光ファイバセンサを用いた大気中の塩分環境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　○吉田　愛　早野　博幸　井坂　幸俊　江里口　玲

1．はじめに

RC 構造物の腐食の開始及び進展は，従来より電気的手法により推測されてきた．しかし，自然電位法や分極抵抗法による電気的手法はコンクリートを介して測定を行うため，測定値から実際の鉄筋腐食状態を推測することが困難な場合がある．そこで本研究では腐食に伴う体積膨張に着目し，大気中において光ファイバセンサを用いて腐食の開始からその進展までの体積膨張ひずみを定量的に捉えることが可能であるか実験的検討を行った．

2．実験概要

図-1 に試験体概要を示す．みがき棒鋼（JIS G 3108，φ20×h50mm）の軸高さ方向の中央区間 25mm に，FBG 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付け，ファイバの両端を棒鋼に接着固定した．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.の恒温恒湿槽に入れひずみの計測を行った．ひずみは計測時および初期値の波長から算出した[1)]．また，測定からの経過日数が 0.7，3，7，10，14 日にて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．

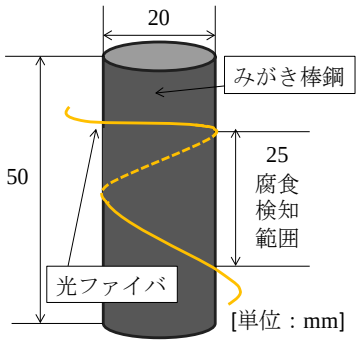

図-1　試験体概要(1 巻き)

3．実験結果及び考察

3．1　腐食膨張ひずみ

試験終了までの経過時間と光ファイバセンサによるひずみの関係を図-2 に示す(凡例：1(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 日までひずみが計測できた各 1 体について腐食面積率を算出し，ひずみとの関係を図-3 に示す．光ファイバの周回数が 3 の試験体 3-2 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，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．また，腐食面積率が 30～50%程度を上回るときから体積膨張が急激に増大することが分かる．この理由として，腐食初期から腐食後期にかけて腐食生成物が変化していることが考えられる．腐食初期に発生する腐食生成物は液体中のイオン

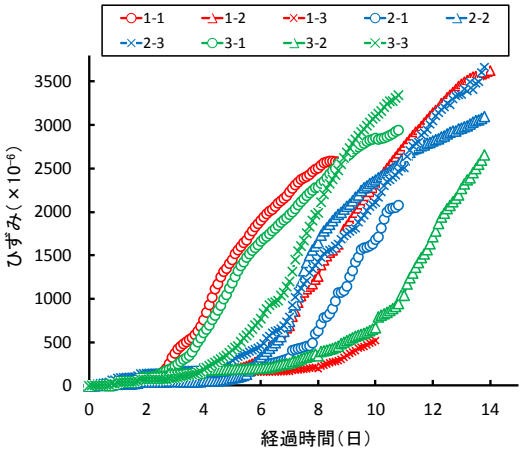

図-2　試験終了までの経過時間とひずみの関係

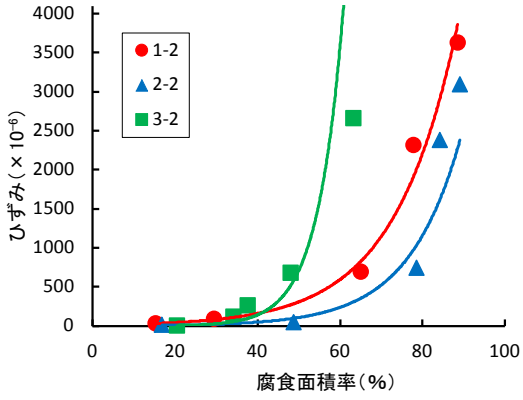

図-3　腐食面積率とひずみの関係

キーワード　光ファイバセンサ，鉄筋腐食，体積膨張，ひずみ
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　TEL 043-498-3902

