特集 ジシンクリートエ、コンクリート構造

光ファイバセンサを用いたコンクリート中における 鉄筋の腐食膨張モニタリングの開発

早野博幸

RC 構造物中の鉄筋は腐食すると体積膨張が生じ,腐食が進展するとコンクリートのひび割れや剥落な どの第三者被害に繋がる。これらの劣化の直接的要因となるコンクリート中の鉄筋の腐食膨張挙動を,光 ファイバセンサによりひずみとして連続的に捉えるモニタリング技術を開発した。また,鉄筋は腐食膨張 を周囲のコンクリートに拘束されているが,腐食ひび割れがかぶり表面まで貫通するとその拘束が一部開 放され,腐食膨張ひずみの勾配が大きく変わる。したがって,腐食膨張モニタリングにより腐食ひび割れ の発生も検知可能であることを明らかにした。

キーワード:コンクリート構造物,鉄筋,腐食,ひび割れ,光ファイバセンサ,モニタリング

1. はじめに

鉄筋は、腐食過程において鉄が様々な腐食生成物に 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行うことが可 能となる。一方で、コンクリート構造物中の鉄筋は、 腐食の進展に伴って体積が徐々に増加し、周囲のコン クリートに大きな引張応力が加わることで腐食ひび割 れの発生を引き起こす。したがって、腐食の発生・進 展だけでなく、コンクリートのひび割れもモニタリン グが可能となれば、構造物の維持管理を行ううえで極 めて有用になる。

本報告は、コンクリート中の鉄筋の腐食膨張挙動な らびに腐食ひび割れ発生を、光ファイバセンサのひず みとして連続的に捉えるモニタリング技術について概 説する。

2. 光ファイバセンサ

光ファイバセンサの特長としては,光信号を利用し ているため長距離伝送が容易,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, などが挙げられる。本研究では,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。測定原理は,光ファイバケーブルの一部に回折格



写真―1 光ファイバセンサ

子が形成されたセンサ部において、外力や温度変化に 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としてひずみに変換する仕 組みを利用している。光ファイバは**写真**—1に示す ように直径が約150µm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ることがない。

3. 実験概要

(1) 大気中における鉄筋の腐食膨張モニタリング

基礎的検討として、まずは大気中で鉄筋の腐食膨張 がモニタリング可能であるかの検討を行った。図―1 に示すように、みがき棒鋼(JIS G 3108、 φ 20 × h 50 mm)の軸方向の中央区間 25 mm に、センサ部 が中央に位置するように光ファイバをらせん状に巻き



図-1 光ファイバセンサの設置状況(周回数:3)

付け,両端を棒鋼に接着固定した。光ファイバの周回 数を1,2,3回の3水準として各3体の試験体を作製 し,棒鋼の上および下端部面以外の側面に対して 10% NaCl水溶液をしみ込ませた脱脂綿で塩水を付着 させ,30℃90% R.H.の恒温恒室槽に入れ腐食膨張ひ ずみの計測を行った。また,所定の時期に試験体の腐 食状態を写真撮影し,棒鋼の端部を曲率補正した後に 腐食面積率を算出した。計測はセンサの波長が許容値 を超えた時点および14日で終了とし,棒鋼に設置し た光ファイバを除去した後,10%のクエン酸水素二ア ンモニウム水溶液(60℃)に浸漬して除錆し,腐食 量を測定した。

(2) コンクリート中における鉄筋の腐食膨張モニ タリング

一般のコンクリート中における塩害環境下では,鋼材の腐食開始からかぶりコンクリートにひび割れが発生するまではかなりの期間を要する。そこで腐食機構は若干異なるが,早期に腐食が進行する電食試験を実施した。試験体の概要を図―2に示す。センサ部がみがき棒鋼の各25mm区間の中央部に位置するよう光ファイバケーブルをらせん状に1巻きして固定し,各センサは断線ですべてが測定不能と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/C0.6)に埋設した。脱型後,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。

試験体は20℃一定の槽内で湿潤状態とし,200 mA の一定電流による電食試験を腐食ひび割れが表面に発 生するまで実施した。電食開始後,光ファイバセンサ による棒鋼の腐食膨張ひずみを8箇所,ひずみゲージ によるかぶりコンクリート表面のひずみを1箇所それ ぞれ連続的に計測した。試験終了後,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℃)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各区間ごとにそれぞれ10 点計測し、平均直径を算出した。

