

論文

[1143] アルカリシリカ反応によるコンクリートの膨張性状に及ぼす各種要因の影響

正会員○野村 謙二 (東京大学大学院)

正会員 小林 一輔 (東京大学生産技術研究所)

1. まえがき

アルカリ骨材反応によるコンクリートの膨張に基づく構造物の劣化を防止するための確実かつ有効な対策としては、少なくとも現時点においては、コンクリート中のアルカリ量を制限する以外にはないと考えられている。

米国では、古くからアルカリ量をNa<sub>2</sub>O換算で0.6%以下とするように低アルカリセメントをASTM C150に規定しているが、近年の傾向としてはコンクリートのアルカリ源として混和剤や塩化ナトリウムなども考えられるところから、コンクリート中の総アルカリ量を制限する方向へ動いており、我が国でも大筋としてはこの方針を採用している。しかし、実際にこのような考え方で良いのか否かを確かめたデータは少ない。

一方、コンクリート中のアルカリ量が同一の場合、水セメント比の大小によってアルカリシリカ反応による膨張やひびわれ性状に差を生じるか否かについては必ずしも明確にされていない。本研究では、以上の諸点を確かめると共に、コンクリートの環境温度の影響、反応性鉱物量の影響、及び反応性骨材の粒径の影響についても実験的に調べた結果をまとめたものである。

2. 実験方法

2-1 使用材料

セメントは表-1に示すように、Na<sub>2</sub>O等価アルカリ量が0.52%及び0.57%の低アルカリの普通ポルトランドセメントを用いた。

反応性骨材としては、表-2に示すような安山岩とチャートを用

表-1 セメントの化学組成 (%)

	強熱減量	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	R <sub>2</sub> O
セメントA	1.1	21.9	4.9	2.9	64.7	1.5	1.9	0.24	0.43	0.52
セメントB	1.1	22.1	4.8	2.9	64.9	1.4	1.9	0.24	0.50	0.57

いた。粗骨材の最大寸法は15mmとし、細骨材は一定の粒度となるように粗骨材を粉砕して作製した。

骨材中の反応性鉱物の概略の量を偏光顕微鏡によって定量した。その結果、安山岩中の火山ガラスの体積占有率は約40%、チャート中の微小石英の体積占有率は約90%であった。なお、非反

表-2 反応性骨材の特徴

骨材	岩石名	産地	地質年代	ASTM C289 (mmol/l)			主な構成鉱物	反応性鉱物	
				Re	Sc	判定		鉱物	占有率
A	ガラス質 両輝石安山岩	山形県	第三紀中新世	106	430	潜在的有害	斜長石、ガラス 普通輝石	火山 ガラス	40%
C	チャート	岐阜県	古世代から中世代	63	303	有害	石英、微小石英	微小石英	90%

応性骨材としては、粗細骨材共に砂岩を用いた。

アルカリ強化剤としては、水酸化ナトリウム及び水酸化カリウム（試薬特級）を用い、原セメント中に含まれる $\text{Na}_2\text{O}$ と $\text{K}_2\text{O}$ の比で混入し、それぞれ所定の $\text{R}_2\text{O}$ の値になるように調整した。

なお、AEコンクリートではAE剤としてヴィンソルを使用した。

### 2-2 コンクリートの配合

コンクリート中のアルカリは全てセメントから溶け出してくると仮定して、コンクリート中の総アルカリ量を $2.47\text{kg/m}^3$ から $6.94\text{kg/m}^3$ と変化させた。即ち、単位水量を $190\text{kg/m}^3$ と一定とし、 $W/C$ と $\text{R}_2\text{O}$ を変えて総アルカリ量を変化させた。表-3に $W/C$ と $\text{R}_2\text{O}$ に対応する総アルカリ量を示す。

### 2-3 供試体

供試体は各配合について、長さ変化測定用として $7 \times 7 \times 40\text{cm}$ 角柱供試体を3本作製した。供試体は両端面に長さ測定用プラグを埋め込んだものである。打設後1日で脱型し、基長を測定したのち温度 $40^\circ\text{C}$ 、湿度100%恒温恒湿槽に入れて保存した。

