

論文 長期間貯蔵した ASR モルタルバーの膨張に及ぼす反応性 鉱物の影響

岩月栄治*¹・森野奎二*²・皿井剛典*³

要旨：アルカリシリカ反応の代表的な反応性骨材である安山岩 4 種類、チャート 2 種類と、黒曜岩、パイレックスガラスを用いたモルタルバーを 10 年間にわたって貯蔵し、膨張率の測定を行い、長期間の膨張とベシマム状態の変化を示した。また、長期間貯蔵後の膨張率と骨材中の反応性鉱物(クリストバライト、トリジマイト、火山ガラス、非晶質シリカ)の含有量との関係を示した。

キーワード：アルカリシリカ反応、モルタルバー、膨張率、安山岩、チャート、反応性鉱物

1. はじめに

アルカリシリカ反応(以下 ASR と称す)は、長期間にわたって反応が継続することが確認されている¹⁾。そのため、実構造物の ASR による劣化を検討する上では、モルタルバーやコンクリート角柱の長期間の膨張特性を把握することが必要である。しかし、モルタルバーやコンクリート角柱での長期間の膨張特性に関する研究・報告は少なくデータの蓄積が必要である。本研究は、長期間貯蔵した各種の反応性骨材を用いたモルタルバーの膨張特性を検討し、さらに長期間貯蔵後の膨張率と、反応性骨材に含まれる反応性鉱物の含有量や岩石学的特徴との関係について検討した。

で切羽の位置が異なるものである。チャート質骨材は、チャート Yo は岐阜県の中・古生層の岩盤から採取した碎石であり、チャート Se は愛知県の第三紀層の地層から採取した山砂利である。黒曜石は、長野県和田村から採取したもので火山ガラスのモデル骨材として使用し、パイレックスガラスも同様にモデル骨材として使用した。これらの反応性骨材は、現在の JIS A5308 では「無害でない：B」に区分されるものである。反応性骨材の混合比は、20, 40, 60, 80 及び 100%とし、非反応性骨材は珪砂を使用した。使用セメントは普通ポルトランドセメント(Na_2O 等量 0.65%)で、添加アルカリ(NaOH)を

2. 実験方法

2. 1 長期間測定したモルタルバー供試体

長期間の膨張率を測定したモルタルバーは、1987 年に ASTM C227 に準じて作製したもので、形状は $28 \times 28 \times 180\text{mm}$ である。使用骨材の化学法試験結果を表-1 に示す。安山岩は、瀬戸内火山岩区に属する斜方輝石安山岩である。安山岩 A, B, C は、いずれも碎石工場の製品置場から採取したものであり、E1 と E2 は同一碎石場

表-1 化学法試験結果

骨 材	化学法の結果 (mmol/l)			
	Sc	Rc	Sc/Rc	判 定
安山岩A	493	203	2.43	無害でない
安山岩B	544	177	3.07	無害でない
安山岩C	502	169	2.97	無害でない
安山岩E1	592	89	6.65	無害でない
安山岩E2	882	202	4.37	無害でない
チャートYo	391	88	4.44	無害でない
チャートSe	116	58	2.00	無害でない
黒 曜 石	61	50	1.22	無害でない
パイレックス	840	131	6.41	無害でない
珪 砂	12	27	0.43	無害

*1 愛知工業大学講師 工学部土木工学科 工修 (正会員)

*2 愛知工業大学教授 工学部土木工学科 理博 (正会員)

*3 愛知工業大学大学院 工学研究科 建設システム工学専攻

使用して、 Na_2O 等量で 0.65, 0.81, 1.2 及び 1.5% に調整した。供試体は、金属製の密閉容器内に 2 重にしたビニール袋を入れて、その底部に水を入れ、その上部に貯蔵した。密閉容器の貯蔵場所は 2 年まで 38℃ の恒温室内に、以後は実験室内 (約 10~25℃) とした。安山岩 E1, E2, 黒曜岩及びチャートの貯蔵 6 ヶ月までの結果は、既往の文献^{2), 3)} で報告している。

