

論文 高じん性セメント系複合材料における連糸状ポリプロピレン短繊維の分散性能に関する検討

大島 章弘^{*1}・森宗 義和^{*2}・川西 貴士^{*3}・平田 隆祥^{*4}

要旨：多量の有機短繊維が添加される高じん性セメント複合材料では、繊維の分散状態が品質に影響を与える要因の一つと考えられる。そこで、有機短繊維としてポリプロピレン短繊維を用いて高じん性セメント複合材料を製造する際の、繊維の添加方法、繊維添加後のフレッシュ性状および繊維の分散性について実験的に検討した。その結果、実施工を想定した製造手法において、繊維添加後のフレッシュ性状および繊維の分散状態が良好であることを確認した。

キーワード：ポリプロピレン短繊維、繊維分散性、傾胴式ミキサ、生コンプラント

1. はじめに

近年、じん性や疲労耐久性を要する部材の補強として、高じん性セメント複合材料が用いられている。さらに、中性化、塩分浸透に対する耐久性を要する部材の表面補修などに、複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料（High Performance Fiber Reinforced Cement Composite：以下、HPFRCCと表記）の適用が検討されており、2007年3月に土木学会から設計・施工指針（案）¹（以下、指針案と表記）が発表された。このHPFRCCは、セメント系材料を有機短繊維で補強することで、一軸引張応力下において擬似ひずみ硬化特性を発揮し、ひび割れ幅を微細に分散できる材料である。

指針案では、主にポリビニルアルコール短繊維（以下、PVA繊維と表記）を用いた場合について記述しているが、比較的安価であり、素材が柔らかく、繊維の分散性や作業性が良い連糸状ポリプロピレン短繊維（以下、連糸状PP繊維と表記）に着目した。著者らは、これまでに連糸状PP繊維を用いて試験室レベルの練混ぜ実験を行い、良好なフレッシュ性状、繊維の分散性、擬似ひずみ硬化特性および複数の微細ひび割れを形成することなど、HPFRCCとしての性能を満足していることを確認²している。しかし、HPFRCCの製造では、従来の繊維補強コンクリートと比較して、多量に繊維を添加する必要があるため、繊維の分散状態が品質に与える影響が大きい。

そこで、この連糸状PP繊維を多量に添加したモルタルの製造に向けて、実機ミキサを用いた施工実験を実施し、繊維の添加方法、繊維添加後のフレッシュ性状、繊維の分散性、繊維のロス量およびロス率について検討した。内容としては、アジテーターカーでの練混ぜを想定

した傾胴式ミキサを用いた室内試験練りと、生コンバッチャープラントおよびアジテーターカーを用いた実機レベルの製造実験を行い、比較評価を行った。

2. 連糸状ポリプロピレン短繊維とは

2.1 ポリプロピレン繊維の特長

(1) 各種有機短繊維の比較

HPFRCCに用いる一般的な補強用繊維として、PVA繊維、高強度ポリエチレン繊維が挙げられる。この2種類の繊維は、引張強度およびヤング係数が高いことが特徴である。また、セメントマトリックスと繊維との界面における付着力では、樹脂自体に極性基を有するPVA繊維が優れている。一方、ポリプロピレン繊維は、引張強度、ヤング係数とも前述した2種類の繊維に比べて劣るものの、伸び能力が高く、アルカリ環境下での耐久性に優れている特長を有する。この繊維は、比較的安価であり、素材が柔らかく、繊維の分散性や作業性が良いことから、ひび割れ抑制、はく離はく落防止、曲げじん性の向上および火災時の爆裂抵抗性改善など、幅広い用途で使用されており、HPFRCCに用いる補強用繊維としても有力な候補材料として挙げられる。

(2) 連糸状ポリプロピレン短繊維とは

使用した連糸状PP繊維には、2つの特長がある。一つ目として、繊維の分散性を改善するために、PP繊維の形状を単糸が分離可能に連結した連糸状のテープ形状とした。二つ目として、ポリプロピレン樹脂は疎水性であるため、セメントマトリックスとの付着力を改善するために、繊維表面に凹凸を施した。実験に使用した連糸状PP繊維を写真-1に示す。

