

アルカリシリカ反応の膨張メカニズムに関する研究

A Study on Expansion Mechanism of Alkali Silica Reaction

関口 達也†, 森野 奎二††, 岩月 栄治††

Tatsuya SEKIGUCHI, Keiji MORINO and Eiji IWATSUKI

Abstract : This paper describes expansion mechanism of the Alkali silica reaction (ASR). The reaction product is made of the reactive mineral (SiO_2) and alkali (Na^+ , K^+ , OH^-). It is known that the expansion of ASR changes by silica alkali ratio ($\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$) of the reaction product. It is not easy to investigate the property of the reaction product made by using rock aggregate. In the experiment, water glass cullet is used instead of the reaction product which is created by ASR of the reactive rock aggregate. As a result, expansion of mortar mixing water glass cullet of silica alkali ratio ($\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$) 3.6 became high, and expansion of mortar mixing water glass cullet including large amount of Al_2O_3 became low.

1. はじめに

アルカリシリカ反応(以下 ASR と称す)は、1938 年に Stanton により報告された¹⁾。我が国においては、1983 年に阪神高速道路橋で ASR によるコンクリートの劣化が顕在化して以来、コンクリートに使用する骨材に対しては、反応性のチェックが実施されてきた。その後、2003 年には、ASR による膨張によって、構造物中の鉄筋が破断する事例が報告され、材料から構造分野にまでこの問題が広がった。土木学会では、アルカリ骨材反応対策小委員会を設け「鉄筋破断と新たな対策」の報告を行い、ASR による劣化構造物の性能の回復、補修、補強工法の選定などについて提言を行っている²⁾。

ASR は、反応性鉱物、アルカリ、水の相互関係によって変化する³⁾。この中の反応性鉱物一つをみても、岩石に含まれている鉱物は、岩種によって存在形態が多様多様であり、例えば、火山岩には、火山ガラス、クリストバライト、トリジマイトを含んでおり、これらはマグマの性質、噴出状態や風化の程度によって変化する。また、堆積岩においても、反応性鉱物の存在形態は、堆積環境によって潜晶質石英やカルセドニーの状態が変化する。従って、コンクリート用骨材として使用した場合、ASR による反応は、多様である⁴⁾⁵⁾。このような岩石に含まれ

ている反応性鉱物は、セメント中の水酸化アルカリと反応して、反応生成物(いわゆる水ガラス)ができる。反応生成物は、シリカとアルカリの比率によって粘性、流動性が異なり、コンクリートの膨張量も異なるといわれている⁶⁾⁷⁾⁸⁾。このことは、ASR のメカニズムやベシマムを検討する上で重要である。しかし、天然の反応性骨材を用いた実験では、上述のように、反応性鉱物の存在形態が多様であるため、これらの生成物の性質を把握することは容易でない。

本研究では、反応生成物の代替として水ガラスカレット(以下カレットと称す)を混入したコンクリートの ASR 膨張挙動について検討を行った。その結果をもとに、 $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ の比率の異なる 9 種類のカレットを用いてモルタルを作製し、 $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ の違いによる ASR の膨張について検討した。また、カレットに含まれている Al_2O_3 の含有量によって、モルタルの膨張量に違いが現れたことから、この点についても検討を行った。

2. 実験方法

2.1 使用材料

コンクリートの使用材料を表 1 に示す。コンクリート供試体は、2003 年に作製され、貯蔵 6 年を経過しているものである。この供試体の材料は、セメントには普通ポルトランドセメント ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ 0.47%)、粗骨材には、砂岩とチャート Yo、細骨材には、川砂を使用している。反応生成物の

† 愛知工業大学大学院 建設システム工学専攻 (豊田市)

†† 愛知工業大学 工学部 都市環境学科 (豊田市)

代替として使用されていたものは、カレット (SiO₂/Na₂O 3.2) である。骨材のアルカリシリカ反応性試験(化学法)結果は図 1 に示す。

2007 年に作製したモルタルの使用材料を表 2 及び写真 1 に示す。セメントは、セメント協会の ASR 研究用普通ポルトランドセメント (Na₂Oeq 0.55%) を用いた。骨材は、化学法とモルタルバー法ともに無害と判定される粒径 0.15~0.075mm の光学硝子用珪砂を用いた。反応生成物の代替として使用したカレットは、SiO₂/Na₂O の比率の異なる 9 種類とした。塊状のカレットは、ハンマーと乳鉢で破碎し、粒径を 0.3mm~0.15mm に調整した。NaOH 試薬は、モルタルのアルカリ量を調整するために使用した。プロピオン酸カルシウムは、セメント水和物の OH イオンを低下させる機能があることから、セメントに含まれているアルカリ量 (Na₂Oeq 0.55%) を実質上少なくする目的で使用し、それが、モルタルの膨張挙動にどのような変化を生じるのかを検討した。

