

論文 繊維補強セメント系複合材料の基礎性状に関する実験的研究

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

要旨：本研究では，コンクリート及びモルタルをセメント系母材（マトリックス）とした繊維補強セメント系複合材料における繊維の種類や混入量がフレッシュ性状及び曲げ靱性に及ぼす影響を実験的に検討を行った。その結果，コンクリートマトリックスの場合では，PP 繊維より PVA 繊維を使用した方が高い靱性が得られることが確認できた。モルタルマトリックスの場合では，30mm と長い繊維を使用した場合においてスランプフローの低下量が少なくなり，更に，長い PVA 繊維を使用した場合には高い靱性も得られた。又，ワーカビリティと靱性をそれぞれ定量評価することで，繊維混入による性状変化を明確に表現できた。

キーワード：繊維補強，短繊維，靱性，ワーカビリティ

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，セメント系母材（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）等と分類することができる¹⁾。特に，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，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，骨材等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，一般的なレディーミクストコンクリート工場からの供給が難しい現状がある。

そこで，レディーミクストコンクリート工場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，マトリックスをコンクリート，又はモルタル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フレッシュ性状及び力学特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。尚，本論文は，既往の研究³⁾の後に追加実験を行って，その成果を全体を通してまとめたものである。

2. 実験方法

2.1 使用材料及び配合

本実験のマトリックスにおいて使用した材料を表-1に示す。レディーミクストコンクリート工場からの供給及びコストダウンを念頭に置いているため，骨材には硅砂や人工骨材の使用を避けた。表-2にマトリックスの配合を示す。マトリックスには，目標圧縮強度 30MPa のコンクリート（配合 C）と目標圧縮強度 30MPa（配合 M1）及び 60MPa（配合 M2）のモルタルの合計 3 種類を用意した。モルタルにおいてはマト

*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

リックス強度の影響を検討した。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 55cm を目標として、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% 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 : 以下, PP と略す) 繊維, ポリビニルアルコール (Polyvinyl Alcohol : 以下, PVA と略す) 繊維 2 種類, 高強力ポリエチレン (High Tenacity Polyethylene : 以下, HTPE と略す) 繊維の合計 4 種類を選択した。繊維長さが 30mm と比較的長い PP 繊維及び PVA1 繊維はいずれのマトリックスにも使用して、繊維長さが 12mm と短い PVA2 繊維及び HTPE 繊維はモルタルマトリックスにのみ使用した。各ケースの詳細を表-4 に示す。

2.2 試験方法

(1) 試験概要

繊維補強セメント系複合材料では、繊維の混入によりフレッシュ性状が変化する。本実験の配合においても、繊維混入によるフレッシュ性状の変化を実験的に確認する。又、繊維補強セメント系複合材料は、曲げ、又は引張力作用時において靱性的な挙動を示すことが特徴として挙げられる。ここでは、比較的容易に試験を行える曲げ試験により靱性挙動を把握した。

(2) フレッシュ性状

フレッシュ性状試験では、繊維混入前後の空気量及びスランプフローを測定した。繊維混入後に大幅なスランプフローの低下を示したケースについてはスランプを測定した。空気量の測

表-1 マトリックスの使用材料

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 マトリックスの配合

マトリックス種類	略号	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)							
			W	C	S1	S2	G	SP	AE	VA
コンクリート	C	47	180	383	452	452	750	4.98	0.0306	-
モルタル1	M1	45	360	800	399	399	-	1.20	0.6400	0.18
モルタル2	M2	32	256	800	534	534	-	11.2	0.0320	-

表-3 繊維の物性

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
高強力ポリエチレン	HTPE	0.97	φ0.012	12	1000	2770	88

