

報告 高強度ならびに中強度のPE 繊維を用いたHPFRCCの引張性能に及ぼす材齢と養生条件の影響

前田 徳一^{*1}・LE Anh-Dung^{*2}・浅野 幸男^{*3}・六郷 恵哲^{*4}

要旨：高強度 PE 繊維と中強度 PE 繊維を用いて HPFRCC（繊維混入率 1.0%と 1.5%）を作製し、その引張性能（ひずみ硬化挙動と複数微細ひび割れ挙動）に及ぼす材齢（6ヶ月まで）と養生条件（水中と気中）の影響について検討した。高強度 PE 繊維を 1.0%あるいは 1.5%用い、水中あるいは気中養生した HPFRCC では、材齢 6ヶ月までの試験の結果、明確な引張性能がみられた。中強度 PE 繊維を 1.5%混入し、水中あるいは気中養生した HPFRCC では、材齢 3ヶ月までは明確な引張性能がみられたが、水中養生したもので材齢 6ヶ月では引張性能が低下した。中強度 PE 繊維を 1.0%混入したものの引張性能は小さかった。

キーワード：HPFRCC, PE 繊維, 複数微細ひび割れ挙動, ひずみ硬化挙動, 材齢, 養生条件

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、引張応力下において擬似ひずみ硬化（以下、単にひずみ硬化）挙動と複数微細ひび割れ挙動を示す点に特徴がある¹⁾。HPFRCC には、高強度 PE（ポリエチレン）繊維、高強度 PVA（ビニロン）繊維、PP（ポリプロピレン）繊維などが体積比で 1~2%程度混入されている。HPFRCC の普及をはかるためには、材料コストの中で大きな割合を占める繊維のコストを低減することが重要と考えている。

従来から用いられている高強度 PE 繊維は、分子量が高く、ゲル紡糸という手法で製造される。一方、開発中の中強度 PE 繊維²⁾は、分子量が相対的に低く、熔融紡糸という手法で製造される。熔融紡糸である中強度 PE 繊維は、ゲル紡糸である高強度 PE 繊維と比較すると、製造工程数が大幅に少ないため、引張強度は半分程度であるが、安価に供給できるメリットがある。

HPFRCC の性能は材齢 4 週程度で評価される場合が多く、長期にわたって、引張性能に及ぼす材齢の影響について検討した研究は少ない。

本研究においては、高強度 PE 繊維または中強度 PE 繊維を用い、繊維混入率を 1.0%または 1.5%とした HPFRCC を作製し、その引張性能（ひずみ硬化挙動と複数微細ひび割れ挙動）に及ぼす 6ヶ月までの材齢の影響と、水中ならびに気中の養生条件の違いの影響とについて検討した。

2. 実験の概要

2.1 実験の計画

実験の計画を表-1に示す。前述のように、高強度 PE 繊維と中強度 PE 繊維を用い、繊維混入率を 1.0%と 1.5%とした。養生条件を、20℃の水中と気中（湿度 80%程度）の 2 種類とした。材齢 3 年までの試験を行う予定であるが、ここでは、材齢 6ヶ月までの結果を報告する。なお、材齢 6ヶ月で繊維混入率 1.5%のものについては、水中養生した供試体のみ試験を行い、気中養生した供試体の試験は行っていない。

表-1 実験の計画

目標材齢 実材齢(日)	1 週	4 週	3 ヶ月	6 ヶ月	1 年	3 年
水中養生	○	○	○	○	○	○
気中養生	—	○	○	(○)	○	—

* 気中養生は水中養生 1 週後、気中養生に変更

* ○：実施, (○)：一部実施, —：実施せず

表-2 使用材料

材料		物性
PE 繊維	高強度	繊維径 12 μ m, 繊維長 12mm 密度 0.97g/cm ³ 引張強度 2.6GPa 弾性係数 88GPa
	中強度	繊維径 12 μ m, 繊維長 12mm 密度 0.97g/cm ³ 引張強度 1.4GPa 弾性係数 55GPa
セメント		早強ポルドランドセメント 密度 3.13g/cm ³
細骨材		7 号珪砂 密度 2.60g/cm ³
混和剤	高性能 AE 減水剤	ポリカルボン酸系
	増粘剤	水溶性メチルセルロース系
混和材	石灰石粉	密度 2.71g/cm ³ 比表面積 3050cm ² /g

