



020

共同研究報告書

整理番号第25号

セメントのアルカリ量制御による
アルカリ骨材反応抑制手法に関する
共同研究報告書

平成元年3月

建設省土木研究所
地質化学部コンクリート研究室
社団法人 セメント協会

「Copyright © (1989) by P.W.R. I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P. W. R. I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。」

セメントのアルカリ量制御による アルカリ骨材反応抑制手法に関する 共同研究報告書

建設省土木研究所	地質化学部	部 長	桑 原 啓 三 ¹⁾
	コンクリート研究室	室 長	小 林 茂 敏
		主任研究員	河 野 宏 隆
		研 究 員	森 濱 和 正
			石 井 良 美
	化学研究室	室 長	片 脇 清 士
(社)セメント協会	技 術 部	部 長	加 藤 修
	技 術 部	係 長	細 谷 俊 夫
大阪セメント(株)	中央研究所	所 長	中 野 錦 一
小野田セメント(株)	セラミックス研究所	所 長	内 川 浩

要 旨

わが国で産出するアルカリ骨材反応性を示す骨材に対し、セメントのアルカリ量制御によるアルカリ骨材反応抑制対策を確立することを目的として、建設省土木研究所および社団法人セメント協会が共同研究を行った。

本報告書は、この共同研究で得られた実験データおよび報告書類のすべてを編集したものである。

キーワード：アルカリ骨材反応，アルカリ量，ASR抑制対策，アルカリ総量規制，モルタルバー法，セメント，コンクリート

1) 現：土木研究所地質官

序

昭和 50 年代半ばに、阪神地区で発見されたアルカリ骨材反応によるコンクリート構造物の劣化は、その後の調査で、阪神地区だけでなく全国各地で発生しており、また、劣化を引き起こす可能性のある骨材も全国的に広く分布していることも判明した。アルカリ骨材反応によるコンクリートの劣化は、塩害によるコンクリート橋等の劣化の問題とともに、放置しておけば、コンクリートに対する不信感をもたらし、社会問題化する恐れが出てくる。このため、建設省は総合技術開発プロジェクト「コンクリートの耐久性向上技術の開発」（昭和 60～62 年）等を通じて、対策の検討を開始した。

このような検討の中で、アルカリ骨材反応に対する対策のひとつとして、セメントあるいはコンクリート中のアルカリ量に制限を加え、それによってアルカリ骨材反応を抑制することが提唱され、具体的な制限値の提案と実験的な裏付けを行うことが望まれた。このため、それぞれの分野で研究の実績と情報の蓄積のある建設省土木研究所、社団法人セメント協会の両者が共同してこの課題に取り組んだ。

この報告書は昭和 61 年度～62 年度にわたって行われた共同研究の成果を取りまとめたものであり、今後、アルカリ骨材反応対策を検討する際に、有益な資料を提供するものであると確信するものである。

最後に、多大な御指導、御協力を賜った共同研究委員会の委員の方々に、深く感謝申し上げる次第である。

平成元年 3 月

共同研究委員会委員長

桑 原 啓 三

目 次

序

I. アルカリがモルタルおよびコンクリートの膨張に及ぼす影響に関する実験

1. まえがき	I-1
2. 実験目的	I-1
3. 実験概要	I-1
4. モルタル膨張試験	I-1
4.1 材 料	I-1
4.2 モルタル供試体の作製	I-3
4.3 初期養生および基長の測定	I-3
4.4 貯蔵および長さ測定	I-3
4.5 試 験 I	I-3
4.6 試 験 II	I-4
4.7 試 験 III	I-6
4.8 試 験 IV	I-8
4.9 試 験 V	I-10
5. コンクリート膨張試験	I-11
5.1 骨 材	I-11
5.2 骨材の岩種およびアルカリ反応性	I-11
5.3 セメント	I-13
5.4 コンクリートの配合	I-13
5.5 試験条件	I-13
5.6 試験結果	I-13
5.7 考 察	I-16
6. む す び	I-16
6.1 モルタル膨張試験結果のまとめ	I-16
6.2 コンクリート膨張試験結果のまとめ	I-17
7. 資 料 編	I-19

Ⅱ. モルタルバーの膨張要因に関する各種の実験的検討

1. アルカリ量がアルカリ骨材反応に及ぼす影響	Ⅱ-1
1.1 まえがき	Ⅱ-1
1.2 実験概要	Ⅱ-1
1.3 実験結果および考察	Ⅱ-2
2. 各種のアルカリがアルカリ骨材反応に及ぼす影響	Ⅱ-5
2.1 まえがき	Ⅱ-5
2.2 実験方法	Ⅱ-5
2.3 実験結果および考察	Ⅱ-6
2.4 ま と め	Ⅱ-12
3. ASRモルタルバー膨張量に影響する要因に関する考察	Ⅱ-13
3.1 まえがき	Ⅱ-13
3.2 実験方法	Ⅱ-13
3.3 実験結果および考察	Ⅱ-14
3.4 ま と め	Ⅱ-19
4. ASR骨材を用いたコンクリートバーの膨張特性	Ⅱ-20
4.1 まえがき	Ⅱ-20
4.2 実験概要	Ⅱ-20
4.3 実験結果および考察	Ⅱ-20
4.4 ま と め	

Ⅲ. アルカリ量規制によるアルカリ骨材反応抑制対策の合理性の検討

1. まえがき	Ⅲ-1
2. モルタルバー実験の結果による検討	Ⅲ-1
3. コンクリートバー実験の結果による検討	Ⅲ-2
4. 低アルカリセメントによる抑制対策の合理性に関する考察	Ⅲ-3
5. 結 論	Ⅲ-3

I アルカリがモルタルおよびコンクリートの
膨張に及ぼす影響に関する実験

共同研究委員会

担当： 社団法人 セメント協会

1. まえがき

アルカリ骨材反応性を示す骨材を用いてもアルカリ骨材反応を生じさせない方法としては、米国のASTMで古くから用いられている低アルカリセメントを用いる方法と欧州で提案されたコンクリート中のアルカリ総量を 3 kg/m^3 以下とする方法がある。わが国でも抑制対策として同様な対策が暫定対策として使用されているが、その合理性を検証するための実験資料がまだ不足しており、早期に作成することが望まれている。

2. 実験目的

わが国のセメントと骨材を使用した場合の、低アルカリセメントの使用またはアルカリ総量の制御によるアルカリ骨材反応の防止対策の合理性を確認するための基礎資料を得ることを目的とする。

3. 実験概要

セメントのアルカリ含有量が、アルカリ反応性骨材を用いたモルタルの膨張にどう影響するか、あるいはアルカリの種類として、ナトリウムとカリウムとの影響の程度はどう異なるか等についての基礎資料を得るため、各種の条件でモルタルの膨張量の測定を行った。

また、コンクリート中の単位アルカリ量がアルカリ反応性骨材を用いたコンクリートの膨張にどう影響するかを調査し、コンクリートのアルカリ骨材反応発生抑制対策の「コンクリート中のアルカリ総量の規制」に示された Na_2O 換算で 3.00 kg/m^3 以下とする規制値の妥当性について確認を行う。

4. モルタル膨張試験

4.1 材 料

(1) 骨 材

モルタル膨張試験に使用した骨材は、下記3種類の骨材で、これを粉砕し、モルタル供試体の成形に際し、表-I.1の比率で計量し、混合して使用した。

骨材の化学法による試験の結果を表-I.2および図-I.1に示す。

使用骨材

No.1. 香川県産安山岩

No.2. 石川県産安山岩

No.3. 山口県産チャート

(2) セメント

試験の内容により、アルカリ含有量等の異なる普通ポルトランドセメントを選別して使用した。

使用したセメントは、化学成分を各試験項目ごとに記載した。

表- I.1 調製骨材の粒度分布

ふるいの呼び寸法		質 量 百 分 率 (%)
通 過	残 留	
4.75 mm	2.36 mm	10
2.36 mm	1.18 mm	25
1.18 mm	600 μ m	25
600 μ m	300 μ m	25
300 μ m	150 μ m	15

表- I.2 モルタルバー試験に使用した骨材の化学法による試験結果

骨 材	Rc (mmol/l)	Sc (mmol/l)	判 定
No. 1	184	722	潜在的有害
No. 2	123	225	潜在的有害
No. 3	29	96	有 害

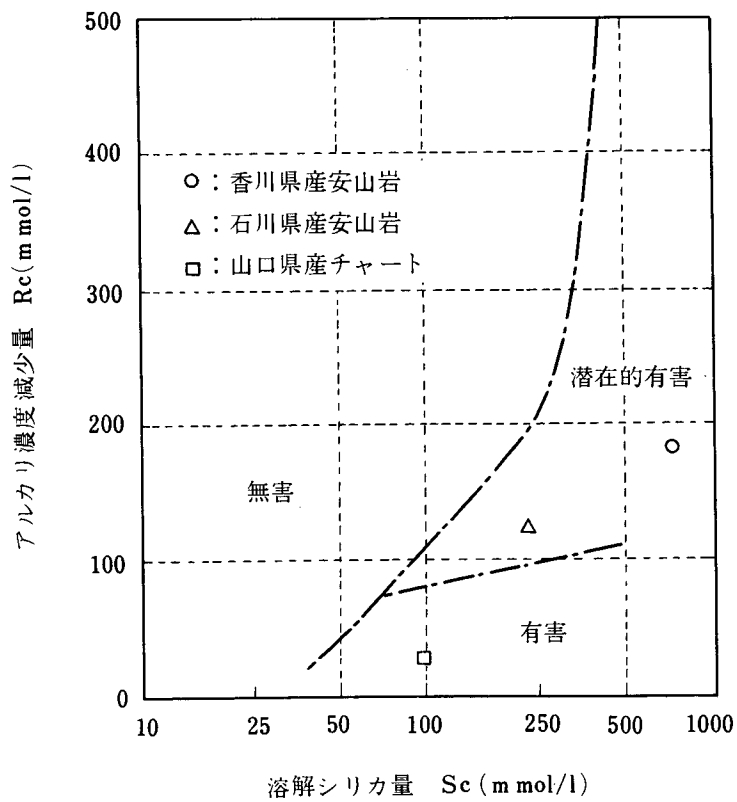


図- I.1 化学法試験結果

4.2 モルタル供試体の作製

長さ変化測定用モルタル供試体は、「骨材のアルカリシリカ反応性試験方法（モルタルバー法）建設省暫定案」の方法に従って、各試験ごとに3本ずつの供試体を製作した。

4.3 初期養生および基長の測定

モルタル供試体は、所定の方法で練り混ぜ、成形後24時間±2時間は、型枠のまま $20^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ で湿空養生し、脱型後、直ちに基長を測定した。

4.4 貯蔵および長さ測定

基長の測定を行った供試体は、 $40^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 、 $\text{RH} \geq 95\%$ の容器に密封し、材令2週、4週、8週、3カ月および6カ月のとき長さ測定を行い、膨張量を求めた。

4.5 試験 I

(1) 目的

モルタル中に存在するナトリウムおよびカリウム量が、モルタルの膨張に及ぼす影響を調べる。

(2) 試験条件

水酸化ナトリウム水溶液（NaOH）または水酸化カリウム水溶液（KOH）を準備し、セメント量に対し、 Na_2O 換算として0.5%、0.6%、0.8%、1.0%、1.2%となるように添加した練り混ぜ水を用いてモルタル供試体を作製した。

なお、使用したセメントのアルカリ量は表-I.3に示すように0.31%である。

表-I.3 試験 I に用いたセメントの分析結果 (%)

ig. loss	insol.	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O	(Na_2Oeq)
0.5	0.2	21.2	5.7	3.4	64.3	1.8	1.9	0.16	0.23	0.31

(3) 試験結果

材令6カ月まで測定した長さ変化率(%)を図-I.2に示した(資料編・表-I.1参照)。

(4) 考察

(a) 香川県産安山岩は、NaOH添加により Na_2Oeq 1.2%とした場合、材令8週で0.05%を越える膨張量を示したが、 Na_2Oeq 1.0%以下では膨張せず、KOH添加では Na_2Oeq 1.2%でも膨張しなかった。

(b) 石川県産安山岩は、NaOH添加あるいはKOH添加により Na_2Oeq 1.2%とした場合、材令4週で0.05%を越える膨張を示したが、 Na_2Oeq 1.0%以下で膨張しなかった。

(c) 山口県産チャートは、 Na_2Oeq 1.2%でも材令6カ月まで膨張しなかった。

(d) NaOH 添加と KOH 添加を比較した場合、膨張におよぼす影響は NaOH の方が大であった。

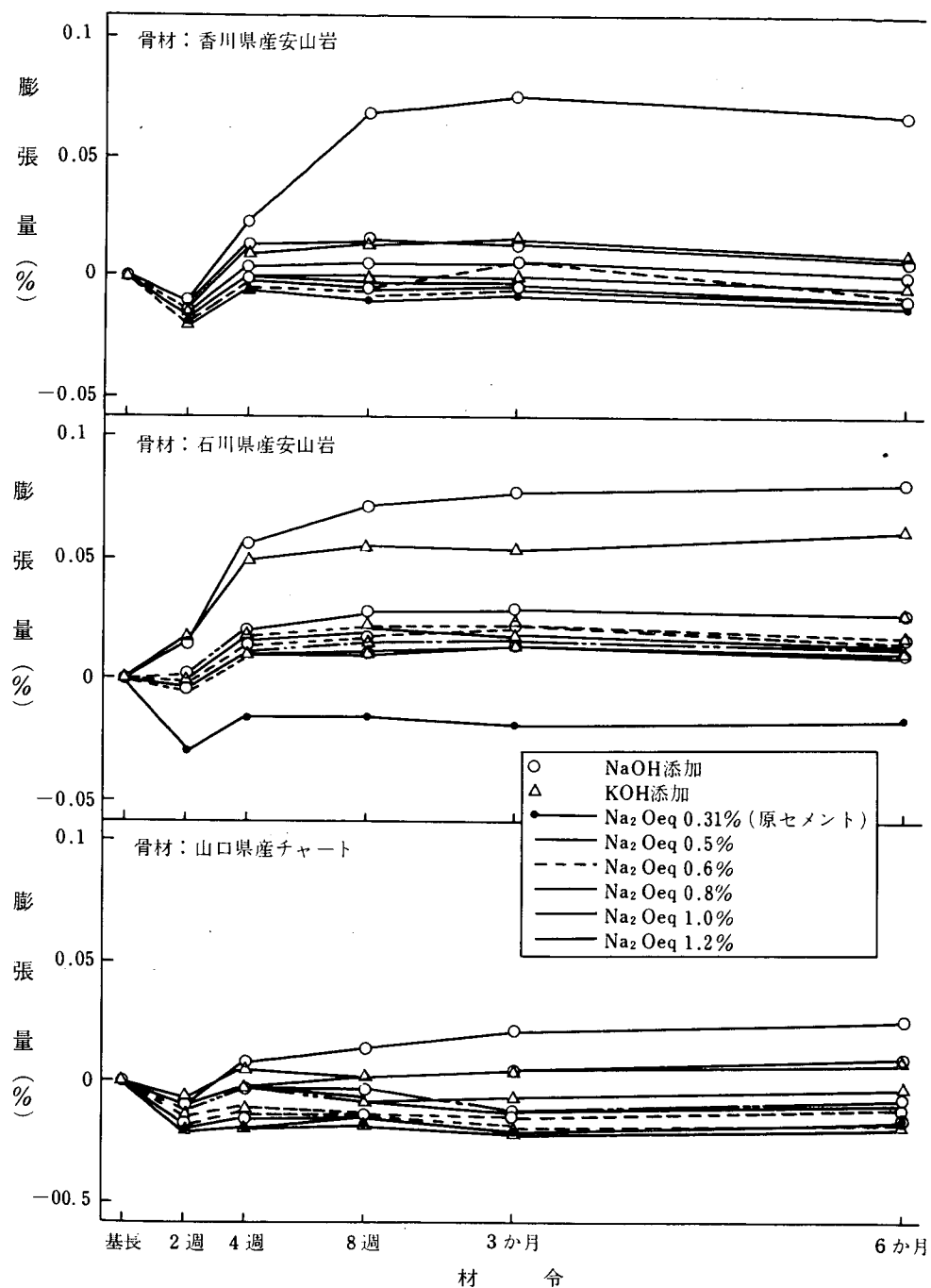


図-1.2 アルカリ量とモルタル膨張量との関係 (試験 I)

4.6 試験 II

(1) 目的

骨材の一部を非反応性骨材で置換した場合のペシマム現象の現れ方を、アルカリ量を変えて調べる。

(2) 試験条件

アルカリ反応性骨材No.1（香川県産安山岩）に非反応性骨材（硬質砂岩）を20%，40%，60%，80％の比率（内割）で混合し，反応性骨材の含有比を変えた骨材を準備し，試験Ⅰと同条件で試験した。

なお，使用したセメントは試験Ⅰと同じものである。（表-1.3 参照）。

(3) 試験結果

アルカリ量を変化させた場合のベシマム現象の有無を図-1.3-1および図-1.3-2に示した（資料編・表-1.2 参照）。

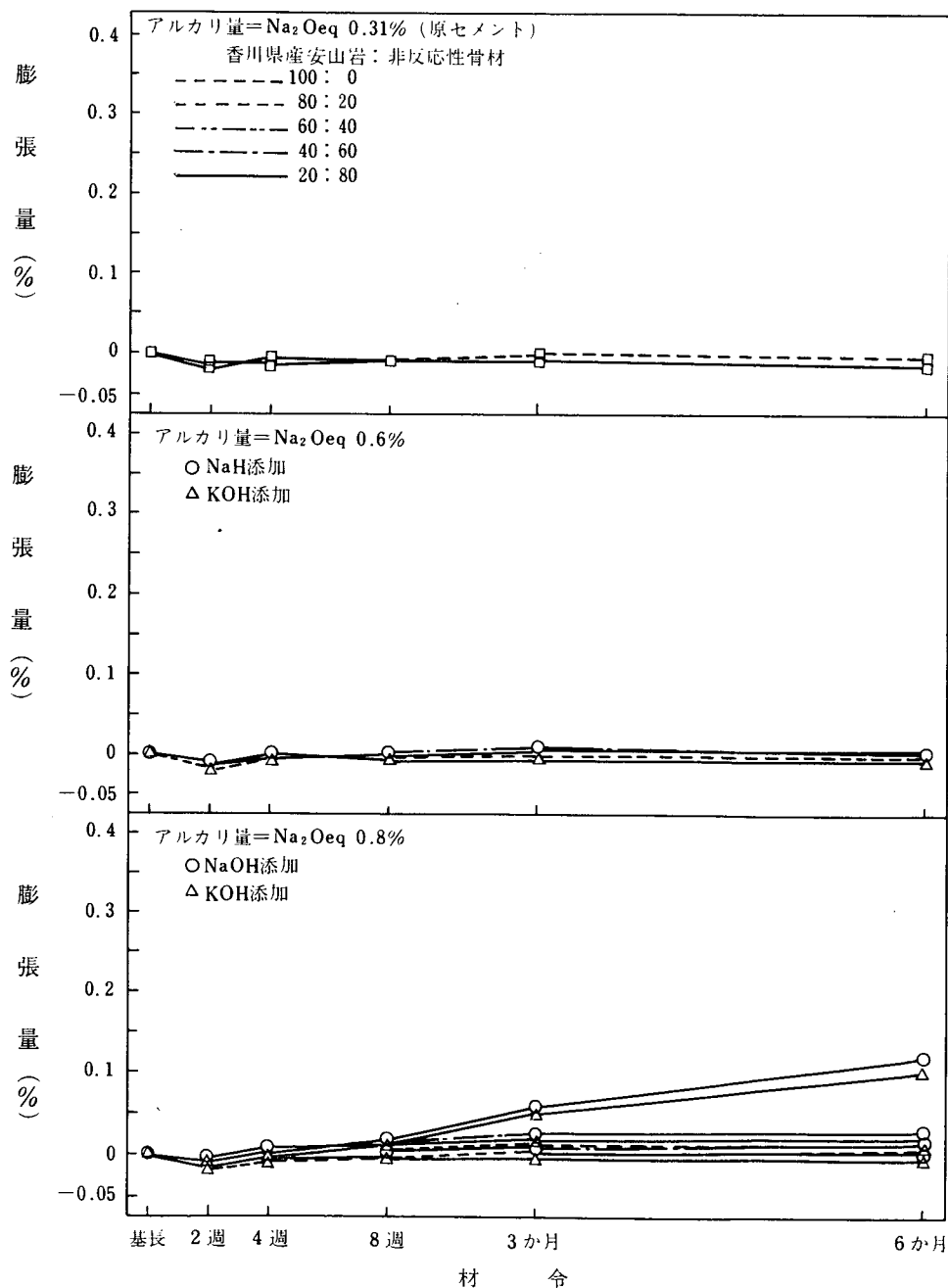


図-1.3-1 アルカリ反応性骨材と非反応性骨材との混合骨材のモルタルバー試験(その1) (試験Ⅱ)

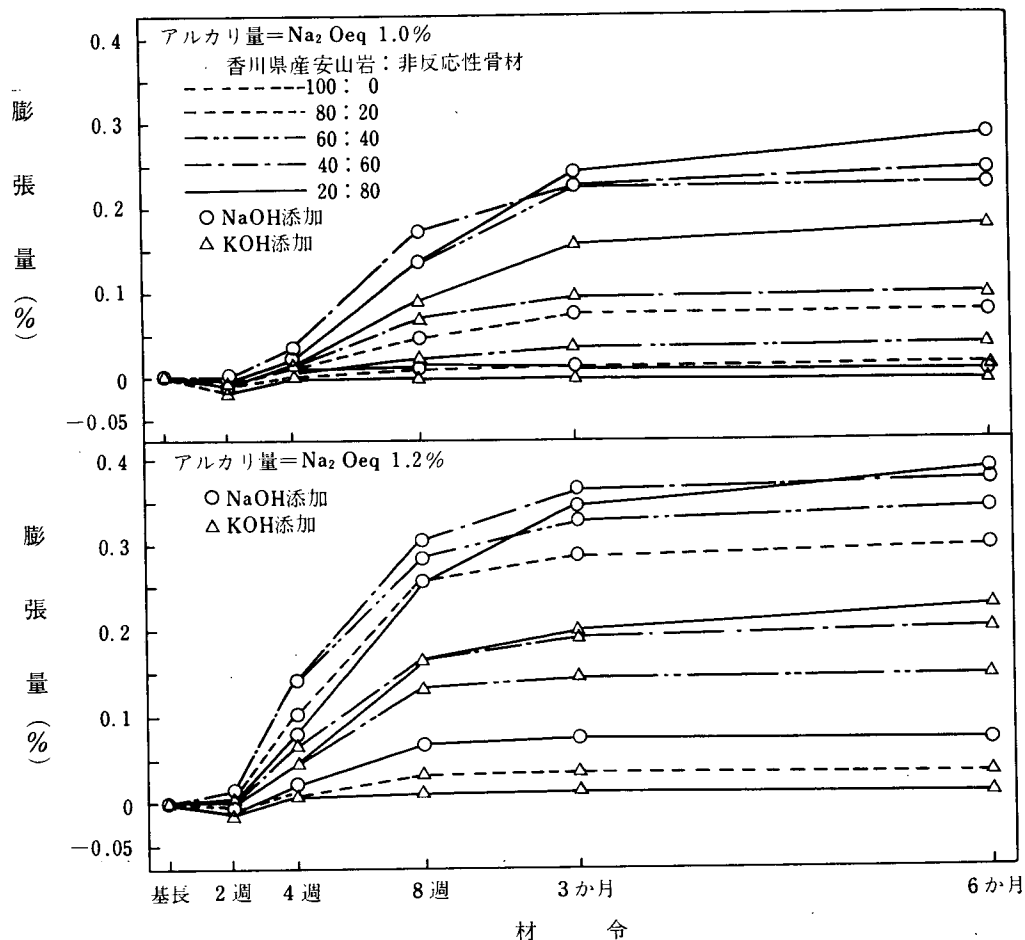


図-1.3-2 アルカリ反応性骨材と非反応性骨材との混合骨材のモルタルバー試験(その2)(試験Ⅱ)

