

論文 粗骨材を混入した SHCC の流動性と力学特性に関する基礎的研究

巖 樹光*1・上田 尚史*2

要旨:本研究では、粗骨材の混入が SHCC の流動性や力学特性へ及ぼす影響について実験的な検討を行った。まず、粗骨材の混入が可能な SHCC モルタルの配合と粗骨材を 20vol%混入した際の流動性に対して目標値を定め、当該目標値を満足する配合を決定した。その後、粗骨材を混入した SHCC を用いて、三等分点曲げ試験と圧縮試験を行い、粗骨材の混入が力学特性に及ぼす影響について検討した。その結果、粗骨材を混入しても 300mm 以上となるスランプフローを得ることが可能な配合を決定することが可能であることを示した。また、粗骨材を混入しても明確な曲げ硬化特性を得ることが可能であることを示した。

キーワード: SHCC, 粗骨材, PVA 繊維, PE 繊維, 曲げ硬化挙動, 流動性

1. はじめに

ひずみ硬化型セメント複合材料 (Strain Hardening Cementitious Composites, 以下 SHCC) は、一軸引張応力下においてみかけのひずみの増加を伴い応力が増加する擬似ひずみ硬化を示し、微細で高密度の複数ひび割れを形成するセメント複合材料である¹⁾。その優れた引張特性を得るために、粗骨材を含まない繊維補強モルタルであるのが一般的である。しかし、粗骨材を含まないことから、ヤング係数やひび割れ面のせん断伝達抵抗等の力学特性は低く、また収縮が大きくなるなど寸法安定性に関する配慮も必要となる。SHCC は、これまでに主に補修材料として用いられることが多いが、粗骨材を混入することでそれらの性能を高めることができれば、より広範な利用へつながると考えられる。

SHCC への粗骨材混入についての検討は、これまでもいくつかの研究者により行われている。例えば、Suryant et al.²⁾は、PVA-ECC に粗骨材を混入することにより、せん断抵抗が向上することを実験的に示している。同様に Ueda and Kawamoto³⁾は SHCC に粗骨材を混入することにより引張性能は低下するが、ひび割れ面でのせん断抵抗が向上するため、鉄筋で補強した SHCC 部材のせん断耐力はそれほど低下しないことを指摘している。また、Sahmaran et al.⁴⁾は、粗骨材を混入した ECC は、乾燥収縮が低下することで収縮ひび割れ抵抗性が増すことを示している。

以上のように、SHCC に粗骨材を混入することは、引張性能が低下する可能性があるものの、材料としてのトータルの性能を考えれば必ずしもデメリットばかりではないことが明らかとなっている。しかしながら、粗骨材を混入した SHCC の作製法に関しては、十分に知見が蓄積されているとは言い難い。

そこで本研究では、SHCC に粗骨材を混入した場合の

フレッシュ性状の変化に関して検討するとともに、適度な流動性を有する粗骨材混入 SHCC の配合に関する基礎的な検討を行った。また、粗骨材混入 SHCC の力学特性について実験的に検討した。

2. 粗骨材の混入がフレッシュ性状に及ぼす影響

2.1 粗骨材混入 SHCC の材料設計におけるコンセプト

事前の検討により、SHCC に粗骨材を混入すると、流動性が著しく低下したり、材料分離が生じたりすることが分かった。そこで本研究では、粗骨材を混入する以前の SHCC (SHCC モルタル) には十分な流動性と適度な粘性を付与することとし、流動性の基準としては 15 打のモルタルフロー値を 200mm 以上有することとした。また、粗骨材を混入した場合には、軽微な振動で流動するように、スランプフロー値が 300mm 以上となることを目標とした。

