

論文 モルタルバーの ASR 膨張に及ぼす骨材粒径と促進試験条件の影響

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

要旨：本研究では、ASR の促進試験法として NaOH 溶液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適用した。そして、この促進試験法によって生じるモルタルバーの膨張に及ぼす、反応性骨材の粒径、NaOH 溶液の濃度およびオートクレーブ処理圧力の影響について検討を行った。その結果、NaOH 溶液濃度が高く、かつ、反応性骨材の総表面積が大きくなるほど ASR 膨張は大きくなるが、骨材の種類、NaOH 溶液濃度あるいはオートクレーブの処理圧力によっては、ASR 膨張が最も大きくなる反応性骨材の総表面積の値が存在することが確認された。

キーワード：ASR 膨張、オートクレーブ、骨材粒径、骨材表面積、NaOH 溶液濃度

1. はじめに

アルカリシリカ反応(ASR)は長年月にわたってゆっくり進行し、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、使用する骨材に関してはあらかじめ適切な ASR の促進試験法を用いて、その骨材が有害な膨張を引き起こすか否かの判定を短期間のうちに行う必要がある。

そこで、本研究では、極めて短期間で ASR を促進するための促進試験法として、NaOH 溶液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について検討を行った。すなわち、モルタルバーの ASR 膨張に及ぼす反応性骨材の粒径、供試体を浸漬する

NaOH 溶液の濃度およびオートクレーブの処理圧力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：0.68 % Na₂O eq., K₂O/Na₂O=1.9）である。細骨材には、表-1に示す 3 種類の反応性骨材を使用した。モルタルバーを浸漬するための水酸化ナトリウム（NaOH）溶液の作製には、試薬一級の NaOH を使用した。

2.2 実験方法

本実験では、図-1に示すフローチャートに

表-1 骨材の物理的性質と化学法の結果

骨材の種類		岩石名	比重	吸水率 (%)	化学法による結果 (m mol/ l)		Sc/Rc
					Rc	Sc	
反応性骨材	T1	斜方輝石安山岩	2.60	1.93	101	558	5.52
	T2	斜方輝石安山岩	2.64	1.48	68	301	4.46
	O	両輝石安山岩	2.25	1.18	177	732	4.14

*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）

従って促進試験を行い、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た後にモルタルバーの初期長さの測定を行い、モルタルバーに NaOH 溶液を浸透しやすくするために、直ちに 60℃の乾燥炉で 24 時間モルタルバーを乾燥する。乾燥後、所定の濃度の NaOH 溶液の入ったステンレス容器中にモルタルバーを浸漬したまま、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、モルタルバーの長さ変化の測定を行い膨張率を算出した。

2.3 実験条件

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 と一定にした。使用する細骨材は、呼び寸法 5, 2.5, 1.2, 0.6, 0.3 および 0.15mm のふるいでふるい分け、2.5 ~ 0.15mm の各ふるいに残留した骨材を単一粒径の骨材として使用した。また、2.5, 1.2, 0.6, 0.3 および 0.15 mm のふるいに残留した骨材を質量百分率で、10 %, 25 %, 25 %, 25 %, 15 %となるように混合したもの (JIS A 5308 附属書 8 モルタルバー法の骨材粒度に準拠) も使用した。モルタルバーを浸漬する NaOH 溶液の濃度は、0.5, 1.0 および 2.0 mol/l の 3 水準とした。オートクレーブの処理条件は、処理圧力を 0.05, 0.10, 0.15 および 0.20MPa の 4 水準とし、処理時間を 24 時間と一定にした。モルタルバーの寸法は、4 × 4 × 16 cm である。

