

化学反応に伴うコンクリート材料劣化シミュレーションに関する基礎研究

九州大学大学院 学生会員 ○片山 純一

九州大学大学院 正会員 浅井 光輝

1. 目的

コンクリート構造物の劣化の要因は、中性化・アルカリシリカ反応 (ASR)・塩害等様々である。その多くは、力学的要因と化学的要因の複雑に連成しており、劣化メカニズムを詳細に把握し、対策することは非常に困難である。

本研究では、力学的要因と化学的要因を考慮した連成シミュレータの開発を目的とし、対象を ASR のみとする。ASR メカニズム解明に向けた基礎検討として、**図-1** に示すように、メゾレベル (粗骨材・界面・モルタル) でのコンクリート材料解析モデル (**図-2**) を用いてアルカリイオンの浸透・拡散解析、そしてアルカリ量に関係した骨材膨張に伴う亀裂進展解析を実施するものとする。

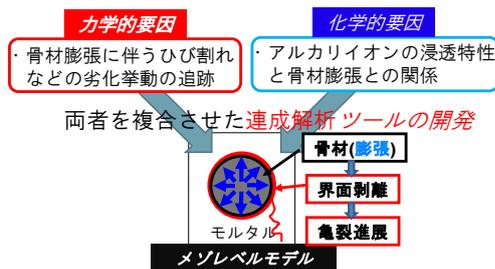


図-1 連成解析ツールイメージ図

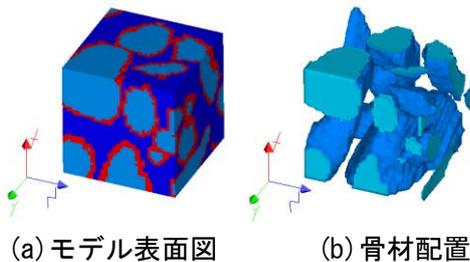


図-2 メゾレベルコンクリートモデル

2. V-FEM による各領域での解析ツール

本研究では、3次元画像の構成単位であるボクセルを有限要素と見なすボクセル FEM (以下 V-FEM) により、骨材・界面・モルタルの3相モデルを構築する。そして、亀裂進展を含む力学現象、および物質拡散の両者を FEM 解析する。以下では各領域での解法の補足説明を加える。

2.1 非局所型V-FEMと亀裂進展の表現方法

V-FEMでは異種材料界面における非現実的な応力振動がしばしば問題点として挙げられる。本解析では、積分平均化理論を導入した非局所型V-FEMを採用した。この手法は、ある1点で応力を評価する際に、その応力評価点の周囲の影響を加味した大域的な点の情報から局所的な点での力学状態を評価するものであり、非現実的な応力振動を抑制できる。

また亀裂進展解析は、すべての領域が微小かつ定形要素で分割されるV-FEMの特徴と計算効率を考慮し、簡易的なエレメント除去法により実施することにした。この技術は、ある破壊基準を満たした要素の剛性を劣化させる、または剛性を消失させ応力の伝達を遮り不連続面を表現するものである。通常の損傷モデルでは、**図-3(a)**のような損傷パラメータに指数関数を与えることにより、巨視的な軟化挙動を表現するモデルが大半を占めている。しかし本解析では、ごく微小な領域での材料特性を与えるべきであり、**図-3(b)**のように破壊基準を満たした要素は瞬時に損傷パラメータを1とし、要素剛性を消失させることで不連続面を表現した。

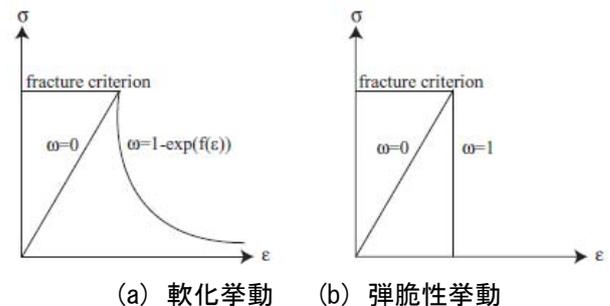


図-3 損傷モデルにおける局所挙動

2.2 アルカリイオンの非定常浸透・拡散解析

アルカリイオンの浸透・拡散は多くの自然現象と同様に、時間とともに刻々と変化していくため、非定常の拡散方程式を用いる必要がある。非定常問題を有限要素式で表わすためには時間積分を用いる必要があるが、本研究では精度と計算量の兼ね合いから後退オイラー法を用いることとする。以下には後退オイラー法を用いた非定常拡散方程式の導出について示す。拡散方程式の弱形式である式(1)を示す。

$$\int_{\Omega} (\nabla w)^T K \nabla c d\Omega = \int_{\Omega} w \left(\frac{\partial c}{\partial t} \right) d\Omega + \int_{\Gamma_f} w \bar{J} d\Gamma - \int_{\Omega} w s d\Omega \quad (1)$$