*1 萩原工業（株） 合成樹脂事業部 製品開発グループ ハギライン BU チームリーダー 工修（正会員）

*2 萩原工業（株） 合成樹脂事業部 営業部 パルチップグループリーダー（正会員）

*3 （株）大林組 技術本部 技術研究所 生産技術研究部 主任 工修（正会員）

*4 （株）大林組 技術本部 技術研究所 生産技術研究部 主任研究員 博（工）（正会員）

2.2 モルタル・コンクリートへの有機短繊維の添加方法とその特徴

モルタルおよびコンクリートへ繊維を添加する方法を表-1に示す。モルタルを練り混ぜる方法として、ハンドミキサおよび左官用モルタルミキサを使用する方法が挙げられる。しかし、ハンドミキサおよび左官用モルタルミキサでは、少量のモルタルしか練り混ぜることができないため、HPFRCCの構造部材への適用を考えると、多量のモルタルを練り混ぜる必要があり、グラウト用ミキサ、アジテーターカーや生コンプラントミキサでの製造が求められる。そこで本実験では、アジテーターカードラムや生コンプラントミキサへ連糸状PP繊維を直接添加することとした。

2.3 有機短繊維の分散性の試験方法とその評価方法

繊維の分散性試験方法としては、NEXCO トンネル施工管理要領（繊維補強覆工コンクリート編）の基準試験項目である繊維混入率試験³⁾がある。この試験方法は、アジテーターカーが積載しているコンクリートを排出する過程において、最初、中間、最後の3つの時点で所定の試料を採取し、試料の中から繊維を洗い出しその質量を求める方法である。評価方法は、質量から算定した繊維混入率が、設計繊維混入率の100±20%かつ、3回の平均値が設計混入率の95%以上であることを規定値としている。

また、JR 東日本の土木工事標準仕様書⁴⁾では、アジテーターカーからの試料採取はNEXCOと同様に3つの時点において採取するよう、記載されている。採取した試料から洗い出した繊維量が、設計繊維混入量の80%以上であることを規定している。

2.4 有機短繊維のロス量およびロス率の試験方法とその評価方法

試験方法は、アジテータードラム内および生コンプラントミキサ内に付着したモルタルから繊維を採取した。繊維ロス率は下記式から求めた。

$$\text{ロス率} = \frac{\text{ロス量}}{\text{設計繊維添加量}} \times 100(\%) \quad (1)$$

ロス量：生コンバッチャープラントミキサおよびアジテータードラム内に残存していた連糸状PP繊維の重量

3. 実験概要

3.1 実験ケース

HPFRCC製造における連糸状PP繊維の添加は、2種類の手法で検討を行った。最初に、アジテーターカーによる練混ぜを想定して、傾胴式ミキサを用いた室内試験練

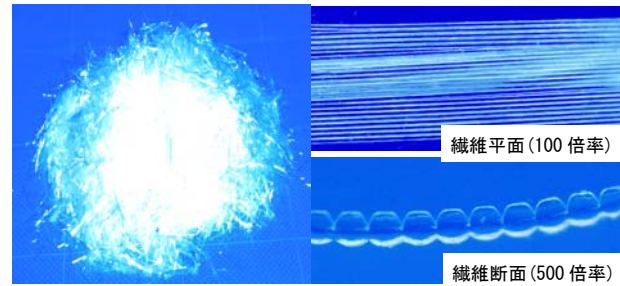


写真-1 連糸状PP繊維

表-1 繊維の添加方法

	繊維練混ぜ装置	特徴
モルタル	ハンドミキサ	攪拌能力が高く、多量の繊維を攪拌できる。
	左官用ミキサ	攪拌能力が低いため、多量の繊維添加するには分散性の注意が必要。
モルタル・コンクリート	傾胴式ミキサ	回転羽根やミキサ内に繊維が付着する。
	グラウト用ミキサ	バッチ式ミキサでは均一に繊維を練混ぜることが可能。
	アジテーターカー添加	繊維投入後、高速攪拌することで繊維を分散できる。
	バッチャープラント添加	一度に多量のHPFRCCを製造することができる。
	繊維投入機の使用	多量の繊維を空送により添加できる。ファイバーボールの発生を抑制できる。

