

異形鉄筋の腐食膨張による鉄筋コンクリートのひび割れシミュレーション

香川大学工学部 賛助会員 ○前川祥也 正会員 岡崎慎一郎
茨城大学工学部 正会員 車谷麻緒

1. はじめに

海洋沿岸部に位置する鉄筋コンクリート構造物は塩害による鉄筋腐食の影響を受ける。これらの維持管理を実施する上で、残存性能の評価は重要である。構造物の構造性能および耐久性能は鉄筋の腐食の有無と腐食減少量に強く依存している。劣化診断に必要な点検は、目視が標準であるため、コンクリート表面に呈した腐食ひび割れの開口幅でひび割れ部直下の鉄筋の腐食量の推定ができれば、高度な維持管理に資すると考えられる。

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、異形鉄筋の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. 損傷モデルの概要¹⁾

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。

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

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。本モデルの特徴として、出力結果はメッシュサイズに依存しないことが挙げられる。したがって、メッシュサイズを非常に細かくすれば、3次元の損傷分布が、ひび割れの分布の様相と概ね等しくなり、微細な損傷を高解像度で再現できるのである。この特徴により、本モデルで異形鉄筋の形状を考慮した検討も行うことができる。

3. RC の有限要素モデル

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、図1の鉄筋コンクリートモデルに一定の厚みを与え、さらに厚み方向は対称境界とすることにより、梁の軸方向に十分長い部材を対象とした。

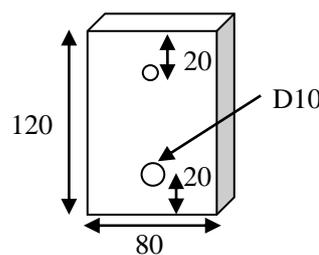


図1 RC 試験体の寸法

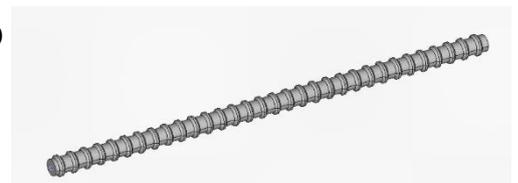


図2 異形鉄筋のモデル

本研究では、直方体コンクリートモデルから D10 相当の3次元の異形鉄筋モデル(図2)を差し引き、差し引かれたコンクリートの空洞に形成された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、鉄筋の腐食膨張を模擬的に再現した。1step あたり 0.001mm 相当の変位を与え、100step まで載荷した。梁の底面に生じるひび割れの幅を検討対象とし、ひび割れ幅は、要素の等価ひずみから損傷開始時のひずみを引いたものに要素寸法を掛けたものと定義した。

4. モデルの厚みが解析結果に与える影響

本研究では、異形鉄筋の節間距離が 7mm であることを考慮して、モデルの最小厚みを 7mm とし、それより厚いものを 7mm, 14mm, 28mm, 56mm, 116mm とし、モデルの厚みが計算結果に与える影響を検討した。本研究で求めたいものは、モデル底面に生じたひび割れの幅である。本研究においては、ひび割れ幅 w を以下

