

# 論文 鋼繊維と合成繊維を混入した繊維補強セメント複合材料の引張性能に及ぼす鋼繊維形状の影響

吉田 理紗<sup>\*1</sup>・菊田 貴恒<sup>\*2</sup>・西脇 智哉<sup>\*3</sup>・三橋 博三<sup>\*4</sup>

**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には、調合条件を選定する必要がある。そこで本研究では、合成繊維と鋼繊維を組合せて混入し、鋼繊維の形状が、調合条件によって引張性能に与える影響を明らかにすることを目的とする。3種類の鋼繊維について、鋼繊維の引張強度と形状・混和材・水結合材比・鋼繊維量をパラメータとして、試験体を作製し一軸引張試験を行った。その結果、繊維表面の形状による付着特性が引張性能に大きく影響する可能性が示された。また、繊維表面に機械的付着特性がなくても、試験体に含まれる繊維の表面積を増やすことで、比較的高い引張性能が確保できることが示された。  
**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, 付着, アスペクト比

## 1. はじめに

高強度のセメント硬化体は、脆性的な破壊を起こすので、繊維補強セメント材料(Fiber Reinforced Cementitious Composite, 以下 FRCC)は繊維を混入することで靱性を高めている。しかしながら、既往の1種類の繊維によるFRCCでは、鋼繊維のみを用いた場合には高強度だが靱性は低い傾向性を示すものが多い<sup>1)</sup>。一方で、合成繊維のみを用いた場合は、ECC(Engineered Cementitious Composite)に代表される高靱性セメント複合材料のように、高靱性だが比較的強度が低い傾向性を示す。

そこで、2種類の物性の異なる繊維を混入することで、複合効果により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)は、強度かつ靱性を高めることができる<sup>2)</sup>。図-1のような、高強度かつ高靱性を両立する HFRCC を開発するためには、調合条件および混入する繊維を選定し、構成条件を明らかにする必要がある。本研究では、ひび割れをマイクロレベルで補強する合成繊維と、メゾレベルで補強する鋼繊維を用いた HFRCC について、鋼繊維の形状が引張性能に与える影響を明らかにすることを目的とし、3種類の鋼繊維について、鋼繊維の引張強度と形状・混和材・水結合材比・鋼繊維量をパラメータとして、HFRCC の引張性能への影響を比較した。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料および調合

本研究では、早強ポルトランドセメント、高性能減水剤、細骨材に珪砂7号、混和材としてフライアッシュ(FA)あるいはシリカフューム(SF)を使用した。その詳細を表

1-1に示す。また写真-1のように、鋼繊維はスチールコード(SC 繊維)・ストレート繊維(OL 繊維)・フック加工鋼繊維(DR 繊維)、合成繊維はポリエチレン繊維(PE)を使用した。それらの物性の詳細を表-2に示す。一般に、繊維のアスペクト比が高い方が引張特性に有効である



図-1 HFRCC 開発の概念図

表-1 使用材料

材料名称	略号	備考
セメント	C	早強ポルトランドセメント(密度: 3.14g/cm <sup>3</sup> )
フライアッシュ	FA	フライアッシュ2種(密度: 2.33g/cm <sup>3</sup> , 粒径: 1μm未満から100μm)
シリカフューム	SF	マイクロシリカ(密度: 2.2g/cm <sup>3</sup> , 粒径: 0.03μmから0.3μm, 中央値0.1μm)
細骨材	S	珪砂7号(密度: 2.61g/cm <sup>3</sup> )
高性能減水剤	SP	ポリカルボン酸エーテル系化合物(密度: 1.05g/cm <sup>3</sup> )
増粘剤	V	セルロース系, 高粘性タイプ(密度: 1.25g/cm <sup>3</sup> )

※結合材 B=C+SF または C+FA

表-2 繊維物性

繊維名称	略号	密度	繊維長	直径	引張強度	アスペクト比
		g/cm <sup>3</sup>	mm	μm	MPa	
スチールコード	SC	7.84	32	400	2850	80
ストレートファイバー	OL	7.85	13	160	2000	81.3
フック加工鋼繊維	DR	7.84	30	550	1350	54.5
ポリエチレン	PE	0.97	12	12	2580	1000

\*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 (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)

