

化学物質の少量添加による アルカリシリカ反応の抑制に関する研究

A Study on Effect of Restraint of Alkali Silica Reaction by Adding a Small Amount of Chemical Materials

平林 丈明[†]、森野 奎二^{††}、岩月 栄治^{††}
Takeaki HIRABAYASHI, Keiji MORINO and Eiji IWATSUKI

Abstract : This paper describes effect of restraint of alkali silica reaction (ASR) by adding a small amount of chemical materials. In general, the measures for restraining the ASR are the total alkali content (under 3.0 kg/m³) and the use of mixed cement (blast-furnace slag cement type B or C, fly ash cement B or C). However, it is necessary to use more than a certain quantity (for example: 100 kg/m³). Therefore the development of the materials which can restrain ASR by adding a small amount is expected. In the experiments, mortars were made using ordinary portland cement, restraint materials and 4 types of reactive aggregates (2 types of chert, andesite, slate). Effects of restraint of 3 types of chemical materials were examined. They are the calcium propionate, the lithium-based compound and the aluminum-based compound. As a result, the expansions of mortars were restrained by the addition of the calcium propionate of 1.8 % in cement weight and also were restrained by the addition of the lithium carbonate of 2.5 % in cement weight.

1. はじめに

アルカリシリカ反応(以下 ASR と称す)は、コンクリート中のアルカリ性の水溶液が骨材中のシリカ成分と化学反応を起こし、異常な膨張やそれに伴うひび割れなどを起こす現象である¹⁾。ASR はアメリカの Stanton によって 1940 年に発見されてから、70 年余り経っているが未だに不明な点がある。

日本において ASR による大規模な被害が初めて報告されたのは 1983 年で、阪神高速道路橋である。それ以降、ASR の被害は阪神地域にとどまらず全国各地に及んでいることが次第に明らかになっていった。

ASR が問題化したことを受け 1986 年には抑制対策が制定され、2002 年にその一部が改定された。その対策は、コンクリート中のアルカリ総量の抑制、抑制効果のある混合セメント・混和材料の使用などである。

アルカリ総量の抑制については、コンクリート中に含

まれるアルカリを Na₂O 等量で 3kg/m³ 以下、あるいは外部からアルカリが供給される場合は 2.4kg/m³ 以下とされている。しかし、規定以下のアルカリ量でも反応する骨材があり抑制が困難な場合もあることが、最近、分かってきた。

混合セメント・混和材料の使用は高炉水砕スラグ粉末、フライアッシュなどの使用である²⁾。しかし、これらの効果を発揮させるには、一定量以上の使用が必要であり、実用に際しては、専用の設備が必要となる。コンクリートの製造所(生コン工場等)では、設置場所や装置・経費の点で、その使用が困難な場合も少なくない。

そこで、少量の添加で ASR を抑制できる材料の開発が望まれている。

本研究では既往の研究から抑制効果が期待できるプロピオン酸カルシウム^{3)~5)}、リチウム系化合物^{6)~12)}及びアルミニウム系化合物^{13)~16)}などの化学物質について、それらの効果を検討した。

2. 実験概要

本研究は、以下の実験により構成されている。

[†] 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)

- (1) ASR 反応性天然骨材を用いて作製したモルタルに化学物質を添加し、膨張率の増減から、その効果を調べる。(天然骨材実験)
- (2) 反応生成物に相当する水ガラスカレット(以下カレットと称す)を反応性骨材や反応生成物の代替として用いたモルタルの膨張率の増減から、その効果を調べる。(カレット実験)

2・1 使用材料

2・1・1 天然骨材実験に使用した材料

天然骨材実験の使用材料を表 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(Na₂O 等量: 0.55%、0.62%)を使用した。ASR 抑制化学物質には、有機物のプロピオン酸カルシウム、リチウム系化合物の炭酸リチウム、アルミニウム系化合物のフッ化アルミニウムを使用した。骨材は反応性骨材であるチャート 2 種類(養老産 Yo、猿投産 Sa)、粘板岩及び安山岩の 4 種類を用いた。また非反応性骨材として川砂を使用した。実験ではベシマムを把握するために反応性骨材と非反応性骨材を混合して使用した。骨材のアルカリシリカ反応性試験(化学法)の結果を表 2 及び図 1 に示す。

2・1・2 カレット実験に使用した材料

カレット実験の使用材料を表 3 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(Na₂O 等量: 0.55%)を使用した。ASR 抑制物質には、有機物のプロピオン酸カルシウム、リチウム系化合物の重

表 1 天然骨材実験の使用材料

種類	概要	産地
普通ポルトランドセメント	Na ₂ O等量0.62%、密度3.16g/cm ³	/
	Na ₂ O等量0.55%、密度3.15g/cm ³	
チャートYo	密度2.63g/cm ³	岐阜県
チャートSa	密度2.63g/cm ³	愛知県
粘板岩	密度2.69g/cm ³	岐阜県
安山岩	密度2.63g/cm ³	香川県
川砂	密度2.53g/cm ³	愛知県
水酸化ナトリウム	NaOH	/
プロピオン酸カルシウム	(C ₂ H ₅ COO) ₂ Ca	/
炭酸リチウム	Li ₂ CO ₃	/
水酸化アルミニウム	Al(OH) ₃	/
フッ化アルミニウム	AlF ₃	/

