

# 論文 各種要因がポリプロピレン短繊維混入モルタルのひび割れ自己治癒性能に与える影響

小澤 勇斗\*1・武田 宇浦\*2・山本 基由\*3・石井 晃太郎\*4

**要旨:** 本研究は、PP 短繊維を混入し、ひび割れを導入したセメントモルタルにおいて、セメントの種類や材齢、PP 短繊維混入率、自己治癒環境、供試体の大きさなど様々な要因が自己治癒効果に与える影響の考察を目的として実施した。その結果、PP 短繊維の混入率が上がるほど、初期の漏水量が減少する傾向にあり、特に 0.33%の際には自己治癒環境設置期間の経過に伴ってひび割れの閉塞が顕著に見られた。材齢 3 年の長期材齢の供試体においてもひび割れの閉塞が見られたことから、コンクリートの自己治癒効果は長期材齢でも期待できる。

**キーワード:** 自己治癒コンクリート、細径異形ポリプロピレン短繊維、ひび割れ閉塞率、SEM-EDX

## 1. はじめに

コンクリートなどのセメント系建設材料は、昨今様々な場面で利用されており、我々の生活に欠かせないものとなっている。しかし、2000 年以降、建設後 50 年経過するコンクリート構造物は急激に増大することが予想されていることや、若年層の人口減少による建設技術者数の減少により、計画的な維持管理が求められる<sup>1)</sup>。

近年、維持管理コストの低減のための試みとして、コンクリート構造物に自己修復機構を持たせる動きが始まった。このような自己修復コンクリートの 1 つに、コンクリートが持つ自己治癒効果を促進させる自己治癒コンクリートがある。コンクリートにおける自己治癒とは水分などが供給される環境において、ひび割れが自然に閉塞する現象を指している。コンクリートのひび割れそのものは構造物耐力には影響しないものの、補強に使用されている鉄筋の腐食を引き起こすことから、コンクリートの耐久性に大きな影響を及ぼす。そのため、コンクリートに発生するひび割れはメンテナンスの重要な項目の 1 つとされている。

自己治癒コンクリートの一つに短繊維を用いた自己治癒コンクリートがある。繊維補強されたコンクリートの自己治癒効果については様々な研究がなされており<sup>2)3)4)</sup>、コンクリート内に含まれる繊維によって、ひび割れ幅が抑制されることや、早期に自己治癒効果が見られること、自己治癒環境の違いによる自己治癒性能の差異など様々なことが明らかになっている。しかし、これらの研究は既存の繊維補強材料を用いており、自己治癒性能の付与に特化したものではない。本研究で用いる短繊維は十字異形断面を有しており、析出物が吸着しやすいという特

徴を持っている。これにより発生した析出物が流出することを防ぎ、より高い自己治癒効果をもたらすことに期待できる。**写真-1**に短繊維の断面を示す。

本研究では、細径異形ポリプロピレン短繊維(以降、PP 短繊維とする)を混入したモルタルに導入したひび割れの自己治癒過程を観測し、供試体の設置環境、使用セメント、PP 短繊維混入率、材齢、ひび割れ幅、供試体の大きさなどの各要素が自己治癒に与える影響を考察した。また、ひび割れ間の析出物の析出過程や成分を、走査型電子顕微鏡(以降 SEM とする)、エネルギー分散型 X 線分光法(以降 EDX とする)による分析などで観察した。

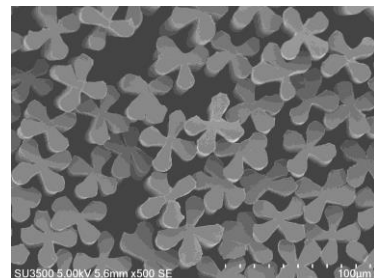


写真-1 短繊維の断面

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料

#### (1) 使用材料

本研究で用いた材料を表-1 に示す。セメントには普通ポルトランドセメント(N)、高炉セメント(BB)の 2 種類、細骨材には海砂を使用した。PP 短繊維は、細径異形ポリプロピレン短繊維であり、**写真-1**に示す断面を持つ繊維である。繊維の水分率は、乾燥質量に補正し用いた。

\*1 明石工業高等専門学校 建築・都市システム工学専攻 (学生会員)

