

[62] コンクリート用砕石のアルカリ・シリカ反応による膨張

正会員 ○二 村 誠 二 (大阪工業大学工学部)

正会員 福 島 正 人 (大阪工業大学工学部)

1. まえがき

アルカリ骨材反応が米国のT・E・Stanton¹⁾によって発見されたのは1940年である。現在では、アルカリ骨材反応はアルカリ・シリカ反応、アルカリ炭酸塩岩反応、アルカリ・シリケート反応に分類されるに至っている。これらの概要はG・E・Gillot²⁾によって総括されているが、わが国で主として問題となるのはアルカリ・シリカ反応によるものである。

現在、阪神地区で問題となっているのはアルカリ・シリカ反応の原因となるクリストパライトを含有する輝石安山岩砕石³⁾である。この砕石を使用したコンクリート構造物に異常な膨張ひび割れが顕在化したのは、この10数年ほどのことである。この社会的背景としては⁴⁾

- (1)工場間の差は相当に大きいようではあるが、セメント製造上の問題からアルカリ量が高濃度化の傾向にある。(阪神地区で使用されている主なメーカー10社の普通ポルトランドセメント市販品の R_2O は最小で0.51%、最大で0.98%であり、平均で0.89%である。)
 - (2)阪神地区は細骨材として海砂の使用が主であり、これに含有される Na_2CO_3 等のアルカリ成分が、アルカリ・シリカ反応を促進させる要因となっている。
 - (3)海砂の塩分対策のために、富調合かつ低水セメント比のコンクリートが多用されることになり、間隙溶液中のアルカリイオン濃度が高くなってきている。
 - (4)コンクリート用粗骨材としての使用実績が少ない砕石であっても、骨材の化学的安定性に対する検討がなされないまま使用されている。
 - (5)ポンプ工法による単位セメント量、単位水量の増加のため、コンクリート自体の品質が低下してきている。
- 等が挙げられる。

そこで本研究は、コンクリート中のアルカリ成分が増大しつつある現状を考え、高アルカリ環境下におけるコンクリート用砕石のアルカリ・シリカ反応性について検討したものである。

2. 実験計画

アルカリ・シリカ反応による膨張量に影響を及ぼす要因としては、(1)骨材の反応性の程度、(2)反応性骨材の混入率、(3)反応性骨材の粒度、(4)コンクリート間隙溶液中のアルカリ濃度および(5)温度等が挙げられるが、それぞれの要因の組合わせによっても大きく異なると言える。ここでは、主としてセメント中のアルカリ濃度を $NaOH$ で高めた場合のコンクリート用砕石のアルカリ・シリカ反応性について実験的に検討した。さらに、高アルカリ環境下での促進試験法として適用する場合の可能性についても検討した。

わが国で使用されているコンクリート用砕石は多種多様であるが、今回は阪神地区で一般的に使用されている代表的な岩種のコンクリート用砕石と問題となっている輝石安山岩と同一と思われる砕石の計5種類とし、以下の項目について検討した。なお、各砕石の物理的性質を表・1に示す。

実験Ⅰ：ここでは、砕石中に含有される有害鉱物の有無およびその鉱物名を知るため、偏光顕微鏡および粉末X線回折法によって検討する。

実験Ⅱ：ASTM・C・289「骨材の潜在反応性試験方

表・1 使用砕石の物理的性質

岩石名	表乾比重	吸水率(%)	すりへり減量(%)	安定性(%)	産地
石英安山岩	2.62	0.80	13.9	4.1	兵庫県
石英斑岩	2.65	0.85	13.0	2.3	兵庫県
硬質砂岩	2.70	0.50	10.8	4.7	大阪府
玄武岩	2.89	0.70	11.3	1.9	香川県
輝石安山岩	2.54	1.46	13.4	1.0	不明
JIS規格	>2.5	<3.0	<4.0	<12	—

法」(化学方法)の溶解シリカ量およびアルカリ度低減量による各砕石の反応性の程度を検討する。

実験Ⅲ：ASTM・C・227「セメント・骨材の潜在性アルカリ骨材反応試験方法」(モルタルバー方法)に準じた試験方法で、セメント中のアルカリ濃度を高めた場合の有害なアルカリ骨材反応の潜在可能性の判定および促進試験方法としての可能性の検討をする。

モルタルバーの作製にあたり、セメントは $N_{a_2}O$ 等価量0.76%の普通ポルトランドセメントを使用した。セメント中のアルカリ濃度を高めるためには、 $NaOH$ の試薬特級を調合水に対して0.05、1.0 mol/l添加した。各骨材は豊浦産標準砂を主骨材とし、容積比で50および100%混入した。調合はセメント：骨材：水=1：2.25：0.5とした。

以上の実験の他に、反応性の明らかな輝石安山岩砕石に対しては、上記のモルタルバー方法に準じ、 $NaOH$ でセメント中のアルカリ濃度を高めた場合のベシマム混入率、ベシマム粒度について次のような実験を計画した。

実験Ⅳ：高アルカリ環境下における輝石安山岩砕石の骨材混入率とモルタルバーの膨張量との関係について検討する。骨材混入率は、豊浦産標準砂を主骨材とし、容積比で10～100%混入した。 $NaOH$ の添加量および調合は実験Ⅲと同様である。

