

## 論文

## [1012] アルカリシリカ反応によるコンクリートの膨張挙動とゲルの組成

正会員 小林 一輔（東京大学生産技術研究所）

正会員 ○森 弥広（千葉工業大学工学部）

## 1. ま え が き

近年アルカリシリカ反応によるコンクリートの異常膨張や反応のメカニズムなどについての研究が各方面で行われているが、未解明の点も多い。

そこで本研究は、その一つである反応性物質に関するベシマム現象をとりあげ、反応性骨材を用いたコンクリートについて、このベシマム現象の確認を行うと共に、生成したゲルの組成の分析を試み、アルカリシリカ反応のメカニズムを解明する基礎資料を得ようとしたものである。

## 2. 実 験 方 法

## 2. 1 使用材料およびコンクリートの配合

セメントは、 $\text{Na}_2\text{O}$ 等価アルカリ量（ $\text{R}_2\text{O}$ ）が 0.57%（ $\text{Na}_2\text{O}=0.24\%$ ， $\text{K}_2\text{O}=0.50\%$ ）の普通ポルトランドセメントを使用した。

反応性骨材としては、表-1に示すような安山岩とチャートを用い、粗骨材の最大寸法を15mmとした。また細骨材は一定の粒度となるように、それぞれの粗骨材を粉砕したものを使用した。

これらの骨材を偏光顕微鏡によって調べた結果、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93%であった。

非反応性骨材としては、細粗骨材ともに砂岩を用いた。

表-1 反応性骨材の特徴

岩石名	産 地	地 質 年 代	ASTM C289 (mmol/l)			主な構成鉱物	反応性鉱物
			Rc	Sc	判 定		
ガラス質 両輝石安山岩	山 形 県	第三紀中新生	106	430	潜在的有害	斜長石・ガラス・普通 輝石頑火輝石	火山ガラス (40%)
チャート	岐 阜 県	古生代から中生代	63	303	有 害	石英・微小石英	微小石英 (93%)

アルカリ強化剤としては、 $\text{NaOH}$ と $\text{KOH}$ （試薬特級）をそれぞれ原セメント中に含まれるNaとKの比率で混入し、 $\text{R}_2\text{O}=1.46\%$ となるように調整した。骨材中に占める反応性骨材の割合（置換率）は、20・60・100%とした。

また、コンクリートの水セメント比と単位水量は、すべての配合を通じておのおの40%および226Kg/m<sup>3</sup>とした。

## 2. 2 供試体

供試体は、10x10x40cmの角柱供試体を各配合について4本ずつ作製し、これらのうち3本は長さ変化測定のために両端面に長さ測定用プラグを埋め込み、残りの1本はゲルの分析に供した。

また脱型後、直ちにこれらの供試体は、基長の測定を行ったのち、温度40℃・湿度100%の恒温恒湿試験槽内において促進養生を行った。

### 2. 3 測定

測定はコンパレータによる供試体の長さ・質量・一次共鳴振動周波数について行い、膨張量・重量変化率・動弾性係数を求めた。

### 2. 4 EDXAによるゲルの組成分析

材令30週の供試体から試料を切り出した。組成分析には、日立S-2300型電子顕微鏡およびこれに装備されたKevex社製EDXAを使用した。試料面には炭素蒸着を行い、加速電圧は20kVとした。X線強度は100秒間の積算値を用い、この結果に対してZAF補正(Standardless)を行い、各成分を酸化物として計算した。

## 3. 実験結果

### 3. 1 膨張特性

図-1～2は、骨材の置換率(反応性珪物量)と膨張量の関係を示したものである。図-1に示した安山岩の場合には、材令6週頃までは反応性珪物量と膨張量がほぼ比例関係にあり、置換率100%の場合が最も大きい膨張量を示した。しかし材令8週以降になると、60%の場合が膨張量に関するベシマム量になることがわかる。なお、20%の場合は他の置換率とは異なり、材令30週以降においても膨張が確認された。

一方、図-2に示したチャートの場合には、安山岩の場合に比較してベシマム量の現れる材令および膨張量に多少の差異はあるが、全体としての傾向は安山岩と同様の結果となった。図-3～4は、それぞれ安山岩およびチャートの膨張量、重量変化率および動弾性係数の、材令34週までの経時変化を示したものである。