りを行い、フレッシュ性状、繊維の分散性を確認した。次に、その結果をふまえて、実際に生コンプラントでの製造を想定して、下記のa),b)の2つの添加方法について検討を行い、フレッシュ性状、繊維の分散性を比較した。a)バッチャープラントミキサへ繊維を直接投入する手法、b)バッチャープラントでベースモルタルを製造した後、モルタルをアジテーターカーに積載し、繊維投入機を用いて連糸状PP繊維をアジテーターカーに後添加する手法とした。b)の添加手法については、アジテーターカーに搭載したモルタルの容量が異なる場合の影響についても検討を行った。

表-2 繊維の物性

繊維種類	繊維度 (dtex)	長さ (mm)	換算直径 (μm)	引張強度 (N/mm^2)	ヤング係数 (N/mm^2)
連糸状 PP 繊維	13 (単糸)	12	42.6	480	5,000
PVA 繊維	15	12	40.0	1,600	40,000



写真-2 傾胴式ミキサ

表-3 HPFRCC の配合 (傾胴式ミキサ)

使用繊維	W/B (%)	S/B	W (kg/m^3)	繊維添加率 (vol.%)	Ad. ($\text{B}\times\%$)
連糸状 PP 繊維	50.0	0.79	427	3.0	1.5
PVA 繊維				2.0	



写真-3 繊維投入機によるアジテーターカーへの繊維の添加状況

表-4 HPFRCC の配合 (生コンプラント)

W/B (%)	S/B	W (kg/m^3)	連糸状 PP 繊維 (vol%)	Ad. ($\text{B}\times\%$)
47.0	0.83	385	3.0	1.3

3.2 配合および製造条件

HPFRCC に使用した繊維の物性を表-2 に示す。傾胴式ミキサでの実験における配合を表-3 に示す。生コンバッチャープラントでの製造実験における配合を表-4 に示す。傾胴式ミキサによる実験では、比較繊維として PVA 繊維を用いた。

(1) 傾胴式ミキサによる製造

練混ぜ方法は、最初に 2 軸型強制練りミキサ (公称容量 60L) を用いてモルタルを練混ぜた。モルタルの練混ぜ時間は 70 秒間とした。次に、練り上がったモルタルを傾胴式ミキサ (公称容量 100L) に移し変えた後、回転させながら繊維を投入し、繊維投入後 180 秒間練混ぜを行った。練混ぜ量は 1 バッチ当り 50 L とし、傾胴式ミキサの回転数は、アジテーターカーの回転数とほぼ同等である 16rpm とした。使用した傾胴式ミキサを写真-2 に示す。

フレッシュ試験として、スランプフロー、モルタル JIS フローおよび空気量を測定した。また、ファイバーボールの有無については、指触により確認した。



写真-4 HPFRCC の排出状況



写真-5 繊維混入率試験状況

表-5 フレッシュ特性（傾胴式ミキサ）

繊維種類	繊維 添加率 (vol.%)	スランブ フロー (cm)	モルタルのフレッシュ性状		
			JIS フロー(mm)		空気量 (%)
			0 打	15 打	
連糸状 PP 繊維	3.0	43.0×41.5(42.3)	128×123(126)	209×198(204)	6.6
PVA 繊維	2.0	51.0×50.0(50.5)	129×123(126)	198×195(197)	2.5

