

ASR劣化コンクリートから取り出した骨材の反応性に関する研究

A study on Reactivity in Aggregates Taken from ASR Damaged Concrete

田中 隆範* 森野 奎二** 岩月 栄治**
Takanori TANAKA, Keiji MORINO and Eiji IWATSUKI

Abstract : Alkali-Silica Reaction (ASR) occurs for a long term. In the repairs of ASR damaged concrete structure, it needs to know the residual reactivity in aggregates. In this paper, the reactivity in aggregates taken from ASR damaged concrete prisms had been stored for 11-14 years, was investigated by chemical test method and expansion measurements of concrete prisms were made with the aggregates. In chemical method, dissolved silica (Sc) of aggregates taken from ASR damaged concrete prisms differed from that of original aggregates. The expansions of the concrete prisms that were adjusted in the quantity of 9 kg/m³ alkali were different by the kinds of rocks and the locality of aggregates. And also, it was different from the past expansions for 11-14 years.

1. はじめに

アルカリシリカ反応(ASR)は、コンクリート打設後1~2年で劣化を生ずることがある。また、コンクリートに劣化が認められるようになった後も反応が長期間にわたって継続的に進行する¹⁾²⁾。コンクリート内部でASRが進行している場合、長期間経過してから急激に劣化が顕在化することもあり、その反応性は変化に富んでいる。このような変化に富んだASRではあるが、1つの目安は骨材の残存反応性である。特に、ASR劣化構造物の補修においては、補修の可否の判断や補修方法の選択をするうえで、骨材の残存反応性を把握しておく必要がある。しかし、骨材自体に反応性がどの程度残っているかを調査すると、その反応性は岩種や試験方法等によって結果が異なる場合がある³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾。そして、ASRの発生と進行に影響を及ぼす要因も非常に多い。例えば、外部からの影響としては道路に散布される融雪剤に含まれるNaClがその1つである。従来の融雪剤にはCaCl₂が主に使われていたが、地域によっては経済性や路面が滑りにくい等の理由で

NaClの使用が増加しており、コンクリートに外部からNaClが供給される機会が増している⁷⁾⁸⁾⁹⁾。このように骨材にアルカリが供給される状況は多様化している。

これまでASRを起こした骨材の残存反応性を検討した研究は少なく、特に長期にわたる詳細な実験及び調査を継続したデータは少ない。一方、ASRの抑制方法として高炉水砕スラグ微粉末等の混和材の使用は有効である。今後、ASR劣化コンクリート構造物を解体し、再生骨材としてコンクリートから取り出した反応性骨材の利用が見込まれる¹⁰⁾ことから、高炉水砕スラグ微粉末によるASR膨張抑制効果¹¹⁾も調査する必要がある。

本研究では、11~14年間貯蔵してあったASR劣化コンクリート供試体から骨材を取り出し、骨材の残存反応性を調査した。化学法試験では、岩種、骨材の産地、モルタルの剥離状態によって反応性や溶解シリカ量(Sc)がどの程度相違するかを検討した。吸水率3%以下まで改善した骨材のみを用いて作製したコンクリート供試体¹²⁾を用いて、岩種、骨材の産地等によって、改善骨材コンクリートの膨張がどの程度影響を受けるかを検討した。その他に、高炉水砕スラグ微粉末を混和材として使用したコンクリート供試体のASR膨張抑制

* 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)

効果についても検討した。

2. 実験概要

本研究は、以下の4つの実験より構成される。

シリーズI：原コンクリートから取り出した骨材の反応性及び溶解シリカ量(S_c)の変化の検討。

シリーズII-1：原コンクリートから取り出した骨材を用いた供試体の40°C湿潤貯蔵での膨張挙動の検討。

シリーズII-2：原コンクリートから取り出した骨材を用いた供試体の50°CNaCl溶液浸漬貯蔵での膨張挙動の検討。

シリーズIII：原コンクリートから取り出した骨材を用いたコンクリートの膨張に及ぼす高炉水砕スラグ微粉末の抑制効果の検討。

2.1 使用材料

2.1.1 骨材を取り出したコンクリートの特性

骨材を取り出すために用いたコンクリートは、ASRによるコンクリートの劣化を検討するために11~14年間研究室に貯蔵してきた供試体寸法100×100×390mmの角柱供試体(以下、原コンクリートと称す)である。その使用骨材は反応性であるチャートYo、Se、J、T、安山岩M、Ky、Nと非反応性である砂岩Ty、Tであり、原コンクリート時の総アルカリ量は2.4、3.0、3.6、6.0 kg/m³ (3.6、6.0 kg/m³はチャートYo、Seのみとし、砂岩Tは3.0 kg/m³のみとする)となっている。図1に原コンクリートに使用された骨材の化学法試験結果、図2に骨材種類別の原コンクリートの膨張率を示す。

2.1.2 原コンクリートから取り出した骨材のモルタル付着状態

原コンクリートをプレーキジョークラッシュャで破碎して取り出した骨材は、次の3種類とした。すなわち、破碎直後の何も手を加えてない状態の骨材(以下、改善前と称す)、ロサンゼルス試験機で3~4時間摩擦してモルタルを剥離し、第一種構造物に使用することができる吸水率3%以下にした状態の骨材(以下、改善後と称す)、及び、改善後の骨材300gに対し10の工業用硝酸溶液(HNO₃、濃度67.5%)に48時間浸漬してモルタルを剥離した状態の骨材(以下、硝酸浸漬後と称す)¹³⁾である。それらを写真1~写真3に示す。なお、硝酸溶液浸漬前後のモルタル付着量、すなわち、改善後の骨材に付着しているモルタルの割合は表1に示すように、8~23%であった。

