

論文 オートクレーブ処理を施したモルタルの ASR 膨張特性

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、骨材のアルカリシリカ反応(ASR)を促進する方法として、1 規定の NaOH 溶液にモルタル供試体を浸漬してオートクレーブ処理を行う方法を採用した。そして、この方法によって生じる ASR 膨張に及ぼす処理圧力、処理時間および供試体の前処理条件の影響について検討を行った。その結果、同一圧力下では、処理時間を長くするほどオートクレーブ処理直後の膨張は大きくなり、処理圧力に関しては、0.10MPa 程度までは、圧力の増大に伴って処理直後の膨張は増大するが、骨材の種類によっては、圧力の増大に伴って膨張が減少することが確認された。

キーワード: ASR, オートクレーブ, 処理圧力, 処理時間, NaOH 溶液浸漬, 膨張率

1. はじめに

アルカリシリカ反応(ASR)は、長年月にわたって進行しコンクリート構造物にひび割れ損傷を与える。そこで、使用する骨材については、その反応性をあらかじめ確認しておかなければならない。従来、骨材のアルカリ反応性を判定する促進試験法には、化学法およびモルタルバー法などがある。しかし、一般に骨材の反応性を判定するためには数ヶ月の期間を要する。その中でも骨材の反応性を数時間から数日で判定する方法として、オートクレーブを用いた方法が提案されている。しかし、オートクレーブにより ASR を促進するためには、多量のアルカリ化合物の添加を必要とする。練混ぜ時にアルカリ化合物を過剰に添加すると、セメントの凝結や水和反応に少なからずとも影響を与えるものと考えられる。また、エトリンガイトの遅延膨張を生じる可能性があることも報告されている¹⁾。

そこで本研究では、骨材のアルカリシリカ反応を促進する方法として、練混ぜ時にアルカリ化合物を添加する代わりに、モルタルを 1 規定(N)の NaOH 溶液に浸漬してオートクレーブ処

理を行う方法を採用した。そして、まず、オートクレーブ処理直後に生じるモルタルの ASR 膨張に及ぼす各種要因の影響を明らかにするために、モルタルの水セメント比、前処理条件およびオートクレーブ処理条件(処理圧力、処理時間)を要因に選んで検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料

本実験で使用したセメントは、アルカリ含有量が Na₂O 等量で 0.68 % の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で、一部、アルカリ含有量が 0.40 % の低アルカリ型普通ポルトランドセメントを使用した。細骨材は、表-1に示す JIS の化学法およびモルタルバー法で無害でないと判定されている 3 種類の反応性骨材(T1, T2, O)と、化学法で無害でないと判定されるが、モルタルバー法では無害と判定されている骨材(NT)を使用した。各細骨材の粒度は、JIS のモルタルバー法に規定される粒度となるように粉碎して調整を行った。供試体中のアルカリ含有量の調整および、供試体を浸漬する NaOH 溶液の作製に、試薬一級の NaOH

- | | | | |
|----|----------|----------|---------|
| *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 | 鳥取大学助教授 | 工学部土木工学科 | 工博(正会員) |
| *4 | 鳥取大学講師 | 工学部土木工学科 | 工博(正会員) |

表-1 骨材の物理的性質と化学法およびモルタルバー法の結果

骨材の種類	岩石名	反応性鉱物	比重	吸水率 (%)	化学法による結果 (m mol/ℓ)		Sc/Rc	モルタルバー法の材齢6ヶ月の膨張率 (%)
					Rc	Sc		
T1	斜方輝石安山岩	Cr, Tr, Ch	2.60	1.93	101	558	5.52	0.281
T2	斜方輝石安山岩	Cr, Tr	2.64	1.48	68	301	4.46	0.366
O	両輝石安山岩	Cr, Tr	2.25	1.18	177	732	4.14	0.379
NT	砂岩		2.70	0.65	22	30	1.39	0.019

