

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

茨城大学 学生会員 ○佐々木 浩武
 茨城大学 学生会員 加藤 匠
 茨城大学 正会員 車谷 麻緒

1. はじめに

モルタルと粗骨材により構成されるコンクリートは非均質材料であり、非常に複雑な破壊挙動を示す。その破壊挙動に与える影響の要因は多々あるが、中でも粗骨材とモルタルの界面に形成される力学的弱部の影響や、粗骨材の寸法、形状などの幾何学的な性質による影響が大きいことが知られている。それらの影響は、コンクリートの非均質性に起因し、複合的に作用するため、コンクリートは不確かさを含む破壊挙動となる。破壊シミュレーションにより、コンクリートの破壊挙動を再現するには、コンクリートの非均質性とそれに伴う不確かさを考慮する必要がある。

破壊シミュレーションにおいて、非均質性とそれに伴う不確かさを考慮する方法として、非均質性を考慮した損傷モデルとその解析結果を用いたモンテカルロシミュレーションが挙げられる。車谷らは、粗骨材とモルタルの二相材料としてのコンクリートを解析できる非均質性を考慮した損傷モデル¹⁾を提案している。この手法は、二相材料としてのコンクリートをメッシュフリー解析できるという利点を有している。

そこで本研究では、車谷らの手法をモルタル、粗骨材、界面の三相材料が解析できるように拡張し、それにより、モンテカルロシミュレーションを行う。

2. 非均質性を考慮した損傷モデル

車谷らの手法では、図-1(a)に示すような材料 1 のみが破壊すると仮定された二相材料の 1 次元問題の理論解を応用し、非均質材料の損傷を評価している。本手法では、図-1(b)のように材料 1 中に材料 3 を定義し、材料 3 のみが破壊すると仮定した三相材料の 1 次元問題の理論解を応用する。損傷モデルの構成式は、次式で表される。

$$D = (1 - D)c : \varepsilon \quad (1)$$

ここで、 σ はコーシーの応力テンソル、 c は弾性係数テンソル、 ε はひずみテンソルである。 D は損傷の度合いを表す損傷変数であり、 $0 \leq D \leq 1$ の値をとる。多次元問題では、ひずみテンソルと応力テンソルをスカラー量の等価ひずみと等価応力に置き換える。等価ひずみ ε_e は、修正 von-Mises モデルによる次式を用いる。

$$\varepsilon_e = \frac{k-1}{2k(1-\nu)} I_1 + \frac{1}{2k} \sqrt{\left(\frac{k-1}{1-2k} I_1\right)^2 + \frac{12k}{(1+\nu)^2} J_2} \quad (2)$$

ν はポアソン比、 k は圧縮引張強度比、 I_1 はひずみテンソルの第 1 不変量、 J_2 は偏差ひずみテンソルの第 2 不変量である。等価ひずみを用いることにより、多次元問題

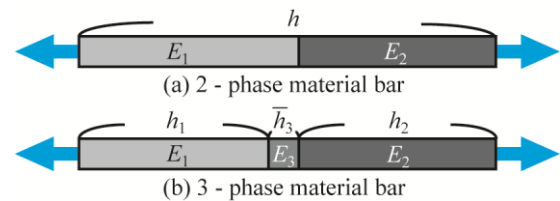


図-1 材料 3 のみが損傷する 1 軸引張問題

題を 1 次元問題に置き換えることができる。そのため、多次元問題において 1 次元問題の理論解を適用することができる。損傷変数 D は次式で表される。

$$D = 1 - \frac{a_0 \bar{\varepsilon}_3}{\varepsilon_e} \exp \left\{ - \frac{E a_0 \bar{\varepsilon}_3}{G_f} \left(\frac{\varepsilon_e}{a_D} - \bar{\varepsilon}_3 \right) \bar{h}_3 \right\} \quad (3)$$