表-6 フレッシュおよび硬化後の特性（生コンプラント）

記号	種類	練混ぜ量 (m ³)	フレッシュモルタルの性状		硬化後の特性
			スランブフロー (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 (N/mm ²)
a)	バッチャープラント	1.0	42.0×51.5 (47.0)	1.2	34.5
b)	アジテーターカー	0.5	43.5×43.0 (43.5)	1.0	43.0
		1.0	53.5×51.5 (52.5)	1.2	45.0
		3.5	42.5×42.0 (42.5)	1.3	44.1

表-7 繊維混入率およびロス率の測定結果

種類	練混ぜ量 (m ³)	繊維混入率試験結果						ロス率試験結果		
		繊維添加率 (vol.%)				判定*		ロス量 (kg)	添加量 (kg)	ロス率 (%)
		1	2	3	平均	測定値	平均値			
バッチャー プラント	1.0	3.22	3.16	3.19	3.19	OK	OK	1.0	27.3	3.7
アジテーター カー	0.5	3.35	3.08	3.21	3.21	OK	OK	0.6	13.7	4.1
	1.0	3.17	3.05	3.07	3.10	OK	OK	0.7	27.3	2.5
	1.5	3.19	3.15	3.08	3.14	OK	OK	1.0	95.6	1.0

*判定: NEXCO「トンネル施工管理要領(繊維補強コンクリート編)」の基準試験に準拠

(各測定値) 設計混入率の 100±20%

(平均値) 設計混入率の 95%以上

(2)生コンバッチャープラントによる製造

HPFRCC は、公称容量 2.5m³ の 2 軸型強制練りミキサを用いて製造した。製造方法は、モルタルを 120 秒間練混ぜた後、繊維を一括投入し、更に 180 秒間練り混ぜた。製造量は、プラントミキサを 1.0m³ とし、アジテーターカーを 0.5, 1.0, 3.5 m³ の 3 水準とした。アジテーターカーへの繊維添加方法は、繊維投入機を用いた。

繊維投入機による繊維投入時間を 180 秒間とし、投入完了後 180 秒間高速攪拌した。繊維投入機は、多量の繊維を空送により添加でき、ファイバーボール対策として有効である。

繊維投入機を用いて連糸状 PP 繊維をアジテーターカーへ添加している状況を写真-3 に示す。写真-4 にアジテーターカーからの排出状況を示す。

フレッシュ試験として、スランブフロー、空気量を

測定した。また、連糸状 PP 繊維の分散性を確認するため、写真-5 に示すように JSCE-F 554 に準拠して繊維混入率試験を行った。試料は、プラントミキサ内の左側、中央および右側から、アジテーターカーは排出時の最初、中間および最後からそれぞれ 1.57ℓ ずつ計 2 回、3.14ℓ 採取した。プラントミキサ内およびアジテータードラム内に残存した繊維のロス量およびロス率について確認した。試験は、2.4 に記載した方法にて行った。さらに、モルタルの硬化後、寸法 φ100×200mm の圧縮強度試験を行った。

