

論文 初期ひび割れを通じて海水作用を受ける超高強度繊維補強コンクリートの力学特性と組成変化

河野 克哉^{*1}・川口 哲生^{*2}・橋本 勝文^{*3}・横田 弘^{*4}

要旨: 超高強度繊維補強コンクリート(以下, UFC)は, 高強度, 高靱性および高耐久性を有するものの, ひび割れを生じた場合には鋼繊維の腐食によって力学性能が低下する懸念がある。本研究では, 初期ひび割れ幅が異なる UFC を人工海水に浸漬した後の力学特性ならびに組成変化について検討した。その結果, 水結合材比がきわめて低い UFC の場合は, 内部で複数の微細な初期ひび割れを生じているが, 3年間ほど人工海水に浸漬した後でも曲げ耐荷性能が低下しないこと, UFC 内部に豊富に含まれる未水和セメントが海水と遅れて反応することでひび割れを自動的に閉塞する効果があることなどがわかった。

キーワード: 超高強度繊維補強コンクリート, ひび割れ, 海水, 腐食, 曲げ特性, 未水和セメント

1. はじめに

圧縮強度 200N/mm² 程度となる超高強度繊維補強コンクリート(以下, UFC)は, 鋼繊維の混入で引張特性を改善し, さらに高流動性と高耐久性を備えた建設材料である。このような UFC の特長は, きわめて低い水結合材比と高温の熱養生で早期に達成されるものであるが, 自己収縮が増大しやすく, 初期にひび割れを生じやすいといった課題もある。一般にひび割れが無い UFC 中の鋼繊維は, ごく表面に存在するもののみが腐食を生じて点錆となるものの, 緻密なマトリクスに保護された内部の鋼繊維は腐食しない。しかし, ひび割れを有する UFC では, ひび割れ面で架橋した鋼繊維が容易に腐食することで伝達応力の低下を引き起こすことが懸念されている。このため, 土木学会の UFC の設計・施工指針(案)では, i) UFC に発生する引張応力はひび割れ発生強度を超えないように設計することと, ii) UFC 内部に異形鉄筋を用いないことを原則としている¹⁾。

このような背景の下, 本研究では初期ひび割れを有する UFC の耐久性を評価した。具体的には, 初期ひび割れ幅ならびに水結合材比が異なる UFC 供試体を人工海水に浸漬した後, 曲げ試験による力学特性ならびに機器分析による塩化物イオン浸透状況や組成変化を検討した。

2. 実験の概要

2.1 コンクリートの使用材料, 配合, 練混ぜおよび養生

(1) 使用材料ならびに配合

表-1 に示すように, 結合材(以下, B)は, 低熱ポルトランドセメント(以下, C)ならびにシリカフェーム(以下, SF)の 2 種類とし, ヘンシェルミキサ(容量 100L)にて予

め混合してプレミックス粉体で用いた。また, 細骨材には珪砂(以下, S)を, 混和剤には高性能減水剤(以下, SP)を, 補強用短繊維には鋼繊維(以下, F)を使用した。

表-2 は配合を示したものであり, プレミックス粉体(B)は Furnace の最密充填理論²⁾による粒子の平均径(Cの場合 20 μ m, SFの場合 1.3 μ m)と空隙率(いずれの場合も 0.5)を用いた簡易計算にて体積比で C:SF=8:2 とした。水結合材比は体積比で 40%, 100%(それぞれ質量比で 13.2%, 32.7%)とし, 繊維混入率(以下, V_f)はコンクリート体積に対して内割で 2.0%とした。表-2 に示すように, W/B=13.2%の配合は圧縮強度(以下, f_c')210N/mm²を有するほか, ヤング係数 59.5k/mm², ひび割れ発生強度 10.5N/mm² および破壊エネルギー14.40N/mm となる UFC であり, W/B=32.7%の配合は一般的な繊維補強セメント系材料(以下, FRC)である。

(2) 練混ぜならびに養生

パン型強制ミキサ(容量 100L)に B, 水, SP を投入して 7 分間の練混ぜを行い, F を投入してさらに 2 分間の練混ぜを行った。いずれの配合も所定の型枠内に打ち込んで熱養生に供した。具体的には, 1 次養生(封緘養生: 20 $^{\circ}$ C, 24h)の後で脱型し, 2 次養生(蒸気養生: 昇温速度 15 $^{\circ}$ C/h, 最高温度 90 $^{\circ}$ C, 最高温度保持時間 48h, 降温速度 15 $^{\circ}$ C/h)を行った。