2.2 原コンクリートから取り出した骨材を用いたコンクリート供試体

2.2.1 供試体作製

改善後の骨材を用いたコンクリート供試体の配合を表2に示す。供試体寸法は60×60×150mmで角柱供試体とし、供試体両端に膨張率測定用としてビスを埋め込んだ。粗骨材は前述にある改善後、細骨材には安定な石英からなる非反応性の愛知県瀬戸産の珪砂を用い、供試体本数は、配合毎で1~

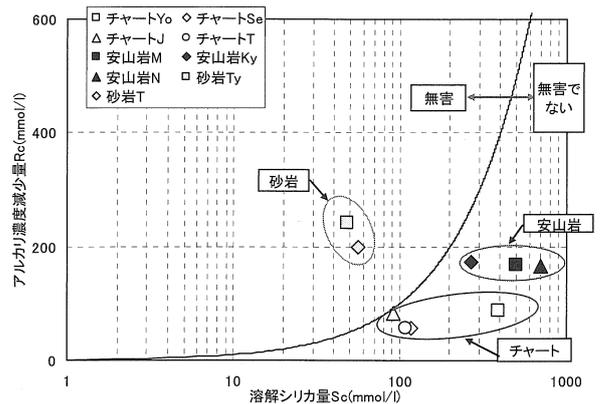


図1 原コンクリートに使用された骨材の化学法試験結果

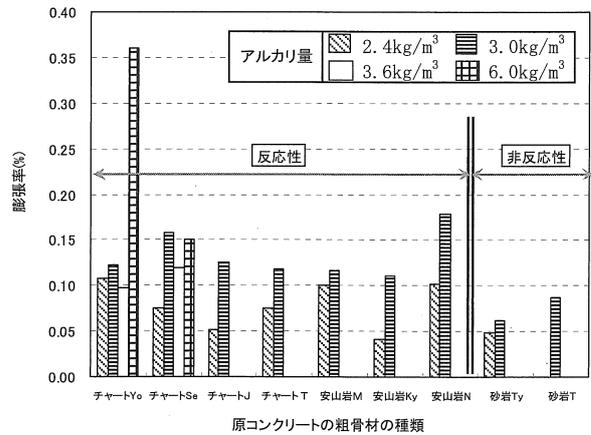


図2 骨材種類別の原コンクリートの膨張率



写真1 原コンクリートから取り出した骨材(改善前)

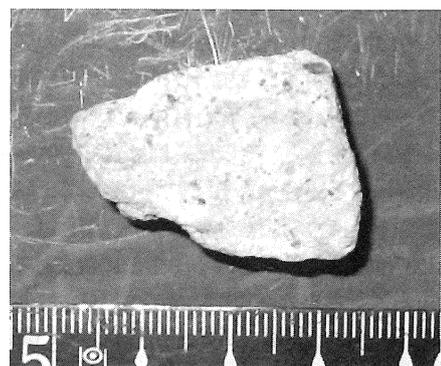


写真2 原コンクリートから取り出した骨材(改善後) 3本作製し、同一環境に貯蔵した。なお、改善後に付着して

いるモルタルに含まれるアルカリは、表1に示すように0.04~0.12 kg/m³と微量なので作製時に考慮せず、総アルカリ量をNa₂O換算で、シリーズIIでは3 kg/m³、9kg/m³、シリーズIIIでは9kg/m³とした。また添加アルカリは、NaOH(特級、顆粒状)を水に溶かして用い、セメントは普通ポルトランドセメント(アルカリ量、Na₂O換算0.62%)を用いた。本実験では、シリーズII-1において、総アルカリ量3kg/m³と9kg/m³の供試体(H14、15作製)で計120本、シリーズII-2において、総アルカリ量3kg/m³の供試体(H15作製、チャートYo、Se、J、T、安山岩Mのみ)を計39本、シリーズIIIにおいて、総アルカリ量9kg/m³の供試体(H16作製)を計47本作製した。

2.2.2 シリーズII 供試体の貯蔵状態

シリーズII-1では、供試体作製24時間後に供試体を湿度95%以上となるようすべて湿らせた保湿布で覆い、ビニール袋で2重に密封し湿潤状態とした。供試体を貯蔵した容器は、40℃恒温室内に設置した。またシリーズII-2では、貯蔵期間28日までのシリーズII-1と同様とし、それ以降は供試体を50℃のNaCl溶液に浸漬状態とした。

2.2.3 シリーズIII 供試体の貯蔵状態

シリーズIIIでは、セメントは50%を高炉水砕スラグ微粉末で置換したものを使用した。また、シリーズII-1と同様に供試体作製24時間後に供試体を湿度95%以上となるようすべて湿らせた保湿布で覆い、ビニール袋で2重に密封し湿潤状態とした。それらを貯蔵した容器は、40℃恒温室内に設置した。

2.3 実験方法

2.3.1 化学法試験

原コンクリートから取り出した改善前、改善後、硝酸浸漬後のチャートYo、Se、J、T、安山岩M、Ky、N、砂岩Ty、T、計62種類の骨材について化学法試験を行った。さらに、これらの骨材とは別途にチャート、安山岩、珪砂を用い、硝酸溶液の骨材に及ぼす影響の有無を調べるために、硝酸溶液浸漬前後で化学法試験も行った。なお、化学法試験において粒度調整以降の手順は、どの処理方法でもJIS A 1145-2001に従った。

