

## 論文 超高強度繊維補強コンクリートの自己治癒に関する研究

川西 貴士\*1・佐々木 一成\*2・片岡 弘安\*3・石関 嘉一\*4

**要旨:** 超高強度繊維補強コンクリートは硬化後も硬化体中に未水和セメントが多く存在している。そのため、ひび割れ内部に水が浸透した場合、未水和セメントやカルシウムの反応によりひび割れの閉塞が期待される。そこで、ひび割れを発生させた供試体に水を浸透させ、ひび割れの閉塞状況を確認した。また、走査型電子顕微鏡や電子線マイクロアナライザーなどにより、ひび割れ内部に析出した物質の同定を行った。その結果、ひび割れ幅が 0.1mm 以下であればひび割れが閉塞し、水の浸透が止まること、水酸化カルシウムやエトリンガイトの生成および炭酸カルシウムの析出により、ひび割れが閉塞することを確認した。

**キーワード:** 超高強度繊維補強コンクリート, 自己治癒, ひび割れ, 透水試験, 化学分析

## 1. はじめに

超高強度で 100 年の高耐久性を有する超高強度繊維補強コンクリート（以下、UFC と呼称）が開発されている<sup>1)</sup>。特に、近年では、高度経済成長期に建設された老朽化した社会インフラを効率的に維持管理するために、耐久性が高く、ライフサイクルコストを低減できる UFC が見直され、高速道路や港湾構造物のリニューアル工事への適用が進められている<sup>2) 3)</sup>。

一方で、UFC は水結合材比が極めて小さく、自己収縮ひずみが大きい材料であり、収縮が拘束されるとひび割れが発生する場合がある。ひび割れ部に水が浸透すると、耐久性の低下が懸念される。しかし、UFC は、硬化体中に未水和セメントやカルシウム (Ca) が多く存在している。そのため、ひび割れ内部に水が浸透した場合、水和物や炭酸カルシウム (CaCO<sub>3</sub>) の生成により、ひび割れが自己治癒により閉塞する可能性が高い。

コンクリート構造物において、ひび割れの低減技術に対する社会的ニーズは高く、これまでに自己治癒に関する研究が進められている。一般的なコンクリートにおいては、外部からの水の供給があると水和物の生成や CaCO<sub>3</sub> の析出によりひび割れが閉塞することが報告されている<sup>4)</sup>。高強度材料については、水結合材比 15% の高強度高靱性セメント系複合材料の自己治癒に関して報告されているが、ひび割れ幅や透水条件が及ぼす影響について、明確には示されていない<sup>5)</sup>。

そこで、UFC を対象に、自己治癒したひび割れ部の耐久性を評価する上での基礎実験として、ひび割れ内部に水が浸透した場合の自己治癒性について確認した。ひび割れを発生させた供試体に水を溜めることでひび割れ内部に透水させ、ひび割れの閉塞状況を確認した。

ひび割れ内部への水の浸透が止まった場合、さらに、加圧した状態でさらに水の浸透状況を確認した。

また、ひび割れ内部の閉塞状況を確認するために、透水試験後の供試体の断面から化学分析を行い、ひび割れ内部に生成される物質の同定を行った。分析には、走査型電子顕微鏡（以下、SEM と呼称）、エネルギー分散型 X 線分析（以下、EDS と呼称）および電子線マイクロアナライザー（以下、EPMA と呼称）を使用した。

## 2. 実験概要

## 2.1 透水試験

ひび割れ部に作用する水圧を変えるために、2 種類の透水試験を実施した。一つ目として、100mm の水頭を作用させた透水試験を実施した（透水試験（その 1））。透水試験（その 1）に用いる供試体の寸法は、直径 100 × 長さ 150mm とし、割裂強度試験によりひび割れを発生させた。割裂強度試験は、材齢 28 日間標準養生を行った後に実施した。割裂強度試験の概要を図-1 に示す。供試体の端面にひずみゲージを貼り付け、発生させるひび割れの幅を 0.05~0.5mm までの範囲となるよう調整した。試験ケースは、実験水準としてひび割れ幅を変えた大中小の 3 ケースとし、各ケースで 3 体ずつ試験を行った。ひび割れ幅として、Case1 は 0.2~0.3mm, Case2 は 0.1~0.2mm および Case3 は 0.1mm 以下を目安とし、ひび割れを発生させた。

