

モルタルバー法における 2, 3 の検討

SOME CONSIDERATIONS ON MORTAR-BAR METHOD

立屋敷 久志*・永嶋 正久**

By Hisashi TATEYASHIKI, Masahisa NAGASHIMA

1 まえがき

骨材のアルカリシリカ反応性を評価する方法の1つにモルタルバー法がある。

現在のJIS A 5308付属書8に規定されているモルタルバー法は、建設総合技術開発プロジェクト「コンクリートの耐久性向上技術の開発」の研究成果を基に、1986年に制定され、その後、1989年に改正されたものである。それ以前のモルタルバー法は、ASTM C 227によるものであった。

ASTM法とJIS法の大きな違いは、試験目的が、前者は、使用するセメントと使用する骨材との反応性及び骨材の潜在反応性を評価することであるのに対し、後者は、骨材の潜在反応性を評価する点である。具体的には、供試体寸法が違う点と、ASTM法では、実際に使用するセメントを用い、水量をフロー値で決定するのに対し、JIS法では、アルカリ量の低いセメントに水酸化ナトリウムを添加してアルカリ量を1.2%に調整し、水量は一定(W/C=50%)で行なう点である。

両方法とも、試験対象の骨材でモルタルをつくり、その膨張で判定するので、実際のコンクリートの条件に近く、化学法や岩石学的検査に比べると、直接的でわかりやすいが、その反面、モルタルの膨張に影響する因子は多く、結果の解釈は必ずしもわかりやすいものではない。

そこで、膨張に影響するいくつかの因子並びにモルタルバー法の結果とコンクリートの挙動との関係について、筆者らの実験データを用いて考えてみる。

尚、アルカリ量は、適宜変化させているが、水量は、JIS法のW/C=50%とし、供試体寸法は、ASTM法の1×1×11.4mmとした。

2 使用骨材

反応性のありそうな骨材として火山岩である安山岩と堆積岩であるチャート、並びに無害骨材として花崗閃緑岩を実験に使用した。その岩質及びJIS A 5308 付属書7 骨材のアルカリシリカ反応性試験(化学法)の結果を表1及び図1に示す。

表1 骨材の岩質と化学法の結果

骨材名	岩 質	化学法の結果		
		Sc	Rc	判定
安山岩 1	古銅輝石安山岩	613	262	無害でない
安山岩 2	安山岩	660	178	無害でない
安山岩 3	古銅輝石安山岩	308	137	無害でない
安山岩 4	輝石安山岩	588	222	無害でない
チャート A	チャート	118	51	無害でない
チャート B	チャート	56	47	無害でない
チャート C	粘板岩質チャート	98	79	無害でない
チャート D	チャート	109	53	無害でない
チャート E	チャート	222	37	無害でない
花崗閃緑岩	花崗閃緑岩	17	52	無害