4. 実験結果および考察

(1) 大気中における鉄筋の腐食膨張モニタリング

光ファイバセンサで計測した大気中における塩分環 境下の棒鋼の腐食膨張ひずみを図-3に示す(凡例: 1(光ファイバ周回数)-1(No.))。時間の経過ととも にひずみは増加傾向を示しているが,計測開始から3 ~5日まではひずみの増加傾向は緩やかであり,それ 以降は腐食の進展に応じて試験体ごとに増加割合が 様々ではあるが,急激な増加傾向を示している。腐食 状態の目安となる腐食面積率と腐食膨張ひずみの関係 について検討するため,終了となる14日まで計測で きた各1体について腐食面積率を算出し,腐食膨張ひ





ずみとの関係を図―4に示す。計測開始から0.7日の 腐食面積率はいずれも約20%程度と腐食が進展して いるが、ひずみは大きくても数十μ程度であり大きな 値ではない。光ファイバの周回数が3の試験体32に 着目すると、他より腐食面積率が小さくてもひずみが 増大する傾向があり、30%程度を超えると指数関数的 に増大した。光ファイバの周回数が多いほど鋼材表面 との接触長が長くなり、腐食部分に接する確率が高く なって早く腐食検知できるが、極端に周回数が多すぎ ると鋼材への外来腐食因子の到達を妨げることが予想 される。ただし、今回は厳密には各試験体が同じ腐食 の発生・進展となっているかは定かではないので、光 ファイバの周回数が腐食の検知確度に及ぼす影響を検 証することは難しいと考えられる。

図-4より、腐食面積率が30~50%程度を上回る ときから腐食膨張が急激に増大し、図-3では3~7 日に相当する。腐食膨張ひずみが急増する原因として は,腐食生成物の生成経路として,鉄イオン水溶液か ら出発したものが最終形態としていずれも固相であ る、オキシ水酸化鉄(FeOOH)や酸化鉄(Fe₃O₄ など) になることから²⁾, 固相に変わることによってひずみ として表れることが考えられる。また腐食初期に発生 する腐食生成物は液体中のイオンから形成するコロイ ド状であり³⁾,これらは構造的には液体に近い性質と みなせる。したがって高湿度下で水膜ができているみ がき棒鋼表面では平面的に広がることで堆積しにく く、ひずみとして表れにくいことが影響しているもの と考えられる。その後は、アノードとカソードが生起 する電池作用と併せて,高温高湿となる大気中では, 腐食速度を加速させる水と酸素が十分に供給されるた め急速に腐食が進展し、ひずみが増大したと考えられ る。また、腐食生成物については非晶質と結晶質のも のが存在し、結晶化するか否かも体積膨張に大きく影

響すると考えられるが,いずれにしても本環境条件で の大気中の塩分環境下における腐食では,急激に体積 膨張が生じる加速期があることが明らかとなった。ま た,最終的には図-3より3000µ程度になるとひず みの増加割合が小さくなるものもみられ,大量の腐食 生成物が表面に付着することによって酸素や水が内部 に供給されにくくなり,腐食速度が遅くなったことが 考えられる。

各試験体の計測終了後の腐食量と腐食膨張ひずみの 関係を図—5に示す。なお,試験体1-3は途中で光ファ イバの破損がみられたため図から除いた。図より,光 ファイバの周回数にかかわらず腐食量とひずみは概ね 正の相関が認められ,腐食がかなり進行している状態 では,腐食量の増加に伴って体積膨張ひずみも大きな ものとなっていることが分かり,膨張ひずみより腐食 量が推定できる可能性があることを示している。



(2) コンクリート中における鉄筋の腐食膨張モニ タリング

電食試験でのコンクリート中の鉄筋の腐食膨張ひず み、およびかぶり表面のひずみ挙動を図―6に示す。 ここでは、後に腐食層の厚さについて検証を行うこと から、らせん状に設置している光ファイバの腐食膨張 ひずみを円周方向に換算した。図より、いずれの挙動 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。既往の研究⁴⁾ 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に、膨 張圧に寄与しないことを指摘しており、初期において はその現象が表れている可能性がある。また、表面ひ ずみについては、腐食膨張ひずみのおおよそ平均的な 挙動と類似していることから、コンクリート中におい