表-1 使用材料

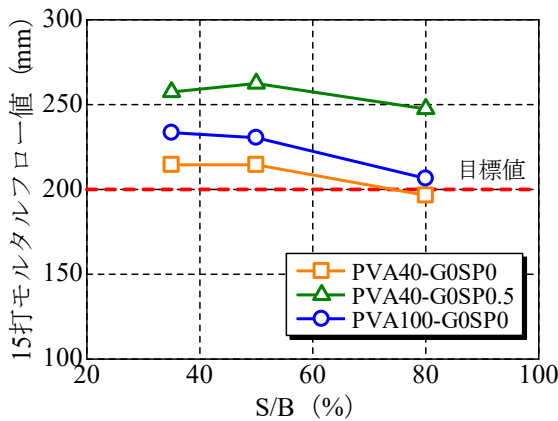
使用材料	備考
セメント (C)	普通ポルトランドセメント, 密度: 3.15g/cm ³
フライアッシュ (FA)	JISA6201 II種, 密度: 2.25g/cm ³
細骨材 (S)	七号珪砂, 密度: 2.65g/cm ³
粗骨材 (G)	最大粒径20mm, 密度: 2.66g/cm ³
ポリエチレン繊維 (PE)	繊維径12μm, 繊維長12mm, 密度: 1.0g/cm ³ 引張強度2600MPa, 弾性係数88GPa
ポリビニルアルコール繊維 (PVA40)	繊維径40μm, 繊維長12mm, 密度: 1.3g/cm ³ 引張強度1560MPa, 弾性係数41GPa
ポリビニルアルコール繊維 (PVA100)	繊維径100μm, 繊維長12mm, 密度: 1.3g/cm ³ 引張強度1200MPa, 弾性係数28GPa
混和剤 (SP)	マスターグレンウム6500×2, 密度: 1.07g/cm ³ 主成分: ポリカルボン酸エーテル系化合物

*1 関西大学大学院 理工学研究科環境都市工学専攻 (学生会員)

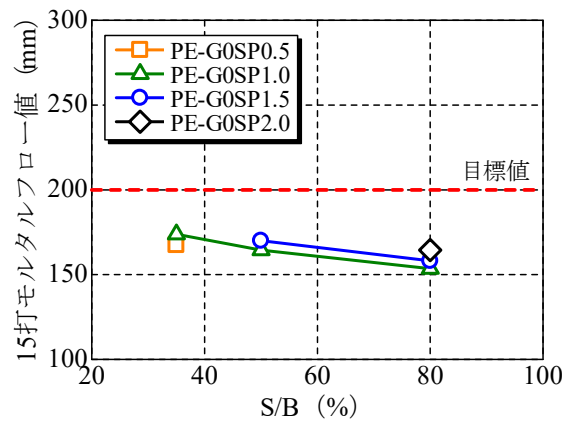
*2 関西大学 環境都市学部都市システム工学科 准教授 (正会員)

表-2 SHCC の配合・フレッシュ性状

ケース	W/B (%)	FA/B (%)	V _f (vol%)	SP/C (%)	単位水量 (kg/m ³)	モルタルフロー値 (mm)					
						S/B=35%		S/B=50%		S/B=80%	
						0打	15打	0打	15打	0打	15打
PVA40-G0SP0	45	50	2.0	0	463	144.0	214.5	143.0	214.5	122.0	196.5
PVA40-G0SP0.5				208.0		257.5	210.5	262.5	187.5	247.5	
PVA100-G0SP0				168.5		233.5	164.5	230.5	128.0	206.5	
PE-G0SP0.5				104.5		167.5	-	-	-	-	
PE-G0SP1.0				124.3		173.8	118.5	164.5	109.0	153.5	
PE-G0SP1.5				分離		125.0	170.0	112.0	158.1		
PE-G0SP2.0				-		-	-	-	114.0	164.5	
PE-G0SP2.5				-		-	-	-	分離		



(a) PVA40 および PVA100



(b) PE

図-1 モルタル 15 打フロー値と細骨材混入率の関係

2.2 使用材料および配合

実験に使用した材料の物性を表-1に、配合を表-2に示す。水結合材比 (W/B) は 45% とし、セメントの重量の 50% をフライアッシュで置換した。単位水量は 463kg/m³ とし、繊維混入率 (V_f) は 1.0vol% とした。本研究では、前節の要求性能を満足する配合を明らかにするため、単位水量、W/B、ならびに繊維混入率を一定とし、細骨材混入率と混和剤の添加量をそれぞれ変化させて検討した。細骨材混入率は、細骨材結合材比 (S/B) で 35%、50%、80% とした。混和剤の添加量は、15 打フロー値が 200mm 以上となるか材料分離が生じるまで、セメント重量に対して 0.0%~2.5% の範囲で 0.5% 刻みで増加させた。また、繊維径の違いによる影響を明らかにすることを目的として、混入繊維の種類として表-1 に示す 3 種類の短繊維を使用した。すなわち、直径 40 μm、長さ 12mm の PVA 繊維 (PVA40 と称す) と、直径 100 μm、長さ 12mm の PVA 繊維 (PVA100 と称す)、および直径 12 μm、長さ 12mm の PE 繊維 (PE と称す) である。

