

論文

[1181] 過飽和塩水浸漬によるモルタルバーのアルカリシリカ反応性試験法

二村 誠二^{*1}

1. まえがき

アルカリシリカ反応には、細孔溶液中の水酸化アルカリと骨材中の反応性シリカとの「化学反応」過程と、その反応によって生成されたアルカリシリカゲルの「吸水膨張」過程という2つの過程が存在する[1]。この2つの過程が複雑に影響するため、いくつかの「ペシマム値」が存在することになる。これは骨材に含有される反応性鉱物の質的要因（種類・形態）と量的要因（含有量・構成割合）などによっても大きく異なるため、骨材のアルカリシリカ反応性を的確に判定する試験法が望まれる。

わが国では、コンクリート用骨材のアルカリシリカ反応性試験法として、JIS A 5308の化学法が一般的に用いられている。しかし、化学法で「無害でない」と判定されても、モルタルバー法では「無害」と判定される例も多いようであり、判定結果の信頼性には未だ問題がある。また、JIS A 5308のモルタルバー法は、信頼性は高いものの、試験体の保存状態や取扱いに起因するバラツキなどが認められ、改善すべき点もある。いずれにしても、アルカリシリカ反応には上述のような2つの過程が存在することから、骨材の有害反応性試験法としてはモルタルバー法（またはコンクリートバー法）を基礎とした試験法が望ましいと言える。これに対応する試験法がASTMやJISのモルタルバー法と言えるが、判定結果を得るまでに6ヶ月という長期間を要することから、モルタルバーによる迅速試験法の必要性が高まっている。

モルタルバーを用いた迅速試験法として、オートクレーブ法[2]によるものがいくつか提案され、JIS A 1804「コンクリート生産管理用試験方法—骨材のアルカリシリカ反応性試験方法（迅速法）」として制定された。しかし、オートクレーブ法は高温・高圧力下での試験のため、セメントと骨材の組み合わせによっては、通常的环境下では起こり得ない反応を生じる可能性もあり、よりの確かかつ簡便に判定できる試験法の検討が必要と思われる。

本報告は、過飽和塩化ナトリウム水溶液中にモルタルバーを浸漬した場合の膨張特性について実験し、それに基づいた「モルタルバーによる骨材のアルカリシリカ反応性試験方法（迅速法）」としての可能性について検討したものである。

2. 実験計画

モルタルバーをアルカリ溶液中に浸漬して促進膨張試験を行う場合、保存環境に対する影響要因としては①アルカリの種類、②アルカリ溶液の濃度、③保存温度が考えられる。今回の研究では、Chatterjiらの研究[3]を参考にして予備実験を行い、アルカリ化合物としては塩化ナトリウムを選定した。これは、塩化ナトリウムの膨張促進効果の大きさおよび取扱い作業の安全性を考慮したものである。また、アルカリ溶液の濃度としては過飽和水溶液とした。これは、促進効果を高めるためにはより高濃度のものが有利であること、反応に伴う環境溶液濃度が変化しないことを考慮して選定した。なお、保存温度については、アルカリ溶液の濃度条件がかなり過酷であることから、20・40・60℃の3条件について検討することとした。

