論文　ハイブリッド型繊維補強セメント系複合材料の力学特性に及ぼす極短繊維の影響

菊田　貴恒[*1]・三橋　博三[*2]

要旨：物性の異なる複数種の繊維を組み合わせたハイブリッド型繊維補強セメント系複合材料のさらなる性能向上を目的に，長繊維および短繊維と共に繊維長さ 0.1mm～0.5mm にカットされた極短繊維の複合混入がその複合材料の力学特性に及ぼす影響を，三点曲げ試験及び一軸引張試験により比較検討した。その結果，繊維長さが 0.1mm～0.5mm という極短繊維であっても，初期ひび割れ以降の安定したひび割れ進展挙動を実現し得る短繊維との適切な比率で複合混入することで，十分にひび割れ補強繊維として架橋性能を発揮することが明らかとなった。

キーワード：極短繊維，金属繊維，化学合成繊維，複合混入，曲げ性状

1. はじめに

セメント系材料の引張性能の改善を目的にモルタルに繊維を混入した繊維補強セメント系複合材料(Fiber Reinforced Cementitious Composites, 以下，FRCC)が開発され，さらに，擬似ひずみ硬化を伴いながら複数ひび割れを起こすことで FRCC の変形性能を大きく向上させた HPFRCC に関する研究 [1)]も行われている。これらの技術を応用し，高い圧縮強度に加えて引張強度及び靭性能を向上させた超高強度高靭性 FRCC を実現できれば，社会基盤構造物や建築物の更なる性能向上が見込まれ，豊かな居住環境を確保することができると考えられる。

このような中, 筆者らは高い強度と靭性能を両立した材料を実現すべく，物性の異なる複数種の繊維を組み合わせたハイブリッド型繊維補強セメント系複合材料（Hybrid Fiber Reinforced Cementitious Composites, 以下 HFRCC）を提案してきた [2)]。これは長さ 30mm 程度の繊維（以下，長繊維と定義する）と長さ 10mm 前後の繊維（以下，短繊維と定義する）とを複合混入することで，マクロなひび割れからメゾ，ミクロなひび割れまでを多段階的にひび割れ補強し，高引張強度と高靭性能の両立を目指したものである。即ち適切に繊維を複合混入することで，それぞれの繊維の単一混入時の性能よりも高い性能が発現することが確認されている。

しかし, 近年のセメント系材料の著しい高強度化やさらなる長寿命化への対応など，これらの多様な要求性能に対応可能な HFRCC を実現していくには従来の材料設計では限界があると言える。特に繊維については，これまで一般的に使用されてきた長繊維や短繊維は施工性，分散性などの観点から混入量に限界があり，HFRCC のさらなる性能向上を目指すためには新たな繊維を調合設計に取り入れていく必要があると考えられる。現在，新たな補強材料としてカーボンナノチューブ [3)]やセルロースナノファイバー[4)]のようなナノサイズの繊維に様々な分野からの注目が集まっており，また，樹脂系の分野においては微小な粉体状の繊維などが補強材料として広く使用されている。このようなセメント系分野以外で活用されている極短い繊維を従来から用いられている長繊維，短繊維と共に HFRCC に混入することで，より微視的なひび割れ領域からの多段階的なひび割れ補強が可能となり, 力学特性のさらなる向上が期待できると考えられる。

そこで本研究では，圧縮強度 100N/mm^2 程度の高強度モルタルマトリクスを対象に，長繊維および短繊維と共に繊維長 0.1mm～0.5mm にカットされた繊維（以下，極短繊維と定義する）の複合混入がその複合材料の力学特性に及ぼす影響を明らかにすることを目的とする。

2. 実験概要

2.1 使用材料および調合

本研究で用いた使用材料は，シリカフュームセメント，7 号硅砂，ポリカルボン酸系高性能減水剤，消泡剤である。詳細を**表－1** に示す。また，繊維については長繊維として両端フック付き鋼繊維(以下 DR 繊維, 長さ 30mm)，短繊維としてポリエチレン繊維（以下 PE 繊維，長さ 6mm)，極短繊維としてアラミド繊維（以下 AR 繊維）を用いた。その詳細を**表－2** に示す。極短繊維として混入した AR 繊維については繊維直径をすべて同一とし，繊維長さのみを 0.1mm，0.25mm，0.5mm の 3 水準とした。

本研究に用いた調合および試験体名称を**表－3** に示す。

*1 日本工業大学　建築学部建築学科准教授　博士（工学）　(正会員)
*2 東北大学　名誉教授　工学博士　(名誉会員)