2. 2 安山岩骨材に含まれる反応性鉱物の定量

安山岩に含まれる反応性鉱物は、シリカ鉱物のクリストバライト (Cr), トリジマイト (Tr) と火山ガラス (Vg) である。これらの定量は偏光顕微鏡下で概略を把握し、数値的には X 線回折によって求めた²⁾。X 線回折では、まず熱燐酸処理によって Cr, Tr, 石英の含有量を求めた。その内、石英の含有量は X 線回折の内部標準法

(標準物質: LiF) で石英とパイレックスガラスで作成した検量線 (図-1) から求め、それを差し引いて Cr と Tr の含有量とした。Vg の定量は、未処理の安山岩を使用し、X 線回折角度 $2\theta = 23^\circ$ 付近のバックグラウンドの上昇を測定し (長石のピークと重なるため測定は 25° で行った)、パイレックスガラスと石英で作成した検量線 (図-2) と、安山岩中の微量の Fe によるバックグラウンドの上昇を補正するための検量線 (図-3) を用いた。

2. 3 チャート質骨材に含まれる反応性鉱物の定量と結晶性指標

チャート質骨材に含まれる反応性鉱物は、潜晶質石英、玉髄及び非晶質シリカである。これらは X 線回折では石英のピークが顕著に現れるので、石英の最強線 ($2\theta = 26.7^\circ$) の高さとな非晶質シリカ量 (パイレックスガラス使用) との関

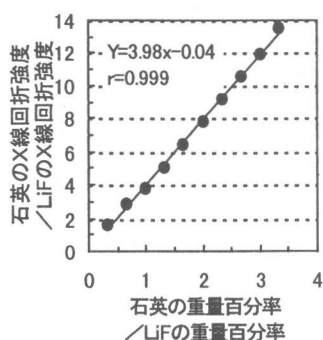


図-1 燐酸処理後の安山岩に含まれる石英の検量線

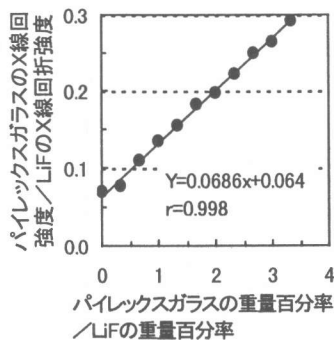


図-2 安山岩に含まれる火山ガラスを定量する検量線

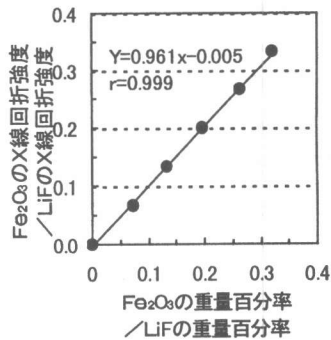


図-3 安山岩に含まれる Fe によるバックグラウンド補正の検量線

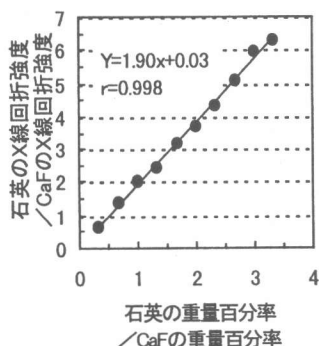


図-4 チャートに含まれる非晶質シリカを定量する検量線⁴⁾

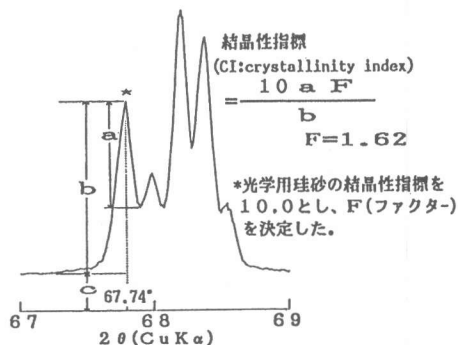


図-5 石英の $2\theta = 69 \sim 67^\circ$ の 5 重線と結晶性指標の算定⁴⁾

係を内部標準法(標準物質:CaF)によって作成した検量線(図-4)から求め、その差を非晶質シリカの含有量とした。また、図-5の石英の $2\theta=69\sim 67^\circ$ の5つのピークから結晶性指標(CI)を測定した⁴⁾。

