

光ファイバセンサを用いたコンクリート中の電食下における鉄筋の腐食膨張挙動

太平洋セメント(株) 正会員 ○早野 博幸 井坂 幸俊 吉田 愛 江里口 玲

1. はじめに

RC 構造物における鉄筋腐食は、コンクリートの耐久性だけでなく構造性能の低下に繋がるため、維持管理をするうえで腐食状態の把握は重要な項目の一つに挙げられる。腐食ひび割れの発生は、鉄が腐食生成物に変化する過程で体積膨張が生じ、周囲のコンクリートに応力が発生することに起因する。したがって、鉄筋の腐食過程における体積膨張の挙動を捉えることができれば、腐食状態を把握でき、腐食の進展あるいは腐食ひび割れ予測を精緻に行うことが可能となる。本研究では光ファイバセンサを用い、コンクリート中の電食下における鉄筋腐食状況を把握すべく、腐食検知～進展～腐食ひび割れ発生までについてモニタリング可能かどうかを検討するとともに、鉄筋腐食の体積膨張過程について考察を加えた結果を報告する。

2. 実験概要

電食試験体の概要を図-1 に示す。みがき棒鋼に FBG センサ部を有する光ファイバケーブル($\phi 150 \mu\text{m}$)をらせん状に 1 巻きして固定し、計 8 本をそれぞれ計測器に接続した。これをかぶり厚が 5cm となるように W/C0.6 のコンクリートに設置し、脱型後、かぶり面中央部に防水型ひずみゲージを貼付して材齢 22 日まで湿潤養生を行った。

かぶり面に貼付したゲージ側が上面となるようコンクリートを 20°C 一定の湿潤状態とし、200mA の一定電流による電食試験を行った。計測は、FBG センサによる棒鋼の周方向ひずみを 8ch、ひずみゲージによるかぶり表面ひずみを 1ch 連続的に計測した。腐食ひび割れ発生後に棒鋼を取り出して除錆し、腐食量を算出するとともに棒鋼直径をノギスで各区間ごとにそれぞれ 10 点計測し、平均直径を算出した。

3. 実験結果および考察

電食過程における棒鋼のひずみを図-2 に示す。いずれも電食開始直後から 17 日程度まではひずみの変動は小さく、その後は急激にひずみが増大している。電食試験における鉄の腐食機構としては、鉄がイオン化するアノード反応が卓越することが考えられること、さらには電食開始後から一定の腐食電流が流れており、ファラデーの法則によれば鉄の電解量、すなわち腐食量は時間に比例して一定速度で生じることが考えられる。そのため、ひずみ増加も一定となって表れることが予想されたが、計測結果はそれとは異なるものとなった。

これには 2 つの理由が考えられる。一つは電気化学的腐食反応量とそれに伴う物理的体積膨張は必ずしも一致しない可能性があるということである。既往の研究¹⁾では、最初の腐食生成物である $\text{Fe}(\text{OH})_2$ などは水溶液としてコンクリートの細孔中に移動するため膨張圧に寄与しないことを指摘している。初期には鉄イオンが溶出し始め、その後酸化還元などに伴い腐食生成物が固体となって堆積し、それがひずみとして表れるかどうかについてはさらなる検討が必要である。二つ目には、電食以外の要素として、コンクリート中では部位によって腐食進展に関わ

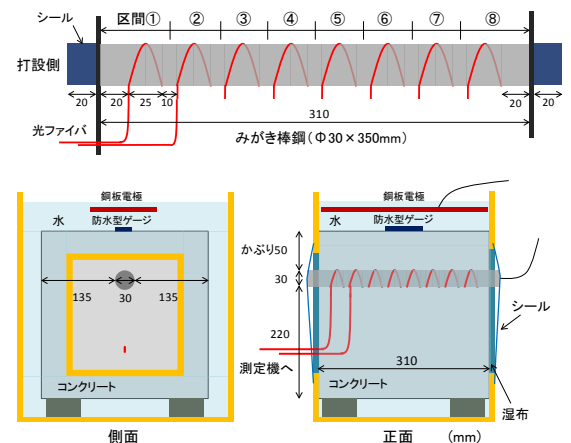


図-1 電食試験体の概要

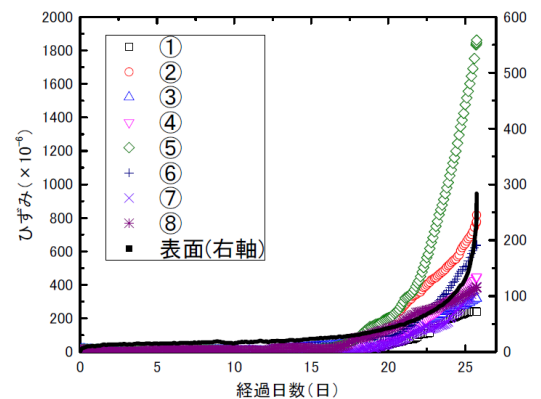


図-2 電食過程における棒鋼のひずみ

キーワード 光ファイバ, 腐食, 電食, ひずみ, モニタリング

連絡先 〒285-8655 千葉県佐倉市大作 2-4-2 太平洋セメント(株) 中央研究所 TEL043-498-3902

る酸素や水の供給状況が異なること、腐食生成物の形成による新たな電池作用、酸素の発生による pH の変化などが影響することが考えられる。

腐食ひび割れ発生前後のひずみ挙動を図-3 に示す。電食開始後 25.74 日において、光ファイバ計測による棒鋼のひずみ、およびコンクリート表面ひずみの勾配がほぼ同時期に変わっており、このときにかぶり面にひび割れが生じた可能性が高い。本結果から、光ファイバセンサにより腐食の進展から腐食ひび割れ発生までがモニタリング可能であることがわかる。

