

アルカリシリカ反応性骨材の無害化技術に関する研究

Chemical Transformation of Aggregates to Prevent Alkali-Silica Reactions

柳 田 克 巳
新 井 一 彦¹⁾

要 約

本研究は、あらかじめアルカリシリカ反応性を示すことがわかっている有害な骨材を、溶融結晶化または表面改質等の化学的処理を行うことによって、アルカリシリカ反応に対して無害化することを目的として行ったものである。反応性骨材として、安山岩碎石および川砂利の2種類の骨材を入手し、①原石、②溶融結晶化した骨材、③表面改質した骨材に対するアルカリ骨材反応性試験をそれぞれ実施した。

試験の結果、溶融結晶化および表面改質のいずれの方法によっても、アルカリシリカ反応に対して有害な反応性骨材を無害化できる可能性のあることが確認された。

目 次

- I. はじめに
- II. 無害化の方法
- III. 化学法による試験
- IV. モルタルバー法による試験
- V. おわりに

I. はじめに

数年前から、コンクリート用良質骨材の枯渇が社会問題化している。特に、アルカリシリカ反応をはじめとするアルカリ骨材反応は、コンクリート構造物の耐久性を著しく損なう恐れがあり、反応に対して無害な骨材を使用することが良質な建設物を構築する上で重要であることは言うまでもない。しかしながら、最近、公共工事に使用されるコンクリート用骨材にアルカリシリカ反応性を有する有害骨材が含まれていた事態が発覚し、国土交通省が実態調査に乗り出すことになったと報じられている¹⁾。

一方、ひとたびアルカリシリカ反応に対して有害と判定された骨材の産地では、同じ岩体から採取される骨材はもはやコンクリート用骨材として使用できる可能性が少なく、骨材採取場として切り拓かれた状態のまま閉山に追い込まれるケースが多いのが実情である。これまでのアルカリ骨材反応に対する防止対策は、無害な骨材を採取できる産地を確保して、その産地で採取した骨材を使用することが基本であり、有害と判定された骨材は原則として排除されていた。したがって、有害な骨材を改質し、安全な骨材として利用できる技術が開発されれば、不足している良質骨材の供給に寄与するだけでなく、資源の有効利用の観点からも重要な意味を持つ。

以上のような背景から、本研究では、あらかじめアルカリシリカ反応性を示すことがわかっている有害な骨材（以下、「反応性骨材」）を、溶融結晶化または表面改質等の化学的処理を行うことによって、

アルカリシリカ反応に対して無害化する可能性について実験検討を行った。

反応性骨材としては、安山岩碎石および川砂利の2種類の骨材を入手し、

- a. 原石
- b. 溶融結晶化処理した骨材（以下、「溶融結晶化骨材」）
- c. 表面改質処理した骨材（以下、「表面改質骨材」）

に対するアルカリシリカ反応性試験をそれぞれ実施した。アルカリシリカ反応性試験としては、JISに規定される「骨材のアルカリシリカ反応性試験方法」のうち化学法およびモルタルバー法による2種類の試験を行った。

「溶融結晶化」技術は、下水汚泥や焼却灰から生成される溶融スラグを無害化し、結晶化石材と呼ばれる石材に変成する工程で実用化されており²⁾、これまでエコタイルの開発等に関連して活用されてきた技術である^{3) 4)}。また、「表面改質」は、「溶融結晶化」に比べてより少ないエネルギーで無害化することを意図したもので、骨材の表層に化学的に安定な改質層を形成することを意図して、今回考案したものである。

II. 無害化の方法

1. 溶融結晶化による無害化

アルカリシリカ反応は、骨材中の反応性を有するシリカとコンクリートに含まれるアルカリが反応することによって生じた生成物が吸水して膨張し、コンクリートにひび割れなどを生じさせる現象である。したがって、骨材中の反応性シリカが他の成分、例えば酸化カルシウムや酸化アルミニウムなどと結合して結晶を形成していれば、反応を抑えられる可能性がある。