水セメント比（W/C）は高強度なモルタルマトリクスとするため 0.16 を基本とした。一部の調合については水セメント比と極短繊維混入の関係を検討する目的で，0.36, 0.56 に設定した。なお，曲げ試験に用いた調合名は水セメント比（×100）−短繊維混入率−極短繊維混入率−極短繊維長を順に示している。繊維の組み合わせおよび繊維混入率については，まず極短繊維と短繊維との複合混入による複合材の力学特性を明らかにする目的で極短繊維を 0~3.5Vol.%, 短繊維の PE 繊維を 0.3~0.9Vol.%の範囲でそれぞれの繊維を複合混入した。さらに長繊維, 短繊維, 極短繊維の 3 種の繊維を複合混入した場合の複合材の力学特性を明らかにする目的で極短繊維を 1.0Vol.%，短繊維の PE 繊維を 0.3，0.5Vol.%，長繊維を 2.0Vol.%複合混入した。

2.2 練混ぜおよび養生

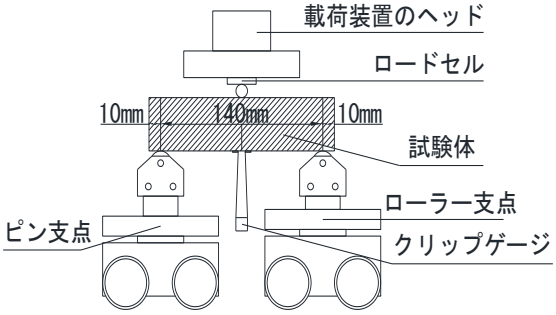
試験体の練混ぜには, 容量 10 リットルのオムニミキサーを用いた。まず, 粉体と細骨材を 1 分間空練り後，水，高性能減水剤，消泡剤を加えて 3 分間混練りを行った。次に，極短繊維を混入し 3 分間混練りし，その後短繊維を混入し 3 分間混練りした。3 種の繊維を複合混入した調合については，さらに長繊維を混入し 3 分間混練りした。養生方法は打設後 24 時間相対湿度 90%の養生室内で湿空養生を行い，脱枠後に蒸気養生を行なった。蒸気

表－1 使用材料

材料名称	略号	備考
セメント	C	シリカフュームセメント（密度：3.08g/cm^3）
細骨材	S	硅砂7号（密度：2.61g/cm^3）
消泡剤	−	ノニオン系界面活性剤（密度：1.01g/cm^3）
高性能減水剤	−	ポリカルボン酸系（密度：1.05g/cm^3）

表－2 使用繊維物性

繊維名	略号	密度 (g/cm^3)	繊維長さ (mm)	直径 (μ m)	引張強度 (MPa)
両端フック付き鋼繊維	DR	7.85	30	380	2610
ポリエチレン	PE	0.93	6	12	2580
アラミド	AR	1.39	0.1	13	3470
			0.25		
			0.5		