3. 結果及び考察

3. 1 安山岩に含まれる反応性鉱物の定量

表-2にCr, Tr, Vgの定量結果を示す。砕石工場製品の安山岩A, B, Cは, Cr+Trが7.4~10.4%, Vgは3.2~12.7%であった。また, E1はCr+Trは7.3%, Vgは51.9%, E2は同順で

表-2 安山岩に含まれる反応性鉱物含有量

骨 材	反応性鉱物の含有量(%)		
	クリスタライト(Cr) +トリジマイト(Tr)	火山ガラス(Vg)	Cr+Tr+Vg
安山岩A	10.0	3.2	13.2
安山岩B	7.4	12.7	20.1
安山岩C	10.4	7.0	17.4
安山岩E1	7.3	51.9	59.2
安山岩E2	11.4	9.0	20.4
黒曜石	0	80.0	80.0

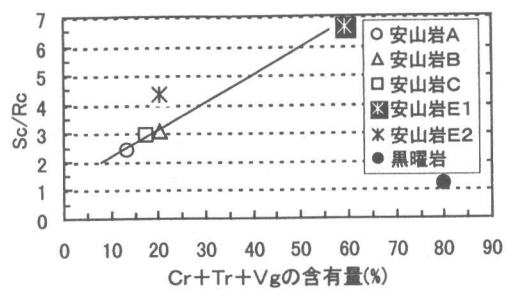


図-6 化学法の結果と反応性鉱物量の関係

11.4, 9.0%であった。これらから同一採石場であっても切羽が異なれば鉱物の構成が大きく変動することがわかる。モデル材料である黒曜岩は外見ではほとんど火山ガラスであるが, X線回折では長石などを20%含んでいた。図-6に化学法の結果と反応性鉱物量の関係を示す。安山岩は正の比例関係を示しているが, 黒曜岩は傾向が異なっている。