2.3.2 膨張率測定

コンクリート供試体の膨張率測定は、40℃湿潤貯蔵及び50℃NaCl溶液浸漬貯蔵の供試体ともに、測定する16時間以上前に温度20±2℃に保たれた測定室内へ移動させた後、1/1000mmダイヤルゲージ付きの長さ変化測定器を用いて行った。なお、脱型24時間後の測定値を初期値とし、膨張率を算出した。

3. 結果及び考察

3.1 原コンクリートから取り出した骨材の反応性及び溶解シリカ量(Sc)の変化[シリーズI]

原コンクリートから取り出した骨材の化学法試験結果を

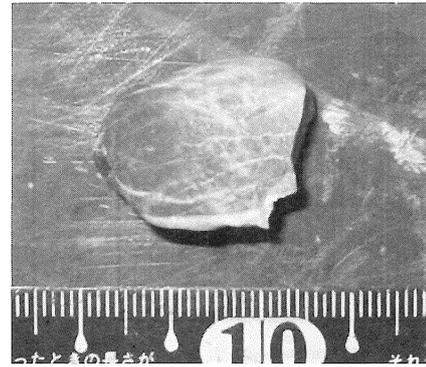


写真3 原コンクリートから取り出した骨材(硝酸浸漬後)

表1 改善後骨材のモルタル付着率

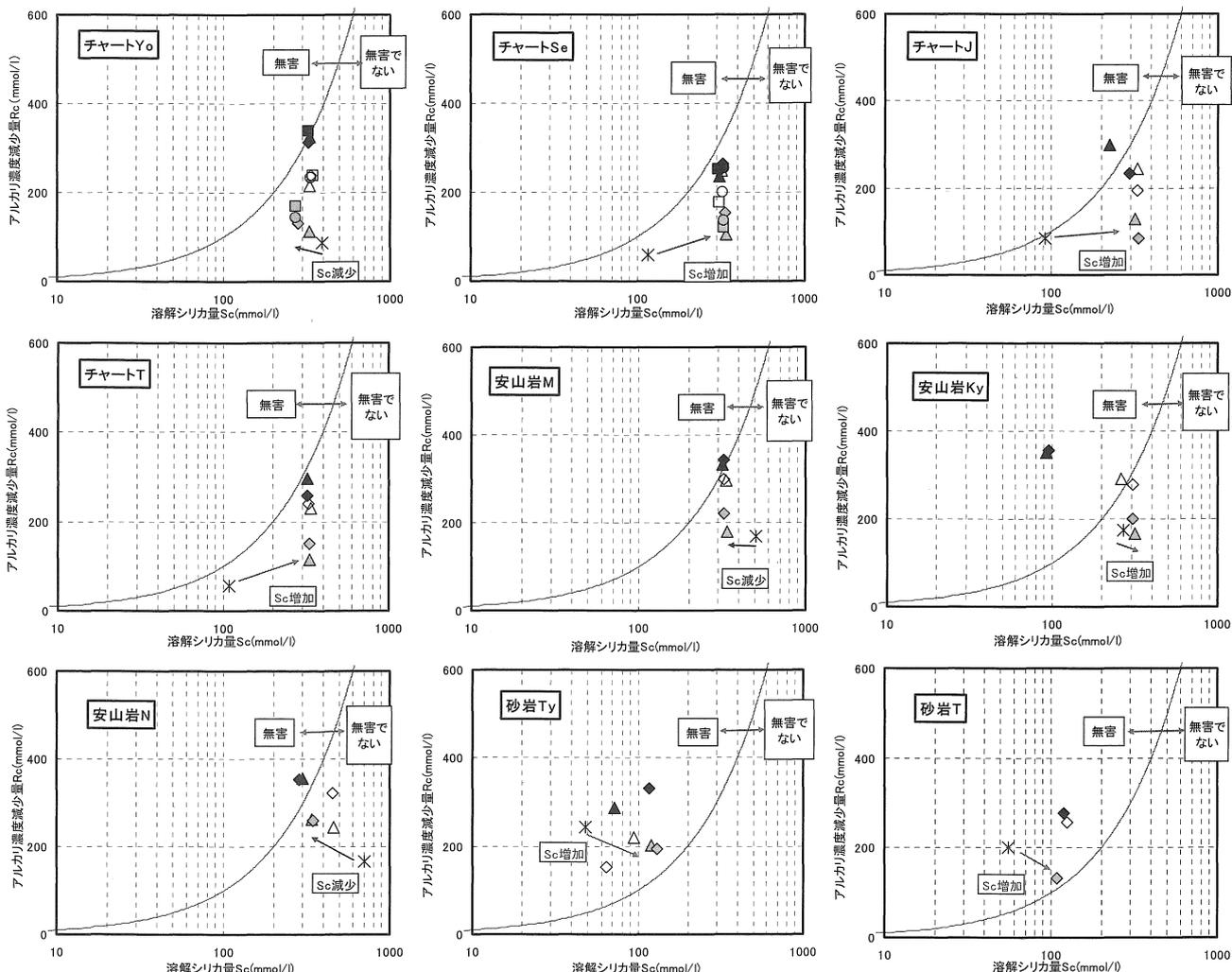
	硝酸浸漬 前の質量 (g)	硝酸浸漬 後の質量 (g)	モルタル 付着率 (%)	モルタルに含 まれるアルカリ 量(kg/m ³)
チャートYo 2.4kg/m ³	300.0	245.5	18	0.08
チャートYo 3.0kg/m ³	300.0	238.0	21	0.09
チャートYo 3.6kg/m ³	300.1	238.4	21	0.12
チャートYo 6.0kg/m ³	300.0	256.9	14	0.10
チャートSe 2.4kg/m ³	300.1	250.8	16	0.05
チャートSe 3.0kg/m ³	300.2	270.3	10	0.04
チャートSe 3.6kg/m ³	300.2	261.0	13	0.06
チャートSe 6.0kg/m ³	300.3	260.0	13	0.11
チャートJ 2.4kg/m ³	300.1	266.8	11	0.04
チャートJ 3.0kg/m ³	300.0	255.0	15	0.06
チャートT 2.4kg/m ³	300.0	260.0	13	0.04
チャートT 3.0kg/m ³	300.5	257.9	14	0.06
安山岩M 2.4kg/m ³	301.0	271.0	10	0.06
安山岩M 3.0kg/m ³	301.0	275.8	8	0.05
安山岩Ky 2.4kg/m ³	303.5	242.4	20	0.07
安山岩Ky 3.0kg/m ³	302.7	244.3	19	0.08
安山岩N 2.4kg/m ³	314.3	243.6	22	0.05
安山岩N 3.0kg/m ³	309.8	240.0	23	0.07
砂岩Ty 2.4kg/m ³	311.6	265.8	15	0.06
砂岩Ty 3.0kg/m ³	307.1	251.2	18	0.09
砂岩T 3.0kg/m ³	317.7	255.8	19	0.10