硝酸リチウム、炭酸リチウム、アルミニウム系化合物の水酸化アルミニウム、フッ化アルミニウム、臭化アルミニウムを使用した。骨材は粒径を 0.15~0.075mm に調整した光学硝子用珪石粉を使用した。これは化学法、モルタルバー法ともに無害であり、非反応性である。カレットは過去の実験結果から膨張の著しかったシリカ・アルカリ比、SiO₂/Na₂O が 3.6¹⁷⁾のものを使用した。塊状のカレットは、ハンマーと乳鉢で破碎し、粒径を 0.3~0.15mm に調整した(写真 1)。

2・2 配合

2・2・1 天然骨材使用モルタルの配合

表 4 に天然骨材使用モルタルの配合を示す。モルタル

表 2 アルカリ反応性試験(化学法)の結果

骨材	溶解シリカ量 Sc (mmol/l)	アルカリ濃度の減少量 Rc (mmol/l)	Sc/Rc
チャートYo	304	143	2.13
チャートSa	188	102	1.84
粘板岩	214	69	3.10
安山岩	255	120	2.13
川砂	60	79	0.76

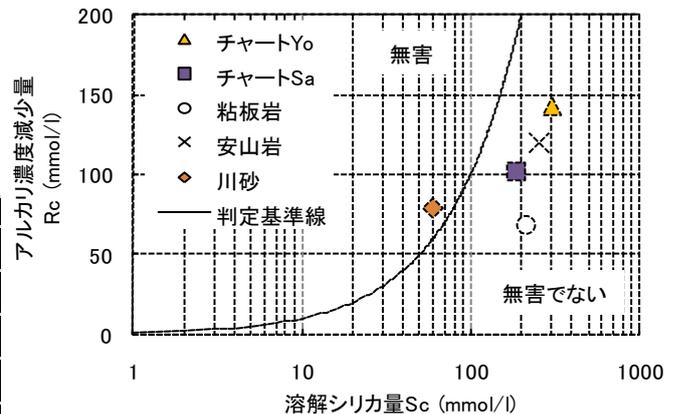


図 1 アルカリ反応性試験(化学法)の結果



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 カレット実験の使用材料

種類	概要
普通ポルトランドセメント	Na ₂ O等量0.55%、密度3.15g/cm ³
光学硝子用珪石粉	密度2.65g/cm ³ 、粒径0.15mm以下
カレット	SiO ₂ /Na ₂ O=3.6、粒径0.3~0.15mm
プロピオン酸カルシウム	(C ₂ H ₅ COO) ₂ Ca
炭酸リチウム	Li ₂ CO ₃
亜硝酸リチウム	LiNO ₂
水酸化アルミニウム	Al(OH) ₃
フッ化アルミニウム	AlF ₃
臭化アルミニウム	AlBr ₃

表4 天然骨材使用モルタルの配合

配合比率(質量比)		セメント：水：骨材 1：0.5：2.25	
供試体寸法(mm)		40×40×160	
モルタルのアルカリ量 (%)(Na ₂ O等量)		1.2	
骨材		チャートYo	チャートSa
		粘板岩	安山岩
セメント 質量に 対しての 添加量(%)	プロピオン酸 カルシウム	0.45、0.9、 1.2、1.5、 1.8、3.6、5.4	1.8、2.7、3.6
	炭酸リチウム	0.83、1.67、 2.50	1.0
	フッ化アルミ ニウム		2.5、5.0

の配合は、セメント：水：骨材の質量比を 1：0.5：2.25 とした。アルカリ量は、Na₂O 等量で 1.2%とし、水酸化ナトリウム試薬を添加して調整した。抑制用の化学物質は、チャート Yo 及び粘板岩使用モルタルでは、セメント質量に対してプロピオン酸カルシウムを 0.45、0.9、1.2、1.5、1.8、3.6、5.4%、炭酸リチウムを 0.83、1.67、2.50% 外割添加した。チャート Sa 及び安山岩使用モルタルでは、セメント質量に対してプロピオン酸カルシウムを 1.8、2.7、3.6%、炭酸リチウムを 1.0%、フッ化アルミニウムを 2.5、5.0%外割添加した。

2・2・2 カレット使用モルタルの配合

表5にカレット使用モルタルの配合を示す。モルタルの配合は、セメント：水：珪石粉・カレット混合物の質量比を 1：0.75：2.25 とした。カレットの混入量は珪石粉の質量の 2.2%を内割添加した。アルカリ量は、セメン

表5 カレット使用モルタルの配合

配合比率(質量比)		セメント：水：(珪石粉+カレット) 1：0.75：2.25
カレットの混入量		珪石粉の質量の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 O等量)		0.55
セメント 質量に 対しての 添加量 (%)	プロピオン 酸カルシウム	2.4、3.6、4.8
	炭酸リチウム	1.0、2.0、3.0
	亜硝酸リチウム	
	水酸化アル ミニウム	3.0、4.0、5.0
	フッ化アル ミニウム	
	臭化アルミ ニウム	

トから供給されるアルカリのみで Na₂O 等量で 0.55%とした。アルミニウム系化合物は 3.0、4.0、5.0%、リチウム系化合物は 1.0、2.0、3.0%、プロピオン酸カルシウムは 2.4、3.6、4.8%を外割添加した。

2・3 測定方法

2・3・1 天然骨材使用モルタルの膨張率測定

天然骨材使用モルタル供試体の寸法は、40×40×160mm とした。供試体は、打設後 24 時間型枠内に置き、脱型直後に初期値を測定し、その後は、40℃湿潤貯蔵とした。測定間隔は、1 週間とし、測定 24 時間前に 20℃の恒温室に移動し、膨張率の測定を 1/1000mm デジタルダイヤルゲージで行った。

