

# 報告 JIS モルタルバー法の膨張率に対するアルカリシリカ反応速度論に基づく既存予測手法の適用性に関する研究

中村 成春\*1・堂下 航\*2

**要旨**：本研究は、古澤・魚本らのアルカリシリカ反応速度論に基づく JIS モルタルバー法の膨張率進行の予測手法について、4 種類の反応性骨材の JIS 化学法と JIS モルタルバー法に基づく試験結果を参照・比較し、その既存予測手法の適用性を検討することを目的とした。その結果、1) 膨張率換算係数 E および膨張低減係数 h の算定に難点があること、2) 表計算ソフトのセル計算ワークシートの数値解析手法を開発したこと、3) 遅延型膨張骨材を解析対象とする場合、後期拡散係数を設定するための実験結果が必要なこと等が示された。

**キーワード**：アルカリシリカ反応, JIS モルタルバー法, JIS 化学法, 拡散方程式, 膨張率, 表計算ソフト

## 1. はじめに

集合住宅やインフラ施設等の既設 RC 造の経年変化に伴うひび割れ劣化現象は耐久性や美観を損なうことから、その修繕の合理的対策について社会的関心が高い。すなわち、持続可能性といえるサステナブルな設計・生産・管理・保全の制御技術が模索されている。適切な維持管理により長期に建物的健全かつ人的健康を保った RC 造の実現、これを一言で表すことにした「サステナブル RC 造」の実現に関する技術確立が強く望まれている。

このため、日本建築学会 (AIJ) や土木学会 (JSCE) をはじめとする各種学術団体からは、合理的見知に基づき、RC 造における性能規定型の劣化対策を講じるための耐久性に関する様々な予測手法が整備されている。しかし、AIJ 耐久設計指針<sup>1)</sup>、JSCE 示方書維持管理編<sup>2)</sup>において、コンクリートのアルカリシリカ反応による対策が重要視され、様々な対策方針を指示しているが、コード化された具体的な材齢関数による劣化進行の予測方法は提示されていない。

本研究は、既存の反応性骨材の化学反応速度論に基づくアルカリシリカ反応の膨張率進行の予測手法について、4 種類の反応性骨材の JIS 化学法と JIS モルタルバー法に基づく試験結果を参照・比較し、その既存予測手法の適用性を検討することを目的とする。

## 2. 既往のアルカリシリカ反応の進行の予測手法の概要

### 2.1 調査・分析に基づくアルカリシリカ反応の進行の予測手法の紹介

新設 RC 造に対しては、アルカリ総量規制や反応性骨材の事前チェックにより、アルカリシリカ反応を起こさせない予防対策が講じられているが、その予防対策が導入される以前の 1950~70 年代頃の高度成長期の既設 RC 造等では、経費や環境問題から建て替えによる新設化が

困難で、維持管理により供用期間を延長して行かざるを得ない状況が多々ある。

アルカリシリカ反応の進行が顕在化すると、その反応に伴う膨張ひずみにより、ひび割れ発生とともに、構造物中の鉄筋曲げ加工部や圧接部等の損傷や欠陥が入りやすい箇所で破断に至ることもある。このため、アルカリシリカ反応性の膨張ひずみ進行の予測技術は、既設 RC 造の維持管理や耐用限界評価に対して有意義になると考えられる。しかし、現状の予測技術は、精度の良い予測が困難である。

対象の既設 RC 造が、将来、アルカリシリカ反応を生じるかは、まず使用されている骨材が反応性骨材かどうかの確認が必要になる。構造物を調査して得た使用材料や調査の品質データとともに、構造物の表層のひび割れ発生有無やひび割れパターンを観察し、また、コンクリートコアを切り出して、コア表面の使用骨材について、偏光顕微鏡を用いての反応性骨材の有無、反応リムの形成、シリカゲルの滲出、などが生じていないか分析し確認することになる。

さらに、アルカリシリカ反応は、水分が多いところで著しく生じるので、構造物の表層や周囲環境の気象状況、構造物の温度変化、湿度変化、含水率変化などを測定して、実環境条件を確認することになる。

アルカリシリカ反応の進行性を実験的に予測するには、切り出したコンクリートコアによる残存膨張量試験となる JCI-DD2「アルカリシリカ反応を生じたコンクリート構造物のコア試料による膨張率の測定方法」の評価方法がある。残存膨張量試験を行うためのコアを採取・運搬するには、コアの含水状態を変化させない対策を行う必要がある。なお、この試験で得られた膨張率は、促進養生の結果であり、実構造物の性能と直接対応付けするには注意が必要になる<sup>3)</sup>。

\*1 大阪工業大学 工学部建築学科准教授 博(工) (正会員)

\*2 日本建築総合試験所 工修 (正会員)

## 2.2 古澤・魚本らのアルカリシリカ反応の進行の予測手法の概要

AII 耐久設計指針<sup>1)</sup>では、古澤・魚本ら<sup>4)5)</sup>の化学反応速度論に基づくアルカリシリカ反応モデルの予測手法の概要を抄録している。しかし、この文献<sup>1)</sup>では、予測手法の具体的な解説はなされていない。

古澤・魚本ら<sup>4)5)</sup>は、有害な化学反応の発生有無を表すアルカリシリカゲルの形成反応率と、その化学反応が生じた後の供用期間中の有害な膨張の発生有無を表すアルカリシリカゲルの膨張率を、アルカリシリカ反応の進行に関する評価指標として、予測手法を構築している。