ひび割れ時の光ファイバひずみと除錆後の棒鋼直径の計測結果を、打設側からの鉄筋腐食端面からの距離に応じて図-4 に示す。2つの計測値は単位が異なるため、光ファイバのひずみ最大値と棒鋼直径の変化量の最大値が一致するように軸を調整した。傾向は類似しているもののすべての部位でこれらはほぼ一致しておらず、端部の方は除錆後の棒鋼直径変化量に対して腐食膨張時のひずみは小さい。これについては、端部の腐食生成物の体積膨張率が結果的に小さい、あるいは腐食生成物が初期にイオンとしてコンクリートの外側に流出したという可能性が考えられ、試験終了後に観察した結果においても腐食生成物が若干流出していたことが確認された。

試験前の棒鋼の半径と腐食ひび割れ発生時の光ファイバによるひずみから算出した棒鋼の平均半径の差(腐食膨張による半径変化量)と、試験前の棒鋼の半径と除錆後の棒鋼の平均半径の差(除錆後の半径変化量)を図-5 に示す。この図は、棒鋼の断面で考えた場合、 $x \leq 0$ 部分が元の棒鋼、赤線で囲まれた部分が腐食膨張による増加分、青線で囲まれた部分は腐食生成物に変化した部分ということになる。これより、Fe から腐食生成物に変化した棒鋼の体積 V_0 (青部分)、腐食による体積膨張分 V_e (赤部分)を算出すると、 $(V_e + V_0) / V_0$ が体積膨張率になり、全体の平均は 1.5 となった。また、 V_0 を腐食量と鉄の密度を用いて算出した場合には 1.7 となった。

鉄筋を含む断面の EPMA による面分析結果(Fe_2O_3)を図-6 に示す。黒い部分が鉄筋で、コンクリートとの界面に赤から白色で示される濃度が高い部分が認められ、ここでは他の元素濃度は低かったことからこの領域が腐食生成物であり、その厚さは最大で 50 μm 程度であった。

4. まとめ

電食下におけるコンクリート中の鉄筋腐食に関して、光ファイバセンサによって腐食膨張挙動およびひび割れ発生までをモニタリングできる可能性を示すとともに、コンクリート中における腐食生成物の体積膨張率を算出した。

参考文献 1) 間本大輔ほか: 鉄筋の腐食ひび割れ発生限界腐食量に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 79 巻, 第 701 号, pp.867-876, 2014.7.

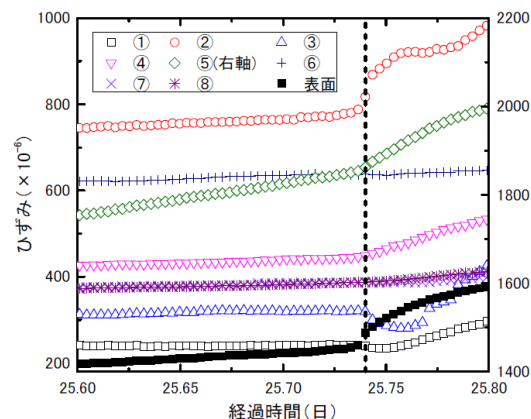


図-3 ひび割れ発生前後のひずみ

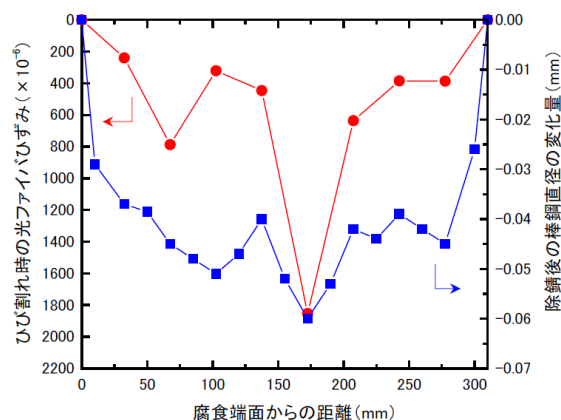


図-4 ひび割れ時の光ファイバひずみと除錆後の棒鋼直径の変化量

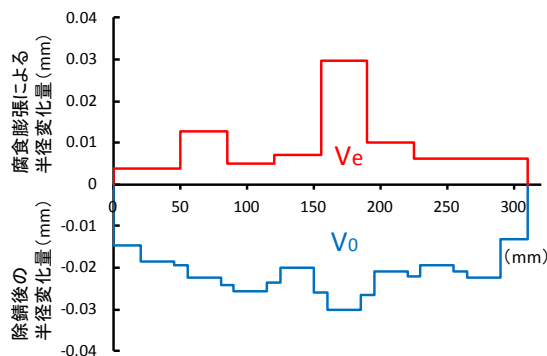


図-5 ひび割れ時および除錆後の棒鋼の半径変化量

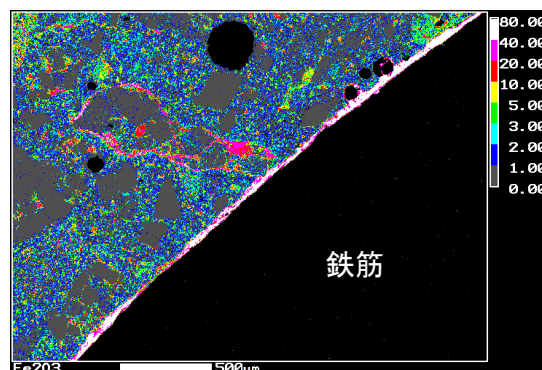


図-6 EPMA による面分析結果