

粗骨材の粒度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 (シンポジウム講演概要)

3D Meso-Scale Numerical Experiment of Reinforced Concrete Beam Reflecting the Aggregate Grading (Proceedings of Symposium on Applied Mechanics)

那須川 佳祐 (茨城大・工) 升井 尋斗 (茨城大・工) 車谷 麻緒 (茨城大・工)

Keisuke NASUKAWA, Ibaraki University

Hiroto MASUI, Ibaraki University

Mao KURUMATANI, Ibaraki University

E-mail: 22nm829x@vc.ibaraki.ac.jp

Three-dimensional Numerical experiments are carried out for reinforced concrete in meso-scale. The reinforced concrete model reflects the geometry of deformed bars and coarse aggregates in detail. We finally show numerical experiments of reinforced concrete beams with or without shear reinforcements to verify the availability of the proposed model. The numerical results are compared to experimental results performed in a laboratory.

1. はじめに

コンクリートを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二相の複合材料である。コンクリートの内部に存在する粗骨材の体積率・形状・粒度分布の違いは、コンクリートの力学性能や破壊挙動に影響を及ぼすことが知られている¹⁾²⁾。コンクリートに形成するひび割れは、材料としての強度特性に加えて、構造物の耐久性にも関係する重要な因子であるため、粗骨材がコンクリートに及ぼす影響を定量的に把握しておく必要がある。このような背景から、コンクリートのメゾスケールに着目した数値シミュレーションに関する研究が盛んに行われている。

既往の研究で車谷らは、異種材料による非均質性を反映可能な損傷モデルを提案している³⁾。このモデルを用いれば、粗骨材の形状に沿ったメッシュ生成を行わずに、非均質性を考慮したコンクリートの破壊シミュレーションが行える。

粗骨材の存在を考慮してコンクリートの破壊シミュレーションを行うには、粗骨材の形状や分布を反映したコンクリートのメゾスケールモデルを作成する必要がある。升井らは、粗骨材の充填率・粒度・形状を反映したコンクリートの3次元メゾスケールモデルの作成方法を提案している⁴⁾。しかし、実際のコンクリートとの類似性は示されたが、数値解析への適用には至っていない。

そこで本研究では、粗骨材の粒度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。実験結果と比較し、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、離散ポロノイ図を用いて粗骨材形状を作成する。ポロノイ分割された領域を粗骨材形状として1つつ抽出・保存することで、疑似的な粗骨材モデルを作成する。メゾスケールモデルを実際のコンクリートに近づけるには、粗骨材の粒度分布を再現する必要がある。本研究では、粗骨材モデルの体積を基準に、粗骨材モデルを分類し、間接的に粒度分布を再現する。区分化した累積分布の情報を参照し、あらかじめ作成しておいた粗骨材モデルを、解

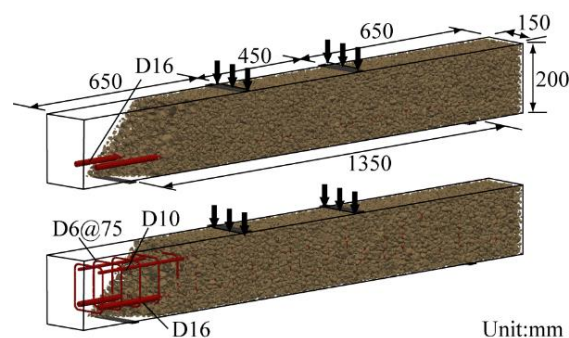


図-1 試験体の寸法と載荷・支持条件

析対象とする領域内部にランダムに配置することで、コンクリートのメゾスケールモデルを作成する。

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³⁾を適用する。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。

本研究ではコンクリートをモルタルと粗骨材の二相材料として扱い、各要素の体積におけるモルタルの体積率 V を求める。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