ひび割れを発生させたのち、供試体の上面より 100mm の位置まで水を溜めた状態で静置し、透水させた。透水試験（その 1）の概要を図-2 に示す。水の浸透および流出により水面が下がった場合、1 日 1 回給水を行い、100mm の水頭差を保持した。ひび割れが閉

\*1 (株) 大林組 技術研究所生産技術研究部主任研究員 博士 (工学) (正会員)

\*2 (株) 大林組 技術研究所構造技術研究部主任研究員 修士 (工学) (正会員)

\*3 (株) 大林組 技術研究所生産技術研究部副主任研究員 修士 (工学) (正会員)

\*4 (株) 大林組 技術研究所生産技術研究部 博士 (工学) (正会員)

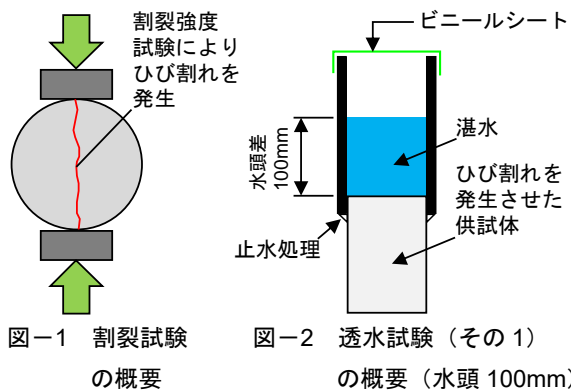


図-1 割裂試験の概要

図-2 透水試験（その1）の概要（水頭 100mm）

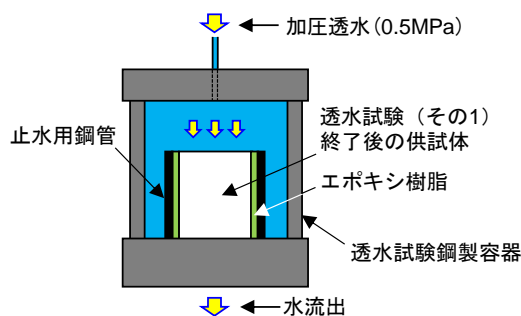


図-3 透水試験（その2）の概要（圧力 0.5MPa）

塞し、水の浸透が止まった段階でマイクロスコープにて端面のひび割れ部の状況を観察した。

二つ目の透水試験として、透水試験（その1）によりひび割れが閉塞した供試体について、さらに作用する圧力を増加した透水試験を行い、水の透水状況を確認した（透水試験（その2））。透水試験（その2）の概要を図-3に示す。供試体の側面はシールし、上面から水压を作用させた。作用させる圧力は、厳しい条件とするためにタイヤの接地圧程度の0.5MPaとした。

なお、供試体に発生させたひび割れは微細であり、鋼繊維が多量に混入されていることから、供試体を移動したり、水压を作用させる際のひび割れ幅の変動による影響は小さいため、2種類の透水試験ともに、ひび割れ幅の固定は特に行わなかった。

## 2.2 化学分析による物質の同定

ひび割れ内部の閉塞状況を確認するために、透水試験（その2）の試験後の供試体を切断して、マイクロスコープによる観察を行った。また、ひび割れ内部に生成された物質を同定するために、供試体の断面をSEMによる観察およびEDSやEPMAによる分析を行った。分析に使用した供試体の概要を図-4に示す。

