

損傷理論を導入したボクセル有限要素解析によるアルカリシリカ反応の膨張挙動解析

琉球大学 正会員 ○富山 潤, 九州大学 正会員 浅井光輝, 金沢大学 正会員 久保善司,
琉球大学大学院 学生会員 吉次優祐, (株)大栄コンサルタント 布木勇人, 琉球大学 正会員 藍檀オメル

1. はじめに

コンクリートの経年劣化には様々な要因があるが、それらの多くは化学的側面と力学的側面が複雑に連成した複雑な現象である。これまで劣化因子の物質移動解析やひび割れ進展解析など、各分野での研究は盛んに行われているが、それらを連成した数値解析の研究のほとんどは2次元解析や簡易的なモデルに留まっていた。そこで、本研究では損傷理論に基づくボクセル有限要素法を用いてアルカリシリカ反応（以下、ASRと称す）に対する3次元問題の連成解析シミュレータの検討を行った。また、解析領域を粗骨材とモルタルの2相コンクリートモデル²⁾でモデル化し、骨材形状・分布を考慮可能とした。なお、粗骨材は、反応性と非反応性の混合割合を自由に設定可能である。解析例として、内在アルカリ環境下で反応性骨材の混合割合に応じた膨張挙動の違いを検討した。

2. 解析方法

連成解析の手順を図-1に示す。まず、非定常拡散問題を解き、ASRに關与するイオン濃度（仮想的）の濃度分布を求める。次に、イオン濃度の空間分布の解析結果からASR膨張モデルを用いて膨張力を決定する。このとき、膨張力によって引張応力が限界値に達した領域をひび割れと判断する。ひび割れと判断された領域の拡散係数は損傷程度に応じた拡散係数に置き換える。ここから再び非定常拡散解析を解いていく手順を繰り返すことで、イオン拡散およびひび割れ進展解析の連成解析を行う。

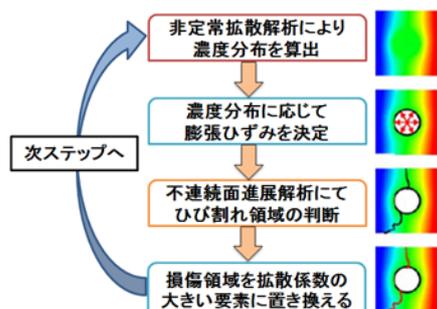


図-1 連成解析の流れ

2.1 損傷力学モデルの概要

損傷モデルでは連続体損傷力学を導入し、損傷変数 D を用い、要素剛性を段階的に減少させるモデルである。

損傷変数は $0 \leq D \leq 1$ であり、 $D=0$ のときには健全な状態を示し、 $D=1$ は最終的な破壊状態を表す。損傷に伴う微小空間の発達には材料の剛性低下を引き起こすため、本研究では、損傷理論に基づき、次式によって損傷状態を表す。

$$D = (E_0 - E) / E_0 \quad (1)$$

ここで、 E_0 は非損傷状態の弾性係数、 E は損傷後の弾性係数である。 C^e を等方弾性テンソルとし、損傷を考慮した材料構成則を一般化すると、以下ようになる。

$$\sigma = (1 - D) C^e \varepsilon \quad (2)$$

2.2 各種モデル

(1) ひび割れた要素の拡散係数モデル

ひび割れた要素の拡散係数 k は、損傷パラメータに応じ大きくし、ある一定量 α になると収束するとした式(3)を用いた(図-2(a)参照)。

$$k = k_0 + \alpha \{1 - \exp(-\beta \times D)\} \quad (3)$$

ここで、 k_0 は健全時の拡散係数、 α は k の収束値を表現する係数、 β は拡散係数の最大値への収束速度を表現する係数、 D は損傷係数である。

(2) 膨張モデル

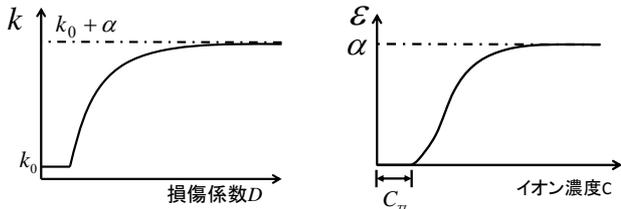
ASR膨張は、反応生成物であるASRゲルの吸水膨張によるものであるが、本研究では、ASRゲル量がイオン濃度に比例すると仮定し、また、ASRゲル生成後、吸水膨張までの潜伏期を考慮した式(4)に示す等方ひずみ ε を膨張モデルとして提案する(図-2(b)参照)。

$$\left. \begin{aligned} C_{alkali} < C_{TL} \quad \varepsilon &= 0 \\ C_{alkali} > C_{TL} \quad \varepsilon &= \alpha \{1 - \exp(-\beta(C_{alkali} - C_{TL}))\} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