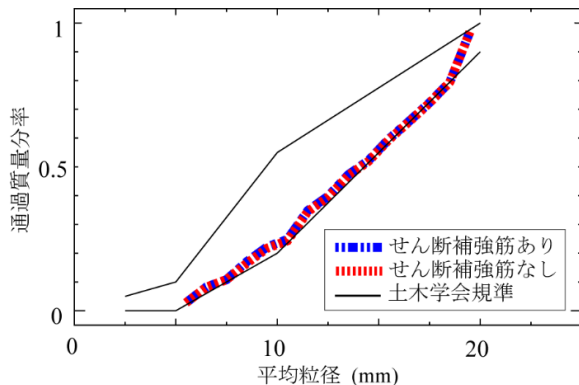


図 - 2 充填した粗骨材の粒度分布

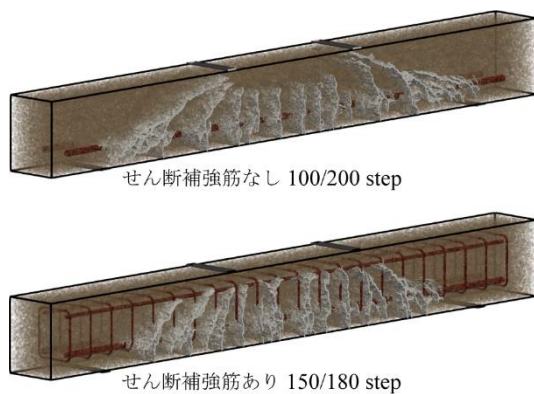


図 - 3 ひび割れの3次元可視化

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。

充填した粗骨材の粒度分布を図 - 2 に示す。充填する粗骨材の粒度分布は土木学会規準⁵⁾の標準粒度に従った。有限要素には四面体1次要素を使用した。モルタルの材料パラメータは、ヤング率を 20 GPa、ポアソン比を 0.2、圧縮引張強度比を 12、破壊発生ひずみを 1.6×10^{-4} 、破壊エネルギーを 0.08 N/mm とした。粗骨材の材料パラメータは、ヤング率を 60 GPa、ポアソン比を 0.2 とした。

鉄筋の材料パラメータは、ヤング率を 190 GPa、ポアソン比を 0.3、降伏応力を 400 MPa、非線形硬化パラメータ Q と b をそれぞれ 100 MPa と 5 とした。本研究では、鉄筋の複雑な形状までモデル化しているため、ヤング率や降伏応力を実験と同じ値に設定しても、力学挙動が同じになるとは限らない。そこで、3次元の鉄筋のモデルに対して引張解析を実施し、鉄筋の材料パラメータを同定した。

3.2 荷重変位関係とひび割れ分布の比較

解析結果として、ひび割れと粗骨材の分布を重ね合わせたものが図 - 3 である。発生したひび割れは、粗骨材を迂回しながら複雑に進展している。荷重-変位関係を図 - 4 に示す。せん断補強した RC はりは延性的な挙動を示し、曲げ破壊の特徴を捉えている。せん断補強筋のない RC はりは脆性的な挙動を示し、せん断破壊の特徴を捉えている。部材表面のひび割れを図 - 5 に示す。実験結果を詳細に再現できていることが分かる。

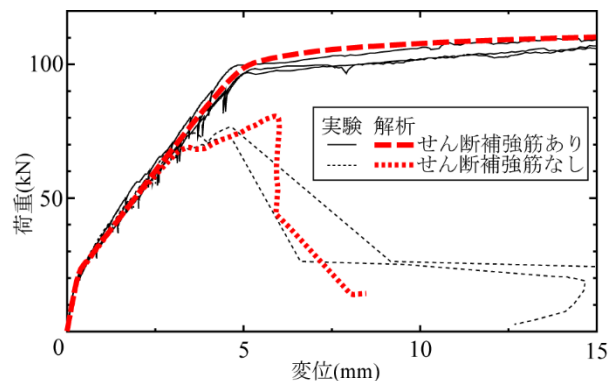


図 - 4 荷重-変位関係

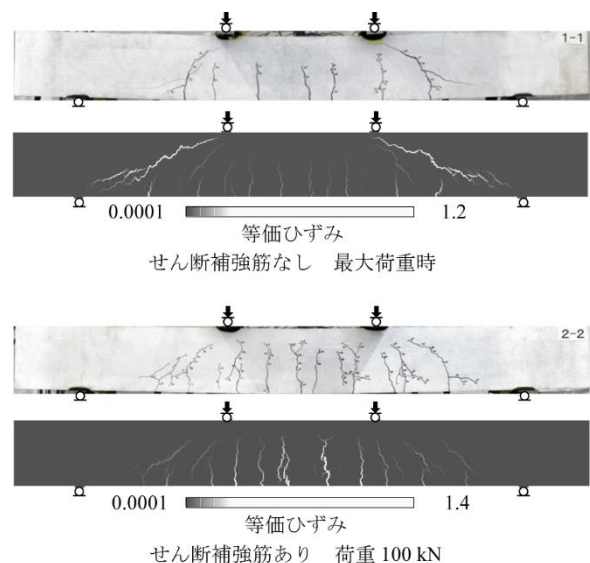


図 - 5 実験結果と解析結果の部材表面のひび割れ

4. おわりに

本研究では、区分化した粗骨材粒径の累積分布の情報を参照することで、粗骨材の粒度分布を反映した鉄筋コンクリートの3次元メゾスケールモデルを作成し、非均質性を考慮した損傷モデルを適用して数値解析を行った。実験結果を詳細に再現でき、RC はりに対して有用な数値解析手法であることを示した。

参考文献

- 1) 大塚浩司, 勝部宏明: コンクリートの破壊進行領域の性状に及ぼす骨材寸法の影響, 土木学会論文集, Vol. 1993, No. 478, pp. 109-116, 1993.
- 2) 山本泰彦: コンクリートのワーカビリティおよび強度におよぼす粗骨材粒の特質, コンクリート・ジャーナル, Vol. 7, No. 11, pp. 11-21, 1969.
- 3) 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, pp. 47-54, 2019.
- 4) 升井尋斗, 那須川佳祐, 車谷麻緒: 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とその定量的評価, 土木学会論文集 (応用力学), Vol. 79, No. 15, 22-15036, 2023.
- 5) 土木学会: 2018年制定 コンクリート標準示方書[規準編], pp. 130-137, 2018.