

論文 繊維の複合効果がハイブリッド型繊維補強セメント複合材料の引張性状に及ぼす影響

吉田 理紗^{*1}・菊田 貴恒^{*2}・西脇 智哉^{*3}・三橋 博三^{*4}

要旨: 高強度かつ高靱性の繊維補強セメント複合材料を開発するため、調合条件を適切に選定する必要がある。本研究では、合成繊維と2種類の形状異なる鋼繊維を組み合わせて混入し、その複合効果が引張性状に与える影響を明らかにすることを目的とする。繊維の組合せおよび混入率、鋼繊維形状をパラメータとして一軸引張試験を行った。その結果、繊維の複合効果をより発揮させる混入率を適正化することで高強度かつ高靱性な引張性状が得られた。合成繊維混入率には適正範囲が存在し、鋼繊維形状によりその適正範囲が異なること、鋼繊維は分散性を確保できれば混入率の増加に伴いより優れた引張性状を示すことがわかった。
キーワード: 繊維補強セメント, 鋼繊維, 合成繊維, 一軸引張試験

1. はじめに

セメント系複合材料の高靱性化の手法の1つとして、繊維補強セメント複合材料(Fiber Reinforced Cementitious Composite, 以下 FRCC)が挙げられ、繊維を混入することで引張応力下での変形性能を高めている。さらに、2種類の物性の異なる繊維を混入することで、それぞれの弱点を補い、さらに複合効果を期待したハイブリッド型繊維補強セメント複合材料(Hybrid Fiber Reinforced Cementitious Composites, 以下 HFRCC)が提案されている。筆者ら(例えば¹⁾は繊維の複合化によって、図-1のように高強度かつ高靱性なセメント材料の開発を目指すために、一軸引張応力下における HFRCC の引張性状に及ぼす繊維および調合条件の選定などを行ってきた。

本研究では、繊維の複合効果を明らかにして適切な材料構成を見出すことを目的として、合成繊維と鋼繊維の混入率および鋼繊維形状をパラメータとして HFRCC の引張性状への影響について実験的検討を行った。

2. HFRCC における繊維の複合効果

Rossi はひび割れのレベルによって最適な繊維により補強すべきというマルチスケールコンセプトを提案している²⁾。ひび割れ開口の小さなマイクロレベルでは、多量の繊維が必要とされ、繊維径が小さく短い必要があるとされる。一方で、ひび割れ開口がある程度大きくなったメゾレベルでは、十分に架橋できるように繊維は長い方が適切である。すなわち、両レベルのひび割れには、短く細い繊維と長い繊維の2種類混入することが望ましいと考えられる。そこで本研究では、図-2 に示すようにマイクロレベルのひび割れを補強するために、径が小さく

短い合成繊維を用いて、メゾレベルのひび割れを補強するために剛性が高く長い鋼繊維を用いて物性の異なる2種類の繊維を混入した。さらにメゾレベルにおいて、鋼繊維が引き抜ける際に周囲のマトリクスを破砕するが、その部分を合成繊維が補強する効果が期待できる。

3. 実験概要

3.1 使用材料および調合

本研究では表-1 に示すように、鋼繊維はフック加工鋼繊維(HDR)およびスチールコード(SC)を使用した。なお、SC は直径 0.15mm の鋼繊維を5本集束して撚られており写真-1 のように、繊維表面に凹凸性状がある。また合成繊維にはポリエチレン繊維(PE) を用いた。使用

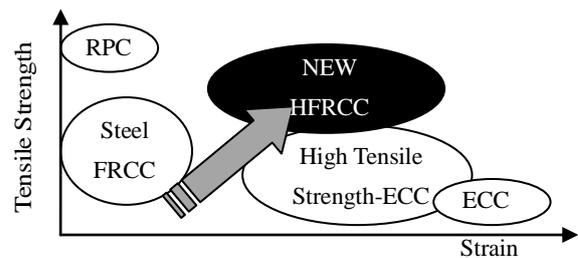


図-1 HFRCC 開発の概念図

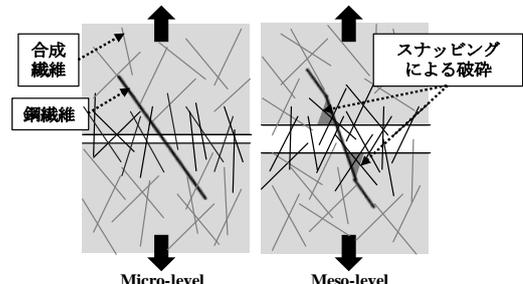


図-2 繊維の複合効果

*1 東北大学大学院工学研究科 都市・建築学専攻 博士課程前期 (現大林組) (正会員)

