

損傷モデルによるコンクリートの非均質性 に関するモンテカルロシミュレーション

Monte Carlo Simulations for Meso-scale Heterogeneity of Concrete by a Damage Model

佐々木 浩武 (茨城大院・理工) 加藤 匠 (茨城大院・理工) 車谷 麻緒 (茨城大院・理工)

Hiromu SASAKI, Ibaraki University

Takumi KATO, Ibaraki University

Mao KURUMATANI, Ibaraki University

FAX: 0294-38-5268, E-mail: mao.kurumatani.jp@vc.ibaraki.ac.jp

Monte Carlo simulations are carried out to investigate the influence of the heterogeneity with respect to the grain size of coarse aggregates in concrete on the fracture properties. The concrete is regarded as three-phase composite materials composed of mortar, aggregates, and the interface. A damage model that allows a kind of mesh-free finite element analysis is used for modeling cohesive crack growth.

1. はじめに

土木構造物に用いられるコンクリートは、モルタルに多数の粗骨材を混ぜ合わせた非均質材料である。粗骨材の寸法、形状、分布が異なれば、コンクリートの力学挙動も変化するため、粗骨材がコンクリートの力学挙動に与える影響を定量的に把握しておく必要がある。

既往研究においては、粗骨材の影響を数値解析で再現するために、コンクリートのメソスケールにおける非均質性をモデル化する研究が行われている。粗骨材を円形または多角形として、コンクリートの非均質性を簡易的にモデル化する方法や、CT 画像をもとに粗骨材の形状や分布をモデル化する研究事例が報告されている。また、メソスケールのコンクリートを対象に、モンテカルロシミュレーションを行った研究も数多く行われている。しかし、粗骨材を多数含むメソスケールモデルに対して、一般的な有限要素解析を適用すると、粗骨材形状に沿ってメッシュ生成を行う必要があるため、モンテカルロシミュレーションを行っている既往の研究の多くは、50~100回の試行回数に留まっている。

そこで本研究では、コンクリートのメソスケールにおいて、粗骨材の影響を統計的に検討することを目的として、粗骨材の粒径や分布を変化させたモンテカルロシミュレーションを行う。破壊挙動のモデル化と数値解析には、異種材料による非均質性を考慮可能な損傷モデルを適用し、メッシュ生成に要するコストを削減するとともに、既往研究よりも試行回数を多くすることで、モンテカルロシミュレーションの高精度化を実現させる。

2. 異種材料を考慮した損傷モデル

メッシュフリー有限要素解析を行うための損傷モデルについて説明する。コンクリートのメソスケールの破壊挙動を再現するために、モルタルと粗骨材による材料の非均質性に加えて、界面での破壊発生を考慮した損傷モデルについて示す。

Fig. 1 に示すような、材料 1, 2, 3 が直列に配置された棒の弾性問題を設定する。コンクリートの場合、材料 1 はモルタル、材料 2 は粗骨材、材料 3 は界面に対応する。図中の E はヤング率、 h は長さを表しており、断面積は棒全体において一定とする。本研究では界面を、有限の長さ(厚さ)を持つ力学的弱部と考える。

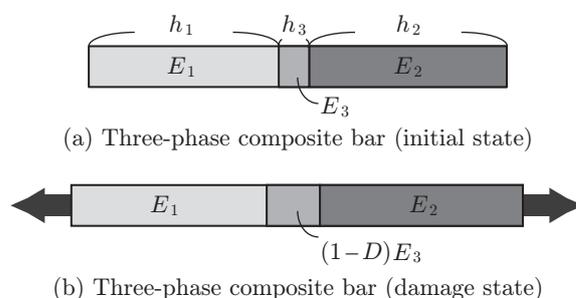


Fig. 1 材料 3 (界面) が損傷する棒の引張問題

界面がモルタルよりも脆弱であると仮定して、文献¹⁾と同様の手順で定式化を進めると、最終的に損傷変数 D_e は次式で表される。

$$D_e = 1 - \frac{\bar{\varepsilon}_e}{\varepsilon_e} \exp \left\{ - \frac{E \bar{\varepsilon}_e}{G_f} \left(\frac{\varepsilon_e}{\alpha_D} - \frac{\bar{\varepsilon}_e}{\alpha_0} \right) V_3 h_e \right\} \quad (1)$$