2.4 骨材の粒径および表面積の算出

各ふるいに残留した骨材の長さ (L)、幅 (B) および厚さ (T) を測定し、骨材の粒径を式 (1) から求めた。

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

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

ここに、 d : 投影面積円相当径、 D : ふるい目の開き、 L : 粒子の長さ、 B : 粒子の幅、 T : 粒子の厚さ、である。

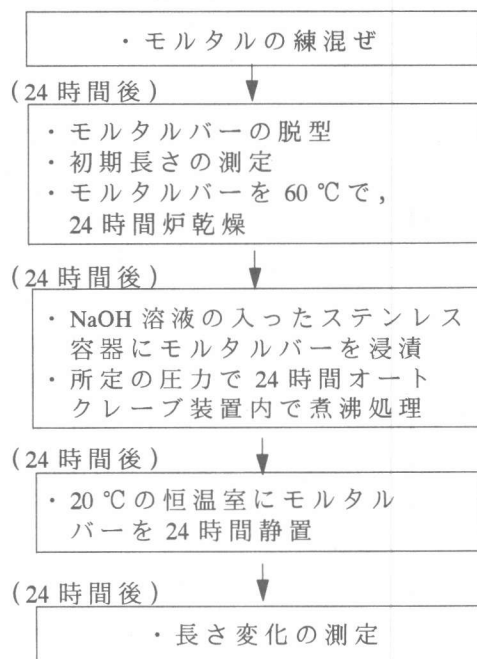


図 - 1 促進試験のフロー

式 (1) は Heywood¹⁾ が提案した式で、粒子の投影面積と同じ面積を持つ円の直径 d (投影面積円相当径) を算出するものである。投影面積相当径は粒子表面積との対応性があり、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 ($s=4A$) である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) を求めた。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、 $n=M/(\rho v)$ で求められる。したがって、骨材粒子の総表面積 (S) は、 $S=sM/(\rho v)$ であることより、式 (2) を用いて算出した。

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

3. 実験結果と考察

3.1 ASR膨張に及ぼす骨材粒径の影響

図-2に 1 mol/l の NaOH 溶液に浸漬したモルタルバーに対して、0.1MPa の処理圧力で 24 時間のオートクレーブ処理を行った場合の、モルタルバーの膨張率と反応性骨材の粒径との関係を示す。図には T1, T2 および O の 3 種類の骨材を使用して作製したモルタルバーの結果を示す。図より、使用したすべての骨材に関して、粒径の小さい反応性骨材を使用するほど、モルタルバーはオートクレーブ処理後に大きな膨張を生じることがわかる。これは、一定の骨材質量に対して、骨材の粒径が小さくなるほど骨材の総表面積が増大し、アルカリシリカ反応によって生成されるアルカリシリカゲルの量が増加するためであると考えられる。

また、図-3に所定の濃度の NaOH 溶液に浸漬したモルタルバーに対して処理圧力 0.1MPa で 24 時間のオートクレーブ処理を行った場合の膨張率と粒径との関係を示す。なお、ここで使用した骨材は O 骨材である。図より、モルタルバーを浸漬する NaOH 溶液濃度にかかわらず、反応性骨材の粒径が小さくなるほどモルタルバーの膨張は大きくなる。また、1.0 および 2.0 mol/l の NaOH 溶液に浸漬したモルタルバーの膨張は粒径約 0.5 mm で最も大きくなっており、O 骨材を使用したモルタルバーにおいては、反応性骨材の粒径に関してモルタルの ASR 膨張を最大にするベシマム値が存在することが確認された。

3.2 ASR膨張に及ぼすNaOH溶液濃度の影響

図-4に、O 骨材を用いて作製したモルタルバーを、所定の濃度の NaOH 溶液に浸漬して、0.1MPa の処理圧力で 24 時間のオートクレーブ処理を行った場合の、モルタルバーの膨張率と NaOH 溶液濃度との関係を、使用した骨材の粒径別に示す。図より、使用した骨材の粒径にかかわらず、モルタルバーを浸漬する NaOH 溶液の濃度が高くなるほどモルタルバーの膨張率は大きくなる。また、粒径が小さ

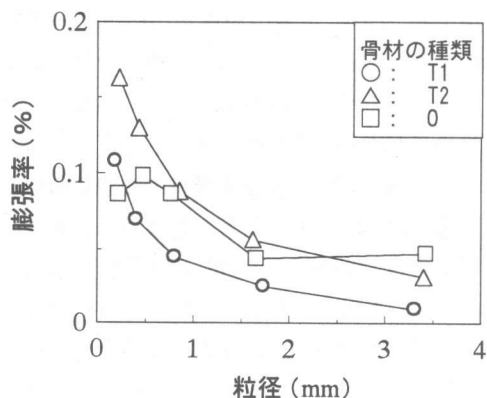


図-2 膨張率と反応性骨材粒径との関係

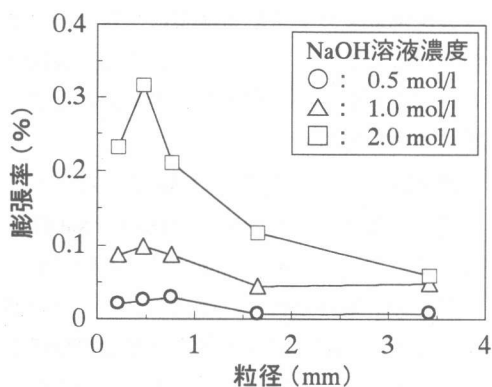


図-3 膨張率と反応性骨材粒径との関係 (O骨材)