*2 東北大学大学院工学研究科 都市・建築学専攻助教 博士(工学) (正会員)

*3 東北大学大学院工学研究科 都市・建築学専攻准教授 博士(工学) (正会員)

*4 東北大学 名誉教授 工博 (正会員)

した材料は、早強ポルトランドセメント(C, 密度: 3.14g/cm³), 細骨材に珪砂 7号(S, 密度: 2.61g/cm³), 混和材としてシリカフェューム(SF, 密度: 2.20g/cm³), 高性能減水剤(ポリカルボン酸系, 密度: 1.05 g/cm³)であり, 調合を表-2 に示す。繊維は外割りで混入し, 鋼繊維量の影響を検討するために鋼繊維を 0.25%刻みで 0%から 2%まで混入し, 合成繊維を 1%に固定した。同様に合成繊維量を検討するために合成繊維を 0%から 2%混入し, 鋼繊維を 1%とした。

3.2 練混ぜおよび養生

練混ぜには, 容量 5 リットルのオムニミキサーを使用し, 粉体および細骨材を 1 分間空練り後, 水と減水剤, 合成繊維, 鋼繊維の順に投入しそれぞれ 3 分間ずつ混練した。打設後 24 時間湿空養生を行い, 脱型後は標準養生として材齢 7 日で載荷試験を行った。

3.3 試験体形状および一軸引張試験方法

本研究ではダンベル型試験体を使用した。なお, 試験体の断面寸法は 30mm×30mm と, 鋼繊維が軸方向に配向しやすい条件になっているが, 土木学会の指針³⁾にしたがって各調合で試験体を 6 体ずつ作製し, 万能試験機を用いて一軸引張試験を行った。試験体両端部の支持条件を固定とし, 載荷時の変位は, 試験体の材軸と平行に

なるよう, 高感度変位計を設置して計測した。なお, 検長区間は 80mm と設定した。

3.4 引張性状の評価

一軸引張試験結果を定量化する目的で, 強度の評価については初期ひび割れ時応力 σ_i , ひずみ硬化応力 $\Delta\sigma$ 及び引張強度 σ_t を用い, 靱性の評価には, 最大荷重時ひずみ ε_p , 引張終局ひずみ ε_{ult} , 引張破壊エネルギー G_{ft} 及び引張靱性指標をそれぞれ定義して用いた。

図-3 に示すように, 最大荷重時応力と初期ひび割れ時応力の差分をひずみ硬化応力 $\Delta\sigma$ とする。最大荷重時応力を引張強度 σ_t とする。引張強度に達した後, 急激に応力の低下が生じる場合には, 引張強度時のひずみを引張終局ひずみと同義とする。それに対して, 初期ひび割れ後に疑似ひずみ硬化挙動を示す場合は, ひずみ軟化域において初期ひび割れ応力と同じ応力まで降下した点のひずみを, 引張終局ひずみ ε_{ult} と定義する。図-4 のように, 引張応力-変位曲線の面積を積分したものを引張破壊エネルギー G_{ft} とし, 図-5 のようにある変位区間の引張破壊エネルギーを, その変位区間 d と最大荷重 F_t の積で除したものを, 引張靱性指標と定義する。なお変位区間は, 0mm から 2.4mm(検長区間のひずみ 3%に相当), 0mm から最大荷重時変位 d_p , d_p から 2.4mm とする。

表-1 繊維物性

繊維物性		密度 (g/cm ³)	繊維長 (mm)	直径 (μ m)	引張強度 (MPa)	アスペクト比
鋼繊維	HDR	7.85	30	380	2911	78.9
	SC	7.84	32	400	2850	80
合成繊維	PE	0.97	6	12	2580	500

表-2 調合表

Series	SF/B (Wt.%)	C/B (Wt.%)	S/B (Wt.%)	W/B (Wt.%)	Fiber(Vol.%)	
					Steel	PE
(Steel0-2)-PE1	20	80	45	30	0~2	1
(PE0-2)-Steel1					1	0~2