2・2 配合

2・2・1 コンクリートの示方配合

2003 年に作製されたコンクリートの示方配合を表 3 に示す。カレットは、粗骨材の質量の 0.5% を内割りで混入した。このコンクリートには、非反応性の砂岩を用いた。また、カレットを混入したコンクリートの比較用として、反応性のチャート Yo 使用コンクリートを作製した。

2・2・2 モルタルの配合

2007 年に作製したモルタルの配合を表 4 に示す。モルタルの配合は、セメント:(珪砂+カレット)の量を 1:2.25 とし、W/C は、70% とした。カレットの混入量は、珪砂の質量の 2.2% を内割りで混入した。モルタルのアルカリ量は、Na₂Oeq 0.55% に加え、NaOH 試薬を添加して 0.70% に調整した。また、アルカリ量が Na₂Oeq 0.55% のセメントに、プロピオン酸カルシウムをセメント質量の 0.4%、0.6%、0.8%、1.2% を外割りで添加した。

2・3 測定方法

2・3・1 コンクリートの膨張率測定

コンクリートの膨張率測定には、コンクリート立方体 (400×400×400mm) と、コンクリート角柱供試体 (100×100×400 mm) を用いた。各供試体のアルカリ量を表 5 に示す。コンクリート立方体の膨張率は、表面に 250mm 間隔で埋め込まれたコンタクトゲージによる方法で測定し

表 1 コンクリートの使用材料

種類	性質	産地
普通ポルトランドセメント	Na ₂ Oeq 0.47%、密度 3.15g/cm ³	
砂岩 (粗骨材)	密度 2.62g/cm ³ 、吸水率 0.92%	愛知県
チャートYo (粗骨材)	密度 2.63g/cm ³ 、吸水率 0.97%	岐阜県
川砂 (細骨材)	密度 2.59g/cm ³ 、吸水率 1.44%	愛知県
カレット	SiO ₂ /Na ₂ O 3.2 (粒径 5~2.5mm に調整)	

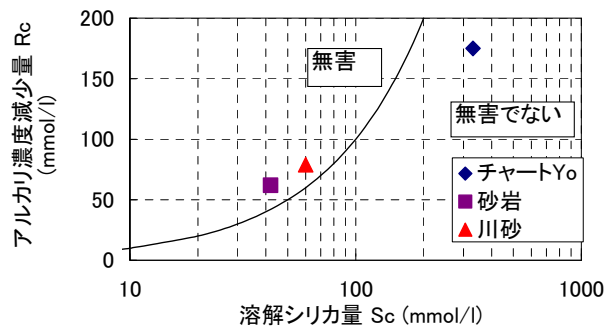


図 1 骨材のアルカリシリカ反応性試験(化学法)結果

表 2 モルタルの使用材料

種類	性質
普通ポルトランドセメント	密度 3.15 g/cm ³ 、Na ₂ Oeq 0.55%
光学硝子用珪砂	密度 2.65 g/cm ³ 、粒径 0.15mm 以下
水酸化ナトリウム	特級試薬
プロピオン酸カルシウム	特級試薬
カレット SiO ₂ /Na ₂ O の比率の異なる 9 種類	1.2
	2.6
	2.9
	3.4
	3.6
	4.5
	4.6
	4.7
	6.0



写真 1 反応生成物の代替として使用したカレット (左:破碎前、右:破碎後)

表 3 コンクリートの示方配合

種類	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量					
						水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	AE 減水剤 (ml/m^3)	カレット (kg/m^3)
						(kg/m ³)					
砂岩+カレット	20	8	4.5	51.3	41	154	300	749	1081	750	5.41
チャートYo									1095		

表 4 モルタルの配合

配合比率(質量比)	セメント : 水 : (珪砂+カレット) 1 : 0.7 : 2.25	
カレットの混入量	珪砂の質量の2.2%内割り	
供試体寸法(mm)	28 × 28 × 140	
モルタルのアルカリ量(%) (Na ₂ Oeq)	0.55	0.55
	0.70	
セメント質量に対してのプロピオン酸カルシウム添加量(%)	添加なし	0.4, 0.6, 0.8, 1.2

表 5 コンクリートのアルカリ量

種類	コンクリート立方体	コンクリート角柱供試体
砂岩+カレット	3kg/m ³	3kg/m ³
		6kg/m ³
チャートYo	9kg/m ³	3kg/m ³
		9kg/m ³

た(図 2)。コンクリート立方体は、脱型後 2 年間は 40℃ 湿潤貯蔵し、その後 4 年間は、屋外貯蔵とした。コンクリート角柱供試体は、40℃ 湿潤貯蔵とした。

