

# 論文 異なる径の PP 短繊維を多添加した繊維補強コンクリートの材料特性及びひび割れに対する自己修復機能に関する研究

李 豪傑\*1・西脇 智哉\*2・佐藤 駿介\*3・五十嵐 豪\*4

**要旨:** 直径数十  $\mu\text{m}$  程度の細径ポリプロピレン短繊維を、補強繊維としてコンクリート中に添加することは、マトリックスに対する付着面積が増加することから、繊維補強効果の増進が見込まれる一方で、フレッシュ性状の低下が予想される。本検討では、一般的に繊維補強に用いられる太径 PP 短繊維と、それよりも細かな細径 PP 短繊維の 2 種類の PP 短繊維をコンクリートに添加し、その材料特性および自己修復機能への付与効果に関する検討を行った。その結果、細径 PP 短繊維の比率を増加することで、フレッシュ性状は低下するものの、曲げ靱性を改善すること、微細ひび割れ領域において自己修復機能を促進させることが確認された。

**キーワード:** 細径 PP 短繊維, ひび割れ, 自己修復, 機械的性質, フレッシュ性状, 乾燥収縮性状

## 1. はじめに

これまで、繊維補強セメント複合材料 (Fiber Reinforced Cementitious Composite, 以下, FRCC と表記) の研究が盛んに行われてきており、膨大な研究蓄積がある。例えば、高靱性繊維補強セメント複合材料 (DFRCC) は曲げ応力下でのたわみ硬化性状を示し、RC 部材の構造性能を回復することが可能な断面修復材として用いることが可能である<sup>1)</sup>。高性能繊維補強セメント複合材料 (HPRCC) は引張応力下において、初期ひび割れの発生後もひび割れ幅が増大することなく、複数の微細ひび割れが発生して引張ひずみ硬化挙動を示す<sup>2)</sup>。また、国府田ら<sup>3)</sup>の検討では、合成繊維を用いた FRCC はひび割れの自己修復を促進させることができると報告されている。これらの材料は、粗骨材を用いないモルタルをベースとし、繊維の添加量は体積比 2% (以下, 2 vol.% と表記) 超を添加する検討事例が多い<sup>4)</sup>。この場合、引張応力下における脆性的破壊というコンクリートの欠点を補うことができるものの、単位セメント量が  $1000 \text{ kg/m}^3$  超となる場合もあり、 $\text{CO}_2$  排出量など環境負荷が大きいことは否めない。

一方、粗骨材を用いる通常のコンクリートに対して繊維を添加した繊維補強コンクリート (Fiber Reinforced Concrete, 以下, FRC と表記) についても、これまで数多くの検討が行われてきた。例えば、ポリプロピレン短繊維 (以下, PP 短繊維と表記) をコンクリートに添加することにより、剥落防止機能の付与<sup>5)</sup>、収縮ひび割れに対する抵抗性の向上<sup>6)</sup>等が確認されている。ただし、アスペクト比が数百を超える細径合成繊維をコンクリートに添加した場合は流動性が著しく低下するため、練混ぜや打込みの施工上の制限により、PP 短繊維の添加量は 0.2

vol.%程度に限定されるものが大部分である。このような、通常のコンクリートに対しても、FRCC と同様に補強繊維を多添加することができれば、環境負荷の過度な増大なしに力学特性や収縮ひび割れに対する抵抗性の改善、また、自己修復等の機能付与が期待される。

著者らはこれまで、通常のコンクリートに、一般的に繊維補強に用いられる PP 短繊維よりも細かな細径 PP 短繊維を 1.00 vol.%まで添加してもワーカビリティの確保が可能な FRC の作製方法を検討してきた<sup>7)</sup>。しかし、得られた FRC の材料特性に関する検討は十分ではない。また、細径 PP 短繊維に加えて、サイズの異なる補強繊維と組み合わせることにより、微細ひび割れ幅から可視領域のひび割れ幅まで、多段階の繊維補強効果が得られることが見込まれる<sup>8)</sup>。

これらのことを背景に、本検討では 2 種類の径を持つ PP 短繊維を用いて、コンクリートに対して合計 1.00 vol.%になるように両者の比率を変えた供試体を作製し、フレッシュ性状、機械的性質、自己修復性状の取得を行い、短繊維の配合比が及ぼす影響について考察を試みた。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料