2・3・2 カレット使用モルタルの膨張率測定

カレット使用モルタル供試体の寸法は、28×28×140mm とした。供試体は、打設後 24 時間型枠内に置き、脱型直後に初期値の測定を行い、その後は、40℃湿潤貯蔵とした。測定間隔は 1 週間とし、測定 24 時間前に 20℃の恒温室に移動し、膨張率の測定を行った。

3. 結果及び考察

3・1 天然骨材を使用したモルタルの実験結果

3・1・1 抑制材無添加モルタルの膨張挙動

抑制物質無添加モルタルの膨張挙動を図2(チャート

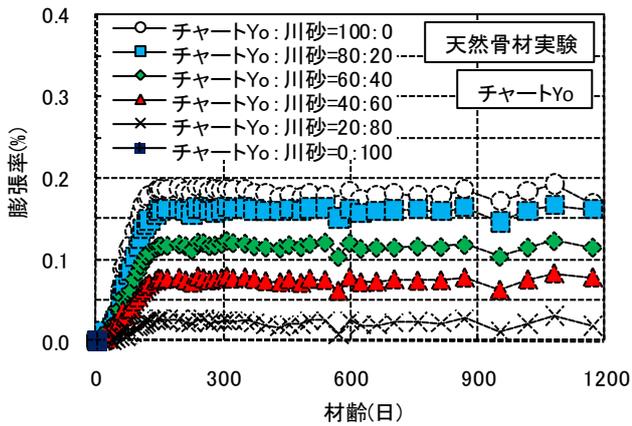


図 2 抑制物質無添加モルタルの膨張挙動(チャート Yo)

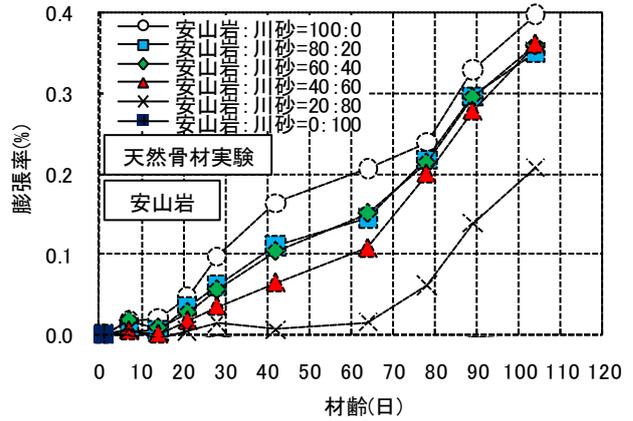


図 5 抑制物質無添加モルタルの膨張挙動(安山岩)

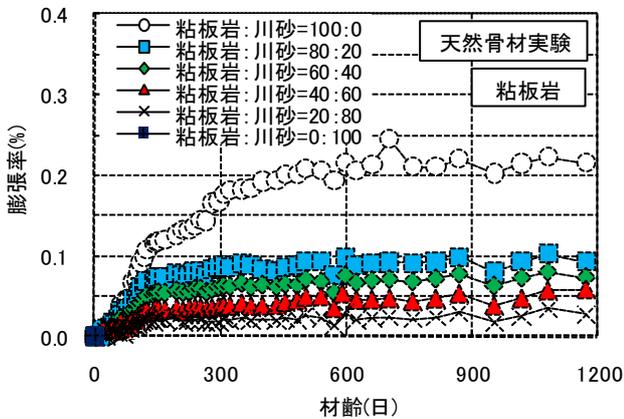


図 3 抑制物質無添加モルタルの膨張挙動(粘板岩)

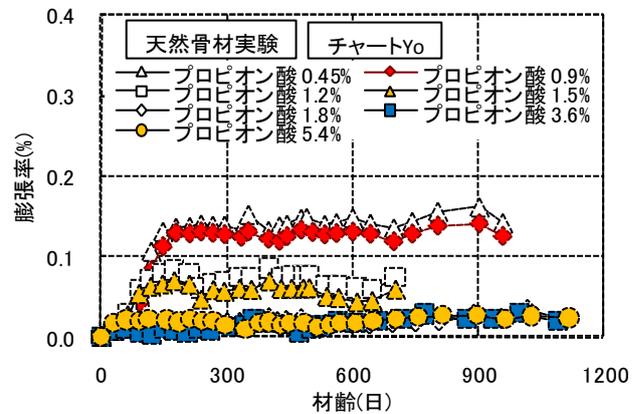


図 6 プロピオン酸カルシウム添加モルタルの膨張挙動(チャート Yo)

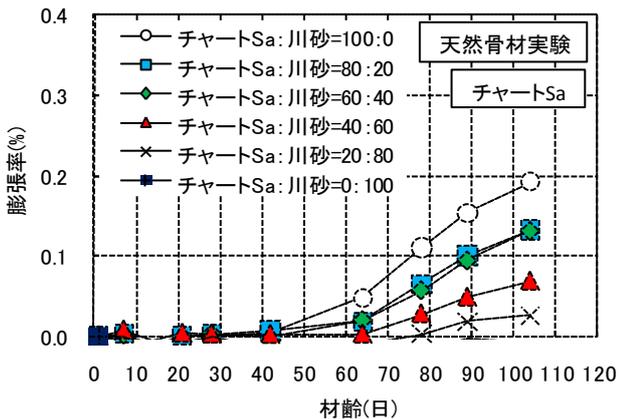


図 4 抑制物質無添加モルタルの膨張挙動(チャート Sa)