そのアルカリシリカ反応を生じたコンクリートの膨張率の予測手法は、アルカリシリカゲルの形成反応率、単位反応性骨材量、膨張低減係数をパラメータとした関数から予測し、また、使用骨材のアルカリシリカゲルの形成反応率は、反応性骨材中のアルカリ拡散係数、ペースト部の間隙水のアルカリ濃度、反応性骨材の寸法および材齢をパラメータとした関数から予測している。

古澤・魚本らの文献<sup>4)5)</sup>では、コンクリート中の骨材表面から内部方向へのアルカリシリカ反応速度は、アルカリの拡散によって支配されるとし、フィックの法則を簡略化した反応層が骨材内部方向に成長する拡散モデルを適用している。なお、反応の進行に伴い間隙水中のアルカリ濃度  $C$  は反応の進行によって低下する変数で、反応生成物総量  $T_{pr}$  の関数で表現している。

$$\frac{dx}{dt} = C \cdot \frac{k}{x} \quad ; \quad C = f(T_{pr}) \quad (1)$$

ここで、 $t$  : 時間(hr)

$x$  : 骨材表面からの一次元反応量(cm)

$C$  : ペースト部アルカリ濃度(mol/l),  $T_{pr}$  は式(4)参照

$k$  : アルカリの拡散係数(cm<sup>2</sup>/hr)

拡散方程式(1)は、アルカリ濃度  $C$  が反応の進行度の関数から非線形モデルになるが、反応期間中に  $C$  が大きく低下しない場合、時間  $t=0$  で骨材表面からの一次元反応量  $x=0$  の初期条件から、 $x$  について両辺を積分でき、反応量  $x$  はアルカリ濃度  $C$  と材齢  $t$  の関数となる。これは、JIS A 1145 化学法の溶出試験等では、アルカリ量に対する反応性骨材量の比率が小さく、反応が十分に進行してもアルカリ濃度の低下はあまり大きくないことを根拠としている<sup>4)</sup>。このため、式(1)から式(2)の解が導出できる。

$$x = \sqrt{2 \cdot k \cdot C \cdot t} \quad (2)$$

アルカリシリカゲルの形成については、反応性骨材粒子 1 個を球形にモデル化して、その球表面が反応によって反応層の厚みを形成し、その層厚み分から反応性骨材半径を小さくする。これをアルカリシリカゲル形成の体

積反応率 $\alpha_i$ として、反応量  $x$  の関数式(3)で表す。

$$\alpha_i = 1 - \left(1 - \frac{x}{r_i}\right)^3 = 1 - \left(1 - \frac{\sqrt{2 \cdot k \cdot C \cdot t}}{r_i}\right)^3 \quad (3)$$

ここで、 $\alpha_i$  : コンクリート中の反応性骨材の半径  $r_i$  のアルカリシリカゲル形成の体積反応率

$r_i$  : 反応性骨材の半径(cm)

ペースト部の間隙水のアルカリ濃度  $C$  は、JIS A 1145 化学法のアルカリとシリカの溶出実測値を利用して、反応生成物総量  $T_{pr}$  の関数として式(4)で表す。

$$C = f(T_{pr}) = \left( \frac{C_e - C_{cons} - T_{pr} \cdot RS}{W_f} \right) \quad (4)$$

ここで、 $C_e$  : 有効アルカリ量初期値(mol/l)。モルタル単位量あたりのアルカリ総量のモル数  $R_m$  (mol/l)の50%とする。 $C_e = 0.5 \times R_m$ で、 $R_m =$ (単位セメント量[g/l]) $\times$ (Na<sub>2</sub>O換算アルカリ量[%]/100) $\times 2 /$ (Na<sub>2</sub>O分子量62)から求める。

$C_{cons}$  : 初期アルカリ消費量(mol/l)。全骨材に占める各粒径の骨材割合から求めた単位モルタルあたりの反応性骨材の表面積の総和  $S_a$  (cm<sup>2</sup>)を、骨材粒子の真比重を2.55として、JIS 化学法における半径  $1.125 \times 10^{-2}$ (cm)の球形粒子1000gの総表面積  $S_b$ (cm<sup>2</sup>)で除して、JIS 化学法の溶出試験で求められるアルカリ  $R_c$ (mmol)とシリカ  $S_c$ (mmol)の関係の  $R_c$ 側切片  $R_{cint}$ (mmol)を掛けて求める。 $C_{cons} = S_a / S_b \times (R_{cint} / 1000)$ となる。

$T_{pr}$  : 反応生成物総量(mol/l)。 $T_{pr} = A \cdot \sum \alpha_i \cdot \beta_i /$ (SiO<sub>2</sub>分子量60.08)で求める。 $A$ は式(5)参照  
 $RS$  : 化学法の溶出試験から求められる  $R_c$ (mmol)と  $S_c$ (mmol)の関係の直線部の勾配。

$W_f$  : 単位モルタルあたりの自由水量(l/l)。理論的な水和水量をセメント質量の28%として、単位水量から差し引く。 $W_f =$ (単位水量[g/l]) $-$ (単位セメント量[g/l] $\times 0.28$ )/1000となる。