本検討で用いた材料を表-1 に示す。セメントには普通ポルトランドセメントを、細骨材には陸砂と砕砂の 2 種類を 1 対 1 で混合して粒度調整を行ったものを、粗骨材には砕石を使用した。混和剤としてはポリカルボン酸エーテル系高性能減水剤を使用し、図-1 に示す 2 種類の PP 短繊維を使用した。細径 PP 短繊維 (以下, Fs と表記) は繊度が 1.3 dtex, 換算直径は  $13.5 \mu\text{m}$  でアスペクト

\*1 東北大学 大学院工学研究科 都市・建築学専攻 博士課程前期 現大成建設 (学生会員)

\*2 東北大学 大学院工学研究科 都市・建築学専攻 准教授 博士 (工学) (正会員)

\*3 ダイワボウポリテック(株) 播磨研究所 修士 (工学)

\*4 東北大学 大学院工学研究科 都市・建築学専攻 助教 博士 (工学) (正会員)

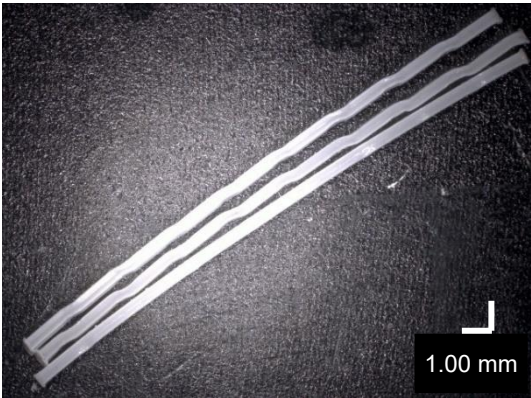


図-1 PP 繊維の外観（上：Fs，下：FL）

比が 445 であり，太径 PP 短繊維（以下，FL と表記）は繊維度が 1000 dtex，換算直径は 374  $\mu\text{m}$  でアスペクト比が 53 である。

## 2.2 使用調合

本検討では，著者らの既報<sup>7)</sup>を基準に，単位水量を 275  $\text{kg}/\text{m}^3$ ，水セメント比を 40%，細骨材率を 45% に固定して調合を決定した。ここで，単位水量は JASS 5<sup>9)</sup> で規定される最大量の 185  $\text{kg}/\text{m}^3$  を超過し，通常のコンクリートと比較して極めて大きい，Fs の表面に水分が吸着されるため，見かけの保水性を考慮することにより，打込みと締固めが可能な流動性を確保できる調合のために必要な単位水量である<sup>7)</sup>。また，繊維の添加率が合計 1.00 vol.% になるように，Fs および FL の添加率を定めた。ここでは，練混ぜおよび打込みが可能な FRC を得ることを優先し，目標スランプおよび目標空気量は特に定めていない。調合表を表-2 に示す。

## 2.3 練混ぜ方法

本検討で用いる Fs は表面に吸着される水分量が大きいため，練混ぜの開始の時点で繊維を予め水分中に分散させることにより，その後の練混ぜに必要な水分を確保することとした。そのため，練混ぜ方法としてまずはセメント，および，減水剤を添加・攪拌しておいた水を投入して 1 分間の練混ぜを行い，続いて得られたセメントペーストに繊維を投入して 2 分間で練り混ぜた。最後に細骨材と粗骨材を投入して 2 分間の練混ぜを行い，合計

表-1 使用材料

材料名称	略号	備考
セメント	C	普通ポルトランドセメント， 密度 3.16 $\text{g}/\text{m}^3$ ，比表面積 3230 $\text{cm}^2/\text{g}$
細骨材	S	S <sub>1</sub> ：福島県産陸砂， 表乾密度 2.61 $\text{g}/\text{cm}^3$ ，実積率 64.2%
		S <sub>2</sub> ：福島県産砕砂， 表乾密度 2.65 $\text{g}/\text{cm}^3$ ，実積率 65.1%
粗骨材	G	福島県産砕石， 表乾密度 2.69 $\text{g}/\text{cm}^3$ ，実積率 61.0%
混和剤	SP	ポリカルボン酸エーテル系高性能減水剤，密度 1.05 $\text{g}/\text{cm}^3$
細径 PP 短繊維	F <sub>s</sub>	長さ 6 mm，換算直径 13.5 $\mu\text{m}$ ， 密度 0.91 $\text{g}/\text{cm}^3$ ，アスペクト比 445， 比表面積 9180 $\text{cm}^2/\text{g}$
太径 PP 短繊維	F <sub>L</sub>	長さ 20 mm，換算直径 374 $\mu\text{m}$ ， 密度 0.91 $\text{g}/\text{cm}^3$ ，アスペクト比 53， 比表面積 124 $\text{cm}^2/\text{g}$

