

論文 超高強度繊維補強コンクリート中における鋼繊維の腐食に関する実験的検討

田中敏嗣*¹・新藤竹文*²・横田弘*³・下村匠*⁴

要旨：超高強度繊維補強コンクリートの引張特性は、主に鋼繊維の効果に依存しており、耐久性照査の観点から鋼繊維の腐食抵抗性の評価は重要である。そこで、塩化物イオンを添加したオートクレーブ促進腐食試験により超高強度繊維補強コンクリートの強度性状と鋼繊維の腐食の評価実験を行った。その結果、超高強度繊維補強コンクリートは、著しく高い鋼繊維の腐食抵抗性を有し、厳しい塩害環境下においても鋼繊維の腐食、ならびにこれに伴う力学性能の低下の可能性はほとんどない考えられる。

キーワード：超高強度繊維補強コンクリート、鋼繊維、塩化物イオン、腐食、促進腐食試験

1. はじめに

一般に繊維補強コンクリートは、短繊維をコンクリート中に均一に分散させ、従来のコンクリートと比較して引張強度、曲げ強度、靱性等を改善する複合材料である。近年、反応性粉体コンクリート(RPC: Reactive Powder Concrete)の技術を応用し、圧縮強度が 200N/mm^2 以上の超高強度繊維補強コンクリートが開発された¹⁾。このコンクリートは引張特性にも優れているため、鉄筋を使用しない設計も可能で、PC歩道橋への適用実績等を踏まえ²⁾、各種構造物への適用が期待されている。

超高強度繊維補強コンクリートの引張特性は、鋼繊維の効果に大きく依存しているため、耐久性照査の観点から鋼繊維の腐食抵抗性の評価は重要である。超高強度繊維補強コンクリートは、緻密で劣化因子の侵入に対する抵抗性が高く、鋼繊維の腐食を抑制する性能は優れていると考えられる。しかしながら、鋼繊維の腐食に関して検討した例は極めて少ない。

そこで本研究では、鋼繊維の腐食に関する照

査の検討を行う上での基礎資料を得るために、オートクレーブ養生繰り返しによる促進腐食試験により、超高強度繊維補強コンクリート中の鋼繊維の腐食性状を評価した。得られた結果により、超高強度繊維補強コンクリート中の鋼繊維の腐食抵抗性について検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

表-1に超高強度繊維補強コンクリート(以下UFRC)の配合を示す。使用材料は、水道水(W)、高性能減水剤(SP)、鋼繊維(FM、 $\phi 0.2 \times 15\text{mm}$)および超高強度繊維補強コンクリート用のプレミックス材料(DP、密度 2.85g/cm^3 、太平洋セメント(株)製)とした。このプレミックス材料は、セメント、シリカフューム、珪石粉末などが最密充填されるように調整されており、骨材として最大粒径 2mm の珪砂が混合されている。なお、FMは2%vol用い、目標フロー値を 240mm (0打フロー)とした。

比較として従来の鋼繊維補強コンクリートを

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

*2 大成建設(株) 技術センター土木技術研究所 主席研究員 工博(正会員)

*3 (独) 港湾空港技術研究所 構造強度研究室 室長 工博(正会員)

*4 長岡技術科学大学 工学部環境・建設系 助教授 博(工) (正会員)

表－1 UFRCの配合 (kg/m³)

記号	W	DP*	FM	SP**	CI
UFRC-0	180	2297	157	25	0
UFRC-6	180	2297	157	25	6
UFRC-13	180	2297	157	25	13
UFRC-NF	184	2344	0	25.5	0

* DP:セメント 818(kg/m³), シカフーム・珪砂等 1479(kg/m³)

** SPは単位水量の一部とした

表－2 SFRCの配合 (kg/m³)

記号	W	C	S	FM	Ad	CI
SFRC-0	263	658	1316	157	6.6	0
SFRC-6	263	658	1316	157	6.6	6
SFRC-13	263	658	1316	157	6.6	13
SFRC-NF	268	671	1342	0	6.7	0