コンクリートの膨張率 $\varepsilon$ は、形成反応率 $\alpha_i$ 、単位反応性骨材量  $A$ 、膨張低減係数  $h = 3h'$ の関数式(5)で表す。

$$\begin{aligned} \varepsilon &= E \cdot A \cdot \sum \beta_i \cdot \left( k_1 \alpha_i - \frac{h' 4\pi r_i^2}{(4\pi r_i^3)/3} \right) \\ &= E \cdot A \cdot \sum \beta_i \cdot \left( k_1 \alpha_i - \frac{3h'}{r_i} \right) = E(T_{pr} - T_{er}) \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、 $\varepsilon$  : 膨張率(%)

$A$  : 単位反応性骨材量(g/l)

$\beta_i$  : 全反応性骨材中の半径  $r_i$  の反応性骨材比率

E：膨張に寄与する生成物量から膨張率に換算する係数(%・l/mol)  
 $k_1$ ：反応率から生成物量の換算係数で、 $\text{SiO}_2$ 分子量の逆数( $k_1=1/60.08$ ) (mol/g)  
 $h=3h'$ ：単位反応比表面積から膨張低減容量に換算する膨張低減係数(mol・cm/g)  
 $T_{er}$ ：総膨張低減容量(mol/l)。  $T_{er}=A \cdot \sum \beta_i \cdot (h/r_i)$  で、  $h=3h'$

以上の文献<sup>4)5)</sup>の予測手法は、JIS A 1145 化学法のアルカリ/シリカ比  $RS=R_c/S_c$  を利用し、また、ある反応性骨材置換率条件下の JIS A 1146 モルタルバー法の膨張率 $\epsilon$ を参照して E と  $h=3h'$ を決めて、その他の反応性骨材置換率のモルタルバー法による膨張率 $\epsilon$ を予測する。

古澤・魚本の予測手法は、JIS 化学法と JIS モルタルバー法の試験結果が必要で、現状では、既設 RC 造の評価に対して、直接適用は困難と思われる。しかし、JIS 試験方法は、長年、全国で広く実施されており、それらの試験結果が整備・データベース化されれば、予測に必要な反応性骨材の諸パラメータを得られる可能性がある。

そして、既設 RC 造の調合や環境条件等のプロファイルが調査結果で明らかな場合、予測手法を適用して、既設 RC 造が現時点まで受けたアルカリシリカ反応の概要を知ることができる。ついで、式中の材齢を増加させて、将来の変化値を予測できることになる。プロファイルとの比較には、膨張率だけでなく、アルカリ濃度や反応生成物総量等の各種パラメータが利用できることになる。

現時点までの予測結果が、詳細調査によって現時点までの既設 RC 造と違った場合は、得られた予測値と調査値を比較して、予測値が調査値と同じになる比率を算出する。現時点から将来の変化を予測するときは、算出した予測値に、この比率を乗じる等で、既設 RC 造のみかけ予測値を得ることができ、維持管理の対応に利用していくことが考えられる。

このような考えから、本研究では、まず基礎的な段階として、古澤・魚本の予測手法をトレースし、文献<sup>4)5)6)</sup>であまり触れられていない予測手法の使い勝手と、その使い勝手に対する問題点を検討することにした。

### 3. JIS 化学法と JIS モルタルバー法による実験結果を参照した古澤・魚本らの既存予測手法の適用性の検討

#### 3.1 表計算ソフトのセル計算ワークシートによる数値解析手法の開発例

具体的な関数式によるモデルを組み上げても、数値解析手法が具体化されなければ、予測値を得ることができない。アルカリシリカ反応の進行を予測するための古澤・魚本らの既存予測手法は、原論文<sup>4)5)6)</sup>を読み込んで不明な点が多々ある。また、拡散方程式(1)あるいは式

(2)を解くには、非線形計算が必要なことを明示している。

この既存予測手法を、初・中級技術者にも手軽に扱えるよう、excel 表計算ソフトのセル計算ワークシートのみで実行できる数値解析手法を開発した。式(2)の非線形計算は、excel のツール・オプションにある再計算を実行させる反復計算コマンドを利用した。図-1、図-2 および図-3 に、開発したセル計算ワークシートを例示する。

#### 3.2 JIS 化学法と JIS モルタルバー法に使用した骨材の品質と数値解析の入力データ取得の検討

表-1 に、実験で使用した骨材品質を示す。実験は 4 シリーズで、化学法とモルタルバー法を実施している。各実験シリーズとも、反応性鉱物骨材を標準砂と 10~20% 刻みで置換しており、また、使用した反応性骨材の反応性鉱物は、文献<sup>7)</sup>にて、粉末 X 線回折分析(XRD)による同定結果を報告している。

表-2 と図-4 に、実験シリーズ 4 のクリストパライト TS を例にして、JIS 化学法の実験結果から  $R_c/S_c$  関係の傾き RS と y 切片  $R_{cint}$  と拡散係数 k の算出概要を示す。JIS 化学法は、反応性骨材粒子を 24 時間 80℃で反応促進させるので、80℃の拡散係数 k が得られる。

ここで、JIS モルタルバー法では 40℃で試験を行うことを標準としており、アレニウスプロットを利用して、80℃拡散係数から 40℃拡散係数に変換した。変換に必要な活性化エネルギー  $E_a$  は、文献<sup>6)</sup>にて 15000~20000 cal/mol の範囲が指摘されており、また、文献<sup>5)</sup>の記載データを分析すると  $E_a$  の平均が 16111 cal/mol を得られた。