2・3・2 モルタルの膨張率測定

モルタルの膨張率測定用供試体の寸法は、28 × 28 × 140mm とした。供試体は、脱型後 40℃ 湿潤貯蔵とした。

2・4 反応生成物の走査電子顕微鏡による観察

セメントペーストにカレットを混入した硬化体 (Na₂Oeq 0.55%) を作製し、内部の生成物の生成状況を走査電子顕微鏡によって観察・検討した。

2・5 NaOH 溶液に浸せきしたカレットの反応状況の観察及び ICP 法による生成物の分析方法

カレットの反応状況の目視観察としては、以下の方法によった。直径 30mm、長さ 120mm の試験管に、カレット 5g を 0.5 及び 1mol/l の NaOH 溶液 25ml に入れ、その試験管を 40℃ に保たれた水中に浸した。試験装置を写真 2 に示す。また、試験管の内部で生成された生成物を ICP 発光分光分析法により分析した。その方法は、生成物を王水とフッ化水素を用いて分解し、それをプラズマ発光分光分析装置に入れ、Si、Na、K、Al などを測定した。

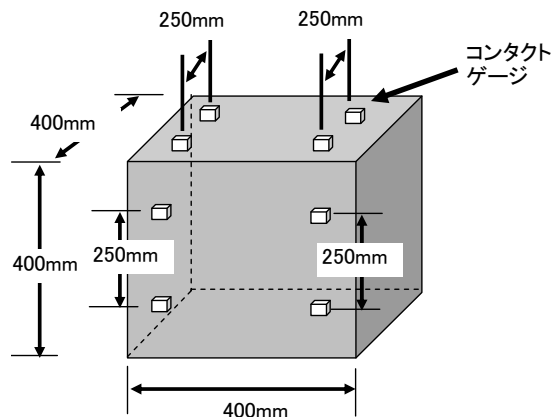


図 2 コンクリート立方体の形状

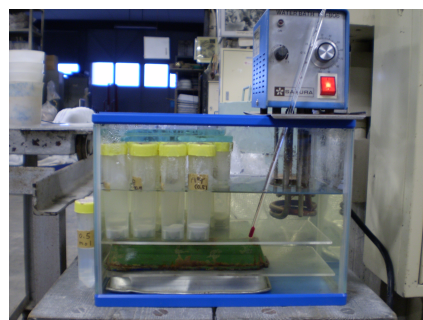


写真 2 NaOH 溶液に浸せきしたカレットの試験装置

3. 結果及び考察

3・1 カレットを混入したコンクリートの膨張挙動

3・1・1 カレットを混入したコンクリート立方体の膨張挙動及びひび割れの観察

カレットを混入したコンクリート立方体の膨張挙動を図 3 に示す。カレットを混入したアルカリ量 3kg/m³ のコンクリート立方体では、1700 日で 0.5% の膨張を示し、チャート Yo を用いたアルカリ量 9kg/m³ のコンクリート立方体では、0.25~0.35% の膨張を示した。これらの膨張挙動は両者ともに、類似した結果となった。また、カレットを混入したコンクリート立方体を目視観察すると、チャート Yo を用いたコンクリート立方体と同じ亀甲状・地図状のひび割れを観察することができた(写真 3)。

これらの両供試体とも、測定開始から 2 年後に屋外で貯蔵しており、実際の構造物と同じ環境で貯蔵していることから、コンクリートにカレットを混入した場合でも、岩石鉱物の反応による膨張と同様の膨張がみられた。

次に、コンクリート立方体からコアを採取し、コンクリート内部の状況を観察した。カレットを混入したコンクリート立方体から採取したコアを目視観察すると、白色の生成物が見られた(写真 4)。また、カレットを混入したコンクリートでは、骨材(砂岩)による膨張ではなく、反応生成物による膨張が確認できた。

3・1・2 コンクリート角柱供試体の膨張挙動

6 年間湿潤貯蔵したコンクリート角柱供試体の膨張挙動を図 4 に示す。カレットを混入したアルカリ量 $3\text{kg}/\text{m}^3$ のコンクリートでは、0.5%の膨張を示したが、カレットを混入したアルカリ量 $6\text{kg}/\text{m}^3$ のコンクリートでは、0.3%の膨張であった。カレットを混入したコンクリートは、アルカリ量が高くなることで、0.2%程度膨張率が低くなった。従って、外部から供給されるアルカリによって、反応生成物の $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ の比率が変化し、膨張量に差が現れたと考えられる。

以上のことから、カレットを混入したコンクリートでは、シリカ質のチャートを用いたコンクリートと、同様の膨張を確認することができた。また、カレットを混入したコンクリートのアルカリ量を $3\text{kg}/\text{m}^3$ から $6\text{kg}/\text{m}^3$ に変えたことで膨張量が減少した。これらのことから、生成物の $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ の比率が膨張に大きく関係しているといえる。そこで $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ の異なる 9 種類のカレットを用いてモルタルを作製し、シリカ・アルカリ比 ($\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$) が膨張に及ぼす影響について検討した。

3・2 シリカ・アルカリ比の異なるカレットを混入したモルタルの膨張挙動

3・2・1 アルカリ量 0.55%($2.9\text{kg}/\text{m}^3$)及び 0.70%($3.7\text{kg}/\text{m}^3$)のモルタルの膨張挙動