3. 2 安山岩を用いたモルタルバーの貯蔵10年間の膨張挙動

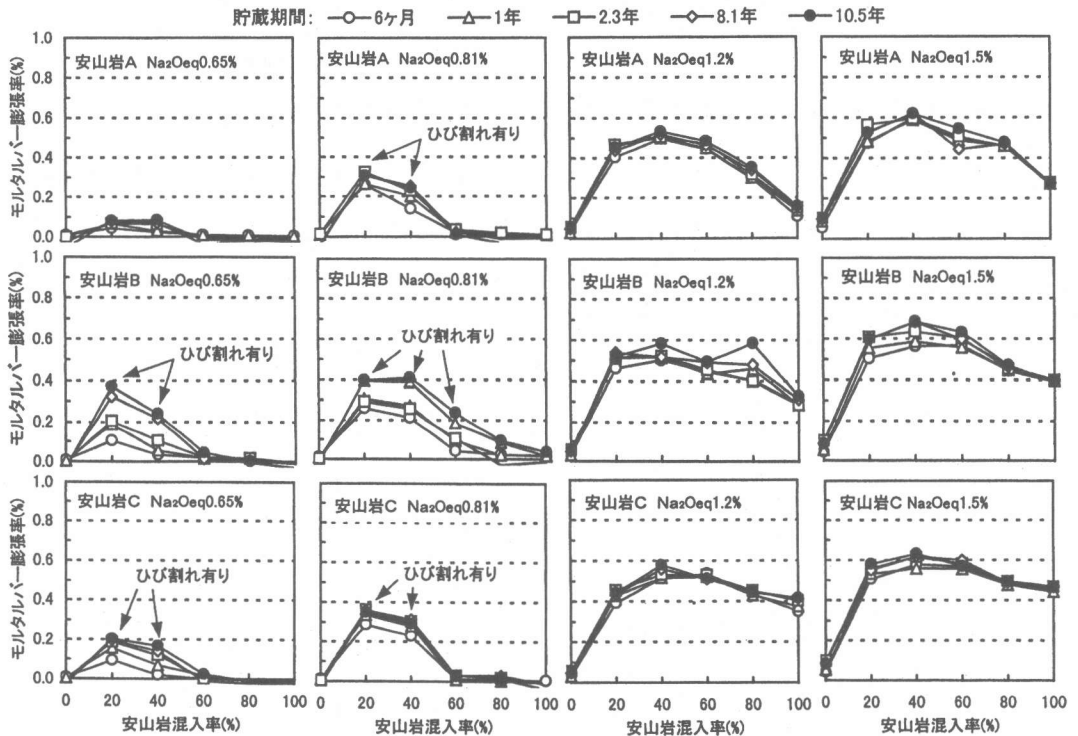


図-7 安山岩A, B, Cを用いたモルタルバーの各貯蔵期間の膨張率

図-7に安山岩 A, B, C を用いたモルタルバーの各貯蔵期間毎の膨張率を示す。いずれの安山岩もアルカリ量が 0.65~0.81~1.2%と増加するに従って膨張率は増加している。しかし 1.2%から 1.5%では膨張の増加は少ない。ペシマムの位置は、安山岩混入率が 20~40%であり、アルカリ量が多くなるに従って混入率 60%以上でも膨張している。貯蔵期間毎の膨張は、貯蔵 6 ヶ月~2.3 年ではほとんど主要な膨張は終え、以後貯蔵 10.5 年までは若干の膨張を示している。しかし、安山岩 B のアルカリ量 0.65%, 混入率 20%は、貯蔵 10.5 年においても膨張の増加がみられている。図-8に安山岩

は、反応性鉱物の含有量が多い安山岩 E1 や黒曜岩、パイレックスガラスは他の安山岩と傾向が異なっている。安山岩 A, B, C, E2(図右の

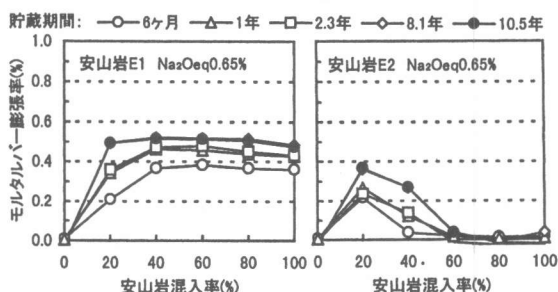


図-8 安山岩 E1, E2 を用いたモルタルバーの各貯蔵期間の膨張率

E1, E2 の各貯蔵期間毎の膨張率を示す。E1 は貯蔵 10.5 年の膨張でもペシマム現象はみられず他の安山岩と傾向が異なっている。これはガラス物質の Vg を多く含むことが原因と考