*1 東洋紡績株式会社 スーパー繊維事業部 (正会員)

*2 岐阜大学 工学部社会基盤工学科 (正会員)

*3 岐阜大学 社会資本アセットマネジメントセンター 博士 (工学) (正会員)

*4 岐阜大学 工学部社会基盤工学科 教授 工博 (正会員)

表-3 HPRCC の配合

水セメント比 (%)	水紛体比 (%)	単位量 (kg/m ³)						
		水	セメント	石灰石粉	細骨材	高性能 AE 減水剤	増粘剤	PE 繊維
55	30	380	695	569	321	37.92	0.9	9.7 or 14.6



(a) 繊維投入 (b) ミキサの羽根
写真-1 練混ぜに用いたミキサ

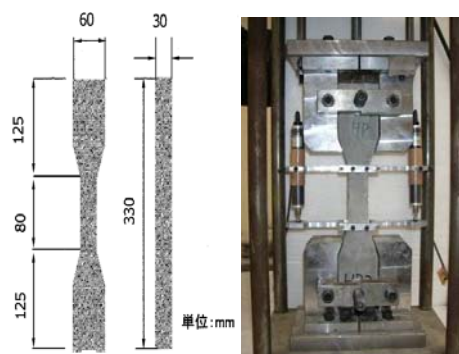


図-1 供試体および試験装置

2.2 材料および配合

表-2 に実験に用いた材料を示す。高強度 PE 繊維と中強度 PE 繊維の密度は同じであるが、断面形状は高強度 PE 繊維が扁平断面、中強度 PE 繊維は真円断面である。表-3 には、高強度 PE 繊維あるいは中強度 PE 繊維の混入率が体積比で 1.0 および 1.5% の HPRCC の配合を示す。HPRCC には粉体を多く用いるが、セメント量が多すぎると圧縮強度が高くなりすぎるため、本研究においてはセメントの 45% を石灰石粉³⁾ で置換した。

2.3 練混ぜ方法

HPRCC の各材料を秤量し、二軸強制練りミキサ (容量 120 リットル、写真-1) で、下記の手順で、1 回の試験当たり 60 リットル練混ぜた。

- ・材料を投入後、低速で空練りを 1 分実施した。
- ・材料をブラシで掻き落した後、所定の水を投入した。
- ・低速で 1 分練混ぜた後、中速で 2 分練混ぜた。
- ・PE 繊維を投入後、低速で 1 分練混ぜた。

2.4 評価試験方法

(1) フレッシュ性状

流動性の評価については JIS R 5201 (セメントの物理試験方法) に規定するフローコーンを用いた。フローコーンを引き上げたときの拡がり (0 打フロー値) と、その後 15 回フローテーブルを落下させたときの拡がり (15 打フロー値) を測定した。このとき、直径の最大値と最小値の平均値を代表値とした。

空気量は、空気量をゼロ (0) と仮定した配合上の理論密度と、練混ぜ完了直後の実測単位容積質量の差から推定した。単位容積質量は、後述のプラスチック製型枠に HPRCC を入れて成形した後に測定した。

(2) 圧縮および一軸引張試験

圧縮強度試験用の円柱供試体の作製には、φ5×10cm のプラスチック製型枠を用いた。供試体は、1 配合ごとに 40 個作製した。成型後翌日まで 20℃ の恒温室内で養生した後に脱型し、その後 6 日間水中養生を行ない、その内の 3 個を材齢 7 日の圧縮強度試験に用いた。残り 37 個の供

