

非均質性を考慮した損傷モデルによるコンクリートの3次元破壊シミュレーション

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

1. はじめに

コンクリート構造物が破壊すると、それによる被害は甚大であるため、コンクリートの破壊挙動を解明および予測することは重要な課題である。そこで、実験では測定が難しい応力などの情報を定量的に取得できるなど利点が多いことから、コンクリートの破壊シミュレーションの研究が進められている。既往の研究では、車谷ら¹⁾は損傷モデルを適用し、数値解析によってコンクリートの複雑な破壊挙動を再現した。

このような既往の研究をはじめとする数値解析では、一般的にコンクリートを簡易的に均質材料として計算を行っている。しかし、実際のコンクリートは、セメント・砂・粗骨材などから構成される非均質材料である。コンクリートに荷重が作用した際、物性の異なるモルタルと骨材が一体となって変形しようとするため、骨材周辺では局所的に応力が生じ、ひび割れが発生する。さらに、発生したひび割れは、骨材を迂回しながら分散と連結を繰り返して成長するため、その進展挙動は非均質材料特有のものになる。

非均質材料の解析を行う場合、材料ごとの形状に沿った要素分割を行って非均質性をモデルに反映させる必要がある。しかし、コンクリート中には形状が複雑な骨材がランダムに分布しているため、破壊シミュレーションにおいて骨材形状に沿った要素分割を行って非均質性を表現することは難しい。

そこで、本研究では骨材形状とは無関係に分割した有限要素メッシュを用いて、コンクリートの非均質性を考慮した解析手法を提案する。そして、検証例題を通して、提案手法の妥当性を評価する。

2. 提案手法

2.1 非均質性のモデル化

提案手法ではコンクリートをモルタルと骨材から構成されたと考え、コンクリートの有する非均質性を各要素に骨材の体積率 V を $0 \leq V \leq 1$ で与えることで表現する。このとき、モルタルと骨材の両方が含まれる要素では V に応じて材料特性を決定する。

2.2 損傷モデル

コンクリートの材料モデルには、車谷らが考案した

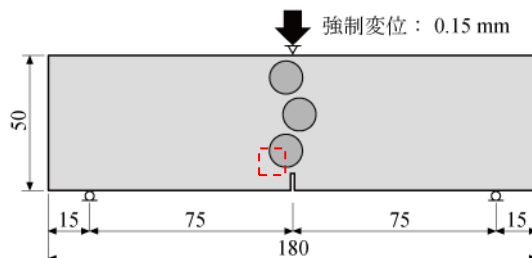


図-1 2次元のはりの概要

等方性の損傷モデルを非均質材料に対応できるよう拡張する。損傷モデルの構成則は次式で示される。

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

ここで、 σ はコーシーの応力テンソル、 D は損傷変数、 c は弾性係数テンソル、 ε はひずみテンソルである。 D は損傷の度合いを $0 \leq D \leq 1$ で表す変数であり、損傷がなければ 0、完全に損傷すれば 1 となる。

提案手法において、骨材は損傷しないものとし、各要素に含まれるモルタルの損傷のみを考慮すると、最終的に損傷変数 D は次式のようになる。

$$D(\varepsilon) = 1 - \frac{\varepsilon_0 \alpha_0}{\varepsilon} \exp \left\{ - \frac{E \varepsilon_0 \alpha_0}{G_f} h_e (1 - V) \left(\frac{\varepsilon}{\alpha_D} - \varepsilon_0 \right) \right\} \quad (2)$$

ここで、 ε_0 はモルタルの破壊発生ひずみ、 ε は等価ひずみ、 E は要素全体の平均ヤング率、 h_e は要素長さ、 G_f はモルタルの破壊エネルギーを示す。 α_0 と α_D はそれぞれ次式の関係を示す値である。

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

ここで、 E_m はモルタルのヤング率、 ε_m は要素内のモルタルの等価ひずみ、 ε は要素全体の等価ひずみである。これらにより要素内のモルタルの損傷のみを考慮して損傷解析が行える。

3. 検証例題

3.1 提案手法の評価

検証例題を用いて、提案手法の妥当性を示す。図-1に示す解析対象に対して、2つの解析モデルを作成した。図-2はそれぞれの解析モデルにおける図-1の破線で囲んだ部分を拡大し、要素内の骨材の体積率をコンター図で示したものである。同図の左のモデルでは、骨材形

キーワード コンクリート、破壊シミュレーション、非均質性、損傷モデル、有限要素法

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

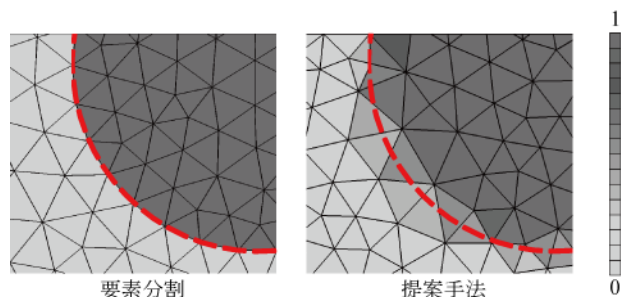
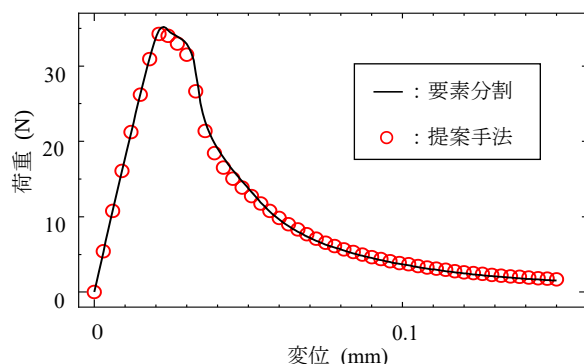
図-2 可視化した骨材の体積率 V 