* Cr : クリストバライト, Tr : トリジマイト, Ch : 玉髄

を使用した。

2.2 実験条件

実験条件を表-2に示す。モルタル供試体の作製に使用する細骨材の反応性骨材混合割合は、それぞれモルタルバー法で無害と判定される NT 骨材を混合して 25 % および 100 % とした。モルタルの砂セメント比(S/C)は 2.25 とし、水セメント比 (W/C) は 0.45 ~ 0.70 の範囲内で 6 水準とした。供試体の寸法は 4 × 4 × 16cm の角柱供試体とし、モルタルの練混ぜ後 24 時間で供試体を脱型し、直ちに供試体の初期長さを測定する。なお、練混ぜ時にアルカリの添加は行わない。続いて、1N の水酸化ナトリウム (NaOH) 溶液に供試体を浸漬してオートクレーブ処理を行い、処理直後の膨張率を測定した。このとき、処理直後の長さ変化の測定は、供試体を装置から取り出し、20 °C の恒温室に 24 時間静置してから行った。オートクレーブの処理圧力 (ゲージ圧力) は 0.05 ~ 0.20MPa の範囲内で 4 水準、処理時間は 8 ~ 48 時間の範囲内で 4 水準とした。なお、設定した各圧力 (飽和蒸気圧) に対応する装置内部の温度は表-2に示すとおりである。さらに、オートクレーブ処理を行う前の前処理条件として、供試体を 60 °C の乾燥炉で乾燥したものと、乾燥処理を行わないものとの比較を行った。このとき、供試体の乾燥時間を 5 ~ 48 時間の範囲内で 6 水準、供試体を NaOH 溶液に浸漬する時間を 0.5 ~ 24 時間の範囲内で 3 水準とした。また、オートクレーブ処理を行うまでの前養生条件として、NaOH 溶液に浸漬する期間を 0 日 (NaOH 溶液浸漬後、直ちにオートクレーブ処理を開始する) ~ 6 日の範囲内で 4 水準とした。また比

表-2 実験条件

細骨材の種類	T1, T2, O, NT
反応性骨材混合割合 (%)	25, 100
W/C	0.45, 0.50, 0.55, 0.60, 0.65, 0.70
S/C	2.25
NaOH 溶液濃度	1N
オートクレーブ処理圧力 (温度) (MPa)	0.05 (112 °C) 0.10 (120 °C) 0.15 (128 °C) 0.20 (134 °C)
オートクレーブ処理時間 (時間)	8, 16, 24, 48

較のために、JIS A 5308 附属書 8 のモルタルバー法に準じて、各骨材を使用したモルタル供試体の膨張率の経時変化を測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 モルタルバー法による結果

図-1 および図-2 に、各骨材に対して反応性骨材の混合割合を 100 % および 25 % とした供試体の、モルタルバー法における膨張率の経時変化を示す。なお、図-1 には、NT 骨材を 100 % 使用した供試体に対する結果についても同時に示す。図-1 より、反応性骨材を 100 % 使用した場合、T2 骨材を使用した供試体は、

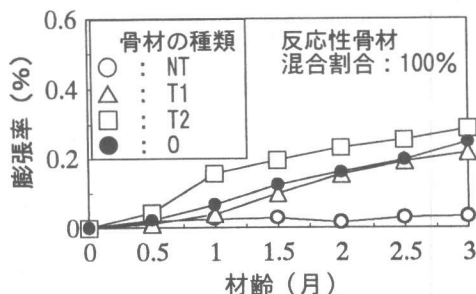


図-1 膨張率の経時変化

他の骨材を使用した供試体に比べて最も大きな膨張を示している。一方、図-2の反応性骨材混合割合を25%とした場合には、O骨材を使用した供試体（以下、O供試体と呼ぶ）の膨張率が最も大きく、続いてT2骨材を使用した供試体（以下、T2供試体と呼ぶ）の膨張率が大きく、T1骨材を使用した供試体（以下、T1供試体と呼ぶ）の膨張率は最も小さい。また、図-1と図-2を比較すると、どの骨材に関しても、反応性骨材の混合割合を25%とした供試体の方が、100%とした供試体よりも大きな膨張を示していることがわかる。これは、本実験に使用したすべての反応性骨材に対して、ベシム混合割合が100%よりも小さいところに存在するためである。また、T1、T2およびO骨材を使用した供試体の膨張率は、いずれも材齢3ヶ月において0.05%以上となっており、いずれの骨材も無害ではないと判定されるものである。NT骨材を使用した供試体は、材齢3ヶ月までほとんど膨張を示していない。

