

土 木 研 究 所 資 料

A S Rの試験方法(モルタルバー法) と抑制対策に関する実験的研究

昭和63年 2 月

建 設 省 土 木 研 究 所
地質化学部コンクリート研究室

Copyright © (1988) 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、複写は、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。

A S Rの試験方法(モルタルバー法) と抑制対策に関する実験的研究

コンクリート研究室	室	長	小林	茂敏
	主任研究員		河野	広隆
	研究員		森濱	和正
			石井	良美
	部外研究員		平間	昭信
	元研究員		小野	金造*)
	元部外研究員		佐々木	一郎*)
		〃	肥沼	年光**)
		〃	辻子	雅則**)

要 旨

我国でアルカリシリカ反応(A S R)が発見されたことを契機に、1985年に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」が設立され、A S Rの対策について本格的な研究が開始された。これにより建設省は、1986年A S R対策のための骨材の反応性試験および抑制対策を盛り込んだ暫定案を通達した。

本報告書はそれらの通達の基礎となる各種研究の結果をとりまとめたものである。A S Rに関する様々な要因の実験を行い、暫定案の試験法(モルタルバー法)と抑制対策の合理性について検討を行っている。また、骨材の反応性試験の簡易試験法の開発も行っている。

キーワード：アルカリシリカ反応・モルタルバー法・簡易試験法・抑制対策

*) 現 (株)東京ソイルリサーチ

**) 現 飛島建設(株)

まえがき

アルカリ骨材反応（ASR）は、骨材中のシリカとセメント中のアルカリの化学反応によりコンクリートが膨張し、コンクリート構造物にひびわれを生じ構造物の耐久性を著しく低下させるものである。

ASR の被害は全国各地で発見されており、早急な抑制対策が望まれている。

建設省では1986年6月2日にASRの暫定対策を通達し抑制対策にのりだした。その内容は、骨材の反応性試験と抑制対策からなっている。しかしこの暫定対策にはまだ多くの検討の余地がある。ここでは暫定対策を策定、見直しのため、反応のメカニズム解明のための種々の要因実験を行い、試験法、抑制対策の改善すべき点を明らかにしようとしたものである。

本報告はつぎの章より構成されている。

第1章では、本研究を行うにあたっての経緯を記す。

第2章では、これまで国内外で行われた研究内容とその問題点、本報告の課題である骨材の試験法、抑制対策の問題点を明らかにする。

第3章では、アルカリと骨材との反応に関するさまざまな要因実験について述べる。この章では主にコンクリートのときに受ける配合、環境などの影響についてふれ、試験法、抑制対策にかかわる要因については4章、5章にゆずる。

第4章では、標準試験法（モルタルバー法）の見直しと簡易試験法について述べる。モルタルバー法は試験結果のバラツキを小さくするため、大きいバラツキを生じると考えられる要因を選びだし、それについて検討する。簡易試験法は、オートクレーブ法およびダブルシリンドー法について述べる。

第5章では、アルカリ骨材反応の抑制について暫定対策で提案されている4つの方法について検討を行う。

なお、本報告を補完するものとして、4章のダブルシリンドー法は文献1)を、5章の抑制対策の高炉スラグの方法は文献2)を、また本報告全体のモルタルバーの詳細なデータは文献3)を参照されたい。5章の抑制に関する実験は、土木研究所と共同研究による成果である。高炉スラグによる抑制は鉄鋼スラグ協会、フライアッシュによる抑制ではフライツッシュ協会、電力中央研究所、土木研究センターと、アルカリ総量規制はセメント協会と共同研究を行ったものである。

目 次

まえがき	
第1章 研究の経緯	1
第2章 アルカリ骨材反応に関する既往の研究	2
2.1 アルカリ骨材反応の概要	2
2.1.1 アルカリシリカ反応	2
2.1.2 アルカリ炭酸塩反応	3
2.1.3 アルカリシリカ反応の影響要因	3
2.2 アルカリシリカ反応の抑制対策	7
2.2.1 アルカリシリカ反応の抑制に関する研究	7
2.2.2 諸外国での抑制対策	8
2.2.3 我国での抑制対策	9
2.3 ま と め	11
第3章 アルカリシリカ反応の影響要因に関する研究	12
3.1 研究概要	12
3.2 モルタルによる各種要因の検討	12
3.2.1 アルカリ量のクリティカルポイントについての検討	12
3.2.2 各種イオンの影響	16
3.2.3 ペシマムに関する検討	23
3.2.4 膨張に対する混和剤の影響	29
3.2.5 膨張に対する空気量の影響	35
3.2.6 拘束を受けたASR膨張の影響	36
3.2.7 ASRに対する乾燥の影響	40
3.2.8 ASRの外来塩分の影響	41
3.3 コンクリートによる各種要因の検討	45
3.3.1 コンクリートバーによるアルカリシリカ反応の検討	45
3.3.2 コンクリートバーのASRに対する乾燥の影響	48
3.3.3 コンクリートのアルカリシリカ反応促進劣化の検討	49
3.3.4 コンクリートのASRへの外来塩分の影響	51
3.4 ま と め	53
第4章 アルカリシリカ反応の試験方法に関する研究	54
4.1 アルカリシリカ反応の試験方法の位置付けと問題点	54
4.2 モルタルバー法の検討	55

4.2.1	適用範囲	55
4.2.2	試験用器具	56
4.2.3	温度と湿度	56
4.2.4	材 料	57
4.2.5	供試体（モルタルバー）の作り方	60
4.2.6	養生及び測定	62
4.2.7	測定材令	62
4.2.8	判 定	63
4.2.9	精 度	63
4.3	簡易試験方法の検討 — オートクレーブ法 —	69
4.3.1	試験条件設定のための予備試験	69
4.3.2	オートクレーブ法の確証実験	73
4.4	簡易試験方法の検討 — ダブルシリンダー法 —	82
4.4.1	ダブルシリンダー法の概要	82
4.4.2	試験条件設定のための予備試験	82
4.4.3	ダブルシリンダー法の確証実験	87
4.5	ま と め	90
第5章	アルカリシリカ反応の膨張抑制に関する研究	94
5.1	抑制対策の概要	94
5.2	混和材による抑制	94
5.2.1	高炉スラグ微粉末による抑制	94
5.2.2	フライアッシュによる抑制	106
5.2.3	コンクリートにおけるボゾランのASR抑制効果と抑制効果の長期安定性	115
5.3	アルカリ量制御による抑制	118
5.3.1	低アルカリ形セメントによる抑制	118
5.3.2	アルカリ総量による抑制	118
5.4	ま と め	123
結 論		124
参考文献		127
巻末資料		131
	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	133
	モルタルバー法修正案	144

第1章 研究の経緯

1982年、関西地方を中心にコンクリート構造物に異常なひびわれなどが発生するという早期劣化を生じた。その調査を行った結果、早期劣化の原因は、化学的に不安定な鉱物を含んだ岩石を用いた骨材とセメント中の高いアルカリが反応し、反応によって生成された反応生成物（アルカリシリカゲル）の吸水膨張によって、コンクリート内部に生じた膨張圧力によるひびわれであることが判明した。いわゆるアルカリ骨材反応である。

アルカリ骨材反応はアメリカで1940年ごろ、ヨーロッパで1950年ごろに発見され調査研究が進められた。日本においても1951年に初めてアルカリ骨材反応の被害例が報告された。しかし、その後に行われた各種骨材の反応性試験の結果からほとんどの骨材は無害であり、我国にはアルカリ骨材反応に有害なアルカリ反応性骨材はほとんどないと考えられていた。しかし、近年、上述のようなアルカリ骨材反応に関する被害例は全国で報告され、社会問題となった。そのため、既設構造物の被害実態調査、被害構造物の補修対策、新設構造物のアルカリ骨材反応の防止対策が緊急に求められた。

建設省には、問題に対処するため1985年より総合開発プロジェクト「コンクリートの耐久性向上技術の開発」が設立され、アルカリ骨材反応の本格的な研究が開始された。1986年6月2日には「アルカリ骨材反応暫定対策について」の通達を出し、アルカリ骨材反応の抑制対策の実施を始めた。通達の内容は、

1. 抑制対策

- ① 安全と認められる骨材の使用
- ② 低アルカリ形セメントの使用
- ③ 抑制効果のある混合セメント等の使用
- ④ コンクリート中のアルカリ総量の抑制

2. 骨材のアルカリ・シリカ反応性の確認方法

- ① 骨材のアルカリ・シリカ反応性試験（化学法）建設省暫定案
- ② 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

からなっている。しかし、これらの暫定対策は、問題が発生して短期間のうちに立てられたものであり、アルカリ骨材反応のメカニズムの解明、対策の合理性等に対する検討など多くの課題がこのプロジェクトに課せられている。

本研究報告は、それらの課題のうち抑制対策およびモルタルバー法の検討を行ったものである。

第2章 アルカリ骨材反応に関する既往の研究

アルカリ骨材反応 (AAR; Alkali Aggregate Reaction) とは、骨材中に含まれる反応性鉱物と主にセメント中に含まれるアルカリが反応し、反応によって生成された反応生成物の膨張圧によって、硬化したコンクリートが膨張ひびわれをおこす現象である。AARによるコンクリートの膨張ひびわれは不規則多数で、その程度が著しい場合にはコンクリート構造物の耐力や耐久性に影響をおよぼすこともある。

アルカリ骨材反応は大別して、アルカリシリカ反応 (ASR; Alkali Silica Reaction) とアルカリ炭酸塩反応 (ACR; Alkali Carbonate Reaction) に2分されるが、現在ではこの他、アルカリシリケート反応 (Alkali Silicate Reaction) も加えられている。我が国で発見されているアルカリ骨材反応のほとんどはアルカリシリカ反応である。アルカリ骨材反応が、T.E.Stanton²¹⁾によって発見されて、50年が経過し、この間に多くの研究者、技術者によって反応機構の解明や抑制対策等、様々な研究が試みられてきた。しかし、50年を経過しようとする現在においても、疑問点や問題点が多く残されているといえる。

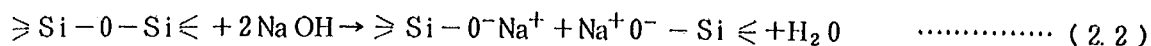
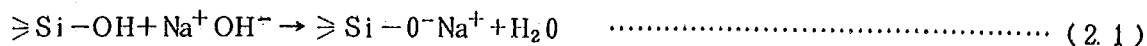
ここでは、主として ASR に関する既往の研究を概観しながら、今後研究を行う上での疑問点、問題点を考えてみる。

2.1 アルカリ骨材反応の概要

2.1.1 アルカリシリカ反応

アルカリシリカ反応が最初に発見されたのは1930年代のアメリカ合衆国であり、その成因は骨材中の結晶度の低いシリカ、セメント中のアルカリ (Na^+ , K^+) 及び水とされている。骨材中の結晶度の低いシリカの代表的なものとして、オパール、玉髄、 α -クリストバライト、トリジマイト及び結晶度の低い火山ガラス等である。セメント中で含まれているアルカリは Na_2O , K_2O 等のアルカリ金属で、セメント中に0.3~1.2%は必ず含まれている。

反応は、まず、シラノール基の中和反応にはじまり、シリカ結晶表面が H^+ で中和される。次いで、水酸化アルカリ濃度が高いときはシロキサン結合が切断され、アルカリ珪酸塩ゲルを生成するというもので、式(2.1)および式(2.2)のようなものとされている。

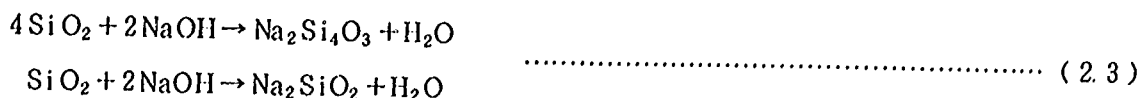


この反応は、反応性骨材や反応性鉱物、温度等反応条件 (アルカリ、温度、湿度等) によって進行は変化する。

以上、述べた反応機構の説明は、Powers と Steinour²²⁾ によるもので、これに関する研究では先駆的な役割をはたした。

Hansen²³⁾ は、1944年にアルカリ骨材反応の膨張機構を浸透圧理論を用いて説明した。それは、アルカリ珪酸塩は再重合しやすく、セメント硬化体の細孔中を移動することが困難に比べ、水酸化アルカ

りは移動が容易であることから、セメント硬化体が一種の半透膜となって、反応生成物が反応性骨材の周囲に膨張圧を及ぼすと説明されており、生成されるゲルは次の化学式によると考えられる。



また、このHansenの浸透圧理論を受けて、支持する報告²⁴⁾も見受けられる。

もう一つの考え方として、Vivian²⁵⁾が提唱した説もある。これはHansenの提唱するセメント硬化体の半透膜は不必要であり、アルカリシリカのゲルが半透膜の役割をはたし、吸水膨張するというものである。

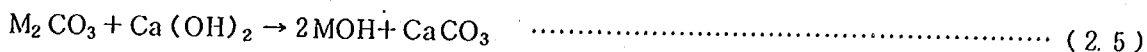
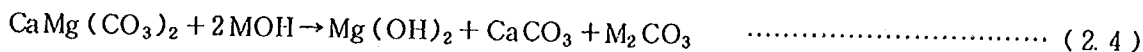
2.1.2 アルカリ炭酸塩反応

特殊な石灰岩とセメント中のアルカリが反応して膨張するものであり、反応性鉱物としてはドロマイトといわれている。但し、ドロマイトを含む石灰岩は我が国でも多量に使用されているが今までに被害を生じたとの報告はごくわずかで、世界でもアルカリシリカ反応に比べその発生は少ない。

アルカリ炭酸塩は、1957年カナダのE.G.Swenson²⁶⁾によって発見されたもので、従来試験では発見ができないものである。但し、現在では、この反応の試験方法としてASTM C 586 ロックシリンダー法がある。

セメント中で関係のあるアルカリはアルカリシリカ反応と同様にNa₂O、K₂Oであり、反応によって生成される水酸化マグネシウム（ブルーサイト）の容積増大によるものとされている。

Hodley²⁷⁾によれば、ドロマイトの分解反応は次式によるものとされている。



アルカリ骨材反応は、コンクリートが硬化してしばらく時間を経てからひびわれ等の外見的な現象となって現れることが多い。反応は相当長年月に渡って続くものと考えられるが、反応物が消費されつくしてある時間を経過すると収束するとも考えられる。

2.1.3 アルカリシリカ反応の影響要因

アルカリシリカ反応の影響要因は多く、それらが複雑に影響しあうが、反応は必ずしも膨張につながるとは限らない。ASRのもっとも重大なことは、コンクリート構造物に対して害をおよぼす膨張であり、反応は起こしても、膨張さえおさえれば実用上困ることはない。そのためか、ASRに関する研究は、膨張機構に関するものが多く、この研究の主流をなすものである。また、単に反応の影響要因ということだけでなく、既往の研究の多くはASR膨張の影響要因として報告されている。従って、以下に述べる事柄について膨張に影響する要因をとりあげて述べることにする。

(1) アルカリ量

アルカリシリカ反応に直接関係するアルカリは、通常Na₂O等価百分率として表わされるアルカリ量

よりもむしろ、間隙溶液中のアルカリ濃度であると考えられている。しかし、この間隙溶液中のアルカリ濃度を求めるのは容易なことではないため、一般には Na_2O 等価百分率 (Na_2Oeq) がセメントのアルカリ量と反応による膨張との間の相関性を議論するための指標とされていることが多い。

アルカリシリカ反応はアルカリとシリカとの反応のため、アルカリが減少すれば、その反応性とそれに伴う膨張もまた減少する。このような観点は抑制対策にも用いられ、アメリカでは低アルカリ形セメント (Na_2O 等価百分率が 0.6% 以下のセメント) の使用が ASR 対策として用いられている。図-2.1^{2,8)} にセメントのアルカリ量とモルタルバーの膨張量の関係を示す。この図-2.1 のように材令 20 週を経過したモルタルバーの膨張量はアルカリ量に応じて増加しており、ASR の膨張がアルカリ量と密接な関係を有していることがわかる。また、低アルカリセメントの領域 ($\text{Na}_2\text{Oeq} = 0.6\%$ 以下) ではモルタルバーの膨張は小さい。

このように Na_2O 等価百分率の他に単位アルカリ量 (kg/m^3) とも ASR は密接な関係を有し、 Na_2Oeq の場合と同様に単位アルカリ量に応じて膨張量は増加する。英国では、この事より、コンクリート 1m^3 中の単位アルカリ量 $3\text{ kg}/\text{m}^3$ 以下として ASR 抑制対策としている^{2,9)}。

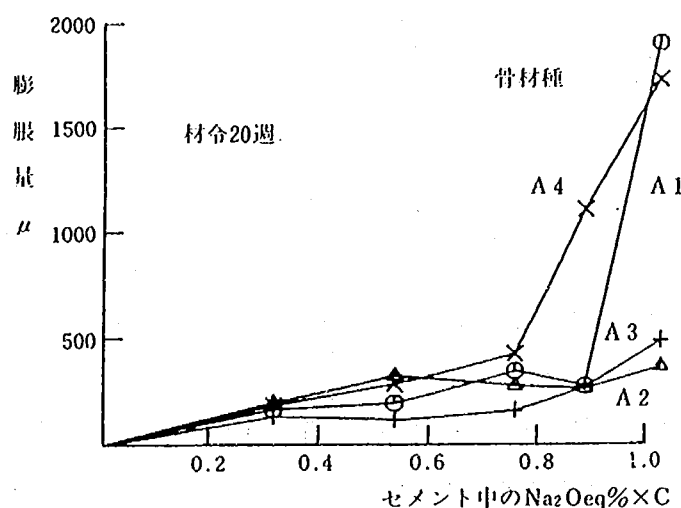


図-2.1 アルカリ量^{2,8)}

(2) W/C, 単位水量および環境条件

アルカリシリカ反応は、反応機構でも述べたとおり、反応には水の存在が必須条件となる。この水はコンクリートの外部から供給されるものとコンクリート内部に存在する水である。これらの水を制御することによってアルカリシリカ反応による膨張量を減少 (抑制) させようという研究が特に近年、我国によって多く行われている^{2,10)}。これらの研究は主にコンクリート表面を塗装処理することによって、外部から供給される水分を断ち、また、内部の水分を制御するというもので新設構造物のアルカリシリカ反応抑制対策より、むしろ既設構造物を対象としたものであると思われる。

また、これに関連するものとして湿度をあげることができる。湿度はアルカリシリカ反応に対して重

要な影響因子である。それは、アルカリシリカ反応によって生成される生成物の性質を大きく左右するものであるからである。

湿度についての報告について図-2.2^{2.11)}に示すように、90% RH以上で膨張を示し、90% RH以下の膨張量は小さい。また、90% RH以上では100% RHが最大の膨張量を示している。この図から判断するとアルカリシリカ反応による膨張を生じうる湿度は90% RH以上と見ることができる。

W/Cの影響については、後述するペシマムが存在するとの報告^{2.12)}や水セメント比が小さくなると膨張は小さくなるとの報告^{2.13)}がある。水セメント比を変化させる試験は同時に砂セメント比と単位セメント量も変化することから、水セメント比が小さくなると膨張量が小さくなるとの報告も結果的にはアルカリ量に依存しているものと思われるが、ペシマムがどの程度の水セメント比で存在するかによって変ることや試験に使用した反応性骨材によっても変ると思われるため、一義的に結果を見ることはできないものと思われる。

アルカリシリカ反応はシリカとアルカリとの間でおこる化学反応であるために、反応温度に依存するはずである。しかし、温度と膨張との関係はそうにはなっておらず、これについて見てみると図-2.3^{2.14)}に示すようにASTMモルタルバー法で設定している38℃付近で最大の膨張量を示し、それよりも高い60℃や低い20℃では膨張量は小さくなっている。しかし、温度についてはアルカリシリカ反応で生成される生成物の違いによって、その関係は変化するものと思われ、さらに多くの資料の蓄積が必要である。

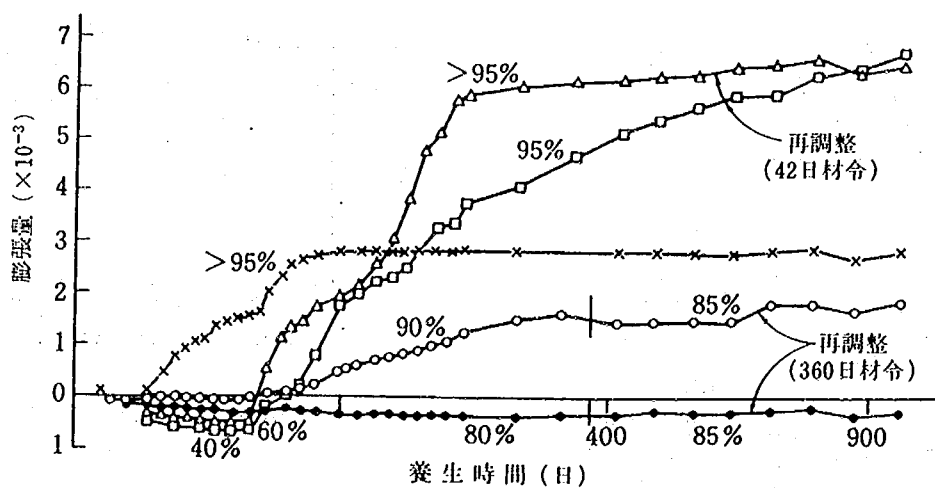


図-2.2 湿度、温度のちがいによる反応速度^{2.11)}

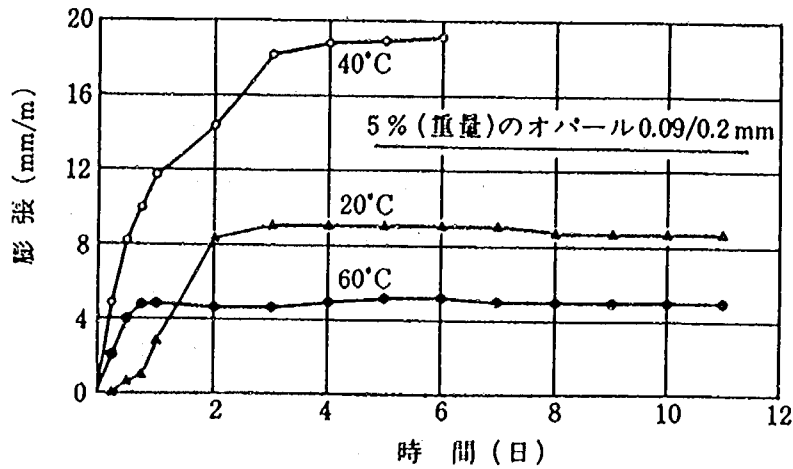
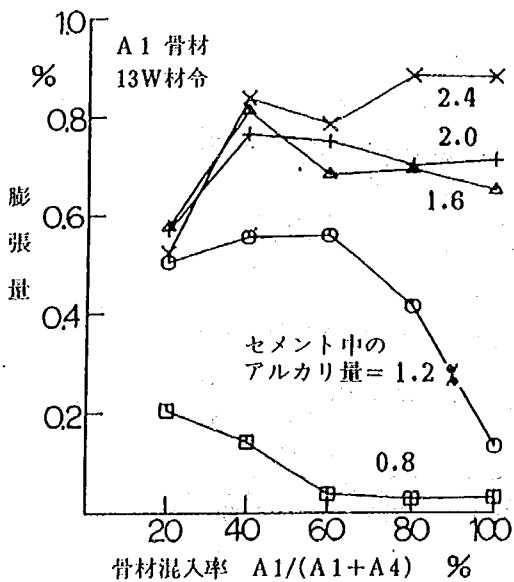


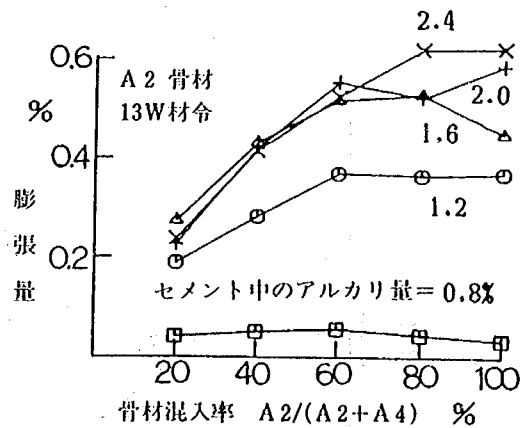
図- 2.3 温度の影響

(3) ペシマム量

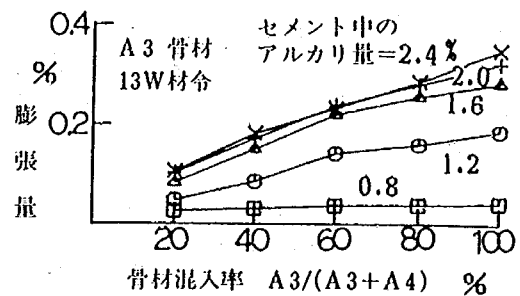
アルカリシリカ反応を代表する性質としてペシマム (Pessimum) があげられる。それは、最悪条件として表現され、反応性骨材と非反応性骨材との混合割合、水セメント比、骨材の粒度等であられることが知られている。その一例として、反応性骨材と非反応性骨材との混合割合の場合を図- 2.4^{2.15)}



(1) A1 骨材のペシマム特性



(2) A2 骨材のペシマム特性



(3) A3 骨材のペシマム特性

図- 2.4 ペシマム^{2.15)}

に示す。つまり、ベシマムとはある混合量でモルタルバーの膨張量は最大を示すが、その前後では膨張量は小さくなる現象を呼ぶ。ベシマムを説明する理論としてはすでに述べた Powers²²⁾ の説がよく説明するといわれている。

2.2 アルカリシリカ反応の抑制対策

2.2.1 アルカリシリカ反応の抑制に関する研究

1940年、米国のT.E.Stantonによって発見されたアルカリシリカ反応(以下、ASRと略す)は、その後各国で発見され、そのため各国で様々な抑制対策がとられている。アルカリシリカ反応は、その反応の必要3条件である「反応性骨材」「アルカリ」「水」が満足しておこる結果であり、さらに環境条件(例えば温度)が加味されて反応を促進する。従って、ASRの抑制対策としては、それら3条件の中のひとつを除く事が基本となる。その他、ポゾランの添加も反応抑制として知られている。アルカリシリカ反応の抑制は後述するように国によってとられている対策は異なる。

ASRを抑制する研究の主なものはポゾランによるものである。一般にASR抑制を説明する説としてはつぎのようなものがある。

① $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の低減

Chatterji²¹⁶⁾ はアルカリシリカ反応が進行するためには、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が存在する必要があると、ポゾランを添加することによって $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が消費されるため膨張が軽減されると説明した。

② アルカリイオン濃度の低減

ポゾランは一般に比表面積が非常に大きいので、アルカリイオンが吸着され、間隙溶液中のアルカリイオン濃度が低下し、カルシウム含有量の高い非膨張性のゲルが生成される²²⁾。

③ OH^- イオン濃度の低減

焼成したシリカ質ポゾランでは、その酸性表面との反応によって間隙液中の OH^- イオン濃度が減少するため反応がおこりにくい。

④ 物理的効果

ポゾランを加えると水を多く必要とするので、ポロシチーが変化し、局部的に膨張を緩和する。

⑤ 各種イオン及び水の移動

Smolezyk²¹⁷⁾ はポゾランの添加によって生じる水和物とアルカリ間に強い結合力が存在し、セメントペーストマトリックスの透水性が低下したり、 Na^+ や K^+ イオンの拡散をおさえると説明した。この研究をうけて Bakker²¹⁸⁾ はセメント硬化体構造の密化が水やイオンの透過性を小さくすることが主な支配的な要因であると説明付けた。

ポゾランの評価については現在、モルタルバーの膨張量といった指標でしか判断されておらず、ポゾランの化学的作用や物理的作用は必ずしも、すでにだされている抑制対策には反映されていない。本来であればこれら化学的作用や物理的作用の関係をポゾランの品質やその置換率も含めて検討し抑制対策を講ずるべきであろう。

2.2.2 諸外国での抑制対策

(1) 使用材料の選別

ASRは前述のとおり「反応性骨材・アルカリ・水」が満足しておこるものであるため、この内のひとつを除外する事が抑制対策として考えられる。そして、これらは、普通は材料として骨材、セメント、練混水として存在するため、抑制方法としては必然的に反応性骨材の排除、セメントのアルカリ量の低減、練混水の減少となる。

① 反応性骨材の排除

ASR抑制対策として反応性骨材を排除する事は、極めて有効な方法である。この反応性骨材の判定については「ASTM化学法、モルタルバー法」の両試験がよく知られている。諸外国でも、これをベースに試験方法が規格化・提案されている。判定基準については、モルタルバー法の場合、材令6ヶ月での膨張量が0.1%以上のときアルカリシリカ反応性骨材であるとし、化学法では溶解シリカ量(Sc)とアルカリ濃度減少量(Rc)の関係から、無害、潜在的有害、有害の三つに判定される。但し、両試験法ともいくつかの問題点が指摘されており、例えば、モルタルバー法では材令6ヶ月では短い、判定に要する期間が長すぎる等がいわれている。いずれにしても、モルタルを用いる試験や化学的手法を用いる試験にしても、一長一短あり、ASRを判定する決定的な試験法ではない。そのため、様々な方法も提案はされているもののASTMモルタルバー法が提案されて以来、この試験方法にとってかわる試験法はいまだ提案されていない。

② セメントのアルカリ量の減少

ASRは、セメントのアルカリを減少させることによって、その反応が抑制される事が知られており、等価 Na_2O 量が0.6%以下であれば一般に反応が抑制される事から抑制対策として「低アルカリ形セメント」と呼ばれるセメントの等価 Na_2O 量0.6%以下を保証したセメントが使用されている。但し、低アルカリ形セメントを使用しても、セメント以外からアルカリが混入(海塩粒子、細骨材、混和剤等)する場合は考えられるので注意して行わなければならない。

③ 混合セメント等の使用

ASRを抑制する方法としては、反応に必要な条件を直接的に排除する方法以外に、フライアッシュ、高炉スラグ粉末等を混入する方法があり、諸外国の多くがこの方法を採用している。しかしながら、その混入量も含め、ASRに対して逆に膨張を増大させるものもあり、その選定については注意を要する。

(2) 配合による抑制

アルカリ反応性骨材は、それに使用されるセメント量についても関係があり、一般にセメント量が多いと膨張は増大する。この事はセメントに含まれる等価 Na_2O 量(%)とも関連し、両者の関係からコンクリート 1m^3 中のアルカリ量(kg/m^3)をASRをおこさない水準まで抑える方法によってもASRを抑制する事ができる。

表-2.1に、諸外国で行われているASR抑制対策を示す。すべて、前述のような基本的な抑制対策を講じているものの、反応性骨材の違いや地域性からアルカリ総量にも若干数値に違いが生じている。

表- 2. 1 諸外国でのASR抑制対策

国 名	試 験 法	抑 制 対 策	
ア メ リ カ	ASTM C 227 ASTM C 289	低アルカリセメント スラグ50%以上	(2.3kg/m ³)
イ ギ リ ス	(Concrete prizm)	アルカリ総量 3 kg/m ³ 以下 フライアッシュ25%以上 スラグ50%以上	(3kg/m ³)
デ ン マ ー ク	ASTM C 289の修正		
ア イ ス ラ ン ド	ASTM C 289の修正		
カ ナ ダ	CAN3. A23.1-M77 (ASTM C 227の修正)		
南 ア フ リ カ	CSA A23.1-M77 (ASTM C 289の修正)	アルカリ総量(1.8kg/m ³ 以下無害 3.8kg/m ³ 以上有害)	(2.1kg/m ³)
オーストラリア	AS 1141 (ASTM C 289)		(2kg/m ³)
ド イ ツ	DIN 4226	スラグ50%以上 3 kg/m ³ 以下	
ニュージーランド	CSA A23.1-M77 と同様な法		(5kg/m ³)

2.2.3 我国での抑制対策

(1) 我国でのASRの現状

我国では、古くは1951年に近藤ら²¹⁹⁾が最上川産骨材を使用した橋の床版に亀甲状のひびわれが生じたとしてASRの報告があり、1965年には村田ら²²⁰⁾の報告がある。しかしながら、我国ではASRをおこす骨材はないものとされてきたため、ASR抑制対策も無縁のものとして、その提案や規格は長くされていなかった。その後、1982年の阪神地区の事例を契機に日本各地でASRが発見されるようになり、建設省土木研究所の調査²²¹⁾によれば、コンクリート構造物92構造物中21構造物についてASR調査を実施し、その内の20構造物が「ASR」あるいは「ASRの疑いがある」と判定されている。

(2) 建設省暫定対策

建設省では、ASRに対する暫定的な処置として昭和61年6月2日付で「「アルカリ骨材反応暫定対策について」の運用について」の通達を出した。その通達の適用範囲はASRが一般にコンクリート打設後から数年若しくは十数年(まれに数十年)経過後に発生する事から、短い期間に限って用いられる仮設構造物には基本的にこの対策をとらなくともよいとしている。暫定対策は、同年10月1日から試行、

翌年4月1日から実施とした。

抑制対策では4つの方法があげられており、①建設省暫定案としてだした、化学法、モルタルバー法によって安全と認められる骨材の使用、②昭和61年2月JIS規格改訂により供給されるようになった低アルカリ形セメントの使用、③抑制効果のある混合セメントの使用、④アルカリ総量 3 kg/m^3 の規制である（表-2.2）。

これら四つの対策の選定については、材料の入手や施工条件、構造物の種類、配合などその長短があるため、特に、どの対策を優先させるという事はないが、ダム等大規模な工事では現場でコンクリートを製造することが多く、事前に十分な調査を行うことができるので、まず対策として確実と思われる骨材の選定をするといよい。但し、それもままならない場合には、様々な条件（セメントの選定、配合等）を考慮して他の対策をとるとよいと思われる。なお、61年10月に改訂されたJIS A 5308「レデミクストコンクリート」にもASR対策として上記四つの対策を講じることが記述されている。

表-2.2 我国でのASR対策（建設省暫定対策）

方 法	備 考
安全と認められる骨材の使用	化学法、モルタルバー法→建設省暫定案により判定
低アルカリ形セメントの使用	JIS R 5210の適合セメント
抑制効果のある混合セメント等の使用	高炉セメントB種またはC種を使用 混和材を混合したセメントでASR抑制効果の確認されたものを使用
コンクリート中のアルカリ総量の抑制	コンクリート 1 m^3 に含まれるアルカリ総量を Na_2Oeq で 3 kg/m^3 以下

2.3 ま と め

いままで述べてきた ASR の研究事例は世界各国で行われている ASR 研究の一端にしかすぎない。最後に、今後我が国で ASR 研究を行う上での問題点をまとめると次のようになる。

- (1) 反応のメカニズムにおいては不明な点が多く、今後さらに多くの資料の蓄積が必要である。ASR は骨材によって大きくその性質が変化する（特に膨張機構等）ことから多くの骨材を調査し、有害鉱物の限定を急ぐ必要がある。
- (2) ASR の試験法は我が国の現状に合った試験方法の確立が望まれる。特に現場の実情も考えて ASR を正しく評価する試験法でなくてはならない。そのためには現場で測定できるコンクリートを対象とした ASR 品質管理試験方法が必要であろう。また、モルタルバー法では試験方法の規準化またはそれに代わる早期判定試験方法の確立が望まれる。モルタルバー法に限らず、ASR を評価する試験方法は ASR の特性（例えば、ペシマム現象）を正しく評価できる試験方法が望ましい。
- (3) 新設する構造物を対象とした抑制対策に関しては、我が国で生産されるポゾランの ASR 抑制効果の確認は抑制対策を講じる上で大切なことである。さらに、ポゾランによる抑制はその化学的作用及び物理的作用を考慮したものであることがよい。
- (4) 既設構造物に関しては ASR の被害を最小限に抑える抑制手法、ASR が構造物に及ぼす影響の調査および補修・補強手法の研究が必要である。

第3章 アルカリシリカ反応の影響要因に関する研究

3.1 研究概要

コンクリートに使用される骨材は、年間8億トンにも及ぶが、その内容はこれまでの河川産のものから、陸砂利、砕石、砕砂等へ依存量が増加している。それに伴って、一部で骨材に起因するコンクリート構造物の早期劣化が問題となってきたが、このなかにはアルカリ骨材反応（A S R）を代表とするような、化学的に有害な鉱物を含んだ岩石を骨材として用いたため、あるいは骨材の長期安定性の不十分さによると考えられるものがある。現在、我が国にはコンクリート用骨材としての物理的特性を規定する規格はあるが、アルカリシリカ反応性等の化学的安定性やコンクリート用骨材としての長期安定性を試験する方法はまだ確立されたものはない。このため骨材として用いる岩石がコンクリート用骨材として安定であるか、コンクリートの耐久性に悪影響を与えないかあるいは有害鉱物を含んだ岩石が実用上問題があるか否か等を早期に判定する試験方法を開発する必要がある。ここでは、アルカリシリカ反応を生じる骨材の判定を行なうため、劣化機構の把握と影響要因の検討を目的とした研究を行った。

3.2 モルタルによる各種要因の検討

3.2.1 アルカリ量のクリティカルポイントについての検討

これまでの研究から、ひとくちにA S R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量は異なることが次第にわかってきた。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、C Pと略す）が異なることが予想された。C Pを定量的に把握し、C P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A S R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作製し、膨張量を測定した。

(1) 実験概要

試験に供した骨材は、結晶度の高いシリカの代表として水晶2種類と豊浦標準砂（珪砂）、シリカを含む無害の骨材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の代表として3種、チャート質のものの代表として2種を用いた。その他に、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-3.1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。

(2) 実験結果及び考察

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を図-3.2と3.3に示す。E,F,Gは

いずれも安山岩であるが、膨張を生じない明確なアルカリ量の上限を有している。この点（C P）はそれぞれ1.0～1.2%、0.8～1.0%、0.8～1.0%の間にある。そしてこの点を越えると、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点がなく、アルカリ量の増加に従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、比較的高いアルカリ量（1.6%を越える）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。

以上のことにより、安山岩類では膨張をおさえるアルカリ量の上限は比較的明確に設定できるが、この点を越えると反応は著しくなると考えられ、チャート類等では、アルカリの上限は明確には示し得ないが、この点を越えても膨張は安山岩類ほど著しくはないと考えられる。

また、今回用いた骨材ではアルカリ量0.6%で大きな膨張を示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ような骨材は、1.2%で3ヶ月で0.05%以上の膨張を生じている。

一般に安山岩類ではアルカリ量を高めると、モルタルバーの初期の膨張が大きくなる。このため、安山岩類に限って言えば、アルカリ量を高めることによってモルタルバー法の判定期間を短縮できる可能性がある。

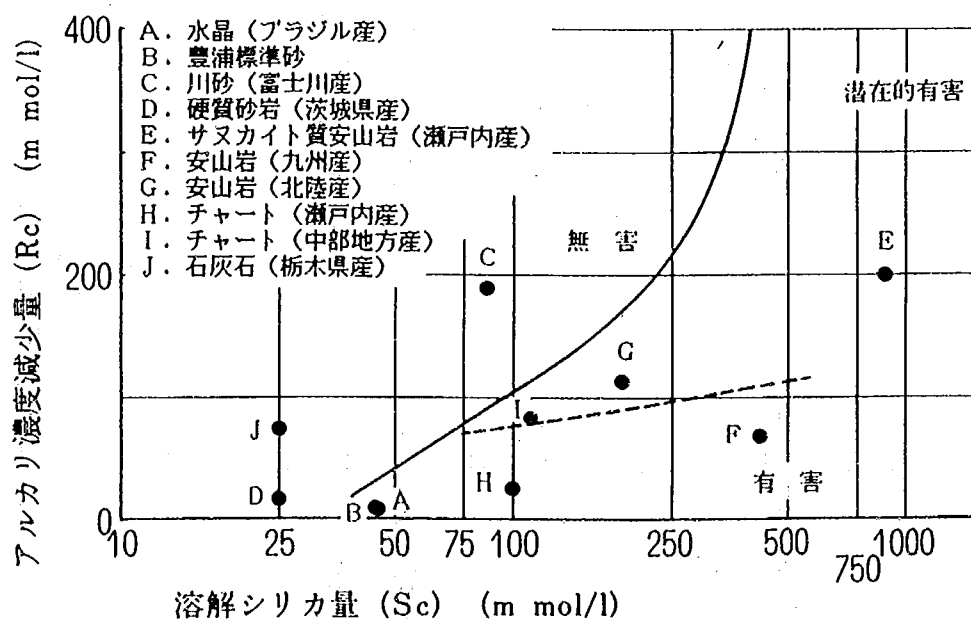


図-3.1 使用した骨材の化学法の結果

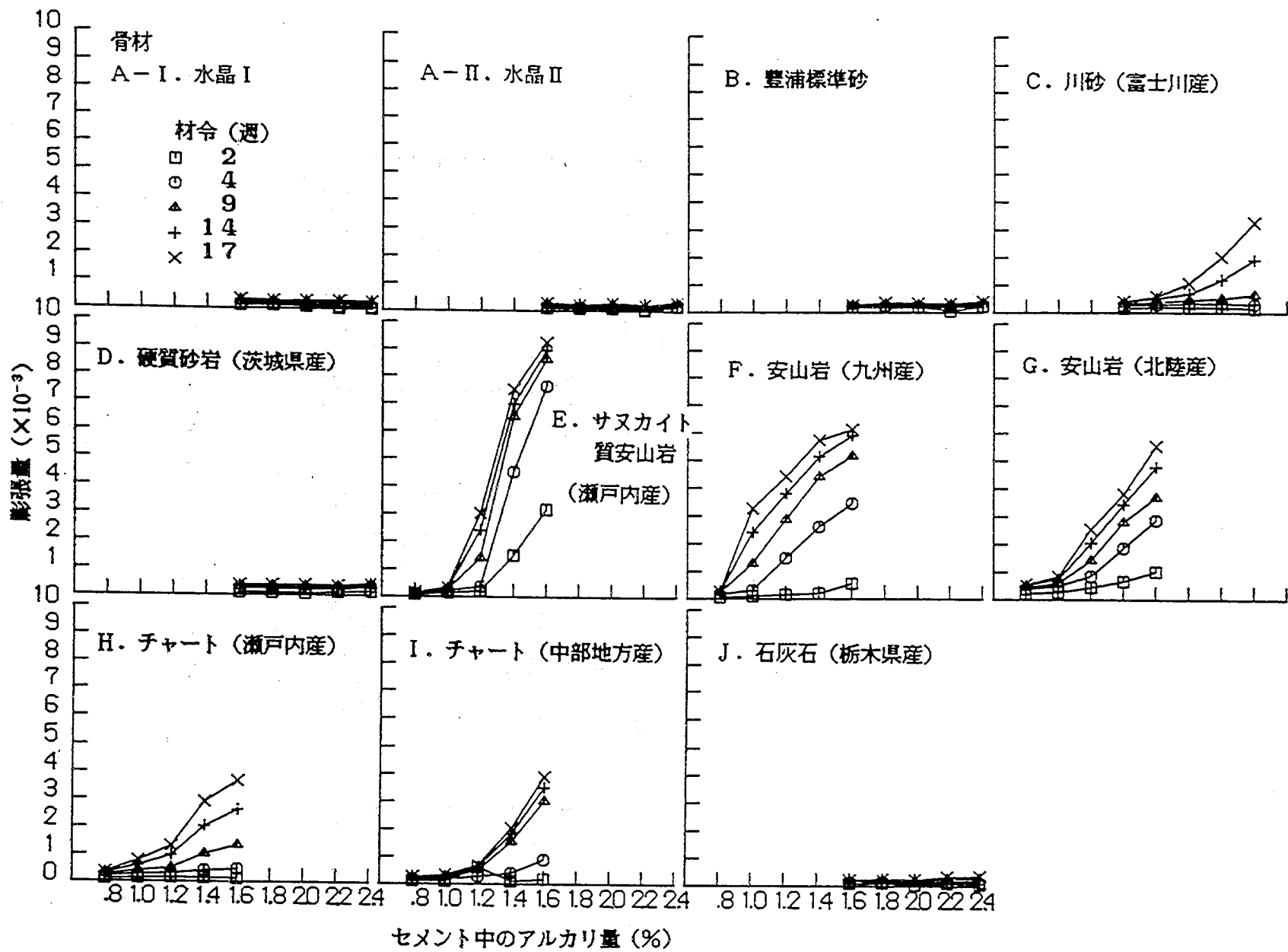


図-3.2 アルカリ量とモルタルバーの膨張量

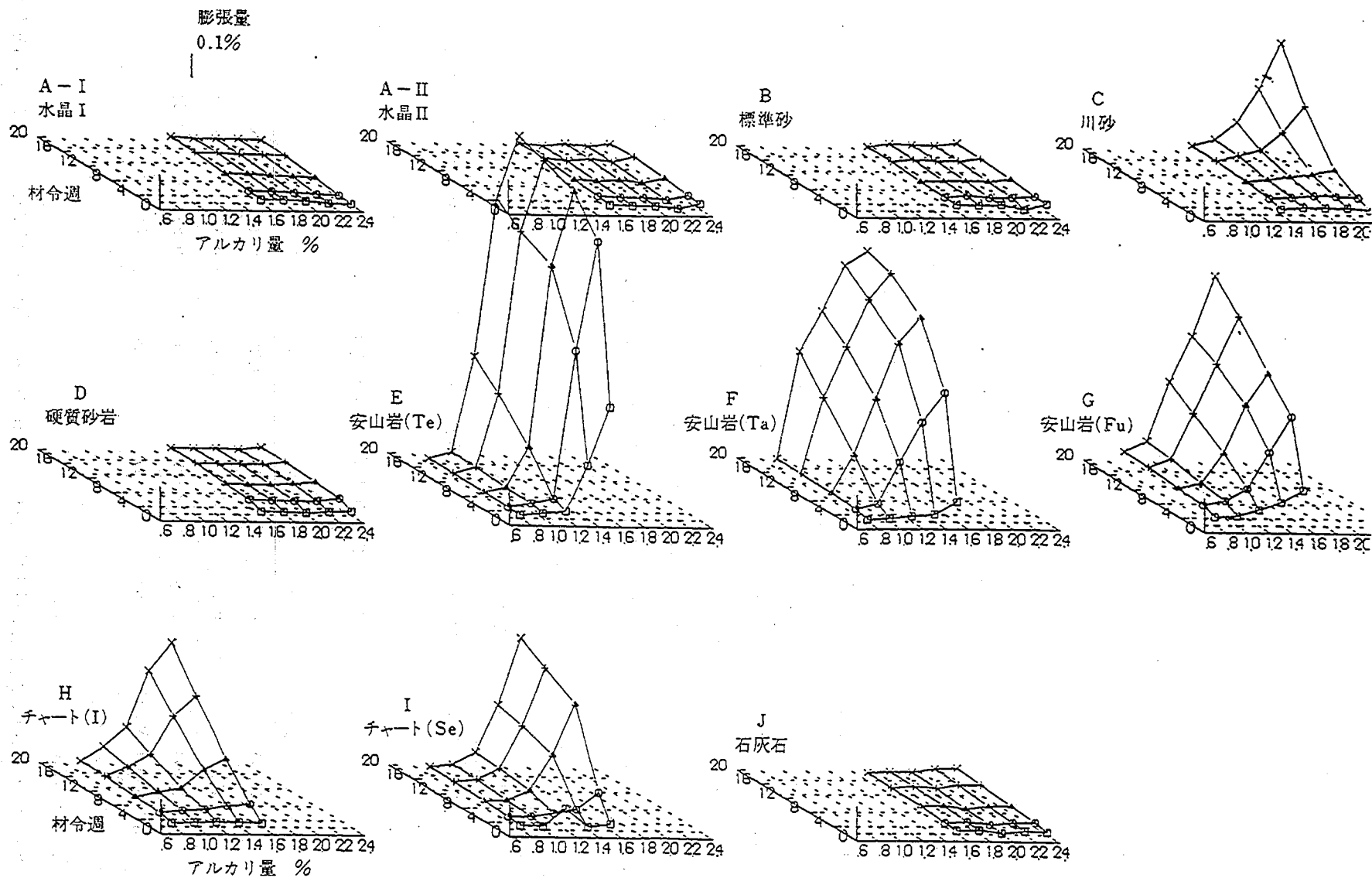


図- 3.3 アルカリ量-材令-モルタルバー膨張量

3.2.2. 各種イオンの影響

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各種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た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。

(1) 実験概要

1) 使用材料

表-3.1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反応性のあるという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が、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。細骨材の粒度は反応面積に影響するため、別途検討が必要であるが、ここでは骨材は破碎後ASTM C 227の細骨材粒度の規定に合わせて粒度調整した。表-3.2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。

表-3.1 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-3.2 セメントのアルカリ量

セメント (%)	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) $\text{Na}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{Oeq}$	52	47	38	44	56

2) 供試体の作製

モルタルバーはASTMの方法では $1 \times 1 \times 11 \cdot 1/4$ inのものをを用いているが、ここではJIS規格の $4 \times 4 \times 16$ cmのものをを用い、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=140mm)。モル

タルのフロー試験機や、試験方法、ねりませ方法、締固め方法等についてもASTM法とJISの方法は異なるが、これらもJIS R 5201に準じて行い、各配合3本ずつ供試体を作製した。

3) 養生及び長さ変化測定方法

供試体は打設後24 hr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 $38 \pm 2^\circ\text{C}$ 、 $\text{RH} > 95\%$ の湿気箱中で養生した。この後所定の材令で1/1000 mmダイヤルゲージにより長さ変化を測定した。

4) 配合

配合は下記の要因の影響を調べるために表-3.3のように変化させた。

シリーズI：まずASTMの試験方法に最も近い方法として、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 wt%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、CaCl₂、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あた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-3.3 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 一定	一 定	2.25	NaCl, Na OH CaCl ₂ , KOH添加 アルカリ量一定
シリーズⅣ	W / C 変化	変 化	2.25	アルカリ量 / m ³ 変化
	W / S 一定		変 化	
	W / C 一定			

フロー一定は180～190mmの範囲

(2) 実験結果および考察

1) シリーズI

図-3.4にシリーズIの代表例としてA4骨材とC1～C5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下の傾向にあるようであるが、今後の測定結果を追跡してみないと、確定的なことは言えない。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-3.5にA1~A5の骨材、C1~C5のセメントを用いたモルタルバーの Na_2Oeq と20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。黒曜石のA1ではアルカリ量が増大しても膨張量に大きな変化はみられないが、真珠岩と輝石安山岩系のA4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。

2) シリーズII

図-3.6にシリーズIIの一例としてA3骨材を用いたNaClを添加したモルタルでの材令8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、砂の0.1%wtまで含まれる可能性があり、後者では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-3.6ではNaClの添加量の増大とともに膨張量が増しており、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極めて重大な影響を及ぼす可能性があると考えられる。

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およ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 CaCl_2 を添加し、その影響をみた。

図-3.7はA1骨材、C1セメントを用いた一定配合のモルタルに CaCl_2 を添加した場合の CaCl_2 の添加量と、12週における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 $\text{Na}_2\text{Oeq}=0.761\%(\times C)$ の一定量となるようにC1~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12週における膨張量とClイオンの量との関係を図-3.8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-3.9はNaOHを添加し、アルカリ量が $\text{Na}_2\text{Oeq}=0.765\%(\times C)$ となるよう調整したA1骨材モルタルの12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-3.10、3.11は、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。図-3.12は同じものの材令12週におけるアルカリ量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%セメントをペーストとしてそれ以上の

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 % でピークがあり、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ベシマムのようなものが存在すると考えられる。また、図-3.12 に示されるように Na と K の影響はかなり異なり、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は問題があると考えられる。

4) シリーズIV

図-3.13、3.14、3.16 に A1、A3、A4 骨材を用いたモルタルの単位体積あたりのアルカリ量（以下、単位アルカリ量と略す）と 12 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、これらをみると 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-3.15 のようになり、セメントが異なっても図-3.14 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。

図-3.17 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 12 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 2.5 kg/cm³ 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。

以上、図-3.10～3.17 を総括すると、低アルカリ量では Na と K に効果の差はないが、高アルカリ量では著しい差が生じており、アルカリ量によって K の換算係数を別に定める必要もあると考えられ、さらに調査の必要があると考えられる。

上記の結果は比較的短期のモルタルバーによる膨張量試験から得られたもので、条件としては限られたものであるが、本研究から得られた知見としては次のものがあげられる。

- 1) アルカリ骨材反応に対しセメント中のアルカリだけでなく、外部からのアルカリイオンも影響する。
- 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ペシマムが認められ、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等価量を定めることは問題があると考えられる。
- 5) モルタルバーの膨張量はアルカリの種類と量によって大きく影響されるものでモルタルバー法を骨材の膨張性の判定試験法とするためには、使用するセメント中のアルカリの種類、量を規定し、配合についても単位モルタル中のアルカリ量を規定する必要がある。

今後さらに長期材令におけるモルタルバーの挙動を調査し、アルカリの種類別の影響の定量的把握をするとともに、モルタルバーの膨張量とコンクリートの膨張や劣化との関係、骨材の有害性の判定基準の設定等の検討を行って行かなければならない。

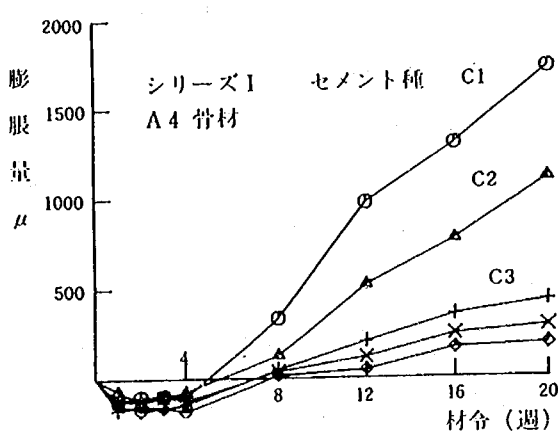


図-3.4 材令と膨張量

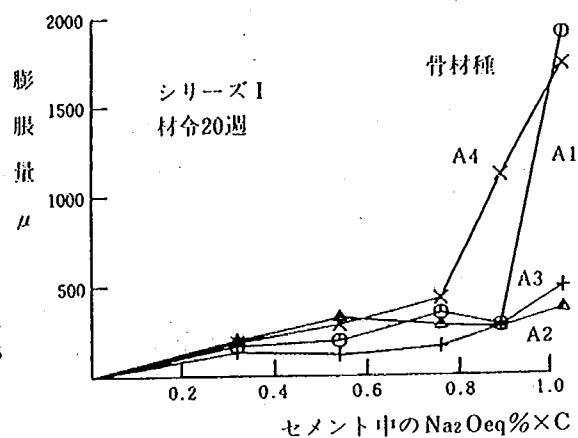


図-3.5 セメント中のアルカリ量と膨張量

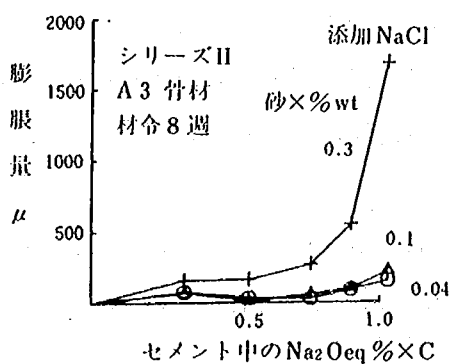


図-3.6 NaCl 添加の影響

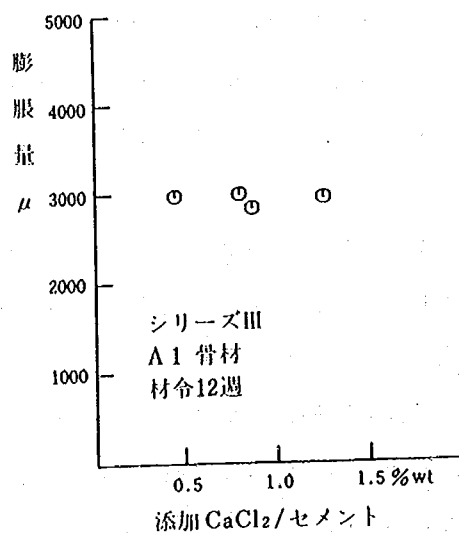


図-3.7 CaCl_2 添加の影響

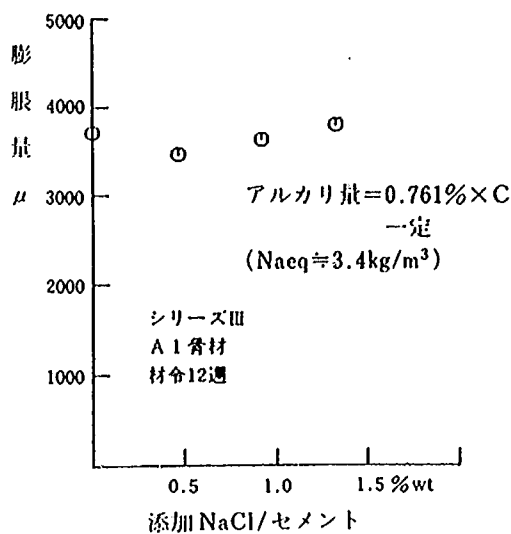


図- 3. 8 NaCl 添加の影響

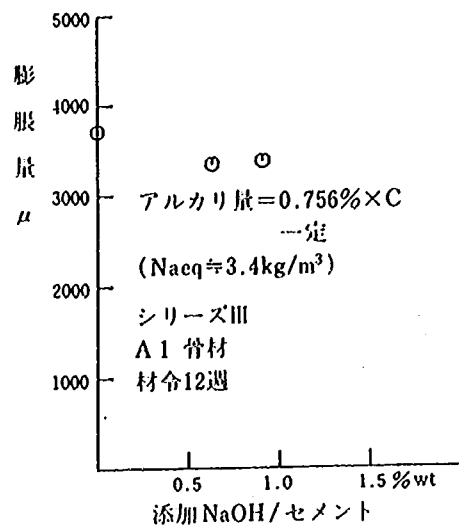


図- 3. 9 NaOH 添加の影響

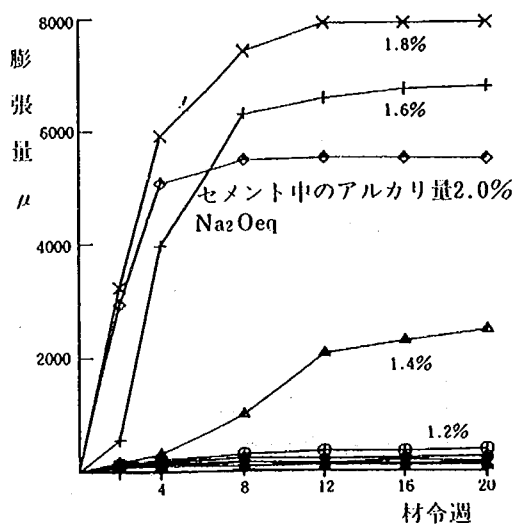


図- 3.10 NaOH 添加モルタルの膨張量

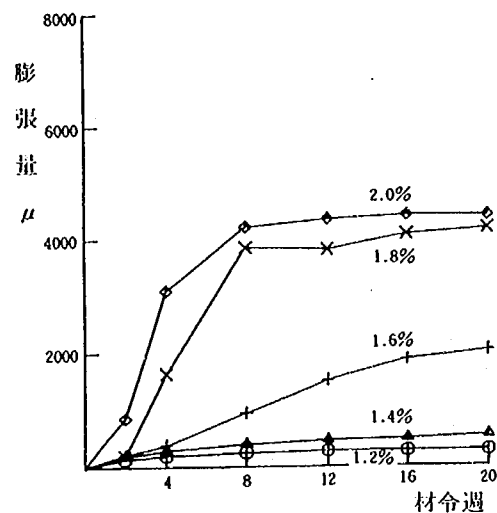


図- 3.11 KOH 添加モルタルの膨張量

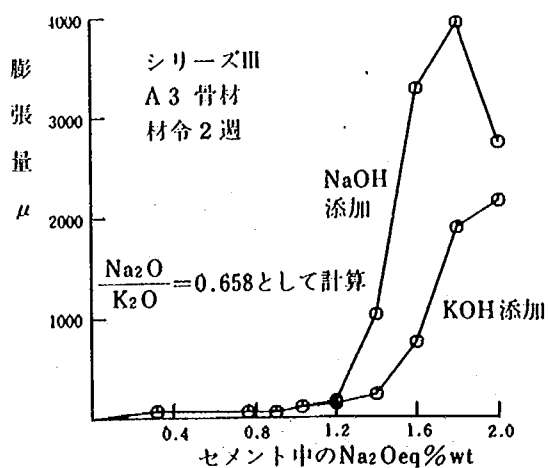


図- 3.12 Na と K 添加の影響

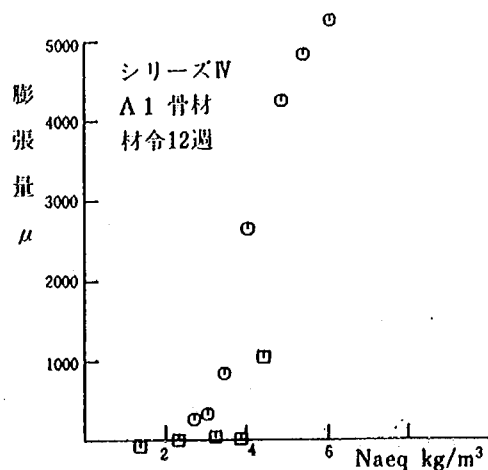


図- 3.13 モルタル中の単位アルカリ量と膨張量

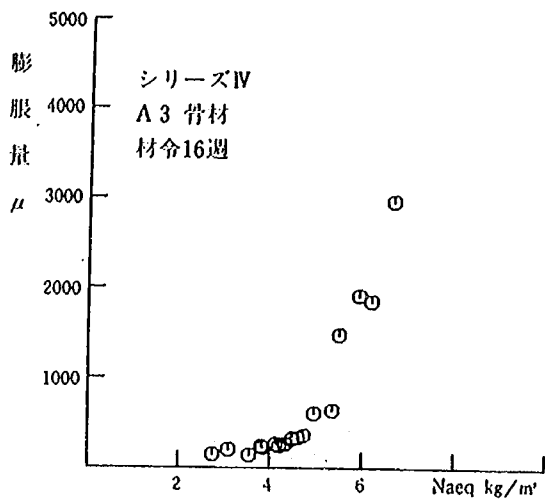


図- 3.14 モルタル中の単位アルカリ量と膨張量

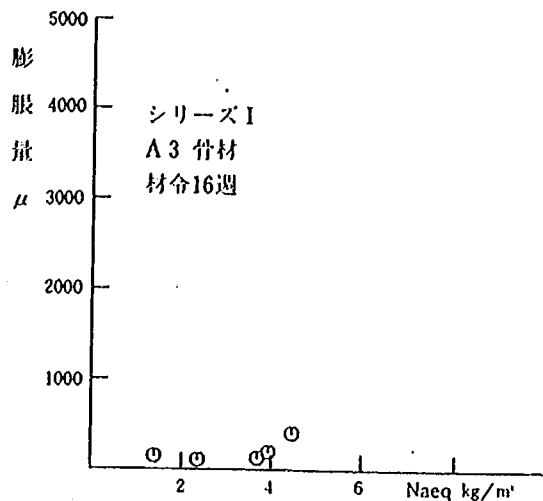


図- 3.15 モルタル中の単位アルカリ量と膨張量

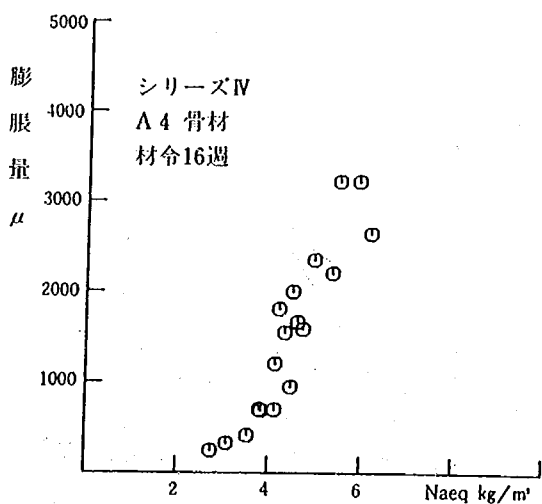


図- 3.16 モルタル中の単位アルカリ量と膨張量

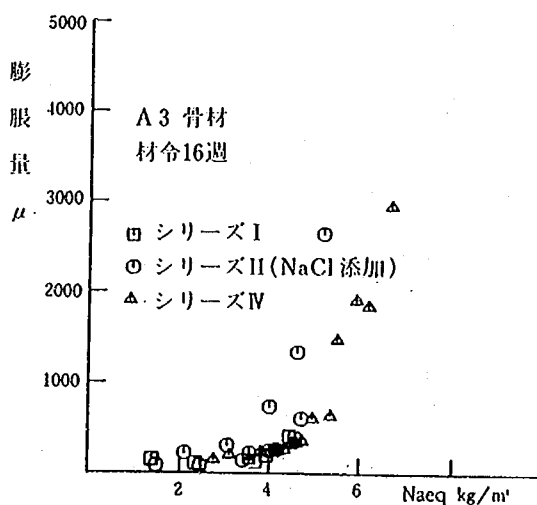


図- 3.17 モルタル中の単位アルカリ量と膨張量

3.2.3 ペシマムに関する検討

アルカリ骨材反応現象で特徴的な現象のひとつにペシマムがある。これは骨材によっては反応性の骨材を100%用いたときに必ずしもコンクリートの膨張量が最大とならず、反応性骨材がある割合のときに膨張量が最大となるような最悪（ペシマム）の点が存在することがあるという現象である。我が国の骨材の中にも明確なペシマムの存在するものが発見されているが、ペシマムの存在する理由は、これまでのところ明確にはなっていない。一説にはアルカリ量とシリカの量の比によって生ずるのではないかとされている。この現象は、骨材の組合せによっては、危険性が増す場合があることを示しており、非常に重要なものである。