*1 大阪工業大学講師 工学部建築学科 工修（正会員）

表-1 使用した骨材の性質

記号	骨材の種類	比重	吸水率 (%)	JIS化学法 (mM/l)			JISモルタルバー法 (%)			
				Sc	Rc	判定	13W	26W	判定	
反応性	T1	輝石安山岩碎石	2.50	2.21	437	135	D	0.19	0.22	D
	T2	輝石安山岩碎石	2.48	2.25	385	118	D	0.16	0.17	D
	T3	輝石安山岩碎石	2.41	2.17	741	216	D	0.14	0.16	D
	HR	輝石安山岩川砂利	2.28	5.75	364	66	D	0.03	0.03	I
	HW	輝石安山岩川砂利	2.38	4.34	696	80	D	0.04	0.04	I
	SS	玄武岩碎石	2.76	2.02	340	150	D	0.07	0.11	D
	YR	チャート碎石	2.53	1.90	289	259	D	0.13	0.14	D
非反応性	SR	チャート碎石	2.69	0.26	30	66	I	0.03	0.03	I
	KS	硬質砂岩碎石	2.63	0.46	37	81	I	0.03	0.03	I
	TT	硬質砂岩碎石	2.62	1.61	38	88	I	0.03	0.03	I
	NS	流紋岩碎石	2.61	0.73	48	69	I	0.02	0.03	I
	UN	流紋岩碎石	2.57	1.24	44	67	I	0.03	0.03	I
	KY	流紋岩碎石	2.62	0.48	42	46	I	0.02	0.03	I
	IS	流紋岩碎石	2.63	0.48	45	54	I	0.03	0.04	I
	YS	流紋岩碎石	2.52	1.94	152	85	D	0.02	0.03	I
	KT	流紋岩碎石	2.46	2.90	156	108	D	0.02	0.02	I
	FB	凝灰岩碎石	2.50	1.85	26	76	I	0.02	0.03	I
	YG	川砂	2.56	1.38	29	32	I	0.02	0.02	I
	NG	海砂	2.52	1.87	42	71	I	0.03	0.03	I
	HS	海砂	2.52	1.83	45	57	I	0.02	0.02	I

注) JIS化学法・モルタルバー法においてIは「無害」、Dは「無害でない」を示す。

2.1 使用材料

セメントはモルタルバー法用普通ポルトランドセメント (Na₂O eq=0.67%) を使用した。骨材は有害反応性骨材7種と阪神地区で一般に使用されている非反応性骨材13種を対象とした。使用した骨材の性質を、JIS A 5308「レディーミクストコンクリート」の附属書7(化学法)・附属書8(モルタルバー法)の試験結果を含めて、表-1に示す。

2.2 供試体の作製および試験方法

供試体の作製は JISモルタルバー法に準じて行った。モルタル打設後22~24時間で脱型し、20℃の過飽和塩水に2時間浸漬してから、基準となる長さ・質量・1次共振たわみ周波数を測定した。その後、20・40・60℃の過飽和塩水中に浸漬し、材齢3日・1~8週において測定2時間前に20℃の過飽和塩水中に移して温度を安定させ、各測定を行った。

3. 実験結果およびその検討

3.1 膨張量について

過飽和塩水浸漬法によるモルタルバーの材齢1および2週における膨張量測定結果を表-2に示す。なお、20℃保存における供試体全ての膨張量は極めて小さかったので、ここでは省略した。また、モルタルバーの膨張量と材齢との関係例を図-1(a)~(e)に示す。これによれば、

(1) T1は阪神地区で大きな被害の原因となった輝石安山岩碎石の中の1つである。粉末X線回折による有害反応性鉱物の同定では、クリストバライトと火山ハリの存在が認められる。保存温度20℃では、材齢8週でもほとんど膨張を示さない。しかし、保存温度が40℃、60℃と高くなるに従って、その膨張量も急激に大きくなる。特に60℃では、材齢1週までの間に1.0%を越える膨張を示し、材齢6週でほぼ膨張は停止する[図-1(a)]。同様の傾向はHR・HWにおい

表-2 過飽和塩水浸漬法によるモルタルバーの膨張量測定結果 (%)

記号	60℃		40℃		
	1W	2W	1W	2W	
反応性	T 1	1.100	1.393	0.098	0.494
	T 2	1.320	1.584	0.545	0.873
	T 3	1.263	1.538	0.552	0.814
	HR	0.282	0.710	0.016	0.012
	HW*	0.566	0.740	0.046	0.321
	SS	0.476	0.593	0.008	0.166
	YR	0.131	0.551	0.020	0.011
非反応性	SR	0.031	0.068	0.013	-0.010
	KS	0.011	0.053	0.017	0.021
	TT	0.020	0.021	0.029	0.029
	NS	0.030	0.044	0.010	0.015
	UN	0.045	0.056	0.017	0.024
	KY	0.022	0.030	0.010	0.010
	IS	0.031	0.028	0.001	0.010
	YS	0.003	0.032	-0.024	-0.008
	KT	-0.009	-0.006	0.014	0.008
	FB	-0.014	0.012	0.010	0.003
	YG	0.019	0.017	0.015	0.010
NG	0.019	0.037	0.023	0.022	
HS	0.031	0.038	0.012	0.041	