(4) 考 察

- (a) Na_2Oeq 0.31%および0.60%では、膨張自体が小さく、ペシマム現象は認められなかった。
- (b) Na_2Oeq 0.80%では、アルカリ反応性骨材(香川県産安山岩)と非反応性骨材との混合比が20:80の混合骨材が材令13週から急激に膨張し、他の場合も反応性骨材の混合比が100%より小さいものが膨張量が多い傾向が認められた。
- (c) Na_2Oeq 1.0%および1.2%になると、反応性骨材の混合比が20%, 40%, 60%の場合が大きな膨張を示し、特にNaOH添加によりアルカリ量を増した場合にこの傾向が大であった。

4.7 試 験 Ⅲ

(1) 目 的

モルタルバー法に規定されているセメント骨材比よりも富配合にした場合、貧配合にした場合、すなわち、結果として単位アルカリ量が多くなった場合、および少なくなった場合のモルタル膨張量の変化を調べる。

(2) 試験条件

モルタルバー法に規定されたセメント骨材比の1:2.25を基準とし、富配合の1:1.25および貧配合の1:3.25の場合の比較試験を行う。

ただし、練り混ぜ水量は、基準としたモルタル(W/C=0.5)のフローを測定し、このフロー値に対し±5mm以内のフロー値が得られるように水量を加減した。

使用した反応性骨材は香川県産安山岩、セメントは試験Ⅰと同じものであり、(表-1.3 参照)、アルカリ量はNaOH溶液により0.6%および0.8%に調節して試験した。

(3) 試験結果

骨材量に対し、セメント量が相対的に多い場合および少ない場合の試験結果を図-1.4に示す(資料編・表-1.3 参照)。

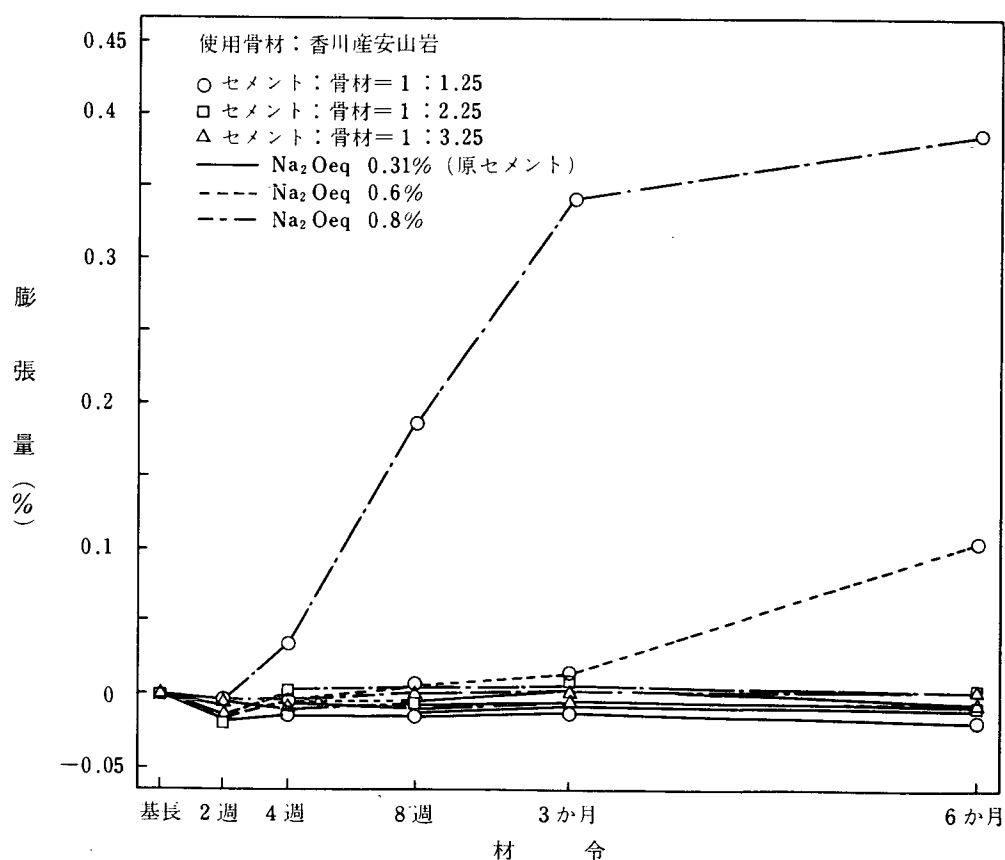


図-1.4 富配合と貧配合のモルタルバー試験(試験Ⅲ)

(4) 考 察

セメント骨材比が1:1.25と富配合で、かつアルカリ量がNa₂Oeq 0.80%の場合は、材令4週以降急激に膨張し、0.60%の場合は材令6カ月で0.1%を越える膨張量を示した。他のセメント骨材比ではNa₂Oeq 0.80%または、0.60%, 0.31%のいずれも全く膨張しなかった。

4.8 試 験 V

(1) 目 的

セメント中に含有するアルカリと、後添加の薬品 (NaOH) とのアルカリシリカ反応に及ぼす影響力の相違を調査する。

(2) 試験条件

表-I.4 に示すように、 Na_2Oeq が 0.31% (セメント A), 0.39% (セメント B), 0.60% (セメント C) および 0.80% (セメント D) の 4 水準のセメントを選び出し、これに NaOH を添加して、いずれも Na_2Oeq 1.2% となるように調節して試験した。使用した反応性骨材は香川県産安山岩、石川県産安山岩および山口県産チャートである。

表-I.4 試験 V に用いたセメントの分析結果 (%)

セメント	ig. loss	insol.	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O	(Na_2Oeq)
A	0.5	0.2	21.2	5.7	3.4	64.3	1.8	1.9	0.16	0.23	0.31
B	0.8	0.4	21.1	5.4	2.8	63.2	3.1	1.7	0.19	0.31	0.39
C	0.6	0.0	21.8	5.3	2.9	63.7	1.7	2.1	0.30	0.46	0.60
D	1.2	0.1	22.0	5.4	3.1	62.9	1.3	1.9	0.36	0.67	0.80

(3) 試験結果

アルカリ含有量の異なる 4 種類のセメントを用い、NaOH 添加によりいずれも Na_2Oeq 1.2% 一定として試験した結果を図-I.5-1 および図-I.5-2 に示す (資料編・表-I.4 参照)。なお、NaOH の添加を行わず、原セメントのみで試験した場合についても併載した。

(4) 考 察

- 各骨材の場合とも、後添加の NaOH が多い場合 (原セメントの Na_2Oeq 0.31%) と少ない場合 (原セメントの Na_2Oeq 0.80%) よりも、中間の場合 (原セメントの Na_2Oeq 0.60% および 0.39%) のほうがモルタルバー膨張量が大であった。従って、セメント中の既存のアルカリと、後添加のアルカリとの膨張に及ぼす影響の点では一定の傾向が認められなかった。
- 低アルカリセメントであるセメント A, セメント B, セメント C の間にも一定の傾向は認められず、アルカリ含有量と膨張量の大小の順序との関係も骨材により異なっていた。

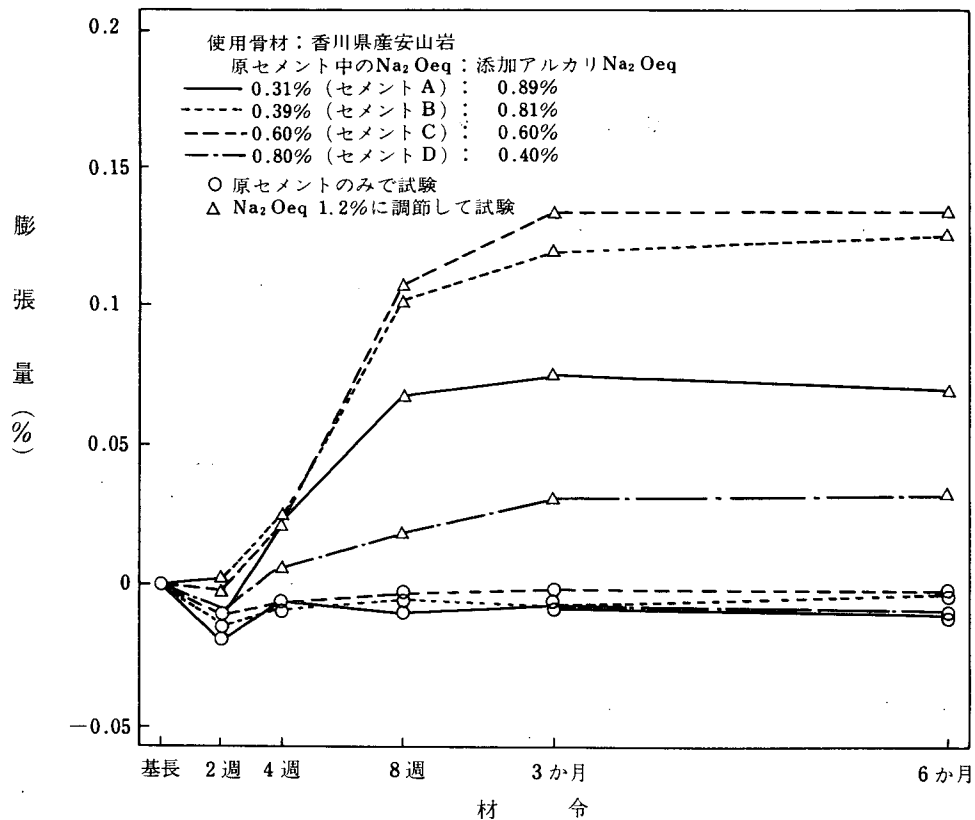


図-1.5-1 原セメント中のアルカリと添加アルカリとの膨張に及ぼす影響(その1) (試験Ⅳ)

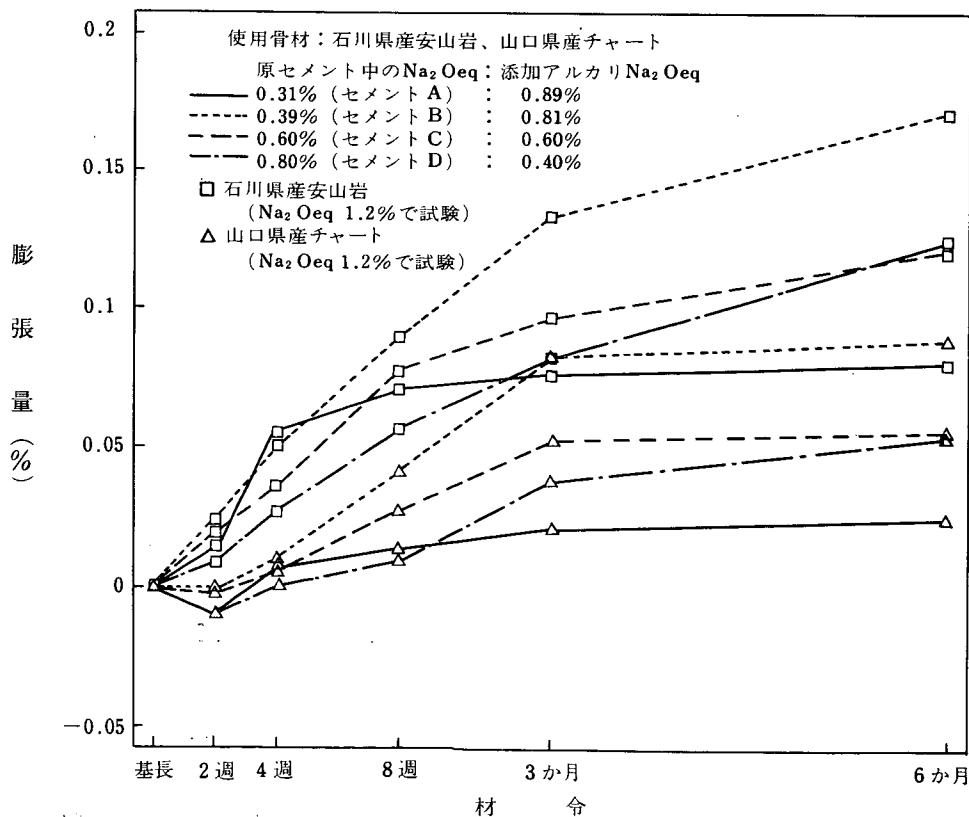


図-1.5-2 原セメント中のアルカリと添加アルカリとの膨張に及ぼす影響(その2) (試験Ⅳ)

4.9 試験 V

(1) 目的

セメント銘柄の違いによるモルタルバー膨張量の影響を調べる。

(2) 試験条件

表-1.5 に示すように Na_2Oeq および K_2O がほとんど等しい 3 銘柄のセメントを選び出し、これに NaOH を添加して、いずれも Na_2Oeq 1.2% 一定とし、香川県産安山岩および山口県産チャートのモルタルバー試験を行った。

表-1.5 試験 V に用いたセメントの分析結果 (%)

セメント	ig.loss	insol.	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na ₂ O	K ₂ O	(Na ₂ Oeq)
E	0.6	0.0	21.8	5.3	2.9	63.7	1.7	2.1	0.30	0.46	0.60
F	0.9	0.1	21.8	4.7	2.8	64.8	1.7	1.7	0.30	0.46	0.60
G	0.5	0.1	22.4	4.2	3.1	63.0	3.1	2.2	0.28	0.46	0.58

(3) 試験結果

アルカリ含有量がほぼ等しい銘柄の異なる 3 種類のセメントを用い、 Na_2Oeq 1.2% としたモルタルバー試験結果を図-1.6-1 および図-1.6-2 に示す (資料編・表-1.5 参照)。

なお、 NaOH の添加を行わず原セメントのみで試験した場合についても併載した。

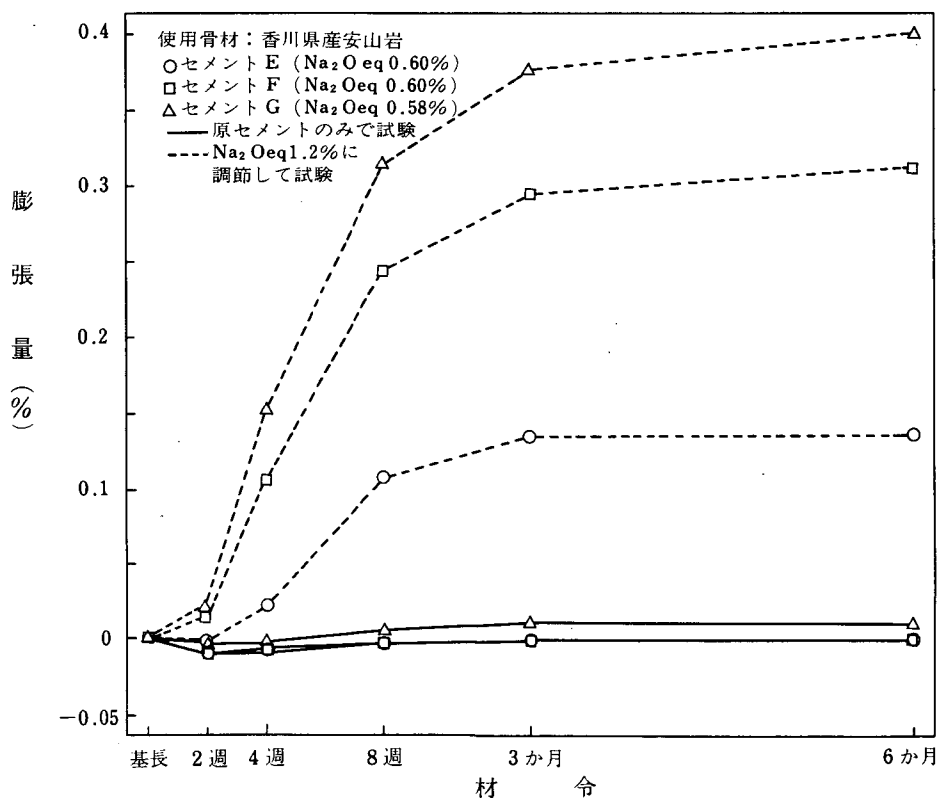


図-1.6-1 アルカリ量が等しい 3 銘柄のセメントを用いたモルタルバー試験 (その 1) (試験 V)

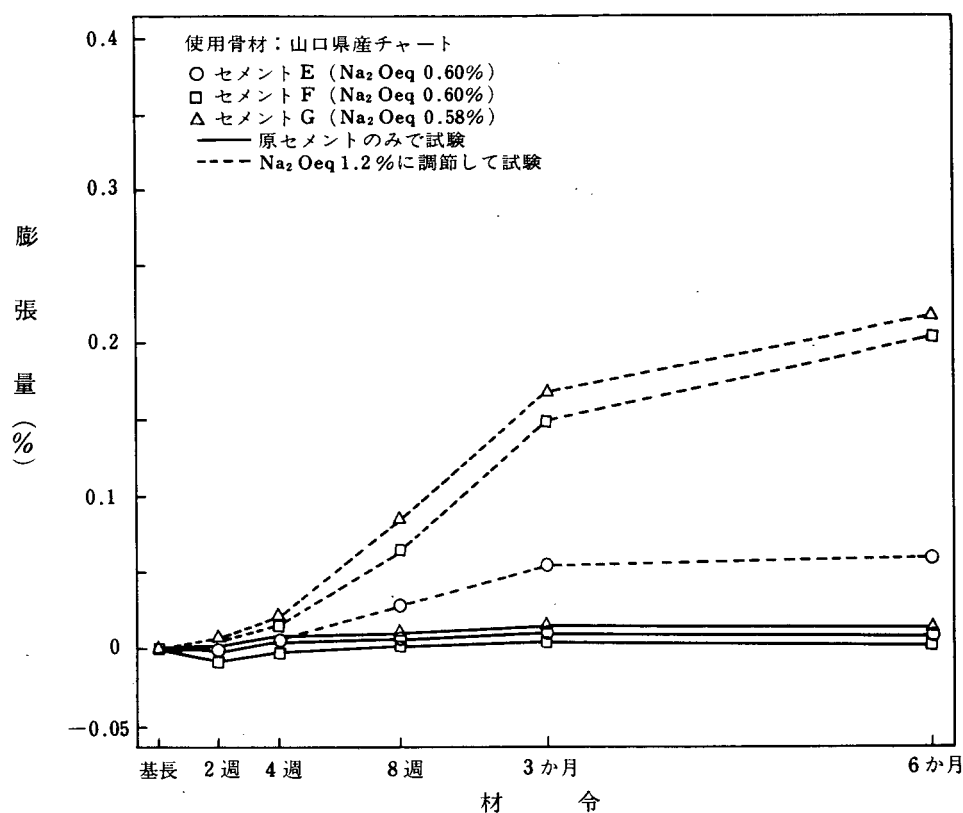


図-I.6-2 アルカリ量が等しい 3 銘柄のセメントを用いたモルタルバー試験(その 2) (試験 V)

(4) 考 察

アルカリ含有量が同等でも、セメントの銘柄が異なると、モルタルバー膨張量が同等とならず、膨張量の差異は相当大きく、材令 3 カ月では最大値は最小値の約 3 倍に達した。材令 6 カ月の膨張量は、ほぼ同程度の比率のまま横ばいとなっている。

5. コンクリート膨張試験

5.1 骨 材

試験に使用した粗骨材は、6 種類のアルカリ反応性粗骨材 (記号：A～F) および非反応性骨材 (記号：N) で、すべて碎石である。

細骨材は、非反応性砕砂である。

5.2 骨材の岩種およびアルカリ反応性

粗骨材の岩種を表-I.6 に示す。

化学法による使用骨材のアルカリ反応性試験の結果を表-I.7 および図-I.7 に示す。

表-1.6 コンクリートバー試験に使用した粗骨材(碎石)の岩種

骨材記号	岩 石 名
A	普通輝石—紫蘇輝石—安山岩
B	普通輝石—紫蘇輝石—安山岩
C	カンラン石—普通輝石—紫蘇輝石—安山岩
D	安山岩
E	紫蘇輝石—普通輝石—安山岩
F	スレート—チャート—砂 岩
N	砂 岩

表-1.7 化学法による骨材のアルカリ反応性試験結果

骨材記号	Rc (m mol/l)	Sc (m mol/l)	判 定
A	139.0	492.0	潜在的有害
B	124.6	541.7	潜在的有害
C	105.6	596.0	有 害
D	181.5	703.8	潜在的有害
E	99.5	630.6	有 害
F	51.7	99.5	有 害
N	47.8	38.2	無 害
細骨材	27.2	13.3	無 害

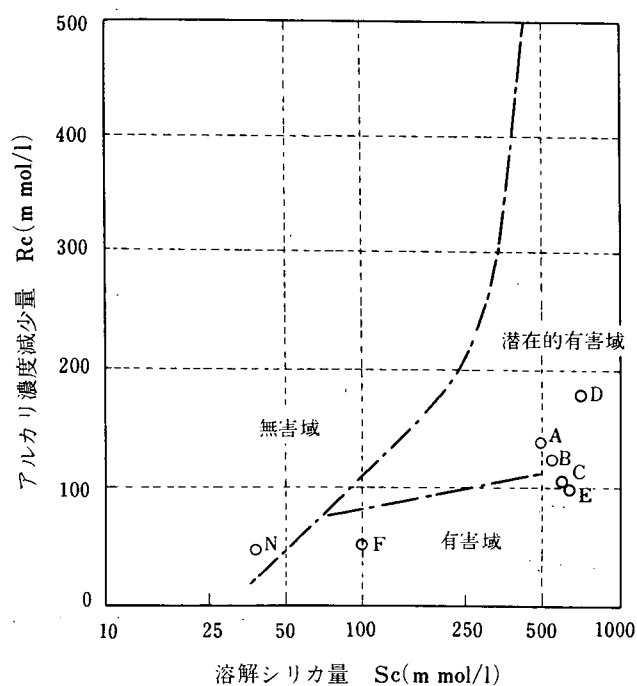


図-1.7 化学法試験結果

5.3 セメント

セメントは、表-1.8 に示したアルカリ量 (Na_2Oeq) が、0.36%および0.93%の2種類の普通ポルトランドセメントを用い、0.93%のものに試薬 (NaOH および KOH の混液) 添加により1.5%とした場合の3水準で試験した。

表-1.8 コンクリート膨張試験に用いたセメントの分析結果 (%)

セメント	ig.loss	insol.	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O	(Na_2Oeq)
H	0.7	0.2	22.3	5.5	2.9	62.6	2.7	1.8	0.17	0.29	0.36
I	0.5	0.1	21.8	5.0	3.2	64.0	1.6	2.1	0.59	0.51	0.93

