

光ファイバセンサを用いた鋼材腐食モニタリングおよび腐食部の断面観察

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

Abstract : The electrolytic corrosion test of embedded rebar with optical fiber sensors in concrete was conducted to clarify the volumetric expansion behavior due to corrosion. The monitoring using optical fiber sensors is useful to grasp the corrosion progress of the rebar, and can clearly detected the time of a corrosion cracking from the expansion strain behavior induced by rebar corrosion. The volume expansion ratio of corrosion products in concrete was in the range of 1.2-2.0, and the value was less than the theoretical one estimated from the density and the atomic weight of corrosion products because it was under the restraint condition. According to observations by EPMA after the corrosion test, corrosion products mostly remained in the interface between the rebar and the concrete, and did not diffuse into the inside of concrete through micro-pores in the paste.

Key words : Optical fiber sensor, Corrosion, Volume expansion, Electrolytic corrosion test

1. はじめに

鉄筋腐食は、腐食過程において鉄がさまざまな腐食生成物に変化することで体積膨張が生じる。腐食自体は電気化学的反応によるものであるが、その過程で体積変化を伴うことから、鉄筋の腐食過程における体積膨張挙動を物理的に捉えることができれば、腐食状態を把握でき、さらには腐食の進展予測も精緻に行うことが可能となる。

一方で、RC構造物のコンクリートの拘束下にある鉄筋は、腐食の進展に伴って体積が徐々に増加し、周囲のコンクリートに鉄筋の周方向の引張応力が加わることで腐食ひび割れの発生に繋がる。腐食ひび割れが生じると、腐食因子の侵入が容易になることで加速度的に劣化が進行することになるが、一般的には、ひび割れは外観からの変状により検出できることが多い。したがって、腐食の発生・進展だけでなく、ひび割れ発生までの期間において腐食進展モニタリングが可能となれば、構造物の維持管理を行う上で極めて有用になる。

本研究は、光ファイバセンサを用い、電食下におけるコンクリート中の鉄筋の腐食膨張挙動や腐食ひび割れ発生をひずみとして捉えることが可能であるかを検討し、さらにはEPMAによる腐食部の断面観察を行い、腐食過程について考察を加えたものである。

2. 実験概要

2. 1 光ファイバセンサの概要

光ファイバセンサは、さまざまな対象物のひずみや温度などの計測に用いられている。一般的な特長としては、電気センサが長距離の場合に伝送損失が大きいのに対し、光信号のため長距離伝送が容易である、外部の電磁ノイズによる影響がない、1本の光ファイバで多点計測が可能であるなどが挙げられる。また、計測対象としては広範囲にわたるものが多い。本研究では、さまざまな光ファイバセンサの中からFBGセンサ¹⁾を選定し、鉄筋の腐食に伴う周方向の体積膨張ひずみが計測可能な仕様にして用いた。測定原理としては、光ファイバケーブルの一部に紫外線によって回折格子が形成された

センサ部において、伸縮や温度変化によって回折格子間距離が変わることで、それに応じた反射光の波長変化を物理量に変換する仕組みを利用している。光ファイバは直径が約150 μm と極めて細いため、鉄筋に設置することでひずみゲージなどのように面的に外部からの劣化因子を阻害することがなく、計測において電流も流れないため腐食に影響を与えない。

波長からひずみへの換算は式(1)¹⁾に基づき、本研究で使用した FBG センサの中心波長1550nm を乗じて $1.2 \times 10^{-3} \text{nm}/\mu\epsilon$ となる。さらに式(2)によって計測時および初期値の波長からひずみを算出した。

$$\frac{1}{\lambda} \frac{\Delta\lambda}{\Delta\epsilon} = 0.78 \times 10^{-6} \mu\epsilon^{-1} \quad (1)$$

$$\epsilon = (\lambda - \lambda_0) / 1.2 \times 10^3 \quad (2) \quad \text{ここに、}\epsilon: \text{ひずみ}(\mu), \lambda: \text{波長}(\text{nm}), \lambda_0: \text{初期波長}(\text{nm}).$$