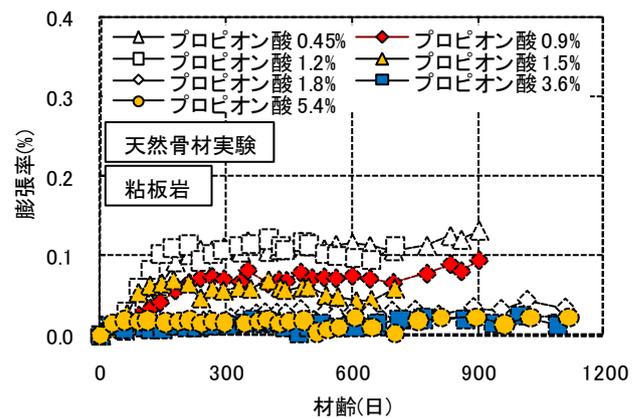


図 7 プロピオン酸カルシウム添加モルタルの膨張挙動(粘板岩)

Yo)、図 3(粘板岩)、図 4(チャート Sa)、図 5(安山岩)に示す。各図のいずれの骨材においても 100%使用の膨張率が最も高いことから、これらの骨材にはペシマム現象はみられない。図 2のチャート Yo モルタルは、材齢 30 日から著しい膨張を始めて、材齢 150 日で膨張が収束している。図 3の粘板岩モルタルは、材齢 30 日から著しい

膨張を始め、材齢 500 日まで膨張が継続している。図 4のチャート Saモルタルは、材齢 40 日から膨張を開始し、図 5の安山岩モルタルは、初期から著しい膨張を開始し、その後も同様の膨張が継続する。このように岩種によって膨張挙動に著しい差がみられる。この原因は、反応性

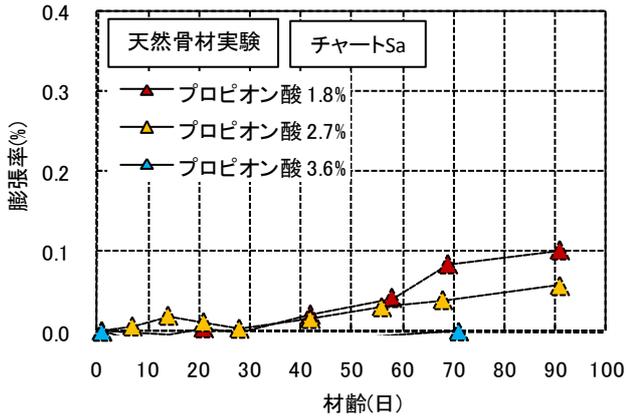


図8 プロピオン酸カルシウム添加モルタルの膨張挙動 (チャート Sa)

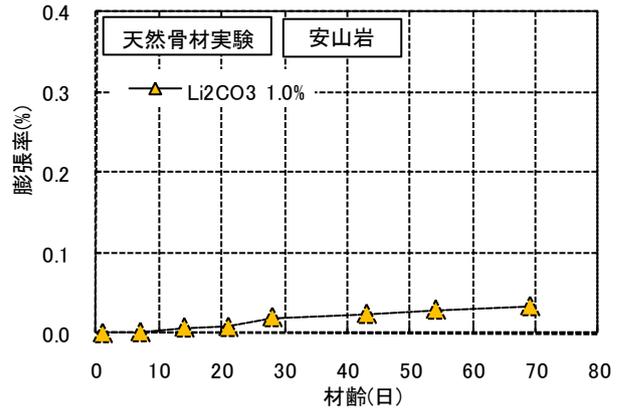


図11 炭酸リチウム添加モルタルの膨張挙動(粘板岩)

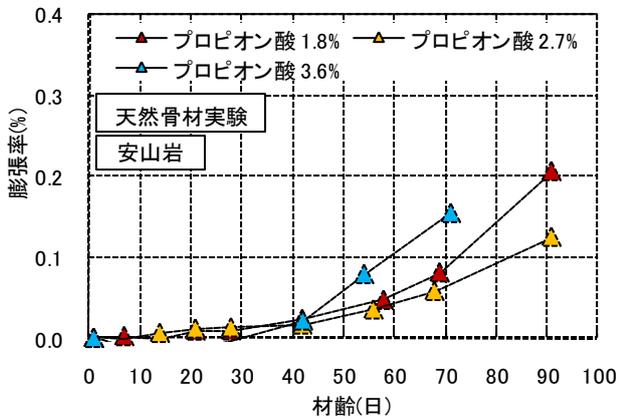


図9 プロピオン酸カルシウム添加モルタルの膨張挙動 (安山岩)

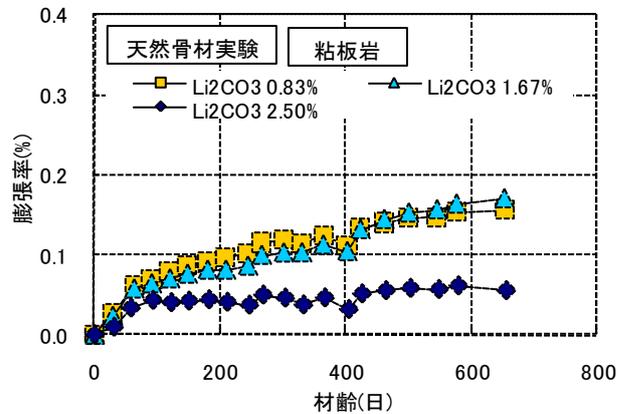


図12 炭酸リチウム添加モルタルの膨張挙動 (チャート Sa)

