

論文 環境条件の違いが鋼繊維の腐食に及ぼす影響に関する実験的研究

利 キホウ*1・上田 尚史*2・高谷 哲*3・佐々木 亘*4

要旨：本研究では、様々な環境下における鋼繊維の腐食特性を明らかにすることを目的とし、溶液中と気中での腐食試験を行い、鋼繊維の腐食状況の外観観察および質量減少率を評価した。その結果、水中浸漬試験の結果からは、溶液の pH が低く塩化物イオン濃度が高いほど、鋼繊維の腐食は顕著となることが明らかとなった。また、気中暴露試験の結果、鋼繊維表面の塩化物濃度が高く相対湿度が高くなるほど、鋼繊維の腐食は顕著となることが確認された。

キーワード：鋼繊維, 腐食, pH, 塩化物イオン, 相対湿度

1. はじめに

鋼繊維補強コンクリート（以下 SFRC）は、ひび割れ開口を抑制するために、コンクリートに鋼繊維を混入した複合材料である。鋼繊維の混入により、コンクリートの引張強度、曲げ強度などの力学特性を改善することが可能であり、しかし、コンクリートの中性化や塩分浸透などにより SFRC 内部の鋼繊維が腐食し、力学特性が低下する恐れがある。

例えば、Elham et al.²⁾は、腐食が生じた鋼繊維の引き抜き試験を行い、鋼繊維の腐食量の増加に伴い鋼繊維が破断して架橋効果を失うことを報告している。また、佐野ら³⁾は SFRC 中の鋼繊維の腐食により、曲げ強度や破壊エネルギー等が低下することを確認している。その理由として、腐食生成物の形成によりコンクリート内部に微細なひび割れが生じたことを挙げている。このように、鋼繊維の腐食により、架橋効果が失われ、ひび割れ開口抑制効果が低下することが示唆されている。しかし、鋼繊維そのものがどのような環境下において、どのように腐食するかについては未だに不明な点が多く、鋼繊維そのものの腐食を予測することは難しいのが現状である。そのため、SFRC の長期耐久性を考える上で、鋼繊維の腐食挙動を明確にすることは重要であると考えられる。

そこで、本研究では、様々な環境における鋼繊維の腐食特性を明らかにすることを目的として、水溶液中環境の pH, 水分, 塩化物イオン濃度が鋼繊維の腐食に与える影響について検討を行った。また、実際の腐食では塩化物イオン存在下において湿度により鋼繊維表面に形成する水膜厚さが変化し⁴⁾、溶存酸素濃度の違いが腐食に影響する可能性があるため⁵⁾、気中暴露試験も行った。

2. 実験概要

2.1 鋼繊維の概要

本実験では、図-1 に示す直径 0.62mm, 長さ 30mm の両端にフック加工が施されている鋼繊維を使用した。表-1 に鋼繊維の微量元素のカatalog値を示す。

実験では、鋼繊維の表面に付着した不純物を取り除くために、以下に示す前処理を行った。まず、糊でバンドされている鋼繊維を精製水に浸漬し、10 分間超音波により振動を与えることで分散させた。その後、アセトンとエタノールを用いて、それぞれ 10 分間ずつ超音波洗浄により脱脂処理を行った。脱脂処理後は、紙製ウエスを用いて鋼繊維の濡れを取り除いた。その後、直ちに最小表示 0.1mg の秤を用いて質量を測定した。なお、20 本の鋼繊維の平均質量は 73.4mg, 標準偏差は 0.91mg であった。