3.2 オートクレーブ処理直後の膨張率に及ぼすW/Cの影響

図-3に、細骨材としてT2骨材を100%使用した供試体の、オートクレーブ処理直後の膨張率と供試体のW/Cの関係を示す。このとき、供試体作製に使用したセメントは、アルカリ含有量が0.40%の普通ポルトランドセメントである。そして、NaOH溶液に浸漬した供試体に対して、処理圧力を0.10MPa、処理時間を24時間としてオートクレーブ処理を行った。また、NaOH溶液を供試体に浸透しやすくするため、60℃の乾燥炉で24時間乾燥させた後にNaOH溶液に浸漬した供試体に対しても、上記の条件でオートクレーブ処理を行って膨張率の測定を行った。図より、乾燥処理を行わない供試体の場合（図中の○記号）、W/C=0.60までは、オートクレーブ処理直後の膨張率は、W/Cの増加とともに若干大きくなる傾向にあるがその差は小さい。さらに、全ての供試体において、処理直後の膨張率は0.04%以下であり、骨材の反応性を評価するという目的においては、膨張率

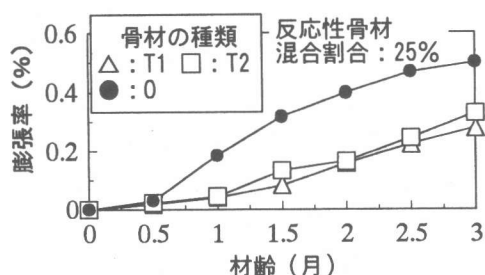


図-2 膨張率の経時変化

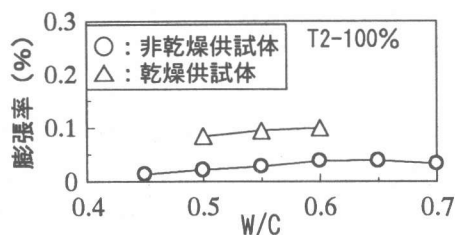


図-3 オートクレーブ処理直後の膨張率とW/Cの関係
(処理圧力:0.10MPa, 処理時間:24時間)

が小さすぎるものと考えられる。一方、乾燥処理を行った供試体（図中の△記号）についてもW/C=0.60までは、W/Cの増大に伴いオートクレーブ処理直後の膨張率が若干大きくなる傾向が認められるがその差は小さく、供試体のW/Cは処理直後の膨張にほとんど影響を与えないと考えられる。また、乾燥処理を行った供試体は、乾燥処理を行わない供試体に比べて3~4倍の膨張を生じる。これは、乾燥処理を行わない供試体に関しては、オートクレーブ処理を施している間に供試体細孔中のNaOH濃度が十分上昇しなかったのに対して、乾燥処理を行った供試体の場合は、NaOH溶液が供試体中に浸透しやすく、その結果、供試体細孔中のNaOH濃度が、乾燥処理を行わないものよりも上昇したためであると考えられる。

3.3 オートクレーブ処理直後の膨張率に及ぼす前養生条件の影響

3.2でNaOH溶液に浸漬する前に供試体を乾燥することによって、乾燥処理を行わないものよりも大きな膨張が得られたことから、本実験では、供試体を乾燥炉で乾燥した後に、NaOH溶液に浸漬する方法をとった。図-4は、60℃

