

# 論文 短繊維補強コンクリートのリサイクル性に関する基礎的検討

杉本 勝哉<sup>\*1</sup>・国枝 稔<sup>\*2</sup>・上田 尚史<sup>\*3</sup>・中村 光<sup>\*4</sup>

**要旨:** 本研究は、短繊維補強コンクリートを用いた構造物の解体時の方策を検討するため、ジョークラッシャーを用いて破碎した短繊維補強コンクリート（鋼繊維およびポリプロピレン繊維を使用）の破碎性状を実験的に検討した。本研究の範囲内では、短繊維補強コンクリートの破碎後のコンクリート塊の粒度分布は、同一配合の普通コンクリートから得られるコンクリート塊の粒度分布より小径側に移行すること、繊維混入率が大きいほど粒度分布が小径側に移行すること、繊維種別が破碎性状に与える影響は小さいことなどが明らかとなった。

**キーワード:** 短繊維補強コンクリート, 鋼繊維, ポリプロピレン, 破碎, 再生骨材, コンクリート塊

## 1. はじめに

近年、短繊維補強コンクリートは、ひび割れ幅の抑制や部材の高靱性化を目的とした適用だけでなく、はく落防止、高強度コンクリートの火災時の爆裂防止、および乾燥収縮等によるひび割れ抑制などを目的とした適用も積極的に進められている。

例えば、日本コンクリート工学会「高靱性セメント複合材料の性能評価と構造利用研究委員会（委員長：六郷 恵哲 岐阜大学教授, 2001-2003年）」にみられるように、繊維補強材料の高性能化の推進および技術的な課題の整理を通して、利用拡大を目指した活動が行われてきている<sup>1)</sup>。最近では、「繊維補強セメント系複合材料の新しい利用法研究委員会（委員長：金子佳生 京都大学教授, 2009-2011年）」が発足し、繊維補強セメント系材料の新しい利用法についての議論が行われている。特に、環境負荷低減という観点から、繊維補強セメント系材料を使用した構造物のライフサイクルにおいて、普通コンクリートと比較しながら留意すべき点について整理されつつある。その中で、特に、構造物の供用が終了し、解体することになった繊維補強セメント系材料の取り扱いにおいて、繊維混入に伴って、解体時に必要なエネルギーや再生骨材の入手の可否について不明な点が多いのが現状である。

普通コンクリートに対しては、再生骨材に関する研究が積極的に行われた成果として、再生骨材の JIS が制定されている一方で、短繊維が混入されたコンクリートは産業廃棄物として取り扱うことが原則である現状を鑑みると、明らかに繊維補強セメント系材料の解体時の考え方、具体的な対応策に関する情報不足は否めない。

本研究では、繊維補強コンクリートを用いた構造物の解体時にどのような対応が可能かを検討する上で、普通

コンクリートと同様の利用方法（例えば、路盤材として使用する、再生骨材として利用する）を検討するための基礎的情報を提供することを目的に、ひずみ軟化型繊維補強コンクリート (FRC) の破碎性状を把握した。

なお、鋼繊維及びポリプロピレン繊維の2種類をそれぞれ使用した FRC を作製し、破碎後のコンクリート塊のふるい分け試験、吸水率試験を行うことで、短繊維が FRC の破碎性状に与える影響について、普通コンクリートのそれらと比較しながら検討した。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料

#### (1) コンクリート

本実験で使用したコンクリートは普通コンクリート (NC) と繊維の種類および混入率の異なる 5 種類の FRC とに大別できる。普通コンクリートの計画配合を表-1 に示す。普通コンクリートはレディーミクストコンクリートを用い、W/C は 42% とし、セメントには早強ポルトランドセメント（密度：3.14g/cm<sup>3</sup>）を使用した。粗骨材には碎石（密度：2.98g/cm<sup>3</sup>）を用い、最大寸法は 20mm、粗粒率 (FM) は 6.69 である。細骨材には砂（密度：2.60g/cm<sup>3</sup>）を用いた。混和剤にはポリカルボン酸系の高性能 AE 減水剤（密度：1.10g/cm<sup>3</sup>）を使用した。

表-1 計画配合

G <sub>max</sub> (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
			水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 Ad.
20	42	45	170	410	758	1022	3.075

