

アルカリ骨材反応に関する実験（その5）

——アルカリ・シリカ反応のペシマム現象について——

喜田大三 千野裕之

Studies on Alkali-Aggregate Reaction (Part 5)

——Pessimum Phenomenon of Alkali-Silica Reaction——

Daizo Kita Hiroyuki Chino

Abstract

Expansion of mortar due to alkali-silica reaction may be greater if reactive aggregates are used together with non-reactive aggregates rather than if used alone. This is called a pessimum phenomenon. A few experiments on pessimum phenomena were conducted using eight deleterious or potentially deleterious aggregates according to alkali-silica reactivity tests (Chemical Method). (1) One of three kinds of deleterious aggregates and three of five kinds of potentially deleterious aggregates according to the Chemical Method showed pessimum phenomena. (2) Dissolved silica and reduction of alkalinity of mixed aggregates were greater than calculated for reactive aggregates alone, and the ratio of dissolved silica was higher than that of reduction of alkalinity. (3) Aggregates that showed pessimum phenomena needed much alkali in order to show deleterious expansion by the Mortar Bar Method. (4) It was surmised that aggregates producing pessimum phenomena are supplied with much alkali when mixed with non-reactive aggregates so that the reaction progresses and expansion of mortar is increased.

概 要

アルカリ・シリカ反応によるモルタルの膨張は、反応性骨材を単独で用いた場合よりも、無害な骨材を混合して用いた場合の方が大きくなることもあり、ペシマム現象といわれている。ここでは、骨材判定法の一つである化学法で有害あるいは潜在的有害な8種類の反応性骨材を用いて、ペシマム現象に関する2, 3の実験を行なった。(1) 化学法で有害な骨材3種のうち1種、潜在的有害な骨材5種のうち3種がペシマム現象を示した。(2) 反応性骨材と無害骨材の混合骨材による化学法では、シリカの溶出およびアルカリの消費は、ほとんどの場合、単独骨材の値から求めた計算値より大きく、その比率はシリカの溶出がアルカリの消費より大きかった。(3) ペシマム現象を示す骨材は、モルタルバー法で基準を超える膨張を示すのに多量のアルカリを必要とした。(4) ペシマム現象を示す骨材は、混合率を下げるとその骨材あたりのアルカリ供給量が増加し、単独の場合よりかえって反応が進み、膨張量が大きくなったと推察される。

1. まえがき

アルカリ・シリカ反応に関する骨材判定試験として、建設省暫定案による化学法およびモルタルバー法が広く実施されている。このうち、モルタルバー法は所定の粒度に調製した骨材を用いたモルタルの促進膨張試験によって、骨材の有害性を判定している。また、化学法は所定濃度のアルカリで骨材を加熱処理したときに溶出するシリカの量とこのとき消費されるアルカリ量すなわちア

ルカリ濃度減少量から図-1に示す判定図によって骨材の有害性を判定している。筆者らは、既報¹⁾でこのうちアルカリ濃度減少量に関する因子を明らかにし、骨材の岩種によるこれらの因子の影響度の違いを明らかにした。

さて、同図で、シリカ溶出量、アルカリ濃度減少量の両者が大きい骨材は潜在的有害と判定される。この領域の骨材には、無害な骨材と混合して割合を下げると単独骨材の場合よりかえって膨張量が大きくなるものがある。

化学法では、この領域の骨材は不活性な骨材との混合

率が5:95~50:50の組合せによるモルタルバー法を行なって無害性が示されなければ有害であるとしている。

このように、無害骨材との混合によって、かえってモルタルの膨張量が大きくなる現象はペシマム（最悪な割合）現象といわれており、アルカリ・シリカ反応に特有な現象である。この現象については多くの報告がなされており(例えば文献2)、筆者らも、ある種の輝石安山岩がこの現象を示すことを報告した³⁾。ペシマム現象は、骨材判定を分かりにくいものになっているが、その機構はまだ十分に解明されていない。また、コンクリートには2種類以上の粗骨材を混合して用いることがよくあるので、この現象によって骨材判定を誤る可能性もある。