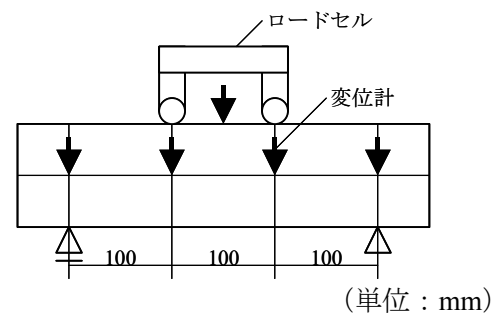


図-1 曲げ試験概略図

定は JIS A 1128 に、試験は JIS A 1150 に、スランプ試験は JIS A 1101 にそれぞれ準拠して行った。

(3) 曲げ試験

JCI-SF4⁴⁾に準拠して、図-1 に示すように 100×100×400mm の供試体により 3 等分点曲げ試験を実施した。載荷速度は 0.5mm/min. として、各ケース 3 体ずつ試験を行った。得られた結果から曲げ荷重-中央変位曲線を求めた。又、曲げ靱性を定量評価として、中央変位 2mm までの曲線下の面積より曲げタフネス⁴⁾を算出した。

3. 実験結果

3.1 フレッシュ性状

(1) 繊維混入前のフレッシュ性状

繊維混入前のフレッシュ性状試験で測定した

空気量及びスランプフローの平均値及び標準偏差を表-5に示す。M2では、他の配合と比較して高性能 AE 減水剤の添加量が多いため標準偏差が大きくなったが、平均値はいずれの配合においても目標値に近い値となった。

(2) 繊維混入後の空気量

繊維混入前後の空気量の変動を把握するために、指標として空気量変動比を式(1)のように定義した。

$$\text{空気量変動比} = \frac{\text{繊維混入後の空気量}}{\text{繊維混入前の空気量}} \quad (1)$$

図-2に空気量変動比と繊維混入率の関係を示す。概して、SP 又は AE の添加量が多い M1 及び M2 は C と比較して変動が増大した。一般に、繊維を混入して練り混ぜると空気が巻き込まれるため空気量が増大すると言われている。本実験の配合では、M1において繊維混入率の増加に伴って空気量が増大する傾向が得られた。一方、C 及び M2 においては、繊維の種類によりばらつきはあるものの、繊維混入率がある程度まで増加すると、空気量が低減傾向に変化していることが確認できる。原因として、繊維混入率が増加すると大幅なスランプ低下が生じて、練り上がり後の状態がばさついた状態となったケースもあり、空気が連行されにくくなったためと考えられる。M1 に関しては他の配合と比較して多量の AE 剤が添加されているために、繊維混入率が増加しても連行されたと考えられる。

(3) 繊維混入後のスランプフロー

空気量変動比と同様にスランプフロー (Slump Flow : 以下, SF と略す) 変動比を式(2)のように定義した。

$$\text{SF変動比} = \frac{\text{繊維混入後のSF}}{\text{繊維混入前のSF}} \quad (2)$$

図-3にSF変動比と繊維混入率の関係を示す。ここで、繊維混入後において大幅にスランプフローが低下したためにスランプのみを測定したケースについては、本実験で得られた図-4のスランプと SF 変動比の関係により回帰的に SF 変動比を算出した。図-3を見ると、概して繊維

表-4 各ケースの詳細

略号	マトリックス種類	繊維種類	繊維混入率 (%)	
C	C	-	-	
C-PP-0.5		PP	0.5	
C-PP-1.0			1.0	
C-PP-1.5			1.5	
C-PP-2.0			2.0	
C-PP-3.0			3.0	
C-PVA1-0.5		PVA1	0.5	
C-PVA1-1.0			1.0	
C-PVA1-1.5			1.5	
C-PVA1-2.0			2.0	
C-PVA1-3.0			3.0	
M1		M1	-	-
M1-PP-0.5	PP		0.5	
M1-PP-1.0			1.0	
M1-PP-1.5			1.5	
M1-PP-2.0			2.0	
M1-PP-3.0			3.0	
M1-PVA1-0.5	PVA1		0.5	
M1-PVA1-1.0			1.0	
M1-PVA1-1.5			1.5	
M1-PVA1-2.0			2.0	
M1-PVA1-3.0			3.0	
M1-PVA2-0.5	PVA2		0.5	
M1-PVA2-1.0			1.0	
M1-PVA2-1.5			1.5	
M1-PVA2-2.0			2.0	
M1-PVA2-3.0			3.0	
M1-HTPE-0.5	HTPE		0.5	
M1-HTPE-1.0			1.0	
M1-HTPE-1.5			1.5	
M2	M2		-	-
M2-PP-0.5			PP	0.5
M2-PP-1.0		1.0		
M2-PP-1.5		1.5		
M2-PP-2.0		2.0		
M2-PP-3.0		3.0		
M2-PVA1-0.5		PVA1	0.5	
M2-PVA1-1.0			1.0	
M2-PVA1-1.5			1.5	
M2-PVA1-2.0			2.0	
M2-PVA1-3.0			3.0	
M2-PVA2-0.5		PVA2	0.5	
M2-PVA2-1.0			1.0	
M2-PVA2-1.5			1.5	
M2-PVA2-2.0			2.0	
M2-PVA2-3.0			3.0	
M2-HTPE-0.5		HTPE	0.5	
M2-HTPE-1.0			1.0	
M2-HTPE-1.5	1.5			