とも言えるが、これらは骨材中に空隙が多いため、材齢初期における膨張は幾分遅れる。

(2) SSは香川県産玄武岩砕石であり、反応性鉱物としては火山ハリで代表される。トリジマイトやクリストバライトといった極めて反応性の高いシリカ鉱物と比較すると、火山ハリによるアルカリシリカ反応は、いくぶん緩やかに進行するようである [図-1(b)]。

(3) YRは岐阜県産のチャート砕石である。温度に対する依存性はT1の輝石安山岩砕石と同様であるが、膨張量はかなり小さく、60℃保存でも0.6%程度である。これは、反応性シリカ鉱物が潜晶質石英であることから、アルカリシリカ反応はかなり緩やかに進行し、材齢4週以降において膨張量が大きくなる傾向を示している [図-1(c)]。このことは、反応性シリカ鉱物として潜晶質石英が対象となる際には、アルカリシリカ反応による膨張はかなり緩やかになるので、迅速試験法としては、保存温度を60℃程度まで上げる必要があることを示唆している。

なお、SRは滋賀県産チャート砕石であるが、この骨材はJIS化学法やモルタルバー法で「無害でない」となったり「無害」となるなど極めて不安定である。60℃保存においてのみ、材齢2週から大きな伸びを示し、8週で0.3%を越える膨張を示している。しかし、この骨材を用いたコンクリート構造物で、アルカリシリカ反応による劣化事故が起きたとの報告は未だない。