ここでは、化学法で潜在的有害および有害と判定された骨材を無害な骨材に各種割合で混合し、モルタルバー法により、ペシマム現象を観察した。つぎに、これら混合骨材について化学法を行ない、両試験の関連性を調べた。さらに、アルカリ量をかえたモルタルバー法を行なうなどして、ペシマム現象が発生する機構について検討を行なった。

2. 実験概要

2.1. 供試骨材

化学法で潜在的有害な骨材5種類、有害な骨材3種類を用いた。岩種は輝石安山岩6種類(A-1~A-6)、玄武岩1種類(B)、チャート類1種類(C)である。混合して用いる骨材は、アルカリ濃度減少量が小さくて無害な深成岩類1種類(P)である。供試骨材の岩種、含有鉱物・化学法の試験結果を表-1および図-1に示す。

2.2. 実験方法

2.2.1. モルタルバー法 潜在的有害あるいは有害な骨材(以下、反応性骨材という)を無害な骨材に混合し、建設省暫定案に準拠したモルタルバー法を実施した。

混合骨材中に占める反応性骨材の混合率は0%、30%、

番号	岩種	含有 鉱物	化学法の判定結果
A-1	輝石安山岩	火山ガラス, トリディマイト, クリストバライト, 斜長石, 輝石, モンモリロナイト	潜在的有害
A-2	"	火山ガラス, クリストバライト, 石英, 斜長石, 輝石, モンモリロナイト	潜在的有害
A-3	"	火山ガラス, 斜長石, 輝石	潜在的有害
A-4	"	火山ガラス, 斜長石, 輝石	潜在的有害
A-5	"	火山ガラス, 斜長石, 輝石, かんらん石	有害
A-6	"	火山ガラス, 斜長石, 輝石	有害
B	かんらん石玄武岩	火山ガラス, かんらん石, 普通輝石, 斜長石, モンモリロナイト	潜在的有害
C	チャート	石英, 玉髄	有害
P	石英斑岩	石英, 斜長石, アルカリ長石, 輝石, 黒雲母, 方解石, 緑泥石	無害

表-1 骨材の岩種、含有鉱物および化学法判定結果

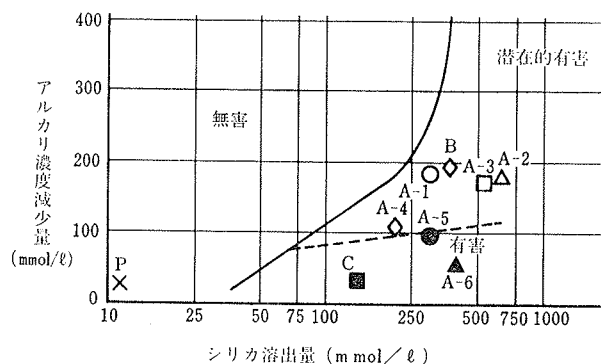


図-1 化学法による判定結果

50%, 100%とした。セメントはアルカリ量0.88% (Na₂Oとして、以下同じ)の普通ポルトランドセメントを用い、これにNaOHを添加してセメントあたり1.2%とした。

これとは別に、単独の反応性骨材それぞれについて、アルカリ量の異なるモルタルバー法を実施した。セメントは上記と同種であり、NaOHを添加して、セメントあたり0.88%、1.2%、1.6%とした。