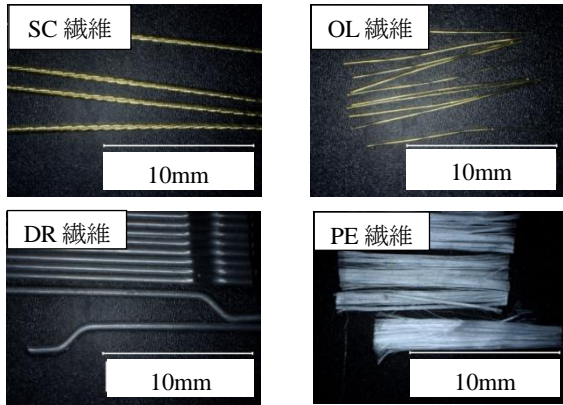


写真-1 使用繊維の表面

表-3 調査

試験体名称	W/B wt.%	FA/B wt.%	SF/B wt.%	SP/B wt.%	合成繊維				鋼繊維				試験体 本数
					PE vol.%	SC vol.%	OL vol.%	DR vol.%	PE vol.%	SC vol.%	OL vol.%	DR vol.%	
SC1-PE0.75-FA-W/B30	30	30	-	0.9	1	0.75	1	-	-	-	3		
OL1-PE0.75-FA-W/B30							-	1	-	-	5		
DR1-PE0.75-FA-W/B30							-	-	1	-	2		
PE0.75-FA-W/B30							-	-	-	-	6		
SC1-PE0.75-FA-W/B40	40	30	-	1.5	0.9	0.75	1	-	-	-	5		
OL1-PE0.75-FA-W/B40							-	1	-	-	5		
DR1-PE0.75-FA-W/B40							-	-	1	-	5		
PE0.75-FA-W/B40							-	-	-	-	3		
SC1-PE0.75-SF-W/B30	30	-	20	2.5	2.2	0.75	1	-	-	-	6		
OL1-PE0.75-SF-W/B30							-	1	-	-	5		
DR1-PE0.75-SF-W/B30							-	-	1	-	4		
SC1.5-PE0.75-SF-W/B30							1.5	-	-	-	6		
OL1.5-PE0.75-SF-W/B30							-	1.5	-	-	6		
DR1.5-PE0.75-SF-W/B30							-	-	1.5	-	4		
SC2-PE0.75-SF-W/B30							2	-	-	-	5		
OL2-PE0.75-SF-W/B30							-	2	-	-	6		
DR2-PE0.75-SF-W/B30							-	-	2	-	5		
PE0.75-SF-W/B30							-	-	-	-	11		

ことが知られている<sup>3)</sup>ため、本研究ではSC繊維とOL繊維のアスペクト比を同等にして、その影響を除外した。なお、SC繊維は5本の繊維を集束して撚られており、繊維表面に凹凸ができるため、付着特性の向上が期待できる<sup>4)</sup>。また、実験に用いた調査を表-3に示す。水結合材比(W/B)は30%と40%とし、細骨材はS/B45%とした。鋼繊維と合成繊維は外割りで混入し、体積混入率とした。PEは体積混入率0.75%とした。

## 2.2 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た。練混ぜは、粉体および細骨材を1分間空練り後、水および減水剤を投入し3分間、PEを2回にわけて投入しそれぞれ1分30秒間、鋼繊維を2、3回にわけて投入しそれぞれ1分30秒間混練した。

なお、DR繊維は数本ずつ繊維同士が接着剤で連なっており、練混ぜの過程で繊維が1本ずつ分散する設計となっているが、予備実験で練混ぜ後もDR繊維同士接着されたままであった。そこで、DR繊維をあらかじめ1本ずつばらして使用した。試験体の養生方法は、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。