※B=C+SF ※Steel=HDRorSC

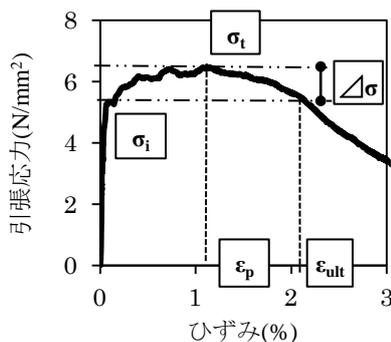


図-3 引張終局ひずみ

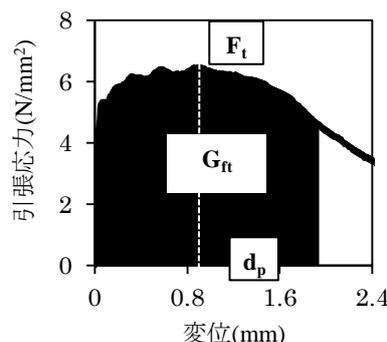


図-4 引張破壊エネルギー

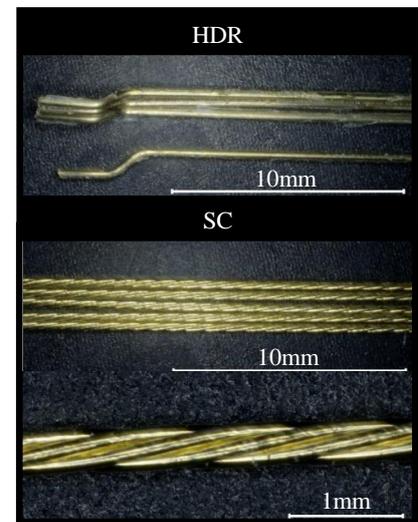


写真-1 鋼繊維

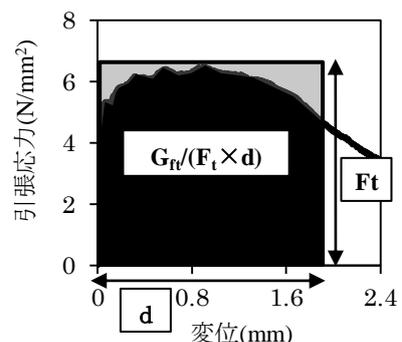
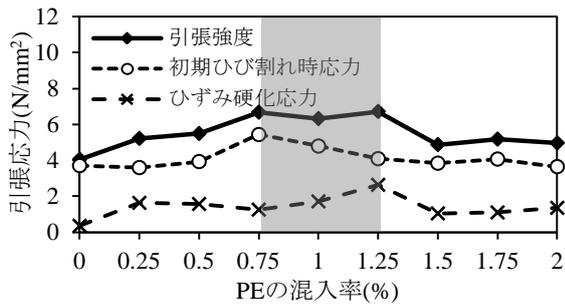
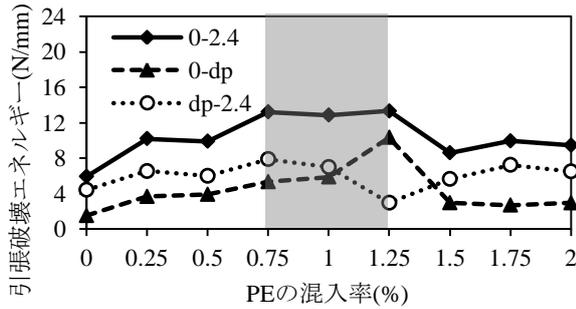


