

内部ひび割れを有する RC 部材の塩化物イオン濃度の予測手法に関する研究

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

1. はじめに

コンクリートにひび割れが生じると、塩化物イオンの移動が容易となり、RC 構造物の耐久性の低下を加速させる。そのため、ひび割れが塩化物イオンの移動性状に与える影響を把握することは、構造物の耐久性能を適切に評価する上で重要である。著者らは、これまでに、内部ひび割れを有する鉄筋コンクリート中の物質移動解析²⁾について検討している。しかし、この研究は解析手法の開発を目的としていたため、塩化物イオン濃度の定量的な評価までは検討していない。

本研究では、ひび割れの 3 次元幾何形状を再現可能な数値解析手法¹⁾を用いて、既往の実験を模擬した数値シミュレーションを行い、内部ひび割れを有する鉄筋コンクリート中の塩化物イオン濃度を定量的に評価できることを示す。

2. 損傷モデルを用いた数値解析の定式化

2.1 損傷モデルを用いたひび割れ進展解析

損傷状態にある弾性体の準静的つり合い問題は次式で表される。

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \bar{\mathbf{b}} = \mathbf{0} \quad \text{in } \Omega \quad (1)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \frac{1}{2} \{ \nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T \} \quad \text{in } \Omega \quad (2)$$

$$\boldsymbol{\sigma} = (1 - D_\epsilon) \mathbf{c} : \boldsymbol{\varepsilon} \quad \text{in } \Omega \quad (3)$$

ここで、 $\boldsymbol{\sigma}$ はコーシー応力テンソル、 $\boldsymbol{\varepsilon}$ は微小ひずみテンソル、 $\mathbf{c}$ は弾性係数テンソル、 $\mathbf{u}$ は変位ベクトル、 $\bar{\mathbf{b}}$ は既知の物体力ベクトル、 ∇ は勾配オペレータ、 Ω は物体領域である。 D_ϵ は損傷変数と呼ばれるスカラー値関数であり、 $0 \leq D_\epsilon \leq 1$ の範囲で損傷の度合いを表す。

2.2 損傷を考慮した物質移動解析

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する。Fick の第 2 法則を用いて、非定常拡散問題の支配方程式は次式で表される。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\nabla \cdot \mathbf{J} + \bar{f} \quad (4)$$

$$\mathbf{J} = -k(D_\epsilon) \nabla C \quad (5)$$

ここで、 C は濃度、 t は時間、 $\mathbf{J}$ は物質流束ベクトル、 $\bar{f}$ は既知の発生項である。 k は拡散係数であり、ひび割れの影響を加味するために、本研究では損傷変数 D_ϵ を用いて、拡散係数 $k(D_\epsilon)$ を次式で定義する。

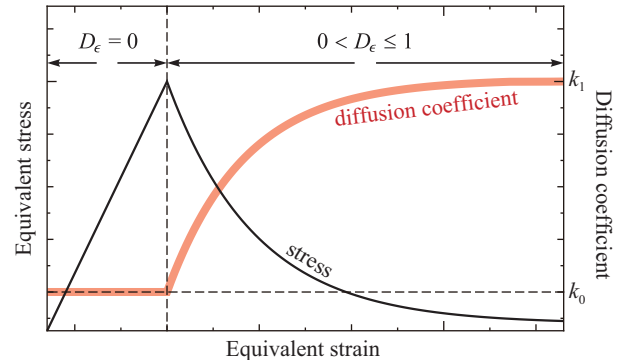


図-1 損傷を考慮した拡散係数のモデル化

$$k(D_\epsilon) = (k_1 - k_0) D_\epsilon + k_0 \quad (6)$$

ここで、 k_0 は損傷のない場合 ($D_\epsilon = 0$) の拡散係数、 k_1 は完全に損傷した場合 ($D_\epsilon = 1$) の拡散係数である。

