

論文 ひび割れた超高強度繊維補強コンクリートはりの海洋環境曝露試験

後藤 隼一郎*1・横田 弘*2・橋本 勝文*3・河野 克哉*4

要旨: ひび割れた超高強度繊維補強コンクリート (UFC) の経年的な力学性能の低下の程度を確認するため、北海道の日本海沿岸においてひび割れを有する UFC 製切欠きはり供試体を設置して海洋環境曝露試験を行った。その後、3 点曲げ試験に供することで力学性能の変化を評価した。また、曲げ試験終了後、塩化物イオンの浸透状況および鋼繊維の腐食状況の観察を行った。その結果、0.01mm 以下のひび割れ幅であれば、鋼繊維の腐食は認められず、経年的に力学性能の低下が見られないということが分かった。

キーワード: 超高強度繊維補強コンクリート, 鋼繊維, 腐食, 海洋環境曝露試験, 引張軟化曲線, ひび割れ

1. はじめに

脆性的な挙動や低引張強度などの欠点をもつセメントコンクリートに対し、セメントマトリクスに高強度の短繊維を混入した超高強度繊維補強コンクリート (以下、UFC) と呼ばれる高強度、高じん性、高耐久性といった優れた性能を持つ複合材料の適用事例が増加している¹⁾。

現行の UFC の設計・施工指針¹⁾では、供用時において UFC に発生する引張応力がひび割れ発生強度を超えないように規定されている。すなわち UFC はひび割れの発生を許容しない部材として取り扱われている。しかしながら、UFC はひび割れ発生後においても鋼繊維の架橋効果および引抜き抵抗性により高いじん性と引張力を十分に負担できる優れた力学特性を有している。

図-1 は引張荷重-変形曲線の概念図である²⁾。一般に UFC の荷重-変形曲線は、鋼繊維とコンクリートが一体で引張力を負担する領域 (以下、領域 (I)) と、鋼繊維のみで引張力を負担する領域 (以下、領域 (II)) の 2 つに大別され、さらに領域 (a) ではマトリクスであるコンクリートの引張破壊荷重 (図中の P_0) よりも初期ひび割れ荷重 (図中の P_{cr}) が著しく増大し、領域 (II) では鋼繊維が引き抜けながら引張力に抵抗し、徐々に耐荷力を失うようになる。このように、UFC は、マトリクスにひび割れが発生した後においても、ひび割れに架橋した繊維が引張応力を分担できることが特長といえる。

図-2 は UFC を用いた構造物の照査に用いられる簡易的な引張軟化モデルである²⁾。マトリクスのひび割れ発生後に鋼繊維の架橋効果で応力を保持する領域、開口変位の増大に伴って応力が徐々に低下する領域の 2 つに分けることができる。ここで、マトリクスにひび割れが発生した際の開口変位は 0.01mm 程度で、その後の一定応力を保持する平坦部は開口変位 0.5mm 程度までとされ