2. 2 試験体

みがき棒鋼($\phi 30 \times 350\text{mm}$)の各25mm区間にFBGセンサが中央部に位置するよう光ファイバケーブル($\phi 150\mu\text{m}$)をらせん状に1巻きして設置した(図-1)。8個のFBGセンサは断線などですべてが測定不能にならないように直列配置せず、個別に計測機と接続した。このみがき棒鋼を最短かぶりが50mmとなるようコンクリート(W/C=0.6, $\sigma_{28}=41\text{N}/\text{mm}^2$)に埋め込んだ。脱型後、コンクリートから露出した棒鋼は被覆処理し、かぶり面の中央部には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。

2. 3 電食試験

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 $^{\circ}\text{C}$ 一定の湿潤状態とし、かぶり面から10mmの位置に陰極材となる銅板を配置し、棒鋼を陽極材として200mAの一定電流による電食試験を行った。FBGセンサによる棒鋼の周方向ひずみを8ヶ所、ひずみゲージによるコンクリートかぶり面中央部のひずみを1ヶ所それぞれ連続的に計測した。腐食ひび割れ発生後、試験体のコンクリート部分を除去して棒鋼を取り出し、10%のクエン酸水素二アンモニウム水溶液(60 $^{\circ}\text{C}$)に浸漬させ、腐食生成物を除去して腐食量の測定を行った。また、ノギスを用い除錆後の棒鋼の直径を光ファイバを巻いている区間(25mm)、巻いていない区間(10, 20mm)に分けてそれぞれ10点計測し、平均直径を算出した。

2. 4 腐食部におけるEPMAの面分析

腐食部分の断面を観察するため、電食試験後の棒鋼中央部の腐食部におけるコンクリートを切り出し、エポキシ樹脂で包埋した後、棒鋼の軸方向に直交する方向に切断して縦横20mm程度の小片を得た。その切断面を研磨して、分析面とした。研磨後、導電性を与える目的で炭素を蒸着して、電子線マイクロアナライザ(EPMA)による面分析に供した。

3. 実験結果および考察

3. 1 棒鋼のひずみ挙動

既報²⁾において、大気中の塩分環境下では目視による腐食状態の進展とともに光ファイバセンサによるひずみの増加が確認されている。本検討はコンクリート中の電食下の検討であり、電食過程における棒鋼のひずみを区間ごとに図-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化は小さく、その後は急激に増大しており、特に中央に近い区間⑤で増加が顕著に認められる。表面ひず

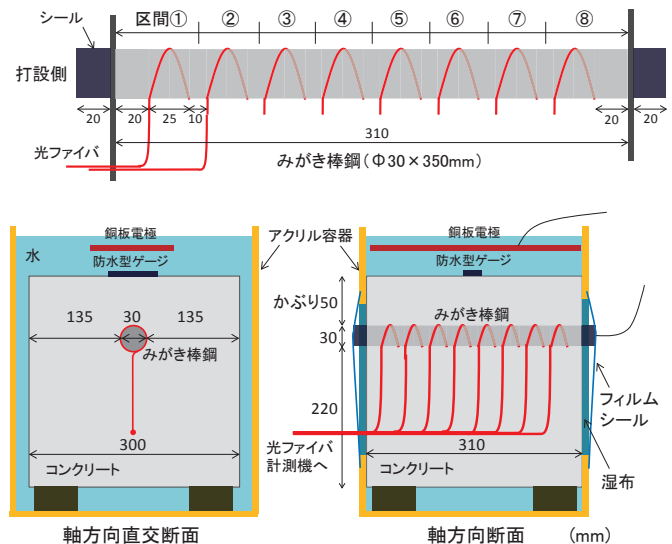


図-1 試験体の概要

みについても、光ファイバひずみのおおよそ平均的な挙動と類似している。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。

これには主に2つの理由が考えられる。1点目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³⁾では、最初の腐食生成物であるFe(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どのように表れるかについてはさらなる検討が必要である。2点目には、電食以外の要因が挙げられる。複合材料であるコンクリート中では部位によって腐食進展に関わる水や酸素の供給が異なること、新たな腐食生成物の形成による電池作用、酸素や水素の発生によるpHの変化などが影響することが考えられる。これらに加え、コンクリートのような強アルカリ環境下における不動態皮膜の形成が、初期の体積膨張ひずみを小さくさせる要因になっていることも考えられ、その検証については後述する。

