

# 論文 オートクレープ養生を行ったコンクリートのアルカリ骨材反応膨張特性

黒田 保\*<sup>1</sup>・西林新蔵\*<sup>2</sup>・井上正一\*<sup>3</sup>・吉野 公\*<sup>4</sup>

要旨：コンクリートのアルカリ骨材反応を促進する方法の一つであるオートクレープに着目し、その処理圧力、処理時間およびアルカリ量がコンクリートのアルカリ骨材反応膨張特性に及ぼす影響に関して検討を行った。その結果、処理圧力、処理時間およびアルカリ量に関して膨張率を最大とする値が存在するようであり、また、オートクレープでコンクリートのアルカリ骨材反応を促進する場合、ある程度以上のアルカリ量が必要であることがわかった。本実験においては、アルカリ量3.0%で、オートクレープ処理圧力0.2MPa、処理時間4時間直後の膨張率は、40°C, R. H. 100%で促進したコンクリートにおける材齢6カ月の膨張率とほぼ同程度であることが確認された。

キーワード：アルカリ骨材反応、オートクレープ、ペシマム値、残存膨張率

## 1. はじめに

アルカリ骨材反応は、長年月にわたって進行しコンクリートの構造部材に損傷を与え、コンクリート構造物の耐久性や耐荷力に重大な影響を及ぼす要因の一つである。

従来より、アルカリ骨材反応性を判定する試験法には、化学法、モルタルバー法、コンクリート法など幾つかのものが制定、提案されているが、その中でもコンクリート法は、実際に用いられる配合のコンクリートの試験が行えるので、コンクリートのアルカリ骨材反応性をより正確に評価できるものと考えられる。しかしながら、コンクリート法は、アルカリ骨材反応を促進させる試験法ではあるが、それでも判定までに半年を必要とする。

そこで本研究では、コンクリートのアルカリ骨材反応性を早期に判定する試験方法を確立することを目的に、高圧高温条件下でコンクリートを保存するオートクレープを適用することを考えた。まず、オートクレープで養生を行ったコンクリートのアルカリ骨材反応による膨張特性を把握するために、その圧力やオートクレープ処理時間がコンクリートのアルカリ骨材反応に及ぼす影響について検討を行い、さらに、オートクレープ処理後に40°C, R. H. 100%の条件下でコンクリートを保存し、その残存膨張率に関する検討を加えた。

## 2. 実験概要

本実験で使用した材料および実験条件を表-1に、反応性骨材の化学法の結果を表-2に示す。

本実験で使用したセメントはアルカリ含有量がNa<sub>2</sub>O等量で0.33%の普通ポルトランドセメントで、骨材としては、粗骨材に非反応性のものを、細骨材には、実際のコンクリート構造物に使用されて損傷の生じたことが認められ、また、JCI化学法およびモルタルバー法で反応性が確認さ

- 
- \*1 鳥取大学助手 工学部土木工学科、工修（正会員）
  - \*2 鳥取大学教授 工学部土木工学科、工博（正会員）
  - \*3 鳥取大学助教授 工学部土木工学科、工博（正会員）
  - \*4 鳥取大学助手 工学部土木工学科、工博（正会員）

れている斜方輝石安山岩および比較のために非反応性のものを使用した。

コンクリートの示方配合は、表-3に示すとおりであり、アルカリ量はセメント重量に対して $\text{Na}_2\text{O}$ 等量でそれぞれ1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 4.0%となるように、試薬1級の $\text{NaOH}$ を用いて調整を行った。また、コンクリートの練混ぜは可傾式ミキサーを用い、セメント、細骨材および粗骨材を投入して1分間空練りを行った後、所定量の $\text{NaOH}$ を溶解させた混合水を入れてさらに3分間練り混ぜた。

オートクレーブの処理圧力は、0.10～0.30MPaの5水準、処理時間は1～8時間の5水準とし、それぞれオートクレーブ処理直後の長さ変化を測定した。また、残存膨張量の測定は、オートクレーブ処理を施した後40℃, R. H. 100%の養生槽で保存し、それぞれ材齢3カ月まで0.5カ月毎に、材齢3カ月以降は6カ月まで1カ月毎に測定を行った。また比較のためにそれぞれのアルカリ

量の供試体において、脱型直後オートクレーブ処理を施さないでそのまま40℃, R. H. 100%の養生槽に保存しその膨張率の経時変化を測定した。長さ変化の測定は、コンクリートを養生槽から出した後恒温室に搬入し、供試体温度が20℃になってから行った。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 オートクレーブ処理直後の膨張特性