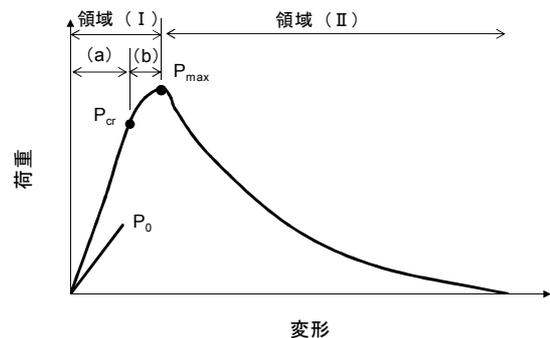


図-1 引張荷重-変形曲線の概念図

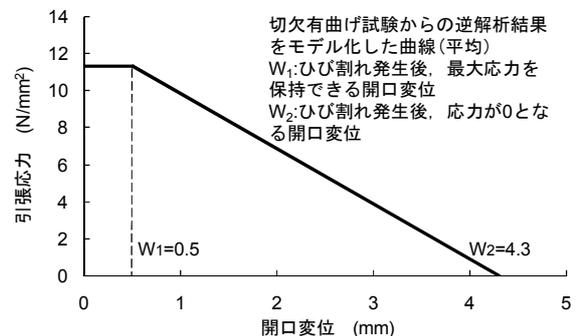


図-2 引張軟化曲線モデル

ている。この領域においては、UFC はひび割れ発生後において最大応力を維持することができる。以上のことは、UFC などの繊維補強セメント系材料はひび割れが発生した後に引張応力を最大限分担でき、ひび割れ後にはじめて架橋繊維の効果が発揮されることを意味している。したがって、供用中に UFC のひび割れを許容しない設計は、言い換えると繊維が混入されていなくてもよいとも言え、繊維には終局時の脆性破壊を防止するための安心材料の役割しか与えられていないことになる。

通常の RC 設計のように許容ひび割れ幅の制限値を設

*1 北海道大学大学院 工学院北方圏環境政策工学専攻 修士課程 (学生会員)

*2 北海道大学大学院 工学研究院北方圏環境政策工学部門 教授 博士 (工) (正会員)

*3 北海道大学大学院 工学研究院北方圏環境政策工学部門 助教 博士 (工) (正会員)

*4 太平洋セメント株式会社中央研究所 主任研究員 博士 (工) (正会員)

けて UFC 構造を設計する方法であれば、ひび割れた UFC のもつ引張性能を十分に利用でき構造部材としての適用範囲を広げることにも可能になると考えられる。そのためには、ひび割れた UFC に架橋する鋼繊維自体の腐食による性能低下が生じないことを確認する必要がある。

なお、設計上はひび割れを許容しない UFC であるが、実際には部材の局所的な位置において微細なひび割れが生じている構造物も存在している³⁾。今後、鋼繊維が腐食することでひび割れが拡大する可能性も完全には否定できない。このような UFC 構造物の安全性を評価する意味においても、ひび割れた UFC の耐久性を考慮した力学性能について明らかにする必要がある。

このようなことから、本研究では、曲げひび割れを導入した UFC 製切欠きはり供試体を海洋環境下に曝露し、経年的な力学性能低下の程度を確認することを目的とした。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

本試験で使用した UFC に関して、表-1 は使用材料、表-2 は配合、表-3 に圧縮強度を示す。

2.2 供試体

曝露試験のために、100×100×400mm の角柱供試体を JCI-S-001-2003「切欠きはりを用いたコンクリートの破壊エネルギー試験方法」に準拠して作製した。打込みから 24 時間後に脱型し、室温 20℃、相対湿度 95% の恒温恒湿室にて 24 時間静置した。その後、蒸気養生槽にて、昇温速度 15℃/hr で最高 90℃まで昇温し、最高温度を 48 時間保持した後、降温速度 15℃/hr にて 20℃まで降温した。その後、供試体スパン中央にコンクリートカッターを用いて幅 5mm、深さ 30mm の切欠きを導入した。

2.3 初期ひび割れの導入

養生後に切欠きを導入した供試体は、図-3 に示すような切欠きはりの 3 点曲げ試験に供してひび割れを導入した。切り欠きはりのスパンは 300mm で、万能材料試験機を用いて静的に一点載荷し、ひび割れ肩口開口変位(以下、CMOD)を測定した。なお、CMOD は切欠き肩口にナイフエッジを取り付け、クリップ型変位計にて測定した。

図-2 の引張軟化曲線モデル²⁾に基づき、マトリクスのひび割れ発生時に対応する CMOD として 0.01mm、ひび割れ発生後の最大引張応力を保持できる最大値に対応する CMOD として 0.5mm、引張軟化挙動においておおむね終局を迎えている 3.0mm、その中間の 1.5mm を基準として、これら 4 つの CMOD を目安に除荷後の残存ひび割れの幅が目標としたひび割れ幅になるように最大荷重を制御した。なお、実際に導入されたひび割れ幅として