2.2 腐食試験の方法

(1) 水中浸漬試験

水中浸漬試験は、コンクリートの中性化と塩化物イオンによる複合的な影響を検討することを目的としたもの

表-1 鋼繊維の微量元素（質量濃度）

C(%)	Mn(%)	Si(%)	P(%)	S(%)
≤0.10	≤0.70	≤0.30	≤0.035	≤0.035

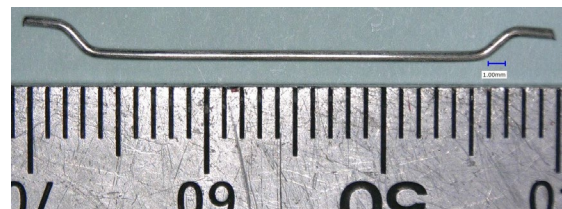


図-1 鋼繊維の外観

*1 関西大学 大学院理工学研究科環境都市工学専攻（学生会員）

*2 関西大学 環境都市工学部都市システム工学科准教授 博（工）（正会員）

*3 京都大学 大学院工学研究科助教 博（工）（正会員）

*4 三井住友建設株式会社 技術開発本部 R&D センター 博（工）（正会員）

である。この実験では、溶液の pH と塩化物イオン濃度を実験要因とした。溶液の pH は 9, 11, 13 の 3 水準とし、溶液中の塩化物イオン濃度は、塩化物イオンと水酸化物イオンの比（以下、Cl⁻/OH⁻）で 0, 1.0, 2.0 の 3 水準とした。試料数は、各水準を組合せた 9 ケースに対して、各ケース 5 本ずつとした。

水中浸漬試験では、所定の pH と Cl⁻/OH⁻ に調製した溶液を 30ml 用意し、前処理した鋼繊維 1 本とともにプラスチック製の密閉容器（容量 100ml）に入れた。容器は 20℃ の環境にて 28 日間静置した。試験開始後、7, 14, 21 日目に鋼繊維の腐食状況を目視にて確認した。ただし、7 日目の目視は容器の底部から行い、14 日目と 21 日目の目視は密閉容器を開封した上で行った。

(2) 気中暴露試験

気中暴露試験は、ひび割れ部の鋼繊維の状況を想定して、湿気状態と鋼材表面の塩化物イオン量による複合的な影響について検討することを目的としたものである。相対湿度は 33, 75, 100%RH の 3 水準とし、塩化物イオン量は NaCl の質量パーセント濃度で 0, 0.03, 3% の 3 水準（0%NaCl, 0.03%NaCl, 3%NaCl）とした。試料数は、各要因を組合せた 9 ケースに対して 3 本ずつとした。ただし、3%NaCl のケースについては、後述するように暴露期間ごとの腐食量を確認するために試料数を 1 ケース 15 本とした。

相対湿度の調整には、飽和 MgCl₂ 溶液、飽和 NaCl 溶液と水道水を用いた。それぞれの溶液で満たした容器をデシケーター内に設置し、およそ 20±2℃ の室内に静置することで、所定の相対湿度に対して±2%RH の環境を維持するようにした。鋼材表面の塩化物イオン量は NaCl 溶液を鋼繊維の表面に付着させることで変化させた。なお、75%RH は NaCl が空気中の湿気を吸湿し、水膜を形成し始める湿度（臨界湿度）であり、塩化物イオン濃度が高くなるにつれて形成する水膜が厚くなることが報告されている⁴⁾。

気中暴露試験では、所定の濃度に調整した NaCl 溶液に鋼繊維を浸漬し、ドライヤーで乾燥させた後、デシケーター内に 28 日静置した。試験開始後、3, 7, 14, 21 日目に鋼繊維の腐食状況を目視にて確認した。また、3%NaCl の各ケースに対しては、それぞれ 3 本の鋼繊維を取り出し、腐食量を測定した。