腐食ひび割れ発生前後のひずみを図-3に示す。電食開始後25.74日において、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ることがわかる。腐食に伴い徐々に体積膨張が生じていた棒鋼は周囲のコンクリートに拘束されていたが、貫通ひび割れの発生によって応力が解放され、光ファイバセンサーで計測していた周方向ひずみが急増したものであり、このときにかぶり面にひび割れが生じたものと考えられる。なお、ひび割れは写真-1に示すように棒鋼周辺部からかぶりが最も小さい50mm部分のみ貫通して発生していた。

3. 2 各区間におけるひずみ分布と腐食生成物の体積膨張率

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、打設面側の腐食端面からの距離に応じ

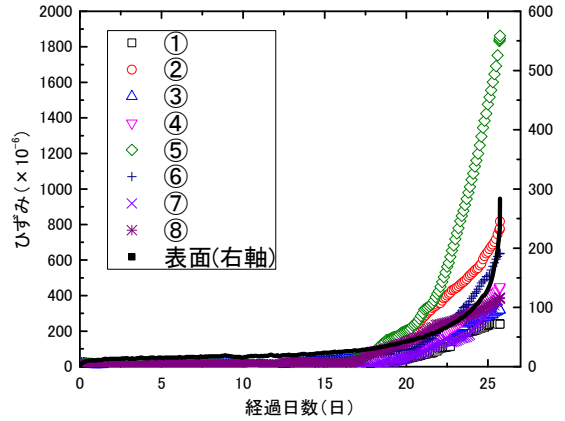


図-2 電食期間における棒鋼のひずみ

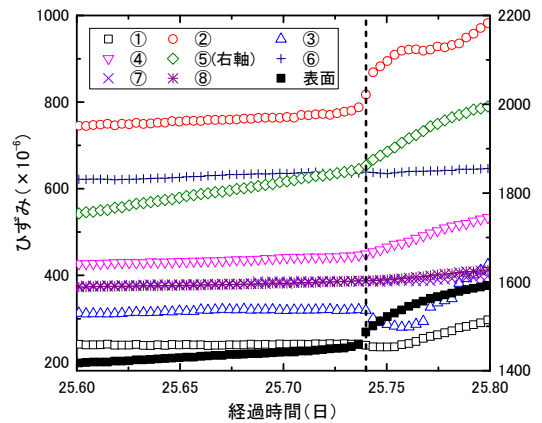


図-3 腐食ひび割れ発生前後のひずみ



写真-1 かぶり面の腐食ひび割れ状況

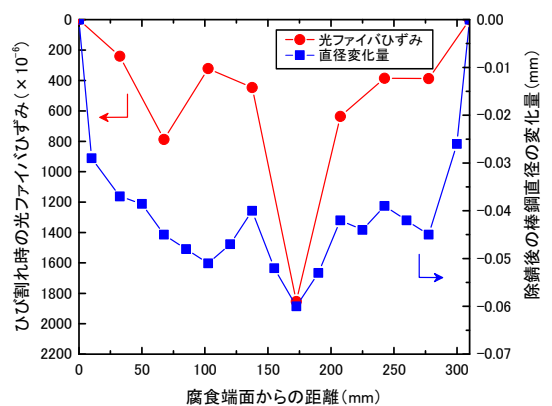


図-4 光ファイバひずみと棒鋼直径の変化量

て図-4 に示す。2つの計測値は単位が異なるため、腐食端面からの距離 172.5mm における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縦軸を調整した。図より両計測値の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ひび割れ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、内部の腐食生成物の体積膨張とともに外部に押し出されたことなどが考えられ、試験終了後に観察した結果においても腐食生成物がコンクリートの外へ若干流出していたことが確認されている。