試体の内、20 個を引き続き水中養生とし、17 個を恒温室内で気中養生とし、その後の試験に用いた。各試験条件では 3 個の円柱供試体の圧縮強度試験を行い、それらの試験値の平均値を代表値とした。

一軸引張試験にはダンベル型供試体を用い、供試体の肩の部分で引張力を伝達する試験装置を用いた。ダンベル型供試体の形状寸法と試験装置を図-1 に示す。ダンベル型供試体の外寸法は、厚さ 30mm、幅 60mm、長さ 330mm であり、中央部の検長区間の長さは 80mm、断面寸法は 30mm×30mm である。

ダンベル型供試体は、1 配合ごとに 50 個作製した。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、供試体の長さ方向 (引張試験時に引張力の作用する方向) に HPRCC を流し込んだ。成型後翌日まで 20℃ の恒温室内で養生した後に脱型し、その後 6 日間水中養生を行ない、その内の 5 個を材齢 7 日の一軸引張試験に用いた。残り 45 個の供試体の内、25 個を引き続き水中養生とし、20 個を恒温室内で気中養生とし、その後の試験に用いた。各試験条件で試験した 5 個のダンベル型供試体のうち、終局ひずみが最大と最小の供試体を除き、残り 3 個の供試体の試験値の平均値を、各供試体の代表値とした。

2.5 ひび割れ計測

試験終了後に、ダンベル型供試体の検長区間の一面 (型枠面) に中心線を引き、その線に沿って紙製の物差し (目

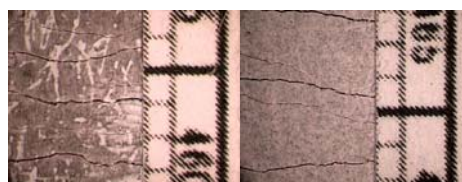


写真-2 ひび割れ写真の一例

表-4 フレッシュ性状と力学性能

繊維種類	繊維体積 (%)	養生方法	材令	フレッシュ性状			力学性状				
				フロー値		空気量 (%)	圧縮強度 (N/mm ²)	一軸引張試験			
				0打	15打			ひび割れ発生強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	引張終局ひずみ (%)	ひび割れ本数 (本)
中強度PE繊維	1.0	水中	1週	152	179	2.3	48.9	3.2	4.3	1.21	9
			4週				54.1	4.3	4.7	1.44	13
			3ヶ月				59.3	4	4.3	0.55	7
			6ヶ月				63.8	4.6	5.3	0.49	3
		気中	4週				65.7	6.3	6.3	0.02	3
			3ヶ月				64.7	2.9	4.2	1.02	10
	1.5	水中	4週	131	166	2.8	71.6	4.5	5.4	0.53	6
			3ヶ月				47.6	2.9	3.6	2.53	23
			4週				56.8	3.5	4.5	1.41	12
			6ヶ月				57.9	3.5	3.9	1.83	19
		気中	4週				61.3	5.2	5.6	0.63	10
			3ヶ月				67.6	5	6.4	0.56	3
高強度PE繊維	1.0	水中	4週	156	189	1.9	64.3	2.9	4.1	2.58	24
			3ヶ月				—	—	—	—	—
			6ヶ月				51.5	3.4	4.9	2.54	42
			1週				59.5	3.9	6.5	3.17	42
		気中	4週				64.2	3.9	5	0.63	13
			3ヶ月				65.9	5.9	7	1.01	15
	1.5	水中	6ヶ月	133	167	1.5	71.8	4.6	7.1	0.96	9
			4週				67.1	2.9	6.3	2.49	28
			3ヶ月				73	4.7	6.9	2.2	27
			1週				51.2	3.6	4.9	2.78	54
		気中	4週				59	4.2	5.7	2.88	55
			3ヶ月				62	3.8	5.2	0.74	28
1.5	水中	6ヶ月	133	167	1.5	62.1	5.1	7.1	0.96	24	
		4週				71.5	4.9	7.5	2.32	35	
		3ヶ月				67.4	3.6	6.1	3.65	57	
		1週				—	—	—	—	—	
	気中	4週				—	—	—	—	—	
		3ヶ月				—	—	—	—	—	