##### 3.1.1 アルカリ量および処理時間の影響

まず、オートクレーブの処理圧力を0.2MPaと一定にし、アルカリ量およびオートクレーブの処理時間を要因にとり、それらがコンクリートのアルカリ骨材反応による膨張特性にどのような影響を及ぼすのか検討を行った。

図-1は処理圧力0.2MPaにおける膨張率とアルカリ量の関係を処理時間別に示したものである。

表-1 使用材料および実験条件

セメント	普通ポルトランドセメント( $\text{Na}_2\text{O}$ eq. 0.33%)				
粗骨材	非反応性(鳥取県産) (比重:2.70, 吸水率:0.65%, F.M.:6.64)				
細骨材	反応性:斜方輝石安山岩(鳥取県産) (比重:2.64, 吸水率:1.48%, F.M.:2.61)				
	非反応性(鳥取県産) (比重:2.66, 吸水率:1.15%, F.M.:2.81)				
添加アルカリ	$\text{NaOH}$				
全アルカリ量( $\text{Na}_2\text{O}$ eq. %)	1.0,	1.5,	2.0,	2.5,	3.0, 4.0
供試体寸法(cm)	7.5×7.5×40				
オートクレーブ	処理圧力(MPa)	0.10,	0.15,	0.20,	0.25, 0.30
	処理時間(Hour)	1,	2,	4,	6, 8

表-2 反応性細骨材の物理的性質と化学法の結果

岩石の種類	比重	吸水率	F.M.	化学法による結果		$S_c/R_c$
				$R_c$	$S_c$	
斜方輝石安山岩	2.64	1.48	2.61	67.5	301	4.46

表-3 コンクリートの示方配合

粗骨材の最大寸法(mm)	スラブ(cm)	空気量(%)	W/C(%)	s/a(%)	単 位 量 (Kg/m <sup>3</sup> )			
					W	C	S	G
20	Free	Free	54	43	190	350	771 (777)	1045

( )内の数値は非反応性細骨材の単位量

図より、アルカリ量2.5%以下において、処理時間1～6時間の範囲では、処理時間が長いものほど膨張率が大きくなる傾向にあるが、アルカリ量が2.5%を越えると処理時間6および8時間のものの膨張率の増加割合は緩慢となり、アルカリ量3.0%においては処理時間4時間の膨張率が最も大きな値を示している。また、全ての処理時間において、アルカリ量1.5%まではほとんど膨張していないが、アルカリ量が1.5%を越えると急激に膨張率が增大しており、処理時間が長いものほどその傾向が顕著に現れている。しかしながら、処理時間1～4時間においては、アルカリ量3.0%で最も大きな膨張率となり、それ以上のアルカリ量では逆に膨張率が低下する傾向が見られる。つまり、アルカリ量3.0%が処理圧力0.2MPaにおけるペシマム値であると考えられる。

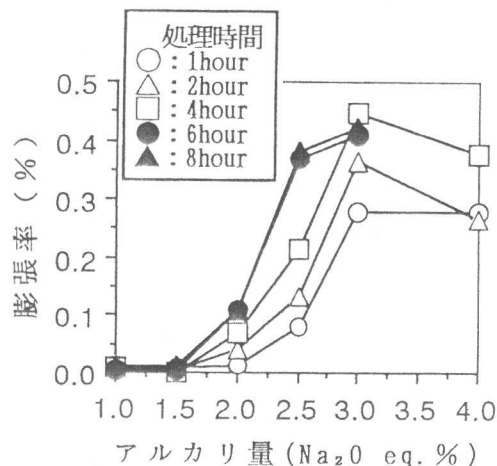


図-1 オートクレーブ処理直後の膨張率とアルカリ量の関係 (処理圧力0.2MPa)

アルカリ骨材反応による膨張量は、反応によって生成されるゲルの量およびゲルの粘性あるいは剛性に支配される。生成するゲルの量は反応性骨材の表面積の増加およびアルカリ量の増加とともに増大し、また、ゲルの粘性あるいは剛性は生成するゲルの化学組成によって変化する。一定の反応性骨材量に対してアルカリ量が多くなるほどゲルの生成量は多くなり、それにともない膨張率も大きくなる。しかし、多量のアルカリが存在すると、反応は急速に生じるが生成するゲルの SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O比が小さくなり早期にゲルの軟化が生じて膨張圧力が緩和される [1]。従って、骨材量が同じであれば、アルカリ量がある値まではその増加にともない膨張率が增大するが、アルカリ量がその値を上回るとゲルの軟化によって膨張圧力が緩和され膨張率が小さくなり、図-1に示すようなアルカリ量に関するペシマム値が現れたものと考えられる。

