

論文 反応性骨材の粒径、粒度および混入量がモルタルの ASR 膨張に与える影響

黒田 保^{*1}, 西林新蔵^{*2}, 井上正一^{*3}, 吉野 公^{*4}

要旨 : ASR を促進する方法として NaOH 溶液に浸漬したモルタルを、オートクレーブ装置内で煮沸処理する方法を適用し、この方法によって生じるモルタルの ASR 膨張に与える反応性骨材の粒径、粒度、混入量の影響について検討を行った。その結果、反応性骨材の粒径および粒度にかかわらず、ASR 膨張と反応性骨材の総表面積との間には相関関係があることが確認された。また、S/C が異なるモルタルバーに対してその ASR 膨張と反応性骨材混合割合との関係を検討した結果、モルタル中の Na_2O 量と反応性骨材体積の比と ASR 膨張との関係は、S/C の値にかかわらずほぼ同じ傾向を示すことが確認された。

キーワード : ASR, オートクレーブ, 反応性骨材表面積, 反応性骨材体積, NaOH 溶液

1. はじめに

アルカリシリカ反応 (ASR) はコンクリート構造物にひび割れを生じさせ、その耐久性を低下させる。したがって、コンクリートに使用する骨材がアルカリ反応性のものであるか否かを短期間のうちに正確に判断することは極めて重要なことである。しかしながら、ASR は極めてゆっくり進行するため、骨材がコンクリートに有害な膨張を生じさせるか否かを短期間で評価するためには、適切な方法により ASR を促進させる必要がある。

一方、ASR はコンクリートの製造に使用する材料やその配合、さらには環境条件等によって影響を受ける。したがって、ASR に影響を与えると考えられる諸要因に関して、それが ASR にどのような影響を与えるのかを把握しておくことが重要である。

そこで、本研究では、反応性骨材を含有するモルタルバーを NaOH 溶液に浸漬し、それをオートクレーブ装置内で煮沸処理する促進方法を用いて、その方法によって生じるモルタルバーの ASR 膨張に与える反応性骨材の粒径、粒

度および混入量の影響について検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料

本実験に使用したセメントはアルカリシリカ反応性試験用普通ポルトランドセメント (全アルカリ量 : $0.69\% \text{ Na}_2\text{O eq.}$, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}=1.9$) である。細骨材には、JIS A 5308 附属書 7 の化学法および同附属書 8 のモルタルバー法で無害ではないと判定されているアルカリ反応性の斜方輝石安山岩 (密度 : 2.59 g/cm^3 , 吸水率 : 1.93% , アルカリ消費量 (R_c) : 101 m mol/l , 溶解シリカ量 (S_c) : 558 m mol/l) と、無害と判定されている砂岩 (密度 : 2.70 g/cm^3 , 吸水率 : 0.65%) を使用した。モルタルバーを浸漬する水酸化ナトリウム (NaOH) 溶液の作製には試薬一級の NaOH を使用した。

2.1 実験方法

本実験では、図-1 に示す手順でモルタルのアルカリシリカ反応 (ASR) を促進し、促進後のモルタルバーの長さ変化を測定した。すなわち、モルタルバーを脱型してその初期長さを測

*1 鳥取大学助手 工学部土木工学科 工修 (正会員)

*2 大阪産業大学教授 工学部土木工学科 工博 (正会員)

*3 鳥取大学教授 工学部土木工学科 工博 (正会員)

*4 鳥取大学助教授 工学部土木工学科 工博 (正会員)

定した後に、モルタルバーの中に NaOH 溶液を浸透しやすくするために、60℃の乾燥炉で 24 時間乾燥する。乾燥後、ステンレス容器の中に入った所定の濃度の NaOH 溶液中にモルタルバーを浸漬し、それを NaOH 溶液に浸漬したまま処理圧力 0.1MPa、処理時間 72 時間に設定したオートクレーブ装置内で煮沸処理を行う。煮沸処理終了後、モルタルバーを NaOH 溶液に浸漬したまま 20℃の恒温室に 24 時間静置した後に、供試体の長さ変化の測定を行い膨張率を算定した。