5.4 コンクリートの配合

単位セメント量は、 300 kg/m^3 、 450 kg/m^3 および 600 kg/m^3 の3水準とし、コンクリートの配合は表-1.9を標準とした。従ってコンクリート単位量あたりのアルカリ量は9水準である。

表-1.9 コンクリートの配合

No.	目 標 スランブ (cm)	W/C (%)	S/a (%)	W (kg/m^3)	C (kg/m^3)	S (kg/m^3)	G (kg/m^3)
1	12	70	43.7	210	300	782	1007
2	12	47	39.4	210	450	655	1007
3	12	37	33.3	220	600	504	1007

5.5 試験条件

温度 40°C 、湿度 100% RH を目標とした環境中で、 $10 \times 10 \times 20 \text{ cm}$ のコンクリートバー供試体を保存し、膨張量を調べた。

5.6 試験結果

骨材 A～F の反応性骨材およびこれに非反応性骨材を 40% および 70% 混合 (内割) した混合骨材のコンクリートバー膨張試験を行った結果、資料編表-1.6～表-1.11 に示すように、材令 18 カ月ではほぼ終局に達したと判断されたので、単位アルカリ量がコンクリート膨張に与える影響を材令 18 カ月において調べ、両者の関係を図-1.8 から図-1.13 に示した。

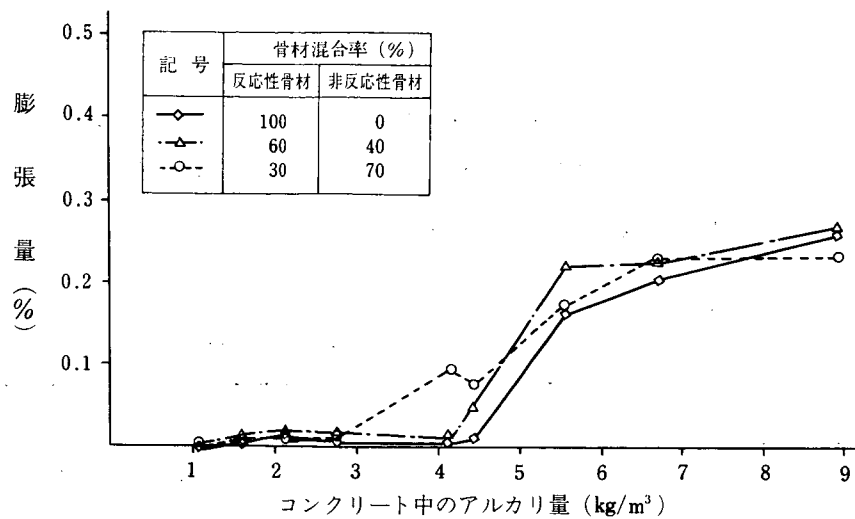


図-I.8 単位アルカリ量とコンクリート膨張量との関係
(使用骨材：A)

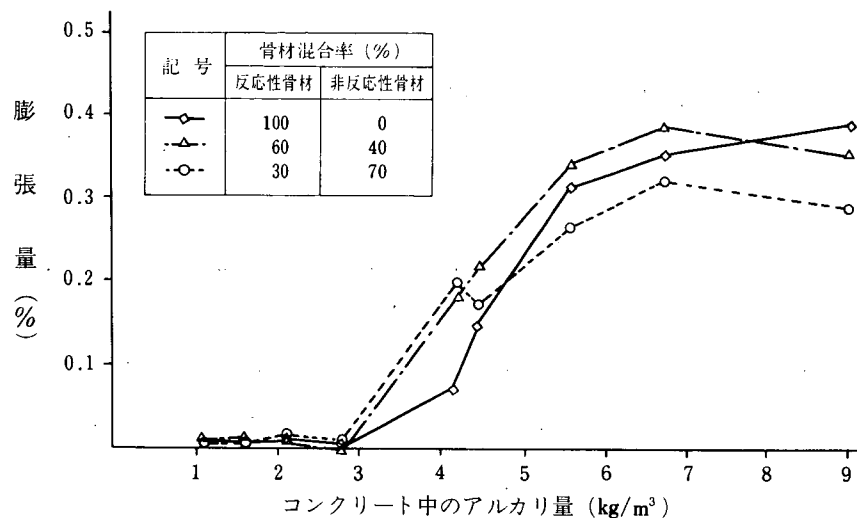


図-I.9 単位アルカリ量とコンクリート膨張量との関係
(使用骨材：B)

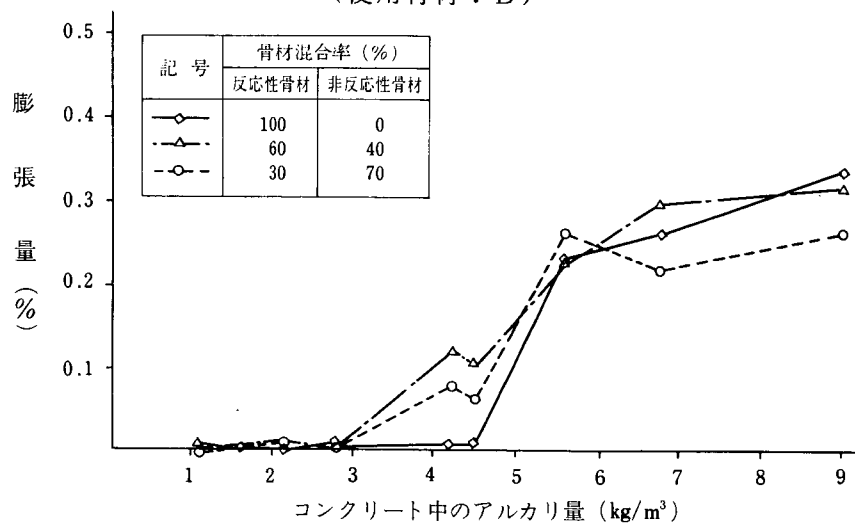


図-I.10 単位アルカリ量とコンクリート膨張量との関係
(使用骨材：C)

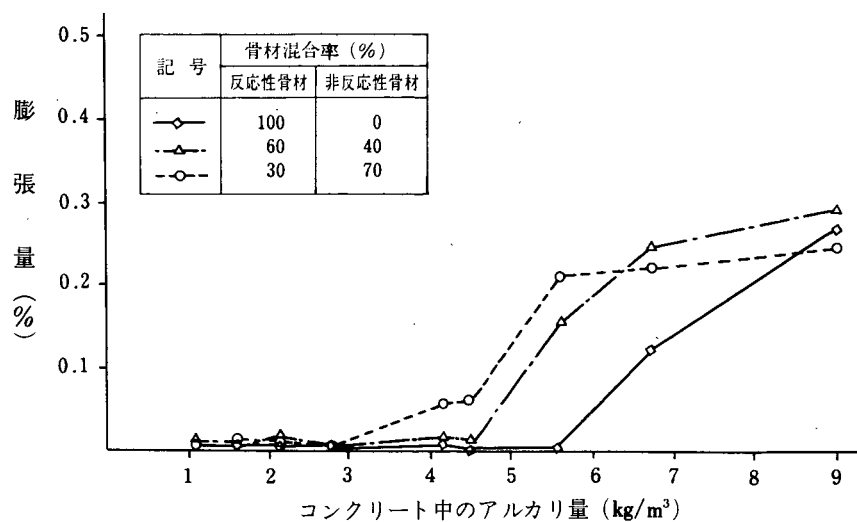


図-I.11 単位アルカリ量とコンクリート膨張量との関係
(使用骨材：D)

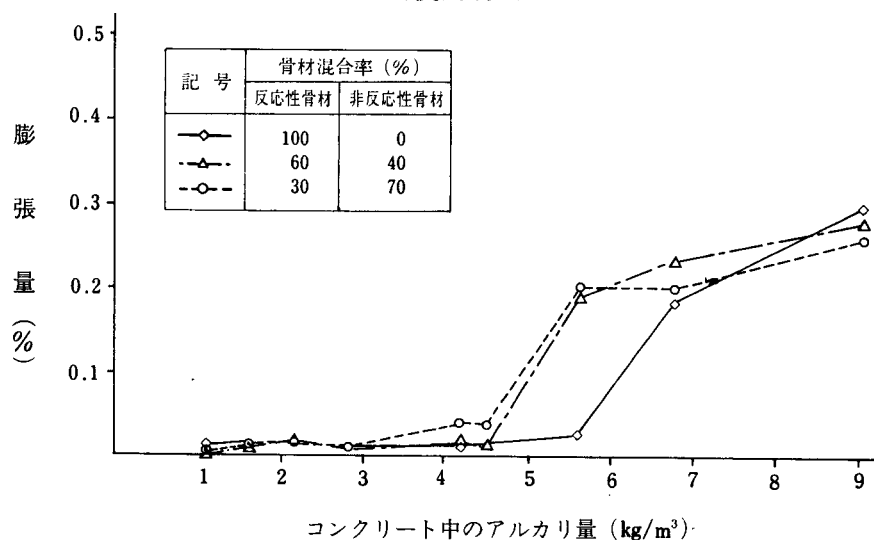


図-I.12 単位アルカリ量とコンクリート膨張量との関係
(使用骨材：E)

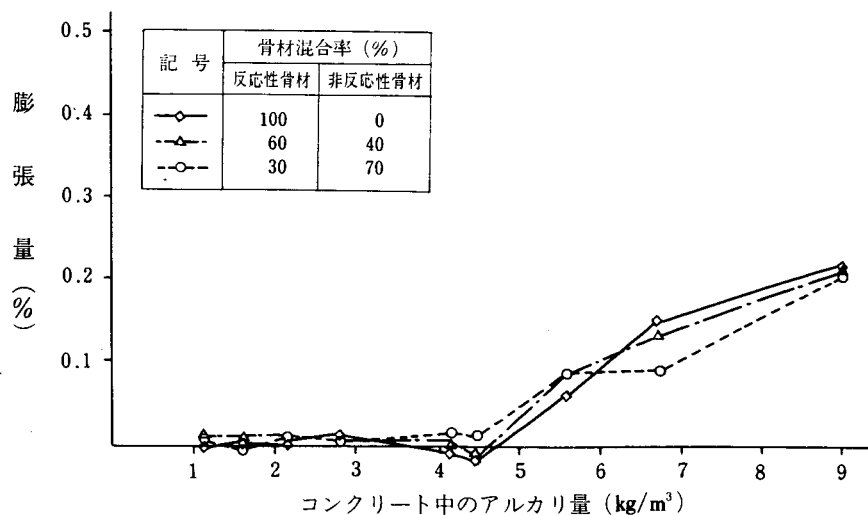


図-I.13 単位アルカリ量とコンクリート膨張量との関係
(使用骨材：F)

5.7 考 察

- (a) コンクリート中の単位アルカリ量 (Na_2Oeq) が、 3 kg/m^3 以下で膨張した骨材はなく、 4 kg/m^3 を越えると膨張した例（単一骨材としてはBのみ）があった。
- (b) 反応性骨材と非反応性骨材とを混合した場合、一般に単一骨材の場合よりも、膨張量が大であった。

6. む す び

アルカリ反応性骨材を使用したモルタルあるいはコンクリートを用いて、各種の条件で実験を行い、アルカリ骨材反応抑制のための基礎的資料を得た。得られた結果をまとめれば次のようになる。

6.1 モルタル膨張試験結果のまとめ

- (1) 使用した骨材は、化学法により、香川県産安山岩および石川県産安山岩が潜在的有害、山口県産チャートが有害と判定された骨材であるが、アルカリ量（セメントの Na_2Oeq として表示、以下同じ）が1.0%以下では、材令6カ月でいずれも膨張を示さず、アルカリ量1.2%とした場合に、材令8週で香川県産安山岩が、材令4週で石川県産安山岩がいずれも0.05%を越える膨張量となった。ただし、材令6カ月において0.1%以上の膨張量を示した骨材はなかった。
- (2) アルカリ濃度を高める目的で、 NaOH および KOH を添加したが、この場合、同じモル濃度であれば、 KOH よりも NaOH のほうが、モルタルの膨張に及ぼす効果は大であった。
- (3) 香川県産安山岩について、反応性骨材と非反応性骨材との混合によるペシマム現象を調べた結果、反応性骨材比が60%以下、特に40%あるいは20%と低比率のときに、モルタル膨張量は大きくなった。ただし、この現象は、アルカリ量が0.8%以上の場合であり、アルカリ量が0.6%以下のときは、いずれも膨張しなかった。
- (4) セメント骨材比が1:1.25と極端に富配合のモルタルでは、アルカリ量が0.8%のとき、材令4週から急激な膨張を開始し、アルカリ量が0.6%では材令6カ月で0.1%以下の膨張量を示した。
- (5) セメント中に既存のアルカリと、試薬による後添加のアルカリとのモルタル膨張量に及ぼす影響について調べた結果、明確な傾向が認められず、いずれの影響力が大であるかを確認することはできなかった。
- (6) アルカリ含有量のほぼ等しいセメント3種類（ Na_2Oeq 0.58%～0.60%）を用い、 NaOH 添加により Na_2Oeq 1.2%一定に調節して、モルタル膨張量を測定した結果、アルカリ量が同一であるにもかかわらず、使用セメントの銘柄が相違しているということのみで、膨張量も大幅に相違していた。

この結果、セメントの銘柄によりアルカリ骨材反応に作用する程度が一定でないことが判明した。

6.2 コンクリート膨張試験結果のまとめ

- (1) 安山岩系の反応性骨材 5 種およびチャート系の反応性骨材 1 種を用い、アルカリ量を変えて、コンクリート膨張試験を行ったところ、コンクリート中の単位アルカリ量が 3 kg/m^3 以下で膨張した供試体はないことが判明した。
- (2) 単位アルカリ量が 4 kg/m^3 を越えても単一骨材の場合は、膨張しない例が多く、材令 18 カ月で 0.1% 以上の膨張を示したものは、安山岩系の一例（骨材 B）のみであった。
- (3) 単位アルカリ量が 4 kg/m^3 前後の時は、反応性骨材と非反応性骨材とを混合した骨材の方が、単一骨材の場合よりも、一般に膨張量が大で、ベシマム現象が認められた。

ただし、単位アルカリ量がさらに大となったときは、混合骨材と単一骨材との明確な差は認められなかった。

資 料 編

表-I.1 試験 I の資料 (アルカリ量の多寡とモルタル膨張量との関係)

(単位: 膨張量%)

アルカリ 量 (%)	材 令	NaOH 添加により アルカリ濃度を調節			KOH 添加により アルカリ濃度を調節		
		香川県産 安山岩	石川県産 安山岩	山口県産 チャート	香川県産 安山岩	石川県産 安山岩	山口県産 チャート
0.31% 原セメント	2 週	- 0.019	- 0.030	- 0.021	- 0.019	- 0.030	- 0.021
	4 週	- 0.005	- 0.016	- 0.019	- 0.005	- 0.016	- 0.019
	8 週	- 0.010	- 0.015	- 0.013	- 0.010	- 0.015	- 0.013
	3 月	- 0.008	- 0.018	- 0.020	- 0.008	- 0.018	- 0.020
	6 月	- 0.011	- 0.015	- 0.015	- 0.011	- 0.015	- 0.015
0.5% に調節	2 週	- 0.017	- 0.004	- 0.019	- 0.018	- 0.005	- 0.021
	4 週	- 0.001	0.011	- 0.015	- 0.003	0.010	- 0.019
	8 週	- 0.004	0.012	- 0.015	- 0.005	0.011	- 0.018
	3 月	- 0.005	0.015	- 0.021	- 0.006	0.015	- 0.021
	6 月	- 0.008	0.013	- 0.014	- 0.007	0.011	- 0.017
0.6% に調節	2 週	- 0.018	- 0.002	- 0.018	- 0.021	- 0.002	- 0.015
	4 週	- 0.004	0.014	- 0.014	- 0.005	0.018	- 0.011
	8 週	- 0.005	0.018	- 0.013	- 0.008	0.022	- 0.012
	3 月	- 0.006	0.023	- 0.013	- 0.006	0.023	- 0.018
	6 月	- 0.006	0.018	- 0.009	- 0.007	0.019	- 0.016
0.8% に調節	2 週	- 0.015	0.004	- 0.010	- 0.017	- 0.003	- 0.012
	4 週	0.003	0.020	- 0.003	- 0.005	0.012	- 0.003
	8 週	0.005	0.028	- 0.003	- 0.005	0.016	- 0.008
	3 月	0.005	0.030	- 0.010	- 0.003	0.017	- 0.011
	6 月	0.002	0.030	- 0.006	- 0.008	0.015	- 0.008
1.0% に調節	2 週	- 0.013	- 0.004	- 0.009	- 0.018	0.000	- 0.010
	4 週	0.013	0.020	- 0.002	- 0.001	0.017	- 0.002
	8 週	0.014	0.028	- 0.002	0.000	0.021	- 0.007
	3 月	0.013	0.030	0.006	0.000	0.020	- 0.006
	6 月	0.009	0.029	0.011	- 0.003	0.016	- 0.001
1.2% に調節	2 週	- 0.012	0.015	- 0.009	- 0.011	0.017	- 0.007
	4 週	0.022	0.056	0.008	0.009	0.050	0.005
	8 週	0.068	0.072	0.014	0.013	0.056	0.003
	3 月	0.076	0.073	0.022	0.015	0.055	0.005
	6 月	0.071	0.083	0.026	0.011	0.063	0.008

(備考) アルカリ量は, Na_2Oeq で表わし, セメント量に対する百分率として表示。

以下同じ。

表-I.2 試験Ⅱの資料（アルカリ反応性骨材と非反応性骨材との混合骨材のモルタルバー
試験結果）

（単位：膨張量％）

アルカリ 量 (%)	材令	NaOH添加によりアルカリ濃度を調節				KOH添加によりアルカリ濃度を調節			
		a : b = 80 : 20	a : b = 60 : 40	a : b = 40 : 60	a : b = 20 : 80	a : b = 80 : 20	a : b = 60 : 40	a : b = 40 : 60	a : b = 20 : 80
0.31 % 原セメ ン ト	2 週	- 0.016	- 0.015	- 0.013	- 0.017	- 0.016	- 0.015	- 0.013	- 0.017
	4 週	- 0.013	- 0.010	- 0.011	- 0.014	- 0.013	- 0.010	- 0.011	- 0.014
	8 週	- 0.007	- 0.009	- 0.008	- 0.009	- 0.007	- 0.009	- 0.008	- 0.009
	3 月	- 0.001	- 0.007	- 0.006	- 0.007	- 0.001	- 0.007	- 0.006	- 0.007
	6 月	0.000	- 0.009	- 0.010	- 0.011	0.000	- 0.009	- 0.010	- 0.011
0.6 % に調節	2 週	- 0.015	- 0.011	- 0.010	- 0.003	- 0.013	- 0.010	- 0.011	- 0.012
	4 週	- 0.009	- 0.001	- 0.001	- 0.005	- 0.007	- 0.008	- 0.005	- 0.007
	8 週	- 0.004	0.000	0.002	0.002	- 0.008	- 0.003	- 0.002	0.002
	3 月	0.007	0.001	0.010	0.006	- 0.001	0.000	- 0.001	0.005
	6 月	0.001	0.002	0.002	0.004	- 0.004	- 0.002	- 0.001	0.007
0.8 % に調節	2 週	- 0.012	- 0.006	- 0.005	- 0.010	- 0.017	- 0.009	- 0.009	- 0.014
	4 週	- 0.002	0.004	0.008	0.001	- 0.010	0.000	- 0.001	- 0.005
	8 週	0.006	0.013	0.016	0.018	- 0.003	0.006	0.011	0.014
	3 月	0.013	0.019	0.027	0.057	0.003	0.010	0.017	0.050
	6 月	0.010	0.018	0.026	0.118	0.006	0.010	0.018	0.100
1.0 % に調節	2 週	- 0.007	- 0.004	0.000	- 0.006	- 0.011	- 0.006	- 0.002	- 0.007
	4 週	0.011	0.020	0.035	0.019	0.001	0.008	0.017	0.014
	8 週	0.046	0.134	0.174	0.136	0.009	0.022	0.071	0.090
	3 月	0.075	0.225	0.229	0.243	0.013	0.036	0.096	0.158
	6 月	0.079	0.233	0.249	0.292	0.016	0.041	0.101	0.184
1.2 % に調節	2 週	0.006	0.015	0.015	0.003	- 0.005	0.003	0.005	0.000
	4 週	0.102	0.143	0.144	0.080	0.010	0.046	0.068	0.047
	8 週	0.201	0.285	0.305	0.257	0.032	0.134	0.166	0.165
	3 月	0.289	0.329	0.366	0.345	0.037	0.145	0.195	0.202
	6 月	0.300	0.345	0.379	0.391	0.034	0.148	0.203	0.231

（備考） a : b = 香川県産安山岩の量 : 非反応性骨材の量

表-1.3 試験Ⅲの資料（富配合と貧配合のモルタルバー試験結果）

使用骨材：香川県産安山岩

（単位：膨張量％）

アルカリ量 （％）	材 令	C : S = 1 : 1.25	C : S = 1 : 2.25	C : S = 1 : 3.25
0.31％ （原セメント）	2 週	－ 0.017	－ 0.019	－ 0.009
	4 週	－ 0.014	－ 0.005	－ 0.010
	8 週	－ 0.015	－ 0.010	－ 0.007
	3 月	－ 0.012	－ 0.008	－ 0.004
	6 月	－ 0.018	－ 0.011	－ 0.007
0.6％ に 調 節	2 週	－ 0.016	－ 0.018	－ 0.004
	4 週	－ 0.003	－ 0.004	－ 0.010
	8 週	－ 0.006	－ 0.005	－ 0.009
	3 月	0.014	－ 0.006	－ 0.005
	6 月	0.104	－ 0.006	－ 0.005
0.8％ に 調 節	2 週	－ 0.004	－ 0.015	－ 0.003
	4 週	0.034	0.003	－ 0.003
	8 週	0.186	0.005	0.001
	3 月	0.340	0.005	0.002
	6 月	0.388	0.002	0.003

（備考） C : S = セメント量：香川県産安山岩

表-I.4 試験Ⅳの資料（原セメント中のアルカリと添加アルカリとの
膨張に及ぼす影響）

（単位：膨張量％）

原セメントの アルカリ量 （％）	材 令	薬品添加をせず 原セメントのみで試験	NaOH添加によりアルカリ濃度を1.2％に調節			
		香川県産安山岩	香川県産安山岩	石川県産安山岩	山口県産チャート	
0.31％ （セメントA）	2 週	－ 0.019	－ 0.012	0.015	－ 0.009	
	4 週	－ 0.005	0.022	0.056	0.008	
	8 週	－ 0.010	0.068	0.072	0.014	
	3 月	－ 0.008	0.076	0.078	0.022	
	6 月	－ 0.011	0.071	0.083	0.026	
0.39％ （セメントB）	2 週	－ 0.015	0.002	0.025	0.000	
	4 週	－ 0.009	0.025	0.052	0.010	
	8 週	－ 0.005	0.102	0.090	0.042	
	3 月	－ 0.008	0.120	0.134	0.084	
	6 月	－ 0.004	0.127	0.175	0.091	
0.60％ （セメントC）	2 週	－ 0.011	－ 0.002	0.020	－ 0.002	
	4 週	－ 0.007	0.021	0.036	0.006	
	8 週	－ 0.003	0.107	0.078	0.027	
	3 月	－ 0.002	0.134	0.098	0.054	
	6 月	－ 0.002	0.135	0.124	0.058	
0.80％ （セメントD）	2 週	－ 0.016	－ 0.008	0.010	－ 0.010	
	4 週	－ 0.006	0.006	0.027	0.001	
	8 週	－ 0.010	0.019	0.057	0.010	
	3 月	－ 0.007	0.031	0.083	0.033	
	6 月	－ 0.010	0.033	0.127	0.056	