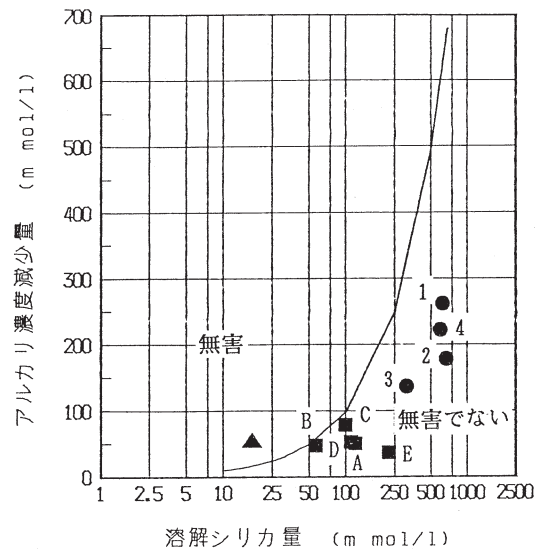


図1 化学法による判定図

* 三菱マテリアル(株)セメント研究所セメント研究部 (〒330 埼玉県大宮市北袋町1-297),

**三菱マテリアル(株)セメント研究所副所長

3 アルカリの形態とNa, Kによる膨張効果

JIS A 5308の附属書8では、 Na_2O 換算のアルカリ量(以後「アルカリ量」と略記)で $0.65 \pm 0.05\%$ 、 $Na_2O:K_2O=1:2 \pm 0.5$ の普通ポルトランドセメントにアルカリ量がセメントの1.2%になるようにNaOHを加えてモルタルバーをつくることになっている。これは、建設総合技術開発プロジェクトでの“同一アルカリ添加量ではNaOHの方が、KOHより大きな膨張量を示す”⁽¹⁾という結果を受けて、安全サイドでの判定になるよう定められたものである。そこでは、添加アルカリの種類による影響は考慮されてはいるが、クリンカー中に存在しているアルカリの影響と添加アルカリの影響の関係については、検討されていない。さらに、クリンカー中のNaとKは、種々の形で存在することから⁽²⁾、添加アルカリ以上に複雑な作用をすると考えられる。

そこで、クリンカー中のアルカリと添加アルカリの違い及びクリンカー中のNaとKの影響について調べた。

3.1 アルカリの形態の影響

Na_2O 換算で1.20%の Na_2O または K_2O を単独に含むクリンカーからつくったセメント、並びにアルカリを含まないセメントにアルカリ量で1.20%になるようにNaOHまたはKOHを添加したものを使用した。骨材の20%に、安山岩1を使用した。

図2に、同一アルカリ量における水酸化アルカリとクリンカー中のアルカリによる膨張量の推移の違いを示す。

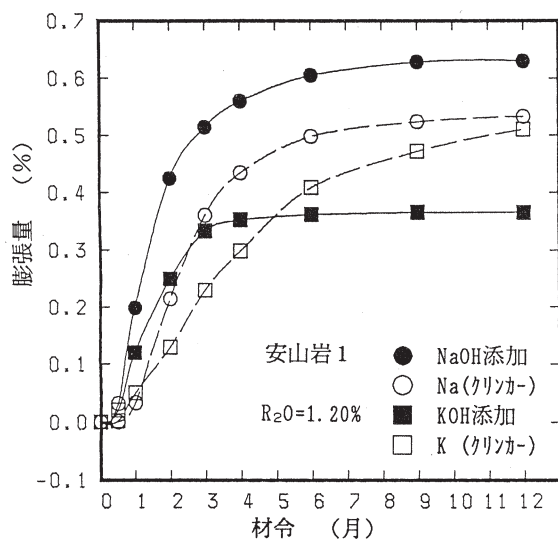


図2 水酸化アルカリとクリンカー中のアルカリの影響

4ヶ月までは、NaとKのいずれの場合も、クリンカー中のアルカリに比べ、水酸化アルカリを添加したモルタルの膨張量が大きい。しかし、6ヶ月以降は、アルカリの形態が違ふときの膨張量は、アルカリの種類によって異なっている。すなわち、Naの場合には、水酸化アルカリの方が大きな膨張量を示しているが、Kの場合には、逆に水酸化アルカリでの膨張量が小さくなっている。

3.2 クリンカー中のNaとKの影響

Na_2O 換算で1.20%並びに1.46%の Na_2O または K_2O を単独に含むクリンカーからつくった4種類のセメントを用いて試験を行なった。反応性骨材には安山岩1を用い、その混入率を全骨材の20%と40%の2通りとした。

図3、4に反応性骨材混入率20%及び40%でのクリンカー中のアルカリの種類による膨張量の違いを示す。

これによると、材令の経過に伴って、NaとKの違いは少なくなっているが、材令6ヶ月の時点で比べてみると、反応性骨材混入率20%のアルカリ量1.46%を除いて、KよりNaの方が著しく大きな膨張量を示している。