これらの図よりわかることは、材令20週頃までは膨張量、重量変化および動弾性係数との間には密接な関係があり、重量が増加すると共に膨張量が増大し、同時に動弾性係数は低下している。重量が増加した理由は、コンクリート中に生じたアルカリシリカゲルが多くの水分を取り込んだことによるものと考えられる。また、動弾性係数が低下した理由は、当然のことではあるが膨張によるひび割れの発生とアルカリシリカ反応の進行にともなう非晶質部分の割合の増大によるものと考えられる。

しかし材令20週以降になると置換率60%の場合、動弾性係数が他の置換率と比較して回復する傾向を示し、アルカリシリカゲルの組成に変化のあったことが推測された。

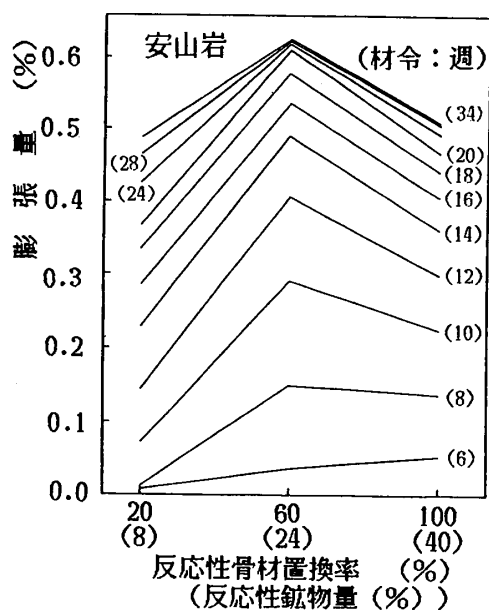


図-1 反応性骨材量と膨張量の関係

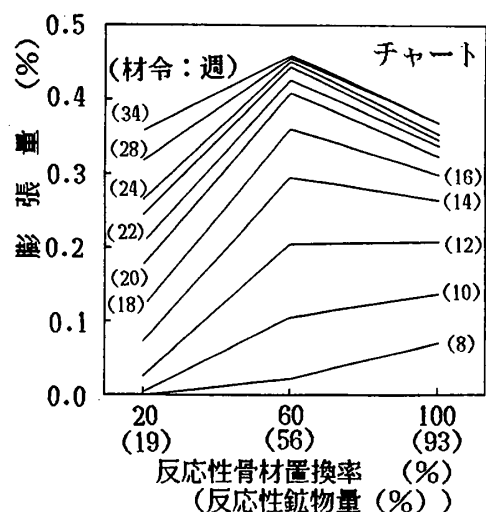


図-2 反応性骨材量と膨張量の関係

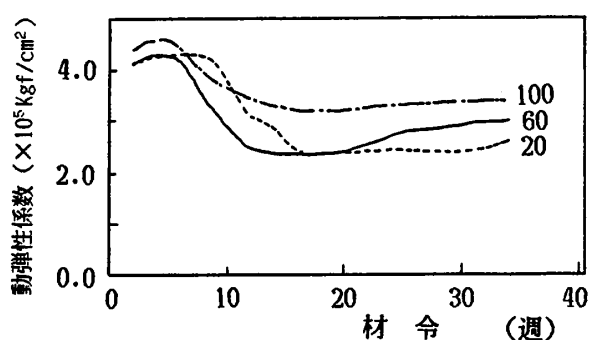
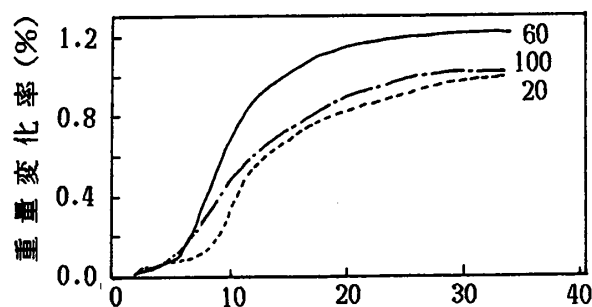
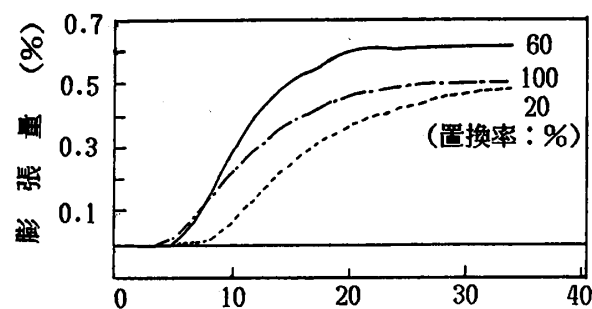