カレットを混入したアルカリ量 0.55% ($2.9\text{kg}/\text{m}^3$) 及び 0.70% ($3.7\text{kg}/\text{m}^3$) のモルタルの膨張挙動を図 5 に示す。膨張挙動は、アルカリ量 0.55%、0.70%ともに、同じ傾向を示した。 $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$, 2.6 及び 2.9 は、貯蔵 14 日目から膨張を始め、貯蔵 160 日で横這いとなった。 $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$, 3.6 は貯蔵 28 日目から膨張を示し、貯蔵 1 年においても膨張を示している。 $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$, 4.5~6.0 は、前述と比べて遅く、貯蔵 50 日目から膨張を示し、貯蔵 1 年においても膨張を示している。これらのことから、 $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ の比率が 2.6 では、膨張開始時期が早い。また、

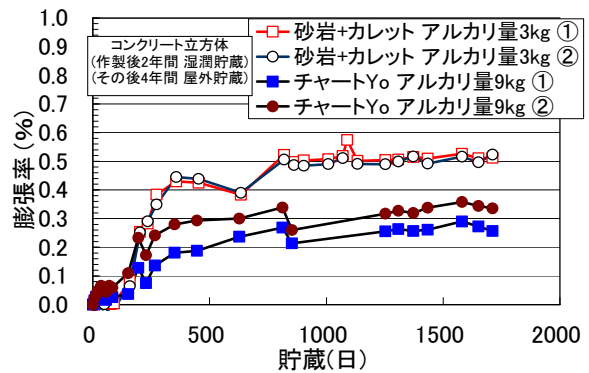


図 3 コンクリート立方体の膨張挙動



写真 3 コンクリート立方体のひび割れ状況 (左:カレット $3\text{kg}/\text{m}^3$ 、右:チャート Yo $9\text{kg}/\text{m}^3$)

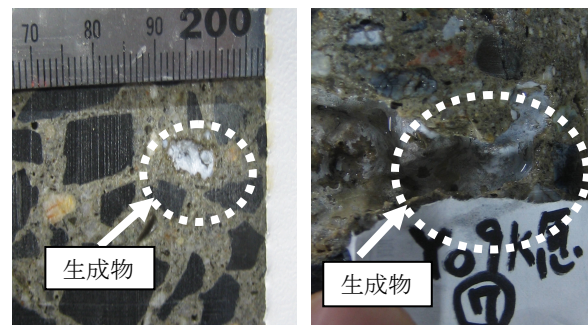


写真 4 コアの外觀の様子 (左:カレット $3\text{kg}/\text{m}^3$ 、右:チャート Yo $9\text{kg}/\text{m}^3$)