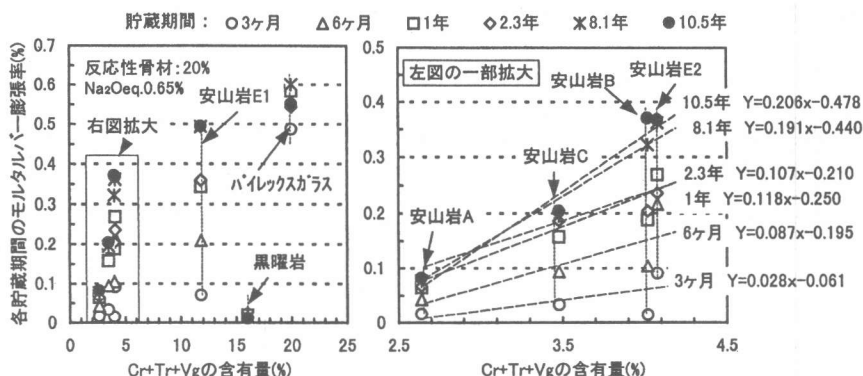


図-9 各貯蔵期間毎のモルタルバー膨張率と反応性鉱物の含有量の関係

えられ、黒曜岩やパイレックスガラスも同様であった。しかし E2 は、ペシマムが明瞭(混入率 20%)であり貯蔵 10.5 年においても膨張の増加がみられている。これは反応性鉱物の含有量が安山岩 B とほぼ同程度であるためと考えられる。これらから安山岩 B や E2 は、アルカリ量 (0.65%) が低くても、ペシマムの場合では、温度も室温程度(約 10~25℃)で膨張が長期にわたって継続することを示しており、既往の結果¹⁾と同様であった。

3. 3 安山岩の膨張率と反応性鉱物の関係

図-9に各貯蔵期間毎のモルタルバー膨張率と反応性鉱物の含有量の関係を示す。最大膨張を示すペシマム(アルカリ量 0.65%, 混入率 20%)での膨張率と反応性鉱物含有量の関係で

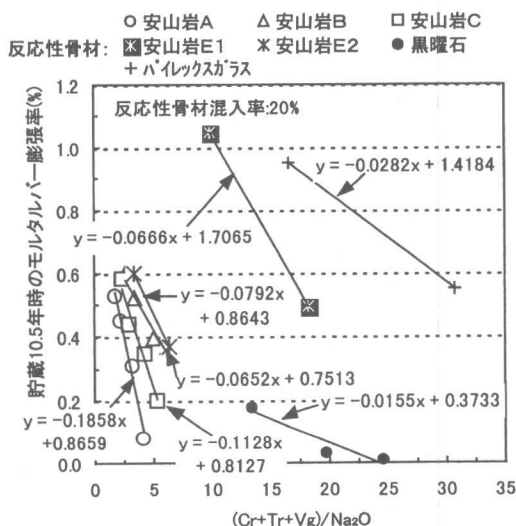


図-10 安山岩を用いたモルタルバーの膨張率と反応性鉱物に対するアルカリ量との関係

拡大図)では、膨張量と反応性鉱物の含有量とは正の比例関係を示し、さらに貯蔵期間の増加に伴って膨張量も増加している。図-10 に貯蔵 10 年時のモルタルバー膨張率と反応性鉱物に対するアルカリ量との関係を示す。図では岩種別にみて、ペシマムではいずれも $(Cr+Tr+Vg)/Na_2O$ が小さいほど膨張率が高くなる傾向を示している。ここでも火山ガラスの多い安山岩 E1, 黒曜岩, パイレックスガラスは傾向が異なり、その他はほとんど同様の傾向を示している。これらから、最大の膨張を示す要因は、反応性鉱物量とアルカリ量との比率によって決まると考えられる。

3. 4 チャート質骨材に含まれる反応性 鉱物の定量と結晶性指標

表-3 にチャート質骨材の偏光顕微鏡観察結果と非晶質シリカ含有量及び結晶性指標を示す。偏光顕微鏡観察では、チャート Y₀ は玉髄を Se よりも多く含んでいることから反応性が高いと

考えられる。また、X線回折で定量した非晶質シリカの含有量や結晶性指標の結果からも Y₀ が Se よりも反応性が高いと考えられる。図-11 に非晶質シリカ量及び結晶性指標と化学法結果との関係を示す。化学法において $Sc/Rc < 1$ (無害) となるには非晶質シリカでは 3.6% 以下、結晶性指標では 8.15 以上となる。