表2 改善後の骨材を用いたコンクリート供試体の配合

	粗骨材 最大寸法	水セメント 比	細骨材 率	単位量(kg/m ³)				混和 剤
				水	セメント	細骨 材	粗骨 材	
				W	C	S	G	
チャート: Yo, Se, J, T	20	51.3	41.0	154	300	761	1025 ~ 1058	0.3
安山岩: M, Ky, N							1054 ~ 1091	
砂岩: Ty, T							1046 ~ 1079	

※1 混和剤は9kg/m³の供試体のみ使用

※2 高炉水砕スラグ微粉末を混入した供試体は、セメントへの微粉末混入率を50%とした



凡例

改善前	改善後	硝酸浸漬後	改善前	改善後	硝酸浸漬後
▲: 2.4kg/m ³	△: 2.4kg/m ³	△: 2.4kg/m ³	■: 3.6kg/m ³	□: 3.6kg/m ³	□: 3.6kg/m ³
◆: 3.0kg/m ³	◇: 3.0kg/m ³	◇: 3.0kg/m ³	●: 6.0kg/m ³	○: 6.0kg/m ³	○: 6.0kg/m ³
* : 原骨材					

※1 3.6kg/m³、6.0kg/m³はチャートYo、Seのみ

※2 砂岩Tは3.0kg/m³のみ

図3 原コンクリートから取り出した骨材の化学法試験結果

図3に示す。図では62種類のうち44種類の骨材が「無害でない」と判定された。非反応性である砂岩Ty、Tを除き、モルタルの付着量が少なくなるにつれ、「無害でない」の領域に移動する傾向が見られた。また、モルタルの付着が全くない硝酸溶液浸漬後がすべて「無害でない」と判定されたことから、11~14年間コンクリート中においてASRを起こしていても骨材自体に反応性が残っているといえる。

さらに、チャート、安山岩の原骨材と長期経過後の溶解シリカ量(Sc)を比較すると、チャートYo、安山岩M、Nは溶解シリカ量(Sc)が減少しており、原コンクリート時にシリカが消費されたと考えられる。逆にチャートSe、J、T、安山岩Kyは溶解シリカ量(Sc)が増加していることから、原コンクリート時にシリカが残った状態にあり、しかも反応しやすい状態になっていると考えられる。

