

# 論文 種類・形状の異なる繊維を用いた繊維補強セメント系複合材料のひび割れ自己治癒性状に関する研究

山田 洵<sup>\*1</sup>・国府田 まりな<sup>\*2</sup>・西脇 智哉<sup>\*3</sup>・三橋 博三<sup>\*4</sup>

**要旨**：既往の研究より、極性を持つ PVA 繊維を用いた繊維補強セメント系複合材料（以下 FRCC）では、極性を持たない PE 繊維よりもひび割れ自己治癒性状に良好な結果を示すことが確認されているなど、FRCC のひび割れ自己治癒性状には繊維種類が影響を与えているものと考えられる。そこで、本研究では FRCC のひび割れ自己治癒に最適な繊維の選定を目的とし、引張載荷試験、透水試験、マイクロスコープ観察により様々な補強繊維を用いた FRCC の自己治癒性状を比較した。その結果、PVA 繊維が最も良好なひび割れ自己治癒性状を示し、自己治癒の評価の際に、力学的特性、ひび割れ内部の粗さが影響を与えることを明らかにした。

**キーワード**：FRCC、ひび割れ、自己治癒、引張載荷試験、透水試験、マイクロスコープ観察

## 1. はじめに

セメント系材料は、圧縮強度・耐火性・耐久性に優れ、型枠によって自由な寸法・形状に加工できる。加えて、比較的安価で大量に得られることから経済性に優れ、今日世界中の構造物に用いられる材料である。しかし一方で、引張強度が低く脆性破壊を示す上に、時間の経過に伴って様々な原因からひび割れが生じる。このひび割れは、美観を損なうだけでなく、ひび割れ部分からの漏水や内部鉄筋の腐食による断面減少と構造耐力の低下といった建物自体の安全性を脅かす深刻な問題に繋がる。このことから、有害なひび割れは極力抑える必要があり、これらへの配慮が近年はより強く求められている。

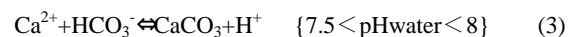
また、コンクリートには水分供給を受ける環境下において、ひび割れ部分が自然に閉塞する自己治癒現象が確認されている<sup>1)</sup>。加えて、著者らはこれまで、普通コンクリートに見られるひび割れ自己治癒は、ひび割れ幅が 0.1mm 以下でのみ期待できるとされていた<sup>2)</sup>が、脆性破壊の抑制と微細なひび割れを分散して発生させることのできる繊維補強セメント系複合材料（Fiber Reinforced Cementitious Composites, 以降 FRCC と呼ぶ）を用いることで促進できること、繊維種類が自己治癒性状に影響を与えることを明らかにしてきた<sup>3) 4)</sup>。

そこで、本研究では自己治癒に最適化した繊維の選定を目的とし、形状・種類の異なる合成繊維を用いた FRCC のひび割れ自己治癒性状の比較を、透水試験、マイクロスコープ観察、破断面の観察によって評価する。

## 2. ひび割れ自己治癒のメカニズム<sup>2)</sup>

自己治癒現象の発生原因として、セメントペースト

の膨張や水和、ひび割れ表面から剥がれ落ちたコンクリート破片による水の流れ道の封鎖などが挙げられるが、中でも最も影響があるのは炭酸カルシウム結晶の一形態であるカルサイトの付着であると言われている。これは大気中から水に溶け込んだ  $\text{CO}_3^{2-}$  とコンクリート中の  $\text{Ca}^{2+}$  とが反応し、 $\text{CaCO}_3$  結晶を析出することで起こる。付着すると水中の  $\text{Ca}^{2+}$  の不足を補うかのようにして、コンクリート内部からさらに流出し  $\text{CO}_3^{2-}$  と結合する。このような反応が繰り返し行われ  $\text{CaCO}_3$  が生成され、ひび割れ部分に付着し治癒してゆく。以下に、ひび割れを流れる水中でのカルサイトの結晶の反応式 (1) ~ (3) を示す。



## 3. 実験概要

マイクロスコープ画像から得られるひび割れ情報と、透水試験により得られる透水係数、引張載荷試験による力学的特性から、自己治癒性能を評価・検討するため、以下の実験を行った。

