

粗骨材の形状と分布を反映した鉄筋コンクリートはりのメゾスケール数値実験

茨城大学 学生会員 ○那須川 佳祐

茨城大学 学生会員 升井 尋斗

茨城大学 正会員 車谷 麻緒

1. はじめに

コンクリートは、メゾスケールで見るとモルタルと粗骨材から構成される材料である。コンクリートの内部には、さまざまな形状や大きさの粗骨材が非均質に分布している。数値解析において粗骨材の非均質性を考慮できれば、コンクリートの破壊挙動をより詳細に再現することが可能になると考えられる。

既往の研究では、粗骨材の分布を考慮した解析手法によりひび割れ進展挙動が再現されている¹⁾。しかし、実際のコンクリートの破壊挙動と比較されておらず、再現性は評価されていない。

そこで、本研究では粗骨材の分布を考慮した鉄筋コンクリートはりの4点曲げ試験の数値解析を行う。そして、実験結果と比較することで、数値解析により再現したひび割れ進展挙動の再現性を評価する。

2. 数値解析手法

2.1 粗骨材の形状と分布を反映したコンクリートのメゾスケールモデリング

本研究では粗骨材の形状を疑似的に再現する手法としてボロノイ分割を利用する。ボロノイ分割を用いることで、3次元空間を不規則な形状の小領域に分割でき、さまざまな形状の粗骨材が生成可能である。

生成した粗骨材を3次元空間に配置して、コンクリートのモデルを作成する。本研究では、車谷らが考案した粗骨材の充填アルゴリズム²⁾を用いる。これにより、粗骨材どうしの重複や鉄筋との重複を回避して、粗骨材を3次元空間内に充填することができ、実際のコンクリートに近いメゾスケールモデルを再現することができる。

2.2 コンクリートの材料モデル

コンクリートの材料モデルには、車谷らが考案した

損傷モデル²⁾を適用する。損傷モデルの構成則は次式で表される。

$$\boldsymbol{\sigma} = (1 - D)\mathbf{c}:\boldsymbol{\varepsilon} \quad (1)$$

ここで、 $\boldsymbol{\sigma}$ はコーシー応力テンソル、 D は損傷変数、 \mathbf{c} は弾性係数テンソル、 $\boldsymbol{\varepsilon}$ はひずみテンソルである。

本研究では、コンクリートをモルタルと粗骨材の二相材料とする。各要素の体積のうち、モルタルの体積率 V として求める。粗骨材は損傷しないものとして、各要素に含まれるモルタルの損傷のみを考えると、損傷変数 $D(\varepsilon_e)$ は次式で表される。

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

ここで、 ε_0 はモルタルの破壊発生ひずみ、 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。

2.3 鉄筋の材料モデル

鉄筋の材料モデルには、von-Mises 塑性モデルを適用する。降伏関数 f は次式で表される。

$$f = \sigma_v - \sigma_y - Q(1 - e^{-bp}) \quad (4)$$

ここで、 σ_v は von-Mises 相当応力、 σ_y は初期降伏応力、 p は相当塑性ひずみ、 Q および b は鉄筋の非線形硬化パラメータである。

3. メゾスケール数値実験の結果および実験との比較

3.1 実験概要および数値解析条件

破壊モードが異なる RC はりのモデルを作成した。試験体の寸法と載荷・支持条件を図-1 に示す。有限要素には、四面体1次要素を使用した。せん断補強筋を配置しない RC はりでは、節点数を約120万、要素数を約

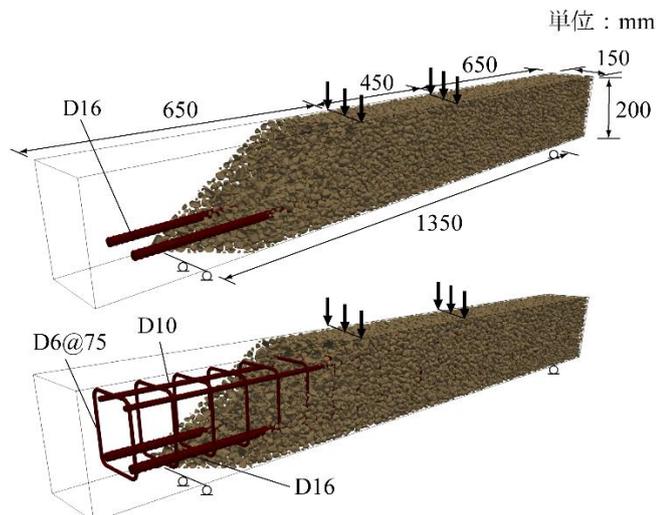


図-1 試験体の寸法と荷重・支持条件

660 万とした。せん断補強筋を配置した RC はりでは、節点数を約 120 万、要素数を約 690 万とした。モルタルの材料パラメータはヤング率 E を20 GPa, ポアソン比 ν を0.2, 降伏応力 G_f を0.08 N/mmとする。粗骨材の材料パラメータはヤング率 E を60 GPa, ポアソン比 ν を0.2とする。鉄筋の材料パラメータは, ヤング率 E を190 GPa, ポアソン比 ν を0.3, 降伏応力 σ_y を400 MPa, 非線形硬化パラメータ Q と b をそれぞれ100 MPaと5とする。