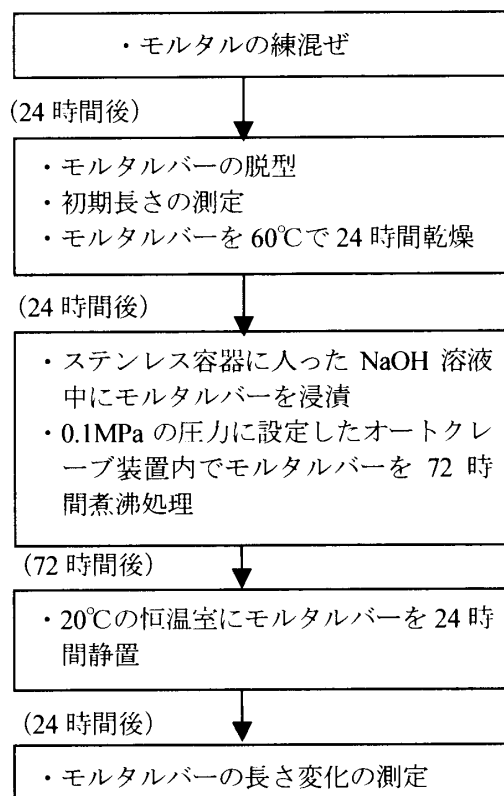
2.3 実験条件

2.3.1 反応性骨材の粒径、粒度が ASR 膨張に与える影響に関する実験

反応性骨材の粒径、粒度がモルタルバーの ASR 膨張に与える影響に関する実験では、モルタルバーの水セメント比 (W/C) を 0.5、砂セメント比 (S/C) を 2.25 と一定とした。使用する細骨材は、呼び寸法 5, 2.5, 1.2, 0.6, 0.3, 0.15 mm の各ふるいでふるい分け、2.5～0.15 mm の各ふるいに残留したものを単一粒径の骨材として使用した。また、2.5～1.2 mm および 0.3～0.15 mm の 2 種類の粒径の骨材をそれぞれ質量比で 0.85 : 0.15, 0.55 : 0.45 および 0.30 : 0.70 の割合で混合したもの、および 2.5～0.15mm の 5 種類のふるいに残留したものを表一に示す割合で混合したものを混合粒径の骨材として使用した。モルタルバーを浸漬する NaOH 溶液の濃度は、0.5 mol/l, 1.0 mol/l, 2.0 mol/l の 3 水準に設定した。供試体の寸法は 40×40×160 mm である。

2.3.2 反応性骨材の混入量が ASR 膨張に与える影響に関する実験

反応性骨材の混入量が ASR 膨張に与える影響に関する実験では、2.5 mm, 1.2 mm, 0.6 mm, 0.3 mm および 0.15 mm の各ふるいに残留した骨材をそれぞれ質量比で 10%, 25%, 25%, 25% および 15% で混合して、細骨材の粒度を一定とした。モルタルの W/C は 0.5 と一定とし、S/C は 0.5, 0.8, 1.5 および 2.25 の 4 水準に設定した。また、それぞれの S/C のモルタルに対して、



図一 促進試験の手順

表一 各粒径の骨材の混合割合

a : b : c : d : e	F.M.
0.05 : 0.35 : 0.45 : 0.10 : 0.05	3.25
0.15 : 0.25 : 0.25 : 0.25 : 0.10	3.10
0.05 : 0.05 : 0.55 : 0.20 : 0.15	2.65
0.05 : 0.05 : 0.45 : 0.15 : 0.30	2.40