(1) シリーズ I

1) 実験概要

実験に使用した骨材は、すべて安山岩で、化学法で有害に属する骨材A、潜在的有害に属する骨材E、無害の骨材B、C、D計5種類である。化学法の結果を図-3.18に白丸で示した。

実験は、骨材の混合比によりアルカリ濃度減少量 (R_c) と溶解シリカ量 (S_c) がさまざまに変化するようA-E、A-C、A-D、E-B、E-C、E-Dの6つの骨材の組合せについて、骨材の混合比を20%づつ変化させ、モルタルバー法によって行った。そのときの各混合比ごとの骨材の化学法の値を計算により加重平均で求めたのが図-3.18の黒丸である。

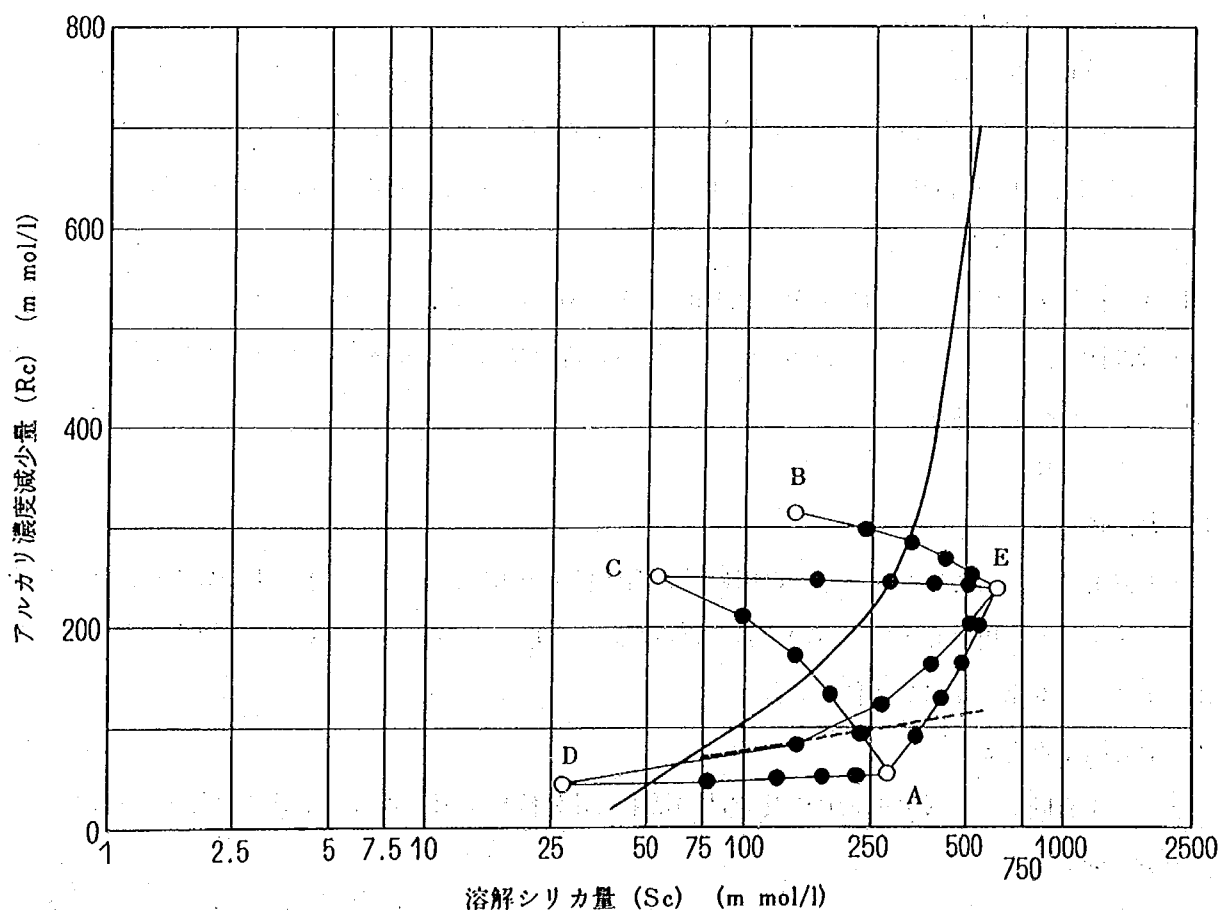


図-3.18 化学法の結果

2) 実験結果

化学法で無害の領域に属する骨材B、C、D 100%の場合はモルタルバーでも膨張せず、有害なA骨材のみでは大きい膨張を示した。しかし、潜在的有害に属するE骨材は、モルタルバーではほとんど膨張しなかった。

図-3.19に材令3ヶ月時の各骨材組合せごとの混合比と膨張量の関係を示す。図-3.18と図-3.19とを見比べると、

- ① A-Eの組合せは、A骨材からE骨材に混合比が増加するにしたがい、 R_c が増加し、膨張量は減少傾向にある。ベシマム量は、AよりScのわずかに増加した混合比80:20付近に存在するようである。
- ② A-Cは、 R_c が小さく、Scの大きいA 100%で膨張は最大となっておりベシマムは存在しない。
- ③ A-Dは、 R_c が小さく、混合比によっても変化はほとんどなく、Scのみ変化する組合せである。有害の領域に属するA骨材40%まではほぼ同じ膨張を示し、それ以下は減少している。明確なベシマムは存在しない。
- ④ E-Bはともに R_c が高く、混合することにより R_c がわずかに増加傾向にあり、Scの変化するものである。どの場合についても膨張していない。
- ⑤ E-Cは、④と同様、膨張していない。
- ⑥ E-Dは、 R_c 、Scとも大きく減少するものである。両骨材とも100%の場合は膨張しないにもかかわらず、混合比の変化によっては膨張しており、明確なベシマムが存在している。この場合のベシマム量はE、Dの混合比は40:60~20:80であり、化学法の変化では、有害領域に接近したところでベシマムを生じている。

以上の結果より、ベシマムは R_c が減少方向にあり、Scのある値のところに存在するようである。図-3.18の骨材の混合比による化学法の結果では、混合骨材の R_c 、Scの変化が下に凸な曲線をえがく場合に生じるものと考えられる。

(2) シリーズII

1) 実験概要

3.2.1で用いた安山岩EとG、および川砂C、石灰岩Jを用い、EとC、JおよびGとC、Jを組み合わせモルタルバーを用いてベシマムの実験を行った。さらに、このシリーズではセメントのアルカリ量を0.8、1.2、1.6%の3水準変化させた。

2) 実験結果と考察

シリーズIと同様、骨材の混合比と化学法の結果(計算値)を図-3.20に、混合比と膨張率の関係を図-3.21に示す。

安山岩を用いた実験では図-3.21に示すように、アルカリ量0.8%では差はみられないが、アルカリ量1.2%、1.6%では、シリカ質の川砂と組み合わせた方が、石灰石と組み合わせたものより、全体的に膨

張量がわずかに低くなっており、また、アルカリ量1.2%ではペシマムのピークが前者で80%程度に対し後者では60%程度となっている。

安山岩Gを用いた実験では明瞭なペシマム現象は現れていないが、アルカリ量1.2%で川砂と組み合わせたものでは膨張量が低くなっている。

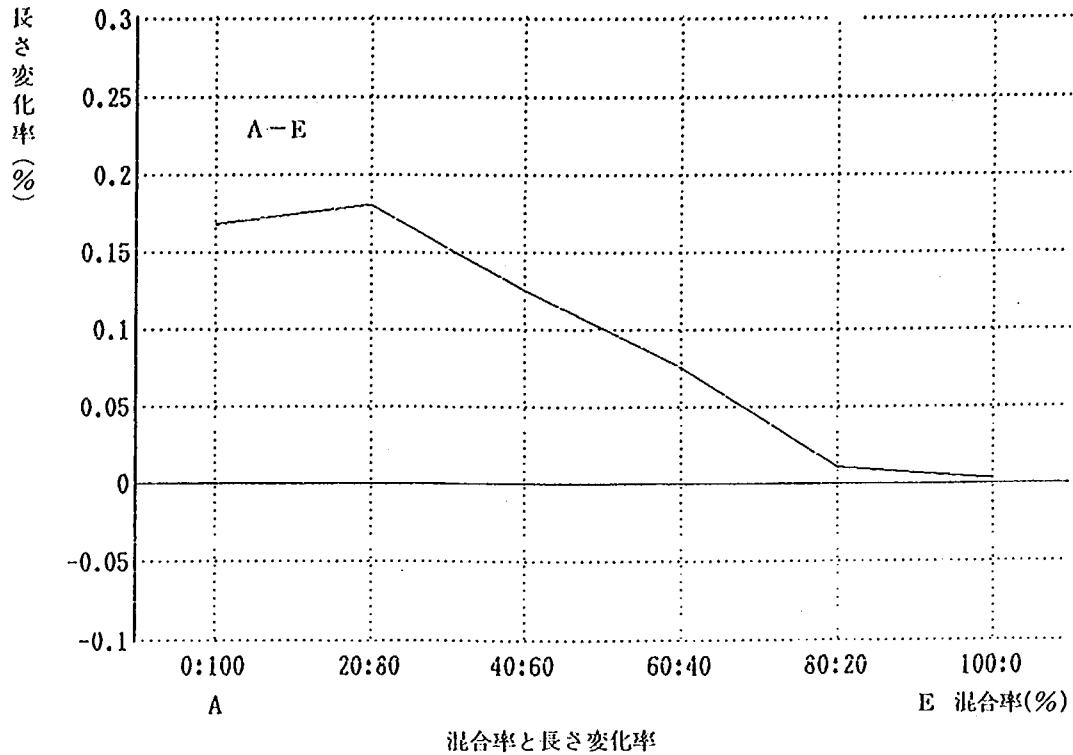


図-3.19 (1) 混合比と膨張率骨材組合せ A-E

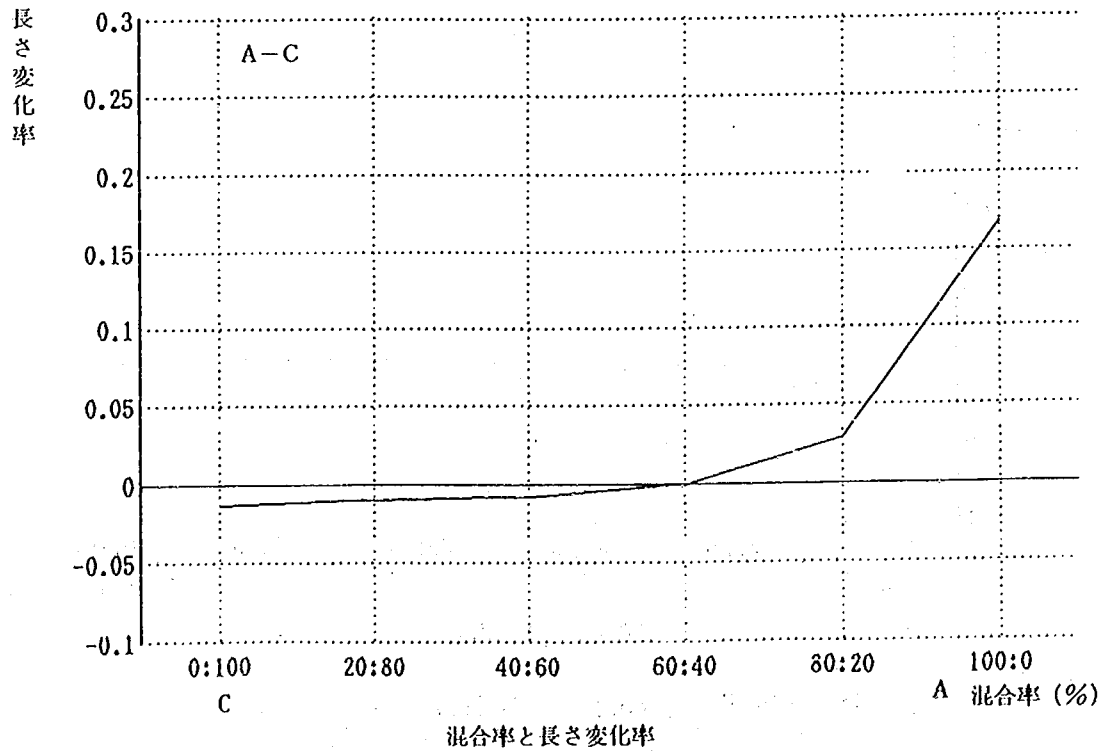


図-3.19 (2) 混合比と膨張率骨材組合せ A-C

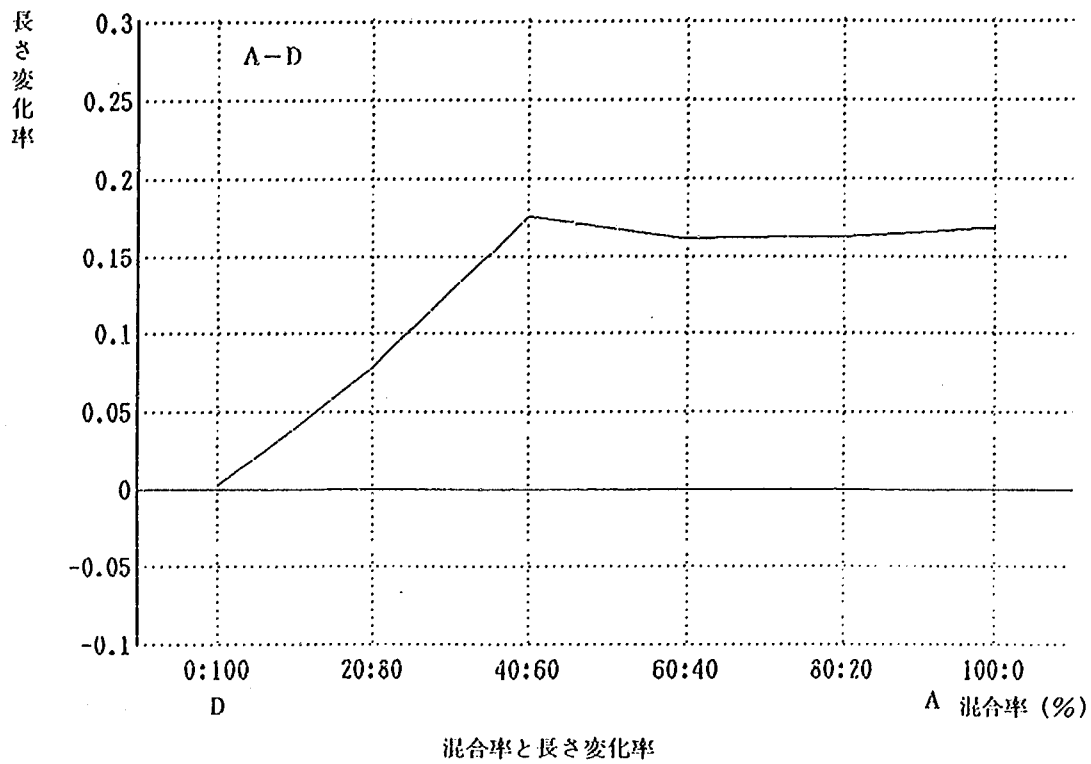


図-3.19(3) 混合比と膨張率骨材組合せ A-D

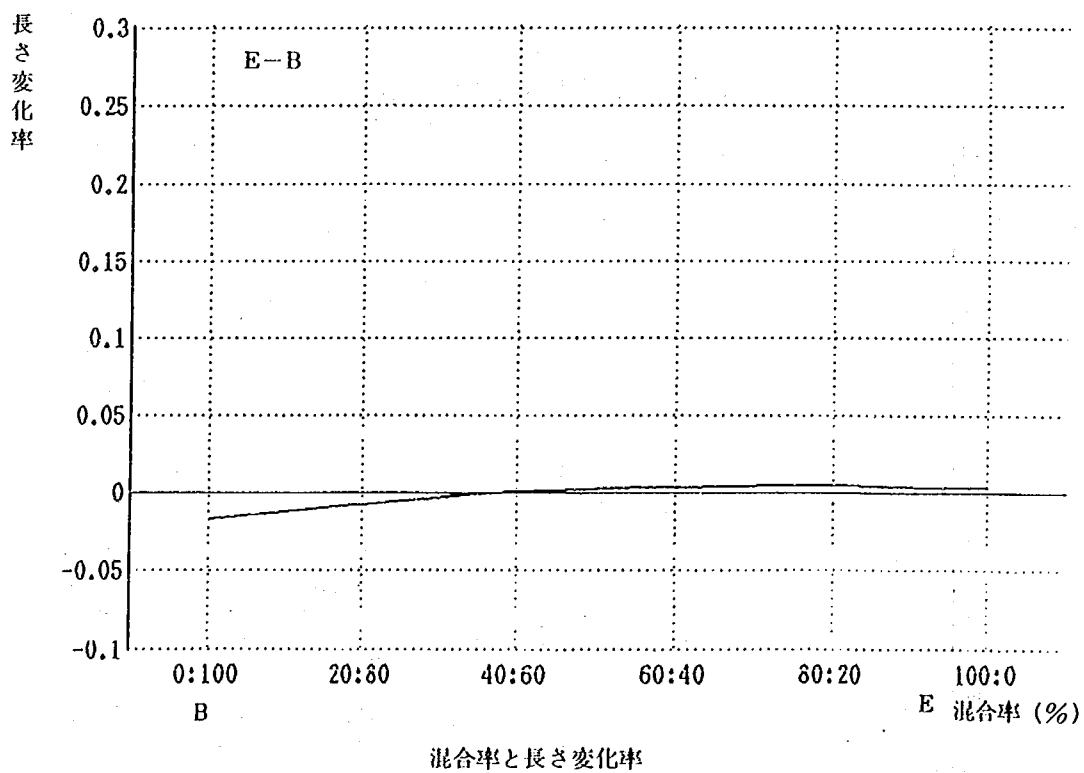


図-3.19(4) 混合比と膨張率骨材組合せ A-B

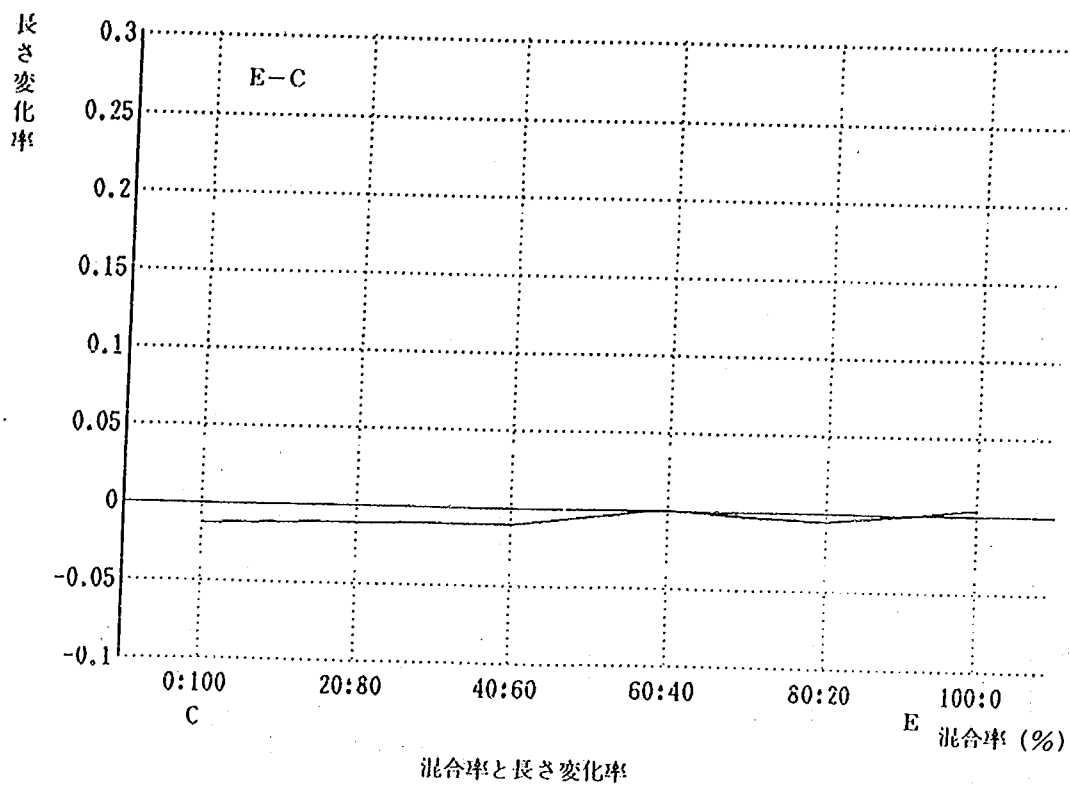


図-3.19 (5) 混合比と膨張率骨材組合せ E-C

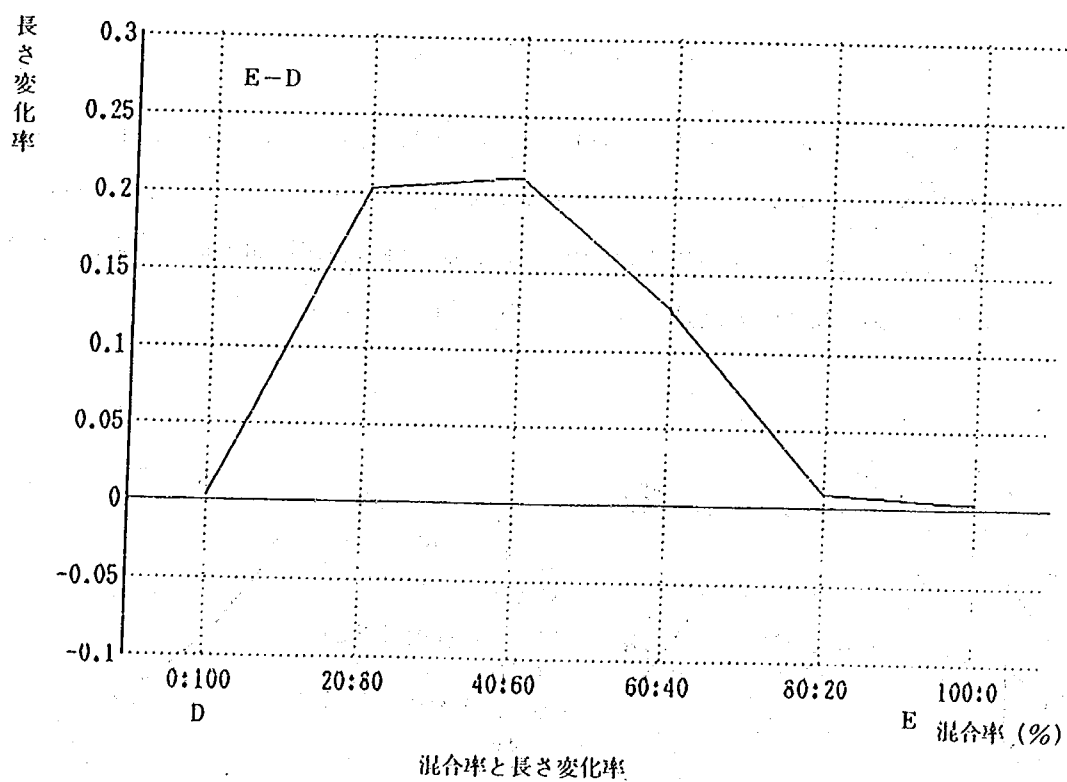


図-3.19 (6) 混合比と膨張率骨材組合せ E-D

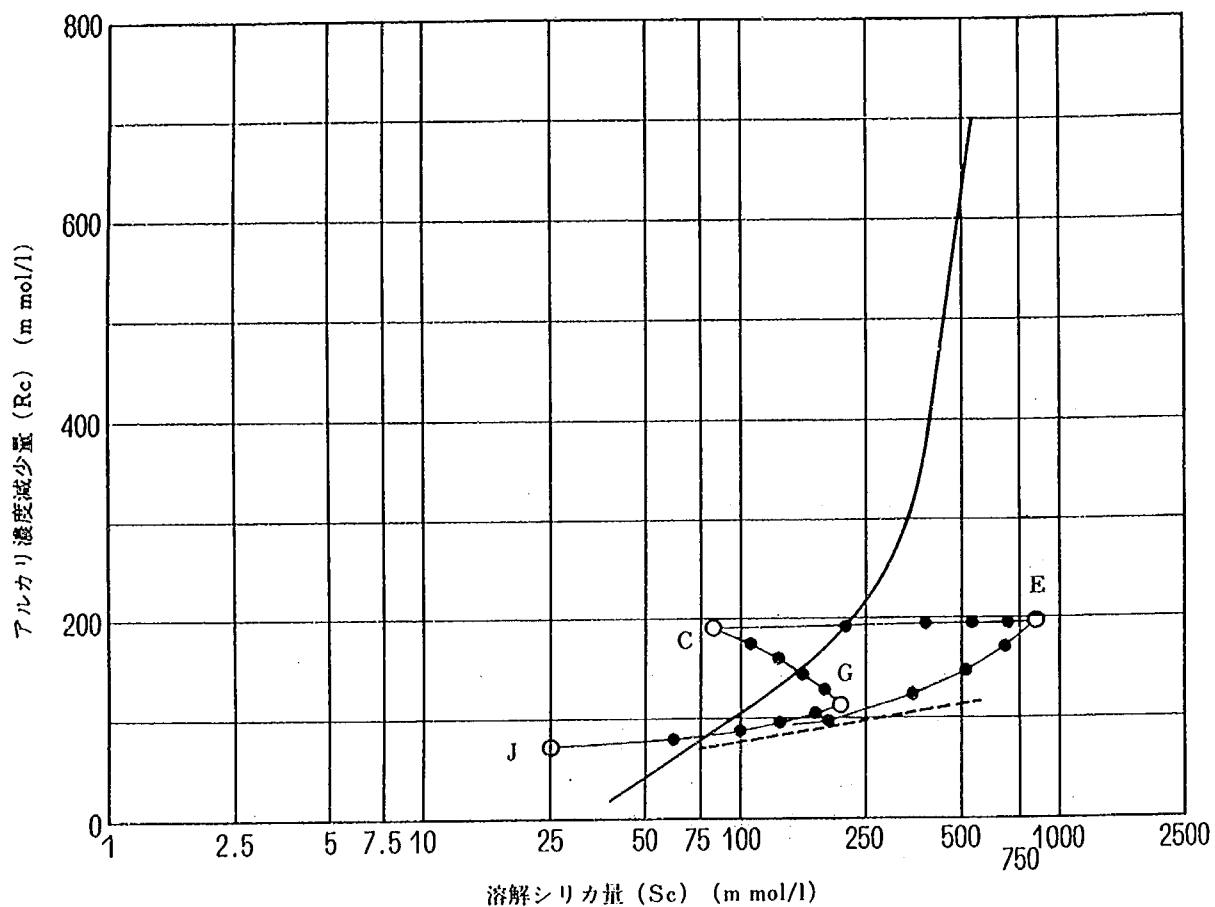


図- 3.20 化学法の結果

このシリーズでは、 R_c の変化が小さいため、明確なペシマムは認められないが、E-Jの組合せは、化学法の結果が下に凸な曲線をえがいており、アルカリ量1.2%の場合には、シリーズIと同様にペシマム量が存在するようである。また、アルカリ量が増加すれば、反応性骨材が増加するほど膨張率も増加するようである。すなわち、図-3.21の膨張率のピークは右に移行するようである。

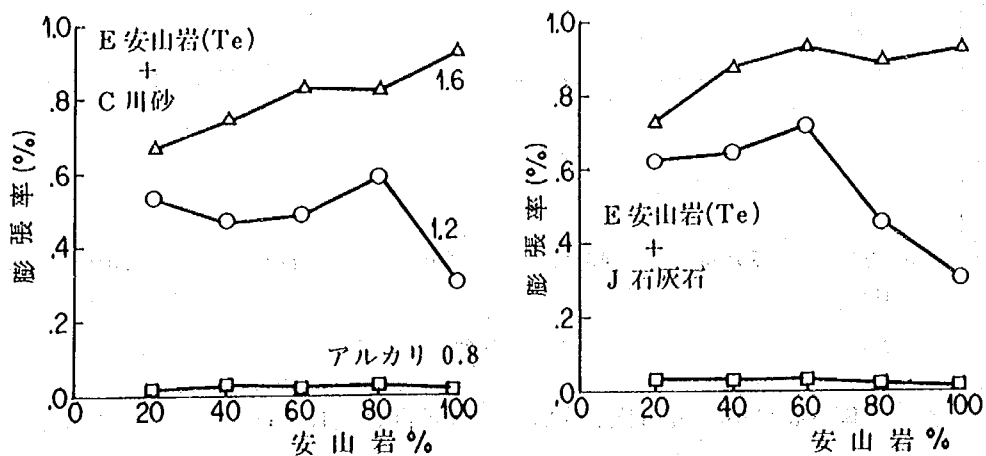


図- 3.21(1) 骨材混合比と膨張率

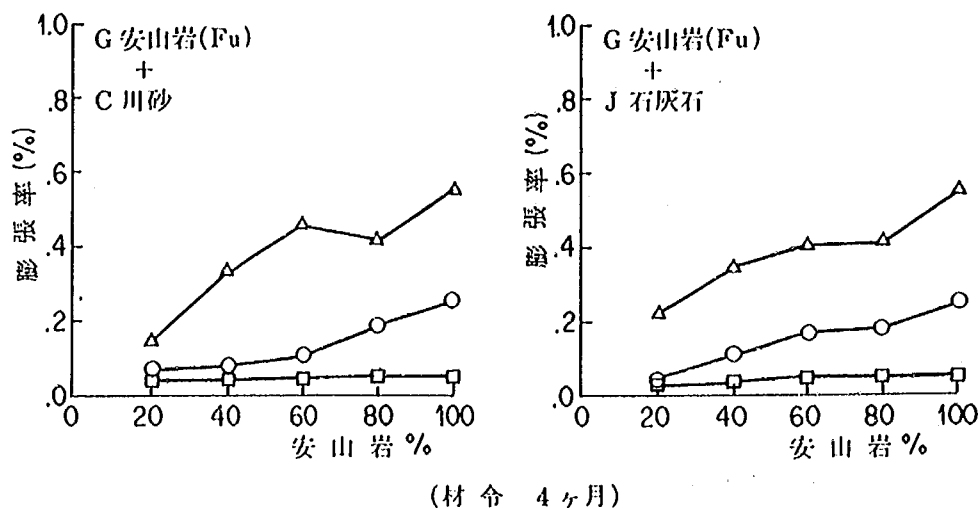


図-3.21 (2) 骨材混合比と膨張率

3.2.4 膨張に対する混和剤の影響

膨張に対して、混和剤がどう影響をおよぼすかについては、種々、研究報告が出されてきている。それらの報告によると、流動化剤、高性能減水剤などのように、その使用量の多いものがプレーンなものより膨張が大きく、A E剤、A E減水剤などのようにその使用量の少ないものは、気泡の効果等によりプレーンなものと同様かまたは、それ以下になると考えられている。

以上のことを確認することを目的として実験を行った。また加えて、アルミ粉の影響も調査することもその目的とした。

(1) 実験概要

1) アルカリ量 Na_2Oeq 1.2%

2) 使用混和剤 5種

A E剤 K 1 (界面活性剤)

A E剤 K 2 (天然樹脂酸塩)

A E減水剤 K 3 (リグニンスルホン酸塩 ポリオール複合体)

高性能減水剤 K 4 (ナフタリンスルホン酸塩、ホルマリン高縮合物)

アルミ粉

3) 使用骨材 4種

A 1 反応性骨材 (輝石安山岩)

A 2 反応性骨材 (サヌカイト質輝石安山岩)

A 3 反応性骨材 (チャート)

A 4 反応性骨材 (輝石安山岩)

4) 配 合

- ① セメント 600 g
- ② 骨 材 1350 g (ASTM粒度となるようにした)
- ③ 単位水量

アルカリ量 ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$) 1.2%で混和剤無添加の時フロー値が、180~190程度となるように単位水位を決定した。

④ 添加アルカリ

NaOH水溶液を用いる。

⑤ 混和剤使用量

メーカー指定標準使用量の中央値を採用する。また、アルミ粉については、膨張量が5%、10%となるよう試験練りにより

5%膨張を想定…………… $C \times 0.023\%$

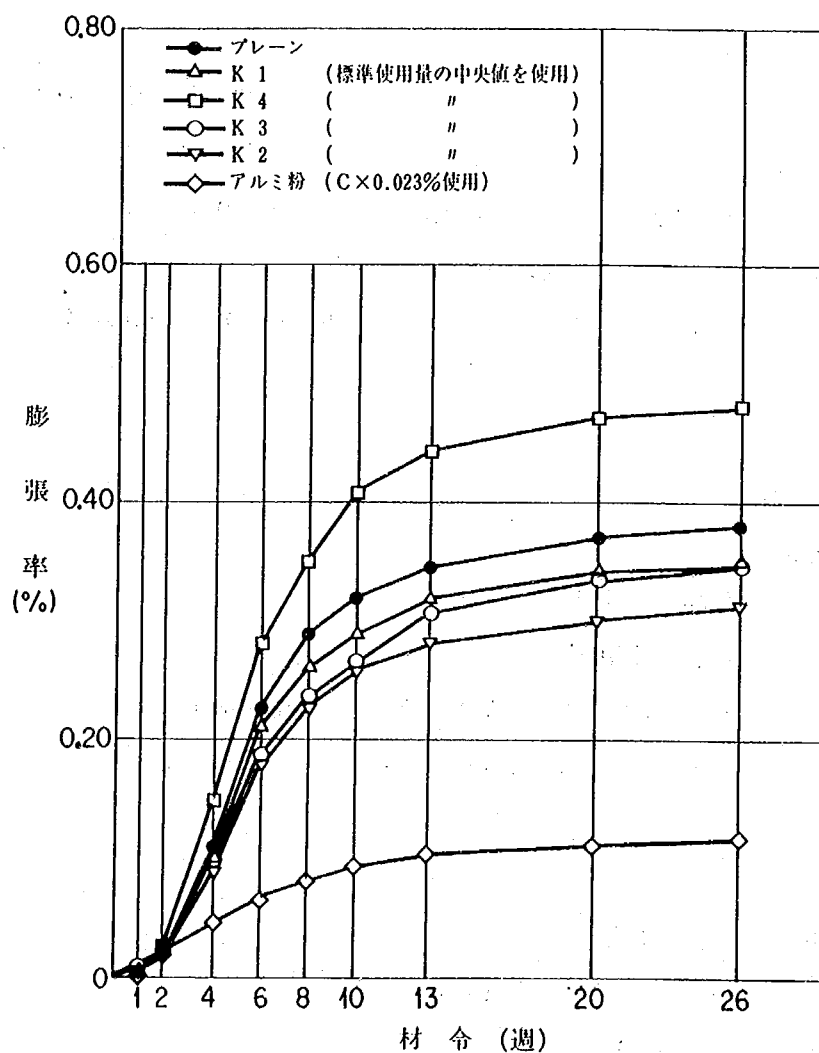


図- 3.22 各種混和剤の添加と膨張率 (A1)

10%膨張を想定…………… $C \times 0.046\%$

(但し、 C は使用セメント量)

と決定した。

(使用量 $K1 : C \times 0.0075\%$ 、 $K2 : C \times 0.045\%$)

($K3 : C$ 100kg当り 275 cc、 $K4 : C \times 0.8\%$)

(2) 実験結果および考察

横軸に材令、縦軸に膨張量を取り、材令と膨張量の変化を4種類の骨材について調べ、図-3.22~図-3.25に示した。混和剤無添加のモルタルバーと添加したモルタルバーの膨張量を比較すると、骨材の種類によっては異なるが、時間とともに同様な傾向で膨張していき、膨張量の差も時間とともに広がっていく傾向にある。図-3.26も合わせて考えてみると、骨材によって混和剤の影響の受け方も異なり、プレーン

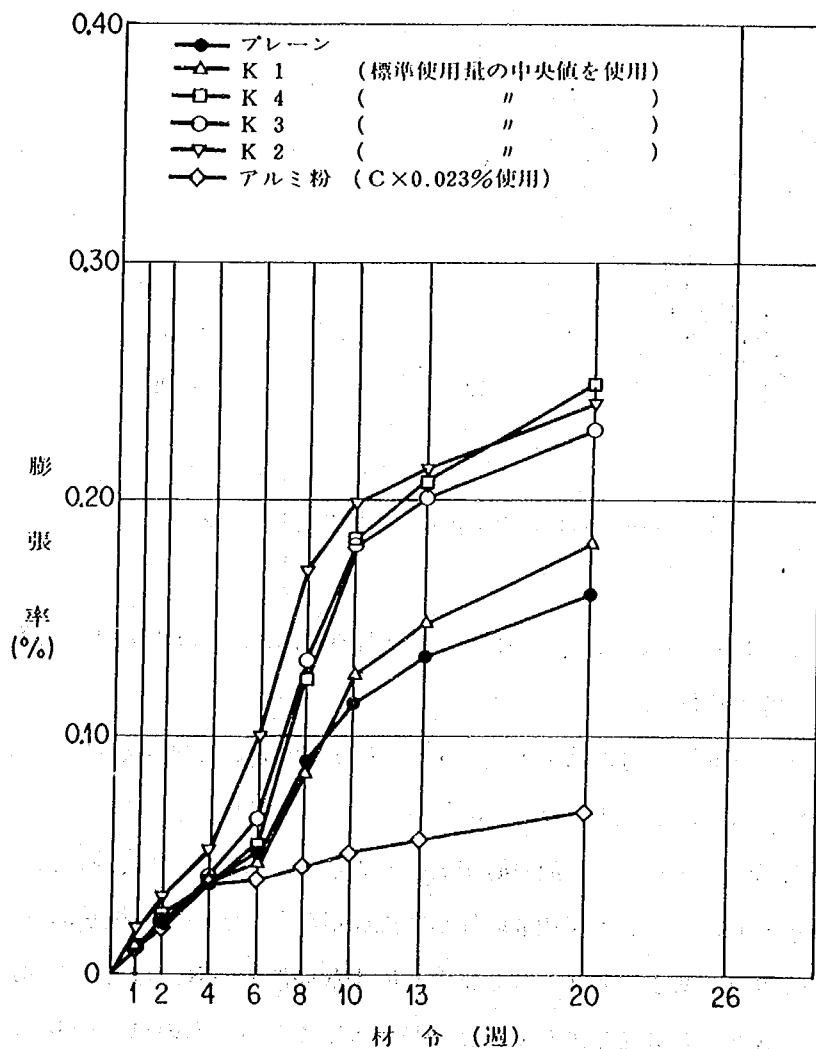


図- 3.23 各種混和剤の添加と膨張量 (A2)

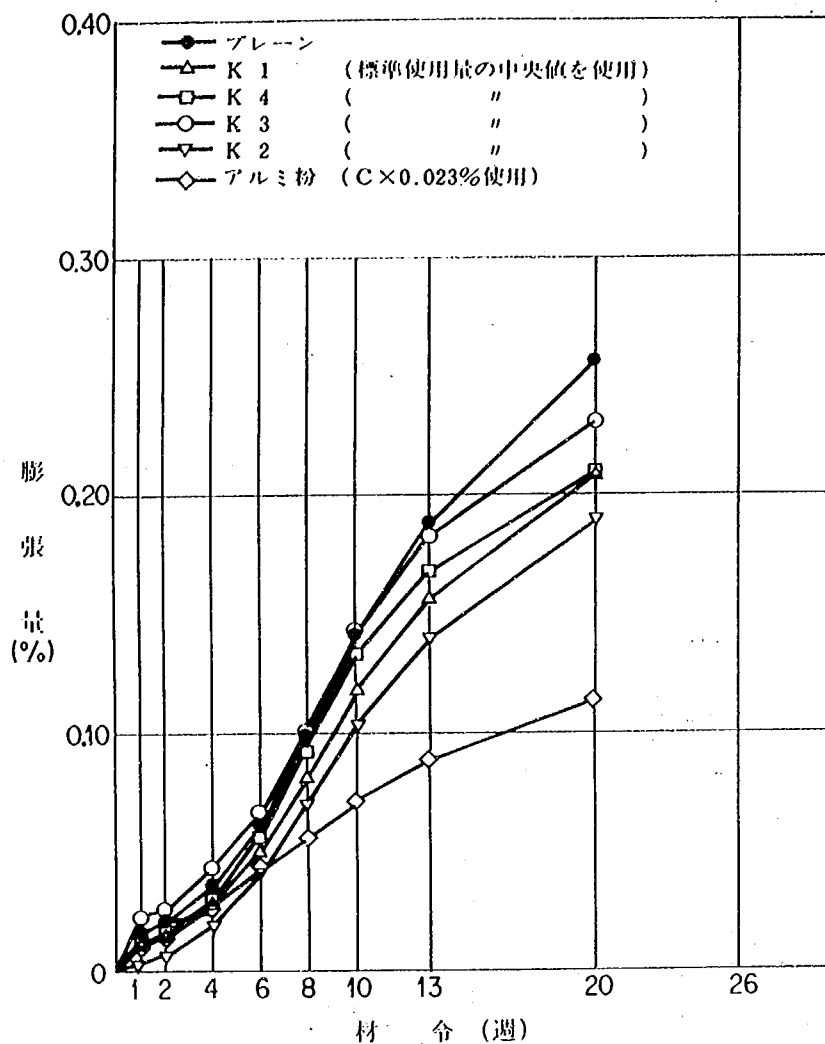


図- 3.24 各種混和剤の添加と膨張量 (A3)

よりも膨張量が大きくなるものもあれば、あまり変らないものもある。膨張量が大きくなるものは、混和剤に対して敏感であると考えられる。

各混和剤のアルカリ (Na、K) の分析結果を表- 3.4 に示す。また、添加量から、アルカリ量 (Na_2O 等量換算) の増分を計算すると、表- 3.5 のようになる。

K 4 混和剤を添加した場合、プレーンや他の混和剤を添加したものに比べて、膨張が大きくなる骨材が多い。K 4 は高性能減水剤であり、他の混和剤に比べて添加量が多いという特徴がある。

アルカリ量の増分としては、K 1、K 2、K 3 は非常に少ない値であり、ほとんど増加しないと考えられる。それゆえ、K 1、K 2、K 3 を添加して、膨張量が少なくなったものは、発生した気泡の影響、混和剤の化学特性等の影響により低減されたものと考えられる。また、膨張が大きくなったものは混和剤に対して敏感であると考えられる。

K 4 混和剤は他の混和剤に比べて使用量が多いが、それでもアルカリ量の増分としては 0.03 % であり、

練混ぜ時のアルカリ量1.2%に比べても、それほど大きな増加ではない。しかし、過去の実験から明らかのように、アルカリ量が1.2%を越えると、膨張量が急激に大きくなる傾向もある。他の要因もあるかもしれないが、アルカリ量の増加も膨張を大きくする要因の1つであると考えられる。

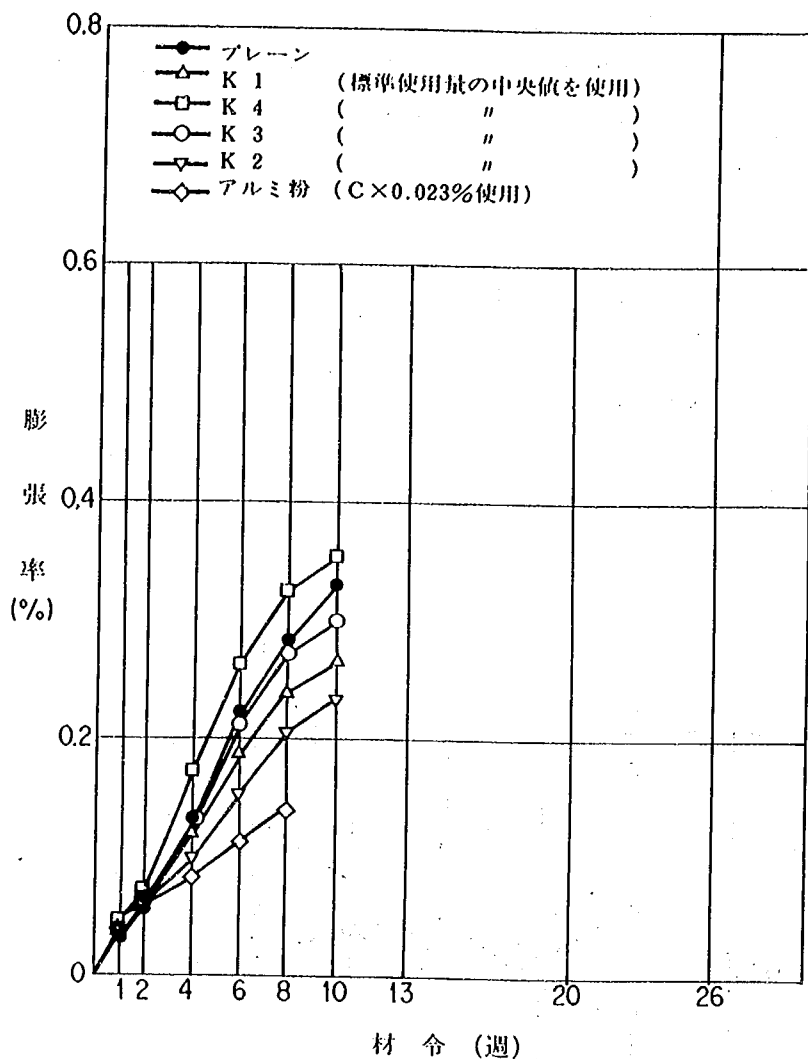


図- 3.25 各種混和剤の添加と膨張量 (A4)

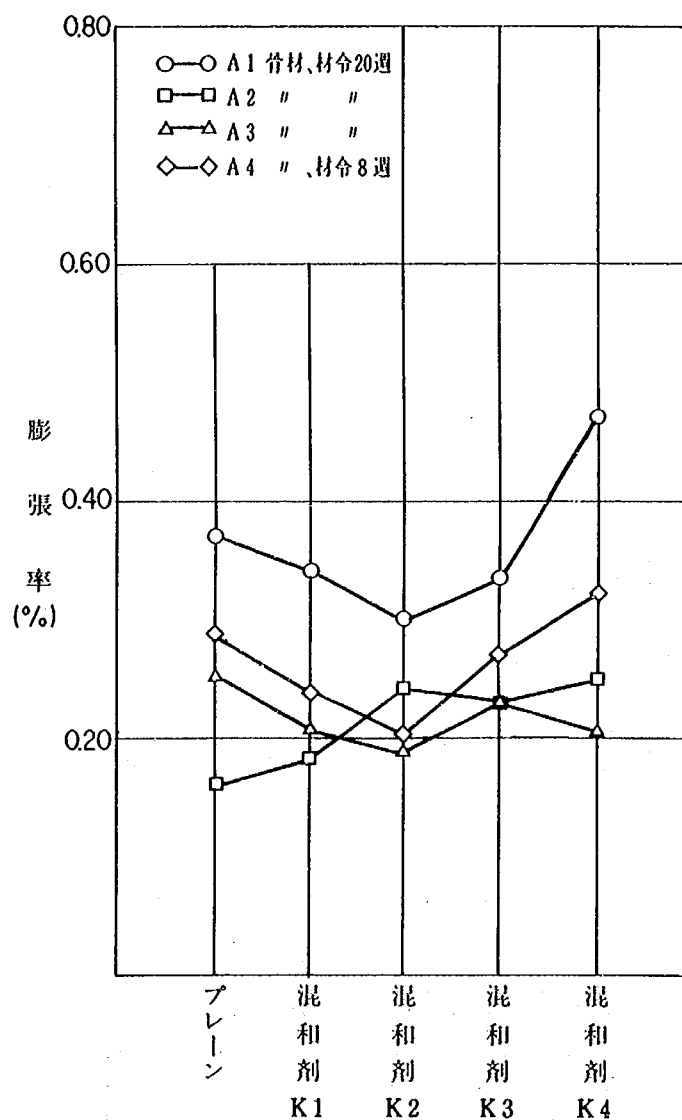
表- 3.4 混和剤のアルカリ分析結果

混和剤の種類	Na (g/h)	K (g/L)
K 1	2.0	0.1 以下
K 2	13	"
K 3	15	"
K 4	43	"

表－ 3. 5 混和剤からの Na₂O 等量換算アルカリ量の増分

混和剤の 種 類	計 算 式	増分(%)
K 1	$\frac{600 \times 0.000075 \times 0.031 \times 0.087}{600} \times 100$	0.00002
K 2	$\frac{600 \times 0.00045 \times 0.031 \times 0.565}{600} \times 100$	0.0008
K 3	$\frac{600 \times 0.00275 \times 0.031 \times 0.652}{600} \times 100$	0.006
K 4	$\frac{600 \times 0.0016 \times 0.031 \times 1.87}{600} \times 100$	0.028

(∵ K 1、K 2、K 4は比重を 1.0 g/cm³とした。)



図－ 3.26 混和剤の種類と膨張

今後は、低いアルカリ量のモルタルに混和剤を添加し、1.2%のアルカリ量のモルタルバーの膨張特性と比較し、同様な傾向になるものかを確認する必要があると考えられる。

化学混和剤の使用が想定される場合には、モルタルバーによる A S R の判定試験を行う際、化学混和剤を添加したものも合わせて調査しておく必要があると考えられる。

3.2.5 膨張に対する空気量の影響

A E剤を添加したものは、プレーンなものに比べて、膨張が抑制されると言われている。抑制する原因のひとつとして、気泡の効果が考えられている。そこで、A E剤を変化させることにより、発生する空気量を変化させ、膨張に対する空気量の影響を調査した。

(1) 実験概要

1) アルカリ量

使用するアルカリ量はすべて Na_2Oeq で 1.2% とした。

2) 使用混和剤

混和剤として、A E 剤（天然樹脂酸塩系）を用いた。

3) 使用骨材

3 種類を用いる。

A 1 反応性骨材（輝石安山岩）

A 2 反応性骨材（サヌカイト質輝石安山岩）

A 3 反応性骨材（チャート）

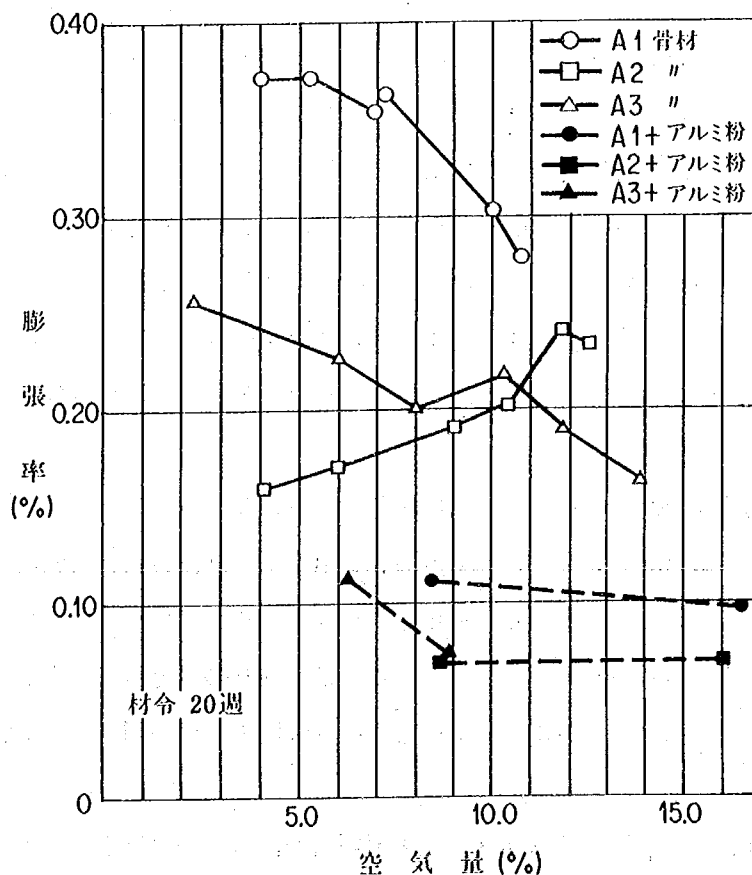


図-3.27 空気量と膨張量

4) 配 合

- ① セメント 600 g
- ② 骨 材 1350 g (ASTM粒度となるように粒度調整した。)

③ 単位水量

フロー値が180～190程度となるように決定した。

④ 添加アルカリ

NaOH水溶液を用いた。

⑤ 混和剤使用量

AE剤の使用量は試験練りにより、空気量が7%、9%、11%、13%となるように決める。試験練りの結果、セメント重量Cに対して、 $C \times 0.01\%$ 、 $C \times 0.02\%$ 、 $C \times 0.03\%$ 、 $C \times 0.045\%$ 、 $C \times 0.060\%$ と決定した。

なお、実際の練混ぜは、空気量測定も行うことから、2バッチ分一度に練った。

(2) 実験結果および考察

空気量と膨張量の関係を示したのが図-3.27である。A1骨材、A3骨材は、空気量の増加とともに膨張は減少していく傾向にある。A2骨材は空気量の増加とともに膨張も増加していく傾向にある。モルタル中の気泡は、ASRが起きた時、生成するシリカゲルの膨張圧力を緩和し、膨張量を低減する働きがあると考えられる。しかし、その効果も骨材により変化し、確実ではないということがわかった。また、効果があったとしても、最大で20%程度であり、不確実であり、あまり期待できないと考えられる。

図中、黒塗り記号は、アルミ粉を添加した時の膨張であるが、どの骨材においても今までの材令の範囲では良い抑制効果があると考えられる。AE剤と同じ空気量においてもその効果にはかなり差があり、アルミ粉の方が良い抑制効果があるといえる。これはアルミ粉により発生する気泡と、混和剤から混入する気泡の大きさの差や、アルミ粉が反応し、アルカリイオンを減少させる影響等考えられるが、今後は、低減効果について、無害化技術の検討と合わせ、検討していく必要があると考えられる。

3.2.6 拘束を受けたASR膨張の影響

これまでのASR被害構造物の例をみると、鉄筋量が多く拘束の大きいコンクリート構造物や、高い構造物の下の部分では、いわゆる無筋コンクリートでみられる亀甲状のひびわれとは異なるひびわれを生じ、しかもひびわれが比較的少ない。このことより、拘束されたコンクリートの膨張特性を把握することは、ASRの抑制等にもつながると考えられる。そこで、ここではASRのメカニズムを解明する研究の一環として、拘束されたモルタルの膨張特性および、そのときの膨張圧の把握を目的として試験を行った。

(1) 実験概要

用いた材料は、A1(輝石安山岩) A2(サヌカイト質輝石安山岩)の骨材とセメントである。モルタルバーの製作は「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」(以下モルタルバー法(案)と略す)および土木学会「膨張コンクリート設計施行指針(案)」の膨張材のモルタルによる

膨張性試験方法に準じた。モルタル中のアルカリ量は、NaOH溶液によって行い、セメントに対する $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ の重量比として、1.2、1.6、2.0、2.4%となるように調整した。モルタルバーは $4 \times 4 \times 14 \text{ cm}$ とし、その両端を金具により拘束した。拘束金具は図-3.28に示す仕様のもので、材質は腐食しないようにステンレスとした。拘束棒の有効径は、2.21、2.68、3.55、4.48 mmの4段階とし、拘束棒の両端は、長さ変化を測定できるように加工した。養生および長さ変化測定はモルタルバー法（案）に準じた。

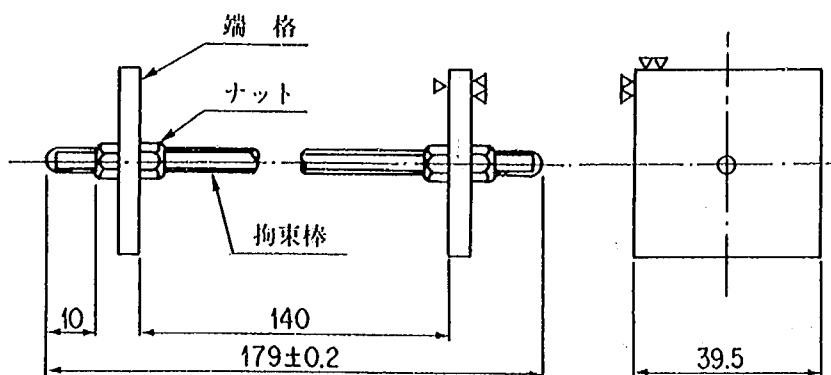


図-3.28 拘束具

(2) 実験結果および考察

拘束鋼材の断面積と膨張量の関係を図-3.29、3.30に示す。拘束の増加とともに、膨張量が減少している。この時、モルタルに生じる拘束による応力を表-3.6に示す。モルタルに生じる応力は、せいぜい数 kg/cm^2 程度であり、この結果より、橋脚の下部やPC構造物にASRによる著しいひびわれの少ない理由が推察される。図-3.31に膨張による仕事量を示す。A1骨材では、鋼材比の増加とともに仕事量が減少しているが、A2骨材ではほとんど変化がない。このことより、特にA1骨材では拘束による膨張抑制の効果が高いものと考えられる。

