論文　PE 繊維の性能ならびに混入率が HPFRCC のひび割れ性状に及ぼす影響

飯塚　貴洋[*1]・水田　武利[*1]・高田　浩夫[*2]・六郷　恵哲[*3]

要旨：ポリエチレン（PE）繊維の混入率を小さくした場合や力学性能が低い繊維を用いた場合について，HPFRCC が示す引張ひずみ硬化性状ならびに複数微細ひび割れ性状を，ダンベル型供試体を用いた一軸引張試験により確認した。その結果，PE 繊維の混入率を 1/2 に減らした場合や弾性係数を 2/3 とした PE 繊維を用いた場合，平均ひび割れ幅は 1.5 倍程度に大きくなるものの 0.05mm 以下であり，複数ひび割れが発生し，ひずみ硬化挙動が生じることを明らかにした。引張試験後の供試体上で測定した平均ひび割れ幅（ただし局所化した幅が最大のひび割れを除く）は，ひずみが 1%程度までの領域での平均ひび割れ幅と同程度であった。

キーワード：HPFRCC，複数微細ひび割れ，ひび割れ幅，ひび割れ間隔，一軸引張試験

1. はじめに

複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料（以下 HPFRCC）は，引張力下においてひずみ硬化し複数微細ひび割れを形成する材料であり，引張変形の増加に伴い，ひび割れ幅が増加するのではなくひび割れ本数が増加する点に特徴がある。ひずみ硬化性状は，ひび割れ発生直後の引張降伏強度，引張強度，引張終局ひずみ（以下，終局ひずみ）によって特徴づけられる。

土木学会から HPFRCC の設計施工指針（案）[1)]が 2007 年 3 月に出版された。この指針（案）では，所定の一軸引張試験により求めた終局ひずみの平均値が 0.5%以上で，平均ひび割れ幅が 0.2mm 以下となる材料を対象としている。HPFRCC には，高強度ポリエチレン（PE）繊維や高強度ビニロン（PVA）繊維が体積比で 1.5～2.0%程度用いられる場合が多い。

HPFRCC の利用を拡大するには，指針類の整備に加え，性能評価方法の簡易化，練混ぜを含む施工の容易化，性能を確保したうえでの低価格化等が重要である。本研究は，これらの観点をもとに実施したものである。

本研究においては，力学性能が低い PE 繊維を用いた場合や繊維の混入率を小さくした場合について，HPFRCC が示す引張ひずみ硬化性状ならびに複数微細ひび割れ性状を実験的に確認することを目的として，ダンベル型供試体の一軸引張試験を行った。ひび割れ性状としては，ひび割れ幅だけでなく，ひび割れ間隔とそのばらつきも取り上げた。ひび割れ性状は，ひずみが 1 %に至るまでの初期の段階だけでなく，引張試験終了後にも観察した。

2. 実験概要

2.1 使用材料と配合

実験に使用した繊維の物性値を**表－1** に示す。繊維 A は，筆者らが従来から用いている高強度ポリエチレン繊維であり，繊維 B は製造が容易ではあるが力学性能が低い（引張強度が繊維 A の 54%，弾性係数が 63%）比較用のポリエチレン繊維である。両者の形状寸法ならびに密度は同じである。

表－2 には，繊維 A あるいは B の混入率が体積比で 1.5%の HPFRCC の配合を示す（それぞれ，繊維 A1.5%，繊維 B1.5%とよぶ）。繊維 A を体積比で 1.0%あるいは 0.75%混入した配合（それぞれ，繊維 A1.0%，繊維 A0.75%とよぶ）では，単位繊維量をそれぞれ 9.7，7.3kg/m^3 とした。セメントには早強ポルトランドセメント使用し，細骨材には 7 号珪砂を使用した。混和剤として高性能 AE 減水剤と増粘剤を使用した。4 種類の HPFRCC の練上り温度，空気量ならびにフロー値を**表－3** に示す。