ここで、 α は膨張量の最大を表現する係数、 β は膨張速度を表現する係数、 C_{alkali} はASRに關与するイオン濃度、 C_{TL} は閾値である。

キーワード アルカリシリカ反応, 膨張解析, 損傷理論, ボクセル有限要素法, 2相コンクリートモデル

連絡先 〒903-0213 沖縄県西原町字千原1番地 TEL098-895-8649



(a) 拡散係数モデル (b) 膨張モデル
 図-2 ひび割れ要素の拡散係数・膨張モデル

(3) アルカリ消費モデル

ASR では、アルカリシリカゲルを生成する際に、アルカリを必要とする。本研究では、反応が生じた位置の ASR に関するイオン濃度を C として、アルカリ消費を簡易的に考慮した式(5)を用いた。

$$C = C_E - \gamma \tag{5}$$

ここで、 C_E は濃度拡散より得られる ASR に関するイオン濃度、 γ は ASR に伴うイオン消費量(濃度)である。

3. 数値解析例

(1) 2相コンクリートモデル

本研究では、反応性骨材と非反応性骨材の割合を任意に決定することのできるボクセルモデルを構築した(図-3(a)参照)。

(2) 解析条件

150×150×150(mm)のボクセルを三方向に各 75 分割したボクセルモデルを使用する。時間刻みは 0.5day とした。図-3(b)のような拘束条件とし、モルタルに 0.5kg/m³ の内在アルカリを考慮した。また、式(4)の閾値を 0.5kg/m³ とした。モルタル、骨材の材料特性を表-1 に示す。解析ケースは、反応性骨材 100%, 50%, 20% の 3 ケースで検討した。結果は 100%と 50%のみ示す。

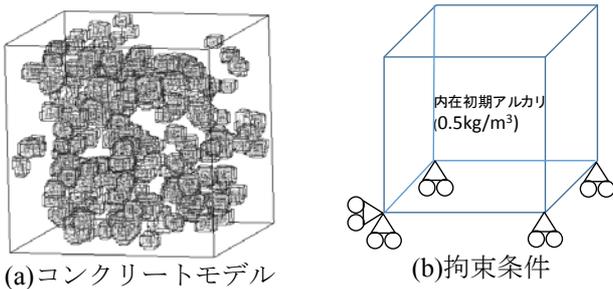


図-3 コンクリートモデル概要

表-1 材料定数

	モルタル	反応性粗骨材	非反応性骨材
拡散係数 (mm ² /day)	1.0	10.0	10.0
弾性係数(GPa)	20.0	60.0	60.0
引張強度(MPa)	4.0	ひび割れない	ひび割れない

4. 解析結果および考察

図-4 に反応性骨材 100%, 50%の 1 日目 (初期状態) および 250 日目の ASR に関するイオン濃度分布を示す。また、図-5 に反応性骨材 100%および 50%の 250

日目のひび割れ (ひび割れ損傷係数) の状況を示す。

図-4 より、反応性骨材の量に応じた反応に伴うアルカリ量の消費の違いにより、領域全体のイオン濃度分布が異なることがわかる。また、図-5 より、反応性骨材の量に応じたひび割れ発生状況の違いが確認できる。

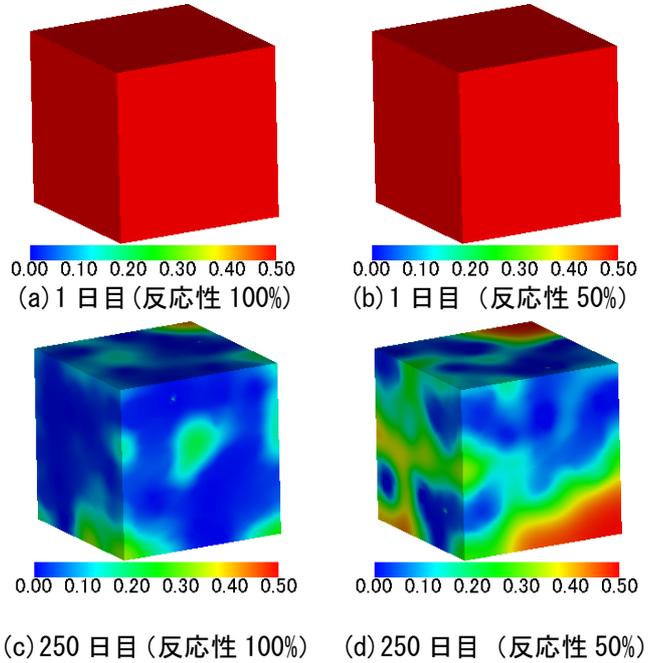


図-4 ASR に関するイオン濃度の経時変化

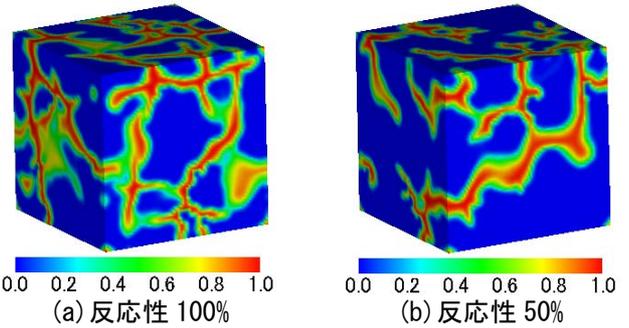


図-5 ひび割れ損傷図 (損傷係数表示)

5. まとめ

簡易的な ASR モデルではあるが、2相コンクリートモデルの採用や反応性・非反応性骨材のモデル化、さらに、反応に伴うアルカリ消費モデルを考慮することで、ASR の膨張挙動が、本手法により表現可能であることが示された。

謝辞:本研究はJSPS 科研費 26420439 の助成を受けた。

参考文献

- 1) 渡邊茜, 浅井光輝: 損傷モデルの概念を導入したボクセル FEM による物質拡散とひび割れ進展問題の連成解析, 日本計算工学会論文集 Vol.2013(2013) p.20130007
- 2) 富山潤, 浅井光輝, 久保善司: 損傷力学ベースボクセル FEM を用いたアルカリシリカ反応の膨張挙動に関する基礎研究, 土木学会第 18 回応用力学シンポジウム講演概要集, pp.199-200, 2015.5