SEMによる観察は、図-4に示すとおり、2種類の断面で行った。1つ目の断面は、ひび割れを発生させた面で割裂により2つに分割した面で、2つ目の断面は、ひび割れに対して直角方向に切断した面とした。観察

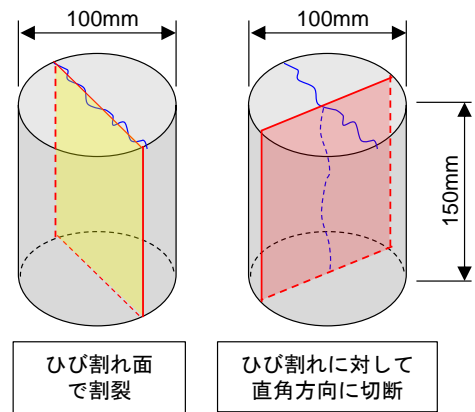


図-4 化学分析用供試体の概要

表-1 材料および配合

水粉体比 (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				鋼繊維 (kg/m <sup>3</sup> )
	水	専用プレミックス粉体	細骨材	高性能減水剤	
W/P	W	P	S	SP	SF
12.6	230	1830	331	18	78.5

※水(W)の内割り置換とし、添加量は適宜調整

する箇所として、ひび割れの上部と下部の2か所から試料を採取した。SEMにより、生成された物質の形状から物質の同定を行った。EDSについては、SEMで観察した試料の中から、代表的な箇所にて組成分析を行い、含まれる元素の割合から物質の同定を行った。また、EPMAについては、図-4に示すひび割れに対して直角方向に切断した断面で分析を行った。分析する箇所として、上部、中部および下部の3か所から試料を採取した。EPMAについては、アルミニウム (Al)、カルシウム (Ca)、炭素 (C)、ナトリウム (Na)、けい素 (Si) および硫黄 (S) の6種類の元素について同定を行った。EDSおよびEPMAともに、代表的な酸化物形態をとるものとして定量分析を行い、これらの結果から水和物やCaCO<sub>3</sub>の存在の可能性について評価を行った。

## 2.3 使用材料および配合

実験にはこれまでに実績のあるUFCの配合を参考に<sup>1)</sup>した。UFCは圧縮強度180N/mm<sup>2</sup>以上、ひび割れ発生強度8N/mm<sup>2</sup>以上を満足する超高強度で極めて富配合の材料である。参考としたUFCは鋼繊維の混入率が2vol.%であり、ひび割れの分散性が高く、微細なひび割れが多量に発生するため、ひび割れ幅の管理が難しい。そこで、できるだけ均一なひび割れを発生させ、かつ割裂試験後に試験体を2つに分断させないために、鋼繊維の混入率を1vol.%とした。実験に用いた材料および配合を表-1に示す。