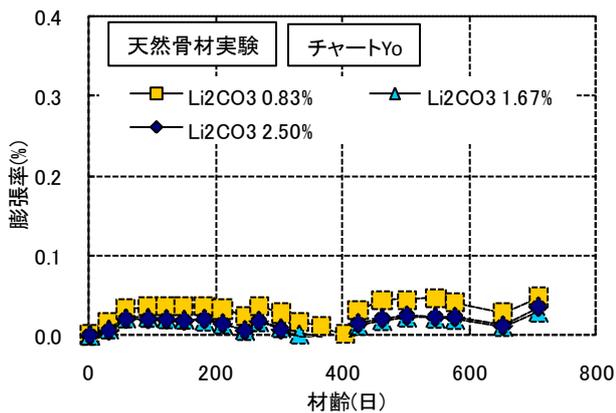


図10 炭酸リチウム添加モルタルの膨張挙動 (チャート Yo)

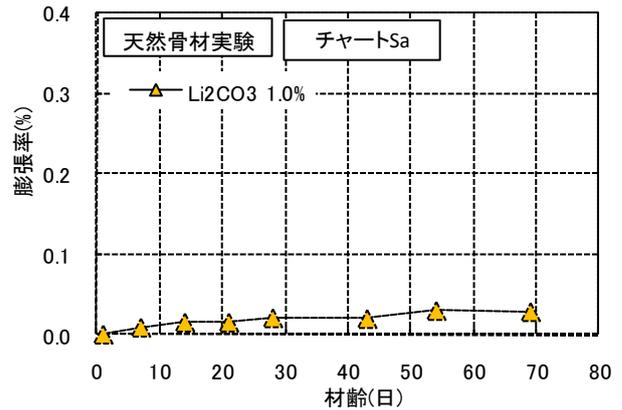


図13 炭酸リチウム添加モルタルの膨張挙動(安山岩)

鉱物の種類と量の相違による¹⁸⁾。

3・1・2 プロピオン酸カルシウム添加モルタルの膨張挙動

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を図6、図7、図8、図9に示す。ここではチャート

Yo、粘板岩、チャート Sa 及び安山岩のいずれの骨材もペシマムが認められなかったので反応性骨材 100%使用の結果を示した。チャート Yo(図6)、粘板岩(図7)は、1.8%以上添加することで、膨張率が0.035%以下となり抑制効果がみられる。チャート Sa(図8)は、3.6%以上添加することで、膨張率が0%付近であり十分に抑制できている。安山岩(図9)は、いずれの添加量でも膨張し、抑

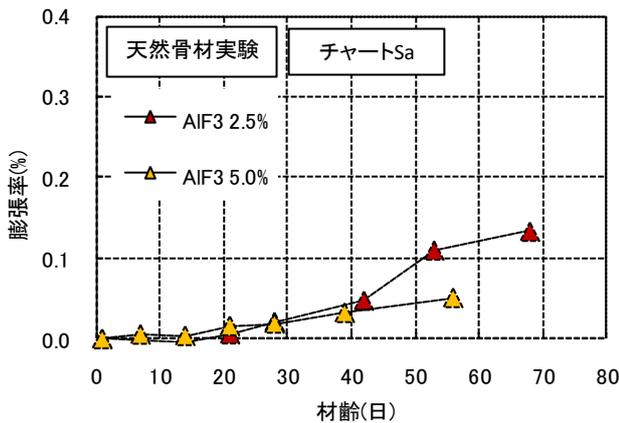


図 14 フッ化アルミニウム添加モルタルの膨張挙動 (チャート Sa)

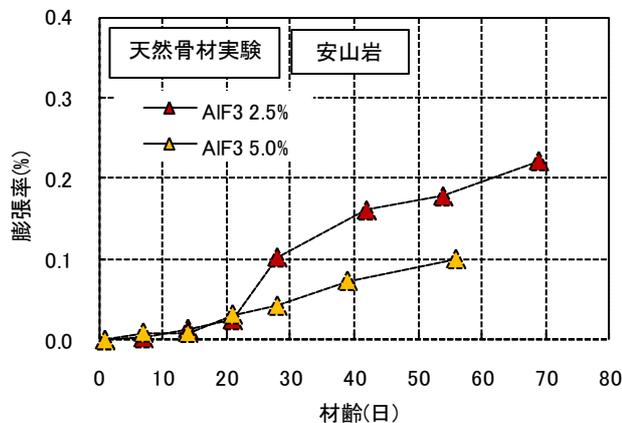


図 15 フッ化アルミニウム添加モルタルの膨張挙動 (安山岩)

制効果はみられなかった。

3・1・3 炭酸リチウム添加モルタルの膨張挙動

炭酸リチウムを添加したモルタルの膨張挙動を図 10、図 11、図 12、図 13 に示す。チャート Yo (図 10)、チャート Sa (図 12) 及び安山岩 (図 13) では、膨張率が 0.02～0.04% となり十分な抑制効果がみられた。粘板岩の場合では、添加率 0.83、1.67% で 0.1% を超える膨張が生じ、材齢 650 日を過ぎても緩やかに膨張しており抑制効果は期待できない。2.50% まで添加率を増やすと、膨張率が 0.05% 程度となり抑制効果がみられるようになった。

