

## 腐食生成物の生成環境を考慮した腐食ひび割れ幅と腐食量の関係

京都大学大学院 学生会員 ○西澤 彩  
住友大阪セメント(株) 正会員 中村 士郎

京都大学大学院 正会員 高谷 哲  
京都大学大学院 正会員 山本 貴士  
京都大学大学院 フェロー 宮川 豊章

## 1. 研究目的

腐食生成物は様々な種類があり、結晶構造が異なるため密度や体積膨張倍率も異なる。しかし、鋼材腐食によるひび割れ幅と腐食量の関係において、腐食生成物の違いを考慮した研究は少ない。そこで本研究では、様々な環境で生じた腐食生成物を粉末 X 線回折分析により同定するとともに、腐食量とひび割れ幅を測定した。その結果から、腐食生成物の生成環境を考慮してひび割れ幅と腐食量の関係を検討した。

## 2. 実験概要

## (1) 電食試験体

100×100×400mm の角柱供試体で、かぶり 20mm の位置に長さ 350mm(腐食区間 300mm)の鉄筋を一本配置した。実験要因は、コンクリートとモルタル、水セメント比(40, 50, 60%), 鉄筋の種類(異形棒鋼 D19, 磨き丸鋼 φ 19), 電流密度(高速 1.7mA/cm<sup>2</sup>, 低速 0.17mA/cm<sup>2</sup>)である。電食試験方法は既報の研究<sup>1)</sup>と同様である。ひび割れ幅はクラックゲージを用いて 50mm ピッチで測定し、7 点の値を平均した。腐食量は JCI-SC1 に従って、60°C, 10%のクエン酸水素二アンモニウム水溶液に腐食後の鉄筋を 24 時間浸せきさせ、以下のように求めた。

$$\text{単位面積当たりの腐食減少量(mg/cm}^2\text{)} \\ = \frac{\text{元の鉄筋質量(mg)} - \text{さび除去後の鉄筋質量(mg)}}{\text{鉄筋の腐食区間の表面積(cm}^2\text{)}}$$

## (2) 暴露試験体

三重県の漁港に 26 年間暴露(1986 年に設置)された供試体を用いた<sup>2)</sup>。120×120×1300mm の角柱供試体でかぶり 25mm の位置に D10 の鉄筋を 2 本配置している。暴露-1 のみ、鉄筋は 4 本配置している。ひび割れ幅は 100mm ピッチで測定し、平均した。供試体の端部はコンクリートの欠損が多く見られたため、腐食生成物は中央区間から採取した。腐食量の測定では、元の鉄筋質量の記録がなかったため、鉄筋の単位長さあたりの質量に測定した鉄筋長さを乗じて元の鉄筋質量を求めた。ただし、腐食量はかぶりに比例するという報告<sup>3)</sup>に従い、かぶり 20mm の腐食量に換算した。

## (3) 塩水散布試験体

供試体は現在存在しないが、中塚の既往の研究<sup>4)</sup>で示された平均腐食ひび割れ幅と腐食量の測定結果を用いる。供試体は 100×200×1600mm の RC はりである。かぶり 20mm の位置に異形棒鋼 D16 の主筋を 2 本配置している。ひび割れ幅は 50mm ピッチで測定し、これらの値を平均した値であり、腐食量の測定は電食試験体と同様である。

## 3. 実験結果および考察

各試験体の粉末 X 線回折分析で得られた結果をまとめて表-1 に示す。各腐食生成物の密度、体積膨張倍率も併せて示す。体積膨張倍率は、式(1)に示すように密度と原子量から求めた理論値である。

$$\gamma = \frac{\rho_{Fe} \times \sum u_i n_i}{u_{Fe} \times n_{Fe} \times \rho} \quad (1)$$

ここに、 $\gamma$ : 腐食生成物の体積膨張倍率,  $\rho$ : 腐食生成物の密度(g/cm<sup>3</sup>),  $\rho_{Fe}$ : Fe の密度(g/cm<sup>3</sup>)( $\rho_{Fe} = 7.11$ ),  $u_i$ : Fe, O, H などの各原子量( $u_{Fe} = 55.85$ ,  $u_O = 16.0$ ,  $u_H = 1.0$ ),  $n_i$ : 腐食生成物の分子 1 個に含まれる Fe, O, H などの各原子の数, とする。自由膨張の場合はさび層内に空隙を生じる可能性があるが、コンクリート中では拘束があり空隙が小さいため、さび層は緻密な構造になっていることが確認できた。そのためコンクリート中の体積膨張倍率は式(1)で求めた理論値と大きな差はないと考える。

各試験のひび割れ幅と腐食量の関係を図-1 に示す。電食試験の各要因の違いはあまり見られなかったため、ここではすべてのプロットを電食試験の結果として扱うこととする。既報の研究<sup>1)</sup>と同様にひび割れ幅と腐食量の関係を求めて、式(2)で表す。

$$W_c = \frac{719\sqrt{w}}{\gamma - 1} \quad (2)$$

ここで、 $W_c$ : 腐食減少量(mg/cm<sup>2</sup>),  $w$ : ひび割れ幅(mm),  $\gamma$ : 体積膨張倍率, とする。

式(2)の  $\gamma$  に各腐食生成物の体積膨張倍率を代入したものを図中の点線で示す。図を見ると、塩水散布試験は  $\gamma = 2.1$  の付近に、暴露試験は  $\gamma = 3.1$  の付近にプロットされることが分かる。両試験とも塩分の多い環境であるが、