想定し、粗骨材を用いない繊維補強モルタル（以下SFRC）を用いた。表－2に繊維補強モルタルの配合を示した。使用材料は、早強ポルトランドセメント(C), 硬質砂岩系砕砂(S), A E減水剤(Ad)および鋼繊維(FM, φ0.2×15mm)とした。なお、FMはUFRCに使用した繊維と同一で2%vol用いた。

鋼繊維の腐食を促進する目的で、塩化物イオン量(CI)が0, 6, 13kg/m³となるよう練混ぜ水に塩化ナトリウム(NaCl)を添加した。なお、塩化物イオン量はコンクリート標準示方書に示されている飛沫帯のコンクリート表面の塩化物イオン濃度(C₀ = 13kg/m³)を参考に決定した。

2.2 促進腐食試験方法

供試体寸法は、φ5×10 cm（圧縮強度）および4×4×16cm（曲げ強度）とした。UFRCは、成形後、前置き時間を48時間とし、脱型後90℃・48時間の蒸気養生を行った。SFRCは、成形後1日で脱型し、材齢7日まで標準養生を行った。なお、オートクレーブ養生のマトリックス強度への影響を把握するため、鋼繊維無混入の供試体(NF)も作製した。

その後、以下のようなオートクレーブによる促進腐食試験を行った。すなわち、JCI-SC2「塩分を含んだコンクリート中の補強用棒鋼の促進

腐食試験方法－オートクレーブ法－」に準拠し、昇温速度を60℃/時間、最高温度180℃を8時間保持した後、徐冷した。これを1サイクルとして、10サイクル繰り返した。

2.3 試験項目とその方法

(1) 強度および荷重－変位関係

圧縮強度(JIS A 1108)および曲げ強度試験を、促進腐食試験開始前(0サイクル), 5サイクル終了時および10サイクル終了時に行った(n=3)。なお、曲げ強度試験は変位制御型試験機による4点載荷とし、荷重－変位の計測も行った。

(2) 鋼繊維の腐食の評価

10サイクル終了後、目視により表面および内部の鋼繊維の腐食状況を観察した。内部の鋼繊維については、電子顕微鏡(SEM)による鋼繊維の表面状態の観察も行った。

3 実験結果

3.1 促進腐食試験による超高強度繊維補強コンクリートの強度性状

図－1および図－2に、鋼繊維無混入(NF)の場合の10サイクルまでの圧縮強度および曲げ強度の変化を示した。SFRC-NFおよびUFRC-NFいずれの場合も、圧縮強度は促進腐食試験によりほとんど変化せず、マトリックス強度の変化は小さいことが認められた。一方、曲げ強度はSFRC-NFでは5サイクルで若干増加するが、いずれの場合も10サイクルでは初期と比較して低下する傾向を示した。これは、オートクレーブ養生中に供試体表面部分に収縮により微細なひび割れが発生したことによる影響と推察される。

図－3および図－4に、SFRCおよびUFRCの曲げ強度性状を示す。なお、最初にひび割れが発生した応力度をひび割れ発生強度、荷重が最大になる応力度を最大応力と定義した。SFRCの場合、5サイクルから10サイクルにおいて、ひび割れ発生強度および最大応力ともに、いずれの塩化物イオン量の条件でも低下する結果となった。これは、主に鋼繊維の腐食の影響と推察される。なお、SFRCの最大応力は0サイクルか

ら5サイクルにおいて大きく増大した。これは、SFRC中の鋼繊維の付着力が促進腐食試験(オートクレーブ養生)により一時的に増進したためと推察される。

一方UFRCの場合、SFRCで認められたような5サイクルから10サイクルにおける強度低下は認められず、ひび割れ発生強度および最大応力ともに、10サイクルまでいずれの塩化物イオン量の条件でも、促進腐食養生前と同程度の値を示す結果となった。

3.2 促進腐食を受けた超高強度繊維補強コンクリートの荷重-変位曲線

図-5、図-6および図-7に塩化物イオン量 13kg/m^3 の場合の荷重-変位曲線を0、5および10サイクルについてそれぞれ示した。SFRCの場合、促進腐食試験により最大荷重および軟化曲線のばらつきが若干大きくなる傾向を示した。UFRCの場合、5および10サイクルにおける最大荷重および軟化曲線のばらつきは、促進腐食試験前と同程度であり、変形性能にもほとんど変化がないことが認められた。

