

論文 超高強度繊維補強コンクリートの海洋環境暴露後の疲労特性に関する実験的検討

渡邊 有寿*1・柳井 修司*2・宮口 克一*3・藤原 浩巳*4

要旨: 超高強度繊維補強コンクリート (以下, UFC) は, 高強度, 高じん性, 高耐久性といった優れた性能を有するものの, 供用期間中に設計で想定する以外の要因によってひび割れが生じた場合, 鋼繊維の腐食によって力学性能の低下を引き起こすことが懸念される。本研究では, UFC の適用限界を把握する基礎的研究の一環として, 海洋環境に約4年間暴露した UFC の曲げ疲労試験を行い, 力学性能の経年的な変化を確認した。また, 塩化物イオンの浸透状況や鋼繊維の腐食状況を観察した。その結果, ひび割れが残留し, 塩化物イオン, 水および酸素が侵入する環境下で疲労を受ける際は, 疲労強度が低下する可能性があることが分かった。
キーワード: 超高強度繊維補強コンクリート, 海洋環境, ひび割れ, 曲げ疲労, S-N 曲線, 腐食

1. はじめに

超高強度繊維補強コンクリート (以下, UFC) は, 圧縮強度が 150/mm² 以上, 引張強度が 5N/mm² 以上の特性値を有する高強度, 高じん性の材料である。UFC は鋼繊維を多量に混入することで優れた引張強度を達成しており, UFC 指針の引張軟化曲線モデルに基づけば, 鋼繊維の架橋効果によってひび割れ幅が抑制・分散され, 開口変位 0.5mm 程度までは最大応力が保持できるため, 即座に耐荷性能が低下しないのが UFC の特性と言える。そのため, 仮に地震など供用中に想定外の荷重によってひび割れが生じても高い変形性能が期待できる。

しかし, ひび割れが生じた UFC では, ひび割れを架橋する鋼繊維が腐食することで耐荷性能が低下することが懸念されている。このため, 土木学会の「超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針 (案)」(以下, UFC 指針) では, 設計上は使用限界状態ではひび割れ発生を許容していない。また, ひび割れ発生要因となる UFC の収縮を拘束させないように, 部材間の接合部など特殊な場合を除いて異形鉄筋は配置しないことを標準としており, UFC を用いた構造物はプレストレストコンクリート構造物として設計されることが一般的である。

UFC にひび割れが無い場合, ごく表面に存在する鋼繊維は点錆となるものの, 緻密なマトリクスに保護された内部のものは腐食しない。一方で, 設計で想定する以外の要因によってひび割れが発生したことを考えた場合, ひび割れが残留した UFC の耐久性を考慮した力学特性は明らかにされているとは言い難い。UFC の適用範囲を検討するため, 海洋環境暴露試験, 人工海水浸漬および温海水乾湿繰返しによる促進試験など様々な検討がさ

表-1 AFt 系 UFC の基本配合

フロー値*1 (mm)	空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)				補強用*6 鋼繊維 (kg)
		水*2	結合材*3	骨材*4	高性能*3 減水剤	
250	2.0	195	1,287	905	32.2	137.4 (1.75vol%)

*1: フロー試験 (JIS R 5201, 落下なし); 打込み時の目標値
*2: 高性能減水剤の水分を含む *3: 密度2.98g/cm³
*4: 表乾密度2.66g/cm³, 吸水率1.18% *5: ポリカルボン酸系
*6: φ0.2mm, 引張強度2,000N/mm², L=15mm, 22mm, 密度7.85g/cm³

れており, 残留ひび割れを有する場合にそのひび割れ幅 (0.2~0.5mm 以上) と腐食条件によっては静的曲げ強度が低下することも報告されている^{1) 2) 3) 4)}。

本研究では, さらに UFC の適用限界を把握する基礎的研究の一環として, 初期ひび割れを含めた UFC の力学性能の経年的な変化を「疲労」を主眼として確認することを目的とし, 海洋環境に約4年間暴露した UFC 供試体の曲げ疲労試験を行った。また, 塩化物イオンの浸透状況および鋼繊維の腐食状況を観察した。