2.3 腐食性状の評価方法

(1) 鋼繊維の腐食量の評価

鋼繊維の腐食量は、腐食試験前後の質量減少率で評価した。鋼繊維の質量減少率は、以下の式(1)で算出した。

$$\Delta w = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100 \quad (1)$$

ここで Δw は質量減少率(%), W_1 は腐食試験前の質量

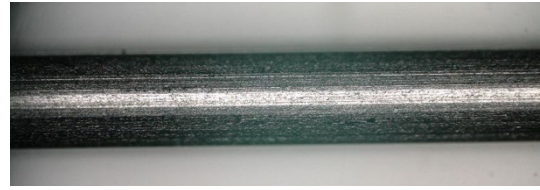


図-2 鋼繊維の表面の一例（腐食なし）

(mg), W_2 は腐食試験後の質量(mg)である。

腐食試験後の質量を求める際の除錆方法については、水中浸漬試験と気中暴露試験で異なる方法とした。水中浸漬試験では、腐食した鋼繊維を 10%クエン酸水素二アンモニウム溶液に浸漬し、60℃ の環境に 24 時間静置する方法を採用した。ただし、この方法によると、腐食の生じていない鋼繊維においても、23%程度質量が減少することが確認された。10 本の鋼繊維を用いた予備試験では、前処理後の質量（平均で 73.4mg）から、平均で 56.7mg まで低下したことが確認された。そこで、水中浸漬試験の腐食試験前の質量 W_1 には、一律上述の 56.7mg を用いることとした。

気中暴露試験では、上記の方法による質量の減少を懸念し、10%クエン酸水素二アンモニウム溶液に対する浸漬方法を変更した。すなわち、60℃ の環境に 24 時間静置する代わりに、10 分間超音波により振動を与えることとした。この方法によると、腐食の生じていない鋼繊維の質量減少率は 0.1~0.4%程度であった。

(2) 顕微鏡による表面観察

鋼繊維の表面の腐食状況は、目視の他に顕微鏡を用いて観察した。使用した顕微鏡システムは VHX-6000 であり、撮像素子は 1/1.8 型の CMOS イメージセンサであり、実効画素は 1600×1200 である。レンズの倍率は VH-Z100R の 100 倍であり、画像範囲は 3.05mm×2.28mm である。図-2 に腐食の生じていない鋼繊維の表面の一例を示す。

鋼繊維の表面状況の観察は、水中と気中それぞれの腐食試験に対して、開始直前と終了後に行った。ただし、腐食試験終了後の観察では、鋼繊維を精製水中において 10 分間の超音波洗浄を行ったものを用いた。

3. 実験結果および考察

3.1 水中浸漬試験

(1) 腐食状況と質量減少率

図-3 に試験 28 日目における鋼繊維の腐食状況を示す。また図中には、各ケースの平均的な質量減少率を併記している。なお、pH=13 のケースにおいて負の質量減少率となっているのは、除錆作業による誤差である。

図より、pH=13 のケースでは、塩化物イオン量に関わらず腐食は認められないことが分かる。既往の研究では、










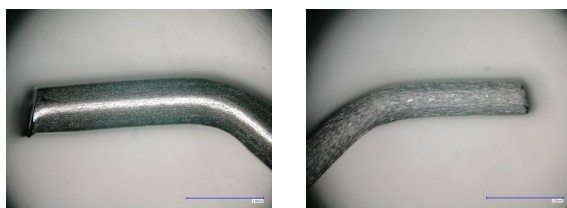
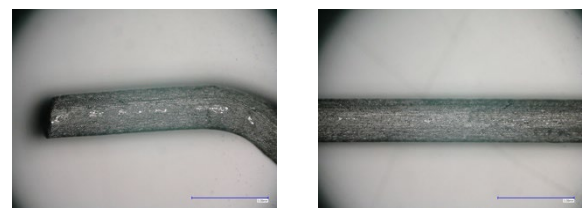
	Cl ⁻ /OH ⁻ =0	Cl ⁻ /OH ⁻ =1.0	Cl ⁻ /OH ⁻ =2.0
pH=13	 -0.3%	 -0.5%	 0.5%
pH=11	 0.1%	 9.1%	 11.4%
pH=9	 10.7%	 9.4%	 9.7%

図-3 水中浸漬試験 28 日目の腐食状況(数値は質量減少率)



(a) 腐食なし (b) 腐食あり

図-4 pH=11, Cl⁻/OH⁻=2.0 の顕微鏡画像(端部)



(a) 端部 (b) 中央部

図-5 pH=9, Cl⁻/OH⁻=2.0 の顕微鏡画像

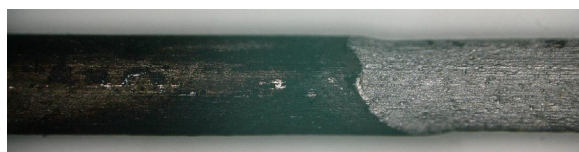


図-6 pH=9, Cl⁻/OH⁻=2.0 の顕微鏡画像(中央部)