また、温度の影響を調べるための供試体は、温度 $20^\circ\text{C}$ 、湿度100%の恒温恒湿槽で保存した。

### 2-4 測定

供試体は、所定の材令で自由膨張量をコンパレータで測定した。供試体は測定1日前に恒温恒湿槽から取り出し、湿布で被覆した状態で温度 $20^\circ\text{C}$ の室内に1日静置した後、測定を行なった。

## 3. 実験結果及び考察

コンクリートの総アルカリ量と材令6か月における膨張量との関係を図-1に示す。この図から明らかなのは、次のようである。

1) 全般的な傾向として、コンクリート中の総アルカリ量がある一定値以内ならばコ

表-3 コンクリートの配合と総アルカリ量

R <sub>2</sub> O(%) \ W/C(%)	C(kg/m <sup>3</sup> )		Air5%	Air8%	50	60	70
	475	380					
	40						
0.52	◇2.47						
1.04	○4.94				□3.95	☆3.30	
1.46	★6.94	▽6.94	△6.94	◆5.55	▲4.63	■3.96	
2.19						●6.94	

単位 (kg/m<sup>3</sup>)

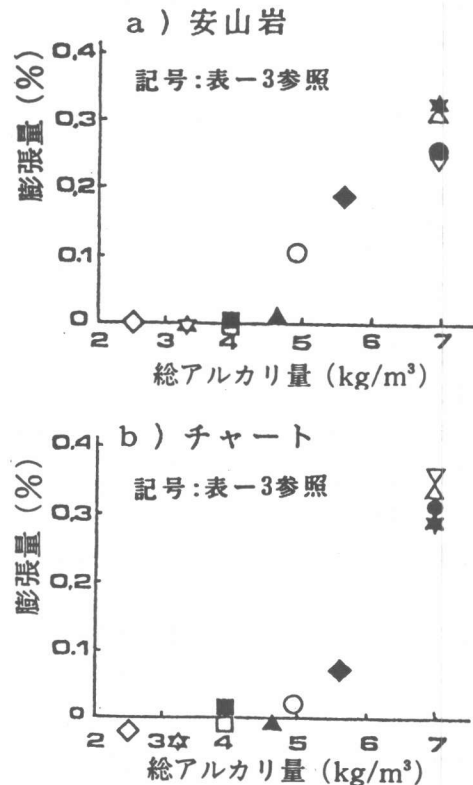


図-1 材令6か月での膨張量と総アルカリ量の関係

ンクリートに膨張を生じない。この一定値は材令6か月の時点では $4\text{kg/m}^3$ 程度である。

2) これ以上のアルカリを含むコンクリートの膨張はコンクリート中の総アルカリ量によって支配され、また既往の研究<sup>1)</sup>が指摘している膨張量が最大となるような水セメント比は存在しないようである。総アルカリ量を増すほど膨張も大きくなるが、その程度は反応性骨材によって異なる。

図-2は、材令34週の時点で殆どの膨張が起こっていない $R_2O=1.04\%$ で $W/C=50\%$ 及び $60\%$ のもの、及び $R_2O=1.46\%$ で $W/C=60\%$ 及び $70\%$ の4条件のものを除いた場合についてコンクリートの経時変化をそれぞれ骨材別に示したものである。これらの図より、

1) 総アルカリ量が $7\text{kg/m}^3$ 程度で同一であれば、安山岩、チャートのいずれを用いた場合も膨張曲線の立ち上がりの時期は、水セメント比、空気量の如何を問わずほぼ一定である。

2) 図-1よりも明らかのように、コンクリートの膨張は、安山岩の場合にはほぼ総アルカリ量に比例して増大しているが、チャートの場合にはアルカリ量がある値を越えると急激に増大する傾向を示し、ガラスと石英質とではアルカリに対する反応挙動が異なることを示唆している。

図-3及び図-4は、それぞれコンクリート中の総アルカリ量と圧縮強度及び弾性係数の低下率との関係を示したものである。

低下率はそれぞれ水セメント比ごとに全く膨張を生じていない総アルカリ量である $4\text{kg/m}^3$ 以下のコンクリートの各材令における圧縮強度及び弾性係数に対する比率とし

