

コンクリートの製造シミュレーション

Simulation of Manufacturing Concrete

車谷 麻緒¹⁾・中嶋 貴将²⁾・渋澤 駿斗³⁾・中畠 和之⁴⁾

Mao Kurumatani, Takamasa Nakashima, Shunto Shibusawa and Kazuyuki Nakahata

¹⁾ 茨城大学大学院 理工学研究科 都市システム工学専攻 (〒316-8511 茨城県日立市中成沢町4-12-1,
E-mail: mao.kurumatani.jp@vc.ibaraki.ac.jp)

²⁾ 茨城大学大学院 理工学研究科 都市システム工学専攻 (〒316-8511 茨城県日立市中成沢町4-12-1)

³⁾ 茨城大学 工学部 都市システム工学科 (〒316-8511 茨城県日立市中成沢町4-12-1)

⁴⁾ 愛媛大学大学院 理工学研究科 理工学専攻 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町3)

This study proposes a method for creating a three-dimensional mesoscale model of concrete. The concrete exhibits a three-phase structure composed of mortar, coarse aggregates, and rebars. The geometries of the rebar and coarse aggregate are replicated using three-dimensional scanning. Employing a coarse aggregates filling algorithm developed by the authors, the rebars and coarse aggregates are spatially arranged in three dimensions to prevent overlap. The coarse aggregates can also be distributed to conform to the prescribed grading curve. Given that the geometry and distribution of the coarse aggregates and rebars are obtained from actual measurements, the proposed method enables the creation of a mesoscale model of concrete that closely approximates the real material.

Key Words : reinforce concrete, meso-scale model, coarse aggregate, 3D scanning

1. はじめに

建設材料の代表格であるコンクリートは、メゾスケール（センチメーター・スケール）において、モルタルと粗骨材からなる材料の非均質性を有している。脆性材料であるモルタルは、不連続変形をともなう非線形性の強い挙動を示すうえ、その挙動は粗骨材の大きさ・形状・数量に影響を受けることから、これらの集合体であるコンクリートの挙動は必然的に複雑でばらつきの大きいものとなる。

また、実際の構造部材（構造物）の場合は、コンクリートに鉄筋が部分的に加わり、センチメーター・スケールにおいて、モルタル・粗骨材・鉄筋が混在する複雑な三相構造となる。

コンクリートの内部に存在する粗骨材は、コンクリートの力学挙動や強度特性に大きく影響することから、コンクリートのメゾスケールモデルを作成することを目的とした研究がこれまでに数多く行われている。既往の研究の多くは、粗骨材形状を簡略化する方法、ボロノイ分割を応用する方法、X線CTを用いる方法の3つに大別することができる。筆者ら[1,2]はこれまでに、フェーズフィールド法、ボロノイ分割、重み付きボロノイ分割を用いて、粗骨材の3次元形状を疑似的に再現することで、コンクリートの3次元メゾスケールモデルを作成する方法を提案した。重み付きボロノイ分割法により、曲面形状まで再現できるようになったものの、粗骨材形状を単純化していることに変わりはなく、また等方的な粗骨材になりやすいという課題もあった。

そこで本研究では、3Dスキャナーを用いて粗骨材の3次元形状を取得し、実際の粗骨材形状を直接的に再現

することで、実物のコンクリートとほぼ同様の3次元メゾスケールモデルを作成する方法を示す。

2. 製造シミュレーションの概要と手順

シミュレーションの大まかな手順を図-1に示す。提案手法の最大の特徴は、粗骨材の3次元形状を3Dスキャンにより取得することである。これにより、実際の粗骨材形状を直接的に再現することができ、実物とほぼ同様のメゾスケールモデルを作成することができる。

まず、図-1(a)に示すように、3Dスキャナーを用いて、粗骨材の3次元形状(STLデータ)を取得する。ただし、スキャンできる粗骨材の数には限界があるため、ここでは形状の特徴(分布性状)が偏らないように、スキャンデータを取得する。粗骨材の寸法が小さすぎる場合もスキャンできないため、比較的寸法の大きい粗骨材を選定し、縮尺を調整することで、小さい粗骨材に対応させる。

次に、図-1(b)に示すように、コンクリートに充填するための粗骨材モデルを準備する。3Dスキャンにより取得した形状データから、大きさや角度を調整し、様々な寸法・形状の3次元粗骨材モデルのデータベースを作成しておく。

最後に、図-1(c)に示すように、3次元粗骨材モデルのデータベースから、乱数を用いて、粗骨材モデルを無作為に充填していく。筆者らが開発した充填アルゴリズム[1]を用いて、目標の体積率と粒度曲線を満足するように、また粗骨材が重複しないように、3次元空間内に粗骨材モデルを充填させる。