高アルカリ環境下であっても、塩化物イオンが存在することにより、不動態被膜として働く Fe₃O₄ の結晶性や安定性が低下し、腐食生成物として析出することが報告されている^{5),6)}。本実験においては、塩化物イオンを含んでいた場合であっても、pH=13 のケースでは腐食生成物は確認されなかった。その理由は明確ではないが、本研究で使用した鋼繊維は、既往の研究で使用された鋼材と比較して、耐腐食性が優れている可能性もあると推察される。

一方で、pH=9 および 11 のケースでは、Cl⁻/OH⁻=1.0 以上で γ-FeOOH と見られる赤色の腐食生成物が確認された。pH=9 では塩化物イオンが入っていないケースでも腐食が確認された。

pH=11 のケースでは、Cl⁻/OH⁻が 0 のケースを除き、鋼繊維の端部において局所的な腐食がみられた。前述の通り、本実験で用いた鋼繊維は既往の研究で用いられている鋼材よりも耐食性が高い可能性があり、一般的な鋼材では塩化物イオン量に関わらず全面腐食する pH=11 であっても、不動態化していたと考えられる。そのため、曲げ加工による応力や被膜欠陥のある端部がマクロアノードとなり腐食が生じ、それ以外の箇所はマクロカソード

ドとなったと考えられる。Cl⁻/OH⁻=2.0 のケースにおいて、部分的な腐食にも関わらず質量減少率は 11.4%であり、全面腐食を生じた pH=9 のケースの 9.7%よりも質量減少率が大きくなっていることから、マクロセル腐食が生じた可能性があると考えられる。

pH=9 のケースでは、塩化物イオン量に関わらず質量減少率は同程度であり、全面腐食であった。このことから、pH が 9 まで低下してくると鋼繊維表面に不動態皮膜が形成しなくなるものと考えられる。

図-4 に、端部に腐食が生じた pH=11, Cl⁻/OH⁻=2.0 のケースにおける鋼繊維の顕微鏡画像を示す。図には、腐食が認められなかった端部(腐食なし)と腐食が生じた端部(腐食あり)の画像を示しているが、腐食が生じることで断面が減少していることが確認できる。顕微鏡に搭載されている機能を用いて両端部の直径を計測した結果、腐食なし側の直径は 0.61mm であったのに対して、腐食あり側の直径は 0.45mm であった。一方、図-5 に、鋼繊維全体で腐食が確認された pH=9, Cl⁻/OH⁻=2.0 のケースにおける鋼繊維の顕微鏡画像を示す。図には、端部と中央部の状況を示しているが、いずれも断面が減少していることが確認できる。先述のケースと同様に、それぞれの直径を計測した結果、端部と中央部の直径はいずれも 0.57mm であった。このことから、pH=11 のケースの方が pH=9 よりも断面減少の程度が高いことが示された。

2.3(2)で述べたように、顕微鏡の観察は、鋼繊維を精製水で超音波洗浄した後に行った。その際、赤色の腐食

生成物が取り除かれ、鋼繊維の素地の色が顕わになる領域と表面が黒色となっている領域が確認された。そこで、当該領域をより詳細に確認することとした。図-6 に、鋼繊維全体で腐食が確認された pH=9、Cl⁻/OH⁻=2.0 のケースにおける顕微鏡画像を示す。図には、鋼繊維の素地の色が顕わになる領域と表面が黒色となっている領域の境界を示している。右側の領域では、表面が粗くなっており、断面が減少していることがわかる。この領域の直径は平均 0.57mm 程度であり、腐食により断面が減少していることがわかる。一方、左側の領域では、表面は黒色となっており、腐食が生じていない領域（例えば図-5(a)）とは明らかに異なる状態であった。この黒色の物質については次項の元素分析において考察する。左側の領域の直径は 0.61mm であり、断面減少はほとんど生じていないものとする。なお、図-6 に示したような状況は、鋼繊維全体が局所的に腐食した pH=11 においても確認された。