FRC は、普通コンクリートに対して、ポリプロピレン繊維 (PP 繊維) または鋼繊維 (SF) を添加するのみとした。具体的には、計量した普通コンクリートを一軸強制

\*1 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 (学生会員)

\*2 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻准教授 博(工) (正会員)

\*3 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻助教 博(工) (正会員)

\*4 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻教授 博(工) (正会員)

練りパン型ミキサ（容量：55L）に投入し、所定の体積混入率となるよう計量した短繊維を数回に分けて投入後、1分間攪拌した。各FRCとも同様の作業を3回行い、供試体を作製した。

各コンクリートのスランプおよび空気量を表-2に示す。なお、それぞれの値は、NCについては打設直前の、FRCについては1回目の練り混ぜで得られたフレッシュコンクリートから得られた値としている。

表-2より繊維の混入により、スランプが小さくなる傾向にあること、および空気量が増加する傾向にあることが分かる。

表-2 スランプ及び空気量

	スランプ (cm)	空気量 (%)
NC	16.6	3.8
PP 繊維混入率 0.2 %	10.5	3.6
PP 繊維混入率 0.5 %	10.5	6.6
PP 繊維混入率 1.0 %	9.8	4.5
SF 混入率 1.0 %	15.5	9.8

## (2) 繊維

先述のとおり使用した繊維は鋼繊維 (SF) およびポリプロピレン繊維 (PP 繊維) の2種類である。使用された繊維を写真-1に示すとともに、それぞれの繊維の物性値 (公称) を表-3に示す。鋼繊維は、長さ30mmで両端フック付きの繊維であり、かつ集束タイプのものである。PP繊維は、長さ48mmのインデント付きストレートタイプである。どちらの繊維もコンクリートに混入することでひび割れが抑制でき、トンネル覆工など多くの施工実績を持つ短繊維である。



(a) 鋼繊維 (SF)



(b) ポリプロピレン繊維 (PP 繊維)

写真-1 使用した繊維

表-3 各繊維の物性値

	PP 繊維	SF
素材	ポリプロピレン	鋼
密度 (g/cm <sup>3</sup> )	0.91	7.85
繊維径 (mm)	0.70	0.60
繊維長 (mm)	48	30

## 2.2 供試体の作製方法

本実験では、φ150×300mmの円柱供試体をコンクリート種別毎に20本作製した。打設時には、棒状バイブレータを用いて十分に締め固めた。打設後、材齢2日において脱型し、恒温室内 (温度20℃) で湿布養生を行った。

## 2.3 強度試験

作製した供試体の破砕は、材齢28日に実施した。なお、材齢28日～29日において、φ100×200mmの円柱供試体 (3本) を用いて、圧縮強度および弾性係数を測定した。また、参考のために材齢70日において、100×100×400mmの角柱供試体 (3本) を用いた三等分点曲げ試験を行った。それらの結果を表-4に示す。鋼繊維を除けば、繊維混入率の増加に伴い圧縮強度が低下する傾向にあった。表-2より、繊維を混入することで空気量が増加しており、圧縮強度の低下は、繊維量の増加だけでなく空気量の増加も影響していると推察される。曲げ強度に関しては、繊維混入率の増加に伴い強度が増加している傾向が見られた。曲げ試験より得られた荷重-載荷点変位の関係を図-1に示す。繊維が混入されることで、繊維がひび割れを架橋し、靱性が向上していることが確認できた。また、その傾向は繊維混入率が大きいほど顕著であった。

表-4 圧縮強度、弾性係数および曲げ強度

	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	曲げ強度 (MPa)
NC	55.8	39.3	5.6
PP 繊維混入率 0.2 %	44.6	34.8	4.6
PP 繊維混入率 0.5 %	44.1	32.8	5.2
PP 繊維混入率 1.0 %	43.5	33.9	6.1
SF 混入率 1.0 %	49.7	36.6	6.4