3・1・4 フッ化アルミニウム添加モルタルの膨張挙動

フッ化アルミニウムを添加したモルタルの膨張挙動を図 14、図 15 に示す。チャート Sa の場合、添加率 2.5% は、材齢 40 日から膨張し、抑制効果はみられない。5.0% に増やすと、材齢 56 日時点で膨張率が 0.05% となり抑制されるようであるが、現在も緩やかに膨張を継続している。安山岩の場合、2.5、5.0% ともに膨張しており、抑

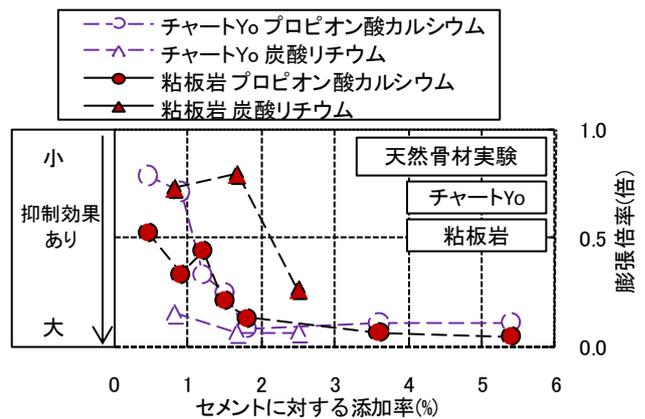


図 16 化学物質別の膨張抑制効果の比較 (チャート Yo、粘板岩、材齢 22 カ月)

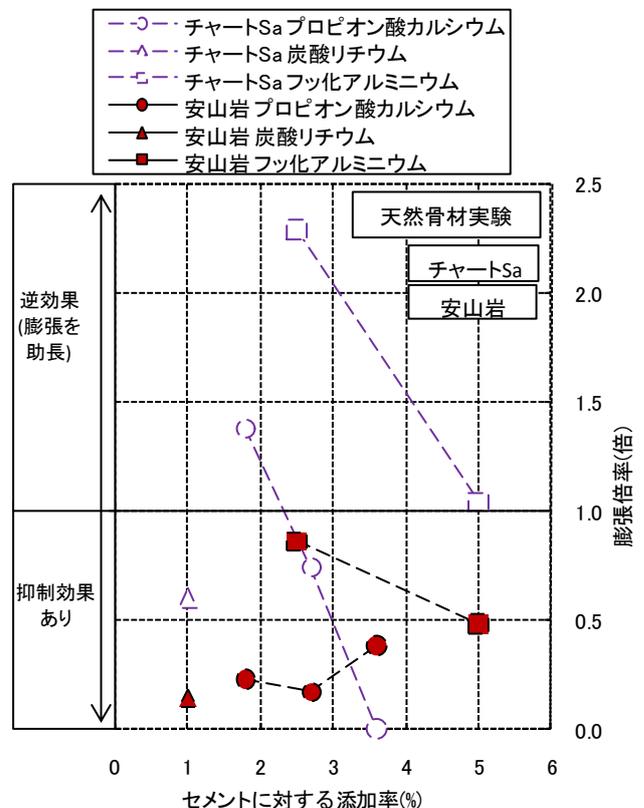


図 17 化学物質別の膨張抑制効果の比較 (チャート Sa、安山岩、材齢 2 カ月)

制効果は認められない。このように抑制効果がない上に、この薬品は取り扱いが難しいので、抑制材料には、不適當である。

3・1・5 各種化学物質の膨張抑制効果の比較

種々の化学物質を添加したチャート Yo、粘板岩モルタルの膨張抑制効果(材齢 22 カ月)の有無を図 16 に示す。図には、参考値として膨張倍率(化学物質添加モルタルの膨張率/無添加モルタルの膨張率)を示した。両骨材とも

にプロピオン酸カルシウムの添加率が増すほど膨張倍率が下がっている。さらにセメントに対して1.8%以上添加することで膨張倍率は0.1倍になり、顕著な抑制効果を発揮している。炭酸リチウムは、チャート Yo の場合、0.83%の添加でも膨張倍率が0.15倍であり、十分に抑制できている。粘板岩の場合、0.83、1.67%の添加では膨張倍率が0.7~0.8倍となり抑制効果は低くなっている。しかし、2.50%添加することで、図16で効果が大の方へ移動(膨張倍率0.25倍の位置)し、抑制できている。

各種化学物質を添加したチャート Sa、安山岩モルタルの膨張抑制効果(材齢2カ月)を図17に示す。プロピオン酸カルシウムは、チャート Sa の場合、添加率が増すほど効果が現れ膨張倍率は低くなっている。さらに3.6%添加すると膨張はなくなり、顕著な抑制効果を発揮している。安山岩の場合、いずれの添加率でも膨張倍率は0.5倍以下となり抑制できている。しかし、添加率3.6%が1.8、2.7%より膨張倍率が高く、他の骨材とは違い添加率と抑制効果は比例していない。この安山岩は、図5の結果では、ペシマムが認められなかったが、プロピオン酸カルシウムを添加することによりアルカリ量が減少し、ペシマムが生じたものと考えられる。炭酸リチウムは、チャート Sa の場合、膨張倍率が0.6倍となり抑制効果は低い。一方、安山岩の場合、膨張倍率は0.15倍となり抑制効果がみられる。フッ化アルミニウムは、安山岩使用モルタルの場合、2.5%の添加では膨張倍率は0.85倍となり抑制効果を認められなかった。しかし、5.0%添加することで膨張倍率は0.5倍となり抑制ができています。チャート Sa の場合は、添加率が増すほど膨張倍率は下がっているものの添加率5.0%でも、1.05倍と抑制効果は低かった。

