

損傷モデルによる水平腐食ひび割れの再現シミュレーション

茨城大学 学生会員 ○阿部 星奈 茨城大学 正会員 車谷 麻緒
香川大学 正会員 岡崎 慎一郎 香川大学 フェロー会員 松島 学

1. はじめに

塩害による鉄筋の腐食は、コンクリート構造物の劣化の要因の一つとして挙げられる。鉄筋の腐食によるかぶりコンクリートのひび割れ、すなわち腐食ひび割れの発生は、その後の構造物が急速に劣化することから、重要な限界状態の一つとして定義されている。

松田ら¹⁾は腐食ひび割れについて、図-1に示するような腐食ひび割れモードを示している。このうち、特に(b)に示すような水平剥離ひび割れは、コンクリートの内部で起きているため、構造物表面で確認することができない。そのため、目視で点検を行っている現状においては、剥離が起きてしまうまで気づけず、被害が大きくなってしまふおそれがある。

このような背景から、実際には見ることでできない内部の腐食ひび割れの進展挙動を数値解析により評価する方法が必要である。本研究では、数値シミュレーションを実施し、コンクリート内部で図-1(b)のような水平剥離ひび割れが起きていることと、鉄筋間隔を変えた場合に生じるひび割れの進展挙動の違いを、2次元・3次元的に示すことを目的とする。

2. 数値解析手法

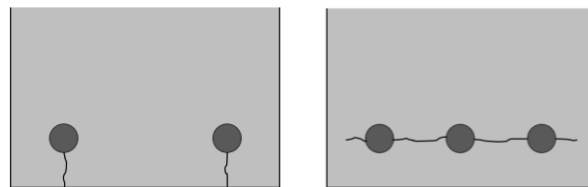
コンクリートの破壊挙動を数値解析で再現するには、粗骨材の影響が反映でき、モルタルのひび割れ進展挙動を再現できる破壊シミュレーションを行う必要がある。本研究では、車谷ら²⁾の提案した非均質性を考慮した損傷モデルを用いる。

2.1 非均質性を考慮した損傷モデル

この損傷モデルは、多次元問題を1次元問題に置き換えることで、1次元問題の理論解を応用して、非均質材料の損傷を評価することができる。この手法を用いることで、粗骨材の影響を反映することができ、モルタルのひび割れ進展挙動を再現することができる。

損傷モデルの基礎式は次式で表される。

$$\sigma = (1 - D_e)c:\varepsilon \quad (1)$$



(a) 鉄筋に沿ったひび割れ (b) 水平剥離ひび割れ

図-1 腐食ひび割れモード

ここで、 σ はコーシー応力テンソル、 c は弾性係数テンソル、 ε は微小ひずみテンソル、 D_e は多次元問題における損傷変数である。

微小ひずみテンソルは、次式で表す等価ひずみ ε_e を適用することでスカラー値として評価する。

$$\varepsilon_e = \frac{k-1}{2k(1-2\nu)}I'_1 + \frac{1}{2k}\sqrt{\left(\frac{k-1}{1-2\nu}I'_1\right)^2 + \frac{12k}{(1+\nu)^2}J'_2} \quad (2)$$

ここで、 ν はポアソン比、 k は引張圧縮強度比、 I'_1 は微小ひずみテンソル ε の第1不変量、 J'_2 は偏差ひずみテンソルの第2不変量である。式(3)で与えられる等価ひずみとは、多軸状態のひずみテンソルを1次元の引張ひずみに換算した相当ひずみである。

多次元問題における損傷変数 D_e は次式となる。損傷変数とは、 $0 \leq D \leq 1$ の範囲で損傷の度合いを評価するものである。

$$D_e = 1 - \frac{\bar{\varepsilon}_e}{\varepsilon_e} \exp\left\{-\frac{E\bar{\varepsilon}_e}{G_f}\left(\frac{\varepsilon_e}{\alpha_D} - \frac{\bar{\varepsilon}_e}{\alpha_0}\right)Vh_e\right\} \quad (3)$$

ここで、 $\bar{\varepsilon}_e$ は破壊発生ひずみ、 V は損傷する材料の1要素における体積率、 h_e は要素の代表長さ、 E は要素全体の平均ヤング率、 G_f は破壊エネルギーである。 α_D 、 α_0 はそれぞれ次式の関係を示す値である。

$$\varepsilon_e = \alpha_D \varepsilon_1, \quad \bar{\varepsilon}_e = \alpha_0 \bar{\varepsilon}_1 \quad (4)$$