この式(1)を有限要素で離散化すると、

$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{C}} + \mathbf{K}\mathbf{C} = \mathbf{f} \quad (2)$$

となる。ここで $\mathbf{M} = \int_{\Omega} \mathbf{N}^T \mathbf{N} d\Omega$, $\mathbf{K} = \int_{\Omega} \nabla \mathbf{N}^T \mathbf{K} \mathbf{N} d\Omega$

であり、 \mathbf{C} は節点濃度ベクトルである。

次に \mathbf{C}_n を既知量として、 \mathbf{C}_{n+1} を求める手順について説明する。

まず濃度の時間微分を差分近似すると、

$$\dot{\mathbf{C}} = \frac{\mathbf{C}_{n+1} - \mathbf{C}_n}{\Delta t_n} \quad (3)$$

となる。また、求めた式(3)を式(2)に代入し、整理すると、以下の式を得る。

$$\mathbf{C}_{n+1} = (\mathbf{M} + \Delta t_n \mathbf{K})^{-1} \cdot \Delta t_n \mathbf{f}_{n+1} + \mathbf{M}\mathbf{C}_n \quad (4)$$

これが非定常拡散方程式の有限要素式となる。

3. 膨張・亀裂進展・拡散の連成解析手法

2節で示した両者の解析手法を連成することで、力学現象と化学現象の連成解析手法を構築する。図-4にその連成解析の手順を示す。



図-4 連成解析手順

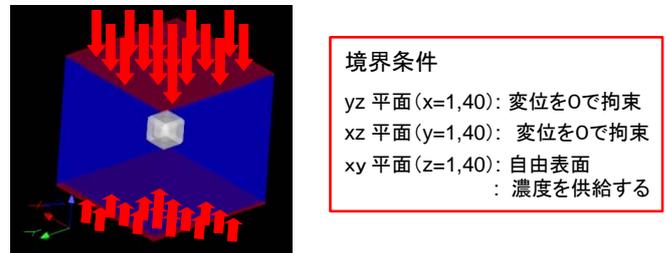
図-4に示されるように、まず拡散問題を解くことでアルカリイオンの空間分布を予測する。そして、非線形力学的問題では、アルカリイオン分布の結果を基にソース項になる膨張力決定する。この際、膨張力によって亀裂が生じた判定される要素は、次の拡散解析では拡散係数の高い仮想的な空隙領域に置換し、再び拡散問題を解く。これを繰り返すことで、アルカリイオン浸透・拡散に伴う亀裂進展解析を実施する。

4. 簡易3次元モデルでの連成解析例

開発した連成シミュレータにより、単純なモデル・境界条件下での解析を行い、その精度を検証する。

解析対象は、図-5(a)に示すような、全要素数は64000

要素の、一辺が40(mm)の立方体モデルであり、一辺が6(mm)の同じく立方体モデルを中央に配置している。マトリックス、内在物の拡散係数はそれぞれ、1.0, 0.01 (m²/sec)であり、内在物には拡散しにくくなっている。境界条件についても図-5(b)に示す通りである。



(a) 解析対象 (b) 境界条件

図-5 解析対象および境界条件

初期ステップと最終ステップのxz平面 (y=20)の濃度コンター図と2D, 3D亀裂図を図-6(a)(b)に示す。初期では、濃度が上下方向に浸透していく。濃度の浸透に伴い、内在物上下のマトリックスに亀裂が生じる。最終的には、濃度は内在物と界面以外は同様の値を持つようになり、亀裂については横方向の広がりを持った形になっている。

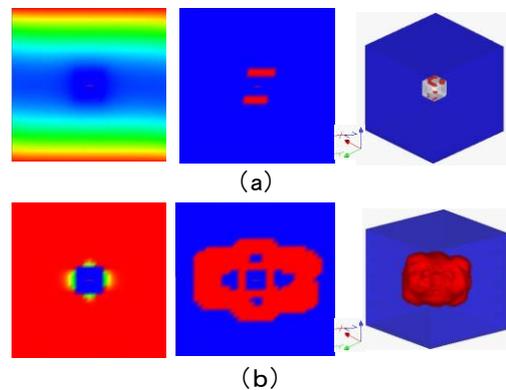


図-6 解析結果

5. 結論

本研究では、アルカリ浸透・拡散に伴う、骨材膨張、亀裂進展解析法を提案した。そして、簡易なモデルについての膨張による破壊挙動も確認することとでその有用性を確認した。実験では観測が困難な材料内部の物質の拡散、破壊挙動の再現を目指した微視的力学アプローチは、コンクリート劣化メカニズムの解明にも有用であると考えられる。今後は、連成解析のさらなる精度向上、そして、実際のコンクリートをスキャンした3次元コンクリートモデルでの解析を行うことで、実現象により近い状態での知見を蓄えることが必要である。