表-3.6 拘束棒から受けるモルタル応力度

骨材	拘束棒	鋼材比 (%)	材 令 (mm)	モルタル応力度(kg/cm^2)			
				アルカリ量 (%)			
				1.2	1.6	2.0	2.4
A1	H2.5	0.24	13	2.6	4.1	4.8	5.0
			20	2.7	4.2	4.8	4.9
	H3	0.35	13	2.4	4.6	5.2	5.8
			20	2.6	4.6	5.2	5.8
	H4	0.62	13	4.8	4.2	5.1	5.6
			20	3.1	4.3	5.1	5.6
	H5	0.99	13	3.4	4.5	5.3	5.3
			20	3.5	4.5	5.3	5.3
A2	H2.5	0.24	13	1.8	2.9	3.0	3.1
			20	2.1	3.4	3.6	3.8
	H3	0.35	13	2.0	3.3	3.4	3.5
			20	2.1	3.8	4.2	4.3
	H4	0.62	13	2.0	3.6	3.8	3.9
			20	2.4	4.0	4.3	4.5
	H5	0.99	13	2.7	4.1	4.3	4.5
			20	2.9	4.7	4.8	5.0

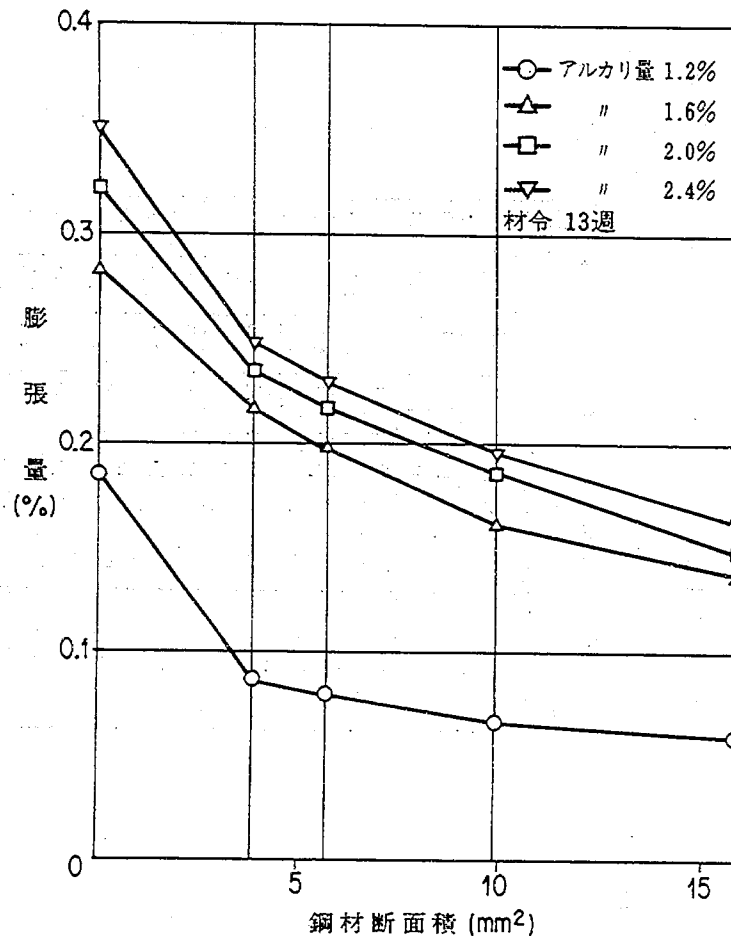


図- 3.29 拘束時の膨張量 (A1)

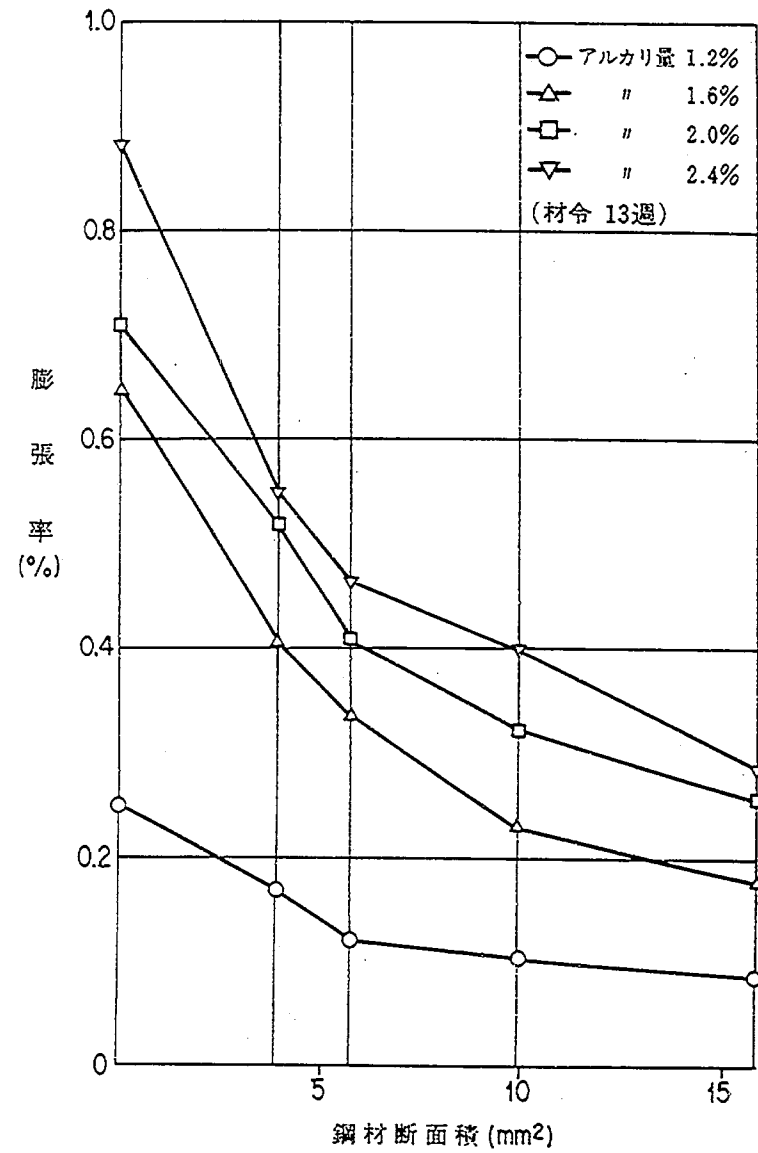


図- 3.30 拘束時の膨張量 (A2)

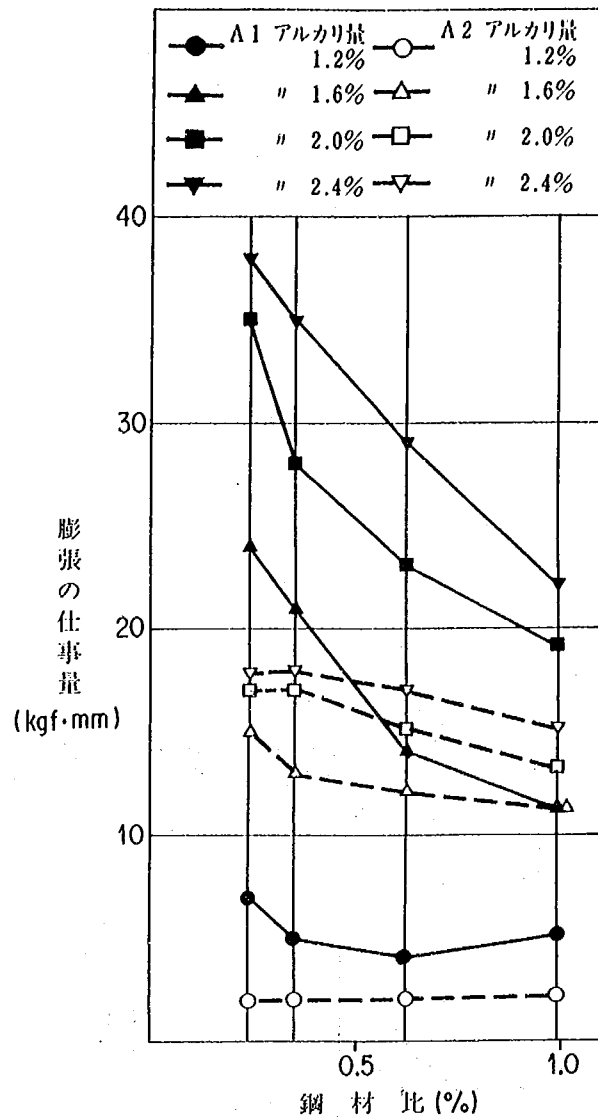


図- 3.31 膨張の仕事量と鋼材比

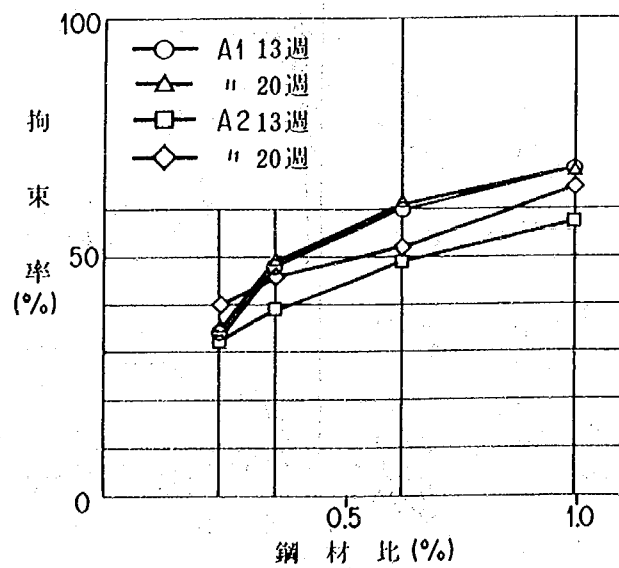


図- 3.32 拘束率と鋼材比

3.2.7. ASRに対する乾燥の影響

ASRは、骨材中のシリカとセメント中のアルカリ金属イオンが反応し、水ガラスを生成し、この水ガラスが吸水して膨張を生じる。このため反応が生ずる時点を、水ガラスが吸水する時点で、水の存在が大きく影響を及ぼす。既に、ASRモルタルバーの養生時の湿潤状態が、モルタルバーの膨張に大きく影響することは明らかである(図-2.2)。ここでは、ASR発生メカニズムを把握するため、また、試験の促進条件のひとつとして重要な意味をもつ要因を明らかにするために、乾燥のASRに対する影響について調査した。

(1) 実験概要

1年間モルタルバー法によって湿潤状態で測定を行ったモルタルバーを110℃で24hr乾燥させた後、20℃の水中に24hrつけ吸水させ、再び38℃の湿潤状態におき、長さ変化を測定した。骨材は、3.2.1で示し

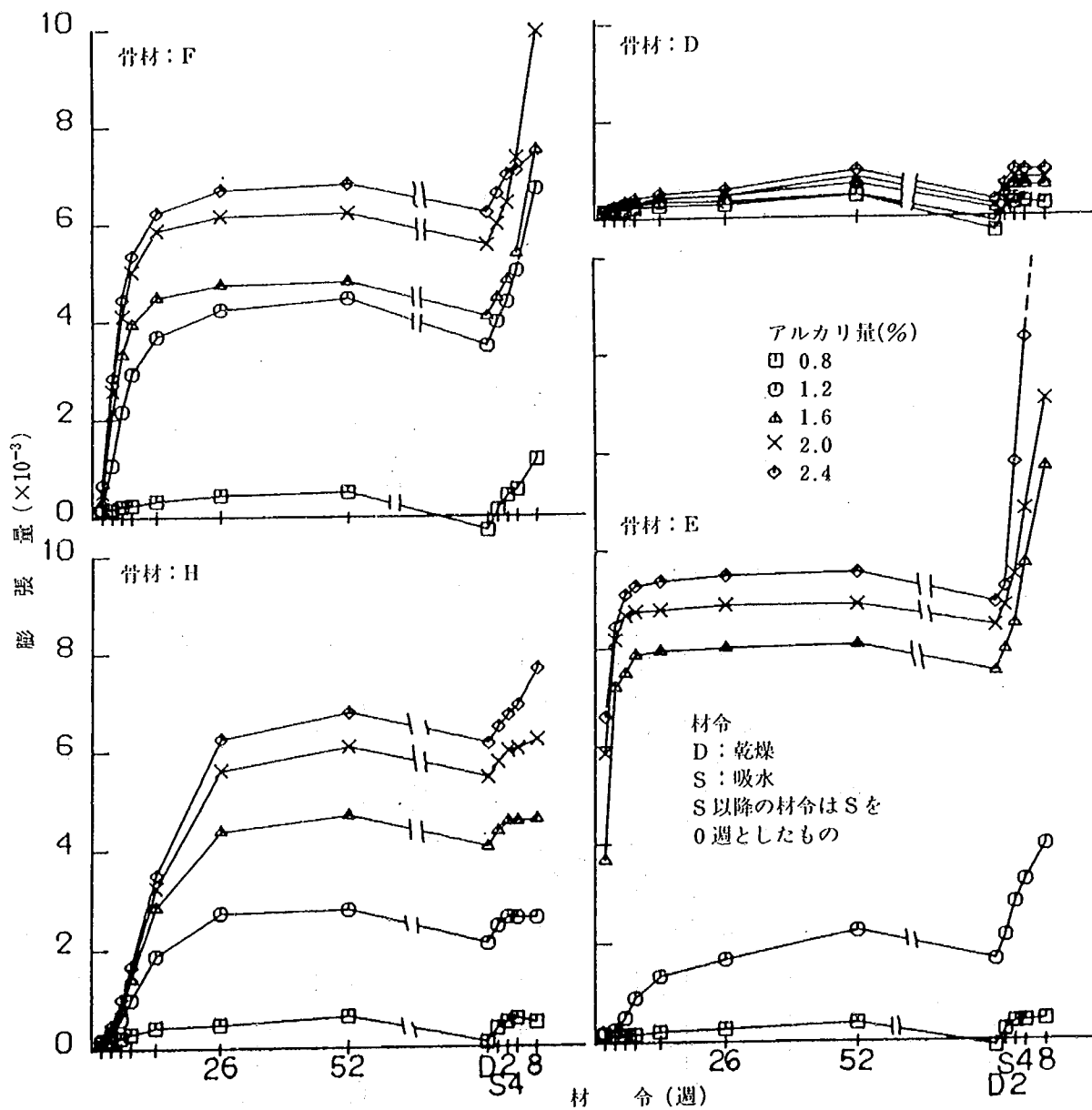


図-3.33 乾燥がASRモルタルバーの膨張に及ぼす影響

た反応性のあるサヌカイト質安山岩（骨材E）、安山岩（同F）、チャート（同H）および反応性のない砂岩（同D）である。セメント中のアルカリ量は0.8～2.4%まで0.4%きざみで変化させてある。

(2) 実験結果および考察

図-3.33にモルタル打設後1年までの膨張量の変化と、一度乾燥した後の膨張量の変化を示す。ここで乾燥後の材令は乾燥吸水後を0とした材令である。いずれの供試体でも乾燥後、1ヶ月までのデータしか得られていないが、反応性を有する骨材を用いた場合には、乾燥後再び、初期の膨張と類似した量、速度の膨張がみられるものが多い。安山岩を用いたモルタルバーでは、アルカリ量が0.5%のもので膨張が初期のものよりかえって大きい。チャートを用いたモルタルバーでは、今後の推移をみないとはっきりしたことはいえないが、アルカリ量が1.2～2.0%のものでは、乾燥後の膨張が1ヶ月で膨張が頭打ちになるような傾向もみられる。なお、サヌカイト質安山岩を用いたモルタルバーでアルカリ量が2.4%のものは、測定ゲージのスケールをオーバーしたため、測定不能となった。

以上の傾向は、ASRの防止や補修のうえで大きな意味をもつ。すなわち、もし、1度膨張したASR反応性骨材を含むコンクリートが再び膨張しないのであれば、補修は膨張が止ってから行うのがよいであろうし、もし、乾湿の繰り返し等で膨張が促進されるのであれば、補修はなるべく早く行うのがよい。この際両方の補修で用いる補修材料には異なった特性が要求されることになる。前者には、ひびわれをうめ、内部の鉄筋を保護する機能が第一に要求されるようである。後者には、ある程度のひびわれの増大に追従し、かつ、水分の出入りを遮断する機能が要求されよう。また、ASRの防止についても、前者では極力水の出入りが少なくなるようにする必要があるわけである。

3.2.8 ASRの外来塩分の影響

アルカリシリカ反応（ASR）に対するセメント中のアルカリ金属イオンの影響は、数多くの研究により次第に明らかにされてきており、これらの成果をもとに、試験方法やASR抑制手法が確立されつつある。一方、塩害発生地域等では、外来塩分の中の特にNaイオンがASRに影響するのではないかと懸念されている。このため、ここでは外来塩分のASRの影響に関する基礎データを得るための実験を行った。

(1) 実験概要

ASR反応のある安山岩質骨材2種と反応性のない硬質砂岩1種を用い、「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、セメント中のアルカリ量をNaOHで0.6%、0.8%、1.2%に変化させたモルタルバーを製作し、38℃で28日間養生させた。このモルタルバーを図-3.34のように、1/3～1/2の部分を、イオン交換水、CaCl₂ 19%溶液、NaCl 20%溶液につけ、38℃で養生し、

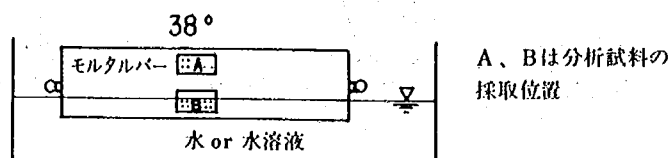


図-3.34 モルタルバー漬水状況

長さ変化を測定した。CaCl₂溶液はA S RにClイオンが影響するとの説があるため、確認のため、NaCl溶液と同じClイオン濃度となるよう調整し、試験したものである。なお、約4ヶ月の測定後、全モルタル中のNa、K、Clイオンの量(可溶性、不可溶性、骨材中のものを含む)をそれぞれの供試体のA、Bの位置で分析した。

(2) 実験結果及び考察

図-3.35に結果を示す。材令28日までの湿潤養生では、F骨材を用いアルカリ量1.2%のものだけが、0.2%前後の膨張量を示しているが、その他はほとんど膨張していない。28日以降に水中に漬けたものでは、水およびCaCl₂溶液ではほとんど膨張量に変化がないが、NaCl溶液に漬けたものでは28日以降膨張量が大きく増大していて、明らかにしみこんだNaイオンが影響していることがわかる。

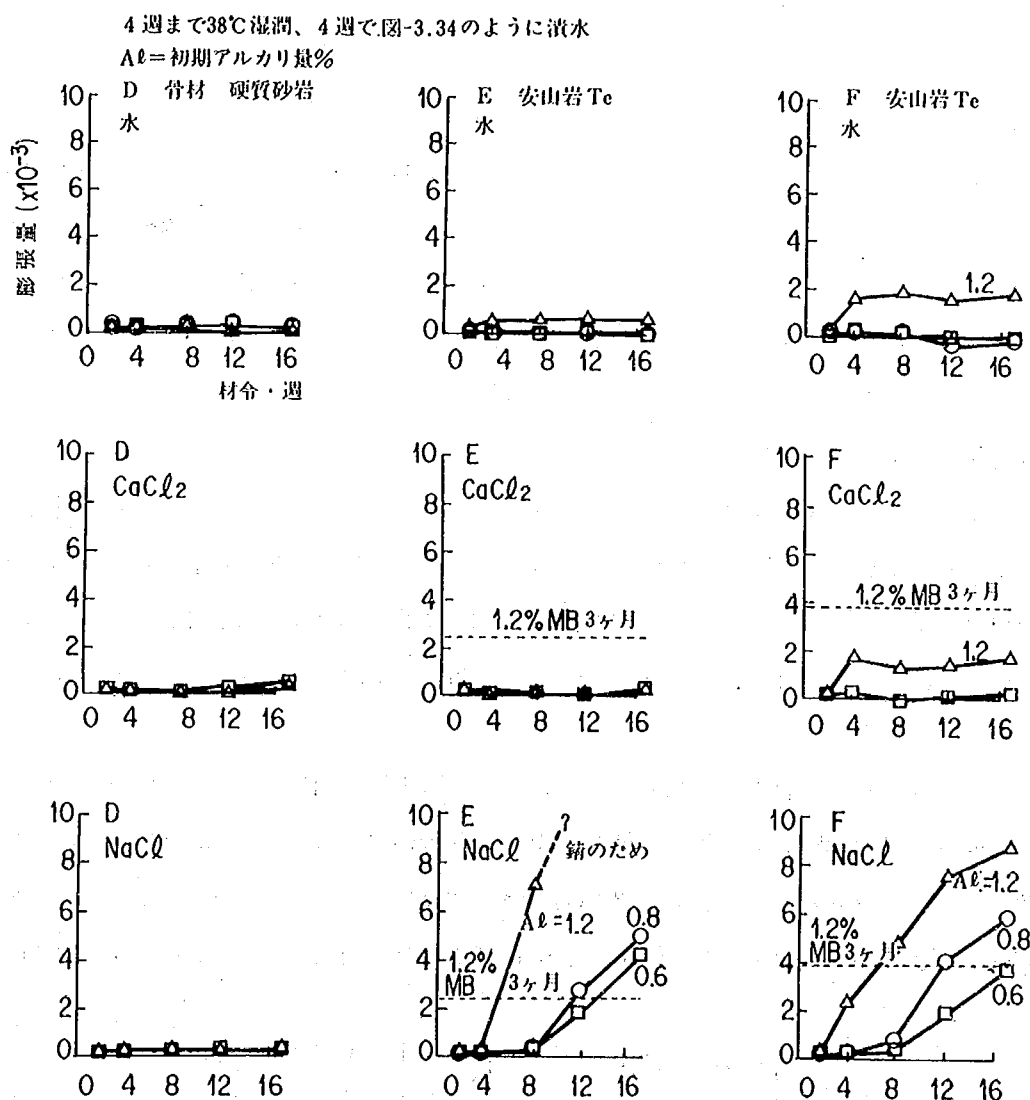


図-3.35 塩水溶液漬水モルタルバー (MB) の膨張量

図-3.36にモルタル中のNa、K、Clイオンの量を示す。Kイオンについては、A、Bの位置でほとんど変化がなく、濃縮も溶出もあまりないようである。しかし、特にD骨材では、セメントから来るKイオンの量よりかなり高い量のKがみられる。これは、骨材中のKと考えられる。Naイオンは、水およびCaCl₂溶液につけたものでは、A、Bの位置でかなり差がみられ、上部に濃縮しているようである。NaCl溶液に漬けたものでは、特にE骨材のA位置で濃度が高いようで、反応と関係があるものと考えられる。ClイオンはNaCl、CaCl₂溶液のどちらでもかなり高濃度になっている。

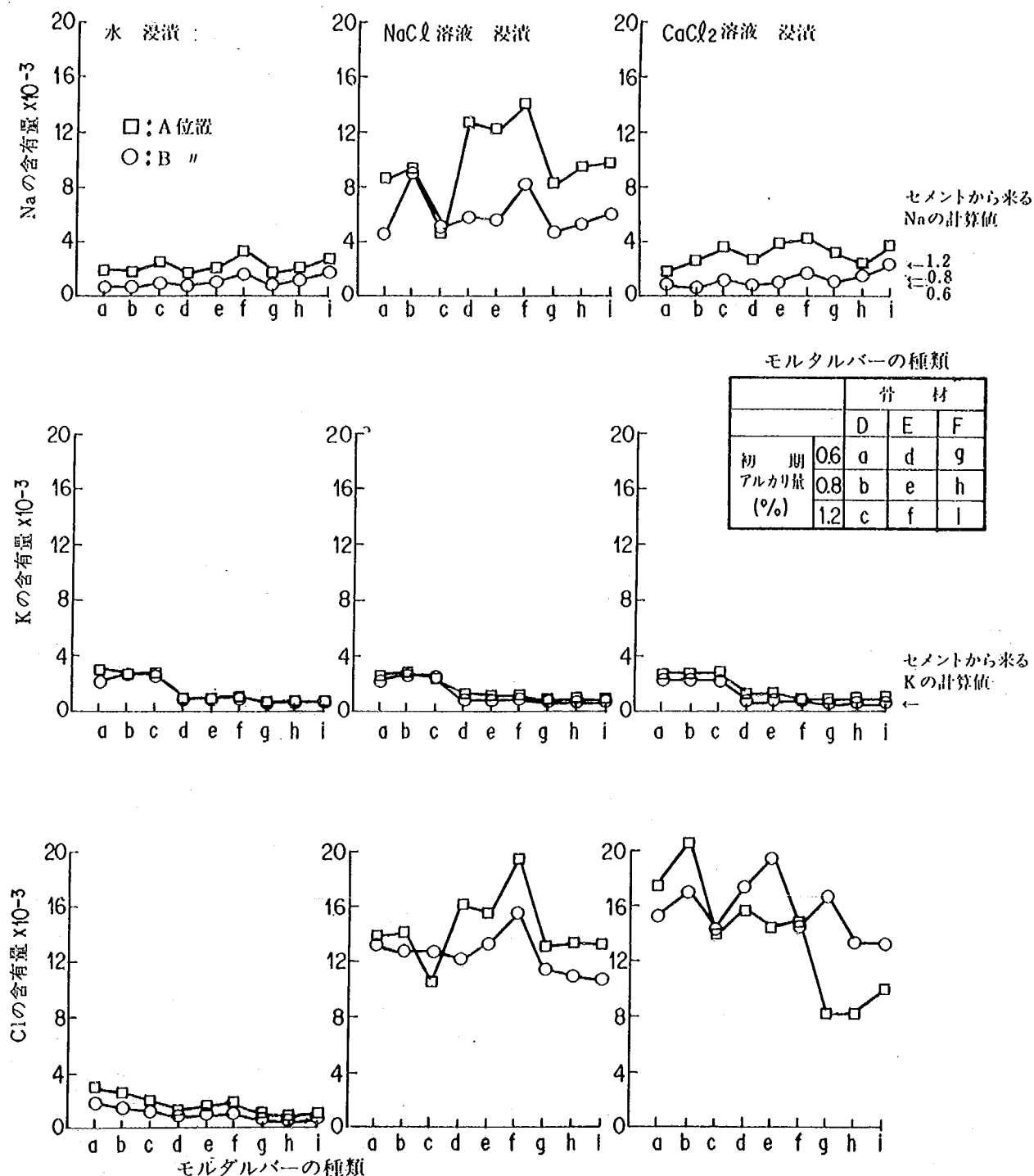


図-3.36 モルタルバー中のNa、K、Clの分析結果

3.2.2 で、同じモル数でも K は Na よりモルタルバーの膨張を増加させないことが判明しているが、今回の実験から K イオンは Na イオンよりモルタル内での移動が少ないことがわかり、これが、シリカとの反応の機会を低減させ、ひいては膨張がそれ程大きくならない原因のひとつとなっていると考えられる。

以上の実験より、外来の塩分中の Na は、ASR に影響し、Cl は無関係であることがわかったが、このような現象は寸法効果が非常に大きい。このため、寸法による影響を検討する必要がある。

3.3 コンクリートによる各種要因の検討

3.3.1 コンクリートバーによるアルカリシリカ反応の検討

ASRの発生メカニズムを知ることは、その試験方法あるいは促進試験方法を確立するうえで重要なことである。骨材のASR有害性を判定する試験法のひとつにモルタルバー法があり、これまで各種のASR関係の試験がモルタルバー法に準じた手法で行われている。この手法は骨材を細骨材として用いるものであり、このため、モルタルバー法で得られた、基礎的な諸特性に関するデータをそのままコンクリートへ適用することはむずかしく、有害な骨材を粗骨材あるいは細骨材としてコンクリートに用いた場合の性状を把握しておく必要がある。また、このことはモルタルではなくコンクリート自体による促進劣化試験方法の開発のための基礎資料を得るうえでも重要である。このため、ここでは代表的ASR骨材を用いて配合等により、コンクリートの膨張性がどのように変化するかを調査し、合わせてコンクリートバー法の手法を検討することを目的として調査した。

(1) 実験概要

用いた骨材の種類を表-3.7に示す。細骨材はすべて砕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。また、A1およびS1骨材については、ASRの特徴のひとつであるベ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。セメントは含まれるアルカリのNaとKのASRへの影響の差を極力小さくするために、なるべくアルカリ量の少ないものを用いることとし、アルカリ量0.65%のものを用い、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促進のため $38 \pm 2^\circ\text{C}$ の湿潤養生とし、所定の材令で長さ変化を測定し、コンクリート表面の観察を行った。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ン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-3.7 用いた骨材

記号	粗骨材岩種	記号	細骨材岩種	
A1	輝石安山岩 I	S1	輝石安山岩 I	反 応 性
A2	チャート	S2	チャート	
A3	輝石安山岩 II	S3	サヌカイト質定山岩	
A4	石灰岩	S4	硬質砂岩	無反応性

(2) 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

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%~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。これは細骨材に比較して、粗骨材表面で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。以上よりコンクリートバーにおけるASRによる有害な膨張量はほぼ0.05%以上と考えられる。

次にセメント中のアルカリ量と膨張量の関係を図-3.37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。今回の実験ではアルカリとしてNaOHを添加し促進養生しているため、膨

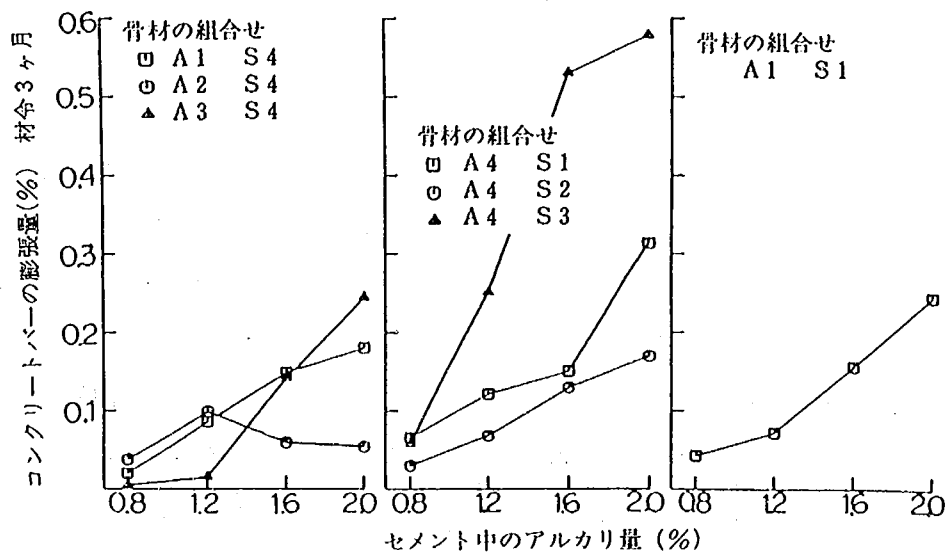


図- 3.37 セメント中のアルカリ量とコンクリートバーの膨張量

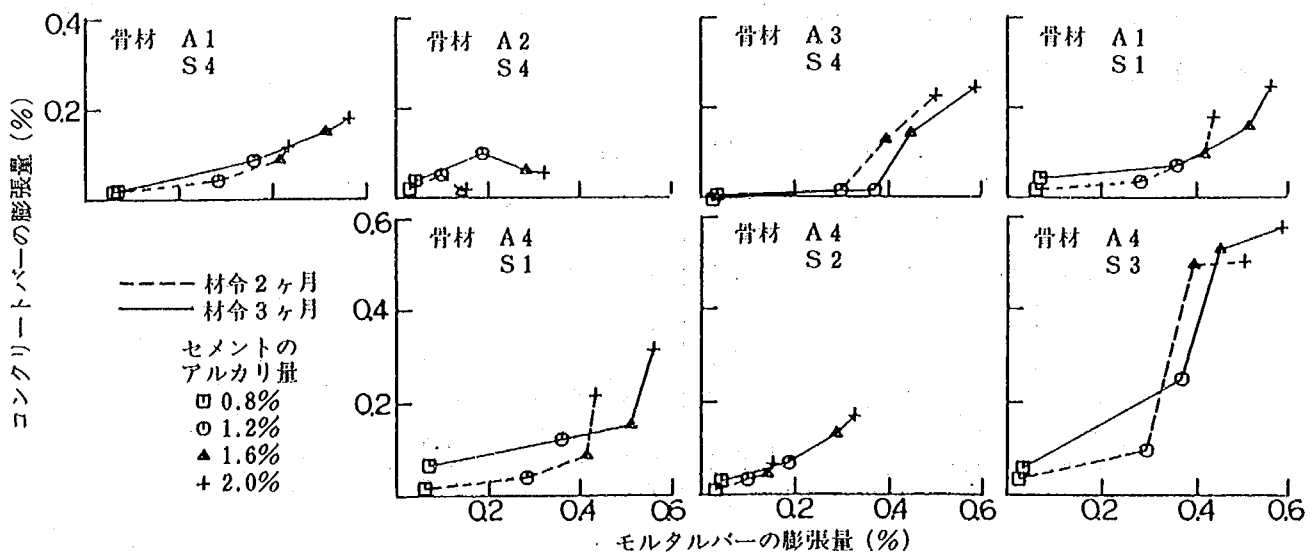


図- 3.38 モルタルバーの膨張量とコンクリートバーの膨張量

張しやすい条件であると考えられ、一般のセメントを用いる場合にはこの程度の単位アルカリ量であれば、膨張はかなり抑えられると考えられる。この図で輝石安山岩Ⅰを用いた場合には、これを細骨材のみ、粗骨材のみ、細粗骨材両方に用いたときの膨張量は、ほぼ似たような値となっている。一方、チャートではこれと異なった傾向となっており、粗骨材がチャートのものではアルカリ量が増加すると、かえって膨張量が少なくなっている。図-3.38 に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おり、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。ただし、コンクリートでの材令-膨張特性がモルタルのそれとは異なることも考えられるため、長期でのデータをとる必要がある。

図-3.39にコンクリートにおけるベシマムの例を示すが、この骨材では、粗骨材とも似たような傾向を示し、アルカリ量1.2%では、反応性骨材の混入率が60~80%で膨張量が最大となる。ここで示した実験は条件が非常に限られているため、今後より詳細な検討が必要と考えられる。

図-3.40に反応性細骨材を用いたときの、ウェットスクリーンしたモルタルの膨張量と、モルタルバーの膨張量の関係を示す。ここでは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。この結果より、コンクリートの骨材のうち、細骨材が反応性があると考えられる場合には、ウェットスクリーンしたモルタルを試験することによりコンクリートの有害性を判定できる可能性がある。

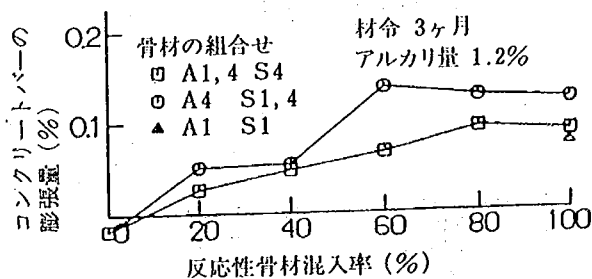


図-3.39 コンクリートバーにおけるベシマム特性

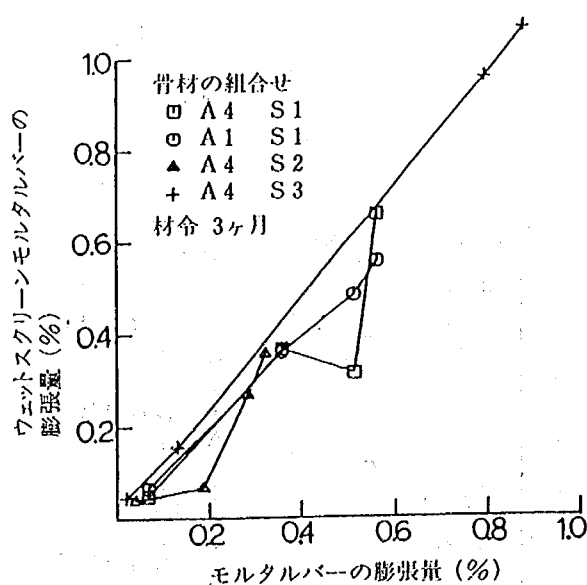


図-3.40 反応性細骨材を用いたコンクリートからウェットスクリーンしたモルタルバーの膨張量

ここに示した実験結果は比較的短期の材令のものであるが、コンクリート中のASR反応性の粗骨材は、モルタル中の細骨材に比較して緩慢に反応を生じることが考えられるため、今後より長期の測定結果を検討する必要がある。また、骨材種や要因等の条件を変化させた場合の検討も必要と考えられる。

3.3.2 コンクリートバーのASRに対する乾燥の影響

ASRは、骨材中のシリカとセメント中のアルカリ金属イオンが反応し、水ガラスを生成し、この水ガラスが吸水して膨張を生ずる。このため反応が生ずる時点を、水ガラスが吸水する時点で、水の存在が大きく影響をおよぼす。既に、ASRモルタルバーの養生時の湿潤状態が、モルタルバーの膨張に大きく影響することを明らかにした。ここでは、コンクリートバーの乾燥・湿潤実験を行った。コンクリートのASRのメカニズムの解明のほか、構造物の補修・補強の時期、工法の選定などにも重要である。

(1) 実験概要

実験に用いた供試体は、3.3.1で使用したものである。1年間測定を行ったコンクリートバーを乾燥させた後、20℃の水中に1週間つけ吸水させ、再び38℃の湿潤状態におき、長さ変化を測定した。

(2) 実験結果および考察

図-3.41にコンクリート打設後1年までの膨張率の変化と、一度乾燥した後の膨張率の変化を示す。ここで、乾燥後の材令は乾燥吸水後を0とした材令である。

打設後の膨張は、6ヶ月以後ほぼ収束に近づいているようである。

コンクリートバーの乾燥・吸水後の膨張はモルタルの場合(3.2.7)とは大きく異なり、非常に緩慢である。吸水すると吸水膨張し、その後の膨張はわずかであり、吸水前の膨張曲線の延長線上にあるようである。しかし、コンクリートバーは一般には反応がゆっくりであり、今後も測定を継続し、推移をみる必要がある。

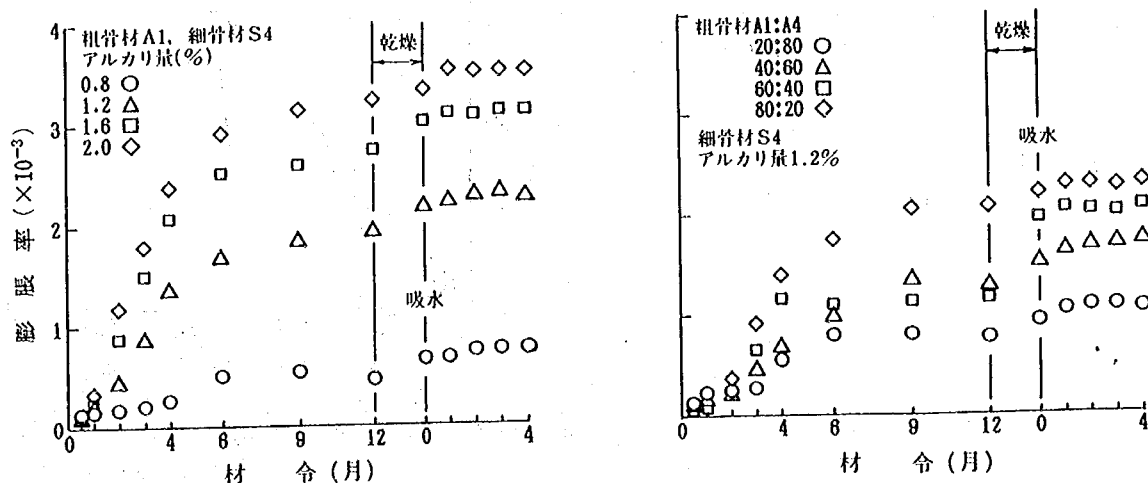


図-3.41 乾燥がASRコンクリートバーの膨張率におよぼす影響

3.3.3 コンクリートのアルカリシリカ反応促進劣化の検討

ASRによるコンクリートの劣化を防止するためには、骨材のASR反応性を調べることも重要であるが、一方、現場に搬入されたコンクリートそのものが問題ないかどうかをチェックすることも必要になるものと考えられる。このためには、一般の施工現場で行われているコンクリートの28日強度試験用供試体の採取と同時にASR判定用の供試体を作製し、28日強度試験時にASRについての判定も行えることが望ましい。このため、なるべく早急にASRの判定を行えるような手法を開発することを目的として、基礎データを得るための試験を実施した。

(1) 実験概要

ここでは、ASRの早期判定手法開発の可能性を調査するため、促進条件と測定項目を変化させた試験を行った。供試体は3.3.1で製作したA1-S4、A4-S1、A1-S1、A4-S4の粗骨材-細骨材の組合せで、セメント中のアルカリ量を変化させたコンクリートである。この供試体について以下に示す3種類の促進劣化試験を行った。

①促進劣化試験Ⅰ： $\phi 10 \times 20 \text{ cm}$ の円柱供試体を打設脱型後、 110°C で24 hr乾燥させ、その後図-3.42のように供試体下端を水または1 N-NaOH水溶液に浸漬し、ひびわれの観察を行った。試験条件を表-3.8に示す。

②促進劣化試験Ⅱ： $10 \times 10 \times 40 \text{ cm}$ の供試体を用いて、 60°C の湿潤条件下で養生し、長さ変化を測定する。

③促進劣化試験Ⅲ： $10 \times 10 \times 40 \text{ cm}$ の供試体を打設脱型後8日間 20°C で標準養生し、その後 80°C で24 hr乾燥させ、 20°C で48 hr吸水させることを3回繰り返し、長さ変化を測定した。

表-3.8 促進劣化試験Ⅰ試験条件

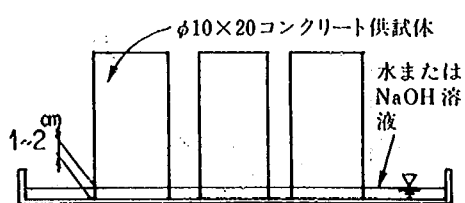


図-3.42 促進劣化試験Ⅰ浸せき方法

		浸 せ き 水	
		水	1N-NaOH溶液
試験温度 $^\circ\text{C}$	20	A 1	B 1
	38	A 2	B 2
	60	A 3	B 3

(2) 実験結果

①促進劣化試験Ⅰ

A1の試験では28日まででは、供試体にはほとんど変状は生じなかった。A2、A3では28日で一部にわずかな徴候がみられたが、これをコンクリートのASR反応性と結びつける程ではなかった。B1～3では、多くの供試体で、浸漬後2日程度できつ水下のコンクリートに茶褐色の変色が生じたり、白色の

付着物が付いたりした。しかし、この現象とA S R反応性とは明確な関連は認められなかった。28日程度になると、析出物やひびわれが生じるようになり、これらの変状は反応性の骨材を用いたものほど著しかった。より長期の材令では、反応性の骨材を用いたものでは、配合時のコンクリート中のアルカリ量に関係なく、ポップアウト等を生じ、変状が明確になった。このことより、NaOH溶液に長期に浸漬することは、骨材の反応性を調べていることに他ならないと考えられる。以上のことより、この手法のままでは促進試験としては使えないと考えられ、別途検討が必要と考えられる。

②促進劣化試験Ⅱ

図-3.43、3.44に60℃の湿潤条件下で養生した後の長さ変化と38℃の湿潤条件下で養生したもののその関係を示す。2ヶ月の結果でも3ヶ月の結果でも、60℃のものが反応が促進されていることが示されている。この結果を、促進判定に用いられないかどうかを検討したのが図-3.45、3.46である。この図から60℃の条件では、2週間では38℃3ヶ月の結果を推定するのは困難と考えられるが、1週間では、特にアルカリ量の高いところでは十分に推定できるものと考えられる。しかし、アルカリ量の低いところでは、判定は危険側になる可能性がある。

③促進劣化試験Ⅲ

図-3.47に乾燥湿潤を繰り返した場合の促進試験の結果を示す。A S Rは化学反応であり、高温で促進されと考えられ、現に促進劣化試験Ⅱでは、短期でかなりの長さ変化が生じているが、促進劣化試験Ⅲの条件では乾燥のため膨張に必要な水が十分でないためか、60℃2週間に比較しても、膨張量は小さい値となっている。

以上の結果より、ここで行った試験では60℃の湿潤養生が比較的好くA S R反応性を促進しており、促進試験方法として有望と考えられるが、この手法は供試体の製作が煩雑なため、より簡易な手法の検討が必要である。

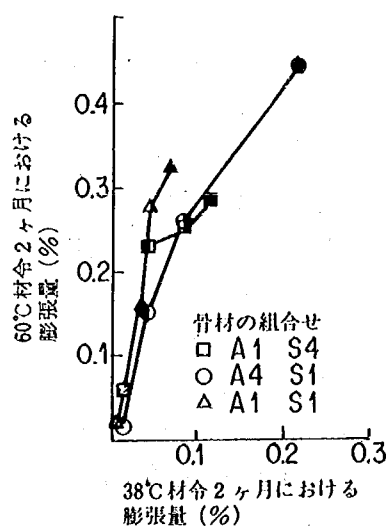


図-3.43 養生温度によるコンクリート
膨張量の比較

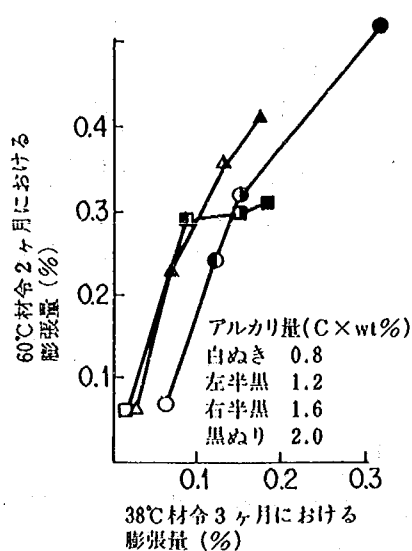


図-3.44 養生温度によるコンクリート
膨張量の比較

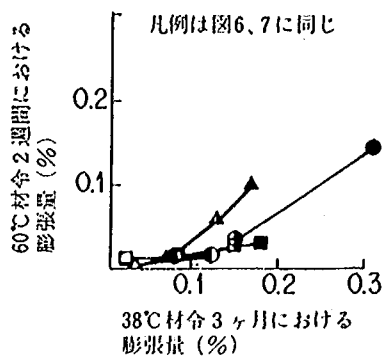


図- 3.45 コンクリートバー
促進膨張結果

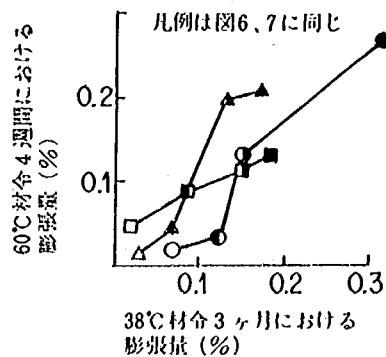


図- 3.46 コンクリートバー
促進膨張結果

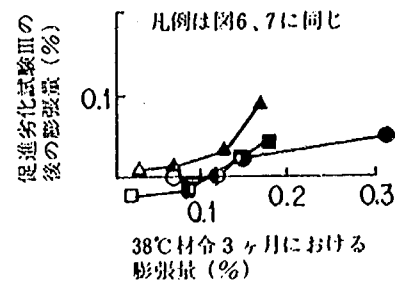


図- 3.47 促進劣化試験
Ⅲの結果

3.3.4 コンクリートのASRへの外来塩分の影響

3.2.8ではモルタルによる外来塩分の影響を調べた。しかし、その実験は、モルタルバーを20%NaCl溶液に浸漬するという過酷な条件下で行ったものであり、そのときは外来塩中のアルカリがASRに影響する可能性のあることを確認した。ところで、外来塩の影響はコンクリートの表面から塩分が浸透することにより生じるものであり、モルタルとは異なること、供試体の寸法効果の大きいことが考えられる。そのため、コンクリート供試体(φ10×20cm)による外来塩の影響を調べた。また、大型の供試体(φ30×60cm)についても実験を行った。

(1) 実験概要

表- 3.9に示すように、コンクリート供試体を作製して塩水中に浸漬し、コンタクトゲージによる長さ変化測定、ひびわれ状況観察を行った。(図- 3.48)

(2) 実験結果および考察

図- 3.49に高さ方向の膨張率を示す。全体にしかも高くなるほど収縮しており、乾燥収縮の影響と考えられる。しかし、2カ月、3カ月でその収縮量も小さくなってきており、今後の測定結果が重要と考えられる。また、各種イオンがどの程度の速度でコンクリートに浸透するか調べる必要がある。

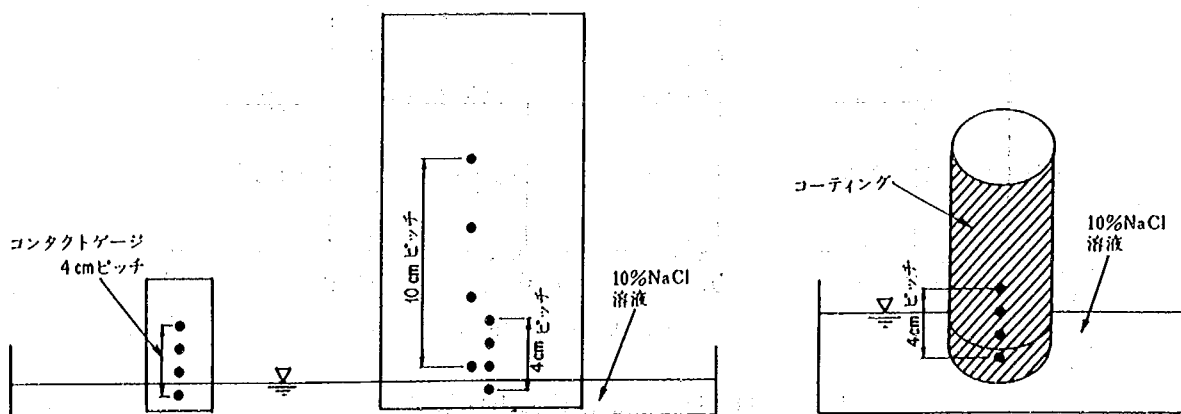


図- 3.48 塩水浸漬状況

表- 3.9 試験の組合せ

骨材 7Bかり(kg/m ³)	F	G	H	D
3	○ ●	○ ●	○ ●	○ ●
5	◎ △ ●	◎	◎	◎ △ ●
7	○ △ ●	○	○	○ △ ●
高炉	○ ●	○	○	○ ●

- φ10×20 40℃ 塩分10%
 ◎ φ10×20, φ30×60 40℃ 塩分10%
 △ φ10×20 20℃ 塩分10%
 △ φ10×20 40℃ 塩分 3%
 ● イオン定量分析

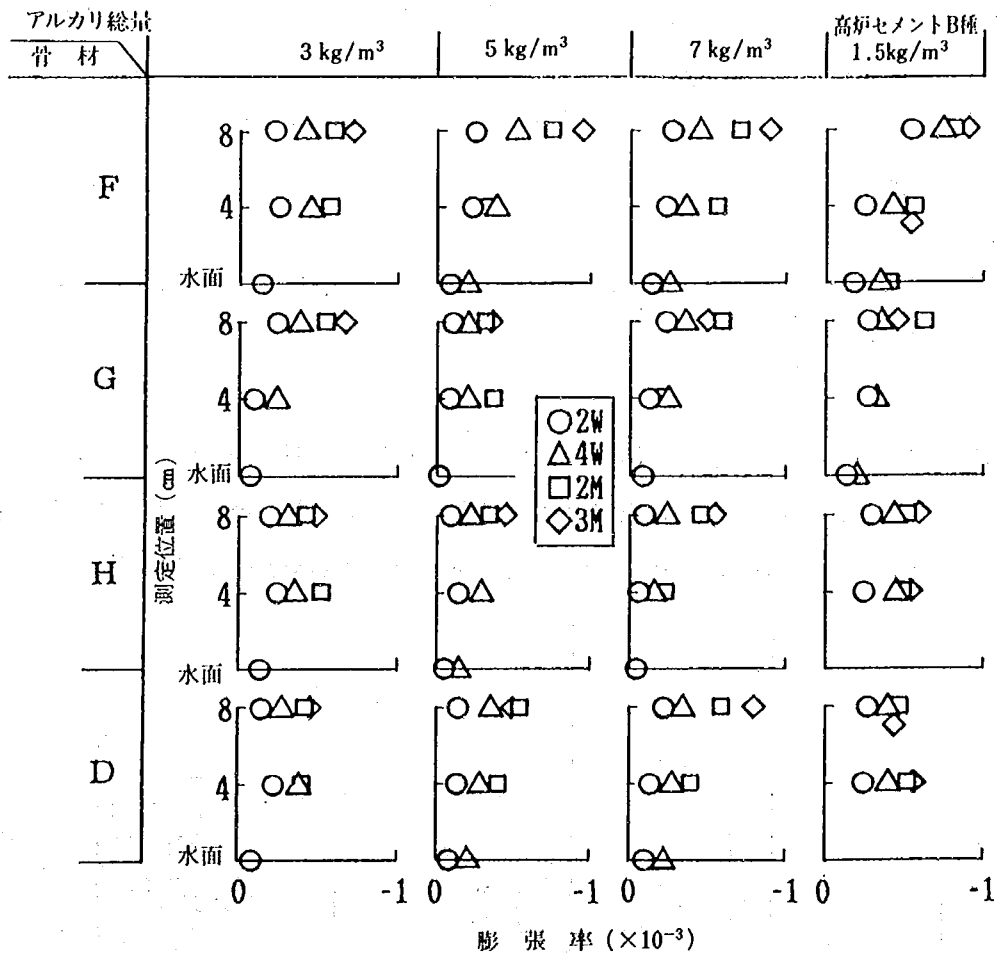


図- 3.49 材令, 測定位置と膨張率

3.4 まとめ

アルカリ骨材反応の基本的な反応要因である各種アルカリイオンと骨材、岩種の反応をはじめ、コンクリート構造物の受ける各種要因実験により、材料の選定、構造形式、環境などの影響によりASRによる膨張の抑制や促進に影響することがわかった。これらは抑制対策を立てるうえでおいに参考になるものと考えられる。既設構造物では被害予測、補修・補強方法の判定材料に、新設構造物ではコンクリートの配合や構造形式の選定、環境条件に応じた対策が必要と考えられる。

第4章 アルカリシリカ反応の試験方法に関する検討

4.1 アルカリシリカ反応の試験方法の位置付けと問題点

アルカリシリカ反応の試験としては、ASTM C 289「骨材の潜在反応性試験方法（化学法）」、ASTM C 227「セメント骨材の組合せによる潜在アルカリ反応性試験方法（モルタルバー法）」が良く知られており、反応性骨材の判定に使われている。また、諸外国でもこの試験を基に試験方法が規格・提案されている。この他、岩石学的試験方法やコンクリート供試体を用いた試験、化学的手法と岩石学的手法を複合化した複合試験などがあげられる。試験方法の位置付けはおおむね図-4.1に示す形をとっていて、将来的にはそれぞれの間には提案されている簡易試験法がはいることとなるであろうが、現在のところ最終的な判定はモルタルバー法に依存されている。

しかし、このモルタルバー法にも問題があり、反応速度の緩やかな岩石（骨材）の場合は、材令6ヶ月の判定では短すぎるといわれている一方で、判定に要する時間が長すぎるともいわれている。また、試験方法自体あまり再現性が良くないともいわれており、ペシマム現象という重要な問題点も残されている。そのため、この欠点を補う促進試験法も提案されてはいるもののすべての欠点を補える試験方法でなく、モルタルバー法の替わりとなりえる試験方法でもない。

他方、化学法は比較的試験期間が短いという利点とASR化学的に再現しうる試験方法であろうが、試験条件の厳しさから、モルタルバー法で無害と判定される骨材を有害と判定する場合がある。

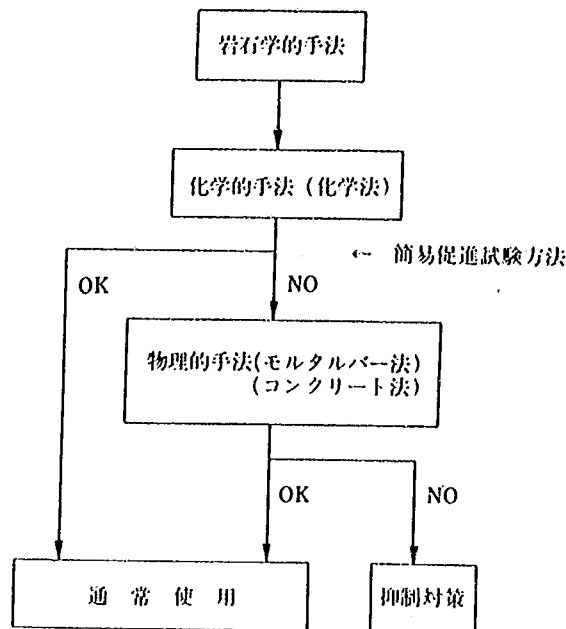
一番重要なことは、ASRは条件に多く依存するため、これら試験方法によって骨材が「アルカリ反応性骨材」あるいは「無害骨材」として判定されることである。それは、判定された骨材は必ずしも判定どおりの結果にはならないであろうし、実際には実害のある骨材との関係を直接的な方法によって調査した上で、総合的に判定されるべきである。

にもかかわらず、モルタルバー法が多く行われている背景には、実害のある骨材とはいっても実際には使われる条件によって左右され、また現在提案されている試験方法のうちモルタルバー法が最も直接的な方法に近いためであろう。

我が国でアルカリシリカ反応によるコンクリート構造物の劣化が発見されてから、アルカリ反応性骨材を判定する試験方法が求められた。このため建設省では国内で先駆けて昭和61年6月に建設省暫定案化学法、モルタルバー法を省内に通達した。

この第4章では建設省暫定案モルタルバー法の見直しをするにあたって行われた検討の結果について暫定案モルタルバー法提案時の資料も含め新たに提案するモルタルバー法の修正案について解説するとともに、モルタルバー法より早期に、またより簡易に試験できる方法を提案するものである。

なお、モルタルバー法修正案は巻末資料に掲載している。



図－ 4.1 試験方法の位置付け

4.2 モルタルバー法の検討

ここでは、建設省暫定案モルタルバー法の見直しをするにあたって行われた検討の結果について暫定案モルタルバー法提案時の資料も含め、新たに提案する修正案モルタルバー法について解説する。

4.2.1 適用範囲

現在、骨材のアルカリ骨材反応性を判定する方法は我が国独自のものはなく、米国のASTM規格の化学法とモルタルバー法を準用しているのが現状である。ASTM規格のモルタルバー法を行おうとすると、必要な機器をすべて新たに揃える必要が生じるため、我が国の実情に合った試験方法とする必要があった。アルカリシリカ反応は骨材とセメントペーストとの境界面で起きる反応であるため、本来であれば骨材の試験もコンクリートとして反応試験を行なうべきであろうが、コンクリートとして試験を行なうには試験要因の複雑さ、スペース、設備、労力といった点で多くの問題を解決しなければならない。このために、1986年より簡易な試験方法としてモルタルバー法を提案した。しかし、その後の調査の結果、新たな知見や暫定案についての改良案が提案されたのでモルタルバー法の修正を行う。

この試験方法により、膨張を生ずるものは必ずしもアルカリシリカ反応によるものだけではないと考えられるが、我が国ではアルカリシリカ反応がほとんどであるのでアルカリシリカ反応試験とした。

アルカリシリカ反応には岩種によってベシムム量が存在するので本試験で無害となったものでも他の骨材と混合使用する場合には混合骨材について反応性試験を行って判断するのがよい。

本試験で有害となっても必ずしもアルカリシリカ反応を生ずる訳ではなく、コンクリート中のアルカリ総量を 3 Kg/m^3 以内におさえる等の対策をほどこして使用すればアルカリシリカ反応は防止できるのである。

4.2.2 試験用器具

試験用器具は、一般的なJISの器具を活用できるように供試体寸法 $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}$ とした。図-4.2は供試体寸法の違いによる膨張量の影響を調べたものである。本供試体は、ASTM規格の $1 \times 1 \times 11 \frac{1}{4} \text{ in}$ に比べ、膨張量が大きく、安全サイドの判定になることがわかる。しかし、本試験の型枠はJISセメント試験用の型枠端板にプラグをセットする孔をあけることとなるため、モルタルの締固め時にプラグが脱落しないように開放側に空気ぬきの小孔を設けるなど注意しなければならない。

ゲージプラグは市販のものは長さ等の規格が統一していないのでゲージプラグの長さによって図-4.3に示す有効ゲージ長（L：ゲージプラグ内側端面間の距離）が異なることがある。従って事前に有効ゲージ長を測定しておく必要がある。