は、目標値の±10%程度の誤差であった。

2.4 曝露試験の概要

曝露試験において、初期導入ひび割れ幅を、目標 CMOD に相当する、ひび割れなし、0.01mm、0.5mm (供試体各 2 本)、1.5mm、3.0mm (供試体各 1 本) の 5 水準とした。ただし、曝露中はひび割れ幅を保持するような荷重を与えておらず、曝露中のひび割れ幅の変化は測定していない。曝露期間(供試体回収までの期間)は 5 年間とした。0.5mm の場合、電子線マイクロアナライザー(以下、EPMA)分析用の供試体も作製した。曝露場所は、北海道の日本海沿岸石狩湾に面した海洋環境とした。

曝露供試体は、図-4 に示すように、冬場の積雪ならびに夏場の雑草の影響を考慮して、地面から 1m 以上の位置に設置した。そのため、仮設用の単管パイプを用いた設置用架台を作製した。供試体は、切欠きを設けた面が上面となるように設置するとともに、海岸側に向かって下方傾斜させることで、すべての供試体が海からの飛来塩分の影響をなるべく均等に受けるようにした。また、供試体底面を 30mm 程度浮かせて設置することで、雨水などが設置底面で滞留することがないようにした。

3. 実験結果

3.1 曲げ試験

曝露期間終了後に、図-3 に示した方法と同様の方法で曲げ試験を行った。また、得られた荷重-CMOD 曲線を用いて引張軟化曲線を推定した⁴⁾。その際、初期導入ひび割れ幅 0.5mm の供試体の一部と 3.0mm の供試体は多直線近似法により適切な引張軟化曲線を得ることができなかった。そのため、考察からは除外している。

図-5 に各供試体の荷重-CMOD 曲線を示す。初期導入ひび割れ幅 0.01mm の供試体は初期導入ひび割れなしの供試体と比較して、ピーク荷重がわずかに減少したものの、ひび割れなしの供試体と同様に、ピーク荷重付近において荷重が最大値を維持しながら、増加と減少を繰り返す現象が見られる挙動を示した。これは、鋼繊維が少しずつ引き抜けながら引張力に抵抗する架橋効果の影響であると考えられる。しかしながら、初期導入ひび割れ幅が 0.5mm 以上の場合、荷重の増減がほとんどみられず、ピーク荷重および曲げ剛性の低下、ピーク荷重を過ぎた後の急激な荷重の低下が顕著にみられた。これは、UFC にあらかじめひび割れを導入することで、鋼繊維の引抜けにより、十分な架橋効果を発揮できないこと、あるいは海洋環境において、塩化物イオンによって鋼繊維が腐食し、鋼繊維が担保する引張応力が低下したためであると考えられる⁵⁾。

荷重-CMOD 曲線の結果を用いて推定した引張軟化曲線を図-6 に示す。初期導入ひび割れなしの場合および

表-1 UFCの使用材料

種類	物性	略号	物性
粉体	UFCプレミックス粉体	PM	土木学会から刊行された超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案)に適合する標準配合粉体
短繊維	UFC専用短繊維	FM	長さ15.2mm, 直径0.22mm, アスペクト比69.1, 密度7.85g/cm ³ , 引張強度2800MPa
混和剤	UFC専用高性能減水剤	SP	ポリカルボン酸系

表-2 UFCの配合

条件			単位量			
W/PM [Vol. %]	FM混入率 [Vol. % (外割)]	SP添加率 [PM×%]	W [kg/m ³]	PM [kg/m ³]	FM [kg/m ³]	SP [kg/m ³]
22.5	2.0	0.932	180	2254	157	21