2. 供試体の概要

2.1 使用材料および配合

本研究に用いた UFC は, エトリンナイト生成系 UFC (以下, AFt 系 UFC) であり, 2006年に土木学会「技術評価制度」により, UFC 指針に準拠した設計・施工が可能であるものと評価を受けたものである⁵⁾。実験に供した AFt 系 UFC の配合を表-1に示す。AFt 系 UFC の結合材は, ポルトランドセメントとポゾラン材およびエトリンナイト生成系混和材で構成されている。骨材は 2.5mm 以下に粒度調整したものを使用し, 鋼繊維は引張

*1 鹿島建設 (株) 技術研究所 土木材料グループ 主任研究員 工修 (正会員)

*2 鹿島建設 (株) 技術研究所 土木材料グループ 上席研究員 工修 (正会員)

*3 デンカ (株) 青海工場 セメント・特混研究部 グループリーダー 工博 (正会員)

*4 宇都宮大学 地域デザイン科学部 社会基盤デザイン学科 教授 工博 (正会員)



写真-1 供試体の作製状況



写真-2 海洋環境暴露状況

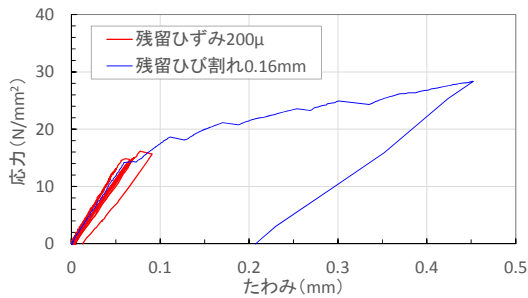


図-1 载荷状況および応力-たわみ曲線

表-2 試験ケース

環境	経過	供試体	No.	ひび割れ	静的強度試験		疲労試験	分析試験
					圧縮	曲げ		
海洋暴露*1	2年	φ100		なし	○3			
	5年	φ100		なし	○3			
	4年	□100	①	なし		○1	○2	○1
			②	残留ひずみ200μ		○1	○2	○1
			③	残留ひび割れ0.1mm		○1	○2	○1

*1: メンテナンスによる海水シャワー停止期間1年4か月 ○印隣の数字はN数

μ (ひび割れ目視できず), ③残留ひび割れ 0.1mm 程度 (実測0.13~0.16mm) の3種を基本の分類とした。なお, 0.1mm 以上のひび割れ幅を残留させるには, ピーク強度 (30.3N/mm²) の約 9 割の応力が必要であり, ケース③は UFC 指針の使用限界状態の領域からは外れている。

2.4 海洋環境暴露試験

供試体は, 国立研究開発法人港湾空港技術研究所 (神奈川県横須賀市) 内の長期暴露試験施設のうち「海水シャワー暴露試験場」に設置した。暴露状況を写真-2に示す。飛沫帯を模した本試験場は, 「自然海水散布 4hr+乾燥 8hr」を 1 サイクルとしており, 人工海水でなく実際の海水を使用することで, Mg 等の影響も加味できる。

ここで, 当初計画では 4 年間の暴露期間を全て本試験場で海水散布する予定であったが, メンテナンスにより約 1 年 4 か月は海水散布が停止しており, この期間は同施設の「海上大気暴露試験場」と同等の環境とみなした。なお, 供試体はひび割れ導入面 (引張縁) が上面となるように設置した。

2.5 試験ケース

本研究では, 4 年間の暴露から供試体を回収し, 表-2に示す試験ケースにて各種静的強度試験および曲げ疲労試験を行った。なお, 圧縮強度試験用供試体に関しては, 作製後速やかに暴露試験場に設置しているが, 曲げ強度試験用供試体については暴露開始までに約 2 年間室内環境 (温度 20℃, 湿度 60%) にて保管している。

3. 試験概要

3.1 静的強度試験

疲労試験に先立ち, ここでは回収した供試体の静的強度を把握するために, 圧縮強度試験 (JIS A 1108) および曲げ強度試験 (JSCE-G552) を実施した。試験は応力制御