2.2 供試体

一軸引張試験には，引張力の伝達部 （掴み部）で破壊が生じにくいダンベル型供試体を用いた。供試体の寸法を**図－1** に示す。ダンベル型供試体の外寸は，厚さ 30mm，幅 60mm，長さ 330mm であり，中央部の検長区間は 80mm，断面寸法は 30×30mm である。4 種類の配合に，それぞれ 5 個ずつのダンベル型供試体と 3 個の圧縮供試体（直径 50mm，高さ 100mm）を作製した。

表－1　繊維の物性値

繊維	繊維径 (mm)	繊維長 (mm)	密度 (g/cm^3)	引張強度 (GPa)	弾性係数 (GPa)
繊維A	0.012	12	0.97	2.6	88
繊維B	0.012	12	0.97	1.4	55

*1 岐阜大学大学院　工学研究科社会基盤工学専攻　（正会員）
*2 岐阜県生コンクリート工業組合技術センター所長　（正会員）
*3 岐阜大学　工学部社会基盤工学科教授　工博　（正会員）

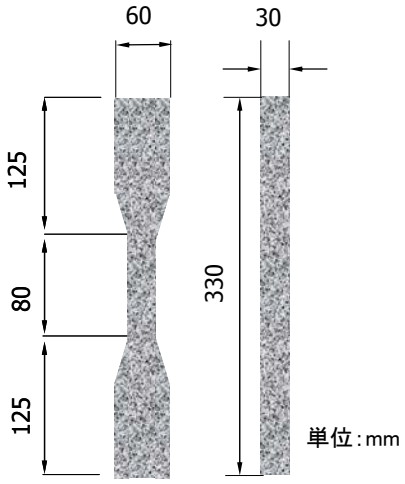
表－2　HPFRCC の配合

材料	繊維の種類	水セメント比（%）	単位量（kg/m^3）					
			水	セメント	細骨材	高性能AE減水剤	増粘剤	繊維*
HPFRCC（繊維混入率1.5%）	PE	30	342	1264	395	37.9	0.9	14.6

＊ 繊維混入率が 1.0%，0.75%の配合では，それぞれ単位繊維量を 9.7，7.3kg/m^3 とし，他の材料の比率は同一とした。

表－3　HPFRCC 練り上がりの物性値

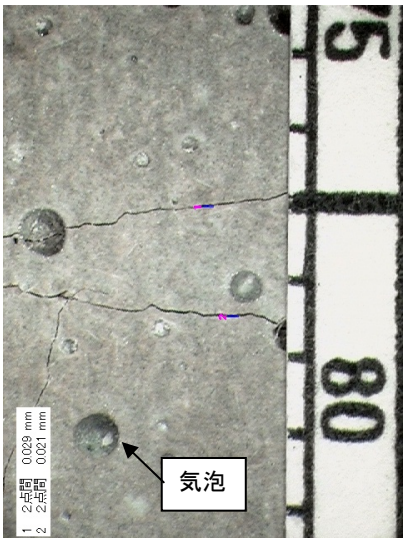
HPFRCC	練り上り温　度（℃）	空気量（%）	フロー値	
			落下前（mm）	落下後（mm）
繊維A　1.5%	22	22	133	159
繊維A　1.0%	22	21	152	182
繊維A 0.75%	22	17	171	201
繊維B　1.5%	19	17	129	160



図－1　ダンベル型供試体

写真－1　載荷装置

ダンベル型供試体の打設時には，テーブルバイブレータ上で振動を与えながら，型枠を傾斜させ，供試体の長軸方向（試験時に引張力の作用する方向）に HPFRCC を流し込んだ。



写真－2　ひび割れ写真の一例

供試体は，材齢 2 日で脱型し，その後試験材齢（12 日～16 日）まで 20℃の室内で水中養生した。載荷試験の数時間前に水中から取り出した。

2.3 一軸引張試験

一軸引張試験に使用する載荷装置を**写真－1** に示す。鋼製フレーム（質量：約 30kg，外寸：250×200×500mm）の中で，上下の掴み具によりダンベル供試体の肩の部分を掴んで引張力を伝達させた[2)]。供試体の端部の固定条件は，下端を固定支持とし，上端を回転支持とした。荷重は可搬型の手回し式加力装置の上に設置したロードセル，変位は試験体両側に取り付けた高感度変位計（ストローク：25mm）で計測した。得られた荷重変位関係を応力ひずみ曲線に変換した。最初に応力が低下するか，応力ひずみ曲線の傾きが急変する点の応力から，ひび割れ強度を求めた。応力ひずみ曲線のピークから引張強度を求め，引張強度に対応するひずみを終局ひずみとした。