ここで、 ε_e は等価ひずみ²⁾、 $\bar{\varepsilon}_e$ は損傷発生時の等価ひずみ、 E は平均ヤング率、 G_f は破壊エネルギー、 V_3 は界面の体積率、 h_e は損傷を評価する領域の代表長さであり、 α_0 と α_D は界面のヤング率 E_3 とひずみ ε_3 を平均ヤング率 E と平均ひずみ ε にそれぞれ変換する関数である。

$$E = \alpha_0^{-1} E_3, \quad \varepsilon = \alpha_D \varepsilon_3 \quad (2)$$

等価ひずみに基づく損傷変数 D_e を用いて、材料の構成式は次のように表される。

$$\boldsymbol{\sigma} = (1 - D_e) \mathbf{c} : \boldsymbol{\varepsilon} \quad (3)$$

本論文で用いる損傷モデルは、多次元であっても、各材料の体積率を用いて、モルタル・粗骨材・界面による非均質性と界面の損傷を評価することができるので、材料の物理形状に沿ってメッシュ生成を行う必要がない。すなわち、材料の物理形状とは無関係に生成したメッシュを用いて、メッシュフリー有限要素解析を行うことができ、粗骨材の形状や分布を変化させたモンテカルロシミュレーションに適した方法であることがわかる。

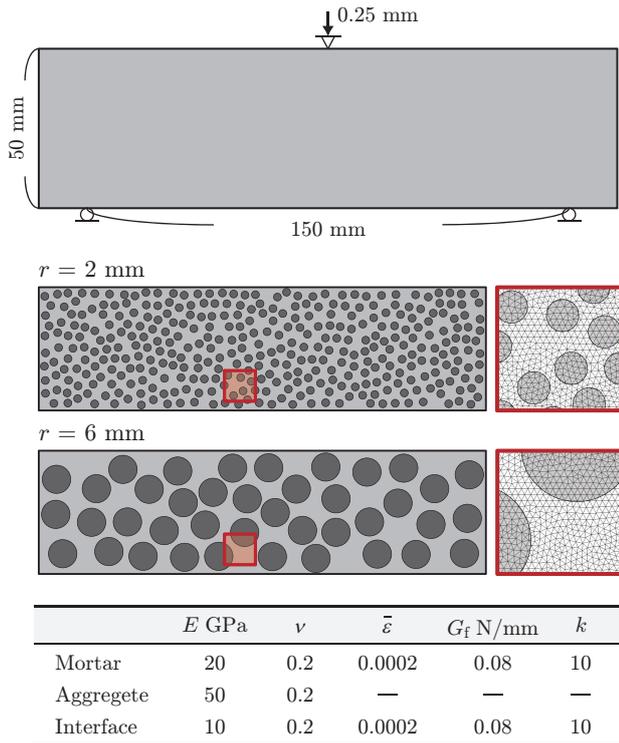


Fig. 2 コンクリートはりの3点曲げ試験

3. 非均質性に関するモンテカルロシミュレーション

以下では、粗骨材の粒径と分布を変化させたモンテカルロシミュレーションを行い、コンクリートのメゾスケールの破壊挙動における粗骨材の影響について統計的に検討する。

解析対象は、Fig. 2に示すようなコンクリートの3点曲げ試験とする。円形の粗骨材をランダムに配置させることで、簡易的にコンクリートのメゾスケールにおける非均質性をモデル化する。粗骨材の充填率を50%とし、半径を2 mm, 6 mmとした2ケースに対して、分布性状をランダムに変化させたモデルをそれぞれ600パターン作成し、破壊シミュレーションを600×2回実施する。有限要素解析に用いたメッシュパターンと材料パラメータは、Fig. 2に示す通りとする。