\*2 明石工業高等専門学校 都市システム工学科 准教授 博士(工学) (正会員)

\*3 大和紡績株式会社 合繊事業本部 博士(工学) (正会員)

\*4 大和紡績株式会社 技術・開発本部 播磨研究所 (非会員)

表-1 使用材料

材料 (略号)	物性
セメント (C)	普通ポルトランドセメント, 密度: 3.16g/cm <sup>3</sup> 高炉セメント B 種, 密度: 3.04g/cm <sup>3</sup>
細骨材 (S)	海砂, 表乾密度: 2.56g/cm <sup>3</sup>
短繊維 (Fb)	細径異形ポリプロピレン短繊維, 密度: 0.91g/cm <sup>3</sup> 水分率: 53.8%, 繊度: 5.4dtex (円換算直径: 26 μm) 繊維長: 15mm

表-2 モルタルの配合

配合名	W/C (%)	繊維混入率 (Vol.%)	C : S	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						
				N			BB			Fb*
				C	W	S	C	W	S	
0%	50	0	1 : 3	513	257	1540	510	255	1530	0
0.2%		0.2								1.82
0.33%		0.33								3.00

\*乾燥繊維量を表記

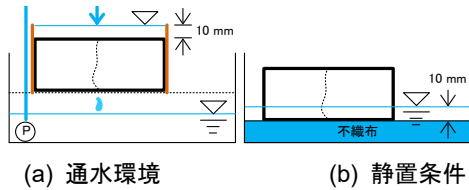


図-1 自己治癒環境条件(厚さ 40mm 供試体)

(2) 配合条件および練混ぜ方法

本研究では、セメント：細骨材を 1：3、水セメント比を 50%とした。また、PP 短繊維混入率は、モルタル容積に対して、0、0.2、0.33%とした。配合を表-2 に示す。

モルタルの練混ぜには、容量 20L のモルタル用ミキサーを使用した。モルタルの練混ぜ手順は、次の通りとした。まず、セメント、細骨材、PP 短繊維を練鉢に入れ、60 秒間低速回転で空練りを行い、PP 短繊維を十分に分散させる。その後、15 秒間かけて水を投入後、高速回転に切り替え、30 秒間練混ぜを行う。ミキサーを 30 秒間停止し、その間にさじでかき落としを行った後、再度高速で 60 秒間練混ぜを行う。練混ぜ終了後、練り鉢を機械から取り外し、さじで 10 回かき混ぜる。

練上がったフレッシュモルタルは、φ100×200mm の円柱型枠に 2 層詰めで打込んだ。また、SEM-EDX 観察用の供試体として、φ50×100mm の円柱型枠に高さ 10mm で打込み φ50×10mm にしたもの(以下 SEM-EDX 観察用供試体とする)を作製した。締固めにはテーブルバイプレーターを用い、φ100×200mm の円柱型枠は 1 層目の打込み後 30 秒間の振動締固め、2 層目を打込み後さらに 90 秒間の振動締固めを行い、SEM-EDX 観察用供試体は打

込み後 30 秒振動締固めを行った。打込み面は、成形後ラップで覆い、所定材齢まで恒温恒湿室(温度 20±2℃, 相対湿度 60±5%)で封緘養生を行った。

2.2 試験方法

2.2.1 自己治癒評価試験

(1) 供試体概要

φ100×200mm の円柱モルタルは材齢が 28, 91 日、3 年に達した後コンクリートカッターを用いて切断し、厚さ 40mm の円盤を切出した。この供試体を自己治癒評価用供試体とする。その後、円盤の側面にテープを巻き、万能試験機(容量 200kN)で割裂引張試験の要領で載荷し円盤中央部に直径方向にひび割れを導入した。ひび割れ導入後、側面のテープを上部側に 10mm 出るように巻き直し、上下面 3 か所ずつ、合計 6 か所のひび割れ幅をクラックスケールで測定し、その平均値から有効ひび割れ幅(以降、ひび割れ幅 w とする)を求めた。