2.2 コンクリートの人工海水浸漬試験

(1) 供試体ならびに初期ひび割れの導入

供試体は, 図-1 に示すような切欠きはり(寸法 10 \times 10 \times 40cm)とし, 熱養生後にカッターにて切断して切欠きを導入した。JCI-S-002-2003 に準じて切欠きはりの 3 点曲げ試験を行い, 初期ひび割れを導入した。除荷後に

*1 太平洋セメント(株) 中央研究所 第 2 研究部 主任研究員 博(工) (正会員)

*2 (株)太平洋コンサルタント コンクリート技術部 博(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 寒冷地建設工学分野 助教 博(工) (正会員)

*4 北海道大学大学院 工学研究院 北方圏環境政策工学部門 寒冷地建設工学分野 教授 博(工) (正会員)

表-1 使用材料

種類	名称	略号	成分ならびに物性
結合材 (B)	低熱セメント	C	比表面積 3330cm ² /g, 密度 3.22g/cm ³
	シリカフェーム	SF	比表面積 10m ² /g, 密度 2.40g/cm ³
細骨材	珪砂	S	最大寸法 0.6mm, 密度 2.61 g/cm ³
短繊維	鋼繊維	F	長さ 15mm, 直径 0.2mm, 密度 7.85g/cm ³ , 引張強度 2.8GPa, 引張弾性率 210GPa, 直線状・平滑面
混和剤	高性能減水剤	SP	ポリカルボン酸系

表-2 配合

No.	W/B		SF/B (vl.%)	V _f (vl.%)	単位量 (kg/m ³)						Flow ^{*2} (mm)	f' _c (N/mm ²)
	(wt.%)	(wt.%)			W	C	SF	S	F	SP ^{*1}		
1	40	13.2	20	2	180	1146	214	927	157	24	277	210
2	100	32.7	20	2	313	805	150	927	157	3	110	68

*¹ Wの一部に内割置換 *² 落下振動を与えないフロー試験による値(JIS A 5201 準拠)

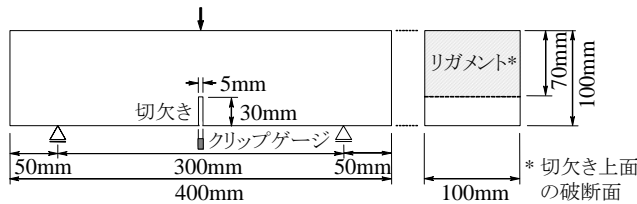


図-1 切欠きはりの3点曲げ試験方法

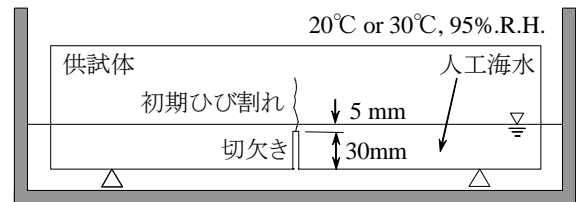


図-3 切欠きはり供試体の人工海水浸漬方法

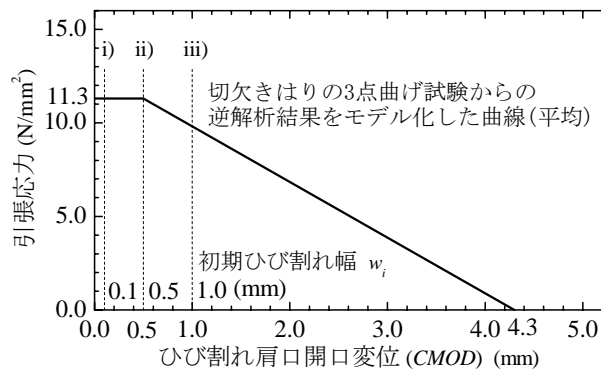


図-2 UFC 指針(案)に示された引張軟化曲線のモデル

における初期ひび割れ幅(以下, w_i)の目標値を, 0.1mm, 0.5mm および 1.0mm の3水準とし, その実測値はすべての供試体でそれぞれ 0.082~0.123mm, 0.413~0.580mm および 1.048~1.127mm の範囲である。また, 比較用として初期ひび割れを導入しない供試体も準備した。なお, w_i は切欠きはりの3点曲げ試験におけるひび割れ肩口開口変位(以下, $CMOD$)として測定された値である。

図-2はUFC指針(案)で規定された引張軟化曲線を示したものであり, 初期導入したひび割れの幅である i) 0.1mm, ii) 0.5mm, iii) 1.0mm は, UFC(本実験では $W/B=13.2\%$ の配合に相当)のひび割れ発生後において, それぞれ i)一定の引張応力を保持できる領域, ii)引張応力の低下が開始される点(軟化開始点), iii)引張応力が徐々に低下する領域, に対応した変位となっている。