表-5 繊維混入前のフレッシュ性状

マトリックス種類	空気量 (%)		スランプフロー (cm)	
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
C	6.7	0.7	58.2	4.9
M1	6.6	0.8	48.6	2.5
M2	7.6	1.6	55.2	8.9

混入率が増加するに従ってスランプフローは低下する傾向が得られ、本実験では、HTPE 繊維を使用した場合に最もスランプフローが低下す

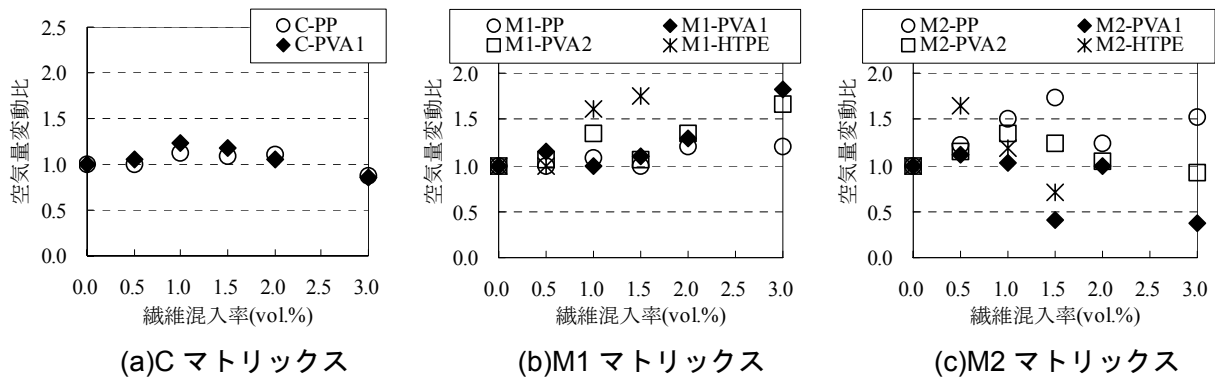


図-2 空気量変動比と繊維混入率の関係

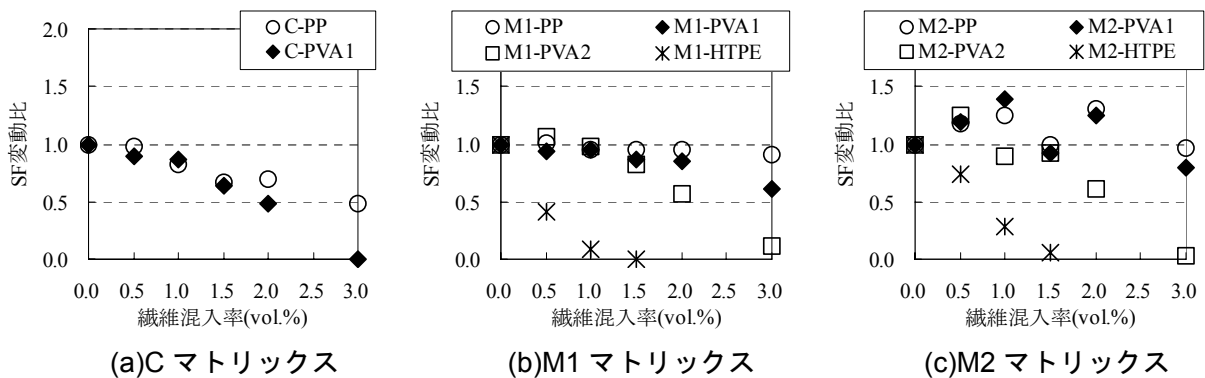


図-3 SF変動比と繊維混入率の関係

る傾向が得られた。これは、HTPE 繊維は他の繊維と比較して繊維断面が著しく小さいためと考えられる。そのため、レディーミクストコンクリート工場で練り混ぜる際にはスランプフローの低下への十分な配慮が必要となる。ここで、M1 及び M2 において、PP 繊維、又は PVA1 繊維を使用した場合は、スランプフローの低下量が小さい結果となった。これは繊維長さに対して最大骨材寸法が十分に小さいために繊維と骨材の噛み合いが緩和されたためと推察される。

3.2 曲げ試験

図-5 に各ケースの曲げ試験で得られた代表的な曲げ荷重-中央変位曲線を示す。若干のばらつきはあるものの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。