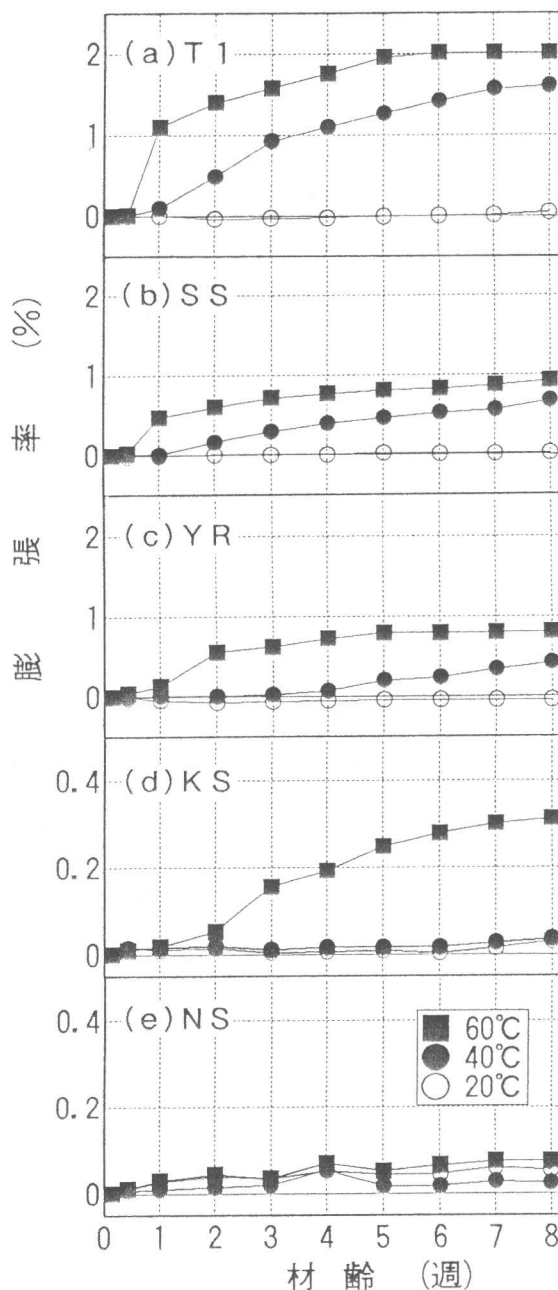


図-1 膨張量と材齢との関係例

(4) K Sは兵庫県産硬質砂岩砕石であり、JIS試験法では「無害」の骨材である。顕微鏡下および粉末X線回折によれば、潜晶質石英が有害鉱物であると同定された。S R同様、60℃保存においてのみ、材齢2週あたりから大きく膨張し、8週で0.3%を越える値を示している〔図-1(d)〕。鉱物のキャラクターによって、高温でのみ膨張し、かつ、時間的に遅れて膨張が始まるという興味深い結果となった。なお、この骨材も使用に伴う劣化事故の報告はない。

(5) N Sは兵庫県産流紋岩砕石であり、極めて広い範囲で分布する岩石である。JIS試験法では常に「無害」のものである。これは、全ての促進条件においても全く膨張を示さない〔図-1(e)〕。このような結果は、他の一般的な骨材についても適用できることである。

(6) 次に、JIS化学法で「無害でない」となるが、モルタルバー法では「無害」となる骨材について検討してみる。K TおよびY Sの流紋岩砕石がこれに対応する。粉末X線回折法による同定によれば、バックグランドが高いことから、有害鉱物としてはいずれも火山ハリを含有するものである。しかし、含有量はそれほど多くないために、JIS化学法ではScの値が大きくなって「無害でない」となるが、モルタルバー法では「無害」となったものと思われる。

3.2 吸水量について

アルカリシリカ反応には「化学反応」過程と「吸水膨張」過程の2つの過程が存在するので、過飽和塩水溶液中に浸漬された供試体において、アルカリシリカゲルが生成されれば、大量に存在する環境水分を吸水して大きな膨張圧を与えるという「吸水膨張」過程の存在を確認する必要がある。図-2(a)~(e)に吸水量と材齢との関係例を示す。

(1) T 1の吸水量〔供試体1cm³中に吸水された量(cm³)の百分率〕と材齢との関係例を示したものが図-2(a)である。「化学反応」過程とそれに続く吸水の後に、モルタルバーの大きな「吸水膨張」過程が明確に認められる。そして、保存温度が高いほど、膨張量が大きいほど、吸水量は大きいようである。

このような傾向は、有害鉱物のキャラクターが異なる玄武岩やチャートにも認められることから、過飽和塩水浸漬法はモルタルバーによる骨材のアルカリシリカ反応性試験法(迅速法)として十分対応できるものと思われる。

(2) 過飽和塩水浸漬法において、全く膨張を示さなかったN Sの吸水量と材齢との関係を図-2(b)に示す。これによれば、保存温度が高くなるほど、モルタルバーの質量は小さくなる傾向を示すと言う、極めて興味深い結果が得られた。これは、保存温度が高くなるほど、主として、モルタル中の水酸化カルシウムが塩水中に溶出するために質量が小さくなるものと思われる。

(3) JIS試験法では「無害」であったが、60℃の過酷環境下で大きな膨張を示したS RおよびK Sは「保存温度60℃」で吸水膨潤性を示す。しかし、吸水量が小さいために、20および40℃