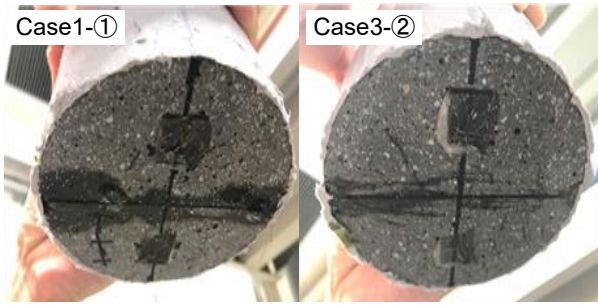


写真-1 供試体下面の水の浸透状況の例

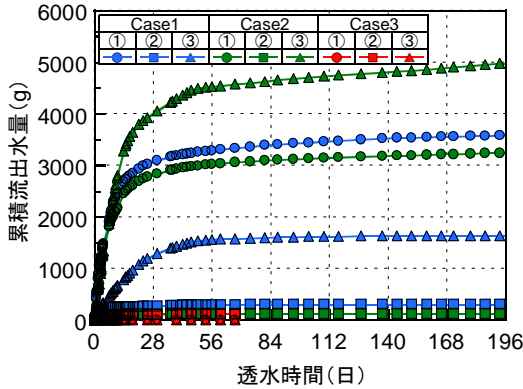


図-5 累積流出水量の推移

### 3. 実験結果

#### 3.1 透水試験結果

##### (1) 透水試験（その1）の結果（水頭 100mm）

いずれのケースについても供試体下面にて水の浸透が確認された。Case1 および Case2 のひび割れ幅の大きい供試体については、下面より水滴が垂れてきたが（写真-1の左側）、ひび割れの幅の小さいCase3については、水滲みが生じるのみであった（写真-1の右側）。いずれのケースについても、透水時間の経過に伴い、供試体の下面に白い析出物が確認された。

累積流出水量の測定結果を図-5に示す。いずれのケースについても、透水時間の経過に伴い、流出水量が低減した。ひび割れ幅の大きいCase1-①、Case2-①、Case2-②については、透水開始後196日の段階でも水の流出が確認された。Case3の3つの供試体については、流出水量の増加が認められなくなったため、透水開始後67日で透水試験を中止した。Case3の透水試験後の供試体の状況の例を写真-2に示す。また、供試体のひび割れ部を顕微鏡にて観察を行った。200倍に拡大したひび割れの状況を写真-3に示す。ひび割れ内部に白色の析出物の生成によるひび割れの閉塞状況が確認された。

顕微鏡にて計測したひび割れ幅と、透水試験における累積流出水量の測定結果を表-2および図-6に示す。ひび割れ幅の増加に伴い、流出水量も増加する傾向が認められた。ひび割れ幅が0.1mm以下で

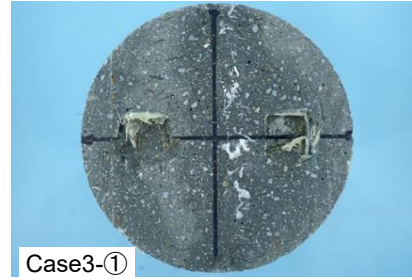


写真-2 透水試験後の状況の例

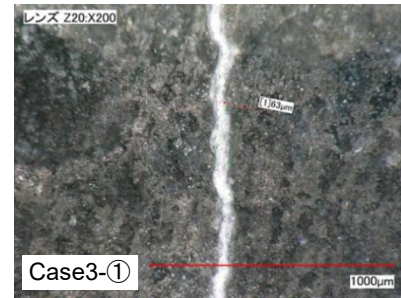


写真-3 マイクロスコープによる観察状況の例

表-2 ひび割れ幅と累積流出水量の測定結果

ケース No.	No.	ひび割れ幅			累積流出水量 (g)
		上面	下面	平均	
Case1	①	0.44	0.39	0.41	3297
	②	0.23	0.35	0.29	304
	③	0.27	0.14	0.20	1562
Case2	①	0.38	0.13	0.25	3030
	②	0.17	0.39	0.28	4536
	③	0.14	0.24	0.19	138
Case3	①	0.18	0.06	0.12	7
	②	0.35	0.05	0.20	11
	③	0.12	0.04	0.08	124

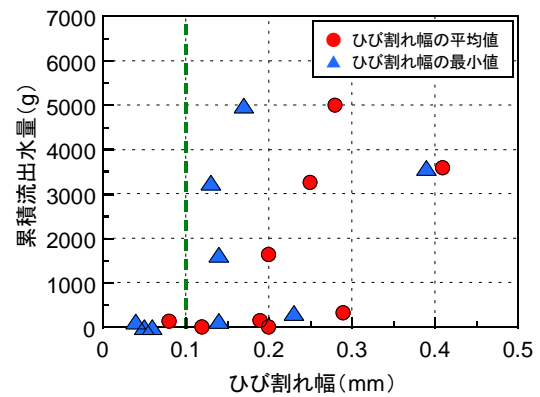


図-6 ひび割れ幅と累積流出水量の関係

あれば、累積流出水量が小さく、ひび割れが閉塞しやすいため、水の浸透が止まることが判った。

##### (2) 透水試験（その2）の結果（圧力 0.5MPa）

水頭 100mm の透水試験（その1）でひび割れの閉塞が認められたCase3の3本の供試体について、0.5MPaの圧力を作用させた状態で透水試験を実施した。透水開

