

報告 繊維種及び混入量が繊維補強セメント系複合材料の靱性に及ぼす影響

川又 篤^{*1}・高橋 貴蔵^{*2}・掘越 哲郎^{*3}・松岡 茂^{*1}

要旨：近年、高い靱性能を有する材料として、繊維補強セメント系複合材料が注目されている。本研究では、繊維補強コンクリート及びモルタルにおける繊維種や混入量が靱性に及ぼす影響を、圧縮、曲げ、引張の点から実験的に検討を行った。その結果、繊維補強コンクリートでは、いずれの試験においても PP 繊維より PVA 繊維を使用した方が高い靱性能を得られた。又、圧縮試験以外では繊維混入量の増加に伴い、靱性が向上することが確認できた。繊維補強モルタルでは、PVA 繊維より HTPE 繊維を使用した方が高い圧縮靱性と引張靱性能を得られたが、繊維混入による著しいスランプロスが見られたため更なる検討が必要である。

キーワード：短繊維、繊維補強、靱性、曲げ、引張、圧縮、モルタル、コンクリート

1. はじめに

近年、高い靱性能を有する材料として、繊維補強セメント系複合材料が注目されており、土木構造物を中心に使用されつつある。繊維補強セメント系複合材料では、セメント系マトリックスにひび割れが発生すると、ひび割れ間を短繊維が架橋することにより力を保持しながら変形が進むため、コンクリートやモルタルと比較すると大幅な靱性の向上が期待できる。

繊維補強セメント系複合材料は、その性能の差異により DFRCC (Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composites) や HPRCC (High Performance Fiber Reinforced Cement Composites) などと分類することができる¹⁾。その中でも HPRCC は、一軸引張応力下において複数ひび割れ特性や疑似歪硬化特性を示す材料として定義されており²⁾、これに分類される材料は高い引張靱性を有する。しかしながら、このような材料は高い引張靱性を確保するために、繊維のみならず、混和材、混和剤、細骨材などに特殊な材料を使用することが殆どであるため、大幅なコストアップを余儀なくされ、且つ一般的なプ

ラントからの供給が困難であることが現状である。

そこで本研究では、プラントからの供給を考慮した一般的な材料を使用することで、コストダウンを図った繊維補強セメント系複合材料の開発を目的とする。ここでは、基礎的研究として、セメント系マトリックスをモルタル及びコンクリートとした繊維補強セメント系複合材料について、繊維の種類及び混入量が圧縮、曲げ、引張靱性に及ぼす影響についてパラメトリックな実験的検討を行った。

2. 実験方法

2.1 使用材料及び配合

本実験のセメント系マトリックスにおいて使用した材料を表-1に示す。プラントでの供給及びコストダウンを念頭に置いているため、細骨材や粗骨材には硅砂や人工骨材の使用を避けた。表-2にセメント系マトリックスの配合を示す。本研究では、セメント系マトリックスに目標強度 30MPa のコンクリートと目標強度 30MPa 及び 60MPa のモルタルの合計 3 種類を用

*1 鉄建建設 (株) 技術センター 工博 (正会員)

*2 (財) 鉄道総合技術研究所 軌道技術研究部 工修(正会員)

*3 (株) クラレ 繊維資材カンパニー 産資開発部 理修

表-1 使用材料

材料	記号	種類	物性
セメント	C	普通ポルトランド	密度3.16g/cm ³
細骨材	S1	陸砂	表乾密度2.60g/cm ³ , 吸水率2.24%, 粗粒率2.47
	S2	砕砂	表乾密度2.60g/cm ³ , 吸水率1.75%, 粗粒率3.23
粗骨材	G	碎石	表乾密度2.67g/cm ³ , 粗粒率6.48, 実績率61.5%
混和剤	SP	高性能AE減水剤	主成分: ポリカルボン酸エーテル系
	AE	AE剤	主成分: 変性アルキルカルボン酸化合物系 陰イオン界面活性剤
	VA	増粘剤	主成分: 水溶性セルロースエーテル