また、処理時間6および8時間においても、アルカリ量2.5%を越えると、膨張率の増加割合が緩慢となり、アルカリ量3.0%付近で膨張率が最大となるペシマム値が存在するものと考えられる。以上のことより、オートクレーブの処理圧力を0.2MPaと一定とした場合には、処理時間4時間、アルカリ量3.0%でコンクリートの膨張率は最大となることが認められた。

### 3. 1. 2 処理圧力の影響

次に、0.2MPaの圧力でオートクレーブ処理を施した場合に膨張率が最大となった、アルカリ量3.0%、処理時間4時間という条件において、その時の処理圧力が、コンクリートのアルカリ骨材反応に及ぼす影響に関して検討を行う。

図-2はアルカリ量3.0%、処理時間4時間という条件下において細骨材に反応性のものを使用したコンクリート、および骨材に全て非反応性のものを使用したコンクリートにおける膨張率と処理圧力の関係を示したものである。この図

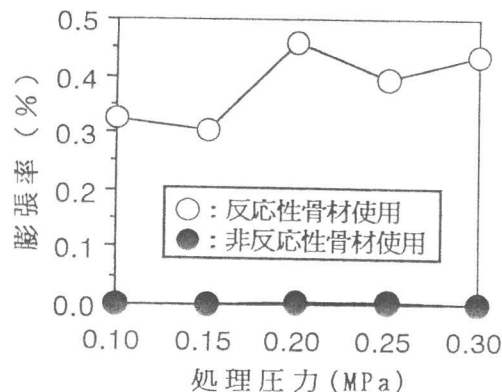


図-2 オートクレーブ処理直後の膨張率と処理圧力の関係 (アルカリ量3.0%、処理時間4時間)

より、処理圧力が0.2MPaの時に、膨張率が最大値を示す傾向が認められた。Tang Ming-Syuらは、非反応の珪砂であっても150℃を越えると膨張を示すと報告している [2]。つまり、処理圧力を大きくし過ぎると、非反応性の骨材においても膨張を示す可能性がある。そこで、骨材として全て非反応性のものを使用したコンクリートにおいて、アルカリ量を3.0%、処理時間を4時間とした場合の、コンクリート供試体の膨張率と処理圧力の関係を図-2に示す。図より、処理圧力0.1～0.3MPaでオートクレーブ養生を行ったコンクリート供試体においては、どの処理圧力においても膨張を示していない。したがって、図-2に示す反応性骨材を用いたコンクリートの膨張は、アルカリ骨材反応によって生成した化合物に起因する膨張であると考えられる。

### 3. 2 残存膨張率

#### 3. 2. 1 コントロール供試体の膨張特性

図-3は、比較のためにオートクレーブ処理を施さないで、40℃, R.H. 100%の促進環境下で保存した供試体（以下、コントロール供試体という）における膨張率の経時変化をアルカリ量別に示したものである。図より、アルカリ量を1.0%とした供試体においては、材齢1カ月から膨張を開始し、その後緩やかに膨張率が增大し材齢6カ月で約0.15%の膨張率となっている。

また、アルカリ量を1.5%および2.0%とした

供試体に関しては、材齢1.5カ月まで急激に膨張率が增大し、その後6カ月まで緩やかに膨張率が増加している。そして、アルカリ量を2.5%および3.0%とした供試体の膨張率に関しては、材齢0.5カ月まではアルカリ量を1.5%および2.0%とした供試体のものよりもさらに急激に膨張しており、その後材齢6カ月まで緩やかに膨張率が增大する。材齢6カ月ではアルカリ量を2.0%とした供試体の膨張率が最大となる。これは、3. 1. 1でも述べたようにアルカリ量が多量に存在する場合には、 $SiO_2/Na_2O$ 比が大きくなってゲルの軟化が生じ、膨張圧力が緩和されたためにアルカリ量2.0%で膨張率が最大となったものと考えられる。

また、アルカリ量を3.0%としたときの材齢6カ月における膨張率に着目すると、図-1および3より、処理時間4時間でコントロール供試体の材齢6カ月における膨張率が得られることがわかる。

#### 3. 2. 2 オートクレーブ処理を施したコンクリートの残存膨張率

図-4～6に、処理圧力を0.2MPaとしたときのアルカリ量1.5, 2.5, 3.0%における膨張率の経時変化をコントロール供試体およびオートクレーブ処理時間ごとに示す。

