

破壊力学に基づく損傷モデルによる鉄筋腐食ひび割れ進展解析

香川大学大学院 学生会員 ○大熊千紗都 香川大学 正会員 岡崎慎一郎
香川大学 フェロー 吉田秀典 香川大学 フェロー 松島学 茨城大学 正会員 車谷麻緒

1. はじめに

わが国では、戦後に集中的に建設されたコンクリート構造物が既に想定された耐用年数を超過しているものが多い。劣化の原因としては鉄筋の腐食によって断面積の減少、コンクリートのひび割れが発生することが挙げられる。適切な補修時期を判断するためにはコンクリート中の鉄筋の状態を推定する必要がある。本研究は、近年開発された破壊力学に基づく損傷モデルを採用することで、コンクリートの微細なひび割れ進展を再現できる有限要素スキームにより、腐食膨張によるコンクリートのひび割れ進展シミュレーションを行い、鉄筋の腐食膨張がひび割れ幅に与える影響を検討するものである。

2. 解析手法

2. 1 損傷モデル

本研究では、破壊力学に基づく有限要素モデルを利用する。式(1)に示す、コンクリートの塑性状態を考慮できる応力ひずみ関係を、式(2)の Damage Index により表現した。ここに、 σ は Cauchy の応力テンソル、 c は弾性係数テンソル、 ε は微小ひずみテンソル、 κ は損傷後の等価ひずみ、 κ_0 は損傷開始時の等価ひずみ、 E はヤング係数、 G_f は破壊エネルギー、 h_e は要素長さである。

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

$$D(\kappa) = 1 - \frac{\kappa_0}{\kappa} \exp\left(-\frac{E\kappa_0 h_e}{E_0} (\kappa - \kappa_0)\right) \quad (2)$$

Damage Index は損傷の程度を表すものであり、これの 3 次元的分布はすなわち、コンクリート中のひび割れ分布と近似的に等価であるとみなせる²⁾。

2. 2 解析条件

既往の研究¹⁾で作製した鉄筋コンクリート供試体から鉄筋モデルを作製し、図 1 に示す。要素長さの平均は 3mm である。本研究ではシミュレーションに要する計算時間を短縮するため、試験体のうち、主鉄筋方向の 100mm の部分を切り出し、切り口は対称境界とした。また、せん断補強筋は省略した。鉄筋モデル面要素すべてに法線方向に等しい変位を与え、その変位量を漸増させることで、鉄筋の腐食膨張を再現した。1step あたり 0.002mm 相当の変位を与え、100step まで载荷した。梁の底面に生じるひび割れの幅を検討対象とし、ひび割れ幅 w_c は、要素の等価ひずみ κ から損傷開始時の等価ひずみ κ_0 を引いたものに要素長さ h_e を乗じたものと定義した。

$$w_c = (\kappa - \kappa_0) h_e \quad (3)$$

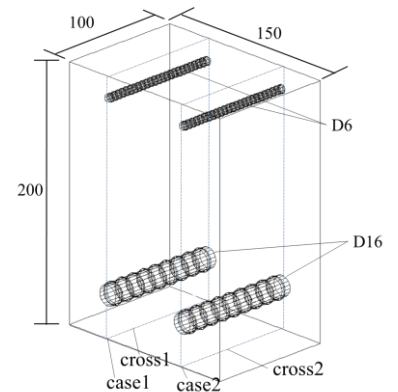


図 1 解析モデル

3. 解析結果

step50, 100 の鉄筋膨張にひび割れ進展の様子をそれぞれ図 3, 図 4 に示す。損傷変数 0.5 から 1 までを濃淡で示し、表面と図 1 で示した cross1 と cross2 の断面のコンクリート損傷の様子を示す。図 3, 図 4 を見ると step が大きくなるにつれて鉄筋から損傷が広がっている様子が見られる、特に、節周辺における Damage Index が高くなっている。本解析で与えた変位を鉄筋の腐食に式(4)から換算する。

$$W_r = \frac{\rho_s \cdot U}{n - 1} \quad (4)$$

W_r は鉄筋の腐食量(mg/cm^2), ρ_s は鉄筋の密度($=7.85 \times 10^3 \text{ mg}/\text{cm}^3$), U は鉄筋の強制変位量, n は錆の体積膨張率で 2.5 と 1.5 とする³⁾. 本解析の断面 cross1 と cross2 における底面の case1 と case2 に相当する要素の開口変位と腐食量の関係と文献¹⁾での実験結果(SN2-1~SN2-4)と比較を図 4 に示す. 実験結果の SN2-2 と解析結果の $n=2.5$, 実験結果の SN2-1 と解析結果 $n=1.5$ でそれぞれ似た傾向を得ることができた. 実験結果の SN2-2 と SN2-3 についてはほとんどのケースで解析結果よりも腐食量が多いという結果になった. 体積膨張率が小さくなるほど解析結果の腐食量が多くなる. 体積膨張率を正確に算出することで SN2-2 と SN2-3 の鉄筋の腐食膨張をシミュレーションすることができると考える. また, 実験に用いた試験体は温水を使用し, 高温多湿と乾湿の繰り返しによって鉄筋腐食を促進した. 海水や電食実験を用いた鉄筋腐食の促進方法での比較も検討する.