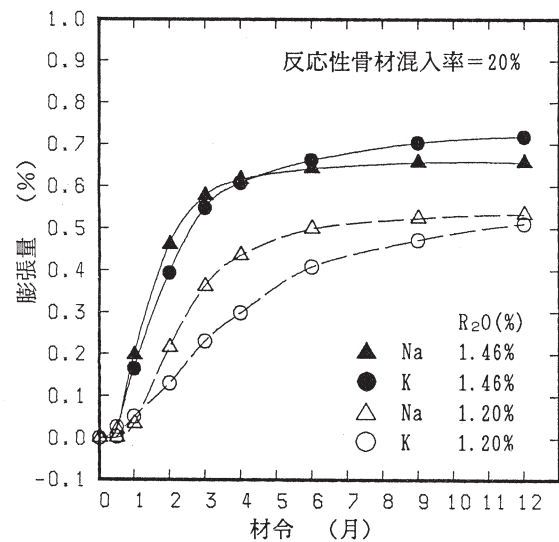


図3 クリンカー中のNaとKの影響

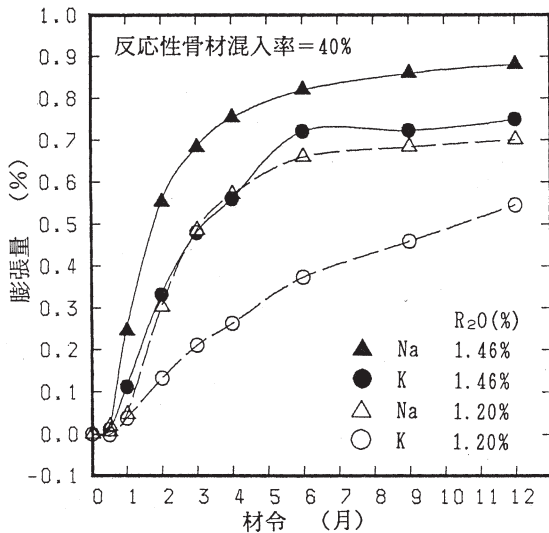


図4 クリンカー中のNaとKの影響

以上のことから、アルカリ量の低いセメントにNaOHを添加するJIS法は、同一アルカリ量で大きな膨張量を示すことになり、安全サイドでの判定となることが確認された。しかし、使用するセメントのNaとKの割合に関しては、Naの多いセメントを使用した方が大きな膨張量になることから、より安全サイドで判定しようとするならば、使用セメントのアルカリには、KよりもむしろNaの多いセメントを使用すべきである。

4 ペシマム現象が判定に及ぼす影響

反応性骨材混入率を変え、ペシマムを考慮したモルタルバー試験の実施は、ASTM C 289の解説や建設省の暫定案の適用範囲で記されている。しかし、ペシマム現象に関する報告の多くは、火山岩系骨材についてであり、建設省総合技術開発プロジェクトでも安山岩での検討に終始している。

そこで、反応性骨材の岩質を火山岩だけでなく、堆積岩(チャート)にまで拡大して、ペシマムの考慮の必要性を調べた。

反応性骨材として安山岩1, 2, 3とチャートB, C, D, Eを使用し、無害骨材として花崗閃緑岩を使用した。アルカリ量1.11%の普通ポルトランドセメントを用い、アルカリ量1.38%及び1.50%になるようにセメントのNa/K比でNaOHとKOHを添加した。

3種類の安山岩と無害骨材を組合わせて、反応性骨材の混入率を変化させたモルタルバーの12ヶ月の膨張量を図5に示す。安山岩1は20%, 安山岩2は30%, 安山岩3は60%混入でペシマム現象を示しているが、3種ともペシマム量以外でも有害な膨張を示している。

また、火山岩の場合には、アルカリ量1.2%に調整したモルタルバー試験で、ペシマム量だけで有害(材令6ヶ月で0.1%以上の膨張量)と判定された例はないと河野も報告⁽³⁾している。