### 3.1 使用材料および繊維特性

本実験で使用したモルタルの調査を表-1 に示す。セメントは早強ポルトランドセメント（密度  $3.14\text{g/cm}^3$ 、比表面積  $4450\text{cm}^2/\text{g}$ ）、細骨材は珪砂 5 号（密度  $2.61\text{g/cm}^3$ 、平均粒径  $180\mu\text{m}$ ）、混和材料はシリカフェーム（密度  $2.2\text{g/cm}^3$ 、平均粒径  $0.15\mu\text{m}$ ）と高性能 AE 減水剤（密度  $1.05\text{g/cm}^3$ 、主成分ポリカルボン酸エーテル系化合物）を用いた。繊維はポリビニルアルコール（繊維径：

\*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 (学生会員)

\*2 株式会社竹中工務店 (元・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)

\*3 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)

\*4 東北大学 名誉教授・工博 (正会員)

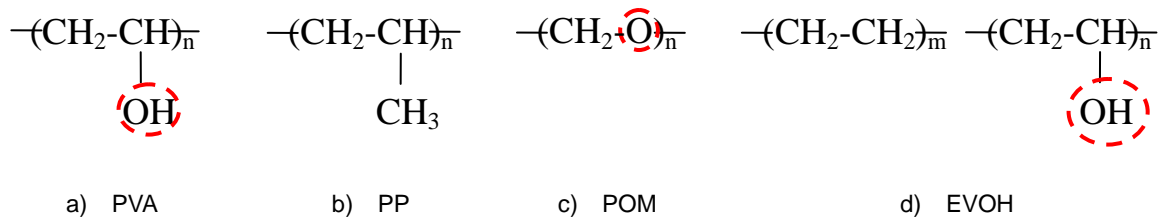


図-1 各シリーズの構造式

0.034mm, 繊維長: 6mm, 以降 PVA), ポリプロピレン (繊維径: 0.011mm, 繊維長: 6mm, 以降 PP) および異形断面としたポリプロピレン (繊維径: 0.018mm, 繊維長: 6mm, 以降 D-PP), ポリアセタール (繊維径: 0.048mm, 繊維長: 10mm, 以降 POM), エチレンビニルアルコール共重合体 (繊維径: 0.015mm, 繊維長: 5mm, 以降 EVOH) を用いた。また, これらの繊維種類はいずれも表面処理を行っていない紡績されたモノフィラメント糸であるため, 各種繊維の極性の強さは, 分子構造式から推測することができる。極性とは, 二原子間の電荷分布の偏りであり, 原子が電子を引き付ける強さを表す電気陰性度が影響する。図-1 に各種繊維の分子構造式を示す。図中の破線(赤)に示した様に PVA, POM, EVOH はそれぞれ OH 基, O 基, OH 基を持っている。負極性を帯びた原子が存在するとカルシウムイオンを引き付け, 炭酸カルシウムのテンプレートとなること<sup>5)</sup>から, 炭酸カルシウムの生成にはこれら極性が起因する可能性があると考えられる。また, 極性にも大小関係があり, O 基を持つ POM シリーズよりも OH 基を持つ PVA シリーズの方が, より多くの炭酸カルシウムの析出が期待できる。また, EVOH シリーズについてもエチレンとビニルアルコールからなる構造式であるため, PVA より小さいものの極性を有し, 炭酸カルシウムの積極的な析出が予想される。加えて, D-PP シリーズについては, 繊維を異形にすることにより, 表面積が大きくなるので親水性が向上し, PP シリーズに比べ多くの炭酸カルシウムの付着が期待できる。

### 3.2 試験体概要

3.1 に示した材料, 繊維を用いた試験体 (以降, PVA シリーズ, PP シリーズ, D-PP シリーズ, POM シリーズ, EVOH シリーズと呼ぶ) を表-1 に示す調合表に基づき各シリーズ 3 体ずつ作製した。また, 試験体は 85×85×25mm の直方体形状であり, 図-2 に示すように, 試験体には 4 本のネジ鉄筋 (M6) を埋設した<sup>6)</sup>。打設後 7 日間, 20℃の養生槽内で水中養生した (以降第一養生と呼ぶ)。