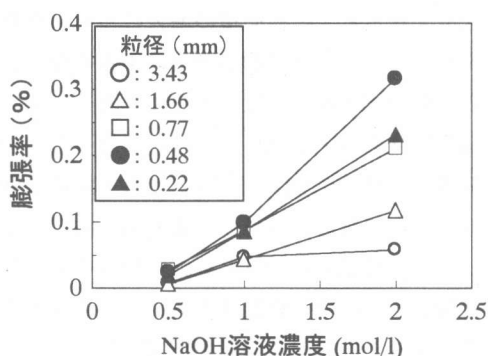


図-4 膨張率とNaOH溶液濃度との関係 (O骨材)

い骨材を使用したものほど、NaOH 溶液濃度の増加に伴う膨張率の増加割合は大きくなる傾向にあることがわかる。これは、反応性骨材に作

用する NaOH 溶液の濃度が高いほど、また、骨材径が小さく骨材の総表面積が大きいものほど、アルカリシリカ反応によって生成されるゲルの量が増加するためであると考えられる。

3.3 ASR膨張に及ぼす骨材の総表面積の影響

図-2および図-3に示したように、骨材の粒径が小さいものほど ASR による膨張は大きくなる。これは、一般に、反応性骨材の粒径が小さいほど骨材の単位質量あたりの総表面積が大きくなり、アルカリシリカ反応によって生成されるゲルの量が増加するためと考えられる。したがって、反応性骨材の総表面積はアルカリシリカ反応によって生じる膨張に影響を及ぼす大きな要因である。そこで、ここでは、反応性骨材の総表面積がモルタルバーの膨張に及ぼす影響について検討する。

図-5に、T1、T2 および O 骨材を使用して作製したモルタルバーを 1 mol/l の NaOH 溶液に浸漬して、0.10MPa の圧力で 24 時間のオートクレーブ処理を行った場合の、モルタルバーの膨張率と反応性骨材の総表面積との関係を示す。図より、本実験に使用したいずれの骨材に対しても、使用する骨材の総表面積が大きくなるほどモルタルバーの膨張率は大きくなる傾向にあることがわかる。また、骨材の総表面積が大きくなると、総表面積の増大にともなうモルタルバーの膨張率の増加割合は小さくなり、特に、O 骨材を使用したモルタルに関しては、骨材の総表面積が 2 m² より大きくなると、骨材の総表面積の増加にともない膨張率が若干低下する傾向にある。骨材の総表面積が大きくなるほど、水酸化アルカリと反応性骨材中のシリカが反応する面積が増加するために、生成されるアルカリシリカゲルの量が増加して、アルカリシリカ反応による膨張は増大すると考えられる。しかし、ある一定量のアルカリ環境下では、骨材の総表面積が増加し過ぎると水酸化アルカリが分散されて各骨材表面でのアルカリ濃度が減少し、シリカの構造の切断が十分に行われなくなる³⁾。その結果、アルカリシリカゲルの生

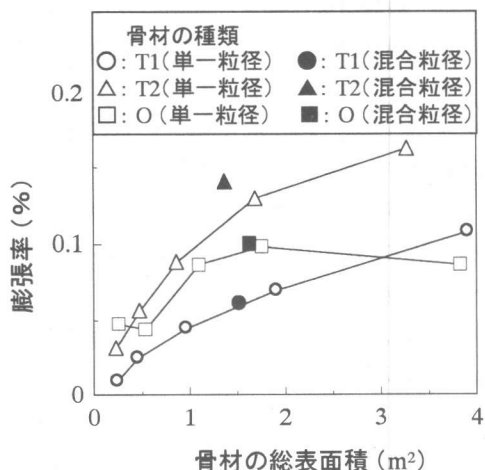


図-5 膨張率と骨材の総表面積との関係

成量が少なくなる。したがって、O 骨材に関しては骨材総表面積が大きくなりすぎたために、骨材の総表面積の増加にともなって、モルタルバーの膨張量が小さくなったと考えられる。