2.2.2. 化学法 反応性骨材と無害骨材の混合骨材について、建設省暫定案に準拠した化学法を実施した。混合率は0%、30%、50%、100%とした。

3. 実験結果と考察

3.1. 混合骨材によるモルタルバー法

各混合骨材の混合率に対する材令6箇月における膨張率を図-2に示した。化学法で潜在的有害な5種類(A-1

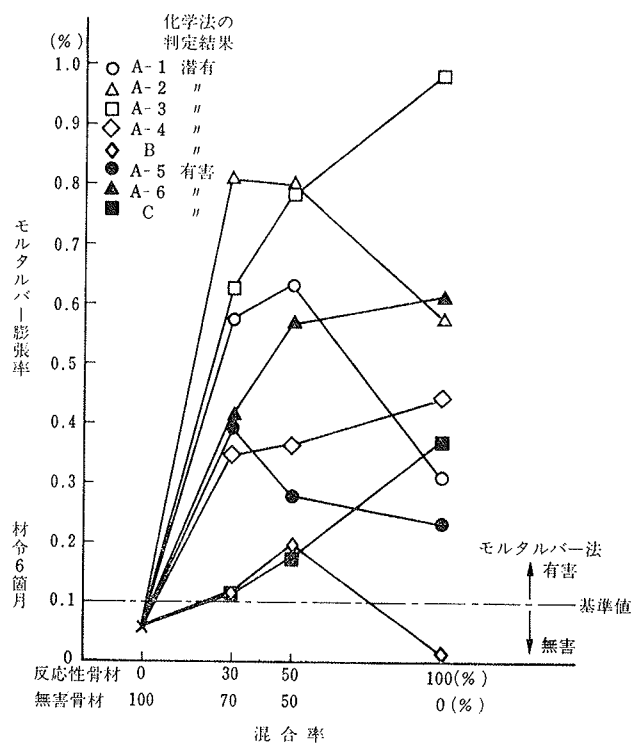


図-2 骨材の混合率とモルタル膨張率の関係

～A-4, B) のうち, B以外の4種類は単独でも0.1%の基準値を超える有害な膨張を示し, そのうち2種類はペシマム現象を示した。Bは単独で無害であるが, ペシマム現象のため有害な膨張を示した。化学法で有害な3種類(A-5, A-6, C)はすべて単独で有害な膨張を示し, そのうちA-5はペシマム現象を示した。

以上の結果, アルカリ濃度減少量が大きく潜在的有害な骨材ではペシマム現象を示す場合が多かった。潜在的有害な骨材は, 単独では膨張率の比較的小さい場合があり, 混合骨材のペシマム条件で無害性が立証されねば有害であるとされており, 実験結果はこれと矛盾しない。

3.2. 混合骨材による化学法

図-3に各種混合骨材の化学法による試験結果を示す。同図では, 反応性骨材の混合率を100%, 50%, 30%, 0%と低下させたときの値を結んで示している。

潜在的有害な骨材は, 混合率が低下するのに伴って潜在的有害域から有害域を経由して無害域に移行する傾向が認められた。アルカリ濃度減少量とも混合率の低下に伴い値が減少した。また, 有害な骨材では, シリカ溶出量は混合率の低下に伴って減少するが, アルカリ濃度減少量は減少するものとほとんど変わらないものがあった。