(2) 切欠きはり供試体の人工海水浸漬

初期ひび割れを導入した供試体は, 図-3に示すよう

に試験研究用として処方が開示されている市販の人工海水に浸漬した。切欠きの肩口部から 5mm の深さとなるように供試体を浸漬することで, ひび割れ部分へ海水成分が毛管現象によって確実に浸透するようにした。すべての供試体は, 温度 20°C, 相対湿度 95%の環境にて人工海水へ 12 ヶ月浸漬し, 浸漬期間中は 1 ヶ月に 1 度の頻度にて人工海水を全量交換した。なお, $W/B=13.2\%$ の UFC の場合には, 温度 30°C, 相対湿度 95%の環境にて人工海水へ 36 ヶ月浸漬する水準も実施した。

(3) 荷重-CMOD 曲線の測定

図-1に示したように人工海水への浸漬前後における切欠きはりの3点曲げ試験を JCI-S-002-2003 に準じて実施し, 荷重-CMOD 曲線を測定した。なお, 鋼繊維を混入した供試体は最終的に破断しないため, ひび割れ発生後の最大荷重とその下降域が十分に確認できた時点 ($CMOD=5mm$)で曲げ試験を終了した。

(4) 塩化物イオン(以下, Cl⁻)浸透状況の観察

人工海水浸漬後の供試体からひび割れを含む形で試料(断面 70×70mm, 厚さ 10mm)を切り出し, 電子線マイクロアナライザー(以下, EPMA)による塩素(Cl)の面分析を JSCE-G574-2005 に準じて行った。

(5) 反射電子像の観察ならびに画像解析

EPMA 分析後の試料から SEM 観察用の試料(断面 20×40mm, 厚さ 10mm)を中央部にひび割れを含む形で切り出し, 反射電子像(以下, BSE 像)を得た。BSE 像のグレイレベルは観察対象物の平均原子番号に依存するため, このグレイレベルの差を利用して, ひび割れ近傍

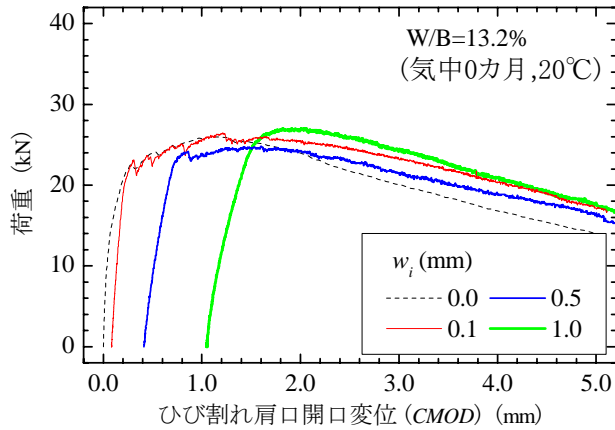


図-3 UFC の荷重-CMOD 曲線(気中0ヵ月)

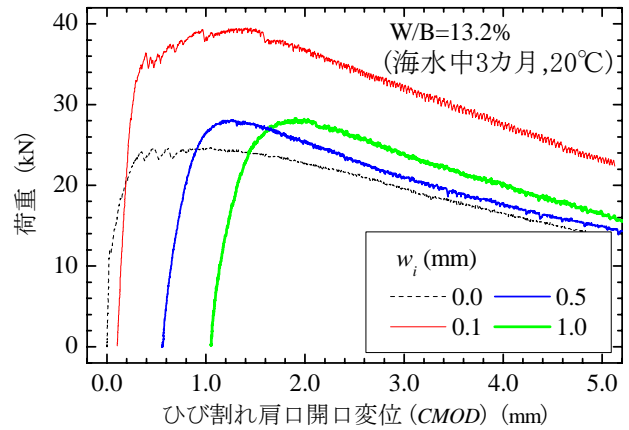


図-4 UFC の荷重-CMOD 曲線(海水中3ヵ月)

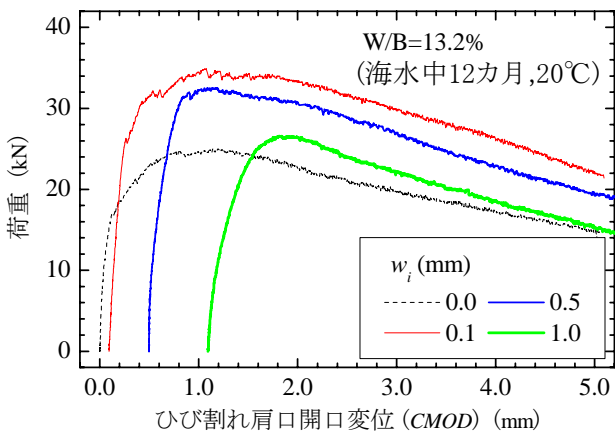


図-5 UFC の荷重-CMOD 曲線(海水中12ヵ月)