4. 実験結果および考察

4.1 傾胴式ミキサによる実験結果

フレッシュ特性の結果を表-5 に示す。JIS フローについては、連糸状 PP 繊維、PVA 繊維とも同程度の値と

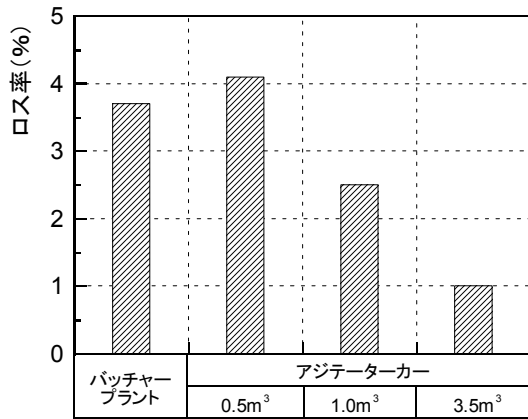


図-1 繊維ロス率の比較

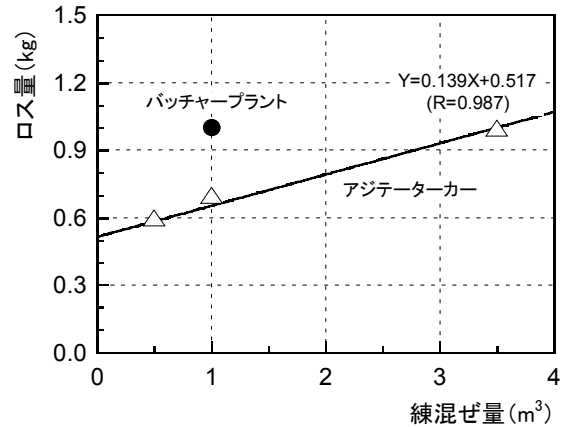


図-2 練混ぜ量とロス量の関係

なった。また、40～50cm 程度のスランプフローが得られた。ファイバーボールの有無については、PVA 繊維は、若干のファイバーボールの存在が認められたのに対して、連糸状 PP 繊維では認められず、良好な繊維の分散性を示した。

4.2 生コンバッチャープラントによる実験

HPFRCC のフレッシュおよび硬化後の特性を表-6 に示す。スランプフローは 42.0～53.5cm の範囲の結果となった。圧縮強度は、バッチャープラントミキサで製造した場合、アジテーターカーで製造した場合よりも約 10N/mm² 低かった。アジテーターカーで 1.0m³ の HPFRCC を製造した場合の流動性が最も良好であった。

また、空気量については、3.0vol.% と多量の連糸状 PP 繊維を添加してもほとんど増加しなかった。これは使用した消泡タイプの空気量調整剤の影響と考えられる。

次に、繊維混入率試験による繊維混入率およびロス率の測定結果を表-7 に示す。繊維の混入率は、いずれも NEXCO の基準試験を満足しており、良好な分散性が確認された。

各製造手法の繊維ロス率の比較を図-1 に、練混ぜ量とロス量の間接を図-2 に示す。アジテーターカーに繊維を添加した配合は、練混ぜ量の増加に伴い、繊維ロス率が低減された。練混ぜ量 1.0m³ で比較すると、アジテーターカーで練混ぜを行った方が、プラントミキサよりロス率が少ないことが確認された。繊維量のロスは、アジテーターカーのドラム内やコンクリート投入ホッパー付近に、繊維が付着することで発生する。図-2 に示すように、アジテーターカー製造では、練混ぜ量の減少に伴いロス量が減少した。製造量が少ない場合でも、ア

ジテータードラム内に残存するモルタルにより、繊維のロス量は 0.5kg 程度発生するものと思われる。

5. まとめ

既存の生コンバッチャープラントおよびアジテーターカーを用いて、連糸状 PP 繊維を多量に添加した HPFRCC を製造した結果、以下の知見が得られた。

- (1) 生コンプラントミキサおよびアジテーターカーのいずれの製造手法でも、スランプフローで 40～50cm 程度の HPFRCC が製造できた。
- (2) 繊維の分散性については、NEXCO の品質管理基準を満足した。
- (3) HPFRCC の練混ぜ量と繊維ロス量は比例関係にあり生コンバッチャープラントよりアジテーターカーによる製造手法の方が、ロス量が少ないことを確認した。

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，No.127，2007.3
- 2) 川西貴士，平田隆祥，大島章弘，森宗義和：ポリプロピレン短繊維を使用した高じん性セメント系複合材料の基本特性，土木学会第 63 回年次学術講演会，pp685-686，2008.9
- 3) 東日本高速道路(株)，中日本高速道路(株)，西日本高速道路(株)：トンネル施工管理要領(繊維補強覆工コンクリート編)，平成 18 年 10 月
- 4) (社)日本鉄道施設協会：土木工事標準仕様書 東日本旅客鉄道株式会社編，付 P8-20，2005.4