強度 2,000N/mm² 以上で直径 0.2mm であり, 長さ 15mm と 22mm を混合したものである。

2.2 供試体の作製

本研究に用いた供試体は, 羽田空港 D 滑走路の棧橋部に適用した UFC 製プレキャスト PC 床版 (以下, UFC 床版)⁶⁾ の製作時に, 製作工場のバッチャープラント (二軸式強制ミキサ, 容量 3.0m³) で製造された AFt 系 UFC から採取した (写真-1)。曲げ強度試験用の供試体は 100×100×400mm の角柱供試体であり, UFC 指針に準拠し合流部が生じないように片側から流し込むように打ち込んだ。養生は, UFC 床版と同様に打込み後に養生シートを被せ, 温度 20~30℃ の環境で 12~16 時間後に脱型し, その後蒸気養生槽にて最高温度 85℃ を 24 時間保持させた (昇温速度+15℃/hr, 降温-3℃/hr)。なお, 圧縮強度試験用に φ100×200mm の円柱供試体も作製した。

2.3 ひび割れおよび残留ひずみの導入

曲げ供試体は, JSCE-G552 「鋼繊維補強コンクリートの曲げ強度および曲げタフネス試験方法 (案)」に準じ, 切欠きのない 3 等分点曲げ試験を行った (支点間距離 300mm)。载荷状況を図-1 に示す。ひび割れ幅をマイクロスコープで直接計測するとともに, 等曲げ区間に設置した π 型変位計の変位をひずみに換算して, 除荷後に所定のひび割れ幅やひずみが残留するよう管理した。本手法にて, ①ひび割れなし (载荷なし), ②残留ひずみ 200

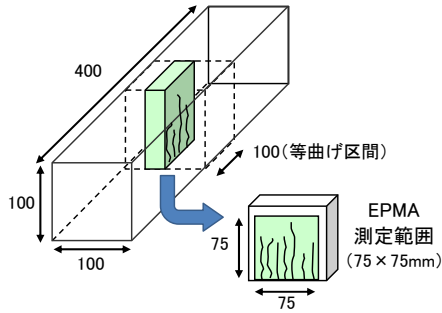


図-2 分析用試料の切り出し

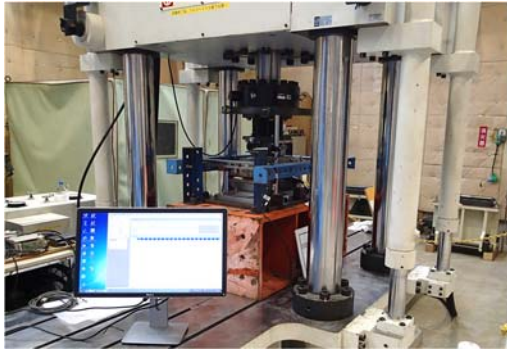


写真-3 疲労試験機（サーボパルサ）

とし、圧縮強度試験の荷重速度は $0.6\text{N}/\text{mm}^2/\text{sec}$ 、曲げ強度試験は $0.06\text{N}/\text{mm}^2/\text{sec}$ とした。曲げ強度試験については、UFC 指針に準じて、曲げひび割れ発生強度から割裂引張試験によるひび割れ発生強度も換算した。

3.2 塩化物イオン浸透状況観察

供試体から図-2 に示すようなひび割れを含む形で試料を切り出し、JSCE-G574-2005 に準じて電子マイクロアナライザ（EPMA）による面分析にて塩化物イオンの浸透状況を確認した。また、走査型電子顕微鏡（SEM）による反射電子像を観察し、鋼繊維の腐食状況を確認した。

3.3 曲げ疲労試験

曲げ疲労試験は、写真-3 に示す 500kN サーボパルサを用いて図-3 に示すような荷重および計測方法で実施した（支点間距離 320mm）。試験は気中で行い、変位はレーザー変位計とアクチュエータのストローク変位計で計測した。また、①ひび割れなし、②残留ひずみ供試体については、等曲げ区間に π 型変位計を設置し、③残留ひび割れ供試体については、最大のひび割れ幅を跨ぐように亀裂変位計を設置し、開口変位を計測した。