表-1.5 試験Vの資料（アルカリ量が等しい3銘柄のセメントを用いたモルタルバー
試験結果）

（単位：膨張量％）

セメントの 銘 柄 (アルカリ量%)	材 令	原セメントのみによる試験		NaOH添加によりアルカリ濃度 を1.2％に調節	
		香川県産安山岩	山口県産チャート	香川県産安山岩	山口県産チャート
セメントE (0.60%)	2 週	— 0.011	— 0.001	— 0.002	— 0.002
	4 週	— 0.007	0.004	0.021	0.006
	8 週	— 0.003	0.006	0.107	0.027
	3 月	— 0.002	0.010	0.134	0.054
	6 月	— 0.002	0.007	0.135	0.058
セメントF (0.60%)	2 週	— 0.009	— 0.008	0.015	0.005
	4 週	— 0.010	— 0.002	0.108	0.015
	8 週	— 0.004	0.002	0.244	0.064
	3 月	— 0.003	0.004	0.294	0.149
	6 月	— 0.001	0.002	0.314	0.205
セメントG (0.58%)	2 週	— 0.004	0.002	0.023	0.007
	4 週	— 0.003	0.009	0.153	0.021
	8 週	0.005	0.010	0.314	0.084
	3 月	0.009	0.014	0.377	0.169
	6 月	0.009	0.013	0.402	0.219

表-I.6 骨材A使用コンクリートバー試験結果

(単位: 膨張量%)

アルカリ含有量 (%)	単位セメント量 (kg/m ³)	骨材 A の混合率 (%)	材 令 (月 数)												
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	18
0.36	300 (1.08)	100	-0.010	-0.010	-0.014	-0.008	-0.010	-0.002	0.006	0.006	-0.008	-0.005	-0.005	-0.001	-0.002
		60	-0.001	-0.005	-0.012	0.006	0.005	-0.001	-0.006	-0.005	0.006	0.008	0.007	0.009	0.002
		30	-0.010	-0.011	-0.028	-0.007	-0.006	-0.011	-0.015	-0.014	-0.002	-0.003	-0.002	0.000	0.002
	450 (1.62)	100	0.005	0.000	-0.011	-0.003	0.003	0.006	0.009	0.006	-0.006	-0.002	0.000	0.002	0.001
		60	0.002	0.007	0.002	0.009	0.008	0.004	0.000	0.000	0.008	0.011	0.014	0.017	0.016
		30	-0.004	-0.006	-0.008	-0.006	0.000	-0.013	-0.025	-0.024	0.000	0.003	0.006	0.007	0.008
	600 (2.16)	100	0.012	0.016	0.019	0.009	0.017	-0.011	-0.005	0.006	0.022	0.022	0.014	0.016	0.016
		60	0.012	0.017	0.011	0.013	0.019	0.029	0.040	0.041	0.023	0.014	0.012	0.015	0.019
		30	0.006	0.007	-0.006	0.006	-0.004	-0.009	-0.014	-0.009	0.011	0.011	0.010	0.010	0.011
0.93	300 (2.79)	100	-0.003	0.005	0.001	0.001	0.000	-0.001	-0.002	-0.001	0.003	0.006	0.005	0.003	0.005
		60	0.008	0.017	0.027	0.019	0.017	0.024	0.031	0.033	0.020	0.017	0.020	0.017	0.016
		30	-0.010	-0.008	-0.006	-0.016	-0.020	-0.020	-0.020	-0.019	-0.015	-0.018	-0.017	-0.016	-0.014
	450 (4.185)	100	0.000	0.007	-0.015	-0.012	-0.021	-0.029	-0.036	-0.025	-0.002	-0.005	-0.005	-0.004	-0.001
		60	0.008	0.006	-0.008	0.010	0.010	-0.011	-0.018	0.021	0.011	0.010	0.008	0.009	0.010
		30	0.009	0.021	0.018	0.018	0.016	0.001	0.007	0.015	0.034	0.053	0.070	0.076	0.094
	600 (5.58)	100	0.012	0.017	0.016	0.029	0.033	0.028	0.025	0.045	0.092	0.138	0.170	0.170	0.173
		60	0.011	0.023	0.054	0.102	0.120	0.117	0.123	0.165	0.172	0.196	0.218	0.223	0.224
		30	0.002	0.014	0.046	0.084	0.090	0.092	0.100	0.133	0.150	0.167	0.175	0.175	0.176
1.50	300 (4.50)	100	0.002	0.011	0.016	0.011	-0.002	-0.020	-0.027	0.007	0.000	0.005	0.008	0.010	0.008
		60	0.005	0.014	0.028	0.022	0.030	0.011	0.013	0.077	0.042	0.043	0.047	0.050	0.051
		30	0.003	0.010	0.027	0.045	0.047	0.033	0.023	0.042	0.062	0.068	0.076	0.078	0.078
	450 (6.75)	100	0.033	0.113	0.149	0.155	0.162	0.162	0.162	0.167	0.181	0.188	0.197	0.201	0.204
		60	0.057	0.129	0.163	0.178	0.182	0.195	0.209	0.214	0.204	0.211	0.221	0.224	0.224
		30	0.025	0.099	0.140	0.157	0.158	0.193	0.168	0.184	0.217	0.222	0.228	0.231	0.231
	600 (9.00)	100	0.056	0.123	0.157	0.189	0.201	0.233	0.266	0.275	0.242	0.249	0.257	0.267	0.266
		60	0.053	0.118	0.140	0.181	0.188	0.196	0.205	0.221	0.247	0.256	0.264	0.268	0.268
		30	0.039	0.081	0.116	0.145	0.160	0.160	0.160	0.174	0.213	0.226	0.233	0.235	0.237

表-I.7 骨材B使用コンクリートバー試験結果

(単位: 膨張量%)

アルカリ含有量 (%)	単位セメント量 (kg/m ³)	骨材 B の混合率 (%)	材 令 (月 数)												
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	18
0.36	300 (1.08)	100	0.002	0.010	0.013	0.008	0.014	0.025	0.036	0.026	0.007	0.005	0.007	0.008	0.008
		60	0.000	0.001	-0.002	-0.003	-0.006	-0.012	-0.017	-0.011	0.001	0.004	0.007	0.007	0.006
		30	0.000	-0.006	-0.006	-0.009	-0.018	-0.025	-0.032	-0.022	-0.006	-0.004	0.001	0.003	0.003
	450 (1.62)	100	0.001	0.003	0.007	0.002	-0.002	-0.004	-0.007	-0.003	0.005	0.009	0.013	0.014	0.013
		60	0.002	0.003	0.006	0.006	-0.010	-0.017	-0.023	-0.011	0.008	0.010	0.014	0.015	0.013
		30	-0.008	-0.010	-0.011	-0.016	-0.022	-0.023	-0.023	-0.012	-0.002	-0.006	-0.001	0.002	0.004
	600 (2.16)	100	0.008	0.007	0.012	0.009	0.004	-0.014	-0.033	-0.020	0.006	0.006	0.011	0.013	0.013
		60	0.003	0.011	0.008	0.005	0.003	0.005	0.007	0.005	0.003	0.004	0.007	0.008	0.009
		30	0.007	0.013	0.012	0.007	-0.007	-0.008	-0.009	0.000	0.022	0.019	0.017	0.018	0.016
0.93	300 (2.79)	100	0.003	0.005	0.006	0.003	0.001	-0.008	0.001	0.018	0.005	-0.001	0.003	0.005	0.007
		60	-0.010	-0.012	-0.011	-0.006	-0.016	-0.035	-0.031	-0.009	-0.009	-0.009	-0.009	-0.008	-0.004
		30	0.001	0.003	0.014	0.002	-0.005	-0.015	-0.012	0.006	0.006	0.003	0.008	0.010	0.010
	450 (4.185)	100	0.012	0.016	0.030	0.021	0.011	-0.001	0.008	0.032	0.023	0.023	0.026	0.031	0.072
		60	0.012	0.021	0.031	0.056	0.066	0.069	0.085	0.117	0.138	0.167	0.182	0.183	0.185
		30	0.015	0.027	0.036	0.078	0.101	0.094	0.006	0.143	0.162	0.186	0.198	0.198	0.199
	600 (5.58)	100	0.056	0.124	0.156	0.169	0.173	0.169	0.184	0.216	0.239	0.286	0.311	0.313	0.317
		60	0.044	0.113	0.154	0.190	0.199	0.207	0.225	0.256	0.281	0.319	0.342	0.345	0.346
		30	0.036	0.088	0.140	0.158	0.161	0.157	0.175	0.213	0.238	0.257	0.265	0.268	0.288
1.50	300 (4.50)	100	0.012	0.057	0.113	0.119	0.115	0.101	0.104	0.137	0.143	0.153	0.151	0.146	0.146
		60	0.016	0.057	0.110	0.162	0.177	0.162	0.163	0.185	0.197	0.206	0.215	0.217	0.217
		30	0.015	0.050	0.070	0.119	0.127	0.113	0.119	0.157	0.167	0.163	0.170	0.172	0.171
	450 (6.75)	100	0.114	0.185	0.226	0.241	0.246	0.256	0.266	0.279	0.301	0.334	0.353	0.355	0.354
		60	0.128	0.218	0.268	0.301	0.317	0.326	0.335	0.348	0.359	0.374	0.388	0.390	0.390
		30	0.094	0.182	0.232	0.240	0.243	0.258	0.273	0.289	0.300	0.310	0.320	0.323	0.328
	600 (9.00)	100	0.148	0.239	0.289	0.306	0.314	0.327	0.340	0.357	0.371	0.380	0.388	0.391	0.393
		60	0.131	0.208	0.250	0.280	0.288	0.301	0.313	0.327	0.340	0.347	0.351	0.353	0.355
		30	0.089	0.149	0.186	0.213	0.223	0.235	0.247	0.266	0.279	0.291	0.293	0.291	0.292

(備考) 単位セメント量の欄の()内は, 単位アルカリ量(Na₂Oeq kg/m³)を表わす

表-I.8 骨材C使用コンクリートバー試験結果

(単位: 膨張量%)

アルカリ含有量 (%)	単位セメント量 (kg/m ³)	骨 材 C の混合率 (%)	材 令 (月 数)													
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	18	
0.36	300 (1.08)	100	0.006	0.013	0.012	0.011	0.006	-0.007	-0.020	-0.008	0.004	0.004	0.005	0.005	0.004	
		60	0.000	0.000	-0.003	-0.000	0.009	0.017	0.025	0.005	-0.003	0.001	0.002	0.002	0.003	
		30	-0.005	0.000	-0.001	0.002	0.003	-0.004	-0.012	-0.004	-0.001	-0.003	-0.002	-0.002	-0.001	
	450 (1.62)	100	-0.001	0.004	0.006	0.006	0.004	-0.001	-0.007	0.001	-0.002	-0.007	-0.002	-0.001	0.002	
		60	0.005	0.007	0.006	0.008	0.008	0.000	-0.008	-0.004	-0.001	-0.001	0.003	0.004	0.004	
		30	0.000	0.007	0.005	-0.001	-0.005	-0.016	-0.026	-0.014	-0.003	0.000	0.001	0.001	0.001	
	600 (2.16)	100	0.002	0.006	0.002	0.002	0.007	0.006	0.006	0.002	-0.002	-0.004	-0.001	0.000	0.001	
		60	0.010	0.011	0.013	0.013	0.018	0.026	0.034	0.023	0.014	0.019	0.016	0.015	0.015	
		30	-0.002	-0.003	-0.003	0.003	0.008	0.009	0.010	0.009	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	
0.93	300 (2.79)	100	0.000	-0.022	-0.016	0.005	0.001	-0.006	-0.012	-0.004	0.008	0.000	0.008	0.008	0.008	
		60	-0.001	0.005	0.004	-0.006	0.005	-0.004	-0.014	-0.009	-0.002	-0.001	0.002	0.002	0.002	
		30	-0.006	0.000	-0.001	0.000	0.005	0.007	0.008	0.004	-0.002	-0.002	0.002	0.003	0.003	
	450 (4.185)	100	0.006	0.006	0.006	0.008	-0.003	-0.025	0.002	0.016	0.004	0.009	0.008	0.008	0.008	
		60	-0.003	-0.012	-0.011	0.003	-0.001	-0.016	-0.009	0.018	0.039	0.071	0.089	0.095	0.124	
		30	0.004	0.011	0.007	0.003	0.000	-0.014	-0.007	0.018	0.028	0.040	0.051	0.056	0.082	
	600 (5.58)	100	0.009	0.013	0.030	0.060	0.071	0.072	0.094	0.127	0.161	0.212	0.229	0.232	0.238	
		60	0.000	0.008	0.033	0.064	0.074	0.080	0.109	0.154	0.186	0.217	0.226	0.227	0.229	
		30	0.002	0.003	0.020	0.077	0.113	0.124	0.154	0.201	0.222	0.243	0.259	0.261	0.265	
1.50	300 (4.50)	100	0.003	0.016	0.015	0.008	0.001	-0.013	-0.008	0.008	0.004	-0.001	0.003	0.004	0.004	
		60	0.006	0.012	0.012	0.026	0.035	0.022	0.034	0.059	0.079	0.101	0.106	0.106	0.108	
		30	-0.021	-0.015	-0.009	-0.002	-0.009	-0.025	-0.025	0.004	0.033	0.056	0.067	0.068	0.068	
	450 (6.75)	100	0.024	0.092	0.159	0.190	0.195	0.200	0.206	0.222	0.240	0.256	0.264	0.264	0.264	
		60	0.020	0.092	0.161	0.192	0.197	0.207	0.216	0.232	0.259	0.292	0.303	0.303	0.304	
		30	0.002	0.061	0.113	0.134	0.144	0.158	0.172	0.193	0.202	0.211	0.219	0.220	0.219	
	600 (9.00)	100	0.067	0.146	0.209	0.235	0.250	0.263	0.275	0.293	0.314	0.330	0.337	0.338	0.342	
		60	0.053	0.110	0.171	0.211	0.228	0.246	0.264	0.286	0.302	0.312	0.318	0.320	0.323	
		30	0.030	0.082	0.133	0.166	0.183	0.198	0.212	0.233	0.249	0.256	0.260	0.261	0.264	

表-I.9 骨材D使用コンクリートバー試験結果

(単位: 膨張量%)

アルカリ含有量 (%)	単位セメント量 (kg/m ³)	骨 材 D の混合率 (%)	材 令 (月 数)													
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	18	
0.36	300 (1.08)	100	0.009	0.008	0.004	-0.006	0.008	0.030	0.052	0.016	0.009	0.012	0.012	0.015	0.013	
		60	0.009	0.009	0.008	0.014	0.012	0.008	0.004	0.009	0.012	0.014	0.015	0.019	0.019	
		30	0.000	0.004	-0.005	-0.006	-0.008	-0.011	-0.014	0.002	0.003	0.003	0.004	0.009	0.008	
	450 (1.62)	100	0.005	0.006	0.010	0.009	0.008	0.006	0.004	0.010	0.004	0.004	0.004	0.006	0.006	
		60	0.003	0.007	0.007	0.006	0.013	0.022	0.032	0.010	0.002	0.001	0.002	0.007	0.006	
		30	0.008	0.015	0.018	0.003	0.001	0.004	0.006	0.009	0.010	0.015	0.015	0.015	0.015	
	600 (2.16)	100	0.008	0.006	0.006	0.016	0.010	-0.001	-0.012	0.009	0.012	0.013	0.013	0.011	0.009	
		60	0.011	0.007	0.004	0.008	0.012	0.016	0.020	0.013	0.014	0.017	0.017	0.019	0.016	
		30	0.004	0.005	0.002	0.008	0.014	0.019	0.024	0.013	0.009	0.009	0.009	0.012	0.012	
0.93	300 (2.79)	100	0.001	0.005	0.009	0.008	0.020	0.036	0.052	0.018	0.004	0.006	0.006	0.009	0.009	
		60	0.007	0.006	0.007	0.014	0.012	0.007	0.003	0.008	0.004	0.002	0.003	0.007	0.008	
		30	0.008	0.011	0.012	0.012	0.014	0.016	0.019	0.020	0.009	0.009	0.010	0.010	0.009	
	450 (4.185)	100	0.013	0.015	0.020	0.011	-0.006	-0.024	-0.020	-0.003	0.006	0.009	0.009	0.011	0.010	
		60	0.006	0.010	0.015	0.019	0.001	-0.024	-0.019	-0.002	0.009	0.013	0.014	0.016	0.016	
		30	0.012	0.008	0.006	0.008	0.003	-0.017	-0.008	0.022	0.034	0.045	0.048	0.057	0.059	
	600 (5.58)	100	-0.002	0.000	-0.001	0.001	-0.015	-0.037	-0.004	0.003	0.001	0.004	0.004	0.004	0.002	
		60	0.018	0.045	0.067	0.072	0.063	0.050	0.088	0.098	0.122	0.144	0.147	0.153	0.155	
		30	0.032	0.072	0.106	0.126	0.126	0.121	0.136	0.164	0.181	0.203	0.206	0.210	0.112	
1.50	300 (4.50)	100	0.001	0.001	0.003	0.000	-0.019	-0.042	0.017	0.002	-0.001	-0.002	-0.001	0.007	0.003	
		60	0.000	0.006	0.007	0.000	-0.013	-0.028	0.000	0.007	0.002	-0.001	0.000	0.007	0.006	
		30	0.008	0.022	0.037	0.035	0.025	0.011	0.043	0.049	0.046	0.056	0.057	0.063	0.062	
	450 (6.75)	100	0.076	0.111	0.121	0.117	0.128	0.143	0.158	0.128	0.118	0.119	0.120	0.123	0.123	
		60	0.122	0.177	0.205	0.207	0.214	0.222	0.231	0.224	0.236	0.243	0.244	0.248	0.248	
		30	0.097	0.142	0.161	0.168	0.178	0.188	0.199	0.194	0.202	0.220	0.221	0.222	0.222	
	600 (9.00)	100	0.110	0.151	0.177	0.183	0.182	0.179	0.176	0.197	0.215	0.250	0.255	0.263	0.267	
		60	0.112	0.163	0.197	0.212	0.217	0.221	0.224	0.241	0.267	0.276	0.278	0.286	0.292	
		30	0.086	0.130	0.165	0.174	0.180	0.185	0.190	0.215	0.225	0.236	0.238	0.245	0.248	

(備考) 単位セメント量の欄の () 内は, 単位アルカリ量 (Na₂Oeq kg/m³) を表わす。

表-I.10 骨材E使用コンクリートバー試験結果

(単位:膨張量%)

アルカリ 含有量 (%)	単位セメ ント量 (kg/m ³)	骨 材 E の混合率 (%)	材 令 (月 数)													
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	18	
0.36	300 (1.08)	100	0.013	0.020	0.009	0.007	0.011	0.014	0.018	0.011	0.004	0.014	0.013	0.013	0.014	
		60	0.010	0.007	0.005	0.016	0.025	0.033	0.041	0.022	0.002	0.004	0.005	0.005	0.005	
		30	0.007	0.013	0.009	0.023	0.016	0.008	-0.001	0.002	0.006	0.008	0.012	0.012	0.009	
	450 (1.62)	100	0.010	0.009	0.007	0.011	0.000	-0.012	-0.024	-0.008	0.009	0.011	0.016	0.016	0.016	
		60	0.008	0.019	0.008	0.017	0.008	-0.002	-0.013	-0.003	0.007	0.009	0.011	0.011	0.011	
		30	0.016	0.021	0.014	0.019	0.007	-0.006	-0.018	0.000	0.019	0.012	0.016	0.016	0.015	
	600 (2.16)	100	0.010	-0.002	0.015	0.020	0.011	0.003	-0.006	0.004	0.013	0.015	0.018	0.018	0.018	
		60	0.010	0.003	0.013	0.014	0.006	-0.001	-0.008	0.002	0.013	0.017	0.022	0.022	0.020	
		30	0.005	-0.010	-0.001	0.019	0.019	0.020	0.020	0.013	0.007	0.010	0.016	0.016	0.016	
0.93	300 (2.79)	100	0.008	0.011	0.010	0.018	0.008	-0.002	-0.013	-0.003	0.009	0.012	0.012	0.012	0.013	
		60	0.007	-0.001	0.008	0.003	0.002	0.001	0.001	0.002	0.003	0.004	0.009	0.009	0.009	
		30	0.011	0.012	0.010	0.003	-0.002	-0.006	-0.011	-0.003	0.005	0.009	0.014	0.014	0.014	
	450 (4.185)	100	-0.001	-0.011	0.000	-0.008	-0.019	-0.030	-0.055	0.025	0.006	0.012	0.013	0.013	0.012	
		60	0.012	0.013	0.019	0.007	-0.003	-0.013	-0.007	0.005	0.015	0.016	0.020	0.020	0.018	
		30	0.012	0.016	0.015	0.024	0.002	-0.020	-0.014	0.000	0.014	0.029	0.036	0.037	0.044	
	600 (5.58)	100	0.013	0.022	0.013	0.019	-0.004	-0.027	-0.011	0.006	0.022	0.021	0.027	0.027	0.027	
		60	0.010	0.008	0.014	0.021	0.035	0.049	0.102	0.134	0.163	0.185	0.190	0.190	0.192	
		30	0.012	0.002	0.027	0.054	0.067	0.081	0.141	0.151	0.160	0.191	0.200	0.200	0.202	
1.50	300 (4.50)	100	0.007	0.005	0.009	0.012	-0.005	-0.023	-0.027	0.008	0.011	0.012	0.017	0.017	0.017	
		60	0.009	0.009	0.010	0.015	-0.004	-0.024	0.021	0.018	0.012	0.017	0.017	0.017	0.015	
		30	0.004	0.002	0.006	0.019	0.003	-0.015	-0.010	0.006	0.021	0.034	0.041	0.042	0.042	
	450 (6.75)	100	0.011	0.030	0.072	0.106	0.107	0.108	0.109	0.123	0.140	0.179	0.186	0.186	0.187	
		60	0.031	0.098	0.145	0.160	0.174	0.187	0.200	0.205	0.211	0.230	0.235	0.235	0.235	
		30	0.025	0.070	0.112	0.123	0.132	0.142	0.152	0.174	0.196	0.200	0.204	0.203	0.203	
	600 (9.00)	100	0.035	0.102	0.161	0.180	0.202	0.224	0.247	0.261	0.275	0.291	0.298	0.298	0.299	
		60	0.036	0.096	0.149	0.160	0.185	0.210	0.235	0.251	0.266	0.277	0.281	0.281	0.280	
		30	0.022	0.062	0.135	0.157	0.183	0.210	0.236	0.241	0.246	0.258	0.261	0.261	0.263	

表-I.11 骨材F使用コンクリートバー試験結果

(単位:膨張量%)

