

コンクリートの内部構造を再現可能なイメージベース破壊シミュレーション

茨城大学 学生会員 ○加藤 匠
 茨城大学 学生会員 佐々木 浩武
 茨城大学 正会員 車谷 麻緒

1. はじめに

コンクリートはモルタルと粗骨材から構成される非均質材料である。粗骨材は、様々な形状や大きさでコンクリート内部に不規則に分布し、モルタルとは異なる力学特性を示す。このことから、コンクリートの破壊挙動は非常に複雑になる。つまり、コンクリートの複雑な内部構造を解析に反映できれば、破壊挙動をより詳細にシミュレーションすることが可能になると考えられる。一方で、コンクリートの内部構造を考慮した解析を行う際、その複雑な形状に沿ったメッシュ生成が困難であるという問題がある。この問題を解決し、解析対象の形状を高い精度で再現できるイメージベース的な解析手法として、ボクセル有限要素法がある¹⁾。しかし、計算コストや材料の境界部分における計算精度に問題があることから、ボクセル有限要素法は破壊シミュレーションには適さない。

一方、有限要素解析におけるメッシュ生成の手間を解消するために、メッシュフリー解析の研究が行われている²⁾。メッシュフリー解析は、解析対象の形状に沿ったメッシュ生成が不要であるため、複雑な内部構造を有する材料の解析も行うことができる。しかし、これらの手法のほとんどは、材料の境界を線または面として明確に定義した形状モデルを作成する必要がある。複雑な形状の粗骨材を大量に含むコンクリートに適用するには限界がある。

そこで本研究では、コンクリートの複雑な内部構造を考慮した破壊シミュレーションを行うことを目的とする。そのために、解析対象の形状を高い精度で再現できるイメージベース的な解析と、複雑な形状に沿ったメッシュを必要としないメッシュフリー解析の両方の利点をあわせ持つ、新たな解析手法を開発する。

2. 提案手法

ここでは、メッシュフリー解析を行うための損傷モデルの定式化を示す。続いて、コンクリートの断面画像をもとに、複雑な内部構造を考慮したイメージベース的な解析を行う方法について説明する。

2.1 損傷モデルの定式化

図-1の右側に示すような2つの材料からなる棒材の引張問題を設定する。材料1をモルタル、材料2を粗骨材と考え、それぞれの材料が棒材に占める体積の割合を V 、 $1-V$ とする。普通コンクリートを想定すると、損傷はモルタル部分にのみ発生・進展する。このことから、モルタル部分の損傷のみを考慮した場合、棒材全体の応力 σ とひずみ ε の関係は次式で表される。

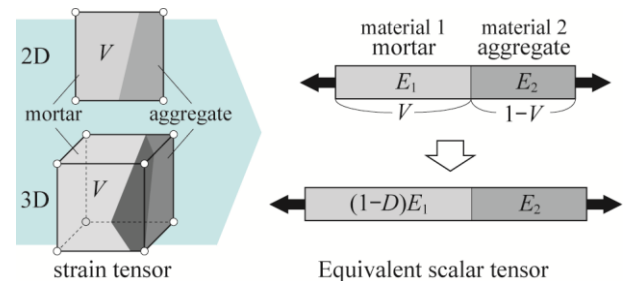


図-1 提案手法の概念図

$$\sigma = (1 - D)E\varepsilon \quad (1)$$

このとき、 D は $0 \leq D \leq 1$ の範囲で損傷の度合いを評価する損傷変数であり、次式で表される。

$$D(\varepsilon) = 1 - \frac{\alpha_0 \bar{\varepsilon}_1}{\varepsilon} \exp \left\{ -\frac{E \alpha_0 \bar{\varepsilon}_1}{G_f} h_e V \left(\frac{\varepsilon}{\alpha_D} - \bar{\varepsilon}_1 \right) \right\} \quad (2)$$