3・2 カレットを使用したモルタルの実験結果

3・2・1 カレットの性質について

カレットの主成分は、ケイ酸ナトリウムであり、水ガラスの加水されていない塊状のものである。岩石骨材よりもはるかに早くモルタルの中で反応し、膨張する材料である。

3・2・2 プロピオン酸カルシウム添加モルタルの膨張挙動

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を図18に示す。プロピオン酸カルシウムを添加したモルタルは材齢154日時点では著しい膨張がみられ、その後も膨張は継続する傾向である。

3・2・3 リチウム系化合物添加モルタルの膨張挙動

図19にリチウム系化合物添加モルタルの膨張挙動を

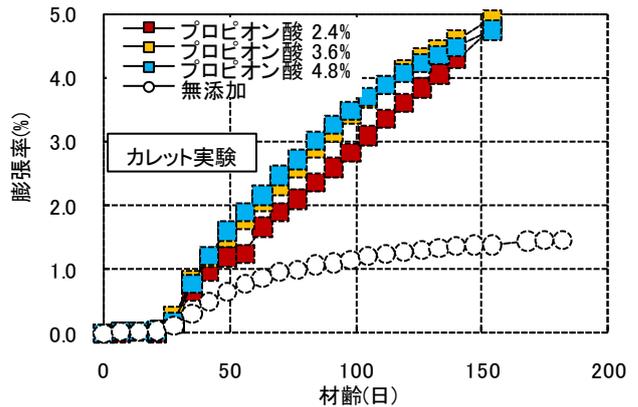


図18 プロピオン酸カルシウム添加モルタルの膨張挙動

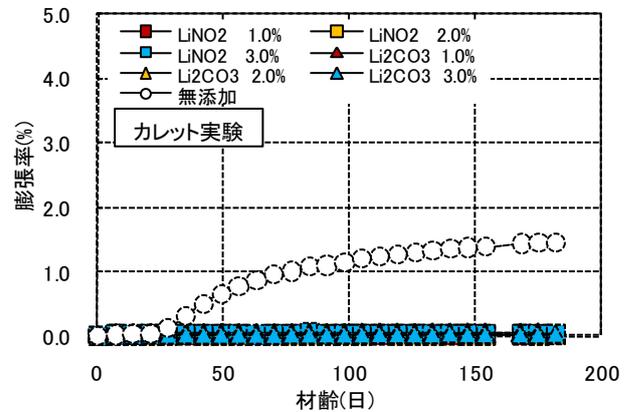


図19 リチウム系化合物添加モルタルの膨張挙動

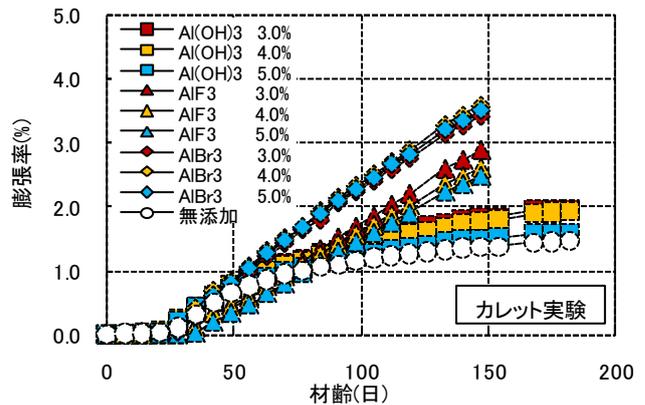


図20 アルミニウム系化合物添加モルタルの膨張挙動

示す。図では亜硝酸リチウム、炭酸リチウムともまったく膨張せず、十分な抑制効果が認められる。

3・2・4 アルミニウム系化合物添加モルタルの膨張挙動

図20にアルミニウム系化合物添加モルタルの膨張挙動を示す。水酸化アルミニウムを添加したモルタルは無添加と同じ膨張を示し、抑制効果はみられない。フッ化アルミニウム添加では無添加より2週間ほど膨張開始が

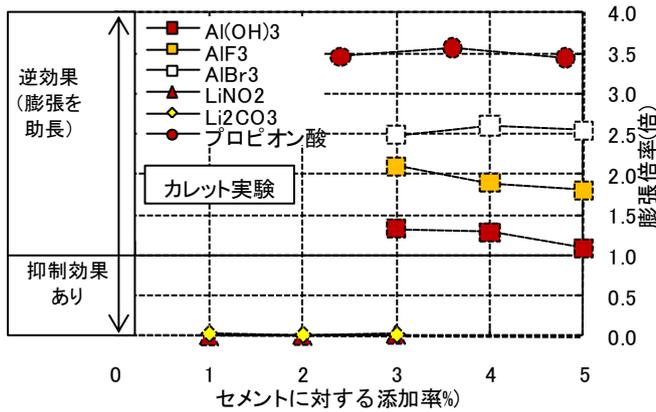


図 21 化学物質別の膨張抑制効果の比較 (5 カ月)

遅れただけで、その後は無添加より高い膨張を示した。この薬品はアルカリ溶液中で分解して生成したフッ酸がシリカを溶解するので、先に述べた以外にも抑制材料としては不適切である。臭化アルミニウムは無添加よりも高い膨張を示し、逆効果となっている。