アルカリ含有量 (%)	単位セメント量 (kg/m³)	骨材 F の混合率 (%)	材 令 (月 数)													
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	18	
0.36	300 (1.08)	100	-0.004	-0.015	-0.004	0.012	0.016	0.019	-0.011	-0.001	0.005	-0.002	-0.003	-0.003	0.000	
		60	0.013	0.001	0.007	-0.001	-0.004	-0.007	0.002	0.007	0.005	0.008	0.008	0.007	0.011	
		30	0.010	0.013	0.004	-0.005	-0.008	-0.012	0.000	0.006	0.007	0.006	0.006	0.005	0.009	
	450 (1.62)	100	0.010	0.006	0.006	0.003	0.000	-0.002	0.006	0.007	0.009	0.010	0.009	0.009	0.011	
		60	0.015	0.008	0.015	-0.004	-0.009	-0.014	0.012	0.014	0.016	0.013	0.013	0.013	0.014	
		30	-0.001	0.004	0.003	-0.031	-0.038	-0.046	0.002	0.006	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.002	
	600 (2.16)	100	0.008	-0.007	0.010	-0.029	-0.039	-0.050	0.000	0.013	0.006	0.013	0.013	0.013	0.013	
		60	0.006	0.001	0.013	-0.023	-0.033	-0.044	0.007	0.018	0.013	0.015	0.015	0.015	0.016	
		30	0.010	0.018	0.013	-0.002	-0.007	-0.012	0.015	0.014	0.020	0.015	0.015	0.015	0.017	
0.93	300 (2.79)	100	0.007	0.001	0.003	0.000	-0.004	-0.007	0.002	0.011	0.006	0.011	0.011	0.000	0.013	
		60	0.006	0.011	0.001	-0.008	-0.012	-0.015	0.000	0.004	0.005	0.004	0.003	0.003	0.005	
		30	0.004	-0.001	0.001	0.015	0.018	0.021	0.005	0.001	0.005	0.003	0.003	0.002	0.004	
	450 (4.185)	100	0.000	-0.002	-0.011	-0.017	-0.019	-0.021	-0.008	-0.011	-0.011	-0.012	-0.012	-0.012	-0.011	
		60	0.013	-0.011	0.004	-0.008	-0.012	-0.015	0.008	0.006	0.003	0.005	0.005	0.004	0.006	
		30	0.010	0.002	0.002	-0.017	-0.026	-0.035	0.008	0.014	0.013	0.016	0.016	0.016	0.017	
	600 (5.58)	100	0.009	-0.009	0.011	0.004	-0.011	-0.026	0.034	0.043	0.052	0.054	0.053	0.052	0.062	
		60	0.022	0.011	0.012	0.030	0.014	-0.001	0.058	0.067	0.075	0.077	0.076	0.075	0.088	
		30	0.028	0.031	0.025	0.019	0.001	-0.017	0.039	0.065	0.080	0.080	0.079	0.078	0.088	
1.50	300 (4.50)	100	-0.009	-0.012	-0.019	-0.025	-0.026	-0.028	-0.020	-0.022	-0.019	-0.021	-0.021	-0.021	-0.019	
		60	-0.003	-0.026	-0.013	-0.028	-0.032	-0.035	-0.014	-0.014	-0.014	-0.014	-0.014	-0.015	-0.012	
		30	0.011	-0.006	0.012	-0.015	-0.022	-0.030	0.011	0.011	0.015	0.013	0.013	0.013	0.015	
	450 (6.75)	100	0.030	0.001	0.021	0.080	0.063	0.045	0.123	0.137	0.144	0.148	0.148	0.148	0.149	
		60	0.027	0.015	0.018	0.071	0.055	0.040	0.111	0.123	0.129	0.129	0.129	0.129	0.131	
		30	0.014	-0.007	0.014	0.040	0.026	0.013	0.106	0.082	0.092	0.089	0.088	0.088	0.091	
	600 (9.00)	100	0.045	0.053	0.069	0.150	0.132	0.114	0.183	0.200	0.209	0.211	0.210	0.210	0.217	
		60	0.051	0.048	0.064	0.138	0.119	0.100	0.170	0.185	0.196	0.202	0.201	0.201	0.211	
		30	0.038	0.031	0.037	0.117	0.093	0.070	0.148	0.162	0.181	0.189	0.187	0.186	0.206	

(備考) 単位セメント量の欄の()内は、単位アルカリ量(Na₂Oeq kg/m³)を表わす。

表-I.12 モルタル膨張試験およびコンクリート膨張試験に用いたセメントの物理試験結果

セ メ ン ト	比 重	ブレン 比表面積 (cm^2/g)	凝 結			安 定 性	フ ロ ー 値	圧縮強さ (kgf/cm^2)			曲げ強さ (kgf/cm^2)		
			水 量 (%)	始 発 (h-min)	終 結 (h-min)			3 日	7 日	28 日	3 日	7 日	28 日
A	3.16	3280	28.5	2-47	4-26	良	252	144	261	461	34	51	71
B	3.15	3260	25.8	2-42	3-42	良	259	154	255	415	34	52	70
C	3.15	3370	26.6	2-34	3-32	良	254	144	229	390	36	50	68
D	3.14	3290	27.8	2-22	3-10	良	248	179	275	432	38	49	72
E	3.15	3370	26.6	2-34	3-32	良	254	144	229	390	36	50	68
F	3.17	3160	27.1	2-56	4-05	良	260	153	230	407	34	48	70
G	3.16	3470	28.4	2-24	3-24	良	249	162	222	396	37	46	74
H	3.16	3360	27.4	2-12	3-20	良	250	118	207	437	30	45	74
I	3.16	3270	26.9	2-24	3-36	良	247	147	260	407	34	53	72

備考：セメントCとEとは同銘柄のものである。

Ⅱ モルタルバーの膨張要因に関する各種の実験的検討

(土木研究所における実験)

共同研究委員会

担当：土木研究所コンクリート研究室

1. アルカリ量がアルカリ骨材反応に及ぼす影響

1.1 まえがき

これまでの研究から、ひとくちにASR反応性のある骨材といっても、岩種等によって、それを用いたモルタルバーの膨張速度、膨張量は異なることが次第に明らかになってきた。特に、同じ配合のモルタルを作った場合に、骨材によってモルタルが膨張し始めるセメント中のアルカリ量（以下、この点をアルカリ量のクリティカルポイントと呼び、CPと略す）が異なることが予想された。CPを定量的に把握し、CPを越えた場合の膨張特性を把握することは、骨材の反応性の試験方法の改善に役立つだけでなく、アルカリ総量規制等によるASR抑制手法の検討にも役立つものである。このため、骨材を種々変え、セメント中のアルカリ量を変化させたモルタルバーを製作し、膨張量を測定した。

1.2 実験概要

実験に供した骨材は、結晶度の高いシリカ質骨材の代表として水晶2種類と豊浦標準砂（珪砂）、シリカを含む無害の代表として硬質砂岩と富士川産川砂、反応性のある骨材のうち安山岩質のものとして3種、チャートのものの代表として2種を用いた。この他に、アルカリシリカ反応と無関係の骨材として石灰石1種を用いた。それぞれの骨材の化学法の結果を図-Ⅱ.1.1に示す。

これら骨材を用い、セメント中のアルカリ量を0.6～2.4‰に変化させて、「骨材のアルカリシリカ反応性試験モルタルバー法建設省暫定案」に準じ、モルタルバーを製作し、38℃で養生し、長さ変化を測定した。

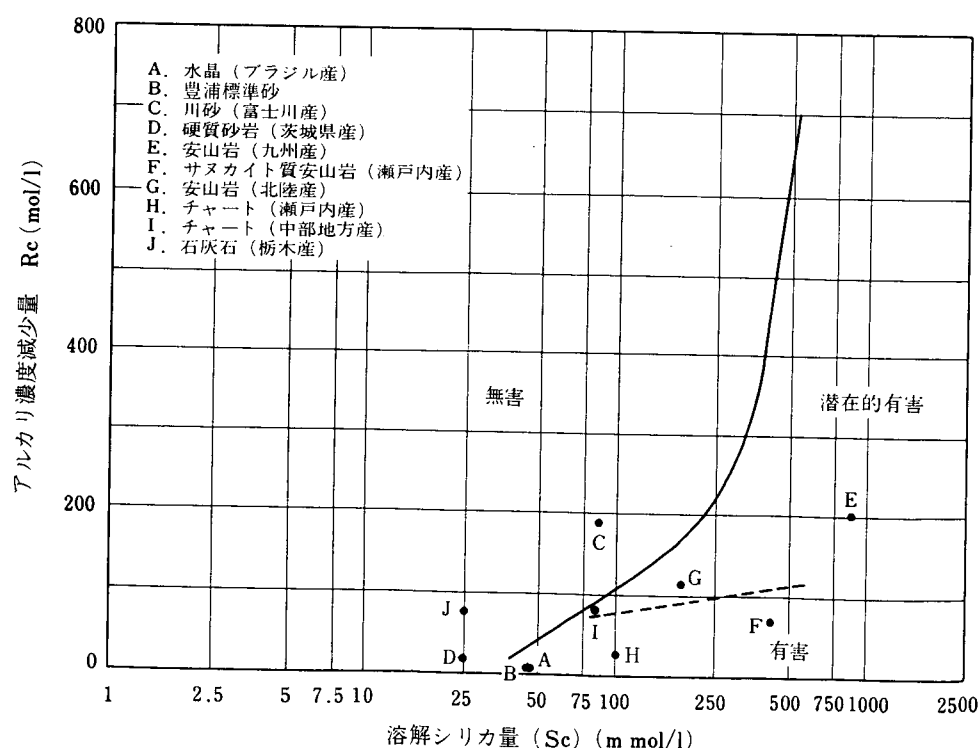


図-Ⅱ.1.1 使用した骨材の化学法の結果

1.3 実験結果および考察

それぞれの骨材を用いたモルタルバーのアルカリ量と材令と膨張量の関係を図-Ⅱ.1.2に示す。E、F、Gはいずれも安山岩であるが、明確な膨張を生じないアルカリ量の上限（CP）を有していて、Eは1.0～1.2%、FとGは0.8～1.0%の間にある。そしてCPを越えると、著しい膨張を示すようになる。これに対してチャートは明確なCPが見られず、アルカリ量の増加にしたがって滑らかに膨張量が増加している。安山岩とチャート以外で明確な膨張を示したCの川砂は、1.6%を越える比較的高いアルカリ量で、チャートと類似の滑らかな膨張量の増加を示している。

以上のことより、安山岩類では膨張を生じないアルカリ量の上限は比較的明確に設定でき、この点を越えるとわずかなアルカリ量の増加により反応は著しくなり膨張量も著しく増大する。チャート類では、膨張を生じないアルカリの上限値は明確には示し得ず、仮にCPを越えてもアルカリ量が極端に大きくならない限り膨張は安山岩ほど著しくはないものと考えられる。

また、今回用いた骨材ではアルカリ量0.6%のモルタルバーで膨張したものは皆無であり、実際にASRによる構造物の劣化を生じている骨材はアルカリ量1.2%のモルタルバーにすると3カ月で0.05%あるいは6カ月で0.1%以上の膨張を生じているものが多い。

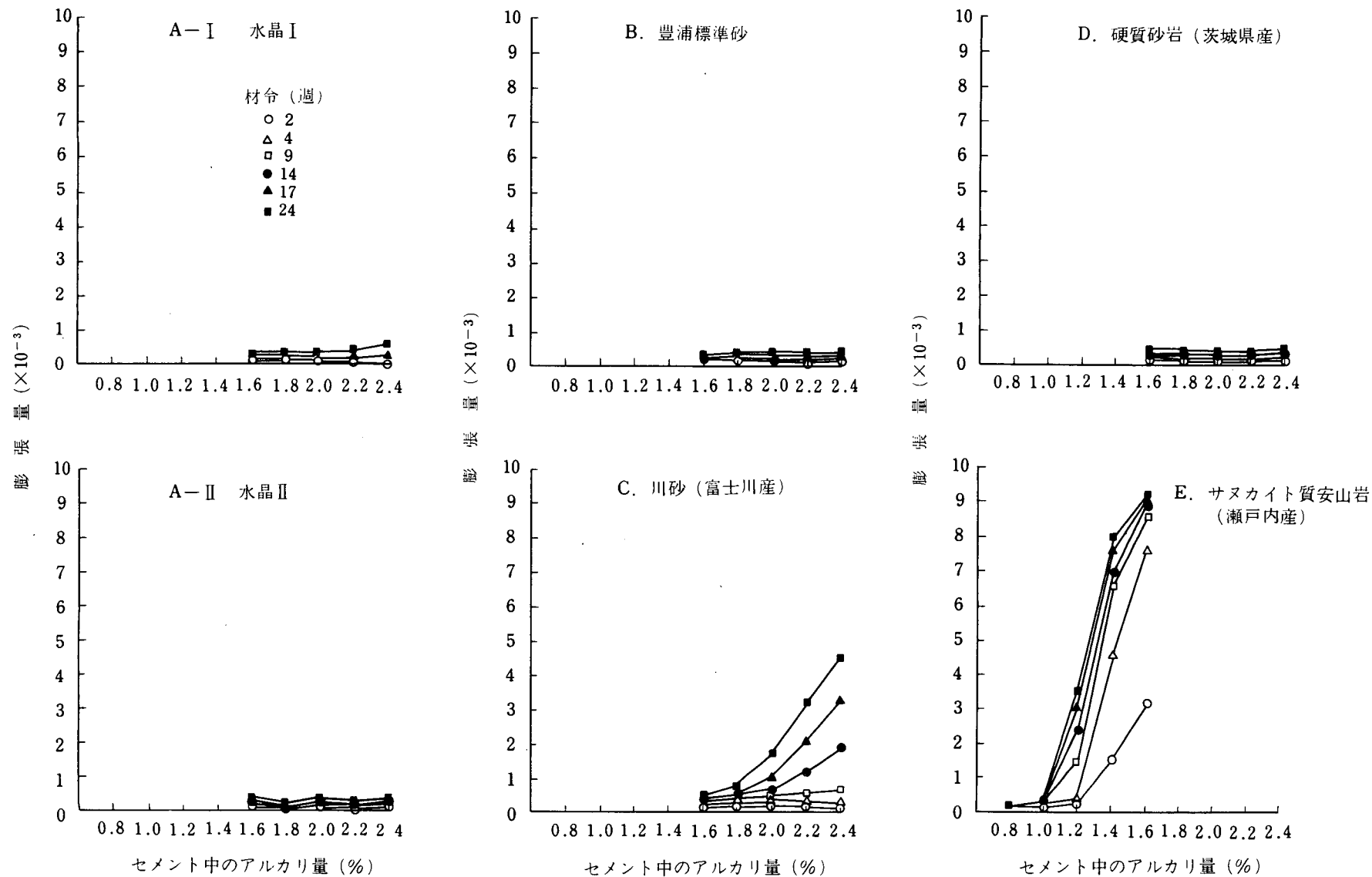


図-11.1.2 セメントのアルカリ量とモルタルバーの膨張量 (その1)

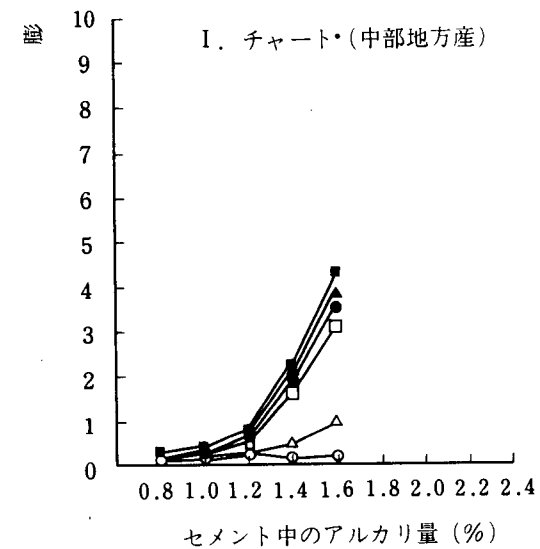
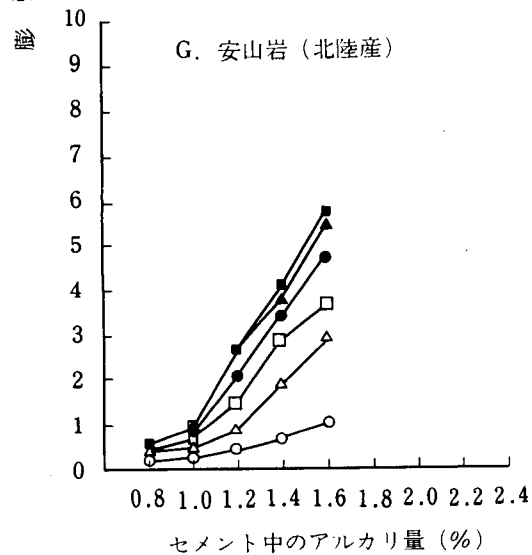
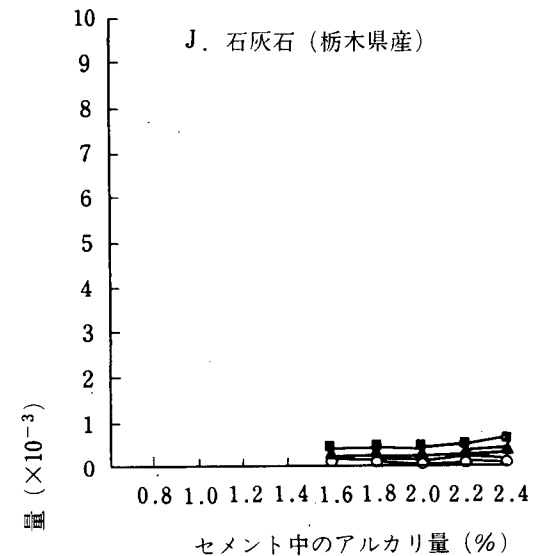
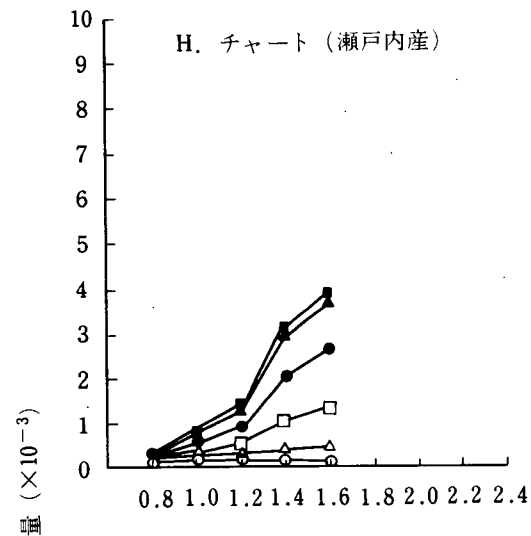
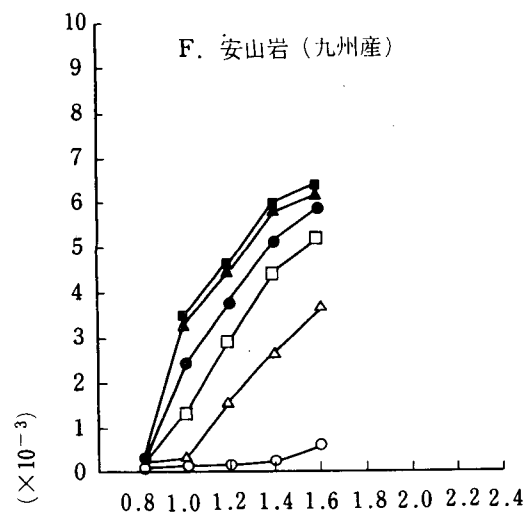


図-II.1.3 セメント中のアルカリ量とモルタルバーの膨張量 (その2)

2. 各種のアルカリがアルカリ骨材反応に及ぼす影響

2.1 まえがき

アルカリ骨材反応に影響する要因は、骨材の物理的・化学的特性、セメント中のアルカリ量、外部からの種々のイオン、コンクリートの配合、温度や湿度等の環境条件、構造物の仕様等々複雑である。ここでは、このうちアルカリ骨材反応のメカニズムを解明し、モルタルバー試験法の改良を行う上で特に重要と考えられるアルカリイオンのアルカリ骨材反応に対する影響を把握するために、アルカリイオンの種類、アルカリイオンの添加化合物の形態およびその量を変えて作製したモルタルバーを用いて膨張量測定を行うことによりその影響を把握する実験を行った。

2.2 実験方法

表-Ⅱ.2.1 に使用した骨材の種類を示す。アルカリ骨材反応を生じる鉱物にはガラス質から微結晶質までのシリカ鉱物が含まれるが、A1～A4の骨材はいずれも化学法による試験では有害の結果が得られているものである。A1、A2はほぼガラス質のものであり、実際には骨材としては使用できないものである。A3、A4は物理的には骨材として十分な品質を有するものである。骨材は粉碎後ASTM C 227の粒度分布の規定に合わせて粒度調整した。表-Ⅱ.2.2 に使用した普通ポルトランドセメントのアルカリ量を示す。アルカリ量は酸化ナトリウム当量 (Na_2Oeq) のセメント重量比で示した。なお、ここではとりあえずKとNaは等しいモル数ではアルカリ骨材反応に対し、同等の影響をもつとして、 K_2O の Na_2O への等価換算係数は Na_2O と K_2O の分子量比の0.658としてアルカリ量を Na_2Oeq で算出した。

配合は下記の要因の影響を調べるために表-Ⅱ.2.3のように変化させた。

シリーズⅠ：A1～A5の骨材、C1～C5のセメントのみを用いセメント中のアルカリ量と各骨材を用いたモルタルの膨張量との関係を調べる。

シリーズⅡ：A3の骨材についてC1～C5のセメントを用い、細骨材に対して絶乾重量の0.3、0.1、0.04重量%のNaClを加えることによりNaイオン、Clイオンの影響を調べる。

シリーズⅢ：A1骨材及びA3骨材についてNaCl、NaOH、 CaCl_2 、KOHを添加し、各イオンの膨張量への影響を調べる。

シリーズⅣ：A1、A3、A4の骨材についてC1セメントを用いW/C、S/C等を変え、モルタルの単位体積当りのアルカリ量を変化させることによりモルタルバーの膨張量の変化を調べる。

表-Ⅱ.2.1 骨材種類

骨材 No.	A 1	A 2	A 3	A 4	A 5
骨材 種	真珠岩	黒曜石	反応性輝石安山岩A	反応性輝石安山岩B	川砂

表-Ⅱ.2.2 セメントのアルカリ量 (％)

セメントNo	C 1	C 2	C 3	C 4	C 5
a) Na_2O	0.54	0.42	0.29	0.24	0.18
b) K_2O	0.74	0.73	0.72	0.47	0.22
c) Na_2Oeq	1.03	0.89	0.76	0.54	0.32
d) a) / b)	52	47	38	44	56

表-Ⅱ.2.3 各シリーズ配合

	水 量	フ ロー	S/C	変化要因
シ リ ー ズ I	W/C変化	一 定	2.25	アルカリ量変化
シ リ ー ズ II	W/C変化	一 定	2.25	NaCl 添加
シ リ ー ズ III	W/C変化	一 定	2.25	NaCl, NaOH, CaCl ₂ , KOH 添加, アルカリ量一定
シ リ ー ズ IV	W/C一定	変 化	2.25	アルカリ量/㎡ 変化
	W/C一定		変 化	
	W/C一定			