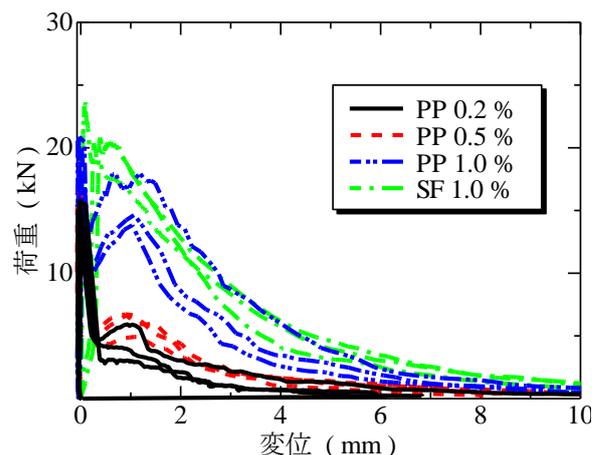


図-1 荷重-載荷点変位の関係

## 2.4 破碎方法

破碎方法は、市販の自走式ジョークラッシャー（処理能力 38ton/h、排出口の隙間 55mm）により 1 回のみ破碎処理を行った。クラッシャーの投入口に先述の円柱供試体をバックホーにて投入し、クラッシャーから排出されたコンクリート塊をすべて回収した（写真-2 参照）。なお、破碎に要した時間はいずれのコンクリートも 10 秒程度であった。表-5 に、破碎前の円柱供試体の全質量、および破碎後に回収されたコンクリート塊の全質量をコンクリート種別毎に示す。これにより、破碎時に損失したコンクリートはいずれのコンクリートにおいても 10% 以下であり、検討に十分な量のコンクリートが回収できたと考えられる。



(a) コンクリートの投入状況 (b) クラッシャー投入口  
写真-2 破碎の様子

表-5 供試体質量

	破碎前 全質量 (kg)	破碎後 全質量 (kg)	回収率 (%)
NC	257.8	249.8	96.9
PP 繊維 混入率 0.2%	251.4	246.0	97.9
PP 繊維 混入率 0.5%	245.7	238.6	97.1
PP 繊維 混入率 1.0%	251.3	245.0	97.5
SF 混入率 1.0%	247.3	231.8	93.7

## 3. ふるい分け試験

### 3.1 試験方法

破碎後のコンクリート塊についてふるい分け試験を行った。ふるい分け試験は、JIS Z 8801 試験用ふるいに規定されるふるい（呼び径、40、30、25、20、15、10、5、2.5mm）を用い、各ふるいにおける試料の通過質量百分率を求めるものとした。

### 3.2 試験結果

図-2 にふるい分け試験によって得られた各供試体の粒度曲線を示す。PP 繊維を混入した FRC に関しては、繊維混入率が増加するに従って各ふるいを通過する量が多くなっている。すなわち、破碎後のコンクリート塊の

寸法が比較的小さいことを表している。ただし、繊維混入率が 0.2% の場合には、普通コンクリート (NC) と明確な違いが認められなかった。排出されたコンクリート塊の粒度分布が、FRC において小径側に移行した理由は、破碎時に繊維が架橋し、原骨材（普通コンクリートに使用された骨材）周辺に付着しているモルタルが破壊するなど、局所的な破壊を誘発したためと推察されるが、詳細についてはさらなる観察が必要である。

また、繊維種別に関しても、SF を混入した FRC の粒度分布は、繊維混入率が同一の PP1.0% の粒度分布に比べると、やや小径側に移行しているが、全体的な傾向は類似している。PP 繊維では、破碎により繊維自身が破断したものが多く視認されたが、鋼繊維では破断がほとんど確認できないことも関連している可能性は高い。これについても詳細な検討が必要である。

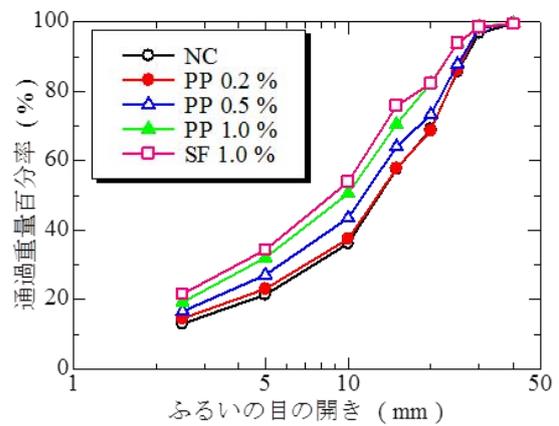


図-2 粒度曲線

写真-3 に各 FRC 供試体のふるい分けにおいて、呼び径 40mm のふるいととどまったコンクリート塊の様子を示す。コンクリートの種別によらず、各コンクリート塊にかなりの量の繊維が付着していることが観察できた。また、原骨材の周りには付着モルタル（原骨材の周りに付着したモルタル）が多く見られた。