ても光ファイバセンサによって鉄筋の腐食膨張ひずみ はモニタリングできていると考えられる。

(3) コンクリートの腐食ひび割れの検知

電食試験後半の25.60日以降における腐食膨張ひず み、およびかぶり表面のひずみ挙動を図-7に示す。 25.74 日付近(図の点線)で、表面ひずみの勾配が大 きく変化しており、この時点で腐食による貫通ひび割 れが発生している。一方で、鉄筋の腐食膨張ひずみの 勾配も、ほぼ同時期に変わっていることがわかる。腐 食に伴い体積膨張した鉄筋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拘束が 一部解放され、急増したひずみを捉えたものと考えら れる。ひび割れは写真―2に示すように、ひずみゲー ジを貼付したかぶり表面にのみ、鉄筋軸方向に貫通し て発生しており、この腐食ひび割れを検知したもので ある。腐食ひび割れは、一般的には外観からしか把握 することはできないが、このように鉄筋の腐食膨張を モニタリングすることにより、ひび割れの発生時期ま で把握することが可能となる。





写真-2 コンクリートの腐食ひび割れ

(4) モニタリング結果の検証

電食試験後に,試験体から取り出した棒鋼の腐食量 は10.1 mg/cm²となった。コンクリート標準示方書維 持管理編⁵⁾では,鋼材径等によって若干値は異なる ものの,電食試験では鋼材腐食量がおおむね10 mg/ cm²以上で腐食ひび割れが発生するとされている。本 試験の腐食量は,示方書の値にほぼ近い値になってい ることから,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。

電食試験前の棒鋼の半径と腐食ひび割れ発生時の腐 食膨張ひずみから算出した棒鋼の平均半径の差(腐食 ひび割れ時の膨張による半径変化量)と,電食試験前 の棒鋼の半径と除錆後の平均半径の差(除錆後の半径 変化量)を図-8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, $y \leq 0$ 部分が試験前の 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 V₀(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 + V₀)/V₀ が腐食生成物の体積膨張率になり,各区間①~⑧で1.2 ~2.0,全体では1.5 となった。コンクリート試験体





図―9 EPMA による面分析結果

の両端部から腐食生成物がやや流出していたことや, 区間⑤が突出して腐食膨張ひずみが大きかったことを 勘案すると,腐食ひび割れ発生までの腐食生成物の体 積膨張率は区間⑤の2.0に近い値を示すと考えられる。

区間⑤における腐食部分の断面を対象として, EPMAによる面分析を行った結果を図—9に示す。 (a)分析面の画像の四角で囲んだ部分について, Fe₂O₃ 濃度分布を算出した。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, この領域が腐食層に相当し,その厚さは数十µm程 度であった。一方,図—8では 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 が腐食層になると考えられ,区間⑤では 60µm 程度 である。これらは平均ひずみから平均半径を算出して いることから特定部分の値を示すものではないが, EPMA による面分析で算出した腐食層厚さと近い値 になっていることがわかる。

5. おわりに

光ファイバセンサを用い,コンクリート中における 鉄筋の腐食膨張挙動ならびに腐食ひび割れがモニタリ ング可能であることを示した。現在,既存の道路橋に 適用するなど実用化の検討を開始しており,インフラ 構造物の維持管理における本技術の有効性について, さらなる検証を進めていく予定である。

JCMA

《参 考 文 献》

- Alan D. Kersey et al, Fiber Grating Sensors, JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, Vol.15, No.8, pp.1442-1463, 1997.8
- 2) 三沢俊平,鉄鋼の湿食形態と腐食生成物,日本金属学会会報,第24巻, 第3号, pp.201-210, 1985
- 3) 木村正雄,鉄が濡れるとどうなるか一液体/金属界面の反応観察,放 射光,第16巻,第1号,pp.12-22,2003
- 4)本間大輔はか、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
- 5) 土木学会, コンクリート標準示方書 [維持管理編], p.155, 2003



[筆者紹介] 早野 博幸(はやの ひろゆき) 太平洋セメント(株) 中央研究所 第2研究部 インフラ保全技術チーム 主席研究員