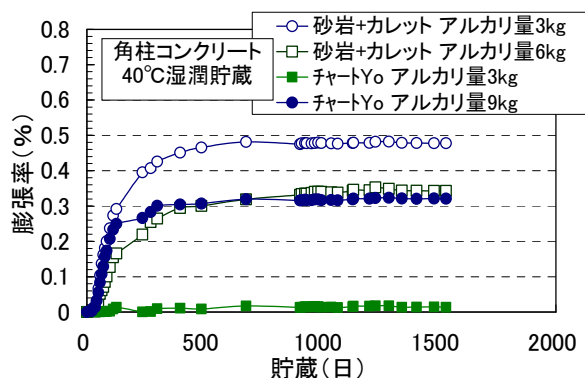


図 4 コンクリート角柱供試体の膨張挙動

アルカリシリカ反応の膨張メカニズムに関する研究

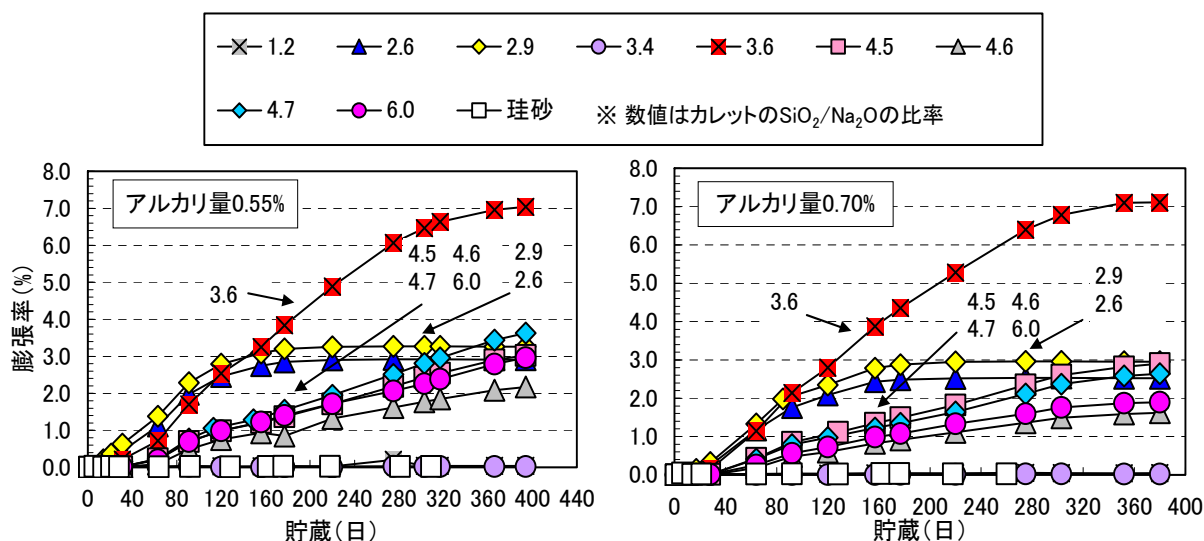


図5 カレットを混入したアルカリ量 0.55%と 0.70%のモルタルの膨張挙動

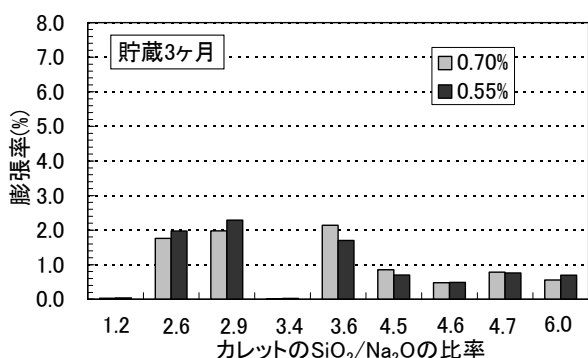


図6 貯蔵3ヶ月のモルタルの膨張量

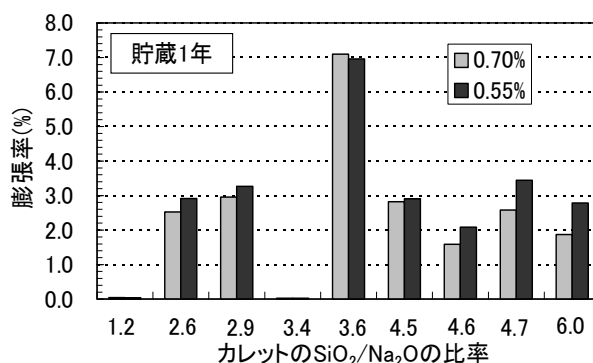


図7 貯蔵1年のモルタルの膨張量

$\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ の比率が 4.5~6.0 で、膨張開始時期は遅いが、膨張を長期間継続する結果となった。

貯蔵 3 ヶ月のモルタルの膨張率を図 6 に示す。図で、 $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ 、2.6、2.9 及び 3.6 は、アルカリ量 0.55% のときに $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ 、2.9 が最大膨張を示しており、アルカリ量が 0.70% になると最大膨張は $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ 、3.6 に移動している。つまり、モルタルのアルカリ量を増加させたことにより、反応生成物の $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ の比率が低くなったことで膨張量に変化が現れたといえる。このことから、貯蔵 3 ヶ月時点において、膨張量に及ぼすカレットの $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ の比率は外部のアルカリと密接な関係を示していることがわかる。

貯蔵 1 年のモルタルの膨張率を図 7 に示す。アルカリ量 0.55% と 0.70% とともに最も高い膨張を示したのは、 $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ 、3.6 であった。遅れて膨張を示していた $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ 、4.5~6.0 は、 $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ 、2.6 及び 2.9 と同等の膨張率となっている。このことから、反応生成物の $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ の比率は 3.6 付近で最も高い膨張を示すとい

える。

次に、図 6、図 7 から、 $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ 、3.4 では、他の供試体と比べて膨張率が極端に低くなっており、また、4.6 では、前後の 4.5 と 4.7 より低くなっており、特異な状態を示している。そこで、カレットの化学成分を分析した結果を表 6 に示す。表を見てみると、 $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ 、3.4 は Al_2O_3 の含有量が 7.8% と突出しており、また、 $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ 、4.6 の場合においては、1.7% と他に比べて多い。これらの Al_2O_3 量の全体的な傾向を示すと図 8 のようになる。カレットの Al_2O_3 の含有量が高くなるほど膨張率が低くなっていることから、 Al_2O_3 が膨張に関与していると指摘した既報⁶⁾の結果が再確認されたともいえる。

これらの膨張率測定に使用したモルタルには白色の生成物が見られ、その生成量に相違があったため、その様子を写真 5 に示す。 $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ の比率の低いモルタルで、白色の生成物が多く見られたのは、水ガラス溶液では、 SiO_2 の少ないほうが、粘性が低いので、表面に移動しやすいからと考えられる。