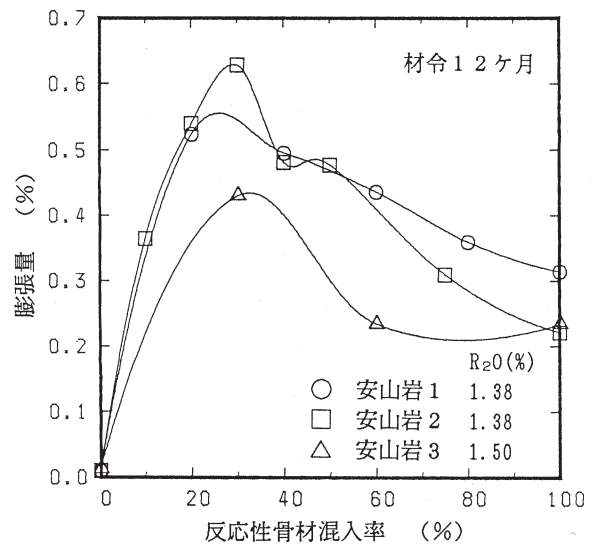


図5 安山岩におけるペシマム現象

以上のことより、JIS法のアルカリ量1.2%では、全量反応性骨材を使用しても、火山岩系骨材には十分対応できるが、チャート（堆積岩）に関しては、判定を誤る可能性もあるので、化学法の結果（特に、Rcの値）を十分活用し、ベシマムを考慮した配合で試験を行うことが必要である。

5 モルタルバー法の判定期間の検討

JIS A 5308のモルタルバー法及び現在のASTM C 227では、材令6ヶ月で0.1%以上の膨張量を示すものを有害であると判断している。JIS法での膨張量が0.1%以上である根拠は、建設総合技術開発プロジェクトにおいて0.1%以上の膨張量でひびわれが確認され、それ以下ではひびわれの確認ができなかったことである。モルタルバー法の判断の基準である0.1%の膨張量が、ひびわれの有無で決定されているということは、本来、材令にかかわらず、0.1%以上の膨張量を示す骨材は、潜在的なアルカリシリカ反応性を有すると判断しなければならない。しかし、土木研究所の試験で、アルカリシリカ反応の問題が生じた国産の骨材では全て、6ヶ月で0.1%以上の膨張量を示したことから、6ヶ月という判定期間が設定されている。

そこで、岩質の異なる火山岩系骨材（安山岩）と堆積岩系骨材（チャート）を用いて、この判定期間の妥当性を調べた。

反応性骨材に、安山岩1、2、3とチャートB、C、Eを用いてモルタルバー膨張量の経時変化を測定した。使用セメントはアルカリ量1.11%の普通ポルトランドセメントで、NaOHとKOHをセメントのNa/K比で添加して、アルカリ量を調整した。試験水準を表2に示す。

表2 試験水準

骨材の種類	セメントのアルカリ量(Na ₂ O換算)%	反応性骨材混入量(%)
安山岩1	1.38	20
安山岩2	1.38	30
安山岩3	1.50	60
チャートB	1.50	100
チャートC	1.50	100
チャートE	1.11	100

図9に、安山岩またはチャートでつくったモルタルバーの材令12ヶ月までの膨張量の推移を示す。

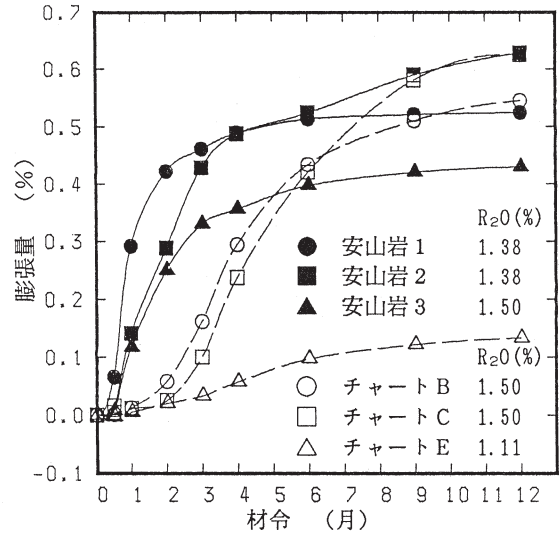


図9 モルタルバーの膨張量の推移

安山岩の場合には、膨張は初期から大きく、材令6ヶ月の時点で収束状態になる。一方、チャートを使用した場合には、初期の膨張速度は小さいが、その後、膨張が始まるとその速度は増大し、長期にわたって継続する。このように、安山岩とチャートでは膨張挙動に違いがある。

そこで、膨張が長期間継続するチャートで、モルタルバー法の6ヶ月の判定に問題が生じた例を挙げてみる。チャートEでは材令3ヶ月の膨張量が0.03%、材令6ヶ月で0.09%であるから、この骨材は無害と判定される。しかし、材令6ヶ月以降も膨張量は増大して、材令12ヶ月では0.13%の膨張量に達している。したがって、チャートEは、長期的には有害な膨張を生じさせる可能性があり、材令6ヶ月での判定は尚早と考えるべきである。