溶融結晶化は、骨材に含まれる無機成分を溶融し、ガラス化した後、再び昇温することによってガラス中に結晶を析出させる方法で

1) 株式会社テクノウェーブ

キーワード：アルカリ骨材反応，無害化，溶融結晶化，表面改質，化学法，モルタルバー法

ある。結晶が析出するための条件は、結晶化しようとする骨材の組成が、Fig. 1 に示した SiO_2 - CaO - Al_2O_3 系三成分図中の結晶化領域に入ることであり、析出する結晶の種類はその化学組成によって決まる²⁾。そこで、まず反応性骨材の組成を調べた上で、結晶化領域に入るように不足成分の添加を行って組成を調整し、熔融結晶化を行った。

(1) 使用した骨材

反応性骨材として、安山岩系の骨材 (A) および川砂利 (B) を入手した。Fig. 1 に、原石 A, B のそれぞれの組成を図示する。熔融結晶化に際しては、次項に示したとおりの方で原石に生石灰および高炉スラグを混合し、調整後の組成が結晶化領域に入るように調整した。それぞれの原石の主成分組成は、Table 1 に示すとおりである。

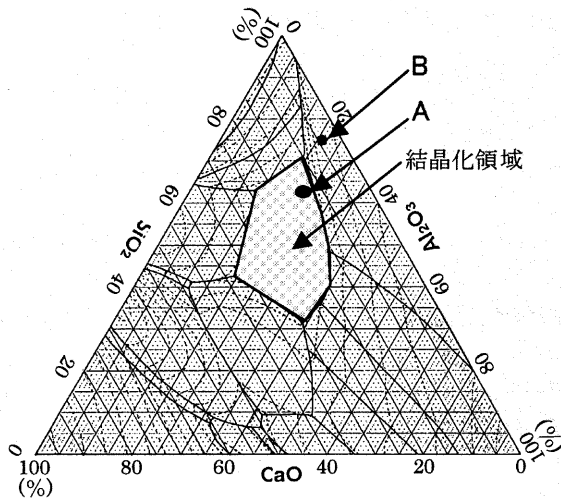


Fig. 1 SiO_2 - CaO - Al_2O_3 系三成分図

(Proportion of Principal Three Composites for Crystallization)

Table 1 原石の主成分組成 (重量%)

(Chemical Composites Proportion of Original Aggregates)

名称	原石 A	原石 B	組成調整剤
	安山岩	川砂利	高炉スラグ
SiO_2	49.54	62.90	32.70
CaO	11.22	3.34	43.89
Al_2O_3	19.14	18.30	14.00
MgO	5.99	1.69	7.08
Fe_2O_3	9.96	4.28	0.16
Na_2O	2.65	5.21	0.28
K_2O	0.20	3.04	0.27
その他	1.30	1.24	1.62
真比重	2.96	2.70	-

(2) 熔融結晶化の方法

以下の手順で反応性骨材 A, B の熔融結晶化を行った。

(a) 組成調整

反応性骨材 A, B の組成を分析し、2mm 以下まで粉碎した後、 SiO_2 - CaO - Al_2O_3 系三成分図中の CaO 重量百分率 (Table 2 中

$\text{CaO}\%$ と表記) が 25% および 30% になるように生石灰または高炉スラグを添加した。混合割合は Table 2 に示すように、原石 A, B に対してそれぞれ 4 通り、合計 8 通り (A1~A4, B1~B4) を設定した。

(b) 溶融

アルミナるつぼに入れた試料を電気炉内に静置し、空気中で 1,450℃ まで昇温して熔融状態とし、1 時間保持した。

(c) 結晶化

試料を 850℃ まで徐冷し、ガラス化した状態で 2 時間保持した後、1℃/分 で 1,075℃ (融点以下) まで昇温して結晶化を開始し、この温度で 4 時間保持して結晶を成長させた。

Table 2 組成調整のための混合割合

(Mixing Proportion of Chemical Additives on Aggregates)