いずれの供試体においても、荷重応力は、回収した供試体のうち、①ひび割れなし供試体の静的曲げ強度 f_m の 40% とし、下限応力 σ_{\min} は f_m の 5% とした。試験は 4Hz の荷重制御で最大 200 万回の繰返し荷重とした。

4. 試験結果および考察

4.1 静的強度試験

(1) 圧縮強度試験結果

圧縮強度試験は暴露から 2 年後、5 年後に実施した。圧縮強度は、初期値（UFC 床板製作時）： $196.1\text{N}/\text{mm}^2$ 、2



レーザー変位計・ π 型変位計 亀裂変位計

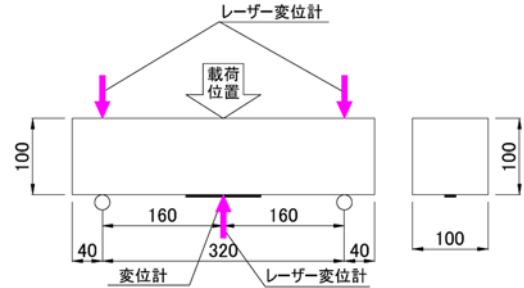


図-3 荷重および計測方法

表-3 静的曲げ強度試験結果

経過	No.	ひび割れ	静的曲げ強度試験			
			曲げ	曲げひび割れ	割裂 ^{*1} ひび割れ	割裂 ^{*1} 引張
0年		なし(製作時)	30.3	13.8	9.5	10.2
4年	①	なし	32.2	14.2	10.9	13.6
	②	残留ひずみ 200 μ	29.9			10.9
	③	残留ひび割れ 0.1mm	32.1			11.8

*1: UFC指針の換算式に則り算出

単位: N/mm^2

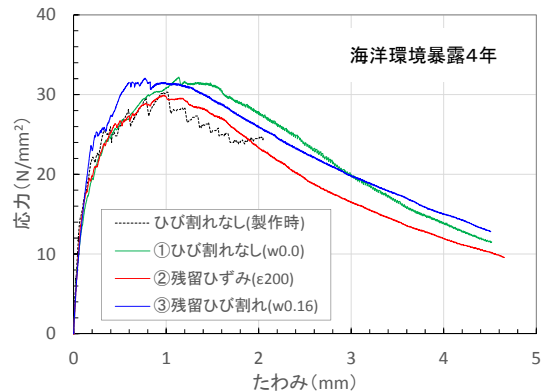


図-4 静的荷重の応力-たわみ曲線

年後： $206.1\text{N}/\text{mm}^2$ 、5 年後： $230.6\text{N}/\text{mm}^2$ と蒸気養生後も 5 年間に渡り強度が徐々に増加する傾向を示した。

(2) 曲げ強度試験結果

暴露 4 年後の各ケースにおける静的曲げ強度試験結果を表-3 に、応力-たわみ曲線を図-4 に示す。①ひび割れがない供試体では、暴露前の初期値に対して暴露後はピーク強度が増加している。これは、前述の圧縮強度の増加に示すように、繊維周辺のマトリクスが緻密化されていることが理由と推察される。これに対し、②残留ひずみを 200μ と与えた供試体では、ピーク強度は初期値に対して横ばいであるが、前述①が強度向上していることを鑑みると、本供試体はマイクロクラックによって強度が若干低下しているものと判断された。さらに、③残留ひ