以上のことから、モルタルバー法における材令6ヶ月での判定は、短期間で膨張が収束する安山岩では妥当であるが、膨張が長期間継続するチャートでは、さらに長期の検討が必要となる。岩質によってこのような違いがあるから、長期の判定期間を要する骨材であるかどうかを見極めるには、岩石学的検査が有効と考えられる。

図6に、チャートを使用した場合の反応性骨材混入率と膨張量との関係を示す。チャートCでは弱いベシマム現象が認められるが、全量反応性骨材を使用した場合でもベシマム量の膨張量と大差は無い。一般に、ベシマム量は、アルカリ量が高いと反応性骨材混入率の高い方へシフトする傾向がある。従って、ここでのアルカリ量を1.5%より少なくして、1.2%とした場合には、ベシマム量は低混入率へシフトして、全量反応性骨材を使用したモルタルの膨張量が減少し、無害と判定する可能性もある。

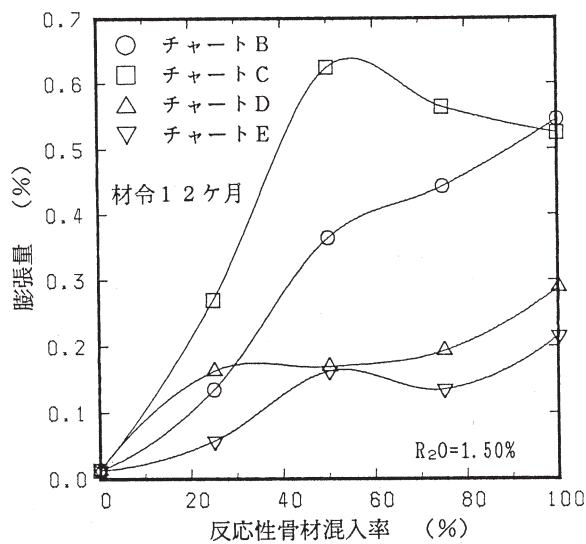


図6 チャートにおけるベシマム現象

また、森野は、同様の試験をアルカリ量1.2%で行なっている。そこでは、ベシマム領域のみで有害と判定されるチャート質骨材があることが報告されている(図7)⁽⁴⁾。このようなチャート質骨材は、アルカリシリカ反応の潜在反応性を有するにもかかわらず、全量使用で無害と判断される恐れがあり、ベシマム量の考慮が必要になる。

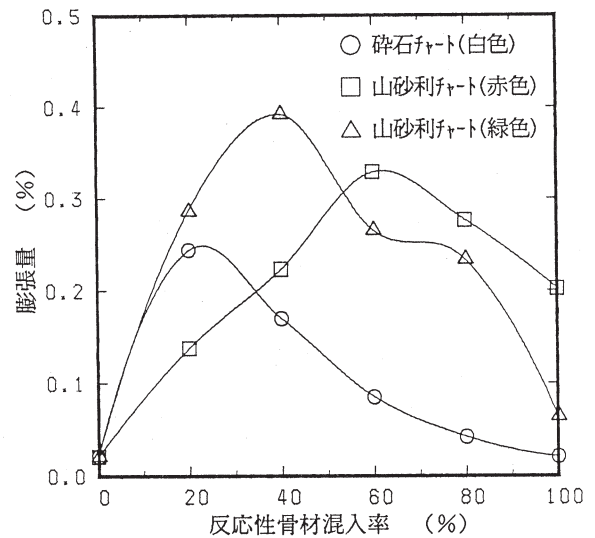


図7 チャートにおけるベシマム現象⁽⁴⁾
(森野氏データ)

次に、ベシマム現象を有する骨材の見極め方法について調べた。

Mielenzは、ベシマム量と化学法におけるアルカリ濃度減少量(Rc)の関連性を検討し、Rcの増大に伴って低いベシマム量を示すことを報告している⁽⁵⁾。そこで、今回の試験結果と森野の結果から、図8にRcとベシマム量をプロットした。この図は、Mielenzの報告を支持するもので、特に、Rcが100(m mol/l)以上の大きな値を示すチャート質骨材では、モルタルバー法でのベシマム量の考慮が必要になる。