ここで, 単独骨材のシリカ溶出量あるいはアルカリ濃度減少量を用いて, 混合骨材あたりに想定される計算値を算出し, この計算値に対する測定値を図-4に

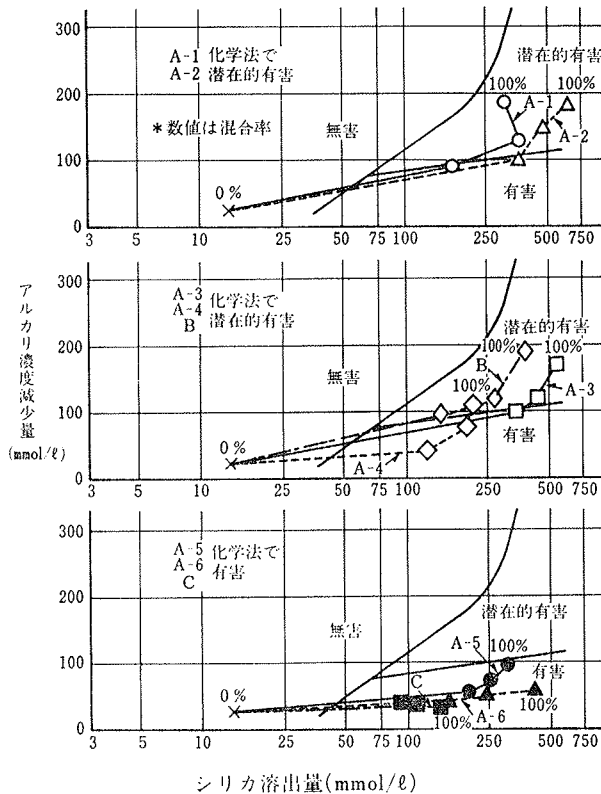
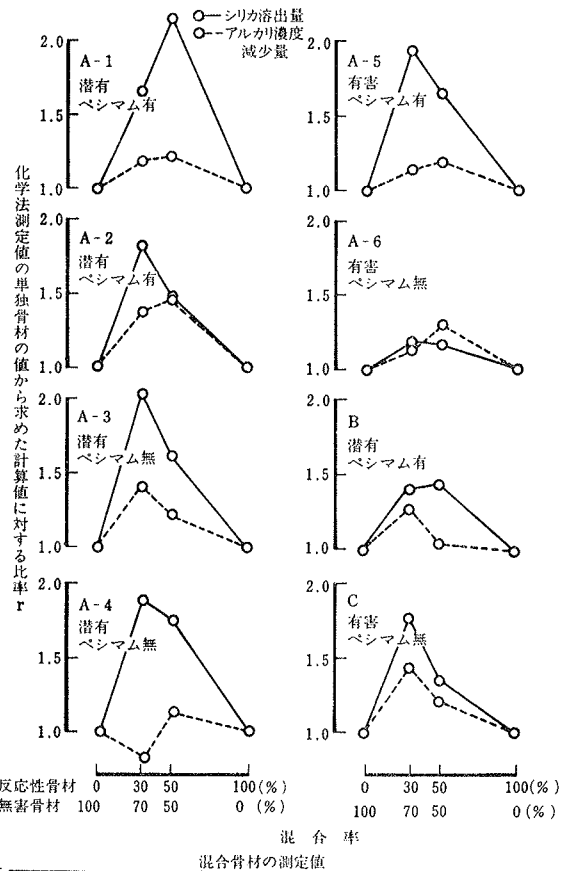


図-3 混合骨材による化学法の判定結果



$$r = \frac{\text{混合骨材の測定値}}{\text{反応性骨材100\%の値} \times \text{反応性骨材混合率} + \text{無害骨材100\%の値} \times \text{無害骨材混合率}}$$

図-4 化学法測定値と計算値との比較

示した。

同図から明らかなように, シリカ溶出量はすべての骨材で, アルカリ濃度減少量もほとんどの骨材で測定値が計算値よりは大きく, 凸型の形状を示した。特にA-1のシリカ溶出量は混合率50%で計算値の2倍を超えており, このことは, 骨材の量が半分になったにもかかわらず, シリカ溶出量は逆に増大したものもあることを示している。

このように, ほとんどの場合, 計算値に比べ測定値の方が大きくなる理由として, 反応性骨材の混合率が小さくなると, この骨材あたりのアルカリ供給量が大きくなることが考えられる。

このとき, 計算値の測定値に対する比率はほとんどの場合, シリカ溶出量の方がアルカリ濃度減少量より大きかった。このことは, 30%あるいは50%の混合骨材において, シリカの溶出する反応がアルカリの消費する反応よりも進行しやすいことを示唆している。

3.3. 化学法とモルタルパー法の試験結果の比較

表-2は各反応性骨材のそれぞれの混合率における化学法およびモルタルパー法の判定結果である。ここでは, 上から化学法のアルカリ濃度減少量が大きい骨材の順に

骨材種	反応性骨材の混合率 (%)				ペシマム現象の有無
	0	30	50	100	
B	○	△ ×	△ ×	△ ○	示す
A-1		×	△ ×	△ ×	示す
A-2		×	△ ×	△ ×	示す
A-3		×	△ ×	△ ×	示さない
A-4		×	×	△ ×	示さない
A-5		×	×	×	示す
A-6		×	×	×	示さない
C		×	×	×	示さない

