

電位拡散解析と腐食ひび割れ解析の統合解析手法の開発

名古屋大学 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

RC 構造物の代表的な劣化要因の 1 つに鉄筋腐食が挙げられる。鉄筋腐食による RC の劣化現象評価のために、中性化速度や塩化物イオン濃度の拡散速度に支配されている潜伏期の研究、進展期の電気化学的な鉄筋腐食の研究、進展期・加速期の腐食ひび割れの進展挙動に関する研究、等は個別には行われてきている。しかしながら、それら個々の挙動を統一的に評価可能な手法についての研究は行われていないのが現状である。そこで本研究では、潜伏期から劣化期の挙動を統一的に評価可能な解析手法を確立するための基礎的な研究として、潜伏期から加速期に至る劣化現象を評価する手法として、腐食ひび割れ解析手法と電位拡散解析手法を統合した手法の開発を行った。

2. 解析手法

1) 腐食ひび割れ解析¹⁾

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 (RBSM) を用いた。各要素は、6 自由度を持つ剛体と仮定し、図-1 に示すように、要素境界面に複数の評価点を設けた。各評価点には、圧縮・引張挙動を表現する垂直バネ、およびせん断すべり挙動を表現するせん断バネを配置した。腐食ひび割れを発生させる腐食膨張圧は、図-2 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様な漸増する膨張ひずみを初期ひずみとして作用させることでモデル化を行った。ここで、腐食層のヤング係数は 500MPa、その厚さは 1mm とした。腐食膨張量の求め方については、3) 節に記す。

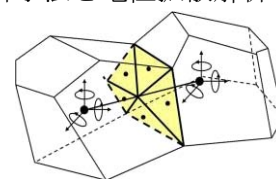


図-1 剛体要素の自由度と要素境界面上の評価点

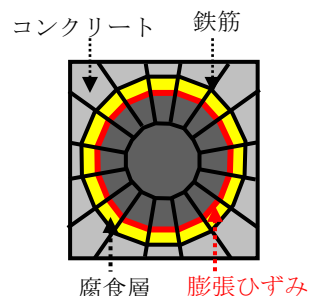


図-2 腐食層のモデル化

2) 電位拡散解析

電位拡散解析には、RBSM 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-3 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)に示す電気伝導方程式を式(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。

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) \quad (1) \quad \frac{\partial \phi}{\partial n} + h(\phi - \phi_{\infty}) = 0 \quad (2)$$

ここで、 D は電気伝導率($1/\Omega \cdot m$)、 ϕ 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、 ϕ_{∞} は電源電位(V)を表す。なお、トラス要素は、Voronoi 要素境界面の面積に対応した断面積を持つものとした。

3) 統合解析手法の解析フロー

図-4 に腐食ひび割れ解析と電位拡散解析を統合した手法のフロー図を示す。解析では、トラスネットワークモデルによって電位拡散解析が行われ、電位分布が算定される。得られた電位分布から鉄筋とコンクリート界面の電位差を求め、さらにオームの法則(式(3))より図-5 のように流れる腐

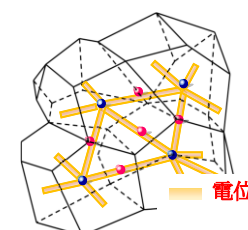


図-3 トラスネットワークモデル

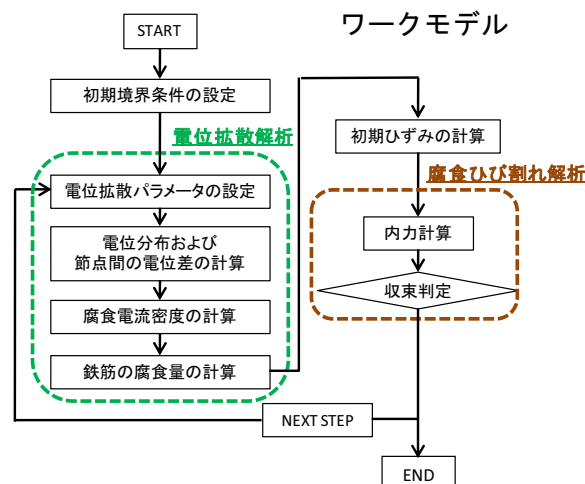


図-4 解析フロー

食電流密度を求め、ファラデーの法則(式(4))より鉄筋の腐食量が算出される。その後、得られた鉄筋の腐食量から式(5)、式(6)を用い、膨張ひずみが算出され、RBSMにおける垂直バネの初期ひずみとして与えられる。

$$i_{corr} = V_i / R \quad (3) \quad m = \frac{i_{corr} \cdot t \cdot M}{n \cdot F} \quad (4)$$

$$U = \frac{m \cdot (dV - 1)}{\rho_s} \quad (5) \quad \varepsilon_i = \frac{U}{H} \quad (6)$$