(2) 自己治癒環境条件

自己治癒環境条件は、図-1 に示す 2 条件とした。1 つ目の条件は、水を循環させる装置を作製し、供試体上面に 10mm 湛水した状態を保つことで常に一定流量の水を流し続ける環境条件(以降、通水とする)である(図-1(a))。これは、実環境下における降雨などによる供試体上面(表面)から下面(内部)にかけての通水を模擬している。2 つ目の条件は、不織布の上に置いた供試体下部を 10mm 浸水した状態で静置する環境条件(以降、静置とする)である(図-1(b))。これは、実環境下における裏込め土など供試体下面からの水分(湿度)の供給を

模擬している。また、室温 20±3℃の環境下で試験を実施した。

### (3) 自己治癒評価方法

それぞれの自己治癒環境条件下への供試体設置時を試験開始0日とし、各測定日 ( $t$ 日) に供試体を取り出し、通水試験を行い、ひび割れからの漏水量を測定した。なお、漏水量の測定には水道水を使用した。ひび割れからの漏水量 (ml/s) は、供試体上部に 10mm 湛水した状況で一定時間におけるひび割れからの漏水量を測定し算出した。漏水が見られなくなったものに関しては、完全にひび割れが閉塞したと判断し、自己治癒環境から取り出した。

試験開始0日と各測定日における漏水量から、以下の式(1)よりひび割れ閉塞率  $w_t$  (%) を算出した。

$$w_t = (q_0 - q_t) / q_0 \times 100 \quad (1)$$

ただし、 $q_0$ : 試験開始0日における漏水量 (ml/s)、 $q_t$ : 測定日  $t$ 日における漏水量 (ml/s) とした。

各供試体の試験開始時と終了時に、それぞれ供試体表面を観察し、ひび割れの閉塞状況を目視でも確認した。

## 2.2.2 SEM-EDX 観察

### (1) 供試体概要

SEM-EDX 観察用供試体は材齢 28, 91 日に達した後、型枠から取り外した。その後、円盤の側面にテープを巻き、万能試験機 (容量 200kN) で割裂引張試験の要領で载荷し円盤中央部に直径方向にひび割れを導入した。ひび割れ導入後、側面のテープを上部側に 10mm 外に出るように巻き直し、上下面 3 か所ずつ、合計 6 か所のひび割れ幅をクラックスケールで測定し、その平均値から有効ひび割れ幅 (以降、ひび割れ幅  $w$  とする) を求めた。

### (2) SEM-EDX 観察方法

SEM-EDX 観察用供試体を 40℃の乾燥炉で 2 日間乾燥させる。乾燥させた供試体のひび割れ間に架橋している PP 短繊維に対して SEM と実体顕微鏡による観察と撮影、EDX による分析を行う。その後、各自己治癒環境に設置し、自己治癒評価を行う。なお、静置環境においては、10mm 浸水させた場合、供試体全体が浸水してしまうため供試体下部に湿らせた布を敷くことで静置条件としている。ひび割れの閉塞が見られた供試体を再び乾燥し、観察と撮影、EDX による分析を行い、ひび割れ間に架橋する PP 短繊維に付着した析出物について調査する。

## 3. 結果および考察

### 3.1 通水試験結果

#### (1) 漏水量の経時変化

図-2 に SEM-EDX 観察用供試体の材齢 28 日の N におけるひび割れ幅と初期漏水量の関係、図-3 に 14 日時点のひび割れ閉塞率とひび割れ幅の関係を示す。初期漏

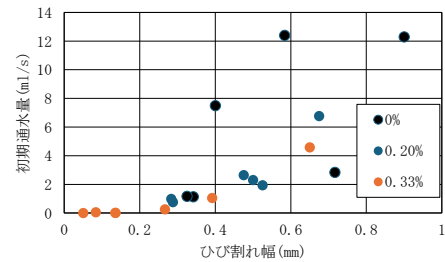


図-2 初期通水量とひび割れ幅の関係 (SEM-EDX 用供試体)

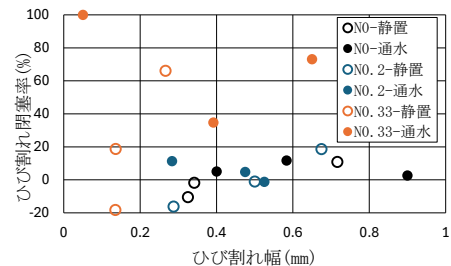


図-3 14 日時点ひび割れ閉塞率とひび割れ幅の関係 (SEM-EDX 用供試体)