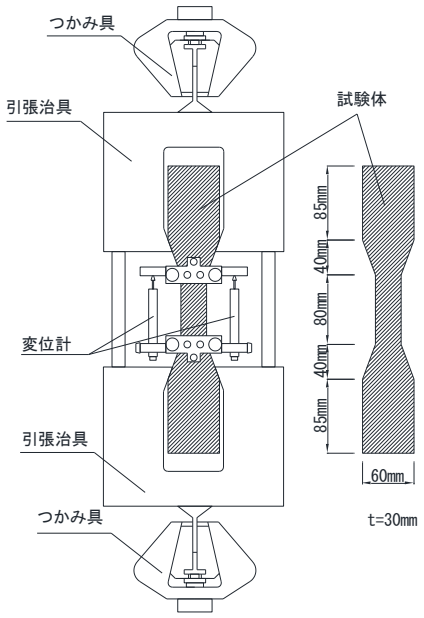


図－1 曲げ試験載荷治具および試験体詳細

表－3 調合

調合名	W/C	S/C	極短繊維 AR	短繊維 PE	長繊維 DR	備考
			(Vol.%)			
16-PE0.3	0.16	0.35	−	0.3	−	曲げ試験 短繊維 単独混入
16-PE0.5				0.5		
16-PE0.7				0.7		
16-PE0.9				0.9		
36-PE0.5	0.36			0.5		
56-PE0.5	0.56			0.5		
16-PE0.5-AR1.1-0.1	0.16		1.1	0.5		曲げ試験 極短繊維 ＋短繊維 複合混入
16-PE0.5-AR1.5-0.1			1.5			
16-PE0.5-AR1.7-0.1			1.7			
16-PE0.5-AR2.0-0.1			2			
16-PE0.5-AR1.1-0.25			1.1			
16-PE0.5-AR1.5-0.25			1.5			
16-PE0.5-AR1.7-0.25			1.7			
16-PE0.5-AR2.0-0.25			2			
16-PE0.5-AR1.1-0.5			1.1			
16-PE0.5-AR1.5-0.5			1.5			
16-PE0.5-AR1.7-0.5			1.7			
16-PE0.5-AR2.0-0.5			2			
16-PE0.5-AR2.2-0.5			2.2			
16-PE0.3-AR0.6-0.5			0.6	0.3		
16-PE0.3-AR1.2-0.5			1.2			
16-PE0.3-AR1.8-0.5			1.8			
16-PE0.3-AR2.4-0.5			2.4			
16-PE0.3-AR3.0-0.5			3			
16-PE0.3-AR3.5-0.5			3.5			
16-PE0.7-AR1.1-0.5			1.1	0.7		
16-PE0.7-AR1.2-0.5			1.2			
16-PE0.7-AR1.3-0.5			1.3			
16-PE0.7-AR1.5-0.5			1.5			
16-PE0.7-AR1.7-0.5			1.7			
16-PE0.9-AR0.1-0.5			0.1	0.9		
16-PE0.9-AR0.3-0.5			0.3			
16-PE0.9-AR0.5-0.5			0.5			
16-PE0.9-AR0.7-0.5			0.7			
16-PE0.9-AR1.0-0.5			1			
16-PE0.9-AR1.2-0.5			1.2			
36-PE0.5-AR0.7-0.5	0.36		0.7	0.5		
36-PE0.5-AR0.9-0.5			0.9			
36-PE0.5-AR1.0-0.5			1			
36-PE0.5-AR1.1-0.5			1.1			
36-PE0.5-AR1.3-0.5			1.3			
36-PE0.5-AR1.5-0.5			1.5			
36-PE0.5-AR1.7-0.5			1.7			
36-PE0.5-AR2.0-0.5			2			
36-PE0.5-AR2.2-0.5			2.2			
56-PE0.5-AR0.3-0.5	0.56		0.3			
56-PE0.5-AR0.5-0.5			0.5			
56-PE0.5-AR0.7-0.5			0.7			
DR-PE0.3	0.16		−	0.3	2	一軸引張 2種及び 3種複合
DR-PE0.3-AR1.0-0.5			1			
DR-PE0.5			−	0.5		
DR-PE0.5-AR1.0-0.5			1			

*DR-PE0.3 および DR-PE0.5 シリーズについては，いずれも W/C 0.16，鋼繊維混入率 2.0Vol.%



図－2 ダンベル型試験体掴み治具と試験体詳細

養生は20℃から1時間ごとに15℃ずつ温度を上げていき，最大 90℃になったところから 24 時間保持した。その後養生室内（室温 20℃）で湿空養生し，材齢 7 日で載荷試験を行なった。

2.3 曲げ試験および一軸引張試験方法

本研究では JIS A6208[5]を参考に 4×4×16cm の角柱試験体を用いた切欠き梁の 3 点曲げ試験を行なった。試験体と載荷装置の詳細を**図－1** に示す。切欠きは試験体中央部に深さ 20mm とし，クリップゲージによりひび割れ肩口開口変位（以下，CMOD）を計測した。一軸引張試験は，土木学会指針 [6]に示されるダンベル型試験体（有効断面積 30×30mm，検長区間 80mm）を用いた。試験体形状と載荷装置の詳細を**図－2** に示す。いずれの試験も容量 100kN の万能試験機を使用し，載荷速度 0.5mm/min で変位制御にて実施した。なお，本研究では調合ごとに 6 体の試験をし，それらの荷重－CMOD 関係及び引張応力-ひずみ関係の平均を用いて比較検討した。