表-3 UFCの圧縮強度

測定項目	測定値[N/mm ²]			平均[N/mm ²]
圧縮強度(寸法φ50×100mm)	①215.9	②218.7	③216.2	216.9

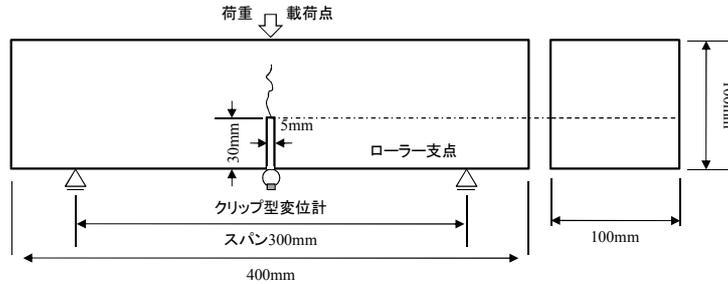


図-3 暴露供試体のひび割れ導入方法および3点曲げ試験の概要

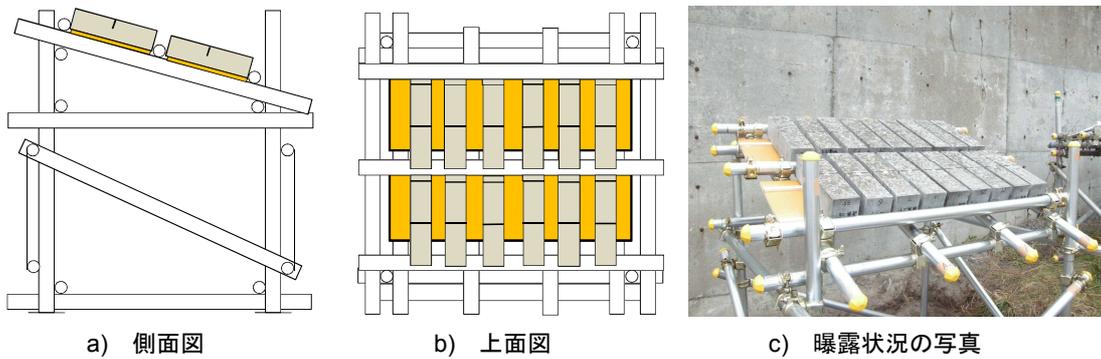


図-4 設置用架台を用いた供試体の暴露方法

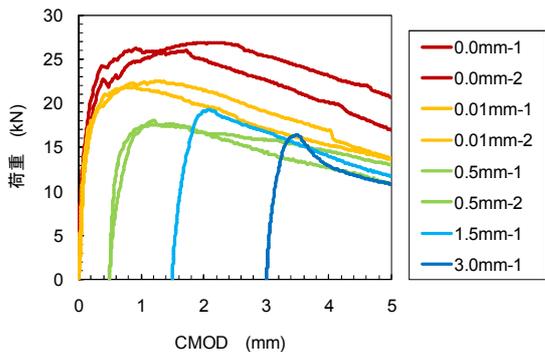


図-5 荷重-CMOD 曲線

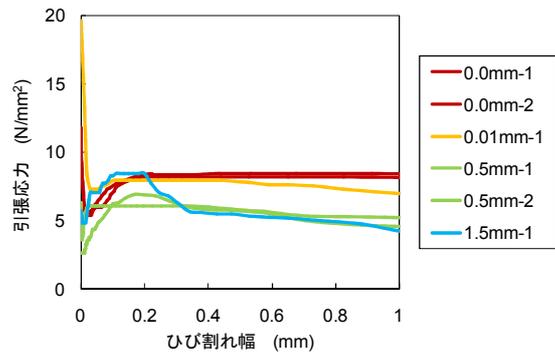


図-6 引張軟化曲線

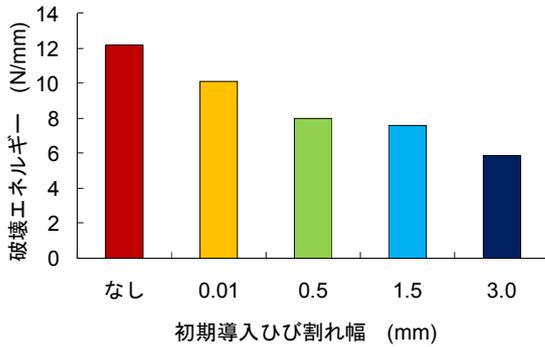


図-7 破壊エネルギー

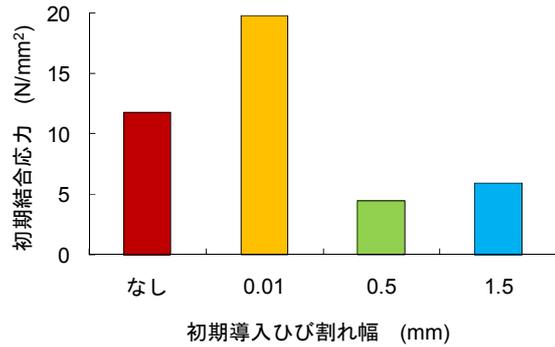


図-8 初期結合応力

の導入による鋼繊維の引抜けおよび鋼繊維が担保する引張応力が低下したことを示している。

3.3 初期結合応力

得られた引張軟化曲線に基づき、ひび割れ幅が 0mm での引張応力（引張軟化曲線の y 切片）を初期結合応力と定義した。本論文では、初期ひび割れを導入した供試体の曲げ試験の結果から得られた引張軟化曲線についても、ひび割れ幅が 0mm となるときの引張応力を初期結合応力とした。図-8 に引張軟化曲線で得られた初期結合応力を示す。初期導入ひび割れ幅 0.01mm の場合、初期導入ひび割れなしの場合と比較して、初期結合応力が増加した。