の乾燥炉で供試体を乾燥させた場合に、供試体中から失われる水分量（以下、乾燥水分量と呼ぶ）の経時変化を示したものである。ここで、乾燥水分量は脱型直後の供試体質量から、乾燥後の供試体質量を差し引いて求めた。なお、供試体の W/C は 0.50 である。図より、乾燥温度を 60℃とした場合、乾燥時間の経過とともに乾燥水分量は増加するが、24 時間以降はほぼ一定値となり、それ以上時間をかけて供試体を乾燥しても供試体から水分は蒸発しないことがわかる。そこで、供試体の乾燥時間を、乾燥水分量がほぼ一定となる 24 時間とした。次に、図-5 に、W/C=0.50 のモルタル供試体を 60℃で 24 時間乾燥させた後、NaOH 溶液に浸漬した場合に、供試体中に浸透する NaOH 溶液の質量（以下、浸透溶液量と呼ぶ）と浸漬時間の関係を示す。浸透溶液量は、乾燥炉で 24 時間乾燥させた供試体を NaOH 溶液に浸漬した後、所定の時間において測定した供試体質量から、乾燥直後の供試体質量を差し引くことにより求めた。図より、供試体を浸漬してから 30 分以内で、供試体中に NaOH 溶液が急速に浸透し、浸漬開始後 30 分以降は浸透溶液量の増加は見られない。すなわち、NaOH 溶液に供試体を浸漬してから 30 分までに、NaOH 溶液は供試体中にほぼ完全に浸透するものと考えられる。

次に、オートクレーブ処理を施す前に乾燥処理を行った供試体を、NaOH 溶液に浸漬させる時間（前養生期間）が、オートクレーブ処理直後の膨張に及ぼす影響について検討を行う。図-6 は、供試体脱型後、60℃の乾燥炉で 24 時間乾燥させた供試体に対して、処理圧力を 0.10MPa、処理時間を 24 時間としてオートクレーブ処理を行った場合の、オートクレーブ処理直後の膨張率と、前養生期間との関係について示したものである。なお、このとき使用した骨材は T2 骨材で、その混合割合は 100%である。また、供試体作製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で、これ以降に示す結果は、全てこのセメントを使用した供試体に対するものであ

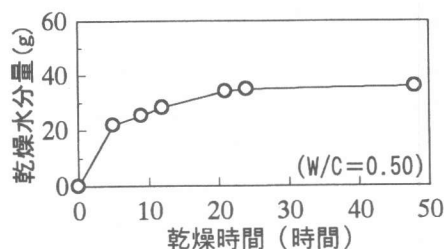


図-4 乾燥水分量の経時変化

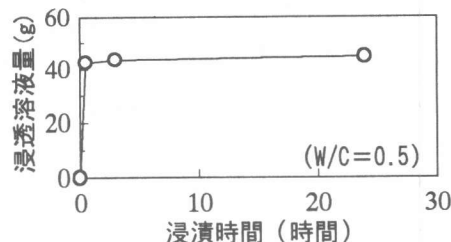


図-5 浸透溶液量の経時変化

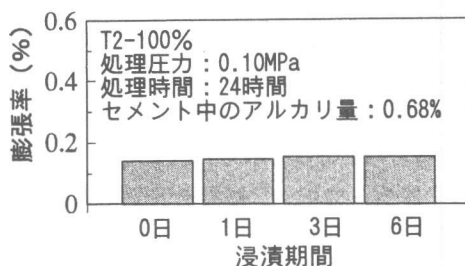


図-6 オートクレーブ処理直後の膨張率に及ぼす処理前のNaOH溶液浸漬期間の影響

る。図-6より、オートクレーブ処理直後の膨張率は、前養生期間の長さにかかわらず、どの供試体においてもほぼ同程度の値となっていることがわかる。

以上の結果より、本実験においては、オートクレーブ処理を行う前の前処理条件として、供試体脱型後に 60℃で 24 時間炉乾燥を行い、その後、1N の NaOH 溶液に浸漬して直ちにオートクレーブ処理を行うこととした。

3.4 オートクレーブ処理直後の膨張率に及ぼすオートクレーブ処理条件の影響

(1) 処理時間の影響

図-7および図-8に、各骨材を使用した供試体に対して、処理圧力を 0.05MPa および 0.20MPa としてオートクレーブ処理を施した場合の、処理直後の膨張率と処理時間の関係を示