また、図-5には単一粒径の骨材を使用したモルタルバーの結果(図中の記号:○,△,□)とあわせて、各粒径の骨材を混合して使用したモルタルバーの結果(図中の記号:●,▲,■)も同時に示している。図より、T2 骨材を使用したモルタルバーで若干異なるものの、骨材の種類が同じであれば、各粒径の骨材を混合して使用したモルタルバーの膨張率と骨材総表面積との関係は、単一粒径の骨材を使用したモルタルバーで得られた両者の関係とほぼ一致していることがわかる。

3.4 骨材の総表面積とNaOH濃度との関係

図-6にモルタルバーを所定の濃度の NaOH 溶液に浸漬して、0.1MPa の圧力で 24 時間のオートクレーブ処理を行った場合の、モルタルバーのオートクレーブ処理後の膨張率と骨材の総表面積との関係を、NaOH 溶液の濃度別に示す。なお、モルタルバーの作製に使用した骨材は O 骨材である。図より、0.5 mol/l の NaOH 溶液に浸漬したモルタルバーの膨張率は非常に小さいが、モルタルバーの膨張率は、ある大きさの総表面積までは骨材の総表面積の増大にと

もなって大きくなることがわかる。また、0.5mol/l と 1.0 mol/l の濃度の NaOH 溶液に浸漬したモルタルに関しては、骨材の総表面積がほぼ 1.1 m² よりも大きくなると、骨材の総表面積が増大しても膨張率は増加しなくなり、ほぼ一定の値となる。また、2 mol/l の NaOH 溶液に浸漬したモルタルバーに関しては、骨材の総表面積が 2 m² よりも大きくなると総表面積の増大にともなって膨張率は小さくなる。骨材の総表面積の増大にともなって、モルタルバーの膨張率が一定の値になるかあるいは減少し始める総表面積の値は、NaOH 溶液濃度が高いほど大きい。これは、NaOH 溶液の濃度が低いほど、骨材の総表面積のわずかな増大にともない NaOH が分散されて、骨材表面における NaOH 濃度が低下するが、NaOH 溶液の濃度が高い場合には、骨材の総表面積がある程度増加してもシリカとの反応に必要な NaOH の量に十分余裕があるためであると考えられる。

以上に示したように、反応性骨材の総表面積とモルタルバーを浸漬する NaOH 溶液の濃度はモルタルの膨張量に大きく影響する。そこで、図-7に O 骨材を使用したモルタルバーに対して、NaOH 溶液の濃度と骨材総表面積の積 (C・S) とモルタルバーの膨張率との関係を示す。図より、C・S の増加にともないモルタルバーの膨張率は大きくなることがわかる。また、モルタルバーを浸漬する NaOH 溶液の濃度別に見て、C・S の増加にともなってモルタルバーの膨張率が一定値となるかあるいは減少し始める C・S の値までは、同一の C・S の値に対するモルタルバーの膨張率は、NaOH 溶液の濃度に関係なくほぼ同程度の値となっていることがわかる。また、膨張率が非常に小さい 0.5 mol/l の NaOH 溶液に浸漬した供試体を除くと、C・S の増加にともなってモルタルバーの膨張率が一定値となるかあるいは減少し始める C・S の値 (図中の○で囲った部分) における NaOH 溶液濃度と反応性骨材の総表面積との比 (C/S) の値はほぼ C/S=1 で同程度の値となっており、骨

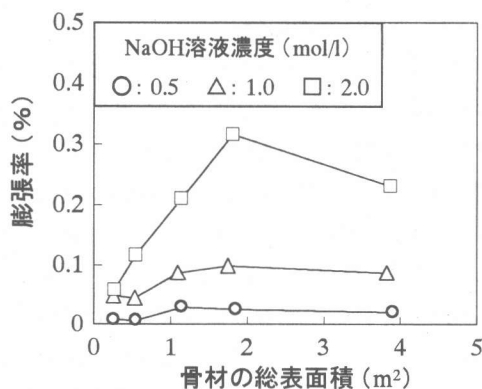


図-6 膨張率と骨材の総表面積との関係 (O骨材)

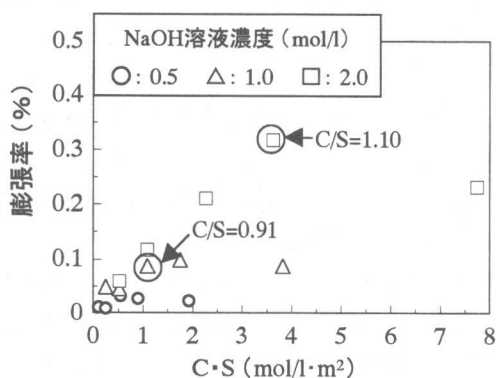


図-7 膨張率とC・Sとの関係 (O骨材)