試行回数600回すべての荷重-変位関係をFig. 3に示す。図中の太線は、全データを平均した荷重-変位関係を表している。粗骨材の分布性状の違いによって、ばらつきのある応答が得られており、結果のばらつきを評価できるシミュレーションの重要性が見て取れる。

Fig. 4は、破壊強度（最大荷重）のヒストグラムおよび平均値と標準偏差を示している。グラフや値から、粗骨材の寸法が大きいくほど、最大荷重が大きくなり、ばらつきの程度も大きくなっていることがわかる。粗骨材の寸法が大きくと、界面の空間分布密度が疎になるため、ひび割れの発生位置や進展経路のばらつきが大きくなり、それによって破壊強度や散逸エネルギーが大きくなったと考えられる。

4. おわりに

コンクリートの非均質性に関するモンテカルロシミュレーションを行い、粗骨材の寸法が大きくなると、破壊強度の平均値と標準偏差が大きくなることを統計的に示した。

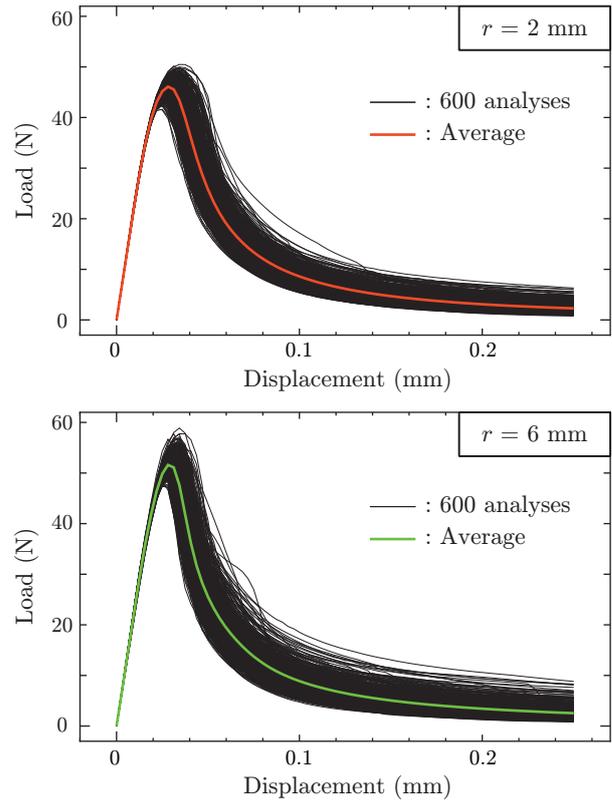
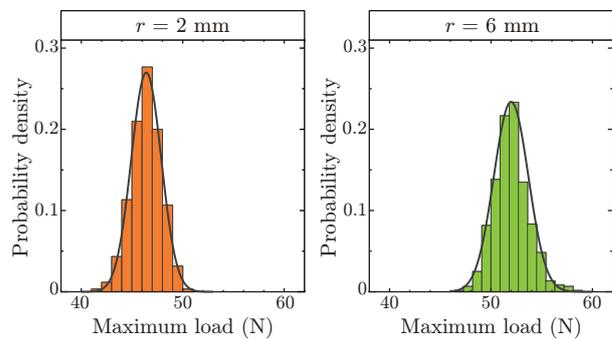


Fig. 3 各ケースの荷重-変位関係



r (mm)	Maximum load (N)	Standard deviation (N)
2	46.4	1.48
6	52.0	1.71

Fig. 4 粗骨材の寸法が異なる場合の破壊強度（最大荷重）のヒストグラムおよび平均値と標準偏差の比較

参考文献

- 1) 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性能検証, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.75, No.1, pp. 47-54, 2019.
- 2) de Vree JHP, Brekelmans WAM, van Gils MAJ: Comparison of nonlocal approaches in continuum damage mechanics, *Comput. Struct.*, Vol.55, pp.581-588, 1995.