粒径 a : 5～2.5 mm, b : 2.5～1.2 mm
c : 1.2～0.6 mm, d : 0.6～0.3 mm
e : 0.3～0.15 mm

反応性骨材と非反応性骨材を混合して反応性骨材の混合割合を質量比で 25%, 50%, 75% および 100% の 4 水準に設定した。モルタルバーを浸漬する NaOH 溶液の濃度は、0.5 mol/l, 1.0 mol/l, 2.0 mol/l の 3 水準に設定した。モルタルバーの寸法は 40×40×160 mm である。

2.4 骨材の粒径および表面積の算定

各ふるいに残留した骨材の長さ (L), 幅 (B), 厚さ (T) を測定し、Heywood¹⁾が提案した式 (1) を用いて骨材の粒径を求めた。

$$\frac{d}{D} = 0.98 \left(\frac{2nm^2}{m^2 + 1} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

$$m=B/T, n=L/B$$

ここに、 d ：投影面積円相当径、 D ：ふるい目の開き、である。

式(1)の d は粒子の投影面積と同じ面積を持つ円の直径で、粒子表面積と対応性がある。粒子が凸面体であり、粒子の配列がランダムであれば、粒子の形状とは無関係に、粒子の表面積(s)は粒子の投影面積(A)の4倍である($s=4A$)²⁾。すなわち、 d を直径とする球の表面積に相当する。そこで、ここでは、骨材の粒径を代表する値として式(1)の投影面積円相当径(d)を用いて、モルタルバー1本に含有する骨材粒子の総表面積(S)を算定した。すなわち、骨材1個の表面積を s 、体積を v とすると、 $s=\pi d^2$ 、 $v=\pi d^3/6$ である。モルタルバー1本に含有する骨材の質量を M 、骨材の密度を ρ とすると、モルタルバー1本に含有する骨材粒子の個数(n)は、 $n=M/(\rho v)$ となる。したがって、モルタル1本に含有する骨材粒子の総表面積(S)は、 $S=sM/(\rho v)$ であることより、式(2)からモルタルバー1本に含有する骨材粒子の総表面積(S)を算定した。

$$S = \frac{6M}{\rho d} \quad (2)$$

3. 実験結果と考察

3.1 モルタルバーの ASR 膨張に与える反応性骨材粒径および粒度の影響

図-2 に、単一粒径の反応性骨材を使用したモルタルバー（以下、供試体と称す）を 0.5, 1.0, 2.0 mol/l の各濃度の NaOH 溶液に浸漬してオートクレーブ装置内で煮沸処理を行った供試体の膨張率と反応性骨材粒径との関係を示す。図より、NaOH 溶液の濃度にかかわらず、使用した反応性骨材の粒径が小さいものほど供試体の膨張率は大きくなることがわかる。また、図-3 は NaOH 溶液中で煮沸処理した後の供試体の膨張率と NaOH 溶液濃度との関係を示したも