表 6 カレットの化学組成

反応生成物	カレット									
SiO ₂ /Na ₂ Oの比率	1.2	2.6	2.9	3.4	3.6	4.5	4.6	4.7	6.0	
SiO ₂ (%)	41.5	65.2	68.9	68.9	74.4	78.3	78.5	79.3	83.2	
Na ₂ O (%)	34.1	25.5	24	20.1	20.6	17.4	17	16.8	13.9	
Al ₂ O ₃ (%)	0.8	0.3	0.3	7.8	0.4	0.4	1.7	0.3	0.4	
CaO (%)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	
MgO (%)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	
K ₂ O (%)	0.8	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	
BaO (%)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	
Sb ₂ O ₃ (%)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	
P ₂ O ₆ (%)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	
Cl (%)	0.3	0.4	0.8	0.3	0.3	0.4	0.3	0.3	0.3	
1000℃強熱減量 (%)	22.4	8.4	5.6	2.7	4.2	3.2	2.3	3.1	2.0	

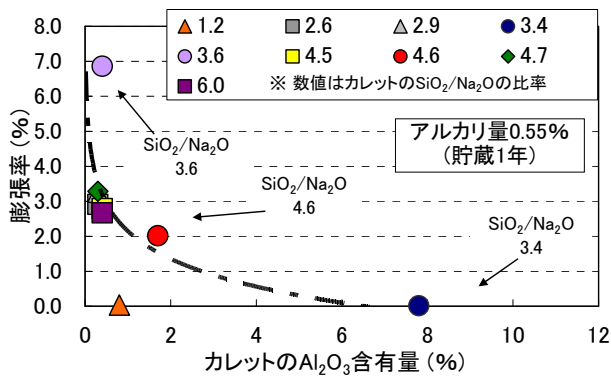


図 8 カレットに含まれている Al₂O₃ の含有量とモルタルの膨張率の関係

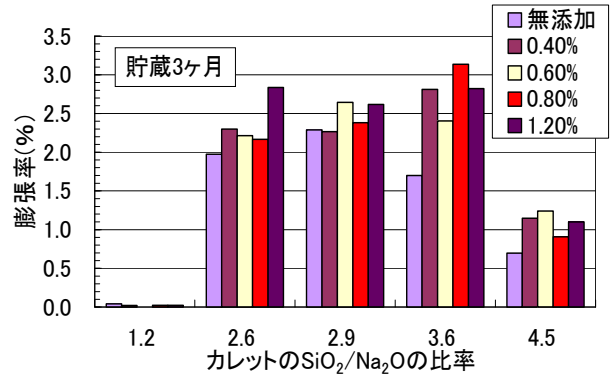


図 9 プロピオン酸カルシウムを添加したモルタルの貯蔵 3ヶ月の膨張率



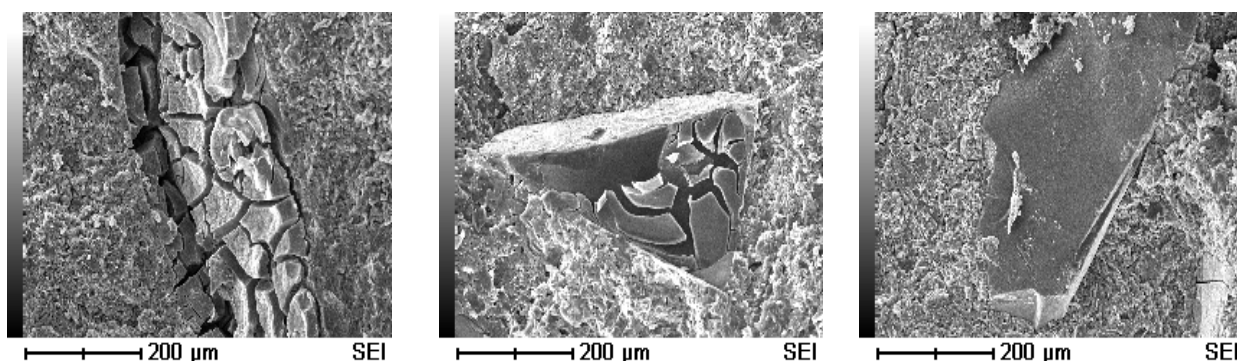
写真 5 膨張率測定用モルタル(Na₂Oeq 0.55%)で確認した生成物の状況(貯蔵 1 年)
(左: SiO₂/Na₂O, 2.9, 中: SiO₂/Na₂O, 3.6, 右: SiO₂/Na₂O, 4.5)

3・2・2 プロピオン酸カルシウムを添加したモルタルの膨張挙動

プロピオン酸カルシウムを添加して、モルタルのアルカリ性(pH)を下げた場合、膨張挙動にどのような変化を示すかを検討した。プロピオン酸カルシウムを添加した貯蔵 3ヶ月のモルタルの膨張率を図 9 に示す。図では、プロピオン酸カルシウムを添加してもモルタルの膨張率に大きな変化はみられなかった。この原因として考えられることは、モルタル中へ反応カレットに含まれている