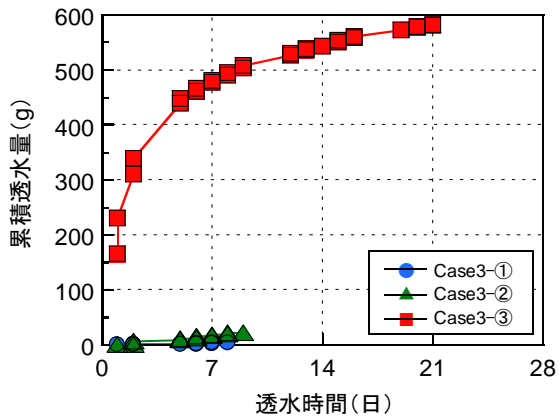


図-7 累積透水量の推移

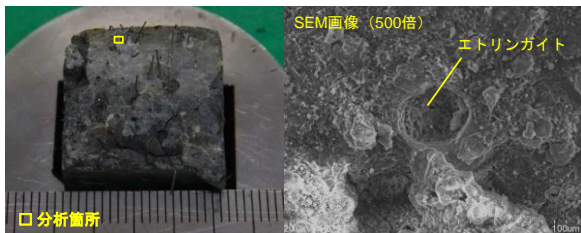


写真-4 SEM 観察結果 (割裂面：ひび割れ上部)

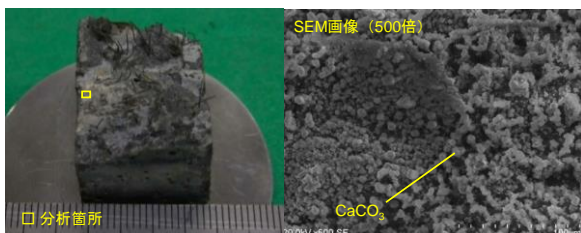


写真-5 SEM 観察結果 (割裂面：ひび割れ下部)

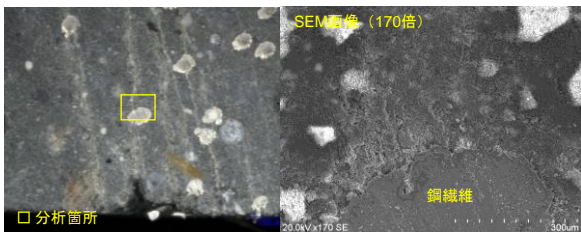


写真-6 SEM 観察結果 (切断面：ひび割れ上部)

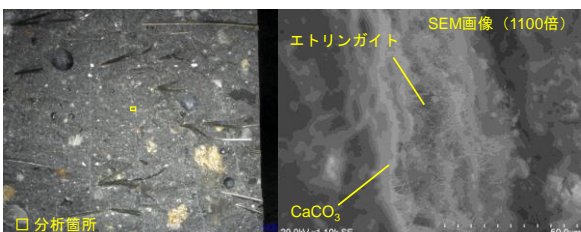


写真-7 SEM 観察結果 (切断面：ひび割れ下部)

始後、閉塞していたひび割れからの水の浸透が確認された。排出された透水量の測定結果を図-7に示す。Case3-①およびCase3-②については、透水試験開始後9日で水の流出が止まった。水頭100mmの透水試験で累積流出量の大きかったCase3-③についても透水開始後21日の段階で水の流出が止まった。ひび割れ幅はCase3-③が最も小さい値であるが、ひび割れ幅の計測