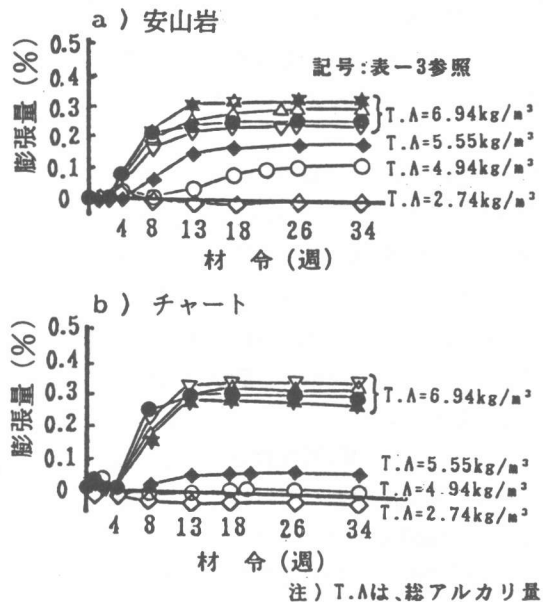


図-2 総アルカリ量が異なる場合の膨張量の経時変化

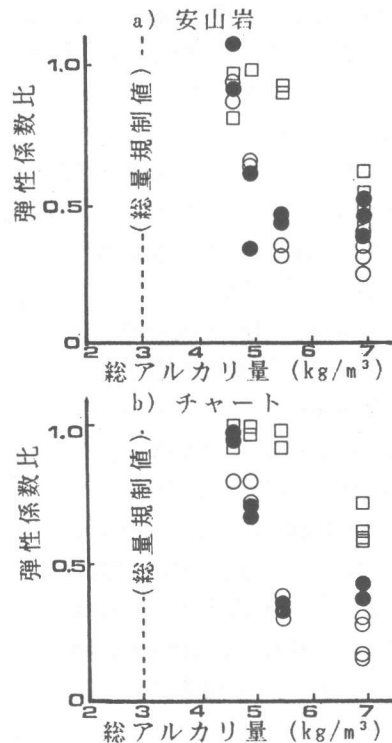


図-3 総アルカリ量と弾性係数の低下率との関係

て表わしてある。これらの図は、コンクリート中の総アルカリ量が $4\text{kg/m}^3$ 程度以下であれば、反応性骨材の使用が強度及び弾性係数に対して影響を与えないことを示している。

図-5は、環境温度が $20^\circ\text{C}$ の場合の膨張量の経時変化を示したものであるが、 $40^\circ\text{C}$ の場合に比べて膨張が始まる時期が遅れている。長期材令では、Diamondも指摘しているように $40^\circ\text{C}$ の場合の膨張速度が著しく低下するので<sup>2)</sup>、これを越える膨張を示すことが予測される。

一方、チャートの膨張性状を安山岩と比較すると、遅延膨張型といわれている潜晶質石英の特徴がよく現れている。

更に、この図から分かることは、 $W/C$ が大きいコンクリートの膨張の開始時期が早いということである。十分な水分が骨材に供給され、併せてコンクリートの強度が低いことから比較的早期で膨張したものとされる。また、空気を連行したコンクリートは、プレーンコンクリートよりも膨張が緩和されている。

図-6はセメントBを使用した $R_2O=1.46\%$ 、 $W/C=40\%$ のコンクリートにおいて、非反応性骨材を反応性骨材によってそれぞれ20%、40%、60%及び80%と置換した場合の膨張量の経時変化を示す。材令初期の段階では、反応性鉱物を多く含んでいるものが膨張量は大きい但最终的な膨張量は必ずしも反応性鉱物を多く含んでいる方が大きくなるとは限らないことが分かる。反応性鉱物を多く含んでいると早期に膨張が始まり、早期に膨張が止まる傾向があるようである。逆に反応性鉱物を含んでいる量が少ないと膨張速度は遅く、長期にわたって膨張を続けるようである。