Na₂O が放出されたためと考えられる。しかし、SiO₂/Na₂O, 2.6 は、プロピオン酸カルシウムの添加量の増加に伴い、膨張率が高くなる傾向を示している。これは、プロピオン酸カルシウムの添加によって Na₂O が減少し、反応生成物の SiO₂/Na₂O の比率が相対的に高くなったことで膨張率に変化が現れたといえる。また、SiO₂/Na₂O, 3.6 は、プロピオン酸カルシウムの添加量によって、膨張率は高くなった(図 9 の 0.8%)後に、低くなる(同図の 1.2%)という傾向を示している。これは、反応生成物の SiO₂/

アルカリシリカ反応の膨張メカニズムに関する研究

写真6 カレットを混入したモルタル($\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ 0.55%)の走査電子顕微鏡写真(左: $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$, 2.9, 中: $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$, 3.6, 右: $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$, 4.5)表7 測定点ごとの $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ の比率

カレットの $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ の比率 化合物	2.9	3.6	4.5
Na_2O (%)	16	4~10	12~22
Al_2O_3 (%)		0~3.5	0.8~4.2
SiO_2 (%)	46	46~64	47~75
K_2O (%)	2	1~15	0.5~0.9
CaO (%)	36	10~48	2~36
測定点ごとの $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$	2.6	8.3, 5.8 3.9, 3.2	3.5, 3.8
測定のデータ数(N)	1	4	2

Na_2O が高い方へ移動し、膨張率が減少したといえる。

3・3 反応生成物の走査電子顕微鏡による検討

セメント ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ 0.55%) にカレットを混入した硬化体の内部を走査電子顕微鏡により観察した。モルタルの膨張率に差のあった $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$, 2.9, 3.6, 4.5 のモルタル内部の状態を写真6に示す。貯蔵1ヶ月の時点で最も高い膨張を示した $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$, 2.9 のモルタル内のカレットは大きくひび割れを起こしており、カレットの表面にも白色の生成物が見られた。すなわち、 $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$, 2.9 のカレットは、反応性が高いといえる。このことは、モルタルの膨張率測定においても、早い段階(貯蔵14日目)で膨張を示した結果と関係しているといえる。 $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$, 3.6 のカレットは、ひび割れが生じているが、2.9のように全体にあるわけではなく、変化していない部分がある。 $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$, 4.5 のカレットは、ひび割れがまったく生じていない。このことは、モルタルの膨張率測定においても、貯蔵50日目で膨張を示しており、膨張速度が遅い結果と整合性がみられる。

写真6のカレット部分について簡易定量分析を行った結果を表7に示す。表の結果に大きなバラツキがみられ

表8 1週間の時点におけるNaOH溶液に浸せきしたカレットの反応状況

カレット	NaOH溶液		反応速度
	1mol/l	0.5mol/l	
$\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$	1.2	○	速
	2.6	◎	
	2.9	◎	
	3.4	△	遅
	3.6	◎	速
	4.5	○	遅
	4.6	△	
	4.7	○	
	6.0	○	

◎: 生成物のはっきりとわかる
○: 生成物が少しわかる
△: 生成物がわずかにわかる
×: 生成物が見られない

るのは、観察の分析面がペンチで割った破断面であるので、表面に凹凸があり、検出する特性 X 線の発生・受信が一定方向でないため、検出結果にバラツキが生じたからである。従って、この値は、参考程度のものである。

3・4 NaOH 溶液に浸せきしたカレットの反応状況の観察

NaOH 溶液に浸せき1週間後のカレットの目視観察による状態を表8に示す。表8では、白色の生成物が浮遊している状況を ASR に関与する生成物の生成量とみなして、その多少を記号で示した。 $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$, 2.6, 2.9 及び 3.6 のカレットは、初期に生成物の生成量が多く見られ、反応速度が速いと推定される。 $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$, 4.5~6.0 のカレットについては、前者と比べて初期の生成量は少なく、反応速度が遅い結果を示している。また、 Al_2O_3 の含有量が 7.8% と高いカレット ($\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$, 3.4) から、生成物が見られた。ただし、生成物の生成量に関しては、他のカレットと比べて少なく、試験管の底にカレットが残っていることから、反応性に Al_2O_3 が大きく関与して

いることが、この観察結果からもみてとれる(写真 7)。

カレットから生成された生成物の分析結果を表 9 に示す。表から、他のカレットと比べて Al_2O_3 の含有量が高い SiO_2/Na_2O , 3.4 は、生成物の Al の値が 6.70ppm であり、 SiO_2/Na_2O , 4.6 は、4.36ppm であり、使用前のカレットの Al 含有量と類似の傾向を示した。この結果から、生成物の中の Al の値も大きいことが示され、Al が生成物の性質を変化させていることが確認された。