表-2 配合

略号	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)							
		W	C	S1	S2	G	SP	AE	VA
C30	47	180	383	452	452	750	4.98	0.0306	-
M30	45	360	800	399	399	-	1.2	0.64	0.18
M60	32	256	800	534	534	-	11.2	0.032	-

表-3 繊維物性

繊維種類	略号	密度 (g/cm ³)	断面 (mm)	長さ (mm)	アスペクト比	引張強度 (MPa)	引張弾性率 (GPa)
ポリプロピレン	PP	0.91	0.5×1.0	30	38	530	10.5
PVA	PVA1	1.30	φ0.660	30	45	880	29
	PVA2	1.30	φ0.100	12	120	1100	25
高強度ポリエチレン	HTPE	0.97	φ0.012	12	1000	2770	88

表-4 シリーズ概要

略号	マトリックス種類	マトリックス強度 (MPa)	繊維種類	繊維混入率 (%)	
C30	コンクリート	30	-	-	
C30-PP-1.0			PP	1.0	
C30-PP-1.5				1.5	
C30-PP-2.0				2.0	
C30-PVA1-1.0			PVA1	1.0	
C30-PVA1-1.5				1.5	
C30-PVA1-2.0				2.0	
M30	モルタル	30	-	-	
M30-PVA2-1.0			PVA2	1.0	
M30-PVA2-2.0				2.0	
M30-HTPE-1.0				HTPE	1.0
M60			60	-	-
M60-PVA2-2.0				PVA2	2.0

意した。モルタルにおいてはマトリックス強度の影響を比較検討した。又、一般的に繊維を混入するとワーカビリティが低下するために、繊維混入前のスランプフローは 500~600mm 程度として、更に繊維が分散できるペースト容積

を確保するために繊維混入前の空気量は 7~8% を目標とした。

繊維の物性を表-3に示す。繊維には繊維補強セメント系複合材料の分野で近年広く使用されているポリプロピレン (Polypropylene) 繊維、

PVA (Polyvinyl Alcohol) 繊維 2 種類, 高強度ポリエチレン (High Tenacity Polyethylene) 繊維の合計 4 種類を選択した。繊維の大きさにより使用目的が異なるため³⁾, PP 繊維及び PVA1 繊維はコンクリートに使用して繊維補強コンクリートを, PVA2 繊維及び HTPC 繊維はモルタルに使用して繊維補強モルタルを作製した。本研究におけるシリーズは表-4 の通りである。

2.2 載荷試験方法

(1) 載荷試験概要

繊維を混入していないコンクリート及びモルタルについては圧縮試験を実施し, 繊維補強セメント系複合材料については圧縮試験, 曲げ試験及び直接引張試験を実施して繊維による補強効果を確認した。

(2) 圧縮試験

圧縮試験は, JIS A 1108 に準拠して, $\phi 100\text{mm} \times 200\text{mm}$ の供試体を使用して行った。供試体側面両側に測定区間 10cm の変位計を取り付けて, 歪を算出した。

(3) 曲げ試験

曲げ試験は, 日本道路公団試験 JHS730-2003 に準拠して, 図-1 に示すように 3 等分点曲げ試験を実施した。ロードセルの載荷速度は 0.2mm/min. とした。得られた結果から, 補正中央変位を算出した。

(4) 直接引張試験

直接引張試験については, 筆者らが過去に提案した方法⁴⁾に基づいて実施した。この方法は, 図-2 に示すように $100 \times 100 \times 300\text{mm}$ の供試体の両端部に取り付けた鋼製の治具を引っ張って実施するものである。この試験では, 一断面における繊維の補強効果を確認するために仮想のひび割れを設けた。ここでは供試体中央部 4 面に深さ 10mm の切り欠きを設けて, 各面にクリップ型変位計を取り付けて変位を測定し, 平均値をひび割れ幅としている。ロードセルの載荷速度は 0.2mm/min. とした。

3. 実験結果

3.1 圧縮試験及びフレッシュ性状

圧縮試験で得られた圧縮強度の結果を表-5 に示す。又, フレッシュ試験で測定した空気量及びスランプ (フロー) を表-5 に付記する。いずれのシリーズにおいても, 繊維が混入されることにより圧縮強度が低減したことが確認できる。特に, 繊維補強モルタルでは繊維混入量