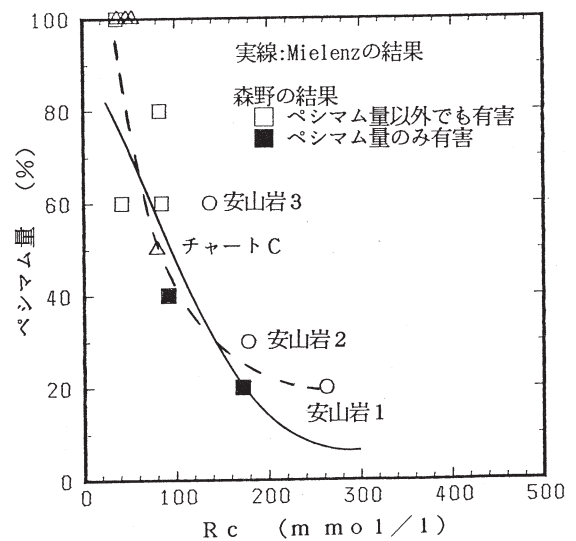


図8 アルカリ濃度減少量とベシマム量との関係

6 モルタルバーとコンクリートの関連性

JISのモルタルバー法は、骨材の潜在反応性を評価する方法であって、その骨材を使ったコンクリートの膨張量やそれに伴う劣化度を推定ものではない。また、モルタルバー法で規定されているセメントのアルカリ量1.2%をコンクリートの単位体積あたりのアルカリ量に換算すると、6~7kg/m³になる。これは、現在流通しているセメントのアルカリ量を考慮すれば、一般的な配合では考えられない程の高アルカリコンクリートに相当する。

このようなモルタルバーの挙動が実際のコンクリートにどう関連するかを把握することは、モルタルバー法の結果を十分に活用する上からも重要なことである。

そこで、同一骨材を使って作製したモルタルバーとコンクリートバーで有害な膨張を生じるのに必要なアルカリ量（以後「限界アルカリ量」と略記）の違いについて調べた。

反応性骨材は、安山岩1、4とチャートB、Dを、モルタルバーの骨材とコンクリートの粗骨材に全量使用した。コンクリートの配合は、単位粗骨材量を一定にして、単位セメント量を変化させ、目標スランプ12cm、目標空気量4%になるように水量を調整した。供試体寸法は10×10×40cmである。表3に試験水準を示す。

表3 試験水準

	骨材の種類	総アルカリ量(kg/m ³)
モルタルバー	安山岩1	3.3 4.4 6.1 7.6
コンクリートバー		2.1 2.8 3.9 4.8 7.0
モルタルバー	安山岩4	3.1 4.1 5.1 6.0
コンクリートバー		1.8 2.3 2.9 4.4 5.5
モルタルバー	チャートB	6.1 8.3
コンクリートバー		6.1 7.2
モルタルバー	チャートD	6.1 8.3
コンクリートバー		5.6 6.8 *