表-2 試験調合

凡例名	単位使用量( $\text{kg}/\text{m}^3$ )				W/C (wt.%)	s/a (vol.%)	繊維(vol.%)	
	W	C	S	G			F <sub>s</sub>	F <sub>L</sub>
S100-L0	275	688	540	659	40	45	1.00	—
S75-L25							0.75	0.25
S50-L50							0.50	0.50
S25-L75							0.25	0.75
S0-L100							—	1.00
NF							—	—

表-3 試験体概要

試験方法		試験体寸法	備考
フレッシュ試験		—	—
乾燥収縮試験		$^{\text{W}}100 \text{ mm} \times ^{\text{H}}100 \text{ mm} \times ^{\text{L}}400 \text{ mm}$	各試験とも 試験体 3 本 にて計測
強度 試験	圧縮	$\Phi 100 \text{ mm} \times ^{\text{H}}200 \text{ mm}$	
	割裂引張		
	曲げ	$^{\text{W}}100 \text{ mm} \times ^{\text{H}}100 \text{ mm} \times ^{\text{L}}400 \text{ mm}$	
自己修復試験			

5 分間の練混ぜ時間とした。また，すべての練混ぜは容量 30 L の揺動式ミキサを使用し，練混ぜ量は 1 バッチあたり 28 L とした。

## 2.4 試験体概要

練り上がったフレッシュコンクリートは  $^{\text{W}}100 \text{ mm} \times ^{\text{H}}100 \text{ mm} \times ^{\text{L}}400 \text{ mm}$  の角柱試験体と  $\Phi 100 \text{ mm} \times ^{\text{H}}200 \text{ mm}$  の円柱試験体に成型した。打込み方向は，円柱では軸方向，角柱では軸と垂直方向とした。また，試料は 3 等分となるように分けて投入し，各層では突き棒で 25 回均等に突き，型枠の側面を 15 回木槌で叩いた。試験体概要を表-3 に示す。

## 2.5 試験方法

### (1) フレッシュ試験

練り上がったフレッシュコンクリートに対してスランプ試験 (JIS A 1101) および圧力法による空気量測定 (JIS A 1128) のフレッシュ試験を行った。

### (2) 乾燥収縮試験

JASS 5 に規定される条件に従い、材齢 7 日までの水中養生を完了した試験体を温度 20°C、湿度 60%RH の環境下において静置し、長さや質量の測定を行い、それぞれの経時変化を得た。材齢が 21 日になるまでは毎日測定を行い、21 日以降は 1 週間ごとに測定した。

### (3) 強度試験

強度試験は、材齢 28 日までの水中養生を完了した試験体に対し、1000 kN 万能試験機を用いて実施した。圧縮試験時にはコンプレッソメータを用いてひずみを計測し、圧縮強度に加えて圧縮ヤング係数を算出した。また、JIS A 1103 に従って割裂引張試験を行い、引張強度を算出した。3 等分点荷重曲げ試験は JCI-S-003-2007<sup>10)</sup> に準拠し、曲げスパンを 300 mm として、試験体の純曲げ区間には引張側と圧縮側の双方に、1/500 mm 以上の精度を有するパイ型変位計を設置して荷重を行った。図-2 に強度試験時の画像を示す。曲げ変形は、引張側と圧縮側の双方に 70 mm の間隔で設置したパイ型変位計により測定したひずみの差 ( $\Delta\varepsilon$ ) から、以下の式 (1) で算出した曲率 ( $\phi$ ) により示した。

$$\phi = \frac{\Delta\varepsilon}{70} \text{ (mm}^{-1}\text{)} \quad (1)$$

### (4) 自己修復試験

試験手順として、まずは材齢 28 日まで水中養生を行い、28 日時点で試験体に初期ひび割れを導入して、その後は養生水槽で水中浸漬を行った。試験体を 1 週間ごとに取り出し、ダブルチャンバー方式のトレント法による表面透気試験<sup>11)</sup>を、曲げ側面のうち型枠面に対して行い、透気係数を測定した。また、マイクロスコープによりひび割れ観察およびひび割れ幅の測定を行い、透気係数とひび割れ閉塞率の経時変化を取得した。初期ひび割れの導入方法は、大坂ら<sup>12)</sup>の実験手法を参考に、試験体を上下反転させての 3 等分点曲げ試験とし、試験体の軸方向と垂直な方向に均等なひび割れを導入した。ただし、脆性的な破壊挙動に繋がる過大なひび割れとならないよう、1 回目の荷重時には最大荷重の 80%まで荷重が低下した時点で荷重を停止して除荷し、その後反転して同等の変形量となるまで荷重を行った。