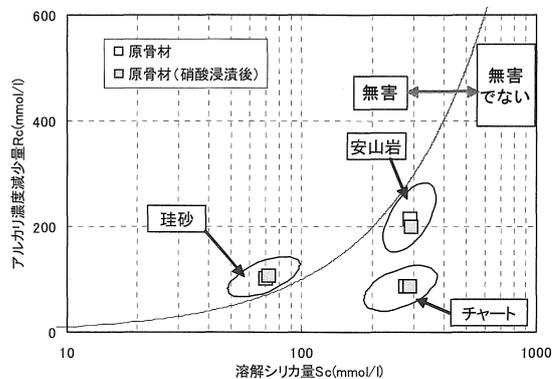


図4 硝酸溶液浸漬前後の化学法試験結果

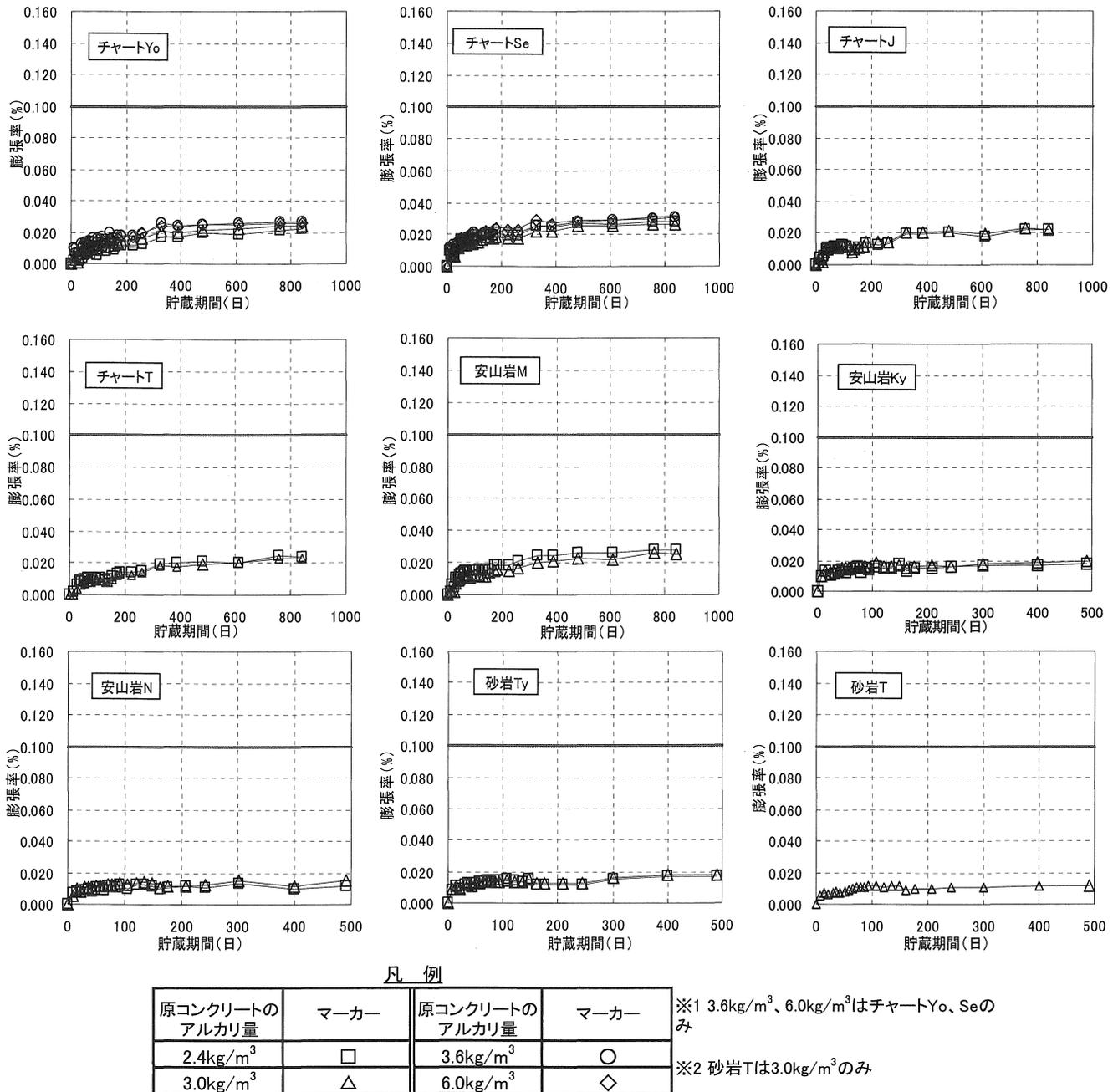


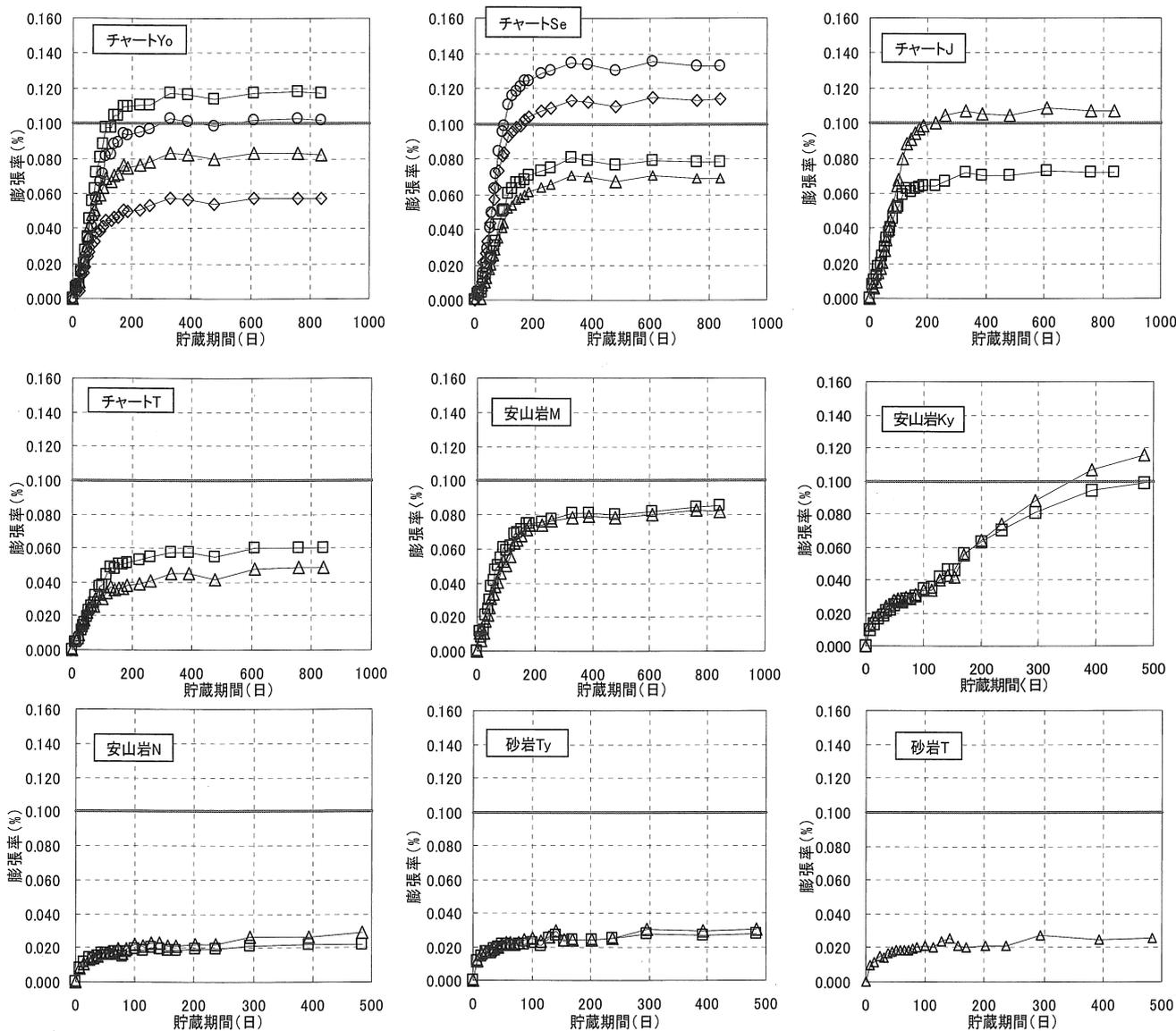
図5 総アルカリ量 3kg/m³ コンクリート供試体の膨張挙動

次に、硝酸溶液浸漬前後の化学法試験結果を図4に示す。図によると、チャート、安山岩、珪砂の3種類すべてにおいて、浸漬前後でアルカリ濃度減少量(Rc)、溶解シリカ量(Sc)に大きな違いは見られない。このことから、モルタル剥離の過程で硝酸溶液が骨材(チャート、安山岩)自体に及ぼす影響はほとんど無いものといえる。

3・2 原コンクリートから取り出した骨材を用いた供試体の40°C湿潤貯蔵及び50°CNaCl溶液浸漬貯蔵での膨張挙動[シリーズII]

シリーズII-1において、総アルカリ量 3kg/m³、9kg/m³ コンクリート供試体の膨張挙動を図5、図6に示す。図5では、

チャート Yo~安山岩 M が貯蔵期間 840 日で 0.022~0.032%、安山岩 Ky~砂岩 T が貯蔵期間 490 日で 0.012~0.020%の膨張率を示している。総アルカリ量 3kg/m³では、岩種の反応性の有無、骨材の産地、原コンクリート時の膨張等によって膨張率にわずかながら差が見られた。また、反応性骨材であるチャート、安山岩であっても貯蔵期間 490~840 日で膨張が活発に起きていない原因としては、原コンクリート時の膨張によってシリカが消費されたことや今回の実験に用いた供試体が JIS A 5308 に定められている ASR の抑制対策にあたる総アルカリ量 3kg/m³以下であったことが考えられる。しかし、微量ながら膨張が継続しており、化学法試験結果からも今後膨張が増加する可能性があるため、更なる検討が必要といえ



凡例