3・2・6 各種化学物質の膨張抑制効果の比較

図 21 に各種化学物質を添加したモルタルの膨張抑制効果(材齢 5 カ月)の有無を示す。亜硝酸リチウムと炭酸リチウムは図の最下段の膨張倍率 0 倍付近となり、添加率 1.0%でも高い抑制効果がみられる。水酸化アルミニウムは添加率が増すほど膨張倍率が低くなっているが抑制効果があるといえるほどではない。フッ化アルミニウム、臭化アルミニウムは添加率に関係なく膨張を助長している。臭化アルミニウムに至っては、添加した方が 2.5 倍膨張する。プロピオン酸カルシウムは天然骨材を用いたモルタルでは抑制効果が認められたが、カレットの場合ではカレットから溶出したアルカリとプロピオン酸カルシウムによって減少したアルカリとの両者の関係から、生成物のシリカ・アルカリ比が膨張側の比率に変化したらしく、膨張を助長する結果となった。この比率を 3.6 ではなく 4 あるいは 5 のカレットを使用していたら効果が現れたかもしれない。このように生成物のシリカ・アルカリ比は重要な膨張要因である。

4. 結論

ASR 反応性の天然骨材を使用したモルタルに少量添加した化学物質の抑制効果についてまとめると、以下のようである。

- (1) チャート Yo、粘板岩及び安山岩使用モルタルでは、プロピオン酸カルシウムをセメントに対して 1.8% 以上添加することで高い抑制効果が認められた。

- (2) 炭酸リチウムは、いずれの骨材でも抑制効果がみられた。このうち顕著な効果がみられたチャート Yo モルタルでは、セメントに対して 0.83%の添加で抑制効果が認められた。

以上の他に天然骨材とは異なる水ガラスカレットを用いて、メカニズムの視点から検討した結果をまとめると以下のようである。

- (3) 水ガラスカレット使用モルタルでは、亜硝酸リチウム、炭酸リチウムはセメントに対して1.0%の添加で、高い抑制効果が認められ、岩石と同様の傾向が認められた。
- (4) プロピオン酸カルシウムでは天然骨材と水ガラスカレットでその効果が異なった。このことより、反応生成物のシリカ・アルカリ比によって、抑制効果が異なることが明らかになった。即ち、抑制効果は、反応生成物の性質によって異なることに注意を払う必要がある。

謝辞：本研究は、平成 21 年度 JST シーズ発掘試験 A(課題番号 08-188)、及び平成 21 年度愛知工業大学教育・研究特別助成(研究代表者 岩月栄治)によって行った。ここに記し謝意を表します。

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.13-26, 1984.
- 2) 森野奎二, 柴田国久, 岩月栄治: シリカフェーム, 高炉スラグ粉末の AAR 膨張抑制効果について, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 9, No. 1, pp. 81-86, 1987.
- 3) 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, 2007.
- 4) 岩月栄治, 多賀玄治, 森野奎二: 各種骨材を用いたプロピオン酸カルシウムの ASR 抑制効果に関する研究, セメント協会, 第 62 回セメント技術大会講演要旨, pp.84-85, 2008.
- 5) 岩月栄治, 森野奎二, 平林文明: 各種混和材料によるアルカリシリカ反応の抑制対策について, 資源・素材 2009, pp.267-270, 2009.
- 6) 米倉亜州夫, 伊藤秀敏, 政所暢利: アルカリ骨材反応によるコンクリートの膨張に及ぼす温度の影響, 広島工業大学紀要研究編, 第41巻 pp.53-63, 2007.
- 7) 斎藤満, 北川明雄, 柳場重正: 亜硝酸リチウムによ

- る骨材膨張の抑制効果, 材料, Vol.41, No.468, Sep., pp.1375-1381, 1992.
- 8) 入田一, 谷川伸, 岡田一興, 山城博隆: 表面被覆材と亜硝酸リチウムによるアルカリシリカ反応抑制効果に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.13, No.1, pp.751-756, 1991.
- 9) 高倉誠, 坂口由里子, 友沢史紀, 阿部道彦: Li化合物によるアルカリ骨材反応の膨張抑制に関する一実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.10, No.2, pp.761-766, 1988.
- 10) 二村誠二: 水酸化リチウムがアルカリシリカ反応に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.15, No.1, pp.935-940, 1993.
- 11) 北川明雄, 友沢史紀, 阿部道彦: 亜硝酸リチウムの含浸によるコンクリートのアルカリ骨材反応膨張抑制効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.11, No.1, pp.117-122, 1989.
- 12) C.L.Collins, J.H.Ideker, G.S.Willis, K.E.Kurtis: Examination of the Effects of LiOH, LiCl, and LiNO₃ on Alkali-Silica Reaction, Cement and Concrete Research 34, pp.1403-1415, 2004.
- 13) 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われ, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.13, No.1, pp.735-740, 1991.
- 14) 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講演論文集, Vol.56, No.8, pp.736-740, 2007.
- 15) 樋口正典, 林寿夫, 山本則幸: アルカリ骨材反応の抑制に関する研究報告, コンクリート工学年次論文集, Vol.13, No.1, pp.745-750, 1991.
- 16) 依田彰彦, 横室隆, 浜田博文: 最近のアルミナセメントを用いたモルタルの性質, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.51-56, 2002.
- 17) 関口達也, 岩月栄治, 森野奎二: ASR膨張の水ガラススケレットによる検討, 土木学会中部支部平成20年度研究発表会講演概要集, 第V部, pp.465-466, 2009.
- 18) 森野奎二, 岩月栄治, 平林文明: 砕石切羽におけるアルカリ反応性岩石の性状, 資源・素材学会, 建設用原材料, Vol.18, No.1, pp.30-37, 2010.

(受理 平成22年3月19日)