2.3 練り混ぜ方法およびフレッシュ試験

SHCC の練り混ぜは、二軸強制練りミキサーを用いた。SHCC モルタルにおいては、モルタルを 2 分間練り混ぜた後で繊維を混入し、さらに 2 分間練り混ぜて SHCC を作製した。粗骨材を混入する場合には、SHCC に粗骨材

を混入してさらに 2 分間練り混ぜた。フレッシュ性状試験は、モルタルフロー値は JIS R 5201 に、スランプフロー値は JIS A 1150 に、スランプ値は JIS A 1101 に準じて行った。

2.4 SHCC モルタルのフレッシュ性状

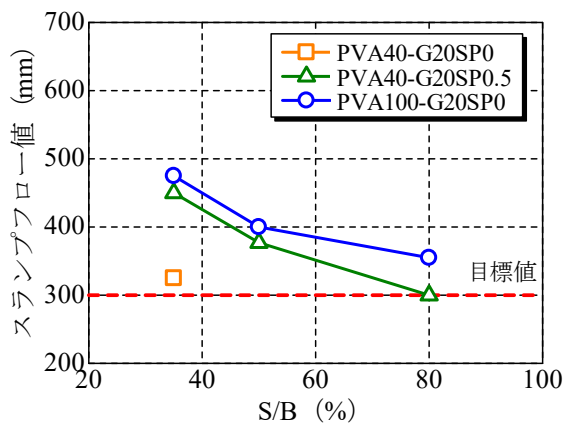
表-2 および図-1 に SHCC モルタルのフレッシュ性状の結果を示す。表-2 には、各配合におけるモルタルフロー値として、0 打と 15 打フローを示している。また、「分離」と記載されているものは、材料分離が生じたものである。良好な状態と分離した状態の比較例を写真-1 に示す。また、図-1 は S/B と 15 打フロー値の関係を示している。

図-1 より PVA40 では、混和剤添加量が 0.0% のときには、S/B が 35 ならびに 50% の場合には 15 打フロー値が目標値を満足したのに対して、S/B が 80% の場合には、わずかではあるものの目標値には達しなかった。混和剤をセメント重量に対して 0.5% 添加した場合には、いずれの S/B に対して目標値を達成した。また、PVA100 においては、いずれの S/B に対しても、混和剤を添加することなしに目標値を満足する結果となった。一方、PE を用いた場合には、流動性が著しく低い結果となり、混和剤添加量を増加させたとしても、15 打フロー値が目標値に達する前に、材料分離が生じる結果となった。

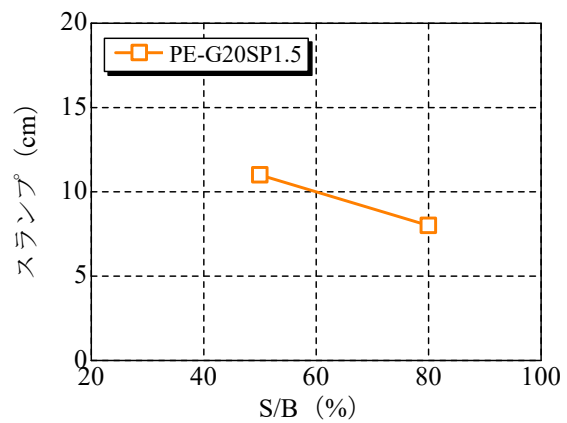
表-3 粗骨材を20%混入したSHCCの配合・フレッシュ性状

ケース	V _f (vol%)	V _G (vol%)	SP/C (%)	単位水量 (kg/m ³)	スランブフロー値(mm)		
					S/B=35%	S/B=50%	S/B=80%
PVA40-G20SP0	1.0	20	0	369	325.0	-	-
PVA40-G20SP0.5			0.5		450.0	377.0	300.0
PVA100-G20SP0			0		475.0	400.0	355.0
PE-G20SP1.0			1.0		(4.5) (分離)	(4.0)	(5.5)
PE-G20SP1.5			1.5		-	(11.0)	(8.0)
PE-G20SP2.0			2.0		-	-	(9.5) (分離)
PE-G20SP2.5			2.5		-	-	-