## 3. 実験結果と考察

### 3.1 フレッシュ試験

表-4 にフレッシュ試験の結果、図-3 にスランプ・



図-2 各強度試験時の画像 (圧縮・割裂引張・曲げ)

表-4 フレッシュ試験結果

凡例名	繊維(vol.%)		スランプ(cm)	空気量(%)
	F <sub>s</sub>	F <sub>L</sub>		
S100-L0	1.00	—	16.2	8.0
S75-L25	0.75	0.25	16.8	7.0
S50-L50	0.50	0.50	20.4	5.0
S25-L75	0.25	0.75	22.8	2.5
S0-L100	—	1.00	23.0	0.9
NF	—	—	23.2	—*

※測定結果なし

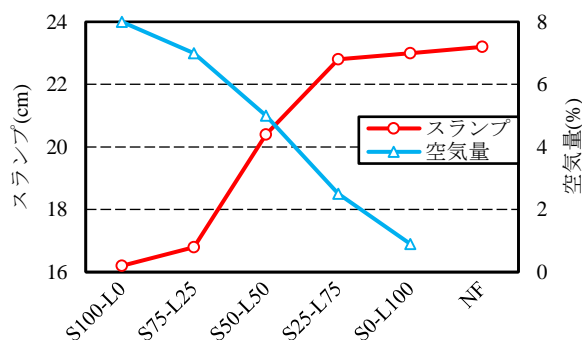


図-3 スランプ・空気量と繊維添加率の関係

空気量と繊維添加率の関係を示す。図-3 により、空気量については、F<sub>s</sub>の添加率を増加するほど空気量が増大する傾向が確認された。これは、比表面積の大きい F<sub>s</sub> の添加量が大きくなった場合、エントラップドエアが増加するためだと考えられる。また、スランプについて、繊維を添加しない NF と比較して、合計添加率を 1.00 vol.% と固定した場合には、F<sub>s</sub> の添加によりスランプが著しく低下する一方で、F<sub>s</sub> の代わりに F<sub>L</sub> を多く添加することによってスランプ値が増大し、スランプの低下が抑制されることが確認された。

### 3.2 乾燥収縮試験

乾燥収縮試験の結果については、収縮ひずみおよび質量減少率の経時変化を図-4 および図-5 に示す。これらの図から、PP 短繊維を用いたシリーズは NF と比較して収縮ひずみ、および、質量変化率ともに増加する傾向が見られ、繊維の添加による乾燥収縮の低減効果は、本実験の範囲では確認できなかった。