写真-4 に各 FRC 供試体のふるい分けにおいて、呼び径 20mm のふるいととどまったコンクリート塊の様子を示す。40mm のふるいととどまったコンクリート塊同様、どのコンクリート塊においても多くの繊維が付着している様子が観察できた。また写真-5 に示すように複数のコンクリート塊が繊維によって架橋されたままのものも多く見られた。このようなコンクリート塊については、架橋を解かず、架橋した状態でふるいととどまった時のふるい目を読み取った。

写真-6 に各 FRC 供試体のふるい分けにおいて、呼び径 10mm のふるいととどまったコンクリート塊の様子を示す。40mm や 20mm のふるいととどまったコンクリート塊と比較して、繊維が付着していないコンクリート塊



(a) PP 繊維混入率 0.2%のコンクリート塊



(b) PP 繊維混入率 0.5%のコンクリート塊



(c) PP 繊維混入率 1.0%のコンクリート塊



(d) SF 混入率 1.0%のコンクリート塊

写真-3 40mm のふるいにとどまったコンクリート塊



(a) PP 繊維混入率 0.2%のコンクリート塊



(b) PP 繊維混入率 0.5%のコンクリート塊



(c) PP 繊維混入率 1.0%のコンクリート塊



(d) SF 混入率 1.0%のコンクリート塊

写真-4 20mm のふるいにとどまったコンクリート塊

が数多くみられた。このことは、本研究で使用したコンクリートであれば、10mm ふるいにとどまるコンクリート塊まで破碎することで、短繊維をほとんど除去できることを示している。

写真-7に各 FRC 供試体のふるい分けにおいて、呼び径 2.5mm のふるいにとどまったコンクリート塊の様子を示す。ほぼ全てのコンクリート塊が完全に繊維と分離しており、ふるいにはコンクリート塊と繊維が別々に観察できた。



写真-5 繊維が複数のコンクリート塊を架橋している様子



(a) PP 繊維混入率 0.2%のコンクリート塊



(b) PP 繊維混入率 0.5%のコンクリート塊

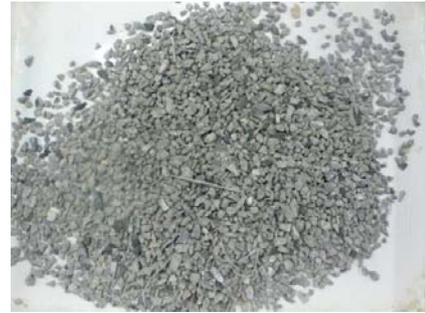


(c) PP 繊維混入率 1.0%のコンクリート塊



(d) SF 混入率 1.0%のコンクリート塊

写真-6 10mmのふるいにとどまったコンクリート塊



(a) PP 繊維混入率 0.2%のコンクリート塊



(b) PP 繊維混入率 0.5%のコンクリート塊



(c) PP 繊維混入率 1.0%のコンクリート塊



(d) SF 混入率 1.0%のコンクリート塊

写真-7 2.5mmのふるいにとどまったコンクリート塊

なお、破碎されたコンクリート塊の観察結果より、本研究で使用したコンクリートは比較的高強度であったため、普通コンクリートおよびFRCの違いによらず原骨材が割裂している場合も多く見受けられた。

以上より、繊維混入率が大きくなるほど、破碎後のコンクリート塊の粒度分布が普通コンクリートの粒度分布よりも小径側に移行する傾向にあること、繊維種別によらず同様の粒度分布の傾向があること、比較的大きなコンクリート塊には短繊維が付着するが、ある大きさ以下（本研究では10mmふるいにとどまるもの）であれば短繊維はほとんど付着していないことが明らかとなった。

