

アルカリ骨材反応によるコンクリートの 3次元亀甲状ひび割れの再現と可視化

Simulation and Visualization of Three-dimensional Map Cracking in Concrete
Caused by Alkali Silica Reaction

持川 空良¹⁾・車谷 麻緒²⁾
Sora Mochikawa and Mao Kurumatani

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

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,
E-mail: mao.kurumatani.jp@vc.ibaraki.ac.jp)

Three-dimensional map (alligator) cracking caused by an alkali-silica reaction is simulated in concrete. The shape of the coarse aggregate and reinforcing bar is realistically modeled in three dimensions. A damage model simulates the three-dimensional crack propagation behavior in concrete. Numerical examples demonstrate that distinctive map cracking can be simulated in plain concrete and reinforced concrete members.

Key Words : *alkali-silica reaction (ASR), reinforced concrete, meso-scale model, 3D map cracking, damage model*

1. はじめに

コンクリートは主要な建設材料の1つであり、鉄筋コンクリートは様々な構造物に用いられている。現在、コンクリート構造物の経年劣化や早期劣化が問題となっており、維持管理による延命化が重要視されている。コンクリートの劣化現象の1つとしてアルカリ骨材反応（以下 ASR と表記）がある。この反応により、コンクリート内部に局所的な膨張が引き起こされることで、モルタル部分にひび割れが発生する。ASR による劣化を受けたコンクリート構造物の表面には、図-1 に示すような、亀甲状のひび割れが生じることが知られている [1]。また近年では、橋梁の梁部やフーチング部で鉄筋破断が報告されており、構造物の耐荷性能低下も懸念されている [2]。そのため、ASR による構造物への影響は十分に検討する必要がある。ASR の膨張挙動やひび割れを精度良く再現できる手法が求められている。

コンクリートをメゾスケールで見ると、モルタルと粗骨材の二相で構成される非均質材料とみなすことが可能である。コンクリート内部に存在する粗骨材の形状・体積率・分布が異なると、コンクリートの力学特性や破壊挙動に影響を及ぼすことが知られている [3,4]。ASR による劣化（ひび割れ形成）は、粗骨材の周囲に生成されたゲルが膨張することで発生するため、粗骨材の形状や分布の影響が大きいと考えられる。そのため、ASR によって生じるひび割れを精度良く評価するには、粗骨材の形状や分布を定量的に把握する必要がある。以上のような背景から、ASR を対象にした数値解析に関する研究が盛んに行われている。

既往の研究では、コンクリート中の粗骨材を考慮することで、ASR を再現できる 3 次元メゾスケール有限要素モデルが提案されている [5,6]。粗骨材分布を再現し

たコンクリートのメゾスケールモデルを作成し、ASR 反応による破壊シミュレーションを行っている。しかし、これら研究では粗骨材の形状が単純化されており、実際のコンクリート中に分布する様々な形状の粗骨材を再現できていない。粗骨材はコンクリートの破壊挙動や力学特性に大きく影響することから、ASR により生じる亀甲状のひび割れを精度良く再現するために、粗骨材の形状や分布を数値解析に反映することが重要であると考えられる。

一方、粗骨材の存在を考慮して破壊シミュレーションを行う手法として、粗骨材の 3 次元形状および粒度分布を反映したメゾスケールモデルを作成することで、実験結果を精度よく再現できる解析手法が提案されている [7]。この手法を用いることで、コンクリート中の粗骨材の実形状を再現した 3 次元破壊シミュレーションが可能である。

以上のことから本研究では、粗骨材の形状や粒度分布を考慮した無筋コンクリート部材、および鉄筋コンクリート部材のメゾスケールモデルを作成し、そのメゾスケールモデルに対して 3 次元破壊シミュレーションを行い、ASR による亀甲状ひび割れを 3 次元で再現することを目的とする。

2. 数値解析手法

(1) コンクリートのメゾスケールモデリング

本研究では、中嶋ら [8,9] が提案している手法を用いて、メゾスケールモデルを作成する。ただし、この手法で用いられている重み付きボロノイ分割法ではなく、3D スキャンを用いることで粗骨材モデルを作成する。既存研究と同様に、粗骨材モデルを大量に準備しておき、粒度曲線を満足するように粗骨材モデルを充填さ

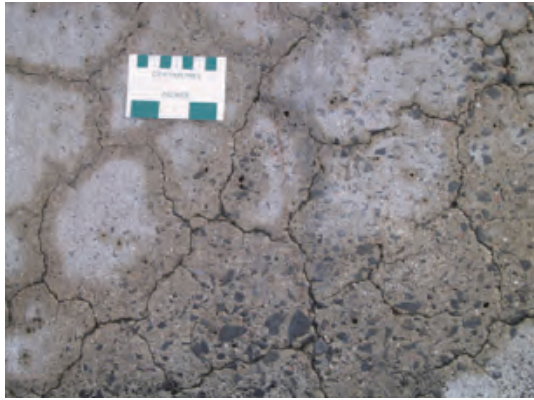


図-1 ASR により発生する亀甲状ひび割れ [1]