損傷モデルにおける応力-ひずみ曲線に拡散係数の関係を重ねた図を図-1 に示す。この図のように、損傷のない弾性状態 ($D_\epsilon = 0$) の場合、拡散係数は k_0 となる。その後、損傷の発展に伴い、損傷変数が $0 < D_\epsilon \leq 1$ の値をとることで、拡散係数の値も大きくなり、最終的に拡散係数は k_1 に収束する。

損傷のない場合の拡散係数 k_0 は、実験によって、コンクリートの見かけの拡散係数として求めることができる。しかし、完全に損傷した場合の拡散係数 k_1 は、測定が困難なパラメータである。そこで本研究では、 k_0 を用いて、 k_1 の値を次式で定義する。

$$k_1 = \alpha k_0 \quad (7)$$

既往の研究²⁾では、内部ひび割れの影響を明確にするため、 α を 100 と仮定したが、本研究では実験結果に対するキャリブレーションにより、 α の値を決定する。

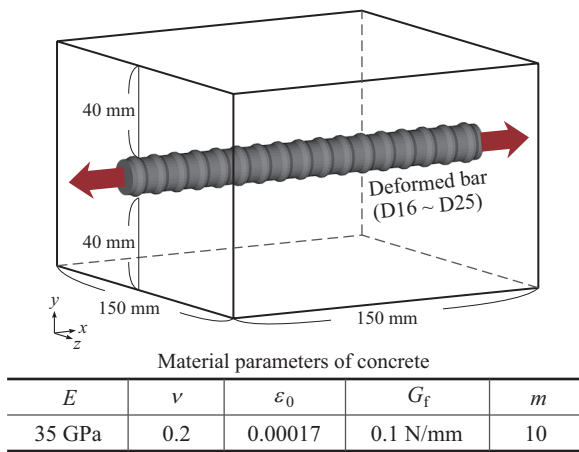
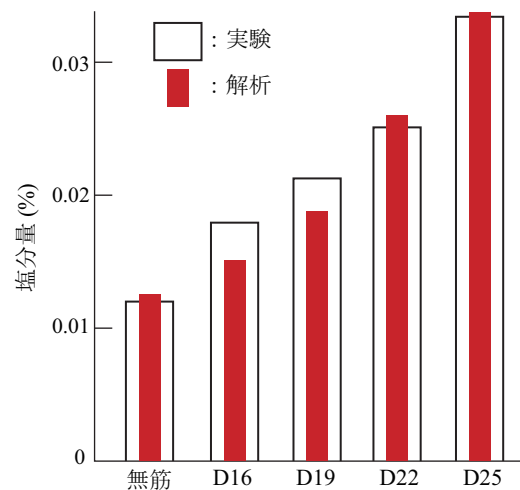
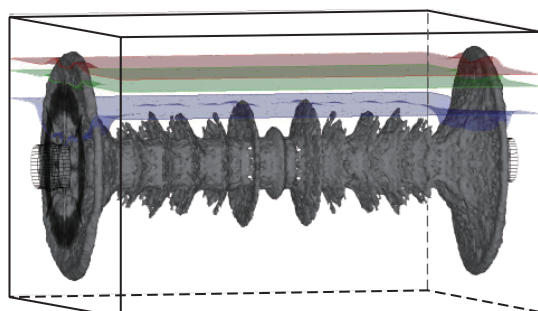
3. 塩化物イオン濃度の定量的評価

3.1 解析対象と条件

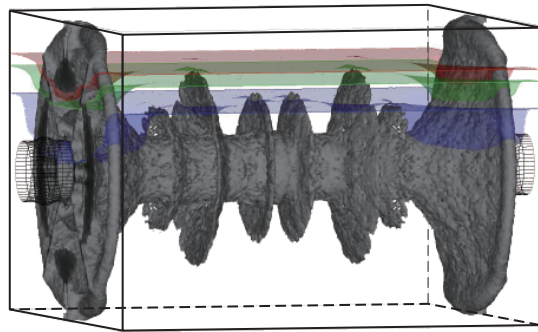
本研究では、氏家ら³⁾の実験を模擬し、鉄筋径を変化させた有限要素モデルに対してひび割れ進展解析を行い、鉄筋まわりに生じる内部ひび割れの 3 次元幾何形状を再現する。そして、内部ひび割れを発生させた有限要素モデルに対して、塩化物イオンの非定常拡散解析を行い、氏家らの実験結果と比較する。