(2) 溶液の pH の変化

実験における pH の変化を確認するために、試験開始前後において pH の計測を行った。使用した pH メーターの pH の測定範囲は-2~20、精度は±0.01 である。

表-2 に各ケースの試験前の pH と終了後を示す。pH=13 のケースでは、0.12~0.22 程度の pH の低下が確認できる。腐食していないにも関わらず pH が低下したのは、実験中に蓋を開けて写真を撮ったため、空気中の二酸化炭素による炭酸化の影響と考えられる。腐食なしの pH=11、Cl⁻/OH⁻=0 のケースでは、pH が 0.65 低下しており、pH13 に比べて低下量が大きくなっているが、これは水溶液中の OH⁻濃度が pH13 の 1/100 であるために炭酸化による pH の変化が大きかったためであると考えられる。一方、腐食ありの pH=11、Cl⁻/OH⁻=1.0 と 2.0 のケースでは、pH の低下量はそれぞれ 0.45 および 0.61 となっており、Cl⁻/OH⁻=0 のケースよりも低下量が小さくなっている。これは、局部的なマクロセル腐食が生じたことにより、マクロカソードで生じた OH⁻をマクロアノードで消費しきれなかったために、溶液全体の炭酸化の影響が緩和されたものと推察される。したがって、マクロアノ

ードの鋼繊維表面では pH が大きく低下している可能性があると考えられる。pH=9 のケースでは、pH が 2.1~2.2 の程度で下がり、7 以下に低下したことが確認された。また、Cl⁻/OH⁻の違いによる pH の低下量の違いは見られていないことが分かる。全面腐食であったことから、カソードで生じた OH⁻をアノードで消費したと考えられるため、この pH の低下は炭酸化によるものであると推察される。また、pH=9 では Cl⁻/OH⁻に関わらず、pH の低下量および腐食減少率が概ね同程度であったことから、酸素拡散律速であったと推察される。

3.2 気中暴露試験

図-7 に気中暴露試験 28 日目の各ケースの鋼繊維の腐食状況を示す。図中には、各ケースの平均的な質量減少率を併記している。

図より、0%NaCl の場合では、相対湿度の違いに関わらず、鋼繊維の腐食は確認されなかった。0.03%NaCl の場合では、相対湿度が 33%RH の場合では腐食は確認されなかったが、相対湿度 75%RH と 100%RH のケースでは、鋼繊維の表面に図-8 に示すような褐色の点錆が確認された。また、3%NaCl の場合では、相対湿度 33%RH のケースにおいて、先述と同様に鋼繊維の表面に褐色の点錆が確認された。一方、相対湿度 75%RH と 100%RH のケースでは、鋼繊維全体にわたり褐色の腐食生成物が確認され、その一部は鋼繊維の周囲に剥落していたことが確認された。同一の相対湿度においては、鋼繊維表面の塩化物イオン濃度が高いほど鋼繊維の腐食の程度が高くなることが確認された。一般に、水中では溶存酸素量と溶液の電気伝導率の関係により、3%NaCl で腐食速度が最大になることが知られている⁷⁾。本実験では乾燥に

表-2 水中浸漬試験における pH
(上：試験前，下：試験後)

	Cl ⁻ /OH ⁻ =0	Cl ⁻ /OH ⁻ =1.0	Cl ⁻ /OH ⁻ =2.0
pH=13	12.97	13.01	13.01
	12.85	12.83	12.79
pH=11	11.04	11.03	11.02
	10.39	10.60	10.41
pH=9	9.00	9.03	9.03
	6.76	6.76	6.92

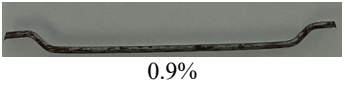
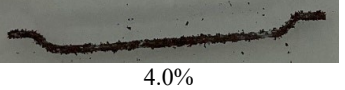
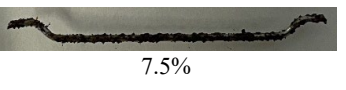
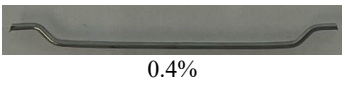
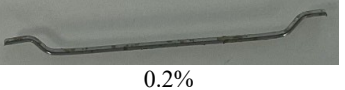
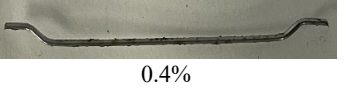

