# 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

京都大学 学生会員 〇西澤 彩 住友大阪セメント(株) 正会員 中村 士郎 京都大学 正会員 高谷 哲 正会員 山本 貴士 フェロー会員 宮川 豊章

W/C

(%)

60

40

50

60

60

供試体

コンクリート(c)

モルタル(m)

モルタル(m)

コンクリート(c)

モルタル(m)

c60N-R-H コンクリート(c)

#### 1. 研究目的

コンクリート中の鉄筋に生じる腐食生成物の種類や性質は、環境によって異なると考えられる.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、腐食生成物を考慮した研究は少ない.そこで本研究では、電食試験、促 進試験および暴露試験を行い、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、腐食環境の違いがひび割れ幅と腐食量の関係に与える影響について検討した.

供試体名

c60N-D-L

c60N-D-H

m40N-R-H

m50N-R-H

m60N-R-H

m60N-D-H

c60C-R-H

m60C-D-A

## 2. 実験概要

#### (1) 供試体

電食および促進供試体は 100×100×400mm の 角柱供試体で,かぶり 20mm の位置に長さ 350mm の鉄筋を一本配置した.鉄筋の端部に リード線を接続し,中央 300mm の腐食区間以 外はエポキシ樹脂およびブチルゴムテープで 被覆した.実験要因の一覧を表-1 に示す.

(2) 電食試験

電食試験の様子を図-1 に示す. かぶり面を

上にした供試体を鉄筋位置まで 3%NaCl 水溶液に浸せきし,かぶり面に NaCl 水溶液で浸した脱脂綿,さらに銅板を乗せ,鉄筋を陽極,銅板を陰極 として電食試験を行った.電流密度は,低速 0.168mA/cm<sup>2</sup> および高速 1.68mA/cm<sup>2</sup>とした.

(3) 促進試験

W/C=60%のモルタル製で,練混ぜ時に塩化物イオン 6.0kg/m<sup>3</sup>を混入した. 14 日間の水中養生の後,乾湿繰り返し環境下(5 日間の湿潤:40℃,

95%RH, 2 日間の乾燥: 20℃, 40%RH) で腐食の促進を行った. 促進試験を開始してから約 200 日後に 0.10mm のひ び割れが発生している供試体が一体確認されたため,本論文ではこの一体を促進試験体として用いることとした.

(4) 暴露試験体

三重県の漁港の堤防に 26 年間自然暴露された供試体(かぶり 25mm)を 8 体用いた<sup>1)</sup>.

(5) 測定項目

各供試体について、平均ひび割れ幅、腐食量の測定、腐食生成物の分析を行った.平均ひび割れ幅は、クラックゲージを用いて供試体の端から 50mm ピッチで測定した値を平均した.供試体解体後、採取した腐食生成物を粉末 X 線回折分析により同定した.解体後1時間以内に JCI-SC1 に従って、単位面積当たりの腐食減少量(以下,腐食量)を測定した.なお暴露試験体については、腐食量がかぶりに比例する<sup>3</sup>として、かぶり 20mm の場合の腐食量に換算した.

#### 3. 実験結果および考察

各供試体の腐食量とひび割れ幅の測定結果を図-2 に示す. 図を見ると,各種実験要因がひび割れ幅と腐食量の関係 に与える影響は小さいと考えられる.また,腐食生成物の分析結果からも電食試験においてはいずれも Goethite, Magnetite,塩化酸化鉄(III)カルシウムおよび塩化水酸化鉄が生成しており,実験要因による違いは見られなかった.以

キーワード:腐食環境,腐食生成物,ひび割れ幅,腐食量,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

(直流電源装置) <del>+</del>
銅板 脱脂綿
3%NaCl水溶液

腐食

方法

電食

鉄筋

D19(D)

φ19(R)

D19(D)

φ19(R)

D19(D) 促進(A)

供試

体数

4

4

1

1

1

2

1

2

1

電流密度

低速(L)

高速(H)