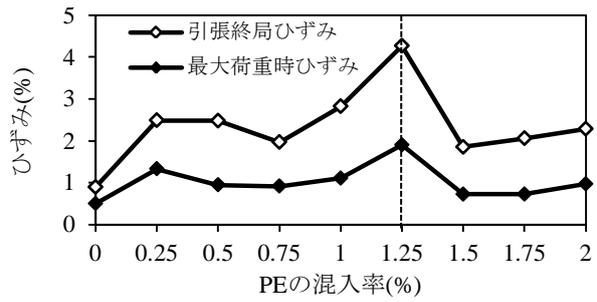
図-5 引張靱性指標



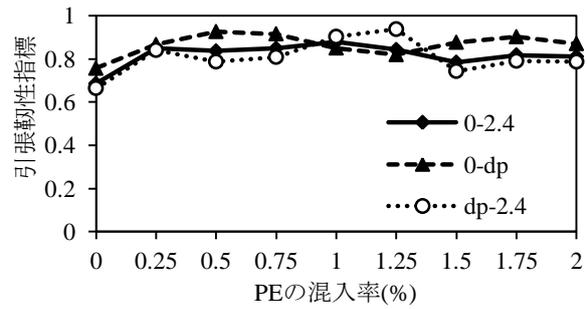
(1) 強度



(3) 引張破壊エネルギー



(2) 引張終局ひずみ及び最大荷重時ひずみ



(4) 引張靱性指標

図-6 PEの混入率が(PE0-2)-HDR1シリーズの引張性状に及ぼす影響

4. 実験結果および考察

4.1 合成繊維混入率と鋼繊維形状が及ぼす影響

図-6, 7, 8に合成繊維 PE を 0%から 2%まで変化させて混入し、鋼繊維 1%と組み合わせた(PE0-2)-Steel1シリーズの引張性状および引張応力-ひずみ曲線モデルを示す。なお引張応力-ひずみ曲線モデルでは、各繊維混入率における、初期ひび割れ時応力及びひずみ、引張強度及び最大荷重時ひずみや、引張終局ひずみの平均値をプロットした。

(1) (PE0-2)-HDR1 シリーズ

図-6(1)(3)から、合成繊維 PE の混入率が HFRCC の引張強度と引張破壊エネルギー(0-2.4mm)に及ぼす影響は低い傾向にあるものの、PE0.75%から 1.25%において繊維の複合効果が最も発揮されている。特に、PE 混入率 1.25%では、ひずみ硬化域を評価したひずみ硬化応力、引張破壊エネルギー(0-d_p mm)および図-6(2)の最大荷重時ひずみや、ひずみ軟化域も評価した引張終局ひずみが極大値となる。このように、複合効果がより発揮される合成繊維混入率には適正な範囲が存在することが示された。これは、PE 混入率が低いとミクロレベルの微細なひび割れに対する架橋効果が小さくひずみ硬化が劣り、メゾレベルでは鋼繊維 HDR の引き抜ける際の周囲のマトリクスの補強効果が小さくなるためと考えられる。逆に PE 過多の場合には繊維同士の接触部分が力学的な欠陥となると考えられ⁴⁾。また図-6(4)から、引張靱性指標は PE 混入率と相関性が得られなかった。

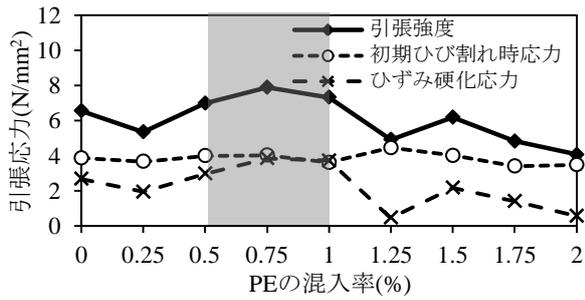
(2) (PE0-2)-SC1 シリーズ

図-7(1)(3)から、PE 混入率を 0.5%から 1%とした場合において、繊維の複合効果が最も大きいことがわかる。引張破壊エネルギー(0-d_p mm)および図-7(2)の最大荷重時ひずみや引張終局ひずみは、PE1%で極大値となっている。これは、前述の(PE0-2)-HDR1 シリーズと同様に、PE が少量であると架橋効果が小さく、混入率が 1%よりも多量であると PE 同士の接触が力学的な欠陥となるためと考えられる。また、図-7(4)から、引張靱性指標への PE 混入率の影響は低いと考えられる。

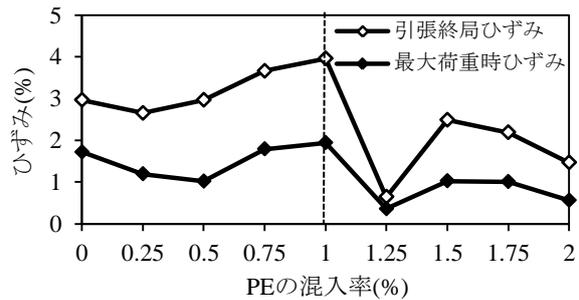
(3) 鋼繊維形状の影響

PE の最大充填繊維混入率 $V_{f,max}$ は 1.06%であるが⁴⁾、HDR と SC を用いた場合では、PE との複合効果がより発揮される PE 混入率の範囲や極大値が異なる。これは、SC の架橋メカニズムは繊維表面の微細な凹凸とマトリクスの摩擦力抵抗力を期待しており¹⁾、微視的な繊維表面とマトリクスの付着が重要だが、混入率 1.25%以上では PE 同士の接触が微細な凹凸とマトリクスの付着性能を下げたためと考えられる。一方、HDR では PE 混入率 1.25%は適正範囲内である。これは、HDR のひび割れの架橋メカニズムは繊維端部のフックの変形によるもので SC より巨視的なため、微視的な PE 同士の接触は比較的影響が小さいためと考えられる。