盛 1mm) を置き、50 倍の倍率でマイクロスコープを移動させ、ひび割れ本数とひび割れ幅を観測した。写真-2 に、ひび割れ写真の一例を示す。ひび割れ幅の計測については、1 条件 5 個の供試体の中で終局ひずみが平均値にもっとも近い 1 個の供試体についてのみ行った。なお、局所化し、幅が最大となったひび割れを対象から除いた。筆者らの経験では、引張力が作用している状態におけるひび割れ幅と、除荷後のひび割れ幅との差はほとんどなく、同程度とみなしてよい²⁾。

3. 実験の結果と考察

3.1 引張試験結果

本研究においては、前述のように、ひずみ硬化挙動と複数微細ひび割れ挙動を合わせて引張性能とよんでいる。

(1) 終局ひずみの定義

試験で得られたフレッシュ性状と力学性能とを、1 条件各 3 個の平均値で表-4 に示す。ダンベル型供試体の一軸引張り試験から得られた引張応力-ひずみ曲線を、

図-2~9 に示す。

なお、終局ひずみは、土木学会の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)¹⁾では、複数ひび割れが発生した後、特定のひび割れの拡大を伴いながら、荷重が大きく低下し始める軟化開始点のひずみと定義されている。しかし、測定した引張応力-ひずみ曲線のみから軟化開始点を判別することは容易でない場合も多い。

本研究においては、判別を容易にするため、引張強度点(引張応力が最大の点)のひずみを、終局ひずみと定義した。このため、引張強度点以降にひび割れが増え、ひずみが増加しても、終局ひずみには反映されない。そこで、引張性能の大小については、終局ひずみだけでなく、引張応力-ひずみ曲線の全体の形状と発生したひび割れ本数をも勘案して考察した。

