のGP-SCCの製造性に関して、流動性、材料分離抵抗性、充填性および間隙通過性の要求品質を満するかの検証を行った。1区画の約135m³の打込みにおいて、ベースコンクリートではスランプ(JIS A 1101)と空気量試験(JIS A 1128)を行った。後添加製造によるGP-SCCでは、スランプフロー試験(JIS A 1150)、空気量試験

Fig.9 ブリーディング量
(Bleeding of Concrete)

(JIS A 1128)、U形充填性試験ランク2.5、U形円筒貫入試験およびコンクリート温度の測定(JIS A 1156)を行った。試験頻度は、いずれも午前3回、午後3回の計6回とした。また、ブリーディング試験(JIS A 1123)、凝結時間試験(JIS A 1147)も後添加前後で1サンプルずつ行った。

(2) 検証結果

Table 6に、フレッシュコンクリートの性状試験結果を示す。ベースコンクリートのスランプは、目標値15±2.5cmを外れるものがあったものの、流動性の指標である後添加後のスランプフローにおいては、500±50mmの目標値を満した。空気量は、ばらつきはあったものの4.5±1.5%の範囲であった。充填性および間隙通過性を評価するランク2.5におけるU形充填高さは、いずれも300mm以上であり、目標値を満することが確認できた。また、材料分離抵抗性を評価するU形円筒貫入試験においても、B室からA室の流入モルタル値を引いた差が±10mm以内を満した。

Fig.9にブリーディング量の比較を示す。ブリーディング

試験は、外気温が 10℃程度の低温環境下で行った。粉末分散剤投入前のスランプ 15cm 程度のコンクリートと粉末分散剤投入後の GP-SCC のブリーディング量の差は比較的小さく、いずれも建築指針で規定されている $0.3\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 以下であった。なお、粉末分散剤投入後の GP-SCC の凝結時間は、粉末分散剤投入前に比べて始発および終結ともに 90 分程度遅れる結果であった。外気温が 10℃程度以下の環境下で、GP-SCC を打ち込んだ底版上面の仕上げにおいてもブリーディングや凝結の遅延が問題となることはなく、一般的なコンクリートと同等の仕上げ性であった。

4. コア採取による構造物の品質検証

(1) 検証概要

後添加製造による GP-SCC を打ち込んだ構造物の品質検証を行った。硬化後の底版から 30 か所のコア採取を行い、側面で粒径 5mm 以上の粗骨材をスケッチすることで粗骨材面積率を算出するとともに、圧縮強度 (JIS A 1108) と静弾性係数 (JIS A 1149) による評価を行った。なお、比較対象の一般的なコンクリート (18 8 20N) を打ち込み、締め固めた区間の 4 か所からコアを採取し、同様の試験を行った。

(2) 検証結果

Fig.10 にコア試験体側面の粗骨材面積率、Fig.11 にコア試験体の圧縮強度、Fig.12 にコア試験体の静弾性係数、Table 7 にコア試験体による各試験結果一覧を示す。一覧からコア供試体の各試験結果における平均値、最大最小の差などを比較した。各 30 か所におけるコアの粗骨材面積率、圧縮強度および静弾性係数にばらつきは小さく均質なものと考えられる。一般的なコンクリートと GP-SCC の粗骨材面積率の平均値には 7.1%の差がある。これは、計画配合における単位粗骨材絶対容積が GP-SCC は $305\text{L}/\text{m}^3$ に対して、一般的なコンクリートは $408\text{L}/\text{m}^3$ であったためである。また、圧縮強度の平均値には $8.4\text{N}/\text{mm}^2$ 差がある。これは、水セメント比が GP-SCC は 54.7%に対して、一般的なコンクリートは 65.0%であったためである。静弾性係数は一般的なコンクリートと GP-SCC で大差はなかった。

各試験の最大最小の差で各試験結果のばらつきを評価すると、粗骨材面積率の最大最小の差は、一般的なコンクリートで 5.9%であるのに対し、GP-SCC は 5.1%と小さい。また、

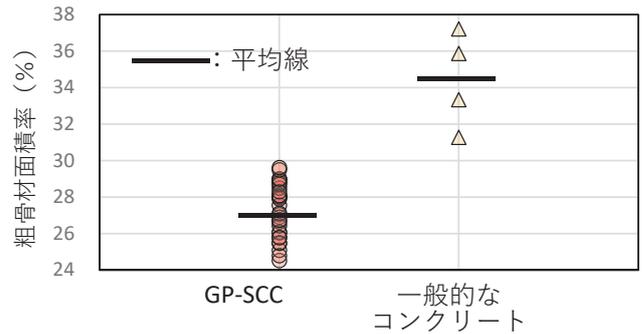


Fig.10 コア試験体側面の粗骨材面積率
(Coarse Aggregate Area Ratio on the Side Surface of the Core)

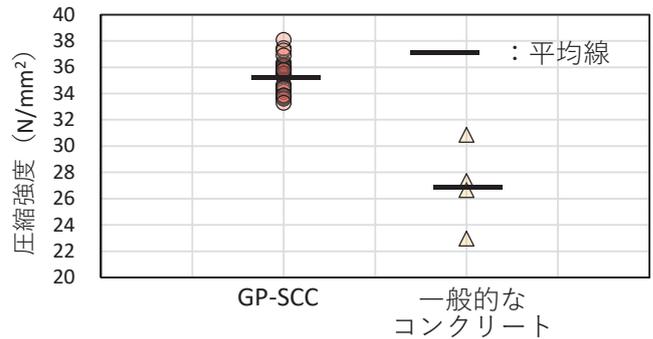


Fig.11 コア試験体の圧縮強度
(Compressive Strength of the Core)

