

## ASRの化学的・力学的現象を考慮したメゾスケール解析手法の構築

関西大学 正会員 博(工) ○上田 尚史  
 関西大学 正会員 博(工) 鶴田 浩章

Abstract : A chemo-mechanical modeling of Alkali Silica Reaction (ASR) was proposed in the view of mesoscale and introduced to finite element analysis. Chemical reaction between alkali components and alkaline reactive minerals in aggregate, producing of a hygroscopic gel and swelling of the gel were simply modeled. Moreover, transportation of both alkali ions and moisture content in concrete was also evaluated by considering the nonstationary diffusion equations in the analysis. Parametric analyses with single aggregate model were conducted in order to confirm the applicability of the proposed model. As the results, it was shown that the proposed model was useful to evaluate ASR expansive behavior, since effects of alkali content and humidity on ASR were simulated qualitatively.

Key words : Alkali silica reaction, Meso-scale analysis, Chemo-mechanical coupling

### 1. はじめに

近年、PC 構造においてアルカリシリカ反応 (ASR) が生じる事例が報告されている。ASR は、使用材料のばらつきやペシマム現象等の要因により、膨張の発生時期や膨張の過程、最終的な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、それら膨張挙動を予め把握することができれば、ASR 抑制対策や ASR 劣化した PC 構造物の維持管理手法を議論する上で非常に有益になると考える。

そこで本研究では、ASR における化学的な現象と力学的な現象を考慮することで、ASR を解析的に再現することを試みた。具体的には、骨材寸法程度の現象に着目し、ASR における骨材の化学反応過程やゲルの吸水膨張過程を簡易なモデルによりモデル化するとともに、アルカリイオンや水分の移動を評価可能な解析手法を構築した。また、構築した解析手法を用いて、アルカリ含有量や水分状態が ASR に及ぼす影響について考察を行った。

### 2. 化学的・力学的現象を考慮したメゾスケール解析手法

#### 2.1 メゾスケール解析手法の概要

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 次元有限要素解析手法の構築を行った。なお、本解析手法における粗骨材要素は、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た。また、粗骨材要素には、反応性骨材要素と非反応性骨材要素を考慮する。

本解析では、アルカリイオンならびに水分の移動現象を考慮するとともに、反応性骨材とアルカリイオンの化学反応、化学反応に伴う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、コンクリートに生じる変形やひび割れ性状の評価を行うものである。図-1に、構築したメゾスケール解析手法の解析フローを示す。図に示すように、本解析手法はアルカリイオン移動解析、水分移動解析、構造解析の3種の解析を連成したものである。

#### 2.2 アルカリイオン移動解析

コンクリート中のアルカリイオンの移動は、式(1)に示す非定常の拡散方程式を解くことで評価した。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_c \nabla^2 C \quad (1)$$

ここで、 $C$  はアルカリイオン濃度 (mol/L) ,  $D_C$  はアルカリイオンの拡散係数 (mm<sup>2</sup>/day) ,  $\nabla$  は微分演算子である。式(1)は次の境界条件のもとに解くことができる。

$$\frac{\partial C}{\partial n} + \alpha_c(C - C_\infty) = 0 \quad (2)$$

ここに、 $\alpha_c$  はアルカリイオン伝達率 (mm/day) ,  $n$  は伝達境界面の法線ベクトル,  $C_\infty$  は雰囲気アルカリイオン濃度 (mol/L) である。

### 2.3 水分移動解析

コンクリートの相対湿度は相対含水率と等しいものと仮定し、アルカリイオンの拡散移動と同様に式(3)に示す非定常の拡散方程式を解くことにより水分移動を評価した。

$$\frac{\partial R}{\partial t} = \nabla(D_R \nabla R) \quad (3)$$

ここで、 $R$  は相対含水率 (%) ,  $D_R$  は水分拡散係数 (mm<sup>2</sup>/day) である。本研究では、水分拡散係数  $D_R$  の相対含水率依存性を考慮した<sup>1)</sup>。また、式(3)は次の境界条件のもとに解くことができる。

$$\frac{\partial R}{\partial n} + \alpha_r(H - H_\infty) = 0 \quad (4)$$

ここに、 $\alpha_r$  は水分伝達率 (mm/day) ,  $n$  は乾燥境界面の法線ベクトル,  $H$  ,  $H_\infty$  はそれぞれ乾燥境界面および雰囲気相対湿度 (=相対含水率) である。