*()書きはスランブ値 (cm)



(a) PVA40 および PVA100



(b) PE

図-2 スランブフロー値およびスランブと細骨材混入率の関係

次に、PE-G0SP0.5を除く配合に対して、粗骨材を体積混入率で20%混入し ($V_G=20\text{vol}\%$)、適度な流動性と材料分離抵抗性を有する配合を検討した。表-3 および図-2に、粗骨材を20vol%混入したSHCCのスランブフロー値を示す。表中において () 書きの結果は、スランブフローが得られなかったものであり、参考までにスランブを記載している。表-3より、PE繊維を用いた場合には、いずれの配合においてもスランブフローは得られなかった。また、図-1, 2より、流動性が同程度のSHCCモルタルであっても粗骨材を混入した後は流動性の低下の程度が大きく異なる結果となった。例えば15打モルタルフロー値が250mm前後の配合を比較すると、PVA100の場合と比較してPVA40の配合ではスランブフロー値は急激に低下した。この結果から、繊維径が細いほど粗骨材と繊維の絡み合いが大きくなったものと考えられる。

以上の結果は、繊維径の違いにより生じており、繊維径が小さくなるほどモルタルとの混合が困難となり流動性は低くなったのである。本来の材料設計であれば、繊維径に応じてモルタルの配合を修正していくことになるが、本研究では以上の結果を基にして、粗骨材混入をするSHCCモルタルの配合を決定した。本研究では、PVA40ならびにPVA100を用いた場合には、S/Bを35%とし、



写真-1 材料分離の比較

混和剤添加量は0.0%とした。一方、PEを用いた場合には、S/Bを50%とし、混和剤添加量はセメント重量の1.5%とした。

上記の基本配合に対して、粗骨材の混入率を0~10vol%と変化させた場合に流動性がどのように変化するかを検討した。表-4、図-3に流動性と粗骨材の関係を示す。なお、図には前述した粗骨材混入率20vol%のケースの結果も示している。図より、いずれの繊維を用いた場合においても、粗骨材混入率が増えるにつれ、スランブフロー値はほぼ直線的に低下することが確認された。粗骨材混入率の増加により粗骨材と繊維の絡み合いが促

表-4 粗骨材混入率による流動性の変化

ケース	Vg (vol%)	SP/C (%)	S/B (%)	単位水量 (kg/m ³)	スランプフロー値 (mm)
PVA40-G0	0	0	35.0	463	575.0
PVA40-G5	5			439	520.0
PVA40-G10	10			416	435.0
PVA100-G0	0			463	625.0
PVA100-G5	5			439	590.0
PVA100-G10	10			416	550.0
PE-G0	0	1.5	50.0	463	450.0
PE-G5	5			439	325.0
PE-G10	10			416	-