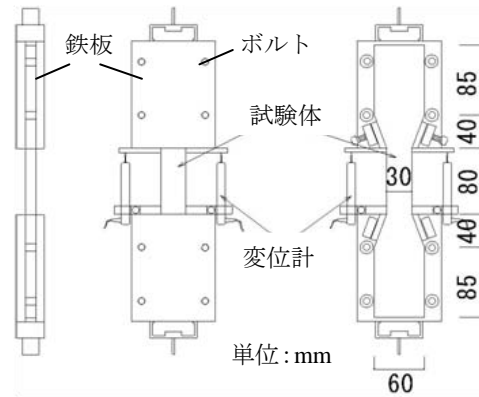
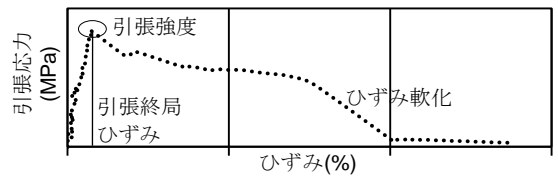
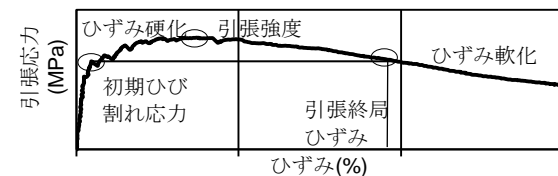


図-2 試験体の形状と治具



(a)初期ひび割れ時に引張強度に達する場合



(b)初期ひび割れ後引張強度までひずみ硬化する場合

図-3 引張終局ひずみの定義

## 2.3 試験体形状および一軸引張試験方法

本研究では図-2のように、厚さ30mmのダンベル型試験体<sup>5)</sup>を使用した。一軸引張試験は、最大容量30kNの万能試験機を用い、試験体の両端部の支持条件を固定とした。万能試験機への試験機の取り付けには図-2のような専用の治具を用い、引張力が十分に伝達するように、試験体前後を厚さ10mmの鉄板で挟込み、ボルトで締め付けた。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。

## 2.4 引張終局ひずみの定義

靱性能の評価には、引張終局ひずみを用いた。なお、最大引張応力を引張強度とした。合成繊維のFRCCでは、引張強度に達した後、急激に応力の低下が生じることが多く、そのような場合には図-3(a)のように、引張強度のときのひずみを引張終局ひずみと定義する。

一方で、合成繊維と鋼繊維を組合せたHFRCCは、初期ひび割れ後にひずみ硬化することが多いため、本研究では図-3(b)に示すように、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、引張終局ひずみと定義する。