フロー一定は 180 ～ 190 mm の範囲

2.3 実験結果および考察

1) シリーズ I

図-Ⅱ.2.1 にシリーズ I の代表例として A 4 骨材と C 1 ～ C 5 のセメントの組み合わせで作製したモルタルバーの各材令での膨張量を示す。他の骨材でもほぼこれと同様に若材令では収縮を生じ、その後膨張に転じている。20 週経過後では低アルカリ量のセメントでの膨張速度は低いものの、52 週時点ではアルカリ量 0.76% 以上で 0.1% を越える膨張を示している。初期の収縮は硬化収縮と乾燥収縮によって生じているものと考えられる。図-Ⅱ.2.2 に A 1 ～ A 5 の骨材、C 1 ～ C 5 のセメントを用いたモルタルバーの Na_2Oeq と 52 週時における膨張量の関係を示す。全体的にはアルカリ量の増大とともに膨張量は大きくなる傾向にある。黒曜石、真珠岩及び輝石安山岩の A 4 ではアルカリ量の変化に対して比較的敏感なようであり、セメント中のアルカリ量が 1% を越えると著しい膨張量の増大がみられる。

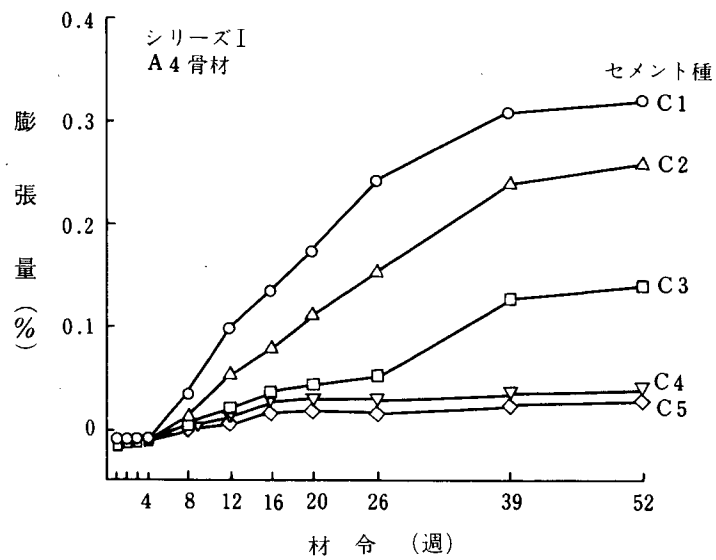


図-Ⅱ.2.1 材令と膨張量

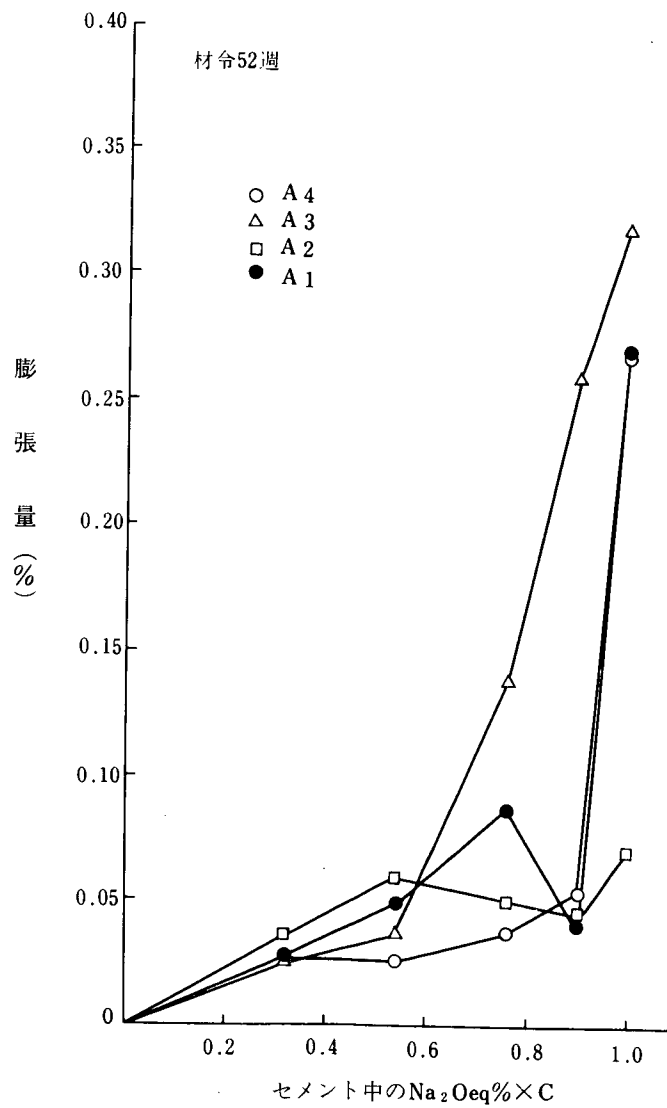


図-Ⅱ.2.2 セメント中のアルカリ量と膨張量

2) シリーズⅡ

図-Ⅱ.2.3にシリーズⅡの一例としてA3骨材を用いNaClを添加したモルタルの材令52週での実験結果を示す。NaClは海砂を使用する場合に混入し、また海岸付近の構造物では外部から潮風によってコンクリート中に浸透してくる。前者では土木学会の基準に従えば、砂質量の0.1%まで含まれる可能性があり、後者はコンクリート表面近くではコンクリートの1%以上が含まれる可能性がある。いずれの場合にもNaイオンが増加するため、アルカリ骨材反応にどう影響するかを把握することは重要である。図-Ⅱ.2.3ではNaClの添加量の増大とともに膨張量が増大しており、この傾向はアルカリ量の多いセメントを用いた場合に著しい。この結果からだけではNaの増加による効果かClの促進効果かは見極めることはできないが、いずれにしても海砂等からの塩分の混入はその量が多くなるとアルカリシリカ反応に重大な影響を及ぼす可能性があると考えられる。

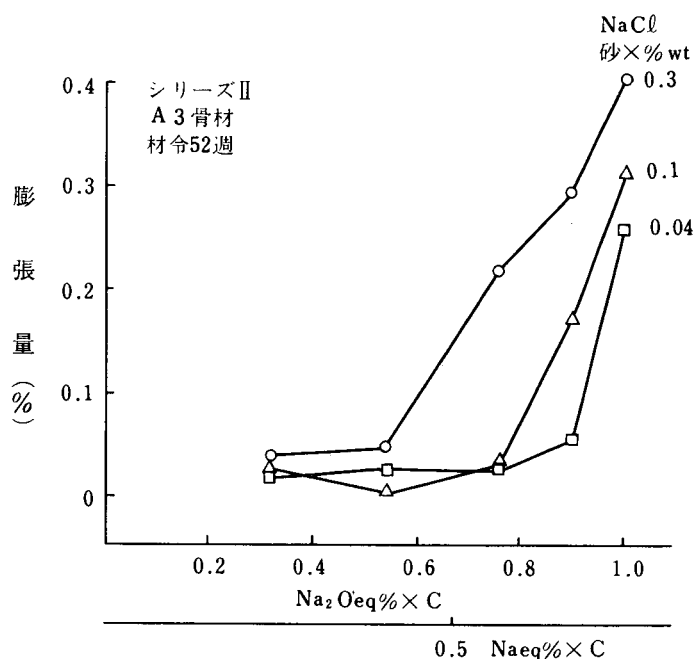


図-Ⅱ.2.3 NaCl 添加の影響

3) シリーズⅢ

シリーズⅡでNaClがアルカリシリカ反応に影響を及ぼすことがわかったが、Naイオンの影響かClイオンの影響かを調べるために、まずモルタルにCaCl₂を添加し、その影響をみた。

図-Ⅱ.2.4はA1骨材、C1セメントを用いた一定配合のモルタルにCaCl₂を添加した場合のCaCl₂の添加量と52週におけるモルタルバーの膨張量の関係を示したものである。Caはセメントペースト中の飽和しているものであり、アルカリシリカ反応にはほとんど関係しないと考えられるため、この図からClイオンの効果のみをみることができるが、このアルカリ量の範囲ではClイオンにはアルカリシリカ反応促進効果はないといえる。

次に NaCl のうち Na イオンがセメント中の Na と同等の影響があるかどうかを見るため、アルカリ量が $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} = 0.761\% (\times C)$ の一定量となるように $C1 \sim C5$ セメントに NaCl を添加し、調整したモルタルを作製した。こうして作った A1 骨材モルタルの 26 週における膨張量と Cl イオン量との関係を図-Ⅱ.2.5 に示す。この図からもこのアルカリ量では Cl イオンはアルカリ骨材反応を促進する効果はなく、しかもセメント中の Na と後から添加した塩分の Na とはほぼ同等の影響を有するといえるようである。図-Ⅱ.2.6 は NaOH を添加し、アルカリ量が $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} = 0.765\% (\times C)$ となるよう調整した A1 骨材モルタルの 26 週における膨張量と添加した NaOH 量との関係を示す。この図からも、アルカリ量を一定とした場合にはセメント中のアルカリと後から添加したアルカリの効果にはあまり差がないといえる。図-Ⅱ.2.7 に、 KOH と NaOH を添加してアルカリ量を増した場合の材令と膨張量の関係を示す。アルカリ量 1.03% 以下はセメントのアルカリだけで、 Na と K が混在している。1.2% 以上ではアルカリ量 1.03% セメントをベースとしてそれ以上のアルカリ量を得るのに KOH と NaOH をそれぞれ単独で添加している。アルカリ量が多くなると比較的短期間で膨張量が停止する傾向にある。 NaOH を添加したものでは、アルカリ量 1.8% にピークがあり、2.0% では、1.6% のものより膨張量が小さくなっている。 KOH を加えたものでは、2.0% まで膨張量は大きくなっている。このようにアルカリ量についてもペシマムのようなものが存在すると考えられる。また、この図から 1.2% までのアルカリ量では Na と K に効果の差はないが、1.4% 以上では著しい差が出ていることがわかる。従って、 K を Na に換算する場合にはこれまでのように単純にモル数を合わせるだけの方法が良いのかどうかさらに検討する必要がある。

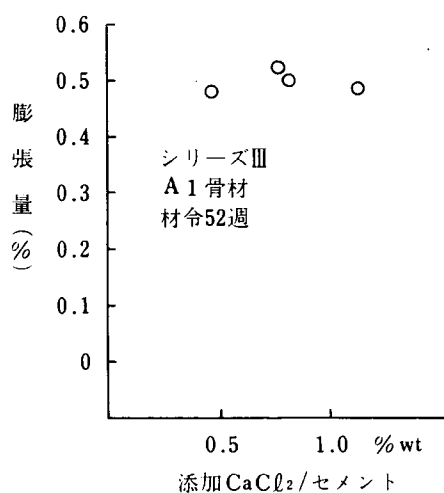


図-Ⅱ.2.4 CaCl_2 添加の影響

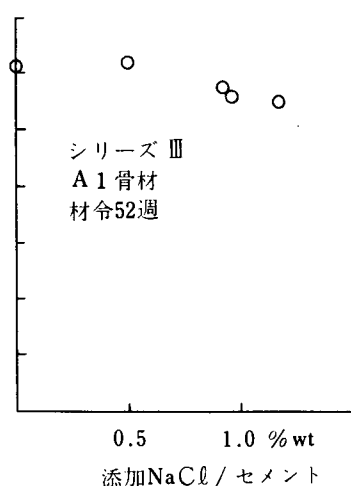


図-Ⅱ.2.5 NaCl 添加の影響

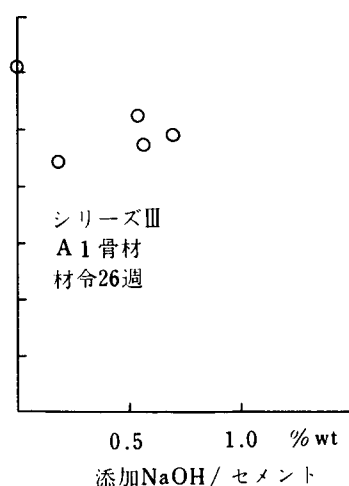


図-Ⅱ.2.6 NaOH 添加の影響

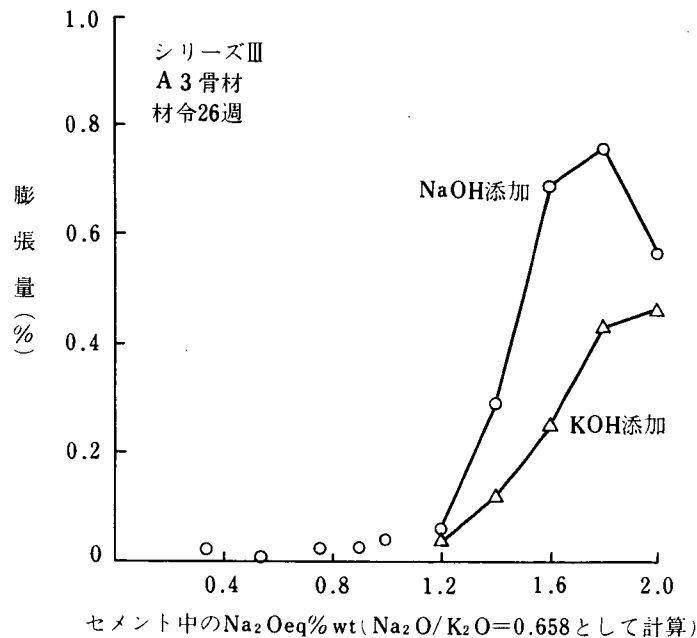


図-Ⅱ.2.7 NaとK添加の影響

4) シリーズⅣ

図-Ⅱ.2.8, Ⅱ.2.9, Ⅱ.2.11にA1, A3, A4骨材を用いたモルタルの単位体積当りのアルカリ量(以下, 単位アルカリ量と略す)と52週での膨張量の関係を示す。このシリーズではW/C, S/C等を変化させることによって単位アルカリ量を変化させているが, 大まかに言ってW/C, S/C等と膨張量とは直接的な相関はなく, 膨張量は単位アルカリ量によって一義的に決まるようである。これまでの報告では, 現場でのアルカリ骨材反応によるコンクリートの膨張はW/C等の配合によってかなり影響を受けるとされているものもあるが, 本実験で行ったモルタルバー法ではこうした影響はみられないようである。

また, A1, A3, A4の骨材種によらず, ある単位アルカリ量を越えると著しく膨張量が大きくなる傾向にあり, 材令が異なるので今後確認する必要があるが, 膨張が著しくなるアルカリ量はA1, A4, A3の順で小さく, 骨材特有のアルカリに対する敏感度のようなものを示すものと考えられる。また, アルカリ量の増加に対する膨張量の増加の比も骨材によって異なっており, この2つの数値によって骨材の反応性が判断できる可能性があり, 今後詳しく検討する必要があると考えられる。

シリーズⅠとシリーズⅣとを同じ条件で比較してみると図-Ⅱ.2.11のようになり, セメントが異なっても図-Ⅱ.2.10とほぼ同様の線にのり, 単位アルカリ量で膨張量が決まるようである。この結果は1編4章7項の試験Ⅲに示す結果と異なっている。今後, 検討を要する課題である。図-Ⅱ.2.12はA3骨材を例にとってシリーズⅠ, シリーズⅡとシリーズⅣのモルタルバーの52週の膨張量をセメント中のアルカリ量と, 後からNaClとして添加したアルカリ量の総量と対比させて示す。Na_{eq}が4 kg/m³ (Na₂Oeqで5.5 kg/m³程度)以下の低濃度ではNaの形態にかかわらずNaの総量に

よって膨張量が決まるようであるが、単位アルカリ量が大きくなるとセメント中のアルカリの効果と NaCl として添加したアルカリの効果が異なってくるようである。これはシリーズⅢで述べたKの効果の換算係数の過大な見積りが影響していると考えられる。

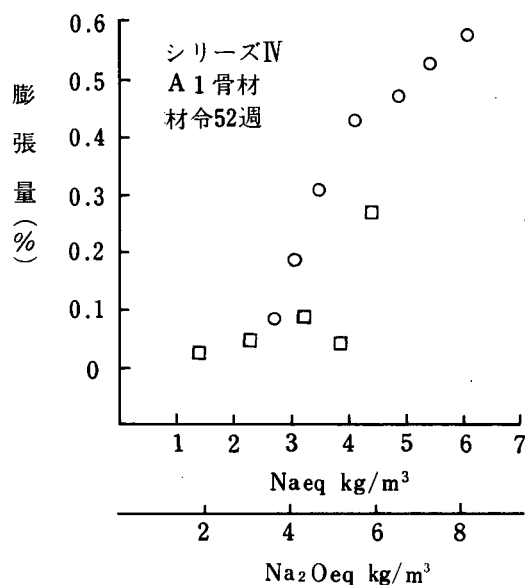


図-Ⅱ.2.8 モルタル中の単位アルカリ量と膨張量

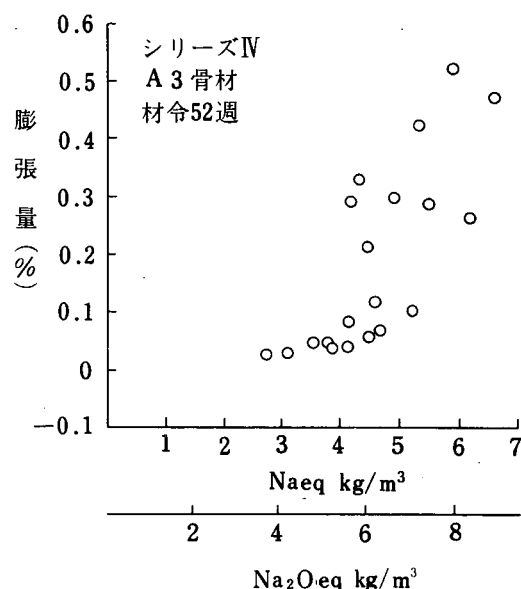


図-Ⅱ.2.9 モルタル中の単位アルカリ量と膨張量

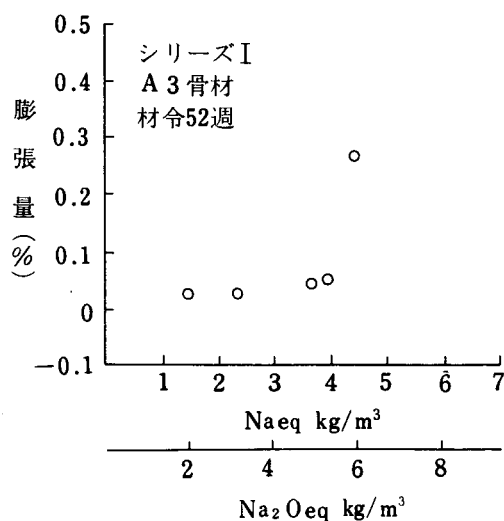


図-Ⅱ.2.10 モルタル中の単位アルカリ量と膨張量

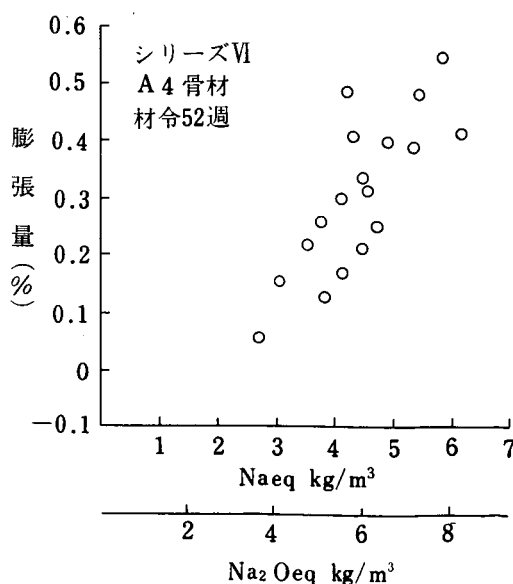


図-Ⅱ.2.11 モルタル中のアルカリ量と膨張量

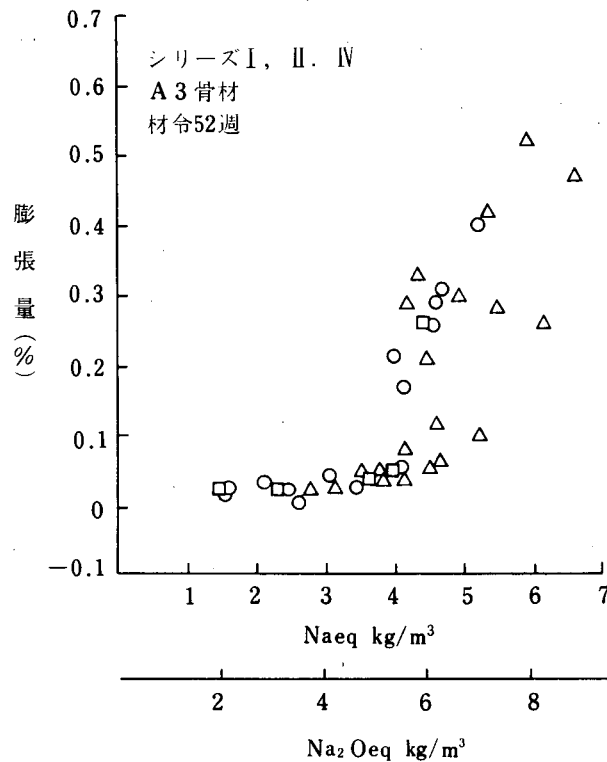


図-Ⅱ.2.12 モルタル中のアルカリ量と膨張量

2.4 ま と め

上述の実験条件は限られたものであるが、その結果から得られた知見としては次のものがあげられる。

- 1) モルタルバーの膨張量はアルカリの種類と量によって影響される。
- 2) Cl イオンにはアルカリ骨材反応への影響はない。
- 3) 比較的低いアルカリ量では膨張量は単位体積モルタルあたりのアルカリ量ではほぼ一義的に決まる。
- 4) KイオンとNaイオンの影響は同一ではなく、比較的低いアルカリ量ではNaの影響のほうが大きく、Kの影響は小さい。しかし、Naについてはアルカリ量のベシマムが認められ、高いアルカリ量では、膨張量が低下している。このため、従来のように単にモル比でKの量をNa当量として表すことについては検討の必要がある。

3. ASR モルタルバー 膨張量に影響する要因に関する考察

3.1 まえがき

コンクリートのアルカリシリカ反応（以下ASRと略す）に影響する要因は種々あり，その反応機構，膨張機構の解明が急がれている。土木研究所ではASR判定試験法やASR抑制手法を確立するために，モルタルバー法を用いた各種試験を実施している。

モルタルバー法は骨材のASR反応性判定試験方法として重要な位置にあり，我が国でも独自の手法の確立が要望されている。このため，建設省ではこれまでの試験結果等を検討して，昭和61年6月に，JISの試験器具等を用いたモルタルバー試験法の暫定案を作成した。これまでのモルタルバー法による調査から，ASTMのモルタルバー法をそのまま用いた場合には問題となるような次の点が明らかになっている。すなわち，① 配合，特に単位モルタルあたりのアルカリ量がモルタルバーの膨張に大きく影響する，② 等モルのアルカリであってもKとNaはモルタルバーの膨張量に異なった影響を及ぼす，③ 養生中の湿度の条件がモルタルバーの膨張に著しい影響を及ぼす等である。これらの結果から，暫定案では，ASTM法と大きく異なる点としては，① に対しては，配合を $W/C = 50\%$ ， $S/C = 2.25$ に統一し，② に対してはセメントはJISに昭和61年に新設された低アルカリ形のものを用い，それにNaOHを加えてアルカリ量を1.2%とし，③ に対しては養生方法の例を具体的に示す，等の改正を行っている。

