

## 電位拡散を考慮した腐食ひび割れ統合解析手法の構築に関する基礎的研究

名古屋大学大学院 学生会員 ○青山 達彦  
 名古屋大学大学院 正会員 中村 光, 国枝 稔, 上田 尚史

### 1. はじめに

鉄筋腐食によるコンクリート構造物の劣化過程は潜伏期・進展期・加速期・劣化期の4段階に分けられているが、それぞれの過程において取り扱う物理現象が異なる。現状では、個々の過程における研究は多くされているが、マルチフィジックスを念頭においた統合的な研究はあまりされていない。そこで本研究では、異なる物理現象として、電位拡散、腐食電流による鉄筋腐食、さらに鉄筋腐食によるコンクリート構造物のひび割れ進展挙動を評価する統合解析手法構築のための基礎的な検討を行った。

### 2. 解析手法

#### 1) 腐食ひび割れ解析<sup>1)</sup>

腐食ひび割れ解析には、ひび割れの発生・進展挙動を直接表現可能な3次元剛体バネモデルを用いた。腐食ひび割れを発生させる腐食膨張圧は、図-1に示すように、鉄筋とコンクリートの間に腐食層をモデル化し、鉄筋と腐食層の要素境界上に配置されている垂直バネに一樣な漸増する膨張ひずみを作ることによってモデル化を行った。

#### 2) 電位拡散解析

電位拡散解析には、剛体バネモデルと統合可能なトラスネットワークモデルを用いた。すなわち図-2に示すように、各剛体要素の母点間を結ぶトラスネットワークを設定し、電位拡散を一次元的な流れのランダムなネットワーク上の分布として表現した。コンクリートおよび鉄筋中の電位拡散は、式(1)に示す電位拡散方程式を式(2)に示す境界条件式のもとで解くことによって評価した。ここで、 $D$ は電気伝導率( $1/\Omega \cdot m$ )、 $\phi$ は電位(V)、 $h$ は電位伝達係数、 $n$ は電位を与える面の法線ベクトル、 $\phi_\infty$ は電源電位(V)を表す。

#### 3) ひび割れが与える影響

鉄筋の膨張圧によってコンクリートにひび割れが生じると、鉄筋表面への酸素や水分の流入が大きくなる。コンクリート欠損部での分極抵抗は小さくなる<sup>2)</sup>ことが知られているので、本研究ではかぶり面側から進展するひび割れ部の鉄筋表面の分極抵抗値を1/10と小さくすることで、その影響をモデル化した。さらに、コンクリート中のひび割れは電位拡散挙動に影響を与えると考えられるため、ひび割れ部におけるトラス要素の電気伝導率を非常に小さくし、ひび割れの影響を考慮した電位拡散挙動も評価できるようにした。

#### 4) 統合解析フロー

図-3に統合解析手法のフロー図を示す。まず、電位拡散解析により各要素の電位が得られる。得られた電位から鉄筋と腐食層の要素における電位差を求め、オームの法則を用い腐食電流を求める。そして、ファラデーの法則より腐食量が算出され、さらに腐食量と鉄の密度を用いることで自由膨張量が算出され、膨張ひずみとして与えられる。

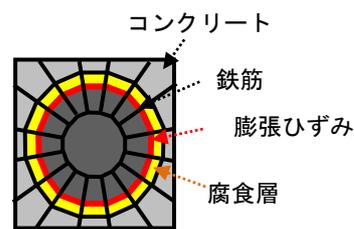


図-1 腐食層のモデル

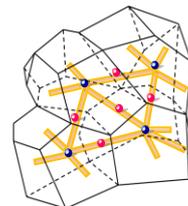


図-2 Voronoi 分割された剛体とトラスネットワークモデル

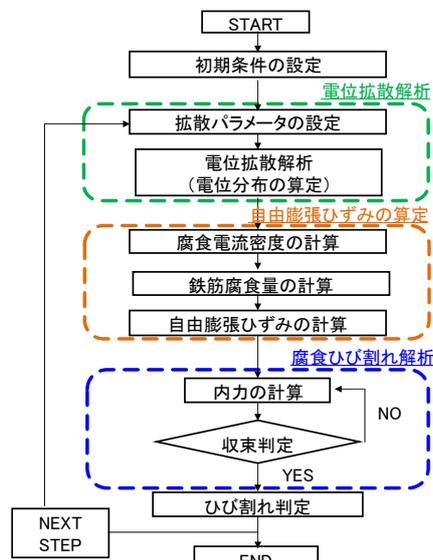


図-3 統合解析フロー図

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} + h(\phi - \phi_\infty) = 0 \quad (2)$$

キーワード 鉄筋腐食, 電位分布, 剛体バネモデル, ひび割れ進展, 局部腐食

連絡先 〒464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町 工学部 9 号館 526 号室 TEL 052-789-4484

### 3. 解析概要

本研究では、河村ら<sup>1)</sup>によって行われた電食実験を対象として解析を行った。実験は、200×150×150mm（鉄筋径 D19，かぶり 30mm）の角柱供試体で行われた。実験概要および解析モデルを図-4 に示す。境界条件は鉄筋の端部に電位を与え、底面を電位 0(V)とした。解析結果から、電位拡散挙動、ひび割れ進展挙動および断面欠損挙動を確認することで、本解析手法の検討を行った。なお拡散パラメータに関しては必ずしも明確になってはいないため、電位の拡散を表現可能な値を仮定した。また腐食ひび割れ解析は電位拡散解析によって得られた電位分布が、定常状態となった時点で開始するものとした。