モルタルバー試験条件		セメント質量比																																	
単位水量	300 g/l	0.5	←JIS																																
単位セメント量	600 g/l	1	←JIS																																
W/C	50 %																																		
単位骨材量	1350 g/l	2.25	←JIS																																
反応性骨材置換率	0.8																																		
<table border="1"> <thead> <tr> <th>調合</th> <th>密度</th> <th>単位量</th> <th>絶対容積</th> </tr> <tr> <th>チェック</th> <th>g/cm3</th> <th>g/l</th> <th>cm3/l</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>水</td> <td>1</td> <td>300</td> <td>300.0</td> </tr> <tr> <td>セメント</td> <td>3.16</td> <td>600</td> <td>189.9</td> </tr> <tr> <td>無反応細骨材(表乾)</td> <td>2.60</td> <td>270</td> <td>103.8</td> </tr> <tr> <td>反応性細骨材(表乾)</td> <td>2.57</td> <td>1080</td> <td>420.2</td> </tr> <tr> <td>合計</td> <td></td> <td>2250</td> <td>1014.0</td> </tr> </tbody> </table>				調合	密度	単位量	絶対容積	チェック	g/cm3	g/l	cm3/l	水	1	300	300.0	セメント	3.16	600	189.9	無反応細骨材(表乾)	2.60	270	103.8	反応性細骨材(表乾)	2.57	1080	420.2	合計		2250	1014.0				
調合	密度	単位量	絶対容積																																
チェック	g/cm3	g/l	cm3/l																																
水	1	300	300.0																																
セメント	3.16	600	189.9																																
無反応細骨材(表乾)	2.60	270	103.8																																
反応性細骨材(表乾)	2.57	1080	420.2																																
合計		2250	1014.0																																
<table border="1"> <tbody> <tr> <td>理論的な水和水量</td> <td>28</td> <td>セメント質量wt%</td> <td></td> </tr> <tr> <td>単位モルタルあたりの自由水量</td> <td>132 g</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>単位モルタルあたりの自由水量</td> <td>0.132 l</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Na2O分子量</td> <td>62.0</td> <td>g/mol</td> <td>Na原子量 23.0</td> </tr> <tr> <td>Na2O換算アルカリ量</td> <td>1.4 %</td> <td></td> <td>O原子量 16.0</td> </tr> <tr> <td>モルタル単位量あたりアルカリのモル数</td> <td>0.271</td> <td>mol/l</td> <td></td> </tr> <tr> <td>間隙水中のアルカリ濃度</td> <td>2.053</td> <td>mol/l</td> <td></td> </tr> <tr> <td colspan="4">↑セメント中アルカリがすべて水溶性アルカリでない</td> </tr> </tbody> </table>				理論的な水和水量	28	セメント質量wt%		単位モルタルあたりの自由水量	132 g			単位モルタルあたりの自由水量	0.132 l			Na2O分子量	62.0	g/mol	Na原子量 23.0	Na2O換算アルカリ量	1.4 %		O原子量 16.0	モルタル単位量あたりアルカリのモル数	0.271	mol/l		間隙水中のアルカリ濃度	2.053	mol/l		↑セメント中アルカリがすべて水溶性アルカリでない			
理論的な水和水量	28	セメント質量wt%																																	
単位モルタルあたりの自由水量	132 g																																		
単位モルタルあたりの自由水量	0.132 l																																		
Na2O分子量	62.0	g/mol	Na原子量 23.0																																
Na2O換算アルカリ量	1.4 %		O原子量 16.0																																
モルタル単位量あたりアルカリのモル数	0.271	mol/l																																	
間隙水中のアルカリ濃度	2.053	mol/l																																	
↑セメント中アルカリがすべて水溶性アルカリでない																																			
<table border="1"> <tbody> <tr> <td>間隙水中に検出されるアルカリ</td> <td>0.5</td> <td>→アルカリ総量の50%と仮定</td> </tr> <tr> <td>単位モルタルあたり有効アルカリ初期値</td> <td>0.136</td> <td>mol/l</td> </tr> <tr> <td>アルカリ初期濃度</td> <td>1.027</td> <td>mol/l</td> </tr> </tbody> </table>				間隙水中に検出されるアルカリ	0.5	→アルカリ総量の50%と仮定	単位モルタルあたり有効アルカリ初期値	0.136	mol/l	アルカリ初期濃度	1.027	mol/l																							
間隙水中に検出されるアルカリ	0.5	→アルカリ総量の50%と仮定																																	
単位モルタルあたり有効アルカリ初期値	0.136	mol/l																																	
アルカリ初期濃度	1.027	mol/l																																	
<table border="1"> <tbody> <tr> <td>単位反応性骨材量</td> <td>A</td> <td>1080 g/l</td> <td></td> </tr> <tr> <td>反応性骨材の半径</td> <td><math>r_i</math></td> <td>0.01125 cm</td> <td>←化学法平均粒子</td> </tr> <tr> <td>骨材粒子の真比重</td> <td></td> <td>2.55 g/cm3</td> <td></td> </tr> <tr> <td>真比重による体積</td> <td></td> <td>0.39 cm3/g</td> <td></td> </tr> <tr> <td>球の体積/表面積=半径/3=</td> <td>真比重の体積/総表面積</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>骨材1gあたりの総表面積</td> <td></td> <td>104.58 cm2/g</td> <td>=3*体積/半径</td> </tr> <tr> <td>球形粒子の質量</td> <td></td> <td>1000 g</td> <td></td> </tr> <tr> <td>骨材の総表面積</td> <td></td> <td>104575.1634 cm2</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>				単位反応性骨材量	A	1080 g/l		反応性骨材の半径	$r_i$	0.01125 cm	←化学法平均粒子	骨材粒子の真比重		2.55 g/cm3		真比重による体積		0.39 cm3/g		球の体積/表面積=半径/3=	真比重の体積/総表面積			骨材1gあたりの総表面積		104.58 cm2/g	=3*体積/半径	球形粒子の質量		1000 g		骨材の総表面積		104575.1634 cm2	
単位反応性骨材量	A	1080 g/l																																	
反応性骨材の半径	$r_i$	0.01125 cm	←化学法平均粒子																																
骨材粒子の真比重		2.55 g/cm3																																	
真比重による体積		0.39 cm3/g																																	
球の体積/表面積=半径/3=	真比重の体積/総表面積																																		
骨材1gあたりの総表面積		104.58 cm2/g	=3*体積/半径																																
球形粒子の質量		1000 g																																	
骨材の総表面積		104575.1634 cm2																																	