ここで、 $\bar{\varepsilon}_1$ はモルタルの破壊発生ひずみ、 E は棒材全体の平均ヤング率、 G_f はモルタルの破壊エネルギー、 h_e は棒材全体の長さである。また、 α_0 、 α_D はそれぞれ次式の関係を示す値である。

$$E_1 = \alpha_0 E, \quad \varepsilon_1 = \alpha_D^{-1} \varepsilon \quad (3)$$

ここで、 ε_1 は棒材内のモルタルのひずみである。以上で示した定式化に従うことで、棒材におけるモルタルの体積率さえわかれば、モルタルの損傷のみを考慮したコンクリートの解析を行うことができる。提案手法では、この損傷モデルを各要素に適用しているため、要素に含まれるモルタルの体積率さえわかれば、メッシュフリー的な破壊シミュレーションが可能となる。

2.2 多次元問題への適用

多次元問題においては、次式で表す等価ひずみ ε_e を適用することで、図-1で示すようにひずみテンソルをスカラー値として評価する。

$$\varepsilon_e = \frac{k-1}{2k(1-2\nu)} I'_1 + \frac{1}{2k} \sqrt{\left(\frac{k-1}{1-2\nu} I'_1 \right)^2 + \frac{12k}{(1+\nu)^2} J'_2} \quad (4)$$

ここで、 ν はポアソン比、 k は引張圧縮強度比、 I'_1 は微小ひずみテンソルの第1不変量、 J'_2 は偏置ひずみテンソルの第2不変量である。以上のように、多次元問題においても、等価ひずみによって1次元問題に置き換えることによって、1次元問題の理論解を応用した提案手法を用いることができる。

キーワード コンクリート、イメージベース、破壊シミュレーション、メッシュフリー、非均質

連絡先 〒316-8511 茨城県日立市中成沢 4-12-1 茨城大学工学部 TEL: 0294-38-5151 FAX: 0294-38-5268

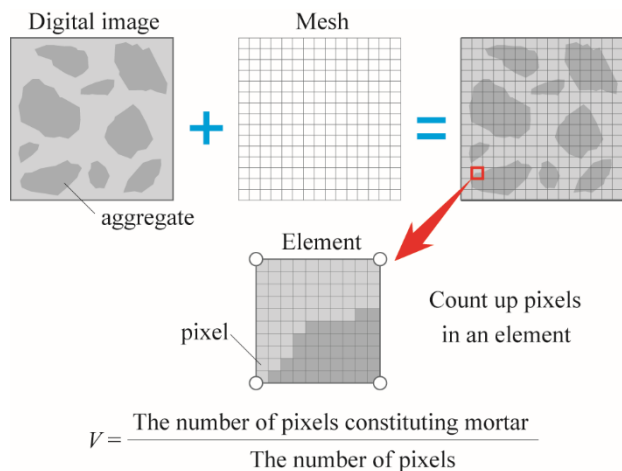


図-2 体積率の算出方法

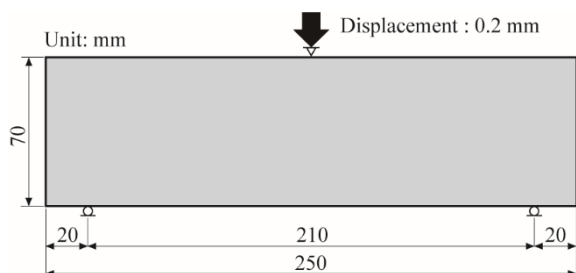


図-3 解析対象

2.3 体積率の算出方法

コンクリートの断面画像から、各要素に含まれるモルタルの体積率を算出する方法を図-2に示す。はじめに、コンクリート断面のデジタル画像にそれとは無関係に生成したメッシュを重ね合わせる。次に各要素に注目し、要素に含まれる画素数を数え上げる。最後に「要素内のモルタル部分を構成する画素数」を「要素内のすべての画素数」で除すことで、各要素におけるモルタルの体積率を算出できる。

