

RC 構造物の物質拡散・腐食および力学的損傷を考慮した劣化予測解析

東北大学大学院工学研究科 学生会員 ○西 紳之介, 東北大学災害科学国際研究所 正会員 高瀬 慎介
東北大学災害科学国際研究所 正会員 寺田 賢二郎, 東北大学災害科学国際研究所 正会員 森口 周二
東北大学大学院工学研究科 正会員 京谷 孝史, 東北大学災害科学国際研究所 正会員 加藤 準治

1. 序論

本研究では、腐食した RC 構造物の耐荷力を予測するためのシミュレーション手法を提示する。まず、腐食原因物質の拡散方程式と腐食反応の電気化学方程式を解き、経時変化する各原因物質の濃度分布を算定する。鉄筋とコンクリートの界面はレベルセット法を用いて再現し、算出した腐食反応速度から界面の時間変化を追跡して、それにより決定した腐食領域に応じて、腐食生成物とそれに伴う体積膨張圧を定める。腐食による膨張および外荷重の作用によるひび割れを表現するために、連続体損傷力学モデルを採用して変形解析を行い、構造物のピーク強度を耐荷力として算定する。この連成解析を腐食量に応じて行うことで、経年的に変化する耐荷力の変化を予測する。

2. コンクリートの電気化学反応と腐食進展

(1) 腐食原因物質の反応拡散問題

腐食原因物質である酸素、水、塩化物イオンの反応拡散問題において酸素、水が鉄筋表面に到達すると $\text{Fe} + \frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_2$ に対応する化学反応が始まり腐食が発生する。腐食の開始には鉄の不動態皮膜を破壊する塩化物イオン濃度が重要であり、 $\frac{[\text{Cl}^-]}{[\text{OH}^-]} \geq 0.6$ で定義されている。鉄筋の腐食反応式は電気化学理論に基づいており、鉄筋界面の移動速度は Tafel 式と Nernst 式により決定される腐食電流密度 i_{corr} と Faraday の法則により算定する。

(2) 界面と構成材料分布の進展解析

本研究では、鉄筋腐食の界面移動の表現手法としてレベルセット法を採用する。レベルセット関数は界面との最短距離を示す関数であり、界面の内側と外側を正負でわけることで、異なる材料を判断する。解析モデルとは別に鉄筋の表面を表すモデルによりレベルセット値を定義して、その法線方向に i_{corr} の分だけ移動させる。材料の分布は 0 から 1 の値を持つヘビサイド関数により定義している。また、ヘビサイド関数が変化した領域を腐食領域として、膨張変形の解析に利用する。

3. 腐食による膨張ひずみの導入と損傷モデルによる劣化解析

(1) 膨張ひずみの導入

本研究では変形挙動を有限変形の枠組みで記述し、変形勾配 $\mathbf{F}$ は弾性変形と腐食膨張による膨張変形の積 $\mathbf{F}^e \mathbf{F}^{\text{corr}}$ で表されるものとする。ここで、膨張変形勾配は $\mathbf{F}^{\text{corr}} = \alpha \mathbf{I}$ として表す。 α は体積膨張率であり、ヘビサイド関数の差分と関連付ける。

(2) 損傷モデルの定式化

本研究では、損傷モデルにおける弾性構成則を $\dot{\boldsymbol{\sigma}} = (1-D)\mathbf{C}:\mathbf{d}$ で定義する。ここで、 $\boldsymbol{\sigma}$ は Cauchy 応力、 $\dot{\boldsymbol{\sigma}}$ はその Jaumann 速度、 $\mathbf{d}$ は変形速度、 $\mathbf{C}$ は弾性係数である。 D は損傷の進展を支配する損傷変数であり、 $D=0$ のときは損傷が発生せず、 $D=1$ では材料が完全に剛性を失った状態を表す。本研究では損傷変数には以下の関数を用いる¹⁾。

$$D(\kappa) = 1 - \frac{\kappa_0}{\kappa} \left(\exp \frac{E \kappa_0 h_e}{A} (\kappa_0 - \kappa) \right) \quad (1)$$