### 2.4 ASR のモデル化

本研究では、ASR における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。反応性骨材とアルカリイオンの化学反応に関する比例定数を  $k_c$  とすると、アルカリイオンの消費量  $\Delta C_c$  は次式で表される。

$$\Delta C_c = k_c \cdot C \quad (5)$$

ASR は、骨材中の  $\text{SiO}_4$  が水酸化アルカリにより切断されることにより生じた  $\text{Si-O-H}$  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<sup>2), 3)</sup>。そこで本研究では、アルカリイオン消費量  $\Sigma(\Delta C_c)$  が閾値  $C_{\text{lim}}$  を超えるとゲルが生成されるものとし、ゲルの生成量  $Q_{\text{gel}}$  を次式で仮定した。

$$Q_{\text{gel}} = \begin{cases} 0 & \Sigma(\Delta C_c) < C_{\text{lim}} \\ \Sigma(\Delta C_c \cdot V_{\text{agg}} \cdot M_{\text{gel}} / \rho_{\text{gel}}) & \Sigma(\Delta C_c) \geq C_{\text{lim}} \end{cases} \quad (6)$$

ここで、 $V_{\text{agg}}$  は反応性骨材要素の体積であり、 $M_{\text{gel}}$  ,  $\rho_{\text{gel}}$  はそれぞれゲルのモル質量 (g/mol) および密度 (g/cm<sup>3</sup>) である。

ゲルによる吸水は、ゲルの浸透圧の影響により生じると考えられている<sup>2)</sup>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、ゲルへの水分移動が生じるものと仮定した。

$$R' = R \cdot V_{\text{agg}} / (V_{\text{agg}} + k_p \cdot Q_{\text{gel}}) \quad (7)$$

ここで、 $R'$  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

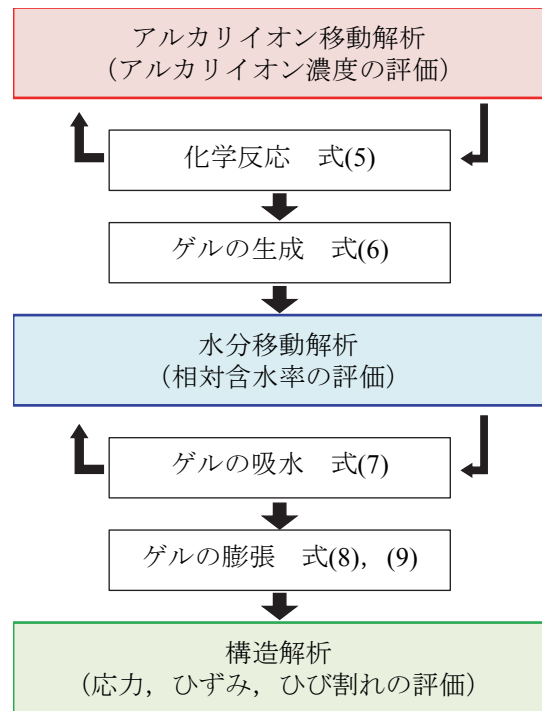


図-1 解析フロー図

水膨張は、ゲルの生成量と反応性骨材要素の相対含水率の変化量  $\Delta R$ ， 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  $\varepsilon_V$  により考慮した。

$$\varepsilon_V = k_{gel} \cdot (E_{gel} / E_{agg}) \cdot Q_{gel} \cdot \Delta R \quad (8)$$

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。

ここで、ASR 膨張は応力状態に依存して方向性を持った膨張挙動を示す特徴があることから、反応性骨材要素に作用する主応力の大きさ  $\sigma_1$ ，  $\sigma_2$ ，  $\sigma_3$  を考慮して、次式を用いて体積膨張ひずみ  $\varepsilon_V$  を主軸 3 方向の膨張ひずみ  $\varepsilon_1$ ，  $\varepsilon_2$ ，  $\varepsilon_3$  へと変換した。

$$\varepsilon_i = (I_3 / I_2) \cdot \varepsilon_V / \sigma_i, \quad (i=1, 2, 3) \quad (9)$$

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(9)で得られた膨張ひずみを反応性骨材要素の初期ひずみとして考慮することで、構造解析を行うこととなる。