上段→化学法判定結果 ×:有害 △:潜在的有害 ○:無害
下段→モルタルバー法判定結果 ×:有害 ○:無害

表-2 混合骨材による化学法とモルタルバー法の比較

示している。

化学法で単独骨材で潜在的有害と判定された A-1 ~ A-4, B は混合率 50%, 30% において化学法では有害あるいは潜在的有害と判定され, モルタルバー法でも有害であった。このうち B は単独骨材ではモルタルバー法で無害であったけれども, 混合率 50% および 30% で上述のように有害な膨張を示した。

化学法で単独骨材で有害な骨材 A-5, A-6 および C はすべて混合率 50% あるいは 30% の場合, 化学法, モルタルバー法の両者で有害と判定された。

以上のことから, 混合骨材について行なった場合でも, 化学法とモルタルバー法の試験結果は, 一方が有害で他方が無害のような矛盾はなく, 良い対応が得られた。2 種類以上の骨材を用いる場合には, 化学法でその混合率における試験を行なえば, 有害性を判定できると考えられる。

次に, ペシマム現象に着目した場合, この現象を示す骨材は, 例外はあるものの, 化学法でアルカリ濃度減少量が大きく, 潜在的有害である場合が多かった。これらの骨材では, 単独骨材の場合だけでなく, 混合率 50% および一部では 30% の混合骨材においても, 潜在的有害と判定される場合が多かった。

このことから, アルカリ濃度減少量が大きい, いいかえればアルカリ消費が大きいこととペシマム現象とは関連するであろうと推察される。

3.4. アルカリ量を変化させたモルタルバー法

反応性骨材に無害な骨材を混合して化学法, モルタルバー法を実施すると, 反応性骨材あたりのアルカリ供給量が大きくなる。3.2. に述べたように, このような混合骨材では, 化学法でシリカ溶出反応が, アルカリ消費反

応に卓越して進むことが認められた。このことから, 反応性骨材あたりのアルカリ供給量の多少が, 一部の骨材ではペシマム現象を示すことと関連があるのではないかと考えられる。そこで, 以下では, 単独骨材でアルカリ量を変えたモルタルバー法を実施し, ペシマム現象を示す骨材とそうでない骨材で, どのような挙動の違いがあるかを調べた。

図-5 にモルタルのアルカリ量に対する各反応性骨材の材令 6 箇月における膨張率を示した。

各骨材とも, アルカリ量が増加するに伴って, 膨張率は増加した。このとき, 同一のアルカリ量で比較すると骨材ごとに膨張率は異なった。そこで, モルタルバー法で有害, 無害を判定する基準値とされている膨張率 0.1% を超えるのに必要なアルカリ量を図-5 から読み

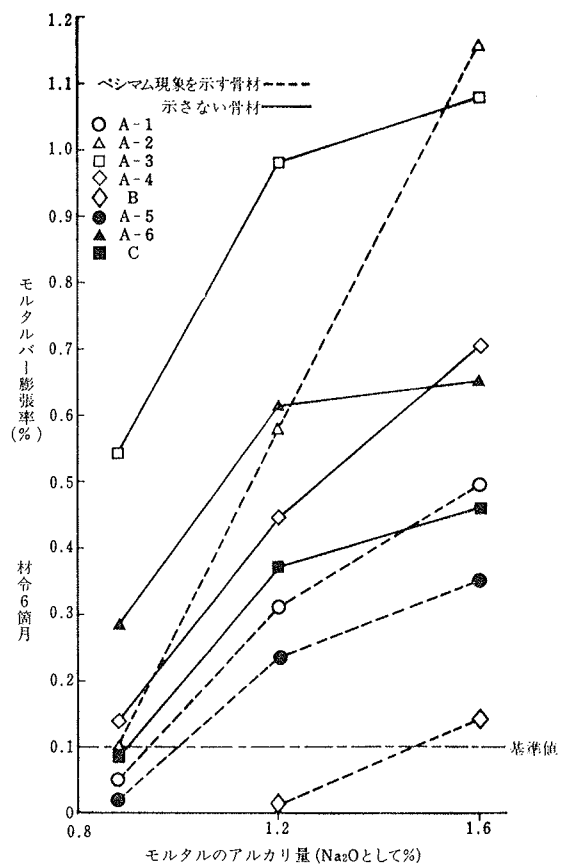


図-5 アルカリ濃度とモルタル膨張率の関係

ペシマム現象を示す骨材		ペシマム現象を示さない骨材	
骨材種	基準値を超えるアルカリ量 (%)	骨材種	基準値を超えるアルカリ量 (%)
B	1.47	C	0.90
A-5	1.00	A-4	0.88未滿
A-1	0.94	A-6	0.88未滿
A-2	0.88	A-3	0.88未滿