図-3 膨張量・重量変化率・動弾性係数の経時変化（安山岩）

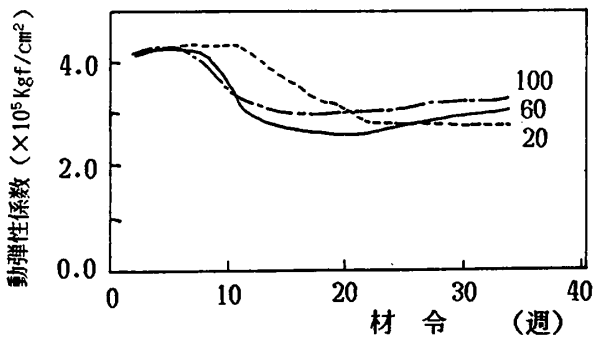
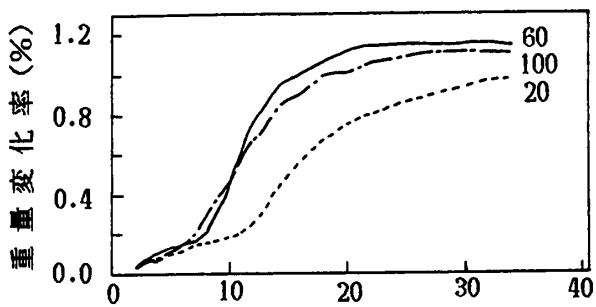
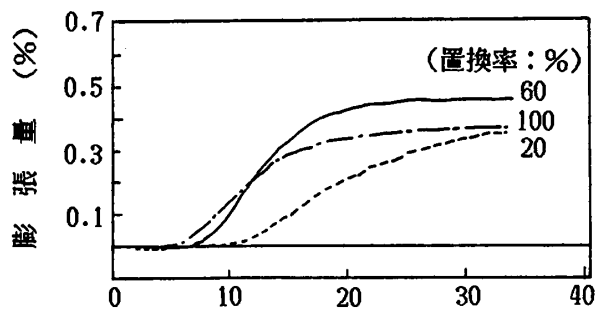


図-4 膨張量・重量変化率・動弾性係数の経時変化（チャート）

### 3. 2 ゲルの組成分析について

図-5～6はそれぞれ、安山岩ならびにチャートを用いたコンクリートの場合における分析結果を、 $\text{SiO}_2 \cdot \text{CaO} \cdot \text{Na}_2\text{O} \cdot \text{K}_2\text{O}$ の4成分表示によって示したものである。これらの図においては、横軸に $\text{SiO}_2$ の含有量、縦軸には $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ および $\text{CaO}$ の含有量を垂直に表す目盛をとっている。この場合、図中にプロットした点をよぎる垂線を考え、この点（上方）から斜線までの長さを $\text{Na}_2\text{O}$ 量、この点（下方）から横軸までの長さを $\text{CaO}$ 量、また図中に示した線部分の長さを $\text{K}_2\text{O}$ 量、として表示した。また、上記の垂線と横軸とが交わる点が $\text{SiO}_2$ 量を示している。なお、線部分の○印は気泡内部のゲルであり、△印は気泡内部であってもゲルの量が微量な場合、×印は供試体内のひび割れ部分に存在したゲルを表している。一方、図-7はゲルの組成に関する既往の研究をとりまとめたものである。

図-5は安山岩の場合を示しているが、ゲルの組成には2つのグループが認められる。その1つは斜辺にそって分布しているグループで、これらはいずれも $\text{Na}_2\text{O}$ と $\text{K}_2\text{O}$ の合計量が10%以下のものである。もう1つのグループは以上の量が10～30%のものである。後者の特徴は、1）これらがいずれも反応性骨材の近くの気泡を充填していたゲルの分析によって得られた値であること、2）置換率がベシマム量である60%の試料の値であること、の2点である。前者のグルー