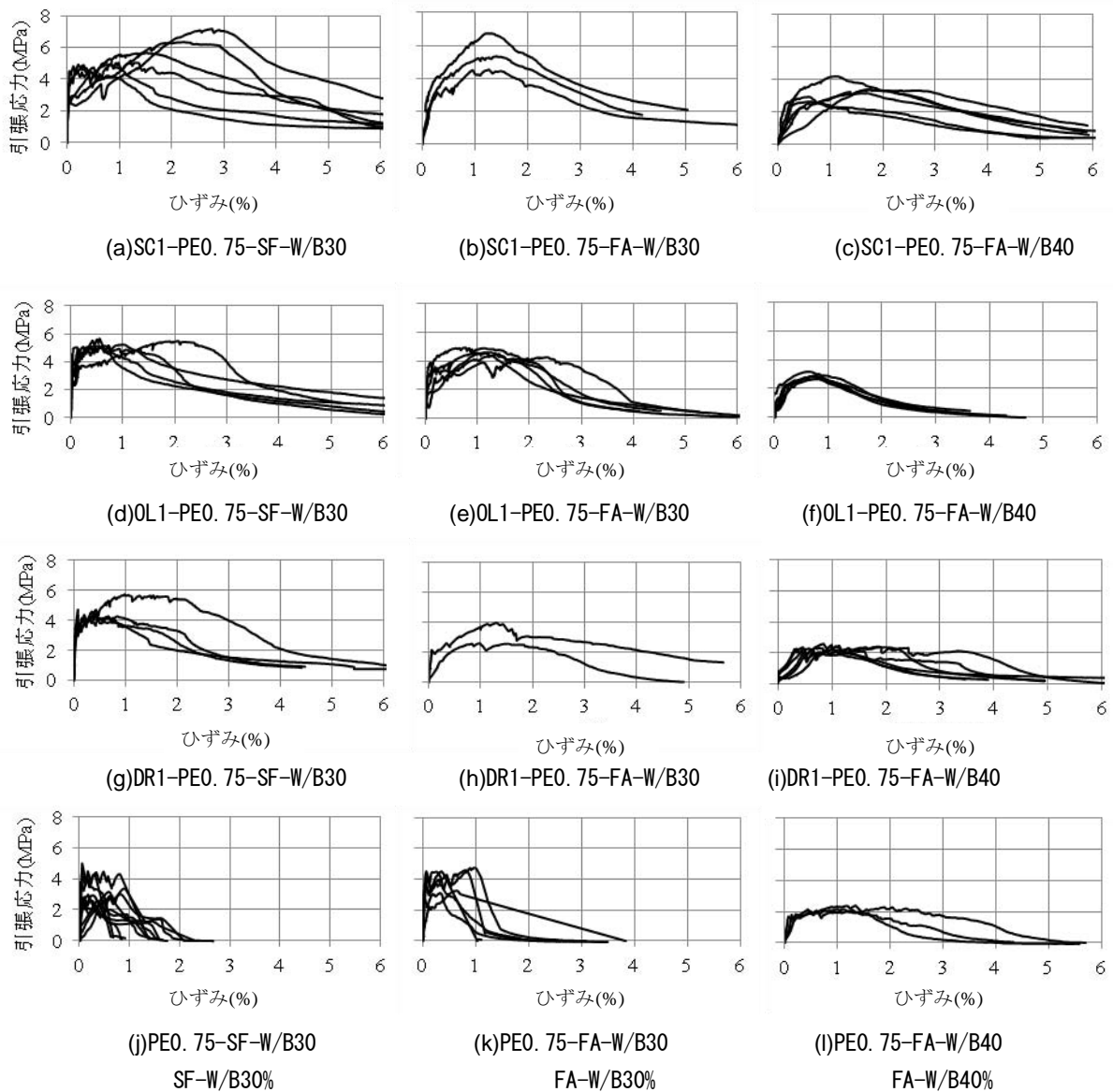


図-4 混和材および水結合材比を変えた引張応力-ひずみ関係

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 鋼繊維の引張強度と形状が引張性能に及ぼす影響

一軸引張試験を行い、その試験結果の引張応力とひずみの関係を図-4に示す。混入した繊維種ごとに終局ひずみと引張強度の平均値を、それぞれ図-5、6に示す。鋼繊維の引張強度と、形状として繊維の機械的付着特性と繊維長に着目して考察した。

##### (1) 鋼繊維の引張強度が引張性能に及ぼす影響

繊維の引張強度は表-2の通りである。図-5から鋼繊維の引張強度と、引張終局ひずみには明らかな傾向性が示されない一方、図-6から鋼繊維の引張強度が高いほど、試験体の引張強度が高いという傾向性が得られた。

##### (2) 機械的付着特性が引張性能に及ぼす影響

表面に凹凸のあるSC繊維と、表面に機械的付着のないDR繊維・OL繊維を比較すると、図-5、6からSC

の方が靱性と強度も高いことがわかる。これはSC繊維表面凹凸による機械的付着特性が、マトリクスと繊維の摩擦による引き抜き抵抗を増大させたと考えられる。

さらに、繊維両端にフック型加工してあるDR繊維と真直なOL繊維を比較すると、図-6からOL繊維の方が高い強度を示している。これは、OL繊維は機械的付着特性がなく、単体では引張性能への良好な効果をあまり期待できないものの、PE繊維との混入による複合効果が発揮されたためと考えられる。加えてSC繊維とアスペクト比が同等で破断面での繊維本数が多いので、繊維とマトリクスの表面積が大きく、摩擦抵抗力も大きくなったためと考えられる。