なお、ひび割れ本数の増加が止まり、特定のひび割れが拡大(局所化)する軟化開始点を判別するには、供試体の検長領域全体を連続して撮影した高解像度のビデオ

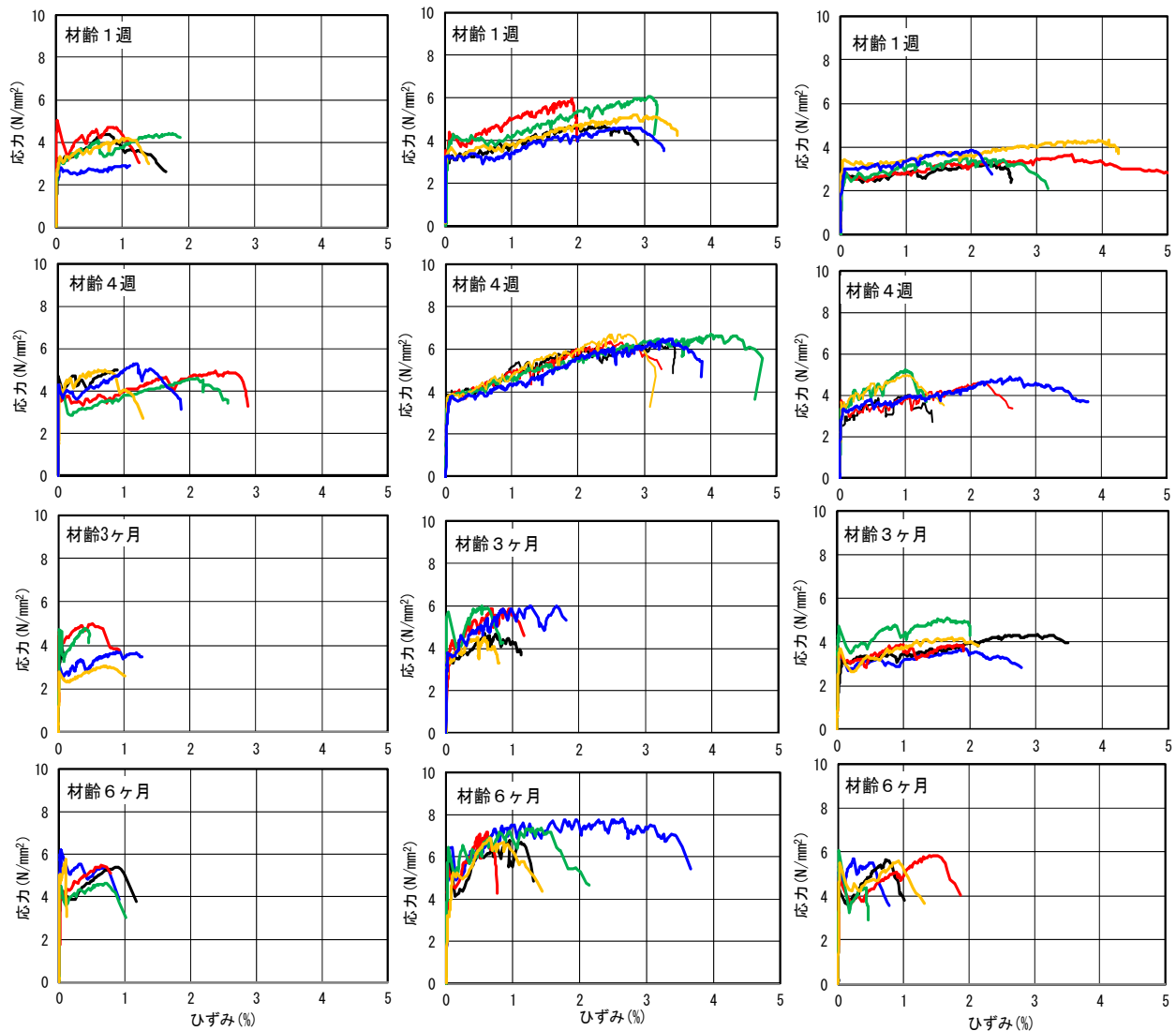


図-2 中強度 PE1.0% (水中養生)

図-3 高強度 PE1.0% (水中養生)

図-4 中強度 PE1.5% (水中養生)

映像を用いる必要があると考えている。

(2) ひずみ硬化挙動と複数微細ひび割れ挙動

表-4 ならびに図-2~9 からわかるように、材齢 6 ヶ月で比較した場合、PE 繊維を 1.0% 混入した供試体の終局ひずみは、高強度 PE 繊維のもの (水中: 1.01%, 気中: 2.20%) が中強度 PE 繊維のもの (水中: 0.49%, 気中: 0.53%) より、水中養生では約 2 倍大きく、気中養生では約 4 倍大きかった。PE 繊維を 1.5% 混入し水中養生した供試体の終局ひずみは、高強度 PE 繊維のもの (0.96%) が中強度 PE 繊維のもの (0.63%) より、1.5 倍大きかった。表-4 の左端欄からわかるように、全体的に、水中養生を続けると終局ひずみとひび割れ本数が減少する傾向が認められた。

表-4 からわかるように、材齢 6 ヶ月で比較すると、PE 繊維を 1.0% 混入した HPRCC ダンベル供試体のひび割れ本数は、水中養生と気中養生のいずれの場合も、高強度 PE 繊維を用いたもの (水中: 15 本, 気中: 27 本) が中強度 PE 繊維を用いたもの (水中: 3 本, 気中: 6 本)