* (社)セメント協会・コンクリート専門委員会F-42から引用した。

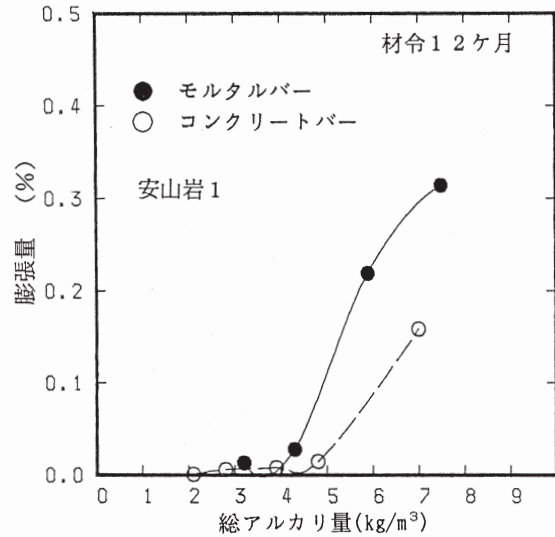


図10 モルタルとコンクリートの限界アルカリ量

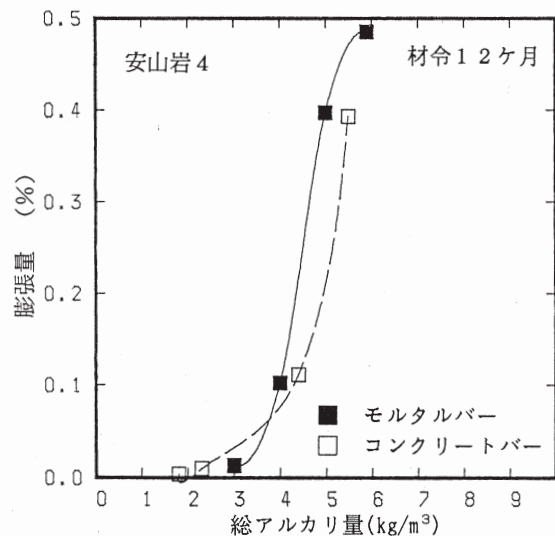


図11 モルタルとコンクリートの限界アルカリ量

図10、11に、安山岩骨材を使用したモルタル及びコンクリートの材令12ヶ月における膨張量を示す。

安山岩1の場合には、コンクリートに比べモルタルの方が若干低いアルカリ領域で膨張しているものの、両者とも概ね4~5kg/m³に限界アルカリ量が存在するといえる。安山岩4の場合には、総アルカリ量（単位体積当りのアルカリ量）に対する膨張挙動はほぼ等しく、両者の限界アルカリ量は3~4kg/m³に存在する。

また、岸谷は、火山岩を用いた同様の試験においてモルタルで4kg/m³、コンクリートで5kg/m³とモルタルの方が多少、少ないアルカリ量で膨張すると報告している⁽⁶⁾。