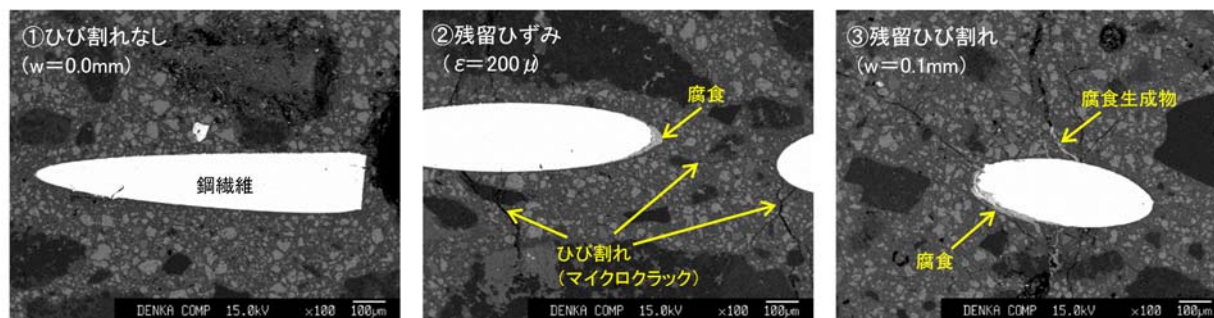


図-6 鋼繊維周辺の元素分析（反射電子像）

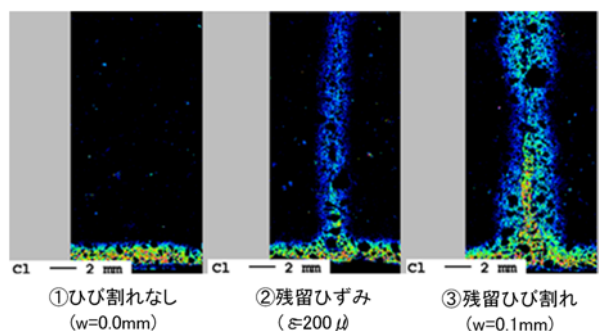


図-5 ひび割れから侵入した塩化物イオンの濃度分布（海洋環境暴露4年）

ひび割れ幅 0.1mm 程度の供試体では、初期値に対してピーク強度の増加が認められるとともに、ピーク以降の維持応力も高くなった。これは、残留ひび割れから侵入した塩化物イオンや酸素によって鋼繊維周囲に腐食生成物が発生し、マトリクスとの付着力や引抜き抵抗性が向上したためと推察された。なお、いずれのケースにおいても曲げ試験後の供試体はひび割れ面で架橋した鋼繊維が破断せず引き抜ける破壊モードであった。

4.2 塩化物イオン浸透状況の観察

暴露後に切り出した試料の EPMA による塩素マッピング画像を図-5 に示す。図より、①ひび割れがない供試体では、塩素は供試体表面から約 2mm のごく表面に存在するのみである。これに対し、②残留ひび割れを 200 μ 与えた供試体では、目視では観察できなかった微細ひび割れが切断面にて確認でき、この微細ひび割れを通じて塩化物イオンが内部に浸透していることも確認された。なお、ひび割れの深さ方向に対して塩素の濃度分布がみられるが、ひび割れの直角方向であるマトリクス側に向かった浸透範囲は約 2mm までである。③残留ひび割れ 0.1mm 程度の供試体には大小複数のひび割れが見られ、塩化物イオンの浸透範囲は 2mm 程度であるが、ひび割れ幅が大きいことから②よりも強い濃度分布となった。

次に、塩化物イオンが浸透した箇所の鋼繊維を SEM によって元素分布を確認した。ここでは、暴露試験体での反射電子像の例を図-6 に示す。図より、①ひび割れがない供試体では、元素は Fe のみが検出、O は検出されなかったため、鋼繊維は腐食していないと判断した。これに