以上から、SC繊維の表面凹凸の機械的付着特性が引張性能に大きく影響する可能性が示された。また図-4のように、SC繊維やDR繊維はひずみ軟化がゆるやかで

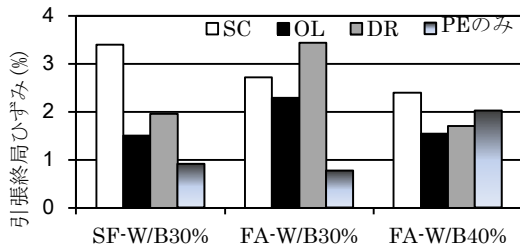


図-5 引張終局ひずみと鋼繊維の関係

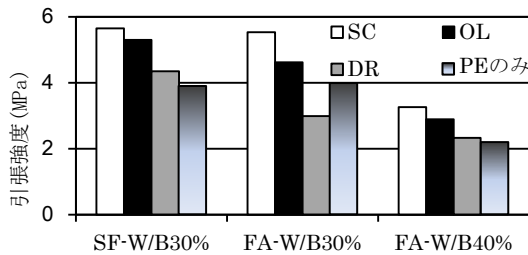


図-6 引張強度と鋼繊維の関係

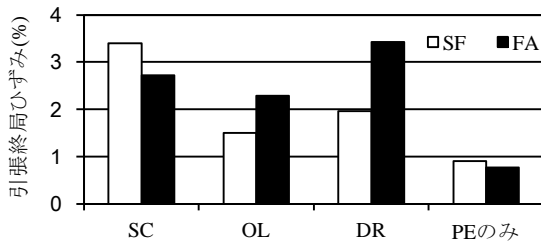


図-7 終局ひずみ-混和材の関係

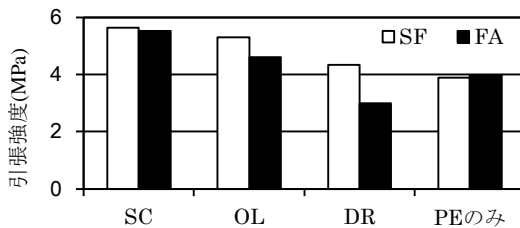


図-8 引張強度-混和材の関係

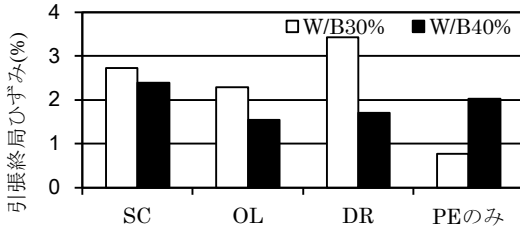


図-9 終局ひずみ-水結合材比の関係

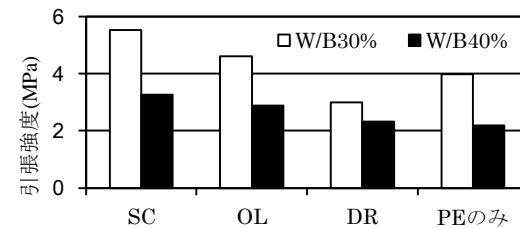


図-10 引張強度-水結合材比の関係

あり、表面凹凸や両端のフックが影響したと考えられる。

### (3) 鋼繊維の長が引張性能に及ぼす影響

繊維長 32mm の SC 繊維と 30mm の DR 繊維を同等とし、13mm の OL 繊維と比較すると、図-4 から、SC 繊維と DR 繊維はひずみ軟化の傾斜がゆるやかであり、これは繊維長による影響だと考えられる。

繊維長がほぼ同等な SC 繊維と DR 繊維を比較したところ、図-5、6 のように引張性能は大きく異なる結果となり、繊維の長さが引張性能に及ぼす明確な傾向性は示されなかった。これは、一般にアスペクト比が大きい方が、引張性能に良好な効果をもたらすことが知られており、表-2 のように SC 繊維のアスペクト比の方が大きいことが影響したと考えられる。

アスペクト比が同等の OL 繊維(アスペクト比 81.3)と SC 繊維(アスペクト比 80)を比較した結果、繊維長の長い SC 繊維の方が高い強度と靱性を示した。これは、繊維が長くひずみ軟化がゆるやかであることや、SC 繊維表面の機械的付着特性が影響したと考えられる。

以上から、繊維長による引張性能への明確な傾向性は示されなかったが、繊維長を長くすることでひずみ軟化がゆるやかになる可能性を示した。また、アスペクト比が引張性能に影響することが示された。

