

非均質性を考慮した損傷モデルによるコンクリートの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

コンクリート構造物が破壊した際、その被害は甚大であるため、コンクリートの破壊挙動を解明することは重要な課題である。そこで、破壊挙動の予測や内部のひび割れの可視化が行えるなど利点が多いことから、近年では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、相馬ら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¹⁾。

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モデル化している。しかし、実際の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。非均質材料に荷重が作用した際、物性の異なる材料が一体となって変形しようとするため、応力集中が発生し、均質材料とは異なる破壊挙動を示す。また、コンクリートに発生するひび割れは、骨材によって迂回・分散するため、複雑に進展する。このような違いはあるが、骨材は形状が複雑なうえ、コンクリート内に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メッシュ分割を行って骨材の形状を解析モデルに反映することは難しい。

そこで、本研究では骨材の形状を反映させたメッシュ分割を行わず、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、実際に骨材の形状を解析モデルに反映した結果と整合性を示すことで提案手法の妥当性を評価する。

2. 解析手法

2.1 非均質性のモデル化

本研究ではコンクリートの非均質性を、骨材の形状を考慮したメッシュ分割を行うのではなく、各要素に骨材の体積率 V を与えることで表現する。体積率 V は $0 \leq V \leq 1$ で表し、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、非均質性を考慮した計算が行えるよう車谷らが考案した損傷モデル²⁾を拡張する。損傷モデルの構成則は次式で表される。

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

ここで、 σ はコーシー応力テンソル、 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。

本研究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抽出すると、損傷変数 D は次式のようになる。

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

ここで、 ε_0 はモルタルの破壊発生ひずみ、 ε は等価ひずみの最大値、 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。

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

ここで、 E_1 はモルタルのヤング率、 ε_1 は要素内のモルタルのひずみ、 ε は要素全体のひずみである。これらにより要素内のモルタルの損傷のみを抽出して損傷解析を行うことができる。

3. 検証例題

提案手法により、骨材形状を解析モデルに反映せずに同様の結果が得られることを示す。そこで、骨材の形状を考慮したメッシュ分割を行った解析と、提案手法による解析の結果を比較し、その整合性を示す。以下の問題では、骨材は破壊しないものとし、モルタルのヤング率を 20 GPa、骨材のヤング率を 60 GPa、モルタルのポアソン比を 0.2、骨材のポアソンを 0.2、モルタルの圧縮引張強度比を 10、モルタルの破壊発生ひずみを 2.0×10^{-4} 、モルタルの破壊エネルギーを 0.05 N/mm と設定した。

3.1 一軸引張問題

はじめに、図-1 に示すようなコンクリート中の骨材とモルタルの境界部分を模擬した一軸引張問題を設定する。モデル 1 はモルタルと骨材の境界部分をメッシュ分割し、中央の 3 要素にモルタルのパラメータを与える。一方、モデル 2 は境界部分をメッシュ分割せずに、中央の要素に骨材の体積率 $V=2/3$ 、両端の要素に $V=1$ を与える。解析結果として、荷重-変位関係を図-2 に示す。結果から、モデル 1 とモデル 2 の結果が概ね一致していることが分かる。以上より、提案手法によって、一軸引張問題において境界部分のメッシュ分割を行わずに非均質性が表現できたといえる。