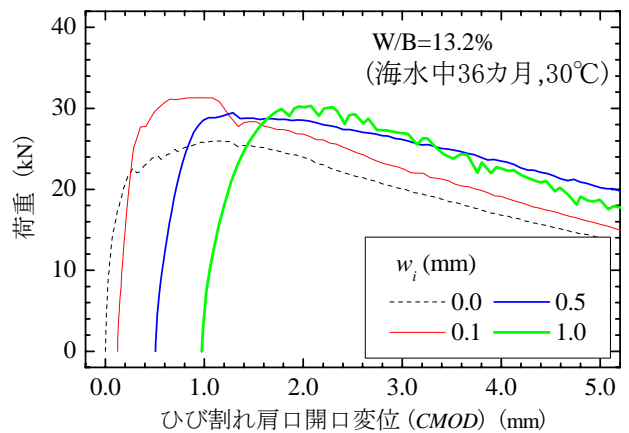


図-6 UFC の荷重-CMOD 曲線(海水中36ヵ月)

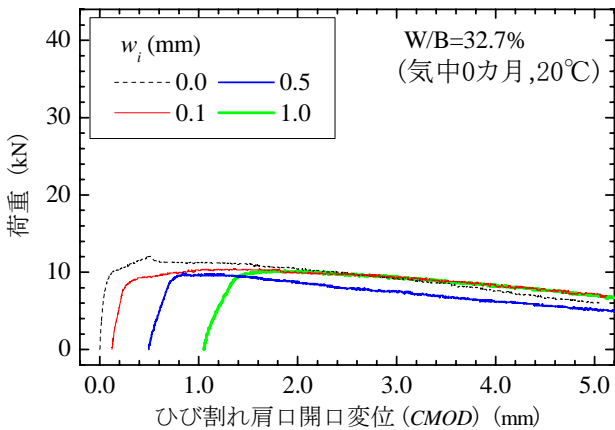


図-7 FRC の荷重-CMOD 曲線(気中0ヵ月)

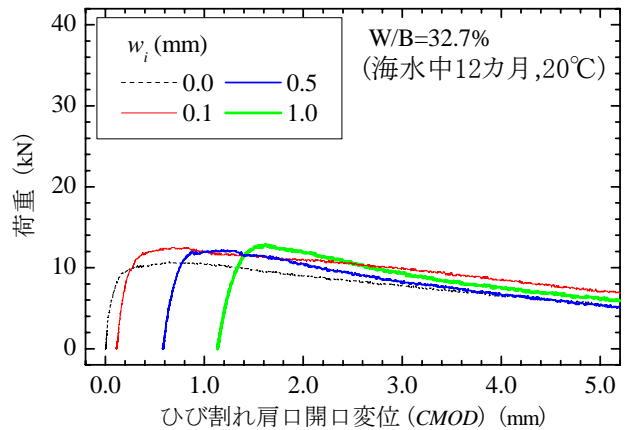


図-8 FRC の荷重-CMOD 曲線(海水中12ヵ月)

の未水和セメントと空隙が占める面積領域を抽出，2 値化し(1 試料につき 10 視野を観察)，それぞれの体積率(含有率)をステオロジー^{3),4)}から算出した。

3. 実験結果

3.1 初期ひび割れを有する UFC の荷重-CMOD 曲線

図-3，図-4 および図-5 は，初期ひび割れ幅が異なる UFC(W/B=13.2%)において，環境温度 20°Cの下で海水への浸漬前，浸漬 3 ヶ月後および浸漬 12 ヶ月後の荷

重-CMOD 曲線をそれぞれ示したものである。初期ひび割れが無い UFC の場合($w_i=0.0\text{mm}$)，海水に 3 ヶ月あるいは 12 ヶ月浸漬してもピーク荷重は浸漬前とほとんど変わらず，海水が UFC の力学特性に与える影響は小さい。これに対して，初期ひび割れを有する UFC の場合($w_i=0.1\text{mm}$ ， 0.5mm および 1.0mm)には，海水に浸漬 3 ヶ月ならびに 12 ヶ月浸漬することでピーク荷重が向上し，とくに初期ひび割れ幅が小さい場合($w_i=0.1\text{mm}$)にはピ