表-3 EDS 分析結果

成分名		定量分析結果(%)	
		CaCO <sub>3</sub> 写真-5	エトリンガイト 写真-7
酸化アルミニウム	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.91	2.94
酸化カルシウム	CaO	41.93	44.37
二酸化炭素	CO <sub>2</sub>	41.17	22.18
二酸化けい素	SiO <sub>2</sub>	12.9	22.14
三酸化硫黄	SO <sub>3</sub>	1.21	4.23
酸化カリウム	K <sub>2</sub> O	—	0.51
酸化マグネシウム	MgO	0.27	0.44
酸化鉄	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.61	3.19

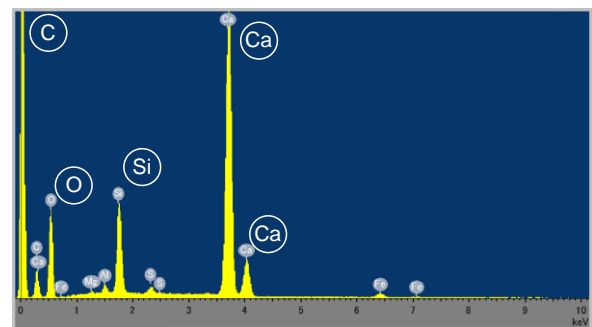


図-8 EDS 分析結果 (写真-5 : CaCO<sub>3</sub>)

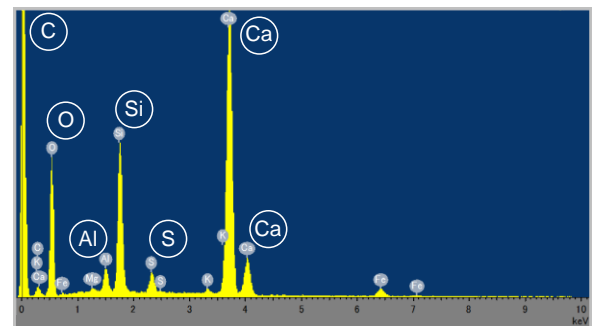


図-9 EDS 分析結果 (写真-7 : エトリンガイト)

は上面と下面で行っているため、内部のひび割れ幅の分布に若干の差異があり、累積流出水量にばらつきが生じたものと推測する。

### 3.2 分析結果

#### (1) SEM 観察結果

ひび割れ面で割裂した供試体の SEM の観察結果を写真-4 および写真-5 に、ひび割れに対して直角方向に切断した供試体の SEM の観察結果を写真-6 および写真-7 に示す。それぞれ上部および下部から 2cm 程度の試料を切り出し、SEM の観察を行った。写真-4 および写真-5 の左側に割裂面の状況を示す。写真-6 および写真-7 の左側に切断面のマイクロスコプの観察画像を示す。また、右側に SEM の観察画像を示す。割裂面には白い析出物が認められ、切断面にはひび割れの発生個所に白い筋が認められた。