### 3.3 強度試験

図-6 に圧縮強度・ヤング係数および各最大耐力時の

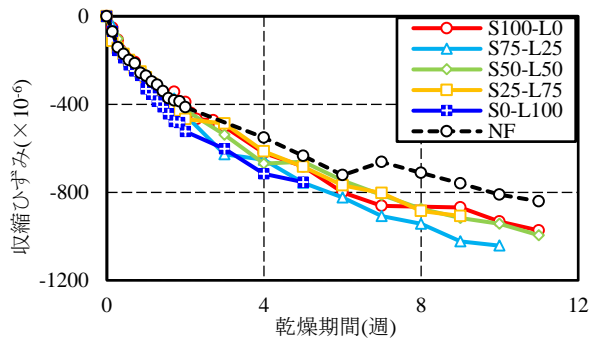


図-4 収縮ひずみの経時変化

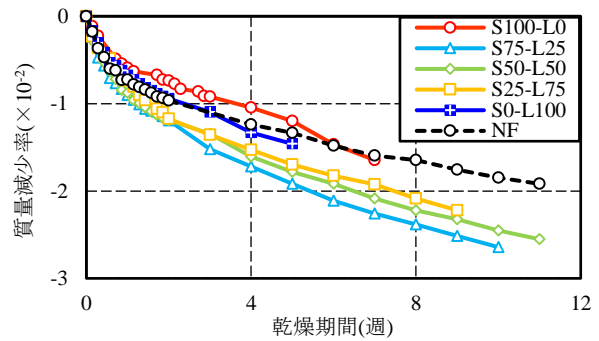


図-5 質量減少率の経時変化

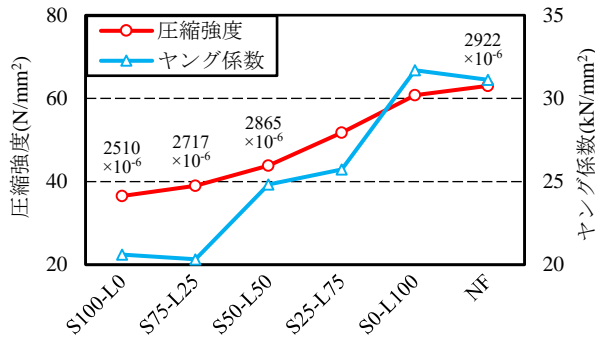


図-6 圧縮試験の結果  
(図中の数値は最大耐力時のひずみ)