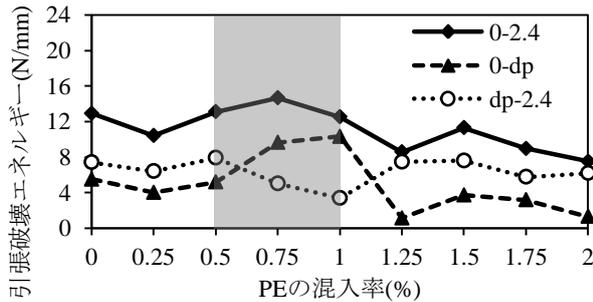
図-8 から、HDR1%のみの FRCC は比較的低い引張特性を示すが、(PE0.25)-HDR1 の HFRCC を比較すると、PE が少量であっても繊維の複合効果によって、ひずみ硬化域が大きく向上することがわかる。一方 SC の場合は、単独の FRCC でも比較的高い引張特性を示し HDR と比



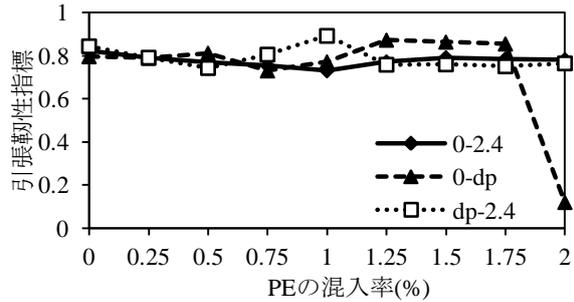
(1) 強度



(2) 引張終局ひずみ及び最大荷重時ひずみ



(3) 破壊エネルギー



(4) 靱性指標

図-7 PEの混入率が(PE0-2)-SC1シリーズの引張性状に及ぼす影響

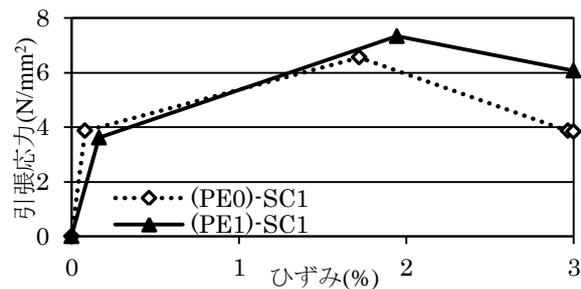
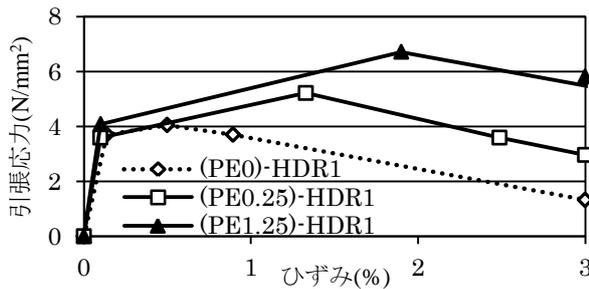


図-8 各混入率における(PE0-2)-Steel1シリーズの引張応力-ひずみ曲線モデル

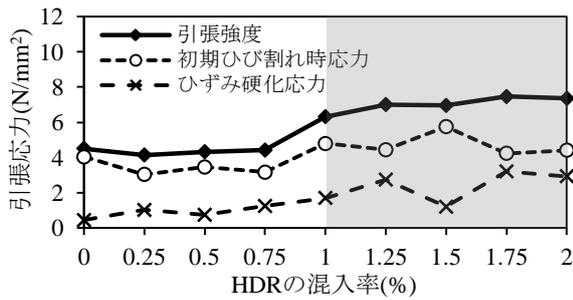
べると PE との複合効果は小さい。これは SC の方が繊維 1 本当たりの質量が小さく、同混入率において絶対繊維本数が多いため、微細なひび割れに対しても架橋効果が比較的あることや、表面の凹凸性状による高い摩擦抵抗力が得られるため^りと考えられる。