#### 4. 吸水率試験

##### 4.1 試験方法

コンクリート塊にどの程度モルタルが付着しているかを調べるため、吸水率試験を行った。吸水率は付着モルタル分が多くなるにつれ、大きくなる傾向にあり、再生骨材の品質の目安に用いられる。

前述のふるい分け試験により、呼び径20mmと10mmのふるいにとどまるコンクリート塊について吸水率試験を行った。呼び径20mmと10mmのふるいにとどまったコンクリート塊を試料としたのは、それらのふるいに多くのコンクリート塊がとどまったためである。

吸水率試験は JIS A 1110 に規定された試験方法に基づいて行った。

#### 4.2 試験結果

表-6 及び表-7 に吸水率試験によって得られた各コンクリート塊の吸水率を示す。なお、吸水率は3回の平均値を示している。

普通コンクリートに関しては、JIS A 5023 の再生骨材 L 程度の吸水率であり、表-6 より、呼び径 20mm のふるいにとどまったコンクリート塊の吸水率についても同程度であった。特に、繊維混入率の増減による変化があまり見られず、粒径が 20mm のコンクリート塊については、繊維混入率等の違いが付着モルタル量に与える影響は小さいと考えられる。

一方、表-7 より、呼び径 10mm のふるいにとどまったコンクリート塊の吸水率は、繊維混入率の増加に伴い減少している傾向が見られた。このことは、繊維混入率が大きいコンクリート塊ほど付着モルタルが減少していることを意味している。特に PP 繊維、SF の違いによらず、1%の繊維混入率の場合、普通コンクリートのそれに比べて約 1%低下している。先述のとおり、短繊維の架橋により、原骨材周辺に付着しているモルタルが破壊され、原骨材量が相対的に多くなっていると推察される。

以上から、繊維の有無が吸水率に与える影響は、粒径が 10mm のコンクリート塊において顕著に見られ、繊維混入率が大きいほど吸水率が小さくなることから、破碎

表-6 20mm のふるいにとどまったコンクリート塊の吸水率 (3 回の平均)

	吸水率 (%)
NC	6.68
PP 繊維混入率 0.2 %	6.09
PP 繊維混入率 0.5 %	6.54
PP 繊維混入率 1.0 %	7.06
SF 混入率 1.0 %	6.35

表-7 10mm のふるいにとどまったコンクリート塊の吸水率 (3 回の平均)

	吸水率 (%)
NC	6.04
PP 繊維混入率 0.2 %	5.53
PP 繊維混入率 0.5 %	5.55
PP 繊維混入率 1.0 %	5.10
SF 混入率 1.0 %	5.09

後のコンクリート塊には付着モルタルの少ない原骨材が多く含まれていることが明らかとなった。

#### 5. まとめ

短繊維補強コンクリートを用いた構造物の解体時の方策を検討するため、ジョークラッシャーを用いて破碎した短繊維補強コンクリート（鋼繊維およびポリプロピレン繊維を使用）の性状について、ふるい分け試験、及び吸水率試験により検討を試みた。以下に本研究で得られた知見と今後の課題を示す。

- (1) 短繊維補強コンクリートの破碎後のコンクリート塊の粒度分布は、同一配合の普通コンクリートから得られるコンクリート塊の粒度分布より、小径側に移行する傾向にあった。特に繊維混入率が大きいほど粒度分布は小径側に移行した。
- (2) 繊維種別が破碎性状に与える影響は、本研究の範囲内では確認できなかった。
- (3) 繊維混入率が大きいほど、粒径の小さいコンクリート塊中には付着モルタルの少ない原骨材が多く含まれる傾向にあった。本研究の範囲内では、10mm ふるいにとどまるものについて、吸水率の小さいコンクリート塊が得られた。

短繊維が破碎性状に及ぼす影響について、より詳細なメカニズムの解明が今後の課題として挙げられる。特に、ベースのコンクリートの強度が比較的低いものについての検討が急務である。

#### 謝辞

本研究は、繊維補強セメント系複合材料の新しい利用法研究委員会（委員長：金子佳生 京都大学教授，2009-2011 年）の環境対応 WG での議論を参考にさせていただいた。また、供試体の破碎を行う際には丸栄コンクリート工業株式会社に実施いただいた。ここに記して謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：高靱性セメント複合材料の性能評価と構造利用研究委員会報告書，2004