### 3.3 引張試験

第一養生の後, 試験体のねじ鉄筋を通じて万能試験機を用いた引張載荷試験 (以降, 第一載荷試験と呼ぶ) を

表-1 調合表

W/B	S/B	SF/B	SP/B	Fiber(Vol.%)
45	45	15	0.9	2.0

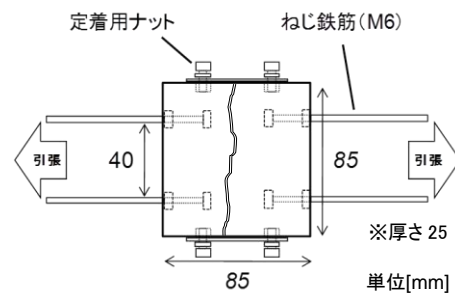


図-2 試験体形状

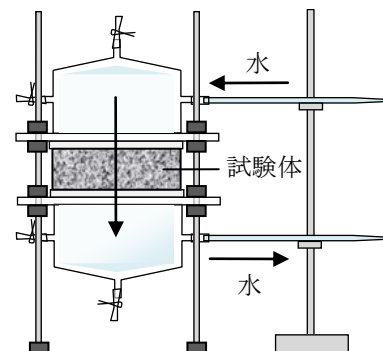


図-3 小型透水試験機

行った。普通コンクリートでも 0.1mm 程度は自己治癒し, その一方で過大なひび割れ幅では試験体のコントロールが困難となることから, 導入するひび割れ幅は 0.3mm 程度とした。ひび割れ導入後, 試験体の両側を金属プレートで固定し, ひび割れ幅を保持した。第一載荷試験後は, 再度 20℃の水中で 4 週間の水中養生を行った (以降第二養生と呼ぶ)。また, 第二養生を終えた後, 再び引張載荷試験 (以降, 第二載荷試験と呼ぶ) を行い完全に破断させ, 自己治癒が力学的特性に与える影響を調べた。

### 3.4 マイクロスコブ観察

自己治癒の進展を確認するためにマイクロスコブを用いて, 自己治癒物質の付着状況を観察した。ひび割れ導入の直後に, 試験体に生じたひび割れの全体をマイクロスコブで観察・撮影し, 最大ひび割れ幅の計測を行

った。第二養生 3, 14, 28 日目にもそれぞれ同様の観察を行い、ひび割れ表面部分への自己治癒物質の付着状況を観察した。また、第二載荷試験後の試験体破断面を観察し、ひび割れ内部の自己治癒物質の付着状況を確認した。

### 3.5 透水試験

自己治癒に伴う水密性能の回復を確認するため透水試験を行った。従来の JISA6909 に基づく手法(建築用仕上げ塗材に用いる試験法)ではひび割れがメスピペット範囲外に拡散し、また水頭差が経時変化に伴って減少するため透水係数の算出にばらつきが生じることがあった。そこで、新たに岸本らが考案<sup>6)</sup>し改良を加えた小型透水試験機(図-3)を用いて試験体を常時浸漬した状態で試験を行い、上部ピペットにて計測される単位水量の損失時間から透水係数を算出した。1 回目の透水試験は第一載荷試験の直後に行った。その後、第二養生 3, 14, 28 日目にも透水試験を行い透水係数の変化を調べ、水密性能の評価に用いた。

### 3.6 破断面観察

第二引張試験時に試験体を破断させ、その破断面をマイクロSCOPEで観察することで、ひび割れ内部の自己治癒物質の析出状況を確認した。加えて、3D 計測ソフトによる破断面の凹凸を計測し、破断面の表面粗さを確認した。

## 4. 実験結果と考察

### 4.1 第一載荷試験

図-4 に各シリーズの引張試験により得られた結果を示す。各シリーズにおいて最大引張強度は 2~3MPa と

なった。また、PVA シリーズ、PP シリーズ、D-PP シリーズについては引張強度到達後も靱性的な挙動を示した。特に、PVA シリーズにおいては除荷時までひずみ硬化が続いた。一方で、POM シリーズ、EVOH シリーズについてはセメントとの付着が弱く、引張強度到達後に繊維が引き抜けて試験体が破断した。そのため、引張強度到達後の応力負担が 0 となりポストピークは直線となった。このことから、PVA シリーズは他のシリーズに