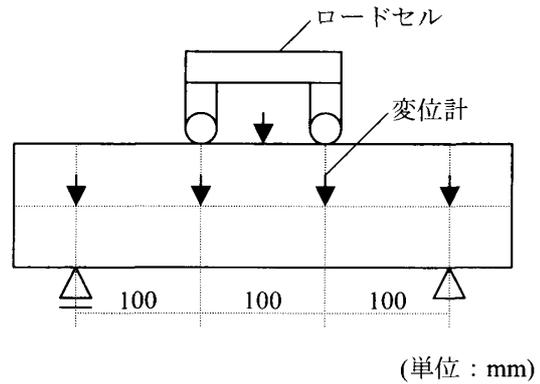


図-1 曲げ試験模式図

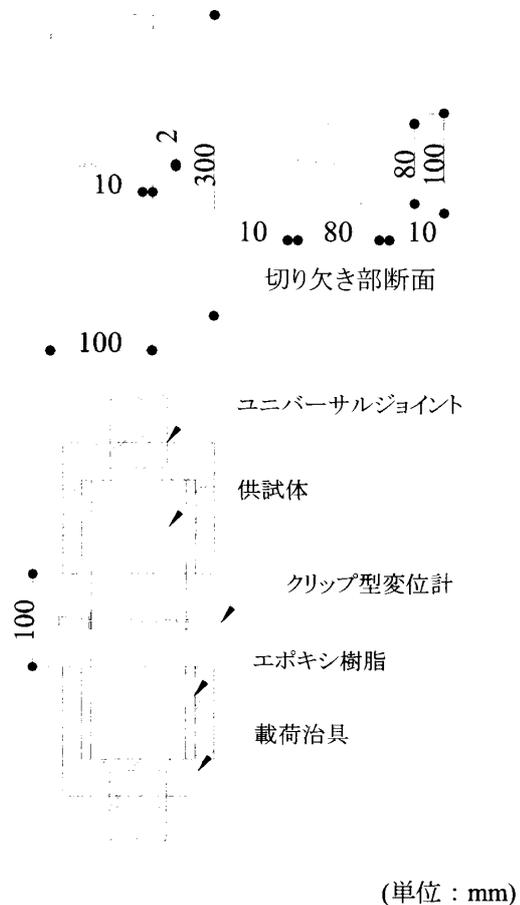


図-2 直接引張試験模式図

表-5 各シリーズの圧縮強度及び空気量

略号	圧縮強度 (MPa)		空気量 (%)		スランブ (cm)	スランブフロー (mm)
	実験値	5%低減値*	繊維混入前	繊維混入後		
C30	34.3	-	6.2	-	-	605×570
C30-PP-1.0	30.2	32.9	6.8	7.6	-	580×560
C30-PP-1.5	30.1	33.3	7.4	8.0	19.5	405×385
C30-PP-2.0	31.7	32.9	7.0	7.8	15.0	-
C30-PVA1-1.0	30.9	32.6	6.4	7.4	-	460×435
C30-PVA1-1.5	29.4	32.2	7.0	8.2	20.0	395×350
C30-PVA1-2.0	33.3	33.6	6.6	7.0	19.0	-
M30	33.9	-	6.8	-	-	515×515
M30-PVA2-1.0	28.9	31.9	5.8	7.0	-	490×490
M30-PVA2-2.0	25.1	28.8	6.6	9.6	16.5	-
M30-HTPE-1.0	29.4	27.5	6.2	10.0	7.0	-
M60	59.2	-	9.0	-	-	510×505
M60-PVA2-2.0	54.2	58.0	7.8	8.2	17.5	-

