

損傷モデルを用いたコンクリート中の物質移動解析手法の開発とその性能評価

茨城大学 正会員 ○車谷 麻緒
 茨城大学 学生会員 小林 賢司
 香川大学 正会員 岡崎 慎一郎

1. はじめに

鉄筋コンクリートにひび割れが発生すると、水分や塩化物イオンの移動経路となり、鉄筋の腐食および耐久性の低下を引き起こす。そのため、ひび割れが腐食因子の移動性状に与える影響を把握することは、鉄筋腐食に対する耐久性能を評価する上で重要である。

既往の研究のひとつに、剛体バネモデルを用いた方法がある。剛体バネモデルは、ひび割れを離散的に表現できるが、要素分割に依存するという課題がある。一方で後藤ら¹⁾は、実験から引張を受ける異形鉄筋周辺のコンクリートに、内部ひび割れが発生することを示した。しかし、3次元の内部ひび割れを考慮して、コンクリート内部の物質移動を解析した例は見られない。

そこで本研究では、比較的材料パラメータの選定が容易であり、かつコンクリートの破壊力学を考慮した損傷モデルを用いて、鉄筋コンクリートのひび割れ進展、並びにひび割れを考慮した物質移動をシミュレート可能な解析手法を構築する。さらに、実験結果との比較により、本解析手法の妥当性を検証する。

2. 損傷および物質移動解析の数値解析手法

2.1 コンクリートの破壊力学を考慮した損傷モデル²⁾

損傷モデルにおける構成式は、フックの法則にスカラー値関数の損傷変数 D を用いて次式で表される。

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

ここで、 σ は応力テンソル、 ε はひずみテンソル、 c は弾性係数テンソルである。 D は損傷の度合いを $0 \leq D \leq 1$ で表し、0 で損傷なし、1 で完全に破壊とみなす。損傷の進展は、ひずみをスカラー値へ変換した等価ひずみ ε_{eq} を用いて記述する。等価ひずみ ε_{eq} は次式で表される。

$$\varepsilon_{eq} = \frac{k-1}{2k(1-2\nu)} I_1 + \frac{1}{2k} \sqrt{\left(\frac{k-1}{1-2\nu} I_1\right)^2 + \frac{12k}{(1+\nu)^2} J_2} \quad (2)$$

ここで、 ν はポアソン比、 k は圧縮引張強度比、 I_1 はひずみテンソルの第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。

変形履歴における等価ひずみの最大値を $\kappa \geq 0$ とすることで、損傷変数 $D(\kappa)$ は次式で表される。

$$D(\kappa) = 1 - \frac{\kappa_0}{\kappa} \exp\left(-\frac{E\kappa_0 h_e}{G_f} (\kappa - \kappa_0)\right) \quad (3)$$

ここで、 E はヤング率、 κ_0 は破壊発生ひずみ、 G_f は破壊エネルギー、 h_e は要素長さである。

2.2 損傷を考慮した物質移動解析

(1) 非定常拡散解析

本研究では、塩化物イオンの移動を拡散現象としてモデル化し、非定常拡散解析を行う。3次元拡散問題の支配方程式は、Fickの第二法則より次式で表される。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = k(D) \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) \quad (4)$$

ここで、 C は濃度、 t は時間、 $k(D)$ は損傷変数 D の関数とした拡散係数である。この支配方程式を Galerkin 法により離散化し、Crank - Nicolson 法により時間に関しても離散化することで、非定常拡散問題を解く。

(2) 損傷状態における拡散係数の算出

コンクリートの損傷を考慮した拡散現象のモデル化のため、損傷に応じた拡散係数 $k(D)$ を次式で定義する。

$$k(D) = (k_1 - k_0)D + k_0 \quad (5)$$

ここで、 k_0 は損傷のない場合、 k_1 は完全に損傷した場合の拡散係数である。したがって、各要素において $D=0$ のとき拡散係数は k_0 となり、 $D=1$ のときは k_1 となる。

3. 損傷したコンクリート中の物質移動解析

3.1 損傷モデルによるひび割れ進展解析

(1) 解析概要

氏家ら³⁾は、実験により内部ひび割れがコンクリートの密実性低下と透気性に及ぼす影響を調査した。本研究では、氏家らの実験を模擬し、図-1に示すようにモデルの中央に配置した鉄筋に強制変位を与え、鉄筋径の違いによる内部ひび割れの進展を再現、比較する。境界条件は、鉄筋の両端を完全固定とし、鉄筋応力で 200 MPa となるよう強制変位を 200 ステップで与える。