### 3. 単一骨材モデルによるメソスケール解析

#### 3.1 解析モデルおよび解析パラメータ

構築した解析手法による ASR のシミュレーションの可能性について検討した。ここでは、反応性骨材の化学反応や吸水膨張過程が、骨材周囲のアルカリイオン濃度や相対湿度の影響をどのように受けるのか明らかにするため、モルタル中に反応性骨材が 1 つ配置されている状態を想定した。図-2 に解析モデルを示す。1 辺 10mm の立方体要素を用いて、反応性骨材が中心となるように反応性骨材要素およびモルタル要素を配置した。アルカリイオンならびに水分の伝達境界は、図中の破線で示すようにモルタル要素の外縁とした。

表-1 に解析に用いた各種パラメータの値を示す。モルタル要素のアルカリイオンの拡散係数は、後藤ら<sup>4)</sup>や河合ら<sup>5)</sup>の研究を参考にして、 $D_C = 1.00 \times 10^{-1} \text{ mm}^2/\text{day}$  とした。アルカリイオン伝達係数については、これまでに検討された事例が無く不明であるため、 $\alpha_C = 1.00 \times 10^{-4} \text{ mm/day}$  を仮定した。また、モルタル要素の水分拡散係数ならびに水分伝達率は、秋田ら<sup>1)</sup>の研究を参考にして、 $D_R = 1.00 \times 10^2 \text{ mm}^2/\text{day}$ ，  $\alpha_R = 4.00 \times 10 \text{ mm/day}$  とした。

なお、反応性骨材要素の各種拡散係数ならびに伝達係数は、モルタル要素の 0.1 倍を仮定した。ゲルのモル質量は、ゲルの組成を  $\text{Na}_2\text{H}_2\text{SiO}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$  と仮定し<sup>2)</sup>，  $M_{gel} = 284$

表-1 解析パラメータ

アルカリイオン拡散係数 $D_C$ (mm <sup>2</sup> /day)	$1.00 \times 10^{-1}$
アルカリイオン伝達係数 $\alpha_C$ (mm/day)	$1.00 \times 10^{-4}$
水分拡散係数 $D_R$ (mm <sup>2</sup> /day)	$1.00 \times 10^2$
水分伝達率 $\alpha_R$ (mm/day)	$4.00 \times 10$
ゲルのモル質量 $M_{gel}$ (g/mol)	284
ゲルの密度 $\rho_{gel}$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.50
ゲル発生限界イオン消費量 $C_{lim}$ (mol/L)	0.05
化学反応に関する比例定数 $k_C$ (1/day)	1.0
ゲルの浸透圧に関する係数 $k_p$ (-)	0.1
ゲルの膨張性に関する係数 $k_{gel}$ (-)	50.0
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
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

