

# 論文 短繊維混入形ポリマーセメントモルタルの性能評価に関する研究

谷ヶ崎 世司<sup>\*1</sup>・三浦 智之<sup>\*2</sup>・大下 英吉<sup>\*3</sup>・出井 丈也<sup>\*4</sup>

要旨：モルタルやコンクリートの引張強度や曲げ強度ならびに脆性的な破壊挙動を改善する目的として、短繊維またはポリマーを混入した実験的検討が数多くなされている。しかし、短繊維とポリマーの両方が混入されたものに関しては十分に検討されていない。本研究では、2種類の短繊維とポリマーを用いて砂セメント比、ポリマーセメント比、短繊維の体積混入率をパラメータとしたモルタルを用いて、各種性状の検討を行った。その結果、繊維とポリマーの最適な組み合わせが明らかになり、繊維混入率、ポリマーセメント比、砂セメント比が曲げ強度および圧縮強度に及ぼす影響を把握した。

キーワード：アラミド繊維，ビニロン繊維，ポリマーセメントモルタル，曲げ強度，圧縮強度

## 1. はじめに

近年、鉄筋コンクリート構造物の塩害や中性化、新幹線高架軌道スラブや自動車専用道路の高架橋床版等に交通荷重によるひび割れが生じ、耐久性・耐荷性が低下している。この対策として、多数のRC構造物で補修・補強を実施し健全化を図る必要性が増加している。そのような中で、ポリマーセメントモルタルは普通セメントモルタルに比較し、曲げ強度と引張強度および伸び能力が大きく、透水性が小さく、鉄筋への付着力が大きいいため、断面欠損箇所の補修や補強を目的とした補修材料として広く用いられている<sup>2)</sup>。また、コンクリートやモルタルの欠点である脆性的な性質を改善し高靱性化する方法の一つに短繊維を混入する方法がある。短繊維を混入することによって、引張力を分担しひび割れを分散させることでひび割れ幅を微細に抑え、大きな引張変形と靱性をもたらすことができる。これまでは、スチール繊維を混入したコンクリートに関する研究が数多く実施されていたが、スチール繊維は重量が大きいことや、錆の発生などが検討課題となっていた。そのため、最近では軽量で耐食性に優れる合成繊維を用いた研究が行われており、スチール繊維と同等の補強効果が得られている<sup>1)</sup>。そこで、ポリマーセメントモルタルに合成繊維を混入することにより、耐力や靱性を向上させ、補修材料として用いることも可能であると考えられる。しかしながら、合成繊維を混入したポリマーセメントモルタルに着目した研究例は少なく、その性能は未だ明らかにされていないのが現状である。

このような観点より、本研究ではポリマーセメントモルタルに2種類の合成繊維(共重合パラ型アラミド繊維、ポリビニルアルコール繊維)を混入し、フレッシュ性状実験、曲げ試験、圧縮試験を実施し、各種性状の検討を行

った。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料

本実験の短繊維混入形ポリマーセメントモルタルにおいて使用した材料のうち、セメントは普通ポルトランドセメント、セメント混和用ポリマーはアクリル共重合再乳化形粉末樹脂(PAE1)、カチオン性を付与したアクリル共重合再乳化形粉末樹脂(PAE2)の2種類を使用した。また、短繊維は共重合パラ型アラミド繊維(アラミド繊維、AF)およびポリビニルアルコール繊維(ビニロン繊維、PVA)を用いた。アラミドおよびビニロン繊維の物性は表-1に示す。同表に示すように、繊維自体の力学的特性はアラミド繊維の方が剛性が高い。

表-1 繊維の物性

繊維	密度	引張強度	引張弾性率	破断伸度
	g/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	(%)
アラミド	1.39	3500	74000	4.6
ビニロン	1.30	1500	36900	7.2

### 2.2 練混ぜ方法

練混ぜはまず、砂・セメント・ポリマーをプレミックスし、1分間空練りをした後、水を投入し1分30秒間オムニミキサーで練混ぜた。その後、低速回転でミキサーを回しながら繊維を投入し、2分間練混ぜを行った。その際、繊維およびポリマー混入による空気量の増大を抑制するため、ミキサー内を真空にした状態で練混ぜを行った。

### 2.3 養生方法

試験体(4×4×16 cm)は、打設後24時間で脱型し、水中で5日間養生した後、温度20±2℃、相対湿度60±10%で21日間気中養生を施した。

\*1 中央大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (正会員)

\*2 中央大学 理工学部土木工学科 (正会員)

\*3 中央大学 理工学部土木工学科教授 工博 (正会員)