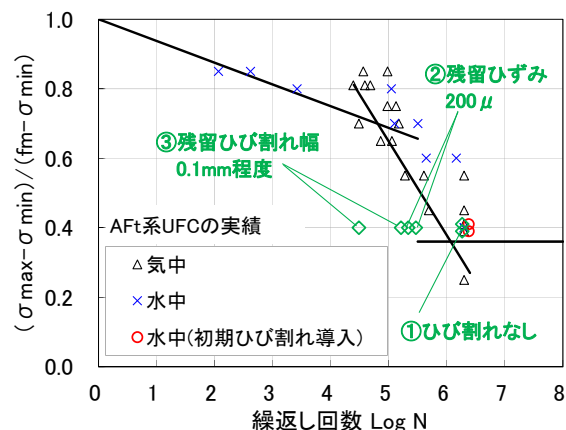


図-7 曲げ疲労試験結果（S-N 曲線）

対し、②残留ひび割れ 200 μ を与えた供試体では、鋼繊維のごく表面（写真の灰色部分）には Fe に加え O が検出されたため、酸化鉄 Fe_2O_3 や水酸化鉄 $Fe(OH)_3$ 等の腐食生成物の存在が示唆され、図に示すマイクロクラックから塩化物イオンや酸素がわずかに供給されたものと推察された。③残留ひび割れ 0.1mm 程度の供試体についても、ひび割れが鋼繊維表面に達している箇所は腐食しており、腐食生成物が鋼繊維ごく近傍のひび割れを埋めるように生成していることが確認された。なお、いずれのケースにおいてもひび割れが鋼繊維に達していない部分は腐食していない。

4.3 曲げ疲労試験

(1) S-N 曲線

①ひび割れがない供試体の静的曲げ強度の 40% を載荷応力とした気中曲げ疲労試験を行った。各ケースの結果をこれまでに得られている AFt 系 UFC の S-N 曲線とともにプロットした（図-7）。疲労試験結果より、①ひび割れがない供試体は 200 万回に達しても破断せずに、UFC 指針式およびこれまでの知見に対して同等の耐疲労特性を保持していることが確認された。これに対し、②残留ひび割れ 200 μ および③残留ひび割れ 0.1mm 程度の供試体では、UFC 指針の S-N 曲線よりも早期に破断する結果となった。

ここで、AFt 系 UFC は、UFC 指針と同様に気中での曲げ疲労試験⁵⁾に加え、水中曲げ疲労試験を実施している。さらには、0.1mm 以下の微細ひび割れの導入後に水

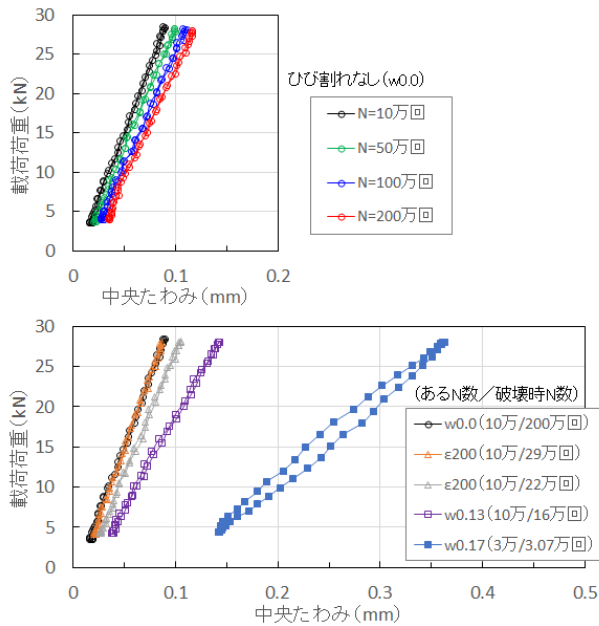


図-8 繰り返し载荷によるたわみの変化

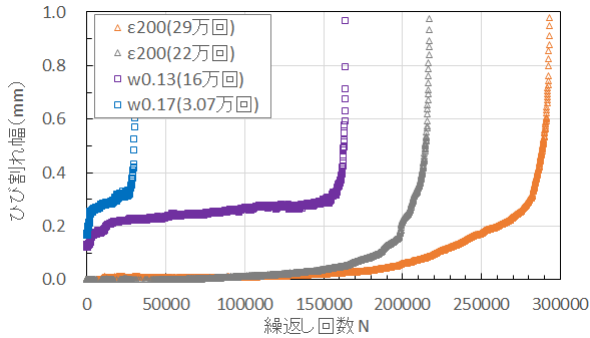


図-9 繰り返し载荷によるひび割れ幅の進展

中での曲げ疲労試験に供しており (S-N 曲線図中, 赤○印), 200 万回まで破壊しないことを確認している。これらの試験は, 塩分や酸素といった劣化因子が侵入していない条件であり, 本研究で得られた結果には, 海洋環境かつ気中での長期暴露がひび割れを架橋する鋼繊維に対し, 腐食やマイクロクラックといった要因が影響していると考えられる。