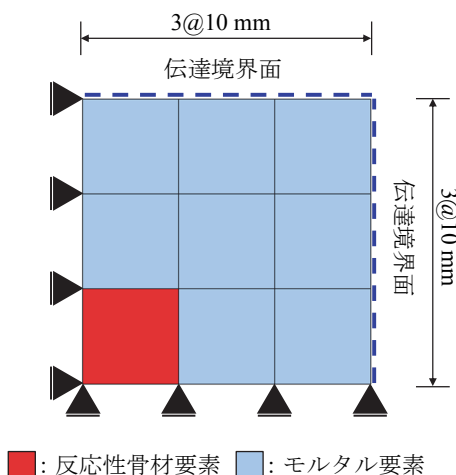


図-2 解析モデル

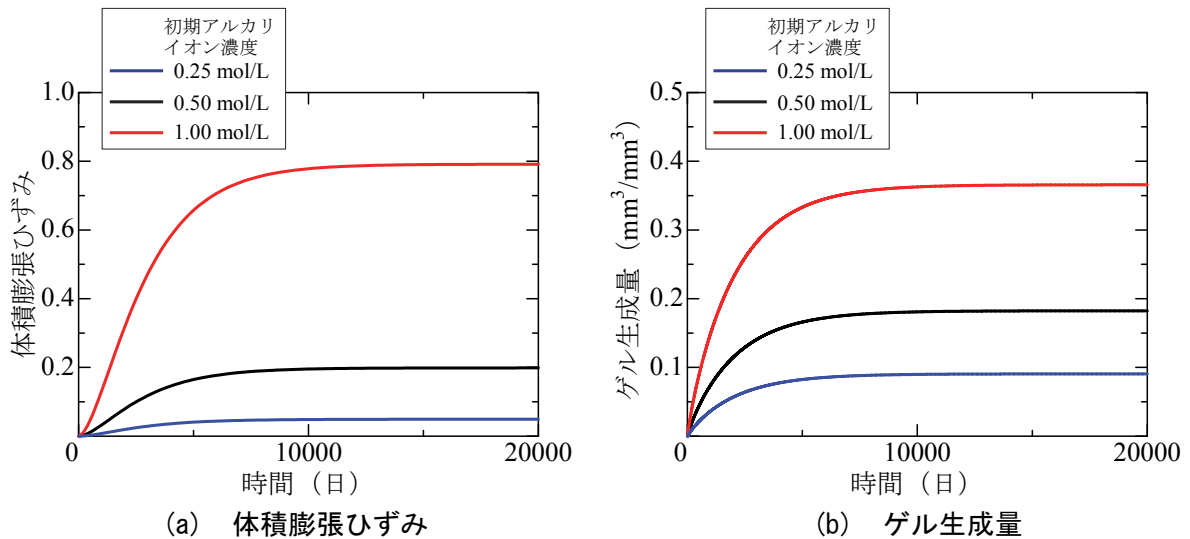


図-3 初期アルカリ量の違いによる比較

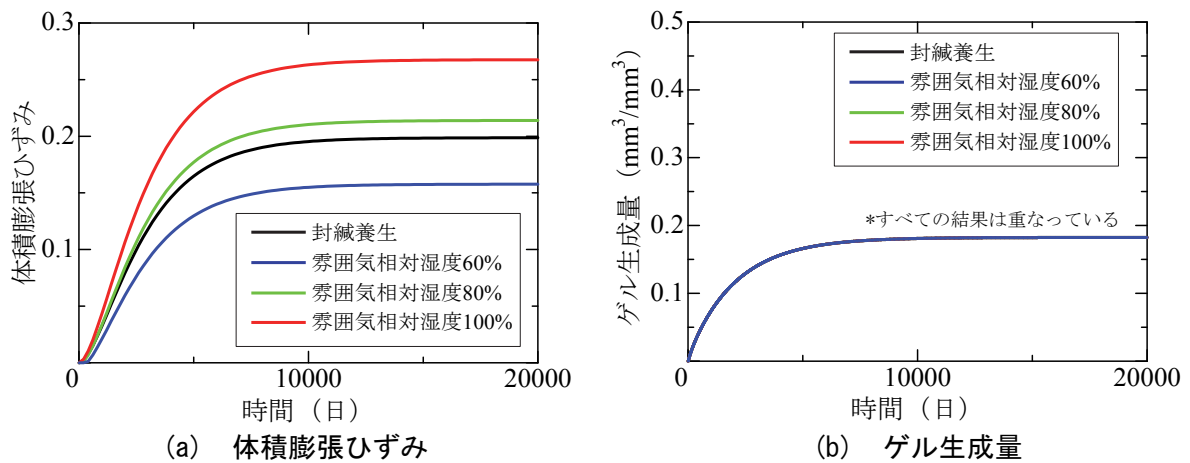


図-4 雰囲気相対湿度の違いによる比較

g/mol とした。ゲルの密度は、一般的には水分状態に依存する<sup>7)</sup>ことが知られているが、本研究では水分状態によらず、 $\rho_{gel}=1.50 \text{ g/cm}^3$  と一定であると仮定した。なお、その他のパラメータについては、解析手法の可能性を評価できるように値を設定しており、必ずしも物理的な意味はないことに注意されたい。

### 3.2 初期アルカリ含有量が ASR に及ぼす影響

初期アルカリ含有量が ASR に及ぼす影響を評価するため、初期のアルカリイオン濃度を 0.25, 0.50 および 1.00 mol/L とした場合について解析を行った。初期の相対含水率は、いずれの場合も 100% とした。ここで、アルカリイオン濃度 0.50 mol/L は、単位水量 170kg, W/C=45%のコンクリートに対して、アルカリが Na<sub>2</sub>O 等量で 4kg 混入している場合に相当する<sup>8)</sup>。なお、解析では封緘状態を想定し、供試体と雰囲気間の水分伝達およびアルカリイオン伝達は生じないものとした。

図-3 に、解析より得られた反応性骨材要素の体積膨張ひずみおよびゲル生成量の経時変化を示す。なお、ゲル生成量は、反応性骨材要素の初期の体積で正規化したものを示している。図より、初期のアルカリイオン濃度が大きいほど体積膨張ひずみは大きくなるのが分かる。これは、式(1)でモデル化したように、初期のアルカリイオン濃度が大きいほど ASR の化学反応が活発に生じ、ゲルが多量に生成されたためである。また、初期のアルカリイオン濃度に依らず、5000 日程度において体積膨張ひずみの増加が緩やかになる傾向が見られた。これは、外部からのアルカリイオンの供給が無いためゲ