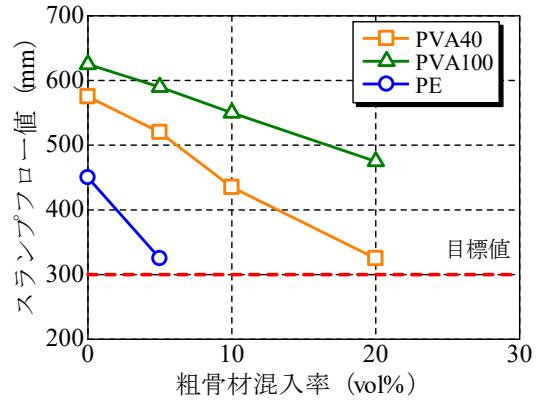


図-3 スランプフロー値と粗骨材混入率の関係

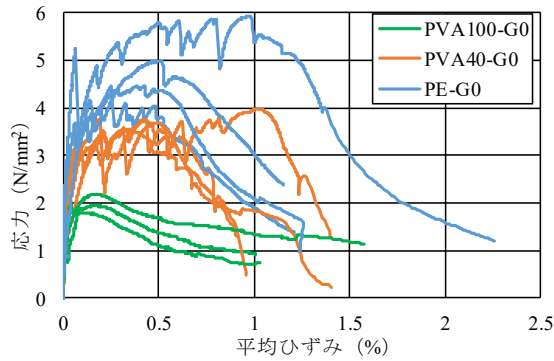


図-4 引張応力-平均ひずみ関係

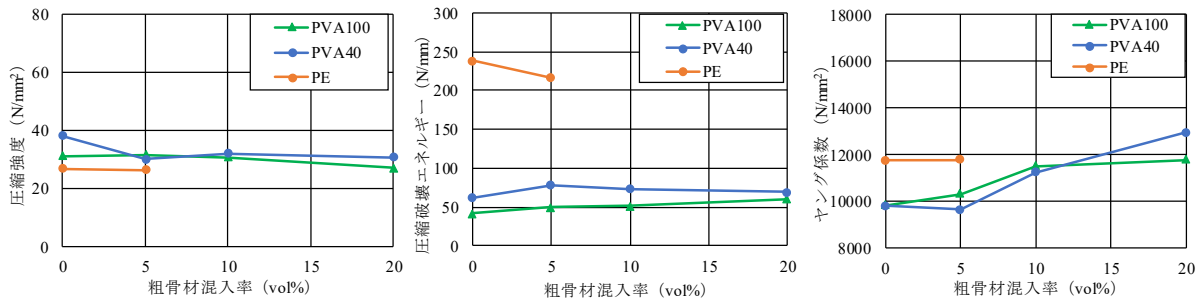


図-5 圧縮実験結果

進されることが考えられるため、混入率の増加に伴い流動性が急激に下がったものとする。

3. 粗骨材混入率が SHCC の力学特性に及ぼす影響

3.1 供試体および力学試験概要

前節で検討した SHCC に対して、力学特性を把握するために圧縮強度試験ならびに三等分点曲げ試験を行った。ただし、SHCC モルタルの引張特性は直接一軸引張試験で評価した。すべての供試体は打設の 24 時間後に脱型し、28 日間水中養生した上で載荷試験を行った。

圧縮強度試験には、寸法 $\phi 100 \times 200 \text{mm}$ の円柱供試体を用いた。また、変位計を用いてポストピーク領域における軸方向変位を計測し、圧縮破壊エネルギーを求めた。圧縮破壊エネルギーは、本研究では圧縮強度の 20% まで応力が低下するまでに吸収した単位面積あたりのエネルギーとした。三等分点曲げ試験には寸法 $100 \times 100 \times 400 \text{mm}$

の角柱供試体を用いた。実験では、荷重と供試体の中央部のたわみを計測した。直接一軸引張試験には寸法が幅 30mm、厚さ 13mm の断面を有するダンベル型供試体を用いた。供試体軸方向に検長区間 150mm のパイ型変位計を設置して、供試体の伸びから平均ひずみを算出した。なお、いずれの試験も 1 水準あたり 3 体実施した。

3.2 SHCC モルタルの引張特性

図-4 に一軸引張試験から得られた引張応力-平均ひずみ関係を示す。図より、PVA40 と PE を混入した供試体では、明確な疑似ひずみ硬化挙動が得られた。一方、PVA100 を用いた場合には、疑似ひずみ硬化挙動は認められなかった。引張強度は、PVA40 を混入した場合は $3 \sim 4 \text{N/mm}^2$ であり、PE を混入した場合は $4 \sim 6 \text{N/mm}^2$ であり、PE を用いた方が引張強度は高くなった。また、終局ひずみは $0.5 \sim 1.2\%$ 程度でばらついており、繊維種類による違いは明確には認められなかった。