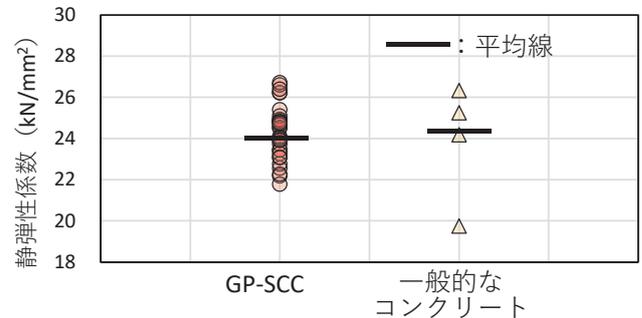


Fig.12 コア試験体の静弾性係数
(Modulus of Static Elasticity of the Core)

Table 7 コア試験体による各試験結果一覧
(List of Test Results Using Concrete Core Specimens)

項目	一般的なコンクリート	GP-SCC	
粗骨材面積率	平均 (%)	34.4	27.3
	最大と最小の差 (%)	5.9	5.1
	N 数 (本)	4	30
圧縮強度	平均 (N/mm^2)	26.9	35.3
	最大と最小の差 (N/mm^2)	7.9	4.8
	N 数 (本)	4	30
静弾性係数	平均 (kN/mm^2)	23.9	24.3
	最大と最小の差 (kN/mm^2)	6.6	4.9
	N 数 (本)	4	30

圧縮強度の最大最小の差は、一般的なコンクリートで 7.9 N/mm²であるのに対し、GP-SCC は 4.8 N/mm²である。静弾性係数の最大最小の差は、一般的なコンクリートで 6.6 kN/mm²であるのに対し、GP-SCC は 4.9kN/mm²である。いずれの試験においても、一般的なコンクリートに比べ、GP-SCC は、最大最小の差が小さい、いわゆる、ばらつきが小さい。このことから、GP-SCC は、一般的なコンクリートと同程度またはそれ以上に材料分離することなく打ち込めており、均質な構造物を構築できたものと考えられる。

以上から実施工を通じて、提案した配合設計フローで製造した GP-SCC は、必要とされる流動性、充填性、間隙通過性および材料分離抵抗性を満たすことを検証した。

なお、本論文では詳述しないが施工性の評価も同時に行っており、GP-SCC の施工に要する時間は、締固め作業がないため、一般的なコンクリートの打込みに比べて約 35%程度 (3 時間) の短縮となった。

V. おわりに

筆者らは、これまで実施してきた実大施工実験の結果から、自己充填性のランク 2.5 となる U 形充填性試験や円筒貫入計による材料分離抵抗性の評価試験を組み込んだ GP-SCC の配合設計手法を提案した。それを実構造物の施工に適用することで、一般的な RC 構造物に要求されるワーカビリティおよび材料分離抵抗性を得られることが明らかとなり、本配合設計手法の妥当性を検証することができた。

しかし、骨材の種類によって変わる形状や粒度などがフレッシュコンクリートの性状にどのように影響するかは、定量的に把握できていない。今後、より汎用的な配合設計手法とするために、それらを解明するとともに、締固め不要の状態を定量的に解明していく計画である。

参考文献

- 1) コンクリート技術シリーズ No.123 締固めを必要とする高流動コンクリートの配合設計・施工技術研究小委員会委員会報告書, 土木学会, 2020.5.
- 2) 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.
- 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.
- 4) 2017 年コンクリート標準示方書〔施工編〕; 土木学会, 2018.3.
- 5) 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.
- 6) 松本修治, 橋本学, 渡邊賢三, 橋本紳一郎; 汎用締固め不要コンクリートにおける新規の粉末分散剤と新たな充填性評価手法に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.44, No.1, 2022, pp.820-825.
- 7) 高流動コンクリートの材料・調合・製造・施工指針(案)・同解説; 建築学会, 1997.1.
- 8) 増田和機, 谷口秀明, 牛島栄; 混和剤を後添加した高流動コンクリートの諸性状, コンクリート工学論文集, 第 10 巻第 1 号, 1999.1, pp.109-122.
- 9) 中村拓馬, 高橋花苗, 藤野謙一; 高性能変性リグニン分散剤の開発とその利用, コンクリート工学年次論文集, Vol.42, No.1, 2020, pp.965-970.
- 10) 熊本光弘, 柳沼尚輝, 松本修治, 水野浩平, 橋本学, 渡邊賢三, 柳井修司, 坂井吾郎; 粉末分散剤を用いたモルタルのフレッシュ性状, 第 76 回土木学会年次学術講演会, V-316, 2021.
- 11) 松本修治, 橋本学, 渡邊賢三, 橋本紳一郎; 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.43, No.1, 2021, pp.832-837.
- 12) 河野政典; 周辺環境に配慮した現場添加型高流動コンクリートの実用化, 日本建設機械施工協会誌, Vol.70, No.4, 2018.4, pp.26-32.

Validation by Actual Application of a Self-Compacting Concrete Mix Design Method that Contributes to Productivity Improvement

*Shuji Matsumoto, Yoh Arakawa, Kohei Mizuno, 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 paper, we propose a general-purpose compounding design method for self-compacting concrete including a new evaluation test method on the basis of studies so far. By applying these methods to an actual structure, the validity of the compounding design method was clarified.