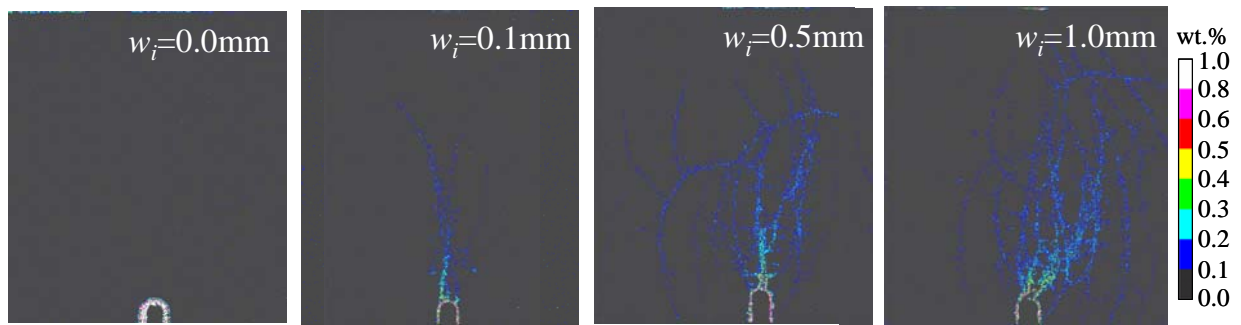


図-9 海水浸漬 3 ヶ月間で UFC (W/B=13.2%) の初期ひび割れから浸入した Cl⁻ の濃度分布

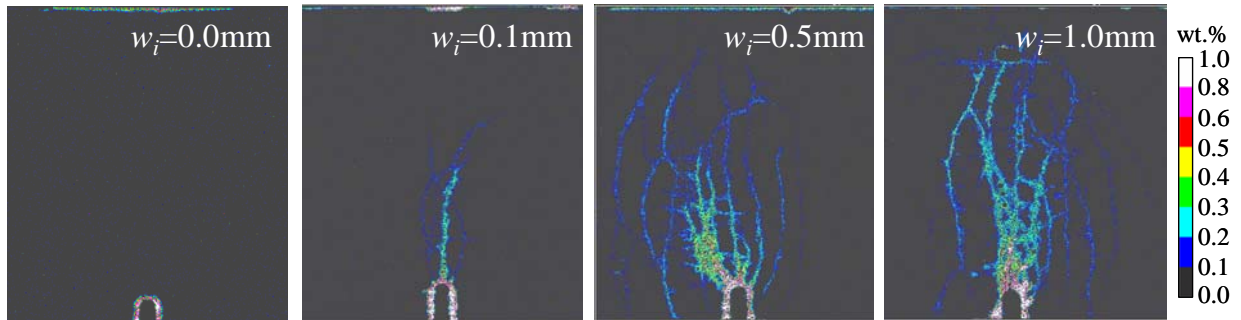


図-10 海水浸漬 12 ヶ月間で UFC (W/B=13.2%) の初期ひび割れから浸入した Cl⁻ の濃度分布

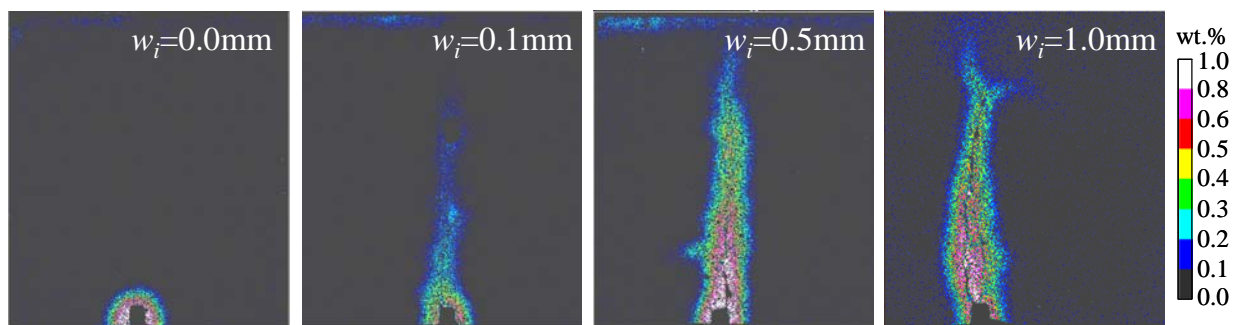


図-11 海水浸漬 12 ヶ月間で UFC (W/B=32.7%) の初期ひび割れから浸入した Cl⁻ の濃度分布

ーク荷重の大幅な増加が認められた。またピーク以降の挙動に着目すると、海水浸漬前の UFC では初期ひび割れ幅が異なってもほぼ一致しているものの、海水浸漬後の UFC では初期ひび割れが無い場合 ($w_i=0.0\text{mm}$) よりも初期ひび割れが有る場合 ($w_i=0.1\text{mm}$, 0.5mm および 1.0mm) の方が同じ *CMOD* に対して高い荷重を維持している。