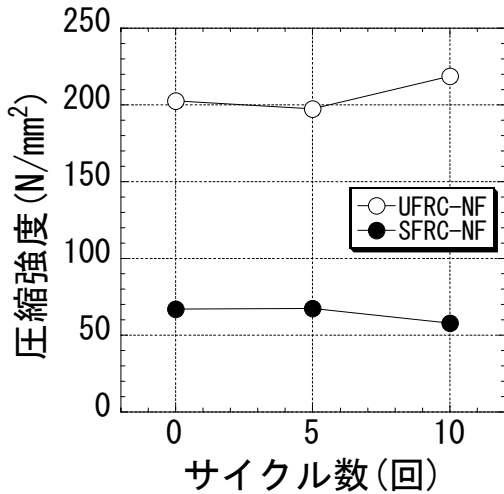


図-1 促進腐食試験による繊維無混入の場合の圧縮強度

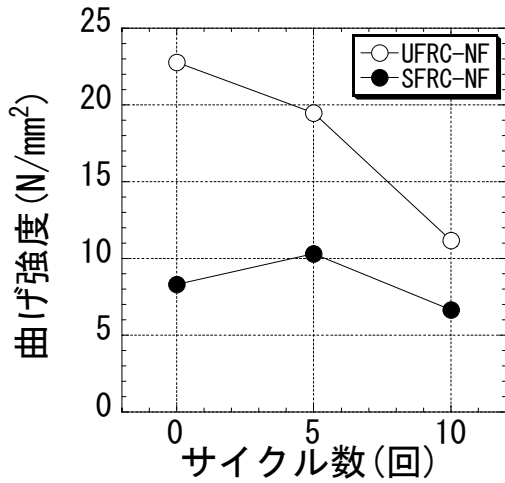


図-2 促進腐食試験による繊維無混入の場合の曲げ強度

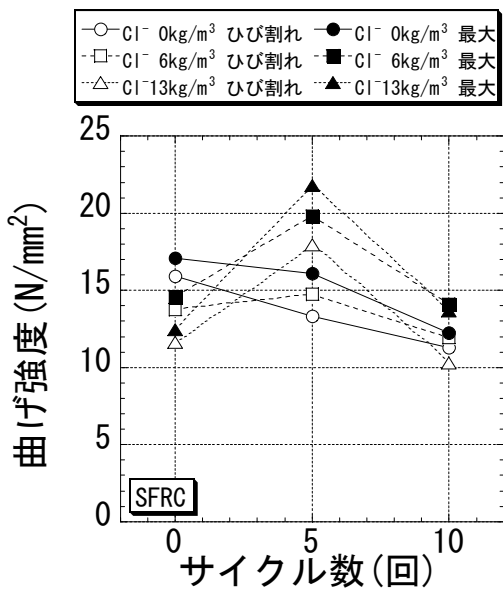


図-3 促進腐食試験によるSFRCの曲げ強度

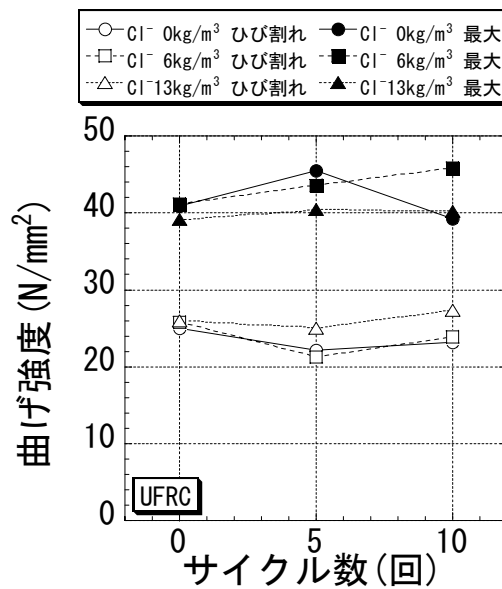


図-4 促進腐食試験によるUFRCの曲げ強度

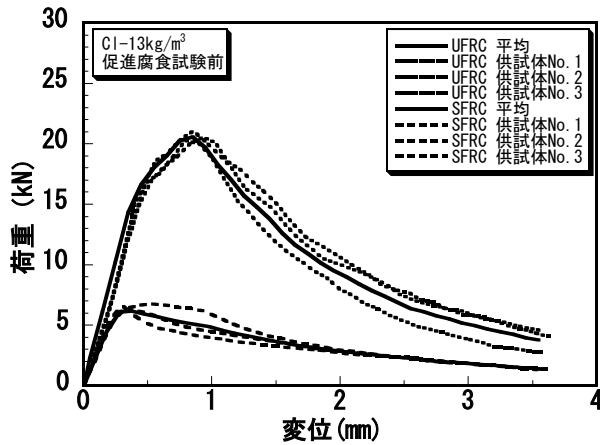


図-5 荷重-変位曲線(促進腐食試験前)

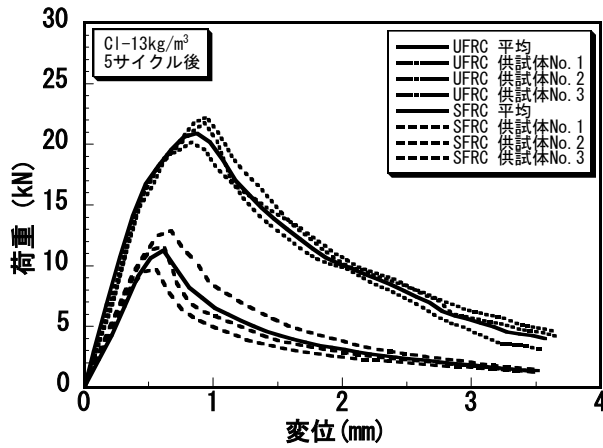


図-6 荷重-変位曲線(5 サイクル後)

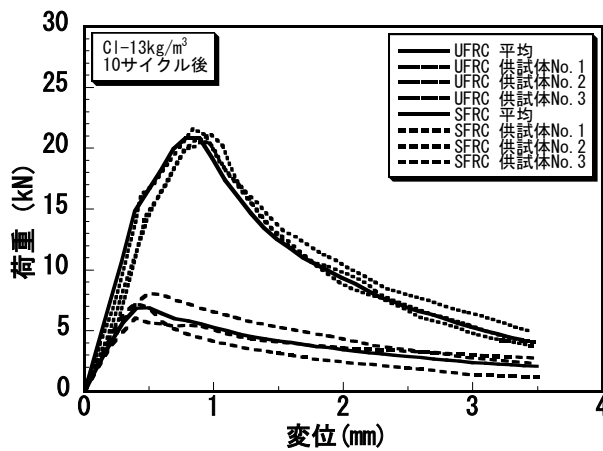


図-7 荷重-変位曲線(10 サイクル後)

3.3 促進腐食試験による超高強度繊維補強コンクリート中の鋼繊維の腐食状況

写真-1 および写真-2 にそれぞれ $Cl^- = 13kg/m^3$ の場合の促進腐食試験 10 サイクル後における SFRC および UFRC の曲げ強度試験後の供試体の状況を示す。