

損傷理論を導入したコンクリート材料劣化予測シミュレータ

九州大学大学院 学生会員 ○渡邊 茜
九州大学大学院 正会員 浅井 光輝
九州大学大学院 正会員 園田 佳巨

1. 序論

コンクリート構造物の経年劣化の要因は、中性化・アルカリシリカ反応(ASR)・塩害等のさまざまな現象が考えられる。その多くは力学的要因と化学的要因が複雑に連成しており、劣化メカニズムを詳細に把握したうえで合理的な対策を行うことは非常に困難である。本研究では、ASRの特徴的な損傷である亀甲状のひび割れパターン(図-1を参照)を再現することを目標とし、数値解析モデルの確立を試みた。本研究では、ボクセルFEMをベースとし、非定常拡散問題と非線形ひび割れ進展問題の両者の解析を連成したシミュレータを構築する。ボクセル要素を除去することで簡易にひび割れを表現する従来型ひび割れ進展解析モデルに対し、損傷モデルを導入することで解の改善を試み、同時に得られる損傷パラメータを用いて拡散問題における物性値も段階的に変化させることで、安定した拡散問題と固体損傷の連成解析手法を提案する。

2. 拡散・膨張・不連続面進展の連成解析手法

連成解析ではまず、非定常拡散問題を解き拡散物質の空間分布を予測する。そして、濃度の空間分布の結果から骨材の膨張力を決定する。この際、膨張力によって不連続面と判定される要素は、拡散係数の高い仮想空隙領域に置換し、再び拡散問題を解く。これを繰り返すことで、浸透・拡散に伴う不連続面進展解析を実施する。ひび割れ進展の判定において、完全脆性モデルと損傷モデルの2つのモデルを用いて比較を行った。

2.1 完全脆性モデル

完全脆性モデルでは最大主応力をひび割れ発生判定基準として、最大主応力が引張強度 f_{ct} に到達した要素をひび割れとみなし、その要素を除去する。ひび割れと判定された要素は、拡散問題においてもモルタルに対応した拡散係数 c から空隙に相当した拡散係数 c_B へと急激に上昇させる。

2.2 損傷モデル

損傷モデルでは連続体損傷力学を導入し、損傷変数 D を用い、要素剛性を段階的に減少させる。損傷変数は $0 \leq D \leq 1$ であり、 $D=0$ のときには健全な状態を示し、 $D=1$ は最終的な破壊状態を表す。損傷に伴う微小空隙の発達には材料の剛性低下を引き起こすため本研究では弾性係数の低下によって損傷状態を表わす。 E_0 は非損傷状態の弾性係数、 E は損傷後の弾性係数である。

$$D = \frac{E_0 - E}{E_0} \quad (1)$$

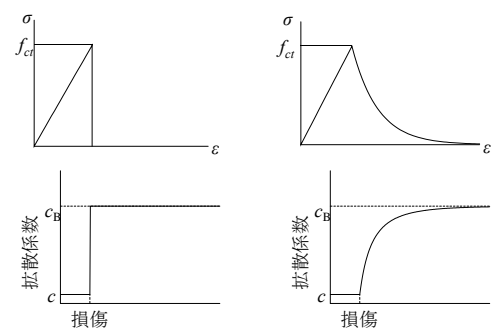
損傷変数は以下に示す損傷進展式によって計算される。

$$D = 1 - \frac{\kappa_0}{\kappa} [1 - A + A \exp\{-B(\kappa - \kappa_0)\}] \quad (2)$$

ここで、 A 、 B は損傷の進展を表すパラメータ、 κ は材料が過去に受けた最大の相当ひずみである。 κ が κ_0 となると損傷が始まるものとする。コンクリートは引張応力に弱い材料であり、圧縮強度に比べて引張強度は約1/10程度である。そこで、圧縮



図-1 ASRによるひび割れ



(a) 完全脆性モデル (b) 損傷モデル

図-2 剛性・拡散係数の変化

域と引張域の相対的な影響度を考慮した相当ひずみを定義することが望ましい。本研究では次式の相当ひずみを用いて損傷を評価することにした。

$$\varepsilon_{eq} = \frac{m-1}{2m(1-2\nu)} I_1 + \frac{1}{2m} \sqrt{\left(\frac{m-1}{1-2\nu} I_1\right)^2 + \frac{2m}{(1+\nu)^2} J_2} \quad (3)$$

ここで、 I_1 はひずみの1次不変量、 J_2 は偏差ひずみの2次不変量であり、 m はコンクリートの圧縮強度と引張強度の比を示す。損傷変数を参照しながら、拡散係数も空隙に相当した大きな値 c_B へと段階的に変化させる。