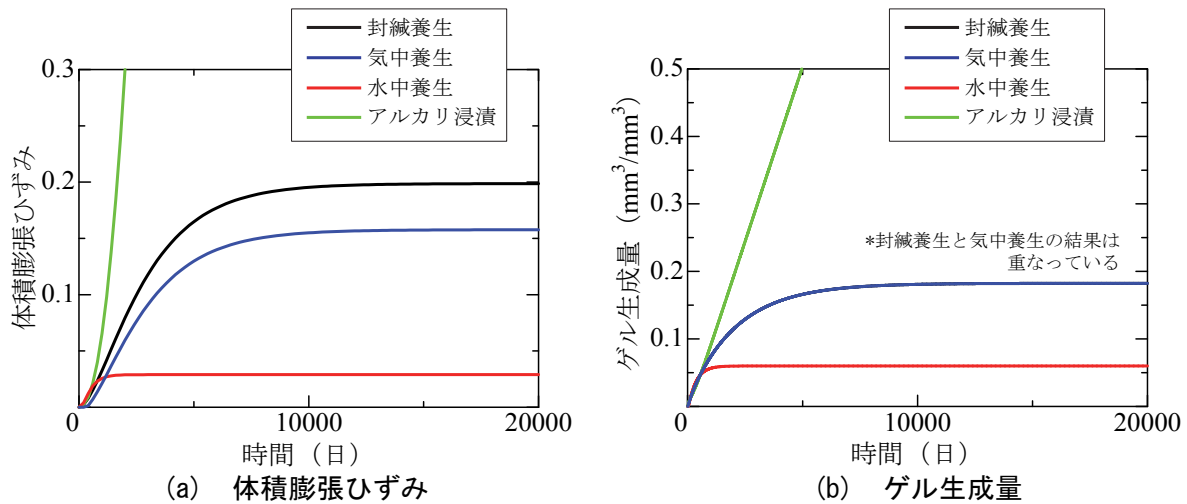


図-5 養生条件の違いによる比較

ルの生成量が停滞するためであると考えられる。

以上のことから、ASR の化学反応およびゲルの吸水過程を考慮することで、アルカリイオン濃度の違いによる ASR 膨張挙動の違いを評価できることが確認できた。

### 3.3 雰囲気相対湿度が ASR に及ぼす影響

雰囲気相対湿度が ASR に及ぼす影響を評価するため、初期の相対含水率を 100%、初期のアルカリイオン濃度を 0.50 mol/L とし、異なる相対湿度下における気中養生を想定した。解析においては、雰囲気相対湿度を 60, 80, 100%として、伝達境界面からの水分伝達挙動のみを考慮した。

図-4 に、解析より得られた反応性骨材要素の体積膨張ひずみおよびゲル生成量の経時変化を示す。図中には、前出の封緘養生の結果を併せて示している。ゲルの生成量に着目すると、封緘養生と気中養生では、反応性骨材要素に供給されるアルカリイオンの量が等しいため、雰囲気相対湿度に係わらず全てのケースで同一の結果となっていることが分かる。一方、体積膨張ひずみの大きさは、雰囲気相対湿度の大きさに応じて異なることが確認できる。これは、雰囲気相対湿度が 60%の場合は水分が外部に逸散するため、ゲルの吸水膨張に要する水分が低下し封緘養生よりも体積膨張ひずみが小さくなるのに対して、雰囲気相対湿度が 80 ならびに 100%の場合は、外部から水分が供給されるため、封緘養生よりも体積膨張ひずみは大きくなったものと考えられる。

以上のことから、ゲルの吸水過程を考慮することで、コンクリートの相対含水率の違いによる ASR 膨張挙動の違いを評価できることが確認できた。なお、コンクリートの相対湿度が 80%程度を下回ると ASR 膨張は生じないという知見<sup>9)</sup>もあることから、乾燥環境下におけるゲルの吸水膨張挙動のモデル化については、より詳細な検討を要すると考える。