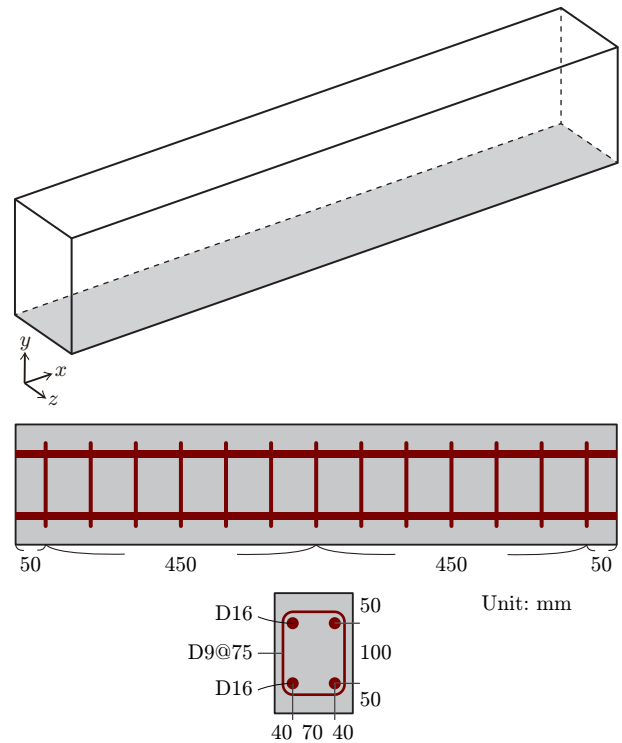


図-2 部材の寸法

せる方法を用いる。粗骨材モデルの3次元形状は実際の粗骨材から取得しており、さらに粒度曲線も満足させられることから、実物に限りなく近いコンクリートのメゾスケールモデルを作成することができる。

(2) コンクリートの材料モデル

コンクリートの材料モデルは、車谷ら [10] が考案した損傷モデルを適用する。損傷モデルの応力-ひずみ関係は以下の式で表される。

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

ここで、 σ はコーシー応力テンソル、 c は弾性係数テンソル、 ε は微小ひずみテンソル、 D は損傷変数である。本研究では、各要素におけるモルタルの体積率を V とする。そして、粗骨材は損傷しないものとし、モルタルの損傷のみを考えると、損傷変数 D は次式で表される。

$$D = 1 - \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_e} \exp \left\{ -\frac{E\varepsilon_0}{G_f} (\alpha_D^{-1}\varepsilon_e - \alpha_0^{-1}\bar{\varepsilon}) V h_e \right\} \quad (2)$$

ここで、 ε_0 はモルタルの破壊発生ひずみ、 G_f はモルタルの破壊エネルギー、 h_e は要素長さ、 ε_e は修正 von-Mises 基準に基づく等価ひずみである。また、 α_0 と α_D はそれぞれ次式の関係から与えられる。

$$E_m = \alpha_0 E, \quad \varepsilon_m = \alpha_D^{-1} \varepsilon_e \quad (3)$$

ここで、 E_m はモルタルのヤング率、 E は体積率 V を用いて算出した要素全体の平均ヤング率、 ε_m は要素内のモルタルの等価ひずみである。

(3) 鉄筋の材料モデル

鉄筋の構成モデルには、一般的な von-Mises 塑性モデルを適用する。降伏基準には、次式に示す非線形等方硬化則に基づく降伏関数 $f \leq 0$ を適用する。