3.2 荷重変位関係とひび割れ分布の比較

図-2 に, 数値解析により得られたひび割れと粗骨材の分布を重ね合わせた図を示す。ひび割れが粗骨材を回避して進展していることが確認できる。

図-3 に実験結果と解析結果の荷重-変位関係を示す。(a)はせん断補強筋のない RC はりの結果で, (b)はせん断補強筋のある RC はりの結果である。(a)の解析結果では脆性的な挙動を示し, せん断破壊の特徴を捉えている。(b)の解析結果では延性的な挙動を示し, 曲げ破壊の特徴を捉えている。

図-4 に実験結果と解析結果の部材表面のひび割れを示す。なお, 解析結果のひび割れは, 等価ひずみの可視化である。せん断補強筋のない RC はりの解析結果では, はりの端部に斜めひび割れが生じ, 実験結果を概ね再現している。せん断補強筋のある RC はりの解析結果においても, ひび割れの発生位置や形状が概ね実験結果と一致している。

4. おわりに

疑似的に再現した粗骨材を充填させた RC はりの3次元メゾスケールモデルを作成し, 粗骨材の分布を考

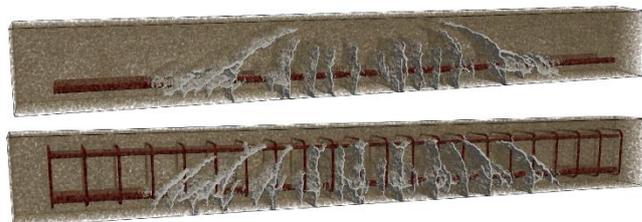


図-2 ひび割れの3次元可視化

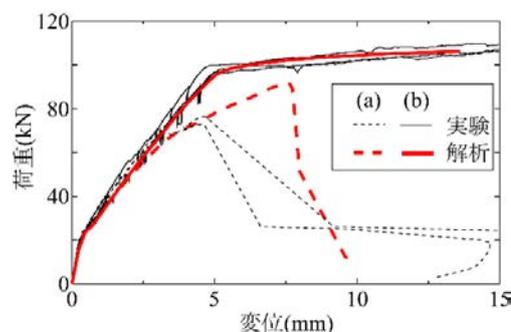


図-3 荷重-変位関係

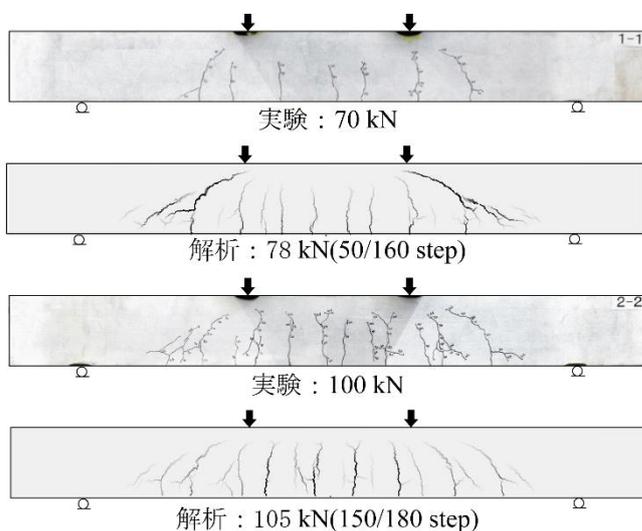


図-4 実験結果と解析結果の部材表面のひび割れ

慮した損傷モデルを適用して数値解析を行った。実験結果と比較することで, 数値解析により得られるひび割れ分布と荷重変位関係の再現性が高いことを示した。

参考文献

- 1) 車谷麻緒, 加藤匠, 松村真由: フェーズフィールド法によるコンクリートのメゾスケールモデルの作成とその数値実験への適用, 日本計算工学会論文集, 2020, pp.20200008.
- 2) 車谷麻緒, 加藤匠, 佐々木浩武: 非均質性を考慮した損傷モデルの定式化とその性能検証, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol. 75, No. 1, 47-54, 2019.