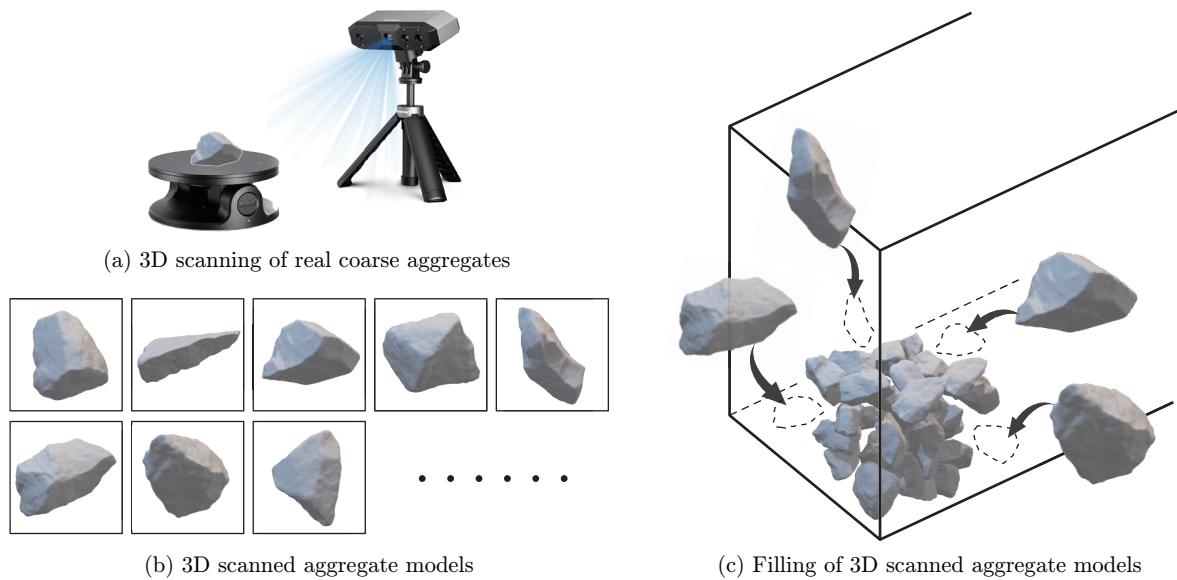


図-1 3D スキャナーを用いたコンクリートの 3 次元メゾスケールモデリング

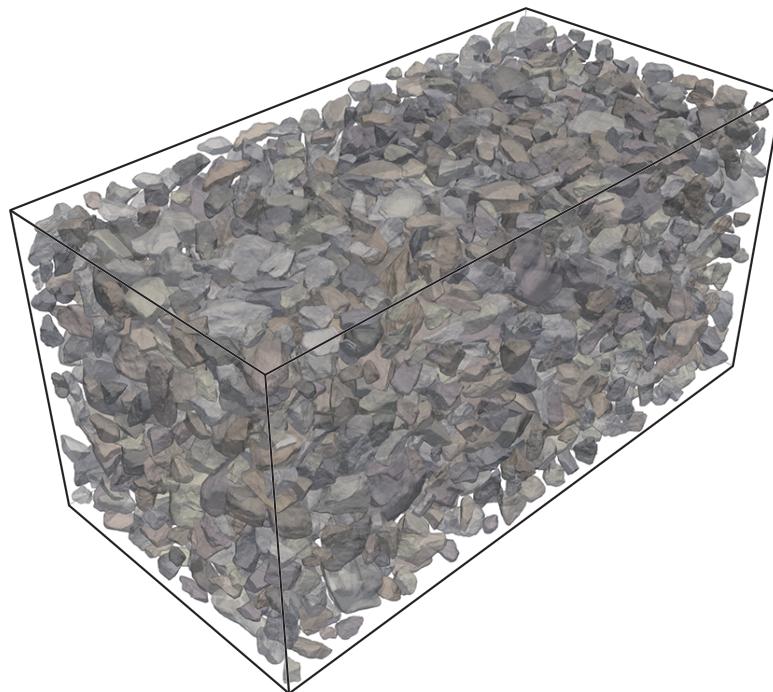


図-2 シミュレーションの可視化結果：角柱コンクリート

3. 数値解析例

(1) 角柱コンクリート

1 例目は、鉄筋のない角柱コンクリートである。角柱の寸法は、 $500 \text{ mm} \times 500 \text{ mm} \times 1000 \text{ mm}$ である。3D スキャンした形状データから作成した 3 次元粗骨材モデルの個数は 12000 である。12000 個の粗骨材モデルから、JIS 規格の粒度曲線を満足するように、コンクリートの 3 次元メゾスケールモデルを作成した。

シミュレーション結果を図-2 に示す。作成したメゾスケールモデルにおける粗骨材の体積率は約 40% である。充填された粗骨材モデルの数は 2501 個であり、事

前に準備した 12000 個の粗骨材モデルから、ランダムに選ばれて配置されている。図-2 を見てわかるように、実物の粗骨材（砂利）と同様の 3 次元形状が再現されており、現実感（リアリティ）のあるコンクリートのメゾスケールモデルが作成されている。