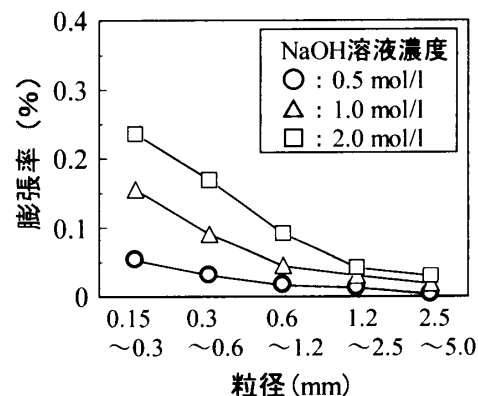


図-2 膨張率と粒径との関係

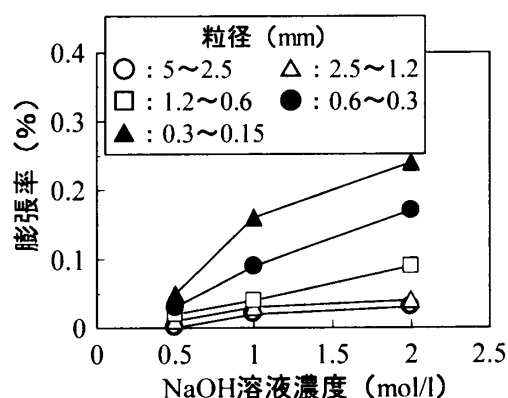


図-3 膨張率とNaOH溶液濃度との関係

のである。図より、使用したすべての粒径の反応性骨材に対して、NaOH 溶液濃度の上昇にともない、供試体の膨張率は増大することがわかる。また、粒径の小さい反応性骨材を使用したものほど NaOH 溶液濃度の上昇にともなう膨張率の増加割合が大きくなっていることがわかる。これは、粒径の小さい骨材を使用したものほど同一骨材体積における骨材の総表面積が大きくなるためにアルカリシリカ反応 (ASR) によって生成されるアルカリシリカゲル (以下、ASR ゲルと称す) の量が増加したこと、および供試体を浸漬する NaOH 溶液濃度が高いほど ASR が促進されるためであると考えられる。

図-4 に、2.5~1.2 mm および 0.3~0.15 mm の2種類の粒径の骨材を混合して使用した供試体の煮沸処理後の膨張率と各粒径の骨材の混合割合との関係を示す。図より、すべての NaOH 溶液濃度に対して、粒径の小さい 0.3~0.15 mm

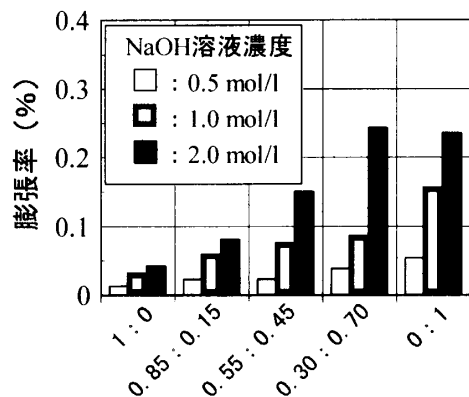
の骨材の混合割合が増加するほど膨張率は大きくなる。また、NaOH 溶液濃度が高いものほど、粒径の小さい 0.3~0.15 mm の骨材の混合割合の増加にともなう膨張率の増加割合は大きくなっていることがわかる。

図-5 に、2.5~0.15 mm のそれぞれ 5 種類のふるいに残留する反応性骨材を混合して使用した供試体の煮沸処理後の膨張率と骨材の粗粒率 (F.M.) との関係を示す。図より、1.0 mol/l あるいは 2.0 mol/l のいずれの NaOH 溶液に浸漬した供試体に関しても、F.M. の小さい反応性骨材を使用したものほど膨張率は大きくなっていることがわかる。

以上の結果より、粒径が小さい、あるいは F.M が小さい反応性骨材を使用したものほど煮沸処理後の供試体の ASR 膨張は大きくなる。これは、粒径が小さい、あるいは F.M が小さい反応性骨材を使用した供試体ほど、それに含有する反応性骨材の総表面積が大きくなり、ASR ゲルの生成量が増加するためであると考えられる。そこで、式 (2) より算出した供試体中に含有する反応性骨材の総表面積と ASR 膨張との関係を図-6 に示す。図には、1.0 および 2.0 mol/l の NaOH 溶液に浸漬した供試体の結果をあわせて示す。図より、供試体を浸漬する NaOH 溶液濃度が同じであれば、今回使用した反応性骨材に関しては、単一粒径の反応性骨材を使用するか、あるいは混合粒径の反応性骨材を使用するかにかかわらず、供試体に含有する反応性骨材の総表面積の増大とともに供試体の膨張率は直線的に増大しており、両者には相関関係があることがわかる。したがって、反応性骨材の粒径および粒度の相違が NaOH 溶液中で煮沸処理を行った供試体の ASR 膨張に与える影響は、供試体に含有する反応性骨材の総表面積の大小により説明することができると考えられる。