	原石 A				原石 B			
	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4
目標 $\text{CaO}\%$	25	30	25	30	25	30	25	30
原石 (g)	179.1	169.2	139.1	109.8	161.7	152.1	105.8	82.7
生石灰 (g)	20.9	30.8			38.3	47.9		
高炉スラグ (g)			60.9	90.2			94.2	117.3

(3) 熔融結晶化した骨材の性状

熔融結晶化骨材の組成分析の結果および形状を Table 3 に示す。熔融結晶化骨材 B は、結晶化過程で一部軟化する傾向を示したために扁平な形状のものが多く、比重も若干低めであった。これに対し、熔融結晶化骨材 A は、結晶化過程で軟化することなく、骨材としての良好な形状を保持することができた。

それぞれの熔融結晶化骨材に対する X 線回折の結果を Table 4 に示す。代表的な 3 種の結晶ピークについて、強いピークがあった順に $\odot > \circ > \triangle > \times$ の記号で表した。原石 A の熔融結晶化骨材には代表的な結晶として $\text{Ca}(\text{MgFeAl})(\text{SiAl})_2\text{O}_6$ = オージャイトが確認された。原石 B の熔融結晶化骨材はピークが多種存在するが、卓越した結晶は認められなかった。

それぞれの反応性骨材について、原石と熔融結晶化骨材の外観状況を Photo 1 および Photo 2 に示す。

Table 3 熔融結晶化骨材の組成分析および目視状態

(Proportion of Composites and Apparent Condition of Crystallized Aggregates)

	熔融結晶化骨材 A				熔融結晶化骨材 B			
	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4
目標 $\text{CaO}\%$	25	30	25	30	25	30	25	30
SiO_2	41.24	39.09	40.04	38.17	46.61	43.88	46.24	43.7
CaO	19.56	24.07	21.27	27.54	24.21	30.47	23.55	26.36
Al_2O_3	16.79	16.51	19.02	16.58	15.1	13.22	16.48	16.56
MgO	6.13	5.85	6.63	7.24	1.89	1.64	4.19	4.54
Fe_2O_3	11.12	9.72	8.46	6.66	4.74	4.16	3.12	2.73
Na_2O	2.99	2.98	2.58	1.92	4.31	4.03	3.44	3.34
K_2O	0.2	0.17	0.2	0.21	1.91	1.51	1.41	1.22
真比重	3.18	3.18	3.1	3.12	2.83	2.88	2.88	2.87
$\text{CaO}\%$	25.21	30.21	26.48	33.47	28.18	34.8	27.3	30.43
軟化	軟化せず				軟化の傾向を示した			
形状	○	○	◎	○	○	△	△	△

Table 4 X線回折分析の結果
(X-Ray Diffraction Analysis Results)

	溶融結晶化骨材 A				溶融結晶化骨材 B			
	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4
$\text{Ca}(\text{MgFeAl})(\text{SiAl})_2\text{O}_6$	◎	◎	◎	○	×	×	○	×
$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$	○	○	○	○	△	△	△	×
$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$	×	○	×	◎	×	○	△	◎

注) 結晶ピークの強さ ◎>○>△>×, ◎:強, ×:弱

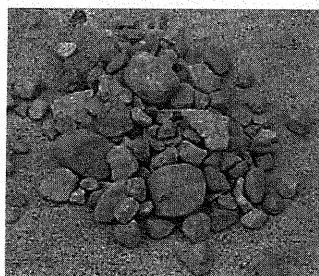


原石



溶融結晶化骨材

Photo 1 原石と溶融結晶化骨材の外観 (反応性骨材 A)
(Appearance of Original and Crystallized Aggregates)



原石



溶融結晶化骨材

Photo 2 原石と溶融結晶化骨材の外観 (反応性骨材 B)
(Appearance of Original and Crystallized Aggregates)