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

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

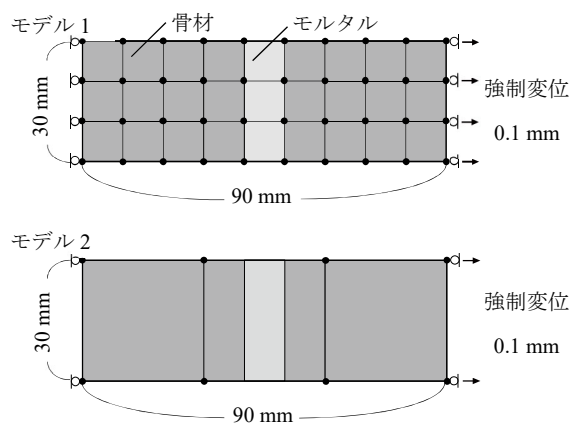


図-1 一軸引張試験

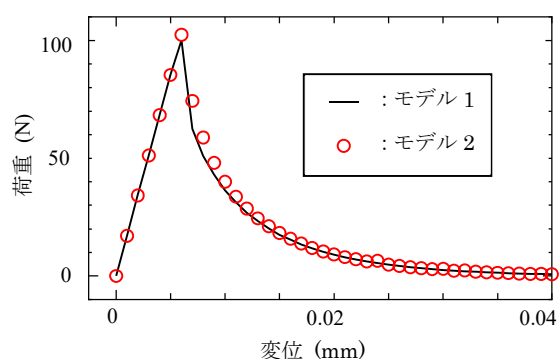


図-2 一軸引張試験の荷重－変位関係

3.2 三点曲げ試験

次に図-3 に示す三点曲げの検証例題を用いて、骨材形状を考慮したメッシュ分割を行った場合の荷重－変位関係とひび割れ進展挙動が提案手法によって再現できることを示す。ひび割れの進展経路に骨材がある状態を模擬し、損傷しない骨材をひび割れが迂回しながら進展していく様子が再現できることを確認する。骨材は簡易的に円形とした。モデル 1 では骨材の形状をモデル化し、メッシュ分割を行った。モデル 2 では、骨材の形状とは無関係にメッシュ分割を行い、提案手法による解析を行った。解析結果として、荷重－変位関係を図-4 に示す。結果を見て分かるように、モデル 1 とモデル 2 の解析結果が概ね一致している。このことから、曲げ試験における荷重－変位関係が提案手法により再現できたといえる。図-5 は図-3 の破線で囲んだ部分における各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。結果を比較してみると、2 つのモデルがよく似たひび割れ形状を示していることが分かる。また、モデル 1 におけるひび割れが骨材を迂回しながら進展していく様子が、モデル 2 で再現できている。以上のことから、提案手法を用いて、骨材形状を解析モデルに反映させた場合のひび割れ進展挙動が再現できたといえる。

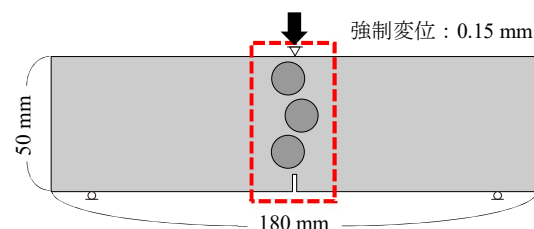


図-3 三点曲げ試験

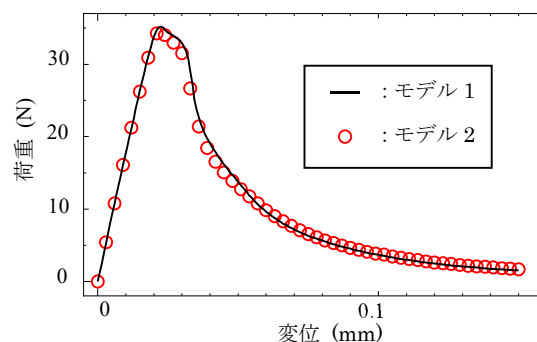


図-4 三点曲げ試験の荷重－変位関係

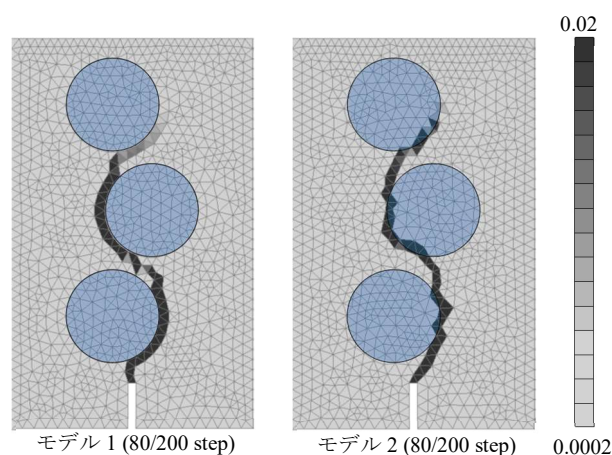


図-5 等価ひずみによるひび割れの可視化

4. おわりに

本研究の提案手法では、骨材の形状を解析モデルに反映することなく、非均質性を考慮した解析を行うことができた。今後は、提案手法により RC はりを解析し、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、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) 相馬悠人, 根本優輝, 車谷麻緒: コンクリートの破壊力学に基づく損傷モデルを用いたせん断補強筋の異なる RC はりの 3 次元破壊シミュレーション, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.72, No.2, I_247-I_255, 2016.
- 2) 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とその性能評価, 日本計算工学会論文集, Vol.2013, pp.20130015, 2013.