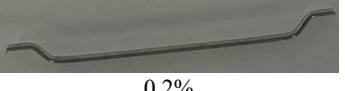
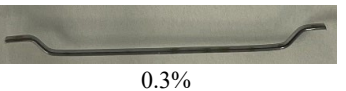
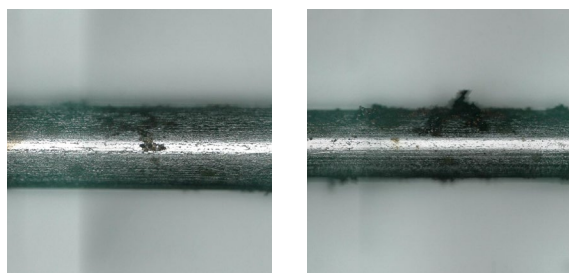
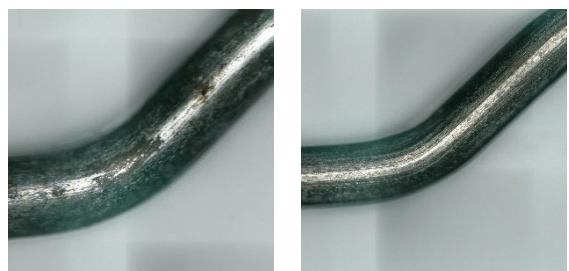
	33%RH	75%RH	100%RH
3.0% NaCl	 0.9%	 4.0%	 7.5%
0.03% NaCl	 0.4%	 0.2%	 0.4%
0% NaCl	 0.1%	 0.2%	 0.3%

図-7 気中暴露試験 28 日目の腐食状況(数値は質量減少率)



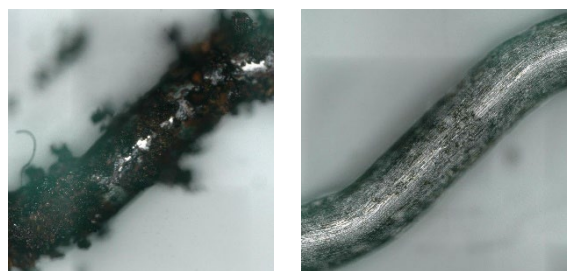
(a) 75%RH (b) 100%RH

図-8 点錆の状況 (0.03%NaCl)



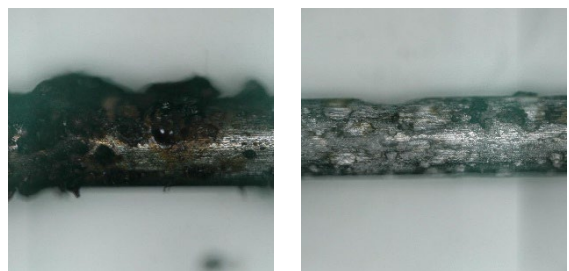
除錆前 除錆後

(a) 33%RH



除錆前 除錆後

(b) 75%RH



除錆前 除錆後

(c) 100%RH

図-9 3%NaCl の各ケースの顕微鏡画像

よる濃縮等で鋼繊維表面の塩化物イオン濃度は変化していると考えられるが、同様の理由により 0.03%NaCl よりも 3%NaCl の腐食速度が大きくなったものと考えられる。

図-9 に 3%NaCl の各ケースにおける鋼繊維の顕微鏡画像を示す。図において、左は除錆前、右は除錆後である。図-9(a) より、33%RH のケースでは、前述のように鋼繊維の表面には点錆による褐色の腐食生成物が生じていたが、除錆した後の画像からは、顕著な断面欠損は確

