

化学的・物理的現象を考慮したメゾスケール解析による ASR 膨張挙動解析

関西大学 正会員 ○上田 尚史, 鶴田 浩章

1. はじめに

アルカリシリカ反応 (ASR) は, 材料のぼらつきやペシマム現象等の要因により, その膨張量を事前に予測することが困難であるとされている. しかし, 膨張量を予め把握することができれば, 将来的な ASR 劣化構造物の安全性の評価につながるとともに, ASR 抑制対策を議論する上でも非常に有益であると考えられる. そこで, 本研究では, ASR における骨材とアルカリの化学反応過程やゲルの吸水膨張過程をモデル化したメゾスケール解析手法を構築し, ASR 膨張挙動のシミュレーションを行った.

2. 化学的・物理的現象を考慮したメゾスケール解析手法

本研究では, 骨材寸法程度の現象に着目したメゾスケール解析として, コンクリートをモルタル要素と粗骨材要素の二層系でモデル化した 3 次元有限要素解析を行った. なお, 粗骨材要素は, 粗骨材そのものではなく, 要素内に粗骨材が存在する状態を仮定し, 骨材には反応性骨材ならびに非反応性骨材を考慮する. 解析では, 水分ならびにアルカリイオンの移動現象を考慮するとともに, 骨材とアルカリイオンの化学反応, ゲルの生成ならびにゲルの吸水膨張を後述するように簡易にモデル化し, コンクリートの変形やひび割れ性状の評価を行った. 図-1 に, 構築したメゾスケール解析手法の概要を示す. 本解析手法は, (1)アルカリイオン移動解析, (2)水分移動解析, (3)構造解析の 3 種の解析を連成したものである. 水分ならびにアルカリイオンの移動は, モルタル要素および反応性骨材要素において生じると仮定し, 表-1 に示す拡散方程式を解くことで考慮した. 骨材とアルカリの化学反応は, 反応性骨材要素のアルカリイオン濃度 C に比例して生じると仮定し, その反応量と同量のアルカリが消費されるものとした. 化学反応に関する比例定数を k_c とすると, アルカリの消費量 ΔC_c は次式で表される.

$$\Delta C_c = k_c \cdot C \tag{1}$$

ASR は, 骨材中の SiO_4 が水酸化アルカリにより切断されて生じた Si-O-H が, 余剰の水酸化アルカリと反応することでシリカゲルが生成するとされている¹⁾. そこで本研究では, アルカリイオン消費量が閾値 C_r を超えるとゲルが生成されるものとし, ゲルの生成量 Q_{gel} を次式で仮定した.

$$Q_{gel} = \sum \Delta C_c \cdot V_{con} \cdot M_{gel} \tag{2}$$

ここで, V_{con} はコンクリート体積, M_{gel} は分子量でありゲルの組成を $\text{Na}_2\text{H}_2\text{SiO}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ ¹⁾ と仮定すれば 284 となる.

ゲルによる吸水膨張は, ゲルの浸透圧の影響により生じると考えられている¹⁾が, 本研究では反応性骨材の相対含水率をゲルの生成量に伴い低下させることにより, 見かけ上, 水分移動が生じるものと仮定した.

$$R_c' = R_c \cdot V_{con} / (V_{con} + k_p \cdot Q_{gel}) \tag{3}$$

ここで, R_c' はゲル生成後の相対含水率, k_p はゲルの浸透圧を間接的に考慮する係数である. ゲルの吸水膨張は, ゲルの生成量と相対含水率の変化量 ΔR_c , およびゲルと粗骨材の弾性係数の比から, 次式で計算される体積膨張ひずみ ε_v により考慮した.

$$\varepsilon_v = k_{gel} \cdot (E_{gel} / E_{agg}) \cdot Q_{gel} \cdot \Delta R_c \tag{4}$$