(1) コンクリートマトリックスの場合

図-5 (a)を見ると、PVA1 繊維を使用した方が初期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はPP 繊維よりも有効な繊維

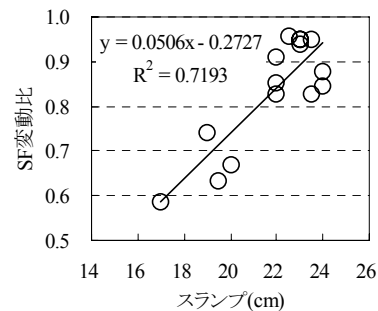


図-4 スランプと SF 変動比の関係

維であることが確認できる。

(2) モルタルマトリックスの場合

図-5 (b) 及び図-5 (c)を見ると、モルタルマトリックスにおいても PP 繊維より PVA1 繊維を使用した方が靱性的な挙動を示した。又、M2-PVA1-3.0 については他と比較して最大曲げ荷重が大幅に増大した。

繊維長さの短い PVA2 繊維と HTPE 繊維を使用した場合については、繊維長さの長い PP 繊維と PVA1 繊維を使用した場合と比較して、曲げ荷重が最大値に達した後に急激に荷重が低下した。これは、ひび割れが局所化してひび割れ幅が拵

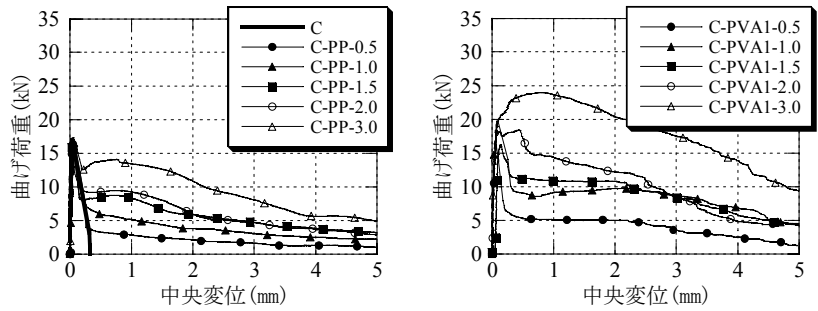
大したとき、繊維長さが長い方が繊維とマトリックスの界面における付着力を持続できるためと考えられる。

繊維長さが比較的短い PVA2 繊維を使用した場合と HTPE 繊維を使用した場合を比較すると、HTPE 繊維を使用した方が PVA2 繊維より高い最大曲げ荷重を示した。