これは後述するように未水和セメントの再水和や炭酸化によるひび割れの閉塞および鋼繊維の腐食による付着性能の向上が原因と考えられる⁶⁾。一方で、0.5mm および 1.5mm の場合に、初期結合応力が大きく減少した。これは、付着性能の低下および鋼繊維の引抜けが要因となっている。このような場合、設計時に期待する引張応力が十分に担保されないということが推測される。

3.4 EPMA による面分析

曝露終了後の供試体を対象に、EPMA を用いてひび割れ内部への塩化物イオン浸透性状を確認した。供試体長軸方向の中央部より、100×100×15mm 程度の板状試料を切り出し、風乾させた後、樹脂を含浸させた。樹脂の硬化後、100×100mm の面を研磨した。電気の導通を付与する目的で、表面に炭素を蒸着させ、これを EPMA 面分析試料とした。

図-9 に初期導入ひび割れ幅 0.5mm の供試体の EPMA 分析による結果を示す。これより、表層部のごく一部に塩化物イオン濃度の高い箇所が認められるが、内部まで浸透していないことが確認された。既往の研究⁷⁾においても、UFC は極めて低い水結合材比と高い養生温度によって、当初から硬化体の細孔構造の緻密化が進んでいること、単位セメント量が多く、未水和セメントを多く含んでいることから塩化物イオンの浸透が抑制されるとされている。本研究においても、海洋環境における長期曝露後もひび割れを有する UFC は、上記の高い塩化物イオン浸透抵抗性を示した。

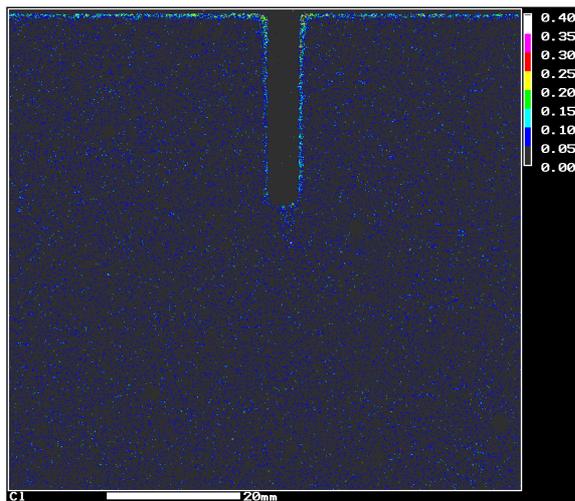


図-9 EPMA による塩化物イオン濃度の面分析結果
(初期導入ひび割れ幅 : 0.5mm, 単位は mass%)