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、 $y=0$ を棒鋼の軸方向断面の境界とした場合、 $y \leq 0$ 部分が元の棒鋼、直線で囲まれた部分が腐食膨張による増加分、点線で囲まれた部分は Fe が腐食生成物に変化した部分ということになる。これより、腐食生成物に変化した棒鋼の体積 V_0 (点線部分)、腐食による体積膨張分 V_e (直線部分)を算出すると、 $(V_e + V_0) / V_0$ が体積膨張率になり、各区間①~⑧で 1.2~2.0、全体では 1.5 となった。また、 V_0 を除錆後の腐食量と鉄の密度を用いて体積として求め、 V_e は同様に光ファイバセンサで計測したひずみを基に算出した場合には 1.7 となった。電食試験における腐食生成物の体積膨張率を、試験終了後の試験体を切断して顕微鏡により錆層厚さ、錆層除去後の半径を計測して算出している報告がある⁴⁾。これによると、電流密度が 0.2mA/cm^2 を境に体積膨張率の値が大きく変わり、低速電食は 4.3~6.8、高速電食では 1.3~2.4 となっている。本試験では電流密度が 0.685mA/cm^2 で高速電食の範疇となり、得られた結果は 1.2~2.0(全体では 1.5, 1.7)で既往の研究による実測結果と近い値になった。一方、腐食生成物の密度と原子量などから推定した場合、その種類によって 2.1~6.9 となるが⁴⁾、この結果は拘束の無い自由空間において各腐食生成物が単独で発生した場合の理論値である。しかし、実際には結晶構造の異なるさまざまな種類の腐食生成物が混在しており、これらがコンクリートに拘束された状態で閉ざされた空間で充填されるように生成していくために、個々の腐食生成物自体の密度は大きく変わらないが理論値より小さくなったと考えられる。

3. 3 鉄筋の腐食量

電食試験後にコンクリートから採取した棒鋼表面は、ほぼ一面に腐食生成物が生じており、腐食量を算出した結果は 10.1mg/cm^2 となった。コンクリート標準示方書維持管理編⁵⁾では、異形棒鋼を用いた電食試験においては、鋼材径などによって若干値は異なるものの、鋼材腐食量がおおむね 10mg/cm^2 以上で腐食ひび割れが発生するとされている。本試験では棒鋼の種類の違いはあるが腐食量はほぼ近い値になっており、光ファイバセンサ設置による影響は小さく、従来実施されてきた電食試験と同様に取り扱えると考えられる。

電食試験における金属の電解量、すなわち腐食量は式(3)のファラデーの法則に基づいて算出できる。

$$M_{ti} = \frac{i_{app} \cdot A \cdot t}{n \cdot F} \quad (3)$$

ここに、 M_{th} : 理論腐食量(mg/cm^2)、 i_{app} : 電流密度(mA/cm^2)、 A : 鉄の原子量(55.845g/mol)、 t : 電食時間(s)、 n : 鉄のイオン価数(2)、 F : ファラデー定数(96485C/mol)