ここで、 κ_0 は材料が経験した最大相当ひずみであり、de Vree の等価ひずみ式より算出する。 κ_0 は損傷発生のひずみ閾値である。また h_e は要素長さで、 E はヤング率である。 A は損傷の進展率を支配する値であり、損傷の進展の程度が変化する。損傷の発生はひずみ閾値 ϵ_{eq} が κ_0 を上回った場合に起こるものとする。ここで、 k は引張圧縮強度比、 ν は Poisson 比、 I_1 と J_2 はひずみテンソルの不変量である。また、後述の付着強度試験の際には腐食生成物による引張抵抗を考慮するため、腐食生成物の膨張力から算出した平均直応力 σ_{corr} より、 $\kappa'_0 = \kappa_0 + \frac{\sigma_{\text{corr}}}{E}$ のようにコンクリートのひずみ閾値 κ'_0 を算出することで、拘束圧に応じてコンクリートの強度が高くなるようなモデルを考案した。

4. 数値解析例

実験に対する提案手法の再現性能を検証するため、(a) 鉄筋の引き抜き試験と (b) 梁の 4 点曲げ試験の数値シミュレーションを行った。

(1) 腐食原因物質の拡散解析と損傷変形との連成解析

腐食促進試験と同様の条件を課して数値解析を行う。両シミュレーションについて実験終了時の最終的な塩化物イオンの濃度分布を図-1 に示す。この解析で得られた腐食領域進展データをを用いて腐食膨張・損傷解析を行う。得られた応力分布とひび割れの様子を図-2 に示す。図中、損傷変数が 1 である位置がひび割れ箇所である。また、図-2 のモデル中心の円はコンクリートと鉄筋の界面を表しており、その界面に沿って応力が分布していることがわかる。また、梁の 4 点曲げ試験のモデルに生じたひび割れの様子を図-3 に示す。

(2) 付着強度試験の数値シミュレーション

腐食膨張解析を行ったモデルから、鉄筋部分に強制変位を与え、付着強度を算定する。腐食によってひびが入る前後 3 パターンの荷重-変位曲線を図-4 に、腐食量と付着強度の関係を図-5 に示す。腐食生成物が引き抜き方向に抵抗することにより付着強度が上昇し、腐食膨張によってひび