\*4 帝人テクノプロダクツ(株) 高機能繊維技術開発部 界面技術グループ (非会員)

表 - 2 実験パラメータおよび試験結果の一覧

試験体	W/C(%)	S/C	P/C(%)	ポリマー	Vf(%)	繊維	フロー値(mm)	空気量(%)	曲げ強度(N/mm <sup>2</sup> )	圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )	
No.1	45	0	0	/	0	/	283	0.0	8.3	40.5	
No.2					0.5	アラミド	241	0.1	11.1	60.2	
No.3					1	ビニロン	202	0.0	11.1	45.2	
No.4			5	PAE1	/	0	/	196	0.0	9.6	46.6
No.5						0.1	アラミド	265	0.4	14.0	38.0
No.6						0.3	アラミド	260	0.5	13.1	44.2
No.7					0.5	アラミド	250	0.0	8.2	46.9	
No.8					1	ビニロン	227	0.0	10.8	44.8	
No.9					10	PAE1	/	0	/	217	0.4
No.10			0.5	アラミド				282	0.0	10.5	33.4
No.11			1	ビニロン				238	0.1	11.3	33.3
No.12			PAE2	0			/	191	0.4	15.3	37.6
No.13				0.5			アラミド	216	0.0	10.9	34.7
No.14		1		ビニロン			278	0.0	14.3	30.6	
No.15		1.5	PAE1	/	0	/	253	0.1	11.9	40.7	
No.16					0.5	アラミド	211	1.1	12.8	38.2	
No.17					1	ビニロン	216	0.9	11.9	37.3	
No.18				PAE2	0	/	222	0.1	8.2	52.3	
No.19					0.1	アラミド	207	1.4	10.1	52.6	
No.20					0.5	アラミド	172	1.5	9.7	48.2	
No.21		2.5	10	/	1	/	147	1.4	10.3	50.5	
No.22					0	/	229	0.5	9.7	40.6	
No.23					0.1	アラミド	208	0.5	11.1	47.3	
No.24				PAE1	0.3	アラミド	179	0.5	10.1	45.9	
No.25					0.5	アラミド	178	0.8	10.0	41.2	
No.26					1	ビニロン	152	0.9	10.1	43.1	
No.27		10	PAE1	/	0	/	229	0.0	10.6	39.0	
No.28					0.5	アラミド	175	0.3	10.1	37.6	
No.29					1	アラミド	155	0.0	13.1	42.8	
No.30				PAE2	0	/	242	0.0	11.3	39.5	
No.31					0.5	アラミド	183	0.2	10.1	38.0	
No.32					1	アラミド	149	1.7	11.8	42.5	
No.33		2.5	10	/	0	/	177	3.5	9.5	52.5	
No.34					0	/	186	1.6	12.0	43.2	
No.35					0.5	アラミド	152	1.7	10.4	36.5	
No.36				PAE1	0.5	ビニロン	142	3.9	9.8	29.5	
No.37					1	アラミド	136	6.1	10.4	35.5	
No.38					1	ビニロン	128	3.7	9.3	28.8	
No.39		PAE2	0	/	168	0.7	12.0	42.7			
No.40			0.5	アラミド	152	2.8	9.6	36.1			
No.41			1	ビニロン	142	7.8	10.2	27.0			
No.42		2.5	10	/	0	/	139	5.0	10.4	31.2	
No.43					1	アラミド	118	6.1	8.8	24.5	

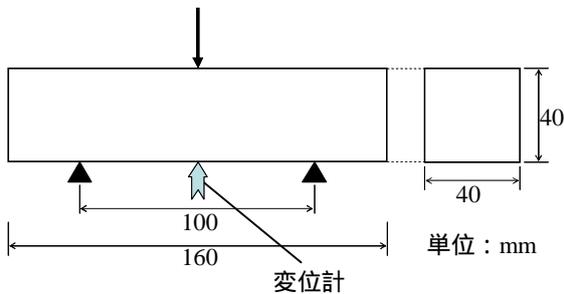


図 - 1 曲げ試験体の形状および寸法

2.4 実験パラメータ

実験パラメータを表 - 2 に示す。水セメント比(W/C)を 45%の 1 水準，砂セメント比(S/C)を 0, 1.5, 2.5 の 3 水準，ポリマーセメント比(P/C)を 0, 5, 10%の 3 水準，短繊維の体積混入率(Vf)を 0, 0.1, 0.3, 0.5, 1.0%の 5 水準に設定した。なお，アラミド繊維の径は 12 μm，ビニロン繊維の径は 14 μm，双方の長さは 6mm である。