ブはいずれもひび割れを充填していたか、または気泡の内面に薄い層で付着した物質の分析によって得られた値である。一般に気泡を充填していたゲルは反応をおこした骨材粒の近辺に多く認められ、その組成は本来のゲルの組成に近いと言われている<sup>1)</sup>。これに対して、ひび割れを充填しているゲルはひび割れ中を移動する間にセメント水和物から供給されるCaをイオン交換などによって取り込んだり、炭酸化の影響を受けるので、本来のゲルの組成を反映していないと考えられている。今回の分析においては置換率の異なる3種の試料について、実体顕微鏡、偏光顕微鏡ならびに走査電子顕微鏡によってゲルと思われる物質が存在する場所と骨材粒との関係を調べた。その結果、大体において気泡をほぼ完全に充填しているゲル（写真-1）は骨材粒の近辺に認められ、しかもこのようなゲルはベシマム量である置換率が60%の場合に多く、他の置換率の試料においてはひび割れ中を埋めているゲル状の物質（写真-2）は認められたものの、気泡を充填しているゲルは殆ど認められなかった。即ち、膨張性が高いと言われている高アルカリ型のゲルがベシマム量の試料から得られたが、他の置換率の場合にはひび割れ中の高カルシウム型のゲルしか見いだすことができなかったということである。問題は同一試料でもその採取場所によってゲルの組成が異なるので、このことから他の置換率の試料に存在するゲルは高アルカリ型であると即断することはできない。

図-6のチャートの場合には上記の安山岩の場合における、後者のグループ、すなわち  $\text{Na}_2\text{O}$  と  $\text{K}_2\text{O}$  の合計量が10~30%の組成のものが多いことが特徴であり、しかもこれらはいずれも気泡を充填するゲルによる分析結果である。このことは、チャートの場合には反応性岩石の置換率のいかんを問わず、気泡を埋めていたゲルが多かったことを意味する。また置換率が100%の場合の組成は  $\text{K}_2\text{O}$  の量が多いこともチャートの場合の特徴である。これらの結果はチャートを用いた場合の反応機構が安山岩のそれとは異なることを示唆している。