ひび割れ上部については、割裂面より観察した

表-4 EPMA 分析結果

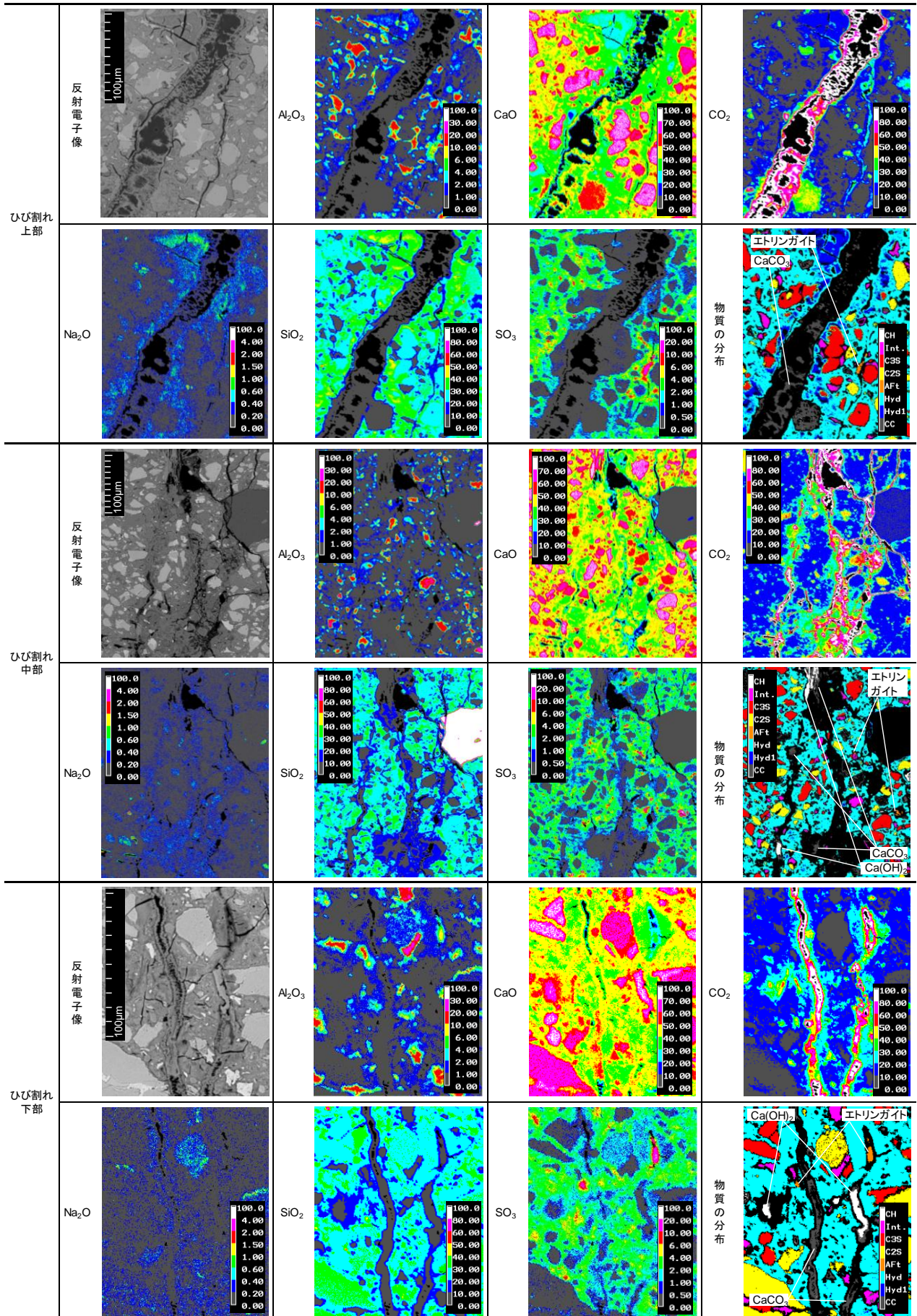


写真-4の中央の空隙部に針状のエトリンサイト ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot3\text{CaO}\cdot\text{SO}_4\cdot32\text{H}_2\text{O}$ ) が認められた。切断した供試体において、写真-6については、ひび割れ部にひび割れ部に白色の筋が認められるが、SEMの観察結果からは、特徴のある物質は観察されなかった。

ひび割れ下部については、割裂面より観察した写真-5において、粒状の結晶が観察された。炭酸カルシウムが析出しているものと思われる。また、切断面より観察した写真-7においては、ひび割れ部に  $\text{CaCO}_3$  に加え、針状結晶の存在が認められた。

#### (2) EDS 分析結果

SEMの観察を行った試料の中で、 $\text{CaCO}_3$ の生成が認められた写真-5 およびエトリンサイトの生成が認められた写真-7 に示す観察箇所について、EDSの分析を行った。分析結果を表-3 に示す。また、EDSチャートを図-8 および図-9 に示す。