2.5 測定項目および実験方法

フレッシュな状態では JIS A 1171 に準拠してスランプ値，フロー値，空気量を測定し，圧縮強度は JIS A 1108 に準拠して 50mm × 100mm の試験体を用いた圧縮試験により求めた<sup>4)</sup>。また，曲げ強度は図 - 1 に示すような 40mm × 40mm × 160mm の試験体を用いて，支点間距離 100mm とした静的 3 点曲げ載荷の曲げ試験により求めた。曲げ試験時の載荷速度は 3kN/min とし，スパン中央部に変位計を設置してたわみも測定した。

3. 繊維を混入したポリマーセメントモルタルの各種性状に及ぼす影響評価

3.1 フレッシュ性状

繊維混入率(Vf)とフロー値の関係を図 - 2 に示す。双方の繊維とも，繊維混入率の増加に伴いフロー値は減少し，繊維の種類によるフロー値の違いはほとんど見られなかった。また，同図よりポリマーの混入によるフロー値の変化は見られなかった。これは，本実験で用いたポリマーは流動性向上の目的で作られたものではなく，あくまで強度増加を目的として作られたためである。

3.2 曲げ試験

(1) 繊維の影響

図 - 3 に砂セメント比(S/C)を 0, 短繊維を 1% 混入した

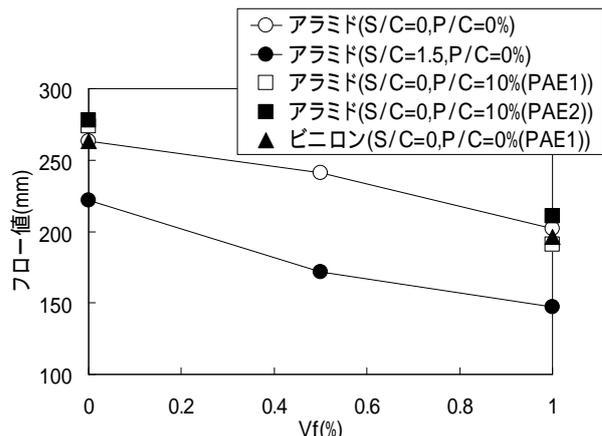


図 - 2 繊維混入率とフロー値の関係

試験体の曲げ強度および荷重～変位関係を示す。繊維を混入したセメントペーストの曲げ強度は繊維未混入の場合に比べて増加しており、アラミド繊維の方が大きな増加を示した。また、繊維混入した場合、ピーク荷重以降、緩やかに荷重が低下している。このことは、セメントマトリックス中の繊維が曲げひび割れの拡大を抑制したことによるものであるが、表 - 1 に示したようにアラミド繊維はビニロン繊維に比べて高強度および高弾性であるため、荷重の低下割合が非常に緩やかである。なお、写真 - 1(a)はアラミド繊維 1%混入、(b)はビニロン繊維 1%混入した試験体の試験終了後のひび割れの様子である。同写真より、アラミド繊維を混入した試験体はビニロン繊維を混入した試験体よりひび割れが分散していることがわかり、アラミド繊維混入試験体は靱性が大きいことが確認できる。

### (2) ポリマーの影響評価

図 - 4 にポリマーを混入し、 $S/C=0$ 、繊維を 1%混入した試験体の曲げ強度を示す。前述のように、ポリマー未混入( $P/C=0\%$ )の場合、繊維の混入により曲げ強度は増加する。また、PAE1 を用いた場合も繊維の混入により曲げ強度は増加した。しかしながら、ビニロン繊維を用いた場合、曲げ強度の増加はほとんど生じていない。PAE2 を用いた場合は、繊維を混入することにより、曲げ強度は未混入時よりも低下した。これは、繊維表面にカチオン性ポリマーが被覆し、繊維とセメント硬化体との付着が低下し、繊維の補強効果が十分に発揮されないためであると考えられる。

このように、ポリマーの種類によっては、繊維の補強効果が表れないばかりか曲げ強度を低下させる場合がある。

### (3) 砂の影響

図 - 5 に  $S/C$  が異なり、 $P/C=10\%$  (PAE1)、 $V_f=1.0\%$  の試験体の曲げ強度を示す。同図に示すように、 $S/C=0$  の場合では、繊維混入によって曲げ強度が増加したものの、 $S/C=2.5$  の場合においては、いずれの繊維を用いた場合においても、曲げ強度は繊維が未混入である場合よりも低下した。また、図 - 5(b)に示すように、 $S/C=0$  および