3. 5 チャート質骨材を用いたモルタル バーの貯蔵 10 年間の膨張挙動

図-12 にチャート Y₀ 及び Se を用いたモルタルバーの各貯蔵期間の膨張率を示す。アルカ

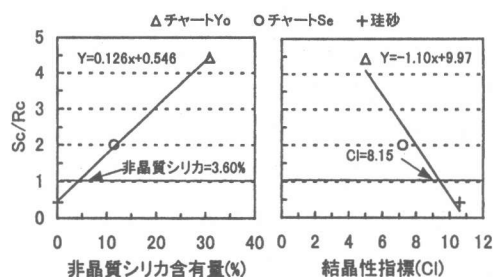


図-11 非晶質シリカ量及び結晶性指標と
化学法結果との関係

表-3 チャート質骨材の偏光顕微鏡観察結果、非晶質シリカ量及び結晶性指標

骨 材	偏光顕微鏡の観察結果						結晶性指標 (C1)	非晶質シリ カの含有量 (%)
	玉 髄		潜晶質石英	歪んだ石英	石英脈			
	球顆状	脈状			細粒石英	粗粒石英		
チャートYo	+++	+++	+++	±	+	±	5.01	30.8
チャートSe	++	+	+++	+	+	++	7.22	11.5

+++>++>+>±

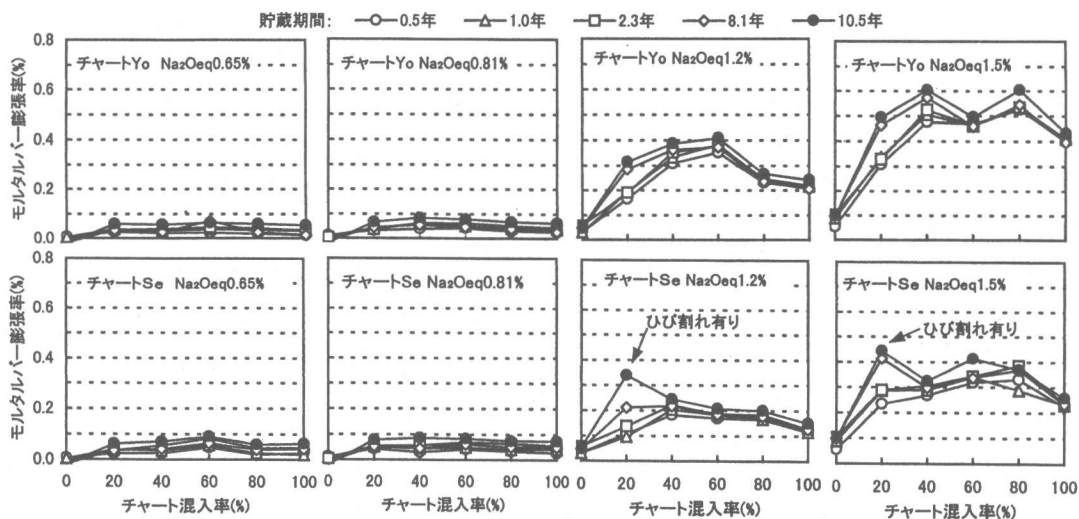


図-12 チャート Y₀, Se を用いたモルタルバーの各貯蔵期間の膨張率

り量 0.65, 0.81%では、貯蔵期間 10.5 年においても膨張率は 0.1%以下であるが、アルカリ量 1.2, 1.5%では、貯蔵 10.5 年時においても膨張が継続している。チャートの種類別では、アルカリ量 1.2, 1.5%では Y_o が Se よりも膨張が大きく、化学法、非晶質シリカ量及び結晶性指標の結果と一致している。ベシマム現象は、チャート Y_o では、貯蔵 2.3 年においてアルカリ量 1.2%では混入率 60%, アルカリ量 1.5%では 40~80%である。貯蔵期間が 10.5 年になると、アルカリ量 1.5%では 40%と 80%に変化する。また Se は、貯蔵 2.3 年においてアルカリ量 1.2%では混入率 40%, アルカリ量 1.5%では 80%であるが、貯蔵期間が 10.5 年になるとアルカリ量 1.2%, 1.5%とも混入率は 20%に変化する。これらから、温度が室温程度(10~25℃)でアルカリ量(1.2~1.5%)が多い場合では長期間の貯蔵でベシマムの変化がみられた。