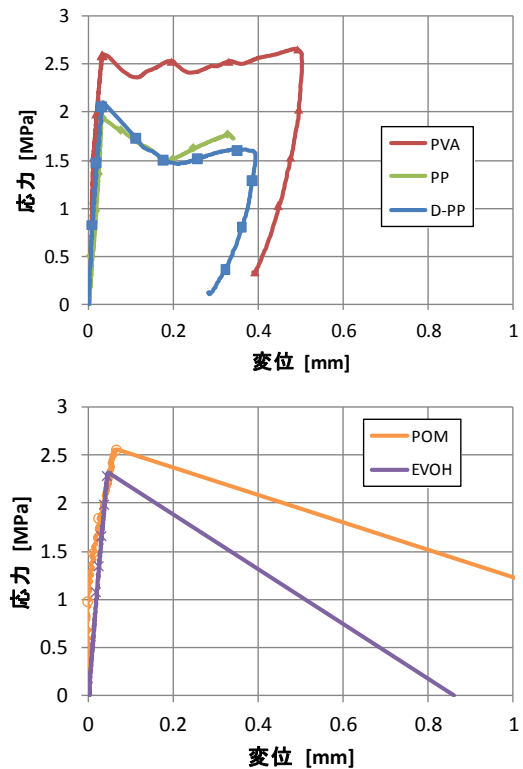


図-4 第一載荷試験時の応力と変位の関係

		繊維名(最大ひび割れ幅)				
		PVA (225 $\mu$ m)	PP(250 $\mu$ m)	D-PP (301 $\mu$ m)	POM (367 $\mu$ m)	EVOH(399 $\mu$ m)
経過 日数 (日)	0					
	3					
	14					
	28					

図-5 ひび割れ自己治癒の経時変化

比べセメントペーストとの付着が良く、力学的特性に優れた繊維であり、POM シリーズ、EVOH シリーズは付着に乏しい繊維と考えられる。

#### 4.2 マイクロスコープ観察

図-5 にマイクロスコープ観察より得た第二養生期間の各材齢におけるシリーズごとの試験体表面部分のひび割れ画像を示す。ここでは各シリーズの中からひび割れ幅の最も大きい試験体のひび割れ部分の画像を示した。ひび割れ導入直後は、ひび割れが明瞭であったが、第二養生によってひび割れ部分に自己治癒物質の付着が確認できた。また、シリーズによって経時変化に伴うひび割れ表面への自己治癒物質の付着量が異なることが分かった。第一載荷試験時に靱性的な挙動を示した PVA シリーズ、PP シリーズ、D-PP シリーズについて、ひび割れ中に繊維架橋が多く見られ、その繊維架橋を中心に自己治癒物質の析出が確認できた。また、PVA シリーズ、D-PP シリーズは、それぞれ 3 日目、14 日目にひび割れ部分を概ね閉塞させることが確認された。一方で、PP シリーズについては、繊維架橋への自己治癒物質の析出が確認できたものの、28 日目においてもひび割れ部分は閉塞しなかった。また、第一載荷試験時に繊維が引き抜けて破断した POM シリーズ、EVOH シリーズについては、繊維架橋はほとんど確認できなかったものの、14 日目時点で自己治癒物質の析出によりひび割れ部分が概ね閉塞したことが確認できた。これは、3.1 で述べた通り PVA シリーズ、POM シリーズ、EVOH シリーズは極性を持つ為、カルシウムイオンを積極的に引き付け炭酸カルシウムの析出が促進されたからと考えられる。また、D-PP シリーズについても、断面を異形にすることにより親水性が向上したことで、図-6 に示す様に繊維 1 本あたりの炭酸カルシウムの付着量が PP シリーズよりも増大したからだと考えられる。このことから、極性の大きな繊維や異形にした繊維を用いることで自己治癒物質の析出量を促進することができると言える。

#### 4.3 透水試験

図-7 に第二養生の日数と透水係数の関係を示す。透水係数はダルシーの法則で定義される水の流れやすさを示す値で、数値の減少は水密性能の向上を表す。透水係数は各シリーズの試験体 3 体の平均値とした。透水試験の結果、PVA シリーズ、D-PP シリーズ、POM シリーズについては、経時変化に伴う透水係数の減少が確認された。しかし、PP シリーズ、EVOH シリーズについては、経時変化に伴う透水係数の減少は明確には見られなかった。また、図-8 に各シリーズの 0 日目の透水係数を 1 とした場合の 3、14、28 日目における平均透水係数減少割合を示す。その結果、透水係数の減少割合は PVA シリーズ、D-PP シリーズ、POM シリーズ、EVOH シリ