SFRC の場合、表面付近の鋼繊維は腐食し、点錆および錆汁が多く発生していた。また、試験体内部の鋼繊維は黒く変色したが、赤錆には至っていない。UFRC の場合、表面に飛び出した鋼繊維が腐食したことによる点錆は見られたが、SFRC のような内部から染み出るような錆汁は認められなかった。また、内部の鋼繊維の変色・変状は目視では認められなかった。



写真-1 SFRC 供試体表面の鋼繊維の状況(促進腐食試験 10 サイクル後, $Cl^- = 13kg/m^3$)



写真-2 UFRC 供試体表面の鋼繊維の状況(促進腐食試験 10 サイクル後, $Cl^- = 13kg/m^3$)

写真-3, 写真-4 および写真-5にそれぞれ未使用時の鋼繊維, $Cl^- = 13kg/m^3$ の場合の10サイクル後における SFRC 中および UFRC 中の鋼繊維表面の SEM 観察結果を示す。なお, 鋼繊維は供試体の断面中心付近から, マトリックスを破碎しながら引き抜かないよう注意して採取した。SFRC の場合, 表面に多くの付着物が認められた。表面分析の結果, これは主にカルシウム, シリカおよびアルミニウムから構成されていたため水和物と推定された。鋼繊維に水和物が付着した理由として, 鋼繊維表面が腐食し, 鋼繊維と水和物の付着力が増大したためと推察される。今後, 鋼繊維表面の腐食状態の確認を含めて, この点についてはさらに検討する必要がある。