ここで $\bar{\varepsilon}_3$ は材料 3 の損傷発生ひずみ、 G_f は破壊エネルギー、 $\bar{h}_3$ は材料 3 の長さである。棒材全体のヤング率 E および、 a_0 、 a_D で表される。

$$E = \frac{1}{\frac{1}{E_1} \left(V - \frac{\bar{h}_3}{h} \right) + \frac{V}{E_2} + \frac{\bar{h}_3}{E_3 h}} \quad (4)$$

$$a_0 = \left(V - \frac{\bar{h}_3}{h} \right) \frac{E_3}{E_1} + (1 - V) \frac{E_3}{E_2} + \frac{\bar{h}_3}{h} \quad (5)$$

$$a_D = \left(V - \frac{\bar{h}_3}{h} \right) (1 - D) \frac{E_3}{E_1} + (1 - V) (1 - D) \frac{E_3}{E_2} + \frac{\bar{h}_3}{h} \quad (6)$$

E_1 、 E_2 、 E_3 は材料 1、2、3 のヤング率、 V は材料 1 と 3 の体積率の合計値、 h は全体の長さである。

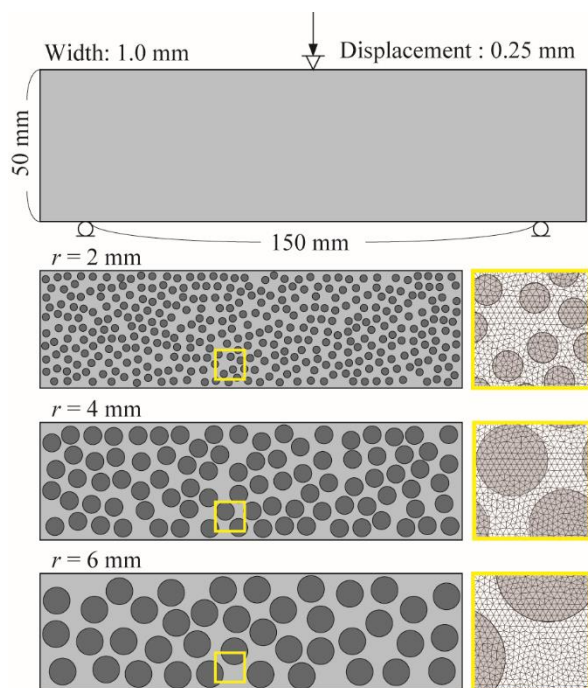
また、本手法は等価ひずみにより多次元問題でも 1 次元問題のように扱えるため、材料の体積率 V と材料 3 の長さ $\bar{h}_3$ を用いて材料の非均質性を考慮することができる。よって、本手法では体積率 V と材料 3 の長さ $\bar{h}_3$ がわかれば、材料の物理形状とは無関係のメッシュによりメッシュフリー有限要素解析を行うことができる。

3. モンテカルロシミュレーション

非均質性とそれに伴う不確かさを考慮した破壊シミュレーションを行うために、本手法のメッシュフリー解析ができる利点を活かして、コンクリートの破壊シミュレーション結果を用いたモンテカルロシミュレーションを行う。

3.1 解析対象と条件

解析対象は、図-2(a)に示すようなコンクリートの三点曲げ問題である。各ケースにおいて粗骨材に見立てた寸法の異なる円形を充填率 50 % で乱数を用いて配置し、粗骨材の寸法の違いによるコンクリートの破壊挙動の違いを評価する。一般的に粗骨材の最大粒径の違



(a) 解析対象と有限要素解析モデル

(b) キャリブレーションにより決定された材料パラメータ

	E	ν	$\bar{\varepsilon}$	G_f	k
mortar	20 GPa	0.2	0.0002	0.05 N/mm	10
aggregates	50 GPa	0.2	—	—	—
ITZ	10 GPa	0.2	0.0002	0.05 N/mm	10

図-2 コンクリートの三点曲げ問題

いによって、破壊強度や軟化挙動に違いが生じることが知られており、本研究では粗骨材の寸法の違いだけを評価するために、各ケースの円形の寸法を一定とした。モンテカルロシミュレーションでは、試行回数が多いほど精度が向上する。破壊挙動の不確かさを考慮するために十分な試行回数 600 回の解析結果を標本とする。材料パラメータは、既往の供試体実験の結果²⁾を対象に各種パラメータを変化させ、キャリブレーションを行うことにより決定した。図-2(b)に示す。