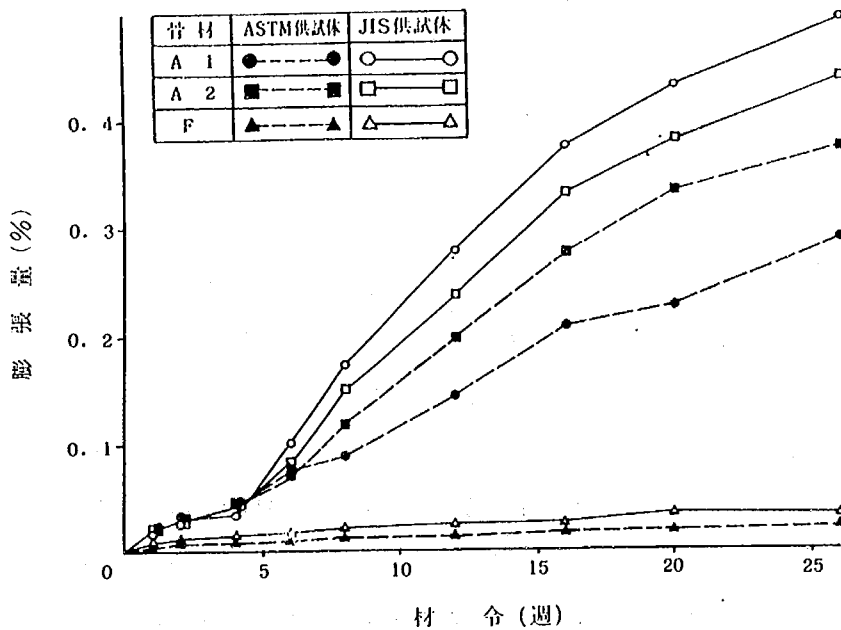


図-4.2 供試体寸法の違いによる膨張量への影響

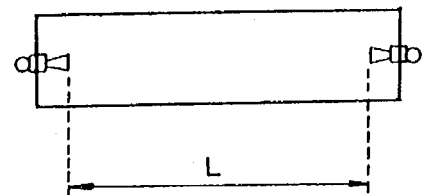
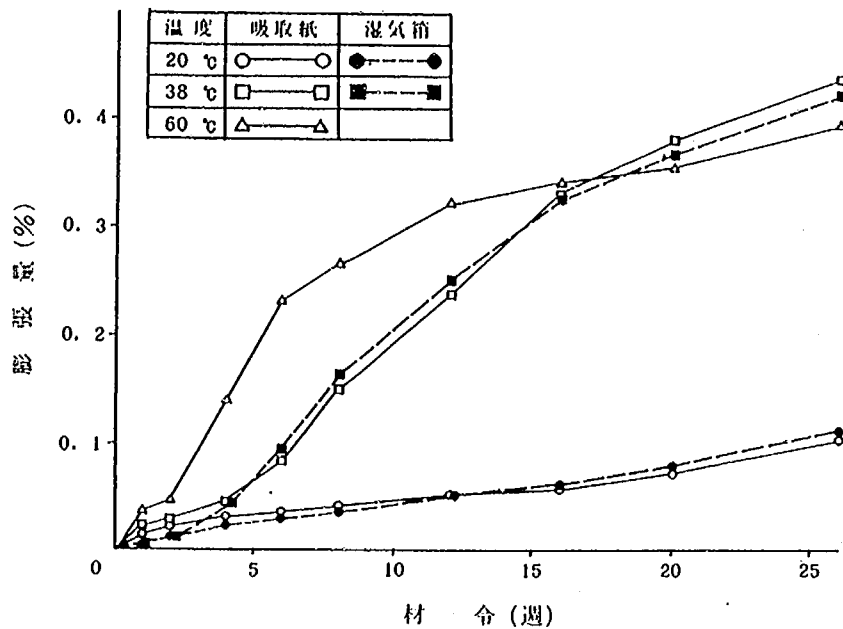


図-4.3 有効ゲージ長

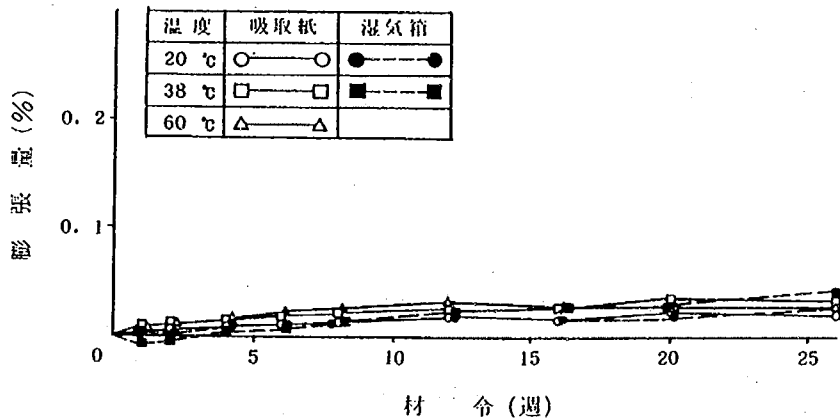
4.2.3 温度と湿度

成形室と材料の温度および測定室は、一般のコンクリートの試験と同様に、 $20 \pm 3^\circ \text{C}$ に保たなければならないとした。貯蔵容器の中の相対湿度は、モルタルバーの膨張に大きな影響を与えるため、100%になるべく近くなるようにする。この湿度を管理する方法については4.2.6 養生および測定で述べる。

供試体貯蔵温度については図-4.4に示したような関係が得られている。ここで使用した骨材では温度 40°C 以上であれば膨張を示しているが、材令6ヶ月での温度 40°C と 60°C の膨張量には差が見られない。但し、温度 60°C では若材令での膨張速度は速くなる結果となっている。従って、作業の行いやすい温度とすることや、ASTMでは $37.8 \pm 1.7^\circ \text{C}$ ($100 \pm 3^\circ \text{F}$)であるため、それに近い値として貯蔵温度を摂氏で $40 \pm 2^\circ \text{C}$ とした。



a) A2 骨材



b) F 骨材

図-4.4 養生温度の違いによる膨張量への影響

4.2.4 材 料

(1) 骨材の準備および粒度調整

骨材の粒度および粒形は骨材の反応に影響するものと考えられるが、粉砕機によって粒形を調整することは容易ではない。そこで粒度だけは表-4.1に示すものに規定した。しかしながら図-4.5に示すように、細骨材の粒度が、土木学会コンクリート標準示方書に示される細骨材の粒度分布内におさまるようにふるい分けられていれば、膨張にはそれほど差が生じていない。この結果から材料の量等の関係で表-4.1に示す粒度が、どうしても得られない場合には、土木学会コンクリート標準示方書に示す細骨材の粒度分布内に納まるように調整し、その旨を報告書に記せばよいものとした。なお、ASTMの粒度分布(表-4.1)に調整された砂と土木学会コンクリート標準示方書に示す細骨材の粒度分の関係は図-4.6のような分布となる。

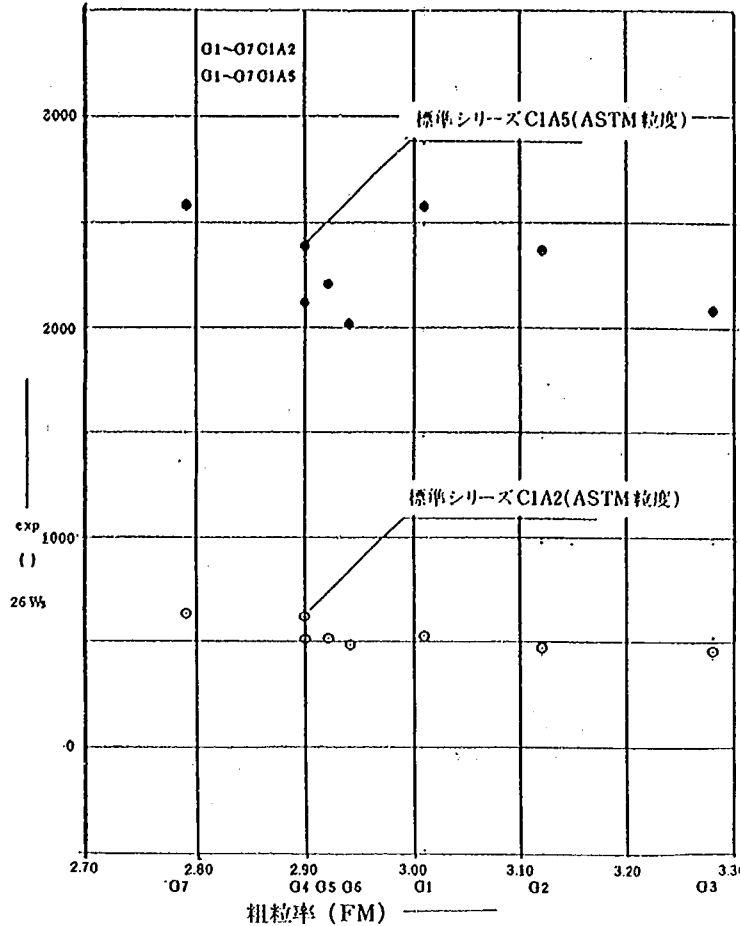


図-4.5 砂粗粒率 (FM) と 26 ws 時における膨張量の関係

表-4.1 細骨材の粒度分布

ふるい呼び寸法		質 量 百分率 (%)
通 過	残 留	
4,760 μm	2,380 μm	10
2,380 μm	1,190 μm	25
1,190 μm	590 μm	25
590 μm	297 μm	25
297 μm	149 μm	15

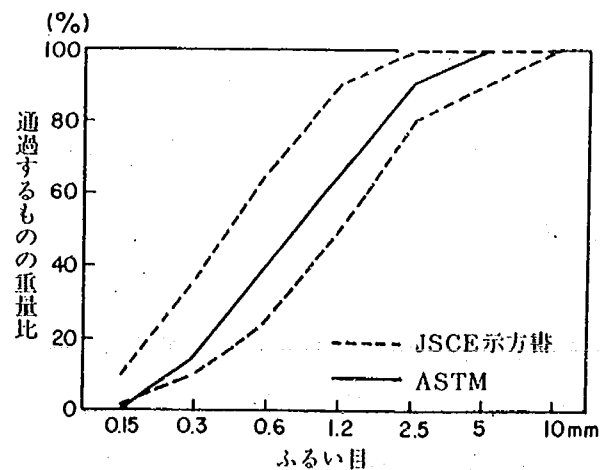


図-4.6 粒度分布

土木学会コンクリート標準示方書に示す粒度分布にも満足しない砂は、必ず混合砂として使用されるので、無害の砂もしくは混合することがわかっている粒度の異なる砂を混ぜて粒度を合わせて試験する。やむを得ない場合は、その粒度で行い、結果に粒度が合っていない旨記することとした。

(2) セメント

セメントは暫定案モルタルバー法では JIS R 5210 に規定される普通ポルトランドセメント低アルカリ形としていたため、通常市販されている低アルカリセメントでよいものとしていた。しかし、図-4.7 に示すように、試験に用いるセメントの名柄によって膨張量が増減することや K_2O と Na_2O の換算係数が必ずしも等価でないという意見、セメントのアルカリ量は高い方がよいとする考え方もあるので、試験に用いるセメントは、アルカリ量や Na^+ と K^+ の構成比をなるべく一定にすることが必要と考えられる。現在、我国で使用されているセメントのアルカリ量の平均は $R_2O=0.65\%$ 、 Na_2O と K_2O の比の平均は 1 : 2 程度であるので、とりあえず試験に使用するセメントはこれらの実態に合わせたものとし、将来販売体制が整えば試験用のセメントを統一するのが望ましいと考えられる。

【参考：骨材の調整方法】

1. 粗骨材

- (1) 縮分した試料を絶乾状態とする。
- (2) $4760\mu m$ の網ふるいでふるい、通過分を除去する。
- (3) 縮分を小型ジョークラッシャーで破碎し、 $4760\mu m$ 網ふるいでふるう。残分はさらにジョークラッシャーで破碎してから、 $4760\mu m$ の網ふるいでふるう。この操作を繰り返して $4760\mu m$ の網ふるいを全通させる。
- (4) この通過分を $2380\mu m$ の網ふるいでふるい、残分の中から $4760\mu m \sim 2380\mu m$ 粒度試料を分取する。
- (5) 分取した残りの試料をさらに小型ジョークラッシャーや 2.7^{*} に規定する粉砕機で破碎し、 $2380\mu m$ の網ふるいでふるう。この操作を繰り返して $2380\mu m$ の網ふるいを全通させる。
- (6) この通過分を $1190\mu m$ の網ふるいでふるい、残分の中から $2380 \sim 1190\mu m$ 粒度試料を分取する。
- (7) 分取した残りの試料は再び 2.7^{*} に規定する粉砕機で破碎し、破碎とふるい分けを繰り返し、 $1190\mu m$ 網ふるいを全通させる。この操作を $590\mu m$ 、 $297\mu m$ 及び $149\mu m$ の各網ふるいについて繰り返し、各々の粒度試料を分取する。
- (8) 粉砕機の刃先の間隔は各粒度に応じて調整し、必要以上に小さくしてはならない。また、粉砕機の連続した 2 度破碎、3 度破碎を行ってはならず、必ず、その間にふるい分けを行って残分だけを破碎する。
- (9) 分級した各粒度試料は、各寸法のふるいに入れ、水で十分に洗浄し、骨材に付着したごみや微粒子を除去する。

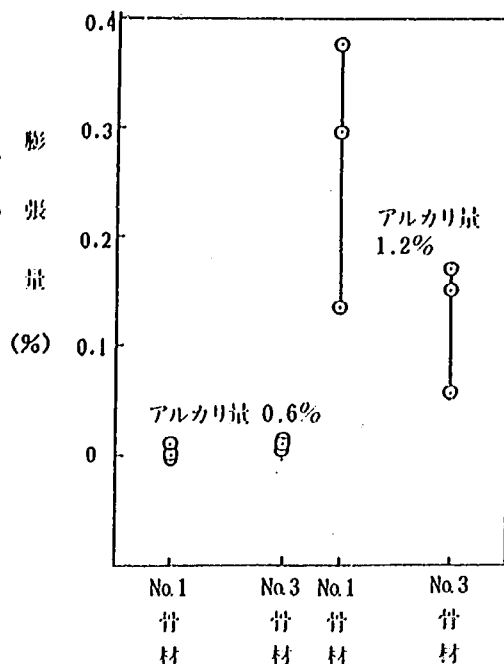


図-4.7 セメント名柄による影響

* 巻末資料、モルタルバー法修正案の番号

- (10) 洗浄後の各粒度試料は水を切ってから乾燥に入れ 105 ± 5 °C で一定重量になるまで乾燥する。
- (11) 乾燥後の各粒度試料は、直ちに使用しない場合には、清潔な気密容器に入れて別々に保管する。

2. 細骨材

- (1) 縮分した試料を絶乾状態とする。
- (2) $4760 \mu\text{m}$ の網ふるいでふるい、通過分を除去する。
- (3) この通過分を $2380 \mu\text{m}$ の網ふるいでふるい、残分の中から $4760 \sim 2380 \mu\text{m}$ の粒度試料を分取する（余剰の残分は捨ててもよい）。
- (4) この通過分を $1190 \mu\text{m}$ の網ふるいでふるい、残分の中から $2380 \sim 1190 \mu\text{m}$ の粒度試料を分取する（余剰の残分は捨ててもよい）。
- (5) 以下同様にして、この操作を $594 \mu\text{m}$ 、 $297 \mu\text{m}$ 及び $149 \mu\text{m}$ の各網ふるいについて繰り返し、それぞれの粒度試料を分取する。
- (6) 粗粒、例えば $4760 \sim 2380 \mu\text{m}$ の粒度試料が不足するときは、 $4760 \mu\text{m}$ の網ふるい残分を用いて粗骨材の調整方法によって粒度試料を作る。
- (7) 細粒が不足するときは、上位粒度試料の余剰残分を粗骨材の調整方法によって粉砕して作る。
- (8) 水洗い、乾燥及び保管は、粗骨材の場合と同様とする。

3. 粗骨材と細骨材とが同じ産地の碎石、砕砂の場合は、細骨材について試験を行なうだけでよい。

4. $297 \mu\text{m}$ 及び $149 \mu\text{m}$ のふるい分けには、ロータップシェーカーを用いるのがよい。

各種の岩種から構成されている川砂利等の粗骨材は、できるだけ使用する時と同じ状態の混合比で破碎して試料の砂とすることが大切である。

4.2.5 供試体（モルタルバー）の作り方

(1) 供試体の数

供試体の本数は同一のバッチから3本を製作するようにする。ここで供試体の本数を3本としたのは、本試験は比較的結果のばらつきが大きくなりやすい傾向にあるため、本来であれば本数が多い方が精度等はよくなるが、型枠の制約やコンクリートの他の試験においても3本によるデータ処理手法が一般となっていることなどを考慮して、このように定めた。

(2) モルタルの配合について

ASTM法では水セメント比は決められておらず、フロー率で水量を決定しているが、ここで水セメント比50%としたのは、図-4.8の結果から水セメント比40~60%の範囲ではモルタルバーの膨張量にあまり差がみられず、また水セメント比を50%とすると一般に用いられているコンクリートの水セメント比に近いものとなるためである。さらに、ほとんどすべての骨材についてモルタルバーの製作が可能となることによる。

セメント中のアルカリ量を1.2%としたのは、図-4.9に示すようにこれまで我が国で使用されたセメント中のアルカリ量の最大値が約1.2%であったこと、およびこれまでのモルタル試験から、こ

の程度のアリカリ量が骨材の反応性をチェックするのに適当と判断されたからである。

供試体の製作は JIS R 5201 に準じたものである。モルタルの練混ぜは、水に添加した NaOH の影響等を考慮した順序とした。

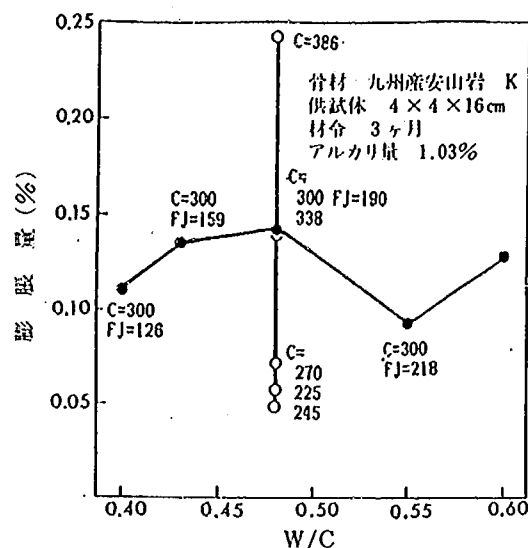


図- 4. 8 水セメント比の影響

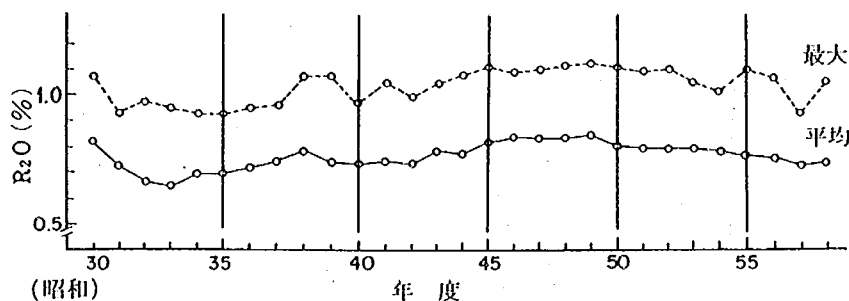


図- 4. 9 普通ポルトランドセメントのアリカリ量 (R₂O) の推移^{4.1)}

【参考：アリカリ量の調整】

セメント中のアリカリには Na₂O と K₂O があるがモル数をあわせることにより当量換算している。

Na₂O の分子量 30.99, K₂O の分子量 47.10

原子量 = Na : 22.99 K : 39.10 O : 16.00 H : 1.01

このため Na₂O と同重量の K₂O はモル数としては $30.99/47.10 = 0.658$ 倍となる。Na₂O_{eq} が 0.5 % のセメント 600g を Na₂O_{eq} が 1.2 % のセメントとするには

$600 \times (1.20 - 0.50) / 100 = 4.20\text{g}$ の Na₂O が必要

これと等量の NaOH は $4.20 \times \text{NaOH} / (\text{Na}_2\text{O} / 2) = 4.20 \times 40.00 / 30.99 = 5.42$

5.42g の NaOH は 0.136 規定。よって 1 規定の NaOH 水溶液を用いるとすれば練り混ぜ水のうち 136ml を NaOH 水溶液におきかえれば良い。

正確に NaOH を加えるには、あらかじめ NaOH 溶液を作り滴定により濃度を調べておき、練り混ぜ水に混合する量を計算するのがよい。

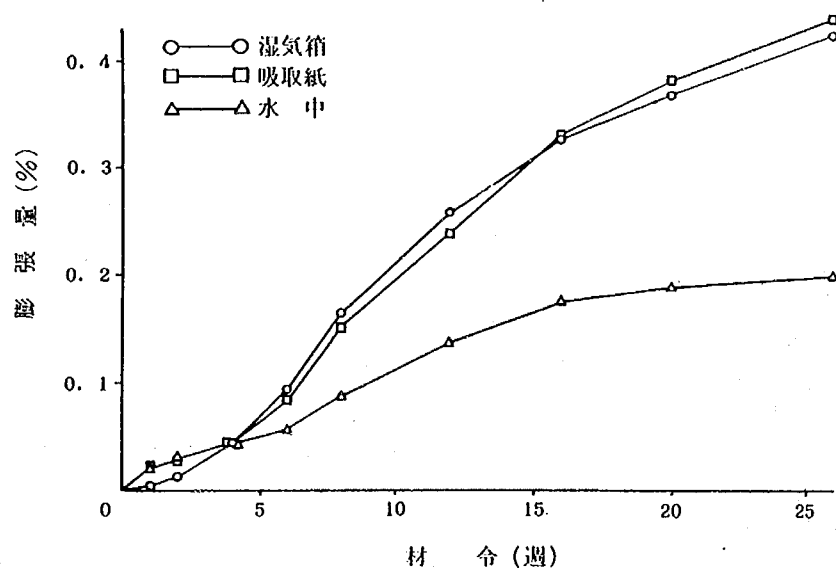
4.2.6 養生及び測定

暫定案では $RH \geq 95\%$ とするための方法として2種類の方法を提案した。それは、図-4.10に示すように両者の方法にはモルタルバー膨張量の明確な差がないために、いずれの方法を採用してもよいこととした。しかし、95%以上の高湿度はそれを測定するのにもむずかしいことや、湿度の低下が結果に大きく影響することから、湿度を管理する方法として供試体表面を吸収紙で巻く紙巻き法を推奨する。また、他の方法によって試験を行う場合は湿度が十分保つ方法を厳しく規定した。

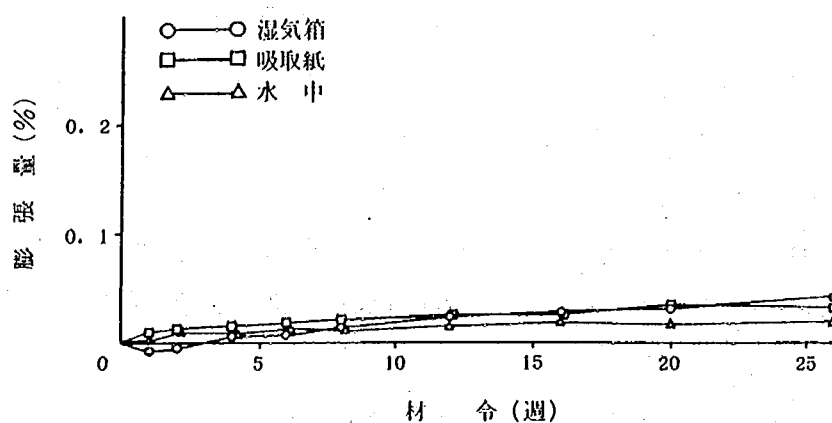
4.2.7 測定材令

判定は3ヶ月、6ヶ月の測定値で行うが、測定は脱型時、2週、4週、8週、3ヶ月、6ヶ月で行い、測定回数は必要に応じて増加させるものとした。

伸びの傾向を詳細に検討したり、事故等への迅速な対応を行なうには、より短い期間で測定を行なうのがよいのは言うまでもない。



a) A2 骨材



b) F 骨材

図-4.10 湿度管理方法の違いによる膨張量への影響

4.2.8 判定

ASTMではモルタルバー法の判定は供試体の平均膨張量で行っており、その値は材令6ヶ月で0.1%としている(3ヶ月では0.05%)。

図-4.11にモルタルバーの膨張量とひびわれの関係を示す。この図によればモルタルバーの膨張量が0.1%以上のときひびわれが確認され、0.1%以下ではひびわれは確認されていない。また、モルタルバーによる試験は岩種やアルカリ量によって膨張量や膨張速度の傾向に大きな差が見られたり、岩種によってはペシマムが存在するため反応性岩種の混合比によって膨張量が異なることもある。したがってまだ、モルタルバーの判定規準については多くの異論もあるが実用性も考えて、6ヶ月での膨張量が0.1%を越えるかどうか(ひびわれが発生するかどうか)を判定をすることとした。なお、これまでに土木研究所で行った試験では問題があると考えられる国産の骨材はすべて6ヶ月で0.10%以上の膨張を示していた。

表-4.2に277試料の材令3ヶ月時のモルタルバーの膨張量と6ヶ月時のモルタルバー膨張量の関係を示す。材令3ヶ月でモルタルバー膨張量が0.05%以上となった73試料中、大部分の71試料(97.3%)が材令6ヶ月で0.10%以上の膨張量を示している。一方、材令6ヶ月で0.10%以下の膨張量を示したのは2試料(2.7%)と少ない。

以上のことより、約97%の確率をもって材令3ヶ月時点での膨張量0.05%で判定ができ、しかも材令3ヶ月の膨張量では無害とは判定しないため安全側の判定ができる。

4.2.9 精 度

最近の土木研究所における調査によって、セメントを統一し、また湿度管理を十分に行い、さらに熟練した技術者が試験の管理・指導したモルタルバー法の結果では図-4.12に示すように、かなり精度よく測定できていることがわかる。このモルタルバーの膨張量と標準偏差及び変動係数の関係を見てみると図-4.13、4.14のようになる。標準偏差で低い数値を扱っているために全体的に小さいといえるが、膨張量が大きくなると標準偏差は大きく広がる。変動係数では膨張量の大きい領域においては約15%以内におさまっているが膨張量が低い領域では100%でもおさまっていない。すなわち、暫定案で示したように膨張量が低い領域と膨張量が大きい領域とで分けた管理が必要となることがわかる。そこでモルタルバー法では膨張量の低い領域では絶対値による管理を行い、膨張量が大きい領域では変動率による管理を行なうこととした。しかし、ここで両者の境の膨張量を一体どこに値にするのかを定めなければならない。ASTM法ではこの値を平均膨張量0.02%としており、暫定案では0.05%としている。

今ここで仮に両者の境を平均膨張量0.02、0.03、0.04、0.05%とした四つの数値と、変動率はそれぞれ±10、15、20%の三つの数値を考えてみる。実験データで精度が合格するものの割合は表-4.3～4.5の()の中の割合になる。すなわち、ASTM法の精度である膨張量0.02%、変動率±15%(膨張量が0.02%以下では絶対値で0.003%の変動幅)で合格するものは膨張量の大きい領域で77%、膨張量が小さい領域で42%、全体として60%であり、試験した40%が試験の精度を満足しないこととなる。次に他の数値を比較すると0.05%、と0.04%は試験精度を満足する率は各々89.6、86.2%とほぼ同じ率であり、0.03

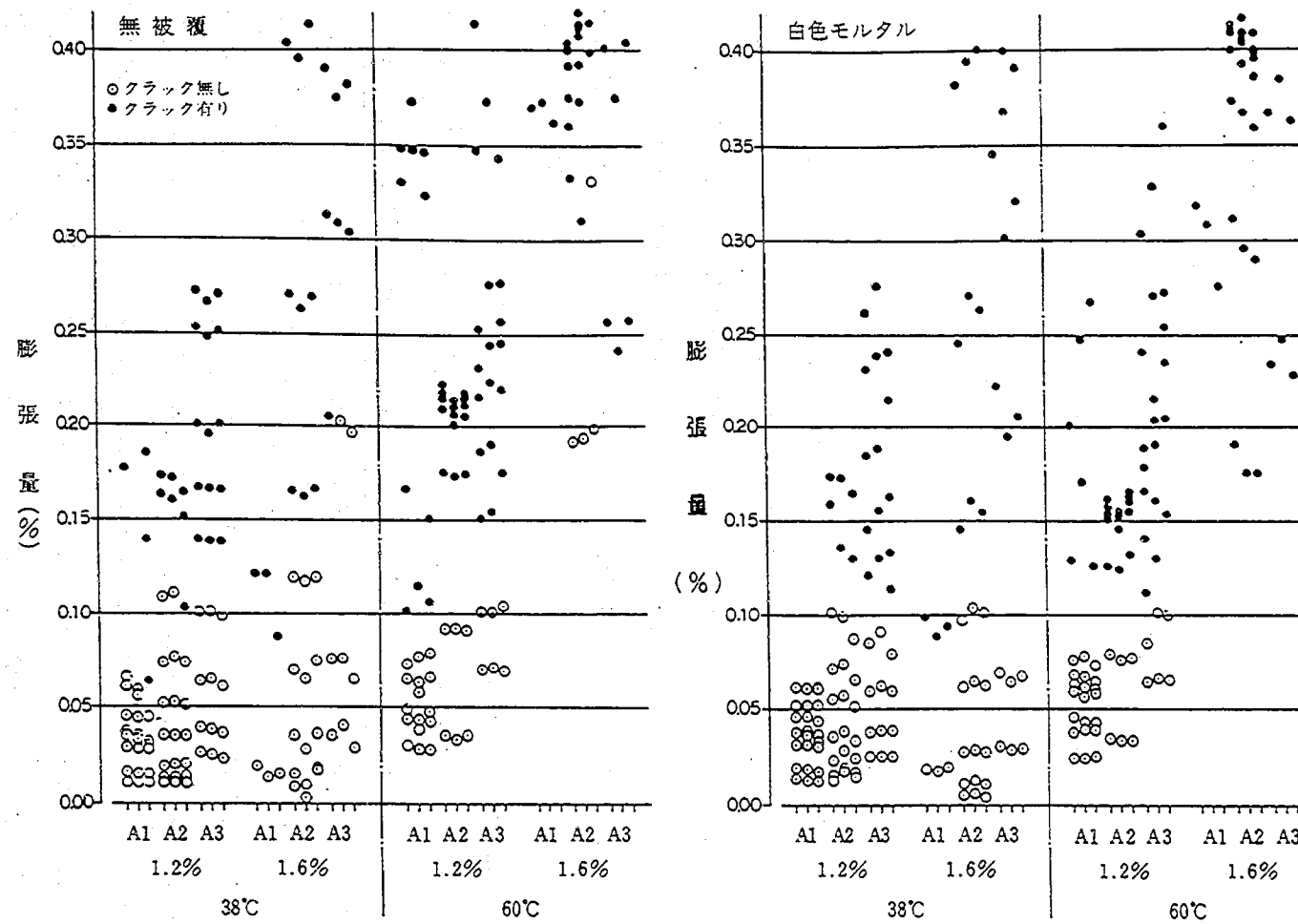


図- 4.11 ひびわれが発生した時の膨張量

表- 4.2 材令3ヶ月と6ヶ月
における膨張量

n = 277

モルタルバーの膨張量	頻度
0.05%/ 3ヶ月以上	73
0.10%/ 6ヶ月以上	89
0.05%/ 3ヶ月以上かつ 0.10%/ 6ヶ月以上	71
0.05%/ 3ヶ月以上かつ 0.10%/ 6ヶ月以下	2
0.05%/ 3ヶ月以下かつ 0.10%/ 6ヶ月以上	18

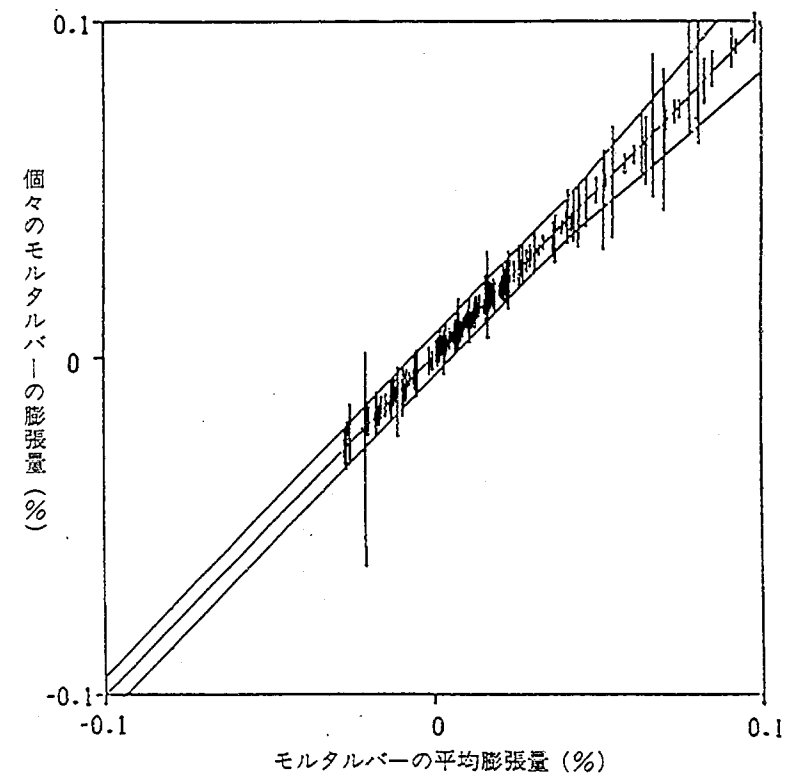
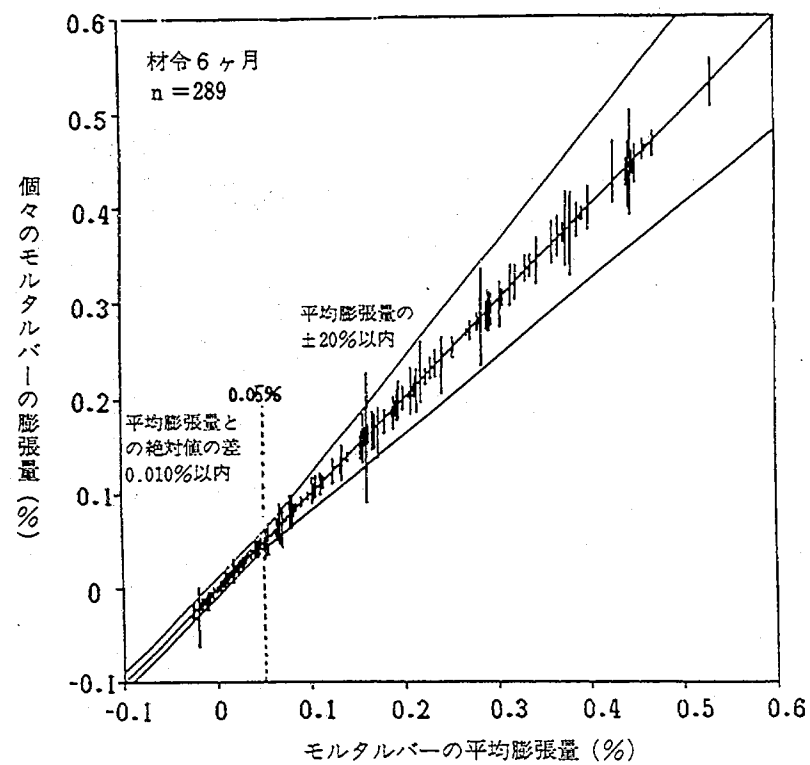


図-4.12 モルタルバー法のバラツキ

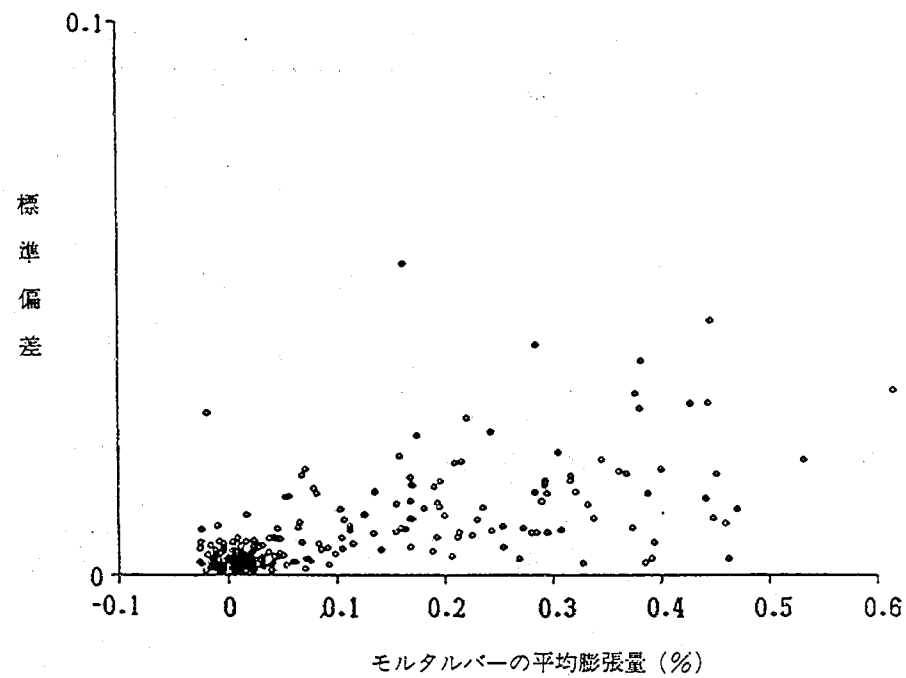


図-4.13 標準偏差

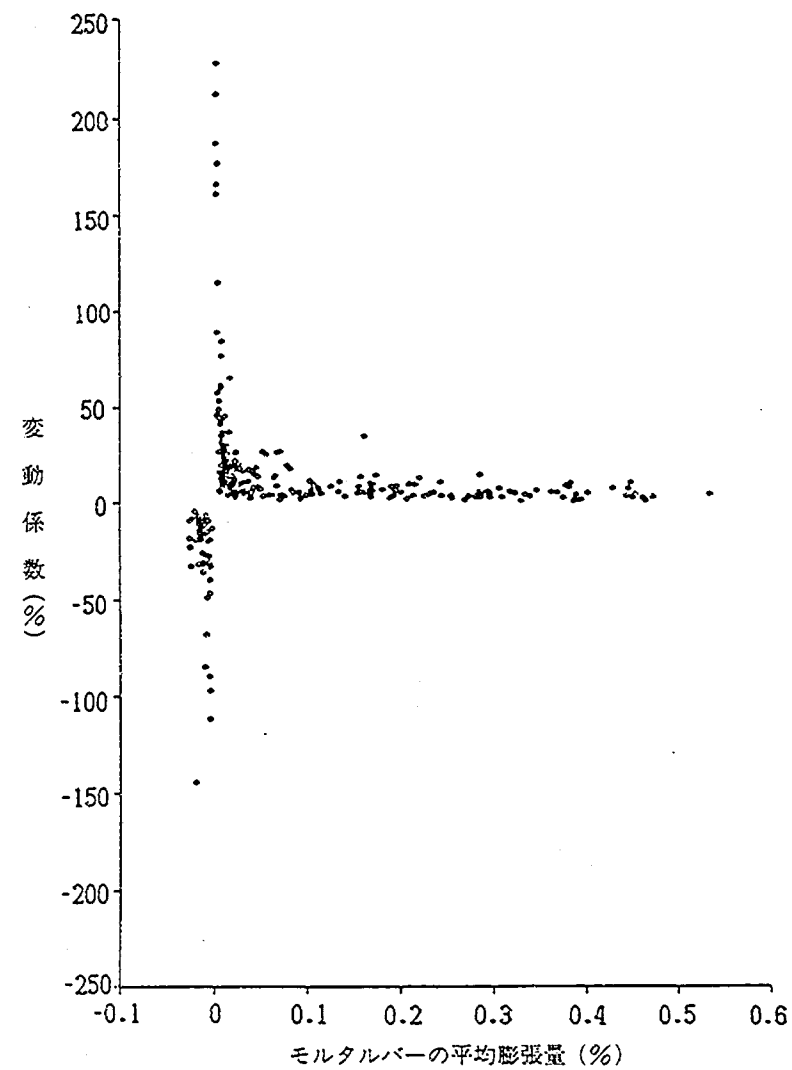


図-4.14 変動係数

表－4.3 絶対値（領域）の小さい（0.05％以下）範囲での判定
n=289

	<0.05%	<0.04%	<0.03%	<0.02%
個 数	179	170	161	138
絶対値%	0.0100	0.0080	0.0060	0.0040
変動幅20%	175	160	142	90
(判定率)	(97.8)	(94.1)	(88.2)	(65.2)
絶対値%	0.0075	0.0060	0.0045	0.0030
変動幅15%	183	148	118	58
(判定率)	(91.1)	(87.1)	(73.3)	(42.0)
絶対値%	0.0050	0.0040	0.0030	0.0020
変動幅10%	133	109	67	38
(判定率)	(74.3)	(73.6)	(41.6)	(27.5)

表－4.4 絶対値（領域）の大きい（0.05％以上）範囲での判定

n = 289

	>0.05%	>0.04%	>0.03%	>0.02%
個 数	110	119	128	151
変動率20%	102	108	115	129
(判定率)	(92.7)	(90.8)	(89.8)	(85.4)
変動率15%	96	101	107	117
(判定率)	(87.3)	(84.9)	(83.6)	(77.5)
変動率10%	74	77	82	87
(判定率)	(67.3)	(64.7)	(64.1)	(57.6)

表－4.5 全領域での判定

n = 289

	0.05%	0.04%	0.03%	0.02%
変動幅20%	277	268	257	219
(判定率)	(95.8)	(92.7)	(88.9)	(75.8)
変動幅15%	259	249	225	175
(判定率)	(89.8)	(86.2)	(77.9)	(60.8)
変動幅10%	207	189	149	125
(判定率)	(71.6)	(64.4)	(51.8)	(43.3)

％では 83.6 ％となる。このように 10 ％の変動幅ではいずれの場合も試験した 10 ％以上のものが精度を満足しないこととなる。一方、暫定案での精度を見てみると全体では試験したほとんどの 95.8 ％が精度を満足する。また、(社)日本コンクリート工学協会でも試験した結果でも暫定案の精度では満足することがわかっている。

以上のことより、多くの試験した結果が満足する精度として修正案でのモルタルバーの精度は、

「同一バッチから成形した全部の供試体の平均膨張量と、個々の供試体の膨張量との絶対値の差が 0.010 ％以下であれば精度は満足していると考えてよいとし、平均膨張量が 0.05 ％を超える場合は個々の供試体が平均膨張量との比で $\pm 20\%$ 以上の差がなければ精度は満足していると考えてよい」

ものとした。この精度規定条文は暫定案で示したものと同様なものだが、図-4.12で示したように、修正案での方法は明らかに暫定案より優れた結果を得ることができる。

また、この精度を満足しない場合の救済措置として

「個々の供試体の膨張量がすべて 0.1 ％以上の場合は精度に関係なく有害の判定をしてもよい。なお、精度が上記のいずれにも適合しないときは、最も膨張量の小さい供試体一本を除いた残りの二本の供試体の平均膨張量で判定してもよい」

こととした。

4.3 簡易試験方法の検討—オートクレーブ法—

モルタルバー法は試験の結果については一定の評価はされているものの、欠点も多くその一つとして試験期間に6ヶ月間を要することがあげられる。この点を補う形でいくつか促進試験方法が提案されているものの、促進試験の位置付けや評価については多くの問題点が含まれている。

ここでは、オートクレーブ装置を用いて反応を促進した試験によってASRの早期判定を行なうとともに、ASR試験法としての適用性について述べるものである。

4.3.1 試験条件設定のための予備試験

アルカリ骨材反応試験モルタルバー法は現在、判定までに6ヶ月という長期間を要し、このことが本試験の最大のネックとなっている。このため、判定までの期間を短縮することが望まれている。このためここでは、モルタルバーの膨張量への促進試験の条件の影響を検討するための試験を行った。

(1) 実験概要

オートクレーブ法による反応性判定試験の条件設定のため非反応性の骨材2種として川砂Cと硬質砂岩D、反応性の骨材3種としてチャートHと安山岩Gおよび安山岩Fを用いモルタルバーを製作し、オートクレーブ装置で湿潤状態で促進養生を行った。実験の要因としてはセメント中のアルカリ量、温度(圧力)、

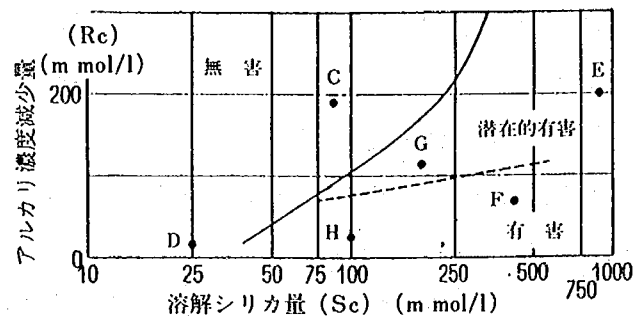


図-4.15 骨材のASR化学法結果

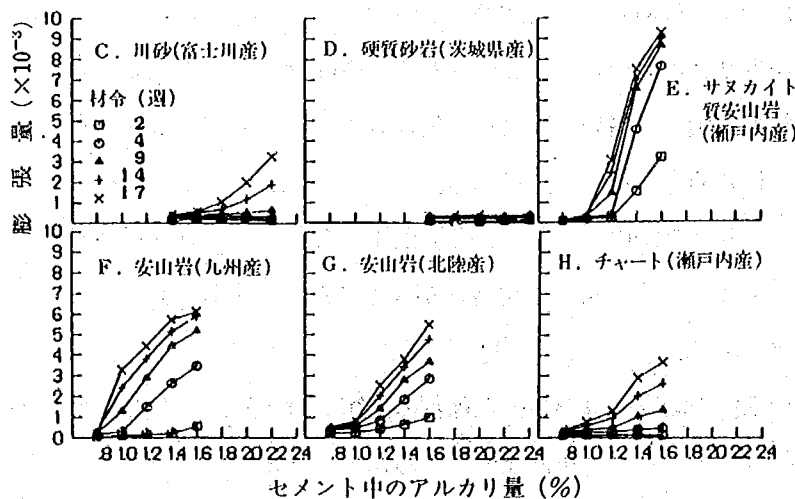


図-4.16 ASRモルタルバー試験結果

養生時間、促進養生までの前養生の有無を変化させた。用いた骨材の A S R 化学法の結果を図- 4.15、A S R モルタルバー法の結果を図- 4.16に、促進養生の温度履歴の模式図を図- 4.17に示す。

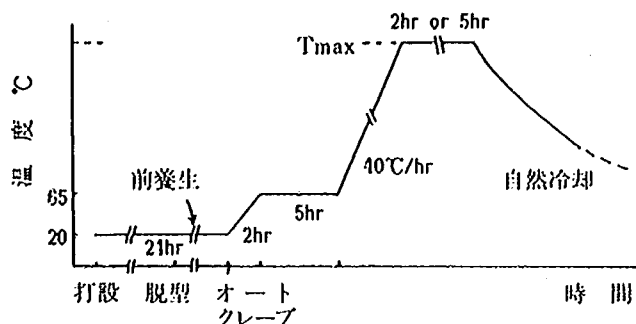


図- 4.17 養生温度履歴

(2) 実験結果

図- 4.18に前養生の影響を示す。ここで「前養生なし」とはモルタルバー打設後24時間の湿潤養生（20℃）を行った後、脱型後直ちにオートクレーブで促進養生を行うことを示し、「前養生あり」とは、脱型後さらに24時間の湿潤養生（20℃）を行い、促進養生を行うことを示す。図に示されるように、各条件で前養生の有無はほとんど膨張量に影響していないことがわかる。このため時間の短縮の意味から、前養生を行わずにオートクレーブを行なうことが可能と考えられる。

図- 4.19に養生温度の影響を示す。高いアルカリ量ではG骨材は110℃と150℃では差が大きいものの150℃と180℃ではそれ程差がなくなっている。

図- 4.20にアルカリ量の影響を示す。アルカリ量の影響は大きく、条件にもよるが促進膨張させるためには1.6%以上のアルカリ量が必要と考えられる。

次に図- 4.21に養生時間の影響を示す。比較的低温（110℃）では2時間と5時間でかなりの差が出ているものもある。150℃では安山岩Gのみが2時間から5時間の間で大きく膨張しているようであり、180℃ではG骨材でしかもアルカリ量が高いときに2時間から5時間で大きく膨張している。

全体的にみると、いずれも安山岩を用いた場合には促進養生によって大きな膨張量が得られるが、チャートではそれ程大きな膨張は認められないようである。

以上のことより、オートクレーブ法の試験条件として前養生なし、アルカリ量2.0%、温度150℃、2時間の養生を行えば、短時間での判定が行える可能性が大きいと考えられる。いずれにしても、今後、各種の骨材による検討が必要である。

なお、モルタルバーは膨張量の測定のほか動弾性係数の測定も行った。しかし、動弾性係数の測定結果は、オートクレーブ養生前はモルタルバーが低強度であるため、非常に小さい値であったが、養生後はひびわれを生じて強度が増加することにより大きい値を示した。そのため、オートクレーブ養生前後の動弾性係数の減少率ではA S R判定の指標とすることはできないものと考えられる。

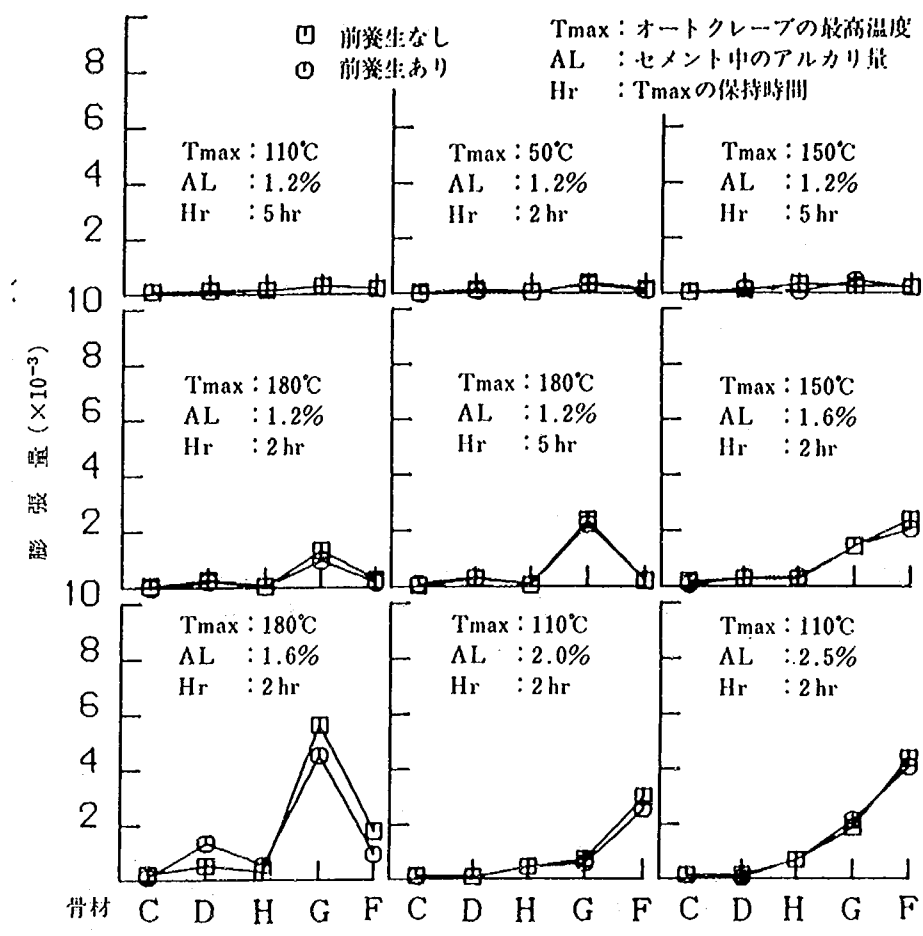


図- 4.18 促進養生前の前養生の有無の影響

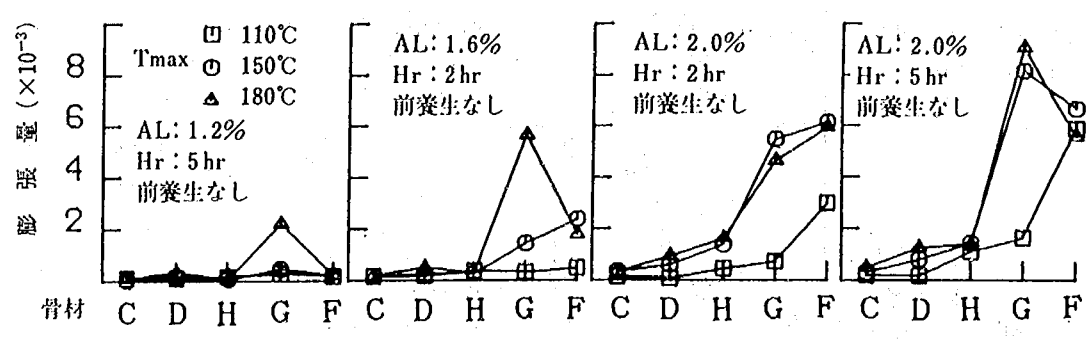


図- 4.19 促進養生温度の影響

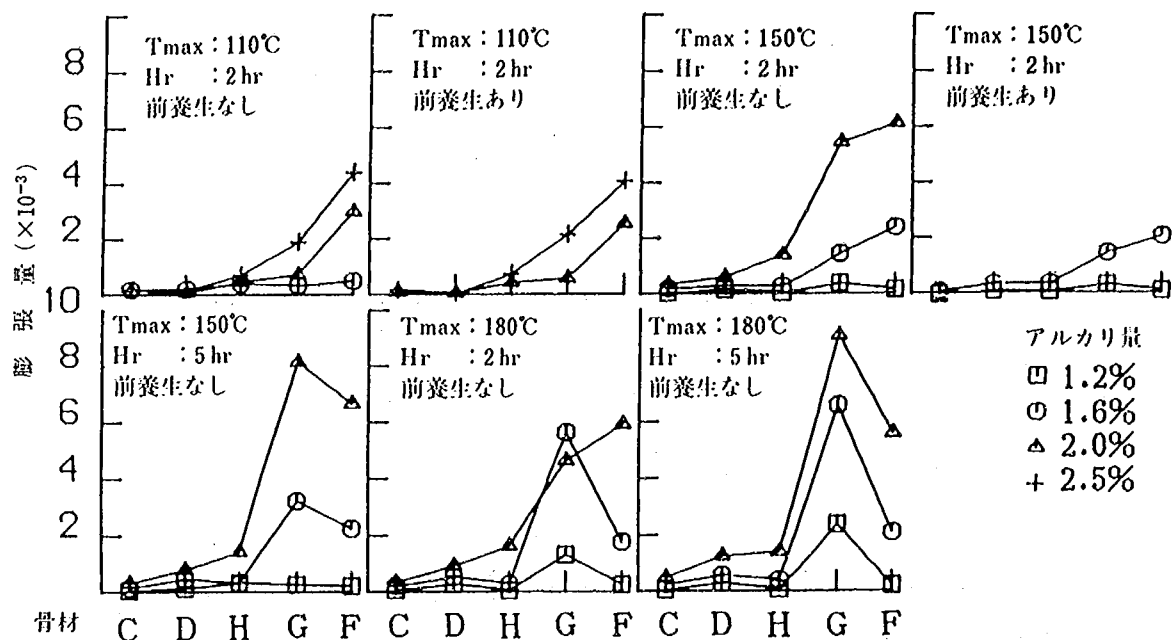


図- 4.20 アルカリ量の影響

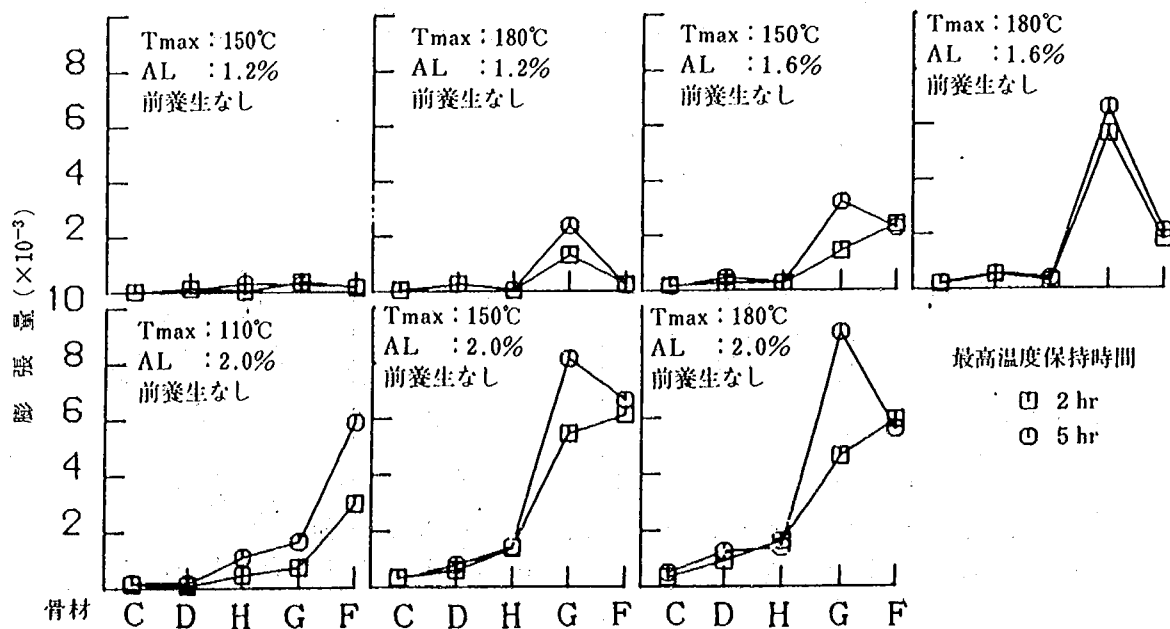


図- 4.21 最高温度保持時間の影響

4.3.2 オートクレープ法の確証実験

予備実験ではオートクレープによる促進試験の要因を決めるためアルカリ量、温度、養生温度、前養生の有無を変化させて実験を行った。ここでは予備実験で設定された試験条件によって50種類の骨材を用いて確証実験を行った。

(1) 実験条件

- ① 骨材：使用した骨材は反応性骨材、非反応性骨材も含めて50種類。岩種は火山岩類40種、堆積岩類10種である。
- ② 促進実験条件：次の二通りとした。予備実験では条件1の設定となったが、100℃以上では特殊な試験装置（オートクレープ装置）が必要となるため、条件2のように温度を100℃としてアルカリ量をさらに高く設定して行った。

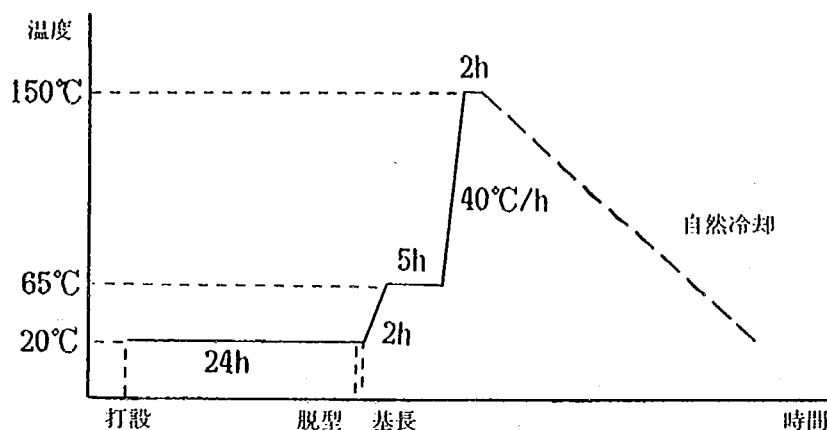


図- 4.22 条件 1.

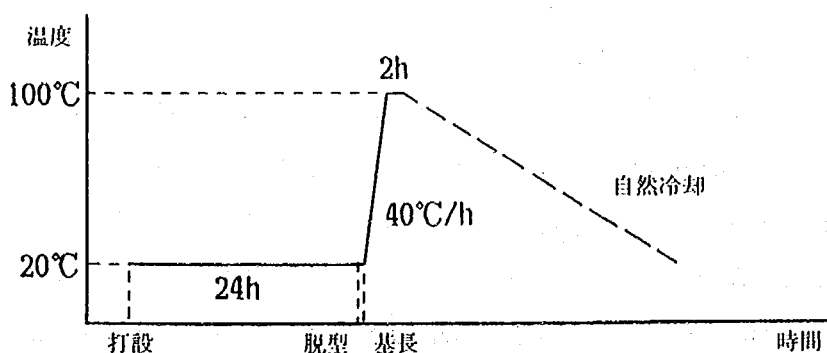


図- 4.23 条件 2.