2. 表面改質による無害化

表面改質は、反応性骨材に CaO 粉末を混合し、 $1,200^\circ\text{C}$ で焼成することにより、骨材の表層のみを化学反応させて、アルカリシリカ反応に対して安定な表面改質層を形成させる方法である。この処理は、骨材全体を溶融する必要がなく、溶融結晶化に比べてエネルギー的に有利である。

(1) 使用した骨材

溶融結晶化の場合と同じ 2 種類の反応性骨材 A および B を用いた。

(2) 表面改質の方法

以下の手順で原石 A, B の表面改質を行った。

(a) 粒度調整

原石 A, B をジョークラッシャーで粗粉碎し、必要に応じて微粉碎した後、篩で分級した。さらに、化学法およびモルタルバー法によるアルカリシリカ反応性試験に供するために、後述する試験方法に定められる所定の粒度に試料を調整した。

(b) CaO 添加量の算定

試料を秤量し、酸化カルシウム (CaO) を $\text{CaO}/\text{SiO}_2(\text{mol}) = 2$ の割合で添加し、十分に混合した。酸化カルシウムは、 $53\mu\text{m}$ 以下に分

級したものを使用した。骨材に対する CaO 添加量は、

$(\text{SiO}_2 \text{ 含有量} \times 2 \times \text{CaO 分子量} / \text{SiO}_2 \text{ 分子量}) - \text{CaO 含有量}$ として計算した。A の場合、

$$0.4954 \times 2 \times 56.08 / 60.09 - 0.1122 = 0.8125$$

B の場合、

$$0.6290 \times 2 \times 56.08 / 60.09 - 0.0334 = 1.1406$$

となった。

(c) 表面改質

混合試料を電気炉を用いて空气中で $1,200^\circ\text{C}$ に昇温し、30 分間保持することで表面に改質層を形成した。

(d) 不要物質の除去

得られた焼成物を解砕した後、 $150\mu\text{m}$ の篩を用いて、未反応の余剰 CaO を除去した。

(e) 洗浄

除去しきれない CaO は、さらに同じ篩を用いて流水で洗浄しながら除去した。

(f) 試料の乾燥

残渣 (改質骨材) を 105°C の恒温槽中で 24 時間乾燥させた。

(g) 微粉の除去

乾燥品を $150\mu\text{m}$ の篩で微粉を除去し、秤量した。

(3) 表面改質した骨材の性状

(a) 組成

原石および表面改質骨材の組成を表 Table 5 に示す。表面改質によって CaO 含有率は、反応性骨材 A の場合約 14%, 反応性骨材 B の場合約 28% 大きくなった。

Table 5 原石および表面改質骨材の組成 (重量%)
(Chemical Composites Proportion of Original and Surface Transformed Aggregates)

名称	原石 A	表面改質 A	原石 B	表面改質 B
SiO_2	49.54	39.69	62.90	46.92
CaO	11.22	25.17	3.34	31.34
Al_2O_3	19.14	17.52	18.30	10.75
MgO	5.99	5.25	1.69	1.17
Fe_2O_3	9.96	8.66	4.28	2.83
Na_2O	2.65	2.09	5.21	4.08
その他	1.50	1.62	4.28	2.91

(b) X線回折分析

X線回折分析によって同定された結晶は、反応性骨材 A の場合、原石は $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ 、表面改質骨材は $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ の他、 $\text{Ca}(\text{MgFe})\text{Si}_2\text{O}_6$, MgSiO_3 , $\text{CaFe}_3\text{AlSiO}_6$ 等であった。反応性骨材 B の場合は、原石は $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ および SiO_2 、表面改質骨材は、 $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$ および SiO_2 であった。

(c) EPMA (電子線マイクロアナライザ) による元素分布観察

反応性骨材 A の原石と表面改質骨材について、EPMA を利用して成分元素分布をそれぞれ観察した。Photo 3 および Photo 4 は、それぞれの骨材断面の C a 元素の分布を示した写真である。写真中の赤色で示された部分は C a 元素が分布していることを示しており、

