

RC 部材の腐食実験条件の違いを考慮した腐食生成物モデルの提案
およびその腐食ひび割れ幅推定への適用に関する基礎的研究

早稲田大学大学院 学生会員 ○安達 雄裕, 山田 大樹, 中村 智, 徐 哲俊
早稲田大学 正会員 秋山 充良

1. はじめに

塩害環境下にある RC 構造物は、鉄筋腐食に伴い生じる腐食生成物により、かぶりコンクリートに腐食ひび割れを生じる。目視点検などで得られる腐食ひび割れ幅は、鉄筋腐食量を推定するための有用な情報になり得るが、腐食ひび割れ幅と鉄筋腐食量の関係には大きなばらつきが存在する。両者の関係を正しく把握するためには、腐食ひび割れ幅と鉄筋腐食量に加え、腐食生成物の理解が必要である。RC 部材に人工的に鉄筋腐食を生じさせる実験手法には電食試験や乾湿繰り返し試験が用いられるが、鉄筋腐食量が同程度でも、それに対応する腐食ひび割れの幅は異なっており、つまり、腐食実験条件により RC 部材内部の腐食生成物の特性に違いが生じていると予想される。

Yuan et al.²⁾は、鉄筋腐食率から膨張圧を推定する腐食生成物モデルを作成したが、同モデルは限定された実験条件に基づいているため、腐食実験条件の違いが腐食生成物の特性や腐食ひび割れ幅に及ぼす影響について考察できていないなど、RC 部材内部で発生する腐食生成物の成長過程やその特性は未解明なままである。

そこで、本研究では電食実験と乾湿繰り返し実験により腐食させた RC はりに対し、X 線撮影を用いて腐食生成物を可視化したうえで、腐食実験条件の違いを考慮した腐食生成物モデルを提案した。そして、提案した腐食生成物モデルと非線形有限要素解析を用いて腐食ひび割れ幅を算定し、実験結果と比較する。

2. 腐食実験と X 線撮影による腐食生成物の可視化

既往研究¹⁾に示す 1 本の引張鉄筋を有する RC はりに対して、電食実験 (CD シリーズ) および乾湿繰り返し実験 (WD シリーズ) を行い、腐食実験条件が鉄筋腐食率と腐食ひび割れ幅との関係および鉄筋腐食率と腐食生成物厚さとの関係に及ぼす影響を観察した。表-1 に RC はりの腐食実験条件とコンクリート物性値を示す。CD シリーズの電流密度は、供試体毎に値が異なる。実

験では、鉄筋腐食率分布と腐食ひび割れ幅分布を取得するとともに、図-1 に示す X 線装置内で RC はりを回転させて RC はり内部を撮影し、画像処理を用いて腐食生成物厚さを計測することにより、撮影角度 θ ごとに腐食生成物厚さとその部材軸方向の分布を取得した。その結果、乾湿繰り返し実験の腐食生成物は、その形状が概ね真円である一方、電食実験では RC はり底面側にピークを有する半楕円形であることを確認した。

さらに、図-2 に示す平均鉄筋腐食率と平均腐食ひび割れ幅の関係、および平均腐食生成物厚さとの関係から、腐食生成物厚さが大きいほど腐食ひび割れ幅が大きいことや、腐食速度が遅い乾湿繰り返し実験の方が腐食ひび割れ幅と腐食生成物厚さが大きい傾向のほか、電食実験により腐食させた供試体では電流密度が最も低い CD-10 供試体の腐食ひび割れ幅と腐食生成物厚さが他の供試体と比較して大きいことが認められた。

表-1 RC はりの腐食実験条件とコンクリート物性値

供試体名	腐食 実験手法	電流密度 ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	かぶり (mm)	軸方向 鉄筋径	圧縮強度 (材齢28日) (MPa)
CD-10	電食	10	20	D13	34.9
CD-50		50			34.9
CD-100		100			34.9
CD-200		200			34.9
CD-500		500			26.8
WD-1	乾湿 繰り返し	--			42.5
WD-2					42.5

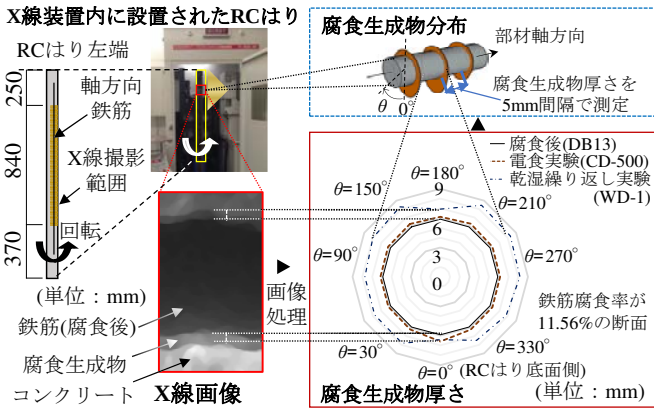


図-1 X 線撮影を用いた腐食生成物分布の取得

キーワード 鉄筋腐食, 腐食ひび割れ, X 線撮影, 腐食生成物厚さ, 非線形有限要素解析
連絡先 〒169-0853 東京都新宿区大久保 3-4-1 早稲田大学 創造理工学部 社会環境工学科 Tel: 03-5286-2694