水量について、PP 短繊維混入率が 0%の供試体はばらつきが見られたが、0.2, 0.33%の供試体ではほとんどが 3ml/s 以下となり、PP 短繊維混入率が高くなればなるほど初期の漏水量は低くなる傾向が見られた。このことから、PP 短繊維の導入は漏水量を減少させる効果があるといえる。この要因として、ひび割れ間に架橋する短繊維によってひび割れ幅が広がることを抑制していることが考えられる。PP 短繊維混入率が 0.33%の供試体においては、日数の経過に対して明確な漏水量の減少が見られ、短繊維によるひび割れ閉塞を確認することができた。また、一部の供試体では完全なひび割れの閉塞が見られた。一部の供試体で設置初日に比べ漏水量が増加している供試体があるが、その原因として、水に常に触れているため、ひび割れの周囲のモルタル分が剥離したことでひび割れが少し広がり、漏水量が増加したと考えられる。

### 3.2 ひび割れ閉塞率

#### (1) ひび割れ閉塞率と繊維混入率、ひび割れ幅の関係

図-4, 5, 6 に材齢 28, 91 日, 3 年における PP 短繊維混入率ごとのひび割れ閉塞率とひび割れ幅の関係を示す。どのパターンにおいても、ひび割れ幅が 0.2mm 以下の場合には PP 短繊維によってひび割れがおおむね 70%以上閉塞することがわかった。このことから、小さいひび割れ幅に対しては PP 短繊維による自己治癒が有効であると推察できる。ひび割れ幅が 0.4mm を超える場合ではひび割れの閉塞があまり見られなかったものの、PP 短繊維混入率が 0.33%のものについては、ひび割れ閉塞率が 50%を超える場合があった。このことから PP 短繊維混入

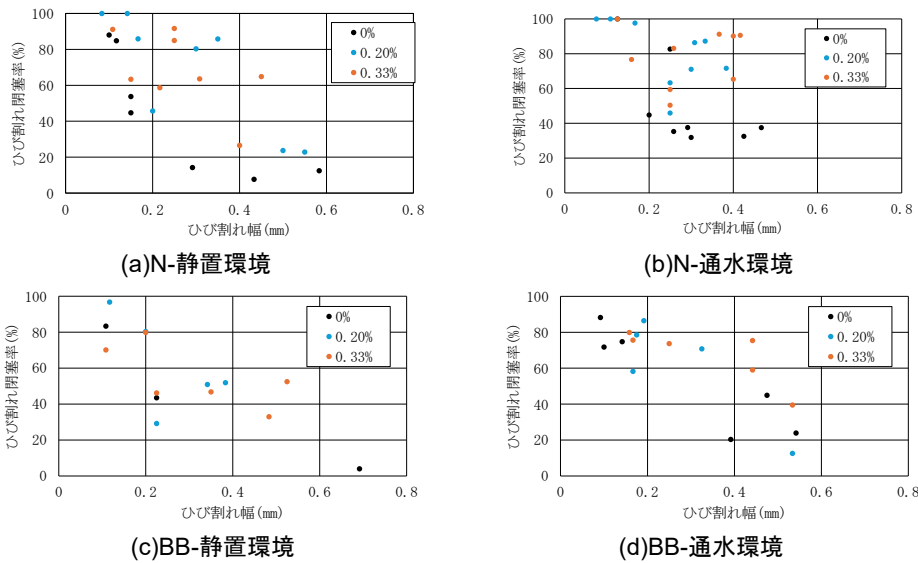


図-4 試験開始 14 日時点でのひび割れ閉塞率とひび割れ幅の関係(材齢 28 日)