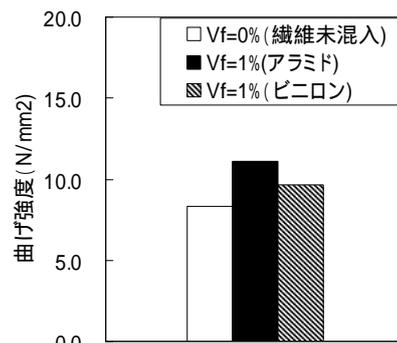
写真 - 1 繊維の種類の影響 ( $S/C=0$ ,  $P/C=0\%$ ) (試験終了後の様子)

1.5 の場合においては、繊維の混入によって曲げひび割れの進展・拡大が抑制され、ピーク荷重以降、緩やかに荷重が低下しているが、 $S/C=2.5$  の場合はピーク荷重以降、急激に荷重が低下した。このことは、繊維と繊維の間に砂が入り込み、繊維とモルタルの一体性が低下し、靱性値が小さくなったためであると考えられる。

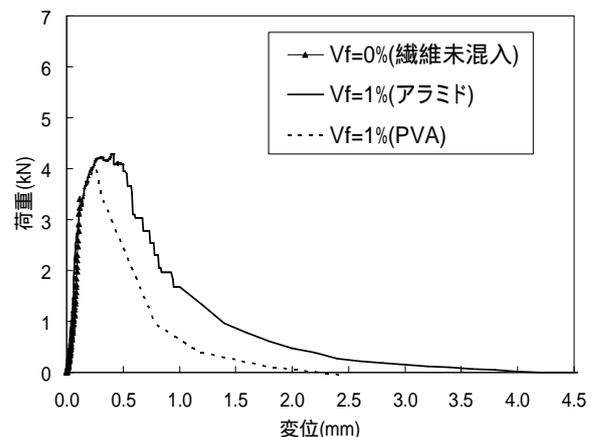
### 3.3 圧縮試験

#### (1) 繊維の影響

図 - 6 に砂セメント比( $S/C$ )を 0、短繊維を 1%混入した試験体の圧縮強度を示す。繊維を混入したセメントペーストの圧縮強度は繊維未混入の場合に比べて増加しており、繊維の種類は、圧縮強度にほとんど影響を及ぼしていない。



(a) 曲げ強度



(b) 荷重変位関係

図 - 3 繊維の種類の影響 ( $S/C=0$ ,  $P/C=0\%$ )

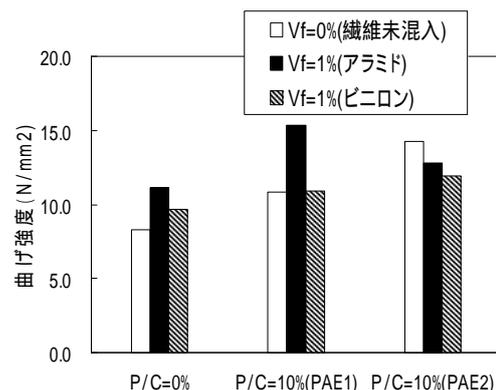
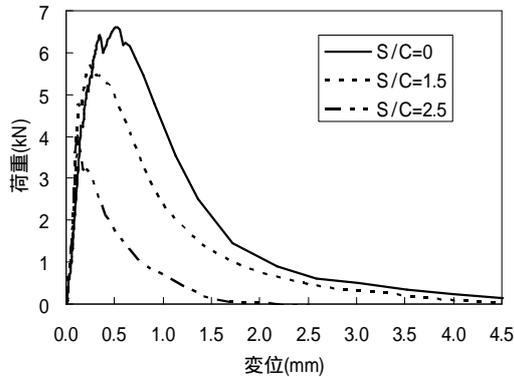
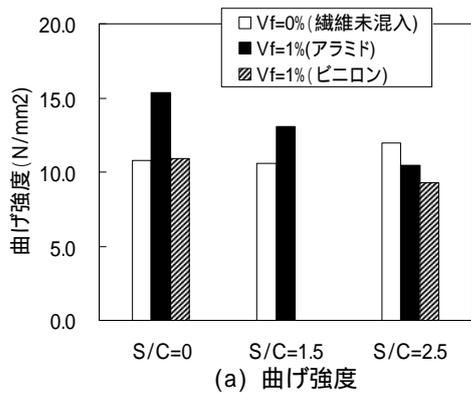


図 - 4 ポリマーの影響 ( $S/C=0$ )