図-7に総アルカリ量を $6.94\text{kg/m}^3$

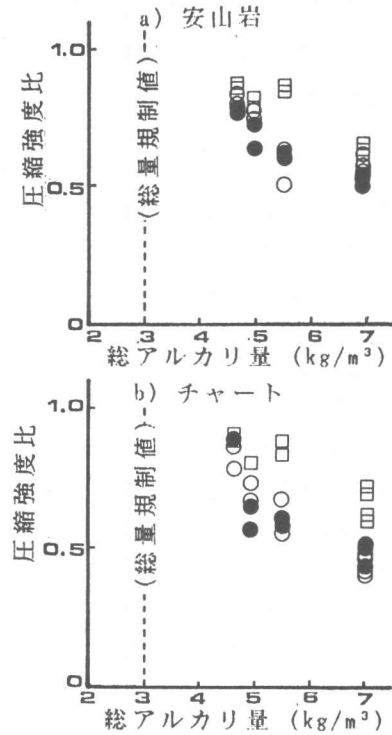


図-4 総アルカリ量と圧縮強度の低下率との関係

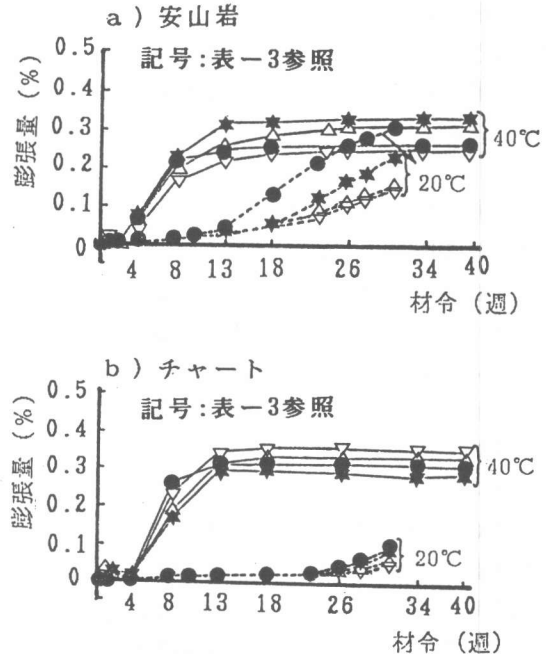


図-5 環境温度が異なる場合の膨張量の経時変化

と一定とした場合、各骨材別に反応性珪物量と膨張量との関係を示す。骨材中で反応に関係してくるのは反応性珪物であり、その部分の占める割合をおさえておく必要がある。そのため横軸に偏光顕微鏡で定量した反応性珪物量をとった。これらの図を見ると、安山岩を用いたコンクリートとチャートを用いたコンクリートの両方に、膨張に関しての反応性珪物のベシマム量が存在することが分かる。このベシマム量は、材令が経つにつれて反応性珪物量の少ない方へ移行する傾向が見られるが、このことは図-6の経時変化と比べると分かり易い。材令6か月になるとベシマム量の移動は殆どなくなっている。

材令6か月の曲線に着目すると、安山岩を使用した場合、反応性珪物である火山ガラスのベシマム量は全骨材体積の約25%となる。

チャートを使用した場合、微小石英のベシマム量は全骨材体積の70%となる。

図-8は、非反応性骨材中の細骨材部分、または粗骨材部分をそれぞれ容積で40%安山岩またはチャートで置き換えた場合の膨張量の経時変化を示したものである。この図から明らかなことは、骨材の粒径が膨張量に大きい影響を及ぼすことである。反応面積の大きい細骨材置換の場合に、膨張は急速に増大しており、粗骨材置換の場合の膨張量の約2倍に達している。この傾向は特に安山岩を使用した場合に顕著である。