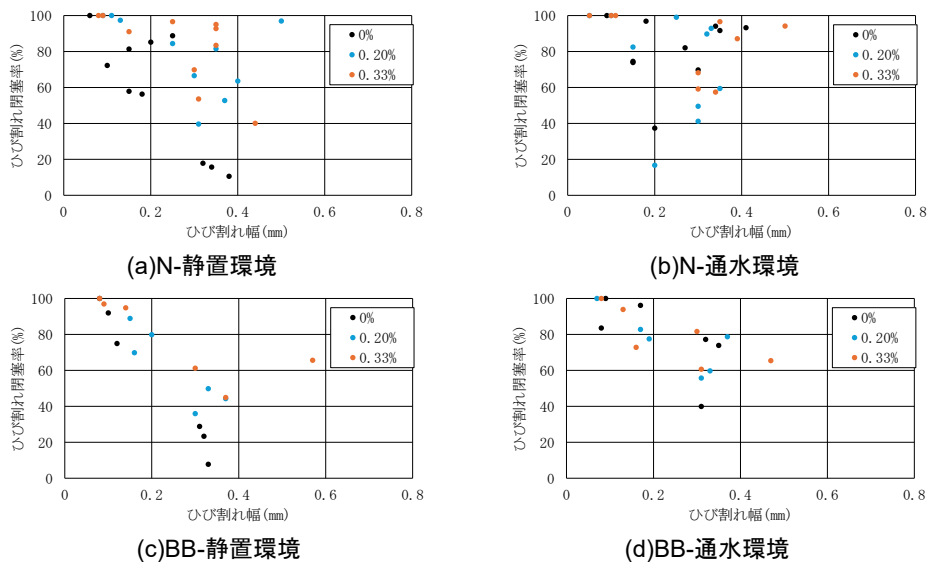


図-5 試験開始 14 日時点でのひび割れ閉塞率とひび割れ幅の関係(材齢 91 日)

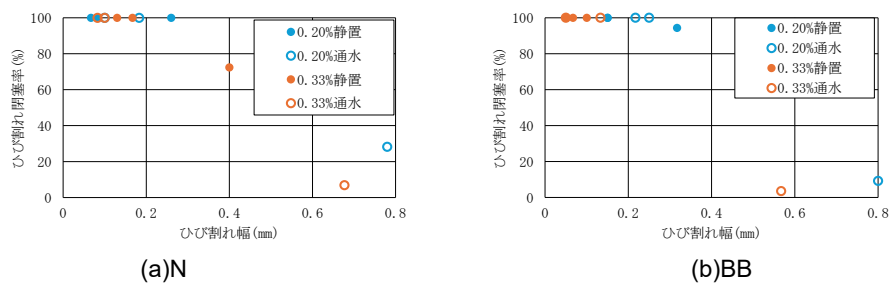


図-6 試験開始 14 日時点でのひび割れ閉塞率とひび割れ幅の関係(材齢 3 年)

率が高い場合は大きいひび割れ幅に対しても自己治癒が有効であることが考えられる。

## (2) ひび割れ閉塞率と自己治癒環境条件の関係

図-4, 5, 6 から、ほとんどのパターンにおいて、静置環境より通水環境でのひび割れ閉塞率が大きくなる傾向にあった。また、通水環境の方では、0.3mm 以上の大きなひび割れに対してひび割れの閉塞が見られるケースが多かった。このような結果となった要因として、材齢

が進行する中で未水和セメントが減少したことによって、再水和反応による自己治癒効果が低くなったことが考えられる。通水環境において閉塞が見られたのは、自己治癒要因の一つにひび割れ表面に存在する微粒子がひび割れ内の一部に目詰まりを起し透水性を低下させる現象<sup>9)</sup>があり、通水環境においてひび割れ間に流れる水に含まれる微粒子が PP 短繊維に吸着し、漏水量が低下したと考えられる。

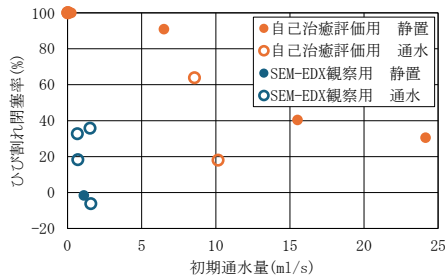


図-7 N0.2%の14日時点ひび割れ閉塞率(材齢28日)

### (3) 供試体の大きさとひび割れ閉塞率の関係

図-7に自己治癒評価用供試体とSEM-EDX観察用供試体それぞれの材齢91日のN0.2%におけるひび割れ閉塞率を示す。自己治癒評価用供試体については極端に初期通水量が大きいものを除いて2週間以内にほぼ完全に閉塞し、初期通水量が大きい供試体についても、ある程度のひび割れの閉塞が見られた。しかし、SEM-EDX観察用の供試体においては、初期通水量がさほど大きくないものでも閉塞がほとんど見られない供試体がいくつか見られ、自己治癒評価用供試体の結果と比べると差が見られた。このことから、供試体の大きさがひび割れの閉塞に影響を及ぼしていることが推察される。