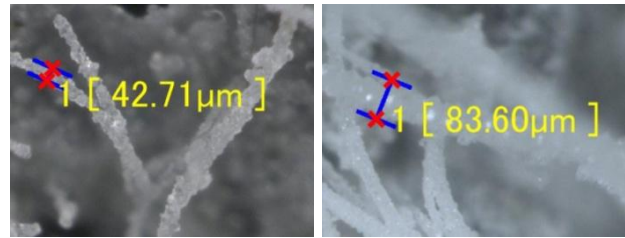


図-6 断面形状による自己治癒物質の付着状況の差の例

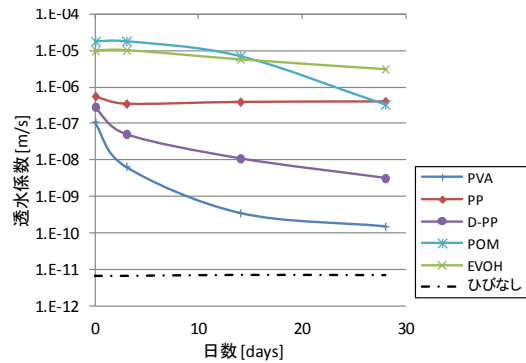


図-7 第二養生における透水係数の変化

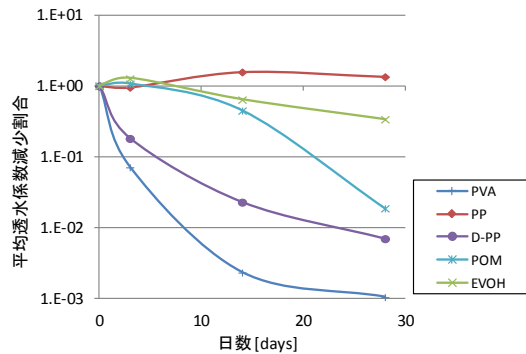


図-8 平均透水係数減少割合

ーズ、PP シリーズの順で大きいことが分かった。しかし、EVOH シリーズについては、図-5 に示した様にひび割れ表面をほぼ閉塞させる程の自己治癒物質が付着したにも関わらず、PP シリーズ同様に透水係数に明瞭な減少はみられなかった。このことから、水密性能に関しては自己治癒物質の付着によるひび割れ表面の閉塞状況だけでは、向上の有無を評価することは難しいと言える。

#### 4.4 第二載荷試験

第二養生 28 日目以降に第二載荷試験を行うことで、自己治癒による力学的特性への影響について検討した。一例として PVA シリーズと POM シリーズの第二載荷試験結果、さらに強度比をそれぞれ図-9 と表-2 に示した。強度比は第一載荷試験時の最大引張強度に対する第二載荷試験時の最大引張強度の比として定義した。表-2 から、PVA シリーズでは第二養生によって強度比が 1 を超え、第一載荷試験よりも引張強度が大きくなったことが