4.2 鋼繊維量と形状が引張性状に及ぼす影響

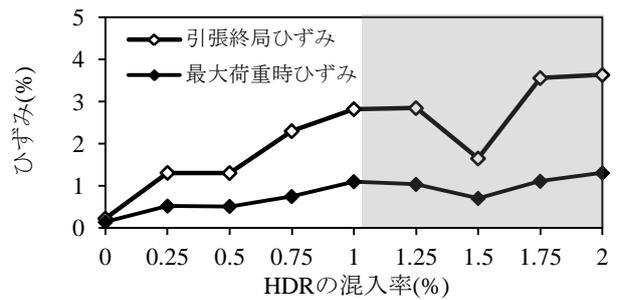
(1) (HDR0-2)-PE1 シリーズ

(HDR0-2)-PE1 シリーズの引張性状及び引張応力-ひずみ平均曲線を図-9, 10 に示す。図-9(1), 10 から、PE1%及び HDR0%から 0.75%まで混入した HFRCC の引張強度は繊維のないマトリクス強度と同等の 4N/mm^2 程度である。しかしながら、図-10 のように繊維なしマトリクスと PE1%の引張応力-ひずみ曲線を比較すると PE を 1%混入した試験体はひずみ軟化が緩やかになっており、さらに(HDR0.25)-PE1 と比較すると、HDR を 0.25%のみ加えた場合でも、引張強度はあまり変化しないものの疑似ひずみ硬化現象が生じ、ひずみ軟化もより緩やかになり、鋼繊維量の増加に伴い靱性向上することがわかっ

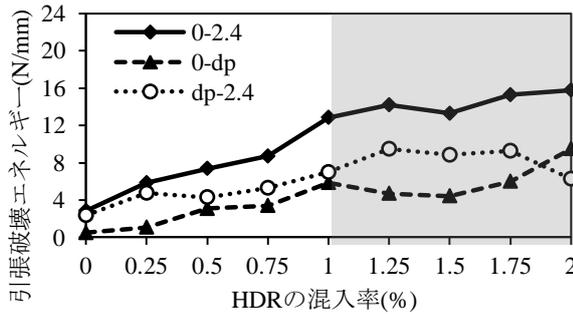
た。HDR1%を境に引張強度も高くなっている。靱性についても図-9(2) (3) (4) のように、HDR1%を境に概ね高くなっている。しかしながら、混入率を増加させることで絶対的な繊維本数が増加するにも関わらず、HDR1%以上では HDR 混入率を増加させても、引張性状にはあまり影響が見られなかった。そこで、試験体の力学的な弱点部分であると考えられる破断面付近における試験体断面 ($30\text{mm} \times 30\text{mm}$) の繊維本数を数えたところ、図-11 のような平均鋼繊維本数と鋼繊維の混入率の関係が得られた。HDR1%以上では繊維本数が 100 本程度と同程度であり、この繊維本数が引張性状に対して支配的にはたらくためと考えられる。また、HDR1%以降で繊維本数が同程度となった理由として HDR1.5%以上ではフレッシュ性状で分散性が悪化したことが挙げられる。また写真-2(a)の矢印方向に打設したとき、繊維 1 本当たりの質量が比較的大きく沈降しやすいという HDR の性質から局所的に偏りが生じやすく、SC と比べて繊維の絶対本数が少ないためと考えられる。よって、繊維の複合効果を増大させ