図-1 JIS モルタルバー法の調合条件と JIS 化学法のアルカリ初期濃度および反応性骨材の総表面積の設定

			合計	100	反応骨材量	合計 cm3					合計 cm2			
				100	1080	423.53					42501.0			
ふるい最大 mm	ふるい最小 mm	ふるい平均直径 mm	各質量分率 βi wt%	骨材質量 g/l	骨材体積 cm3	球形半径 ri cm	1個球体積 cm3	単位量中の骨材個数	1個球表面積 cm2	単位量中の総表面積 cm2				
4.75	2.36	3.555	10	108	42.35	0.17775	0.023524	1800	0.39704	714.8				
2.36	1.18	1.770	25	270	105.88	0.08850	0.002903	36467	0.09842	3589.2				
1.18	0.60	0.890	25	270	105.88	0.04450	0.000369	286850	0.02488	7138.1				
0.60	0.30	0.450	25	270	105.88	0.02250	4.77E-05	2219154	0.00636	14117.6				
0.30	0.15	0.225	15	162	63.53	0.01125	5.96E-06	10651939	0.00159	16941.2				
全骨材に占める各粒径の骨材の割合から求めた単位モルタルあたりの反応性骨材の表面積の総和						42501 cm2								
JIS化学法の実測値を利用→ Rc-Sc関係のRc側切片						Rcint	0 m_mol/l							
JIS化学法の実測値を利用→ Rc-Sc関係の直線部勾配						RS	0.2092							
JIS化学法の実測値を利用→ 反応速度定数						k=kint	1.67E-10 cm2/hr							
反応速度定数(通常はkpost=kint=k)						kpost	1.67E-10 cm2/hr ←遅延型反応性骨材を解析するときに設定。							
単位反応比表面積から膨張低減容量に換算の膨張低減係数						h'	2.55E-06							
膨張に寄与する生成物量を膨張量に換算係数						h=3h'	7.64E-06 mol·cm/g·l_mortar ←JISモルタルパー法実測膨張率から逆算							
単位反応性骨材量						E	1.3826 %·g_mortar/mol ←JISモルタルパー法実測膨張率から逆算							
						A	1080 g/l_mortar							
						SiO2分子量	g/mol		60.084	←	Si原子量	28.086 g/mol	O原子量	15.999 g/mol
						初期アルカリ消費量 Ccons	0 mol/l							

図-2 JIS モルタルパー法の骨材条件と JIS 化学法の Rc\_Sc 関係および拡散係数の設定

循環小数 ツール→オプション→計算方法→反復計算をチェック											
拡散係数変化 x^2(cm2)		拡散係数変化 x(cm)		反応骨材量を変更したら、必ず赤セルやその他の計算セルにマウスを充てて、何度かダブルクリックで、グラフの計算結果が滑らかになるまで、セルを再計算させること							
0.00000001		1.000E-04									
時間 dt	骨材表面から一次元反応量	反応期間の間除水のアルカリ濃度 C mol/l	反応生成物総量 Tpr mol/l mortar	半径Riの骨材の体積(質量)反応率	ふるい平均直径 mm				総膨張低減容量	膨張に寄与の生成物量	膨張量
25	dx^2 cm2	x^2 cm2	x cm	3.555	1.77	0.89	0.45	0.225	0.27614642	-0.276146421	0
0	0	0	0	0.17775	0.0885	0.0445	0.0225	0.01125	0	0	0
25	8.57E-09	8.57123E-09	9.25809E-05	0.16614575	0.00156173	0.003135055	0.006228	0.012293	0.0244856	0.27614642	-0.110000674
50	6.37E-09	1.49443E-08	0.000122247	0.21902629	0.00206182	0.004138243	0.008219	0.016211	0.0322462	0.27614642	-0.057120126
75	5.67E-09	2.06178E-08	0.000143589	0.2569619	0.00242148	0.004859528	0.009649	0.019023	0.0378037	0.27614642	-0.01918452
100	5.17E-09	2.57893E-08	0.000160591	0.28711856	0.00270794	0.005433878	0.010787	0.02126	0.0422158	0.27614642	0.010972137
125	4.77E-09	3.05619E-08	0.00017482	0.31231375	0.00294764	0.005914394	0.011739	0.023129	0.0458979	0.27614642	0.036167327
150	4.44E-09	3.50012E-08	0.000187086	0.33400162	0.00315425	0.006328503	0.01256	0.024738	0.0490646	0.27614642	0.057855195
175	4.15E-09	3.91535E-08	0.000197872	0.35304852	0.0033359	0.006692555	0.01328	0.026152	0.0518433	0.27614642	0.076902095
200	3.9E-09	4.30538E-08	0.000207494	0.37001957	0.00349792	0.007017222	0.013923	0.027412	0.0543175	0.27614642	0.093873149
225	3.68E-09	4.67296E-08	0.00021617	0.38530735	0.00364401	0.007309924	0.014503	0.028547	0.0565449	0.27614642	0.109160926