条件1：前養生なし、セメントのアルカリ量2.0％、オートクレープの最高温度150℃、最高温度保持時間2時間（図- 4.22）

条件2：前養生なし、セメントのアルカリ量2.5％、オートクレープの最高温度100℃、最高温度保持時間2時間（図- 4.23）

(2) 実験方法

モルタルバー供試体をオートクレーブ装置で各々の条件で促進養生を行い、長さ変化、動弾性係数の測定、表面のひびわれを観察する。

(3) 実験結果

図-4.24に全骨材のモルタルバー法の6ヶ月の膨張率とオートクレーブ法の膨張率の関係を示す。図中にはモルタルバー法の3ヶ月および6ヶ月での判定基準である膨張量0.05%、0.1%を破線で示した。図より、モルタルバー法とオートクレーブ法との相関は小さい。また、無害、有害の判定で比較するとモルタルバー法で無害と判定されるがオートクレーブ法で有害と判定される骨材は条件1で5骨材、条件2でも5骨材、反対にモルタルバー法では有害、オートクレーブ法では無害と判定されるのは条件1では判定基準0.1%で13骨材、0.05%で3骨材、条件2では0.1%で6骨材、0.05%で3骨材となっている。その他の骨材についてモルタルバー法及びオートクレーブ法の判定は合致している。

つぎに化学法とオートクレーブ法とを比較したのが図-4.25である。比較のために図-4.25の上段にはモルタルバー法の6ヶ月の結果も示す。化学法で有害または潜在的有害と判定される中にもモルタルバー法で無害と判定されるものが6骨材ある。オートクレーブ法では、化学法で有害または潜在的有害に位置する骨材でもRcの小さい骨材は無害と判定されるが、その他はほとんど有害と判定されている。これは化学法の分布位置から岩種の違いと考えられる。そこで骨材を火山岩類と堆積岩類に分類し、オートクレーブとモルタルバーの膨張率、化学法との関係を示すと図-4.26～4.29のようであった。

火山岩類(安山岩)では図-4.26より、条件1では危険側に判定されるものが3骨材あるが、条件2では危険側は全くない。また化学法との比較(図-4.27)では、条件2は化学法で有害または潜在的有害に属するものはほとんどオートクレーブでも有害と判定されている。これより安山岩をオートクレーブの条件2により促進養生すれば化学法程度の判定が可能と考えられる。

つぎに堆積岩類(チャート)は、モルタルバーではすべて有害と判定されているが、図-4.28、4.29より条件1ではすべて無害、条件2ではわずか4骨材が有害、判定基準を0.05%にすると7骨材が有害となっている。これらの促進条件では、堆積岩類はかなり危険側の判定となる。これは、一般にいわれているようなチャートは反応性が遅いことによるものと考えられる。堆積岩類をオートクレーブによってASRを判定するには、さらに促進条件(アルカリ量、最高温度と継続時間)や判定基準を検討する必要がある。

オートクレーブ法の精度は図-4.30に示すように、3本の平均膨張率に対し個々のバラツキはほとんど±15%以内にあり、モルタルバー法と同程度にある。

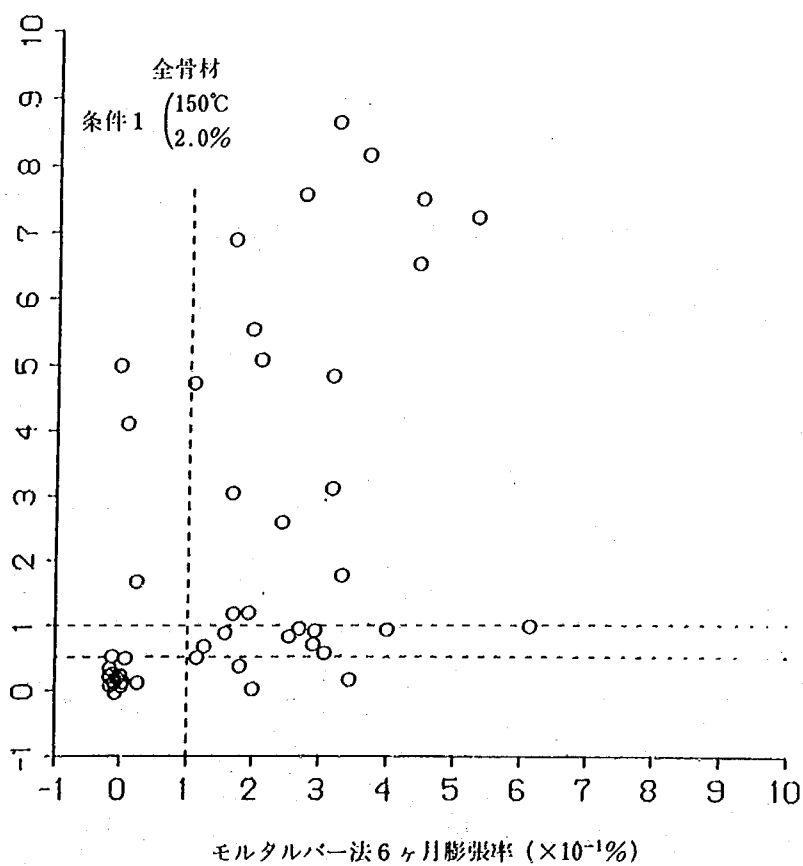
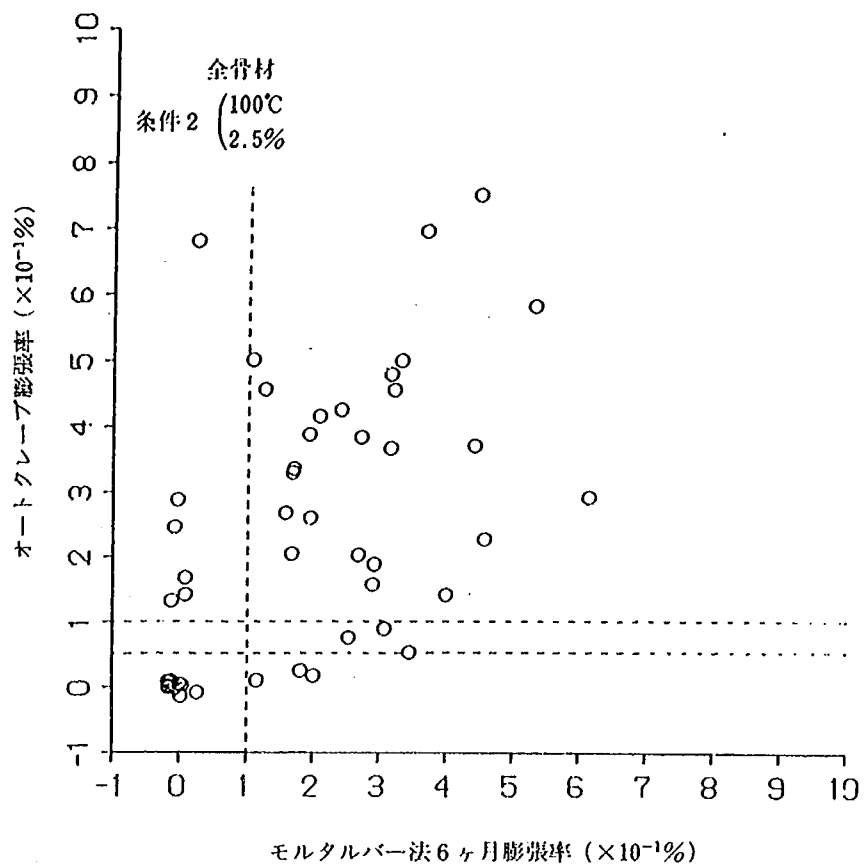


図-4.24 オートクレーブとモルタルバーの比較 (全骨材)

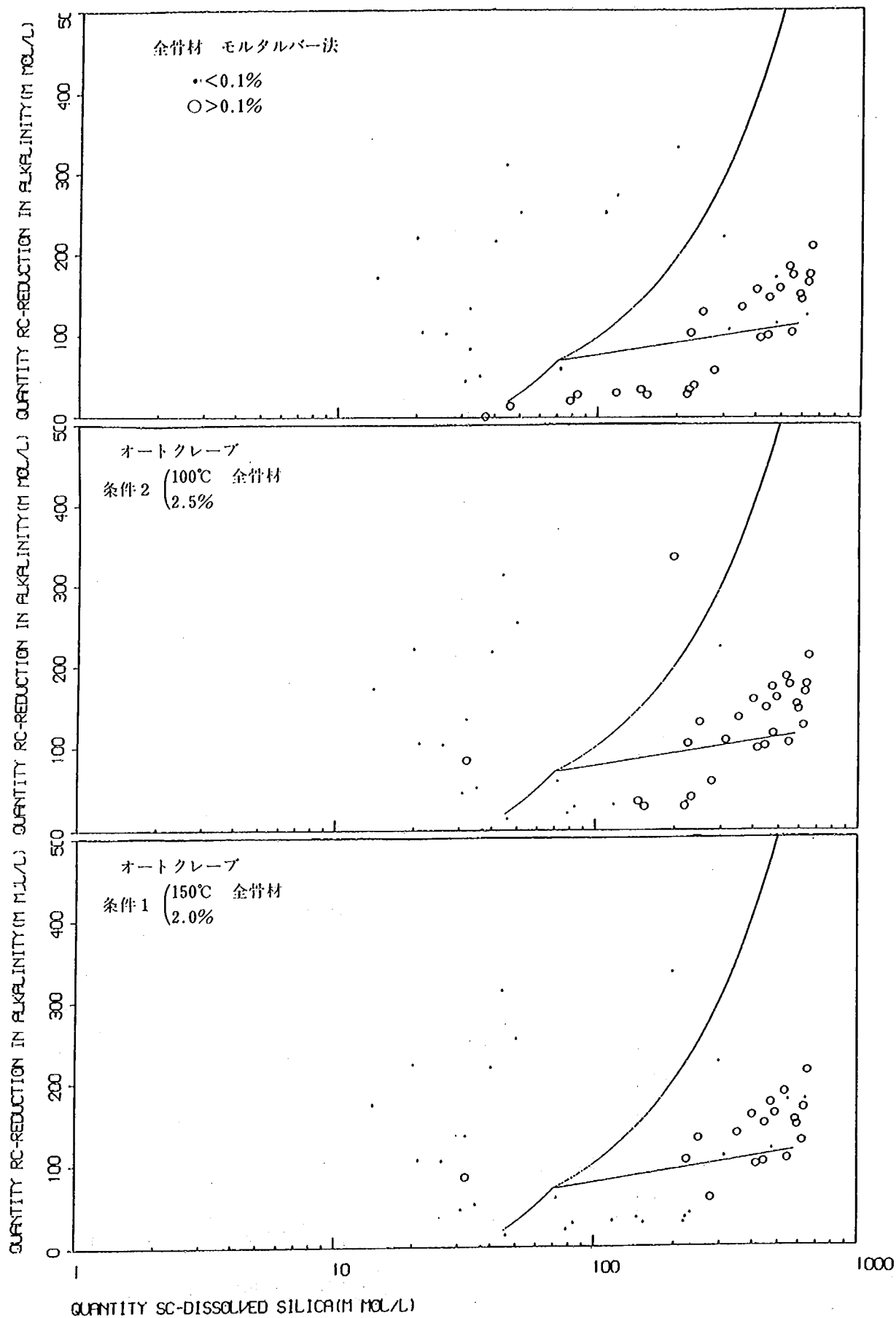


図-4.25 オートクレーブと化学法の比較 (全骨材)

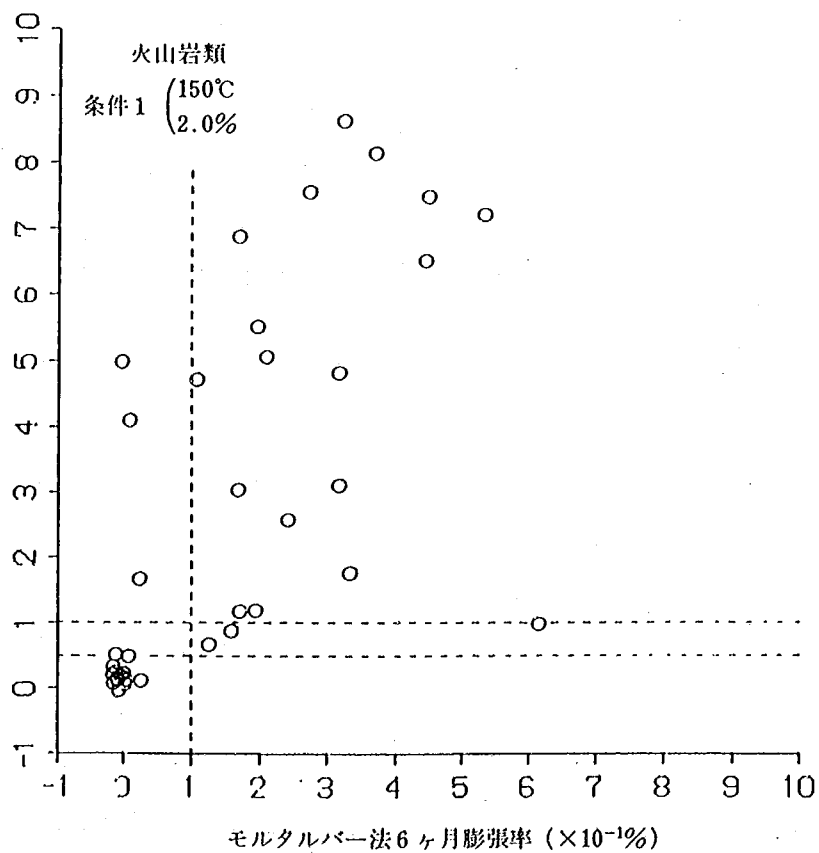
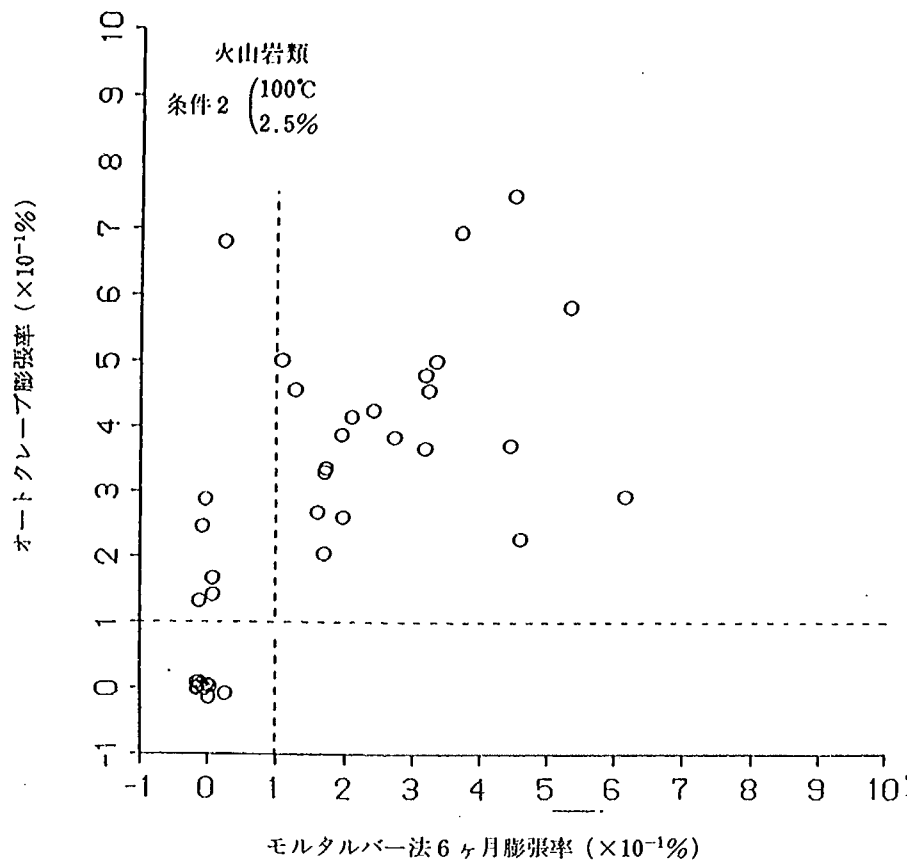


図-4.26 オートクレーブとモルタルバーの比較 (火山岩類)

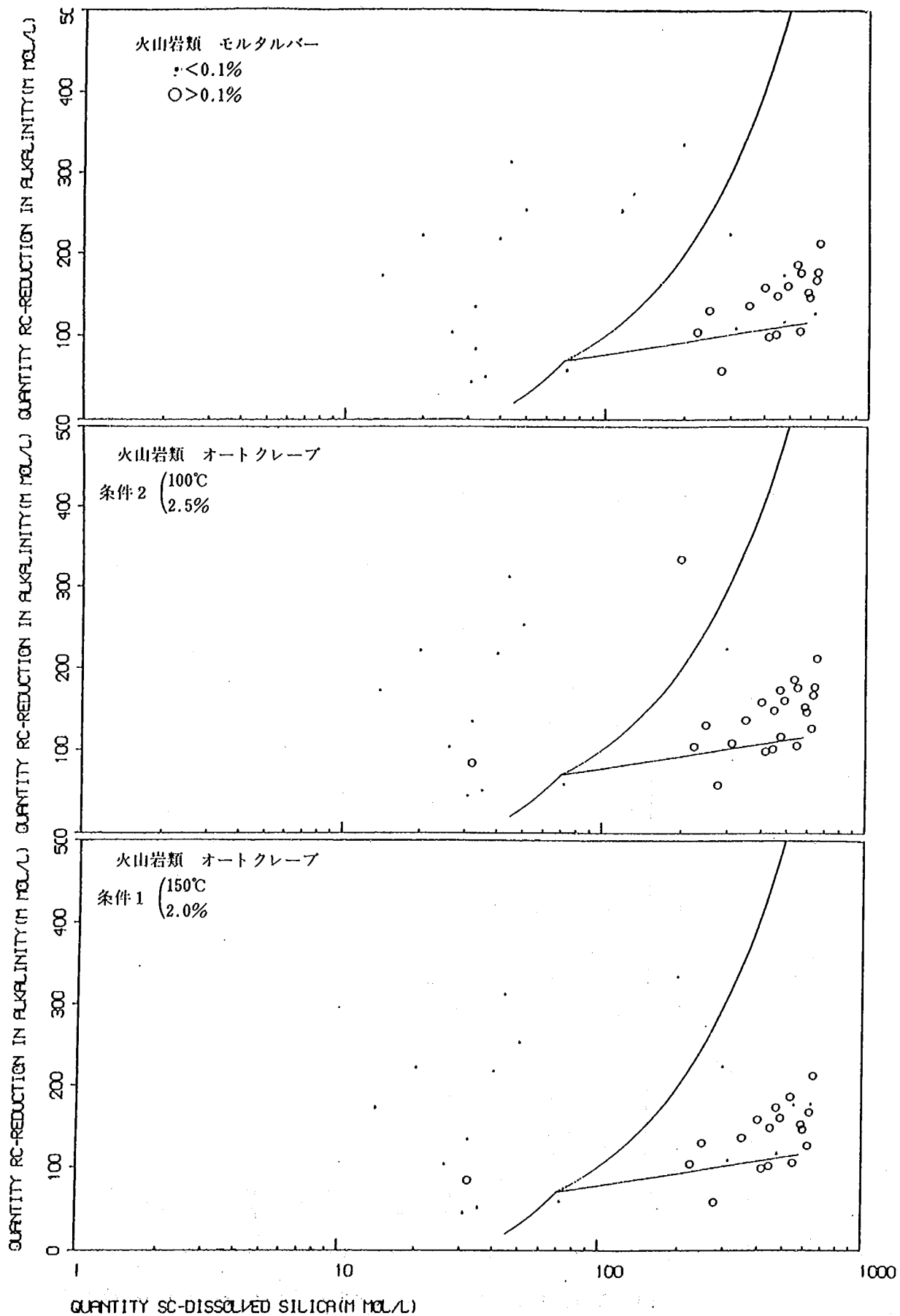


図-4.27 オートクレーブと化学法の比較 (火山岩類)

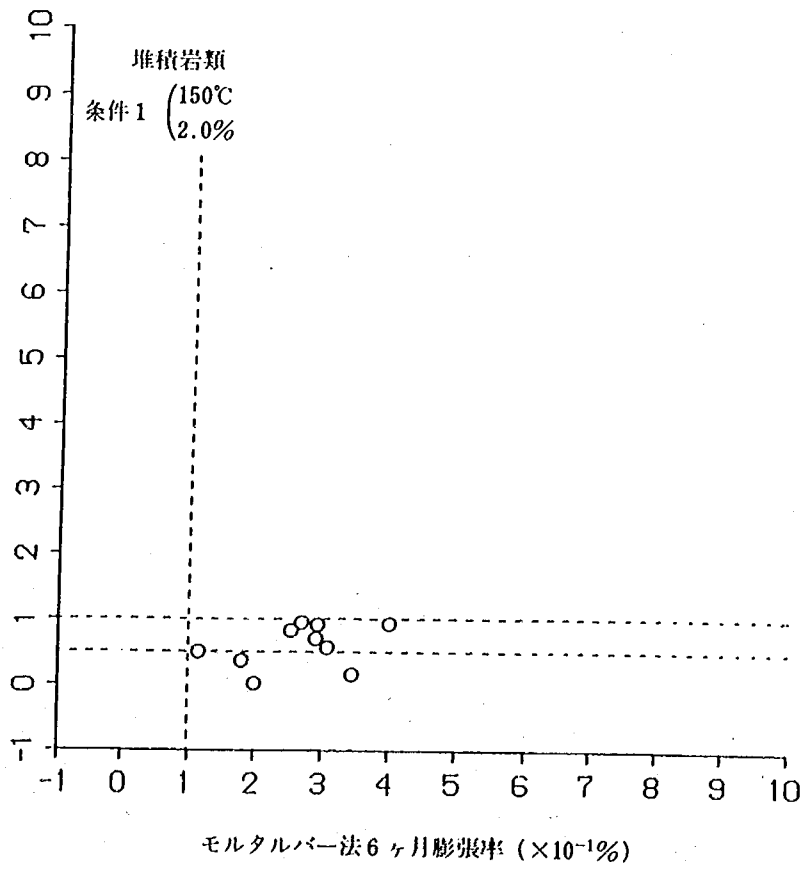
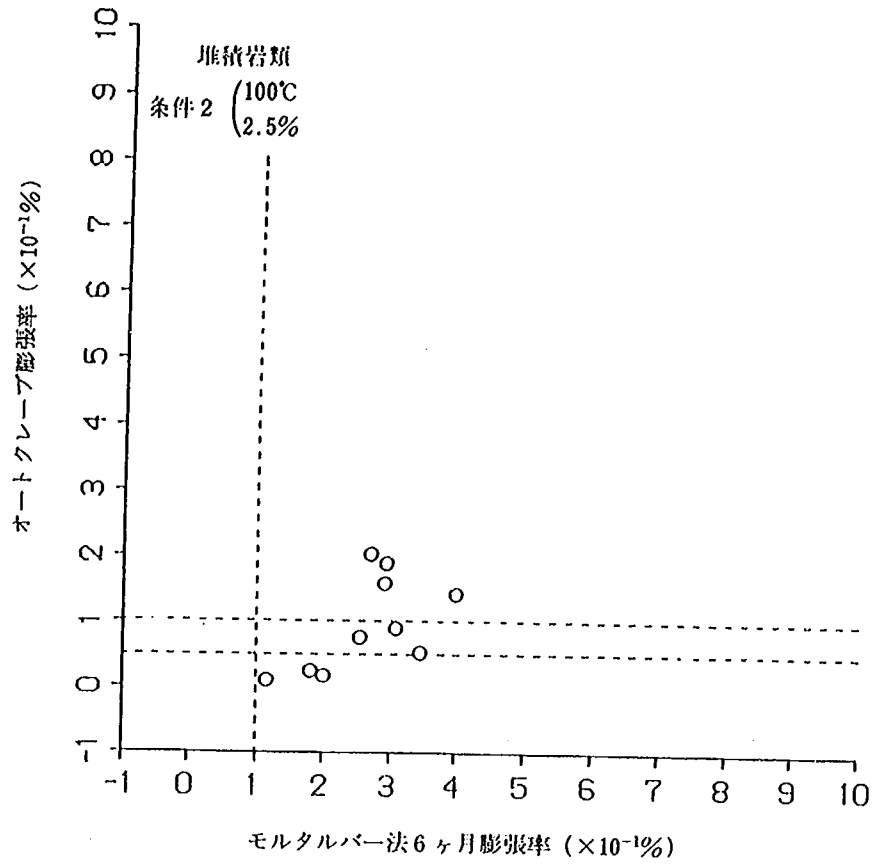


図-4.28 オートクレーブとモルタルバー法の比較 (堆積岩類)

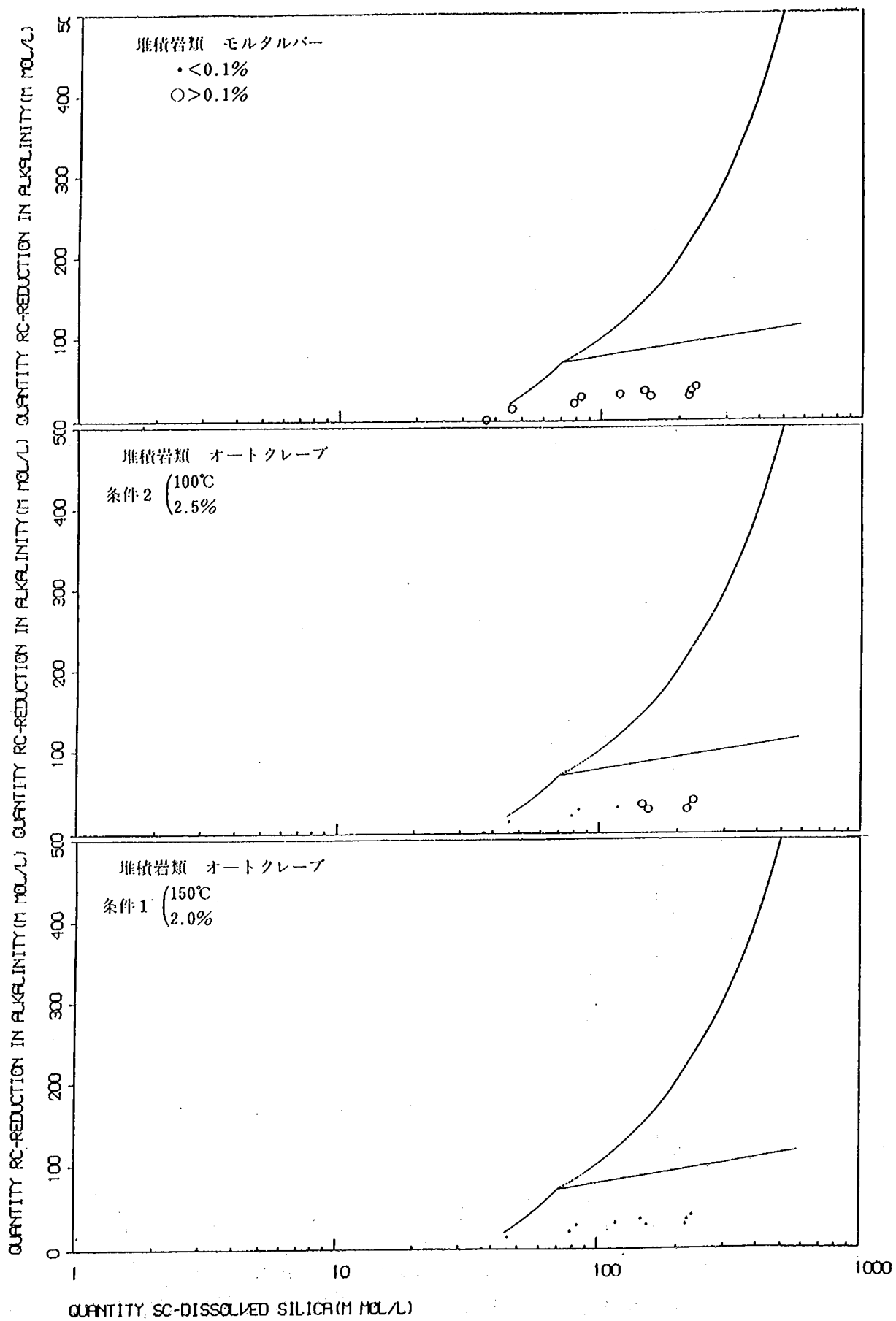


図-4.29 オートクレープと化学法の比較 (堆積岩類)

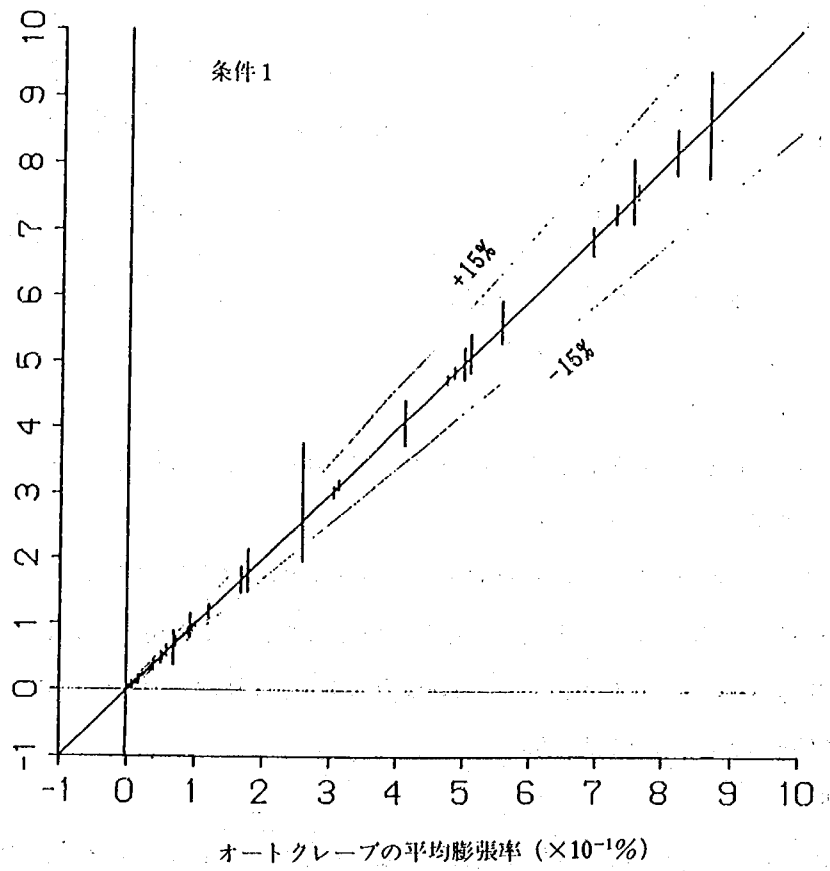
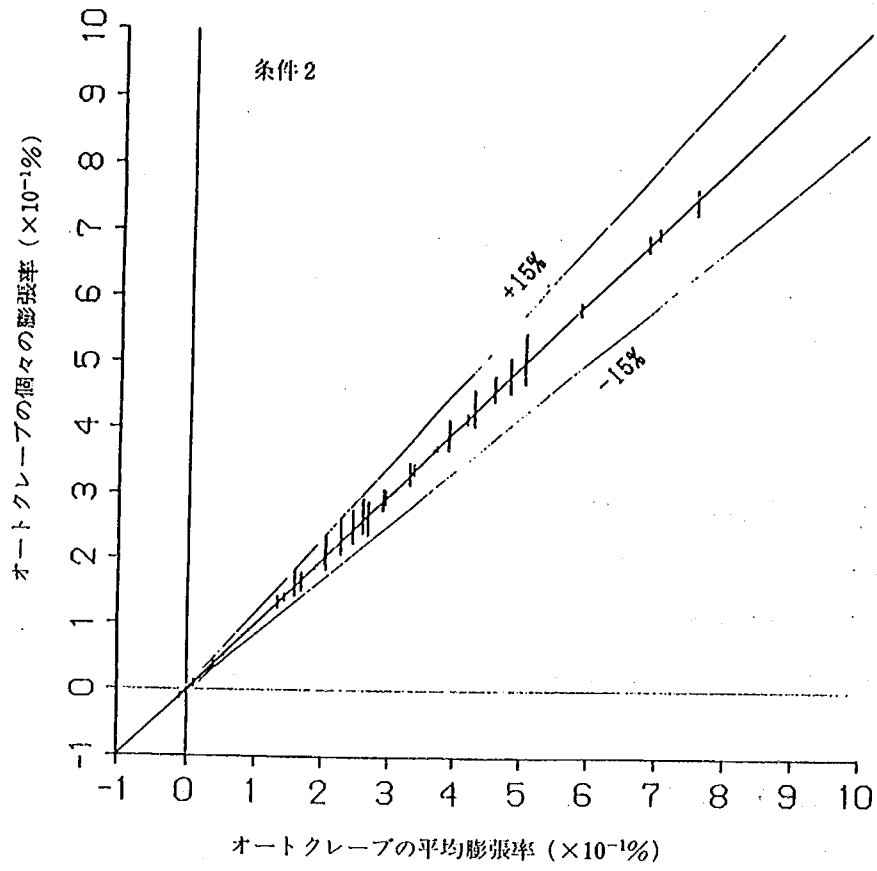


図-4.30 オートクレープの精度

4.4 簡易試験方法の検討—ダブルシリンドー法—

モルタルバーは、現在、骨材のアルカリシリカ反応性を判定する最も信頼性のある試験方法となっているが、4.1で述べたように判定に長期間を要する一方、特別な長さ変化測定器を要する。このため、ここでは現場で目視によって骨材のASR反応性を判定できる方法を開発するための検討を行った。また、一旦、レデーミクストコンクリートとして現場に搬入されたコンクリートは、現場判定する手法はない。このため、現場に搬入されたコンクリートについて、特別な器具を用いずに、ASR反応性を判定するための手法の検討を行った。

4.4.1 ダブルシリンドー法の概要

(1) 試験法の概要

ダブルシリンドー法は、試験する骨材を用いたモルタルまたはコンクリートの $\phi 10 \times 20 \text{cm}$ 円柱供試体を作製する。硬化後、 $\phi 15 \times 30 \text{cm}$ の型枠の中心に配し、周りに無害骨材を用いたモルタルを充填して二重円柱構造供試体（ダブルシリンドー、図-4.31）を作る。この供試体を高温湿潤養生後、外側のモルタルに発生するひびわれの有無によって骨材またはコンクリートの反応性を判定する方法である。

(2) 試験方法の理論的背景

本試験は非膨張性の材料で膨張性の材料を覆うと、後者がわずかに膨張しても前者にひびわれが発生することを利用し、目視でASRを生じるコンクリートかどうかを判定しようとしたものである。

すなわち、円柱供試体を用いた2種類のモルタルは弾性係数の等しい弾性体であり、軸方向応力は0である（平面応力状態）と仮定すると、内部のモルタル（またはコンクリート）が α だけ膨張した場合に外側のモルタルの円周方向に発生するひずみ ϵ_0 は、中心からの距離 r の位置で（4.1）式のようになる。

$$\epsilon_0 = \frac{\alpha}{2r^2} \left\{ (1-\nu)r_1^2 + (1+\nu) \frac{r_1^2 r_2^2}{r^2} \right\} \dots\dots\dots (4.1)$$

ここに r_1 ：内部モルタル境界の半径

r_2 ：外部モルタルの外半径

ν ：ポアソン比

本供試体は $r_1 = 5.0 \text{ cm}$ $r_2 = 7.5 \text{ cm}$ であるので、最外周の ϵ_0 は 0.44α 、内外のモルタルの境界における ϵ_0 は ν を0.2と仮定すれば 0.78α となる。

最外周のモルタルの伸び能力（ひびわれ発生ひずみ）を0.02%と仮定すれば、 α がおおよそ0.045%に達したときにひびわれが発生することとなる。なお、外側モルタルの層を薄くすれば α がより小さいときにひびわれが発生するようになるが、ひびわれ間隔が細くなり個々のひびわれ幅は小さくなる。

4.4.2 試験条件設定のための予備試験

(1) 実験概要

通常多用されている $\phi 15 \times 30 \text{cm}$ の型枠を用いて、図-4.31に示すようなダブルシリンドーを作製した。このときの外周厚さは 2.5 cm である。このダブルシリンドーを 38°C および 60°C で水を少量入れたビニール袋

中に入れ、湿潤状態に保ち養生し、周の長さ変化測定とひびわれ観察を行った。内円柱には、まず、長さ変化率とひびわれ発生の関係をみるために、反応性骨材を用い同じ配合でアルカリ量を変化させたモルタルを用いた。次に、現場のコンクリートを想定し、粗骨材にE、G、Hの反応性骨材を使い、細骨材に非反応性の砂岩Dを使ったコンクリートを用いた。コンクリートでは単位体積あたりのアルカリ量を種々変化させている。

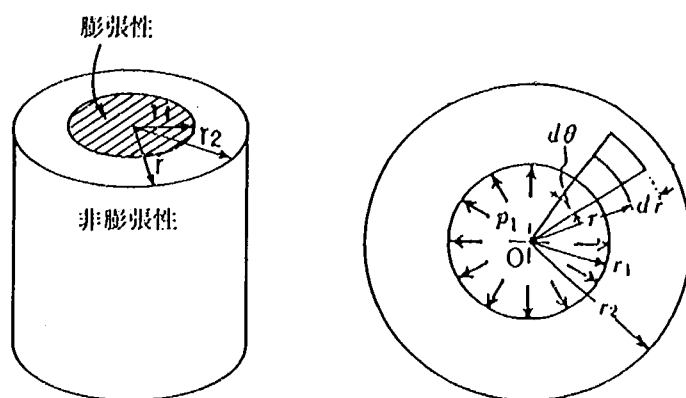


図- 4.31 ダブルシリンドー

(2) 実験結果および考察

ダブルシリンドー法で、円周方向の膨張量がどの位になった時にひびわれが発生するかを調べた結果が図- 4.32、4.33、4.34である。どのダブルシリンドー供試体も円周方向のひずみが0.05%を越えた時にひびわれが発生した(図- 4.33)。ひびわれ発生までの円周方向の膨張とモルタルバーによる膨張量はほぼ一致していた(図- 4.32)。しかし、ひびわれ発生後は、ひびわれのひらき分を含んでいるためか、前者の方が後者よりかなり大きくなった。また、ひびわれ後の膨張量と総ひびわれ幅の間にはリニアな関係がみられた(図- 4.34)。

図- 4.35はアルカリ量、養生温度を変えたものである。アルカリ量は、1.2%以上でひびわれを発生させることが可能であり、アルカリ量が大いほど促進効果は高い。温度についても、高いほど促進効果は高い。1.6%のアルカリ量と60℃の温度を与えた時には、実験した骨材の範囲では1週間以内にひびわれが発生し、促進が可能と考えられる。

次に、コンクリートの供試体を芯にしてダブルシリンドーを製作し、その膨張量と材令、ひびわれの測定例を示したものが図- 4.36である。ひびわれはモルタルと同様、円周方向膨張が0.05%以上になった時に発生している。添加アルカリの種類と量を変化させたときの膨張量を図- 4.37に示す。NaClは現場での使いやすさを考え使用したものである。ひびわれを発生させるにはNaOHで $6\text{Kg}/\text{m}^3$ 以上NaClで $7\text{Kg}/\text{m}^3$ 以上でなければならない。コンクリート内円柱でも、ひびわれ発生後の膨張量と総ひびわれ幅の間にはリニアな関係がみられた(図- 4.38)。

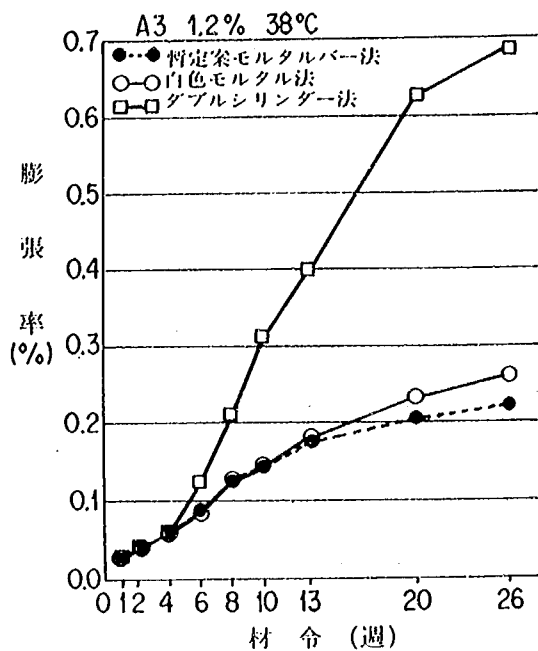


図- 4.32 供試体種類別の膨張状況

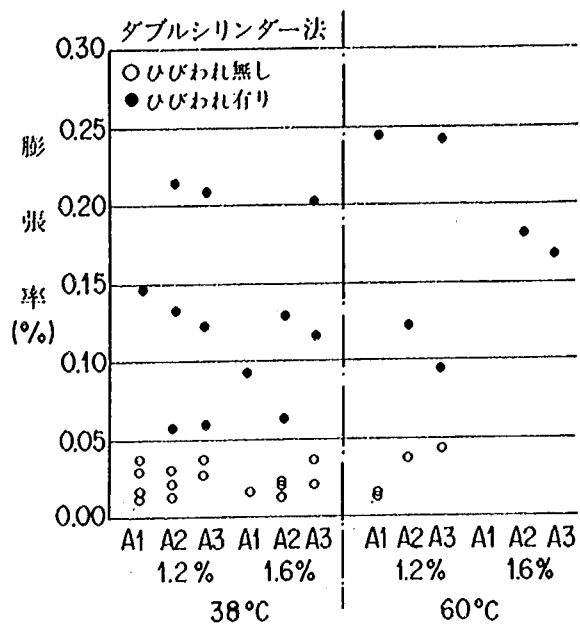


図- 4.33 モルタル膨張量とひびわれ発生

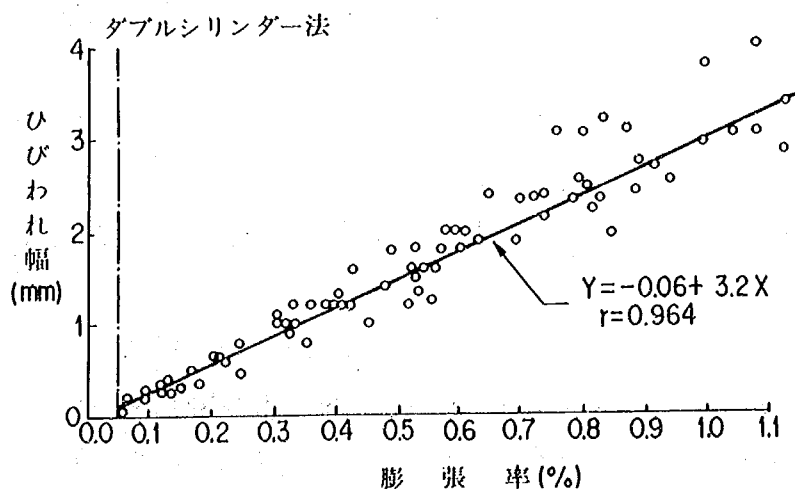
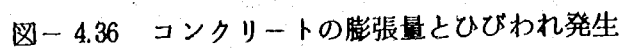
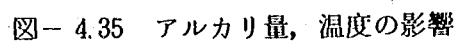
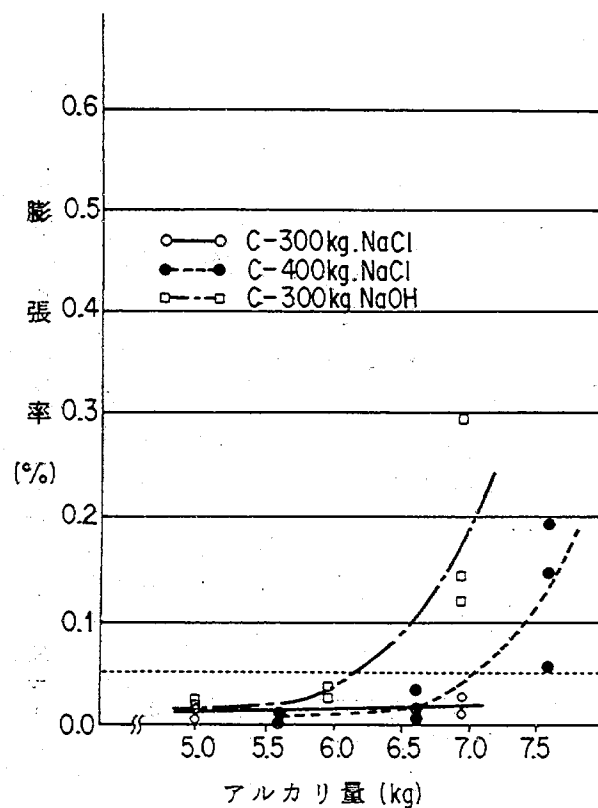
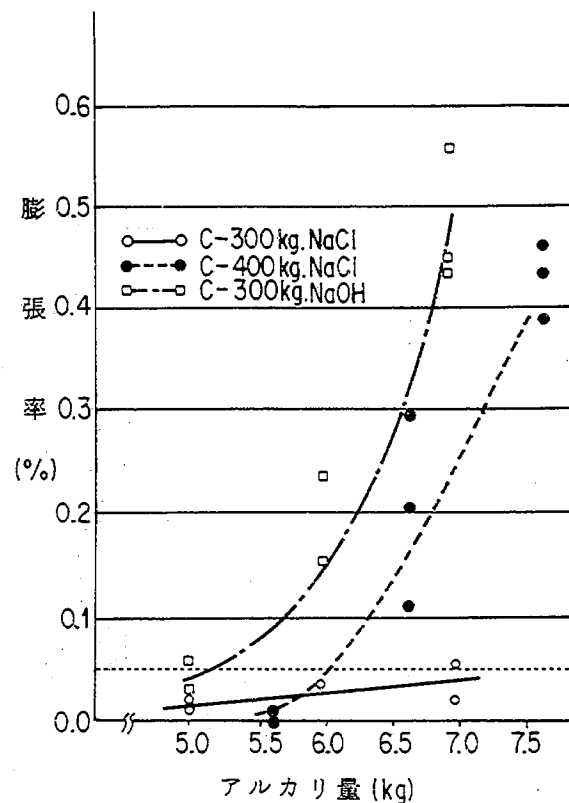


図- 4.34 膨張量とひびわれ幅の関係

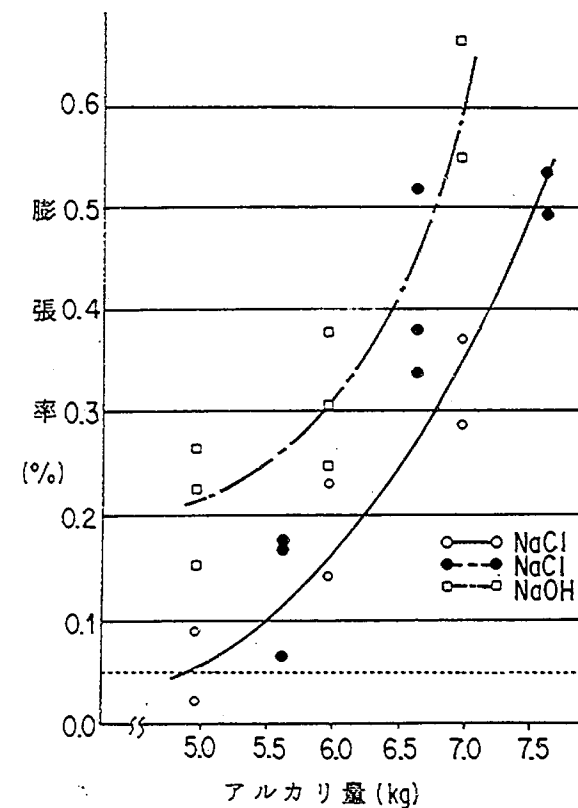




(1) 材令4週



(2) 材令13週



(3) 材令26週

図-4.37 アルカリ量と膨張量の関係 (シリーズII)

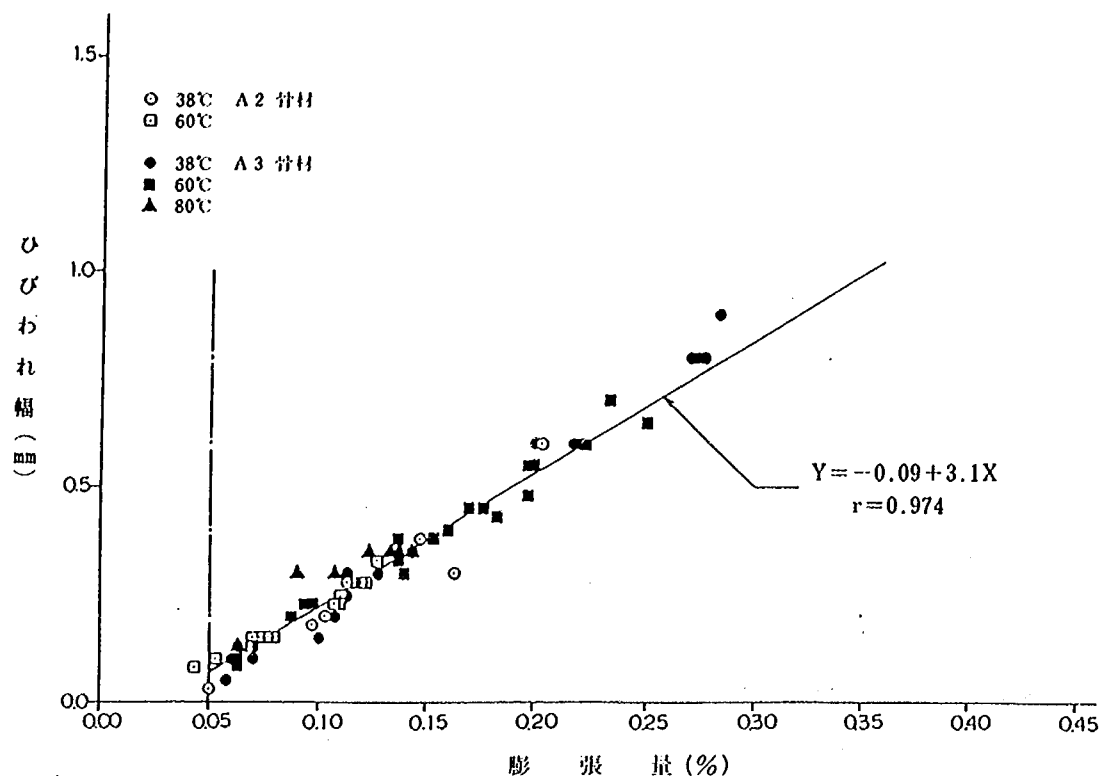


図-4.38 膨張率とひびわれの関係 (Series-II)

本実験の範囲内で得られた結果をまとめると、次のようである。

- ① モルタル、コンクリートの膨張がひびわれで判定できる。
- ② 外円周の膨張量が 0.05 %以上で円柱軸方向のひびわれが発生する。
- ③ ひびわれ発生後は膨張量と総ひびわれ幅の間に高い相関が得られた。
- ④ モルタルによる骨材のアルカリ反応性の目視判定方法として適応可能である。
- ⑤ 60℃湿潤養生等、養生条件等を工夫することにより、より早期に判定することも可能であると思われる。
- ⑥ コンクリートに対しても、モルタルと同様の結果が得られ、コンクリートへの適応も可能であると思われるが、ひびわれ発生までに長期間を要す、養生条件の選定によってはひびわれが発生しない場合がある等の問題点があり、今後の検討が必要である。

4.4.3 ダブルシリンドー法の確証実験

ダブルシリンドー法の予備実験より得られた結果をもとに、試験条件を設定し、7.1骨材について、モルタルによる骨材判定試験（モルタル法）およびコンクリートの膨張性判定（コンクリート法）の2方法について実験を実施した。その結果を、モルタルバー法の結果と照合し、ASR骨材判定の試験方法として適用できるのか確認を行った。

(1) 実験概要

1) モルタル法(細骨材対象)

- ① セメントのアルカリ量; 0.65(%)
- ② アルカリ量; $C \times 1.2$ (%)
- ③ アルカリ調整試薬; NaCl (食塩: NaCl 99%以上)
- ④ モルタル配合; セメント: 水: 骨材 = 1: 0.5 : 2.25
- ⑤ 養生条件; 60℃湿潤養生
- ⑥ 健全材料; 普通モルタル(普通セメント: 水: 富士川砂 = 1: 0.5 : 2.25)

2) コンクリート法(粗骨材対象)

- ① セメントのアルカリ量; 0.65 (%)
- ② アルカリ量; 7.2 (Kg/m³)
- ③ アルカリ調整試薬; NaCl (食塩: NaCl 99%以上)
- ④ コンクリート配合; コンクリート配合を表-4.6に示す。
- ⑤ 養生条件; 60℃湿潤養生
- ⑥ 健全材料; 普通モルタル(普通セメント: 水: 富士川砂 = 1: 0.5 : 2.25)

表-4.6 コンクリート配合表

骨材最大寸法 (mm)	空気量 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位重量 (kg)				
				セメント	水	粗骨材	細骨材	アルカリ量
20	2.0	55.0	45.0	320	176	1023	828	7.2

(2) 実験結果および考察

図-4.39にモルタルバー法材令6ヶ月の膨張量とダブルシリンドー法材令8週の膨張量の関係を示す。

モルタル供試体では材令8週までの測定を終えた55骨材はモルタルバー法で有害と判定された33骨材中、22骨材の供試体でひびわれが確認され有害と判定され、無害と判定された22骨材はどの供試体もひびわれは発生しておらず無害と判定された。ダブルシリンドーの膨張量はモルタルバー法の膨張量が多いほど大きく、早期にひびわれが確認できる傾向を示した。モルタルバー法で有害と判定された骨材でひびわれが発生していない11骨材は、図-4.39に示すように8骨材はモルタルバー法の材令6ヶ月の膨張量が0.2%以下の比較的膨張速度の小さい骨材であることから今後ひびわれが確認されると思われる。モルタルバー法の材令6ヶ月の膨張量が0.2%を超える3骨材については岩種がすべてチャートであることから設定した試験条件がチャート系の岩種には適さないことが考えられる。測定は現在も継続中であり、ひびわれが発生していない11骨材の中でも材令10週でひびわれが確認された骨材もあり、材

令13週ではモルタルバー法との高い対応が得られることが予想され、モルタル供試体では簡易試験方法としての適用は可能であると思われる。

一方、コンクリート供試体では材令8週までにひびわれが確認できた骨材は僅かに4骨材にすぎずコンクリート供試体での促進方法の検討が必要である。コンクリートのアルカリ量は予備実験の結果から材令13週までに判定が可能なアルカリ量が $7\text{Kg}/\text{m}^3$ 以上であったことから、モルタルバー法のアルカリ量 $\text{Na}_2\text{O} = 1.2\%$ （単位アルカリ量 $7.2\text{Kg}/\text{m}^3$ ）と同等のアルカリ量を設定した。コンクリート供試体は骨材を粗骨材として実験を実施したものであるがA1～A4骨材については単位アルカリ量 $7.2\text{Kg}/\text{m}^3$ のコンクリートで骨材とした場合、細骨材とした場合の比較を行った。その結果の一例を図-4.40に示す。図-4.40に示すように細骨材とした場合にはモルタル供試体と同じ材令でひびわれが確認されるが粗骨材の場合はこれより遅れてひびわれが確認されている。このことから粗骨材は細骨材より反応に多くの時間を必要とするため、多くのアルカリ量等の高いエネルギーを与えなければモルタルと同程度の反応速度は得られないと思われる。

以上の結果より、ダブルシンダー法はモルタルバー法との対応がよく、簡易試験法としての適用が可能と考えられる。しかし、判定にはモルタル13週（3ヶ月）、コンクリート26週（6ヶ月）程度と長期間を必要とする。促進試験も兼ねるためには、アルカリ量を大きくするなど試験条件の改善が必要である。

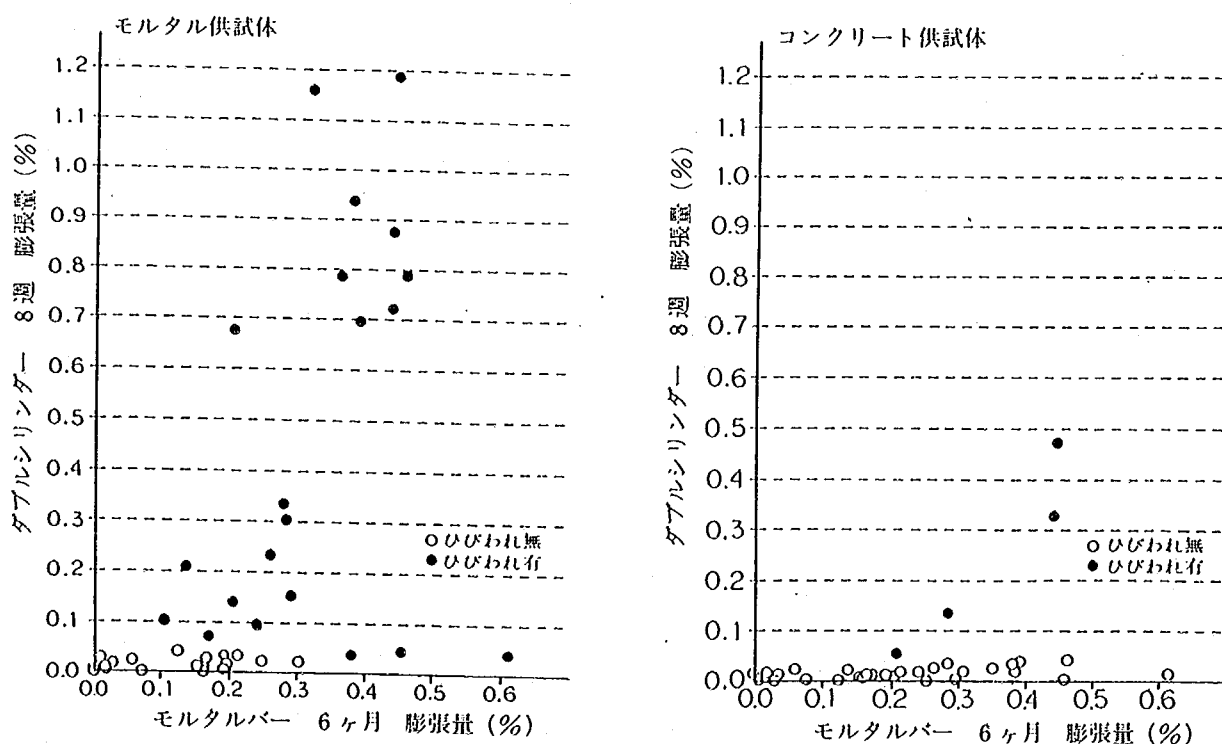


図-4.39 モルタルバー法との膨張量の関係（実証実験）

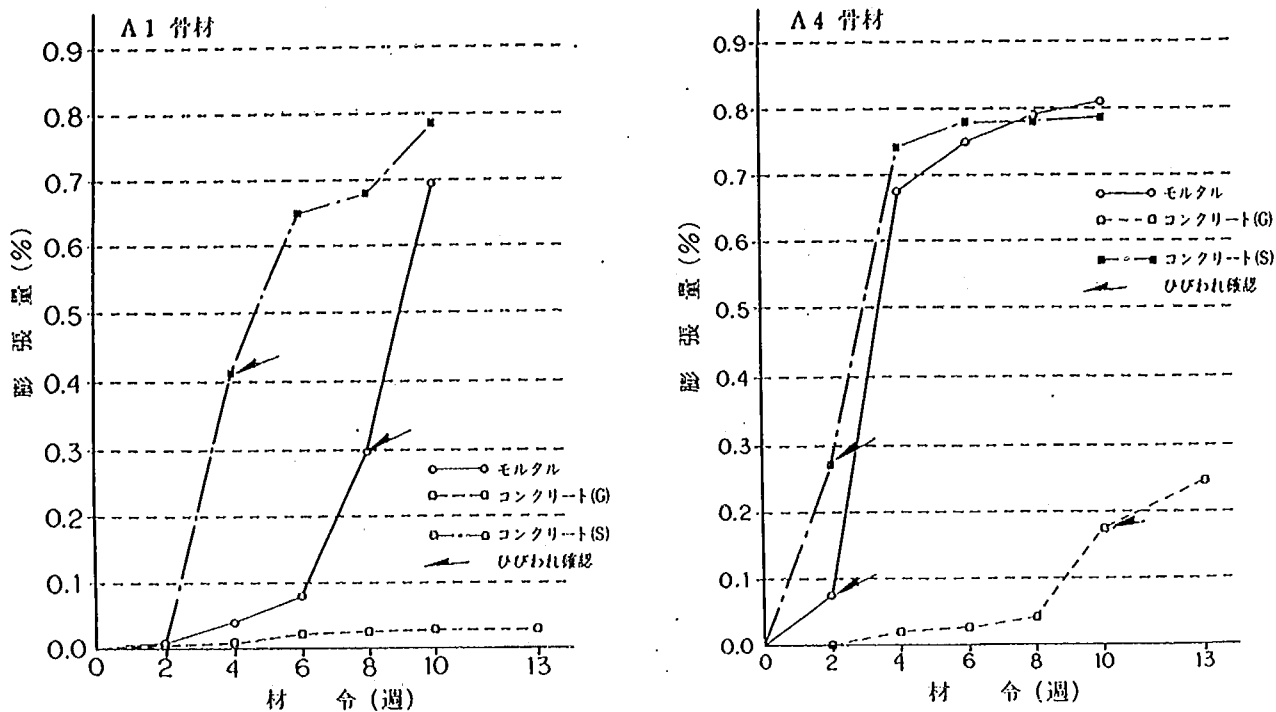


図- 4.40 材令と膨張量の関係 (実証実験)

4.5 まとめ

標準試験法 (モルタルバー法) の精度向上のため修正点をまとめると表- 4.7 のとおりである。修正案では大きいバラツキを生みやすいセメント、養生方法を限定したことにより、今後の骨材試験はさらに精度の向上がはかれるものと考えられる。

簡易試験方法ではオートクレープ法、ダブルシリンダー法による骨材判定の可能性を見出した。試験法のフローを図- 4.41、4.42に示す。また、標準試験法との比較を表- 4.8に示す。