*5%低減値：繊維混入後に変動した空気量1%につき、セメント系マトリックスの圧縮強度を5%低減した値

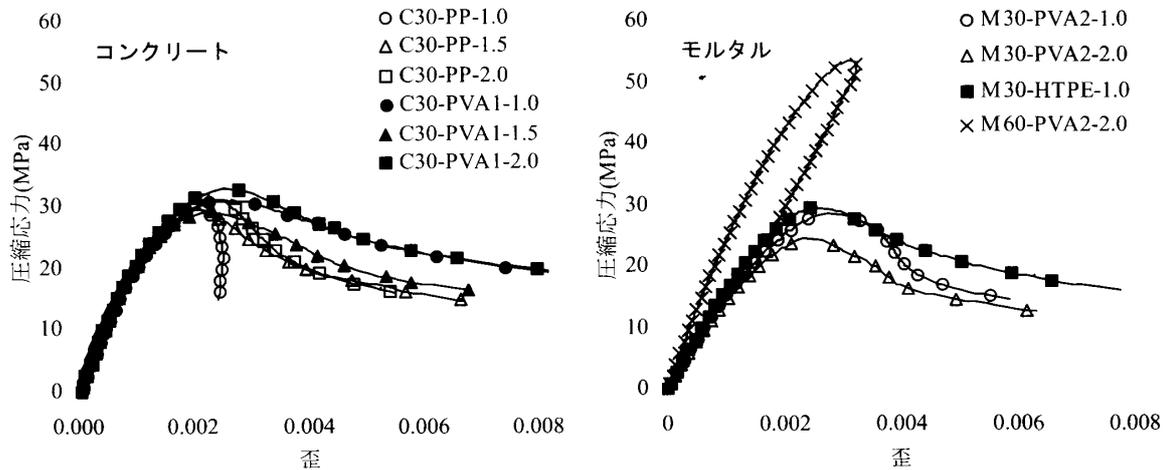


図-3 圧縮応力-歪曲線

の影響も確認できる。これは繊維の巻き込みにより繊維混入後の空気量が増加したことが要因として考えられる。一般的に、空気量が1%増加すると圧縮強度は4~6%低減すると言われている。そこで、セメント系マトリックスの圧縮強度から、空気量1%につき圧縮強度を5%低減した値を表-5に付記した。実験値と比較すると5%低減値の方が高いため、AE剤等で付加される空気より繊維混入による巻き込み空気の方が強度低減効果が大きい、若しくは空気量以外の要因があると推察され、更なる検討が必要である。又、スランブ試験の結果を見ると、繊維量が増加するに従って、スランブロスが確認できたが、PP繊維及びPVA繊維を使用した場合で

は2.0%混入しても比較的高いワーカビリティを示した。しかしながら、HTPE繊維を使用した場合では、繊維混入量が1.0%にも関わらず著しいスランブロスが確認された。これは、HTPE繊維は他の繊維と比較して断面が著しく小さいことが原因として考えられる。そのため、プラントなどで練り混ぜる際にはスランブロスへの配慮が必要となる。

図-3に各シリーズの圧縮試験で得られた代表的な圧縮応力-歪曲線を示す。最大応力以降に歪が戻っている曲線は歪測定区間で破壊が進行したものである。繊維補強コンクリートでは、繊維混入量による差異ははっきりと表れなかった。繊維種については、PP繊維を使用する

より PVA1 繊維を使用した方が最大応力以降で緩やかな軟化曲線を示した。

繊維補強モルタルに関しては、HTPE 繊維を 1.0% 使用した方が PVA2 繊維を 2.0% 使用するよりも圧縮靱性に富んでいることが確認できた。

3.2 曲げ試験

図-4 に各シリーズの曲げ試験で得られた代表的な荷重-補正中央変位曲線を示す。いずれのマトリックスにおいても繊維混入量の増加に伴って曲げ靱性が向上することが確認できた。

繊維補強コンクリートについて見ると、PVA1 繊維を使用した方がひび割れ以降で高い荷重を保持しており、曲げ靱性を得るために有効な繊維であることがわかる。

繊維補強モルタルに関しては、HTPE 繊維が混

入率 1.0% にも関わらず、PVA2 繊維 2.0% より高い最大曲げ荷重を示した。しかしながら、最大荷重以降は比較的急激に荷重が低下して、変位の増加に伴い PVA2 繊維 1.0% の曲線と同等となった。