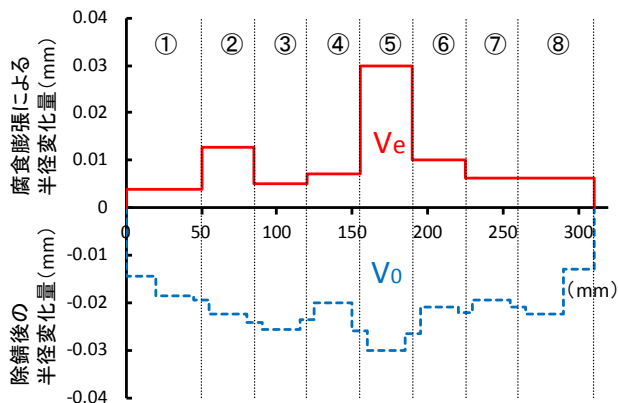


図-5 腐食ひび割れ時および除錆後の棒鋼の半径変化

本実験においては理論腐食量 $441\text{mg}/\text{cm}^2$ に対して実測値 $10.1\text{mg}/\text{cm}^2$ となり、電食の効率は約2.3%と小さい。電食における鉄筋腐食量の効率については、モルタル試験体のW/C、かぶり厚および電流密度を水準とした検討が行われ、その値は1~77%の範囲に及び⁶⁾、すべての電流が鋼材の腐食反応に消費されていない結果となっている。効率が低下した主な理由としては、鉄の溶解とは異なる陽極での反応である水の電気分解による酸素の発生が挙げられ、その影響はコンクリートの塩化物イオン濃度、溶液のpHおよび電流密度によって異なる結果となっている。本実験においても同様に腐食効率は小さいことから鋼材近傍において酸素の発生とともに陰極で水素が発生し、その副次的効果として棒鋼周囲において徐々にアルカリ環境が失われ、後半には腐食反応が促進されている可能性もある。これが、腐食膨張ひずみの挙動について前述した、電解以外の要因が後半のひずみ増大に繋がったことも考えられる。

また、電食開始初期のひずみ増加が小さい理由の一つとして、コンクリート中のアルカリ環境下で形成される不動態皮膜の影響について検討を行った。コンクリート中の環境を再現するために飽和水酸化カルシウム溶液中において、棒鋼単独で次の2水準の電食試験を実施した。(I)棒鋼を飽和水酸化カルシウム溶液に浸漬後、すぐに電食を開始、(II)棒鋼を事前に7日間飽和水酸化カルシウム溶液に浸漬後、電食を開始した。棒鋼および電流量はコンクリートの電食試験と同様とし、不織布(ポリプロピレン)で覆ってスポンジに入れ、その表面に銅板を設置して1時間電食した。また、事前に不織布およびスポンジは飽和水酸化カルシウム溶液に浸漬した。試験結果を表-1に示す。

(I)の腐食効率は91%と理論値に近い値を示したが、棒鋼を事前に飽和水酸化カルシウム溶液で7日間浸漬した(II)は29%となり、理論値とは大きく乖離がみられる。不動態皮膜についてはどれくらいの期間で形成されるかは明らかになっていないが、(II)は(I)に比べて強アルカリ環境下のもとである程度の緻密な不動態皮膜が形成されたものと考えられると、上記結果が合理的に説明できる。

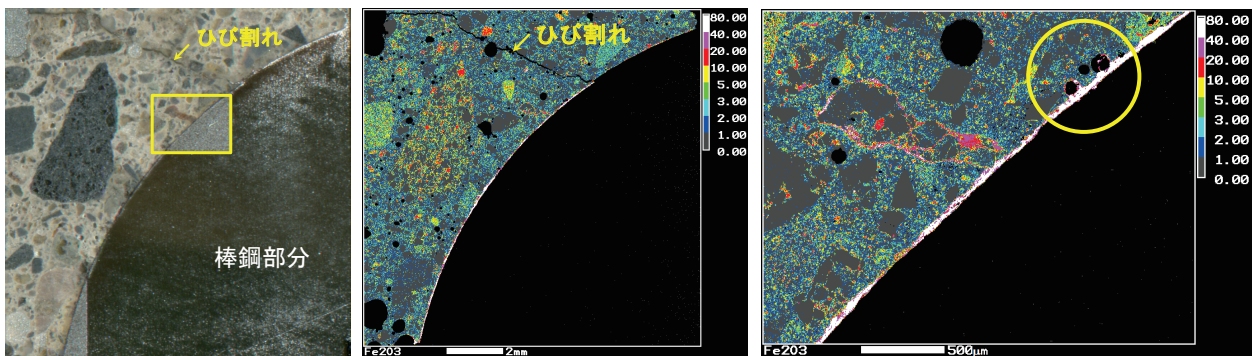
表-1 棒鋼の電食試験結果

種類	事前浸漬 (日)	理論腐食量 (mg/cm^2)	実測腐食量 (mg/cm^2)	腐食効率 (%)
I	0	0.605	0.552	91.2
II	7	0.605	0.174	28.8

3. 4 腐食部におけるEPMAの面分析

電食試験後の棒鋼中央部の腐食部におけるコンクリート断面のEPMAによる面分析結果を図-6に示す。各元素の濃度は標準試料のX線強度を標準として比例法により求め、それぞれの酸化物(Feは Fe_2O_3 , Caは CaO , Sは SO_3 , Siは SiO_2)としてのmass%で表示した。