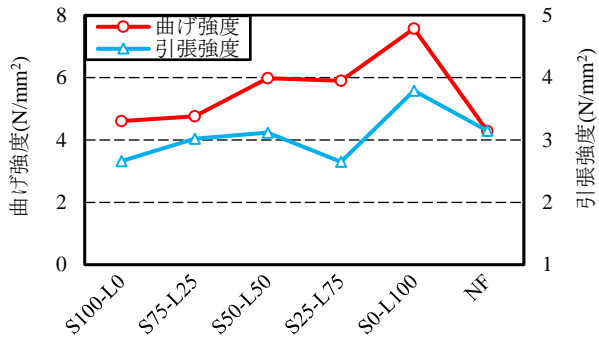


図-7 3等分点曲げ試験・割裂引張試験の結果

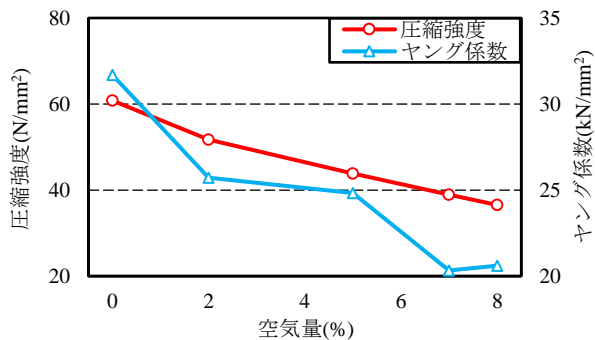


図-8 圧縮強度・ヤング係数と空気量の関係

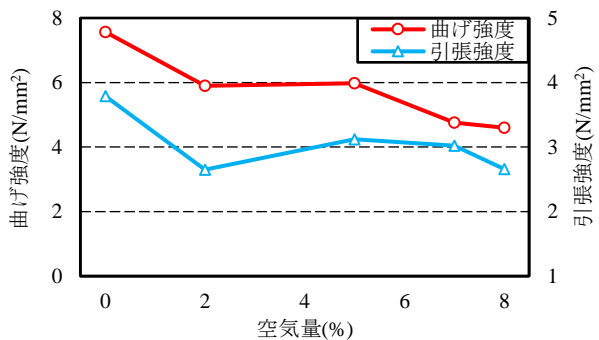


図-9 曲げ強度・引張強度と空気量の関係

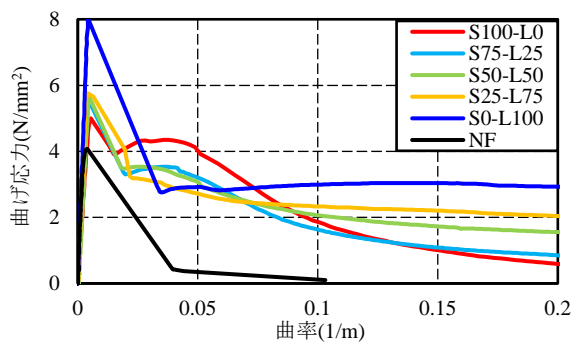


図-10 曲げ応力と曲率の関係

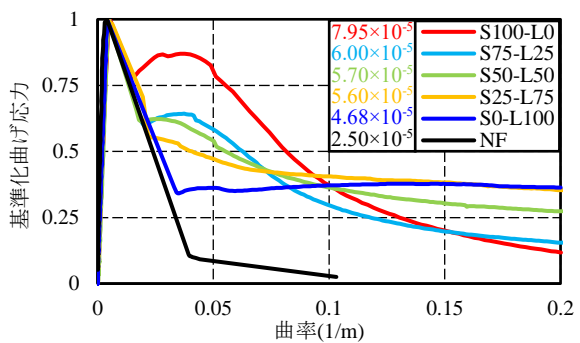


図-11 基準化曲げ応力と曲率の関係

ひずみデータ (一部) を、図-7 に 3 等分点曲げ試験と割裂引張試験の結果を、図-8, 9 には、図-6, 7 に示した各機械的性質を空気量との関係で整理した結果を示す。図-6 から、コンクリートに繊維を添加しない NF と比較して、繊維を添加するにしたがって圧縮強度とヤング係数は低下する傾向にある一方、繊維を合計 1.00 vol.% 添加した場合には、 $F_L$  添加率が大きい場合に、圧縮強度

およびヤング係数の双方が大きくなる傾向であることが確認された。

図-7 に示すように、繊維を添加することによって曲げ強度が向上することが確認され、引張強度については明らかな影響が認められなかった。また、S25-L75 を除き、 $F_L$  添加率が大きくなるとともに曲げ強度と引張強度の両方とも向上する傾向が見られた。一方で、図-8, 9

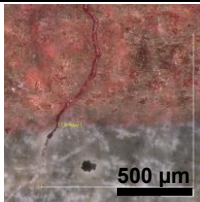
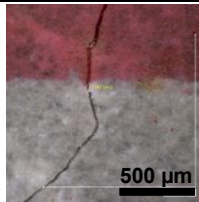
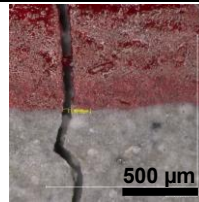
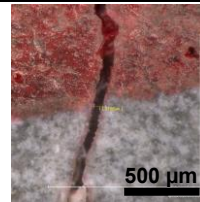
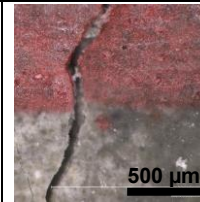
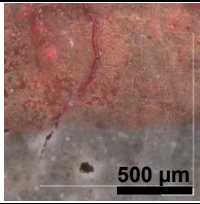
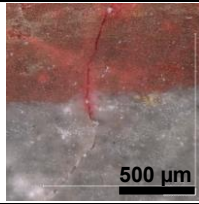
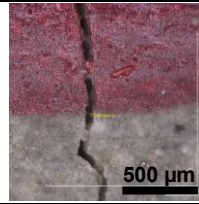
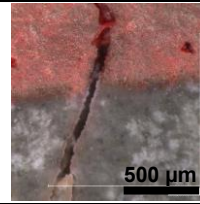
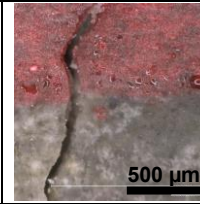
シリーズ	S100-L0	S75-L25	S50-L50	S25-L75	S0-L100
水中浸漬前					
測定値(平均)	25 $\mu\text{m}$	18 $\mu\text{m}$	60 $\mu\text{m}$	58 $\mu\text{m}$	74 $\mu\text{m}$
水中浸漬後					
測定値(平均)	8 $\mu\text{m}$	8 $\mu\text{m}$	45 $\mu\text{m}$	38 $\mu\text{m}$	58 $\mu\text{m}$

図-13 ひび割れの撮影画像

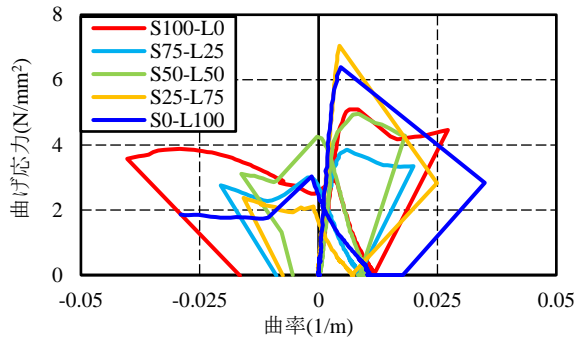


図-12 ひび割れ導入時の曲げ応力と曲率の関係

に示すように、各機械的性質は、空気量と負の相関であることが確認された。これは、 $F_s$ の添加率の増加に伴ってエンラップドエアが増大しているためと考えられる。今後の検討においては、消泡剤や細径繊維の添加のタイミングなどを工夫して、細径繊維の多添加の配(調)合においても、機械的性質が向上できる余地があると推察される。