赤色が濃いほどその分布濃度が高いことを示す。Caの元素分布は、原石Aでは濃度差はあるものの、全体に分布しているのに対し、表面改質骨材Aでは表面全体に濃度の高い層が存在している。この結果から、表面改質骨材の表層には、厚さ数 μm ～数十 μm のCaOを多く含むCaO-SiO₂系化合物が膜状に生成していることがわかる。表面改質骨材のCa表層膜の厚みは、最小で約7 μm 、最大で約74 μm 、平均は約15 μm 程度であった。

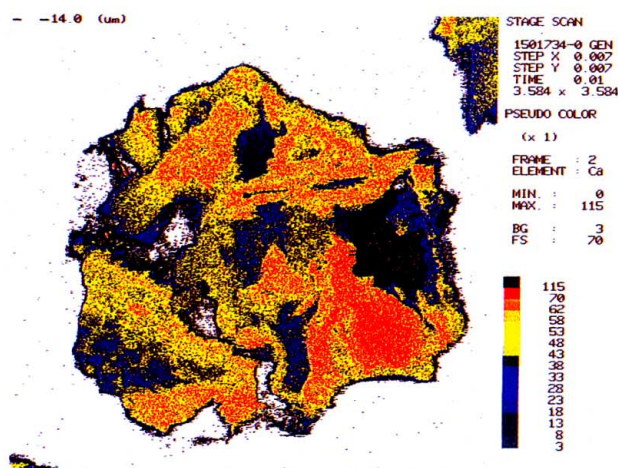


Photo 3 原石の成分元素分布

(Chemical Elements Distribution of Original Aggregates)

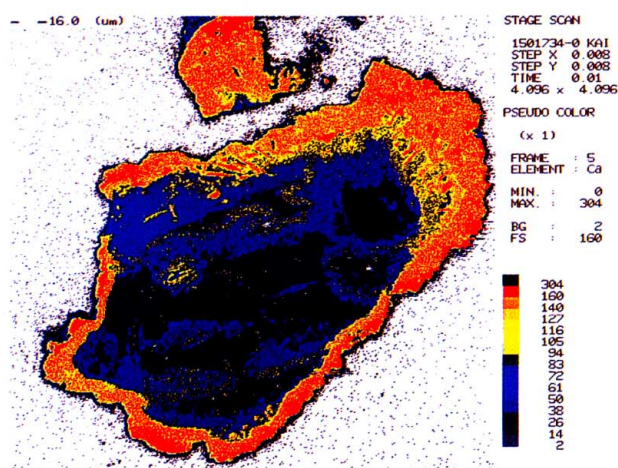


Photo 4 表面改質骨材の成分元素分布

(Chemical Elements Distribution of Surface Transformed Aggregates)

III. 化学法による試験

1. 試験方法

溶融結晶化および表面改質の二つの方法によるアルカリシリカ反応の無害化の有効性を確認するために、反応性骨材A、Bの原石と溶融結晶化骨材および表面改質骨材に対して、化学法によるアルカリシリカ反応性試験を行った。

化学法による試験は、JIS A5308「レディーミクストコンクリート」附属書7「アルカリシリカ反応性試験方法（化学法）」に従って行った。溶解シリカ量の測定は、原子吸光法によって行った。