一方 UFRC の場合, 10 サイクル後においても鋼繊維の表面は未使用時と同等の状態と判断され, 腐食は認められなかった。

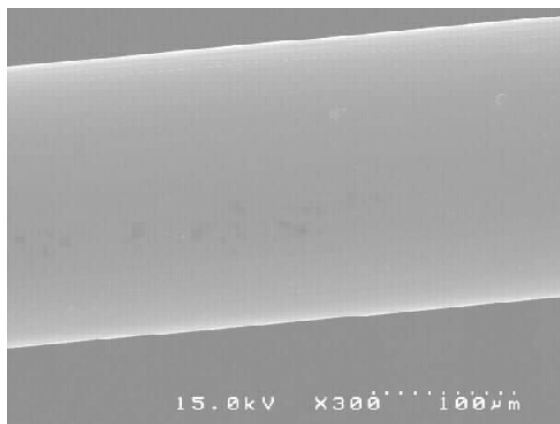


写真-3 未使用の鋼繊維の表面 (SEM×300)

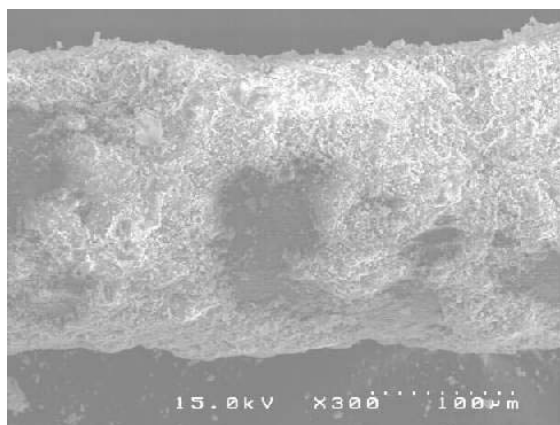


写真-4 SFRC 中の鋼繊維の表面 (促進腐食試験 10 サイクル後, $Cl^- = 13kg/m^3$, SEM×300)

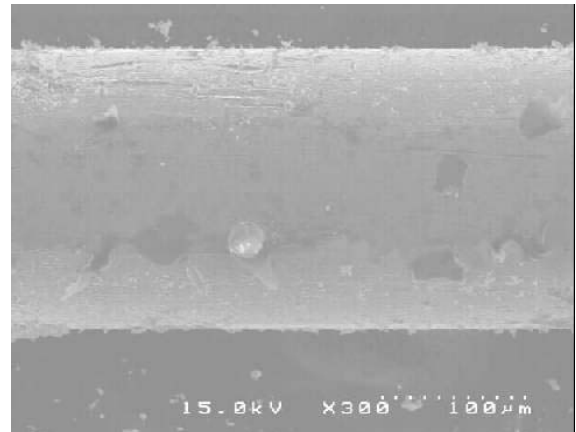


写真-5 UFRC 中の鋼繊維の表面 (促進腐食試験 10 サイクル後, $Cl^- = 13kg/m^3$, SEM×300)

4. 超高強度繊維補強コンクリート中の鋼繊維の腐食抵抗性について

一般にコンクリート中の鋼材の腐食に関連する劣化要因としては, 水分, 酸素, 塩化物イオンが重要な役割を担っている。また, コンクリートの電気抵抗も要因の一つである。

UFRC の物質移動に関する物性を表-3にまとめた³⁾⁴⁾⁵⁾。UFRC は, 水セメント比が小さく緻密なマトリックスを有するため, 劣化因子となる物質の透過性は, 一般のコンクリートと比較して大幅に小さい。本研究の促進腐食試験において UFRC 中の鋼繊維が腐食しなかったのは, マトリックス部の物質透過抵抗性が著しく高いことが主因と考えられる。