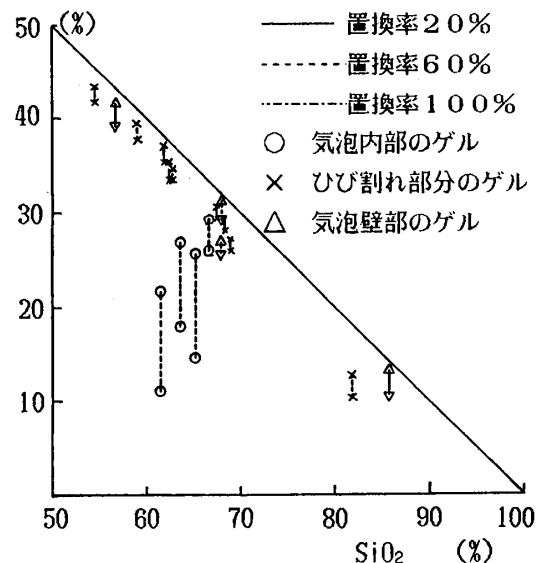


図-5 ゲルの組成4成分表示（安山岩）

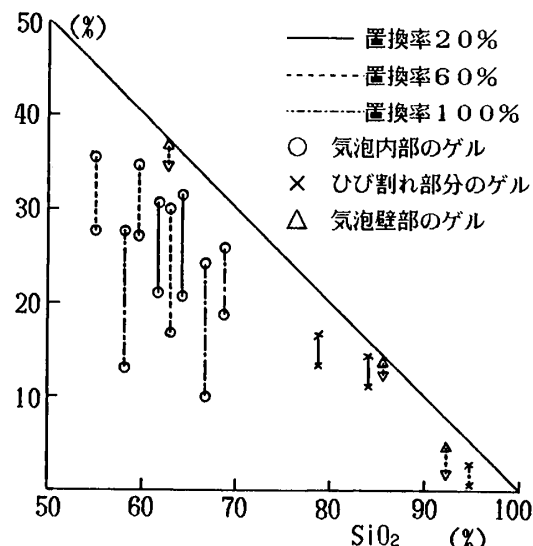


図-6 ゲルの組成4成分表示（チャート）

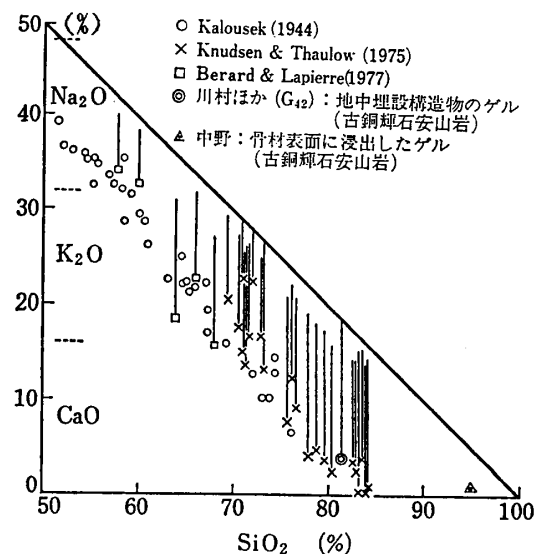


図-7 ゲルの組成4成分表示（既往の研究）

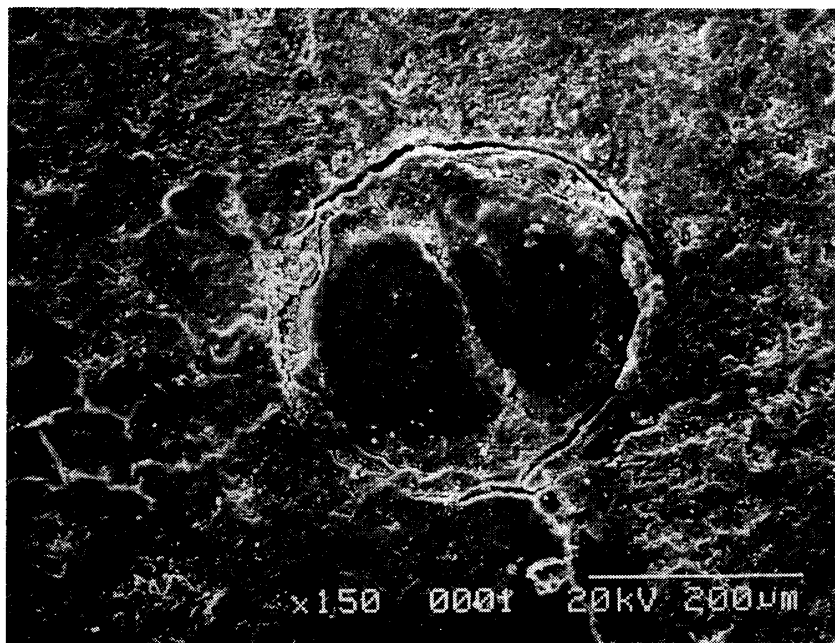


写真-1 気泡を埋めるゲルのSEM像（骨材：安山岩）

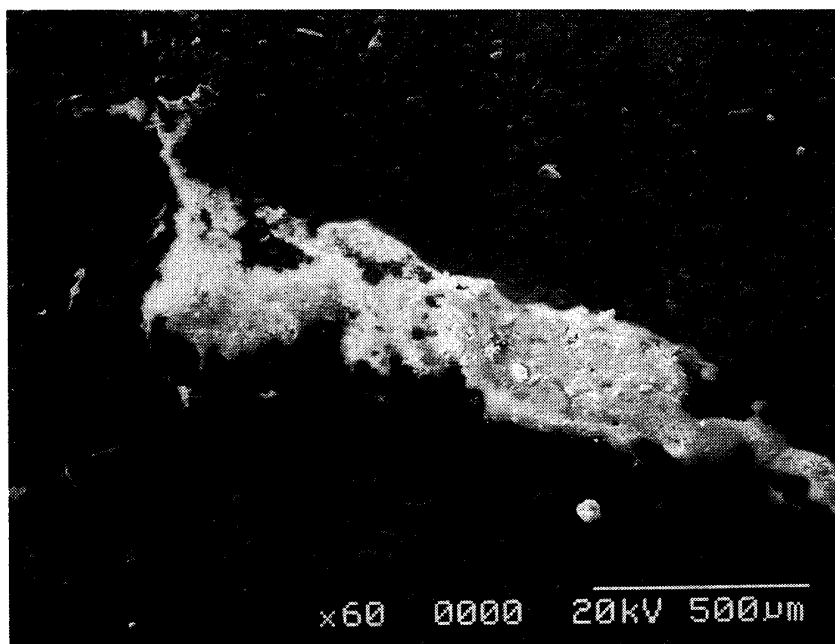


写真-2 ひび割れ部分のゲルのSEM像（骨材：安山岩）

以上の結果を中野<sup>2)</sup>によって集約された既往の研究結果である図-7と対比すると、図-5および図-6の結果はいずれも図-7に包含されており、今回の分析はペシマム量、反応性骨材の種類およびゲルの採取場所と関連させてゲルの組成をやや詳細に検討したことになる。