す。なお、使用した各細骨材の反応性骨材混合割合は 25% で、供試体の W/C は 0.50 である。図-7 より、処理圧力を 0.05MPa とした場合、モルタルバー法において最も大きな膨張を示す O 供試体は、処理時間 16 時間で処理直後の膨張率が 0.15% となっており、さらに処理時間を長くすると処理時間の増加とともに、処理直後の膨張率は直線的に増大する傾向にあることがわかる。また、T1 供試体および T2 供試体に関しては、処理時間 16 時間ではほとんど膨張を示していないが、処理時間を 24 時間以上とすると、処理時間の増加とともに処理直後の膨張率は増大する。また、図-8 より、処理圧力を 0.20MPa とした場合においても、処理時間の増加とともに処理直後の膨張率は大きくなるのがわかる。

(2) 処理圧力の影響

図-9 および図-10 に、各骨材を使用した供試体に対して、オートクレーブ処理時間を 24 時間および 48 時間とした場合の、オートクレーブ処理直後の膨張率と処理圧力の関係を示す。なお、各供試体における反応性骨材混合割合は 25% で、供試体の W/C は 0.50 である。図-9 より、オートクレーブ処理時間を 24 時間とした場合、骨材の種類によって、オートクレーブ処理直後の膨張率に及ぼす処理圧力の影響が異なることがわかる。すなわち、T1 供試体の膨張率は、処理圧力が 0.05 ~ 0.15MPa の範囲内では、どの圧力下においてもほぼ同程度の値であり、処理圧力を 0.20MPa とすると 0.15MPa とした場合よりも膨張率が小さくなる。また、T2 供試体に関しては、処理圧力 0.15MPa までは処理圧力の増大に伴い処理直後の膨張率は増大する傾向にあるが、処理圧力を 0.20MPa とすると、0.15MPa とした場合よりも膨張率が小さくなる。一方、反応性骨材の混合割合を 25% としたとき、モルタルバー法において最も大きな膨張を生じた O 供試体に関しては、処理圧力 0.05MPa と 0.10MPa ではほぼ同程度の膨張率を示し、処理圧力を 0.10MPa 以上とすると、圧力の増大に伴いオートクレーブ処理直後の膨

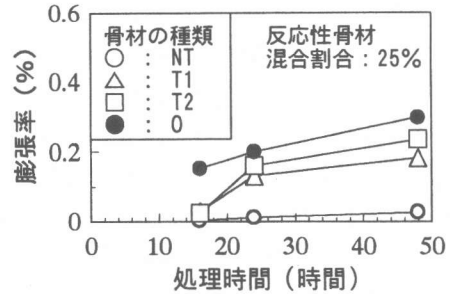


図-7 オートクレーブ処理直後の膨張率と処理時間の関係 (処理圧力: 0.05MPa)

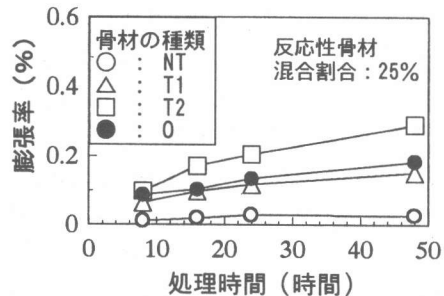


図-8 オートクレーブ処理直後の膨張率と処理時間の関係 (処理圧力: 0.20MPa)

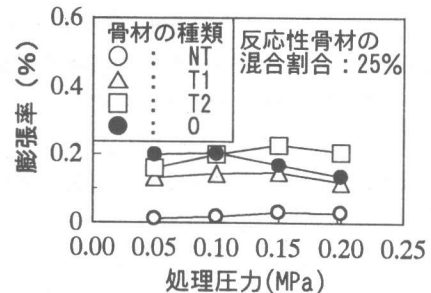


図-9 オートクレーブ処理直後の膨張率と処理圧力の関係 (処理時間: 24時間)

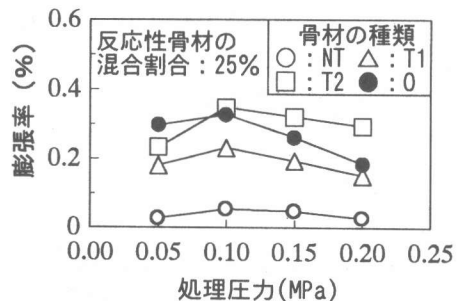


図-10 オートクレーブ処理直後の膨張率と処理圧力の関係 (処理時間: 48時間)