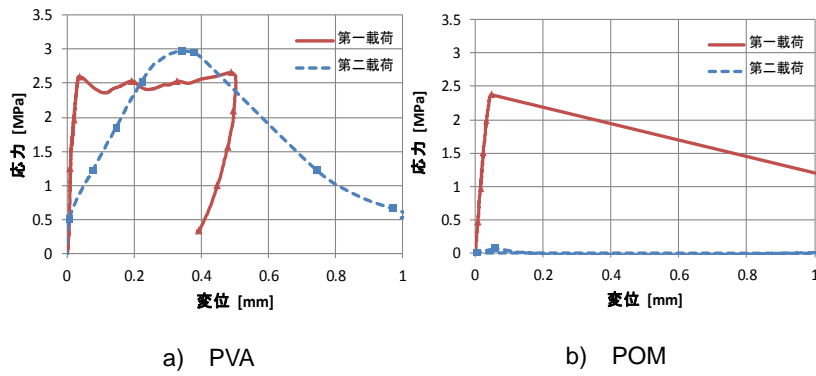


図-9 第二載荷試験の応力と変位の関係

表-2 各シリーズの強度比

	1	2	3
PVA	1.19	1.12	1.20
PP	—	0.93	0.88
D-PP	0.87	0.94	0.96
POM	—	0.12	0.14
EVOH	0.03	—	0.02

確認できる。この理由として、PVA シリーズは繊維自体が破断する程にセメントペーストとの付着が良く、図-9a)に示す様に第一載荷試験において初期ひび割れから除荷時まで顕著な強度低下が起こらなかったこと、第二養生によって繊維とマトリクスの界面における結合強度が増大し、最大引張強度が増大したからと考えられる。このことから、力学的特性に影響を与えるのは自己治癒物質の析出ではなく、水和反応の進展と考えられる。また、PVA シリーズは微細ひび割れを発生させ繊維架橋を保持させると言う点で、他のシリーズよりも自己治癒に適した力学的特性を持つ繊維であると言える。また、D-PP シリーズと PP シリーズは第一載荷試験の最大引張強度を超えないまでも、近似する値を示した。この理由として、PVA シリーズ同様に繊維が架橋した両者を比較した際、強度回復に明瞭な差が出なかったことから、繊維形状が力学的特性に与える影響は小さいと考える。一方、POM シリーズ、EVOH シリーズは第一載荷試験で試験体が破断し繊維架橋がほとんどなかった為、マイクロスコブ観察でひび割れ表面を閉塞させる程の自己治癒物質の析出がみられたものの、強度回復はしなかった。このことから、繊維架橋のない破断面における炭酸カルシウムの接着性は低いと言える。

#### 4.5 破断面観察

上述の引張試験と透水試験の結果から、POM シリーズ、EVOH シリーズのように表面に自己治癒物質の付着がありながら水密性能の回復が行われなかった理由として、破断面の形状の違いが考えられる。ここでは、第二載荷試験で破断させた各シリーズの試験体の破断面を、マイクロスコブを用いて図-10 に示すような内部（実線部）と縁部（破線部）に分けて観察した。一例として、PVA シリーズと POM シリーズにおける自己治癒物質の付着状況を図-11 に示す。第一載荷試験の際に導入したひび割れが大きくなり破断に至るため、第二養生期間における自己治癒物質の付着状況を明瞭に確認することができた。その結果、図-11 中の赤斜線で示したように、

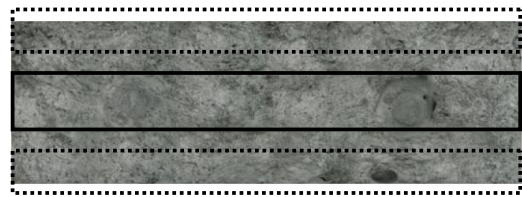
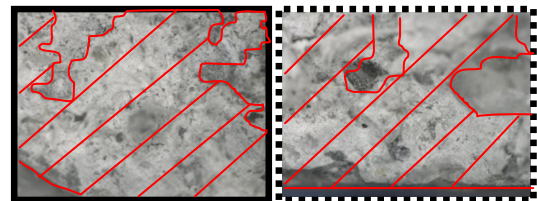
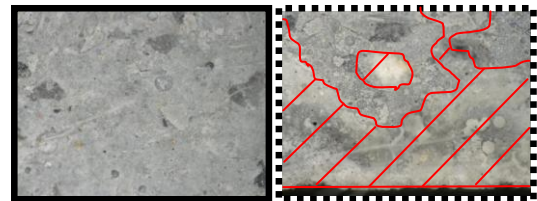


図-10 破断面観察箇所（実線：内部 破線：縁部）



a) PVA



b) POM

図-11 破断面での自己治癒物質の付着状況の例

両シリーズにおいて破断面の縁部で自己治癒物質の付着が確認できた。また、PVA シリーズは、破断面内部においても自己治癒物質が全体的に付着しており、内部まで自己治癒が進展していることが確認できた。このことから、PVA シリーズは自己治癒現象に適した繊維であると言える。一方、POM シリーズについて、内部における自己治癒物質の付着はほとんどみられなかった。また、3D 計測ソフトを用いた破断面の凹凸計測を行った。ここでは、図-12 に示すようにねじ鉄筋の影響の少ない 25×35mm の範囲で試験体の短辺方向に向かって 5 か所計測を行った。計測結果を図-13 に示す。その結果、第一載荷試験において靱性的な挙動を示した PVA シリーズでは複雑な凹凸性状となった一方で、脆性破壊を起こし破断した POM シリーズは平滑な凹凸性状となった。この理由として、第一載荷試験で靱性的な挙動を示したシリ