3.2 解析結果と考察

図-3 に試行回数 600 回の荷重-変位関係およびその平均の荷重-変位関係を示す。コンクリートの非均質性を考慮した多数回の解析を行うことができ、不確かさのある破壊挙動を解析結果として得られることがわかる。図-4 に破壊強度のヒストグラムと 600 回の平均および標準偏差を示す。結果を見ると、粗骨材の寸法が大きいくほど、破壊強度が大きく、不確かさが大きくなっていることがわかる。粗骨材の寸法が大きいくほど、粗骨材の表面積が減り、それに伴い界面の量も減るため、応力の集中が局所的になりひび割れの発生位置がばらつく。また、ひび割れが粗骨材を迂回しながら進展する可能性が高くなる。このような場合には、図-5 に示すようにモデル中央から外れた地点から損傷が発生したり、粗骨材を迂回しながらひび割れが進展したりするため、ひび割れの進展経路が長くなり、散逸エネルギーが大きくなる。そのため、本手法により得られた解析結果の

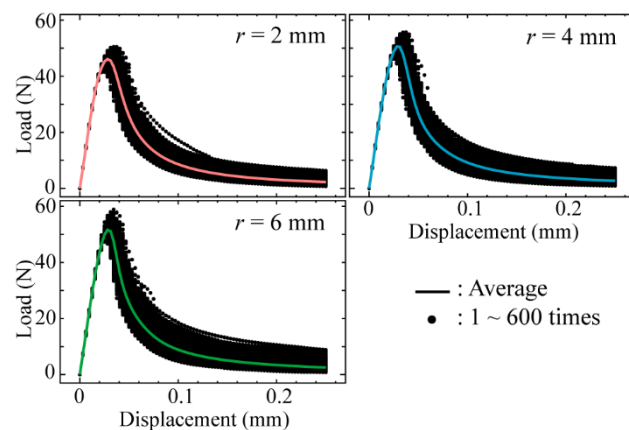
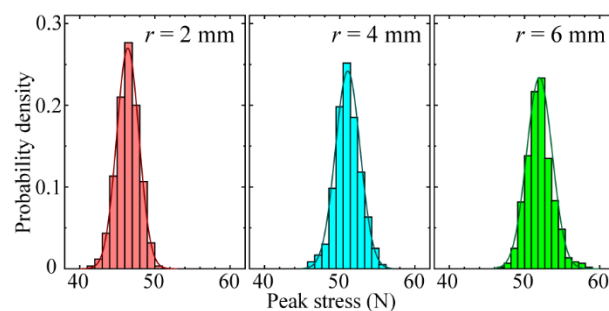


図-3 荷重-変位関係



r (mm)	Mean peak stress (N)	Standard deviation (N)
2	46.4	1.48
4	51.1	1.65
6	52.0	1.71

図-4 破壊強度の不確かさ

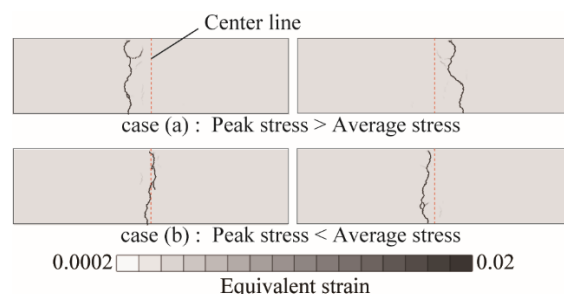


図-5 ひび割れ進展の違い

ような違いが生じる。

4. おわりに

車谷らの非均質性を考慮した損傷モデルを三相材料が解析できるように拡張し、モンテカルロシミュレーションを行った。例題よりコンクリートの非均質性とそれに伴う不確かさを考慮した破壊シミュレーションを行えることを示した。

参考文献

- 1) 車谷麻緒, 会田涼太, 加藤匠: 粗骨材による非均質性を考慮したコンクリートの破壊挙動の計測と数値解析, 計算工学講演会論文集, Vol. 23, 2018.
- 2) Christian Carloni, Mattia Santandrea, Giulia Baietti: Influence of the width of the specimen on the fracture response of concrete notched beams, *Engineering Fracture Mechanics*(2018), <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2018.04.045>