図-3 2次元のはりの荷重-変位関係

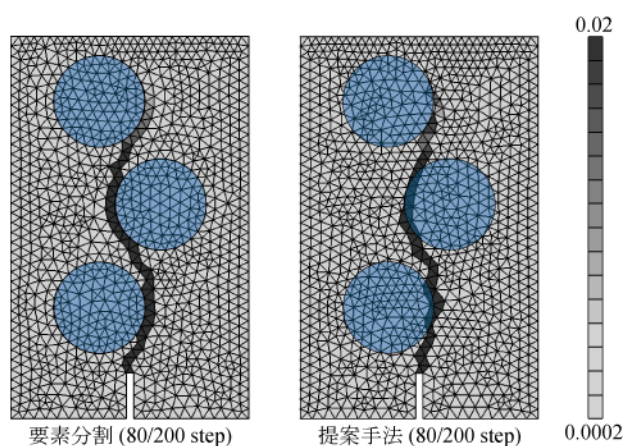


図-4 等価ひずみによるひび割れの可視化

状に沿った要素分割が行われていることが分かる。一方、提案手法による解析に用いる同図の右のモデルでは骨材形状とは無関係に要素分割を行っているため、境界部分の要素においてモルタルと骨材が混在していることが分かる。

解析結果として、荷重-変位関係を図-3に示す。結果を見て分かるように、両モデルの荷重-変位関係が高い精度で一致している。さらに、図-4ははりの中央部分における両モデルのモルタルの等価ひずみを可視化し、ひび割れの様子を示したものである。この図から、両モデルのひび割れがよく似た形状を示しており、骨材を迂回しながら進展していく様子が確認できる。

以上のことから、提案手法を用いることで、骨材形状に沿った要素分割を行わずに骨材の影響を考慮した破壊シミュレーションが可能であることを示した。

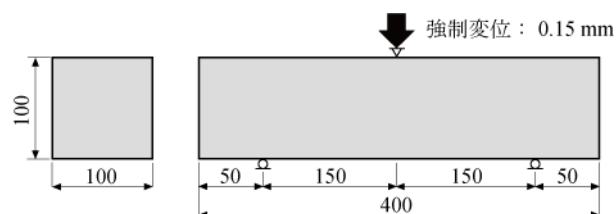


図-5 3次元のはりの概要

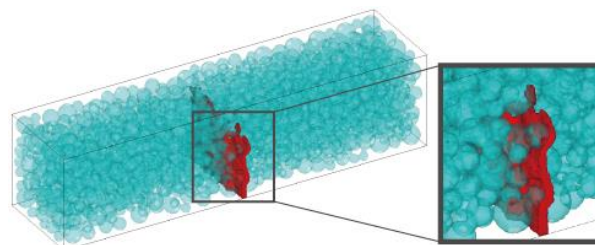


図-6 可視化した骨材とひび割れ

3.2 3次元への適用

提案手法が、実際に骨材形状に沿った要素分割が行えない複雑な問題に対しても適用可能であることを示す。解析対象の3次元のはりを図-5に示す。解析対象のコンクリート内部に、大きさの異なる球状の骨材を充填させ、コンクリートの非均質な状態を表現する。

結果として、骨材の体積率 $V=0.5$ 以上の要素と等価ひずみを可視化し、骨材とひび割れの様子を図-6に示す。この図から、3次元においてもひび割れが骨材を迂回しながら進展していく様子が確認できる。このことから、提案手法は3次元でも骨材形状に沿った要素分割を行わずにコンクリートの非均質性を考慮した破壊シミュレーションが可能であるといえる。

4. おわりに

本研究の提案手法では、各要素に骨材の体積率 V を与え、 V に応じた材料特性を用いることでコンクリートの非均質性を表現した。そして、提案手法によって検証問題を解析し、骨材形状に沿った要素分割を行わずにコンクリートの非均質性を考慮した破壊シミュレーションが可能であることを示した。

今後は、提案手法によりRCはり解析し、実験および均質モデルの解析結果との比較を行う。その結果から、数値解析において非均質性を考慮した場合の影響を評価し、破壊シミュレーションに非均質性を考慮する必要があるか検討を行う。

参考文献

- 1) 車谷麻緒, 寺田賢二郎, 加藤準治, 京谷孝史, 檜山和男: コンクリートの破壊力学に基づく等方性損傷モデルの定式化をその性能評価, 日本計算工学会論文集, Vo2013, pp.20130015, 2013.