2. 試験結果と考察

(1) 溶融結晶化による効果

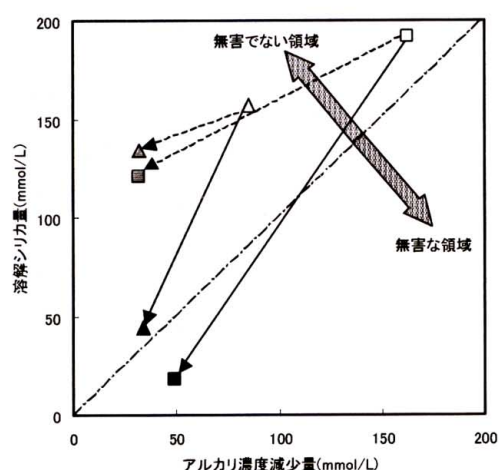
溶融結晶化の混合条件は、Table 2 に示した8通りの条件の中から溶融結晶化後の骨材の粒形が最も良好であったものをそれぞれ選定した。反応性骨材Aについては、原石：高炉スラグを100：44の混合比で混合した「A3」を、反応性骨材Bについては、原石：生石灰を100：24の混合比で混ぜた「B1」をそれぞれ採用した。溶融結晶化の手順および条件は前項で示したものと同一とした。また、比較のために、溶融結晶化骨材と同時に加熱処理（1,075℃で4時間保持）のみ行った骨材（以下、「加熱骨材」）についてもサンプルを作成して試験を行った。

Table 6 および Fig. 2 に試験結果を示す。原石はいずれも「無害でない」領域にあったが、反応性骨材Aについては溶融結晶化によって「無害」の領域に移行した。反応性骨材Bについては、溶融結晶化によって判定境界線の近傍まで近づいたものの、結果としては「無害でない」と判定された。しかし、アルカリ濃度減少量および溶解シリカ量のどちらもが溶融結晶化処理前に比べて著しく減少していることが認められた。また、加熱骨材はA、Bともに原石と比べてアルカリ濃度減少量は小さくなるが、溶解シリカ量の減少が十分でなく、いずれも「無害でない」と判定された。

以上から、反応性骨材Aは溶融結晶化によってアルカリシリカ反応に対して無害化され、反応性骨材Bについても、無害領域には至らなかったもののアルカリシリカ反応性を著しく低減する方向に改質されることが確認された。また、加熱処理だけでは、アルカリシリカ反応性の無害化は難しいことがわかった。

Table 6 溶融結晶化骨材の化学法試験結果
(Chemical Test Results of Crystallized Aggregates)

骨材種類	A			B		
	原石	加熱のみ	溶融結晶化	原石	加熱のみ	溶融結晶化
アルカリ濃度減少量 (mmol/L)	162	32	49	85	32	34
溶解シリカ量 (mmol/L)	192	121	18	157	134	44
判定	無害でない	無害でない	無害	無害でない	無害でない	無害でない



凡例： ←--- 加熱による効果 ← 溶融結晶化による効果
□ 原石A □ 加熱A ■ 溶融結晶化A △ 原石B △ 加熱B ▲ 溶融結晶化B

Fig. 2 溶融結晶化骨材の化学法試験結果
(Chemical Test Results of Crystallized Aggregates)

(2) 表面改質による効果

表面改質による無害化効果を確認するために、表面改質骨材についても化学法によるアルカリシリカ反応性試験を行った。

Table 7 および Fig. 3 に試験結果を示す。原石の試験結果は、前項の試験結果を使用した。反応性骨材 A については、表面改質によってアルカリ濃度減少量および溶解シリカ量ともに大きく減少し、「無害」の領域に移行した。反応性骨材 B については、表面改質によってアルカリ濃度減少量は 85mmol/L→0mmol/L となったが、溶解シリカ量の減少量が小さく、結果としては「無害でない」と判定された。

以上から、骨材 A について表面改質によるアルカリシリカ反応性の無害化効果が確認された。

Table 7 表面改質骨材の化学法試験結果
(Chemical Test Results of Surface Transformed Aggregates)

骨材種類	A		B	
	原石	表面改質	原石	表面改質
アルカリ濃度減少量 (mmol/L)	162	7.03	85	0
溶解シリカ量 (mmol/L)	192	0.77	157	147
判定	無害でない	無害	無害でない	無害でない