図-10に、3等分点曲げ試験時の曲げ応力と曲率の関係を示す。図に示されるように、本検討におけるすべての配(調)合ではたわみ硬化は生じなかったものの、繊維の添加により、NFと比較して著しい曲げ靱性の改善が見られた。強度差を考慮して靱性を比較するために、各最大曲げ応力で除して基準化した曲げ応力と曲率の関係を図-11に示す。また、靱性評価指標として本グラフの曲線下面積を曲率0.2(1/m)まで算出した値を併せて示す。図-11に示すように、NFと比較して、繊維を添加した配(調)合では面積値が大きくなり、繊維の添加による靱性の顕著な改善が見られた。特に、 $F_s$ と $F_L$ の比率に着目すると、 $F_s$ の添加率を増大するとともに面積値が大きくなる傾向であった。このことにより、強度を基準化して考えた場合、 $F_L$ に比べて、 $F_s$ は靱性の改善に対してより効果的だと考えられる。

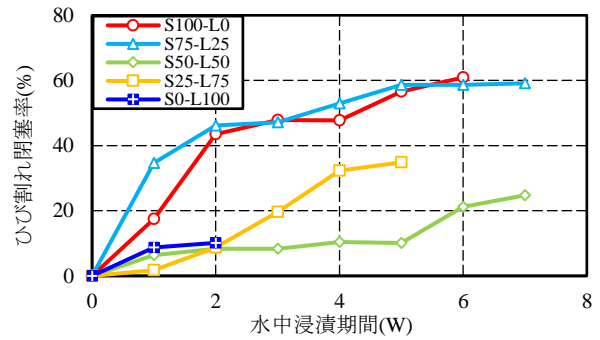


図-14 ひび割れ閉塞率の経時変化

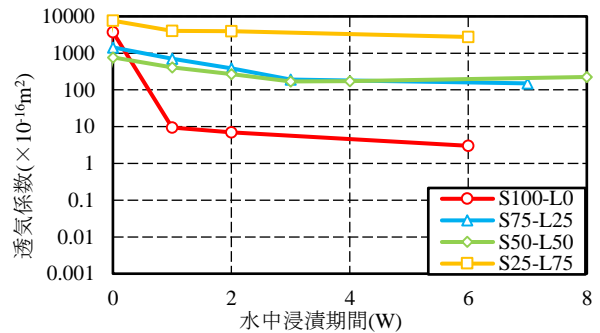


図-15 透気係数の経時変化

### 3.4 自己修復試験

ひび割れは2.5(4)に示す試験手法に従って導入した。ひび割れ導入時の曲げ応力と曲率の関係を図-12に示す。ここで、初回載荷から上下反転させて載荷した際の曲率は負の値として示している。図に示されるように、S0-L100およびS25-L75では、最大曲げ応力後に大きな応力低下が生じてしまい、目標とした最大曲げ応力の80%での制御が困難であった。一方、 $F_s$ を多く添加したS50-L50、S75-L25、S100-L0では、初期ひび割れ発生後の荷重制御が可能であった。

図-13にマイクロスコープで撮影したひび割れの画像を、図-14にひび割れの閉塞率の経時変化を示す。こ

ここで、ひび割れ幅は油性ペンによる目印の上端および下端で測定を行い、これらの平均値として得た。ひび割れの閉塞率は、ひび割れ導入直後（水中浸漬 0 週）のひび割れ幅を基準として算出した。図-13 に示すように、 $F_s$  添加率が比較的高い S100-L0 と S75-L25 については、初期ひび割れ幅がその他の配（調）合より小さい。これは、図-12 にも見られたような、 $F_s$  の多添加によって  $F_L$  との相乗効果により、初期ひび割れ発生後のひび割れの進展が抑制されたためと考えられる。また、S100-L0 と S75-L25 は、水中浸漬 4 週時点でひび割れの明らかな閉塞が確認できる一方で、その他の配（調）合については、図-14 に示すように計測ひび割れ幅には減少傾向が見られるものの、明らかな閉塞は確認できない。すなわち、配（調）合の違いで差はみられるものの、いずれもひび割れの自己修復が進行しつつあり、 $F_s$  を多く添加した S100-L0 と S75-L25 は比較的高いひび割れ閉塞率が確認された。これは、 $F_s$  によってひび割れ自己修復の促進効果が付与されたものと思われる。