初期導入ひび割れ幅 0.01mm の場合は、ひび割れ幅が 0.2mm 以上になっても、両方とも引張応力を維持する同様の挙動を示したのに対して、初期導入ひび割れ幅 0.5mm および 1.5mm の場合は、ひび割れ幅が 0.2mm 以上になった際に引張応力が低下した。このことから初期導入ひび割れ幅 0.5mm および 1.5mm の場合は、鋼繊維の架橋効果が十分に発揮されなかったことが分かる。

3.2 破壊エネルギー

上述の荷重-CMOD 曲線に基づき JCI-S-001-2003 に準拠して式(1)により破壊エネルギー G_f を算出した。

$$G_f = (0.75w_0 + w_1) / A_{lig} \quad (1)$$

ここで、

w_0 : 荷重-CMOD 曲線下の面積 (N・mm)

w_1 : 供試体の自重ならびに載荷具がなす仕事 (N・mm)

A_{lig} : リガメントの面積 (=7000mm²)

図-7 に算出した破壊エネルギーを示す。初期導入ひび割れ幅が大きいほど破壊エネルギーが小さくなった。これは、初期導入ひび割れ幅が大きくなった場合には、3.1 で述べたピーク荷重および曲げ剛性の低下、ピーク荷重を過ぎた後の急激な荷重の低下の結果であり、ひび割れ

3.5 マイクロ스코ープによる発錆面積率の推定

曝露試験および曲げ試験を終了した供試体の内部から鋼繊維をそれぞれ5本採取し、マイクロ스코ープを用いて全体の腐食状況の確認を行った。また、画像解析により、腐食生成物が発生している部分を抽出し、簡易的に二次元画像を二値化することで面積を測定した。この面積を撮影した範囲の鋼繊維の面積で除することによって発錆面積率を算出し、鋼繊維表面の腐食量を定量化した。以下に示す発錆面積率は、全ての画像から算出される値の平均値とした。さらに、EPMAの分析面と同様の面を切り出し、切欠き上端から上方1cm以内のひび割れを架橋する領域から鋼繊維を採取した。

図-10に、一例として、鋼繊維の表面状態、二値化処

理後の画像および発錆面積率の計算結果を示す。なお、発錆面積率は、初期導入ひび割れ幅ごとに示している。初期導入ひび割れ幅が0.01mmおよび0.5mmの供試体の鋼繊維の表面には腐食生成物はほとんど確認されなかった。これについて、画像解析により発錆面積率が2%程度であり、鋼繊維の腐食が進んでいないことを定量化できた。しかしながら、1.5mmおよび3.0mmの場合は発錆面積が大きく、著しい腐食（発錆面積率：50%程度）が生じていたことが確認できた。