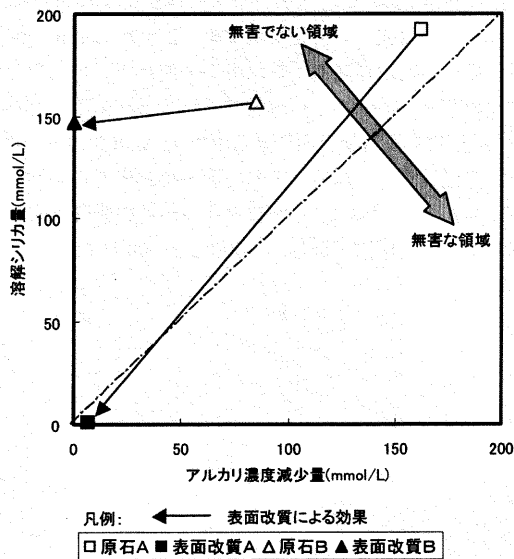


Fig. 3 表面改質骨材の化学法試験結果
(Chemical Test Results of Surface Transformed Aggregates)

IV. モルタルバー法による試験

1. 試験方法

ここでは、アルカリシリカ反応に対する無害化の効果について確認するためにモルタルバー法による試験を行った。モルタルバー試験は、JIS A 5308 附属書 8「骨材のアルカリシリカ反応性試験方法 (モルタルバー法)」(付録参照) に準じて実施した。

試験は、試験体製作後、材齢 6 か月まで実施した。

2. 試験結果と考察

(1) 溶融結晶化による効果

2 種類の反応性骨材 A, B について、原石および溶融結晶化骨材のモルタルバー法試験結果を Table 8 および Fig. 4 に示す。

反応性骨材 B については、原石が 6 か月で膨張率 0.227% であり「無害でない」と判定されたのに対し、溶融結晶化骨材は、同じ材齢で膨張率が 0.031% で「無害」と判定された。

反応性骨材 A については、原石、溶融結晶化骨材ともに「無害」と判定された。しかし、材齢 6 か月における膨張率は、原石 0.051% に対して、溶融結晶化骨材 0.014% であり、溶融結晶化によって膨張率が低減する効果が認められた。反応性骨材 A は、有害骨材として入手したものであるが、試験用に採取したサンプル中に含有される反応性シリカの量が少なかったことなどの理由により、今回の試験では原石についても無害な結果が出たものと推測される。

Table 8 溶融結晶化骨材のモルタルバー法試験結果
(Mortar-Bar Test Results of Crystallized Aggregates)

骨材種類		A		B	
		原石	溶融結晶化	原石	溶融結晶化
膨張率 (%)	3ヶ月	0.023	0.013	0.107	0.034
	6ヶ月	0.051	0.014	0.227	0.031
判定		無害	無害	無害でない	無害

判定基準：膨張率が3か月で0.050%以上または6か月で0.100%以上の場合、「無害でない」

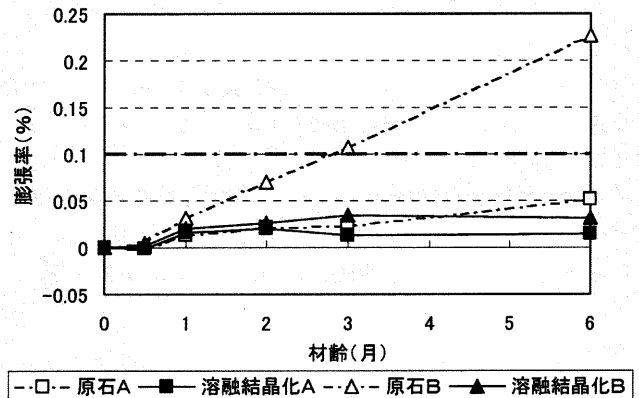


Fig. 4 溶融結晶化骨材のモルタルバー法試験結果
(Mortar-Bar Test Results of Crystallized Aggregates)

(2) 表面改質による効果

反応性骨材 A, B について、原石および表面改質骨材のモルタルバー法試験結果を Table 9 および Fig. 5 に示す。

反応性骨材 B については、原石が 6 か月で膨張率 0.207% であり「無害でない」と判定されたのに対し、表面改質骨材は、同じ材齢で膨張率が 0.040% で「無害」と判定された。