図-3 反復計算コマンドを組み込んだセル計算ワークシートの作成例と解析結果例

表-1 JIS 化学法と JIS モルタルパー法の実験に使用した骨材の品質

シリーズ	岩石種	反応性鉱物	記号	密度 g/cm3		吸水率 %
				絶乾	表乾	
1	チャート	潜晶質石英	YR	2.60	2.64	1.83
	標準砂	-	SS	2.56	2.61	2.09
2	安山岩	火山ガラス	AS	2.64	2.68	1.38
	標準砂	-	SS	2.59	2.62	0.25
3	輝石安山岩	クリストパライト	HB	2.60	2.64	1.83
	標準砂	-	SS	2.56	2.61	2.09
4	輝石安山岩	クリストパライト	TS	2.54	2.57	1.35
	標準砂	-	SS	2.58	2.60	0.25

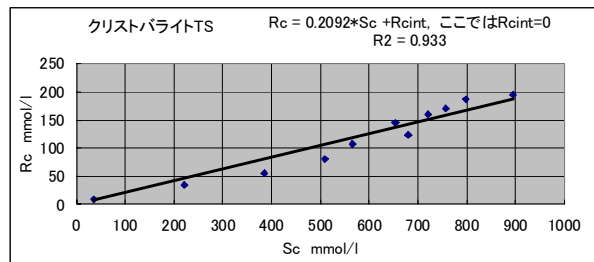


図-4 実験シリーズ4のクリストパライト TS の JIS 化学法結果を例とした傾き RS と切片 R<sub>cint</sub> の算定

表-2 実験シリーズ4のクリストパライト TS の JIS 化学法結果から各種入力データの取得例およびアレニウスプロットを利用して 40°C 拡散係数の算定

JIS 化学法	SiO2分子量	0	反応率 α	半径r(cm)	アルカリ濃度	t hr=	拡散係数	気体定数 Ra
R20	60.08	0.2092	Sc(ppm)を Sc(10^-6)の傾き	0.01125	C=Rc	24	80°C	1.9862 cal/K/mol
判定	Sc/Rc	(mmol/l)	(mmol/l)	(ppm=mg/l)	(mol/l)	√(tC)	k	活性化エネルギー-Ea 16000 cal/mol
TS0%	無害でない	3.84	9	36	2138	0.2092	2.1E-03	8.0E-06
TS10%	無害でない	6.45	34	221	13304	0.2092	1.3E-02	5.0E-05
TS20%	無害でない	6.91	56	386	23171	0.2092	2.3E-02	8.8E-05
TS30%	無害でない	6.34	80	509	30586	0.2092	3.1E-02	1.2E-04
TS40%	無害でない	5.28	107	566	34008	0.2092	3.4E-02	1.3E-04
TS50%	無害でない	5.50	124	680	40852	0.2092	4.1E-02	1.6E-04
TS60%	無害でない	4.50	145	654	39283	0.2092	3.9E-02	1.5E-04
TS70%	無害でない	4.50	160	720	43276	0.2092	4.3E-02	1.6E-04
TS80%	無害でない	4.44	170	757	45486	0.2092	4.5E-02	1.7E-04
TS90%	無害でない	4.27	187	799	47981	0.2092	4.8E-02	1.8E-04
TS100%	無害でない	4.58	195	895	53756	0.2092	5.4E-02	2.1E-04
平均k							3.08E-09	1.67E-10 ←平均k

このため、本研究では  $E_a=16000 \text{ cal/mol}$  を適用した。

次に、JIS モルタルバー法の実測膨張率 $\epsilon$  (図-5) を参照して、膨張率換算係数  $E$  および膨張低減係数  $h$  の算定方法を、実験シリーズ 4 のクリストバライト TS を例にして説明する。最初に、図-2 中の  $E$  および  $h$  を適当な値に設定して、図-3 の解析結果から時間  $t$  ごとの反応生成物総量  $T_{pr}$  を得る。実測膨張率 $\epsilon$ と同じ時刻の  $T_{pr}$  を抜き取り、図-6 をプロットし、式(5)の関係を近似して、実測膨張率の当てはまりの良い  $E$  および  $h$  を逆算する。当てはまりが悪いときは、回帰データの範囲を変更したり、反応性骨材量の異なる置換率条件での結果を適用して、繰り返し試行錯誤し、最終的な  $E$  と  $h$  を得る。この  $E$  と  $h$  の算出が、古澤・魚本の予測手法の適用で最も問題のある部分といえる。