### (4) 長期材齢におけるひび割れ閉塞について

コンクリートの自己治癒は未水和セメントが再水和反応を起こすことによってひび割れが閉塞することによって発生していると考えられているため、長期材齢になることによってひび割れの閉塞に影響を与えるのではないかと考えてられていた。図-4, 5, 6から、材齢3年の供試体についても若材齢の供試体と同じく自己治癒性能が見られた。また、経時変化にも大きな差異は見られなかった。このことから、材齢が長期となっても、PP短繊維による自己治癒効果の促進に期待できるといえる。

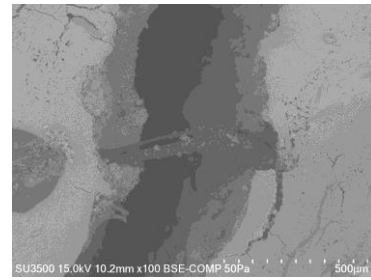
## 3.3 ひび割れ閉塞状況

### (1) 目視での観察

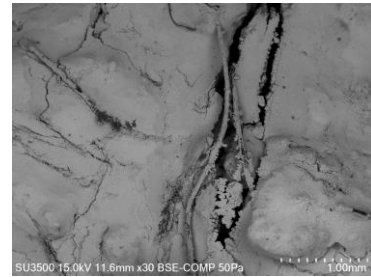
閉塞が見られた供試体において、ひび割れ間に白い析出物が確認できた。上面側、下面側どちらのひび割れ間にも白い析出物が確認できたが、自己治癒環境条件による傾向の差が見られ、通水環境においては下面側、静置環境においては上面側に白い析出物が確認できるケースが多く見られた。この理由として、析出物の成分として考えられている炭酸カルシウムの生成に二酸化炭素もしくは炭酸イオンが必要となるため、大気に触れている面に析出物が発生しやすいことが考えられる。

### (2) SEMを用いた観察

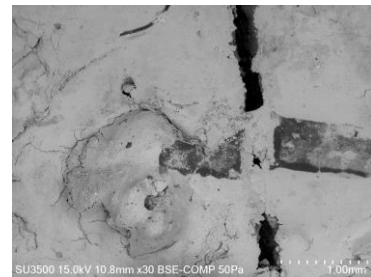
図-8にSEM観察結果を示す。なお、自己治癒環境設置前のN0.2の供試体を観察した結果を電子線像1に、N0.33%の供試体を自己治癒環境に設置し、ひび割れの閉



(a)電子線像1 N0.2% (倍率100倍)



(b)電子線像2 N0.33% (倍率30倍)



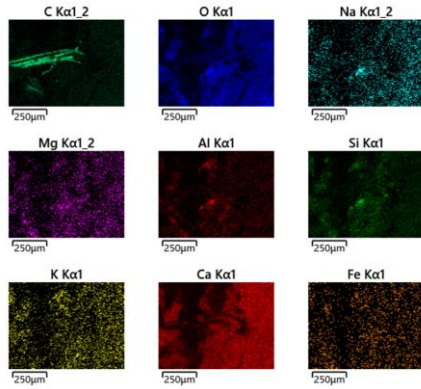
(c)電子線像3 N0.33% (倍率30倍)

図-8 SEM観察結果

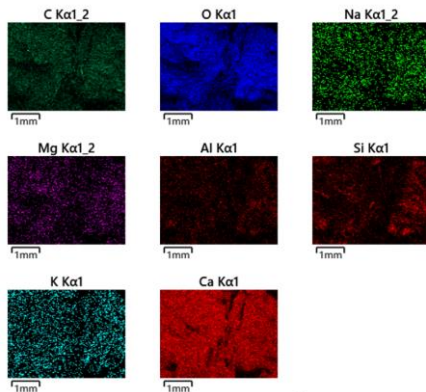
塞が見られたものをSEMにより観察した結果を電子線像2, 3に示す。電子線像1と2を見比べると、1は繊維が黒く表示されているのに対し、2は繊維の大部分がモルタルと同じような色になっていることがわかる。これは自己治癒が促進され析出物が付着したためと考えられる。本研究での自己治癒はこのように繊維に析出物が付着することを繰り返し、ひび割れ間を塞ぐほどに大きさが成長することで発生していると推察できる。また、電子線像3では、一部であるものの、ひび割れ間が繋がるように閉塞していることが確認できた。