図-6(a)の分析面の画像において、黒色部分は棒鋼があった箇所であり、ペースト部上方にはひび割れがみられる。(b) Fe_2O_3 の濃度分布では、ひび割れ部分には濃度の高い部分がみられないことから、腐食生成物はひび割れに侵入していないことが分かる。このひび割れが分析試料の切り出しや加工時に



(a)分析面の画像

(b) Fe_2O_3 濃度分布

(c) Fe_2O_3 濃度分布の拡大図

図-6 EPMAによる面分析結果

発生したとすると、ひび割れ部には腐食生成物が侵入してないのは当然といえる。一方、電食試験中に発生したと仮定すると、電食中には棒鋼周囲に堆積した腐食生成物が外殻のように閉じた空間を形成しており、電解による新たな初期腐食生成物は拡散せず閉じた空間内に留まり、それらの酸化・還元に伴う体積膨張に伴って棒鋼の周方向に引張応力が生じ、結果的にひび割れが発生したことが考えられる。

また、図-6(c)の Fe_2O_3 濃度分布の拡大図((a)の□部分)をみると、コンクリートと棒鋼の界面に白色で示される濃度が高い部分が認められ、ここではCaやSiなど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に相当し、その厚さは最大で50 μm 程度であった。図-5を参照すると、Feが腐食生成物に変わった部分とひび割れ時における体積膨張部分の和が腐食生成物の領域になると考えられ、その厚さは部位によって異なる。図では平均ひずみから平均半径を算出していること、試料の採取位置が厳密に特定できないために正確な腐食層厚さの検証は困難であるが、オーダー的には大差ないといえる。

一方、Fe濃度が非常に高い腐食生成物の層よりペースト側においては、Fe濃度が高い部分はほとんどないことから、前述したように腐食生成物はコンクリートと棒鋼の界面付近に留まり、ペースト内部まで拡散していないと考えられる。ただし、図(c)の拡大図の○部分においては界面近傍に100 μm 程度の空隙があり、空隙に沿ってFe濃度が高い部分がみられることから、棒鋼に接している空隙については腐食生成物が侵入している可能性があるといえる。

4. まとめ

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棒鋼の腐食膨張挙動の計測、ならびに腐食部の断面観察を行った結果、以下の知見を得た。

- (1) 光ファイバセンサを用い、電食下のコンクリート中における棒鋼の腐食進展を体積膨張ひずみとして捉えることで腐食モニタリングが可能であり、ひずみの挙動から腐食ひび割れの発生時期も明確に検出できる。
- (2) コンクリート中の腐食生成物の体積膨張率は部位によって1.2~2.0の範囲となり、全体では1.5または1.7となった。この値は個々の腐食生成物密度と原子量から推定した理論値以下となるが、実際には腐食生成物はさまざまな種類のものが閉ざされた空間で充填されるように生成するため、理論値より小さくなっていると考えられる。
- (3) 腐食生成物は、棒鋼とコンクリートの界面近傍の細孔部には若干侵入するものの界面部にほとんどが留まり、ペースト中の空隙などを通じてコンクリート内部への拡散はみられない。

参考文献

- 1) Alan D. Kersey, et al : Fiber Grating Sensors, JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, Vol.15, No.8, pp.1442-1463, Aug. 1997
- 2) 早野博幸, 井坂幸俊, 江里口玲 : 光ファイバセンサを用いた鋼材の腐食検知に関する研究, 土木学会第70回年次学術講演会講演概要集, vol.70, 部門V, pp.412-413, 2015
- 3) 本間大輔ほか : 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
- 4) 高谷哲, 中村士郎, 山本貴士, 宮川豊章 : コンクリート中の鉄筋の腐食生成物の違いがひび割れ発生腐食量に与える影響, 土木学会論文集E2(材料・コンクリート構造), Vol.69, No.2, pp.154-165, 2013
- 5) 土木学会 : コンクリート標準示方書[維持管理編], p.155, 2003
- 6) Gustavo Duffó et al : Application of gamma-ray radiography and gravimetric measurements after accelerated corrosion tests of steel embedded in mortar, Cement and Concrete Research, Vol.74, pp.1-9, 2015