図-6 は、初期ひび割れ幅が異なる UFC (W/B=13.2%) において、環境温度 30℃ の下で海水への浸漬 36 ヶ月後の荷重-*CMOD* 曲線を示したものである。いずれの初期ひび割れ幅の場合 ($w_i=0.1\text{mm}$, 0.5mm および 1.0mm) でも、初期ひび割れが無い場合 ($w_i=0.0\text{mm}$) に比べてピーク荷重ならびにピーク以降の荷重とも高くなった。

図-7 ならびに図-8 は、初期ひび割れ幅が異なる FRC (W/B=32.7%) において、環境温度 20℃ の下で海水への浸漬前ならびに浸漬 12 ヶ月後の荷重-*CMOD* 曲線をそれぞれ示したものである。海水浸漬前の FRC の場合、前述の UFC に比べて荷重レベルが低く、初期ひび割れ

の有無ならびに幅がピーク荷重ならびにポストピーク挙動に与える影響はほぼ無い。一方、海水浸漬後の FRC では、初期ひび割れが無い場合 ($w_i=0.0\text{mm}$) よりも初期ひび割れを有する場合 ($w_i=0.1\text{mm}$, 0.5mm および 1.0mm) の方がピーク荷重はやや高くなる傾向があるものの、前述の UFC の場合にくらべて初期ひび割れ幅がピーク荷重やポストピーク挙動に与える影響は小さいといえる。

これらの結果から、UFC は海洋環境下でひび割れを生じて、直ちに曲げ耐荷性能の低下を引き起こすことは無いものとする。曲げ試験後の供試体は、いずれの場合もひび割れ面で架橋した鋼繊維が引き抜けを生じていた(腐食による断面欠損での鋼繊維の破断はほぼ無い)。初期ひび割れを有する UFC が海水浸漬で生じる荷重増加の原因には、i) ひび割れ面のごく近傍に埋め込まれた鋼繊維が体積膨張した腐食生成物によってマトリクスからの引き抜け抵抗が増加し、載荷初期におけるひび割れ間の結合応力を向上させたこと、ii) 鋼繊維と

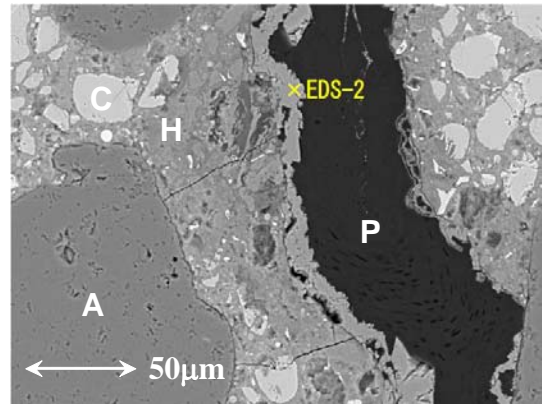
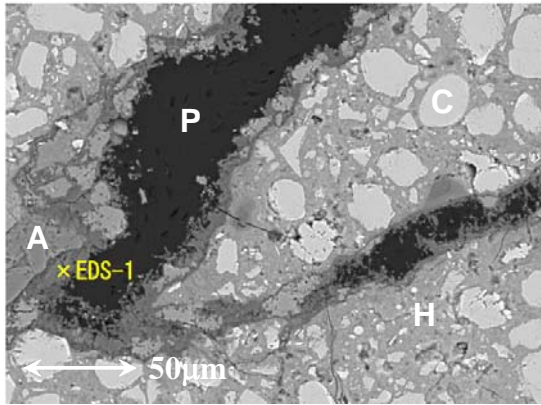


図-12 海水に12ヵ月間浸漬した UFC (W/B=13.2%) の BSE 像 (初期ひび割れ幅 $w_i=1.0\text{mm}$)

マトリクスの界面では鋼繊維の腐食生成物だけでなく海水との反応で生成した新しい水和物が付着を向上させたこと、などの関与が考えられる。

3.2 初期ひび割れを有する UFC の Cl⁻浸透状況

図-9 ならびに図-10 は、初期ひび割れ幅が異なる UFC (W/B=13.2%) を海水に3ヵ月ならびに12ヵ月浸漬した後の Cl⁻ マッピング画像をそれぞれ示したものである。初期ひび割れが無い UFC は、海水浸漬3ヵ月ならびに12ヵ月のいずれの場合も切欠き先端部のごく表面に Cl⁻ が存在するのみで、マトリクス内部には Cl⁻ が侵入していない。一方、初期ひび割れを有する UFC の場合では、ひび割れを通じて Cl⁻ が内部に浸入しており、海水浸漬が3ヵ月から12ヵ月と長くなるほど Cl⁻ が広く分布している。また、UFC の初期ひび割れ幅が増加するほど、切欠き先端部から内部に生じたひび割れ数が増加しており、初期ひび割れ幅が小さいとき ($w_i=0.1\text{mm}$) は1~3本の少数のひび割れから Cl⁻ が浸入するものの、初期ひび割れ幅が大きくなったとき ($w_i=0.5\text{mm}$ ならびに 1.0mm) には多数の微細なひび割れを通じて Cl⁻ が内部に浸入している。このような UFC における Cl⁻ 浸透は、ひび割れを毛管として海水を吸い込んだものであり、W/B がきわめて低いためにひび割れ近傍以外の緻密なマトリクス部分に Cl⁻ の拡散が進行していないといえる。