$$f = \sigma_v - \sigma_{y0} - Q(1 - e^{-bp}) \quad (4)$$

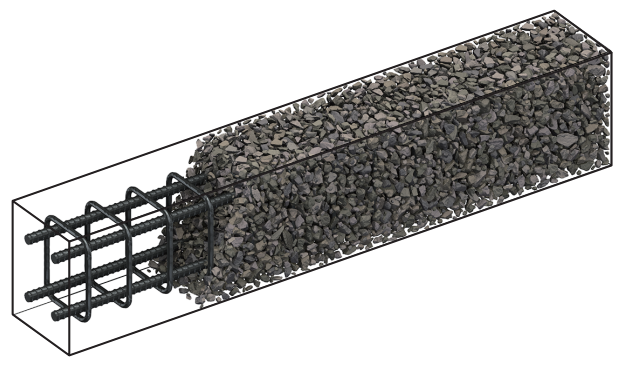
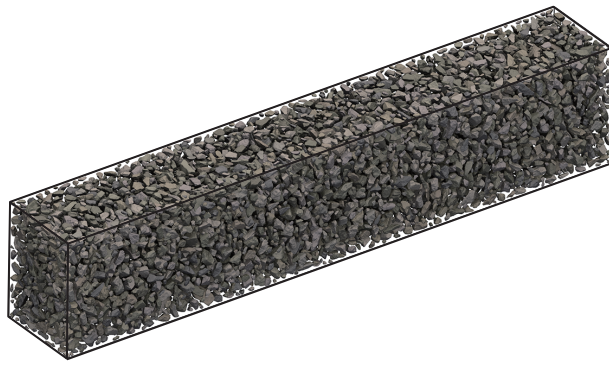
ここで、 σ_v は von-Mises の相当応力、 σ_{y0} は初期降伏応力、 p は相当塑性ひずみである。 Q と b は非線形硬化を表現するためのパラメータである。

3. ASR の数値解析例

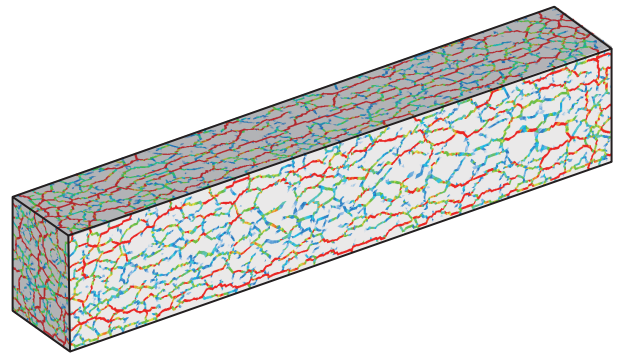
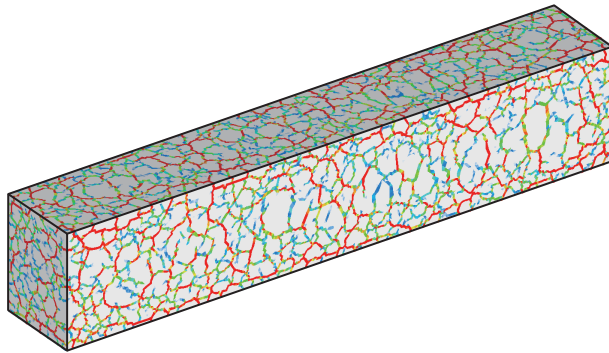
(1) 解析条件

本研究では、無筋コンクリート部材および鉄筋コンクリート部材を対象に、ASR による破壊シミュレーションを行った。モデルの寸法を図-2 に示す。鉄筋コンクリート部材に関して、D16 の軸方向鉄筋を4本、せん断補強筋を13本が配筋されている。無筋コンクリート部材は、鉄筋コンクリート部材から鉄筋を取り除いたものである。拘束条件は、部材の底面（図-2の着色面）の y 方向のみを拘束することとした。

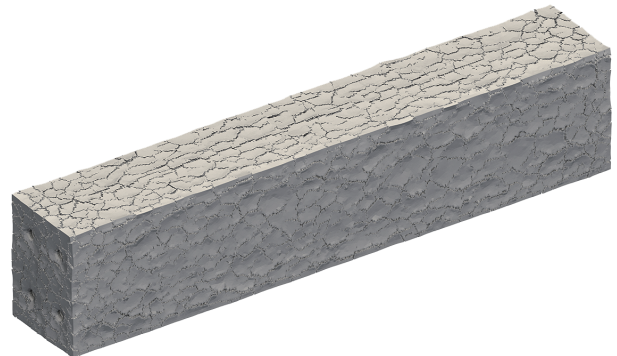
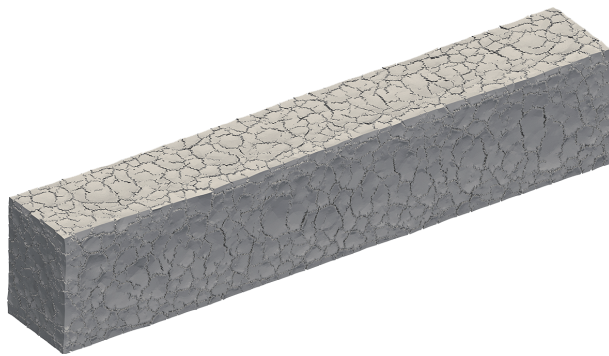
有限要素には四面体1次要素を用いた。無筋コンクリート部材では、節点数を約17万、要素数を約90万とし、粗骨材の膨張ひずみ0.3%を200stepで与えることとした。鉄筋コンクリート部材では、節点数を約47万、要素数を約270万とし、粗骨材の膨張ひずみ0.3%を200stepで与えることとした。モルタルの材料パラメータは、ヤング率を20 GPa、ポアソン比を0.2、圧縮引張強度比を12、破壊エネルギーを0.08 N/mm、破壊発生ひずみを0.00016とした。粗骨材の材料パラメー