(2) 繰返し回数による変化

ある繰返し回数 N における, 供試体の中央のたわみ値と载荷荷重の関係を図-8 に示す。図中の凡例は「ある回数数/破壊時の回数」を示している。図より, ①ひび割れない供試体では 200 万回まで剛性勾配は変わらず, 既往の研究⁷⁾と同様の傾向である。これに対し, ②残留ひずみ 200 μ および③残留ひび割れを有する供試体では, N 数の増加もしくは破壊に近づくにつれて 1 サイクル当たりのたわみ量が増加している。これは, マイクロクラック, ひび割れの進展および繊維の引抜けに起因し, 徐々に剛性が低下したものと考えられる。次に, 破壊までのひび割れ幅の進展と繰返し回数の関係を図-9 に示す。ひび割れ幅は初期に導入したひび割れ幅も加味した値と



写真-4 曲げ疲労試験後の破壊面

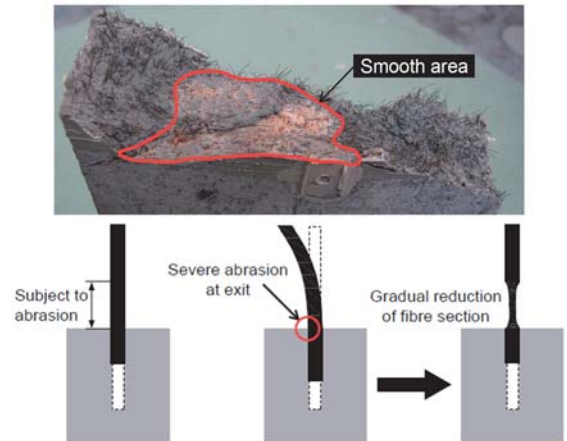


図-10 UHPFRC 一軸引張疲労試験での破壊挙動

しており, 破壊時の繰返し回数はそれぞれ異なるものの, いずれのケースもひび割れ幅が 0.3~0.4mm 程度に変曲点があり, ひび割れ幅 0.4mm を超えると急激にひび割れ幅が増大し破壊に至っている。これは, 同変曲点までは鋼繊維が徐々に引き抜けるモードであるが, 最終的に破断に至るモードであったと推察される。

(3) 破壊面の鋼繊維

200 万回未満で破壊したケース②, ③の破壊面を写真-4 に示す。静的曲げ試験では鋼繊維は引き抜けた結果であったが, 疲労試験後の破壊面は供試体表面 (引張縁) から深さ約 30mm までの範囲で鋼繊維がなく表面が滑面で, 赤褐色に呈色している箇所が見られた。ここで, 海外の超高性能繊維補強コンクリート (UHPFRC) の一軸引張疲労試験では, 鋼繊維の摩耗と研削および腐食 (トライボコロジョン) によって, 赤褐色の摩耗粉を伴う表面破壊が生じることが報告されている (図-10)⁸⁾。

そこで, 曲げ疲労試験中に破壊面から落下した破片や粉末をアセトンに浸漬して保管し, X線回折 (XRD) および蛍光 X線 (XRF) にて分析を行った。XRD では試料が微量のため酸化鉄は明瞭に検出できなかったが, XRF

による元素分析では鋼繊維由来の鉄分が全試料の質量に対し0.8%程度検出された。この検出量は AFt 系 UFC の配合に対する鋼繊維の質量割合(約5%)に対して少ないが、試料には鋼繊維が残存・架橋している部分から剥落したマトリクスも含まれていることなどが要因であると考えられる。

本研究で確認された現象も、既往の報告と類似しており、図に示すメカニズムのように、疲労サイクル条件下では、鋼繊維とマトリクス両方の摩耗が生じながら、架橋する鋼繊維の体積が徐々に減少し破断に至ったものと推察される。しかしながら、赤褐色に呈色した現象については、既往の報告では疲労試験中の短期間で生じているのに対し(劣化環境にない中での酸化腐食)、本研究では塩化物イオン、水ならび酸素が供給される暴露による鋼繊維の腐食で、疲労試験前に呈色している可能性があるため、さらなる分析が必要である。