より、5 倍程度多かった。

PE 繊維を 1.5% 混入し水中養生した供試体の材齢 6 ヶ月でのひび割れ本数は、高強度 PE 繊維を用いたもの (24 本) が中強度 PE 繊維を用いたもの (10 本) より、2.4 倍大きかった。なお、PE 繊維を 1.5% 混入したものについては、前述のように、気中養生での試験を行っていない。

図-10 に、終局ひずみとひび割れ本数の関係を示す。図からわかるように、両者の間には強い相関がみられた。

次に、PE 繊維の種別ごとにみると、高強度 PE 繊維を 1.0 または 1.5% 混入し、水中ならびに気中養生した HPRCC では、材齢 6 ヶ月までの試験の結果、明確なひずみ硬化挙動と複数微細ひび割れ挙動が認められた。なお、高強度 PE 繊維を用い水中養生した場合には、引張終局ひずみは、材齢 4 週で最も大きくその後低下しているが、このことについてはさらに長期の材齢における試験結果を踏まえて検討が必要だと考えている。PE 繊維混入率 1.0% と 1.5% のものを比較すると、1.5% の方が 1.0%

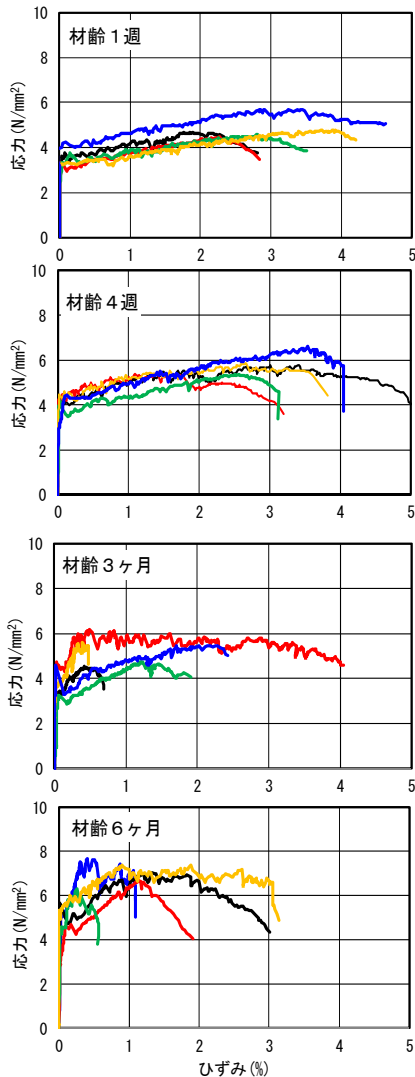


図-5 高強度 PE1.5% (水中養生)

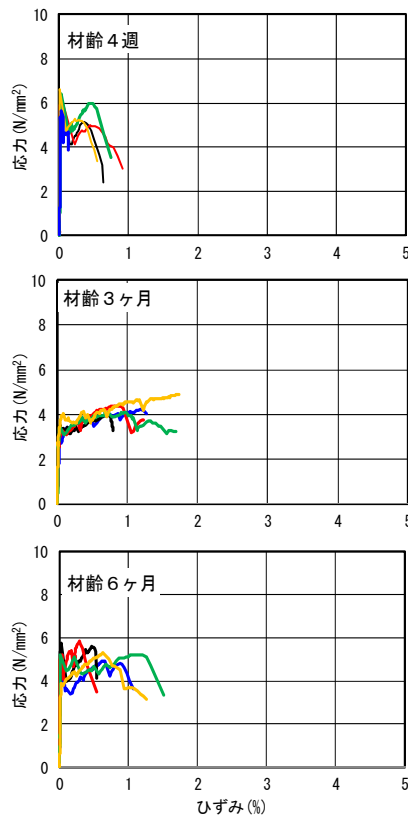


図-6 中強度 PE1.0% (気中養生)