3.2 モルタルバーの ASR 膨張に与える反応性骨材混入量の影響

図-7 に、S/C を 0.5, 0.8, 1.5 および 2.25 とし、反応性骨材の混合割合を 25, 50, 75 および 100%とした供試体を 1 mol/l の NaOH 溶液



粒径bと粒径eの混合割合
(粒径b : 2.5~1.2mm, 粒径e : 0.3~0.15mm)
図-4 膨張率と粒径bと粒径eの混合割合との関係

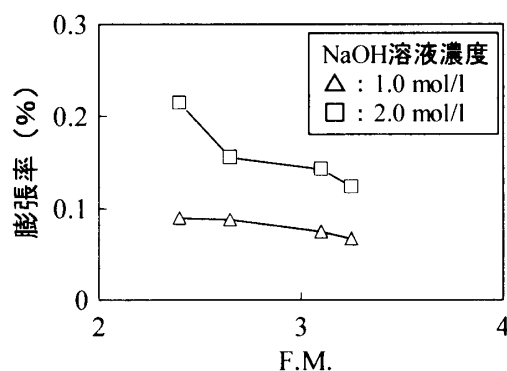


図-5 膨張率とF.M.との関係

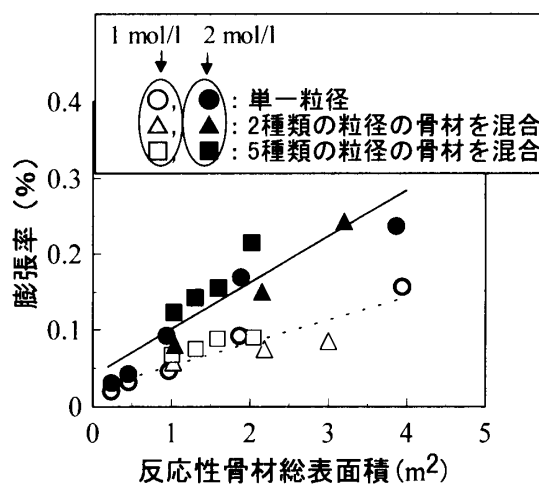


図-6 膨張率と反応性骨材総表面積との関係

に浸漬してオートクレーブ装置内で煮沸処理を行った場合の、供試体の膨張率と反応性骨材混合割合との関係を各 S/C ごとに示す。図より、

S/C が最も小さい S/C=0.5 の供試体に関しては、反応性骨材混合割合の増加にともない ASR による膨張は大きくなる傾向にある。S/C=0.8 の供試体に関しても S/C=0.5 のものよりも膨張率の増加割合は小さいが、反応性骨材混合割合 75% までは反応性骨材混合割合の増加にともなって ASR による膨張は増加する傾向にある。一方、S/C=1.5 および 2.25 の供試体に関しては、反応性骨材混合割合の増加にともなって ASR による膨張は低下する。これは、以下に述べる理由によるものと考えられる。ある一定量のアルカリの存在下において、反応性骨材量が増加するほど ASR によって生成される ASR ゲルの量は増大するため、ASR による膨張は大きくなる。しかし、ある一定量のアルカリに対して反応性骨材量が過度に増加すると Na^+ および OH^- イオンが分散されて、ASR により生成される ASR ゲルの量は減少する³⁾。したがって、S/C が 2.25 および 1.5 の供試体に関しては、反応性骨材の混合割合の増加にともなって膨張率が減少したと考えられる。