(b) 荷重変位関係 (Vf=1% (アラミド繊維))  
図 - 5 砂の影響

### (2) ポリマーの影響評価

図 - 7 にポリマーを混入し, S/C=0, 繊維を 1% 混入した試験体の圧縮強度を示す。同図に示すように, ポリマー混入の有無や種類によらず繊維の混入により圧縮強度は増加した。また, 繊維混入量が同じ試験体の圧縮強度は, ポリマーの混入によって繊維混入の有無や種類によらず圧縮強度は低下した。これは, ポリマー自体に強度がほとんどないためである。

### (3) 砂の影響

図 - 8 に S/C が異なり, P/C=10% (PAE1), Vf=1.0% の試験体の圧縮強度を示す。同図に示すように, S/C=1.5 の場合には, 繊維混入によって圧縮強度が増加したものの, S/C=0 の場合に比べて圧縮強度の増加は小さい。S/C=2.5 の場合においては, いずれの繊維を用いた場合においても, 圧縮強度は繊維が未混入である場合よりも低下した。これは, 砂が繊維を巻き込むことによって繊維の付着力が発揮されず, 繊維とモルタルとの一体性が低下し, 靱性値が小さくなったためと考えられる。

以上より, アラミド繊維は, PAE1 と組み合わせられた場合, ビニロン繊維より補強効果が大きい。また, S/C=2.5 の場合はいずれの繊維を用いた場合も曲げ強度は繊維が未混入である場合よりも低下し, 繊維の補強効果を得るには S/C は 0, 1.5 である必要がある。さらに, PAE2 はいずれの繊維にも不向きと判断でき, 4 章では繊維はアラミド繊維, ポリマーは PAE1 のみに限定し, S/C は 0, 1.5 の 2 水準とする。また, P/C=10% 以下, Vf=1.0% 以下

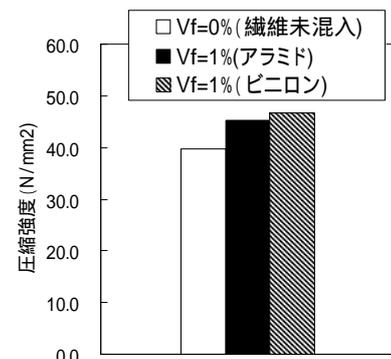


図 - 6 繊維の種類の影響 (S/C=0, P/C=0%)

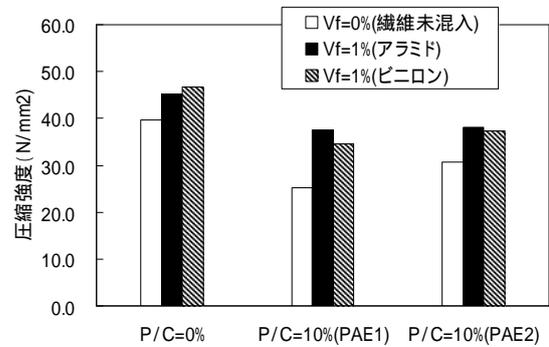


図 - 7 ポリマーの影響 (S/C=0)

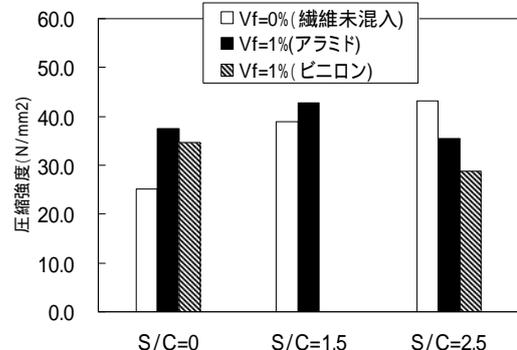


図 - 8 砂の影響 (P/C=10% (PAE1))

の場合の性能を明らかにするために, P/C, Vf を小さくして各種評価を行う。

## 4. 繊維を混入したポリマーセメントモルタルの曲げ試験および圧縮試験による影響評価

### 4.1 曲げ試験

#### (1) S/C=0 (セメントペースト) の場合

図 - 9(a) に S/C を 0 とした試験体の曲げ強度を示す。同図に示すように, P/C=0% の場合, 繊維の混入により曲げ強度は増加する。Vf=0.5% と Vf=1.0% の場合の曲げ強度に差異はない。Vf=0.5, 1.0% では比較的容易に繊維は分散するが, 繊維量が少ないことと繊維とセメントペーストとの付着力が小さいためである。また, 図 - 9(b) の荷重変位関係より, セメントペースト (S/C=0) でポリマーが未混入の場合, Vf=0.5, 1.0% (アラミド繊維) のいずれの場合もピーク荷重以降の荷重が同程度に緩やかに低下する。