### 3.2 混和材が引張性能に及ぼす影響

混和材の違いごとに、各鋼繊維と PE を組合せた場合、および PE 繊維のみの場合の終局ひずみと引張強度の平均値をそれぞれ図-7、8 に示す。

SC 繊維と混和材に SF を用いた図-4(a)と、SC 繊維と FA とした図-4(b)を比べると、SF を用いた場合は、ひずみ 2% を越えてから最大引張強度に達する試験体もあり、図-7 のように終局ひずみは高く、図-8 から強度は若干高くなっている。和地ら<sup>1)</sup>は SC 繊維表面の凹凸は小さいので、マトリクス微細構造が緻密でないため付着力の向上は期待できないとしている。よって、FA よりも微細な粒子でマトリクスそのものを緻密化する SF は、マトリクスと繊維の付着力の向上に寄与し、比較的良好的な引張性能が得られたと推察できる。

OL 繊維と混和材として FA を用いたシリーズでは図-4(e)のように、最大応力に達した後は、SF を用いたシリーズ図-4(d)に比べ、引張強度は低いものの、応力はゆるやかに下降している。これは FA の強度発現が遅く、ここでの試験材齢では、SF よりもマトリクスが緻密ではなく破壊靱性が低いために、図-7 のように終局ひずみが大きくなったと考えられる。同様の理由で、DR 繊維の場合も FA を用いた方が強度は低く、終局ひずみが大きくなっていると考えられる。

### 3.3 水結合材比が引張性能に及ぼす影響

W/B を 30%、40% と変化させて、繊維ごとに平均引張

終局ひずみを図-9に、平均引張強度については図-10に示す。図-9, 10 から PE 繊維のみの場合では、W/Bを40%から30%に下げると強度は高くなるが、終局ひずみは低くなる。一方で、鋼繊維とPE繊維を組合せた場合には、2種類の繊維の複合効果によって、W/Bを下げても靱性および強度を高められることが示された。

しかしながら、図-9のようにDR繊維とPE繊維を用いたHFRCCは、PE繊維のみのFRCCと強度が同程度である。よって、混和材にFAを用いてW/B30%および40%とした本研究の構成条件では、DR繊維は強度に対して有効にはたらかないことが示された。

### 3.4 鋼繊維量がHFRCCの引張性能に及ぼす影響

PE繊維と組合せる鋼繊維量を1%, 1.5%, 2%と変化させて比較する。ここでは、混和材にはSFを用いて、W/Bを30%とした。それぞれの引張応力-ひずみの関係を図-11に、繊維量と引張終局ひずみの関係を図-12, 引張強度との関係を図-13示し、鋼繊維ごとに比較した。

#### (1) SC繊維

図-11(a)(b)を比較すると繊維量が1%と1.5%とした場合には、あまり変化がみられないが、図-11(c)のように繊維量を2%とした場合には靱性、強度ともに大きく

向上し、引張強度8.62MPa、終局ひずみ3.73%という結果が得られた。図-12, 13のように繊維量増やすことで靱性および強度が高められた。これは、繊維本数が増えて、スナッピング効果が有効にはたらいしたことと、マトリクスとの表面積が大きくなり、摩擦抵抗力が増したことで引張性能が向上したと推察できる。ここでスナッピング効果とは、繊維が引き抜ける際、ひび割れ面に対し繊維がある角度をもって傾斜する場合、局部的に繊維に曲げが発生してその部分に応力集中し、界面摩擦が生じ、高い架橋応力を生み出す現象である。

また本研究では、表面に機械的付着特性をもつSC繊維は、他の表面がなめらかな鋼繊維と比べて、高い引張性能を保有していることが確認された。したがって、本研究のマトリクスの構成条件では、繊維表面の特性が引張性能を高める重要な影響因子である可能性が示された。

#### (2) OL繊維

図-11(d)(e)(f)および図-12, 13のように繊維量が1%から1.5%に増加すると靱性、強度ともに向上するが、それ以上の繊維量では頭打ちとなり2%で靱性と強度ともに低下している。これは、繊維量1.5%までは、繊維量が増えるとマトリクスとの表面積が増え引張性能が向上す