3.6 反射電子像観察

反射電子検出器およびエネルギー分散型X線分散装置（以下、EDS）を付属した走査型電子顕微鏡（以下、SEM）を用いて初期導入ひび割れ幅0.5mmの供試体の切欠き

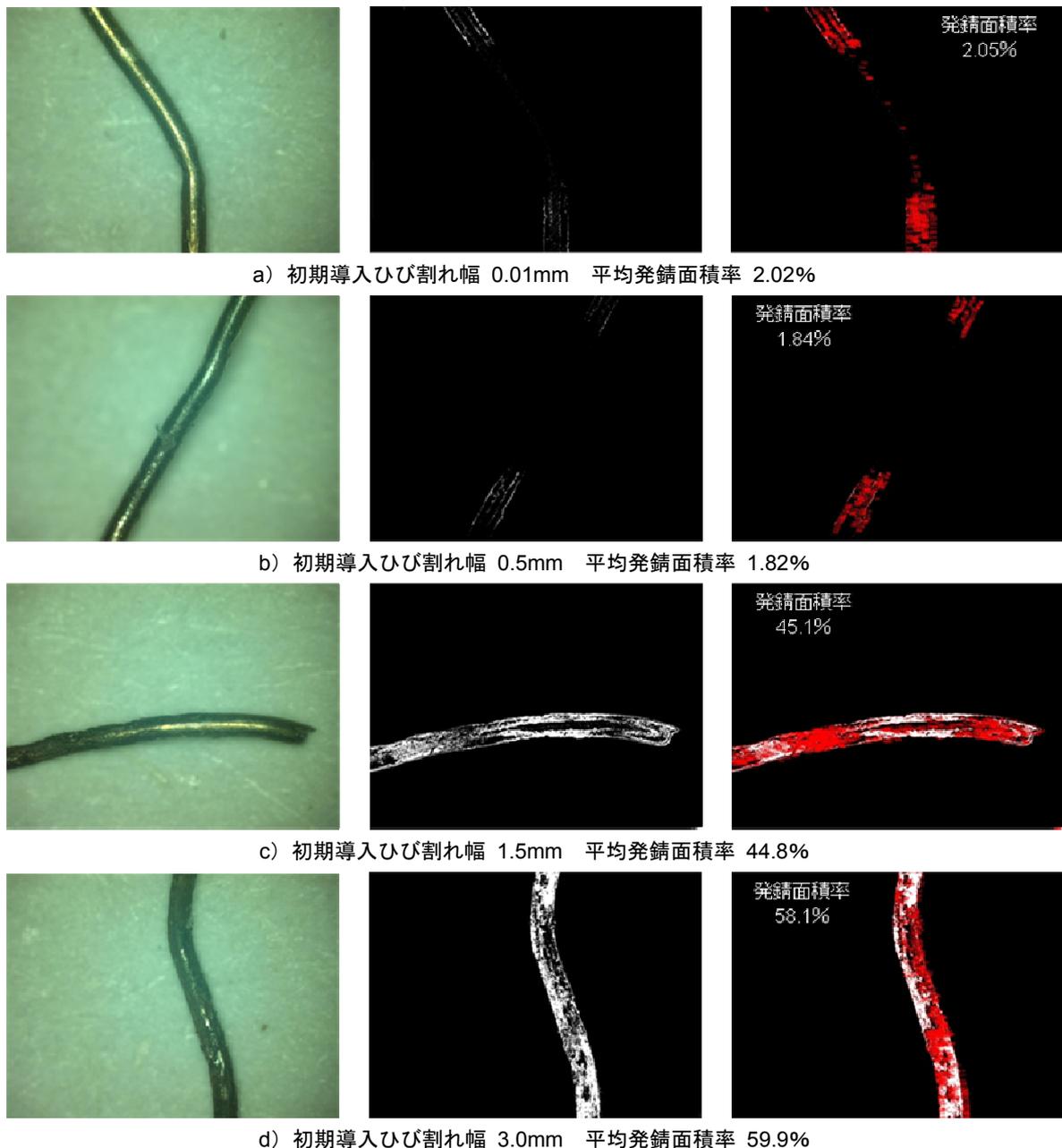
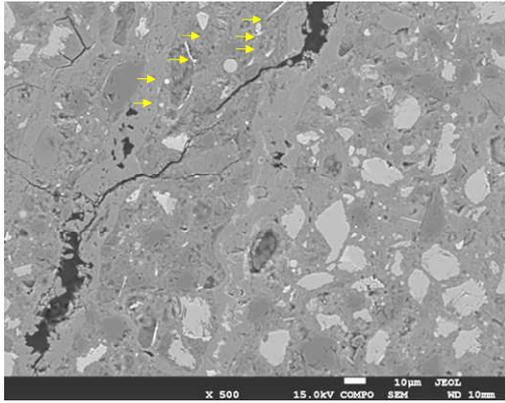
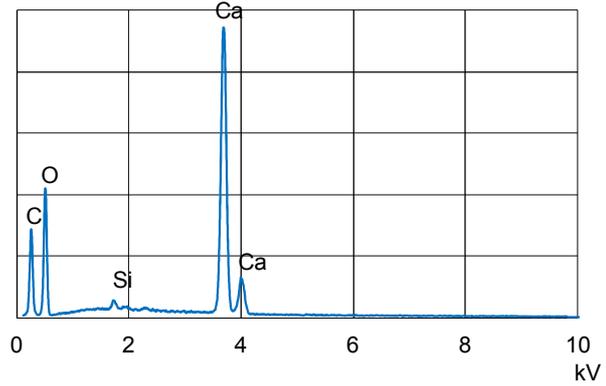