キーワード 物質移動、コンクリート、内部ひび割れ、損傷モデル

連絡先 〒316-8511 茨城県日立市中成沢町 4-12-1 茨城大学日立キャンパス TEL:0294-38-5004

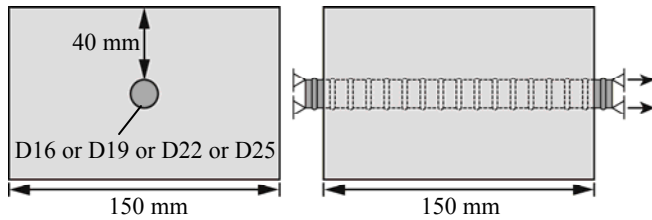


図-1 解析モデル

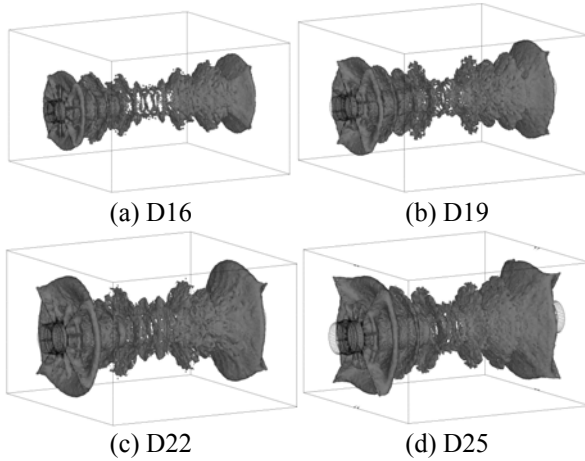


図-2 各鉄筋径における損傷の分布

鉄筋はヤング率 200 GPa, ポアソン比 0.3 とし, コンクリートはヤング率 35 GPa, ポアソン比 0.2, 圧縮引張強度比 10, 破壊エネルギー 0.1 N/mm, 破壊発生ひずみ 1.66×10^{-4} とする. 破壊発生ひずみは, 氏家らの実験による圧縮強度の 1/10 と仮定した引張強度から設定した.

(2) 解析結果

図-2 に最終ステップでの各鉄筋径における損傷の分布を示す. 鉄筋径が大きなものほど, 広範囲かつ供試体の中央まで損傷が分布している. 後藤らの実験において, 内部ひび割れは節が高いほど発生しやすく, 長さも長くなる¹⁾とされていることから, 鉄筋径の違いによる内部ひび割れの進展を 3 次元において再現することができていると考えられる.

3.2 損傷を考慮した物質移動解析と妥当性の検証

(1) 解析概要

モデル上面に塩化物イオンを与え, 鉄筋応力で 100 MPa および 200 MPa 時の損傷状態において, 物質移動解析を行った. 塩化物イオン濃度は 10 kg/m^3 , 拡散係数については, $k_0 = 0.57 \text{ cm}^2/\text{year}$, $k_1 = 57 \text{ cm}^2/\text{year}$ とした.

(2) 解析結果および妥当性の検証

図-3 に D16 および D25 の濃度分布(濃度 1.2 kg/m^3 を可視化), 図-4 に拡散を 1 次元問題とし, モデル底面での濃度と時間の関係から求めた各モデルの拡散係数を示す. 損傷の程度に起因し, 鉄筋径が大きくなるほど

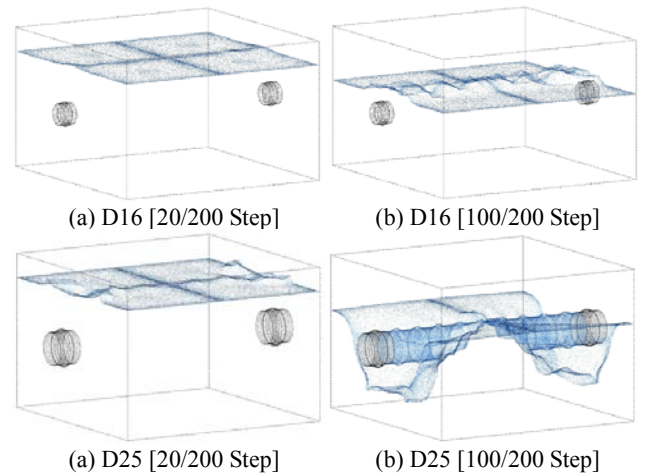


図-3 D16 および D25 の濃度分布

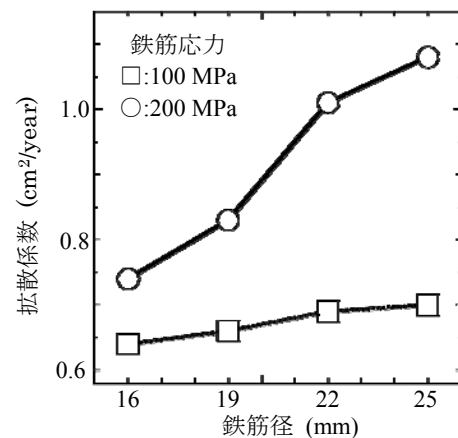


図-4 各鉄筋径と拡散係数

拡散係数も大きくなり, 氏家らの実験と同様の傾向を示した. これより, コンクリート中の損傷を考慮した物質移動解析が概ね妥当であると考えられる.

4. おわりに

本研究では, コンクリートの損傷を考慮した物質移動解析手法を構築し, 損傷による物質移動性状に関して既往の実験結果の傾向と同様な結果が得られた. 今後は, より定量的に本解析手法の評価を行っていく.

【参考文献】

- 1) 後藤幸正, 大塚浩司: 引張を受ける異形鉄筋周辺のコンクリートに発生するひび割れに関する実験的研究, 土木学会論文報告集, 第 294 号, pp.85-100, 1980.
- 2) 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, pp.20140008, 2014.
- 3) 氏家勲, 佐藤良一, 長瀧重義: 内部ひび割れに起因するかぶりコンクリートの密実性低下の透気性による検討, 土木学会論文集, No.550/V-33, pp.163-172, 1996.