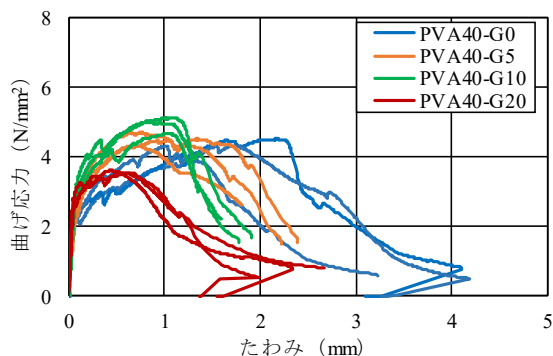


図-6 PVA40 の曲げ応力-たわみ関係

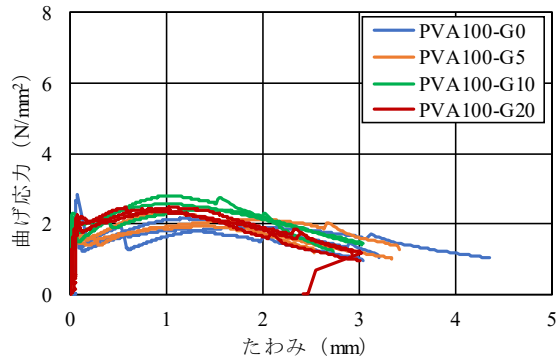


図-7 PVA100 の曲げ応力-たわみ関係

3.3 圧縮特性

図-5 に、圧縮強度試験から得られた、ヤング係数、圧縮強度および圧縮破壊エネルギーを示す。なお、PVA40-G0 については、試験材齢が 38 日であったため参考値として示している。図より、ヤング係数は粗骨材混入率が増加することによりより大きくなることが認められた。一方、圧縮強度や圧縮破壊エネルギーについては、粗骨材混入の影響は明確ではなかった。なお、PE を用いた供試体は PVA を用いた供試体と比較して圧縮破壊エネルギーが大きい結果となった。既往の研究と同様に、繊維の引張強度が大きいほど圧縮応力が緩やかに低下していく傾向が認められた。

3.4 曲げ特性

図-6 から図-8 に三等分点曲げ試験で得られた曲げ応力-たわみ関係を示す。

図-6 より、PVA40 を混入した場合には、粗骨材混入率が 10vol%程度までは曲げ強度は大きくなったが、曲げ強度時のたわみは低下した。このとき、粗骨材混入率が増加することで、たわみ硬化時の傾きが大きくなる傾向が見られた。一方、粗骨材を 20vol%混入すると、曲げ強度と曲げ強度時のたわみは低下した。このことから、PVA40 を混入した場合には、粗骨材の混入は曲げ強度と曲げ強度時のたわみの両方に対して影響することが分かる。なお、等曲げ区間には複数の曲げひび割れが確認された。

図-7 により、PVA100 を混入した場合には、粗骨材の混入に関わらず曲げ強度や曲げ強度時のたわみに有意な差は認められなかった。曲げひび割れの本数は、粗骨材の混入の有無にかかわらず、一本ないし二本のひび割れしか入らなかった。

図-8 により、PE 繊維を混入した場合には、粗骨材を混入すると曲げ強度と終局たわみが小さくなる傾向が見られた。

写真-3(a), (b), (c)は各繊維における曲げ破壊時のひび割れ分布、また(d)は PVA40 を混入した供試体の曲げ試験後の破断面を顕微鏡で確認したものであ

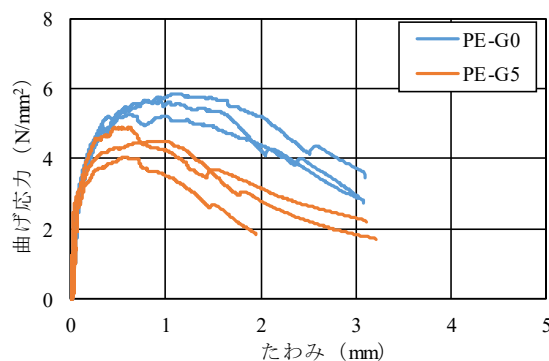


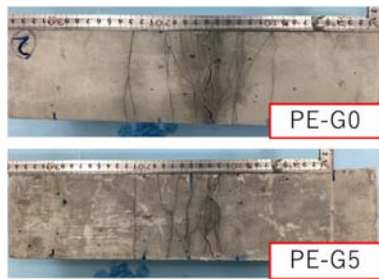
図-8 PE の曲げ応力-たわみ関係

る。写真に見られるように、粗骨材の周囲 1000 μ m 程度の領域には繊維は見られなかった。また、ひび割れは粗骨材とマトリクスの境界面において生じている傾向があることが分かった。粗骨材の混入により、繊維の架橋が粗骨材により物理的に阻害されるため引張特性は低下すると考えられる。しかし、骨材のより近傍に繊維を配置することができれば、骨材とマトリクスの界面に代表される脆弱部の微細なひび割れ進展を抑制することができ、引張特性の低下を抑制できる可能性があると考えられる。この点については今後の課題としたい。