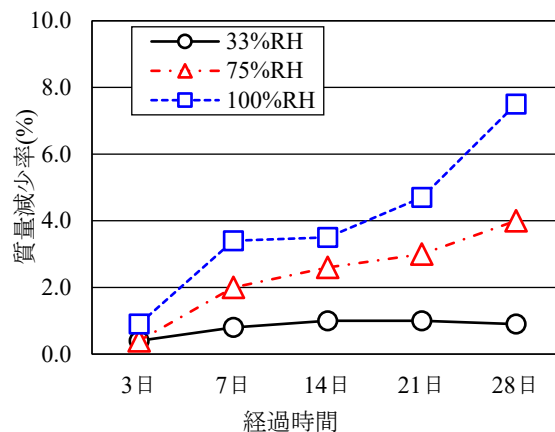


図-10 3%NaCl の各ケースの腐食量の経時変化

認されなかった。一方、図-9(b) より、75%RH のケースでは、鋼繊維の表面には隙間なく褐色の腐食生成物が生じていることが確認できる。除錆後の画像からは断面が欠損していることも確認された。図-9(c) の 100%RH のケースでは、鋼繊維の表面には、より多くの腐食生成物が確認され、除錆後の画像からは断面が著しく欠損していることが確認された。

図-7 中の質量減少率に着目すると、鋼繊維表面に点錆が確認されたケースは、腐食が確認されなかったケースと比較して同程度の質量減少率であった。一方、鋼繊維全体にわたり腐食が確認された 3%NaCl の質量減少率は、相対湿度 75%RH、100%RH のそれぞれにおいて、4.0%、7.5%であった。

ここで、3%NaCl に対して、腐食量の経時変化をまとめたものを図-10 に示す。図より、33%RH のケースでは材齢 14 日以降で腐食の進展が認められないが、75%RH と 100%RH のケースでは、時間とともに腐食が進展していることが確認された。また、75%RH のケースと比べて 100%RH のケースの方が、腐食の進展は急激であることがわかる。

相対湿度が高くなるほど、鋼材表面の水膜の厚さは大きくなることが知られている⁴⁾。NaCl の臨界湿度が 75%RH であることを勘案すると、33%RH のケースでは鋼材表面は乾燥状態となり、腐食に必要な水分が十分に供給されなかったため腐食が進行しなかったものと考えられる。一方、100%RH のケースでは、水膜が酸素拡散抵抗となるため、腐食速度が小さくなることが知られている⁸⁾。そのため本実験においても、同様の結果を予想していたが、実際には異なる結果となった。この原因として、本実験では腐食速度が最大となる 3%NaCl 水溶液に浸漬させた後に乾燥させたことが挙げられる。NaCl に浸漬した後に乾燥させる過程で β -FeOOH や γ -FeOOH といった FeOOH 系の腐食生成物が形成しやすいことが知

られている⁹⁾。一般的には水膜が厚くなると溶存酸素が少なくなるため腐食速度が小さくなると考えられるが、これらの FeOOH は湿潤状態において Fe₃O₄ に還元され、そのときの還元電流量は通常の酸素の還元電流量に比べて 10 倍近く大きくなることが報告されている¹⁰⁾。NaCl の臨界湿度である RH75% では水膜ができて 100 Å ~ 1 μm 程度の厚さと推察される⁸⁾が、RH100% では十分に厚い水膜を形成し、湿潤状態に近くなったことで、FeOOH の還元反応が十分に生じたことにより腐食量が増加したものと推察される。この点については、今後さらに詳細な検討が必要であると考えられる。

3.3 SFRC 中における鋼繊維の腐食に関する考察

3.1 節ならびに 3.2 節の結果から、SFRC 中における鋼繊維の腐食について考える。

まず、水中浸漬試験と気中暴露試験のいずれにおいても、塩化物イオンの存在は、鋼繊維の腐食においても重要な要因となることが確認された。また、水中浸漬試験の結果からは、コンクリート中の pH の低下により、鋼繊維の腐食は促進されることが確認された。したがって、SFRC においても、一般的なコンクリートと同様に、塩化物イオンや中性化の進行により、鋼繊維の腐食のリスクが高くなるといえる。SFRC 中の鋼繊維は、コンクリート表面近傍に存在するものもあるため、材料特性の経時的な変化を適切に考慮する必要があるといえる。