#### 4.まとめ

本研究を行なった結果、次のことが明らかとなった。

1) コンクリート中の総アルカリ量が反応性骨材を用いたコンクリートの膨張を支配すると考えて良く、現在、内外において採

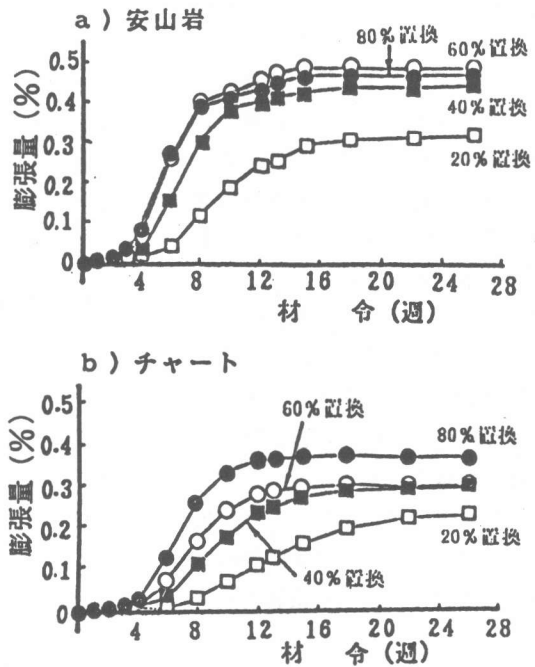


図-6 反応性珪物量が異なる場合の膨張量の経時変化

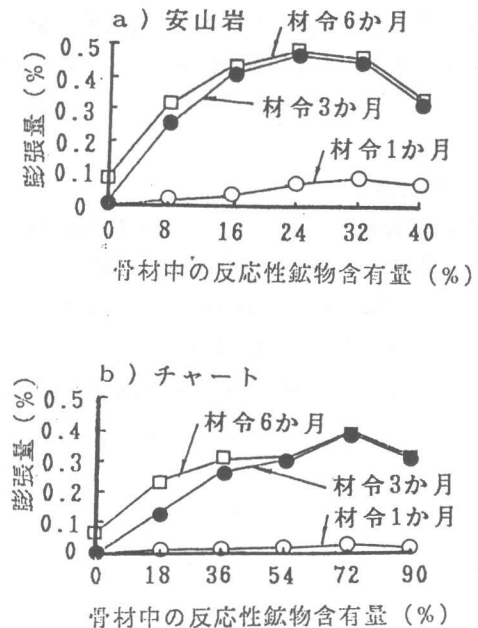


図-7 反応性珪物含有量と膨張量

用されているコンクリート中の総アルカリ量の規制値である $3\text{kg/m}^3$ は妥当な値であると思われる。

2) 環境温度を $20^\circ\text{C}$ とした場合、膨張が増大し始める時期は $40^\circ\text{C}$ の場合よりも遅れるが、長期材令では $40^\circ\text{C}$ の場合よりも大きい膨張を示す可能性がある。

3) 安山岩とチャートを骨材として用いた場合、膨張に関する反応性鉱物のベシムム量が存在する。

4) 反応性骨材の粒度は、膨張に大きい影響を与える。

5) アルカリ量、温度、粒径に依存するコンクリートの膨張性状は、反応性骨材の種類（安山岩とチャート）によって異なる。

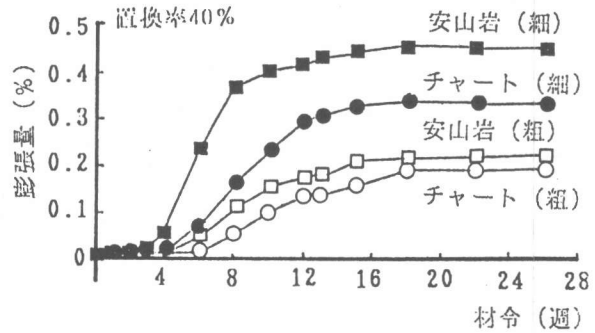


図-8 反応性骨材の粒径が異なる場合の膨張量の経時変化

#### [謝辞]

本研究の実施にあたり、反応性骨材入手に関して丸章夫博士ならびに愛知工業大学の森野教授に便宜を図って頂いた。ここに記して深謝する次第である。さらに実験の遂行にあたっては、関東学院大学の永山信雄君に多大な協力を頂いた。厚く感謝する次第である。

#### [参考文献]

- 1) D.Palmer:Alkali-Aggregate Reaction in Great Britain  
CONCRETE No.3 pp.24~27 1981
- 2) S.Diamond,R S Barneyback,Jr,and L J Struble :ON THE PHYSICS AND CHEMISTRY OF ALKALI-SILICA REACTIONS  
Proc. 5th Int. Conf. on ALKALI-AGGREGATE REACTION 1981