一方、図-8<sup>3)</sup>は図-5および図-6の結果を  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  と  $\text{CaO}/\text{全アルカリ}$  との関係でプロットしたものである。この様にまとめるとゲルの組成は2つのグループ、すなわち比較的高アルカリ・高シリカ型の気泡中のゲルのグループ（白抜き）と比較的高カルシウム型のひび割れ中のグループ（黒印）に分離して示されることがわかる。

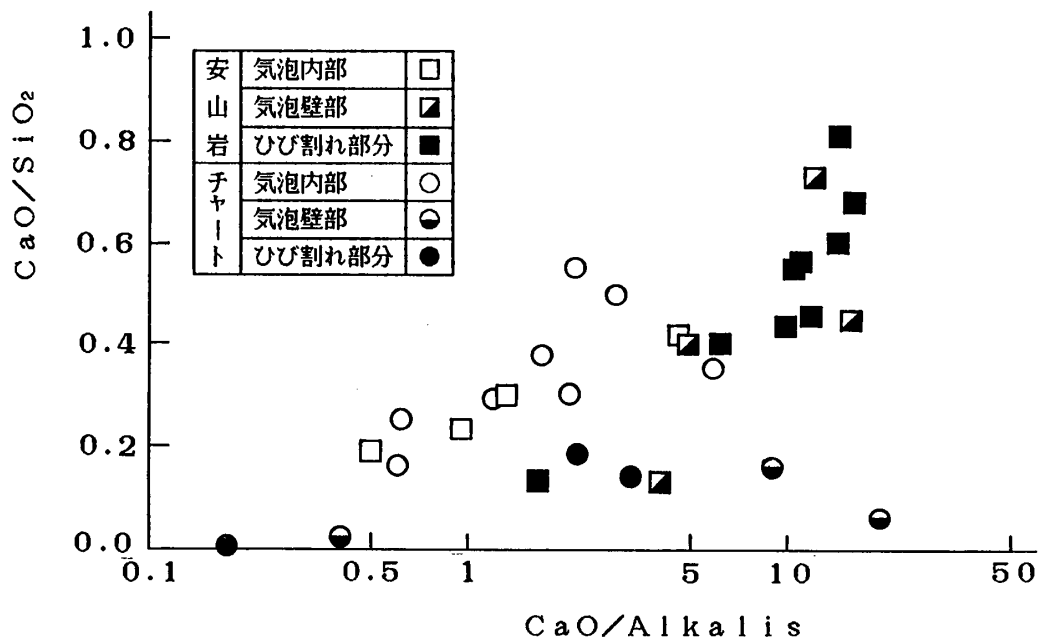


図-8  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$ と $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ の関係

#### 4. ま と め

反応性骨材としてガラス質安山岩とチャートを用いたコンクリートについて膨張に関するベシマム現象を確認すると共に、このような現象を生ずる機構を解明する目的で、アルカリシリカゲルの組成分析を試みた。この結果、ASRによって生じたゲルの組成は、1) 同一の試料でも反応性骨材粒子からの距離とそれが貯留している状態（すなわち、気泡内の充填か、ひび割れ中を埋めているか）、2) 反応性骨材の種類、3) 反応性骨材の置換率などによって相違することを明らかにした。また、ベシマム量との関係については安山岩の場合に、ベシマム量の反応性岩石を含む試料に生成しているゲルが高アルカリ型であることを確かめた。

#### 参考文献

- 1) T. Knudsen and N. Thaulow: QUANTITATIVE MICROANALYSES OF ALKALI-SILICA GEL IN CONCRETE, Cement and Concrete Research, Vol. 5, pp. 443-454, 1975.
- 2) 中野錦一: アルカリ骨材反応の種類、メカニズムおよび特徴, コンクリート工学, Vol. 24, No. 11, 1986.
- 3) S. Urhan: ALKALI SILICA AND POZZOLANIC REACTIONS IN CONCRETE, Vol. 17, pp. 141-152, 1987.