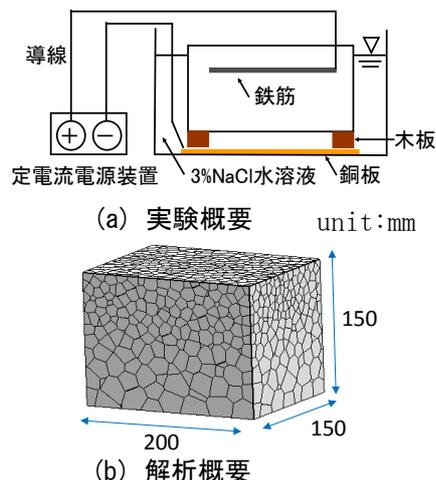


図-4 実験概要および解析概要

### 4. 解析結果

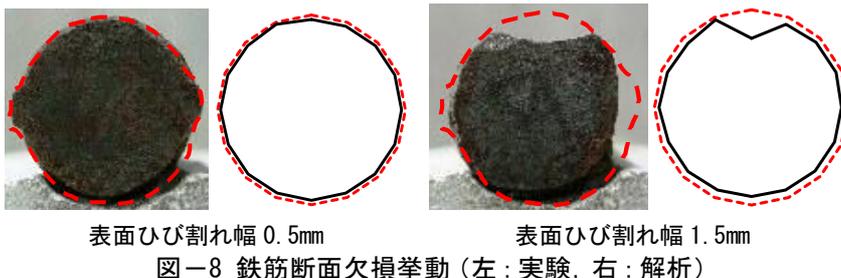
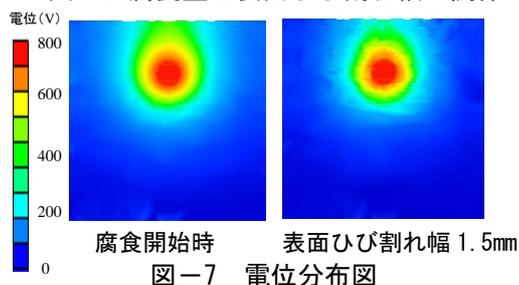
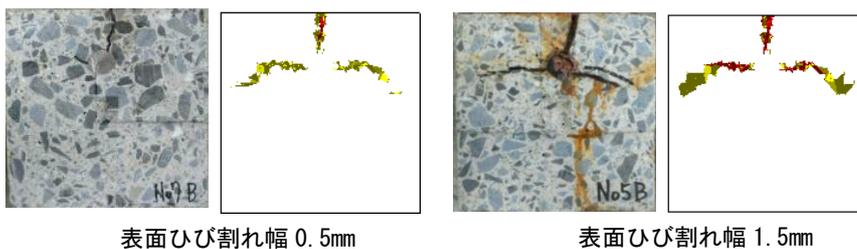
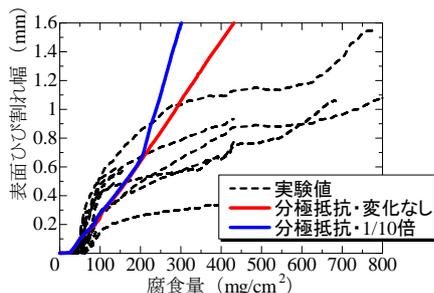
図-5 は鉄筋の腐食量とかぶり面側の表面ひび割れ幅の関係を示したものであり、図-6 は供試体断面における腐食ひび割れ進展挙動の実験値と解析値を示す。図-6 において黄色は剛体バネモデルの垂直バネの引張応力が引張強度の 1/4 まで低下した面、赤色は応力がゼロまで低下した面を示す。図-6 から、実験と概ね一致した腐食ひび割れ進展挙動が見られる。また、図-7 に供試体断面における腐食開始時と表面ひび割れ幅 1.5mm の時の電位分布を示す。図-7 からひび割れの影響を受け、電位分布が変化する挙動を確認することができる。

図-8 は鉄筋断面の断面欠損挙動を示したものであり、図中の解析結果において、赤で示す点線はもとの鉄筋断面、黒で示す実線は欠損後の鉄筋断面を示している。ひび割れ進展解析の結果を用いて、ひび割れ部の分極抵抗を小さくすることで実験と同様の局部腐食挙動を表現できることがわかる。

また図-5 に分極抵抗を変化させていない場合、すなわち局部腐食が生じていない場合の結果を併せて示すが、局部腐食を考慮することでひび割れ幅の拡大が促進される結果が示された。なお本解析ではひび割れ部での腐食生成物の移動を考慮していないため、腐食膨張圧を実験より過大に評価していることに注意が必要である。

### 5. まとめ

本統合解析手法では電位拡散解析を行い、ひび割れ挙動を考慮した電気化学的な腐食現象も扱うことができる。マクロな腐食ひび割れ進展挙動だけでなく、ひび割れの影響を考慮した際に、鉄筋の局部腐食のようなミクロな挙動も表現することができる。今後は塩化物イオンの拡散など、その他の物理現象も統合化していく予定である。



参考文献 1) 河村圭亮, 中村光, 国枝稔, 上田尚史: 鉄筋腐食に伴うコンクリートのひび割れ進展挙動評価に関する基礎的研究, JCI, 2009 2) 宮里心一: 鉄筋コンクリートの欠陥部に生じる塩害および中性化によるマクロセル腐食に関する研究, pp.49-95, 2001