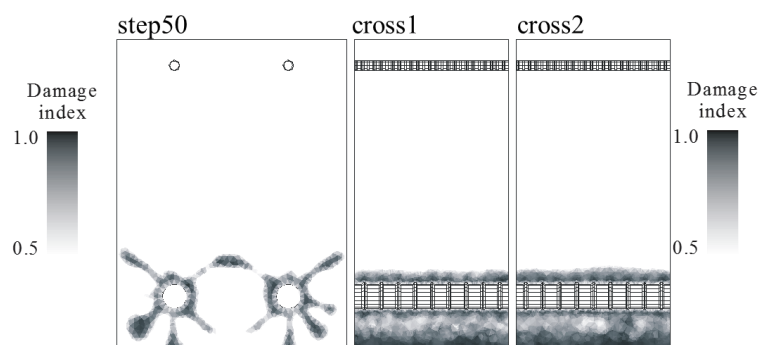


図 2 鉄筋膨張によるひび割れ進展の様子(step50)

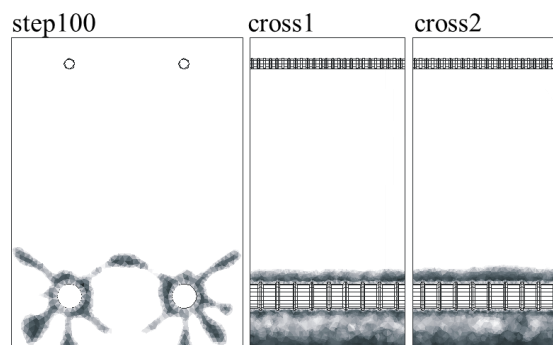


図 3 鉄筋膨張によるひび割れ進展の様子(step100)

4. まとめ

本研究では鉄筋に強制変位を与え, 鉄筋の腐食膨張を再現し, コンクリートへの損傷の様子をシミュレーションした. 解析の結果, 異形鉄筋の節から損傷が広がっていることを確認した. また, 既往の研究の実験結果との比較を行った. その結果, 実験での腐食量を再現し, ひび割れ幅から鉄筋コンクリートの損傷の様子を確認した. 今後は解析においては鉄筋の体積膨張率の算出, 実験においては鉄筋腐食の促進方法について検討し, 解析結果と実験結果の比較により, ひび割れ進展シミュレーションによる鉄筋の腐食膨張がひび割れ幅に与える影響を検討する.

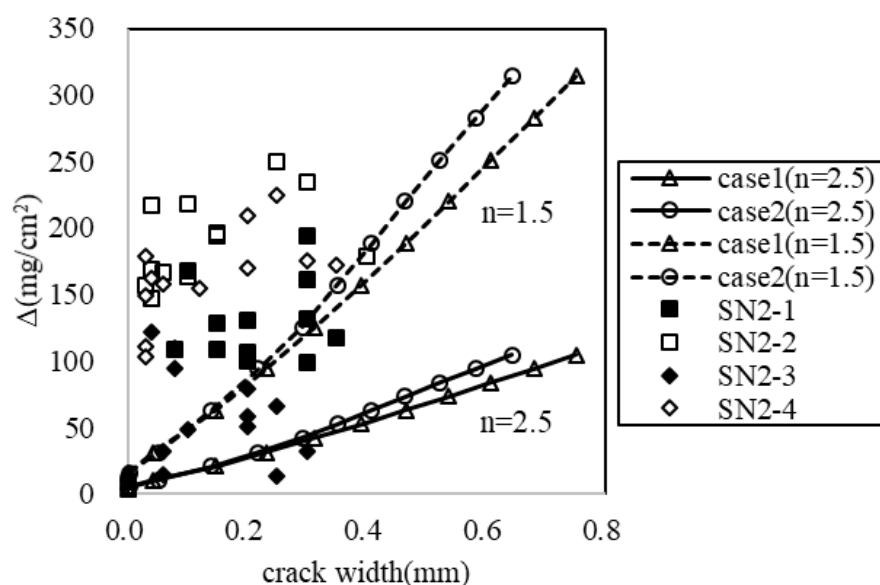


図 4 鉄筋膨張量とひび割れ幅の関係の比較

参考文献

- 1) 岡崎慎一郎, 釜本拓哉, 松島学: 種々の乾湿条件下にある RC はりの鉄筋腐食量がひび割れの開口幅に与える影響, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol.72, No.2, I_610-I_615, 2016
- 2) 車谷麻緒, 根本優輝, 相馬悠人, 寺田賢二郎: コンクリートの破壊力学を考慮した鉄筋コンクリートの 3 次元破壊シミュレーションとその性能評価, 日本計算工学会論文集, 2016, pp.20160004.
- 3) 松尾豊史, 西内達雄, 松村卓郎: 鉄筋の腐食膨張に伴うコンクリートのひび割れ進展解析, コンクリート工学年次論文報告書, Vol.19, No2, pp.99-104, 1997