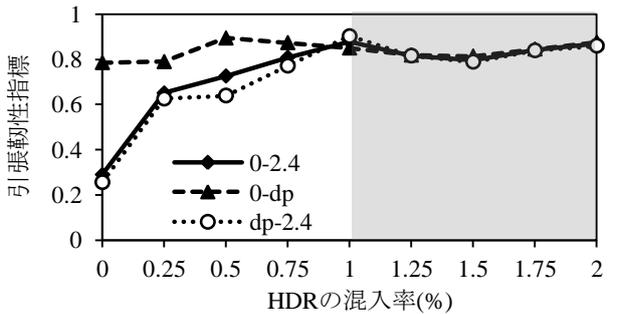
(1) 強度



(2) 引張終局ひずみ及び最大荷重時ひずみ



(3) 破壊エネルギー



(4) 靱性指標

図-9 HDRの混入率が(HDR0-2)-PE1シリーズの引張性状に及ぼす影響

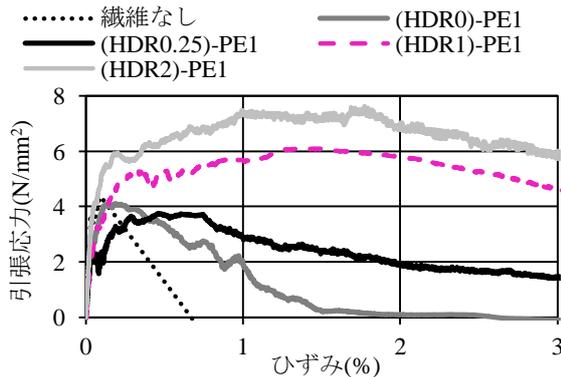


図-10 (HDR0-2)-PE1の引張応力-ひずみ曲線

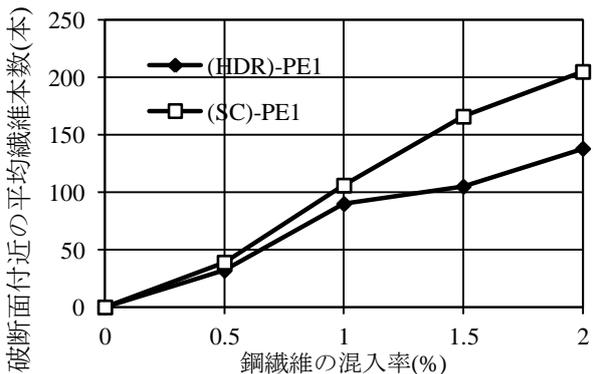
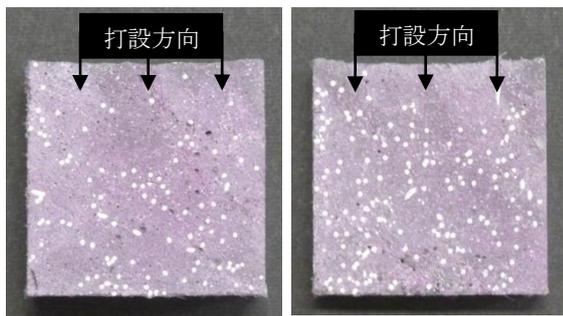


図-11 破断面付近の平均鋼繊維本数と混入率の関係



(a) (HDR1.5)-PE1 (b) (SC1.5)-PE1

写真-2 破断面付近の鋼繊維の分布の様子

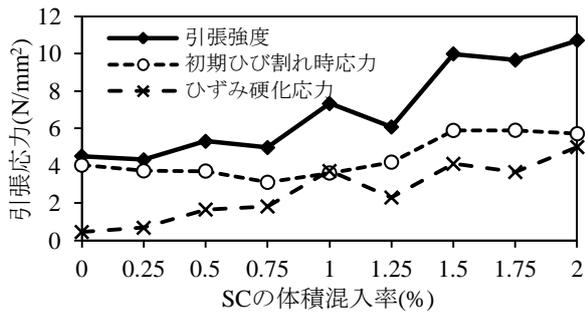
るためには、フレッシュ性状で HDR の存在確率を安定化させるマトリクス材料構成も重要である。

(2) (SC0-2)-PE1 シリーズ

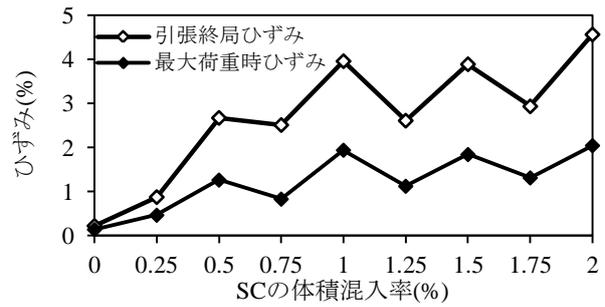
(SC0-2)-PE1 シリーズの一軸引張試験より得られた引張性状を図-12に示す。図-12のように SC の混入率の増加に伴い、若干の変動はあるものの、HDR に比べてコ

ンスタントにより優れた引張性状を示している。図-11に示すように SC の混入率の増加に伴い、試験体破断面付近の平均繊維本数も多くなり、概ね比例関係にある。これは、SC の形状では繊維 1 本当りの質量が HDR に比べて小さく、同じ混入率の場合では SC の方が繊維本数の絶対数が多いので存在確率が高く、写真-12(b)のように弱点となる局所的な偏在を避けやすいと考えられる。よって、鋼繊維の局所的な偏在を防げれば、鋼繊維混入率の増加に伴いより優れたひずみ硬化とより緩やかなひずみ軟化を期待できる可能性が示された。