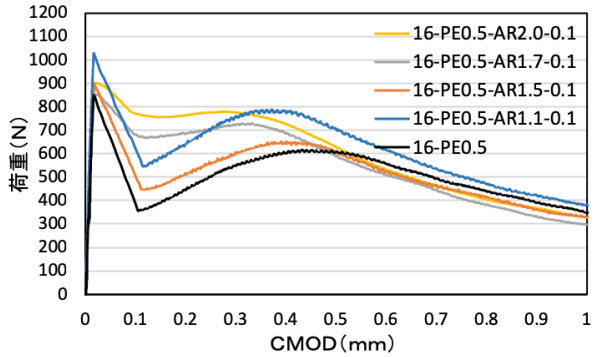
3. 実験結果および考察

3.1 曲げ特性に及ぼす極短繊維長さの影響

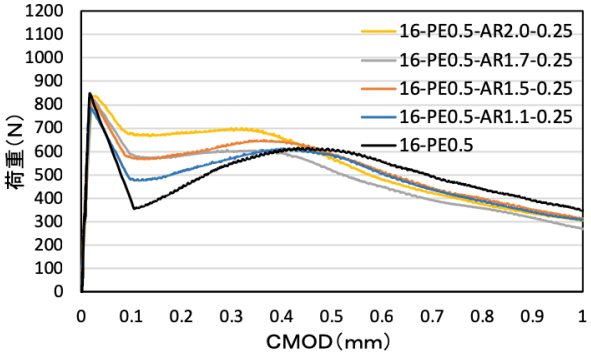
図－3 に繊維長 0.1，0.25，0.5mm の極短繊維と繊維長 6mm の短繊維を複合混入した試験体による荷重－CMOD 関係を示す。なお**図－3** の各図には比較のために短繊維を単独混入した場合の荷重－CMOD 関係も合わせて示している。**図－3**(a)，(b)，(c)より，短繊維を単独で混入した試験体は 850N 付近で初期ひび割れの発生を迎え，そのひび割れ発生に伴い 350N 付近まで急激な荷重低下を示している。その後ひび割れ進展に伴う繊維架橋により緩やかに荷重が上昇し，CMOD が 0.4～0.5mm に達した時点で荷重上昇のピークを迎えている。このように初期ひび割れから繊維架橋による荷重上昇のピークを迎えるまでの範囲において，荷重－CMOD 関係が谷のような形を示していることから，短繊維の単独混入ではひび割れ発生時までに蓄積されるひずみエネルギー量に対してひび割れの急激な進展を抑制する架橋力が不足していると考えられる。

一方，極短繊維と短繊維を複合混入したものでは，**図－3**(a)に示すように極短繊維の繊維長さが 0.1mm であってもその混入率を増加させることで初期ひび割れ以降の荷重低下が徐々に小さくなり，極短繊維の混入率が 2.0 Vol.%時には初期ひび割れ以降の急激な荷重低下はほぼなくなり，非常に安定的なひび割れ進展挙動を示した。したがって，繊維長さが 0.1mm（アスペクト比：7.7）の極短繊維であっても短繊維の単独混入時に不足した架橋力を補うことが可能であり，十分にひび割れ補強繊維として機能することが明らかとなった。

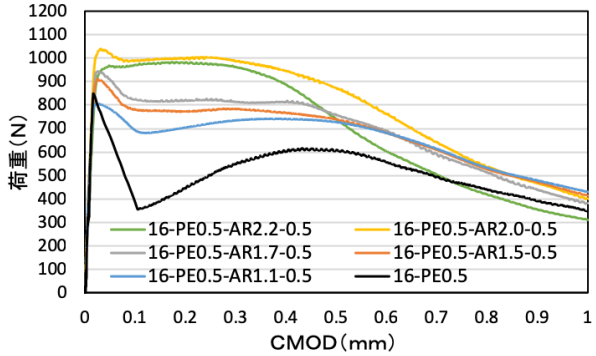
また，**図－3**(c)に示す繊維長さ 0.5mm の極短繊維混入時と，**図－3**(a)，(b)に示す繊維長さが 0.1，0.25mm の荷重－CMOD 関係を比較すると，繊維長さ 0.5mm では繊維混入率 1.1Vol.%と他の繊維長さよりも少ない混入率で初期ひび割れ以降の急激な荷重低下が抑制されている。さらに繊維長さ 0.5mm の極短繊維混入時には繊維混入