ーズは生じた複数のひび割れの間には微細ひび割れやさらなるひび割れ分岐を持つ傾向があると考えられる。また、このような複雑で不連続なひび割れの先端にある破壊進行領域において自己治癒現象が生じた為、図-11で示した様に PVA シリーズは破断面内部に自己治癒物質が付着したと考えられる。以上の事から、破断面の凹凸性状が複雑な程内部での自己治癒が進展し結果的に透水係数が減少すると言える。また、ひび割れ表面の自己治癒物質の析出量だけでなく、引張載荷試験における力学的特性、破断面の凹凸性状を含めた評価により自己治癒に適した繊維を選定する必要がある。

## 5. まとめ

本研究では自己治癒に最適な繊維の選定を目的とし、形状・種類の異なる合成繊維を用いた FRCC のひび割れ自己治癒性状の比較を、透水係数、ひび割れ表面および内部における自己治癒物質の析出状況、力学的特性によって評価した。以下に、本研究で得られた知見を示す。

- 1) 極性や異形断面を有する繊維を用いる事で、FRCC のひび割れ自己治癒の促進を確認した。
- 2) 特に、PVA シリーズでは表面だけでなく内部においても良好な自己治癒性状を示し、力学的特性の回復もみられた。
- 3) ひび割れ表面の自己治癒物質の析出量と透水係数に加えて、新たにひび割れ内部の粗さ、引張載荷試験時の力学的特性から自己治癒を評価できる事が分かった。

本研究の知見を踏まえて、今後は自己治癒物質の成分の特定や析出メカニズムの解明に取り組む必要がある。さらに、各種繊維のハイブリッド化やフライアッシュなどの混和材料を用いた調査設計についても検討を行う。

## 謝辞

本研究は、日本学術振興会科学研究費(若手研究(A)、課題番号：23686078、研究代表者：西脇智哉)の一部として実施された。ここに記して謝意を表す。

## 参考文献

- 1) Neville, A.M. : Properties of Concrete, Person Education Limited, p.328, 1995
- 2) Edvardsen, C. : Water Permeability and Autogenous Healing of Cracks in Concrete, ACI Materials Journal,

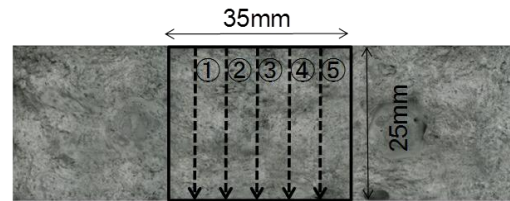
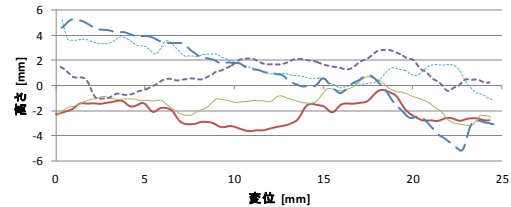
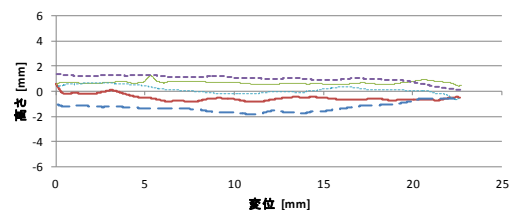


図-12 破断面計測箇所



a) PVA



b) POM

図-13 破断面の凹凸性状

Vol.96, No.96-M56, pp.448-454, 1999

- 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, 2011.9
- 4) Homma, D. , Mihashi, H. , and Nishiwaki, T. : Self - Healing Capability of Fiber Reinforced Cementitious Composites , Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.7, No.2, pp.1-12, 2009
- 5) 加藤隆史, 西村達也, 坂本健 : バイオミネラリゼーションにならう無機/有機ハイブリッド薄膜の構築, 日本結晶成長学会誌, Vol.35, No3, 2008
- 6) Yoshihiko. Kishimoto, Shuichi. Hokoi, Kazunori. Harada, and Satoru. Takada : The Effect of Vertical Distribution of Water Permeability on the Modeled Neutralization Process in Concrete Walls, Journal of ASTM International, Vol.4 No.1, 2007