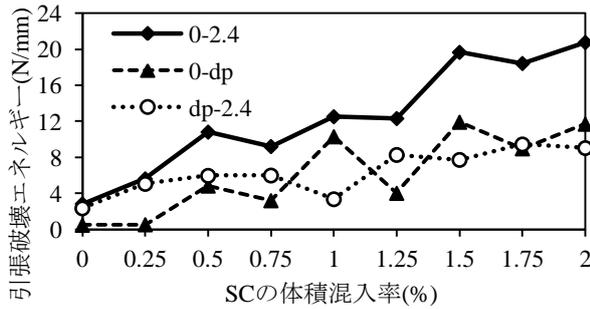
引張靱性指標について図-6(4), 7(4)では合成繊維 PE の混入率によらず、0.8 近傍を推移するのに対して、図-9(4), 12(4)からひずみ軟化域の d_p -3% の区間では鋼繊維混入率によって HDR の場合は 1% まで、SC の場合は 0.5% まで引張靱性指標が増加する。したがって、引張靱性指数(0-3%, d_p -3%)では鋼繊維混入率が支配的な要因であり、



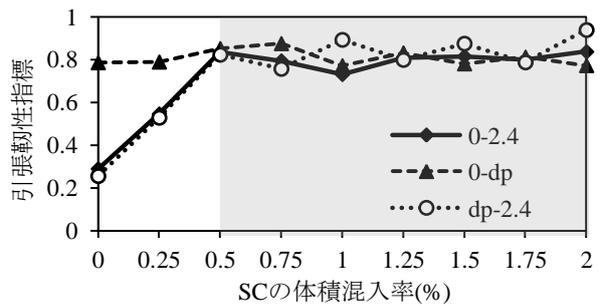
(1) 強度



(2) 引張終局ひずみ及び最大荷重時ひずみ



(3) 破壊エネルギー



(4) 靱性指標

図-12 SCの混入率が(SC0-2)-PE1シリーズの引張性状に及ぼす影響

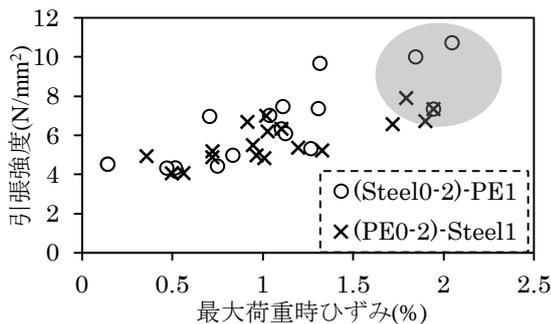


図-13 HFRCCの引張性状に及ぼす繊維の複合効果

HDR 混入率 1%以上, SC 混入率 0.5%以上で引張靱性指標は 0.8 近傍を推移することがわかった。

4.3 HFRCC の引張性状に及ぼす繊維の複合効果

本研究で得られた各シリーズの引張強度-最大荷重時ひずみ関係を図-13に示す。マトリクスは表-2に示すように同様な構成条件であるにも関わらず、繊維の複合効果をより発揮させる混入率を適正化することで、高強度かつ高靱性な HFRCC を開発することがわかった。

5. まとめ

本研究では繊維の複合効果によって HFRCC の引張性状は大きく変化し、混入率を適正化することで高強度かつ高靱性の HFRCC を開発することができた。以下に、得られた知見まとめる。

- (1) HFRCC の合成繊維の混入率は、過少であるとマイクロレベルのひび割れに対する架橋効果が小さく、メゾ

レベルでは鋼繊維の引き抜ける際の補強効果が小さい。逆に過多であると繊維同士の接触が欠陥となるため、鋼繊維との複合効果がより発揮される合成繊維混入率には適正範囲が存在すると考えられる。

- (2) 鋼繊維の分散性が確保できれば、混入率の増加に伴い、HFRCC のより優れたひずみ硬化と緩やかなひずみ軟化を期待できる。
- (3) 鋼繊維形状によって、繊維の複合効果がより発揮される合成繊維の適正範囲が異なり、また鋼繊維形状によっては鋼繊維の混入率を増加させると繊維のフレッシュ性状で分散性が低下するため、形状と混入率に適したマトリクスの構成が重要である。

参考文献

- 1) 吉田理紗, 三橋博三: ハイブリッド型繊維補強セメント複合材料の引張性状に及ぼす鋼繊維および合成繊維の複合効果, 繊維補強セメント系複合材料に関するシンポジウム論文集, pp.285-288, 2012.9
- 2) P. Rossi : Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concretes (UHPFRC) – an overview, Fiber-Reinforced Concrete (FRC) BEFIB'2000, RILEM, pp.87-100, 2000
- 3) (社)土木学会:複数ひび割れ型繊維補強セメント複合材料・施工指針(案), 2007.3
- 4) 高島博之ほか: 押し出し成形によるポリプロピレン短繊維補強セメント系複合材料のマルチクラック発生条件に関する破壊力学的研究, コンクリート工学論文集, Vol.13, No.1, 2002.1