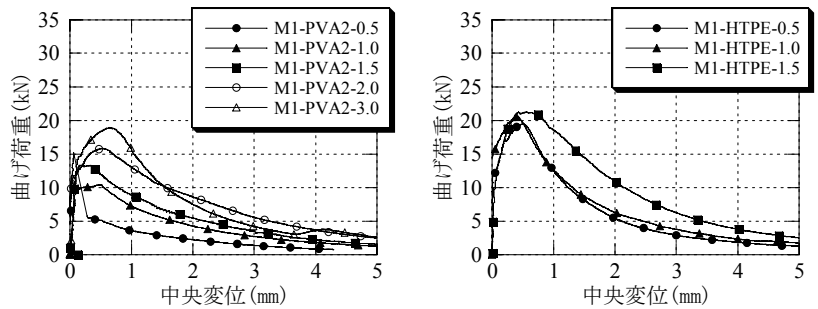
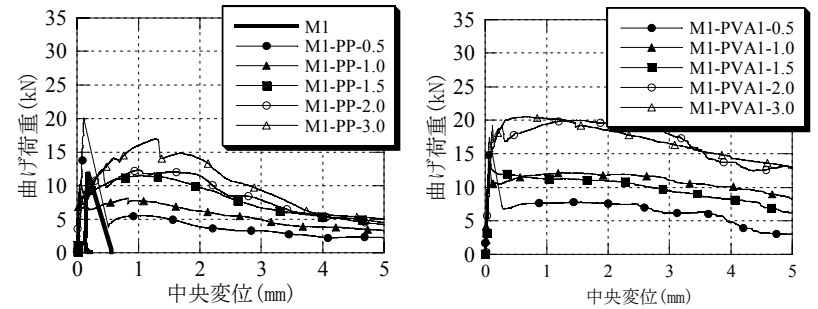
マトリックス強度に関して比較すると、強度の高い M2 に繊維を混入した方が初期ひび割れ強度及び最大曲げ荷重が高くなる結果を得た。しかしながら、最大荷重以降は比較的急激に荷重が低下する傾向にある。これはマトリックス強度が高くなると、繊維とマトリックス間の付着力が増加して破断する繊維が増えるためと考えられる。

3.3 定量評価

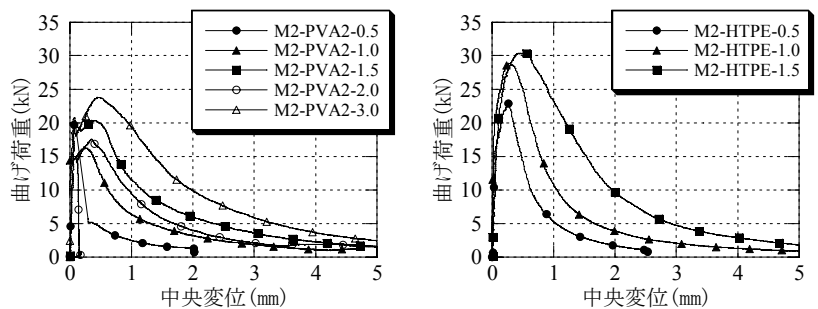
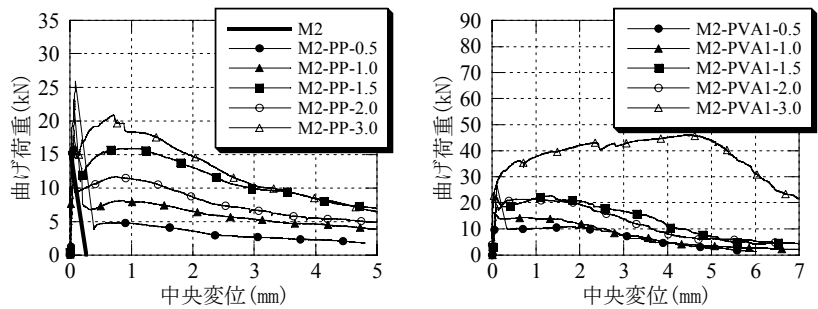
ワーカビリティと靱性を総合的に評価するために、曲げタフネスと SF 変動比を軸に取り図-6に示す。C の場合では、PP 繊維より PVA1 繊維を使用した方がワーカビリティは低下するものの高い靱性が得られることが確認できる。M1 及び M2 の場合では、PP 繊維、又は PVA1 繊維を使用したときにスランプフローの低下量が小さく、更に PVA1 繊維では高い靱性が得られることも確認できる。又、HTPE 繊維を使用した場合は高い靱性が得られるが、少ない繊維混入量にも関わらずワーカビリティは著しく低いことが確