張率が小さくなる傾向にある。このように、処

処理圧力が高くなるのに伴い膨張率が減少する原因としては、次のようなことが考えられる。処理圧力を高くしてオートクレーブ装置内の温度を上昇させると、温度の上昇に伴って ASR の反応速度が加速されるため、まだ塑性状態における供試体中でアルカリシリカゲルの膨張圧力が緩和されること、および、生成されたアルカリシリカゲルが早期に流動化されるためであると考えられる²⁾。また、モルタルバー法で無害と判定されている NT 骨材を使用した供試体は、オートクレーブ処理を施してもほとんど膨張を示していないことから、反応性骨材を使用した供試体に生じた膨張は、ASR のみによって生じたものであると考えられる。

一方、図-10 より、処理時間を 48 時間とした場合には、反応性骨材を使用したすべての供試体に対して、0.10MPa 以上の圧力でオートクレーブ処理を施すと、処理圧力の増大に伴い処理直後の膨張率は減少する傾向にあることがわかる。

3.5 オートクレーブ処理直後の膨張率とモルタルバー法によって得られた膨張率の比較

3.4 で得られた結果より、本実験に使用した骨材に関しては、処理圧力を 0.10MPa 以上とすると処理圧力の増大とともに処理直後の膨張率が小さくなる傾向が認められたため、最適な処理圧力は 0.10MPa であると考えられる。また、同一圧力下においては、処理時間を長くするほど大きな膨張が得られる。ここで、図-11 に、各骨材の反応性骨材混合割合を 25%とした供試体に対して、処理圧力を 0.10MPa、処理時間を 24 時間としてオートクレーブ処理を行った時の処理直後の膨張率と、モルタルバー法の材齢 3 ヶ月における膨張率とを比較した結果を示す。図より、両者の間には比較的高い相関関係があり、また、処理圧力を 0.10MPa、処理時間を 24 時間とした場合には、処理直後にモルタルバー法の材齢 3 ヶ月における膨張率の約 50%の膨張率が得られることがわかる。

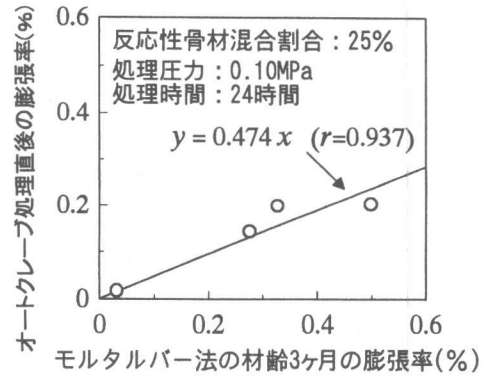


図-11 オートクレーブ処理直後の膨張率とモルタルバー法の材齢3ヶ月の膨張率との関係

4. まとめ

本研究では、1N の NaOH 溶液に浸漬したモルタル供試体に対してオートクレーブ処理を行い、その時に得られる膨張率とオートクレーブ処理条件との関係について検討を行った。本実験の範囲内で得られた結果を以下に列挙する。

- (1) 同一処理圧力(温度)下では、処理時間を長くするほど処理直後の膨張率は大きくなる。
- (2) 反応性の高い骨材を使用した場合、処理圧力(温度)を高くするのに伴い処理直後の膨張率は小さくなる傾向にある。したがって、処理圧力(温度)を高く設定すると膨張率を小さく見積もる可能性がある。本研究の範囲内では、試験に最適な処理圧力は 0.10MPa (120℃)であると考えられる。
- (3) 処理圧力を 0.10MPa(120℃)、処理時間を 24 時間としてオートクレーブ処理を行った場合、処理直後にモルタルバー法における材齢 3 ヶ月の膨張率の約 50%の膨張率が得られた。

参考文献

- 1) Diamond, S: Alkali Silica Reactions - Some Paradoxes, Proceedings of the 10th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, pp.3-14, Aug. 1996
- 2) 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