P/C=5% (PAE1) の場合, Vf=0.0~0.3% の範囲では曲げ強

度は繊維の混入率とともに低下し、 $V_f=0.3\%$ となった時点で最小値を示す。 $V_f=0.5\%$ 時では  $V_f=0.3\%$ 時と比べて曲げ強度は増加するが、その値は  $V_f=0.0\%$ 時よりも小さい。しかし、繊維混入量の増加にともなって、曲げ強度が一度低下してから  $V_f=0.3\%$ を最小値に上がっていることから  $V_f=1.0$  以上混入すれば曲げ強度は増加すると考えられる。また、図 - 9(c)の荷重変位関係より、 $V_f=0.3\%$ 以下はピーク荷重以降急激に荷重が低下し、靱性は小さい。

$P/C=10\%$ (PAE1)で、 $V_f=1.0\%$ の場合、 $V_f=0.0\%$ と比較して、曲げ強度の増加が大きい。

以上の結果から判断すると、ポリマーを混入した場合、繊維混入量が少量(1%未満)であるとポリマーが繊維を被覆し、繊維とセメントマトリックスの付着が著しく低下するものと考えられる。その結果、 $V_f=0.0\sim 0.3\%$ の範囲では、繊維による曲げ強度の増進は生じなく、繊維未混入時よりも曲げ強度が低下する。

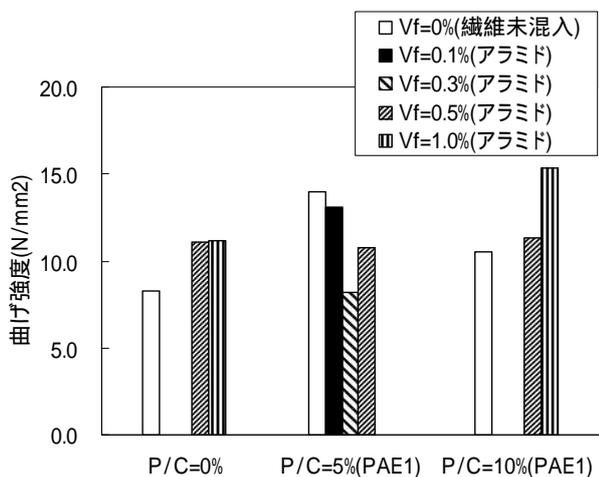
#### (2) $S/C=1.5$ (モルタル)の場合

図 - 10 に  $S/C$  を 1.5 とした試験体の曲げ強度を示す。同図に示すように  $P/C=0\%$ の場合、とアラミド繊維による曲げ強度は  $V_f=0.0\sim 0.1\%$ では大きくなるが、 $V_f=0.1\sim$

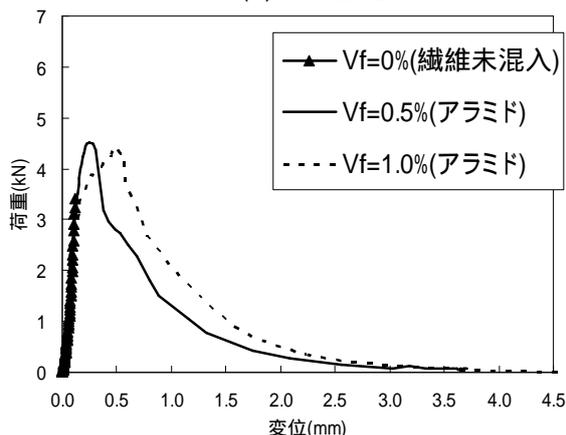
$0.5\%$ の範囲ではほぼ一定である。 $V_f=1.0\%$ 混入することで曲げ強度は約 24%増加した。既往の文献( $S/C=1.7$ )においてアラミド繊維を 3%混入した場合、曲げ強度が 3 倍以上に増加している<sup>1)</sup>。この結果から判断すれば繊維混入による曲げ強度の増加は  $V_f=1.0\%$ で顕著に生じるものと考えられる。また、 $V_f=1.0\%$ 未満においては繊維が比較的分散するが、繊維量が少ないことに加えて既往の文献<sup>1)</sup>より繊維とペーストとの付着力は小さいので、繊維の混入率が曲げ強度に及ぼす影響は少なく、曲げ強度の増加は小さい。一方、 $V_f=1.0\%$ 以上においては繊維の分散性が悪くファイバーボールとなることより、ペーストからの繊維の拔出しが抑制され、逆に曲げ強度は大きくなることが考えられる。セメントペーストの場合と同様、アラミド繊維補強の効果は、混入率が  $V_f=1.0\%$ で顕著に生じるものと考えられる。しかし、セメントペーストに比べて曲げ強度の増加割合が小さい(セメントペーストは  $V_f=1.0\%$ 混入時で 34%、 $S/C=1.5$ では 26%)。これは繊維と繊維の間に砂が入りこみ、付着が低下するためと考えられる。