図12, 13に、チャート骨材を使用した場合の同一総アルカリ量におけるモルタルとコンクリートの膨張量の材令に伴う推移を示す。

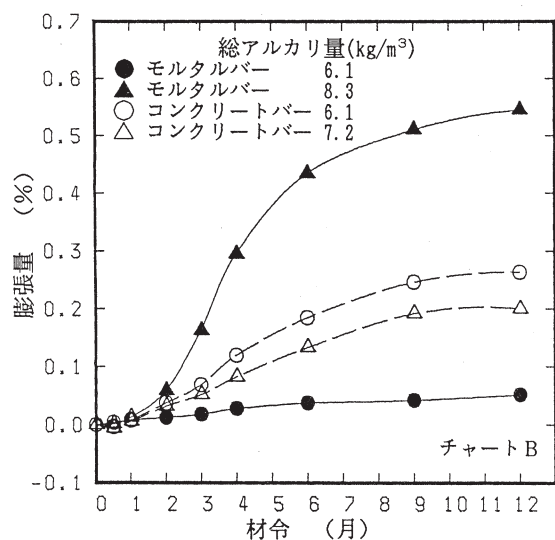


図12 モルタルとコンクリートの膨張量の推移

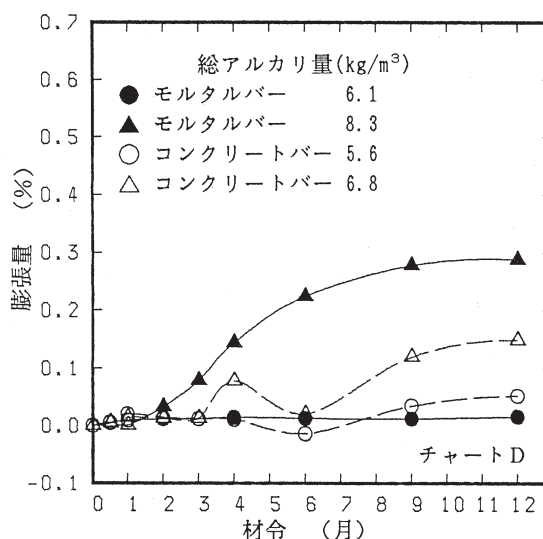


図13 モルタルとコンクリートの膨張量の推移

チャートBでは、総アルカリ量6.1kg/m³のモルタルは顕著な膨張を示していないが、コンクリートでは材令12ヶ月で0.2%以上の膨張量に達している。また、図13に示すチャートDでも、総アルカリ量6.1kg/m³のモルタルは、有害な膨張を示していないが、コンクリートは、総アルカリ量5.6kg/m³でも材令12ヶ月で0.052%の膨張量を示し、総アルカリ量6.8kg/m³では0.149%の膨張量を示している。よって、チャートB, Dを用いたモルタルの限界アルカリ量は、6.1kg/m³以下で、コンクリートの限界アルカリ量はそれ以上に存在することが分かる。

このようにモルタルの限界アルカリ量以下の総アルカリ量で、コンクリートが有害な膨張を生じた事例は、イギリスのフリントを含む堆積岩でも報告されている⁽⁷⁾。しかし、この原因については骨材の粒径の差が起因していると言われている程度で明らかには分かっていない⁽⁸⁾。

以上のことより、安山岩の場合には、モルタルとコンクリートの限界アルカリ量は等しいか、もしくはモルタルの方が、若干低い総アルカリ量で膨張し、チャートの場合には逆に、コンクリートの方が、低い総アルカリ量で膨張するものがあることが分かる。

このような理由から、安山岩の場合、モルタルバー法で有害と判定された骨材でも、通常のコンクリートでは被害を生じないことがある。一方、チャート質骨材の場合、モルタルバー法で無害と判定された骨材でも、高アルカリ条件では、有害な膨張を生じる危険性がある。

7 まとめ

本報告では、JISまたはASTMのモルタルバー法における判定の問題を中心に、いくつかの点を調べてみた。要点は以下のものである。

- ①セメントに含まれるアルカリに比べ、NaOHは膨張促進効果が大きく、アルカリ量の低いセメントにNaOHを添加するJIS法は安全サイドで判定していることになる。
- ②セメント中のNaは、Kよりも膨張促進効果が大きく、JIS法のKの多いセメントよりもNaの多いセメントを用いた方が、より安全サイドの判定ができる。
- ③アルカリ量1.2%のJIS法では、火山岩系骨材の場合、全量反応性骨材を使用した配合で判断可能であるが、堆積岩系骨材、特に、アルカリ濃度減少量(Rc)が大きいものについては、ベシマムを考慮した配合で試験を行なう必要がある。
- ④6ヶ月の判定期間は、火山岩系骨材では妥当であるが、堆積岩系骨材では不十分で、長期での判定が必要なものがある。膨張速度は、岩質によって異なるので、判定期間の判断には、岩石学的検査が有効な手段となる。
- ⑤モルタルバーとコンクリートの関連性では、安山岩の場合、モルタルとコンクリートの限界アルカリ量は等しいか、もしくはモルタルの方が、若干低い総アルカリ量で膨張する。一方、チャートの場合には逆に、コンクリートの方が、低い総アルカリ量で膨張するものがある。

以上のように、JISまたはASTMのモルタルバー法には、検討すべき箇所が残されてはいるものの、実際のコンクリートに想定すると安全サイドでの判定をしていることになる。骨材の潜在反応性をより正確に判定する為には、化学法の結果や岩石学的調査結果を活用したモルタルバー試験を行なうことが重要である。

8 参考文献

- (1)建設総合技術開発プロジェクト、コンクリートの耐久性技術の開発報告書第1報,184,(1988)
- (2)G.Yamaguchi et al.:5th International Symposium on the Chemistry of Cement,part I,181,(1968)
- (3)河野他:第8回コンクリート工学年次講演会論文集,205,(1986)
- (4)森野他:第10回コンクリート工学年次講演会論文集717,(1988)
- (5)R.C.Mielenz et al.:Journal of the American Concrete Institute,vol.19, No.3,193,(1947)
- (6)岸谷他:第8回コンクリート工学年次講演会論文集,129,(1985)
- (7)P.J.Nixon:5th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Copenhagen, paper,329,(1983)
- (8)P.E.Grataan-Bellew:National Research Council Canada Division of Building Research,[723],227