反応性骨材 A については、原石、表面処理骨材ともに膨張率は「無害」と判定された。

以上のモルタルバー法試験結果から、溶融結晶化および表面改質のいずれの方法によっても、原石と比較して膨張率を低減する効果が明らかとなり、反応性骨材を無害化できる可能性のあることが確認できた。

Table 9 表面改質骨材のモルタルバー法試験結果
(Mortar-Bar Test Results of Surface Transformed Aggregates)

骨材種類		A		B	
		原石	表面改質	原石	表面改質
膨張率 (%)	3ヶ月	0.025	0.029	0.027	0.044
	6ヶ月	0.044	0.025	0.207	0.04
判定		無害	無害	無害でない	無害

判定基準：膨張率が3ヶ月で0.050%以上または6ヶ月で0.100%以上の場合、「無害でない」

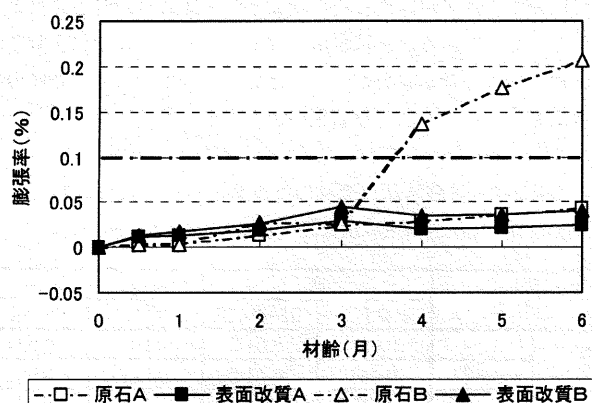


Fig. 5 表面改質骨材のモルタルバー法試験結果
(Mortar-Bar Test Results of Surface Transformed Aggregates)

V. おわりに

2種類の反応性骨材とこれらを下記の2通りの方法によって改質した骨材について、化学法およびモルタルバー法によるアルカリシリカ反応性試験を実施した。

- a. 熔融結晶化：組成調整→熔融（1,450℃で1時間保持）→結晶化（850℃で2時間，1,075℃で4時間保持）
- b. 表面改質：CaO添加→表面改質（1,200℃で30分間保持）

試験の結果、下記の事項が明らかとなった。

- ①化学法の試験結果においては、熔融結晶化または表面改質を行うことによって、アルカリ濃度減少量および溶解性シリカ量がともに低減することが確認された。
- ②モルタルバー法の試験結果においては、原石が「無害でない」と判定された場合でも、熔融結晶化または表面改質によって改質した骨材は、いずれも「無害」と判定された。
- ③化学法の判定では、改質後の骨材は原石に比べて溶解性シリカ量が著しく小さくなったものの、必ずしも「無害」の領域には移行しなかった。しかし、モルタルバー法の判定結果からは、改質後の骨材はすべて無害であることが確認された。
- ④以上から、熔融結晶化および表面改質のいずれの方法によっても、アルカリシリカ反応に対して有害な反応性骨材を無害化できる可能性のあることが確認された。

謝 辞

本研究は、月島機械株式会社との共同研究として実施した。また、三菱マテリアル研究所の関係者のご協力をいただいた。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 朝日新聞；生コン工場全国検査 2001年5月11日（朝刊）
- 2) 永吉義一他；ごみ焼却灰のプラズマ溶融による石材化，第17回全国都市清掃研究発表会講演論文集，Ⅲ・4-1，(1996)，pp.88-90.
- 3) 金子拓己，西田克範他；下水汚泥・焼却灰を再利用した外装壁タイルの開発（その1）溶融石材化スラグを用いた外装壁タイルの製造，日本建築学会学術講演梗概集，(2000)，pp.997-998.
- 4) 柳田克己，新井一彦他；下水汚泥・焼却灰を再利用した外装壁タイルの開発（その2）外装壁タイルの基礎物性と施工品質，日本建築学会学術講演梗概集，(2000)，pp.999-1000.