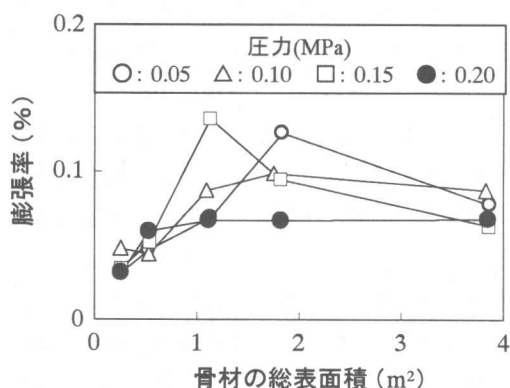


図-8 膨張率と骨材の総表面積との関係 (O骨材)

材の種類が同じであればモルタルバーの膨張量を最大にする C/S の値は同程度のものである可能性があることがわかる。

3.5 処理圧力の影響

図-8に、1 mol/l の NaOH 溶液に浸漬したモルタルに対して所定の圧力で 24 時間のオートクレーブ処理を行った場合の、モルタルバーの膨張率と反応性骨材の総表面積との関係を示す。なお、このときモルタルバーの作製に使用した骨材は O 骨材である。図より、各圧力別に見ると、骨材の総表面積を増大させていっても、それ以上膨張率が大きくならないかあるいは総表面積の増大にともない膨張率が減少し始める総表面積の値が存在し、圧力が大きくなるほどその値は総表面積の小さい方へシフトしていることがわかる。したがって、圧力を高くする場合には、骨材の総表面積をあまり大きくすると膨張率を小さく見積もる可能性がある。

また、図-9に、それぞれ 5 種類の粒径の反応性骨材 (O 骨材) を使用して作製したモルタルバーに対して、1 mol/l の NaOH 溶液に浸漬して、所定の圧力で 24 時間のオートクレーブ処理を施した場合の、モルタルバーの膨張率と処理圧力との関係を示す。図より、粒径 0.77mm の反応性骨材を使用したモルタルの膨張は、圧力を 0.15MPa としてオートクレーブ処理を行ったときに最も大きな膨張を生じる。一方、他の粒径の反応性骨材を使用したモルタルに関しては処理圧力を高くしても膨張率はほとんど変化しないかあるいは、処理圧力の増大にともなって膨張率が低下するものもある。圧力を高く設定するほどオートクレーブ装置内の温度は上昇する。温度が上昇するとセメント硬化体の強度が増すこと、また、温度上昇にともなってアルカリシリカ反応が急速に加速されるため、生成されたアルカリシリカゲルは早期に流動化することが考えられる⁴⁾。したがって、粒径が小さい 0.48mm の骨材および 0.22mm の骨材の総表面積は大きく、温度上昇にともなって多量の NaOH が早期に消費されてゲルが早期に流動化すると考えられるために、粒径の小さいものほど圧力の増加にともなって膨張率が小さくなったと考えられる。

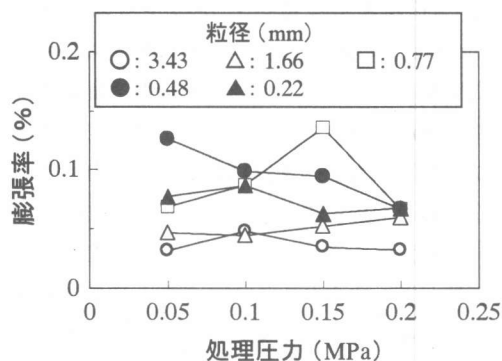


図-9 膨張率と処理圧力との関係 (O骨材)

4. まとめ

本研究では、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促進試験法を用いて、煮沸処理後に生じるモルタルバーの ASR 膨張に及ぼす反応性骨材粒径と促進試験条件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) 粒径が小さい反応性骨材を使用するほど、また、モルタル中の反応性骨材の総表面積が大きいものほど、モルタルバーの ASR 膨張は大きくなる。
- (2) モルタルバーを浸漬する NaOH 溶液濃度が高いほど、モルタルバーの ASR 膨張は大きくなる。
- (3) オートクレーブの処理圧力を高くすると、ASR 膨張が最大になる反応性骨材の総表面積の値が小さくなる。

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 治ほか : 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.73-75, 1986