-

表-1 実験要因

塩

 $(kg/m^3)$ 

0(N)

6(C)

図-1 電食試験の様子

上より、今後は電食試験の各要因の影響はないものとして検討 する.腐食生成物の分析結果について、促進試験においても電 食試験と同じ結果が得られた.暴露試験体からは塩化酸化鉄(III) カルシウムや塩化水酸化鉄が検出されなかった.そのうち、ひ び割れ幅が大きい供試体では Akaganeite や Lepidocrocite が生成 していた.ここで、膨張圧に寄与すると考えられる結晶化した 腐食生成物の体積膨張倍率は、各腐食生成物の密度 $\rho^{3}$ と各原子 量u,各腐食生成物の分子 1 個に含まれる各原子の数nを用いて、 以下の式(1)より推定できる.その算出結果を表-2 に示す.

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

次に、腐食環境別のひび割れ幅と腐食量の関係を、既往の塩 水散布試験の結果<sup>4)</sup>と併せて図-3 に示す.図を見ると、同一ひ び割れ幅における腐食量は、塩水散布試験、次に暴露試験が大 きく、電食試験および促進試験が小さいことが分かる.この原 因は、電食試験、促進試験において体積膨張倍率の高い塩化酸 化鉄(III)カルシウムが生成したことによると考えられる.

また、電食試験の結果を見ると、ひび割れ幅の増加に対する 腐食量の増加量が小さくなる傾向にある.そこで、腐食量はひ び割れ幅の平方根に比例すると仮定した.電食試験の結果から 得られる近似線の傾きは 153 であり、電食試験の体積膨張倍率 を既往の研究<sup>2)</sup>で報告されている 5.1 倍とすると、かぶり 20mm でのひび割れ幅と腐食量の関係は次式により表すことができる.

$$W_c = \frac{613}{\gamma - 1}\sqrt{w} \tag{1}$$

ここで, W<sub>c</sub>: 腐食量(mg/cm<sup>2</sup>), γ: 体積膨張倍率, w: ひび割れ

表-2 各種腐食生成物の体積膨張倍率

腐食生成物		密度 (g/cm <sup>3</sup> )	体積膨張倍率
Goethite	α-FeOOH	4.3	2.9
Akaganeite	β-FeOOH	3.6	3.5
Lepidocrocite	γ-FeOOH	4.1	3.1
Magnetite	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	5.2	2.1
塩化酸化鉄(Ⅲ) カルシウム	CaFeClO <sub>2</sub>	3.4	6.9
塩化水酸化鉄	FeCl <sub>2-x</sub> (OH) <sub>12+x</sub>	非結晶質	



図-3 本論文の提案式と各結果との比較

ひび割れ幅w(mm)

幅(mm)とする.式(1)にすべての供試体で生成が確認された Geocite および Magnetite の体積膨張倍率を代入したものを 図-3の点線で示す.塩水散布試験の結果は,式(1)において y = 2.1 (Magnetite) に近い値であり,暴露試験は y = 2.9 (Geocite) に近い値となる.各腐食生成物の生成量が影響するものの,海岸部の一般的な実構造物におけるひび割れ 幅と腐食量の関係は,体積膨張倍率 2.1~2.9 を用いて表すことができると考えられる.以上より,異なる腐食環境にお けるひび割れ幅と腐食量の関係の違いを腐食生成物の体積膨張倍率で整理できる可能性が示された.

## 4. 結論

腐食環境によって生成する腐食生成物が異なる.このことから、腐食量とひび割れ幅の関係は、腐食生成物の体積 膨張倍率を考慮する必要があると考えられる.

# 参考文献

1) 鈴木宏信, 疋田奈緒也, 高木宣章, 児島孝之: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 2) 宇野祐司, 中村士郎, 高谷哲, 山本貴士, 宮川豊章: 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 3) R. M. Cornell, U. Schwertmann: The Iron Oxides, 1996 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, 京都大学修士論文, 2008