4. 結論

反応性骨材から生じる反応生成物の代替として使用した水ガラスカレットによる ASR の膨張について検討した結果をまとめると、以下のようである。

- (1)水ガラスカレットを混入したモルタルでは、反応生成物の SiO_2/Na_2O の比率の違いにより、膨張率は、異なる結果がみられ、 SiO_2/Na_2O の比率が、3.6 付近に高い膨張を示した。
- (2) SiO_2/Na_2O , 2.6~6.0 の水ガラスカレットを混入したモルタルでは、 SiO_2/Na_2O の比率が低い順に膨張開始時期が速い結果となった。すなわち、 SiO_2/Na_2O の比率が ASR の膨張率と共に、膨張速度に大きく関係していた。
- (3)水ガラスカレットに含まれている Al_2O_3 の含有量が多いモルタルでは、膨張率が低くなる傾向を示した。このことより、生成物に関わる Al_2O_3 がモルタルの膨張に深く関与しているといえる。

参考文献

- 1) 川村満紀, 柳場重正:アルカリ・シリカ反応とその防止対策, 土木学会論文集, No. 348/V-1, pp. 13-23, 1984
- 2) 福本剛士, 森野奎二, 岩月栄治:ASR 鉄筋コンクリート供試体と採取コアの膨張ひび割れ発生に関する研究, 愛知工業大学研究報告, 第 41 号, 2006
- 3) 森野奎二:モルタルバーの貯蔵方法がアルカリシリカ反応の膨張に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 12, No. 1, pp. 829-834, 1990
- 4) 森野奎二, 柴田国久:安山岩およびチャート質骨材のアルカリ反応性, コンクリート工学年次講演会論文集, Vol. 8, pp. 165-168, 1986
- 5) 森野奎二:アルカリ反応性骨材の岩石学的考察, コンクリート工学年次講演会論文集, Vol. 6, pp. 241-244, 1984
- 6) 森野奎二, 春名淳介:種々のアルカリ反応性物質を使用したモルタルの膨張とひび割れ, コンクリート工

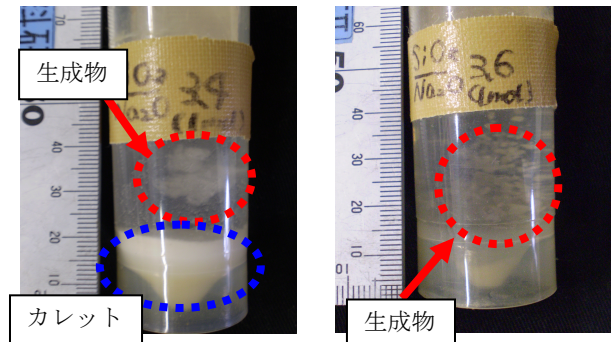


写真 7 NaOH 溶液に浸せきした生成物の様子
(左: SiO_2/Na_2O , 3.4(Al_2O_3 7.8%), 右: SiO_2/Na_2O , 3.6)

表 9 カレットから生成された生成物の分析結果

カレットの SiO_2/Na_2O の比率	2.9	3.4	3.6	4.5	4.6
NaOH 溶液の濃度	1mol/l				
Si (ppm) 波長 251.6nm	10.80	19.74	24.10	15.33	15.31
Na (ppm) 波長 588.9nm	2.26	4.80	4.48	3.22	2.21
K (ppm) 波長 769.8nm	0.06	0.17	0.13	0.14	0.05
Al (ppm) 波長 309.2nm	2.12	6.70	0.82	1.93	4.36
Ca (ppm) 波長 393.3nm	1.14	0.53	2.65	6.70	0.35
Mg (ppm) 波長 285.2nm	0.18	0.10	0.45	0.30	0.06
Ba (ppm) 波長 455.4nm	0.01	0.05	0.04	0.18	0.01

学年次論文報告集, Vol. 13, No. 1, pp. 735-740, 1991

- 7) 鳥居和之, 友竹博一:アルカリシリカ反応によるモルタルの膨張挙動に及ぼすセメントと反応性骨材の組合せの影響, 土木学会論文集, No. 739/V-60, pp. 251-263, 2003
- 8) 森野奎二, 岩月栄治:砕石切羽内のアルカリシリカ反応性岩石の特徴, 資源・材料学会春季大会, pp. 53-54, 2008
- 9) 岩月栄治, 多賀玄治, 森野奎二:プロピオン酸カルシウムの ASR 抑制効果に関する基礎的研究, セメント・コンクリート論文集, No. 61, pp. 318-323, 2008
- 10) 石井あきな, 藤井隆史, 渡辺純一, 片岡宏治, 綾野克紀:水酸化アルミニウムによるアルカリ骨材反応抑制効果, 日本材料学会学術講演会公演論文集, Vol. 56, No. 8, pp. 736-741, 2007

謝辞: 愛知工業大学八木明彦教授、滋賀県立大学丸尾雅啓准教授には生成物の分析に協力して頂いた。また、本研究の一部は、平成 20 年度愛知工業大学教育・研究特別助成を受けた。ここに記して心から感謝の意を表します。

(受理 平成 21 年 3 月 19 日)