マトリックス強度に関しては、高強度なほど初期ひび割れ強度及び最大曲げ荷重が高くなる結果を得た。しかしながら、最大荷重以降は比較的急激に荷重が低下した。これはマトリックス強度が高くなると、繊維とマトリックス間の付着力が増加して破断する繊維が増えるため靱性が低下したものと考えられる。

3.3 直接引張試験

図-5 に各シリーズの直接引張試験により得られた代表的な引張応力-ひび割れ幅曲線を示

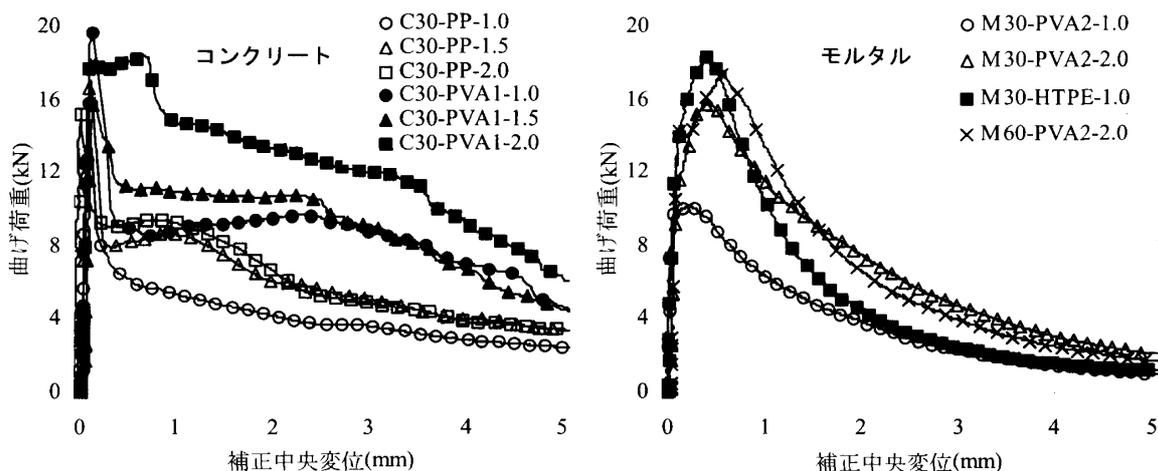


図-4 曲げ荷重-補正中央変位曲線

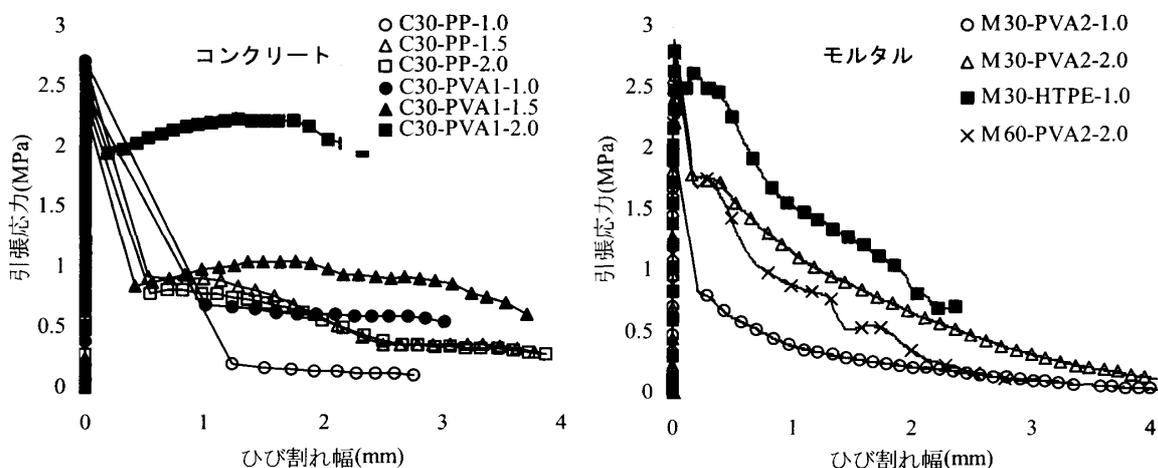


図-5 引張応力-ひび割れ幅曲線

す。直接引張試験の結果は、曲げ試験の結果とほぼ同様の傾向を示すものとなった。しかしながら、HTPE 繊維を 1.0%使用した繊維補強モルタルに関しては、初期ひび割れ以降も複数のひび割れが発生したことで靱性に富んだ軟化曲線を示した。