アルカリ量を1.5%とした供試体においては、全ての処理時間においてオートクレーブ養生を行った供試体の膨張率はコントロール供試体の膨張率よりも小さくなっている。特に、処理時間が長いものほど膨張率が小さくなる傾向にある。また、アルカリ量を2.5%とした供試体においては、処理時間が長いものほど、オートクレーブ処理直後の膨張率の増加割合は小さくなる。また、アルカリ量を1.5%とした供試体ではオートクレーブ養生を行ったものの残存膨張率は、コントロール供試体の膨張率より小さくなっているが、アルカリ量2.5%では処理時間が比較的短い1および2時間のものを除き、それよりも処理時間が長い供試体においては、コントロール供試体の

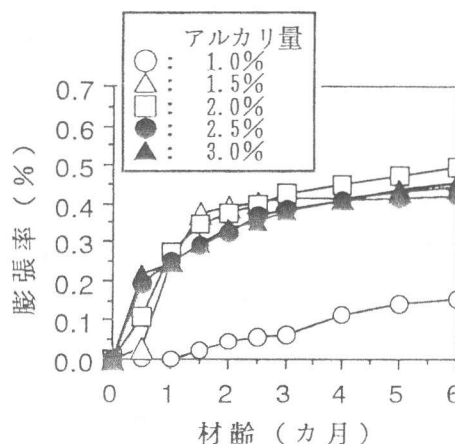


図-3 膨張率の経時変化  
(コントロール供試体)

膨張率よりも大きくなっている。この傾向はアルカリ量 3.0%になるとさらに顕著に現れ、オートクレーブ処理を施した供試体全てにおいて、その膨張率はコントロール供試体の値よりも大きくなっている。つまり、反応性骨材量に対してアルカリ量が少ない場合にオートクレーブ養生を行うと、オートクレーブ養生を行わないものに比べ最終膨張率は小さくなるが、十分なアルカリが供給されると、オートクレーブ養生を行わないものよりかなり大きな膨張を示す。

西林らによると、モルタル供試体におけるゲルの分析結果より、オートクレーブ養生を行った供試体中のゲルはオートクレーブ養生を行わないものよりカルシウムの比率が大きく、高カルシウム型のゲルが多く形成されると報告している [3]。

これは、オートクレーブ処理を施すことにより、コンクリートは高温環境下におかれ、アルカリ骨材反応が活発となり早期に多量のアルカリが消費される。そしてまた、同時に水和反応も促進されるためカルシウムイオンの溶出量が増加する。そのためアルカリ骨材反応によって生成されたアルカリシリケートゲルが早期からカルシウムイオンを取り込み、膨張性の小さい高カルシウム型のゲルが増加し、オートクレーブ処理後の膨張率の増加割合が小さくなったものと考えられる。しかしながら、アルカリ量が高いものに関しては、コントロール供試体の膨張率をかなり上回っている。これは、アルカリ量が高いものほどアルカリ骨材反応が急速に起こり、早期にゲルの量が増加するためオートクレーブ処理直後の膨張率が大きく現れたためで、同じアルカリ量の供試体を見ると、処理時間が長いものほど、つまりオートクレーブ養生中にアルカリがより多く消費され、カルシウムイオンの溶出が多いと考えられるものほどオートクレーブ処理後の膨張率の増加割合は小さくなる。

従って、オートクレーブ養生によってアルカリ骨材反応を促進させる場合、ある程度コンクリート中のアルカリ量を高くしなければオートクレーブ処理直後に膨張を示さないばかりでなく、その後の膨張率がオートクレーブ処理を施さないものよりも小さくなる。

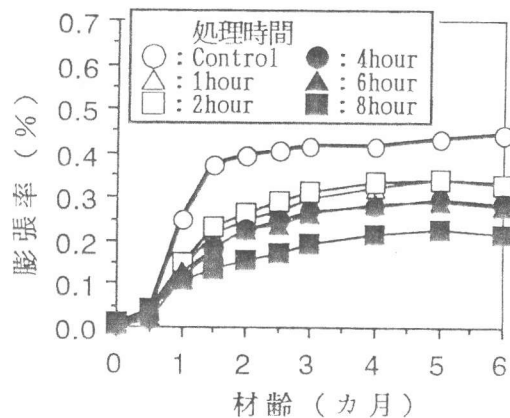


図-4 膨張率の経時変化  
(アルカリ量1.5%、処理圧力0.2MPa)

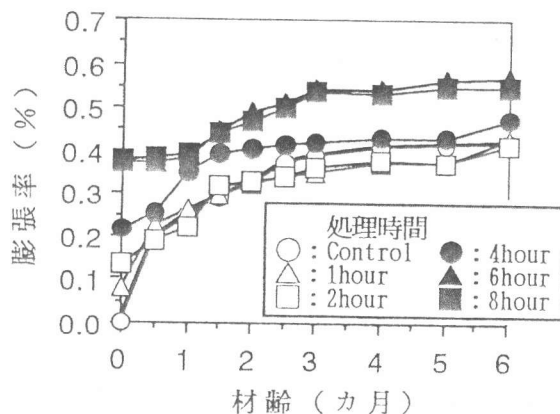


図-5 膨張率の経時変化  
(アルカリ量2.5%、処理圧力0.2MPa)