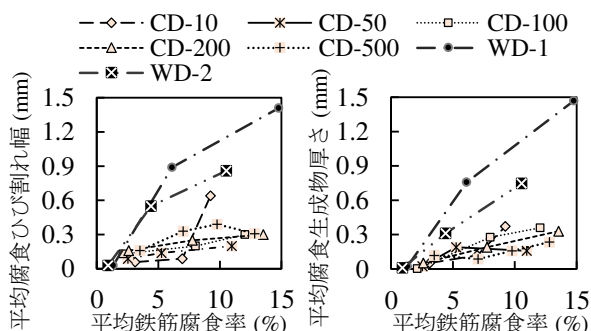


図-2 鉄筋腐食率と平均腐食ひび割れ幅との関係
および平均腐食生成物厚さとの関係

3. 腐食生成物モデルの提案および検証

腐食実験により得られた鉄筋腐食率分布と腐食生成物分布を用いて、図-3に示す電流密度および鉄筋腐食率を入力値とした腐食生成物モデルを提案した。提案モデルでは、腐食生成物厚さ T_{cp} を式(1)を用いてモデル化する。ここで、式(2)に示す角度パラメータ α 、および式(3)に示す断面ごとの平均腐食生成物厚さ MT_{cp_i} (mm)を2.に示した腐食実験の手法に応じて近似した。さらに、式(4)に示す n は、電流密度 I_{corr} ($\mu A/cm^2$)、および腐食前の鉄筋径 R (mm)と腐食後の鉄筋径 R' (mm)に依存する係数であり、腐食実験の手法に応じて近似した。

次に、提案モデルにより推定した腐食生成物厚さの再現性を検証した。提案モデルと Yuan et al.²⁾の腐食生成物モデルを用いて推定した腐食生成物厚さの再現性を比較すると、提案モデルは電食実験中に生じる腐食生成物の流れ出しを考慮できるため、平均鉄筋腐食率が8%以上の領域で平均腐食生成物厚さが急増したCD-10を除き、提案モデルの方が腐食実験の条件に関わらず腐食生成物厚さの再現性が高いことを確認した。

$$T_{cp} = \alpha(\theta) \times MT_{cp_i} \quad (1)$$

$$\alpha(\theta) = \begin{cases} 1.884 \times \exp\{-(\theta/1.600)^2\} + 0.1241 & (-\pi < \theta \leq \pi) \\ 1 & \end{cases} \quad (2)$$

$$MT_{cp_i} = n(R - R') \quad (3)$$

$$n = \begin{cases} \{(R + R')/R^2\} \times (2.873 - 2.372 \times 10^{-3} I_{corr}) & \\ \{(R + R')/R^2\} \times 8.773 & \end{cases} \quad (4)$$

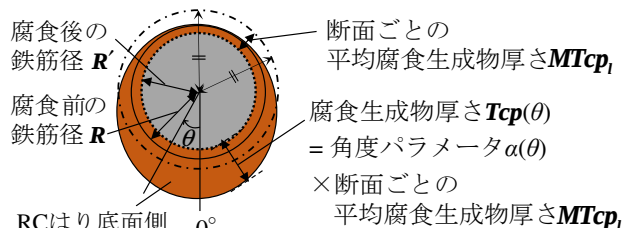


図-3 腐食生成物厚さ・形状のモデル化

4. 腐食ひび割れ幅の推定および再現性の確認

ここでは、腐食生成物を剛体と仮定し、腐食生成物厚さの実験値および Yuan et al.²⁾の腐食生成物モデルと提案モデルにより推定した腐食生成物厚さを3次元有限要素モデルに強制変位として入力し、腐食ひび割れ幅を計算した。図-4に示すように、平均腐食ひび割れ幅の推定値と実験値との絶対誤差を見ると、腐食生成物厚さの実験値を用いた場合には、全ての供試体で腐食ひび割れを過大評価している。一方、CDシリーズでは、提案モデルを用いた腐食ひび割れ幅の再現性が Yuan et al.²⁾の腐食生成物モデルと比較して向上したが、WDシリーズでは再現性が低下する結果となった。

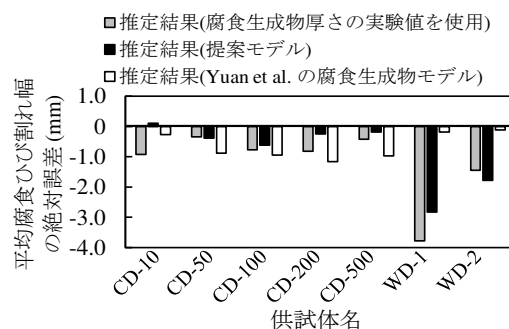


図-4 提案モデルを用いた腐食ひび割れ幅の推定

5. まとめ

本研究では、まず腐食したRCはりに対してX線撮影により腐食生成物を可視化し、実験結果を基に腐食実験条件の違いを考慮した腐食生成物モデルを提案した。次に、提案した腐食生成物モデルを用いて腐食ひび割れ幅を推定し、その再現性を既往の腐食生成物モデルを用いた推定結果と比較した。

今後、腐食実験条件が腐食生成物の弾性係数等の材料特性に及ぼす影響の検証などが必要である。

参考文献

- 1) Xin, J., Akiyama, M., Miyazato, S., Frangopol, D.M., Lim, S., Xu, Z., and Li, A.: Effects of galvanostatic and artificial chloride environment methods on the steel corrosion spatial variability and probabilistic flexural capacity of RC beams, **Structure and Infrastructure Engineering**, Vol. 18, No. 10-11, pp. 1506-1525, 2022.
- 2) Yuan, Y. and Ji, Y.: Modeling corroded section configuration of steel bar in concrete structure, **Construction and Building Materials**, Vol. 23, No. 6, pp.2461-2466, 2009.