#### 4. 開発した数値解析手法の解析結果および考察

図-7 に開発した数値解析手法による実験シリーズ 4 のクリストバライト TS の膨張率 $\epsilon$ の解析結果を示す。図-5 の実験結果を参照して、この TS の例では、最大実測膨張率の反応性骨材置換率 40% から  $E$  と  $h$  を定めた。そして、得られた  $E$  と  $h$  から反応性骨材のその他の置換率条件の予測結果を算定した。予測結果は、反応性骨材の置換率に対する実験結果の傾向を概ね表現しているが、実験結果が約 1000 時間強でほとんど膨張が頭打ちになっているのに対して、解析結果はペシマム条件までの反応性骨材置換率で頭打ちにならず膨張進行が続いている。図-6 の式(5)近似が正比例の関係であるが、実験結果はある  $T_{pr}$  で膨張が頭打ちになっている違いからによる。式(5)を膨張頭打ちになる関数表現に修正することで、限界膨張量の算定精度を向上できると思われる。

実験シリーズ 1~3 の解析結果を実験結果と合わせて、図-8~図-10 に示す。図-9 の火山ガラス AS と図-10 のクリストバライト HB はペシマム条件が解析できているが、図-8 の潜晶質石英 YR は、ペシマム実験結果と合致していない。

潜晶質石英 YR の実験結果は、500 時間あたりまで膨張があまり進行していないが、それ以降の時間で、膨張が増加している。これは、古澤・魚本が文献<sup>9)</sup>で指摘している遅延型膨張骨材の種類になると思われる。この場合、拡散係数を、前期拡散係数と後期拡散係数の 2 段階に分けて解析実施することになる。一方、今回は、この後期拡散係数を定めるための実験結果がなく、開発したセル計算ワークシートの数値解析手法では二段型拡散係数の解析は実行できるが、検証ができなかった。

少し材齢が進行してから膨張が増加するというこ

は、後期拡散係数が前期拡散係数より大きな値になると思われる。すなわち、現在、設定している拡散係数は小さく、そのため、解析上のアルカリ消費が進んでいないみかけ結果を得て、膨張率の進行予測結果が実験結果と不一致になったと思われる。二段型拡散係数の対応検証は、今後の課題としたい。