### (3) EDXによる分析

電子線像1-2と同じ箇所においてEDXによる分析を行った結果を図-9に示す。(a)と(b)の結果から、自己治癒環境に置く前は繊維がある箇所に対してCの検出が強く表れたが、自己治癒環境に設置後は繊維に対するCの検出が周囲と同程度になったことから、繊維表面に別の成分を持つ物質が付着したことが考えられる。(b)では繊維にそってCaの反応が見られるため、付着した物質の主成分はCaであると考えられる。



(a)電子線像 1 の EDX 分析結果



(b)電子線像 2 の EDX 分析結果

図-9 EDX 分析結果

#### 4. 結論

本研究は、PP 短繊維混入率がセメントモルタルに導入したひび割れの自己治癒に及ぼす影響を明らかにするため、通水環境および静置環境に設置した供試体の漏水量を測定しひび割れ閉塞率を比較・評価した。本実験の範囲から得られた知見を以下に示す。

- (1) PP 短繊維混入率の増加に伴い、漏水量が減少することがわかった。これはひび割れ間に架橋する短繊維がひび割れ幅を抑制していることが要因と考えられる。また、PP 短繊維混入率が高いほど、漏水量の明確な減少が確認でき、特に PP 短繊維混入率が 0.33% の場合において、極端に漏水量が多いパターンでもひび割れが閉塞することが確認できた。
- (2) 0.2mm 以下のひび割れに対しては、PP 短繊維を混入させることによっておおむねひび割れが閉塞することが確認できた。ひび割れ幅が 0.4mm を超える場合は閉塞しづらいものの、PP 短繊維混入率が 0.33% の場合は 50%以上閉塞する例を確認できた。
- (3) 材齢 28 日においては、静置環境より通水環境の方が

ひび割れ閉塞の促進がされやすいという結果が得られた。また、通水環境の方が比較的大きなひび割れに対しても閉塞が起りやすいことがわかった。

- (4) 材齢 3 年の供試体において、ひび割れの閉塞が若材齢の物と同じく確認できた。このことから、材齢が長期になったとしても、自己治癒効果に期待できると考えられる。
- (5) 通水環境では下面側、静置環境では上面側に白い析出物が確認できるケースが多かった。自己治癒が起こったとみられる供試体については、SEM で観察すると繊維にそって白い析出物が附着していることが確認できた。

以上より、PP 短繊維を用いるコンクリートの自己治癒において、各種要因が与える影響について明らかにした。また、ひび割れを閉塞させている成分についても明らかになった。これからも、各要因がひび割れの閉塞に与える影響の調査、ひび割れを閉塞させている物質の分析を行い、より確実な自己治癒環境条件について調べることが必要である。

#### 参考文献

- 1) 細田暁, 高梨大介, 高木亮一, 我彦総志: 少量の合成短繊維による収縮ひび割れの抑制機構, コンクリート工学会年次論文集, Vol.28, No.1, pp.299-304, 2006
- 2) 井川秀樹, 横室隆, 橘高義典, 江口秀男: 補強繊維の種類と混入量を変化させた重量コンクリートの自己治癒性能に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.1441-1446, 2017
- 3) 本間大輔, 三橋博三, 西脇智哉: 繊維補強セメント系複合材料のひび割れ自己修復機能に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.693-698, 2008
- 4) 佐々木悠, 山田洵, 崔希燮, 西脇智哉: 養生条件の違いが繊維補強セメント系複合材料のひび割れ自己治癒に与える影響, 日本コンクリート工学会, Vol.36, No.1, pp.1660-1665, 2014
- 5) 生駒勇人, 岸利治: 自己治癒現象に関わるコンクリートのひび割れ初期透水量の急速抑制メカニズムの解明, コンクリート工学年次論文集, 日本コンクリート工学会, Vol.36, No.1, pp.1648-1653, 2014