図-11 は、初期ひび割れ幅が異なる FRC (W/B=32.7%) を海水に12ヵ月浸漬した後の Cl⁻ マッピング画像を示したものである。初期ひび割れが無い FRC ($w_i=0.1\text{mm}$) は、初期ひび割れが無い UFC に比べて切欠き先端部から内部に Cl⁻ が浸透している。また、初期ひび割れを有する FRC ($w_i=0.5\text{mm}$ ならびに 1.0mm) では初期ひび割れ幅にかかわらず内部に生じたひび割れ数は1本のみであり、初期ひび割れ幅が大きいほど深い位置まで Cl⁻ が到達している。この1本のひび割れから浸入した海水がひび割れ側面方向のマトリクスに対して拡散することで、Cl⁻ が高濃度で分布する領域が広がっている。

UFC は、切欠き肩口で計測されるひび割れが大きく開

いても内部に生じたひび割れは複数かつ微細であり、その微細なひび割れ部分以外では Cl⁻ 浸透を生じていないことから、W/B が高い FRC に比べてマトリクス内部で鋼繊維の腐食が進行しにくくなっているものと推察される。このような UFC 独自のひび割れの発生状況が海水浸漬後の曲げ特性に影響したものと考えられる。

3.3 初期ひび割れを有する UFC の組成変化

図-12 は、初期ひび割れ幅 $w_i=1.0\text{mm}$ とした UFC (W/B=13.2%) を海水に12ヵ月浸漬した後の BSE 像を一例として示したものである。BSE 像では、鉄 (Fe) やカルシウム (Ca) のような重元素を含む部分は明るく、炭素 (C) のような軽元素を含む部分は暗く表示される。すなわち、鋼繊維は白く、次いで未水和セメント (凡例:C)、セメント水和物 (凡例:H)、骨材 (凡例:A) の順で暗くなり、空隙 (ひび割れを含む) (凡例:P) はもっとも黒く表示される。そのため、撮影された BSE 像を画像解析することで、マトリクス組成の判別や定量が可能となる。

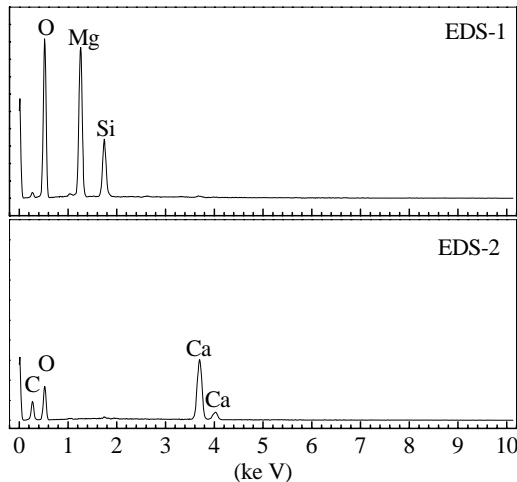
表-3 は、BSE 像の画像解析から算出された UFC (W/B=13.2%) ならびに FRC (W/B=32.7%) 中の未水和セメントならびに空隙の体積含有率を示したものである。初期ひび割れが無い UFC の場合 ($w_i=0.0\text{mm}$)、UFC 体積の 41.1% が未水和セメントで構成されており、UFC の初期ひび割れ幅が増加すると $w_i=0.1\text{mm}$ の場合 37.9%、 $w_i=0.5\text{mm}$ の場合 37.6%、 $w_i=1.0\text{mm}$ の場合 36.4% というように徐々に未水和セメントが減少している。これは、ひび割れを通じて浸入した海水が UFC 中の豊富な未水和セメントと遅れて反応することを示唆している。一方、UFC よりも W/B が大きい FRC では、初期ひび割れが無い場合 ($w_i=0.0\text{mm}$) における未水和セメントの含有率は 23.4% となっており、UFC に比べて残存する未水和セメント量は少ないことがわかる。また FRC の初期ひび割れ幅が増加しても、 $w_i=0.1\text{mm}$ の場合 23.1%、 $w_i=0.5\text{mm}$ の場合 22.9%、 $w_i=1.0\text{mm}$ の場合 22.1% というように未水和セメント含有率はほとんど変化しない。