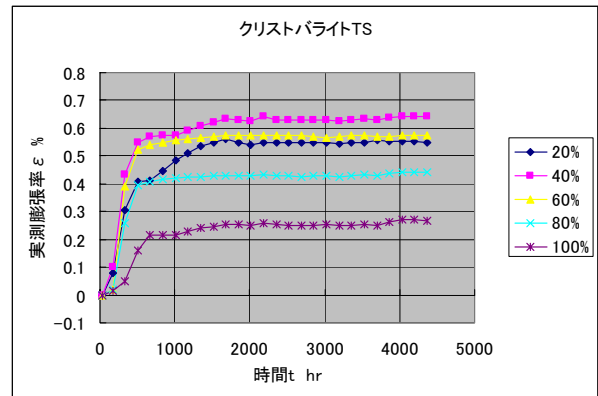


図-5 実験シリーズ 4 のクリストバライト TS の実測膨張率  $\epsilon$  の結果

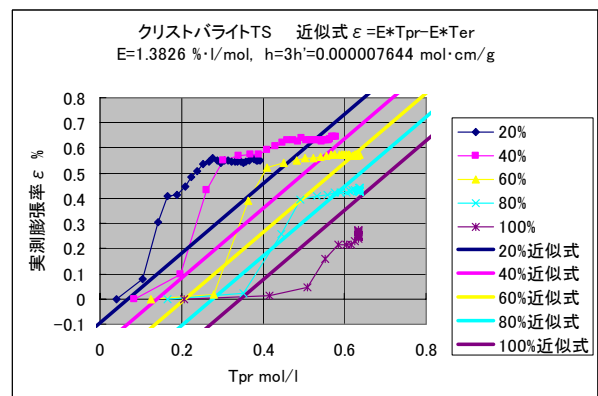


図-6 実験シリーズ 4 のクリストバライト TS の  $\epsilon$  と  $T_{pr}$  の関係

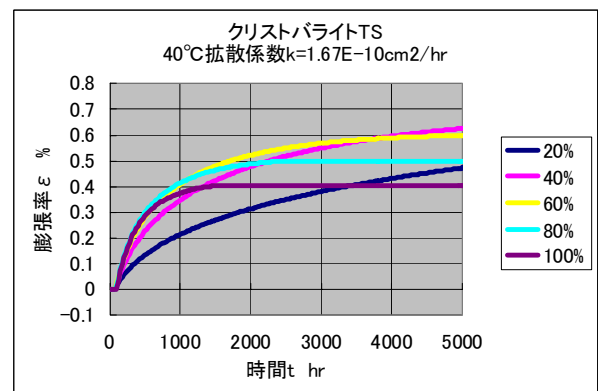


図-7 実験シリーズ 4 のクリストバライト TS の膨張率  $\epsilon$  の解析結果



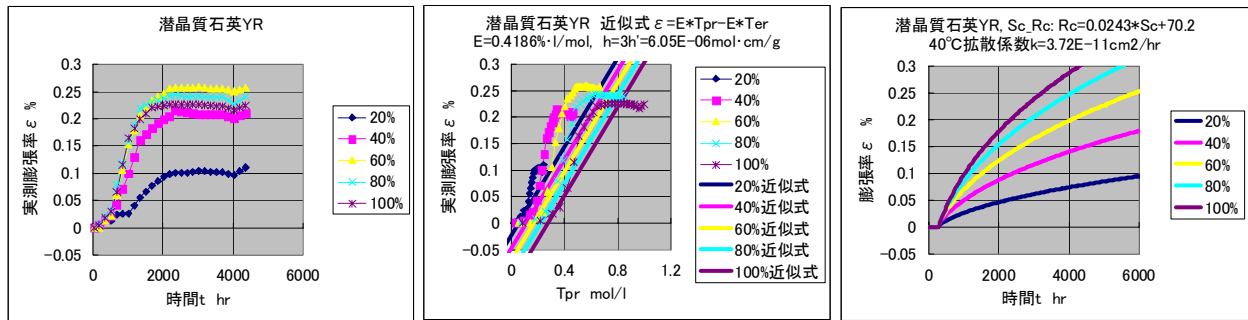


図-8 実験シリーズ1の潜晶質石英 YR の膨張率の解析結果

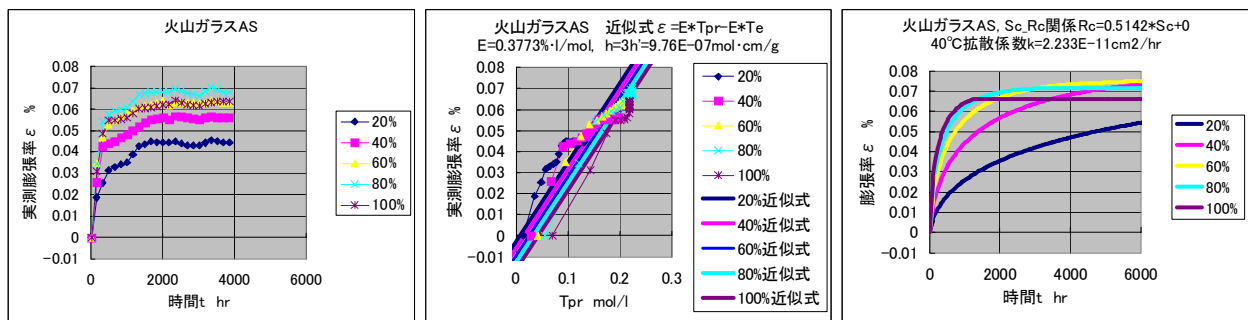


図-9 実験シリーズ2の火山ガラス AS の膨張率の解析結果

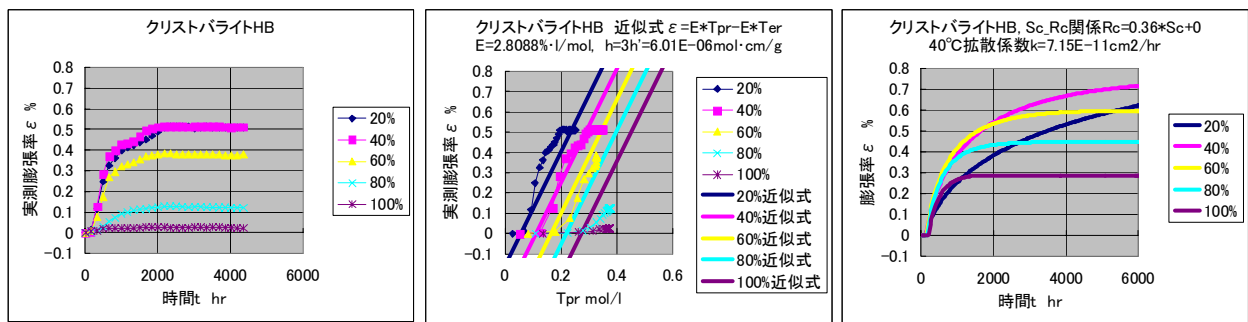


図-10 実験シリーズ3のクリストバライト HB の膨張率の解析結果

## 5. まとめ

本研究は、古澤・魚本らのアルカリシリカ反応の膨張率進行の予測手法について、その適用性を検討した。その結果、膨張率換算係数  $E$  および膨張低減係数  $h$  の算定に難点があること、表計算ソフトのセル計算ワークシートの数値解析手法を開発したことが示された。

## 謝辞

本研究の実験結果を提供頂きました大和ハウス工業(株)総合技術研究所の伊藤尚子さんに謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 日本建築学会編：鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針(案)・同解説, 2004.3
- 2) 土木学会編：コンクリート標準示方書2007年制定, 維持管理編, 2007.3

- 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, pp.267-271, 2008.9
- 4) 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, 1992.1
- 5) 古澤靖彦, 魚本健人：アルカリ・シリカ反応の進行を定量的に予測する新しい判定システム, コンクリート工学論文集, Vol.3, No.2, pp.15-25, 1992.7
- 6) 古澤靖彦, 魚本健人：アルカリシリカ反応に及ぼす環境要因の影響, セメント・コンクリート論文集, No.47, pp.402-407, 1993
- 7) 伊藤尚子, 二村誠二：反応性シリカ量による骨材の ASR 判定試験法に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.957-962, 2008