2.4 ひび割れ計測

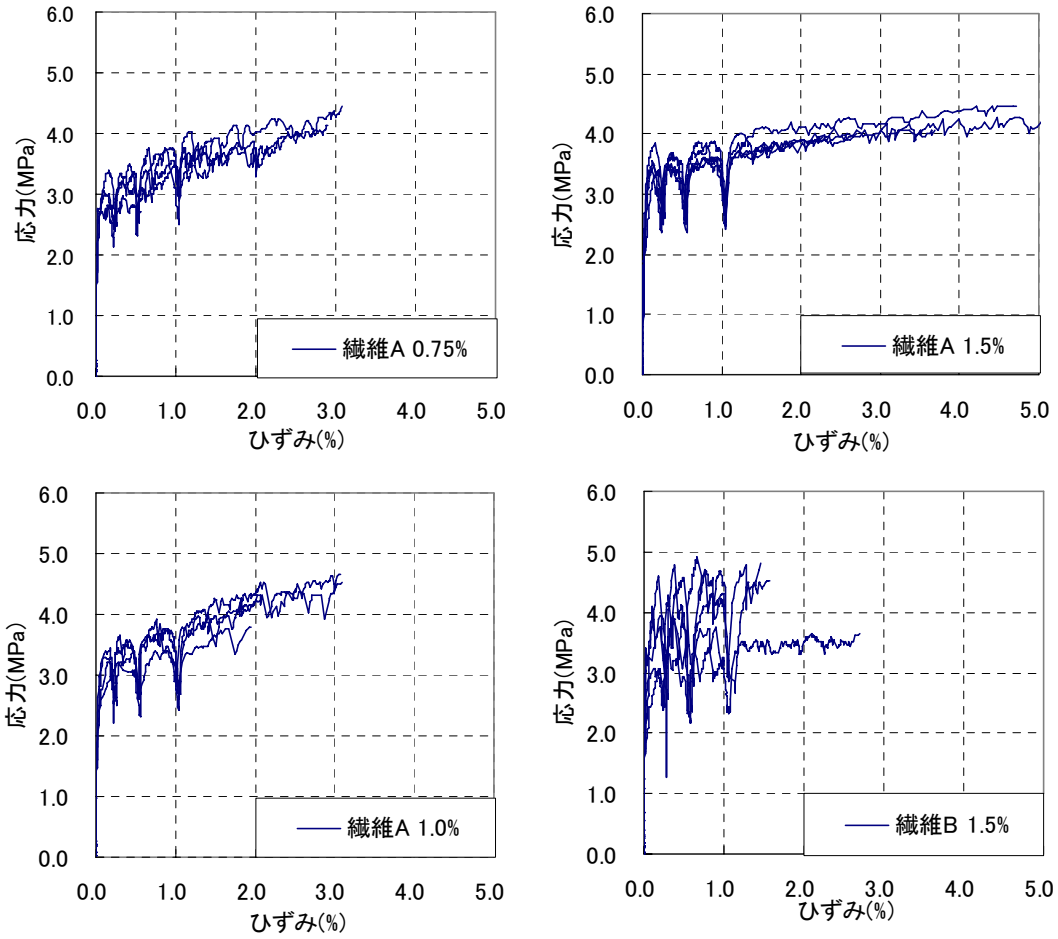
ダンベル型供試体の検長区間の一面（型枠底面に対応する面）に中心線を引き，引張ひずみが 0.2%，0.5%，1.0%の段階で載荷を止め（変位は止めているが荷重は時間とともに低下），その線に沿ってマイクロスコープ（倍率 50 倍）を移動させ，ひび割れを画像としてパソコンに取り込み，ひび割れ幅とひび割れ本数を計測した。除荷後にダンベル型供試体を引張載荷装置から外した後にも