### 3.4 養生条件の違いが ASR に及ぼす影響

養生条件の違いが ASR に及ぼす影響を評価するため、初期の相対含水率を 100%、初期のアルカリイオン濃度を 0.50 mol/L とし、異なる養生条件下における ASR 挙動について検討した。養生条件としては、前出の封緘養生と気中養生に加え、水中養生および 1.0 mol/L のアルカリ溶液に浸漬した場合を想定した。なお、気中養生では雰囲気相対湿度を 60%とし、外部への水分の逸散を考慮した。水中養生では雰囲気相対湿度を 100%、アルカリイオン濃度を 0.00%とし、外部からの水分の供給と外部へのアルカリイオンの溶出を模擬した。

図-5 に、解析より得られた反応性骨材要素の体積膨張ひずみおよびゲル生成量の経時変化を示す。前述したように、気中養生と封緘養生を比較すると、反応性骨材要素へのアルカリイオンの供給量は等しいためゲルの生成量は同一であるが、外部への水分逸散の影響により気中養生における体積膨張

ひずみは小さくなっている。一方、水中養生においては、十分な水分供給があるにもかかわらず体積膨張ひずみが低下する結果となった。これは、アルカリイオンが外部へと溶出することでゲルの生成量が低下したため、吸水による膨張駆動力が小さかったためであると考えられる。また、1.0 mol/Lのアルカリ溶液に浸漬した場合は、アルカリイオンと水分が外部から継続して供給されるため、ゲルの生成が持続するとともに体積膨張ひずみが急激に増加する結果となった。

以上のことから、アルカリイオンや水分の移動を考慮することで、養生条件の違いによるASR膨張挙動の違いを評価できることが確認できた。なお、本解析手法においては、ASRに伴う反応性骨材中のシリカの溶解の影響を考慮していないため、アルカリイオンが存在する限り反応し続けることになっている。この点については、解析手法の改善が必要であると考えられる。

#### 4. 結論

本研究の結論を以下に示す。

- (1) ASRにおける骨材の化学反応過程やゲルの吸水膨張過程を簡易なモデルでモデル化するとともに、アルカリイオンや水分の影響を考慮可能なメソスケール解析手法を構築した。
- (2) 構築した解析手法を用いて、単一骨材モデルを対象とした解析を行った結果、ASR膨張挙動に影響を及ぼすと考えられる初期のアルカリ含有量や養生条件の影響を定性的に評価できることが示された。したがって、構築した解析手法は、ASRのシミュレーションにおいて有用であると考えられる。今後は、化学反応に伴う骨材中のシリカの溶解や化学反応の温度依存性、ゲルの特性等、ASRの現象の更なるモデル化を行うとともに、解析パラメータを同定することで、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。また、本研究は、平成26年度関西大学若手研究者育成経費において、研究課題「準微視的メカニズムに基づいたコンクリートのASRシミュレーション」として研究費を受け、その成果を公表するものである。ここに記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 秋田宏，藤原忠司，小西俊之，尾坂芳夫：コンクリート中の水分移動における水分伝導率の評価，コンクリート工学年次論文集，Vol. 12，No. 1，pp. 161-166，1990.
- 2) 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.
- 3) 日本コンクリート工学協会：作用機構を考慮したアルカリ骨材反応の抑制対策と診断研究委員会報告書，2008.
- 4) 後藤誠史，茂啓二郎，高木達雄，大門正機：セメント硬化体の細孔径分布とイオンの拡散，セメント技術年報，Vol. 36，pp. 49-52，1982.
- 5) 河合研至，小林一輔：コンクリート中のイオンの拡散に関する基礎的研究(I)，生産研究，Vol. 41，No. 9，pp. 739-740，1989.
- 6) 川村満紀，榎場重正：アルカリ・シリカ反応のメカニズム，コンクリート工学，Vol. 22，No. 2，pp. 6-15，1984.
- 7) 魚本健人，古澤靖彦：アルカリ・シリカ反応によるモルタルバーの膨張挙動を予測するモデルの構築，コンクリート工学論文集，Vol. 3，No. 1，pp. 109-119，1992.
- 8) 村中誠，田中泰司：反応機構に立脚したASR膨張挙動に関する物理-化学モデルの構築，土木学会論文集E2(材料・コンクリート構造)，Vol. 69，No. 1，pp. 1-15，2013.
- 9) 鍵本広之，川村満紀：大型コンクリート円柱内部における湿度およびひずみの測定によるASR表面ひび割れ発生過程の解明，コンクリート工学年次論文集，Vol. 31，No. 1，pp. 1225-1230，2009.