(2) 鉄筋コンクリート部材

2 例目は、実スケールの鉄筋コンクリート部材である。鉄筋の配筋図を図-3 に示す。部材の寸法は $60 \text{ cm} \times 80 \text{ cm} \times 210 \text{ cm}$ である。軸方向鉄筋は D25 が 16 本、せん断補強筋は D10 が 10 cm 間隔で配置されてい



図-3 鉄筋コンクリート部材の配筋図

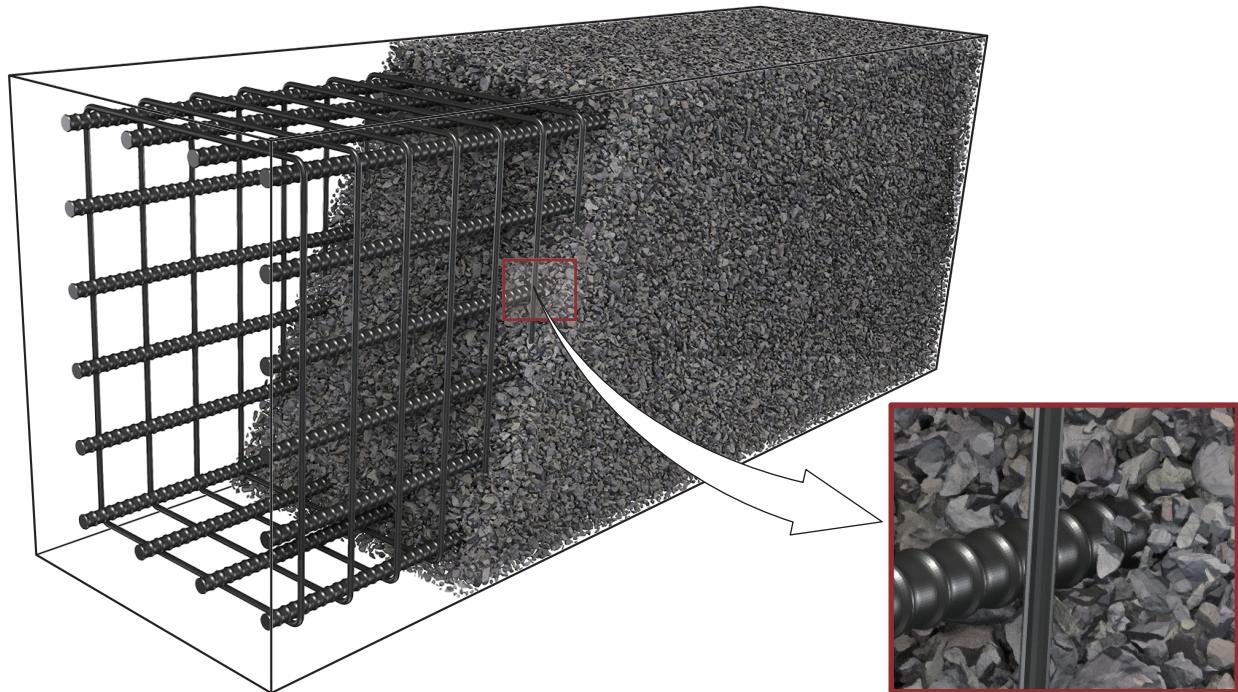


図-4 シミュレーションの可視化結果：実スケールの鉄筋コンクリート部材

る。モデルの規模が大きいことから、計算効率を高めるために、3Dスキャナで形状データから作成した3次元粗骨材モデルの個数は3800とした。3800個の粗骨材モデルから、JIS規格の粒度曲線を満足するように、鉄筋コンクリートの3次元メソスケールモデルを作成した。

シミュレーション結果を図-4に示す。モデル内部の視認性を高めるために、粗骨材を部分的に非表示として可視化している。異形鉄筋の3次元モデルは3D-CADで別途作成したものであり、これを初期状態として粗骨材モデルを充填させた。充填された粗骨材の数は455131、粗骨材の体積率は35%である。可視化結果から、異形鉄筋と粗骨材の複雑な3次元形状に加えて、それらが重複することなく密に配置されていることがわかる。

4. おわりに

本研究では、3Dスキャナーを用いて、規則性のない粗骨材の3次元形状を再現することで、実物とほぼ同

様のコンクリートの3次元メソスケールモデルを作成する方法を示した。数値解析例より、実物の粗骨材と同様の複雑な3次元形状と密な配置を再現することができ、現実感（リアリティ）のあるコンクリートのメソスケールモデルが作成可能であることを例示した。提案手法は粗骨材の粒度曲線を満足させられることから、様々なコンクリートを自在に作成することができる。

参考文献

- [1] 車谷麻緒, 加藤匠, 村松真由: フェーズフィールド法によるコンクリートのメソ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, Vol. 2020, 20200008, 2020.
- [2] 中嶋貴将, 升井尋斗, 車谷麻緒: 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次元メソスケールモデリング, 土木学会論文集, Vol. 80, No. 15, ID: 23-15015, 2024