$P/C=5\%$ (PAE1)の場合、 $V_f=0.0\%$ 、 $0.1\%$ 、 $0.5\%$ としても、繊維による曲げ強度の増加はほとんど見られない。これは繊維の周りをポリマーが被覆してしまうために繊維の効果が発揮されないと考えられる。

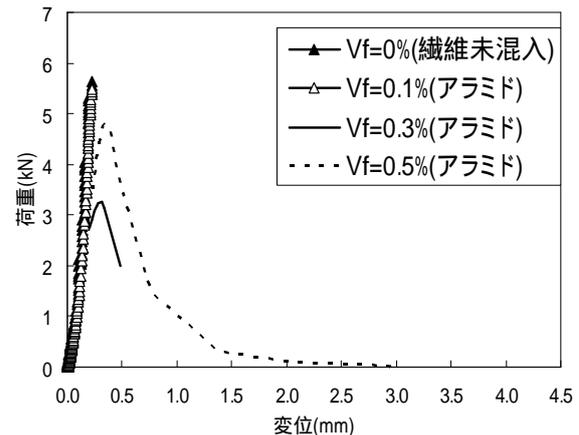
$P/C=10\%$ (PAE1)の場合、 $V_f=0.0\%$ ( $10.6\text{N/mm}^2$ )に対して  $V_f=1.0\%$ ( $13.1\text{N/mm}^2$ )と約 1.3 倍の強度増加が見られた。 $V_f=0.5\%$ ( $10.1\text{N/mm}^2$ )という結果が出ており、繊維が少ない場合は繊維による強度増加が見られない。これも繊維の周りのポリマーの被覆による繊維の補強効果の減少と考えられる。 $V_f=1.0\%$ のときに繊維による強度増加が見られるのは、アラミド繊維は分散性が非常に悪いためモルタルマトリックス中でポリマーが繊維を被覆していない部分による強度増加と繊維が無い部分のポリマーによる強度増加が重なったと考えられる。



(a) 曲げ強度



(b) 荷重変位関係 ( $P/C=0\%$ (PAE1))



(c) 荷重変位関係 ( $P/C=5\%$ (PAE1))

図 - 9 繊維の影響 ( $S/C=0$ )

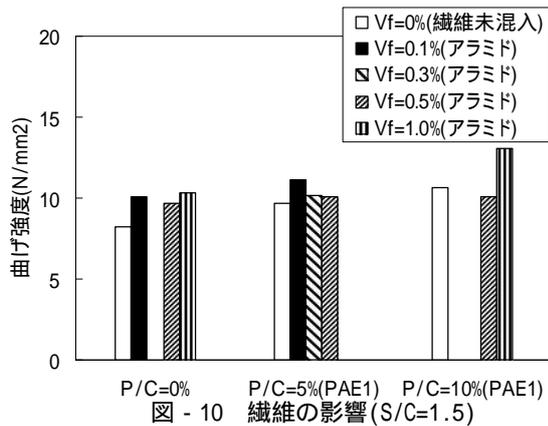


図 - 10 繊維の影響 (S/C=1.5)

以上より、 $S/C=0$ 、 $S/C=1.5$  の場合、 $V_f=0.0 \sim 0.5\%$  の範囲では  $P/C=5$ 、 $10\%$  のポリマーを混入したとしても曲げ強度は一定である ( $S/C=0$ 、 $P/C=5\%$  の場合は小さくなる)。  $P/C=10\%$  の場合、 $V_f=0.5 \sim 1.0\%$  では曲げ強度は約 34% 大きくなることから判断すると、 $P/C=5$ 、 $10\%$  のポリマーを混入する場合  $V_f=1.0\%$  の繊維を混入しないと繊維による補強効果は発揮されない。

#### 4.2 圧縮試験

##### (1) $S/C=0$ (セメントペースト) の場合

図 - 11 に  $S/C$  を 0 とした試験体の圧縮強度を示す。  $P/C=0\%$  の場合、繊維を混入したセメントペーストの圧縮強度は繊維未混入の場合に比べて増加している。ポリマー混入時においては、繊維を混入しても圧縮強度はほとんど増加しなかった。また同図より、繊維混入率が同じ試験体の圧縮強度はポリマーの混入率が大きくなるに従い、小さくなった。これは、ポリマー自体に強度がほとんどないためと考えられる。