ここで, E_{gel} , E_{agg} はそれぞれゲル, 粗骨材の弾性係数であり, k_{gel} はゲルの膨張性に関する係数である. 体積膨張ひずみ ε_v は, 主応力の大きさ $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ を考慮することで, 次式に示すように主軸 3 方向の膨張ひずみ $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$

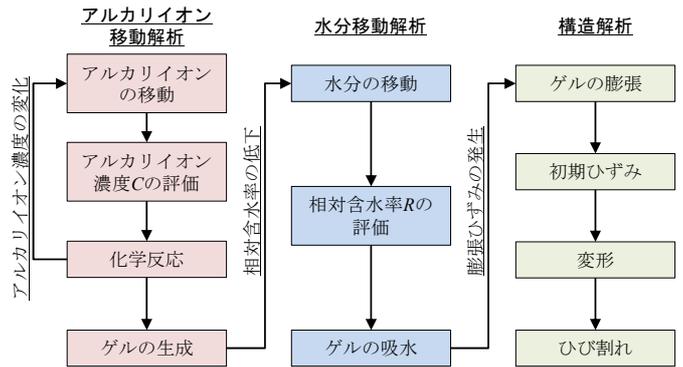


図-1 解析手法の概要

表-1 各種拡散方程式

	拡散方程式	物理量
水分	$\frac{\partial R}{\partial t} = \nabla \cdot (D_R \nabla R)$	R : 相対含水率 D_R : 水分拡散係数
アルカリイオン	$\frac{\partial C}{\partial t} = D_C \nabla^2 C$	C : アルカリイオン濃度 D_C : アルカリイオン拡散係数

キーワード ASR, 化学反応, ASR ゲル, 吸水膨張, ペシマム現象, メゾスケール

連絡先 〒564-8680 大阪府吹田市山手町 3-3-35 TEL 06-6368-1653

へと変換される。

$$\varepsilon_i = (I_3 \cdot \varepsilon_v) / (I_2 \cdot \sigma_i) \quad (i=1, 2, 3) \quad (5)$$

ここで、 I_2 、 I_3 はそれぞれ応力の第2、第3不変量である。

式(5)で得られた主軸方向の膨張ひずみを反応性骨材要素の初期ひずみとして構造解析を行った。

3. 解析概要

本研究では、100×100×400mmの仮想的な角柱供試体を対象として解析を行った。図-2に解析モデルの一例を示す。コンクリートには、粗骨材が体積の40%混入しているものとし、反応性骨材の混入割合として25、50、100%の場合を想定した。解析では、粗骨材を10mmの立方体要素でモデル化し、反応性、非反応性にかかわらず、要素内にランダムに配置させた。モルタルの構成則は、圧縮応力下は弾性体とし、引張応力下では破壊エネルギーを考慮した1/4モデルを用いた。表-2に解析に用いた各種パラメータの値を示す。それぞれの値は、解析手法の可能性を評価できるように設定しており、必ずしも物理的な意味はないことに注意されたい。

4. 解析結果

図-3に、解析より得られた軸方向の膨張ひずみの履歴を示す。図には、ゲル発生限界イオン消費量を $C_{tr}=0.5 \text{ mol/L}$ とした場合の解析結果も示す。なお、膨張ひずみは、供試体両端の節点の平均的な相対変位を供試体長さで除すことで算出した。図より、反応性骨材の混入割合が大きいほど初期の膨張ひずみは大きい、最終的な膨張ひずみは小さくなる結果となった。これは、反応性骨材要素が多いほどアルカリイオンの消費量が大きくなり、モルタル要素から供給されるアルカリイオン量が相対的に低下したためであると考えられる。また、 C_{tr} を大きく設定することで、膨張の開始が遅くなるとともに膨張ひずみが小さくなるのが分かる。これは、ゲルの生成が遅れるとともに、膨張の駆動力が低下したためであると考えられる。

図-4に、解析から得られた800日目(図-3中○)におけるひび割れ図の展開図を示す。図より、供試体全面にわたり方向性の無いランダムなひび割れが生じていることが確認できる。ひび割れは、反応性骨材要素の膨張に伴い生じたものであり、ASRを生じたコンクリートの典型的なひび割れ性状と同様の傾向であると考えられる。