表-3 基準値を超える膨張に必要なアルカリ量

とり、ペシマム現象を示す、あるいは示さない骨材別に表一3に示した。

その結果、3.1. でペシマム現象を示したB, A-1, A-5, A-2の各骨材を用いたモルタルバーは膨張率が基準値を超えるのに必要なアルカリ量が0.88%より大きく、1%を超えるものも認められた。これに対して、ペシマム現象を示さないC, A-6, A-4, A-3では基準値を超えるのに必要なアルカリ量が0.9%以下と小さく、多くは0.88%未満であった。

上記の事実および3.2., 3.3.の考察をもとにペシマム現象について以下のことがいえよう。

ペシマム現象を示す骨材は、アルカリを消費しやすいので、単独骨材では骨材あたりのアルカリ量は少なく、シリカの溶出に働くことのできるアルカリが不足し、反応が進まず、その結果膨張しない。ところが、混合骨材にすると反応性骨材あたりのアルカリ量が大きくなり、アルカリが反応性骨材あたりに十分供給され、反応が進行しやすくなると推察される。

これに対して、ペシマム現象を示さない骨材はアルカリを消費しにくいので、骨材あたりに十分なアルカリが供給され、アルカリが不足して反応が停滞するようなことはなく、骨材の混合率が大きくなっても、反応は進行し、膨張は大きくなったと考えられる。

ところで、既報では、アルカリ濃度減少量の因子について検討している。その結果によれば、この報告でとりあげた反応性骨材の主要因子は骨材表面への吸着、分解生成物のような固形分への吸着であった。これを考慮すると、このような吸着によるアルカリ消費が卓越する骨材では、ペシマム現象をおこしやすいと考えられる。

4. まとめ

アルカリ・シリカ反応に関する骨材判定法の一つ化学法で潜在的有害な骨材5種類および有害な骨材3種をアルカリ濃度減少量が小さく無害な骨材に30%および50%

混合した骨材を用いて、建設省暫定案によるモルタルバー法および化学法を実施した。さらに、上記の計8種類の単独骨材でアルカリ量を変えたモルタルバー法を実施し、以下のことが明らかとなった。

(1) アルカリ量1.2%のモルタルバー法では、化学法で有害な骨材3種のうち1種が、潜在的有害な骨材5種のうち3種がペシマム現象を示した。潜在的有害な骨材1種類は、ペシマム現象のため、単独では無害であった。

(2) 混合骨材の化学法による測定値は、シリカ溶出量のすべてについて、およびアルカリ濃度減少量の1点をのぞいて、単独骨材の値から比例配分によって求めた計算値より大きく、その比率は、30%または50%の混合率で最大値を示した。これは、反応性骨材あたりのアルカリ供給量が大きくなるためであると推察された。

(3) ペシマム現象を示す骨材は、単独骨材によるモルタルバー法で、膨張率0.1%以上の有害な膨張をおこすのにペシマム現象を示さない骨材に比べて多量のアルカリを必要とした。

(4) 上記(2), (3)の結果から、ペシマム現象を示す骨材は、アルカリを消費しやすいので、モルタル中で混合率が大きいとアルカリが不足して反応が進行しないが、混合率が低下すると相対的にアルカリ量が大きくなり、膨張が進行するものと推察した。

参考文献

- 1) 喜田, 千野: アルカリ骨材反応に関する研究(その2), 大林組技術研究所報, No. 34, (1987), pp. 72~76
- 2) Hobbs, D W: Magazine of Concrete Reserch, Vol. 30, No. 115, (1978), pp. 215~220
- 3) 喜田, 千野: アルカリ骨材反応に関する研究(その1), 大林組技術研究所報, No. 32, (1986), pp. 126~130