3. 6 チャート質骨材を用いたモルタルバーの膨張率と非晶質シリカ含有量との関係

図-13 にチャートを用いたモルタルバーの膨張率と非晶質シリカ含有量の関係を示す。ベシマムの変化がみられたチャート混入率 20%, アルカリ量 1.2%の膨張率は、貯蔵 8.1 年までは非晶質シリカの含有量に比例して貯蔵期間毎に増加している。しかし貯蔵 10.5 年では非晶質シリカの含有量とは比例せず、Se の膨張率は Y_o よりも高くなっている。また、このチャ

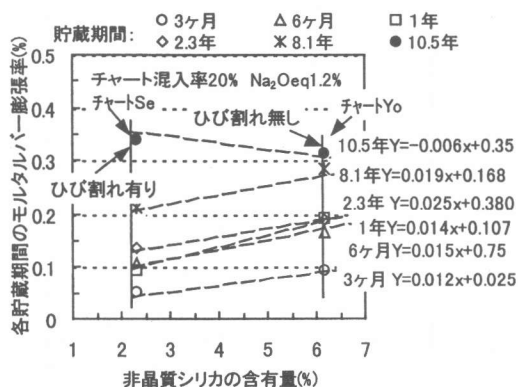


図-13 チャートを用いたモルタルバーの膨張率と非晶質シリカの含有量との関係

ート Se の 20%混入の供試体にはひび割れがみられたが、 Y_o にはみられなかった。これらのことからチャート質骨材の ASR は、長期間の貯蔵ではベシマム以外の配合の場合や、反応性鉱物の含有量にかかわらず、ある時期になると急激に反応が進むといえる。実構造物においても数年間ひび割れがなかったものがある時期からひび割れが発生しだし、それ以降は急激に増加する現象がみられるがそれと同様のようである。

4. まとめ

貯蔵 10 年の安山岩及びチャート質骨材を用いたモルタルバーについて、その膨張挙動と反応性鉱物との関係から得られた結果をまとめると以下のようなものである。

- (1) 安山岩骨材のモルタルバー膨張はモルタル中のアルカリ量(0.65%)が低くても、ベシマムの場合では 10 年後においても膨張がみられた。
- (2) チャート質骨材のモルタルバー膨張は、添加アルカリ量(1.2, 1.5%)が多い場合は、貯蔵 10 年においてベシマムの混合比が変化した。また、反応性鉱物の含有量にかかわらず、急激な膨張やひび割れの発生が認められた。

参考文献

- 1) 岩月栄治, 森野奎二: 長期間貯蔵したアルカリ骨材反応供試体の膨張, 微細構造及び強度性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 18, No. 1, pp. 849-854, 1996. 6
- 2) 森野奎二, 後藤鉦蔵: 反応性鉱物の種類と含有量が異なる各種骨材のアルカリ反応性, 土木学会第 43 回年次学術講演会講演概要集, 第 5 部, pp. 38-39, 1988. 10
- 3) 森野奎二, 岩月栄治, 後藤鉦蔵: チャート質骨材の微細構造とモルタルバー膨張, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 10, No. 2, pp. 717-722, 1988. 6
- 4) 森野奎二, 岩月栄治: 偏光顕微鏡と X 線回折分析によるコンクリートの劣化診断, コンクリート構造物の耐久性診断に関するシンポジウム, pp. 13-18, 1988. 5