また、図-15 に透気係数の経時変化を示す。図-15 から、水中浸漬とともに透気係数が減少する傾向が確認された。透気係数が低いほど FRC 表面がひび割れ導入直前の状態に近く、気密性が高いことを意味するため、図-15 に示したとおり、水中浸漬で導入したひび割れが徐々に閉塞されたことにより、気密性が回復することを確認した。 $F_s$  と  $F_L$  の比率に着目すると、 $F_s$  の添加率が高いほど透気係数の減少が早く、回復がより効率的である傾向が見られた。これは、特にひび割れが微細な場合、比表面積の大きい  $F_s$  を多く添加することにより、自己修復を促進したためと考えられる。これらの結果から、細径 PP 短繊維は微細ひび割れに対して自己修復効果が期待でき、実構造物においても、適切なひび割れ幅の制御を行うことで、同様の効果が得られると考えられる。

#### 4. まとめ

本検討では、2 種類の径の PP 短繊維を合計 1.00 vol.% 添加した FRC を対象に、異なる繊維の添加率の組み合わせでの各種材料特性、および、自己修復効果を取得し、考察を行った。以下に得られた知見を示す。

- 1) 本実験の範囲では、PP 短繊維の添加による乾燥収縮の低減効果は確認できなかった。
- 2) PP 短繊維を添加することにより、圧縮強度が低下する一方、曲げ強度が向上することが確認された。
- 3) 繊維を合計 1.00 vol.% 添加した場合、細径 PP 短繊維を多く添加することで初期ひび割れ発生後の急激な応力低下を抑制し、曲げ靱性が改善されることを確認した。
- 4) 細径 PP 短繊維添加量の増加とともに、過大な空気

量に起因する力学特性が低下した一方、微細ひび割れ領域における自己修復を促進させることができる。

#### 謝辞

本検討は日本コンクリート工学会・2016 年研究助成、および、JSPS 科研費基盤研究 B・17H03337（研究代表者：西脇智哉）の一部として実施されたものである。ここに記して謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) 松尾庄二, 川又篤, 西脇敬一: 高靱性セメント複合材料の断面修復への適用に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 27, No. 1, pp. 307-312, 2005
- 2) 六郷恵哲: 高性能な繊維補強コンクリートの開発と将来展望, コンクリート工学特集/高機能・高性能化する繊維補強コンクリート/1. 総論, Vol. 50, No. 5, 2012.05
- 3) 国府田まりな, 三橋博三, 西脇智哉, 菊田貴恒: 合成繊維を用いた FRCC のひび割れ自己修復に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 76, No. 667, pp. 1547-1552, 2011.09
- 4) 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, 2002
- 5) 平石剛紀, 坂田昇, 林大介, 山村正人: 剥落防止を目的とした有機系繊維補強コンクリートに関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 23, No. 1, pp. 469-474, 2001
- 6) 細田暁, 高梨大介, 高木亮一, 我彦聡志: 少量の合成短繊維による収縮ひび割れの抑制機構, コンクリート工学年次論文集, Vol. 28, No. 1, pp. 299-304, 2006
- 7) 李豪傑, 西脇智哉, 佐藤駿介, 菊田貴恒: 細径 PP 繊維を多混入した繊維補強コンクリートの製作方法に関する検討, 日本建築学会東北支部研究報告集, Vol. 81, pp. 145-148, 2018.6
- 8) Rossi, P.: Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete (HPFRCC) – an overview, Fiber-Reinforced Concrete (FRC) BEFIB'2000, RILEM, pp. 87-100, 2000
- 9) 日本建築学会: 建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事, 2018
- 10) JCI-S-003-2007, 繊維補強セメント複合材料の曲げモーメントー曲率曲線試験方法, 2007
- 11) Torrent, R: A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air the concrete cover on site, Materials and Structures, Vol. 25, pp. 358-365, 1992
- 12) 大坂進太郎, 権代由範, 西脇智哉: 高強度高靱性セメント系複合材料の耐凍害性に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 39, No. 1, pp. 205-210, 2017