図-12 に示した BSE 像からひび割れ部分 (試料の中央

表一 海水浸漬 12 ヶ月後の各組成の体積含有率 (%)

		w_i (mm)				
		0.0	0.1	0.5	1.0	
W/B (%)	13.2 (UFC)	組成 C	41.1	37.9	37.6	36.4
		組成 P	6.5	7.7	8.8	8.3
	32.7 (FRC)	組成 C	23.4	23.1	22.9	22.1
		組成 P	9.8	10.5	11.6	12.4

注 1) 組成 C: 未水和セメント, 組成 P: 空隙(ひび割れ含む)
 注 2) 各分析断面において任意 10 視野のデータを平均化



図一 13 EDS によるひび割れ近傍析出物の定性分析

部切欠き先端から深さ 10mm 程度のひび割れ近傍部、図中の凡例 P はひび割れ)には周囲のマトリクスとは異なる析出物の存在が観察できる。図一 13 は、この析出物に焦点を合わせて、図一 12 中に示した点 EDS-1 ならびに点 EDS-2 の各ポイント位置において、EDS による定性分析で簡便な形で推定した結果を示したものである。点 EDS-1 の位置では、マグネシウム(Mg)、珪素(Si)および酸素(O)が検出されており、海水由来の Mg とセメントの水和で生成した珪酸マグネシウム水和物(M-S-H)と推察される(海水に浸漬せず気中で保管した供試体では検出されていない)。また、点 EDS-2 の位置では、カルシウム(Ca)、炭素(C)および酸素(O)が検出されたことから海水中の炭酸イオンと反応して析出した炭酸カルシウムと推察される。この分析試料はカーボン蒸着処理をしているものの、ごく薄い均一な膜として試料全体に存在しており、海水浸漬していない供試体では検出されないことから海水作用による生成物と判断できる。

このように初期ひび割れを有する UFC は、ひび割れ部の近傍に含まれる豊富な未水和セメントがひび割れから浸入した海水と徐々に反応することで、ひび割れを自的に閉塞しているものと考えられる。実際に筆者らは既往の実験において、海水浸漬前後の初期ひび割れ深さを弾性波法(直角回折法)にて計測したところ、海水に浸漬することで UFC のひび割れ深さが減少することを確認している⁵⁾。したがって、ひび割れ部に水和物が析出する

現象も、初期ひび割れを有する UFC が海水にさらされた場合でも 1~3 年間に渡って曲げ耐荷性能が低下しないことの一因になっているものと推察する。

4. まとめ

本研究では、初期ひび割れ幅が異なる UFC を FRC と比較する形で海水に 1~3 年間浸漬し、曲げ試験による力学特性、EPMA による Cl 浸透状況、BSE 像の画像解析と SEM-EDS 定性分析による組成変化を検討した。本研究で得られた成果をまとめると、以下のとおりである。

- (1) 初期ひび割れを有する UFC は、海水浸漬によってピーク荷重ならびにピーク以降に保持できる荷重が増加し、初期ひび割れ幅が小さいほどピーク荷重やポストピーク挙動が向上した。
- (2) W/B=13.2% の UFC では、初期ひび割れ幅が 0.1mm の場合は 1~3 本の少数のひび割れから Cl が浸入し、初期ひび割れ幅が 0.5mm ならびに 0.1mm の場合では多数の微細なひび割れを通じて Cl が浸入するもの、いずれの場合もひび割れ部分以外の内部に Cl は拡散していない。
- (3) 初期ひび割れが無い UFC は UFC 体積の 40% 以上が未水和セメントで構成されており、初期ひび割れを有する UFC ではひび割れを通じて浸入した海水との反応によって未水和セメント含有率が低下する。
- (4) 初期ひび割れを有する UFC はひび割れ部で珪酸マグネシウム水和物や炭酸カルシウムが析出しており、豊富な未水和セメントと海水の反応でひび割れを自的に閉塞するような現象が観察される。

謝辞

本研究の実施に当っては、当時の北海道大学大学院工学研究科の豊田昂史氏、北海道大学工学部の高橋和宏氏ならびに上松瀬慈氏にご協力を頂きました。ここに記して感謝致します。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリートライブラリー113 超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案), 2004
- 2) 三輪茂雄：粉粒体工学, 朝倉書店, pp.140-145, 1972
- 3) Ewald R. Weibel : Stereological Methods, Practical Methods for Biological Morphometry, Volume 1, Academic Press, 1979
- 4) Ewald R. Weibel : Stereological Methods, Theoretical Foundations, Volume 2, Academic Press, 1979
- 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集, Vol.34, No.1, pp.220-225, 2012