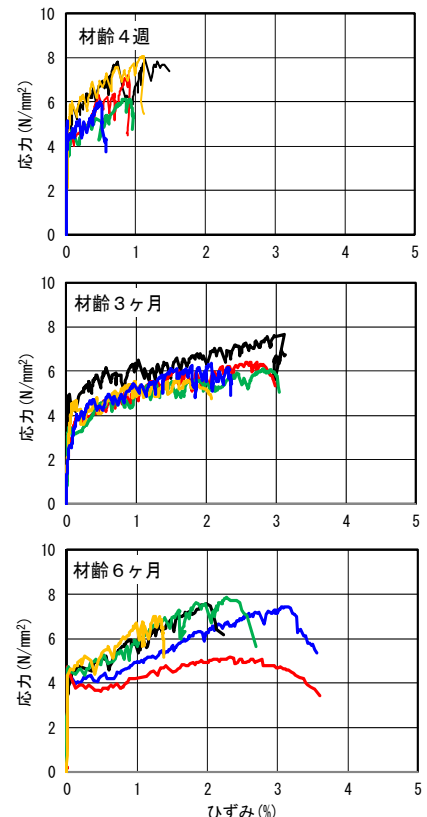


図-7 高強度 PE1.0% (気中養生)

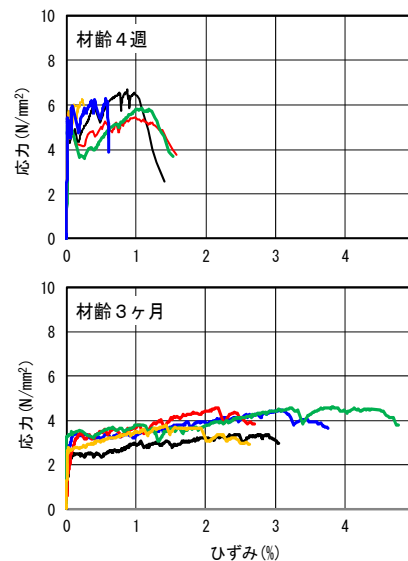


図-8 中強度 PE1.5% (気中養生)

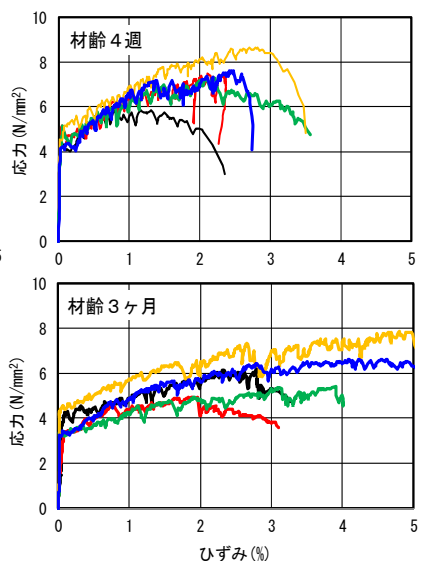


図-9 高強度 PE1.5% (気中養生)

のものより、これらの引張性能は若干大きいものの、大きな差はみられなかった。

中強度 PE 繊維を 1.5% 混入し水中あるいは気中養生した HPRCC では、材齢 3 ヶ月までは明確な引張性能を示したが、水中養生したもので材齢 6 ヶ月では引張性能が低下した。

中強度 PE 繊維を 1.0% 混入した HPRCC では、いずれの養生条件においても、引張性能は小さかった。

本研究の範囲では、材齢がすすみ、ひび割れ発生強度が高くなると、引張終局ひずみが小さくなる傾向が見られた。この傾向は中強度 PE 繊維を用いた場合に顕著であった。中強度 PE 繊維を用いる場合には、空気量を増やすなど、配合を修正することにより、長期材齢においてひび割れ発生強度が大きくなるようにする必要があり、今後さらに検討する予定である。

(3) ひび割れの幅

材齢 6 ヶ月の試験結果において、前述のように代表的な 1 個のダンベル型供試体の検長区間 (80mm) で生じ

表-5 ひび割れ幅の測定例 単位 [mm]