靱性を定量的に評価するために、引張応力-ひび割れ幅曲線のひび割れ幅 2mm までの曲線下の面積を有効破壊エネルギーとして算出して、**図-6**に示した。図を見ると、PVA1 繊維を使用した繊維補強コンクリートと HTPE 繊維を使用した繊維補強モルタルが高い値を示しており、高い引張靱性を有していることが確認できる。又、繊維補強モルタルでのマトリックス強度による比較では、有効破壊エネルギーにおいても、強度が低い方が高い値を示す結果となった。

4. まとめ

本研究では、セメント系マトリックスにコンクリート及びモルタルを採用した繊維補強セメント系複合材料について圧縮、曲げ、及び引張靱性について検討を行った。

繊維補強コンクリートでは、いずれの試験においても PP 繊維を使用するより PVA1 繊維を使用した方が高い靱性を得られた。又、圧縮試験以外では繊維混入量の増加に伴い、靱性が向上することが確認できた。

繊維補強モルタルでは、PVA2 繊維を使用するより HTPE 繊維を使用した方が高い圧縮靱性と引張靱性を得ることができた。しかしながら、HTPE 繊維を使用した場合には、PVA2 繊維の場合と比較して著しいスランプロスが確認できたため、練混ぜの際には特別な注意を払う必要がある。又、マトリックス強度に関しては、強度が低い方が高い靱性を得ることが確認できた。

5. 謝辞

本研究は、(財)鉄道総合技術研究所、及び(株)クラレとの共同研究における成果の一部である。

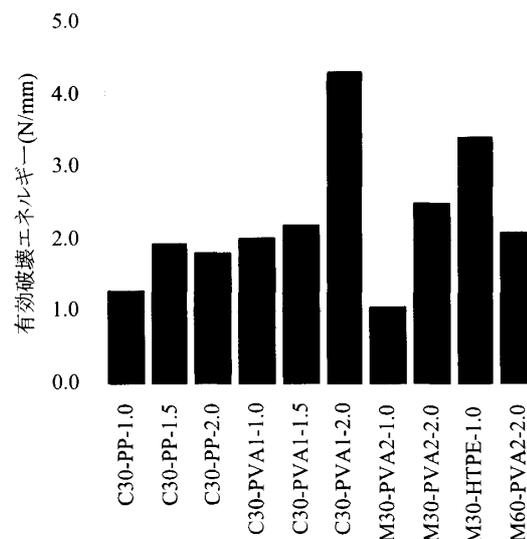


図-6 有効破壊エネルギー

御協力を戴いた方々に謝意を表します。又、北武コンサルタント(株)の渡邊忠明氏には、本研究を進めるにあたり御指導を戴きました。深く謝意を表します。又、萩原工業(株)、及び東洋紡績(株)には、実験で使用する繊維の御提供を戴きました。付記して謝意を表します。

参考文献

- 1) (社)日本コンクリート工学協会：高靱性セメント複合材料を知る・作る・使う，日本コンクリート工学協会，2002.1
- 2) Naaman, A. E. and Reinhardt, H. W.: Characterization of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites - HPRCC, High Performance Fiber Reinforced Cement Composites 2 (HPRCC2), pp.1-23, 1996
- 3) Rossi, P.: Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concretes (UHPRC): An overview, Fiber-Reinforced Concrete (FRC) BEFIB'2000, pp.87-100, 2000
- 4) 武田 康司, 松岡 茂, 松尾 庄二: SFRCの曲げ試験における引張軟化曲線の推定, コンクリート年次論文報告集, Vol.19, No.2, pp.1509-1514, 1997