3. 検証例題

実際のコンクリートの断面画像を用いて、提案手法による破壊シミュレーションを行う。解析対象は図-3であり、各材料パラメータは、モルタルのヤング率 E_1 を20 GPa, 粗骨材のヤング率 E_2 を50 GPa, モルタルのポアソン比 ν_1 を0.2, 粗骨材のポアソン比 ν_2 を0.2, モルタルの圧縮引張強度比 k を10, モルタルの破壊発生ひずみ ε_1 を 2.0×10^{-4} , モルタルの破壊エネルギー G_f を0.05 N/mmとした。また、適用する断面画像は図-4(a)である。解析結果として、図-4(a)の破線で囲んだ部分を拡大し、各ステップにおける等価ひずみ分布を可視化することで、ひび割れの様子を再現したものを図-4(b), (c)に示す。ひび割れが粗骨材の周辺で発生し、粗骨材を迂回しながら進展していく破壊挙動が再現できていることが確認できる。さらに、図-4(d), (f)に示す断面画像を用いて行った解析結果をそれぞれ図-4(e), (g)に示す。これらの図から、提案手法では粗骨材の形状や分布を高い精度で解析に反映し、内部構造の違いによって生じる破壊挙動の差異を表現できていることがわかる。本来であれば、異なる内部構造を有する材料の解析を行うために

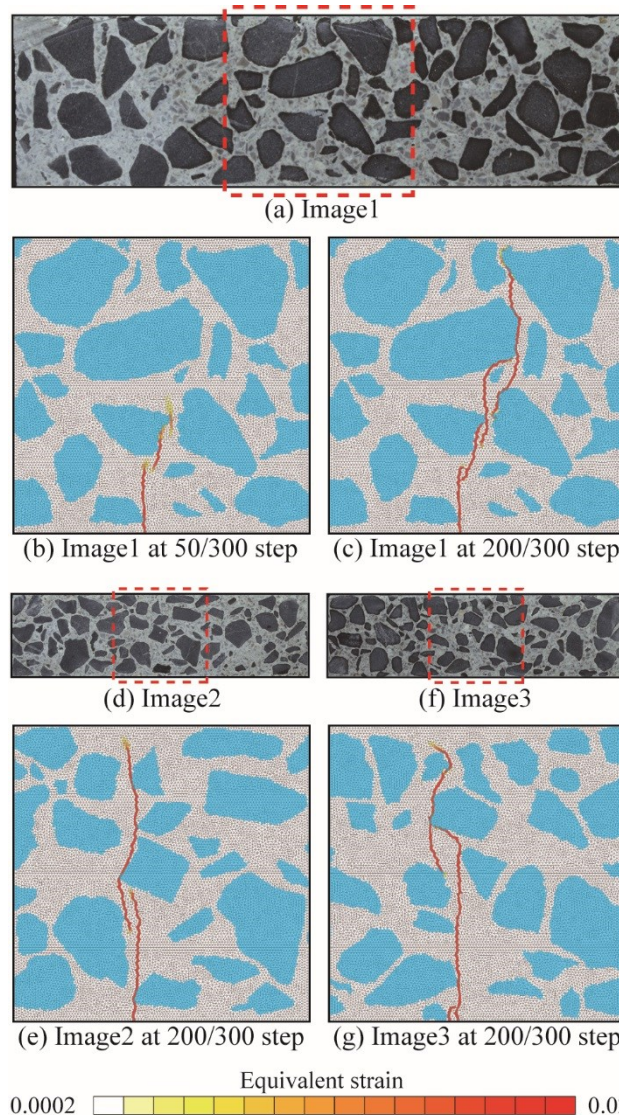


図-4 解析結果

は、それぞれの形状に沿ったメッシュ生成が必要になる。対して提案手法では、1つの固定メッシュと複数パターンの断面画像を用いることで、異なる内部構造を有する材料の破壊シミュレーションが可能である。この点からも、提案手法は複雑な内部構造を考慮したコンクリートの破壊シミュレーション法として優れているといえる。

4. おわりに

コンクリート内部の非均質性を高い精度で反映した破壊シミュレーション手法を提案した。提案手法は、コンクリートの断面画像とそれとは無関係に生成したメッシュを用いて、材料の内部構造の違いによって生じる破壊挙動の差異まで表現することができる。

参考文献

- 1) 永井学志, 山田貴博, 和田章: 三次元実画像データに基づくコンクリート材料の有限要素解析手法, 日本建築学会構造系論文集 第509号, pp.77-82, 1998.
- 2) 日本計算工学会 (編), 鈴木克幸, 長嶋利夫, 萩原世也 (著): メッシュフリー解析法, 丸善, 2006.