ひび割れ幅とひび割れ本数を計測した。供試体の 4 つの面でのひび割れ幅やひび割れ本数には顕著な差は認められなかった。供試体ごとに計測したひび割れの平均を求め，平均ひび割れ幅とした。型枠底面に接する供試体面に引いた中心線の片側に目盛 1mm の紙製の物差し(縮小コピーにより作成）を置き（上部を両面テープで供試体に張付け），ひび割れ位置を計測し，平均ひび割れ間隔の算定に用いた。マイクロスコープに取り込んだひび割れ写真の一例を**写真－2** に示す。平均ひび割れ間隔は，ひび割れ本数が増えれば，検長をひび割れ本数で除した値に漸近するものである。

3. 実験結果と考察

4 種類の HPFRCC について，ダンベル型供試体の一軸引張試験で得られた応力ひずみ曲線を，**図－2** に示す。応力ひずみ曲線において，ひずみが 0.2%，0.5%，1.0%で応力の低下が大きいが，これはひび割れ計測のために載荷を止めたためである。ひび割れ強度，引張強度，終局ひずみを，標準偏差とともに**表－4** に示す。圧縮強度と弾性係数を**表－4** に併記する。4 種類の HPFRCC とも，明確なひずみ硬化性状を示した。

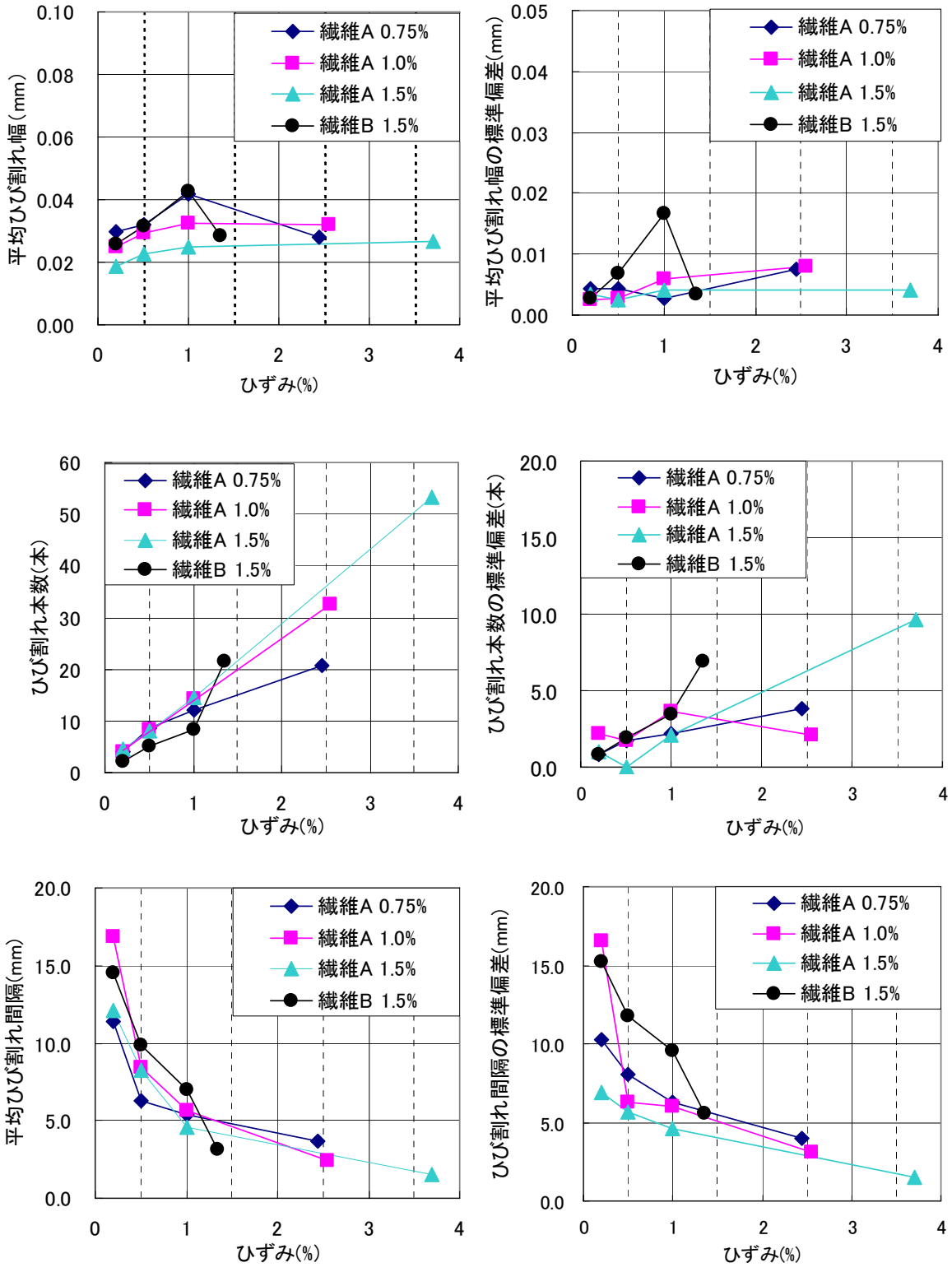
4 種類の HPFRCC について，各段階（引張ひずみが 0.2%，0.5%，1.0%と徐荷後）における平均ひび割れ幅，ひび割れ本数，平均ひび割れ間隔を，それらの標準偏差とともに，**図－3** に示す。各配合のダンベル型供試体は 5 個であるが，ばらつきの程度を比較するために，標準偏差を用いた。4 種類の HPFRCC とも，平均ひび割れ幅は 0.05mm 以下となり，検長 80mm の区間で最終的に 20 本以上のひび割れが生じ，明確な複数微細ひび割れ性状を示した。