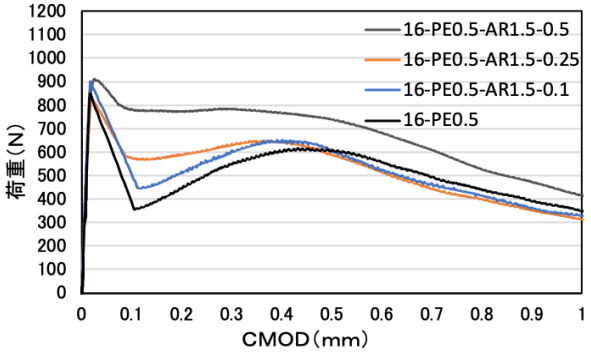
(a) 極短繊維長さ 0.1mm



(b) 極短繊維長さ 0.25mm



(c) 極短繊維長さ 0.5mm



(d) 同一混入量における極短繊維長さの影響比較

図－3 各極短繊維長さにおける荷重-変位関係

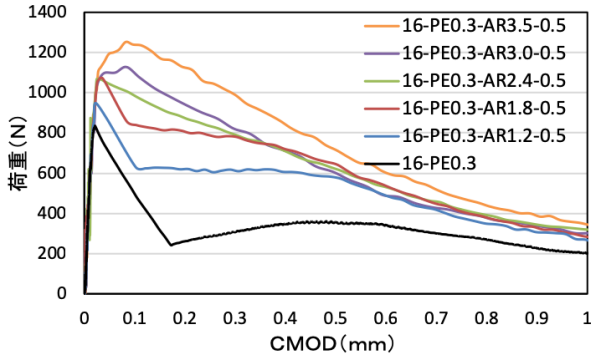
率を 2.2Vol.%まで増加させると，初期ひび割れの発生による荷重低下が一切起こらずに繊維架橋による荷重の上昇が発現しており，短繊維単独混入時の荷重－CMOD 関係に見られる初期ひび割れ後の谷のような形の挙動がほぼ完全になくなっている。**図－3(d)**にはそれぞれの長さの極短繊維を 1.5Vol.%混入した試験体の荷重－CMOD 関係を示す。**図－3(d)**より，極短繊維の混入率が 1.5 Vol.%と同一の場合，極短繊維の長さが 0.1mm よりも 0.5mm と長くなるにしたがって初期ひび割れの発生に伴う荷重低下が小さくなり，より安定したひび割れ進展となることがわかった。

これらのことから，短繊維と共に複合混入した極短繊維は長さが 0.1mm～0.5mm と非常に短いが，FRCC に一般的に使用されている長さ 10mm 前後の短繊維と同様にその繊維混入率および繊維長さによって曲げ特性に明確な差異を示すことが明らかとなった。

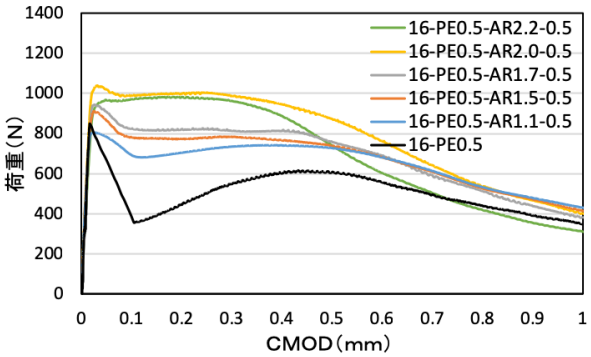
3.2 曲げ特性に及ぼす極短繊維と短繊維の複合混入率の影響

短繊維混入率を 0.3，0.5，0.7，0.9Vol.%の 4 水準としそれぞれに長さ 0.5mm の極短繊維を複合混入した試験体から求めた荷重－CMOD 関係を**図－4** に示す。なお**図－4** の各図には比較のために短繊維を単独混入した場合の荷重－CMOD 関係も合わせて示している。**図－4(a)**，**(b)**，**(c)**，**(d)**より，各短繊維混入率における短繊維単独混入に着目すると，短繊維混入率の増加と共に初期ひび割れ発生後の急激な荷重低下は小さくなり，0.7, 0.9Vol.%の混入率になると初期ひび割れ後の繊維架橋により荷重が上昇し，初期ひび割れ荷重を超える値を示している。しかしながら，短繊維の単独混入では混入率を 0.9Vol.%まで増加させたとしても，初期ひび割れから繊維架橋による荷重上昇のピークを迎えるまでの範囲において，荷重－CMOD 関係が谷のような形を示していることから，初期ひび割れ後の荷重低下を伴う急激なひび割れ進展を抑制しきれないことがわかった。