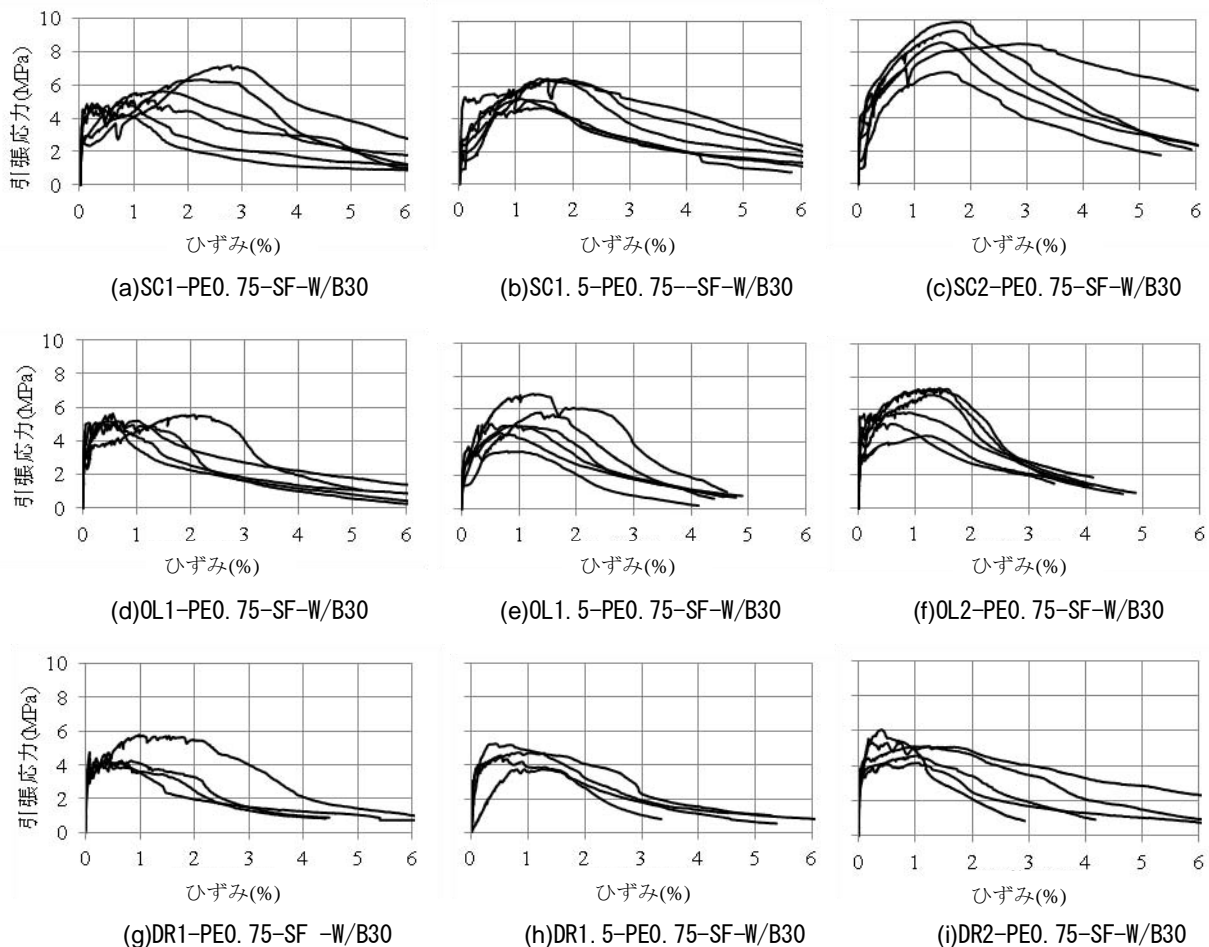


図-11 鋼繊維量と引張性能の関係

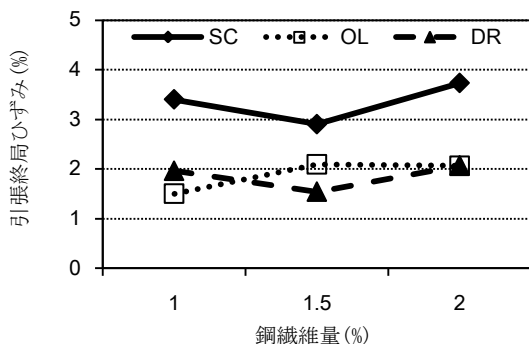


図-12 鋼繊維量の違いが靱性に及ぼす影響

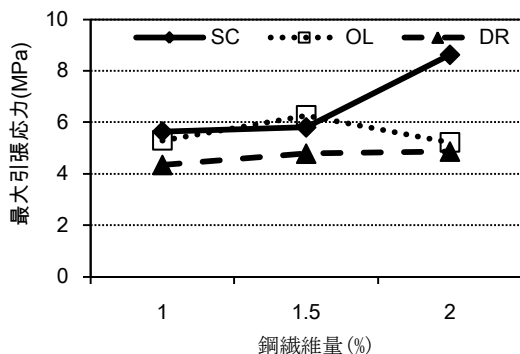


図-13 鋼繊維量の違いが引張強度に及ぼす影響

る一方で、繊維量 2%ではフレッシュ状態でファイバーボールが形成され、そこが弱点となり靱性および強度の低下を招いたと考えられる。

また図-12, OL 繊維は DR 繊維と同程度の終局ひずみである。しかし、繊維量 1.5%については図-11(e)(h), 繊維量 2%については図-11(f)(i)を比較すると、OL 繊維は初期ひび割れ後の応力上昇が良好に出ているが、ひずみ軟化が DR 繊維の場合に比べて急激であるために、終局ひずみが同程度となっている。ここで、ひずみ約 2%で終局ひずみに達することから、図-11 でひずみ 2%での引張応力を比較すると、OL 繊維の場合の方が平均的に高いことが確認できる。したがって、図-12 で OL 繊維の終局ひずみは低く評価されているが、ひずみ 2%での応力保持は比較的に高いことが示された。

### (3) DR 繊維

図-11(g)(h)(i)および図-12, 13 から、繊維量 1%から 2%に増加させても靱性および強度にあまり変化がないことが示された。そこで、破断面に観察された DR 繊維の本数を計測したところ、繊維量 1%で平均 13 本、1.5%で平均 20 本、2%で平均 20 本であった。したがって、繊維量を増やしても破断面の繊維本数が、繊維量を 1.5%と 2%とした場合と変化しなかったことから、本研究では、DR 繊維が適切に分散せず、繊維量の増加は靱性および強度の向上に寄与しなかったと考えられる。

### (4)まとめ

SC 繊維と OL 繊維は良好に分散する場合には、繊維量を増やすことで、引張性能は向上する傾向性が示された。これは、繊維本数が増えたことで、スナッピング効果および繊維とマトリクスとの付着による摩擦抵抗力が有効にはたらいたためと考えられる。