表- 4.7 モルタルバー法試験比較表

項 目	建設省暫定案	同 左 修 正 案	J I S 付 属 警 8	コンクリート工学協会	ASTM C 227
試験目的	骨材の潜在的反応性	同 左	同 左		使用するセメントと使用する骨材を組み合わせた場合の反応性
粒 度	ASTM及びJSCE粒度	同 左	同 左	A S T M	A S T M
骨材の破碎方法	粗粒：ジョークラッシャー 細粒：ディスク型ミル	同 左	同 左	同 左	規定なし
骨材の含水状態	表 乾	同左（但し、配合が変化しない範囲で他の状態での使用も可）	同 左	同 左	
供試体寸法と本数	4×4×16cm 3本	同 左	同 左	同 左	2.5×2.5×28cm 4本
セメントとアルカリ量	低アルカリセメント＋NaOHでR ₂ Oを1.2%に調整	標準セメントの使用＋NaOHでR ₂ Oを1.2%に調整	暫 定 案	高アルカリセメント＋NaOHでR ₂ Oを1.2～1.25%に調整	使用するセメント
モルタル配合（調合）	セメント：水：砂＝1.0：0.5：2.25	同 左	同 左	同 左	セメント：砂＝1.0：2.25 フロー 102～120（%）
養生温度	40±2℃	同 左	同 左	同 左	37.8±1.7℃
養生方法	湿気箱による方法及び紙を巻く方法	紙を巻く方法を推奨、その他の湿気箱による方法も使用も認める	暫定案による方法	湿気箱による方法	湿気箱による方法（ASTM C 511）
判定基準	(0.05%/3ヶ月) 0.10%/6ヶ月	同 左	同 左	同 左	同 左
要求される精度	絶対値	平均膨張率<0.05%のとき、平均値からの差0.01%以内	同 左	暫定案の精度規定及び精度の条件がどれにも適合しない場合の救済措置あり*1	平均膨張率<0.02%のとき、平均値からの差0.003%以内
	相対率	平均膨張率>0.05%のとき、平均値からの差は平均値の±20%以内	同 左 救済措置有*1		平均膨張率>0.02%のとき、平均値からの差は平均値の±15%以内

* 1) 全部の供試体の膨張量が0.1%以上の場合は、精度に関係なく有害と判定してもよい。
最もものびなかった1本を除いて、残りの2本の平均値で判定してもよい。

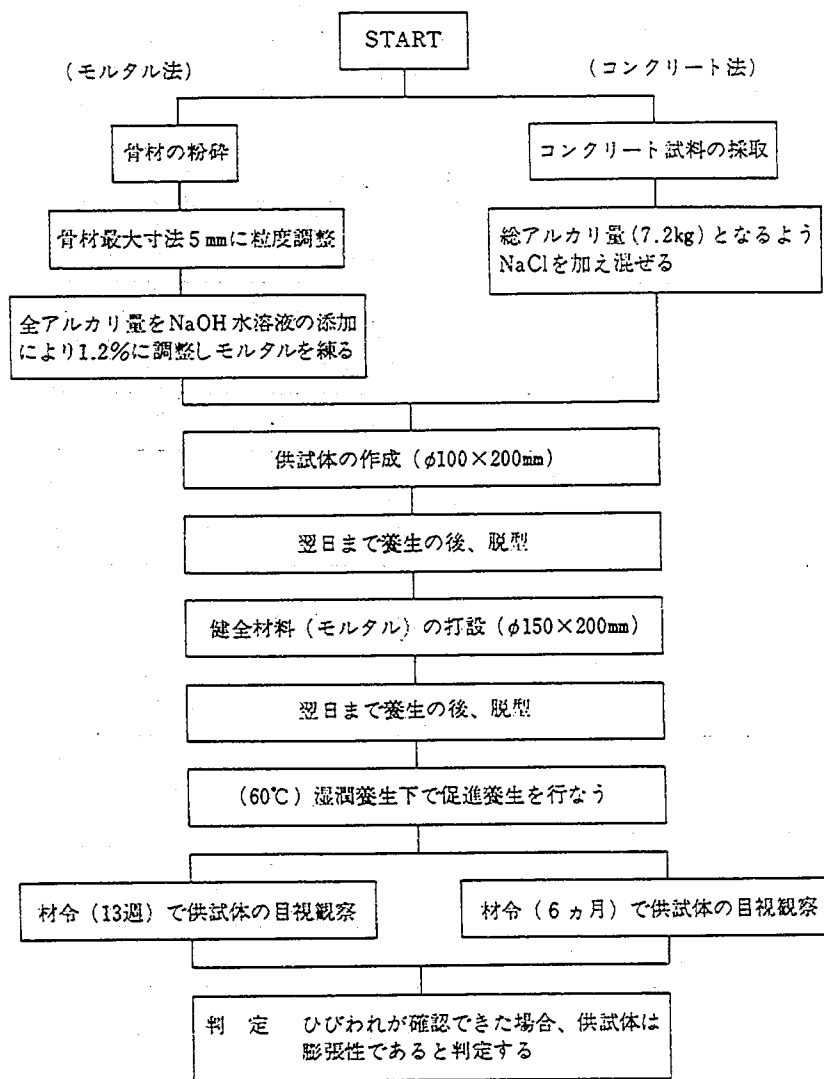


図-4.42 ダブルシリンダー法による ASR 簡易試験方法フロー

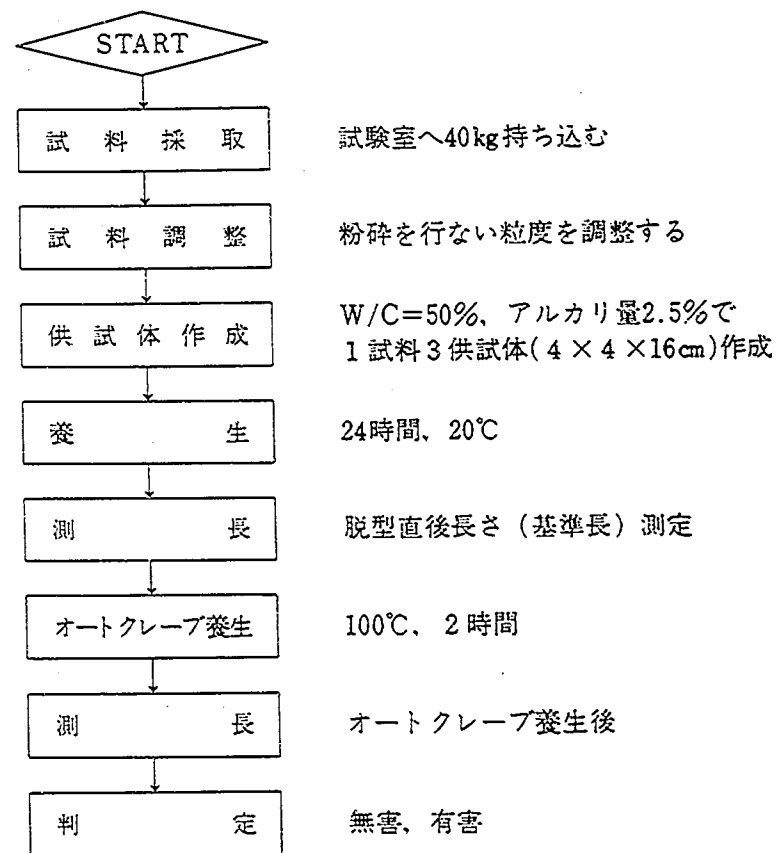


図-4.41 オートクレーブ法試験フロー

表-4.8 標準試験法と簡易試験法の比較

	化 学 法	モルタルバー法	オートクレーブ法	ダブルシリンドー法	
				モルタル法	コンクリート法
試験方法	化 学 的	物 理 的	物 理 的	物 理 的	物 理 的
試験期間	4～5日	6 カ 月	3～4日	3 カ 月	6 カ 月
判定方法	溶解シリカ量 アルカリ濃度減少 量測定	膨張率測定	膨張率測定	ひびわれ	ひびわれ
判定基準と 判定	判定図により 無害, 潜在的 有害, 有害	0.05%以上(3カ 月)または0.1%以 上(6カ月)有害 他は無害	0.1%以上 有害 他は無害	ひびわれ あり 有害 なし 無害	
特 徴	・短期間で判定 ・特殊技能必要	・長期間必要	・短期間 ・モルタルバー法程 度の技術 ・化学法程度の判定	・簡易 ・特殊な器具必要なし ・コンクリートの判定可	

第5章 アルカリシリカ反応の膨張抑制に関する研究

5.1 抑制対策の概要

第2章で述べたとおり、我国に今まで存在しないとされてきたアルカリ骨材反応によるコンクリート構造物の劣化が発見され、それも一部の地域でなく、全国内に存在することが明らかとなっている^{5.1)}。これはアルカリ反応性骨材が一部の地域でなく全国に分布している可能性をも秘めている。このような状況のもと、アルカリシリカ反応に対しての対策が求められた。

アルカリシリカ反応の発生を防ぐには、アルカリ反応性を有しない骨材を使用するのがよいが、近年、枯渇する骨材資源を考えた場合、アルカリ反応性を示す骨材をも有効に使用しなければならない。そのための無害化技術として、すでに諸外国で規格検討されているアルカリ骨材反応抑制対策を参考に我国の実情にあったアルカリシリカ反応抑制対策の調査を行った。

具体的には次に示す代表的なA S R抑制の検討を行った。

- 1) フライアッシュ及び高炉スラグ粉末のA S R抑制効果
- 2) 低アルカリ形セメントによるA S R抑制の検討
- 3) アルカリ総量規制によるA S R抑制の検討

1)は、フライアッシュをA S R抑制材料として使用するために土木研究所、フライアッシュ協会、電力中央研究所、土木研究センターとの四者共同研究で行った検討を中心に述べる。試験はパイレックスガラスを用いたASTM C441-81による試験と天然骨材を用いてA S R抑制効果の確認を行った。また、あわせてフライアッシュの品質とA S R抑制の関係も調査した。

高炉スラグはフライアッシュ同様、A S R抑制材料として使用するために、土木研究所、鉄鋼スラグ協会、土木研究センターの三者共同研究で行ったものである。試験は主にパイレックスガラスや天然骨材を用いて高炉スラグ粉末のA S R抑制効果を確認するために行った。また、高炉スラグ粉末のA S R抑制メカニズムや高炉スラグ品質が抑制効果におよぼす影響についても検討を行った。

2)および3)は、土木研究所とセメント協会で行った共同研究を中心に述べる。ここでは、低アルカリ形セメントのA S R抑制効果について、その使用量も含めて検討したものである。

この他、決定的なA S R抑制対策としては、無害の骨材の使用があげられるが、この対策については判定試験が重大な意味を持ち、また第4章ですでに述べてあるためここではあえてとりあげない。

以下、行われた検討の結果について述べる。

5.2 混和材による抑制

5.2.1 高炉スラグ微粉末による抑制

ボゾランをA S R抑制として使用する場合、先ず心配な点は十分に抑制効果を有するものであるかどうかである。また、これは銘柄によっては逆に膨張量を助長させるものがあるといわれていることにもむす

びつく。

我国には、高炉スラグ粉末が生産されている工場が多数あり、これらの高炉スラグ粉末のA S R抑制効果を確認するため、土木研究所と各関係機関とで共同研究を実施した。

(1) スラグ品質とパイレックスガラスを用いたモルタルバー試験

表-5.1に代表的な12試料のスラグ粉末の化学成分および物理量を示す。

高炉スラグの主成分であるSiO₂、Al₂O₃、CaO、MgOの4成分は、全体平均で95.2%、最大96.6%～最小93.1%の範囲にあり安定した品質であるといえる。また、スラグのNa₂O、K₂Oは各々平均値

表-5.1 (1) スラグ粉末の化学成分

(%)

試料	ig. loss	insol.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	MnO	S	合計	H ₂ O	水溶性H ₂ O	塩基度
A	0.34	0.10	31.6	13.7	0.4	42.8	6.2	2.1	0.25	0.50	0.86	0.62	1.22	98.92	0.55	0.023	1.98
B	+0.40	0.07	34.2	14.4	0.43	42.6	5.4	—	0.22	0.40	1.15	0.48	1.01	99.26	0.48	<0.01	1.82
C	0.14	0.48	34.2	13.4	0.4	41.3	6.2	—	0.25	0.42	1.73	0.58	0.90	98.57	0.52	0.012	1.79
D	0.26	0.06	32.2	14.0	0.44	41.8	5.9	1.96	0.17	0.47	1.09	0.70	1.35	98.81	0.48	<0.01	1.92
E	+0.11	0.09	31.5	13.9	0.5	41.3	6.4	2.86	0.26	0.39	0.98	0.97	1.63	99.07	0.52	0.031	1.95
F	+0.004	0.05	32.5	13.6	0.45	42.0	5.3	2.3	0.28	0.51	1.37	0.58	1.64	98.89	0.62	0.032	1.87
G	+0.06	0.26	33.4	13.8	0.5	41.4	6.3	1.96	0.18	0.32	0.81	0.45	1.34	99.06	0.39	0.015	1.84
H	+0.52	0.09	33.3	14.6	0.7	40.4	7.6	—	0.26	0.39	1.42	0.33	0.90	99.11	0.52	0.009	1.88
I	+0.78	0.24	34.6	13.7	1.81	41.6	6.0	—	0.26	0.32	0.92	0.43	0.84	99.44	0.49	<0.01	1.78
J	+0.48	0.16	33.9	13.1	0.64	42.9	6.5	—	0.45	0.34	0.75	0.67	0.90	99.36	0.68	<0.01	1.85
K	+0.53	0.12	34.3	14.2	0.50	41.9	6.2	—	0.31	0.35	1.01	0.56	0.92	99.32	0.54	<0.01	1.82
L	0.39	0.23	34.0	13.2	0.36	42.5	6.8	—	0.21	0.34	0.57	0.44	0.79	98.53	0.43	<0.01	1.84
平均	+0.15	0.16	33.3	13.8	0.59	41.9	6.2	(2.24)	0.26	0.38	1.06	0.57	1.12	99.03	0.52		1.86
最大	0.39	0.48	34.6	14.6	1.81	42.9	7.6		0.45	0.51	1.73	0.97	1.64	99.44	0.68		1.98
最小	+0.78	0.05	31.5	13.1	0.36	40.4	5.3		0.17	0.32	0.57	0.33	0.79	98.53	0.39		1.78
標準偏差	0.39	0.12	1.09	0.46	0.40	0.74	0.61		0.07	0.09	0.32	0.17	0.31	0.30	0.08		0.06

() は石膏添加試料の平均

P(カナダ)	0.0	—	34.7	9.9	0.3	37.4	15.0	—	0.35	0.46	0.2	0.4	1.7	100.01	0.65	0.009	1.79
--------	-----	---	------	-----	-----	------	------	---	------	------	-----	-----	-----	--------	------	-------	------

表-5.1 (2) スラグの物理試験結果

試料	スラグ比重	スラグ粉末度		ガラス化率(%)		曲げ強さ*(kgf/cm ²)				圧縮強さ*(kgf/cm ²)				塩基度
		88μ残分(%)	比表面積(cnl/g)	顕微鏡	X線	3日	7日	28日	91日	3日	7日	28日	91日	
A	2.93	0.4	3790	84.5	90.8	28	42	73	78	101	182	407	532	1.98
B	2.92	0.1	3850	98.3	99.5	23	35	69	80	71	152	422	580	1.82
C	2.93	1.4	3840	97.7	98.9	22	35	66	77	72	154	389	524	1.79
D	2.90	0.5	4160	98.8	99.4	30	46	74	79	115	216	472	643	1.92
E	2.92	0.5	3480	96.1	98.6	27	40	68	71	95	169	394	520	1.95
F	2.91	0.1	3650	97.2	98.0	25	39	70	80	94	174	432	560	1.87
G	2.90	0.2	3940	98.5	99.4	26	37	67	76	93	171	399	560	1.84
H	2.91	0.2	3710	96.5	98.0	22	35	77	78	73	160	425	589	1.88
I	2.93	0.7	4050	97.2	98.4	25	35	73	79	81	160	429	581	1.78
J	2.93	0.1	4020	96.0	97.2	23	38	73	81	80	180	431	593	1.85
K	2.92	1.9	3660	97.6	99.4	24	36	69	74	74	163	408	575	1.82
L	2.91	0.2	3710	97.5	98.4	28	41	75	85	88	187	437	555	1.84
平均	2.92	0.5	3820	96.3	98.0	25	38	71	78	86	172	420	568	1.86
最大	2.93	1.9	4160	98.8	99.5	30	46	77	85	115	216	472	643	1.98
最小	2.90	0.1	3490	84.5	90.8	22	35	66	71	71	152	389	520	1.78
標準偏差	0.011	0.57	194	3.8	2.4	2.6	3.5	3.5	3.5	13.7	17.7	22.9	34.2	0.06
P	2.90	—	4200	96.9	—	31	50	79	83	114	234	452	557	1.79

*ボルト：スラグ＝50：50 混合物のJIS R 5201による強さ試験結果

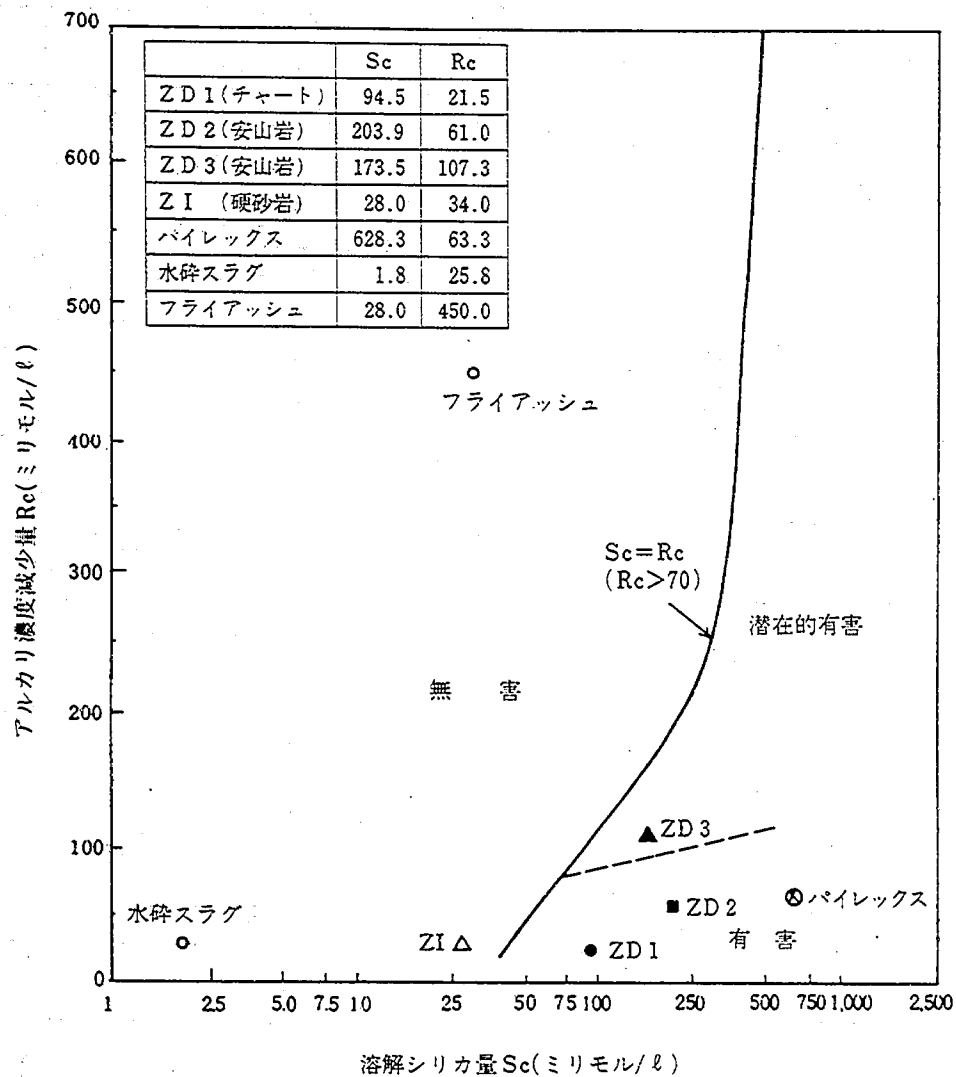


図-5.1 ASR化学法の試験結果
(ASTM C 289)

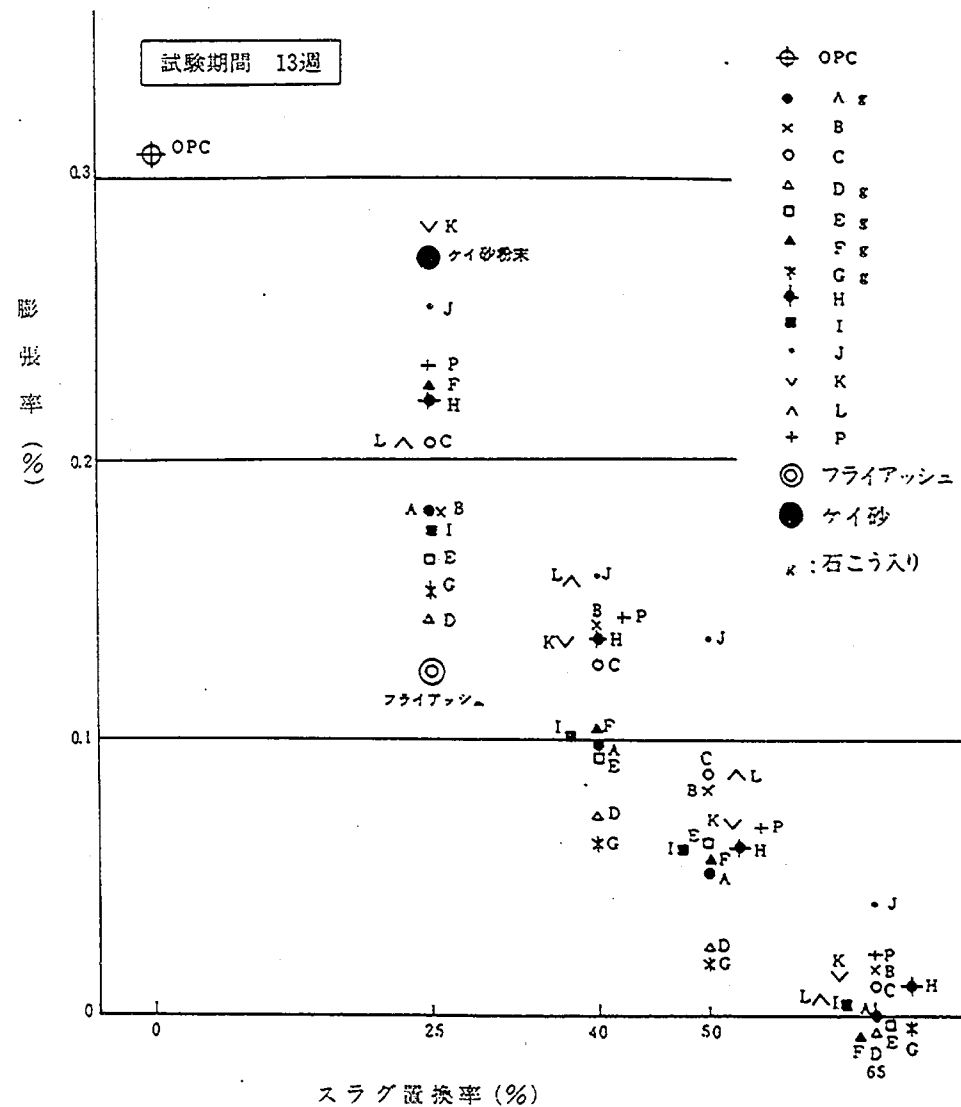


図-5.2 スラグ置換率と膨張率 (銘柄別)

で0.26%、0.38%と低い。しかしながら、スラグ品質がASRに及ぼす影響についてはあまり調査されていない事もあって、スラグ品質が良ければASR抑制効果を有するとはいいいがたい。それは「高炉スラグの品質とその混合率および骨材の化学的性質によってはあまり有効でないことがありえる」と大橋ら^{5,2)}も報告している。また、ポゾランのASR抑制機構が解明されていない現在では、抑制効果のあるポゾランかどうかは試験によって判断される。その代表的な試験方法としてASTM C 441が良く知られている。この試験を用いてスラグ品質とモルタルの膨張量の関係について調査を行った。

図-5.1に用いた骨材等のアルカリシリカ反応性試験化学法の結果を示す。

図-5.2に国産スラグ12銘柄とケイ砂粉末、フライアッシュを用いて行ったASTM C 441の試験結果を示す。置換率25%ではフライアッシュが最も膨張の抑制効果が高く、スラグ粉Kが最も低い。ほとんど活性がなく、アルカリの希釈効果しかないと考えられるケイ砂粉末は、スラグ粉Kの次に効果が低い。スラグ粉K以外のスラグ粉の効果はケイ砂粉末とフライアッシュの間にあり、しかもDのように膨張量がOPCを単独で用いた場合に比較して半分以下になるものもあれば、JやKのように膨張量が20%も減少しないものまで大きくばらついている。スラグ粉については、置換率が40、50、65%と大きくなるに従って、膨張抑制効果が大きくなるとともに、効果のばらつきも少なくなる傾向にある。

表-5.2にスラグ品質とモルタルの膨張量との単相関分析結果を示す。同表は、置換率50%、パイレッ

表-5.2 スラグ品質とモルタルの膨張量との単相関分析結果

	N	2Ws Exp	8Ws Exp
ig loss	12	0.539	0.340
insol	12	-0.335	0.268
SiO ₂	12	0.614**	0.507
Al ₂ O ₃	12	-0.272	-0.468
FeO	12	0.123	-0.015
CaO	12	0.396	0.429
MgO	12	0.199	0.172
Na ₂ O	12	0.772*	0.747*
K ₂ O	12	-0.400	-0.311
TiO ₂	12	-0.100	-0.071
MnO	12	-0.174	-0.011
S	12	-0.704*	-0.595
R ₂ O	12	0.516	0.533
塩基度	12	-0.440	-0.375

* 1% 2.663

** 5% 2.387

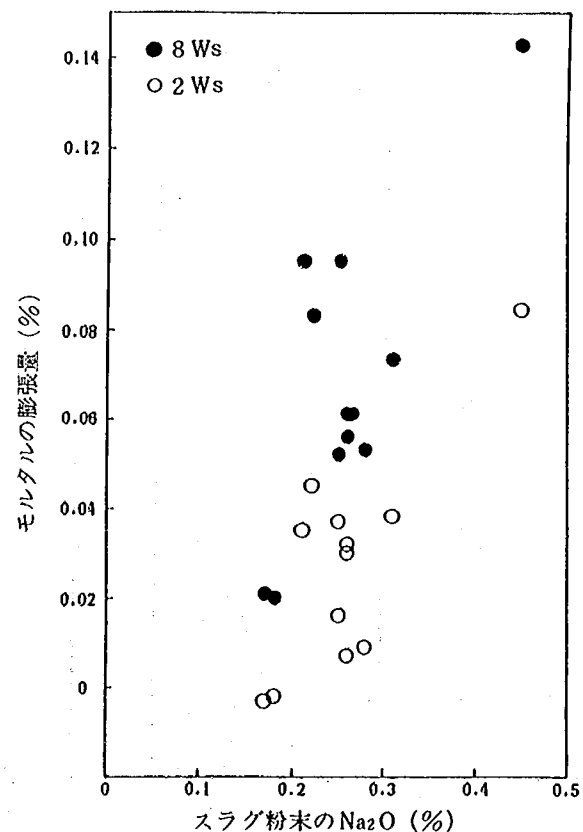


図-5.3 スラグ粉末のNa₂Oとモルタルの膨張量の関係

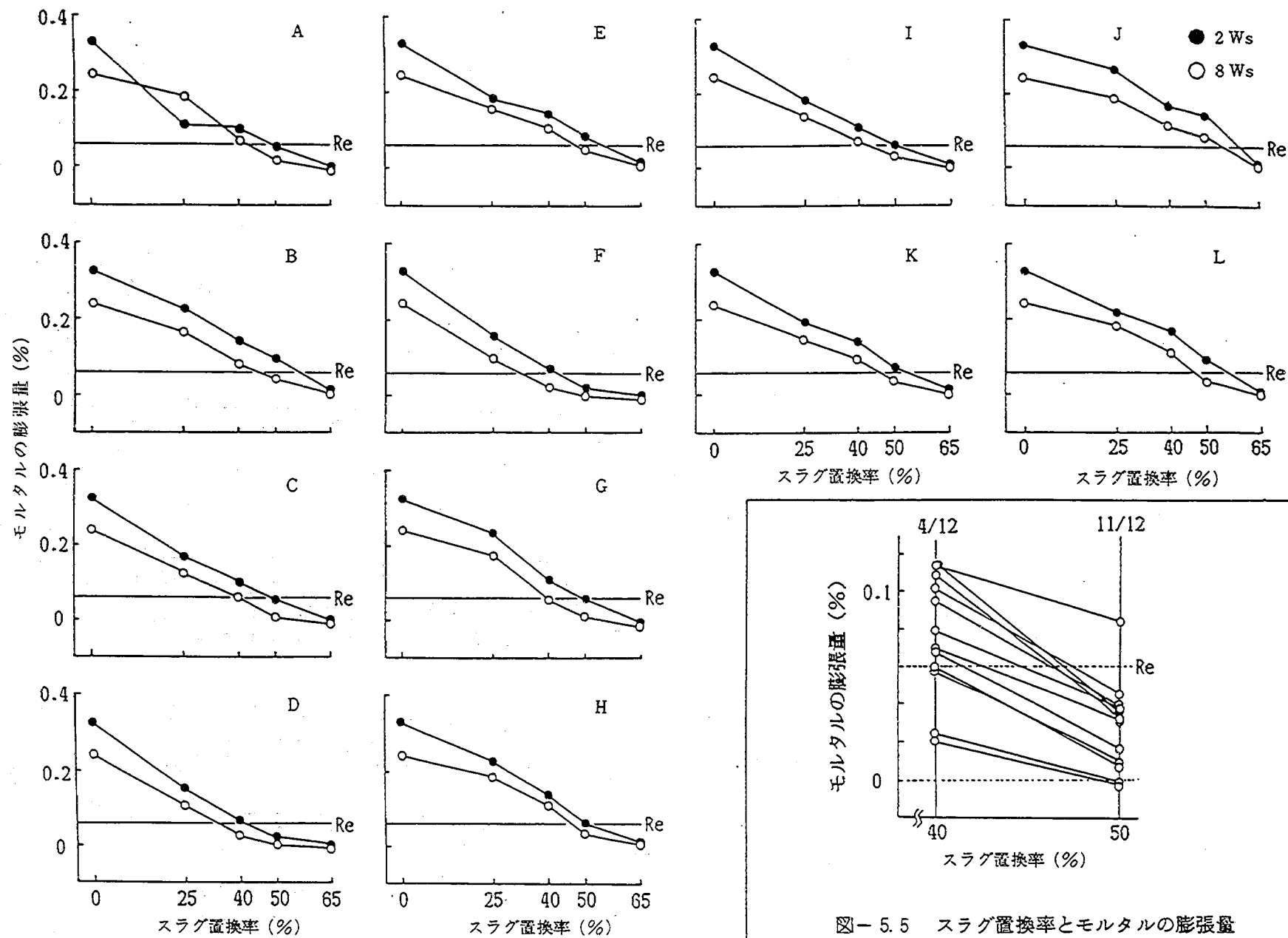


図-5.4 国産スラグの粉末のASTM C 441 結果

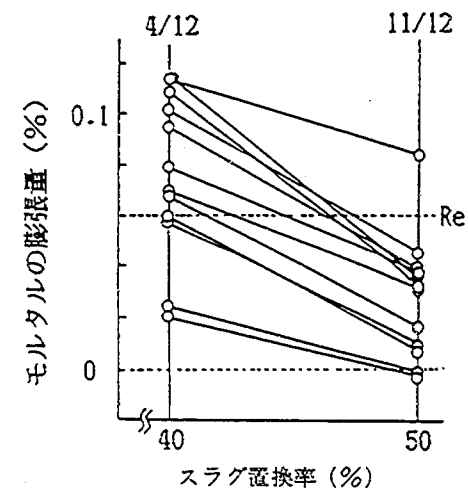


図-5.5 スラグ置換率とモルタルの膨張量

クスガラスを用いた ASTM C 441 に準じて試験をモルタルの材令 2 週、8 週での膨張量の関係を示したものである。モルタルの膨張が続いている材令 2 週では SiO_2 、 Na_2O 、S が比較的よい相関を示しているが、膨張が平衡状態に近い材令 8 週では Na_2O だけがよい相関を示している。これを図示すると図- 5. 3 のようになり、スラグ粉末の Na_2O が高いとモルタルの膨張量も大きくなる傾向を示している。

また、成分以外では置換率が高い相関を示している。通常市販されている高炉セメント B 種ではスラグ粉末の混入率は $40 \pm 5\%$ が多い事から置換率 40、50% での抑制の効果をみると 40% では 13 試料中 4 試料、50% では 12 試料が ASTM C 441 の基準値を満足している (図- 5. 4, 5. 5)。置換率が低い範囲では高炉スラグ粉末の A S R 抑制効果は銘柄によってばらついているが、置換率が高くなるにつれ、ばらつきは少なくなり銘柄による差はなくなっている。

しかし、ASTM C 441 の基準値 $R_e = 75\%$ はスラグでは保証できないとの意見もある。それは、次のようなことである。

モルタルあるいはコンクリートを水中養生するとセメントゲルによる水の吸着作用がセメントゲルの凝集力に従って作用し、膨張圧によってゲル粒子をひき離そうとし、さらに表面張力も低下し、膨張が助長される。このことからモルタルバーの長さ変化は、

$$\text{長さ変化} = \text{膨潤量} + \text{膨張量}$$

となり、長さ変化は見かけ上大きくなる。この膨潤量はポルトランドセメント使用時に比べ高炉セメントを用いた場合の方が、大きいことが指摘されている^{5. 3)}。

DIN 4227 に示される湿潤条件 (相対湿度) とコンクリートの長さ変化の関係では水中では $\epsilon_{s0} = -10 \times 10^{-5}$ (膨潤) するとしているが、膨潤条件に対応し、コンクリートは膨潤から (乾燥) 収縮まで連続的に起こるとして数式化を試みると、CEB-FIP または DIN の表は次のようになる。

$$\epsilon_{s0} = 73.48 \times 10^{-5} (1 - RH/96.5)^{0.642} \dots\dots\dots (5.1)$$

なお、コンクリート標準示方書 (土木学会) の表は次式となる。

$$\epsilon_{s0} = 56.7 \times 10^{-5} (1 - RH/96.5)^{0.642} \dots\dots\dots (5.2)$$

すなわち CEB-FIP、DIN または土木学会では相対湿度 96.5 % 以上で「膨潤」することを示している。

モルタルバーは相対湿度 95% 以上で保存するので、おそらく「膨潤作用」も加味した長さ変化を測定しているとみられる。

図- 5. 6 は、豊浦標準砂と相馬砂からなるシリカサンドに低アルカリ形ポルトランドセメントを用い土木学会基準「コンクリート用高炉スラグ微粉末規格 (案)」に規定されるモルタル配合により 20℃ 水中養生と 40℃ 湿空養生により ASTM C 227 の $25 \times 25 \times 285 \text{ mm}$ モルタルバーの長さ変化を求めたものである。この図から、高炉スラグ粉末によって、ポルトランドセメントを置換したモルタルはその置換率に応じて

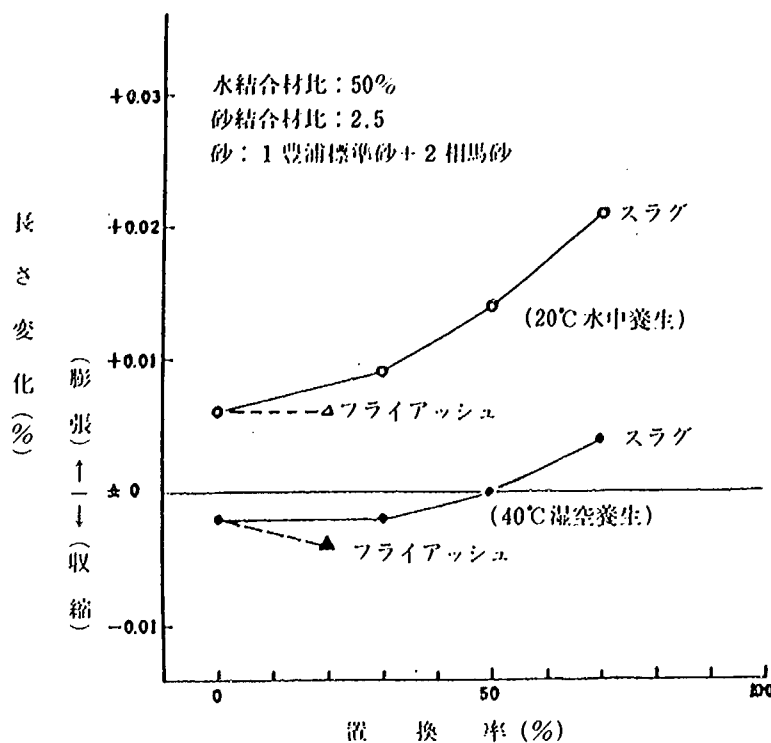


図-5.6 土木学会規準高炉スラグ微粉末用試験モルタル
 による $25 \times 25 \times 285 \text{ mm}$ 供試体の14日膨潤量

「膨潤作用」が大きくなる傾向を示すが、フライアッシュの場合この傾向はみられない。

従って、モルタルバーの膨張量が小さい領域で判定しようとする場合、高炉セメントの膨潤量を考慮しなければならず、ポルトランドセメントやフライアッシュセメントのモルタルバーの膨張量とは同様に扱うことはできないものとする。

スラグ粉末を抑制対策として使用する場合、 Na_2O 量の低いスラグ及び混入率は可能な限り50%に近づけるならば、我国で生産されているスラグ粉末すべてを抑制対策として用いることもでき、その効果も期待できるものであるといえる。但し、A S R抑制に必要な置換率はスラグの膨潤を考慮すると、A S R抑制に必要な置換率は50%より小さな値になるものと考えられる。

(2) 天然骨材を用いたモルタルバー試験

ここではパイレックスガラスを用いたモルタルバー試験でA S R膨張抑制効果が最大のスラグ粉末D、中間のC、最小のJの3種のスラグ粉末を選定して、天然骨材におけるA S R膨張抑制について検討した。このように天然骨材を用いたこの種の実験では定まった抑制効果の目安がないが、その判断の主なものについて述べると、

- ① モルタルバー法の基準の適用（3ヶ月で0.05%、6ヶ月で0.1%）により効果があるとみなす。
- ② 低アルカリセメント使用時（ $E_{14} = 0.02\%$ or $R_e = 75\%$ ）と同程度の膨張量に抑制されたことにより効果があるとみなす。
- ③ モルタルバーのひびわれ発生を基準に、効果があるとみなす。

があげられるが、このうち②については高炉セメントを用いると膨潤が大きくなるとの報告^{5.3)}があり、この膨潤を考慮する必要がある、③については現状では個人差や不確定な要素もあるため、判断の基準にはなりづらい。よって、ここではとりあえず、①をもとに抑制効果について考えることとする。

反応性の高い輝石安山岩を用いてスラグの種類を変化させた場合の結果を図-5.7、図-5.8、図-5.9に示す。なお、試験は建設省暫定案モルタルバー法に準じて行った。但し、アルカリ量は0.86、1.16、1.96%の3水準変化させた。

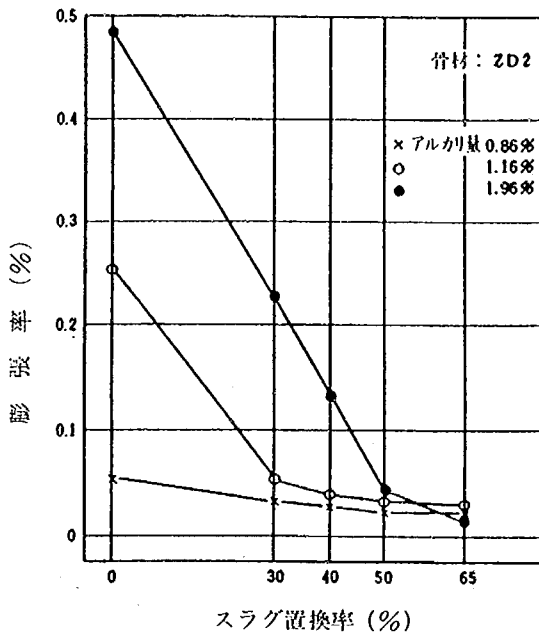


図-5.7 スラグ置換率と膨張率
(スラグC, 材令6ヶ月)

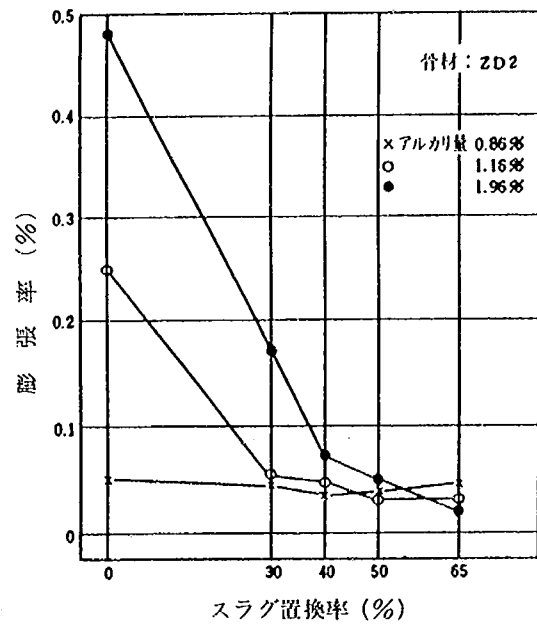


図-5.8 スラグ置換率と膨張率
(スラグD, 材令6ヶ月)

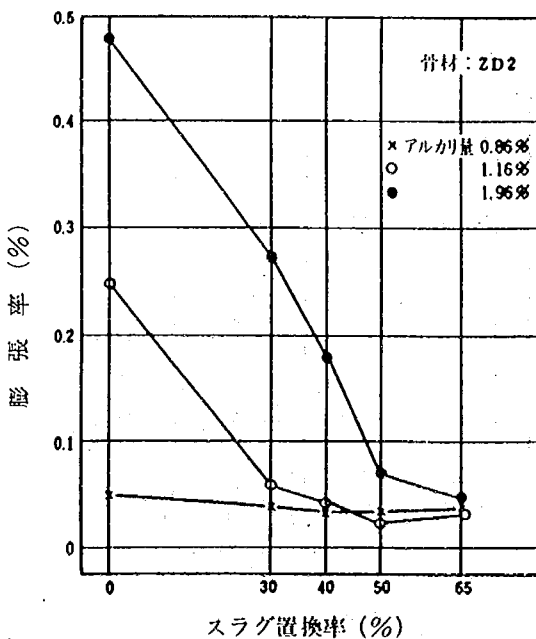


図-5.9 スラグ置換率と膨張率
(スラグJ, 材令6ヶ月)

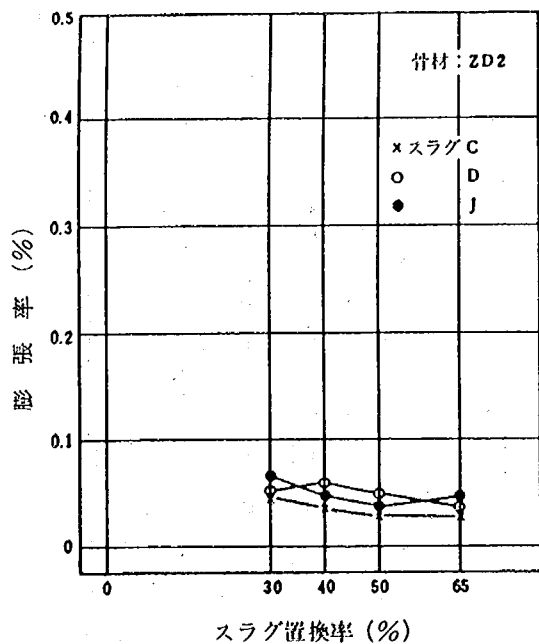


図-5.10 スラグ銘柄の比較
(アルカリ量1.16%, 材令6ヶ月)

スラグ粉末Cを用いた場合、アルカリ量1.2%のセメントを用いたとき置換率30%では6ヶ月0.05%の膨張となり、非常に高いアルカリ量の2.0%のセメントを用いたときには、置換率45%で6ヶ月0.1%、50%で6ヶ月0.05%程度となっている。スラグ粉末Dを用いた場合には、図-5.8に示すように、アルカリ量1.2%のセメントを用いたときは、スラグ置換率40%で、6ヶ月0.05%程度となっており、アルカリ量2.0%のセメントを用いたときには、置換率40%で6ヶ月0.1%以下に、スラグ置換率50%で6ヶ月0.05%以下になっている。スラグ粉末Jを用いた場合には、アルカリ量1.2%のセメントを用いたときには置換率40%で6ヶ月0.05%以下、アルカリ量2.0%のセメントを用いたときは、置換率50%で6ヶ月0.1%以下、置換率約60%で6ヶ月0.05%程度となっている。図-5.10にスラグ粉末C、D、Jの銘柄別の膨張抑制効果を示すが、これをみるとパイレックスガラス骨材を用いたASTM C 441で抑制効果の少なかったスラグJ、逆に、大きかったD、中間のCが天然骨材に対しては有意な差をもたなくなっていることがわかる。

次に、スラグ粉末Dと3種類の天然骨材を用いたモルタルバーの実験結果を図-5.8、図-5.11、図-5.12に示す。チャートを用いた実験では図-5.11のようにアルカリ量が1.2%のセメントを用いた場合には、スラグ粉置換率40%で膨張量が6ヶ月で0.1%以下におさえられ、45%程度の置換率で6ヶ月で0.05%程度になっている。アルカリ量の2.0%のセメントを用いた場合には6ヶ月の膨張量を0.1%以下とするには50%程度置換率が必要であり、また、6ヶ月で0.05%以下とするには60%近い置換率が必要とな

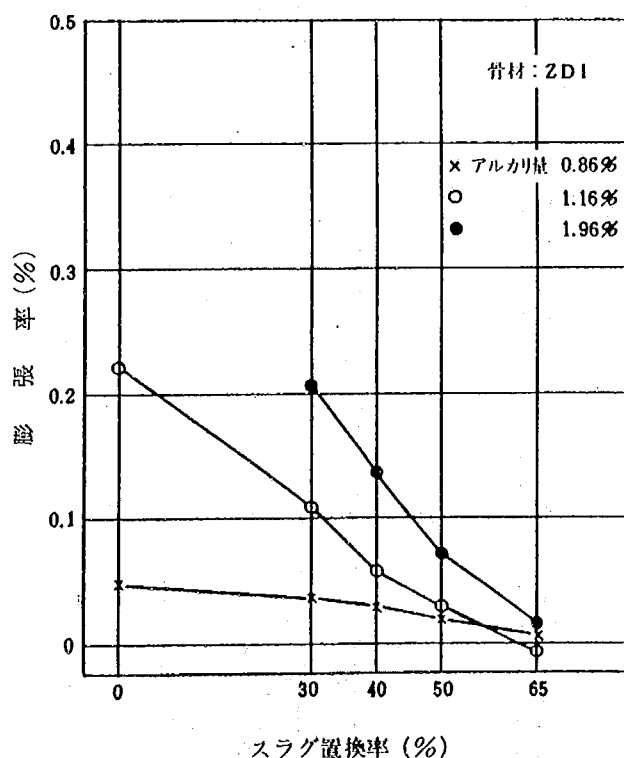


図-5.11 スラグ置換率と膨張率
(スラグD, 材令6ヶ月)

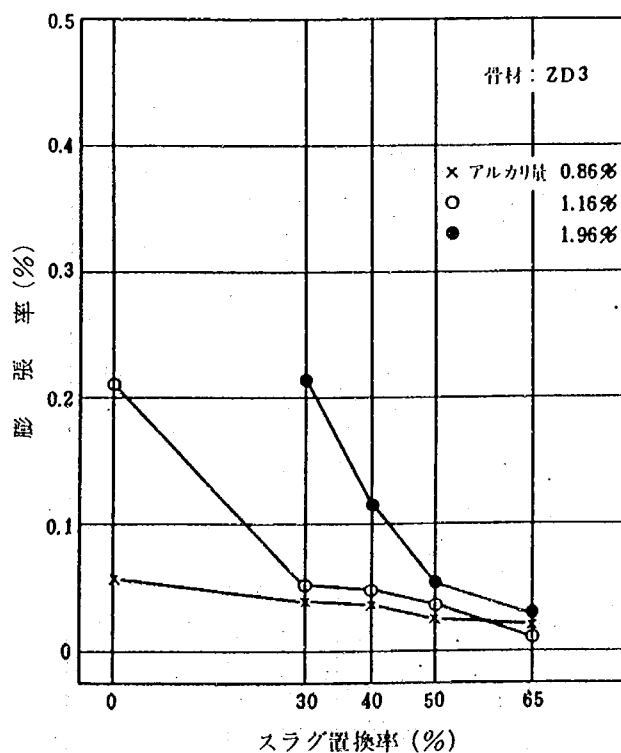


図-5.12 スラグ置換率と膨張率
(スラグD, 材令6ヶ月)

る。この傾向は、図- 5.12の安山岩を用いた場合にもほぼあてはまるものである。輝石安山岩とスラグ粉末Dとの組合せについては前述した。

以上の結果から、天然骨材に対し、スラグ粉末Dを用いた場合には、アルカリ量 1.2 %のセメントを用いたときにはスラグ置換率40%で、ほぼ6ヶ月 0.1 %以下の膨張量とすることができ、置換率45%で6ヶ月 0.05 %以下の膨張量におさえられているといえよう。このアルカリ量 1.2 %という値は、これまでに生産されたセメントのほぼ上限値に近い値である。また、アルカリ量 2.0 %のセメントを用いたときには、スラグ置換率50%で、6ヶ月 0.1 %以下、置換率60%で6ヶ月 0.05 %以下とすることができるといえる。

(3) 高炉スラグ粉末のA S R抑制メカニズム

スラグ粉末のA S R抑制効果には、アルカリの希釈効果だけとする説と、それ以外の効果も加味されているとする説がある。この点を確認するために、ポルトランドセメントとスラグ粉末を合せた全結合材に対するアルカリ量を一定にするように調整し、試験を行った。

まず、図- 5.13~図- 5.15に、セメントに対するスラグ置換率とパイレックスガラス骨材のモルタルバーの膨張量の関係を示す。破線で示したものはセメントのアルカリ量を一定としたものであるが（スラグ中のアルカリ量は無視）、セメントのアルカリ量が 0.51 %の場合には、置換率が25%程度でも膨張抑制効果が非常に大きいことがわかる。セメントのアルカリ量 0.98 %から 1.43 %になると、セメント単独で用いた場合に膨張量が多少減少しているが、スラグの抑制効果は、セメントのアルカリ量が増加するに従い、同じ置換率では小さくなるようである。

次にポルトランドセメントとスラグを合せた全結合材に対するアルカリ量を一定にするように調整した場合の結果を実線で示す。アルカリ量が 0.51 %、0.98 %、1.43 %のいずれの場合にもスラグの置換率に対しては、ほぼ直線的に膨張量が減少している。ただし、セメントに対してアルカリを調整した場合に比較して、材令2週以降の膨張量の増加が大きいようである。また、材令13週の結果をみると、いずれのアルカリ量でも膨張量の線を延長するとスラグ置換率が100 %のあたりで膨張率が0 %付近になることが興味深い。

図- 5.16に輝石安山岩骨材を用い、アルカリ量を全結合材に対して一定に調整した場合のモルタルバーの膨張量を示す。

これは、希釈効果の他もうひとつの目的としてスラグ中のアルカリの影響をも考慮するためである。すなわち、これまでの実験ではスラグ中のアルカリは無視してきたが、ガラス質のスラグ中の固溶されていたアルカリが長期には溶出する可能性が皆無ではないためである。図- 5.16では、全結合材に対しアルカリ量 1.2 %とした場合には、スラグ置換率30%で6ヶ月で約 0.1 %の膨張量に、置換率50%で6ヶ月約 0.05 %の膨張量となっている。全結合材に対しアルカリ量を 2.0 %とした場合には、スラグ置換率30%で6ヶ月で約 0.1 %の膨張量に、置換率50%で6ヶ月約 0.05 %の膨張量となっている。全結合材に対しアルカリ量を 2.0 %とした場合には、置換率が60%を越しても6ヶ月 0.1 %以下におさえることができない。しかしながら、以上のことより、天然骨材に対しても、スラグの混入はアルカリの希釈効果以外の効果が

みられることがわかった。また、表- 5.1 に示したようにスラグ中のアルカリ量は平均 0.52%、最大でも 0.68%と低く、現在市販されているセメントが 0.6~0.8%程度のアルカリ量を有していることを考えると、たとえスラグ中のアルカリの全量が溶出しても、一般には、結合材としてのアルカリ量を低下させる方向に作用するものと考えられる。

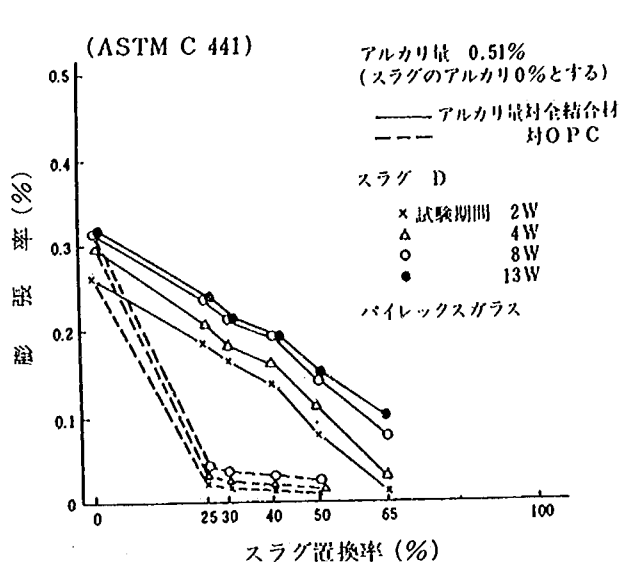


図- 5.13 スラグ置換率と膨張率

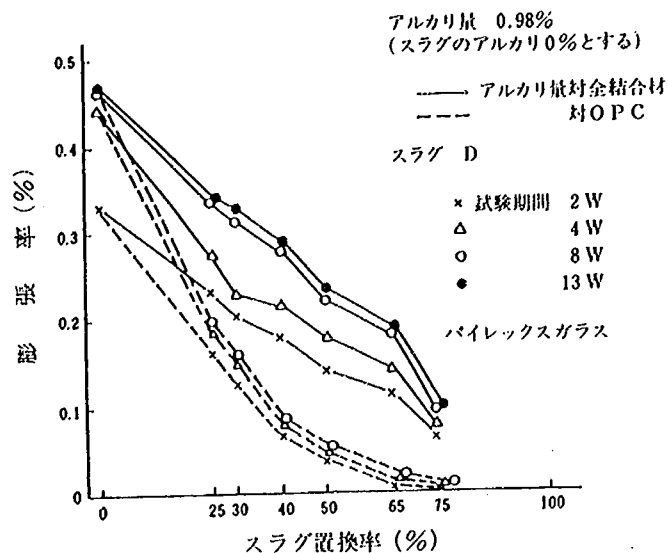


図- 5.14 スラグ置換率と膨張率

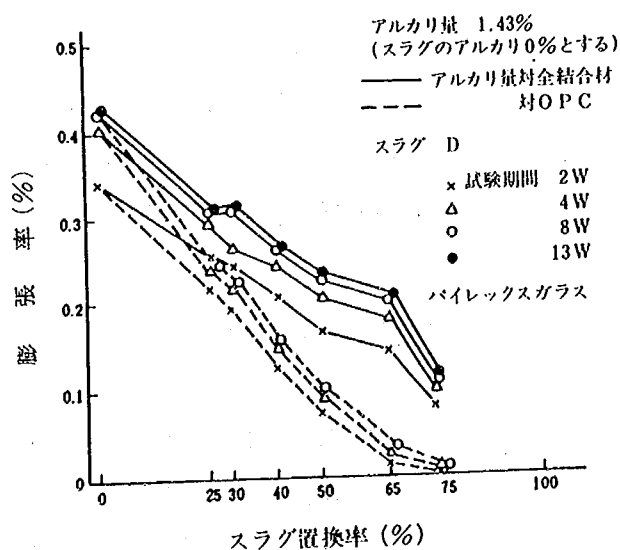


図- 5.15 スラグ置換率と膨張率

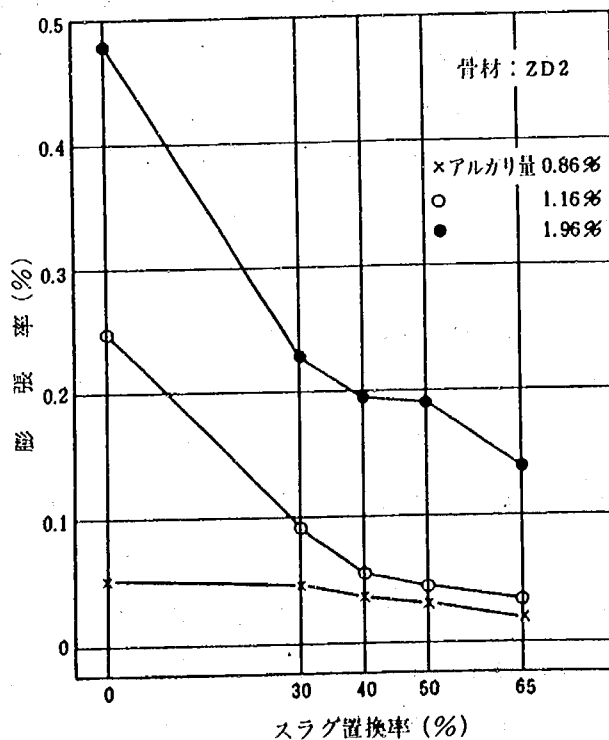


図- 5.16 スラグ置換率と膨張率 (スラグ D, 材令 6 ヶ月)
(アルカリ量を全結合材に対して調整した場合)

図- 5.17にスラグ粉の粉末度の影響がモルタルの膨張抑制効果におよぼす影響を示す。用いたスラグ粉はDブレン値を3290、4410、5580、7860 cm^2/g の4種類に変化させた粉末度が3000～5500 cm^2/g の間では抑制効果に大きな差はみられないようであるが、8000 cm^2/g 程度になると明らかに抑制効果が低下している。スラグ粉末のアルカリ骨材反応によるコンクリートの膨張の抑制効果の理由については、いくつかの説がある。この中に、セメントペースト中の組織のち密化やアルカリ分の安定化といった説もあるが、いずれも粉末度が大きくなると効果が大きくなると考えられる。ところが、図- 5.15からはそれとは逆の傾向がみられる。この理由のひとつとして、先に述べられたスラグ中からのアルカリ分の溶出等も影響していることも考えられる。

図- 5.18に石膏添加率を $\text{SO}_3 = 0 \sim 2\%$ に変化させたときの膨張抑制効果を示す。膨張量の絶対値が小さく、この図からは明確な差は読みとれないが、膨張の減少率からいえば、ほとんど差がないといえよう。

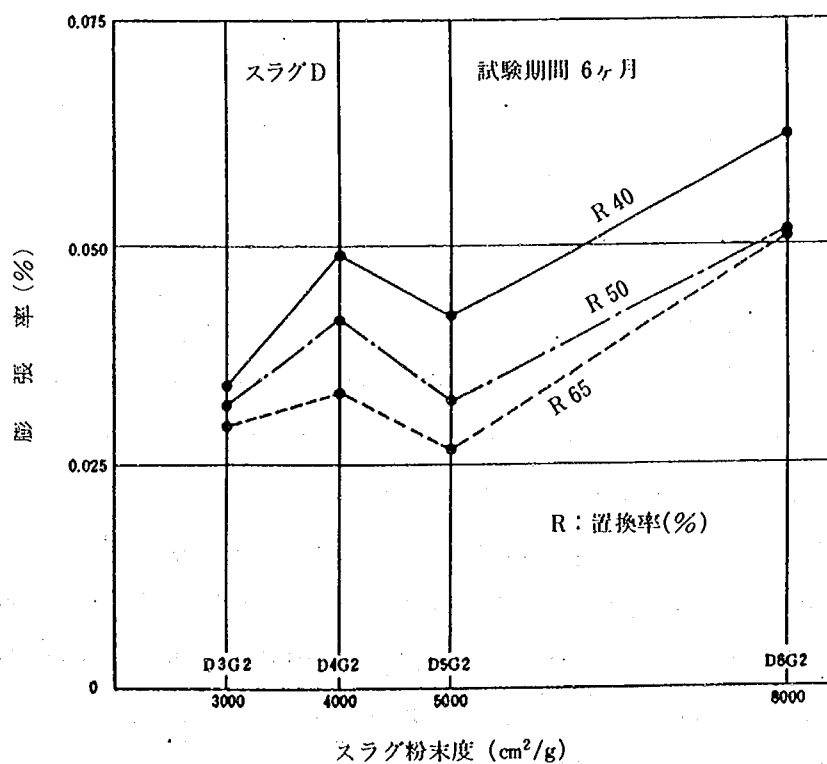


図- 5.17 スラグ粉末度と膨張率（アルカリ量 1.16%）

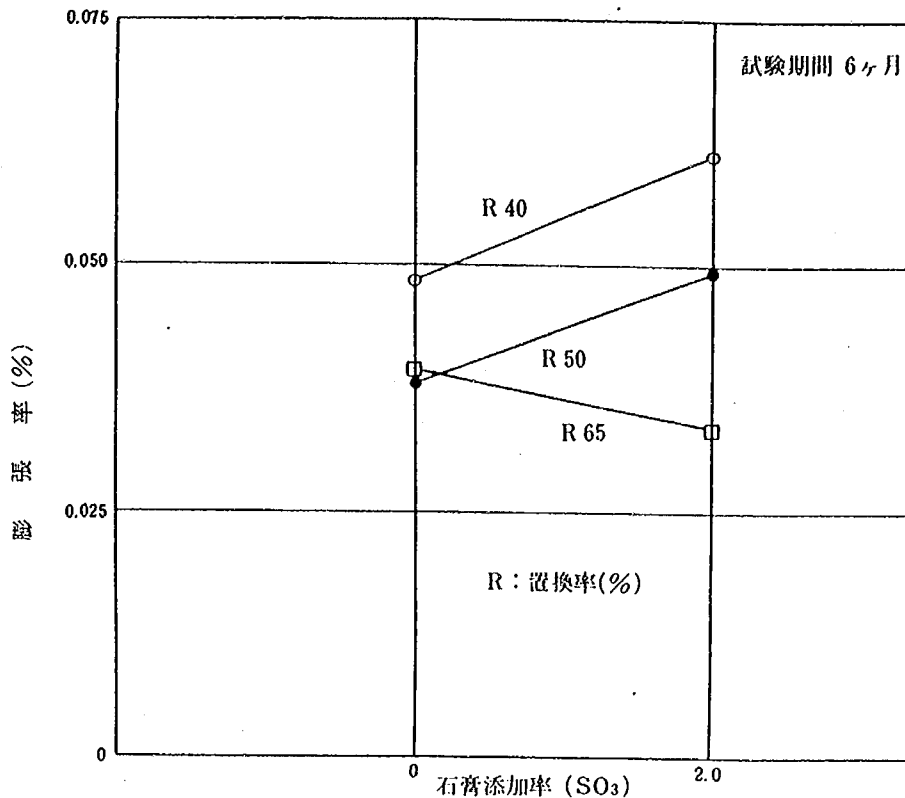


図- 5.18 石膏添加率と膨張率 (アルカリ量 1.16 %)