(a) 3D meso-scale model of plain concrete (left) and reinforced concrete (right)



(b) Principal strain distribution of plain concrete (left) and reinforced concrete (right)



(c) Discontinuous deformation of plain concrete (left) and reinforced concrete (right)

図-3 ASR シミュレーションの結果 (左：無筋コンクリート, 右：鉄筋コンクリート)

タはヤング率を 60 GPa, ポアソン比を 0.2 とした. 鉄筋のパラメータはヤング率を 200 GPa, ポアソン比を 0.3, 降伏応力を 400 MPa, 非線形硬化パラメータ Q , b をそれぞれ 150 MPa, 20 とした. コンクリートおよび鉄筋の材料パラメータは, それぞれ一般的な値を設定した.

メゾスケールモデルの作成においては, 土木学会基準 [11] の標準粒度に従って粗骨材の充填を行った. また, 本研究ではボロノイ分割法を応用して, 材料の破壊 (損傷) に伴う不連続変形を可視化する. この方法は, ドロネー図とボロノイ図の双対性を利用して, 四面体要素の損傷をボロノイ要素の不連続変形に置換する方法である.

(2) 無筋コンクリート部材のシミュレーション結果

図-3 (a) 左に 3 次元メゾスケールモデル, (b) 左に

最大主ひずみ分布, (c) 左に不連続変形図を示す. 解析結果から, ASR により劣化したコンクリートに見られるような, 亀甲状ひび割れを再現できていることが確認できる.

(3) 鉄筋コンクリート部材のシミュレーション結果

図-3 (a) 右に 3 次元メゾスケールモデル, (b) 右に最大主ひずみ分布, (c) 右に不連続変形図を示す. (a) では, 鉄筋部分が見えるように, 部分的に粗骨材を非表示としている. 鉄筋コンクリート部材の場合, ASR によるひび割れは軸方向鉄筋の方向に沿うように発生することが報告されている [12]. 解析結果から, 軸方向鉄筋に沿うようにひび割れが発生しており, ASR 劣化した鉄筋コンクリートに見られるような, ひび割れ分布を適切に再現できていることが確認できる.

4. おわりに

本研究では、粗骨材の形状と粒度分布を再現したコンクリート部材、および鉄筋コンクリート部材の3次元メゾスケールモデルを作成した。そして、損傷モデルによる数値解析を行い、ASR劣化によってコンクリート表面に発生する特徴的な亀甲状ひび割れを3次元で再現した。

参考文献

- [1] *Alkali-silica reactivity field identification handbook*, Federal Highway Administration, FHWA-HIF-12-022
- [2] 小林一輔, 丸章夫, 立松英信: アルカリ骨材反応診断, pp.4-15, 森北出版, 1991.
- [3] 大塚浩司, 勝部宏明: コンクリートの破壊進行領域の性状に及ぼす骨材寸法の影響, 土木学会論文集, Vol. 1993, No. 478, pp. 109-116, 1993.
- [4] 山本泰彦: コンクリートのワーカビリティおよび強度におよぼす粗骨材粒の特質, コンクリート・ジャーナル, Vol. 7, No. 11, pp. 11-21, 1969.
- [5] 岡孝二, 吉田秀典, 松島学, 横田優: アルカリ骨材反応によるコンクリートのひび割れ発生モデルの構築と解析手法の提案, 土木学会論文集 A, Vol. 63, No. 4, pp. 744-757, 2007.
- [6] R. Rezakhani, E. Gallyamov, J.F. Molinari: Meso-scale Finite Element Modeling of Alkali-Silica-Reaction, *Construction and Building Materials*, Vol. 278, 122244, 2021.
- [7] 那須川佳祐, 升井尋斗, 車谷麻緒: 粗骨材の形状と粒度を再現した鉄筋コンクリートはりの3次元メゾスケール破壊シミュレーション, 土木学会論文集, Vol. 79, No. 11, 23-00190, 2023.
- [8] 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ゾ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.
- [9] 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次元メゾスケールモデリング, 土木学会論文集, Vol. 80, No. 15, ID: 23-15015, 2024
- [10] 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その性能検証, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol. 75, No. 2, pp. I.47-I.54, 2019.
- [11] 土木学会: 2018年制定 コンクリート標準示方書基準編, 2018.
- [12] 山村智, 児島孝之, 葛目和宏, 岡本享久: 構造部材の特性とASRひび割れとの関係に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 30, No. 1, 2008.