## 4. まとめ

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) SC 繊維を用いた HFRCC は、混和材および W/B の検討から、よりマトリクスを緻密化することで、靱性かつ強度を高められることが示された。
- (2) アスペクト比が同等である SC 繊維と OL 繊維を比較すると、SC 繊維の方が引張性能は若干高いものの、同程度の引張性能が示された。したがって、SC 繊維表面にある凹凸がマトリクスとの摩擦抵抗力が有利にはたらく一方で、OL 繊維は表面がなめらかで機械的付着がなくても、試験体に含まれる繊維本数が多く、マトリクスとの繊維の付着面積が大きいことも引張性能に対し有効にはたらくことが示された。
- (3) DR 繊維は両端にフック加工してあるが、他の鋼繊維を用いた HFRCC よりも強度が低い。条件によっては PE 繊維のみの場合よりも強度が低く、両端のフックが有効にはたらかなかったと考えられる。

## 参考文献

- 1) 菊地 俊文, 橋田 浩: 超高強度繊維補強モルタルの高靱性化に関する基礎的検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸), pp813-814, 2010. 9
- 2) 和地 正浩, 三橋 博三, 金子 佳生, 川又 篤: ハイブリッド型繊維補強セメント系複合材料におけるコード繊維の付着特性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.2, pp229-234, 2001
- 3) 石関 嘉一, 平田 隆祥, 片野 啓三郎, 竹田 宣典: 鋼繊維の種類が高強度高じん性セメント複合材料の引張特性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol. 32, No.1, pp215-220, 2010
- 4) 河野悠一, 三橋博三: 繊維補強セメント系複合材料の靱性向上機構に関する基礎的研究, セメント・コンクリート論文集, No.59, pp404-409, 2005
- 5) (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
- 6) 菊田 貴恒, 三橋 博三, 西脇 智哉: ストレート鋼繊維と PVA 繊維による HFRCC の材料特性に関する研究, 日本建築学会学術講演梗概集(北陸), pp837-838, 2010.9