5.2.2 フライアッシュによる抑制

我国で生産されるフライアッシュについて、スラグ同様普遍的なA S R抑制を確認するため土木研究所、フライアッシュ協会、電力中央研究所、土木研究センターと四者共同研究を行った。

(1) フライアッシュの品質とパイレックスガラスを用いたモルタルバー試験

表- 5.3 に代表的なフライアッシュ 14 試料の物理的性質および化学分析試験の結果を示す。

フライアッシュは、 SiO_2 を約60%と Al_2O_3 を約25%含んでおり、スラグに比してその品質のバラツキは大きい。また、スラグに比べ、 Na_2O 、 K_2O を多く含み、中には2.35%もの Na_2O を含むものや2.28%もの K_2O を含むものもある。これら14試料を用いてパイレックスガラスでモルタルバー試験を行い、フライアッシュ品質とA S R抑制効果の関係を調査した。

図- 5.19にフライアッシュ14試料の結果を示す。ASTM C 441に規定される膨張減少率(Re)は、フライアッシュ置換率20% (F/C+F)の場合、最大66.7%、最小47.6%の範囲にあり基準値75%には達していない。また、置換率を変化させた試料C、G、Lでは置換率30%でも $\text{Re} = 75\%$ を満足するのは一試料(L)だけであった。

次に、パイレックスモルタルバーの膨張減少率とフライアッシュ品質の関係を表- 5.4に示す。若材令では、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、および SO_3 とパイレックスモルタルバーの膨張減少率との間にやや相関が認められるものの、その理由は明らかではない。

表- 5. 3 フライアッシュの試験結果

試料	物 理 的 性 質							化 学 成 分 (%)											備 考 R2O(Na2O+K2O)
	比重	粉 末 度		単 位 水 量 比 (%)	圧 縮 強 度 比			湿分	熱 収 縮 係 数	SiO2	Al2O3	Fe2O3	CaO	MgO	Na2O	K2O	SO3	合 計	
		ブレン 比表面積 (Cm ² /g)	44μm フルイ 残分(%)		7 日 (%)	2 8 日 (%)	9 1 日 (%)												
A	2.36	4820	4.0	99	77.8	77.8	97.2	0.2	3.3	55.7	23.5	9.7	3.6	1.3	0.89	0.64	0.75	99.38	1.31
B	2.20	3950	5.4	94	83.7	85.8	97.4	0.1	0.3	60.4	25.7	4.5	2.8	1.6	0.97	1.41	0.13	97.81	1.90
C	2.08	2910	23.8	98	65.8	67.6	83.7	0.1	2.1	57.6	24.7	4.1	6.1	1.7	1.19	0.94	0.80	99.23	1.81
D	2.24	6110	3.8	99	82.1	84.8	115.4	0.1	2.9	60.1	26.6	4.4	1.7	1.5	1.60	1.63	0.58	101.01	2.67
E	2.27	4460	0.6	97	87.2	84.3	102.4	0.1	2.8	58.3	33.5	2.0	0.9	0.5	0.82	0.40	0.30	99.52	1.08
F	2.18	3220	3.2	95	84.4	82.5	103.5	0.1	0.5	61.5	25.8	4.4	2.1	1.4	0.96	2.28	0.10	99.04	2.46
G	2.09	3500	15.4	97	73.9	74.8	96.5	0.2	0.6	61.3	25.9	4.3	1.8	1.5	0.90	1.76	0.20	98.26	2.06
H	2.25	4330	4.6	99	75.1	75.3	92.2	0.1	3.6	60.6	23.0	4.6	3.3	1.7	0.77	0.91	0.61	99.09	1.37
I	2.26	4690	9.4	99	69.6	69.3	85.0	0.1	2.1	66.9	23.0	4.1	2.2	0.6	0.32	0.79	0.12	100.13	0.84
J	2.24	3400	11.7	96	81.7	80.5	93.5	0.2	2.3	60.7	26.0	6.0	2.0	0.6	0.78	0.98	0.21	99.57	1.42
K	2.36	3250	3.0	94	78.6	79.3	104.3	0.0	0.5	51.6	23.9	7.5	9.0	1.6	0.83	1.19	2.42	98.54	1.61
L	2.16	3780	15.6	99	69.3	71.1	83.3	0.1	2.3	59.4	24.9	3.5	3.6	1.5	2.28	1.43	0.22	99.13	3.22
M	2.21	3080	23.0	96	73.5	72.3	88.7	0.1	1.0	50.4	27.4	5.9	8.1	2.4	2.20	1.16	0.31	98.87	2.96
N	2.24	4000	11.6	96	79.4	79.6	102.4	0.1	2.9	52.2	26.3	5.1	5.1	1.9	2.35	1.28	0.78	97.91	3.19

表- 5. 4 化学成分とアルカリ骨材反応試験結果との相関関係一覧表

(相関係数)

x 軸 y 軸			SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	Na ₂ Oeq
ASTM C227 長さ変化率	10%	2週	-0.4419	-0.2956	0.2716	0.5234	0.4100	0.3286	-0.0078	0.3158	0.2631
		4週	-0.5710	-0.1145	0.1140	0.6814	0.6796	0.6059	0.1858	0.1351	0.5666
		8週	-0.6873	0.0980	0.1934	0.7066	0.6936	0.6331	0.0657	0.0979	0.5410
		3月	-0.7241	0.0513	0.0670	0.6899	0.7403	0.8887	0.1907	0.2193	0.7998
	20%	2週	0.3665	-0.3545	0.1106	-0.1882	-0.2198	-0.4148	0.3068	-0.0262	-0.2135
		4週	0.3285	-0.3671	0.0023	-0.0461	-0.2196	-0.0559	0.1139	-0.2496	0.0000
		8週	0.1048	-0.3526	-0.0593	0.2742	0.1427	0.2287	0.2415	-0.1333	0.2834
		3月	0.0637	-0.2233	-0.1509	0.2144	0.2465	0.2864	0.4665	-0.1362	0.4217
	30%	2週	-0.0181	0.0416	-0.0249	-0.0252	-0.0165	0.0021	0.0020	-0.1295	0.0051
		4週	0.0050	0.0010	-0.0027	-0.0003	-0.0005	0.0002	0.0006	-0.0000	0.0012
		8週	-0.2309	0.1631	-0.0934	0.3427	0.3299	0.4209	0.1322	-0.3553	0.3949
		3月	-0.2515	0.3245	-0.1810	0.2716	0.3120	0.4981	0.2166	-0.2166	0.4916
ASTM C441 膨張減少率	14日	0.1012	0.6615	-0.6432	-0.4639	-0.3536	-0.1340	-0.3262	-0.5370	-0.2307	
	28日	0.1615	0.6113	-0.6330	-0.4600	-0.3670	-0.1650	-0.3523	-0.6217	-0.2642	
	56日	0.0935	0.5251	-0.5488	-0.3522	-0.3422	-0.1487	-0.3826	-0.5325	-0.2643	
	91日	0.1944	0.3178	-0.3934	-0.3147	-0.3288	-0.1557	-0.1779	-0.4827	-0.1736	

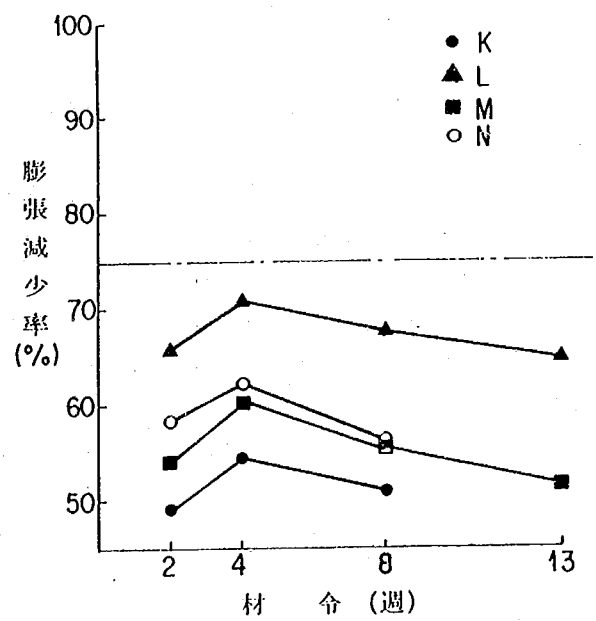
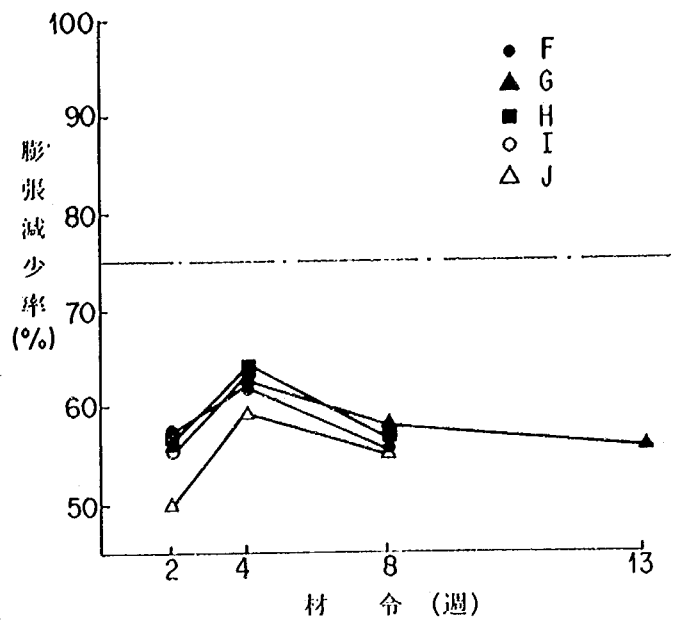
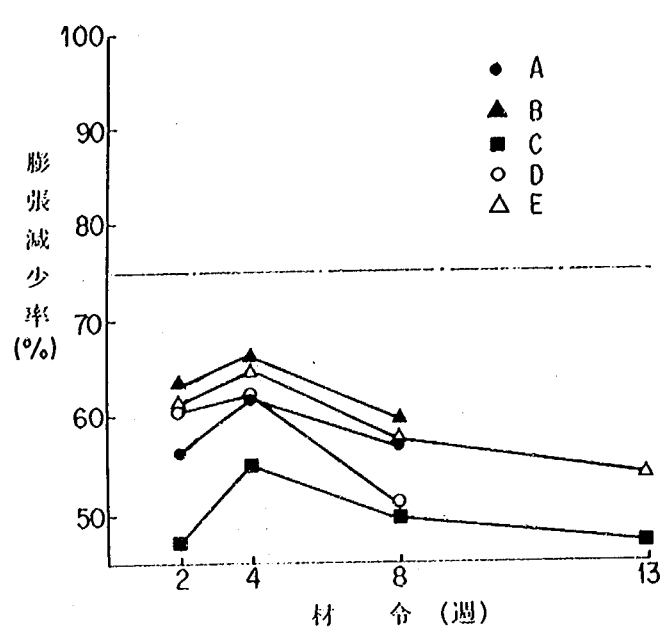


図-5.19 材令とパイレックスガラスモルタルバーの膨張減少率との関係

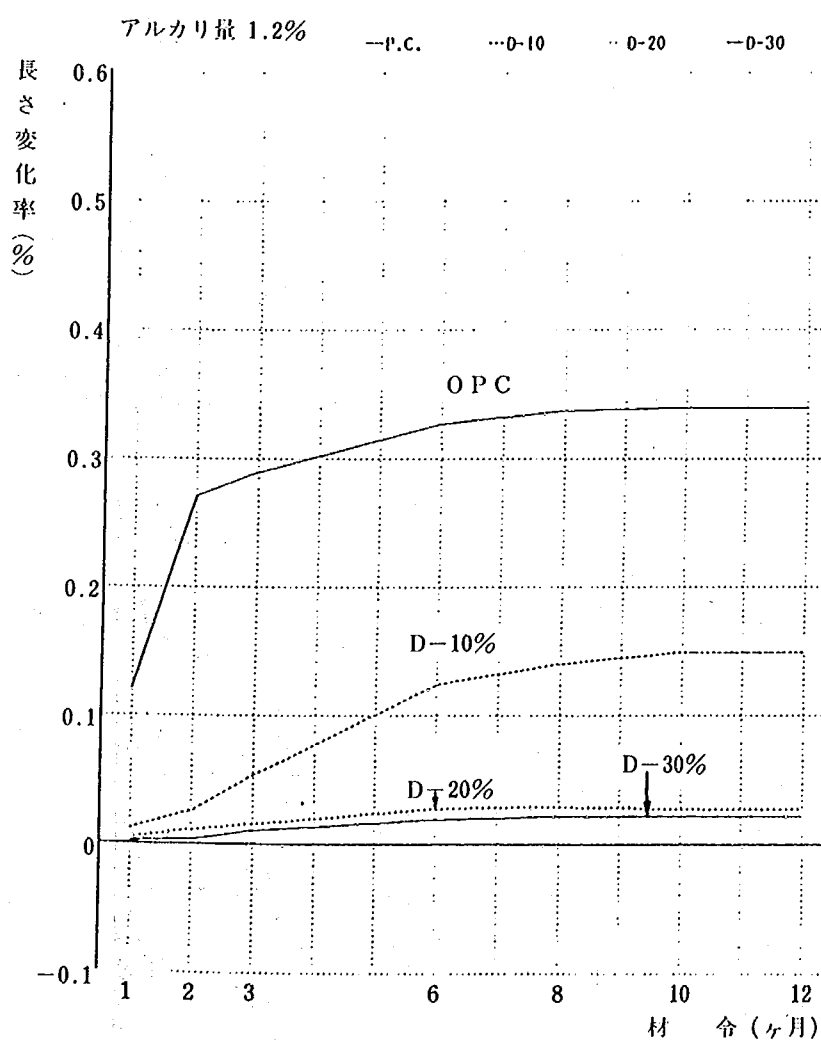
(2) 天然骨材を用いたモルタルバー試験

1) 実験概要

フライアッシュ全14種類について天然骨材（2D2、図－5.1）を用いたモルタルバー試験を行った。フライアッシュ置換率を10、20、30%、アルカリ量は1.2%（一部は0.8%）とした。

モルタルバーの材令12ヶ月までの長さ変化率のグラフの代表的な例を図－5.20に示す。

図－5.21にはすべての試料についての6ヶ月目の長さ変化率を示す。フライアッシュを入れない場合にはモルタルバーは1ヶ月で0.1%以上の膨張をするが、どのフライアッシュでも20%以上混合すると膨張がほとんど生じなくなる。混合比10%ではフライアッシュの種類によって抑制効果に差が出てくる。



図－5.20 材令－長さ変化率の例 (A=1.2%)

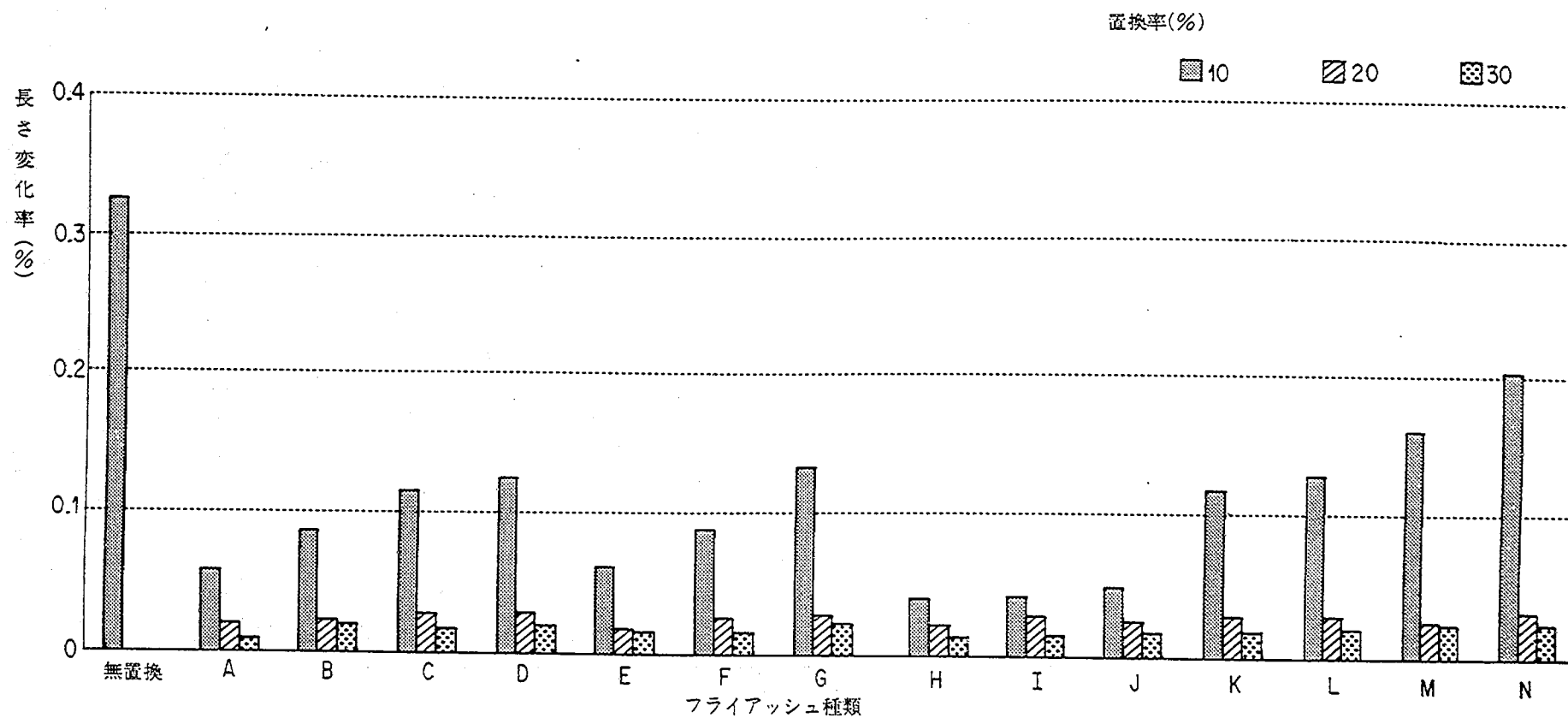


図-5.21 各フライアッシュの置換率と長さ変化率

2) 抑制効果

フライアッシュのA S R抑制作用のメカニズムについては、希釈効果によるものかボゾラン効果によるものか論議の分かれるところであるが、本試験材料のフライアッシュは、表-5.3にも示されるごとく、 R_2O はIとE以外はすべてベースセメントのアルカリ量1.2%よりも大きい。したがって、フライアッシュと置換してもアルカリは希釈されることはなく、逆に濃縮されている。また、フライアッシュ中のアルカリは反応に関係しないものと仮定すれば希釈作用も考えられるが、その場合、20%置換するということは見かけのアルカリ量は $1.2 \times 0.8 = 0.96\%$ になったことになる。後述するようにフライアッシュを入れない場合には0.8%のアルカリ量でもモルタルは膨張しているのに、0.96%のアルカリでも膨張が止まるということはやはりフライアッシュは、ボゾラン効果を有し反応を抑制するものと考えざるを得ない。

3) ボゾラン作用をする物質

ボゾラン作用をする物質を解明するために、抑制作用にフライアッシュの種類による差が生じている置換率10%の場合について、6ヶ月の膨張量とフライアッシュの成分等との相関関係を調べてみたのが表-5.5、5.6および5.7である。

表-5.5は、化学成分との相関であるが、 R_2O が最も相関が強いことを示している。正の相関であるから、 R_2O が増えると膨張量が増えることを意味している。すなわち、フライアッシュ中のアルカリも反応性アルカリとして膨張に関与しているのである。 Na_2O も相関が高いのは R_2O の因子であるから当然であるが、同じアルカリ因子の K_2O の相関はあまり強くないことが注目される。 MgO もかなり強い正の相関があることを示している。

相関関係が負の成分は、その成分が増せば膨張が減るということを意味しているので、A S Rの抑制物質を示していることになる。負の相関係数が最大のものは SiO_2 である。

表-5.5 フライアッシュ化学成分とモルタルバー膨張量との相関関係

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	SO_3	R_2O
-0.6230	0.1158	-0.0198	0.4996	0.7012	0.8271	0.4133	0.2028	0.8406

表-5.6 フライアッシュの結晶、非結晶物質とモルタルバー膨張量との相関関係

結晶鉱物含有量				結晶質成分含有量				非結晶質成分含有量			
ムライト	石英	ヘマタイト	マグネタイト	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	合計	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	合計
-0.6072	-0.5894	-0.1863	-0.3497	-0.6386	-0.6016	-0.4264	-0.6832	0.0169	0.7363	0.0446	0.4617

表-5.7 フライアッシュの物質的性質とモルタルバーの膨張量との相関関係

比重	ブレン比 表面積	44 μ m フルイ残分	単位 水量比	圧縮強度比		
				7日	28日	91日
-0.3047	-0.2389	0.4838	-0.2497	-0.1631	-0.0926	0.1786

SiO_2 も単独で存在することは考えられないので、ムライト ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$)、石英 ($\alpha\text{-SiO}_2$) 等として存在するものを結晶質 SiO_2 、残りの SiO_2 を非結晶質 SiO_2 と分けて各々の相関係数を調べたものが表-5.6 であるが、ムライトや石英のような SiO_2 を含む鉱物は負の相関が強く、ヘマタイト ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) やマグネタイト (Fe_3O_4) のような SiO_2 を含まない鉱物は相関がないことがわかる。石英やムライトに関係のない SiO_2 は相関が小さく、ムライトに関係しない Al_2O_3 は反応を増大させるのに役立っているようである。おそらく Na や K の化合物になっているのであろう。

物理的性質を示す因子では、表-5.6 に示されるように目立って相関の強いものはない。強いて言えば $44\mu\text{m}$ ふるい残分がやや強い正の相関を示している。

以上まとめると、反応抑制作用をしているのはムライトや石英のようなけい酸質の鉱物であり、アルミシ酸化合物として入り込んでいる Na^+ や K^+ は反応を増大させる作用をしているようである。

このことを確認するために図-5.22 に R_2O とフライアッシュ混合率10%のときの6ヶ月目のモルタルバーの長さ変化率との関係を示す。

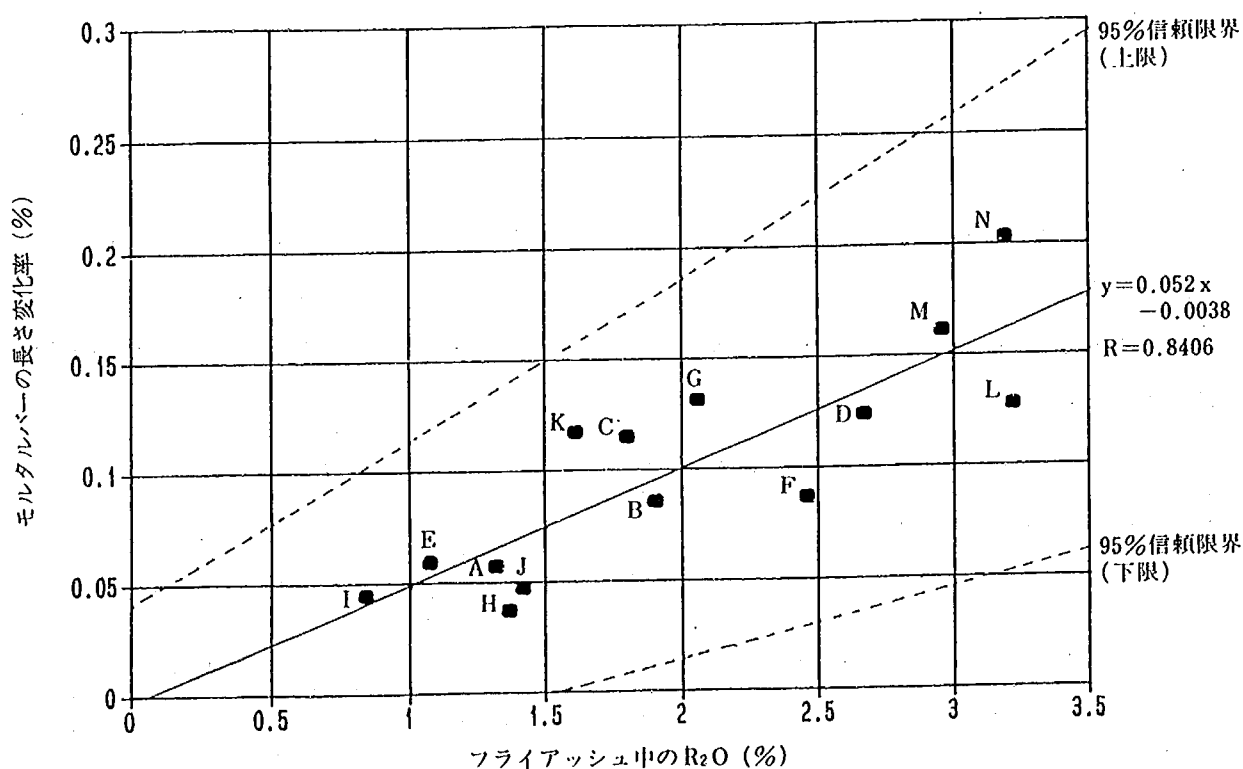


図-5.22 フライアッシュ中の R_2O とモルタルバーの長さ変化率 (材令6ヶ月)

両者に関係があることが明確であり、回帰式は次式で表わされる。

$$y (\text{長さ変化率}) = 0.052 (\text{R}_2\text{O}) - 0.0038 \quad \dots\dots\dots (5.3)$$

SiO_2 、 CaO 、 R_2O を考慮した回帰式を作れば、長さ変化率の推定式は (5.4) 式のように表わされ、図-5.23 に示すように長さ変化率の推定精度は幾分向上する。

$$y \text{ (長さ変化率)} = 0.044 (\text{R}_2\text{O}) + 0.0027 (\text{CaO}) - 0.0024 (\text{SiO}_2) + 0.142 \cdots \cdots (5.4)$$

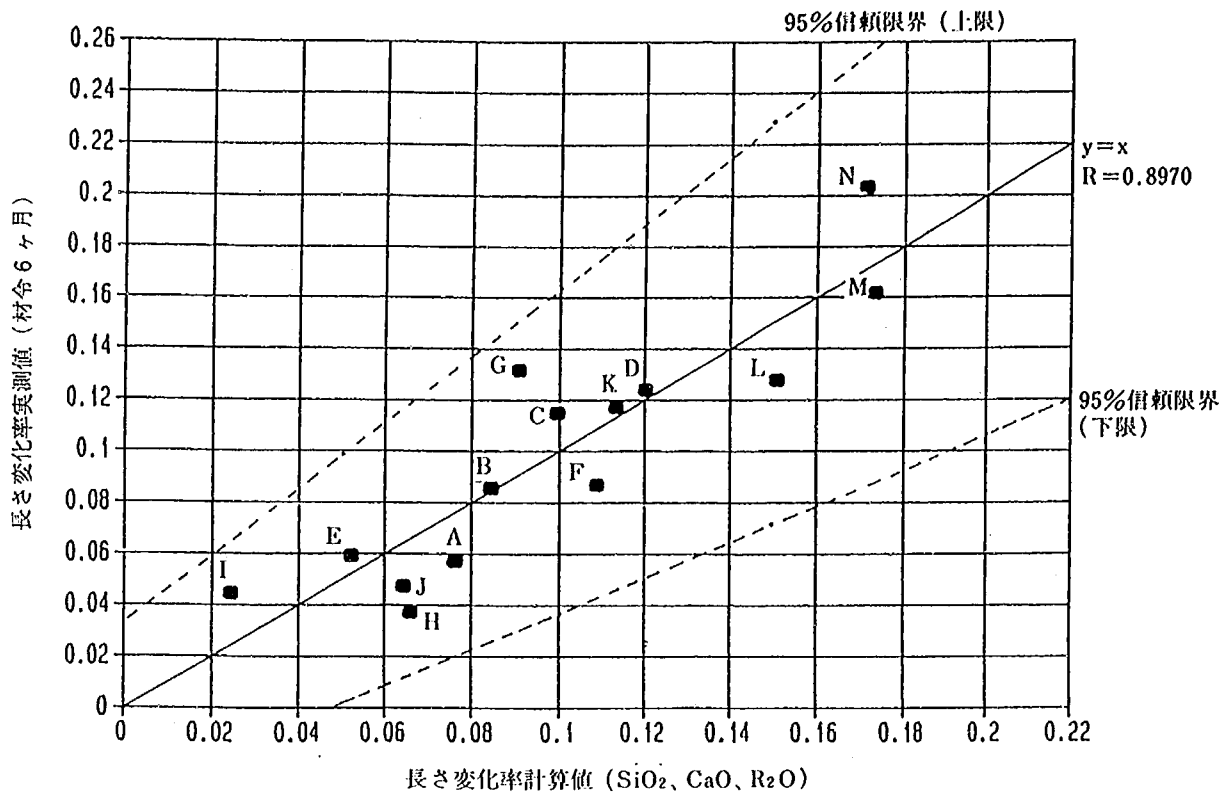


図- 5.23 フライアッシュ中の R_2O , CaO , SiO_2 とモルタルバーの長さ変化率

4) ベースセメントのアルカリ量におよぼす影響

フライアッシュの抑制作用は、ベースセメントによって与えられるアルカリ量によっても影響を受けると考えられたので、標準試験ではアルカリ量を1.2%としているが、これを0.8%に下げて実験した。

結果の一例を図- 5.24に示す。

フライアッシュを混合しない場合には、ベースセメントのアルカリ量が0.8%でも3ヶ月後には0.1%以上の膨張を示したが、フライアッシュ5%以上混合した場合にはどの種類のフライアッシュでも膨張が抑制された。

国産フライアッシュのA S R抑制効果に関してはBeltan オパールを用いた川村らの研究がある。^{5.4)} この実験では、フライアッシュ置換率5、10%では置換しない場合よりも膨張したが、30%置換ではフライアッシュの種類によって膨張するものとししないものが生じている。

この研究に用いられたセメントのアルカリ量は0.93%であるが、骨材/セメントは0.75で標準試験の2.25よりも小さく、単位セメント量が多いことになるので、標準試験に換算した場合のアルカリ量は2.34%で行ったことに相当する。すなわち、セメントにより与えられるアルカリ量を多くしていけば、膨張を抑制できるフライアッシュの量も増えてゆくのである。

5) フライアッシュの抑制効果の判定式の考察

これらの実験結果を考えるとフライアッシュの性質や混合比を考えた場合の膨張を抑制できるかどうか

の判定式は(5.5)のようなもので、このような状態であれば膨張しないと考えられる。

$$\Sigma CA + \alpha \cdot \Sigma FA - \beta \cdot \Sigma F \leq K \quad (5.5)$$

ただし、 ΣCA 、 ΣFA 、 ΣF ：セメント中の総アルカリ量、フライアッシュ中の総アルカリ量、フライアッシュの総量 (kg/m^3)

α ：フライアッシュのアルカリの影響に関する係数

β ：フライアッシュの抑制効果に関する係数

K ：許容アルカリ総量 (kg/m^3)

英国では、Hobbsらがフライアッシュのアルカリ量は17%を考慮し、アルカリ総量が $3 \text{ kg}/\text{m}^3$ 以下であればよいと提案しているが^{5.5)}、(5.5)式で言えば $\alpha = 0.17$ 、 $\beta = 0$ 、 $K = 3$ に相当する。

係数 α 、 β 、 K は、多くの実験から膨張を生じなくなる境界の ΣCA 、 ΣFA 、 ΣF を求めて回帰分析で求めればよいが、試みのために今回の実験結果に基づき、

- 1) セメントのアルカリ量1.2%、フライアッシュのアルカリ量4%の時、置換率20%以上で膨張が抑制された。

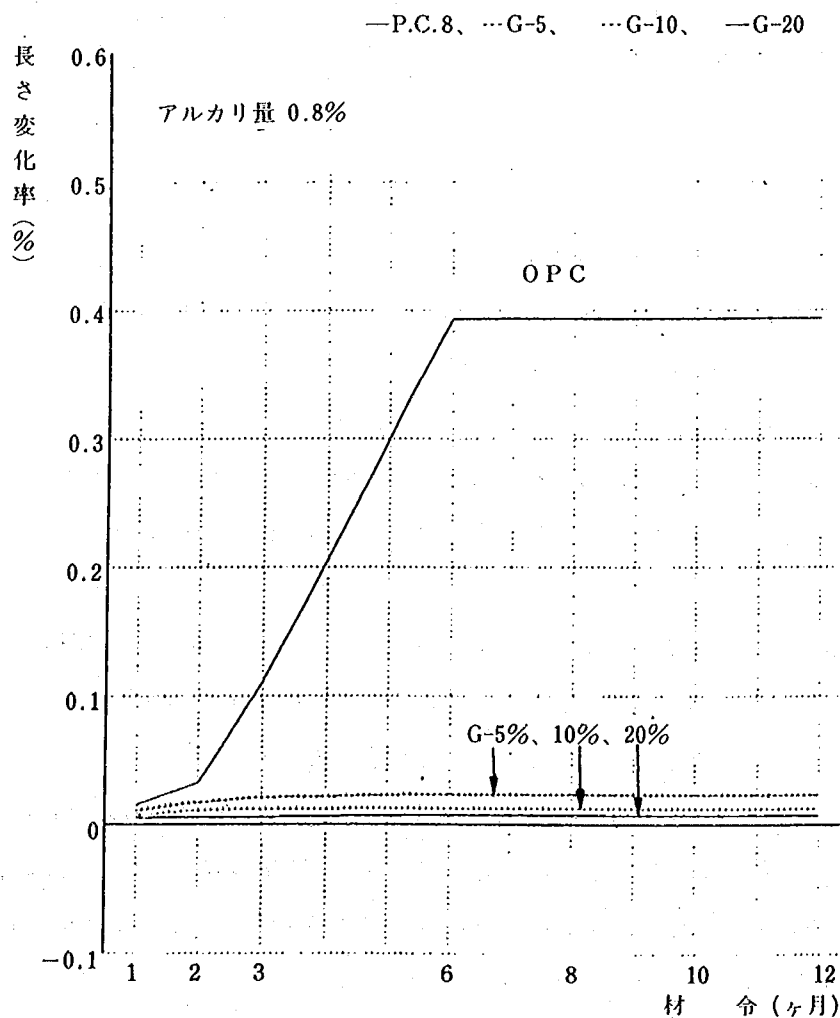


図- 5.24 材令-長さ変化の例 ($A=0.8\%$)

2) セメントのアルカリ量 1.2%、フライアッシュのアルカリ量 1%の時、置換率10%以上で膨張が抑制された。

3) セメントのアルカリ量 0.7%では、フライアッシュを混入しなくとも膨張は抑制された。

4) 試験に用いたモルタルの単位セメント量は $600 \text{ Kg} / \text{m}^3$ に相当する。

以上の4条件を入れて α 、 β 、 K を解くと次式のようにになった。

$$\Sigma C A + 0.83 \Sigma F A - 0.046 \Sigma F \leq 4.2 \text{ Kg} / \text{m}^3 \quad \dots\dots\dots (5.6)$$

この式を採用した場合、次のような実験結果は計算の結果とも整合した。

1) C (セメント) アルカリ量 0.8%、無混合のモルタルバー ($C = 600 \text{ Kg} / \text{m}^3$) は膨張する。

2) Cのアルカリ量 0.8%、F (フライアッシュ) のアルカリ量 4%以下では混合比 5%以上で膨張が抑制される。

3) Cのアルカリ量 1.2%、Fのアルカリ量 3%以下であれば混合比15%で抑制される。

4) Cのアルカリ量 2.34%、Fのアルカリ量 2%以上であれば混合比30%でも膨張する。

5) Cのアルカリ量 2.34%、Fのアルカリ量 1%以下であれば混合比30%でも抑制される。

なお、 $K = 4.2 \text{ Kg} / \text{m}^3$ という数値は我が国のアルカリ総量規制では $3 \text{ Kg} / \text{m}^3$ としている数値に相当するものであるが、両数字の差は安全率といえよう。また、(5.6) 式からは 5.5%以上のアルカリを含むフライアッシュを混合しても抑制効果がないことがわかる。さらに(5.6) 式からセメントのアルカリ量が 1.2%程度、フライアッシュのアルカリ量は 4%程度に高い場合でも 20%も置換すれば、セメント量がかかなり多くても抑制効果が期待できることや、セメントのアルカリ量が 0.8%程度に下がれば、非常に少ないフライアッシュ置換率でも反応抑制効果のあることがわかる。

比較的反応速度の速い安山岩碎石 1 種類を用いた結果ではあるが、次のようなことが得られた。

- ① フライアッシュ中の成分は、A S R 抑制効果に影響をおよぼす。
- ② フライアッシュ中の R_2O は、A S R を増進させる成分である。
- ③ フライアッシュ中の SiO_2 (石英やムライト) は、反応を抑制する成分である。
- ④ セメントから供給されるアルカリの量も効果のあるフライアッシュの置換量に影響する。
- ⑤ フライアッシュ混入によりモルタルバーの膨張が抑制されるどうかは(5.6) 式でかなりよく判定できる。
- ⑥ この式を基にして考えれば、我が国産のフライアッシュ (R_2O が 4%程度以下) を 20%程度混合すれば、セメントのアルカリ量が相当大きくとも通常のセメント量程度であれば A S R を抑制できると考えられる。また、セメントのアルカリ量が 0.8%程度まで下がればさらに少ないフライアッシュの混合比で抑制が可能と考えられる。

5.2.3 コンクリートにおけるボゾランの A S R 抑制効果と抑制効果の長期安定性

いままで述べてきたとおり、高炉スラグ粉末とフライアッシュの A S R 抑制効果については認められたが、いずれも期間の短い促進試験の結果からであるため、これらの効果を長期に渡って確認した。ここでは、代表的な高炉スラグ粉末とフライアッシュを用いて、ボゾランによる A S R 膨張抑制効果の長期安定

性の確認とコンクリートにおけるA S R抑制効果を検討した。

モルタルバー試験では天然骨材、フライアッシュ、高炉スラグ粉末各々1種について、アルカリ水準を1.0、1.5、2.0%の3水準とし、フライアッシュ、置換率0、10、20、25、30%の5水準高炉スラグ置換率0、30、40、50、60%の5水準の要因で暫定案に準じて試験を行った。

コンクリート試験では、モルタルバー試験と同じ材料を用いて、アルカリ水準1.0、1.5、2.0%の3水準、フライアッシュ置換率0、10、20、30%、スラグ置換率0、30、50、60%の各々4水準の要因で行った。コンクリートの配合は、 $W/C (W/C + F(S)) = 55\%$ 、スランプ8 cm、のブレンコンクリートとした。モルタルおよびコンクリートは、38℃、95%RHの環境で養生を行った。

図-5.25に材令24ヶ月でのモルタルバーの膨張を示す。材令5~6ヶ月まで急速に膨張を続けてきたすべてのモルタルバーはその後わずかに膨張を示しながら徐々に平衡状態へと推移している。材令6ヶ月以降最大の膨張量を示しているのは、非反応性骨材を使用し、アルカリ量1.5%の供試体であり、次いで、同アルカリ量2.0%の供試体である。抑制対策を講じたモルタルバーではフライアッシュ10%を混入したものがアルカリ3水準とも大きな膨張量を示しており、スラグ粉末では混入率に関係なく総じて6ヶ月以降の膨張量の増大はあまり認められない。また、すべてのモルタルバーでの材令18ヶ月から24ヶ月の6ヶ

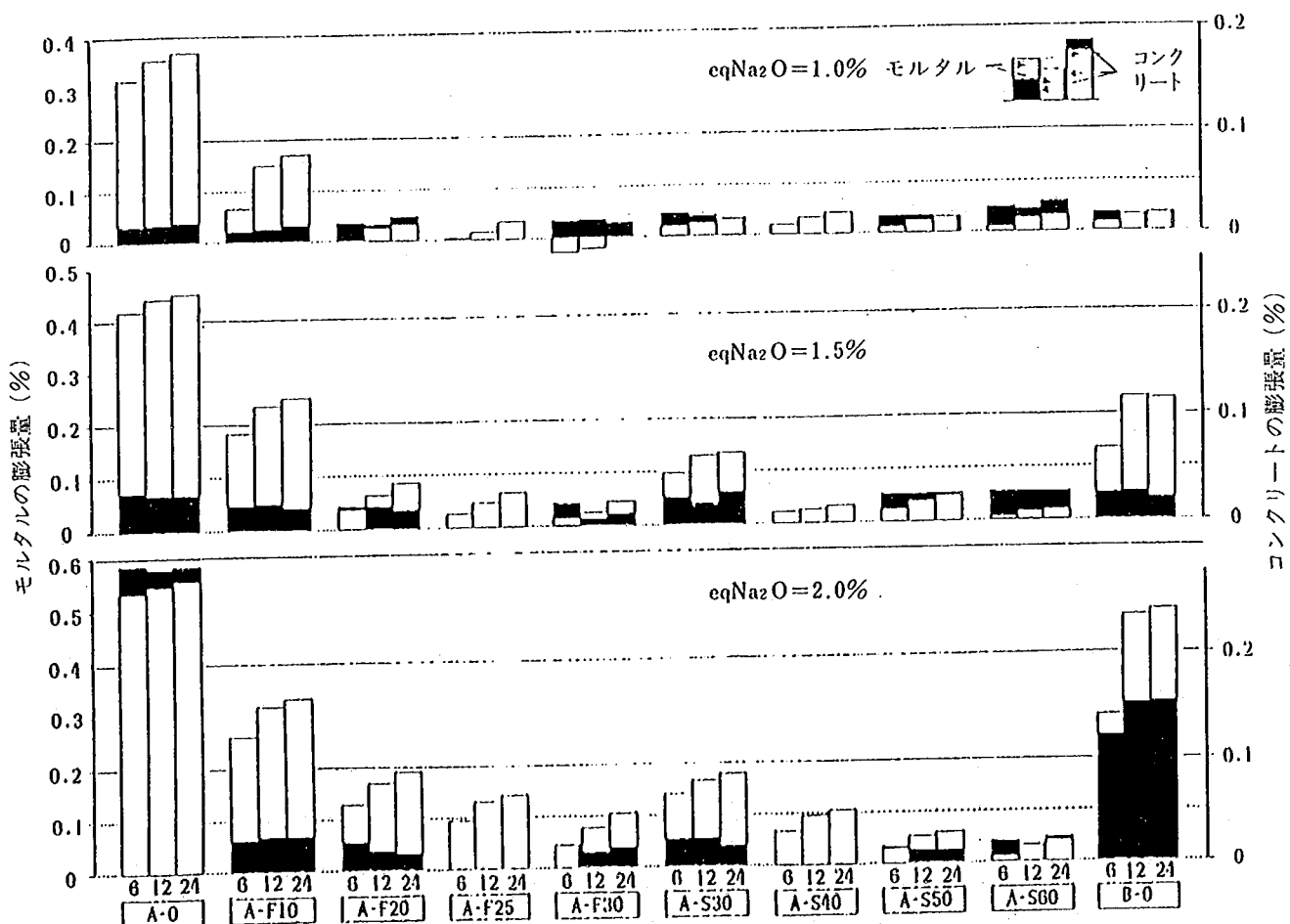


図-5.25 モルタルおよびコンクリートの膨張量

月間の膨張の増大量は平均 0.0008%、最大 0.0071%、最小 - 0.0045% となっており、ごく微量といえる (図- 5.26)。モルタルバーでは、その総アルカリ量が多いのもあって抑制対策を講じたものも膨張しているが、コンクリート供試体を同様な環境においたものでは抑制対策を講じたものは膨張は示していない。これはモルタルとコンクリートの総アルカリ量の違いと組織形態の違いであろうと考えられる。すなわち苛酷な状態とでもいえるモルタルバーで十分にボゾランの抑制が認められるならば、コンクリートとしてはそれ以上の効果が長期に渡って期待できるであろうことを示しているといえる。

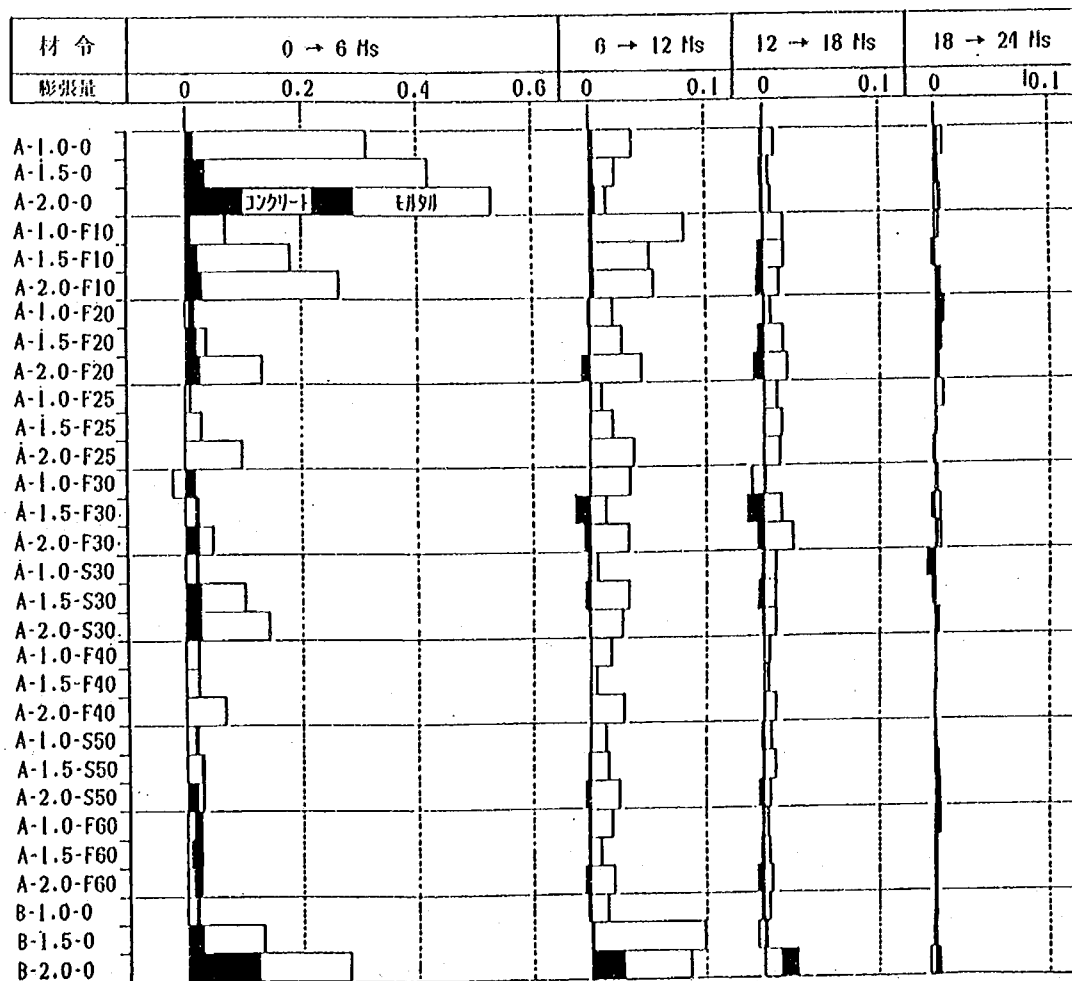


図- 5.26 各材令間の膨張量

5.3 アルカリ量制御による抑制

アルカリ骨材反応を抑制する方法として諸外国ではすでにアルカリ量を低く抑えたセメント（低アルカリ形セメント）の使用やアルカリ総量の規制を行っているところもあり、有望な手法のひとつと考えられる。このため、建設省土木研究所とセメント協会ではセメントのアルカリ量制御によって、我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手法を確立する目的で共同研究を実施した。

ここでは、共同研究によって得られた成果と土木研究所で独自に行われた試験の結果を含めてアルカリ量制御によるアルカリ骨材反応抑制について述べる。

5.3.1 低アルカリ形セメントによる抑制

セメントのアルカリ量がASRにあたえる影響についてはよく知られており、その関係はセメントの Na_2O や K_2O の量比等によって変化するといわれている。しかしながら、一般的にはセメントのアルカリ量によって表現され、モルタルの膨張とも比較的よい相関が得られている。また、反応性骨材によっては、あるアルカリ量を境にして急激に膨張を呈することもある。このようなASRの性質を利用してアルカリ量を減じたセメントによってASRを抑制しようとするのがこの対策である。

セメントのアルカリ量とモルタルバー膨張量の関係については、すでに3.2.1アルカリ量のクリティカルポイントに関する検討や3.2.2各種イオンの影響の項で述べたとおり、セメントのアルカリ量0.6%以下ではモルタルバーの膨張は認められない。

図-5.27にコンクリート供試体による結果を示す。用いた材料は表-5.8に示す。配合は各材料の体積比を一定とし、 $W/C=50\%$ 、単水位置量 $193\text{Kg}/\text{m}^3$ 、単位セメント量 $386\text{Kg}/\text{m}^3$ 、単位粗骨材容積 $302\text{ l}/\text{m}^3$ 、単位細骨材容積 $368\text{ l}/\text{m}^3$ とした。

配合はこのようになかなり富配合であったが、アルカリ量がセメントの0.8%では、膨張はかなり小さくなっている。また、この試験ではアルカリとしてNaOH水溶液を用いたため膨張しやすい条件であると考えられ一般のセメントを用いる場合にはこの程度のアルカリ量であれば、膨張はかなり抑えられると考えられる。

但し、低アルカリ形セメントを用いてもその使用量については考慮する必要がある。それは後述する総アルカリ量との関係でもある。図-5.28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、やはり単位セメント量の増加（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。図中半黒塗りの記号はアルカリ量1.2%でセメント量 $60.0\text{Kg}/\text{m}^3$ のモルタルの膨張量を示している。この配合のアルカリ総量は図中の $1100\text{ Kg}/\text{m}^3$ に相当するが、アルカリの Na^+ 、 K^+ の比率が異なり、 S/C も異なるにもかかわらず、似た傾向を示している。これらのことより、一般のコンクリートのアルカリ骨材反応対策として、低アルカリ形セメントを用いる場合には、コンクリート中のアルカリ総量は、ある値に抑える必要があるといえる。

5.3.2 アルカリ総量による抑制

このアルカリ総量によるASRの抑制は基本的に材料の面から対策を講じる低アルカリ形セメントによる

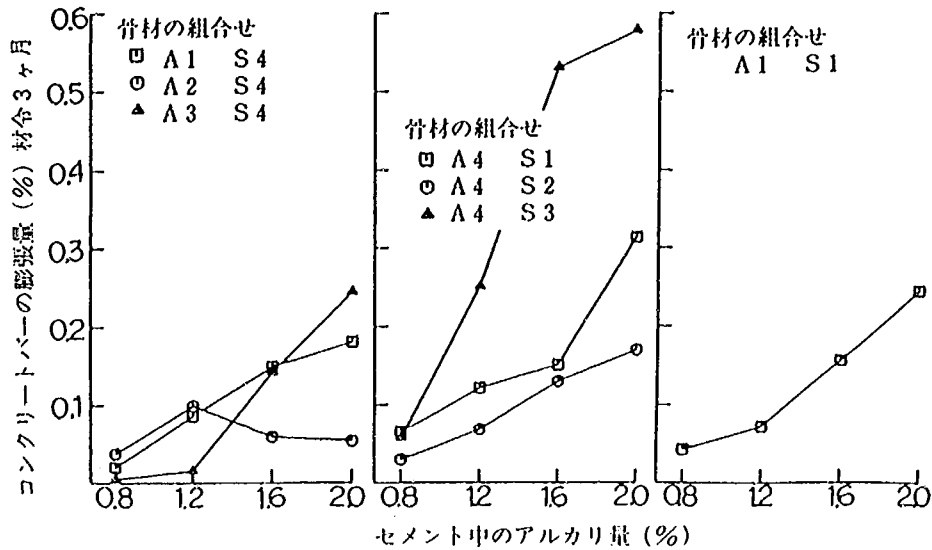


図-5.27 セメント中のアルカリ量とコンクリートバーの膨張量

表-5.8 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

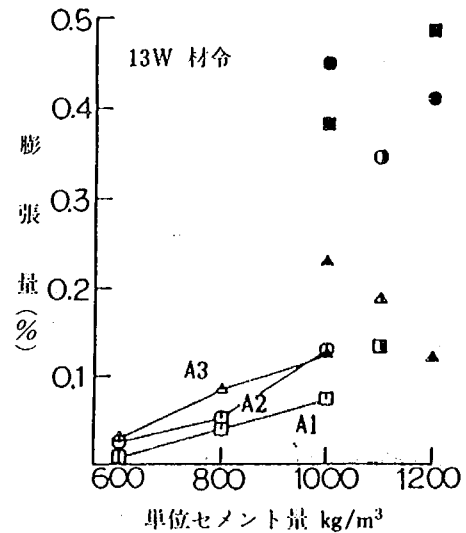


図-5.28 富配合モルタルバーの膨張量

抑制と同様なものであるといえ、それを配合の面から対策を考えるとこの対策になる。従って、両者には当然ながら関係を有し、それは次式に示すとおりである。

$$\text{アルカリ総量 (Kg/m}^3\text{)} = \text{セメントのアルカリ量 (R}_2\text{O}\%) \times \text{単位セメント量 (Kg/m}^3\text{)}$$

また、この抑制手法は単位セメント量あまり多くないコンクリートに対して有効な手段である。

図-5.29にモルタル中の単位アルカリ量とモルタルバー膨張量の関係を示す。一般に、骨材に用いられるような岩石では、単位アルカリ量がある一定の値を越えると急に膨張する傾向を示すことは3.2.1クリティカルポイントに関する検討でも述べたが、このために単位アルカリ量をクリティカルポイント以下に抑えておくとアルカリ骨材反応は抑制できる。図-5.29では4~6 Kg/m³付近で膨張を示しはじめており、骨材によって抑えられるアルカリ総量は変るが、4 Kg/m³以下であれば膨張は示さないものと考えられる。

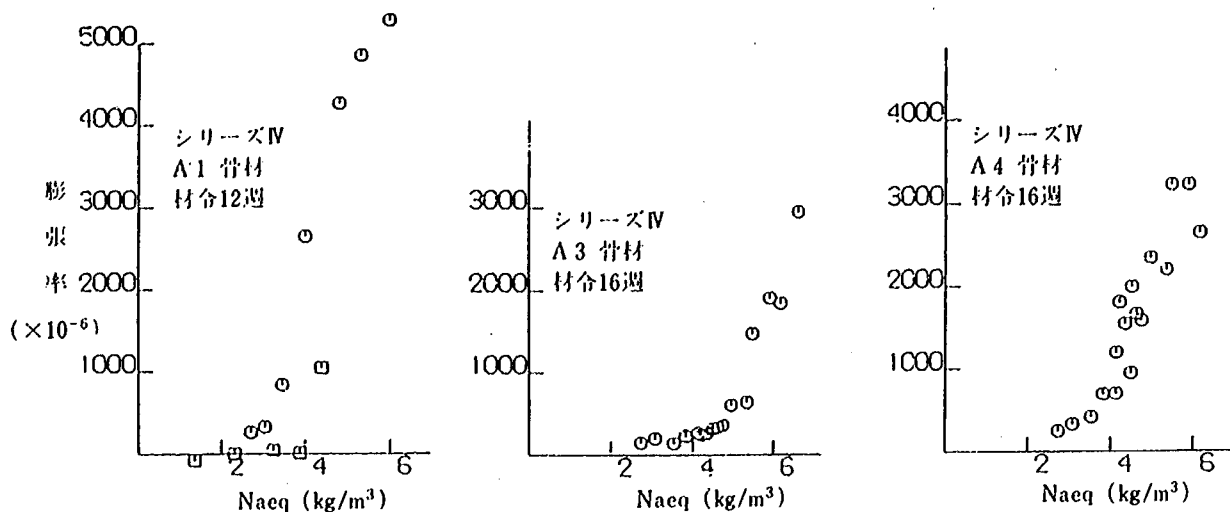


図- 5.29 モルタル中の単位アルカリ量と膨張量

次に、コンクリート供試体による結果について述べる。

図- 5.30にアルカリ総量とコンクリート供試体の膨張量との関係を示す。供試体は、6種類の反応性骨材と1種類の非反応性骨材を用い、細骨材には非反応性骨材を用いた。使用した骨材の化学法の結果は、図- 5.31に示すとおりである。また、セメントはアルカリ量 0.36、0.93、1.5%の3水準として使用し、これに単位セメント量 300、450、600 kg/m^3 の3水準を組合せアルカリ総量を 1.08 ~ 9.00 kg/m^3 の9水準として用いた。表- 5.9に標準配合を示す。

図- 5.30で示した膨張量は材令18ヶ月のもので、ほぼ膨張が平衡状態に達したと思われるものである。この図より、コンクリート中の単位アルカリ量が 4 kg/m^3 を越えると膨張をおこしているが、3 kg/m^3 以下では膨張は認められない。また、図中には反応性骨材と非反応性骨材の割合を変化させたものも図示してあるが、非反応性骨材を混合した場合の方が反応性骨材の単一骨材を使用した場合に比べ、膨張量が大い傾向があった。しかし、単位アルカリ量 3 kg/m^3 以下の場合では膨張は示しておらず、その傾向は認められない。