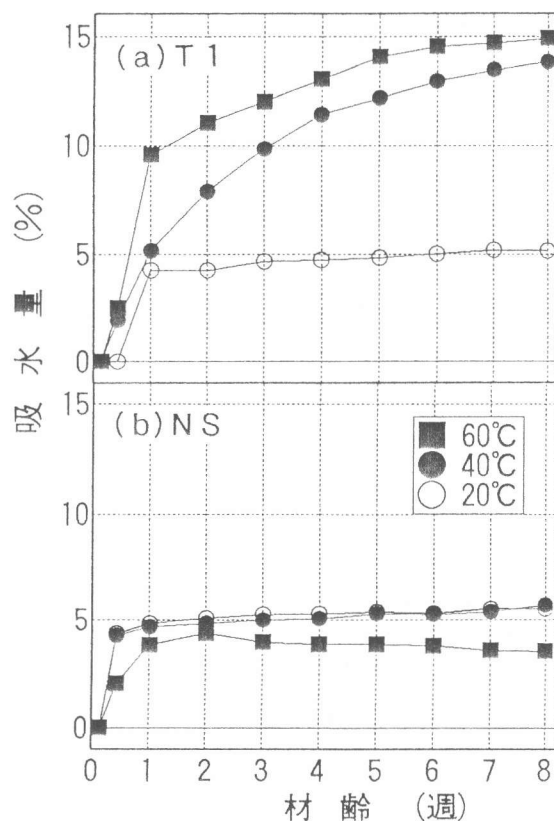


図-2 吸水量と材齢との関係例

保存供試体よりも質量は低下している。これは、材齢初期の段階から大きな膨張（0.40%以上）を示すもの以外、モルタルバーの質量は、吸水に伴って増加しないことを示唆している。

3.3 動弾性係数について

大きな膨張が生じると、モルタル中には微細なクラックが発生する。この結果、モルタルバーの動弾性係数は低下することになる。これらの測定例を図-3(a)~(b)に示す。

(1) 図-3(a)は大きな膨張を示したT1の測定例である。明らかに弾性係数の低下が認められ、モルタルとしての力学的性能低下を明確に示している。

(2) 図-3(b)は過飽和塩水浸漬法においても膨張を示さなかったNSモルタルバーの測定例である。このように、膨張しないものは材齢とともに動弾性係数も大きくなる傾向を示す。そして、保存温度の低いものほど動弾性係数は高い値を示す傾向が認められる。これは、セメントの水和作用に関する温度の影響と3.2(2)で述べたモルタルバーの質量低下の影響によるものと思われる。

(3) 60℃での保存環境下で大きな膨張を示したSRとKS骨材は、材齢2週以降において、膨張に伴う動弾性係数の急激な低下を示している。膨張開始時期が遅くても、0.05%以上の膨張を示すときには、動弾性係数は低下することが確認できた。

4. 過飽和塩水浸漬法における試験条件について

過飽和塩水浸漬法をコンクリート用骨材のアルカリシリカ反応性試験法として利用する場合、その試験条件をどの様に定めるか問題となる。そこで、モルタルバーの各種測定結果を参考にして、前提条件を以下のように定めることとした。すなわち、

- ①出来るだけ迅速に判定するためには、材齢初期において明確な膨張が確認できること。
- ②大きな膨張を示すモルタルバーは、「吸水膨張」過程による質量増加が確認できること。
- ③膨張にともなう動弾性係数の明確な低下が認められること。

この条件を用いると、過飽和塩水浸漬法による試験条件としては、

- ①保存温度は60℃とする。
- ②判定は1および2週のいずれかとする。
- ③有害膨張量は0.1%以上とする。

が適切な基準となる。以上で検討した結果に基づいて、モルタルバーの過飽和塩水浸漬法による骨材のアルカリシリカ反応性試験法（迅速法）のフローを示すと図-4のようになる。

これを適用すると、T1~T3、HR、HW、SS、YRは全て「無害でない」と判定される。JISモルタルバー法で「無害」と判定されたHR、HWが「無害でない」となることに疑問も生