表-1 分析試料の要因および粉末X線回折分析の結果

分析試料					腐食生成物(名称, 化学式, 密度, 体積膨張倍率)					
					Goethite α-FeOOH	Akaganeite β-FeOOH	Lepidocrocite γ-FeOOH	Magnetite Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	塩化酸化鉄(III)カルシウム CaFeClO <sub>2</sub>	塩化水酸化鉄 FeCl <sub>2-x</sub> (OH) <sub>12+x</sub>
供試体名	供試体	W/C	鉄筋	電流密度	4.3	3.6	4.1	5.2	3.4	
					2.9	3.5	3.1	2.1	6.9	水溶解
C60-D-H	コンクリート	60	D19	高速(H)	○			○	○	○
C60-D-L	コンクリート	60	D19	低速(L)	○			○	○	○
C60-D黒皮-L	コンクリート	60	D19黒皮有	低速(L)	○		○		○	○
M40-R-L	モルタル	40	φ19	低速(L)	○			○	○	○
M50-R-L	モルタル	50	φ19	低速(L)	○			○	○	○
M60-R-L	モルタル	60	φ19	低速(L)	○			○	△	○
C60-R-L	コンクリート	60	φ19	低速(L)	○		△	○	○	○
暴露-1海側	コンクリート	60	D10	—	○		○	○		
暴露-1陸側	コンクリート	60	D10	—	○			○	○	
暴露-2	コンクリート	60	D10	—	○	○	○	○		
暴露-3	コンクリート	60	D10	—	○	○	○	○		
暴露-4	コンクリート	60	D10	—	○		○	○		

体積膨張倍率が異なる原因は水分の量の違いにあると考えられる。塩水散布試験は一日に一回塩水散布したため、供試体は常に湿潤状態であったと考えられる。一方、暴露試験では海水がかかる頻度は少なく、乾燥状態の期間も多かったことが予想できる。鉄筋が湿潤状態に保たれる場合は、β-FeOOHやγ-FeOOHが生じてその多くが還元し、Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>に変化する。一方、ひび割れが生じて、鉄筋が乾湿繰り返し環境に置かれる場合は、β-FeOOHやγ-FeOOHが生じ、十分な水分がないため還元することなく残存する<sup>5)</sup>。すなわち、どの環境下でも生成すると考えられているα-FeOOH(γ=2.9)とFe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>(γ=2.1)に加えて<sup>5)</sup>、塩水散布試験ではβ-FeOOHやγ-FeOOHの還元によりFe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>(γ=2.1)がより多く生成し、体積膨張倍率が2.1付近になり、暴露試験では、ひび割れ幅が大きい場合にβ-FeOOH(γ=3.5)やγ-FeOOH(γ=3.1)が生じ、体積膨張倍率が3.1の付近になったと考えられる。

電食試験では塩化酸化鉄(III)カルシウムが多く生じるため体積膨張倍率は5.1倍と高い値になるが、実構造物では生成量が少ないと考えられている<sup>5)</sup>。そのため、実構造物ではβ-FeOOHやγ-FeOOHが生じるかどうか体積膨張倍率を決定すると考えられる。腐食が軽微でひび割れ幅が小さい段階では約2.1倍、腐食が進行しひび割れ幅がある程度大きい段階では、乾湿繰り返し環境下で約3.1倍、常に水分が供給される環境下で約2.1倍になると考えられる。このように、構造物の置かれる環境から腐食生成物の体積膨張倍率を考慮すれば、外観から確認したひび

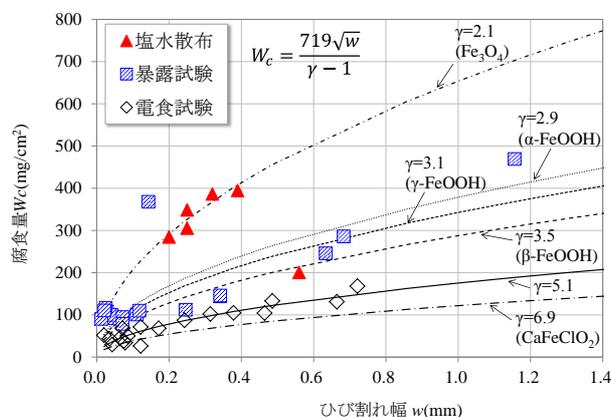


図-1 腐食ひび割れ幅と腐食量の関係

割れ幅を代入することで、内部の鉄筋腐食量をより正確に推定することができる。今後さらに、腐食量から局所的な腐食を評価できる断面減少率を推定することができれば、ひび割れ幅の観察から構造物の耐力を推定して、維持管理の優先度を評価できると考えられる。

参考文献： 1) 西澤彩ら他：腐食環境の違いがひび割れ幅と腐食量の関係に与える影響，土木学会年次学術講演会概要集，V-211，pp.421-422，2013 2) 鈴木宏信ら他：14年間海洋環境下に暴露した鉄筋コンクリート供試体の耐久性，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.1，pp.719-724，2003 3) 宇野祐司ら他：ひび割れ幅と腐食速度が鉄さび生成に与える影響に関する研究，土木学会年次学術講演会概要集，V-102，pp.203-204，2012 4) 中塚猛：曲げおよびせん断圧縮部の鉄筋が腐食したRCはりの耐荷特性に関する研究，京都大学大学院修士論文，2008 5) 西澤彩ら他：様々な環境下でコンクリート中の鉄筋に生じる腐食生成物の違い，土木学会関西支部年次大会，2014(投稿中)

キーワード：腐食生成物，ひび割れ幅，腐食量，腐食環境，体積膨張倍率

連絡先：〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 C1-454 構造材料学研究室 TEL 075-383-3173