図-8 に S/C を 2.25 とし、反応性骨材混合割合を 25、50、75 および 100% とした供試体の煮沸処理後の膨張率と NaOH 溶液濃度との関係を示す。図より、反応性骨材混合割合が 75% と 100% のものに関しては、供試体を浸漬する NaOH 溶液濃度の上昇とともに煮沸処理後の膨張は大きくなる傾向にある。一方、反応性骨材混合割合を 25% とした供試体に関しては NaOH 溶液濃度の上昇とともに煮沸処理後の膨張率は低下する。また、図-9 に、S/C を 0.8 とした供試体の煮沸処理後の膨張率と NaOH 溶液濃度との関係を示す。図より、S/C を 0.8 とした供試体に関しては、すべての反応性骨材混合割合において NaOH 溶液濃度の上昇とともに煮沸処理後の膨張率は減少する傾向にある。これは、モルタル中の反応性骨材の体積が比較的大きい場合には、供試体を浸漬する NaOH 溶液濃度が高くなるほど反応性骨材中のシリカの溶解が促進され、その結果、ASR ゲルの生成量が増加するために煮沸処理後の膨張は大きな

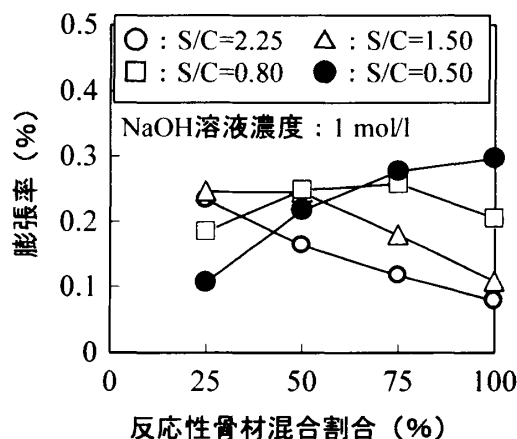


図-7 膨張率と反応性骨材混合割合との関係

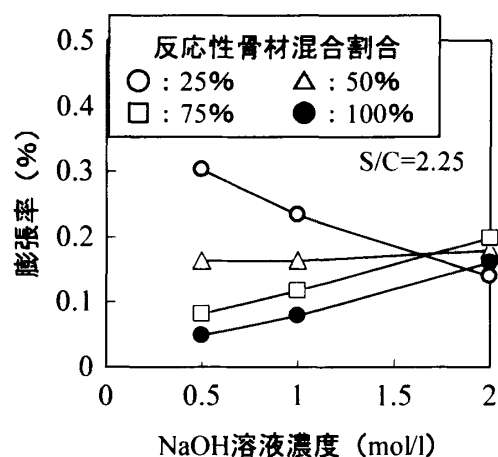


図-8 膨張率とNaOH溶液濃度との関係

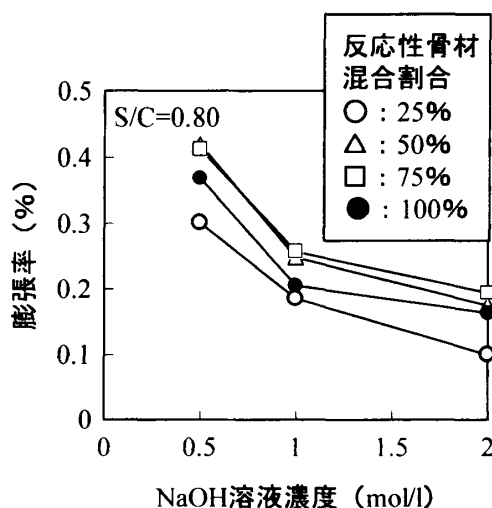


図-9 膨張率とNaOH溶液濃度との関係

る。一方、供試体に含有する反応性骨材の体積が小さい場合にも、NaOH 溶液濃度の上昇と

もに反応性骨材中のシリカの溶解は促進されるが、生成されるアルカリシリカゲルの $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ 比が高くなりその粘性が小さくなるため、モルタル中で ASR ゲルが生じる膨張圧が小さくなる⁴⁾。したがって、反応性骨材量が少ない、すなわち S/C が小さく、また、反応性骨材混合割合が小さい供試体では、供試体を浸漬する NaOH 溶液濃度の上昇とともに ASR による膨張は小さくなったと考えられる。