ここで、 i_{corr} は腐食電流(A)、 V_i は鉄筋とコンクリート界面の電位差(V)、 R はコンクリートの電気抵抗(Ω)、 m は腐食量(mg/cm^2)、 t は時間(s)、 M は鉄筋の原子量(g)、 n は溶解した鉄イオンの当量(mol eq.)、 F はファラデー定数(C/mol eq.)、 U は自由膨張量(mm)、 dV は錆の体積膨張率(=2)、 ρ_s は鉄筋の密度(mg/cm^3)、 H は腐食層の高さ(mm)、 ε_i は自由膨張ひずみを表す。

3. 解析概要

本研究では、一般的に行われている電食実験を想定して、電位拡散の挙動、

変形およびひび割れ性状を確認することで、開発した解析手法の妥当性を評価した。解析は、図-6に示すような $100 \times 150 \times 150 \text{mm}$ (鉄筋径D19、かぶり30mm)の角柱供試体に対して行った。解析モデルは、要素形状の依存性を低減するために、平均要素寸法8mmのVoronoi要素によって分割を行った。境界条件は図-6に示すように鉄筋の端部の母点に電位20(V)を与え、底面を電位0(V)とした。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。

4. 解析結果

電位拡散解析により得られた鉄筋およびコンクリート内部の電位分布を図-7に示す。電位は、鉄筋の電気伝導率がコンクリートよりも十分に大きいため、まずは鉄筋内部に伝わり、その後コンクリート中へ移動していく挙動を示す。さらに時間の経過とともにコンクリート中にも電位が伝わり、電位分布が定常状態となる結果が得られた。電位拡散解析から得られた結果から腐食膨張を始めた鉄筋による断面内のひび割れ図および変形図を図-8に示す。断面ひび割れの進展や、表面ひび割れの発達を定性的に表されており、開発した手法の妥当性が確認できる。

5. まとめ

電位拡散と腐食ひび割れを統合的に解析する手法を開発し、その妥当性確認するため、電食実験を想定したモデルで解析を行った結果、電位拡散の挙動および腐食ひび割れの進展挙動を定性的に評価することが出来た。今後、定量的な評価をするために適切なパラメータの設定を行い、実験値との比較を行っていく予定である。

参考文献

- 河村圭亮, 中村光, 国枝稔, 上田尚史: 腐食ひび割れ進展解析における鉄筋腐食膨張モデルに関する研究, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第8巻, pp.285-292, 2008

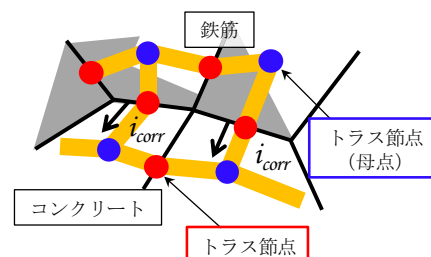


図-5 腐食電流の模式図

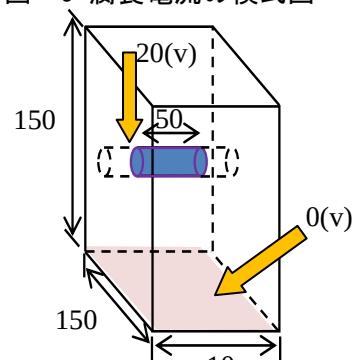


図-6 解析モデル

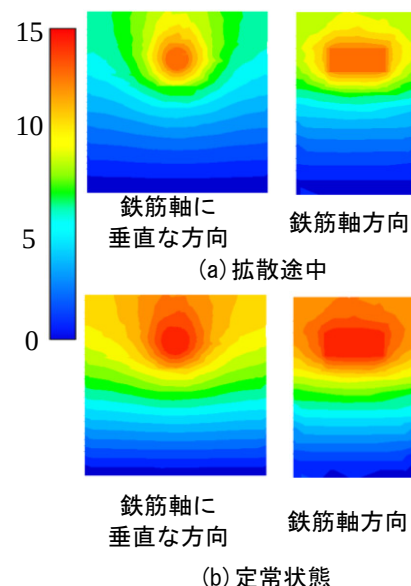


図-7 電位拡散分布

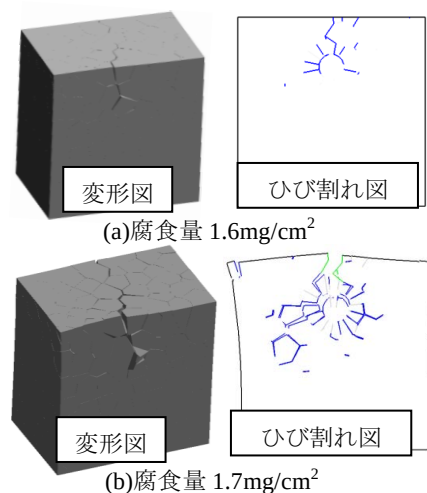


図-8 ひび割れ図と変形