図-10 鋼繊維の腐食状況



a) 反射電子像：UFC



b) EDS による定性分析結果

図-11 SEM-EDS による分析結果

部より導入されたひび割れに着目して観察を行った。また、ひび割れ部に認められた析出物について EDS により構成元素の定性分析を実施した。ひび割れ近傍の反射電子像を図-11 に示す。なお、同図 a)中の矢印は、析出物によってひび割れが閉塞している箇所を示す。このひび割れ部に認められた析出物について、EDS による定性分析を行った結果を図-12 に示す。ひび割れ部には、Ca (カルシウム)、C (炭素) および O (酸素) が検出されたことから、炭酸カルシウムが析出していたと判断される。図-11 では炭酸カルシウムの析出によって、完全に閉塞された箇所も認められた。これと併せて、未水和セメントなどの再水和⁷⁾によって微細なひび割れが閉塞され、外部からの塩分浸透および鋼繊維の腐食が抑制されたことが推測される⁸⁾。以上のように、UFC に発生するひび割れについて、鋼繊維の腐食を促進するひび割れ幅と力学性能の低下を招くひび割れ幅、およびひび割れの閉塞を期待できるひび割れ幅には異なる閾値が存在すると考えられる。すなわち、鋼繊維の腐食、力学性能の低下およびひび割れの閉塞にはおおよそ 0.5mm 未満の許容値を設定するのが妥当と言える。

4. まとめ

海洋環境に5年間曝露されたひび割れを有する UFC 供試体の耐久性および経年的な力学性能について、以下のことが分かった。

試験体本数が少なく、試験結果のばらつきを含んでいるものの、本研究の範囲内では、ひび割れ幅が 0.5mm 以下の場合、鋼繊維の腐食の進行速度は遅いことが分かった。しかしながら、この場合にはひび割れの発生に伴う繊維の引抜けにより力学性能が低下した。また、ひび割れ幅が 0.01mm 以下の場合、未水和セメントの再水和によるひび割れの閉塞および鋼繊維のわずかな腐食による付着性能の向上も期待できる。今後、これらの影響を考慮して、UFC を適用した構造物に発生するひび割れの許

容値について検討する必要がある。

参考文献

- 1) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案)，コンクリートライブラリー，113号，2004
- 2) 田中良弘，福浦尚之，鶴沢哲史，坂本淳，前堀伸平，片桐誠：超高強度繊維補強コンクリートの引張特性と引張軟化曲線のモデル化，土木学会論文集，No.788/V-67，pp.159-173，2005
- 3) 河野克哉，川口哲生，江里口玲：PC 歩道橋に日本で初めて適用された超高強度繊維補強コンクリートの長期耐久性，太平洋セメント研究報告，Vol.165，pp.13-23，2013
- 4) 日本コンクリート工学協会：多直線近似法による引張軟化曲線の推定マニュアル，コンクリートの破壊特性の試験方法に関する調査研究委員会，2001
- 5) 橋本勝文，横田弘，豊田昂史，河野克哉：ひび割れを有する超高強度繊維補強コンクリートの海水浸漬後の引張軟化特性およびひび割れ性状，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.34，No.1，pp.220-225，2012
- 6) 兵頭彦次，新藤竹文，横田弘，下村匠：超高強度繊維補強コンクリートの塩分浸透性と鋼繊維の腐食に関する実験的検討，土木学会第 59 回年次学術講演概要集，第 V 部門，pp.1009-1010，2004
- 7) 下村哲雄，細田暁，岸利治：低水分粉体比コンクリートのひび割れ自己治癒性能，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.23，No.2，pp.661-666，2001
- 8) 河野克哉，川口哲生，橋本勝文，横田弘：海水作用を受ける超高強度繊維補強コンクリートの破壊特性に及ぼす水結合材比とひび割れ幅の影響，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，Vol.14，2013