(a)C マトリックス



(b)M1 マトリックス



(c)M2 マトリックス

図-5 曲げ荷重-中央変位曲線

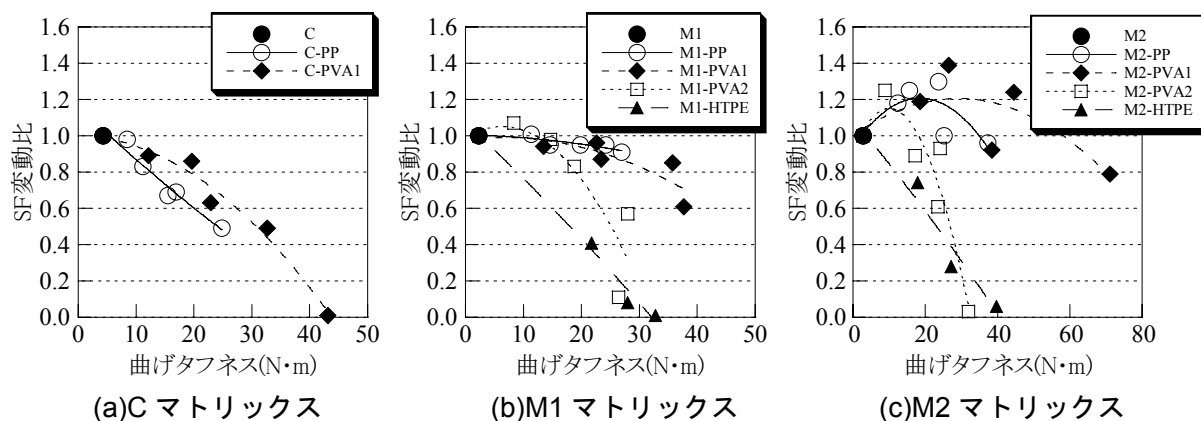


図-6 曲げタフネスと SF 変動比の関係

認できる。ここで使用した二つの指標による評価は、実験結果を明確に反映しているため、使用する部材や施工方法等に応じて繊維補強セメント複合材料の繊維種類や混入量等を選択するツールとして利用が期待できる。

4. まとめ

本研究では、マトリックスにコンクリート及びモルタルを使用した繊維補強セメント系複合材料について、フレッシュ性状及び曲げ靱性の検討を行った。

コンクリートマトリックスの場合では、PP 繊維より PVA1 繊維を使用した方がワーカビリティは低下するものの高い靱性が得られることが確認できた。モルタルマトリックスの場合では、繊維長さの長い PP 繊維及び PVA1 繊維を使用した場合にスランプフローの低下量が小さく、更に PVA1 繊維では高い靱性が得られることが確認できた。又、HTPE 繊維を使用した場合も高い靱性が得られるが、繊維混入によるワーカビリティの低下は著しいことが確認できた。

又、上記のような傾向をより明確に示すため、ワーカビリティと靱性を定量評価して共に図示した。その結果、本実験における配合、繊維種類及び混入量が、繊維補強セメント系複合材料の性状に与える影響を示すことができた。

5. 謝辞

本研究は、(財) 鉄道総合技術研究所、(株)

クラレ、鉄建建設(株)の3社における共同研究の成果の一部である。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)の渡邊忠朋氏には、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，(社)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) 川又 篤，高橋 貴蔵，掘越 哲郎，松岡 茂：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，コンクリート年次論文報告集，Vol.27，No.1，pp.295-300，2005
- 4) (社)日本コンクリート工学協会：繊維補強コンクリートの試験方法に関する規準 (JCI-SF4) 繊維補強コンクリートの曲げ強度及び曲げタフネス試験方法，(社)日本コンクリート工学協会，pp.11-17，