から形成するコロイド状であり [2]，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，電池効果と併せて，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．いずれにしても本条件の高温高湿となる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．

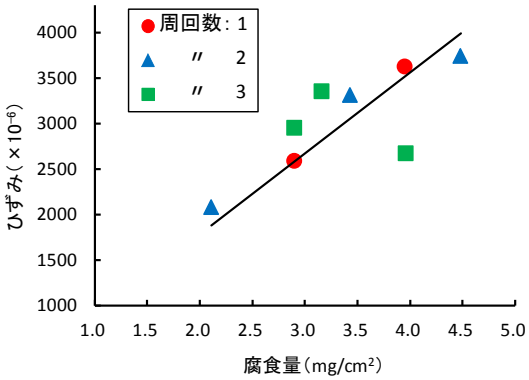

図-4　腐食量とひずみの関係

各試験体の計測終了後の腐食量とひずみの関係を**図-4** 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関わらず腐食量とひずみは概ね正の相関が認められ，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．以上より，大気中における塩分環境下において，棒鋼の腐食膨張をひずみとして定量的に評価が可能なことが分かった．また，腐食量および腐食面積率とひずみは相関が認められ，腐食の進展に応じてひずみが増大することが明らかとなった．

表-1　X 線回折による腐食生成物の分析結果

経過時間（日）	腐食生成物組成（%）					腐食量
	α-FeOOH	β-FeOOH	γ-FeOOH	Fe_3O_4	others	(mg/cm²)
4	3.0	13.0	1.0	0.0	83.0	1.0
15	5.2	6.8	1.8	0.0	86.2	2.2

※others：X 線回折では定量できない非晶質な腐食生成物

３．２　X 線回折による腐食生成物の分析結果

腐食期間の違いによる腐食生成物を比較するため，別途みがき棒鋼を腐食させ経過日数 4,15 日における X 線回折による腐食生成物の定量試験を実施した．腐食促進は，光ファイバセンサを設置した試験と同様な温湿度で実施した．**表-1** に定量試験結果を示す．X 線回折では定量できない非晶質な腐食生成物を除くと，経過日数 4,15 日のいずれも塩分環境下でのみ生成される β-FeOOH が最も多く Fe_3O_4 は確認できなかった． Fe_3O_4 は初期の腐食生成物の堆積により，酸素の供給が不足した腐食生成物内部のオキシ水酸化鉄から還元されるものであり，特に還元反応性の高い β-FeOOH から生成されやすいと報告されている [3]．今回 Fe_3O_4 が確認できなかったことから，腐食生成物の堆積量が少なく腐食生成物に十分に酸素が供給されたため β-FeOOH の還元反応が起きなかったと考えられる．また，経過日数 4 日から 15 日にかけて，塩分環境ではない自然環境下で生成しやすい α-FeOOH, γ-FeOOH の比率が増加し，β-FeOOH 比率の減少が確認された．これは，塩水塗布が不十分であった領域の腐食が時間経過とともに進行したためと考えられる．X 線回折による分析に用いたみがき棒鋼の腐食量は経過日数 15 日でも 2.2mg/cm² であり，ひずみ計測での腐食量（**図-4**）と比較してやや少ない値であった．これは，温湿度は同一であったが試験槽が異なり，槽内の風量が異なったために腐食量に差異が生じたものと考えられるため，さらに腐食量が増加した時点で再度分析を実施する予定である．

４．まとめ

大気中の塩分環境下において，光ファイバセンサを用いることにより棒鋼の腐食開始から腐食進展までを定量的に捉えることができ，さらに棒鋼の体積膨張ひずみと腐食面積率・腐食量の関係を明らかにした．

［参考文献］

1)早野博幸ほか：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
2)木村正雄：鉄が濡れるとどうなるか－液体/金属界面の反応観察，放射光，第 16 巻，第 1 号，pp.12-22，2003
3)菅江清信ほか：金電極上のオキシ水酸化鉄の還元挙動の電気化学的解析，第 59 回材料と環境討論会講演集，B-303