$\text{CaCO}_3$ の生成が認められた箇所については、炭素(C)や(Ca)の割合が高い結果であった。またエトリンサイトの生成が認められた箇所については、CやCaの他に、構成元素であるアルミニウム(Al)や硫黄(S)についても存在が認められた。これらの分析から、ひび割れ内部に生成した物質は、 $\text{CaCO}_3$  およびエトリンサイトの生成であることを裏付ける結果が得られた。

#### (3) EPMA 分析結果

EPMAによる分析結果を表-4 に示す。供試体の上部、中部、下部と3箇所から試料を採取して分析を行ったが、反射電子像からいずれの箇所についても、ひび割れ部に物質が析出して間詰めされ、閉塞している状況が確認できた。ひび割れ内部の閉塞している箇所にはCa、Cの割合が多く、局所的にAlやSが認められた。これらの分析結果から、 $\text{CaCO}_3$ や水酸化カルシウム( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) およびエトリンサイトが生成していることが判った。

ひび割れの閉塞部には、 $\text{CaCO}_3$ が広く分布している。これは、水の浸透によって、UFCの硬化体より溶出したCaと水に溶存していた $\text{CO}_2$ が反応して析出したものと思われる。また、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ およびエトリンサイトが認められた。これは、浸透した水と未水和セメントとの水和反応により生成され、ひび割れの隙間を埋めたものと考えられる。表-4の物質の分布において、ひび割れ内部が黒く、物質を同定していない部分についても、反射電子像をよると物質の析出が認められる部分がある。この部分は、 $\text{CaCO}_3$ と判定した範囲に比べ、CaOや $\text{CO}_2$ の割合が低いために物質の同定をしていないが、当該部分の構成元素はCaとCが主体的となっていることから、 $\text{CaCO}_3$ が析出している可能性が高い。

## 4. まとめ

超高強度繊維補強コンクリート(UFC)について、ひび割れを発生させた供試体に透水させ、ひび割れが閉塞するか確認を行った。また、透水試験後の供試体について化学分析を行うことにより、ひび割れ内部に析出した物質の同定を行った。実験により得られた知見を以下に示す。

- (1) ひび割れ幅が0.1mm以下であれば、白色析出物の生成によりひび割れが閉塞し、水の流出が止まることが判った。
- (2) 水頭100mmの透水試験にて、水の流出が止まった供試体を用いてさらに0.5MPaの水圧を作用させた場合、再度水の浸透が認められたが、時間の経過とともに流出水量が低下し、水の流出が止まった。
- (3) 走査型電子顕微鏡およびエネルギー分散型X線分析の結果、ひび割れ内部に $\text{CaCO}_3$ 、エトリンサイトの生成が認められた。
- (4) 電子線マイクロアナライザーによる分析の結果、ひび割れ内部にCaやCが広く認められ、 $\text{CaCO}_3$ の生成により、ひび割れが閉塞している状況が確認できた。局所的に水酸化カルシウムやエトリンサイトの生成が認められ、未水和セメントが反応した水和物が生成されることが確認できた。

## 参考文献

- 1) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリート「スリムクリート」に関する技術評価報告書、技術推進ライブラリーNo.10, 2012.1
- 2) 塩畑英俊, 平野勝彦, 川西貴士, 佐々木一成：防水層にUFCを用いた複合プレキャストPC床版の開発, コンクリート工学, Vol.59, No.7, pp.574-581, 2021.7
- 3) 平田隆祥, 石関嘉一, 武田篤史, 小澤武史：常温硬化型UFCの現場打設による護岸構造物のリニューアル, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.2, pp.1249-1254, 2014.7
- 4) 五十嵐心一, 細田暁, 人見尚, 今本啓一：セメント系材料の自己治癒技術の体系化研究専門委員会報告：コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, 2011.7
- 5) 大坂祐樹, 西脇智哉, 石川智, 五十嵐豪：ひび割れを有するUHP-FRCCの凍結融解抵抗性および自己治癒：コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp.279-284, 2018.7