##### (2) $S/C=1.5$ (モルタル) の場合

図 - 12 に  $S/C$  が 1.5 の場合の試験体の圧縮強度を示す。同図に示すように、 $S/C=1.5$  の場合では、 $P/C$  が同じ試験体の圧縮強度は繊維を混入してもほぼ一定である。また、繊維混入率が同じ試験体の圧縮強度は、 $S/C=0$  の場合と同様に、ポリマーの混入率が大きくなるに従い、小さくなった。

これらの結果より、セメントペーストの場合は、ポリマーと繊維の両方を混入するとポリマーによる圧縮強度低下と繊維による圧縮強度増加が重なるために繊維による補強効果が得られにくく、モルタルの場合は、砂とポリマーによる圧縮強度低下と繊維による圧縮強度増加が重なるために繊維の補強効果が得られないと考えられる。

#### 5. まとめ

本研究は、2 種類の短繊維とポリマーセメントマトリックスの組み合わせに対する曲げ特性、圧縮特性を評価した。以下に本研究で得られた知見を示す。

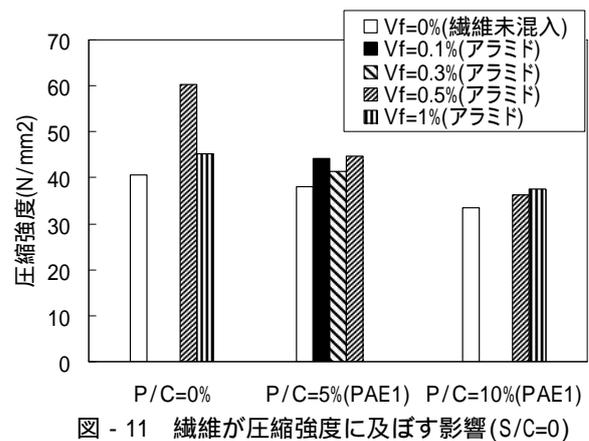


図 - 11 繊維が圧縮強度に及ぼす影響 (S/C=0)

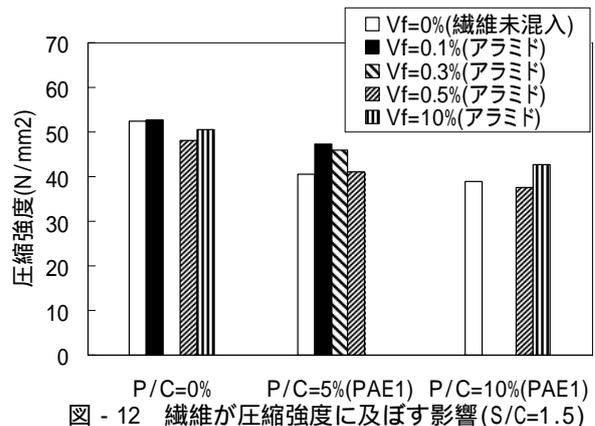


図 - 12 繊維が圧縮強度に及ぼす影響 (S/C=1.5)

- (1) 砂・ポリマーの有無に関わらず、アラミド繊維はビニロン繊維に比べ同等かそれ以上の曲げ強度を有する。
- (2) アラミド繊維はポリマーが PAE1 の場合に曲げ強度は大きくなり、ビニロン繊維はポリマーの種類に関わらず曲げ強度は低下する。
- (3)  $S/C=2.5$  以上の場合、いずれの繊維を用いたとしても曲げ強度、圧縮強度双方とも低下する。
- (4) 短繊維混入時でもポリマーの混入により圧縮強度は低下する。
- (5) ポリマーセメント比 5、 $10\%$  のポリマーを混入する場合、アラミド繊維混入率が 0.1、0.3、0.5% においては曲げ強度に及ぼす繊維の影響は小さく、補強効果を発揮するには 1.0% の繊維の混入が必要である。

#### 参考文献

- 1) 小川晴果, 林 好正, 三谷一房, 川地 武: 超高曲げ強度モルタルの製造技術に関する基礎的研究, 大林技術研究所報, No.52, pp.107-112, 1996
- 2) 大濱嘉彦, 出村克宣: ポリマーセメントコンクリート/ポリマーコンクリート, シーエムシー出版, 2002
- 3) 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
- 4) 土木学会: コンクリート標準示方書[基準編], 2007