

重み付き離散ボロノイ分割法を用いたコンクリートの3次元メゾスケールモデリング (シンポジウム講演概要)

Three-dimensional Mesoscale Concrete Modeling with Realistically Shaped Coarse Aggregates Using Weighted Discrete Voronoi Tessellations (Proceedings of Symposium on Applied Mechanics)

中嶋 貴将 (茨城大・工) 升井 尋斗 (茨城大・工) 車谷 麻緒 (茨城大・工)

Takamasa NAKASHIMA, Ibaraki University

Hiroto MASUI, Ibaraki University

Mao KURUMATANI, Ibaraki University

Email: mao.kurumatani.jp@vc.ibaraki.ac.jp

This study develops three-dimensional mesoscale concrete models consisting of mortar and realistically shaped coarse aggregates. The weighted discrete Voronoi tessellation is applied to generate coarse aggregate models. The grain size and shape distributions are adjusted to reproduce those of an actual concrete sample. The validity of the proposed method is confirmed by comparing the mesoscale model to a concrete sample.

1. はじめに

建設材料として広く用いられるコンクリートは、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二相の非均質材料である。コンクリート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。その影響を詳細に把握するために、近年では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行われている。

著者らは過去に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手法¹⁾を開発した。その際、実物のコンクリートとメゾスケールモデルの断面画像を比較評価することで、開発したメゾスケールモデルの粗骨材形状は、実際の形状に比べて等方的であることを確認している。先行研究²⁾では、粗骨材形状の違いにより、コンクリートの耐力を過大評価してしまう可能性が示されており、より実物に近い粗骨材形状を持つメゾスケールモデルを開発する必要がある。

以上の背景から、本研究では断面画像の比較評価に基づいてコンクリートの3次元メゾスケールモデルを作成する。はじめに、従来の方法によって作成されたメゾスケールモデルと実物の比較評価を示し、次に、その比較評価結果に基づいて形状を改善したメゾスケールモデルの性能を示す。

2. メゾスケールモデルの作成および比較検証

文献1に示されている方法を用いて、コンクリートのメゾスケールモデルを作成する。以下で簡潔に作成手法を説明する。3次元領域を加法的重み付きボロノイ分割によって分割することで得られる領域を、1つずつ粗骨材モデルとして抽出し、データベースとして保存する。保存した粗骨材モデルを参照し、粗骨材モデルを重ねないように任意領域に配置することでメゾスケールモデルを作成する。本研究ではデータベースの粗骨材数を約73000個とした。

作成するモデルと比較するために、図-1に示すコンクリート

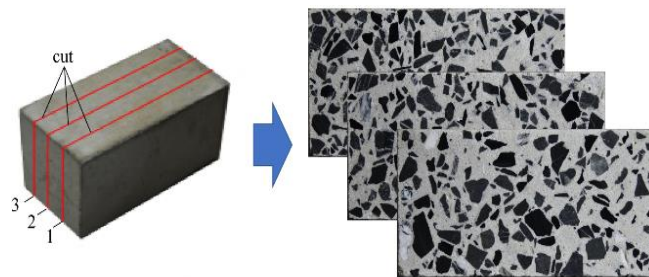


図-1 コンクリート片とその断面画像

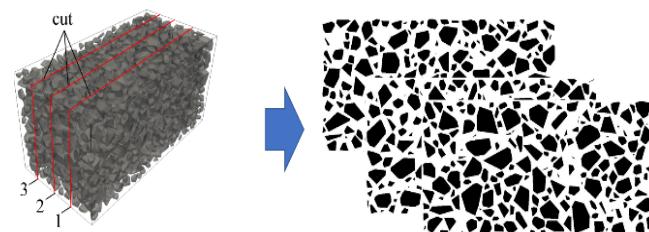


図-2 メゾスケールモデルとその断面画像

片を作製し、断面画像を3枚取得した。また、図-2に示すようにコンクリート片と同じ寸法のメゾスケールモデルを作成し、断面画像を3枚取得した。実断面画像では粗骨材とモルタルの二値化処理を行い、それぞれの画像サイズを1000×500ピクセルに揃えることで定量的な比較評価を行った。

形状評価のための形状指標として、細長比の逆数 λ^{-1} を式(1)と定義する。

$$\lambda^{-1} = \left(\frac{d_{\max}}{d_{\min}} \right)^{-1} \quad (1)$$

ここで、 $d_{\max}$ は断面画像における各粗骨材の最大長さ、 $d_{\min}$ は各粗骨材の最小長さである。また、最小長さ $d_{\min}$ は式(2)と近似する。

$$d_{\min} = \frac{S}{d_{\max}} \quad (2)$$

ここで、 S は各粗骨材のピクセル数である。 λ^{-1} は、粒子形状が真円に近いほど大きい値を示し、粗骨材面積に比べて最大径が大きい場合、つまり粗骨材の一部が突き出した形状をしている場合に小さくなる値である。図-3に、コンクリート片およびメゾスケールモデルの断面画像から得られた粗骨材における、細長比の逆数の分布を示す。図中には平均値と標準偏差も併記している。メゾスケールモデルに対するコンクリート片の平均値の相対誤差は約5.16%であり、粗骨材モデルの形状は実物に対して等方的な傾向にあるものの、細長比の分布性状はよく一致していることがわかる。