一方, 一般の SFRC 中の鋼繊維の腐食については, 海洋環境での長期の暴露試験により, 表層部分の鋼繊維は腐食するものの, 内部の鋼繊維は腐食しないことが確認されている⁶⁾⁷⁾⁸⁾。この理由としては, 鋼繊維の不連続性によるカソード面積の限定により腐食速度が極めて小さいこと, 鋼繊維の断面が小さいので腐食による膨張圧が小さいことに加えてひび割れそのものを拘束する機能を有すること, ひび割れが発生した場合でもひび割れ幅が小さいので自己治癒作用によって不働態皮膜が保持されることなどが考えられている。UFRC の場合においても, SFRC と同様な効果が期待できる。

表-3 UFRCの物質移動に関連する諸物性

	単位	UFRC	一般のコンクリート
水セメント比	—	0.22	0.3~0.6
透水係数 ⁴⁾	cm/秒	10 ⁻¹⁵	10 ⁻¹⁰ ~10 ⁻¹¹
透気係数 ⁵⁾	m ²	10 ⁻¹⁹	10 ⁻¹⁵ ~10 ⁻¹⁷
塩化物イオンの拡散係数 ³⁾	cm ² /年	0.0059	0.14~0.9
電気抵抗性 ⁵⁾	kW・cm	1133	16

以上のことから、UFRCは著しく高い鋼繊維の腐食抵抗性を有し、厳しい塩害環境下においても鋼繊維の腐食、ならびにこれに伴う力学性能の低下の可能性はほとんどないと考えられる。ただし、環境条件によってはごく表面部の鋼繊維は腐食する場合もあると考えられる。そのため美観が重視される場合には、表面を被覆する等の適切な処置を施すことが望ましいと考えられる。

5. まとめ

圧縮強度 200N/mm²以上を有する超高強度繊維補強コンクリート中の鋼繊維の腐食抵抗性について検討することを目的に、腐食を促進するため塩化物イオンを添加し、オートクレーブ養生を10サイクル繰り返す促進腐食試験を行った。本研究の範囲内で得られた結論を要約すると以下ようになる。

- (1) 超高強度繊維補強コンクリートの強度および変形性能は、促進腐食試験により低下しないことが認められた。
- (2) 超高強度繊維補強コンクリート中の鋼繊維の腐食に関しては、表面に点錆がわずかに見られたが、内部の鋼繊維には腐食・変状は認められなかった。
- (3) 超高強度繊維補強コンクリートは、著しく高い鋼繊維の腐食抵抗性を有し、厳しい塩害環境下においても鋼繊維の腐食、ならびにこれに伴う力学性能の低下の可能性はほとんどないと考えられる。

なお本研究は、土木学会コンクリート委員会・超高強度繊維補強コンクリート研究小委員会の活

動の一環として実施したものである。

[参考文献]

- 1) 下山善秀, 鶴澤正美: ダクタルの特性と応用分野, 太平洋セメント研究報告, No.142, pp.55-62, 2002.6
- 2) 田中良弘, 武者浩透, 大竹明朗, 下山善秀: 超高強度繊維補強コンクリートによるPC歩道橋の設計施工法, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.24, No.2, pp.1603-1608, 2002.6
- 3) 森大介, 鶴澤正美, 片桐誠, 下山善秀: RPCMの塩化物浸透性に関する拡散理論による考察, 第56回セメント技術大会講演要旨, pp.176-177, 2002.5
- 4) M.Katagiri, S.Maehori, T.Ono, Y.Shimoyama and Y. Tanaka: Physical Properties and Durability of Reactive Powder Composite Material, Proceedings of the first fib Congress 2002, Session.7, pp.133-138, Oct.2002
- 5) Ultra High Performance Fiber-Reinforced Concrete, SETRA, 2002
- 6) 西 晴哉, 大塩 明, 曾根徳明: 繊維補強コンクリート“その2完”, 小野田研究報告, Vol.30, No.2, pp.100-146, 1978
- 7) 小林一輔, 星野富夫, 辻 恒平: 海洋環境下における繊維補強コンクリートの鉄筋防食効果, 土木学会論文集, 第414号/V-12, pp.195-203, 1990.2
- 8) 鋼繊維補強コンクリート設計施工指針(案), コンクリート・ライブラリー第50号, 土木学会, 1983