以上のことよりアルカリ骨材反応を抑制する目的として設定するアルカリ総量は「3 kg/m^3 以下」であればアルカリ骨材反応を抑制できることが認められた。

表- 5.9 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

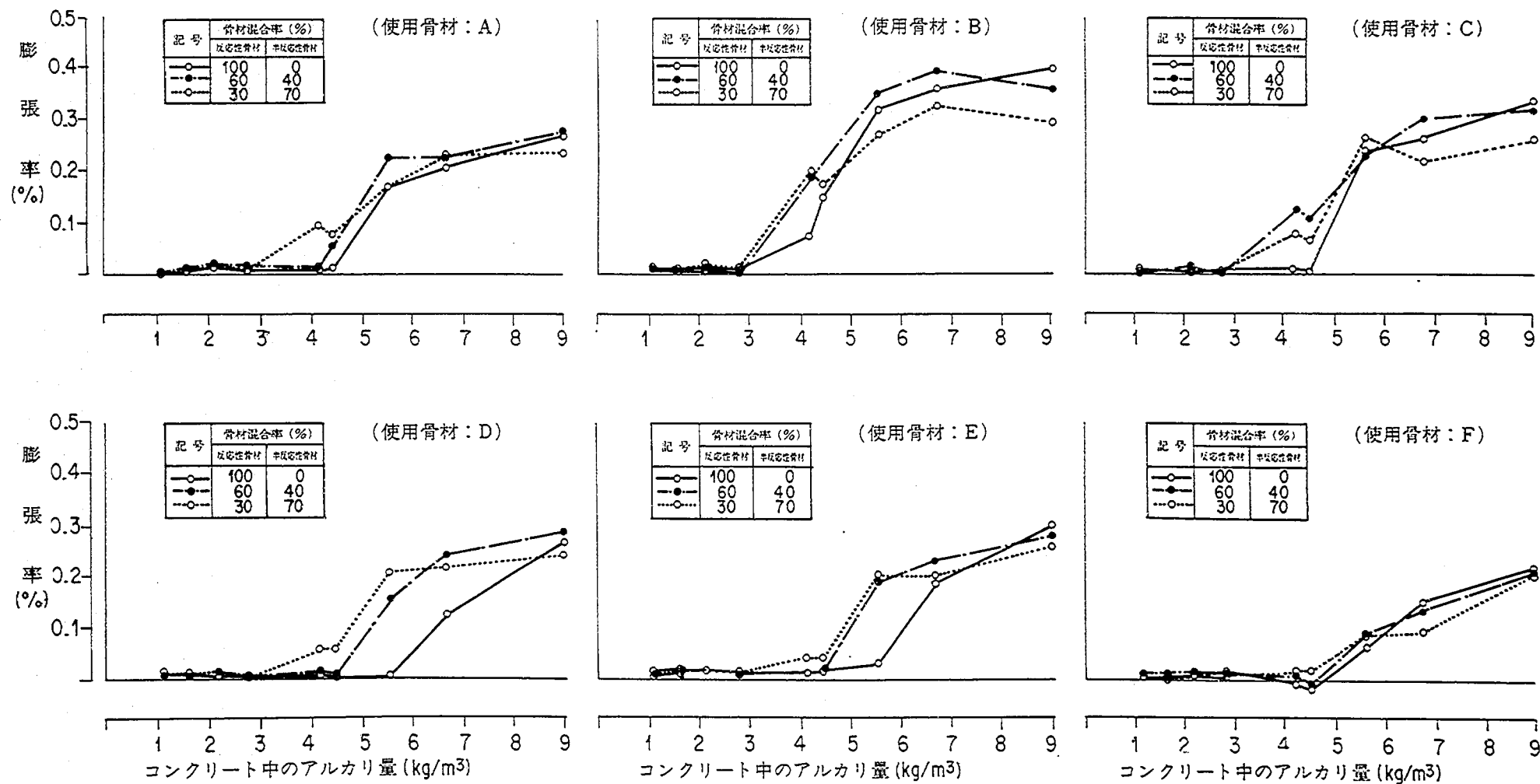


図-5.30 単位アルカリ量とコンクリート膨張率との関係

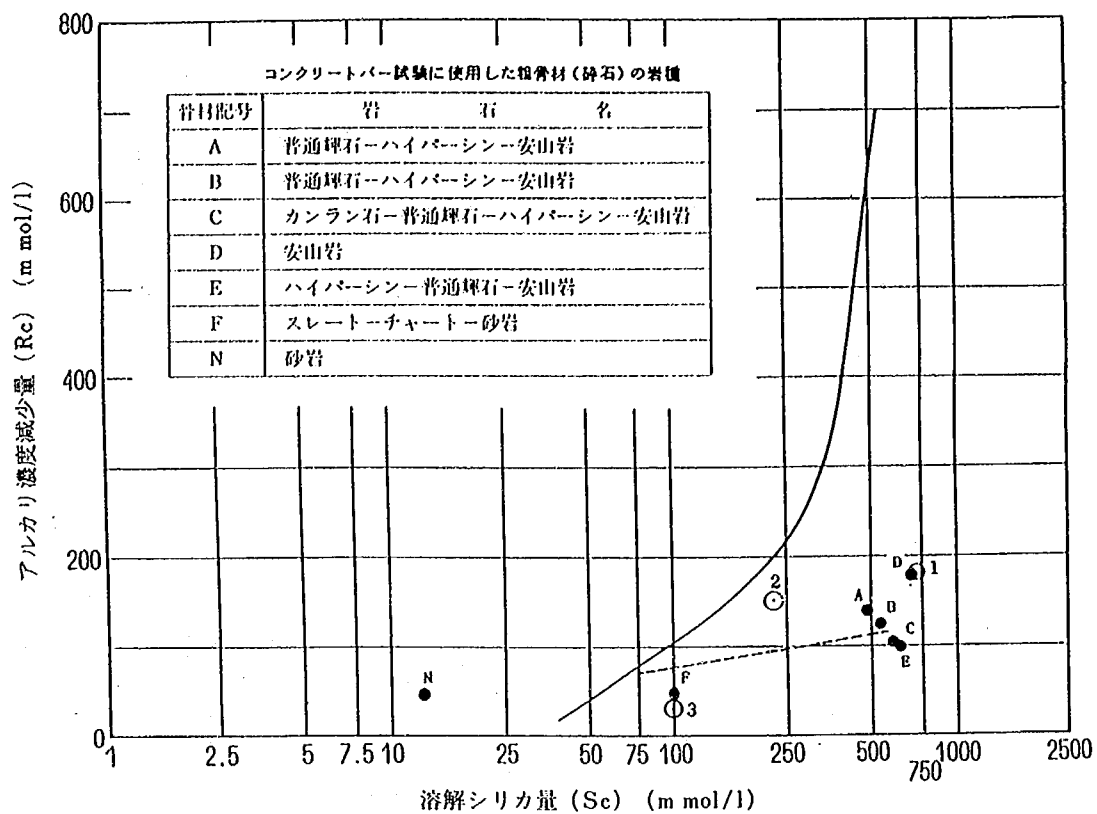


図-5.31 化学法結果

5.4 まとめ

A S Rの抑制対策として①混和材の混入②低アルカリ形セメントの使用③アルカリ総量の規制について検討を行った。

その結果をまとめると次のようになる。

- 1) 混和材混入によるA S R膨張抑制効果は十分な効果が認められ、長期にわたってそれを持続することが推測された。

スラグについては、天然骨材を用いたモルタルバー試験の結果から、アルカリ量1.2%のセメントの場合、スラグ置換率40%で0.1%/6ヶ月以下の膨張とすることができ、置換率45%では0.05%/6ヶ月以下の膨張量とすることができる。

またフライアッシュではアルカリ量1.2%の場合では置換率20%、アルカリ量0.8%の場合で置換率5%で0.05%/6ヶ月以下の膨張量とすることができる。

以上の結果から、安全を考慮したA S R対策を考えると次のようになる。

スラグ粉末においては、「セメントのアルカリ量が1.0～1.2%程度の場合、スラグ置換率50%以上」「セメントのアルカリ量が0.85%以下の場合、スラグ置換率40%以上」で低アルカリ形セメントと同等の抑制効果を有すると考えられる。また、フライアッシュにおいては「セメントのアルカリ量が1.0～1.2%程度の場合、フライアッシュ置換率20%以上」「セメントのアルカリ量が0.8%以下の場合、フライアッシュ置換率15%以上」でやはり低アルカリ形セメントと同等の抑制効果を有すると考えられる。

- 2) 低アルカリセメントを使用する事によるA S R抑制は有効な対策といえるが、単位セメント量(アルカリ総量)を考慮しなければ、かならずしも有効な対策とはいえない。
- 3) アルカリ総量では、モルタルバー、コンクリート供試体の双方の試験で 3 Kg/m^3 以下であれば有効なアルカリ骨材反応抑制対策となることが明らかとなった。ただし、3章でふれたように混和剤などによっても反応は促進されるおそれがある。そのため、混和剤、海砂などからの混入、外来塩などの侵入によりアルカリイオンの増加の影響を考慮する必要がある場合、セメントからのアルカリを低下(2.5 Kg/m^3 以下)させておく必要があると考えられる。

結 論

本報告書では、A S Rの要因、A S Rの暫定案の見直しのため、種々の実験を行い以下のことを述べた。

第2章では、A S Rのメカニズム、抑制対策を概説した。

第3章では、A S Rにおよぼす各種要因の実験の結果について以下のようなことを述べた。

まず、A S Rの主原因である反応性骨材とセメント中のアルカリの関係では、

- ① A S Rによる膨張はあるアルカリ量（クリティカルポイント）以上で急激におこる。
- ② クリティカルポイントおよび膨張（反応）速度は骨材の岩種によって異なり、シリカの結晶性の低い岩種ほどクリティカルポイントは低く、反応速度は速くなる。
- ③ ペシマムは、2種類の骨材の混合比を変化させ、化学法の結果を判定図にプロットしたとき、下に凸な曲線をえがくときに生じる。

各種アルカリイオンの影響は

- ① セメント中のアルカリは主に、 Na_2O と K_2O があり、通常モル数により Na_2O 等量を用いているがNaイオンのほうがモル数以上に膨張は促される。
- ② アルカリはセメント以外に海砂や飛沫となって、コンクリートに浸入するが、そのNaClも促進効果がある。
- ③ しかし、Clイオンによる促進効果はない。
- ④ 配合（W/C、S/Cなど）により、骨材に対する単位アルカリ量が増加しても膨張は促進される。

その他、各種要因として

- ① A E剤など各種混和剤に含まれるアルカリイオンも膨張を促進させる。またアルカリイオン以外にも混和剤によって反応に対する鋭敏性は異なる。
- ② 空気量の増加はゲルの膨張圧力を緩和し、膨張を抑制するが、その効果は骨材によって異なるとともに最大でも通常使用されていない空気量20%程度においての膨張緩和であり、あまり期待できない。
- ③ 膨張を拘束すれば、ひびわれの発生ひずみを大きくすることができる。その程度は、拘束度を大きくするほど効果は大きい。ひびわれパターンも亀甲状のひびわれから拘束方向のひびわれが卓越するようになる。
- ④ 乾燥湿潤の影響は大きく、1年間膨張させたものを乾燥し、再度吸水させると初期の膨張と類似した膨張を示す。
- ⑥ 外来塩もモルタル中に侵入することにより、膨張を促進する。

以上の結果は、骨材の反応性判定のための試験法、A S R抑制対策、A S Rにより被害を受けた（ある

いは被害を受ける可能性のある) 構造物の補修・補強方法、時期などの重要な指標となるものと考えられる

つぎにコンクリートによる実験(コンクリートバー)では、

- ① 粗骨材に反応性のものを使用した場合、モルタルバーより膨張は遅く、モルタルバー法と同じ判定値を使えば危険側の判定をする可能性がある。
- ② 細骨材が反応性の場合、ウェットスクリーニングして試験を行えば、モルタルバーとはほぼ同じ膨張を示す。

第4章では、骨材の判定試験について検討した。まず、暫定案に示されている標準試験法のモルタルバー法について、判定に影響を与えると考えられる要因についてそれぞれ検討した。その結果、暫定案の修正が必要と考えられる主な点は以下のとおりである。

① セメントおよび添加アルカリ

セメント中のアルカリ量が異なれば添加アルカリによって調整(1.2%)しても膨張は大きく異なる。また、セメント中のアルカリ量が同じであっても銘柄の異なるセメントではモルタルバーの膨張は異なるため、試験に用いるセメントは品質を規制したものとし、将来はセメントを統一するのが望ましいと考えられる。

② 湿度管理

湿度はASRにおよぼす影響が大きいものと考えられ、供試体の湿度管理の仕方は統一することが望ましい。よって、標準的な供試体の湿度管理方法として、供試体を乾燥させる恐れのないつぎの方法を推奨する。

「モルタルバーに吸水させた吸取紙を巻き、ビニール袋にいれる方法」

③ 精度

暫定案の精度では、平均膨張量の $\pm 20\%$ を認めていたが、今回提案する修正法によってかなりバラツキをおさえることができる。この結果は、一定条件で行った場合であり、現在、各試験機関等ではまだ暫定案によって試験が実施されており、修正案による試験機関の間のバラツキは考慮されていない。よって、当面、精度は従来どおりとし、修正案により試験結果が蓄積された段階で検討する必要がある。

簡易試験法については以下のようなことを述べた。

① オートクレーブ法

モルタルバーを高温で養生し、モルタルバー法の判定基準に従い、短期間に判定するものである。試験条件は、アルカリ量2.5%のモルタルバーを作製し、温度100℃で2時間養生したのち膨張量を測定することにより、火山岩類は化学法程度の判定が可能である。しかし、まだ堆積岩類を判定するには、試験条件、判定基準などの検討が必要である。

② ダブルシリンダー法

判定しようとする骨材を使用したモルタル円柱供試体のまわりに、健全材料のモルタルを打ち、健全材料のひびわれの発生の有無によって判定するもので、特殊な技能・機器を必要とせず試験できるため、一般の土木技術者は容易に行える。しかし、試験期間の短縮、いわゆる促進試験としては、まだ不十分であり、今後も試験条件などの検討が必要である。

ダブルシリンダー法は、コンクリートの判定についても、応用できる可能性がある。

第5章では、暫定案の抑制対策の見直しを行った。明らかになったことを列記すれば以下ようになる。

① 安全と認められる骨材の使用

4章のように、修正したアルカリシリカ反応性試験法（モルタルバー法）による無害骨材の使用。

② 低アルカリ形セメントの使用

低アルカリ形セメントはアルカリ表示がなく、最大のものは0.6%のアルカリ量がありセメント量が極端に多くなるとアルカリ総量規制をクリアできないことがある。この場合、アルカリ量のわかっているアルカリ量のより低い低アルカリ形セメントを用いるか、無害の骨材を使用することが必要と考えられる。

③ アルカリ骨材反応抑制効果のある混合セメントまたは混和材の使用

高炉スラグを使用する場合、セメント置換率は50%以上が望ましい。ただし、セメントのアルカリ量が0.85%以下であれば置換率40%以下でもよい。市販されている高炉セメントB種の置換率は40～50%となっており、セメントのアルカリ量0.85%以下を確認すれば高炉セメントB種を用いてよい。

また、代表的なボゾランとしてフライアッシュがある。フライアッシュをセメントに置換してASR抑制実験を行った結果、置換率20%以上であれば十分な抑制効果がある。セメントのアルカリ量0.8%以下の場合、置換率15%でも抑制効果は十分であった。

④ コンクリート中のアルカリ総量の規制

反応性骨材でもアルカリ量4～5kg/m³までは膨張しない。コンクリートに供給されるアルカリは、コンクリート練混ぜ時、セメントはもちろん、混和剤、海砂の使用などさまざまである。それらのアルカリ量も総量に考慮しなければならない。また、環境条件によっては飛来塩分などもあり、それらの影響もあるのではないかと考えられるが、現在のところ実験データでは明確にあらわれていない。今後も研究をつづける必要がある。

参考文献

- 1) 小林茂敏, 河野広隆, 辻子雅則, 平間昭信; A S Rの簡易試験法に関する研究—ダブルシリ
ンダーを用いる方法—, 土木研究所資料第2587号, 1988年2月
- 2) 土木研究所, 土木研究センター, 鉄鋼スラグ協会; 高炉スラグ微粉末によるA S R抑制に関
する共同研究報告書, 土木研究所資料第2527号, 1987年12月
- 3) 小林茂敏, 河野広隆, 森濱和正, 石井良美, 小野金造, 佐々木一郎, 肥沼年光: A S Rに関
するモルタルバー実験データ集, 土木研究所資料第2593号, 1988年2月
- 2.1) Stanton, T.E.; Expansion of Concrete through Reaction Between Cement and
Aggregates, Proc. ASCE, Vol. 66, pp. 1781~1811, 1940
- 2.2) Powers, T.C. and Steinouer. H.H.; An Interpretation of Some Pubilshed Researches
on the Alkali-Aggregate Reaction-Part I, Journal of ACI, Vol. 51, pp. 497~514, 1955
- 2.3) Hansen, W.C; Studies Relating to the Mechanisms by which the Alkali-Aggregate
Reaction Produces Expansion in Concrete, Journal of ACI, Vol. 15, No.3, pp. 213~
227, 1944
- 2.4) 例えばVerbeck, G. and Gramlich. C.; Osmotic Studies and Hypothesis Concerning
Alkali-Aggregate Reaaction, ASTM Proc., Vol. 55, pp. 1110~1129, 1955
- 2.5) Vivian, H.E.; Alkali-Silica Reaction, Symposium on Alkali-Aggregate Reaction
Preventive Measures, Reykjavik, pp. 21~34, 1975
- 2.6) Swenson, E.G.; A Reactive Aggregate Undetected by ASTM Test, ASTM Bull.
No.226 pp. 48~50, 1957
- 2.7) Hodley, D.H.; Alkali Reactivity of Dolomitic Carbonate Rocks, HRR, No.45, pp. 1
~20, 1965
- 2.8) 例えば, 小林, 河野, 小野, 佐々木; 各種アルカリがアルカリ骨材反応に及ぼす影響, 第7
回コンクリート工学年次講演会論文集, 1985年5月
- 2.9) C & CA Working Panty; Minimising the Risk of Alkali-Silica Reaction
Guidance Notes, 1983. 9
- 2.10) 例えば武吉, 野田, 多記, 片脇; 被覆材によるアルカリ骨材反応の抑制, 第8回コンクリ
ート工学年次講演会論文集, 1986年6月

- 2.11) Goumundur Guomundsson and Haraldur Asgeirsson ; Parameters Affecting Alkali Expansion in Icelandic Concrete, Proc. 6th Int. Conf. on Alkali in Concrete, pp. 217, 1983
- 2.12) Jones, F.E. and R.D. Tarleton ; Reactions Between Aggregates and Cement, National Building Studies, Research Paper No.25, 1958
- 2.13) Viviar, H.E. ; Common Scientific ind. Res. Orgn. Aust., pp. 254, 1950
- 2.14) 日本材料学会内部資料アルカリ骨材反応に対する予防基準 (ドイツセメント工業研究所講演会資料), 日本材料学会阪神高速道路管理技術センター, 昭和59年5月
- 2.15) 小林, 小野, 河野, 肥沼 ; A S R モルタルバー膨張量に影響する要因に関する2, 3の考察, 第8回コンクリート工学年次講演会論文集, 1986年6月
- 2.16) Chatterji, S. ; The Role of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ in the Breakdown of Portland Cement Concrete due to Alkali - Silica Reaction, Cem, and Concr. Res, Vol. 9, No.2, pp. 185~188, 1979
- 2.17) Smolezyk, H.G. ; Slag Cements and Alkali Reactive Aggregate, of 6th Int. Conf. on Chemistry of Cement, Moscow, 1976
- 2.18) Bakker. R.F.M.; About the Cause of Resistance of Blastfurnace Cement Concrete to the Alkali-Silica Peaction, Proc. of 5th Int. Conf. on AAR in Concrete, Cape Town, 1981
- 2.19) 近藤泰夫, 北川欣一 ; アルカリ骨材反応に関する研究 <第1報: 村山橋及び長崎橋の被害調査並びに某港防波堤破損状況に就て> <第2報: 各地骨材のアルカリ骨材反応の試験結果及びボツオランによる防止等に就て> セメント技術年報Vol. 5. 1965
- 2.20) 村田清逸, 関慎吾, 藤本洋一 ; アルカリ骨材反応を起こしたコンクリートの一例, セメントコンクリートNo.220 1965.6
- 2.21) 桑原啓三他 ; コンクリートの劣化実態調査報告 (1), 土木研究所資料第2369号, 1986年4月

4.1) セメント協会: アルカリ骨材反応についての見解, 1983年10月

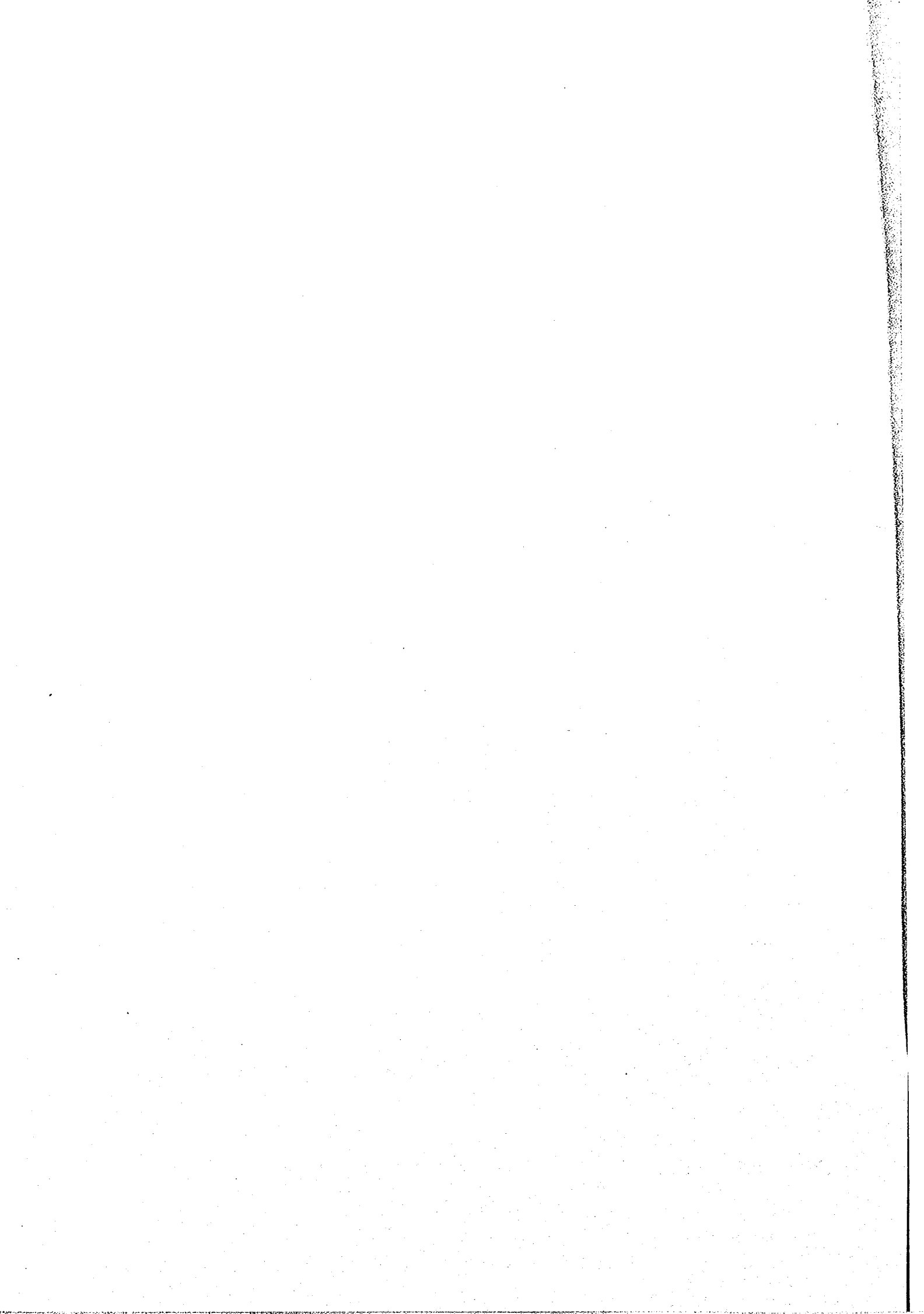
- 5.1) 桑原ほか；コンクリートの劣化実態調査報告(1)，土木研究所資料第2369号，1986年4月
- 5.2) 大橋猛，中井俊英，小長井宣生；アルカリ骨材反応に影響を及ぼす諸要因について，土木学会第41回年次学術講演会講演概要第5部，昭和61年11月
- 5.3) 丸安隆和，小林一輔，阪本好夫；高炉セメントコンクリートの研究，土木学会コンクリートライブラリー，第25号，1970年4月(東大生研報告第4号，1966年2月)
- 5.4) 川村満紀代表；ボゾランのアルカリ骨材反応による膨張防止とその機構に関する研究，昭和61年度科学研交費補助金研究成果報告書，pp. 28
- 5.5) Revised guidelines for avoiding Alkali Silica Reaction, BRE News of Construction Research, February 1988, BRE

巻 末 資 料

(1) 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

(2) モルタルバー法修正案



骨材のアルカリ・シリカ反応性試験（モルタルバー法）案

1. 適用範囲

本方法はモルタルバーの長さ変化を測定することにより、骨材のアルカリ・シリカ反応性を判定する試験について規定する。

現在、骨材のアルカリ骨材反応性を判定する方法は我が国独自のものはなく、米国のASTM規格の化学法とモルタルバー法を準用しているのが現状である。ASTM規格のモルタルバー法を行おうとすると、必要な機器をすべて新たに揃える必要が生じる。このため、ここでは我が国の実情に合った試験方法を検討した。判定法については、本方法によって試験した結果を検討し我が国の骨材に応じたものを策定していく必要があり、将来はさらに規定の内容の変更もあり得るため、暫定案とした。

アルカリ骨材反応にはアルカリ・シリカ反応だけでなく、いくつかのものがあるが、ここでは我が国で現在確認されているアルカリ・シリカ反応を生じる可能性のある骨材を対象とし、アルカリ・シリケート反応、アルカリ・カーボネイト反応については、別途検討の必要がある。アルカリ・シリカ反応を試験する場合でも岩種によってはペシマムが存在するため、ペシマム配合試験を行う等して検討する必要がある。またセメントとの組み合わせ等を検討する場合は本試験に準じ必要な変更を行い試験を行うのがよい。なお、骨材のアルカリ・シリカ反応性試験（化学法）で無害と判定された骨材については、原則として本試験を適用する必要はない。

2. 試験用器具

2.1 はかり

骨材のふるい分けに用いるはかりは骨材質量の0.1%以上の精度を有するものとする。モルタルを作る際の材料の計量には秤量2kg、感量0.1gのものを用いる。

2.2 型枠

JIS R 5201 9.1.2に規定される40×40×160mmの3連型枠で、両端に長さ変化測定用のゲージプラグを埋め込めるよう、ゲージプラグ固定用の穴をあけたものとする。

2.3 長さ変化測定器具

長さ変化の測定は、JIS A 1129（モルタルおよびコンクリートの長さ変化試験方法）に規定するダイヤルゲージ方法による。ダイヤルゲージはJIS B 7509の0.001mm精度のものを使用するものとする。ゲージプラグは試験中に錆を生じない金属製のものとする。

2.4 モルタル製作用器具

モルタルの練り混ぜ、成形、締固めに使用する器具は、JIS R 5201（セメントの物理試験

方法) 9.1.1 及び 9.1.2 に規定される練り混ぜ機、モルタル供試体成形用型および突き棒に規定するものを使用する。

2.5 ふるい

砂の粒度調整用のふるいは、JIS Z 8801 (標準ふるい) に規定する呼び寸法 4.75 mm、2.36 mm、1.18 mm、600 μ m、300 μ m、150 μ m のものを用いる。

2.6 貯蔵容器

供試体を貯蔵する容器は、気密なフタにより密閉ができ、湿気の損失がない構造のものとする。

2.7 製砂機

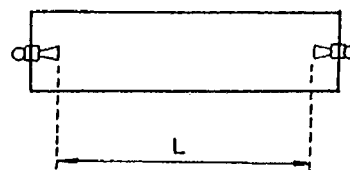
粗骨材から細骨材を製造する製砂機はジョークラッシャー、ディスク型製砂機、ロール型製砂機等を用いる。

ここでは、新たに特殊な器具を準備することなく、一般的な JIS の器具を活用できるようにした。なお、JIS 規格の $40 \times 40 \times 160$ mm 型枠を用いた場合には ASTM 規格の $1 \times 1 \times 11 \cdot 1/4$ in に比べ、膨張量が大きく、安全サイドの判定になる。但し、すでに ASTM 規格で試験を実施されている状況を踏まえ、当面は供試体寸法 $1 \times 1 \times 11 \cdot 1/4$ in の結果も認めるが、新たに始める実験は JIS 型枠によるものとする。

$40 \times 40 \times 160$ mm の型枠はセメント試験用の型枠端板にプラグをセットする孔をあけることとなるが、モルタルの締固め時にプラグが脱落しないよう開放側に空気ぬきの小孔をあけておくのがよい。

市販のゲージプラグは、現状は長さ等の規格が統一していないのでゲージプラグの長さによって 11 に示す有効ゲージ長が異なることがある。従って事前に有効ゲージ長を測定しておく必要がある。なお、有効ゲージ長は解説図 - 1 に示すようにゲージプラグの内側端面間の距離とする。

製砂機については、必要な粒度の細骨材を調整するためにいくつかの機械を組み合わせたほうがよい場合がある。なお、製砂の方法によってはモルタルバーの膨張量に差が生じるとの報告もあるが、実用上は問題ないようである。



解説 図 - 1 有効ゲージ長

3. 温度および湿度

3.1 成形室および測定室

モルタルの成形室および測定室は、 20 ± 3 °C に保たなければならない。

3.2 貯蔵容器内の温度は 40 ± 2 °C、相対湿度は 95% 以上保たなければならない。

成形室と材料の温度および測定室は、一般のコンクリートの試験と同様に、 20 ± 3 °C に保たなければな

らない。貯蔵容器の相対湿度は、モルタルバーの膨張に大きな影響を与えるため、100%になるべく近くなるようにする。

供試体を入れた容器の貯蔵温度は、ASTMでは $37.8 \pm 1.7^{\circ}\text{C}$ ($100 \pm 3^{\circ}\text{F}$)であるため、それに近い値として摂氏で $40 \pm 2^{\circ}\text{C}$ とした。

4. 材料

4.1 骨材の準備および粒度調整

対象とする骨材が粗骨材の場合には、あらかじめ洗浄した後、クラッシャー等で粉砕した細骨材とする。細骨材は、気乾状態で表-1に示す粒度に調整する。

表-1 細骨材の粒度分布

ふるい呼び寸法		質 量 百分率(%)
通	残 留	
4.75 mm	2.36mm	10
2.36 mm	1.18mm	25
1.18 mm	600 μm	25
600 μm	300 μm	25
300 μm	150 μm	15

4.2 セメント

セメントは、JIS R 5210に規定される普通ポルトランドセメント低アルカリ形かつ、 $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ が既知のものを用いる。 $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ が不明の場合にはJIS R 5202（ポルトランドセメントの化学分析方法）により Na_2O および K_2O を事前に求めておく。

4.3 水酸化ナトリウム

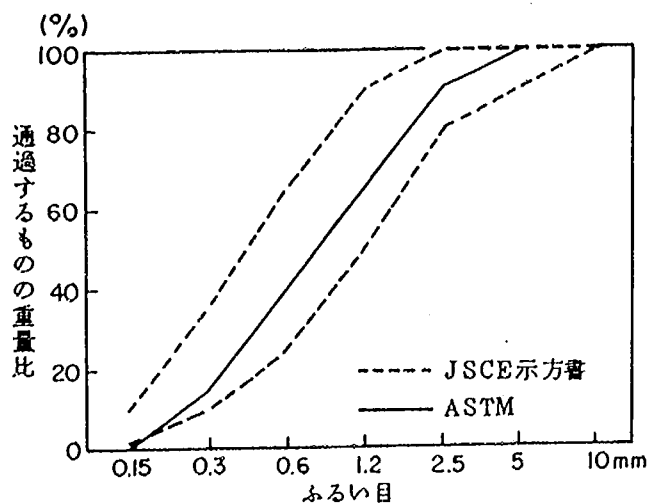
水酸化ナトリウムは、JIS K 8576に規定する特級試薬を水酸化ナトリウム水溶液として用いる。また、市販されている1規定の水酸化ナトリウム水溶液を用いてもよい。

4.4 水

練り混ぜに用いる水は、上水道以上の清浄なものを用いる。

4.1について 骨材の粒度および粒形は骨材の反応に影響するものと考えられるが、粉砕機によって粒形を調整することは容易ではない。そこで粒度だけは表に示すものに規定した。しかしながらこれまで行った調査では、細骨材の粒度が、土木学会コンクリート標準示方書に示す細骨材の粒度分布内におさまるようにふるい分けられていれば、膨張にはそれほど差がでないことが確認されているため、材料の量等の関係で表に示す粒度が、どうしても得られない場合には、土木学会コンクリート標準示方書に示す細骨材

の粒度分布内に納まるように調整し、その旨報告書に記すとよい。なお、ASTM の粒度分布に調整された砂と土木学会コンクリート標準示方書に示す細骨材の粒度分布の関係は 解説 図-2 のような分布となる。



解説 図-2 粒度分布

[参考] 骨材の調整方法の例

1. 粗骨材

- (1) 縮分した試料を絶乾状態とする。
- (2) 4.75 mmの網ふるいでふるい、通過分を除去する。
- (3) 縮分を小型ジョークラッシャーで破碎し、4.75 mm網ふるいでふるう。残分はさらにジョークラッシャーで破碎してから、4.75 mmの網ふるいでふるう。この操作を繰り返して4.75 mmの網ふるいを全通させる。
- (4) この通過分を2.36 mmの網ふるいでふるい、残分の中から4.75 mm～2.36 mm粒度試料を分取する。
- (5) 分取した残りの試料をさらに小型ジョークラッシャーや2.7 に規定する粉砕機で破碎し、2.36 mmの網ふるいでふるう。この操作を繰り返して2.36 mmの網ふるいを全通させる。
- (6) この通過分を1.18 mmの網ふるいでふるい、残分の中から2.36～1.18 mm粒度試料を分取する。
- (7) 分取した残りの試料は再び2.7 に規定する粉砕機で破碎し、破碎とふるい分けを繰り返し、1.18 mm網ふるいを全通させる。この操作を600 μ m、300 μ m及び150 μ mの各網ふるいについて繰り返し、各々の粒度試料を分取する。
- (8) 粉砕機の刃先の間隔は各粒度に応じて調整し、必要以上に小さくしてはならない。また、粉砕機の連続した2度破砕、3度破砕を行ってはならず、必ず、その間にふるい分けを行って残分だけを破碎する。
- (9) 分級した各粒度試料は、各寸法のふるいに入れ、水で十分に洗浄し、骨材に付着したごみや微細粒子を除去する。
- (10) 洗浄後の各粒度試料は水を切ってから乾燥機に入れ105 $\pm$ 5 $^{\circ}$ Cで一定重量になるまで乾燥する。
- (11) 乾燥後の各粒度試料は、直ちに使用しない場合には、清潔な気密容器に入れて別々に保管する。

2. 細骨材

- (1) 縮分した試料を絶乾状態とする。
 - (2) 4.75 mmの網ふるいでふるい、通過分を除去する。
 - (3) この通過分を2.36 mmの網ふるいでふるい、残分の中から4.75 ~ 2.36 mm の粒度試料を分取する
(余剰の残分は捨ててもよい)。
 - (4) この通過分を1.18 mmの網ふるいでふるい、残分の中から2.36 ~ 1.18 mm の粒度試料を分取する
(余剰の残分は捨ててもよい)。
 - (5) 以下同様にして、この操作を600 μ m、300 μ m及び150 μ mの各網ふるいについて繰り返し、それぞれの粒度試料を分取する。
 - (6) 粗粒、例えば4.75 ~ 2.36 mmの粒度試料が不足するときは、4.75 mmの網ふるい残分を用いて粗骨材の調整方法によって粒度試料を作る。
 - (7) 細粒が不足するときは、上位粒度試料の余剰残分を粗骨材の調整方法によって粉碎して作る。
 - (8) 水洗い、乾燥及び保管は、粗骨材の場合と同様とする。
3. 粗骨材と細骨材とが同じ原産の碎石、砕砂の場合は、細骨材について試験を行うだけでよい。
4. 300 μ m及び150 μ mのふるい分けには、ロータップシュエーカーを用いるのがよい。
- 各種の岩種から構成されている川砂利等の粗骨材は、できるだけ使用する時と同じ状態の混合比で破碎して試料の砂とすることが大切である。

4.2 について セメント中のアルカリ量 Na_2Oeq %はセメント中の重量比である。セメント中にはアルカリ骨材反応に影響するイオンとして Na^+ と K^+ が存在するが、現在のところ、両者の評価方法が明らかになっていない。このため、条件をなるべく統一し、不確定な要素をなるべく排除するために、できるだけアルカリ量の少ないセメント ($\text{Na}_2\text{Oeq} < 0.5\%$ が望ましい) を選び、Na を添加することとした。

5. 供試体(モルタルバー)の作り方

5.1 供試体の数

1回の試験での供試体の数は3本を原則とする。また、1バッチから3本を製作する。

5.2 モルタルの配合

モルタルの配合は質量比でセメント1、水0.5、砂(表乾)2.25とする。

1回に練り混ぜるセメント、砂、水の量は次を標準とする。

水 + NaOH水溶液 : 300 ml

セメント : 600 g

砂(表乾) : 1350 g

NaOH水溶液の量はセメントのアルカリ量が Na_2Oeq で $1.2 \pm 0.05\%$ となるように計算して定める。

5.3 材料の計量

重量で計量する材料は、4ヶタまで計る。砂はあらかじめ気乾状態としておき含水（吸水）率を測定し、水の計量の際に補正を行い、水セメント比が変化しないようにする。

5.4 練り混ぜ方法

モルタルの練り混ぜは、原則として次に示す方法による。

JIS R 5201 9.1.1 で規定される練り混ぜ機を使用する。練りはちおよびパドルを混合位置に固定し規定量のセメント、砂を入れる。次に練り混ぜ機を始動させパドルを回転させながら30秒間混合する。次に練り混ぜ機を停止し、規定量の水を投入する。引きつづいて練り混ぜ機を30秒間始動させたのち20秒間休止する。休止のあいだにさじで練りはちおよびパドルに付着したモルタルをかき落す。さらに練りはちの底のモルタルをかき上げるよう2ないし3回かき混ぜる。休止が終わったら再び始動させ120秒間練り混ぜる。

5.5 成形

モルタルは直ちに型枠に2層に詰める。モルタルを型枠の高さの1/2まで詰め、突き棒を用いてその先端が5mm入る程度に、全面にわたって1層につき約15回突く。また、特にゲージプラグの周囲は十分にモルタルがいきわたるようにする。次にモルタルを型枠の上端まで詰め、前と同様に突き棒を用いて突き、最後に残りのモルタルを盛って約5mm盛り上げを行う。打設後は湿気箱に入れ乾燥を極力減ずるようにモルタル表面にふれないようにぬれ布等でおおう。余盛部は打設後約5時間程度で供試体をいためないように注意して削りとり、上面を平滑にする。

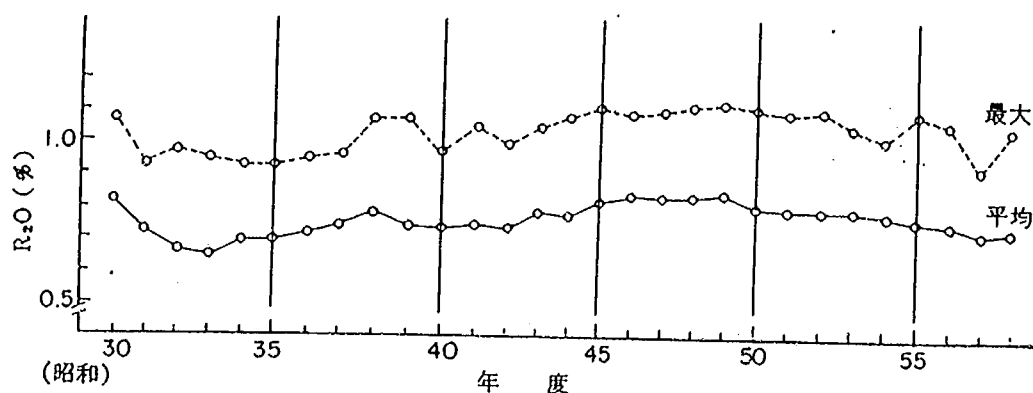
5.1 について 供試体の本数は同一のバッチから3本を製作するようにする。ここで供試体の本数は3本としたのは、本試験は比較的结果のばらつきが大きくなりやすい傾向にあるため、本来であれば本数が多い方が精度等はよくなるが、型枠の制約やコンクリートの他の試験においても3本によるデータ処理手法が一般となっていることなどを考慮して、このように定めた。

5.2 について 5.2 に示した配合は示方配合であるから、骨材の水分の状態（絶乾、気乾、表乾、湿潤）に合わせて、現場配合は決定しなければならない。量については3本の供試体を製作するのに十分な余裕を見込んでいる。このため、練混ぜや成形に支障がない場合には、ここに示した量より1割程度少ない量として、材料の節約を図ってもよい。また、ASTM法では水セメント比は決められておらず、フロー率で水量を決定しているが、ここで水セメント比50%としたのは、水セメント比の違いがモルタルの膨張量に影響を与えることを考慮し水セメント比一定とした。水セメント比を50%とすると一般に用いられているコンクリートの水セメント比に近いものとなる。また、ほとんどすべての骨材についてモルタルバーの製作が可能となる。また、ほとんどすべての骨材についてモルタルバーの製作が可能となる。参考までにフロー値が知りたいときは、JIS R 5201 に示すフロー試験を行うとよい。

セメント中のアルカリ量を1.2%としたのは、これまで我が国で使用されたセメント中のアルカリ量の

最大値が約1.2%であったこと、およびこれまでのモルタル試験から、この程度のアルカリ量が骨材の反応性をチェックするのに適当と判断された。

セメント中のアルカリには Na_2O と K_2O があるがモル数をあわせることにより当量換算している。



解説 図-3 普通ポルトランドセメントのアルカリ量 (R_2O) の推移

Na_2O の分子量 30.99、 K_2O の分子量 47.10

原子量 = Na : 22.99 K : 39.10 O : 16.00 H : 1.01

このため Na_2O と同重量の K_2O はモル数としては $30.99/47.10 = 0.658$ 倍となる。

$\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ が0.5%のセメント600gを $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ が1.2%のセメントとするには

$$600 \times (1.20 - 0.50) / 100 = 4.20 \text{ g の } \text{Na}_2\text{O} \text{ が必要}$$

これと等量のNaOHは

$$4.20 \times \text{NaOH} / (\text{Na}_2\text{O} / 2) = 4.20 \times 40.00 / 30.99 = 5.42$$

5.42 g のNaOHは0.136規定。よって1規定のNaOH水溶液を用いるとすれば練り混ぜ水のうち136mlをNaOH水溶液におきかえれば良い。

正確にNaOHを加えるには、あらかじめNaOH溶液を作り滴定により濃度を調べておき、練り混ぜ水に混合する量を計算するのがよい。

5.4について 供試体の製作はJIS R 5201に準じたものである。モルタルの練り混ぜは、水に添加したNaOHの影響等を考慮して5.4の順序とした。

6. 初期養生

打設後24時間±2時間までは型枠ごと湿気箱に入れて乾燥を極力減ずるようにモルタル表面にふれないようにぬれ布等でおおう。

7. 脱型

初期養生完了後、脱型を行う。このとき湿気を失わないように番号および測定時の上下、測定時の

方向を示す記号を明記する。打設から脱型までの時間は 24 ± 2 時間となるようにする。

8. 基長のとり方

脱型直後、番号等を付けた後供試体が極力乾燥しないように直ちに基長を測定する。

9. 貯蔵及び測定

供試体は長手方向の端を下にして立てておき、下端は貯蔵容器の中の水と接触しないようにする。水中に没したり、供試体表面を水が流れることは、供試体からのイオン等の溶出があり望ましくない。容器は密封し $40^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 、 $\text{RH} \geq 95\%$ で貯蔵する。

供試体が所定の材令に達したならば供試体を容器ごと貯蔵室又は箱から取り出し、少なくとも16時間、 $20 \pm 3^{\circ}\text{C}$ に保ったのち容器を開いてその材令の測定を行う。測定の間は極力、供試体が乾燥しないようにする。

測定後は直ちに $40^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 、 $\text{RH} \geq 95\%$ にもどす。

最初の 24 ± 2 時間の長さの測定の後に1つの容器に入れる全ての供試体は、すべて同時に測定がくするように同じ日につくり、同時に容器に入れる。

供試体は測定後、前の期間とは上下逆の位置にして容器の中に置き直す。

$\text{RH} \geq 95\%$ とするには、養生容器の下に水をはり水中に加熱機をおき、この加熱機によって生ずる水蒸気によって容器全体を加熱するようにするとよい。この方法をとる場合には測定時に供試体が乾燥しやすいので注意を要する。

この方法でも表面が乾燥する場合やこの方法が適当でない場合には、供試体をぬらしたろ紙等ですきまなく巻いて供試体を1本1本ビニール袋に入れて養生するとよい。この際、ろ紙が乾燥しないよう、また、水が流れでるほどとならないように水を補給することが肝要である。この方法では供試体を立てておく必要はないが、クラックの発生等の外観の観察は困難となるので、注意が必要である。

10. 測定方法

10.1 長さ変化の測定

測定はJIS A 1129ダイヤルゲージ法による。

測長わくは、供試体を測定する時と同じ状態に置く。(鉛直度、温度)

標準尺の一方のプラグに測長わくの接点を接触させ、ダイヤルゲージの先端が、標準尺の軸に一致して動くようにし、スピンドルを徐々に出して、標準尺のもう一方のプラグに接触させダイ

ヤルゲージの目盛を読む。目盛は1/10000mmまで読む。スピンドルを引き、再び上記の操作を繰り返し、数値がおちついた後の目盛の読みから平均値を求め、sXiとする。

供試体について、上記の作業を行いXiを求める。

供試体は常に同じ端を上にし同じ面を手前にする。ゲージと供試体の位置関係が常に同一となるようにする。

測定器、標準尺、供試体は、測定前3時間、その試験毎に定めた温度に保つ。

10.2 外観観察

長さ変化の測定時に供試体のそりやポップアウト等の変状、表面のひびわれや水ガラスのゲル等の浸出物、よごれ等を観察する。

11. 長さ変化率の算出

供試体の最初の長さ、と、各測定材令における長さとの差を有効ゲージ長さで除し、0.001%まで計算し、その材令における供試体の長さ変化率として記録する。長さ変化率は次の式で求める。

$$\text{長さ変化率}\% = \frac{(X_i - sX_i) - (X_{ini} - sX_{ini})}{L} \times 100$$

ここに、Xi ; 材令iにおける供試体のダイヤルゲージの読み

sXi ; 材令iにおける標準尺ダイヤルゲージの読み

Xini ; 供試体脱型時のダイヤルゲージの読み

sXini ; 同時に測定した標準尺のダイヤルゲージの読み

L ; 有効ゲージ長(ゲージプラグ内側端面間の距離)

注) Xi、sXi、Xini、sXini、Lの単位は同一とする。

有効ゲージ長はゲージプラグによって長さが異なるので注意を要する。

12. 測定材令

測定材令は次のとおりとする。

脱型時 2週間 4週間 8週間 3ヶ月 6ヶ月

判定は3ヶ月、6ヶ月の測定値で行うが、少なくとも上記材令で測定し必要に応じて回数や期間を増加させる。

伸びの傾向を詳細に検討したり、事故等への迅速な対応を行うには、より短い期間で判定を行うのがよいのは言うまでもない。

13. 判 定

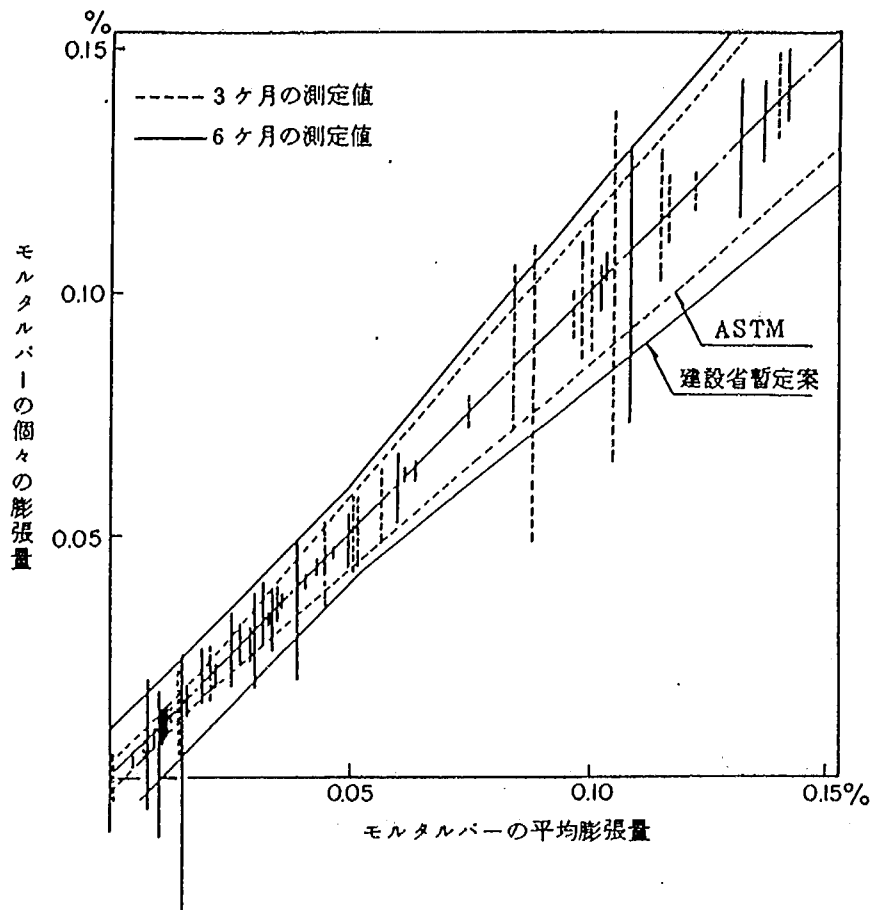
判定については、3本の平均値が、6ヶ月後に0.1%以上の膨張を生じた骨材は有害であるとする。なお、3ヶ月で0.05%以上の膨張を生じたものは有害としてもよいが、3ヶ月で0.05%未満のものは、6ヶ月まで試験を続けた後に判定しなければならない。

現在、ASTM法の判定法を参考に6ヶ月で0.1%を判定基準とした。なお、安全を見込むならば3ヶ月0.05%以上となったら有害と判断してもよい。なぜならば、3ヶ月で0.05%の膨張するもののうちかなりのものが6ヶ月で0.10%以上の膨張をするからである。ただし、3ヶ月の膨張が0.05%以下であるからといって6ヶ月で0.10%以下と推定するのは危険である。モルタルバーによる試験は岩種やアルカリ量によって膨張量や膨張速度に大きな差が見られたり、また岩種によってはベシマムが存在するため反応性岩種と非反応性岩種との混合比によって膨張量が異なることもある。したがってモルタルバーの判定基準については多くの問題点が残っているが、暫定的に条文のとおりとした。判定の時期も6ヶ月後では早すぎるという考え方もあるが、これまでに土木研究所で行った試験では、問題があると考えられる国産の骨材はすべて6ヶ月で0.10%以上の膨張を示したため、ここでは暫定的にこのように定めた。

14. 精度

同一バッチから成形した全部の供試体の平均膨張量と、個々の供試体の膨張量との絶対値の差が0.010%以下であれば、精度は満たされていると考えてよい。但し、平均膨張量が0.05%を超える場合は、個々の供試体の膨張量が平均膨張量との比で±20%以上の差がなければ、精度は満たされていると考えてよい。3本とも0.10%以上の膨張を示したものは精度に関係なく有害と判定してよい。

現在、ASTM法では、ここに示した数値よりも小さい測定値で管理を行っている。解説図-4に土木研究所で行ったモルタルバーの結果を示すが、ASTM法での精度では満足しないものが多く、特に膨張量の小さいところで多くのものが精度を満足していない。このため、この暫定案ではASTM法の精度を緩和した精度を採用している。また、本来であればASTM法よりもより高い試験精度や再現性を有した方法を提案すべきであるが、現在これまでに行われた試験の状況を踏まえて、この精度とした。なお、将来的には、試験データを蓄積し、より試験精度の高い方法を提案したいと考えている。



解説 図-4

15. 報告

報告は、次の項目について記載する。

- (1) 骨材の産地および種別
- (2) セメントの種類および銘柄
- (3) セメントのアルカリ量、酸化カリウム (K_2O)、酸化ナトリウム (Na_2O) および酸化ナトリウム等量 (Na_2O_{eq}) 等の数値
- (4) 供試体の平均長さ変化の百分率、各測定材令
- (5) 試験に混和材料を用いた場合には、その種類、使用量、化学分析結果等
- (6) その他試験中および試験後の供試体の検査によって発見された重要な事項等の必要事項

骨材のアルカリシリカ反応性試験（モルタルバー法） （修 正 案）

1. 適用範囲

本方法はモルタルバーの長さ変化を測定することにより、骨材のアルカリシリカ反応性を判定する試験について規定する。

2. 試験用器具

2.1 はかり

骨材のふるい分けに用いるはかりは骨材質量の0.1%以上の精度を有するものとする。モルタルを作る際の材料の計量には秤量2Kg、感量0.1gのものとする。

2.2 型 枠

JIS A 5201 9.1.2に規定される40×40×160mmの3連型枠で、両端に長さ変化測定用のゲージプラグを埋め込めるよう、ゲージプラグ固定用の穴をあけたものとする。

2.3 長さ変化測定器具

長さ変化の測定は、JIS A 1129（モルタルおよびコンクリートの長さ変化試験方法）に規定するダイヤルゲージ方法による。ダイヤルゲージはJIS B 7509の0.001mm精度のものを使用するものとする。ゲージプラグは試験中にさびを生じない金属製のものとする。

2.4 モルタル製作用器具

モルタルの練り混ぜ、成形、締固めに使用する器具は、JIS R 5201（セメントの物理試験方法）9.1.1及び9.1.2に規定される練り混ぜ機、モルタル供試体成形用型及び突き棒に規定するものを使用する。

2.5 ふるい

砂の粒度調整用のふるいは、JIS Z 8801（標準ふるい）に規定する標準網ふるい4760, 2380, 1190, 590, 297, 149μmのものをを用いる。

2.6 貯蔵容器

供試体を貯蔵する容器は、気密なフタにより密閉ができ、湿気の損失が無い構造のものとする。

2.7 製砂機

粗骨材から細骨材を製造する製砂機はジョークラッシャー、ディスク型製砂機ロール型製砂機等を用いる。

3. 温度と湿度

3.1 成形室及び測定室

モルタルの成形室および測定室は、 20 ± 3 ℃に保たなければならない。

3.2 貯蔵容器内の温度は 40 ± 2 ℃、相対湿度は95%以上保たなければならない。

4. 材 料

4.1 骨材の準備および粒度調整

対象とする骨材が粗骨材の場合には、あらかじめ洗浄した後、クラッシャー等で粉砕した細骨材は、気乾状態（絶乾、表乾状態でもよい）で表-1に示す粒度に調整する。

表-1 細骨材の粒度分布

ふるい呼び寸法		質 量 百分率(%)
通 過	残 留	
4760 μm	2380 μm	10
2380 μm	1190 μm	25
1190 μm	590 μm	25
590 μm	297 μm	25
297 μm	149 μm	15

4.2 セメント

セメントは、アルカリ量 0.65 ± 0.05 ％、 Na_2O (％)： K_2O (％)＝1：2 ± 0.5 の範囲にあるアルカリ量の明らかなポルトランドセメントを用いる。

4.3 水酸化ナトリウム

水酸化ナトリウムは、JIS K 8576に規定する特級試薬を水酸化ナトリウム水溶液として用いる。
また、市販されている1規定の水酸化ナトリウム水溶液を用いてもよい。

4.4 水

練り混ぜに用いる水は、上水道以上の清浄なものを用いる。

5. 供試体（モルタルバー）の作り方

5.1 供試体の数

1回の試験での供試体の数は3本を原則とする。また、1バッチから3本を製作する。

5.2 モルタルの配合

モルタルの配合は質量比でセメント 1、水 0.5、砂（表乾）2.25とする。

1回に練り混ぜるセメント，砂，水の量は次を標準とする。

水＋NaOH水溶液 ： 300 ml

セメント : 600 g
砂(表乾) : 1350 g

NaOH水溶液の量はセメントのアルカリ量が $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ で $1.2 \pm 0.05\%$ となるように計算して定める。

5.3 材料の計量

重量で計量する材料は、4ケタまで計る。砂はあらかじめ気乾状態としておき含水(吸水)率を測定し、水の計量の際に補正を行い、水セメント比が変化しないようにする。

5.4 練り混ぜ方法

モルタルの練り混ぜは、原則として次に示す方法による。

JIS R 5201 9.1.1で規定される練り混ぜ機を使用する。練りはち及びパドルを混合位置に固定し規定量のセメント、砂を入れる。次に練り混ぜ機を始動させパドルを回転させながら30秒間混合する。次に練り混ぜ機を停止し、規定量の水を投入する。引きつづいて練り混ぜ機を30秒間始動させたのち20秒間休止する。休止のあいだにさじ練りはち及びパドルに付着したモルタルをかき落す。更に練りはちの底のモルタルをかき上げるよう2ないし3回かき混ぜる。休止が終わったら再び始動させ120秒間練り混ぜる。

5.5 成 形

モルタルは直ちに型枠に2層に詰める。モルタルを型枠の高さの $\frac{1}{2}$ まで詰め、突き棒を用いてその先端が5mm入る程度に、全面にわたって1層につき約15回突く。また、特にゲージプラグの周囲は十分にモルタルがいきわたるようにする。次にモルタルを型枠の上端まで詰め、前と同様に突き棒を用いて突き、最後に残りのモルタルをもって約5mm盛り上げを行なう。打設後は湿気箱に入れ乾燥を極力減ずるようにモルタル表面にふれないようにぬれ布等でおおう。余盛部は打設後約5時間程度で供試体をいためないように注意して削りとり、上面を平滑にする。

6. 初期養生

打設後24時間 $\pm$ 2時間までは型枠ごと湿気箱に入れて乾燥を極力減ずるように、モルタル表面にふれないようにぬれ布等でおおう。

7. 脱 型

初期養生完了後、脱型を行なう。このとき湿気を失わないように番号及び側定の上下、測定時の方向を示す記号を明記する。打設から脱型までの時間は 24 ± 2 時間となるようにする。

8. 基長のとり方

脱型直後、番号を付けた後供試体が極力乾燥しないように直ちに基長を測定する。

9. 貯蔵及び測定

供試体は密封した容器に温度 40 ± 2 ℃、湿度95%以上で貯蔵する。

湿度95%以上確保するための手段として、供試体の表面を吸収紙で覆うのが望ましい。吸収紙には流れない程度の水分が常に保給されていなければならない。吸収紙で覆う場合には容器はビニール袋でもよい。

供試体の表面を吸収紙で覆わない場合には、容器底面に温度調節をした水をはり、その上に供試体を直接水が接しないように1本1本立てて配置しなければならない。

供試体が所定の材令に達したならば供試体を容器ごと少なくとも16時間、 20 ± 3 ℃に保ったのち容器を開いてその材令の測定を行う。測定の間は極力、供試体が乾燥しないようにする。

測定後は直ちに 40 ± 2 ℃、 $RH \geq 95\%$ にもどす。

最初の 24 ± 2 時間の長さの測定の後には1つの容器に入れる全ての供試体は、すべて同時に測定がくるように同じ日につくり、同時に容器に入れる。

供試体は測定後、前の期間とは上下逆の位置にして容器の中に置き直す。

10. 測定方法

10.1 長さ変化の測定

測定はJIS A 1129ダイヤルゲージ法による。

測長わくは、供試体を測定する時と同じ状態に置く。

標準尺の一方のプラグに測長わくの接点を接触させ、ダイヤルゲージの先端が、標準尺の軸に一致して動くようにし、スピンドルを徐々に出して、標準尺のもう一方のプラグに接触させダイヤルゲージの目盛を読む。目盛は1/1000mmまで読む。スピンドルを引き、再び上記の操作を繰り返し、数値がおちついた後の目盛の読みから平均値を求め、 sX_i とする。

供試体について、上記の作業を行い X_i を求める。

供試体は常に同じ端を上にし同じ面を手前にする。ゲージと供試体の位置関係が常に同一となるようにする。

測定器、標準尺、供試体は、測定前3時間、その試験毎に定めた温度に保つ。

10.2 外観観察

長さ変化の測定時に供試体のそりやポップアウト等の変状、表面のひびわれや水ガラスのゲル等の浸出物、よごれ等を観察する。

11. 長さ変化率の算出

供試体の最初の長さと、測定 of 各材令における長さとの差を有効ゲージ長さで徐し0.001%まで計算し、この期間における供試体の長さ変化率として記録する。

長さ変化率は次の式で求める。

$$\text{長さ変化率}(\%) = \frac{(X_i - sX_i) - (X_{ini} - sX_{ini})}{L} \times 100$$

ここに X_i ; 材令 i における供試体のダイヤルゲージの読み

sX_i ; 材令 i における標準尺ダイヤルゲージの読み

X_{ini} ; 供試体脱型時のダイヤルゲージの読み

sX_{ini} ; 同時に測定した標準尺のダイヤルゲージの読み

L ; 有効ゲージ長(ゲージプラグ内側端面間の距離)

注) X_i , sX_i , X_{ini} , sX_{ini} , L の単位は同一とする。

有効ゲージ長はゲージプラグによって長さが異なるので注意を要する。

12. 測定材令

測定 of 材令は次のとおりとする。

脱型時 2 週

4 週 8 週

3 ヶ月 6 ヶ月

13. 判 定

判定については、3本の平均値が、6ヶ月に0.1%以上の膨張を生じた骨材は有害であるとする。

ただし、3ヶ月で0.05%以上の膨張を生じたものを有害としてもよい。

14. 精 度

同一バッチから成形した全部の供試体の平均膨張量と、個々の供試体の膨張量との絶対値の差が0.010%以下であれば、精度は満たされていると考えてよい。

但し、平均膨張量が0.05%を越える場合は、個々の供試体の膨張量が平均膨張量と±20%以上の相対差がなければ精度は満たされていると考えてよい。また個々の供試体の膨張量がすべて0.10%以上の膨張を示したものは精度に関係なく有害と判定してよい。なお、精度が上記のいずれにも適合しないときは、最も膨張量の小さい供試体1本を除いた、残りの2本の供試体の平均膨張量で判定してもよい。

15. 報 告

報告は次の項目を記載する。

(1) 骨材の産地、種別及び粒度などの特記事項

(2) セメントの種類および銘柄

- (3) セメントのアルカリ量、酸化カリウム (K_2O)、酸化ナトリウム (Na_2O) および酸化ナトリウム等量 (Na_2O_{eq}) 等の数値
- (4) 供試体の平均長さ変化の百分率、各測定時材令
- (5) 試験に混和材料を用いた場合には、その種類、使用量、化学分析結果等
- (6) その他試験中および試験後の供試体検査によって発見された重要な事項等の必要事項

ASRの試験方法（モルタルバー
法）と抑制対策に関する実験的
研究

ISSN 0386-5878
土研資料第2585号
昭和63年2月（1988）

小林 茂敏 河野 広隆 森濱 和正
石井 良美 平間 昭信 小野 金造
佐々木一郎 肥沼 年光 辻子 雅則

要 旨

我国でアルカリシリカ反応（ASR）が発見されたことを契機に、ASRの対策について本格的な研究が開始された。これにより建設省は、1986年アルカリシリカ反応（ASR）対策のための骨材の反応試験および抑制対策を盛り込んだ暫定案を通達した。本報告書はそれらの通達の基礎となる各種研究の結果をとりまとめたものである。

キーワード：アルカリシリカ反応・モルタルバー法、簡易試験法、抑制対策

郵便はがき

四十円切手
をはって下
さい。

305-□□

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. 007

No. 007

配布先氏名

配布先住所

土木研究所資料第 2585 号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名

印