5. まとめ

本研究では、ASRの化学的・物理的現象を考慮したメソスケール解析手法を構築し、ASR膨張挙動の評価を試みた。その結果、定性的ではあるものの、ASRの特徴的な挙動を評価可能であることを示した。今後は、現象の更なるモデル化と解析パラメータの同定を行うことで、より定量的な評価を行う予定である。

謝辞

本研究は、平成24年度土木学会吉田研究奨励賞を授与された研究課題である。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 中部セメントコンクリート研究会編：コンクリート構造物のアルカリ骨材反応，理工学社，1990.

表-2 解析パラメータ

モルタル要素の弾性係数 E_c (GPa)	25.0
モルタル要素の引張強度 f_t (MPa)	2.0
モルタル要素の破壊エネルギー G_F (N/m)	50.0
粗骨材要素の弾性係数 E_{agg} (GPa)	30.0
ゲルの弾性係数 E_{gel} (GPa)	30.0
水分拡散係数 D_R (mm ² /day)	100
初期相対含水率 R_0 (%)	100
アルカリイオン拡散係数 D_C (mm ² /day)	0.1
初期アルカリイオン濃度 C_0 (mol/L)	1.0
ゲル発生限界イオン消費量 C_{tr} (mol/L)	0.05
化学反応に関する比例定数 k_C (-)	1.0
ゲルの浸透圧に関する係数 k_p (-)	10.0
ゲルの膨張性に関する係数 k_{gel} (-)	1.0

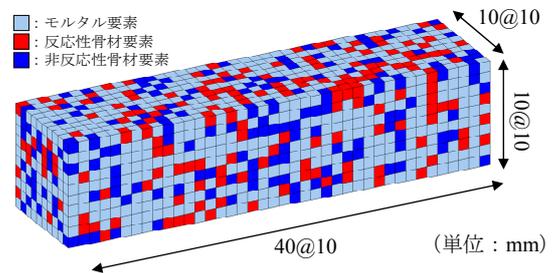


図-2 解析モデル(反応性骨材混入率50%)

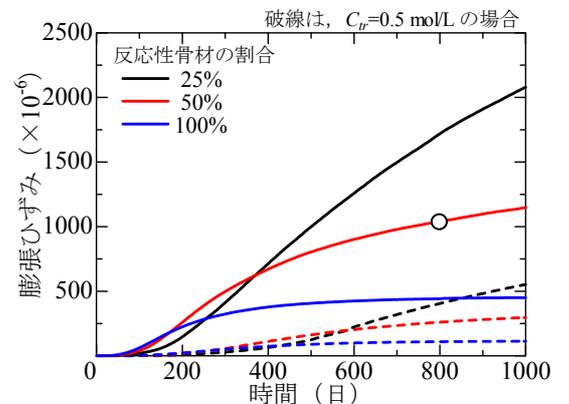


図-3 膨張ひずみの履歴

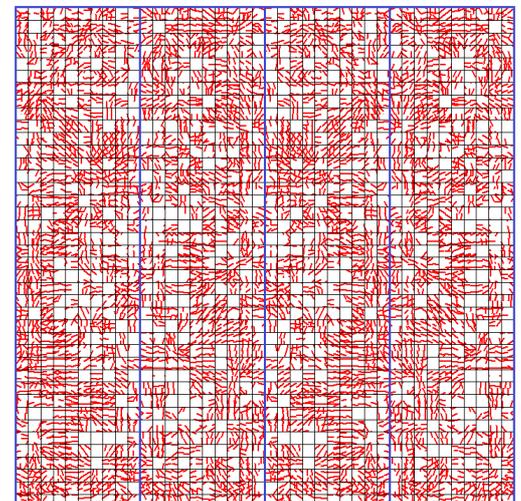


図-4 ひび割れ図
(反応性骨材混入率50%)