3. 連成解析手法の解析例

開発した連成シミュレータによって図-3に示す3次元コンクリートモデルでの解析を行い、その精度を検証する。解析モデルは、100mm立方の実際のコンクリートを研磨し、断面をスキャンした画像から作成したモデル(100万要素)である。解析条件として、モルタル、骨材の拡散係数をそれぞれ $1.0 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{sec}$ 、 $1.0 \times 10^{-12} \text{cm}^2/\text{sec}$ とし、時間刻みは0.5 dayと設定した。境界条件としては、yz平面以外、全面の変位を拘束し、非拘束面である $x=1$ のyz平面から拡散物質を浸透させるものとする。完全脆性モデルではモルタルおよび界面の引張強度を4.0MPa、1.0MPaとし、損傷モデルのパラメータは、 $A=0.99$ 、 $B=100$ 、 $m=10$ 、界面の $\kappa_0=5.0 \times 10^{-5}$ 、モルタルの $\kappa_0=2.0 \times 10^{-4}$ とした。

連成解析結果を図-4、図-5に示す。イオンが骨材に到達すると応力が高くなり、骨材周辺に不連続面が進展する様子が解析できた。しかし、完全脆性モデルでは界面にのみひび割れが形成され、モルタルへとひび割れが進展しなかった。一方、損傷モデルを用いるとモルタルに損傷が進展していき、コンクリート表面まで損傷が到達した。コンクリート表面における損傷の分布を図-6に示す。ASRの特徴である亀甲状のひび割れパターンを定性的に表現することができた。

4. 結論

本研究では非定常拡散解析と不連続面進展解析を連成させる基本的なフローを提案し、内部膨張により不連続面が進展する様子を解析した。この際、ひび割れ進展のモデル化に関して完全脆性モデルと損傷モデルを導入した結果を比較検討することで、提案手法の妥当性について検討した。

完全脆性モデルではひび割れ要素の剛性をゼロとするため、モルタルへのひび割れ進展を再現することができなかった。一方、損傷モデルと併用させた連成解析モデルでは、損傷部分の剛性を段階的に減少させることで、モルタル部分にも損傷が段階的に進展する様子を再現することが可能となった。

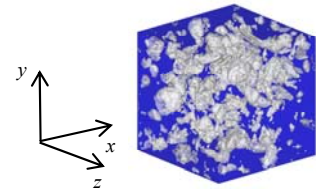


図-3 コンクリートモデル

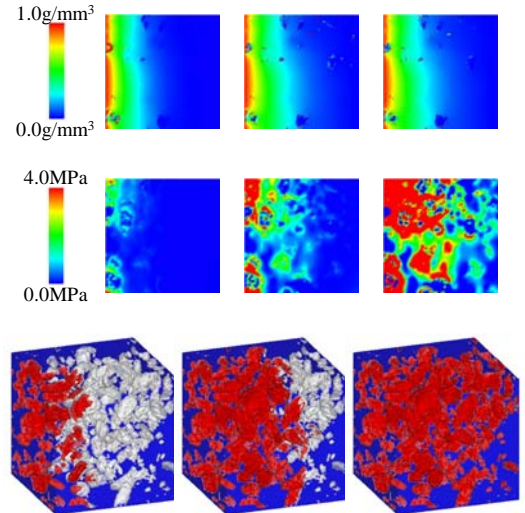


図-4 完全脆性モデルによる解析結果

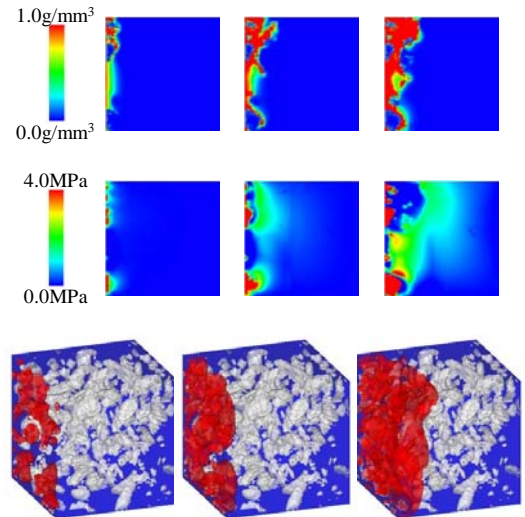


図-5 損傷モデルによる解析結果

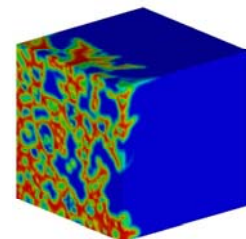


図-6 コンクリート表面における損傷変数