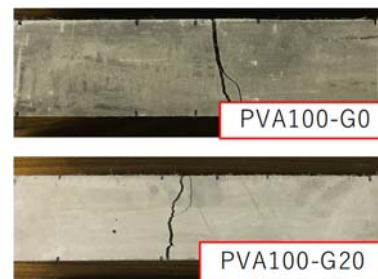
4. 結論

本研究では、SHCC への粗骨材の混入が流動性と力学特性に及ぼす影響について実験的に検討した。本研究で得られた知見を以下に示す。

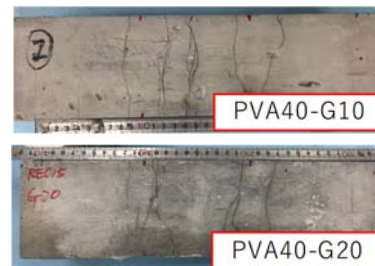
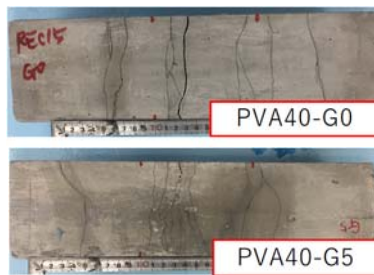
- 1) 直径 40 μ m ならびに 100 μ m で長さ 12mm の PVA 繊維 (PVA40 ならびに PVA100) を用いた場合、粗骨材混入率 20vol%であってもスランプフロー値 300mm が得られる配合が可能であることが分かった。
- 2) 直径 12 μ m で長さ 12mm の PE 繊維を用いた場合には、粗骨材混入率 5vol%程度であればスランプフロー値 300mm が得られる配合が可能である。
- 3) 三等分点曲げ試験を行った結果、SHCC モルタルの引張性能が高い場合には、曲げ強度や曲げ強度時のたわみが低下する傾向が見られた。ただし、その傾向は使



(a) PE のひび割れ分布



(b) PVA100 のひび割れ分布

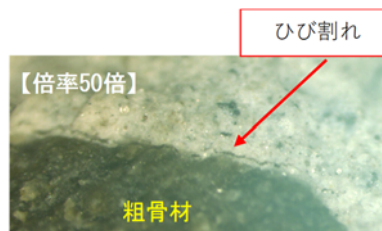


(c) PVA40 のひび割れ分布

繊維：○ 粗骨材：△



(d-1) 骨材周辺の繊維



(d-2) 骨材周りのひび割れ



(d-3) 骨材の剥離跡

(d) PVA40 のひび割れ断面の状態

写真-3 曲げ実験結果

用繊維の違いにより変わってくるが見られた。一方、SHCC モルタルの引張性能がそれほど高くない場合は、繊維混入により曲げ挙動が大きく低下することはなかった。

参考文献

- 1) 土木学会：複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料設計・施工指針（案），コンクリートライブラリー127，2007.
- 2) Suryant, B., Nagai, K. and Maekawa, K. : Role of Coarse Aggregate in High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composite, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.385-390, 2009.
- 3) Ueda, N. and Kawamoto, A. : Influence of Coarse

Aggregate on the Mechanical Behavior of Strain Hardening Cementitious Composites, Strain-Hardening Cement-Based Composites, RILEM, Vol.15, pp 139-146, 2017.

- 4) Sahmaran, M., Yucel, H. E., Demirhan, S., Arik, M. A. and Li, V. C. : Combined Effect of Aggregate and Mineral Admixtures on Tensile Ductility of Engineered Cementitious Composite, ACI Material Journal, Vol.109, No.6, pp.627-637, 2012.
- 5) 飯塚貴洋, 水田武利, 高田浩夫, 六郷恵哲：PE 繊維の性能ならびに混入率が HPRCC のひび割れ性状に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.267-271, 2008.