3. メゾスケールモデルの形状改善手法

文献1ではメゾスケールモデル作成に、予め大量の粗骨材モデルを作成しておき、粗骨材データベースの中から粗骨材を選択・配置する試行錯誤計算を用いている。本研究ではデータベースの個々の粗骨材に形状指標を適用し、実物の断面画像から得られた形状指標の統計量を反映した新たなデータベースを構築する。

個々の粗骨材モデルから複数の断面をとり、各粗骨材モデルにおける細長比の逆数の平均値を算出する。改善前の粗骨材データベース約73000個の細長比の逆数の平均と標準偏差をそれぞれ $\overline{\lambda^{-1}}$ および σ 、改善後の粗骨材データベースの細長比の逆数の平均と標準偏差をそれぞれ $\overline{\lambda^{-1}'}$ および σ' とし、式(3)、(4)を概ね満たすようにデータベースに存在する粗骨材モデルを選択することで、形状を改善した新たな約14000個の粗骨材データベースを作成した。

$$\overline{\lambda^{-1}'} = (1 - 0.0516)\overline{\lambda^{-1}} \quad (3)$$

$$\sigma' = \sigma \quad (4)$$

図-4に、改善前および改善後の粗骨材データベースにおける断面の細長比の逆数の分布を示す。上記の方法により作成した形状改善後の粗骨材データベースを用いてメゾスケールモデルを作成した。コンクリート片および新たなデータベースを用いて作成したメゾスケールモデルの断面画像から得られた粗骨材の細長比の逆数の分布を図-5に示す。メゾスケールモデルに対するコンクリート片の平均値の相対誤差は約0.68%であり、細長比の逆数の分布は良い一致傾向を示している。

4. おわりに

断面画像を比較することで、実物のコンクリートとメゾスケールモデルの粗骨材形状を比較評価した。また、評価結果に基づき、形状指標分布を精度よく反映したメゾスケールモデルを作成した。今後の研究では、作成したメゾスケールモデルを用いた破壊シミュレーションを行い、粗骨材の分布がコンクリートの力学特性および破壊挙動に与える影響を解析的に明らかにしていく。

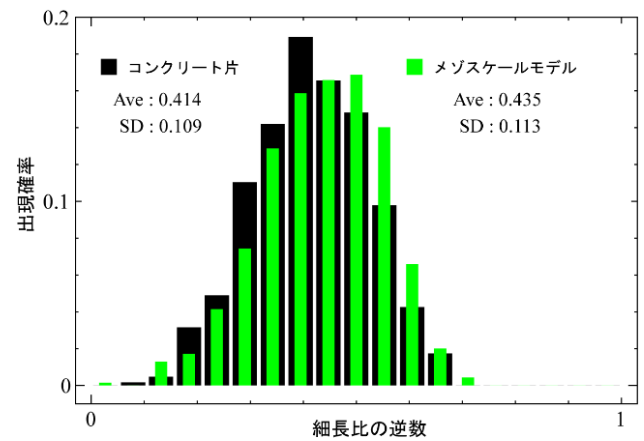


図-3 細長比の逆数の分布比較

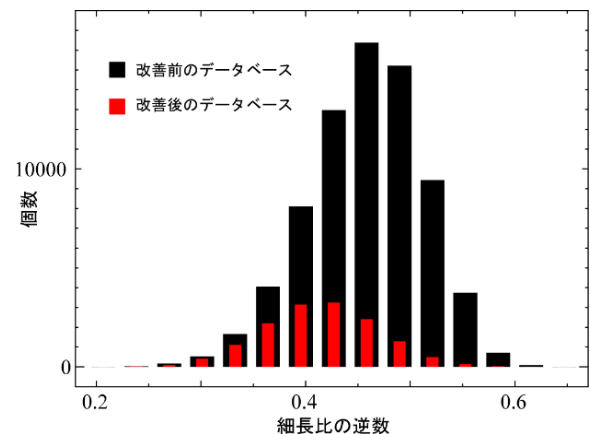


図-4 粗骨材データベースの形状改善

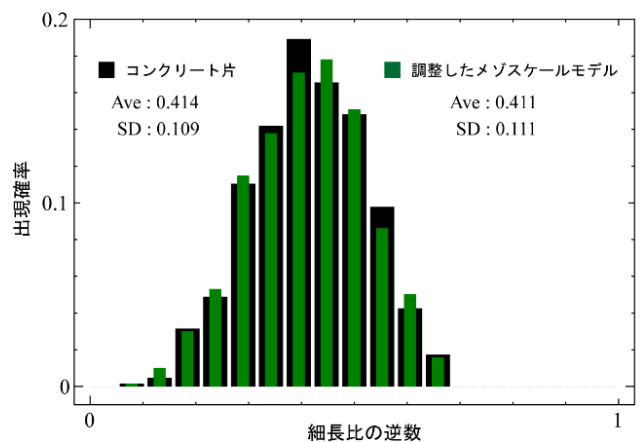


図-5 細長比の逆数の分布比較

参考文献

- 1) 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, Vol.79, No.15, 22-15036, 2023.
- 2) Kim, S. M. and Abu Al-Rub, R. K.: Meso-scale computational modeling of the plastic-damage response of cementitious composites, *Cement and Concrete Research*, Vol. 41, pp. 339-358, 2011.