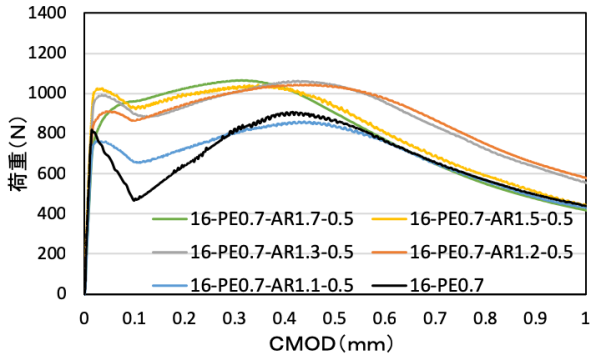
一方，**図－4(a)**に示す短繊維 0.3Vol.%に極短繊維を複合混入したものでは，極短繊維の混入率の増加により初期ひび割れ後の急激な荷重低下が小さくなり，極短繊維の混入率を短繊維混入率の 10 倍となる 3Vol.%まで増加させると初期ひび割れ後の谷のような形の挙動がほぼ完全になくなり，安定したひび割れ進展挙動を示した。また，**図－4(b)**に示す短繊維 0.5Vol.%に極短繊維を複合混入したものでは，極短繊維を 1.1Vol.%混入すると初期ひび割れ後の急激な荷重低下はほぼ抑制されており，短繊維混入率の 4.4 倍となる 2.2 Vol.%の極短繊維を混入することで初期ひび割れ後の谷のような形の挙動がほぼ完全になくなり，CMOD 0.3mm 付近まで最大荷重を保ちながら安定したひび割れ進展挙動を示している。**図－4(d)**に示す短繊維 0.9Vol.%に極短繊維を複合混入したものも前述した短繊維混入率の場合と同様な傾向を示しており，短繊維混入率の 1.33 倍となる 1.2Vol.%の極短繊維を混入する



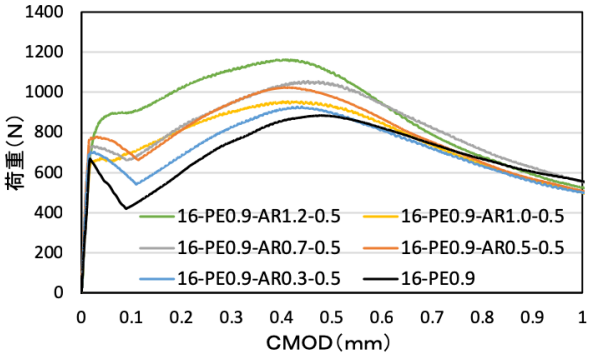
(a) 短繊維 0.3Vol.%



(b) 短繊維 0.5Vol.%



(c) 短繊維 0.7Vol.%



(d) 短繊維 0.9Vol.%

図－4 各短繊維混入率における荷重-変位関係

ことで初期ひび割れ後の谷形の挙動はほぼ完全になくなっている。

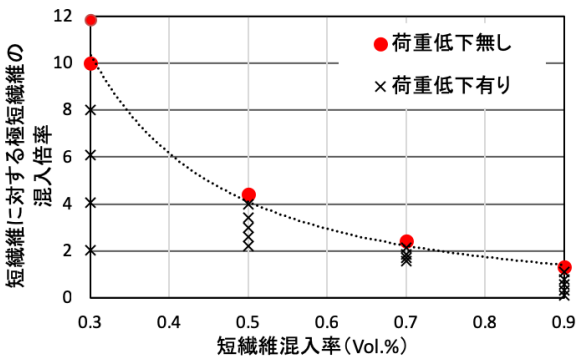
図－5 にそれら安定したひび割れ進展挙動となるために必要な短繊維に対する極短繊維の混入倍率（極短繊維混入率/短繊維混入率）と短繊維混入率との関係を示す。図中の○および×は，**図－4** に示したそれぞれの短繊維混入率に対して極短繊維を混入した場合の初期ひび割れ後の急激な荷重低下の有無を示している。**図－5** より，初期ひび割れ後の荷重低下を伴う急激なひび割れ進展を抑制し安定したひび割れ進展挙動となるには，それぞれの短繊維混入率に対して図中に示す○印以上の極短繊維を混入する必要があること，短繊維混入率が増加するにしたがって安定したひび割れ進展挙動を実現するために補うべき繊維架橋力が減少するため，それに伴い必要となる極短繊維混入率も低下する傾向にあることがわかる。

以上より，いずれの短繊維混入率においても極短繊維を適切な比率で混入することで，安定したひび割れ進展挙動を示すことが確認された。これは，緻密に分散した極短繊維が短繊維のみでは補強しきれないひび割れ先端から広がる破壊進行領域における微視的なひび割れをも補強し，初期ひび割れ後の荷重低下を伴う急激なひび割れ進展を抑制しているためと考えられる。