ここで、 ε_1 は損傷する材料に生じるひずみ、 $\bar{\varepsilon}_1$ は損傷する材料の破壊発生ひずみである。

2.2 鉄筋の腐食膨張のモデル化

鉄筋の腐食膨張は、熱応力解析による荷重制御を用いてモデル化した。熱応力解析における膨張ひずみに

よる見かけの荷重 f_t は、腐食膨張による膨張圧とみなすことができ、次式で表される。

$$\{f_t\} = \int_{V_e} [B]^T [C_e] \{\varepsilon_t\} dV \quad (5)$$

ここで、 B はひずみ変位マトリックス、 C_e は弾性係数テンソル、 ε_t は垂直成分のみに値をもつ膨張ひずみベクトルである。

3. 検証例題

はじめに、図-2に示すような2次元モデルを作成し、粗骨材の有無の両方で数値シミュレーションを実施した。図-2のうち、 L は鉄筋間隔を表し、今回は $L=80\text{ mm}$ 、 100 mm とした。鉄筋の種類はD19とし、鉄筋の周りに図-2に示すような腐食生成物の層を作成し、ここを膨張させるものとした。各材料のパラメータについて、モルタルは $E = 20\text{ GPa}$ 、 $\nu = 0.2$ 、 $\varepsilon_e = 0.0001$ 、 $G_f = 0.1\text{ N/mm}$ 、 $k = 10$ であり、粗骨材は $E = 60\text{ GPa}$ 、腐食生成物は $E = 10\text{ GPa}$ 、鉄筋は $E = 20\text{ GPa}$ である。腐食生成物のヤング率は既往の研究³⁾を参考とした。設定パラメータである膨張ひずみは、今回は 0.01 とした。また、図-2の寸法で奥行き 100 mm とした3次元モデルを作成し、同じパラメータで数値シミュレーションを実施した。

図-3に等価ひずみを可視化した結果を示す。(a)と(b)は粗骨材の影響が反映されていない均質のモデルであり、鉄筋間隔の違いによって生じる腐食ひび割れの挙動の違いが再現できている。図-4は粗骨材の影響を反映させたモデルであり、粗骨材の影響を反映させた場合でも、水平方向に腐食ひび割れが繋がる様子が再現できている。

4. まとめ

腐食膨張によって生じる水平剥離ひび割れの発生は、鉄筋間隔に依存していることを、数値シミュレーションで再現した。しかし、本研究に用いた腐食生成物のモデルは、鉄筋周り全てに被覆しているものであり、実際の腐食生成物の分布とは異なる。腐食生成物のモデル化を検討することを今後の課題とする。

参考文献

- (1) 松田耕作，横田優，米澤和宏，松島学：塩害劣化を受ける鉄筋コンクリート梁の耐荷性能に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol.58A，2012
- (2) 車谷麻緒，加藤匠，佐々木浩武：非均質性を考慮

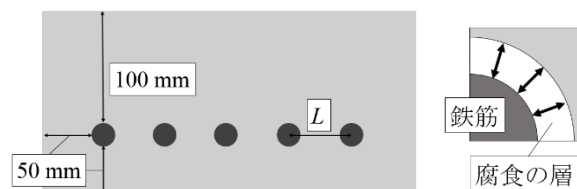
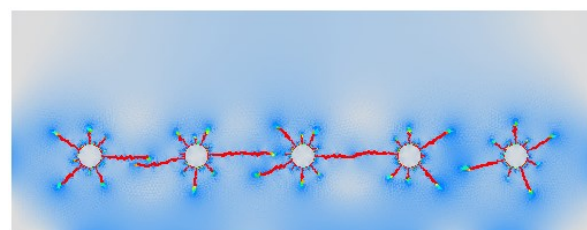
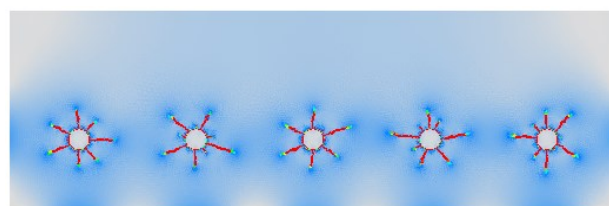


図-2 検証例題の2次元モデル



(a) $L=80\text{ mm}$



(b) $L=100\text{ mm}$

図-3 均質モデルの解析結果

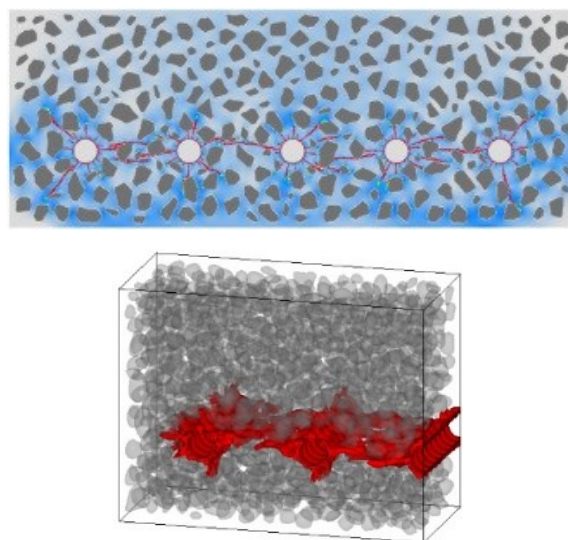


図-4 非均質モデルの解析結果

した損傷モデルの定式化とその性能検証，土木学会論文集A2（応用力学），Vol.75，No.1，2019

- (3) 足助実岐子，根岸泰彦，大下英吉：腐食生成物の力学的特性を考慮した腐食ひび割れ幅進展モデル，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，2013
- (4) 車谷麻緒，安蔵尚，相馬悠人，岡崎慎一郎：損傷モデルによる3次元腐食ひび割れ進展解析に関する基礎的研究，日本計算工学会論文集，2019