原コンクリートのアルカリ量	マーカー	原コンクリートのアルカリ量	マーカー
2.4kg/m ³	□	3.6kg/m ³	○
3.0kg/m ³	△	6.0kg/m ³	◇

※1 3.6kg/m³、6.0kg/m³はチャートYo、Seのみ
 ※2 砂岩Tは3.0kg/m³のみ

図 6 総アルカリ量 9kg/m³ コンクリート供試体の膨張挙動

る。
 図6では、チャートYo～安山岩Mが貯蔵期間840日で0.049～0.133%、安山岩Ky～砂岩Tが貯蔵期間490日で0.022～0.116%の膨張率を示している。総アルカリ量9kg/m³は、高アルカリであるため、各種骨材とも総アルカリ量3kg/m³よりも短期間で明確な膨張が見られた。特に安山岩の膨張率はMで0.082～0.085%、Kyで0.099～0.116%、Nで0.022～0.029%をそれぞれ示しており、同じ岩種であっても膨張率に差があることがわかる。このうち安山岩Kyは、貯蔵直後より膨張が一定の割合で伸びており、他とは異なる膨張を示している。また、安山岩Nはほとんど膨張していないが、その原因として、原コンクリート時の膨張によって、シリカがかなり消費

されたためと考えられる。
 さらに、シリーズII-2において、50℃NaCl溶液に浸漬貯蔵した総アルカリ量3kg/m³コンクリート供試体の膨張挙動を図7に示す。図を見ると、チャートYo～安山岩Mは貯蔵期間546日で0.032～0.045%の膨張率を示しており、貯蔵期間28日までの40℃湿潤貯蔵よりも、貯蔵期間28日以降、すなわち、50℃NaCl溶液浸漬貯蔵時に膨張がわずかながら促進されている。これを図5のチャートYo～安山岩Mの同時期と比較すると、0.004～0.018%程度大きい膨張を示している。このことからNaClによるASRへの影響は認められたが、外部からNaClが供給される環境下にもかかわらず、大きな膨張はみられなかった。これは、骨材に付着している微量のモル