しかしながら，ASRについてはまだまだ不明の点も多く，例えば，ベシマムを有する骨材に対してはその存在を知る有効な手法がなく，現在のモルタルバー法では，試験本数を増やす以外にはその反応性を正確に把握することは難しい等，解決すべき点が多い。このため，ASR試験法の精度を向上させ，かつ手法を簡易化し，また，有効なASR防止対策を設定するためには，ASRに対する種々の影響要因について調査しておくことが必要であり，ここではモルタルバー法を用いて行ったASRの影響要因に関する実験の結果を報告する。

3.2 実験方法

3.2.1 使用材料

表-Ⅱ.3.1 に使用した骨材の種類を示す。A1～A3の骨材はいずれもASTMの化学法で有害と判定されてたものである。骨材は破碎後ASTM C 227の骨材粒度に合うように粒度調整した。使用したセメントはアルカリ量0.65%の比較的アルカリ量の低い普通ポルトランドセメントである。 K_2O の Na_2O への等価換算係数は0.658としている。

3.2.1 供試体の作成

モルタルバーは $4 \times 4 \times 16$ cmのものを用い，その両端に長さ変化測定用のプラグを埋め込んだ（測定有効長=140 mm）。フローの測定および締固めはJIS R 5201に準じて行い，各配合3本ずつ供試体を作成した。

表-Ⅱ.3.1 使用した骨材

記 号	岩 種	化学法による判定
A 1	サヌカイト質安山岩	有害
A 2	輝石安山岩	潜在的有害
A 3	チャート	有害
A 4	硬質砂岩	無害

3.2.3 養生および長さ変化測定方法

供試体は打設後 24 時間の脱型時までは $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、 $\text{RH} > 95\%$ の湿気箱中で養生し、脱型後 $38 \pm 2^\circ\text{C}$ の湿気箱中で吸い取り紙で巻き、湿潤状態にし、ポリ袋に入れ水分の逸散を極力防ぐようにして、養生した。その後、所定の材令で 1/1000 mm ダイヤルゲージにより長さ変化を測定した。

3.2.4 配 合

実験は各種要因の影響を調べるため、5 シリーズについて行った。以下にその目的と配合を示す。

シリーズⅠ：K と Na のモルタルバーの膨張量に及ぼす影響を調べるため、セメントに NaOH と KOH を別々に 4 段階に加えた。W/C、S/C は一定とした。

シリーズⅡ：ASR 対策として低アルカリセメントを用いることが推奨されているが、この場合でもアルカリ総量の規制値を満足すべきかどうかを確認するため、単位水量、W/C 一定で単位セメント量を増加させ富配合のモルタルを製作した。

シリーズⅢ：混和剤の影響をみるため、配合を一定とし代表的な各種混和剤を添加したモルタルを製作した。混和剤の使用量はメーカーの使用推奨値の中間値を用いた。

シリーズⅣ：モルタル中の空気量のモルタルバーの膨張量への影響をみるため、W/C、S/C 一定で AE 剤およびアルミ粉の使用量を変えたモルタルを製作した。

シリーズⅤ：骨材のペシマム特性を調べるため、反応性骨材と非反応性の骨材を混合した配合一定のモルタルを製作した。

3.3 実験結果および考察

3.3.1 シリーズⅠ

図-Ⅱ.3.1～Ⅱ.3.3 に A1、A2、A3 骨材を用いて NaOH と KOH の添加量を変化させた場合のモルタルバーの膨張量を示す。アルカリ総量のモルタルバーの膨張に及ぼす影響は骨材によって非常に異なり、若材令ではある値を越えたアルカリの増加に対して安山岩系の A1、A2 は敏感で、チャートの A3 は比較的敏感ではない。ただし、材令 52 週時点ではすべての骨材がアルカリの増加に対して敏感になっている。Na と K の影響の差はアルカリ量が 1.2% を越えたときに明瞭で、いずれの骨材につい

てもNaOHを添加した場合のほうがKOHの場合より膨張量が多い。しかし、アルカリ量が1.2%を越えると増加したアルカリ量に対する膨張量の増加量はNaOH添加でもKOH添加でも骨材ごとには同様の傾向となっている。後で述べるが、A1骨材はかなり明瞭なペシマムを有し、種々の条件の差を敏感に受けるようであり、アルカリ量がある値を越えた場合に、アルカリ量の増加に対し膨張量の増加が急激に大きくなっている。この値は1.2%前後にあるようで、この骨材に対してアルカリをKOHで添加し1.2%とすると、骨材は無害と判定されることになる。なお、A1骨材と同岩種の骨材を用い別途に行った試験では、NaOHを添加していくとアルカリ量が2.0%程度からアルカリを増しても膨張量があまり増加しなくなった。

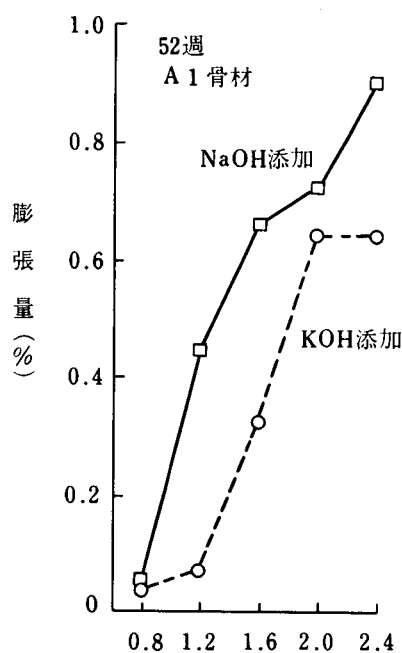


図-Ⅱ.3.1 NaOHとKOHの影響
(A1骨材)

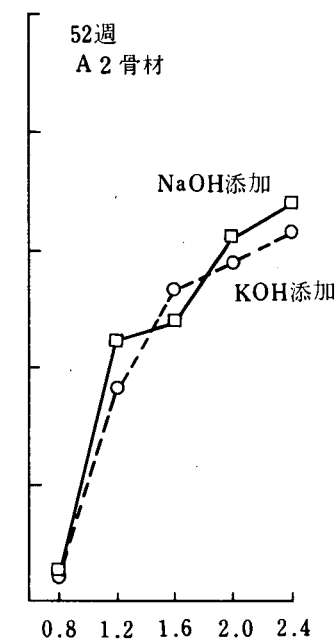


図-Ⅱ.3.2 NaOHとKOHの影響
(A2骨材)

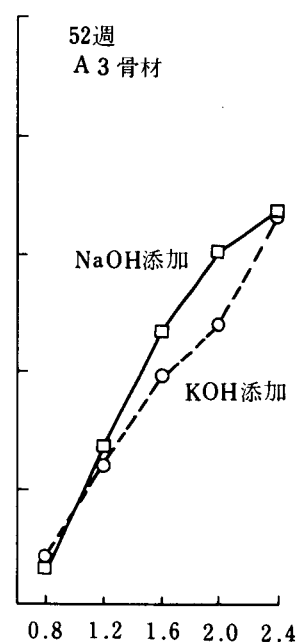


図-Ⅱ.3.3 NaOHとKOHの影響
(A3骨材)

3.3.2 シリーズⅡ

図-Ⅱ.3.4 にアルカリ量 0.65% の比較的アルカリの少ないセメントを用いた富配合のモルタルの膨張量を示す。低いアルカリ量のセメントを用いた場合でも、アルカリ総量の増加とともに膨張量は増加の傾向にある。図中の黒塗りの記号はアルカリ量 1.2% でセメント量 600 kg/m^3 のモルタルの膨張量を示す。この配合のアルカリ総量はセメントのアルカリ量 0.65% の場合でセメント量 1100 kg/m^3 に相当するが、アルカリの Na と K の比率が異なり、S/C も異なるにもかかわらず、似たような傾向を示している。従って、一般のコンクリートの ASR 対策として低アルカリセメントを用いる場合でも、セメント量が著しく多い場合等にはアルカリ総量を検討しておかなければならないことになる。なお、図中

の半黒塗りの点は、流動性確保のため同一配合のモルタルに高性能減水剤を加えたものであるが、単位セメント量 1000 kg/m^3 の点では、減水剤を使用しないものより膨張量がかかなり大きくなっており、高性能減水剤添加の影響が出ている。

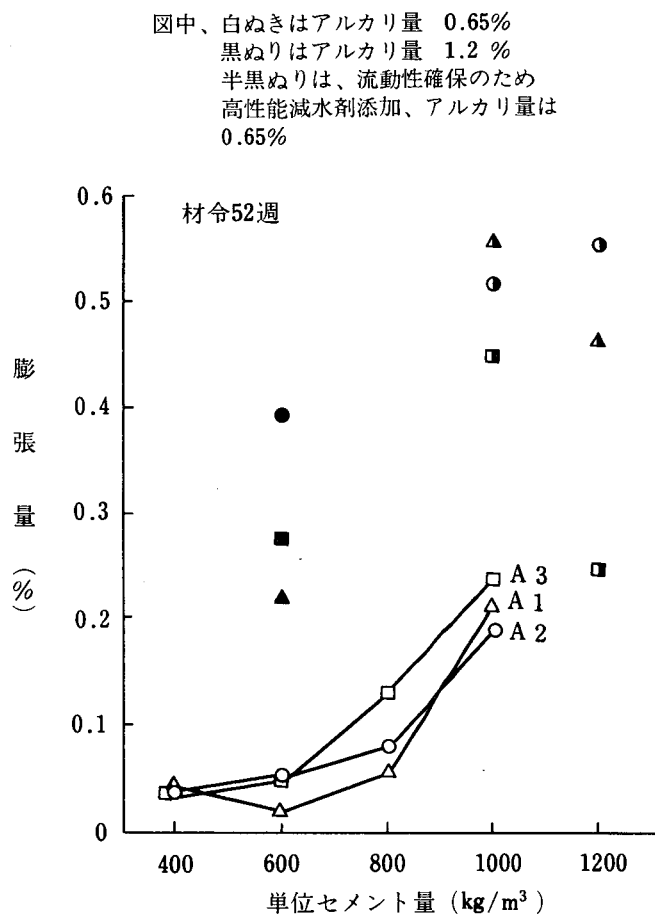


図-Ⅱ.3.4 富配合モルタルバーの膨張量

3.3.3 シリーズⅢ

既往の研究ではコンクリートの化学混和剤が ASR の膨張に影響を及ぼすとの報告がある。そこで 4 種類の代表的化学混和剤を混入した同一配合のモルタルバーの膨張量をみたのが図-Ⅱ.3.5 である。A 3 骨材では混和剤の種類の影響はほとんど受けていないようであるが、A 1、A 2 骨材では特に、高性能減水剤 Ad1 の影響を強く受けているようである。Ad1 は使用量がかかなり多いが、アルカリイオンの増加量を計算するとセメントのアルカリ量にして 0.03% 以下で、単純にアルカリの増加だけが影響しているのではなく、減水効果等によるモルタルの品質の変化等の影響も受けているのではないかと考えられる。

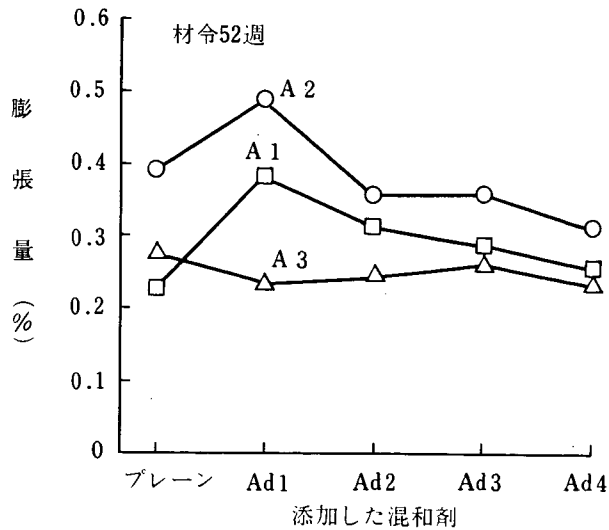


表-Ⅱ.3.2 添加した混和剤

	種 類	成 分	混入量 C×%
Ad 1	高性能減水剤	ナフタリンスルホン酸 ホルマリン高縮合物	1.2
Ad 2	A E 剤	界面活性剤	0.0075
Ad 3	A E 減水剤	リグニンスルホン酸塩 ポリオール複合体	0.069
Ad 4	A E 剤	天然樹脂酸塩	0.010

図-Ⅱ.3.5 ASRに及ぼす化学混和剤の影響

3.3.4 シリーズⅣ

モルタル中の空気は、ASR反応が起きた際に生じる珪酸ゲルの圧力を緩和し、膨張を減少させる作用があることも考えられる。図-Ⅱ.3.6の白ぬきの点は、シリーズⅢでいずれの骨材に対しても膨張量への影響のほとんどなかったAd4混和剤を用いて空気量を変化させたモルタルの膨張量をみたものである。A2、A3骨材では空気量の増加とともに膨張量は減少の傾向にある。しかしながら、膨張量の減少効果はそれほど大きくなく空気量の増加によってASRを防止するようなことは困難のようである。同図の黒塗りの点は空気をアルミニウム粉末の場合によって導入したものである。空気量（水素量）によって膨張量がほとんど変化しないのはAE剤を入れた混合と同じであるが、同じ空気量でもかなり膨張量は小さくなっている。原因は明確ではないが添加アルミニウムによるNaイオンの反応吸収等も生じているのかもしれない。

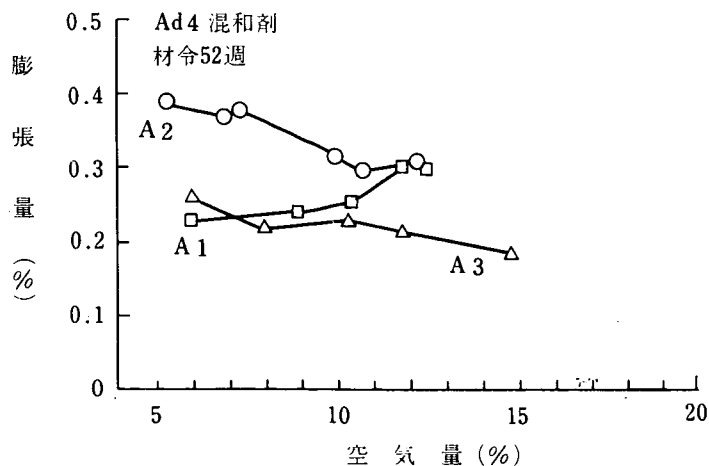


図-Ⅱ.3.6 ASRに及ぼす空気量の影響

3.3.5 シリーズ V

図-Ⅱ.3.7～Ⅱ.3.9にA1～3骨材と無害と考えられるA4骨材を混合して、ベシマムについて調べた結果を示す。A1骨材は明瞭なベシマムを有しており、アルカリ量が少ない場合にはA1骨材の混入率が少ないほうがモルタルバーの膨張量は大きく、アルカリ量の増加とともに膨張量のピークに対する骨材混入率は次第に大きくなり、アルカリ量が2.4%程度になって混入率100%のものが最大の膨張量を示すようになる。A1骨材を60%混入した骨材では、アルカリ量が0.8%から1.2%になる際の膨張量の増加は著しく、図-Ⅱ.3.1に示した増加率よりかなり大きなものとなる。A1骨材では100%使用でも、アルカリ量を1.2%としたモルタルバー法で、3カ月で0.05%以上膨張し有害と判断されるが、もし、同様のベシマムを有する骨材でアルカリ量1.2%であまり膨張しないものがあるとすれば、無害となった骨材でも他の骨材と混合使用すると膨張してしまうというような心配が生じる。A2骨材もA1骨材と同様に、アルカリ量0.8%で反応性骨材混入率60%にベシマム現象がみられ、これはアルカリ量を高めるに従って反応性骨材混入率の多い方に、次第にベシマム現象が推移している。A3骨材では明確なベシマムの傾向はみられず、反応性骨材が多いほど膨張量が大きくなっている。

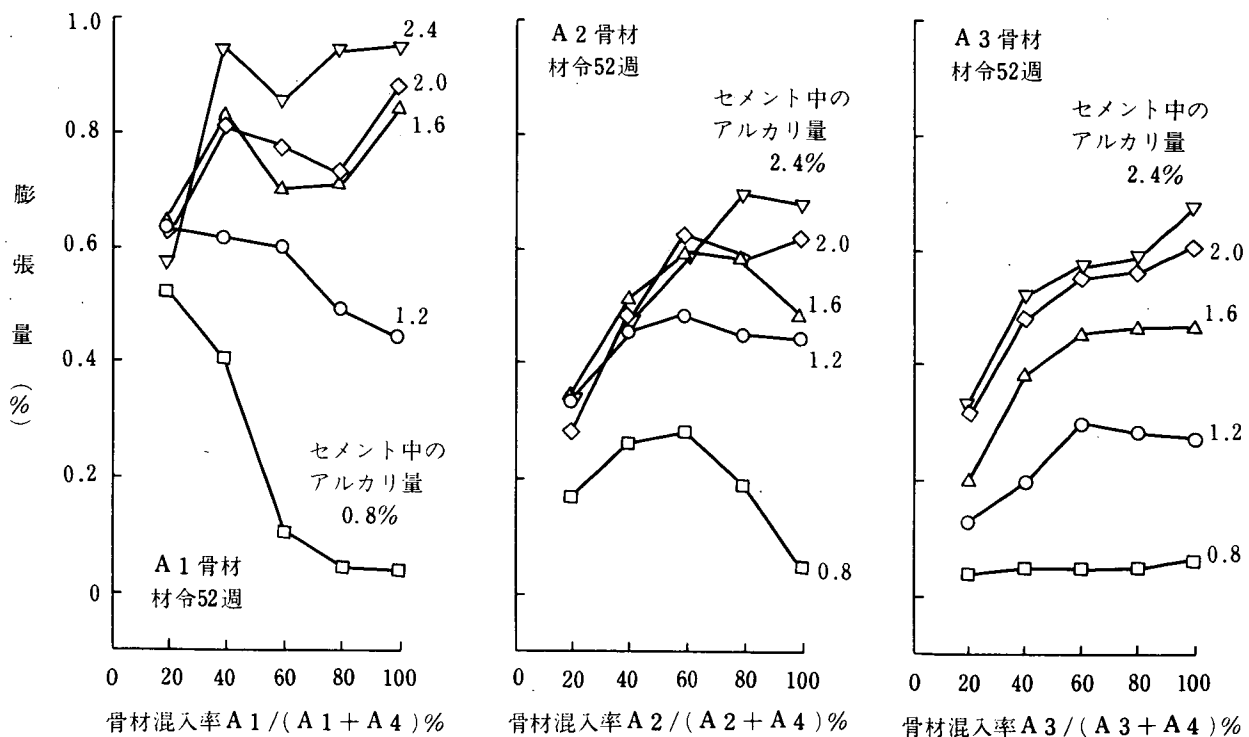


図-Ⅱ.3.7 A1骨材のベシマム特性 図-Ⅱ.3.8 A2骨材のベシマム特性 図-Ⅱ.3.9 A3骨材のベシマム特性

3.3.6 ペシマムの影響とペシマムの有無の判定について

今回の実験では用いた骨材の種類が少ないため、明確なことはいえないが、アルカリ量の増加に対する膨張量の増加率や空気量の膨張量への影響等にペシマムの影響が出ているものと推察される。前述したように、ペシマムを有する骨材でアルカリ量1.2%であまり膨張しないものがあるとすれば、仮にその骨材に無害の骨材を混合されると膨張することも生じることになり、骨材がペシマムを有するかどうか判定することは非常に重要なこととなる。現在のモルタルバー法試験ではペシマムを判定するには供試体の本数を増やし、各種の混合比で非反応性の骨材と混合した試験を行って最大の膨張量を示すもので判定しなければならなくなり、実用的でない。骨材の選択によってアルカリ骨材反応を防止しようとする場合、この問題をどのように対処したら良いのか十分に考える必要がある。

3.4 ま と め

今回の実験は、限られた条件で行われたものであるが、次のような知見が得られた。

- 1) 反応性骨材が膨張を始めるアルカリ量に関してはNaOH, KOHの差は明確でないが、膨張が生じるようになった時点ではNaOHを添加した場合のほうがKOHの場合より膨張量が大い。
- 2) アルカリ量の含有率の低いセメントを用いた場合でも、富配合になると膨張量は増加する。膨張量はモルタル中のアルカリ総量に支配されるようである。
- 3) 空気量の膨張量への影響はほとんどない。
- 4) ペシマムを有する骨材を用いた場合には、各種要因の膨張への影響が複雑に関係しあうので正確な影響要因の分析が困難である。

(参考文献)

- 1) 小林他, 「各種アルカリがアルカリ骨材反応に及ぼす影響」: コンクリート工学年次講演会, 7th, S60
- 2) 蒔田他, 「アルカリ骨材反応試験(モルタルバー法)における各種の問題点」: コンクリート工学年次講演会, 7th, S60

4. ASR骨材を用いたコンクリートバーの膨張特性

4.1 まえがき

アルカリシリカ反応（ASR）を生じる骨材は一般に、化学法あるいはモルタルバー法によって反応性が判定される。しかしながら、この判定で有害とみなされた骨材をコンクリートに用いた場合のコンクリートの特性は、必ずしも明確にはなっていない。ASR対策としてコンクリート中のアルカリ総量を規制する方法が考えられるが、この方法の実施に際してもコンクリートによるデータの裏付けが必要となる。このため、いくつかのASR反応性骨材を用いたコンクリート供試体による実験を行った。

4.2 実験概要

用いた骨材の種類を表Ⅱ.4.1に示す。細骨材はすべて碎石を製砂したものである。供試体は $10 \times 10 \times 40$ cmの角柱とし、粗骨材のみが反応性のもの、細骨材のみが反応性のものおよび細粗骨材両方が反応性のものを、セメント中のアルカリ量を変化させて製作した。A1およびS1骨材については、ペシマムについても調べた。配合はすべて各材料の体積比を一定とし、 $W/C=50\%$ 、単位水量 193 kg/m^3 、単位セメント量 386 kg/m^3 、単位粗骨材容積 302 l/m^3 、単位細骨材容積 368 l/m^3 とした。減水剤、AE剤等の混和剤は使用しないセメントのアルカリ量は 0.65% で、アルカリ量の調整はNaOHを添加することによって行った。供試体の養生条件は $38 \pm 2^\circ\text{C}$ の湿潤養生とした。用いた骨材については別途モルタルバーによる試験を行ったほか、細骨材が反応性の場合にはウェットスクリーニングしたモルタルについてモルタルバーを製作し、長さ変化を測定した。

表Ⅱ.4.1 用いた骨材

記号	粗骨材岩種	記号	細骨材岩種	
A 1	輝石安山岩 I	S 1	輝石安山岩 I	反応性
A 2	チャート	S 2	チャート	
A 3	輝石安山岩 II	S 3	サヌカイト質安山岩	
A 4	石灰岩	S 4	硬質砂岩	無反応性