一方、水中浸漬試験の結果から、pH=13 のケースでは塩化物イオン量に関わらず、鋼繊維の腐食は確認されなかった。既往の研究⁵⁾では、一般的な鋼材では、pH=13 であっても塩化物イオンの存在により腐食が生じる結果となっている。したがって、鋼繊維は鋼材と比較して耐腐食性が高い可能性がある。このことは、鋼繊維補強コンクリートを用いた鉄筋コンクリート部材では、鋼繊維よりも内部鋼材の腐食の方が先行する可能性があることを示唆するものである。一方で、本研究で用いた鋼繊維は pH=11 でも不動態化している可能性があり、応力集中や被膜の欠陥があると、局所的にマクロセル腐食が進行する可能性があることも確認された。一般的な鋼材は pH=11 では腐食しやすい状態にあるため、鋼繊維と電気的に導通した場合、鋼繊維と鋼材でマクロセルを形成する可能性もあると考えられる。したがって、鋼繊維と鋼材を併用する場合には、鋼繊維と鋼材の腐食特性について十分に検討する必要があると考えられる。

4. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 異なる Cl⁻/OH⁻での水中浸漬試験の結果、溶液の pH が低くなるほど、また塩化物イオン濃度が高くなるほど、鋼繊維の腐食の程度は大きくなることが確認

された。

- (2) 相対湿度を制御した気中における暴露試験の結果、相対湿度が高くなるほど、また鋼材表面に付着した溶液の塩化物イオン濃度が高くなるほど、鋼繊維の腐食の程度は大きくなることが確認された。
- (3) 上記の鋼繊維の腐食状況から、本研究で使用した鋼繊維は、一般的な繊維と比較して優れた耐腐食性を有する可能性があると考えられる。一方で、pH=11 で塩化物イオンが存在すると、不動態化する可能性はあるものの、応力集中や被膜の欠陥があると、局所的にマクロセル腐食を生じる可能性もある。

参考文献

- 1) 越智恒男, 大久保誠介, 福井勝則: 鋼繊維補強コンクリートの特徴と発展経緯, 資源と素材, Vol.121, No.12, pp.555-563, 2005.
- 2) Elham Alizade, Samad Zabihi, Farshid Alae: Effect of Steel Fiber Corrosion on Mechanical properties of Steel Fiber Reinforced Concrete, Asian Journal of Civil Engineering, Vol. 17, No. 2, pp. 147-158, 2016
- 3) 佐野匠, 中村拓郎, 二羽淳一郎: 鋼繊維腐食が鋼繊維補強コンクリートの力学特性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.267-272, 2016.
- 4) 押川渡, 篠原正, 元田慎一: 強電解質が吸水してできる水膜組成と水膜厚さの推定, 材料と環境, Vol.52, pp.293-298, 2003.
- 5) 高谷哲, 奥野翔矢, 本田正和, 川上圭司, 左藤眞市, 羽村陽平, 山本貴士, 宮川豊章: アルカリ環境下における鉄系腐食生成物の生成プロセスおよびコンクリート中における鉄筋の腐食環境, 材料, Vol.66, No.8, pp.545-552, 2017.
- 6) 奥野翔矢, 本田正和, 左藤眞市, 高谷哲: 鉄腐食生成物の環境依存性に関する基礎的研究, 物理化学的解釈に基づく電気化学的計測手法の体系化に関するシンポジウム論文集, pp361-366, 2015.
- 7) H. H. Uhlig and R. W. Revie: Corrosion and Corrosion Control. Wiley-Interscience, New York, 1985.
- 8) N.D.Tomashov: Theory of corrosion and protection of metals; the science of corrosion, Macmillan, 1966.
- 9) 三沢俊平: 鉄さびの現状と未解明点, 防食技術, Vol. 32, 657-667, 1983.
- 10) 西方篤, 高橋岳彦, 侯保栄, 水流徹: 乾湿繰り返し環境における炭素鋼の腐食速度のモニタリングとその腐食機構, Zairyo-to-Kankyo, Vol.43, No.4, pp.188-193, 1994.