以上より、本研究や既往の研究^{2) 3) 4)}の静的曲げ強度試験から、仮に供用期間中に想定外のひび割れが生じて、ただちに破壊に至ることはないと思われる。また、0.1mm以下のひび割れを有していても、腐食環境でなければ応力比0.4における曲げ疲労強度は良好である。しかしながら、疲労を受ける UFC 構造部材がひび割れ発生後も腐食環境下に置かれる場合には、鋼繊維の腐食を防止するためにひび割れ面からの塩化物イオン、水ならびに酸素の侵入を遮断する処置⁹⁾を施すとともに、疲労強度について検証をすることが重要であると考えられる。

5. まとめ

本研究では、UFC の適用限界を把握する基礎的研究の一環として、初期ひび割れを含めた UFC の力学性能の経年的な変化を「疲労」を主眼として確認することを目的とし、海洋環境に暴露した AFt 系 UFC 供試体の曲げ疲労試験を行った。得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 静的曲げ試験では、残留ひずみやひび割れを有していても力学特性は低下せず、ひび割れ幅0.1mm程度の場合にはピーク強度の増加が認められた。
- (2) 塩化物イオンの浸透は供試体表面から約2mmのごく表面に生ずるのみであり、ひび割れを有する場合はひび割れを通じて浸透するものの、マトリクス内部には拡散していなかった。
- (3) 塩化物イオンの浸透範囲でひび割れが鋼繊維に達している場合、ごく表面で腐食が見られ、腐食生成物がひび割れを埋めるように存在していた。
- (4) 曲げ疲労試験において、残留ひずみや初期ひび割れを有し、腐食環境に置かれる場合、UFC 指針の S-N 曲線よりも早期に疲労強度が低下する傾向が認められた。

- (5) 曲げ疲労試験での破壊面には、繰返し载荷に伴う摩耗に起因する鋼繊維の腐食破断が認められた。

UFC の適用限界について整理をするため、得られた知見については、鋼繊維の腐食に及ぼす試験環境と実環境の差異(暴露・促進、劣化因子)、疲労試験の方法(荷重、振動数)など様々な要因を考慮して今後もデータ拡充とメカニズム分析をしていく必要がある。

謝辞

本研究の実施や考察に当たっては、港湾空港技術研究所の山路徹氏、中日本高速道路(株)の牧田通氏に多大なるご協力を頂きました。ここに記し、感謝致します。

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, 2004
- 2) 兵頭彦次, 新藤竹文, 横田弘, 下村匠：乾湿繰返し促進腐食試験による超高強度繊維補強コンクリートの耐久性評価, 土木学会第60回年次学術講演会, pp.635-636, 2005
- 3) 河野克哉, 川口哲生, 橋本勝文, 横田弘：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, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.283-288, 2015
- 4) 後藤隼一郎, 横田弘, 橋本勝文, 河野克哉：ひび割れた超高強度繊維補強コンクリートはりの海洋暴露試験, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.281-286, 2015
- 5) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリート「サクセム」の技術評価報告書, 技術推進ライブラリー, No.3, 2006 (2011, 2016年に更新)
- 6) 渡邊有寿, 南浩郎, 大野俊夫, 三浦一浩：UFC床板製作におけるAFt系UFCの製造・品質管理, プレストレストコンクリート技術協会第19回シンポジウム論文集, pp.289-292, 2010
- 7) 田中良弘, 横田弘, 岩波光保, 前堀伸平：超高強度繊維補強コンクリートの気中・水中曲げ疲労特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.2, pp.1309-1314, 2005
- 8) Makita T., Brühwiler E.: Tensile fatigue behaviour of ultra-high performance fibre reinforced concrete (UHPRFC), Materials and Structures, Vol. 47, Issue 3, pp. 475-491, 2014
- 9) 佐藤正巳, 片桐誠：UFCに施したひび割れ補修の繊維腐食抵抗性に関する実験的検討, 土木学会第61回年次学術講演会, pp.711-712, 2006