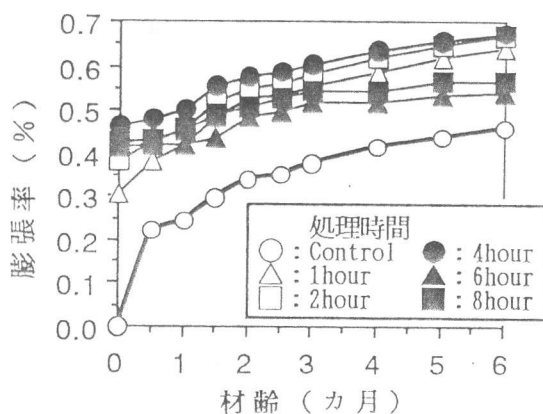


図-6 膨張率の経時変化  
(アルカリ量3.0%、処理圧力0.2MPa)

### 3. 2. 3 残存膨張率に及ぼす処理圧力の影響

図-7にアルカリ量3.0%、処理時間4時間における膨張率の経時変化を各処理圧力別に表示す。オートクレーブ処理直後においては前述したように、処理圧力0.2MPaで最大の膨張率を示しており、その後材齢6カ月までコントロール供試体およびオートクレーブ処理を施した他の供試体の膨張率よりも大きな値を示す。また、膨張率の増加傾向は、処理圧力0.1MPaに関しては、材齢6カ月において最も大きい0.2MPaの膨張率に近づき、材齢6カ月以降においては、0.2MPaの膨張率を上回る可能性もある。他の処理圧力の膨張率の増加割合に関してはほぼ同程度である。

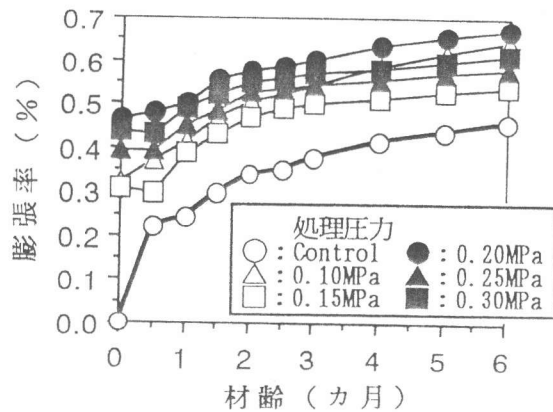


図-7 膨張率の経時変化  
(アルカリ量3.0%、処理時間4時間)

### 4. まとめ

本研究では、コンクリートのアルカリ骨材反応促進試験として、オートクレーブ養生に着目し、高温高圧力下でのコンクリートのアルカリ骨材反応膨張特性、およびその後の残存膨張特性に関して検討を行った。

本実験で得られた結果をまとめて以下に示す。

(1) オートクレーブ養生を行ってアルカリ骨材反応を促進させる場合、コンクリートの膨張率を最大とするアルカリ量、処理圧力および処理時間が存在する。すなわち、アルカリ量、処理圧力および処理時間にベシマム値が存在することが確認された。

(2) アルカリ量の少ないコンクリートに関して、オートクレーブ養生を行うと、オートクレーブ処理直後の膨張率は小さく、また、その後の残存膨張率は、オートクレーブ養生を行わないものよりも小さくなる。したがって、オートクレーブ養生をアルカリ骨材反応に適用する場合、アルカリ量がある程度大きくなければならない(本実験では2.5%以上)。

(3) 本実験では、オートクレーブ処理圧力0.2MPa、処理時間4時間、アルカリ量3.0%で、40°C、R. H. 100%の促進試験の材齢6カ月の膨張率とほぼ同程度の値が得られた。

### 参考文献

- 1) 岸谷孝一ほか：コンクリート構造物の耐久性シリーズ アルカリ骨材反応、技報堂出版、pp56-68、1986
- 2) Tang Ming-shu and et all.: A Rapid Method for Identification of Alkali Reactivity of Aggregate, Cement and Concrete Research, Vol. 13, pp. 417-422, 1983
- 3) 西林新蔵ほか：簡易オートクレーブによるアルカリ骨材反応の促進試験法に関する研究、コンクリート工学、Vol. 26、No. 5、pp. 73-83、1988. 5