図－2　一軸引張試験で得られた応力ひずみ曲線

表－4　一軸引張試験および圧縮試験結果

供試体名	ひび割れ強度(MPa)		引張強度(MPa)		終局ひずみ(%)		圧縮強度(MPa)	弾性係数(GPa)
	平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差		
繊維A　1.5%	3.5	0.21	4.1	0.21	3.7	1.24	41.0	14.5
繊維A　1.0%	3.3	0.09	4.3	0.38	2.5	0.62	49.2	16.4
繊維A 0.75%	2.9	0.32	4.1	0.26	2.5	0.73	52.9	16.7
繊維B　1.5%	3.1	0.28	4.4	0.55	1.4	0.91	40.2	17.3



図－3　各供試体のひび割れ性状

3.1 繊維の性能の影響

ここでは，**図－2, 3** ならびに**表－4** に示す繊維 A1.5% ならびに繊維 B1.5%の実験結果をもとに述べる。

（1）応力－ひずみ関係

繊維 A1.5%に比べ，繊維の引張強度と弾性係数が小さい繊維 B1.5%の応力ひずみ曲線においては，形状のばらつきが大きく，ひび割れ強度（最初のひび割れが生じる時の引張応力）と終局ひずみが小さくなった。これらの理由としては，繊維 A に比べ繊維 B の弾性係数が小さいため，ひび割れ部での繊維の伸びが大きいことが考えられるが，さらに検討する必要がある。

（2）ひび割れ性状

繊維 A1.5%に比べ繊維 B1.5%では，ひずみが 1.0%以下の段階において，ひび割れ本数はおよそ 2/3 となり，ひ

び割れ幅は 1.5 倍となり，平均ひび割れ間隔が大きくなるとともに，それぞれの指標の標準偏差も大きくなった。特に，平均ひび割れ間隔の標準偏差は 2 倍程度と大きくなった。

3.2 繊維の混入率の影響

ここでは，**図－2, 3** ならびに**表－4** に示す繊維 A1.5%，繊維 A1.0%ならびに繊維 A0.75%の実験結果をもとに考察する。

（1）応力－ひずみ関係

PE 繊維の混入率を，1.5%から 1.0%，0.75%と小さくすると，応力ひずみ曲線において，ひび割れ強度が低下し，終局ひずみが明確に小さくなった。すなわち，終局ひずみは，繊維混入率の影響を敏感に受ける。繊維混入率を小さくすると，引張強度とひび割れ強度の差は大きくなり，ひずみ硬化部分の応力ひずみ曲線の傾きが大きくなった。