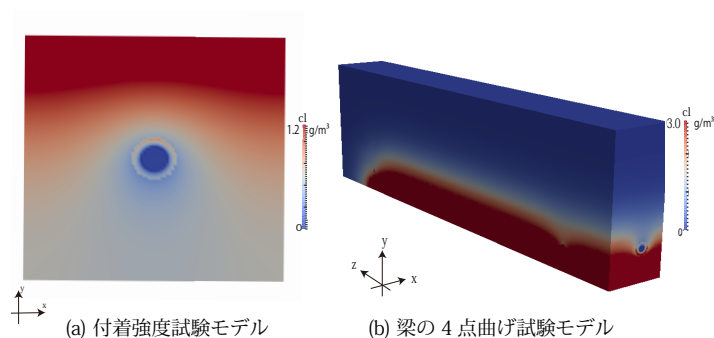


図-1 塩化物イオン濃度分布

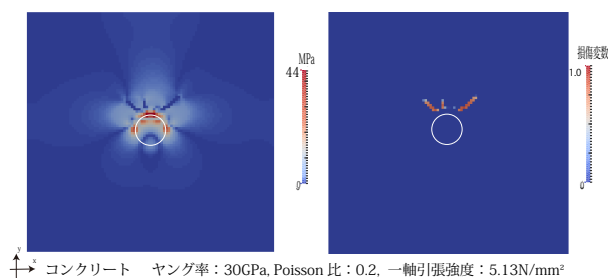


図-2 腐食膨張応力とひび割れ分布図

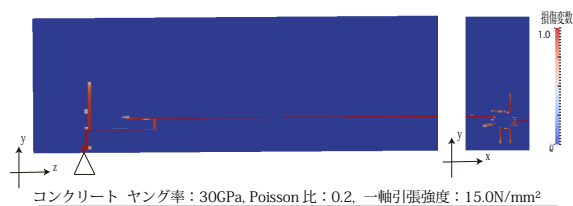


図-3 梁の4点曲げ試験モデルの腐食によるひび割れの様子

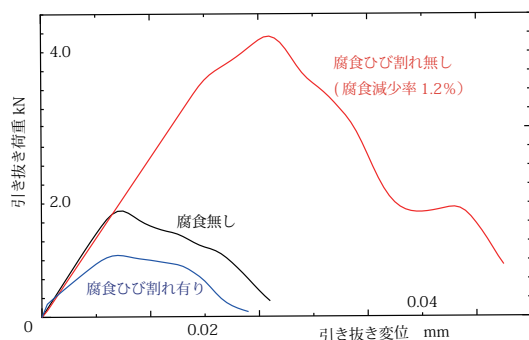


図-4 引き抜き荷重 - 変位曲線

割れが入ることで一気に強度が失われるという実験でも確認されている結果を再現することができた。

(3) 梁の4点曲げ試験の数値シミュレーション

腐食させる前の健全なモデルと腐食ひび割れのあるモデルで4点曲げ試験の数値シミュレーションを行い、耐力力を算定する。得られた荷重-変位曲線を図-6に示す。また、この図中に○を付けた対応するひび割れの様子を図-7に示す。腐食ひび割れの発生によって耐力力が低下するという結果を得たが、実験データとは異なり斜めひび割れは入らず、荷重-変位曲線も異なる挙動を示した。今後、解析条件やモデルの再考が必要であると考え。

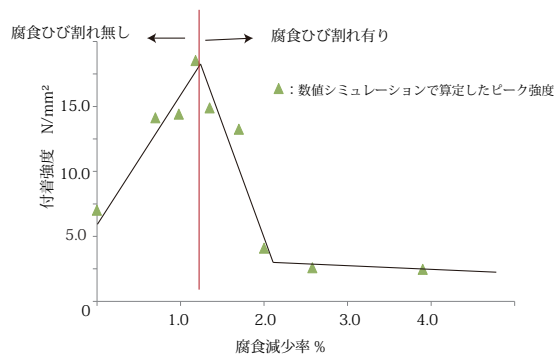


図-5 鉄筋腐食減少率-付着強度

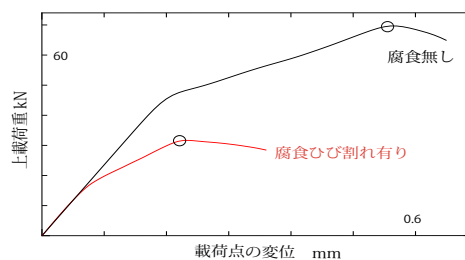


図-6 梁の4点曲げ試験解析結果：荷重 - 変位曲線

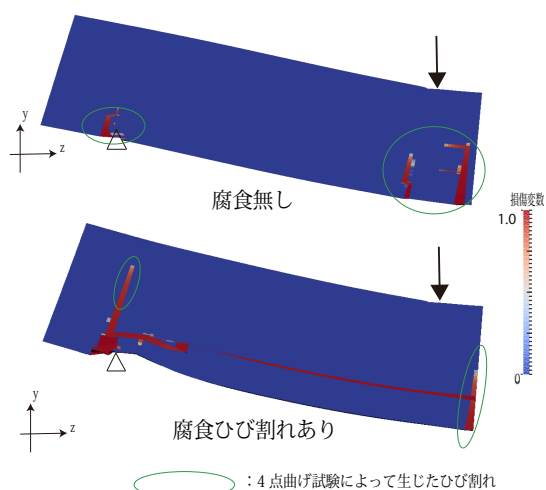


図-7 梁の4点曲げ試験解析結果：ひび割れの様子

5. 結論

本研究では、鉄筋腐食を受けた鉄筋コンクリート構造物の耐力力評価のための腐食反応、拡散、力学連成解析手法を提案した。特に、腐食原因物質の拡散解析から鉄筋界面の時間発展を追跡し、腐食生成物の膨張を表現することで、腐食によって生じたひび割れの様子を再現した。またそのモデルに外荷重を与えることで、腐食を受けたRC構造物の耐力力を予測できる可能性を示した。

参考文献

- 1) 車谷麻緒, 寺田賢二郎, 京谷孝史, 加藤準治, 樫山和男: コンクリートの破壊力学に基づく等方性損傷モデルの定式化とその性能評価, 日本計算工学会論文集, Vol. 2013, 論文番号 P20130015, 2013