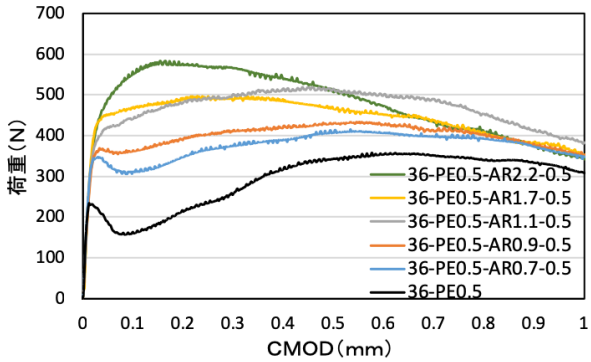
3.3 安定したひび割れ進展挙動に必要となる極短繊維混入率と水セメント比との関係

図－6 に水セメント比を 0.36，0.56 とした試験体における極短繊維混入率と荷重－CMOD の関係を示す。**図－6(a)** に示す水セメント比 0.36 の結果から，極短繊維を 0.9Vol.%混入までは初期ひび割れ後の荷重低下挙動が見られるのに対して，1.1Vol.%以上の混入率ではそれらの挙動は見られず，初期ひび割れ後に直ちに繊維架橋による穏やかな荷重上昇挙動が確認される。また，**図－6(b)** に示す水セメント比 0.56 の結果では，極短繊維が 0.3，0.5Vol.%までは短繊維のみとほぼ同様な挙動を示しているが，極短繊維を 0.7Vol.%混入すると初期ひび割れ後の荷重低下もほぼなくなり，CMOD が 4mm 程度までの領域において短繊維のみの試験体結果よりも高い荷重レベルを保っていることが確認される。

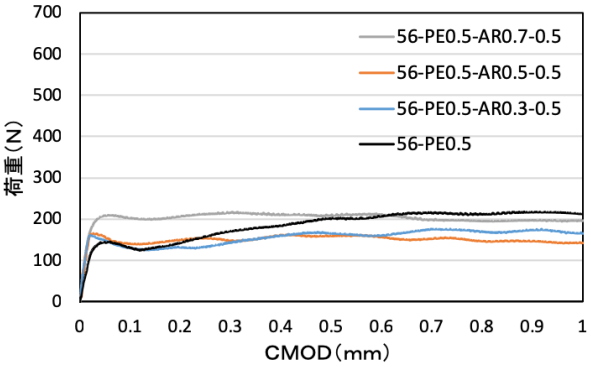
図－7 には水セメント比 0.16 の結果も含め，各水セメント比における極短繊維混入率と初期ひび割れ後の荷重低下の有無と圧縮強度の関係を示す。なお，短繊維である PE 繊維についてはすべての調合で 0.5Vol.%である。水セメント比 0.16，0.36 に着目すると，水セメント比 0.16 における圧縮強度は 110MPa，0.36 では 58MPa と水セメント比が増えることで圧縮強度はおおよそ半分になっている。一方，安定したひび割れ進展挙動に必要な極短繊維混入率は水セメント比 0.16 で 2.2Vol.%，0.36 では 1.1Vol.%と水セメント比が増えることで圧縮強度と同様