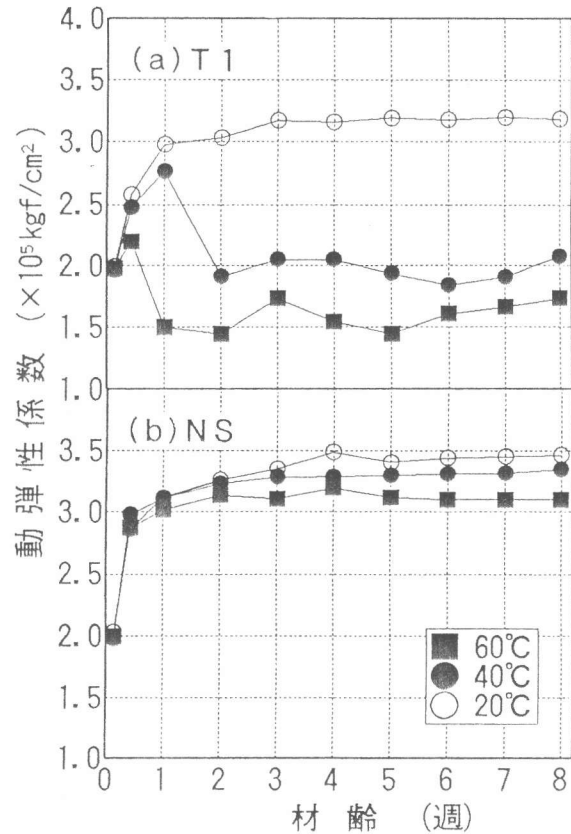


図-3 動弾性係数と材齢との関係例

じるが、この骨材は、村田ら[4] によって被害報告された皆生浜の砂利と起源を同じくするものであり、判定に問題はないと思われる。また、SR、KSは「無害」となるが、極めて過酷な環境でしか膨張しないことから容認できる。さらに、JIS化学法で「無害でない」とされたKTおよびYSはこの試験法で「無害」と判定された。これらの骨材を使用したコンクリート構造物で有害膨張による劣化事例が全く認められていないことから、「無害」と判定することに問題はないものと思われる。

なお、動弾性係数の低下率および吸水量の増加率による有害判定の基準を設けることは困難であるが、参考資料として記録することが望まれる。



図-4 過飽和塩水浸漬法のフロー図

5. むすび

過飽和塩化ナトリウム水溶液浸漬によるモルタルバーの「アルカリシリカ反応性試験方法（迅速法）」の可能性について検討した結果をまとめると次のようなことが言える。

- (1) 過飽和塩水浸漬によるモルタルバーの膨張量について検討した結果、有害鉱物のキャラクターの違いや含有量などによって膨張形態は異なるが、有害反応性骨材は試験材齢初期において明確な膨張が確認できる。
- (2) 大きな膨張を示すものは、モルタルバーの質量が増加し、生成されたアルカリシリカゲルの吸水膨潤性が認められる。
- (3) 大きな膨張を示したモルタルバーは、内部に生じたひび割れのため、動弾性係数の明確な低下が認められる。
- (4) 上記の測定結果に基づいて、過飽和塩水浸漬によるモルタルバーの「アルカリシリカ反応性試験方法（迅速法）」のフローは図-4に示すようなものとなる。
- (5) 動弾性係数の低下率や吸水量の増加率による有害判定の基準は明確には示せなかった。

〈 主な参考文献 〉

- 1) Diamond, S. Barneyback, R.S. and Struble, J.: On the Physics and Chemistry of Alkali-Silica Reaction, Proc. 5th Int. Conf. on AAR in Conc., Cape Town, S 252/22, 1981.
- 2) 例えば、田村博、星野善孝、斉藤広志：アルカリ骨材反応性の早期判定に関する一実験、セメント技術年報、Vol.38, pp.110-113, 1984.
- 3) Chatterji, S. Thaulow, N. and Jensen, A.D.: Studies of Alkali-Silica Reaction. Part 4. Effect of Different Alkali Salt Solutions on Expansion, Cem. and Conc. Res., Vol.17, No.5, pp.777-783, 1987.
- 4) 村田清逸、関 慎吾、藤木洋一：アルカリ骨材反応を起こしたコンクリートの一例、セメント・コンクリート、No.220, pp7-13, 1965.