（2）ひび割れ性状

繊維混入率を小さくすると，ひずみが 1.0%以下の段階では，ひび割れ本数は同程度であるが，平均ひび割れ幅は大きくなった。繊維 A1.5%に比べ，繊維 A0.75%のひび割れ幅は，およそ 1.5 倍と大きくなった。最終的なひび割れ本数（徐荷後に観察）は，繊維混入率が小さくなると，大幅に少なくなった。繊維混入率が小さくなると，平均ひび割れ間隔とその標準偏差が大きくなった。

最終的なひび割れ本数が少なくなったため，終局ひずみも小さくなったと考えられる。繊維混入率が小さくなると最終的なひび割れ本数が少なくなる理由については，必ずしも明確ではないが，ひび割れ部において繊維が負担する引張力が大きくなり，マトリックス中でより大きな繊維の定着長さが必要になるため，平均ひび割れ間隔が大きくなり，ひび割れ本数が減少したことが考えられる。こうした理由については，供試体の断面内での繊維の分布と関連させて，今後さらに検討が必要であると考える。

終局ひずみ以降まで載荷した後に徐荷した供試体では，ひずみが 1.0%の段階に比べて，ひび割れ本数は増えたが，平均ひび割れ幅は同程度であった。したがって，複数ひび割れが生じることを確認し，平均ひび割れ幅を測定したい場合には，引張試験後の供試体でひび割れ幅（ただし局所化した幅が最大のひび割れを除外する）を計測すればよいと考えられる。

（3）フレッシュ時の性状

繊維混入率のみを 1.5%から 1.0%，0.75%に低下させると，**表－3** に示すフロー値の増加からわかるように，フレッシュ時の流動性が大となり，施工性が改善された。よってひび割れ幅に対する要求が厳しくなければ，繊維の混入率を下げることは，施工性の改善に有効であると考えられる。

4. まとめ

PE 繊維の混入率を低下させた場合や繊維の力学性能を低下させた場合について，HPFRCC が示すひずみ硬化性状ならびに複数微細ひび割れ性状を実験的に確認し，下記の結果が得られた。

（1）力学特性が小さい PE 繊維（引張強度 54%，弾性係数 63%）を用いると，終局ひずみは小さくなり，応力ひずみ曲線の形状のばらつきが大きくなった。ひずみが 1.0%以下の段階におけるひび割れ本数は少なくなり，平均ひび割れ幅は大きくなった。

（2）PE 繊維の混入率を，1.5%から 1.0%，0.75%と小さくすると，応力ひずみ曲線において，ひび割れ強度が低下し，終局ひずみが明確に低下した。繊維混入率を小さくすると，ひずみが 1.0%以下の段階では，ひび割れ本数は同程度であるが，平均ひび割れ幅は大きくなった。徐荷後のひび割れ本数は，繊維混入率が小さいと大幅に少なくなった。

（3）繊維混入率が小さい場合や繊維の力学性能が小さい場合には，ひずみが 1.0%以下の段階で，平均ひび割れ間隔は大きくなる傾向を示し，ひび割れ間隔のばらつきも大きくなった。

（4）引張試験後の供試体上で測定した平均ひび割れ幅（ただし局所化した幅が最大のひび割れを除く）は，ひずみが 1%程度までの領域での平均ひび割れ幅と同程度であった。したがって，引張試験終了後に，供試体上のひび割れ幅を計測することにより，平均ひび割れ幅を測定することが可能である。

以上のことから， PE 繊維の混入率を減らしたり，弾性係数が小さい PE 繊維を用いることにより，材料コストを小さくできる可能性が示された。HPFRCC の使用目的，施工性，経済性等を総合的に考慮して，最適な繊維の条件を選択することが望まれる。

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），2007
2) 森山守，林承燦，内田裕市，六郷恵哲：複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料の引張性能と試験装置，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.311－316，2006