4.3 実験結果および考察

まず、コンクリートバーでどの程度の膨張を生じると有害かについて、材令ごとの目視観察の結果と膨張量を比較した。膨張が 0.1% を越えるものは、ほぼ全供試体に肉眼でひびわれが観察された膨張が $0.05\% \sim 0.1\%$ のものでは、粗骨材が反応性のものでは大多数にひびわれが認められたが、細骨材が反

応性のものではひびわれが認められたものは半数以下であった。0.05%の膨張でも粗骨材が反応性のものではわずかではあったが、ひびわれの認められたものがあった。これは反応が局部的に生じているためではないかと推察される。

次に、セメント中のアルカリ量と膨張量の関係を図-Ⅱ.4.1に示す。配合はかなり富配合であったが、アルカリ量がセメントの0.8%（コンクリート単位体積あたりのアルカリ量 $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ で約 3 kg/m^3 ）では、膨張量はかなり小さくなっている。

図-Ⅱ.4.2はアルカリ量を等しくしたコンクリートバーの膨張量と、同じ反応性骨材を用いたモルタルバーの膨張量との関係を示す。全体的にはモルタルバーの膨張量のほうが大きい値となっている。最も明確なペシマムを示すS3骨材を用いたときには、モルタルバーでは比較的小さい膨張しか示しておらず、逆転している。しかし、一般的にいて、セメントのアルカリ量1.2%のモルタルバー試験を行えば、安全側に骨材の反応性の判定が行えるものと考えられる。

図-Ⅱ.4.3にコンクリートにおけるペシマムの例を示すが、この骨材では細骨材、粗骨材とも似たような傾向を示し、アルカリ量1.2%では、60～80%でペシマムとなる。

図-Ⅱ.4.4に反応性細骨材を用いたときの、ウェットスクリーニングしたモルタルの膨張量と、モルタルバーの膨張量との関係を示す。セメントのアルカリ量は同じとしたがS/Cが前者で約2、後者が2.25であるためか、前者の方が膨張量が大きくなっている。

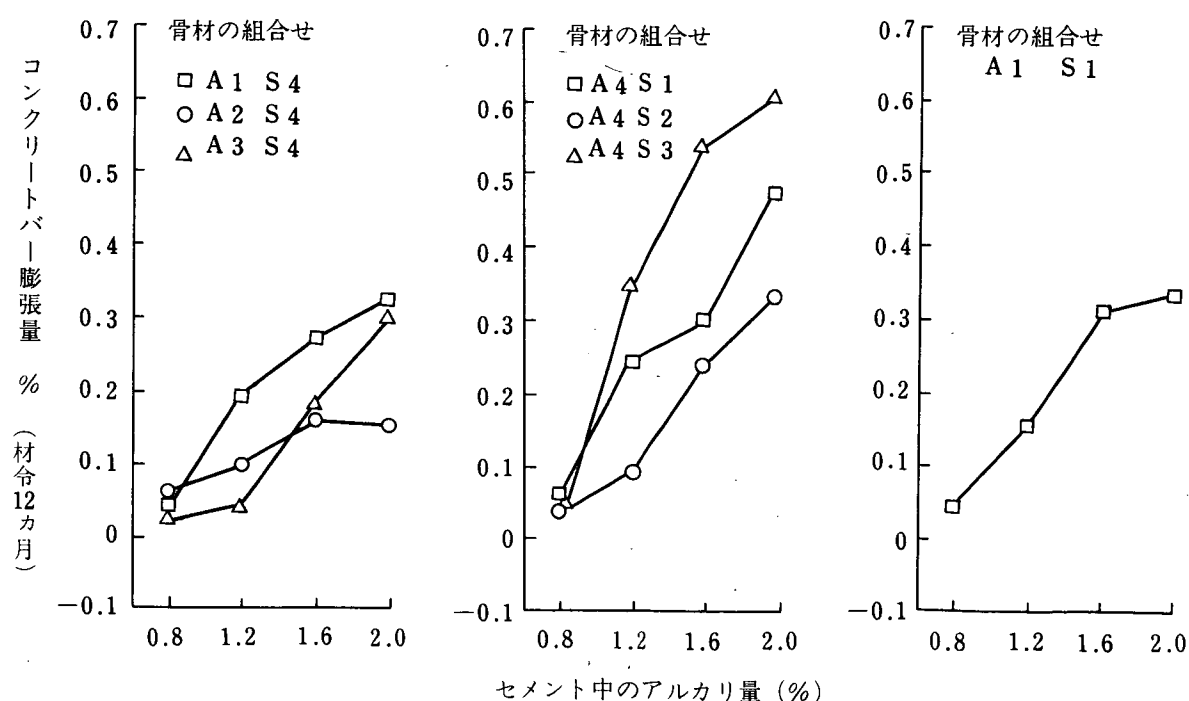


図-Ⅱ.4.1 セメント中のアルカリ量とコンクリートバーの膨張量

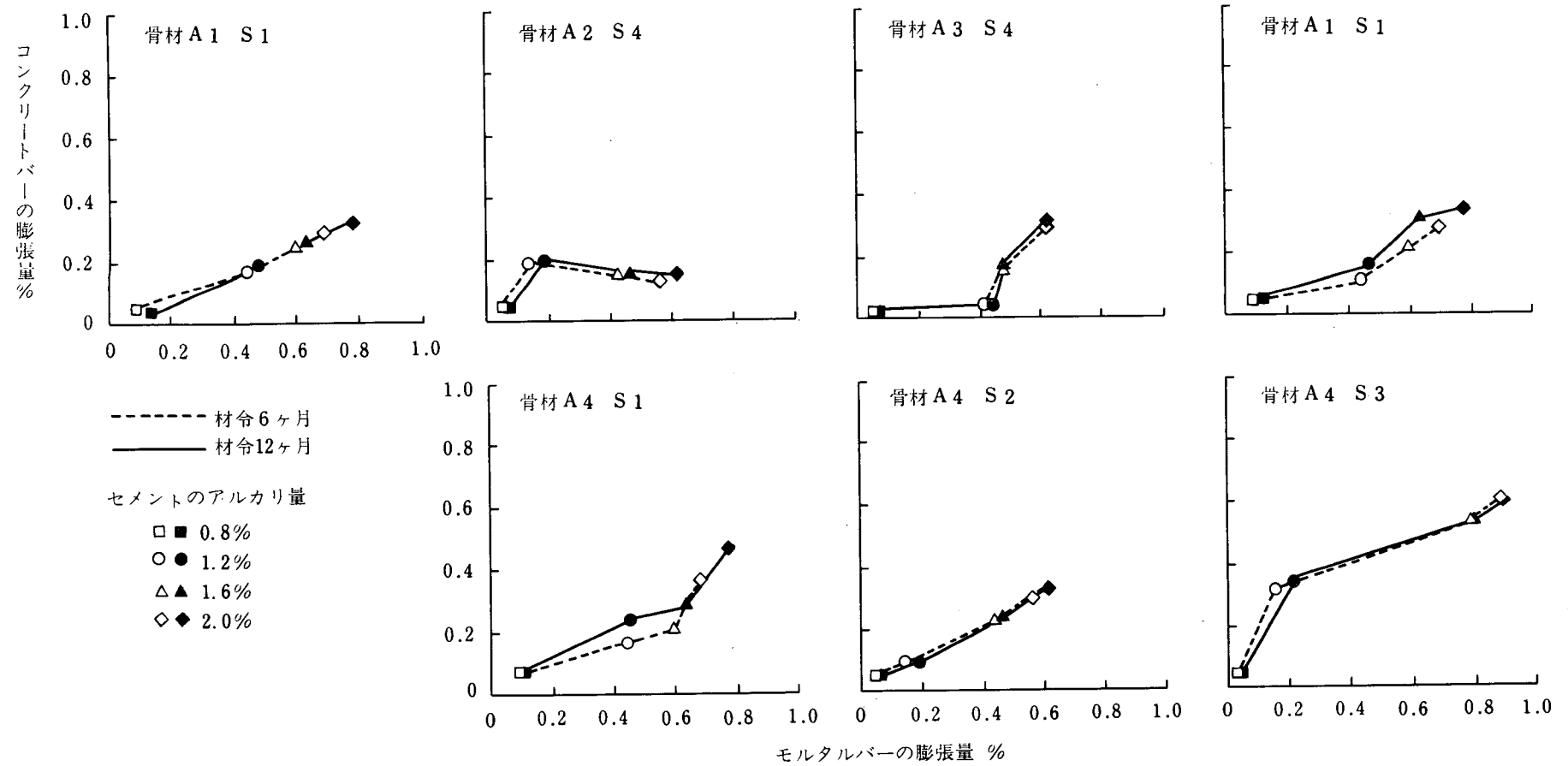


図-II.4.2 モルタルバーの膨張量とコンクリートバーの膨張量

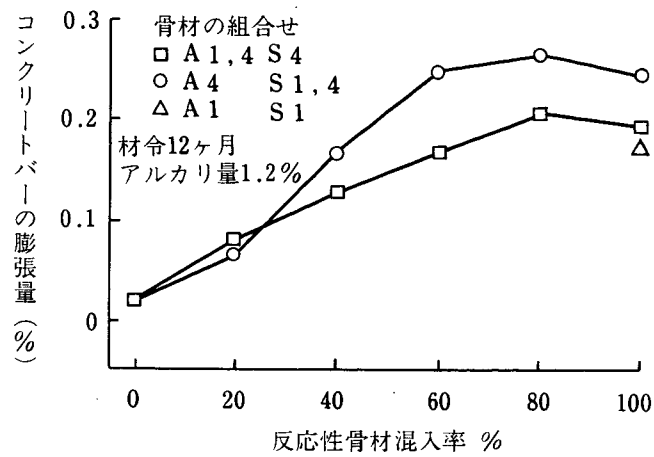


図-Ⅱ.4.3 コンクリートバーにおけるペシマム特性

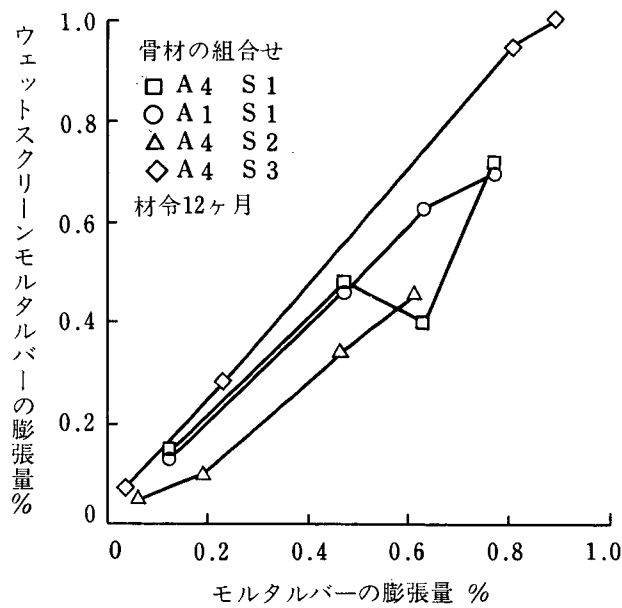


図-Ⅱ.4.4 反応性細骨材を用いたコンクリートから
ウェットスクリーンしたモルタルバーの膨張量

Ⅲ アルカリ量規制によるアルカリ骨材反応
抑制対策の合理性の検討

共同研究委員会

担当：土木研究所コンクリート研究室

1. まえがき

昭和61年度に発せられた建設省通達「アルカリ骨材反応の抑制対策暫定案」では「コンクリート中のアルカリ総量を Na_2O 当量で 3 kg/m^3 以下とする」とすれば反応性骨材を使用しても反応の抑制ができるとしている。本報のⅠ編ではセメント協会、Ⅱ編では土木研究所における実験の結果を述べたが、本編ではそれらの結果を総合して通達で述べられているところのアルカリ総量によるASRの抑制対策の合理性について考察を行うこととする。

2. モルタルバー実験の結果による検討

Ⅰ編・Ⅱ編で述べたセメント協会および土木研究所の双方で行われたモルタルバーの実験結果を再整理して、モルタル中のアルカリ総量と6カ月後のモルタルバーの膨張量の関係を一枚の図に示すと図-Ⅲ.1のようになる。図には90点のデータが示されているが、内訳は反応性のある安山岩3種、チャート2種および骨材としては通常使用されない黒曜石1種、真珠岩1種、水晶2種、ASRを生じないと考えられている石灰石1種および富士川砂、豊浦標準砂の計12種類の骨材である。アルカリ量は 1 kg/m^3 台から 14 kg/m^3 台まで変化させている。

この図によればⅡ編1章で示したクリティカルポイントの関係と同様に、明確にある単位アルカリ量を境にして膨張するモルタルバーがでてきている。この値は Na_2O 換算値でおよそ 4 kg/m^3 であり、この付近を境にしてモルタルバー0.1%以上の膨張をするものがでてきている。すなわち、モルタルバーでは単位アルカリ量が 4 kg/m^3 以下であれば、現在我が国でアルカリ骨材反応を生じているような骨材を用いても有害な膨張を示さないことを示している。

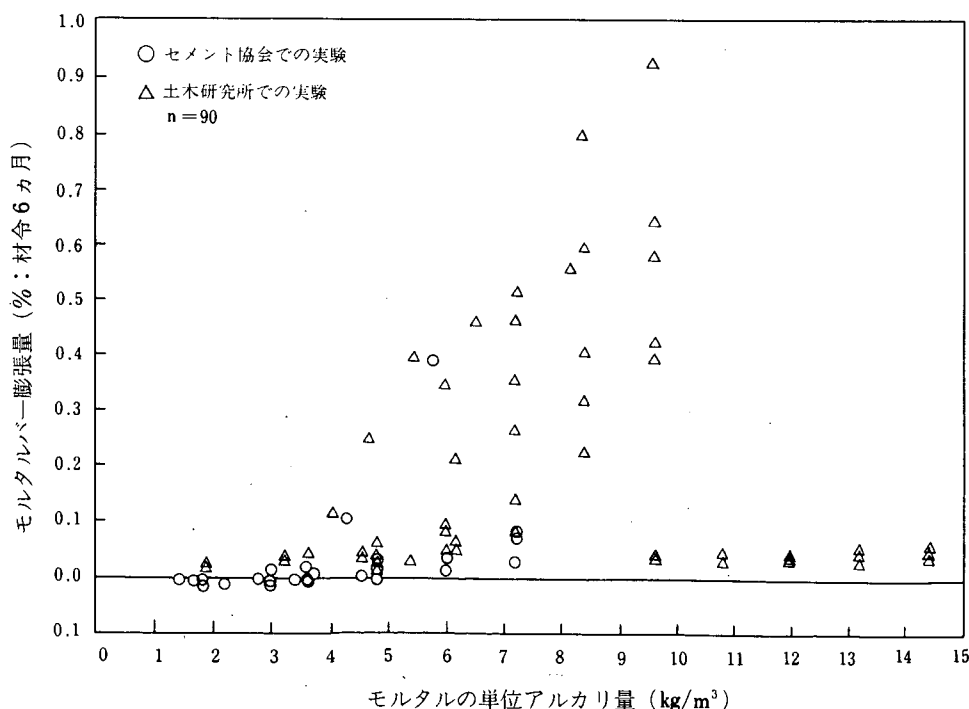


図-Ⅲ.1 モルタルの単位アルカリ量とモルタルバー膨張量の関係

3. コンクリートバーの実験結果による検討

セメント協会および土木研究所の双方で行われたコンクリートバーの実験結果を再整理してコンクリート中のアルカリ総量と材令12カ月のコンクリートバーの膨張量との関係を示すと図-Ⅲ.2 になる。試験値は210点あるが、内訳はセメント協会の実験では反応性粗骨材8種、非反応性粗骨材1種、土木研究所の実験では反応性粗骨材3種、非反応性粗骨材1種、反応性細骨材3種、非反応性細骨材1種を用いて、セメントのアルカリ量を変化させている。反応性骨材のコンクリートへの使われ方には、細骨材のみが反応性骨材の場合、粗骨材のみが反応性骨材の場合、細粗骨材が反応性骨材の場合、良質の骨材との混合使用の場合など種々な場合があるが、セメント協会の実験では反応性骨材は粗骨材にのみ用い、これを100%反応性骨材としたり、非反応性骨材と混合使用したりして実験を行っている。一方、土木研究所は、粗骨材のみ、細骨材のみあるいは細粗骨材の両骨材が反応性骨材の場合と、反応性骨材の含有率を変えた場合について実験を行っている。すなわち、図-Ⅲ.2 は反応性骨材の使われ方をすべて考慮して網羅したものであるといえる。また、材令を一般的にはモルタルバー法で6カ月としているのに対し、ここのコンクリートバーで12カ月目までとった理由はさらに確実性を高くするためであり、セメント協会および土木研究所の双方で行われたコンクリートバーの最も長い材令を示したものである。

この図からコンクリートの場合についてもモルタルバーと同様にある単位アルカリ量以上になると膨張を示すものがでてくるが、その単位アルカリ量は図では Na_2O 換算値で $3 \sim 4 \text{ kg/m}^3$ の間となっている。したがって、コンクリートの場合にはアルカリ総量規制値を 3 kg/m^3 以下としておくことで反応性骨材を用いてもアルカリ骨材反応を抑制することが可能であるといえる。

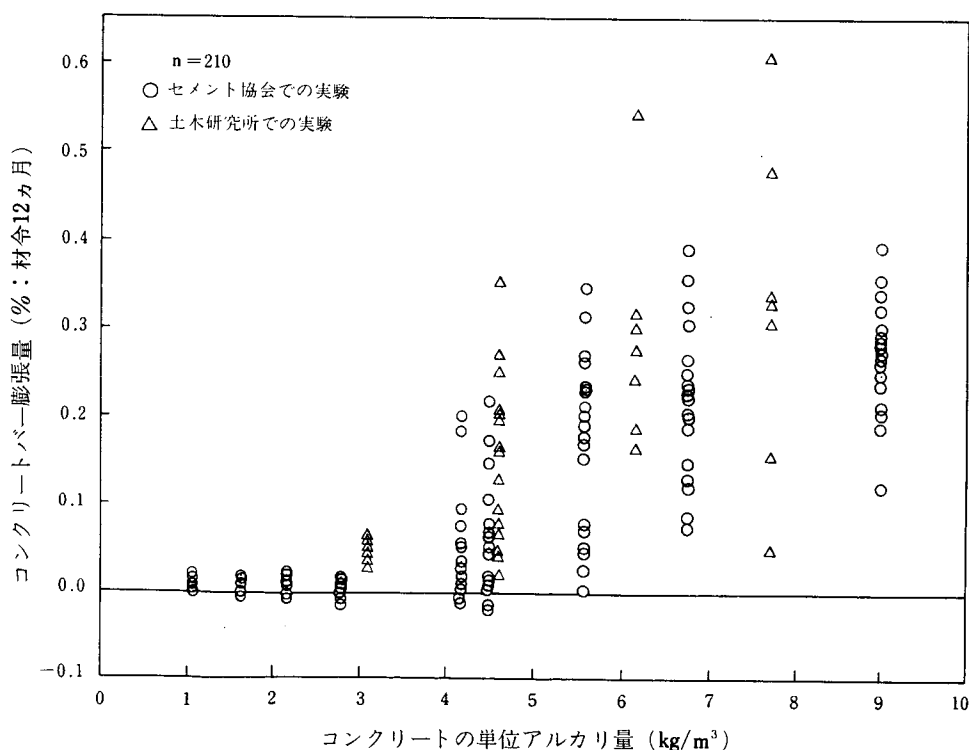


図-Ⅲ.2 コンクリートの単位アルカリ量とコンクリートバーの膨張量の関係

4. 低アルカリセメントによる抑制対策の合理性に関する考察

低アルカリセメントはアルカリ量が Na_2O 換算でセメント重量の0.6%以下のものをいう。低アルカリセメントを使用してもセメント使用量が多くなればアルカリ総量は増える。ちなみにセメント使用量が 500 kg/m^3 の場合には低アルカリセメントを用いてもコンクリート中のアルカリ量は $500 (\text{kg/m}^3) \times 0.6 (\%) = 3 \text{ kg/m}^3$ となる。したがってアルカリ総量による膨張の抑制の理論からすれば低アルカリセメントを用いても単位アルカリ量が著しく増えれば膨張が生じることとなる。このことはセメント協会が行ったモルタルバー実験（図-I.4 セメントのアルカリ量0.6%，セメントの使用量を倍にしてアルカリ量を 7 kg/m^3 とした時，6カ月で0.1%以上の膨張）が示している。ただし，我が国の市販の低アルカリセメントはアルカリ量が0.30%～0.55%程度であり，低アルカリセメントを用いてもアルカリ総量が 3 kg/m^3 以上となるのは，通常ではあり得ないような著しく富配合の場合に限られるので，一般には低アルカリセメントを使用すれば膨張を防げるものと考えて良いであろう。しかしながら，単位セメント量が 500 kg/m^3 以上を越えるような特殊なコンクリートの場合には，低アルカリセメントを使用して抑制を行う場合でもセメントのアルカリ量とセメント使用量を検討してアルカリ総量は 3 kg/m^3 であることを確認しておく必要がある。

5. 結 論

以上の検討結果で得られた結論は以下のようなものである。

- 1) 土木研究所，セメント協会が行った300ケースのモルタルバー，コンクリートバーの実験では，反応性骨材を用いると用いないとにかかわらず，アルカリ総量を 3 kg/m^3 以下とした場合には6カ月で，0.1%以上の膨張するものはなかった。
- 2) したがって，アルカリ総量（ Na_2O 換算値）を 3 kg/m^3 以下とするアルカリ骨材反応の抑制対策は妥当なものであると考えられる。
- 3) 低アルカリセメントを用いてもアルカリ総量が著しく増せば膨張することも確認された。したがって，単位セメント量が 500 kg/m^3 以上にもなるような特殊なコンクリートで低アルカリセメントを使用する場合には，アルカリ総量も 3 kg/m^3 以下であることを確認しておくのがよい。

セメントのアルカリ量制御による
アルカリ骨材反応抑制手法に関する
共同研究報告書

共同研究報告書第25号
平成元年3月(1989年)
建設省土木研究所
桑原啓三・小林茂敏
河野広隆・森濱和正
石井良美・片脇清
(社)セメント協会
加藤修・細谷俊夫
大阪セメント(株)
中野錦一
小野田セメント(株)
内川浩

セメントのアルカリ量制御によって、わが国で産出する反応性骨材に対するアルカリ骨材反応抑制対策を確立することを目的として、建設省土木研究所及び(社)セメント協会が共同研究を行った。本報告書は、この共同研究で得られた実験データ及び報告書を編集したものである。

キーワード：アルカリ骨材反応、アルカリ量、抑制対策、モルタルバー法、セメント、コンクリート

郵便はがき

切手
は
貼
る
こ
ろ
に
貼
る

3 0 5

茨城県つくば市大字旭一番地

建設省土木研究所

コンクリート研究室 御中

No. 020

No. 020

共同研究報告書第25号

配布先氏名

配布先住所



共同研究報告書第25号

部

セメントのアルカリ量制御によるアルカリ
骨材反応抑制手法に関する共同研究報告書
上記のとおり受領しました。

所 属（住所）

氏 名

印

共同研究報告書第25号