材齢 6ヶ月	中強度 (1.0%)		中強度 (1.5%)		高強度 (1.0%)		高強度 (1.5%)
	水中	気中	水中	水中	気中	水中	
養生							
平均	0.020	0.033	0.025	0.022	0.027	0.022	
最小	0.020	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	
最大	0.020	0.062	0.041	0.051	0.052	0.032	

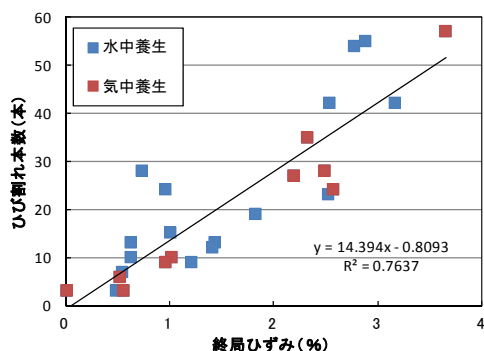


図-10 終局ひずみとひび割れ本数の関係

るひび割れ幅の計測結果を表-5 に示す。平均値は 0.02～0.03mm，最大値は 0.02～0.06mm 程度であった。高強度 PE 繊維を用いた場合に比べ，中強度 PE 繊維を用いた場合には，ひび割れ幅は 1～2 割大きくなった。

3.2 圧縮強度試験結果

水中養生した HPFRCC の圧縮強度は，PE 繊維の種類や繊維混入率に関係なく，材齢 6 ヶ月まで緩やかに増加した。気中養生した HPFRCC では，材齢 4 週までの圧縮強度の増加に比べ，その後の増加は緩やかになった。材齢 3 ヶ月ならびに 6 ヶ月では，水中養生した HPFRCC よりも気中養生した HPFRCC の方が，圧縮強度が 10% 程度大きくなった。通常のコンクリートと同様に，乾燥により組織が緻密化して圧縮強度が増加したものと考えられる。

繊維混入率が 1.0% と 1.5% の HPFRCC の圧縮強度は，ほぼ同じであった。高強度 PE 繊維を用いた HPFRCC では，中強度 PE 繊維に比べ，空気量が若干小さいこともあり，圧縮強度が 1～3% 高い値となった。

4. おわりに

従来から用いられている高強度 PE 繊維に加え，開発中の中強度 PE 繊維を用いて HPFRCC（繊維混入率 1.0%

と 1.5%）を作製し，その引張性能に及ぼす材齢（6 ヶ月まで）と養生条件（水中と気中）の影響について検討し，下記の結果を得た。

- (1) 高強度 PE 繊維を用い，水中あるいは気中養生した HPFRCC では，材齢 6 ヶ月までの試験の結果，明確な引張性能（ひずみ硬化挙動と複数微細ひび割れ挙動）が認められた。
- (2) 中強度 PE 繊維を 1.5% 混入し水中あるいは気中養生した HPFRCC では，材齢 3 ヶ月までは明確な引張性能を示したが，水中養生したもので材齢 6 ヶ月では引張性能が低下した。中強度 PE 繊維を 1.0% 混入した HPFRCC では，いずれの養生条件においても，引張性能は小さかった。
- (3) 材齢 6 ヶ月の試験結果において，ダンベル型供試体の検長区間（80mm）で生じるひび割れ幅の平均値は 0.02～0.03mm，最大値は 0.02～0.06mm 程度であった。
- (4) 本研究で用いた HPFRCC の圧縮強度は，材齢の進行に伴って増加し，水中養生よりも気中養生，中強度 PE 繊維より高強度 PE 繊維の方が大きかった。

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, 2007.3
- 2) 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 HPFRCC 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, 2008.6
- 3) 近藤遊，浅野幸男，前田徳一，六郷恵哲：袋練混ぜ方法により作成した HPFRCC の配合と力学特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.33, No.1, pp.245-250, 2011.7