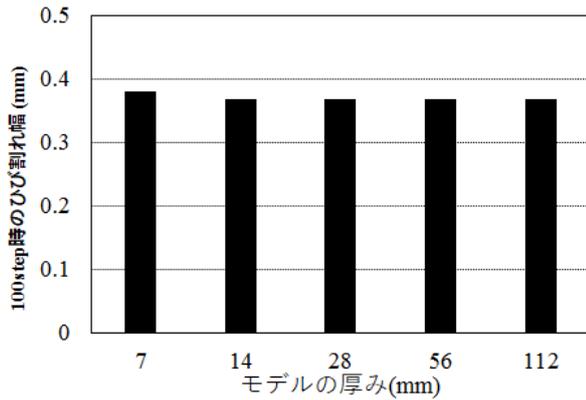


図3 モデルの厚みがひび割れ幅に与える影響

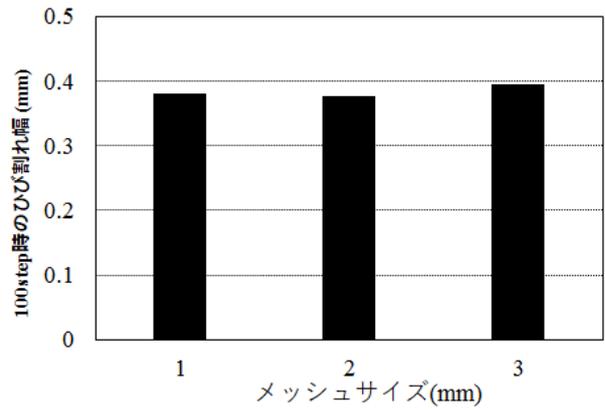


図4 メッシュサイズがひび割れ幅に与える影響

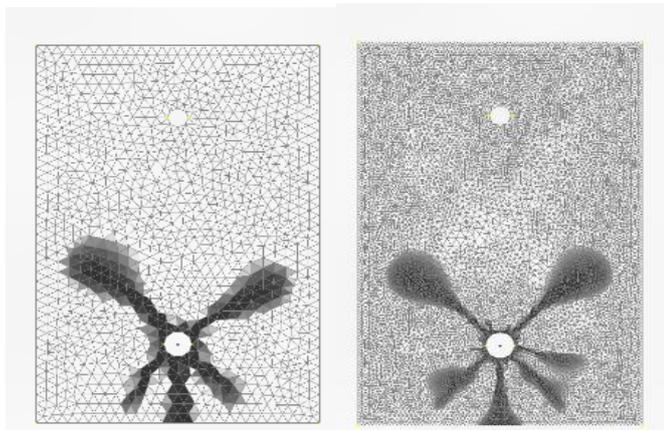


図5 損傷の分布 (左:メッシュサイズ3mm, 右:1mm)

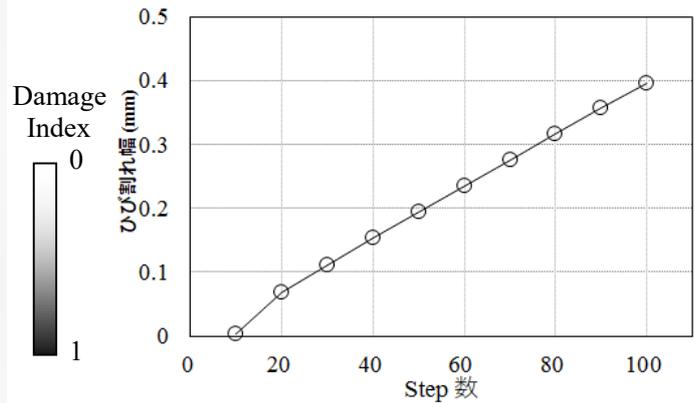


図6 Step数とひび割れ幅の関係

式(3)により計算できるものとした。

$$w = (\kappa - \kappa_0)h \quad (3) \quad \text{ここで、} h \text{ は要素寸法である。}$$

図3に、モデルの厚みが100step時での底面のひび割れ幅に与える影響を示す。どの厚みであっても、ひび割れ幅は、ほぼ同じ値を示したので、計算時間を考慮して今後、モデルの厚みを7mmとする。

5. メッシュサイズが解析結果に与える影響

本研究では、4面体状の3次元メッシュの1辺のサイズを3mm, 2mm, 1mmとしたときでの、解析結果に与える影響を検討した。図4に、モデルの厚みが7mmで、メッシュのサイズが100step時での底面のひび割れ幅に与える影響を示す。また、図5にメッシュサイズが3mmおよび1mmのときの損傷の分布を示す。ひび割れ幅については、どのメッシュサイズであっても概ね同じ値を示したが、損傷の分布では、メッシュサイズが3mmのときに、メッシュ分割のが左右非対称性が顕著であったためか、損傷の分布も非対称となった一方で、メッシュサイズが1mmのときには、左右概ね対象になっていることから、メッシュサイズは1mmの場合が妥当であると判断し、今後の検討にこの値を用いることとした。

6. Step数とひび割れ幅の関係

図6に変位Stepとひび割れ幅の関係を示す。10stepまではひび割れは発生せず、その後、20stepよりひび割れが発生し、100stepの範囲では、直線的にひび割れ幅が増加する傾向にあった。今後、腐食生成物の静弾性係数等を考慮することで、変位stepを鉄筋腐食量に換算し、鉄筋腐食量がひび割れ幅に与える影響を検討したい。

謝辞 本研究は、SIP・インフラ維持管理・更新・マネジメント技術の支援を得て実施された。ここに謝意を記す。

参考文献

1)車谷麻緒, 根本優輝, 岡崎慎一郎, 廣瀬壮一: 異形鉄筋周辺のコンクリートに形成する内部ひび割れモードの再現シミュレーション, 日本計算工学会論文集 Vol. 2014 (2014) p. 20140008