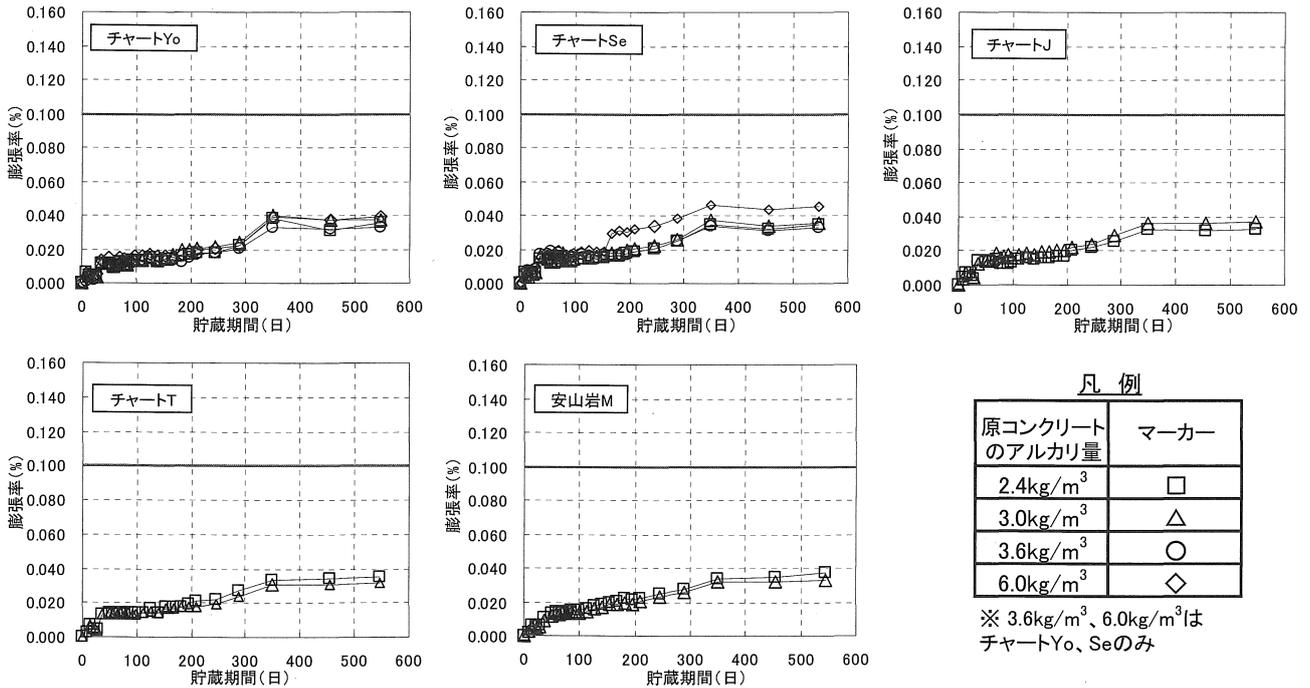


図7 50°CNaCl 溶液に浸漬貯蔵した総アルカリ量 3kg/m³ コンクリート供試体の膨張挙動

タルと粗骨材の寸法の大きさによる反応の遅さが原因と考えられる。しかし、40°C湿潤貯蔵と同様に微量ながら膨張が継続しており、化学法試験結果からも今後膨張が増加する可能性があるため、継続して調査する必要がある。

以上をまとめると、原骨材と長期経過後の溶解シリカ量(Sc)の変化とコンクリート供試体の膨張挙動に相関関係がみられる。すなわち、原コンクリート時に反応が進行している場合、シリカが消費され、残存する反応性は低くなり、逆に、原コンクリート時に反応が進行していない場合は、シリカが消費されず、骨材中に残った状態にあり、コンクリート中にそれらの骨材があることによってさらに残存する反応性が高くなっている。

3・3 原コンクリートから取り出した骨材を用いたコンクリートの膨張に及ぼす高炉水砕スラグ微粉末の抑制効果[シリーズⅢ]

高炉水砕スラグ微粉末を混入した総アルカリ量 9kg/m³ コンクリート供試体の膨張挙動を図8に示す。図では、チャートYo～砂岩Tが貯蔵期間177日で0.010～0.022%の膨張率を示している。図6のチャートYo～砂岩Tの同時期と比較すると、0～0.108%程度、膨張が抑制されていることがわかる。このうち、0～0.007%程度しか膨張が抑制されていないものもあるが、これらは非反応性である砂岩Ty, Tや原コンクリート時にシリカがかなり消費されたと考えられる安山岩Nのみであり、その他のチャートや安山岩は0.027～0.108%程度、膨張が抑制された。これらのことから、コンクリートから取り出した骨材であっても、通常の反応性骨材同様に高炉水砕スラグ微粉末によるASR膨張抑制効果があるといえる。

4. まとめ

本研究で得られた結果をまとめると次のようである。

- (1) 使用した骨材はコンクリート中で長期間(11～14年) ASRを起こしていたが、化学法試験にて70%の骨材が「無害でない」と判定される反応性を残していた。
- (2) 溶解シリカ量(Sc)は、チャートYo、安山岩M、Nが原コンクリート時の長期間の反応によって減少したが、逆にチャートSe、J、T、安山岩Kyは原骨材の試験結果よりも長期経過後の方が増加した。
- (3) 原骨材と長期経過後の溶解シリカ量(Sc)の変化とコンクリート供試体の膨張挙動に相関関係が見られた。
- (4) 原コンクリート時に反応が進行していると残存反応性は低くなり、逆に反応が進行していない場合は、残存反応性が高くなるといえる。

謝辞

本研究は平成13年度愛知工業大学教育・研究特別助成の助成金によって行ったものである。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 岩月栄治、皿井剛典、森野奎二：長期貯蔵したASRモルタルバーの膨張挙動と実構造物の劣化について、土木学会第53回年次学術講演会講演概要集、第5部、pp.202-203、1998.10
- 2) 岩月栄治、森野奎二、皿井剛典：長期貯蔵したASRモルタルバーの膨張に及ぼす反応性鉱物の影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.20、No.2、pp.943-948、1998