以上の結果から、ASR による膨張はアルカリ量と反応性骨材量との関係によって影響を受けることがわかる。そこで、図-10 に、供試体を浸漬する NaOH 溶液の濃度を 1 mol/l とし、各 S/C ごとに反応性骨材の混合割合を変化させた場合の、供試体の膨張率と供試体に含有する Na_2O 量と反応性骨材体積の比 ($\text{Na}_2\text{O}/V$) との関係を示す。なお、モルタルの S/C が異なるとセメント量および供試体に浸透する NaOH 溶液の量が異なる。そこで、ここで示す Na_2O 量は、各供試体に対してセメント中のアルカリ量と供試体に浸透した NaOH 溶液の量を考慮して計算したものである。図より、S/C の値にかかわらず、反応性骨材の体積が増加するほど

($\text{Na}_2\text{O}/V$ 比が小さくなるほど) 供試体の ASR による膨張は大きくなる。しかし、 $\text{Na}_2\text{O}/V$ 比がある値を超えると、反応性骨材の体積の増大にともない ASR による膨張は小さくなる。そして、ASR による膨張が最大となる $\text{Na}_2\text{O}/V$ 比は、S/C の値にかかわらずほぼ同じ値を示すことがわかる。これは、前述したように反応性骨材の種類によっては、生成される ASR ゲルに関して、ASR による膨張を最大にする $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ 比が存在し、今回使用した反応性骨材に関して、そのような $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ 比が存在することを示唆するものであると考えられる。

4. まとめ

本研究では、モルタルの ASR を促進する方法として NaOH 溶液中に浸漬したモルタルバーをオートクレーブ装置内で煮沸処理する方法を用いて、モルタルバーの ASR 膨張に与える

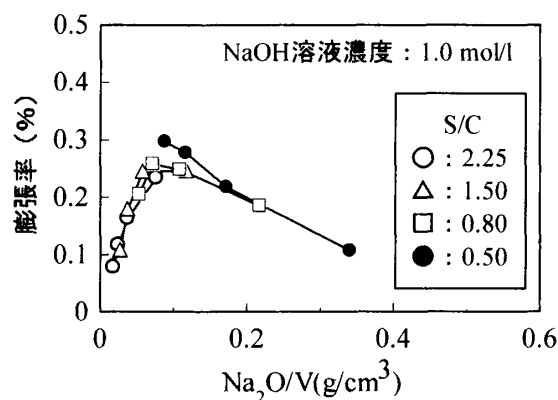


図-10 膨張率と $\text{Na}_2\text{O}/V$ との関係

反応性骨材の粒径、粒度および混入量の影響について検討を行った。本研究で得られた結果をまとめて以下に示す。

- (1) 十分なアルカリが存在し、反応性骨材の体積が同程度であれば、粒径が小さい反応性骨材を使用したものほど、また F.M. の小さい反応性骨材を使用したものほどモルタルバーの ASR 膨張は大きくなる。
- (2) 反応性骨材の粒径および粒度にかかわらず、ASR による膨張と反応性骨材の総表面積との間には相関関係があることが確認された。
- (3) 砂セメント比 (S/C) および反応性骨材の混合割合を種々変化させて実験を行った結果、モルタル中の Na_2O 量と反応性骨材体積の比とモルタルバーの膨張との関係は、S/C の値にかかわらずほぼ同じ傾向を示すことが確認された。

参考文献

- 1) Beddow, J. K.: Particle Science and Technology, Chemical Publishing Co., INC., pp.413-428, 1980
- 2) 三輪茂雄：粉粒体工学，朝倉書店，pp.41-64, 1972
- 3) 小柳 洽ほか：コンクリート構造物のアルカリ骨材反応，理工学社，pp.25-29, 1990
- 4) 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，pp.66-68, 1986