キーワード：鉄筋コンクリート、内部ひび割れ、塩化物イオン、損傷モデル、FEM

〒316-8511 茨城県日立市中成沢町 4-12-1, 茨城大学工学部, TEL: 0294-38-5162, FAX: 0294-38-5268

図-2 氏家ら³⁾の両引き試験体を模擬した解析モデル図-4 各鉄筋径に対する塩分量の比較³⁾

Distribution of damage and chloride ion in case of D16



Distribution of damage and chloride ion in case of D22



図-3 各鉄筋径に対する損傷分布と濃度分布

図-2に、氏家らの両引き試験体を模擬した解析モデルを示す。ひび割れ進展解析では、モデルの対称性を考慮し、全体の1/8モデルを解析対象とする。四面体1次要素を用い、1/8モデルの要素数は約52万である。鉄筋はヤング率200 GPa、ポアソン比0.3の線形弾性体とし、鉄筋応力が約300 MPaになる強制変位を300ステップで与える。

ひび割れ進展解析終了後の損傷状態を初期条件とし、各モデルの上面のみに塩化物イオン濃度 20.7 kg/m^3 を与え、1ステップを0.5日とする120ステップで非定常拡散解析を行う。氏家らの実験を参考に、コンクリートの見かけの拡散係数 k_0 を $4.93 \text{ cm}^2/\text{year}$ とする。完全に損傷した場合の拡散係数 $k_1 = \alpha k_0$ については、実験結果に対するキャリブレーションにより、 α の値を15とする。

3.2 解析結果と考察

解析結果の一例として、D16とD22のケースについて、最終的な損傷分布と塩化物イオンの濃度分布を図-3に示す。鉄筋径の大きなモデルほど、ひび割れが広範囲に進展しており、濃度分布がより深くにまで進行していることがわかる。図-4に、本研究の数値解析結果と氏家らの実験結果の塩分量を比較したグラフを示す。ここで、塩分量とは、モデル上面から27~37 mmの範囲における塩分量を示している。

結果を見ると、鉄筋径が大きくなるにつれて塩分量が増加する傾向を適切に再現しており、実験結果と定量的に一致していることがわかる。塩分量の違いは、その移動経路となるひび割れの相違によるものである。これは、本研究の数値解析において、ひび割れの3次元幾何形状を適切に再現したことを意味するとともに、鉄筋コンクリート内部の塩化物イオン濃度を精度よく予測するには、ひび割れの3次元幾何形状を考慮することが重要であることを示している。

4. おわりに

本研究では、ひび割れの3次元幾何形状を再現可能な数値解析手法を用いて、内部ひび割れを有する鉄筋コンクリート中の塩化物イオン濃度の拡散シミュレーションを行い、既往の実験結果を定量的に再現できることを示した。今後は、その他の実験結果についても検討を行うとともに、鉄筋の腐食膨張のモデル化についても検討する必要がある。

参考文献

- 1) Kurumatani M, Terada K, Kato J, Kyoya T, Kashiya K: An isotropic damage model based on fracture mechanics for concrete, *Engng. Fract. Mech.*, Vol.155, pp.49-66, 2016.
- 2) 小林賢司, 車谷麻緒, 岡崎慎一郎, 廣瀬壮一: 破壊力学的損傷を考慮し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, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.71, No.2, pp.1.161-1.170, 2015.
- 3) 氏家勲, 小林清和, 佐藤良一, 長瀧重義: 内部ひび割れを有するかぶりコンクリートの塩分浸透性に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, No.1, pp.843-848, 1992.