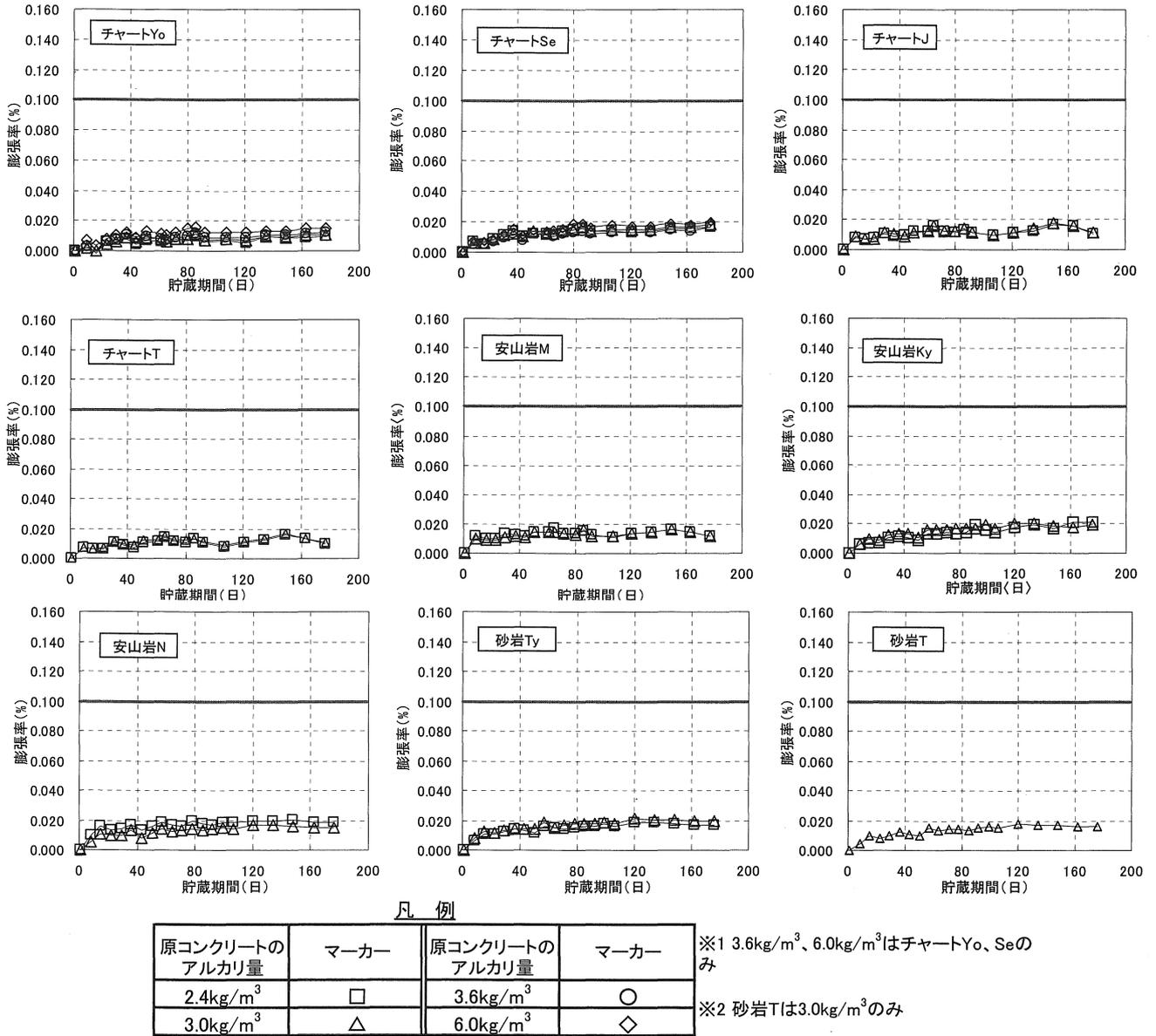


図8 高炉スラグ微粉末を混入した総アルカリ量9kg/m³コンクリート供試体の膨張挙動

- 3) 森野奎二、岩月栄治：反応性骨材を用いた再生骨材コンクリートのアルカリシリカ反応性、土木学会中部支部平成14年度研究発表会講演概要集、pp. 533-534、2003
- 4) 岩月栄治、森野奎二：再生骨材のアルカリシリカ反応に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 25、No. 1、pp. 1229-1234、2003
- 5) 田中隆範、森野奎二、岩月栄治：コンクリートから回収したアルカリシリカ反応性骨材の残存反応性、土木学会中部支部平成15年度研究発表会講演概要集、pp. 459-460、2004
- 6) 田中隆範、森野奎二、岩月栄治：コンクリート中のアルカリシリカ反応性骨材の残存反応性、土木学会第59回年次学術講演会講演概要集、5-004、2004
- 7) 皿井剛典、岩月栄治、森野奎二：凍結防止剤がアルカリシリカ反応に及ぼす影響、土木学会第53回年次学術講演会講演概要集、第5部、pp. 198-199、1998. 10
- 8) 皿井剛典、岩月栄治、不破昭、森野奎二：各種浸漬溶液がアルカリシリカ反応に及ぼす影響、土木学会中部支部平成10年度研究発表会講演概要集、pp. 559-560、1999. 3
- 9) 岩月栄治、森野奎二、不破昭、皿井剛典：各種溶液に浸漬したASRコンクリート角柱の膨張挙動、土木学会中部支部平成10年度研究発表会講演概要集、pp. 561-562、1999. 3
- 10) TR A0006：再生骨材を用いたコンクリート、土木学会コンクリート標準仕方書基準編、pp. 423-429、2002
- 11) 皿井剛典、岩月栄治、森野奎二：高炉水砕スラグ粉末及びフライアッシュのASR長期抑制効果、土木学会中部支部平成9年度研究発表会講演概要集、pp. 723-724、1998. 3
- 12) 建設省技調発第88号建設大臣官房技術調査室長通達：コンクリート副産物の再利用に関する用途別暫定品質基準(案)、1994. 4
- 13) 飯島亨、鶴田孝司、立松英信：再生骨材の物理的性質に及ぼす原コンクリートの品質の影響、資源・素材学会秋季大会企画発表・一般発表(D)資料、pp. 99-100、1997. 9

(受理 平成17年3月17日)