図－5 初期ひび割れ以降の荷重低下の有無と極短繊維−短繊維混入倍率の関係

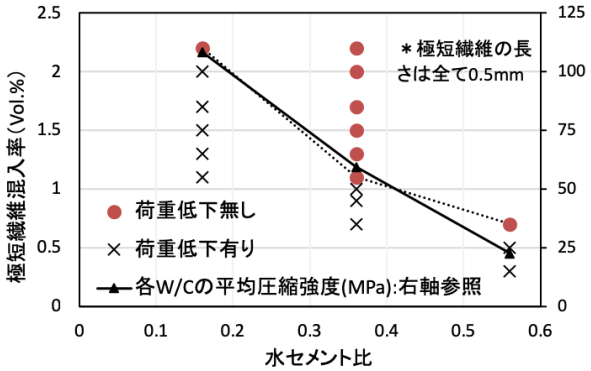


(a) 水セメント比 0.36



(b) 水セメント比 0.56

図－6 各水セメント比における荷重−変位関係



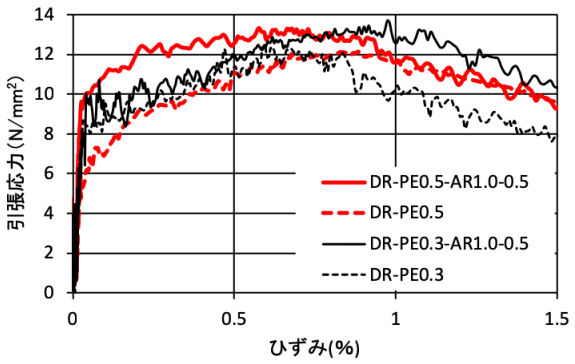
図－7 各水セメント比における初期ひび割れ以降の荷重低下の有無と圧縮強度の関係

に半分の混入率となっている。このような傾向を示す要因はモルタルマトリクスの圧縮強度，言い換えれば圧縮強度と等価なモルタルマトリクスの緻密さの変化に伴い初期ひび割れ発生時までに蓄積されるひずみエネルギー量が変化するため，安定したひび割れ進展挙動に必要な極短繊維混入率もそれに比例して変化したと考えられる。

3.4 極短繊維，短繊維，長繊維の３種複合混入による一軸引張特性について

一軸引張特性に及ぼす極短繊維の影響を明らかにする目的で求めた長繊維，短繊維と共に極短繊維混入の有無による一軸引張応力-ひずみ関係を**図－8** に示す。長繊維の混入率は 2.0Vol.%，短繊維の混入率は 0.3 Vol.%及び 0.5Vol.%とし，極短繊維は 1.0Vol.%の混入率とした。**図－8** より，短繊維混入率を 0.3Vol.%とした試験体では初期ひび割れ強度ならびにひずみ 0.7%付近までの挙動に極短繊維の有無で大きな差異は見られず，ポストピーク領域の挙動に違いが認められる。一方，短繊維混入率を 0.5Vol.%とした試験体では，ひずみ 0.6%付近までの領域において極短繊維の混入により引張応力が著しく向上していることがわかる。

このように極短繊維，短繊維，長繊維の３種の繊維の複合混入において，短繊維混入率の違いにより極短繊維の混入効果に違いが現れる要因は，**図－4**(a)，(b)に示す極短繊維混入率 1.0Vol.%に近い試験体結果から推察できる。すなわち，**図－4**(a)に示す短繊維 0.3Vol.%混入における極短繊維 1.2Vol.%混入時の挙動と**図－4**(b)に示す短繊維 0.5Vol.%混入における極短繊維 1.1Vol.%混入による結果を比較すると，短繊維混入率 0.3Vol.%では初期ひび割れ後に急激な荷重低下が起こっており，小さな変位領域においては極短繊維無混入とあまり変わらない挙動を示している。一方，**図－4**(b)に示す短繊維混入率 0.5Vol.%では初期ひび割れ後の荷重低下も極僅かで，その後も繊維



図－8 極短繊維混入の有無による引張応力—ひずみ関係の比較

架橋による穏やかな荷重上昇が見られていることから，短繊維 0.3Vol.%混入の試験体よりも，より安定したひび割れ進展挙動を示していると言える。したがって，3 種類の繊維の複合混入による一軸引張挙動においては，安定したひび割れ進展挙動を実現する極短繊維と短繊維の適切な混入比率でなければ，極短繊維を複合混入した効果が発現しないと考えられる。

4. まとめ

本研究から得られた知見を以下に示す。

(1) 繊維径 13μm，繊維長さが 0.1mm～0.5mm という低アスペクト比の極短繊維であっても，短繊維と適切な比率で混入することで，ひび割れ補強繊維として架橋性能を十分に発揮することが明らかとなった。

(2) 初期ひび割れ後の安定したひび割れ進展挙動を実現するのに必要となる極短繊維の混入率は，短繊維混入率とモルタルマトリクスの緻密さの双方と強い関係がある。

(3) 一軸引張応力下においても，極短繊維と短繊維を適切な混入比率とすることで，引張性能が向上することが明らかとなった。

参考文献

1) Naaman, A. E and Reinhardt，H. W. : Characterization of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites – HPFRCC, High Performance Fiber Reinforced Cement Composites (HPFRCC2)，pp.1-24，1995

2) 川又篤，三橋博三，金子佳生，福山洋：ハイブリッド型繊維補強セメント系複合材料の靭性能に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.2，pp.235-240，2001

3) Rabah, H. et al. : Microstructure and mechanical performance of modified mortar using hemp fibers and carbon nanotubes, Materials & Design Vol.56, pp.60-68, 2014

4) 白石浩平，矢野徹，三田浩貴，遠藤貴士:木質セルロースナノファイバー配合による天然ゴムの物質改善，近畿大学次世代基盤技術研究所報告，Vol.4 ，pp.43-47, 2013

5) 日本規格協会：JIS A 6208 コンクリート及びモルタル用合成短繊維，2018

6) 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