実験Ⅴ：高アルカリ環境下における輝石安山岩砕石の骨材粒度とモルタルバーの膨張量との関係について検討する。反応性骨材を5mm以下の6つの単一粒度にふるい分け、豊浦産標準砂を主骨材として、各粒度と4骨材混入率は容積比で50%とした。 $NaOH$ の添加量および調合は実験Ⅳと同様である。

これらモルタルバーの実験に対し、供試体は $4 \times 4 \times 16$ cmのものを各3本ずつ作製し、モルタル打設後24時間で脱型した。基準長さ、重量および共振周波数測定後、 20 ± 1 ℃で底に水を入れた湿気箱内に貯蔵した。長さの測定は $1/1000$ mmのダイヤルゲージ法で行い、重量は0.1gまで計量した。

3. 実験の結果およびその検討

3.1 砕石中の有害鉱物

実験Ⅰで行った偏光顕微鏡および粉末X線回折法による各砕石の主な造岩鉱物名を示したものが表・2である。この結果、アルカリ・シリカ反応の原因となる有害鉱物としては輝石安山岩砕石中のクリストパライトが確認された。そして玄武岩砕石には非品質の火山ガラスの含有がかなり多いことが認められた。しかし、他の砕石においても粉末X線回折図のバックグラウンドがやや高いものもあり、それらにもある程度の火山ガラスが含有されているものと思われる。なお、輝石安山岩および玄武岩砕石については $\phi 2.5 \sim 1.2$ mmの骨材を化学方法に準じて3モルの $NaOH$ で反応させ、反応前後の化学成分を蛍光X線で分析して可溶性シリカ量を測定した。この結果、前者は約6.7%、後者は約1.5%となったが、反応後の粉末X線回折による検討によれば、溶出したのはそれぞれクリストパライトと火山ガラスであり、他の造岩鉱物のピーク値の変化はほとんど認められなかった。

3.2 ASTMの化学方法による各砕石の有害度

今回入手した輝石安山岩砕石は同一の砕石場で生産されたものと考えられるが、その外観上から次の3種類に分類することができる。すなわち、

- (1) 黒色で骨材表面に光沢があって滑らかであり、石質が緻密なもの(記号：F)。
- (2) 茶色で石質が緻密なもの(記号：B)。
- (3) 黒色骨材の一部に茶色骨材が斑状または層状にまざりあい、骨材表面が粗いもの(記号：C)

であり、これらの物理的性質および化学成分等にはほとんど差は認められなかった。

そこで、これら3種類を含むASTMの化学方法による測定結果を表・3に示す。これによれば、石英安山岩、石英斑岩、硬質砂岩の溶解シリカ量(S_c)は30～38ミリモル程度と相対的に小さな値となっている。また、アル

表・2 使用砕石の主な造岩鉱物

岩石名	主な造岩鉱物名	備考
石英安山岩	石英、アルカリ長石、斜長石	酸性岩
石英斑岩	石英、斜長石、一部雲母、緑泥石	酸性岩
硬質砂岩	石英、斜長石、方解石、一部雲母、緑泥石	中性岩
玄武岩	斜長石、カンラン石、火山ガラス 一部アルカリ長石	塩基性岩
輝石安山岩	斜長石、アルカリ長石、斜方輝石 クリストパライト	酸性岩

カリ度減少量 (Rc) は 4.3 ~ 5.7 ミリモルで、反応性の基準となる Sc/Rc は 0.53 ~ 0.88 で「無害」となっている。玄武岩碎石の Sc は 85.2 ミリモルで前 3 種よりやや大きな値となっている。これは非晶質の火山ガラスの溶出によるものと思われるが、Rc が 130 ミリモルと大きめの値となっているので、Sc/Rc は 0.66 となり「無害」と判定された。

輝石安山岩碎石の Sc は 552 ミリモルと非常に大きな値となっている。また、Rc も 177 ミリモルと大きい Sc/Rc は 3.12 で「潜在的有害」な区分となった。そして、外観から 3 種類に分類された碎石の測定値はかなり大きな差を示していることから、同一の碎石場のものであっても温泉熱水作用や風化の程度によって、アルカリとの反応性に大きく影響すると言える。

3.3 モルタルバー方法による各碎石の膨張量

セメント中のアルカリ量を NaOH を添加して高めた、実験 III によるモルタルバーの膨張量と材令との関係例を図・1 に示す。輝石安山岩および玄武岩碎石以外はほとんど膨張していないので図中には示さなかった。これによれば、輝石安山岩碎石の場合にはアルカリ濃度が高くなると、骨材混入率の多いものの方が膨張量も大きくなっていることがわかる。そして、アルカリ濃度が高くなればなるほどその膨張量は大きくなる傾向を示している。玄武岩碎石の場合には、ASTM の化学方法では「無害」と判定されたものであるが、骨材混入率 100% で NaOH を 1.0 モル添加した時のみ材令 52 週で約 0.13% の膨張を示している。この碎石は反応性のそれほど高くない火山ガラスを含有するものであるが、一定濃度以上のアルカリ環境下に存在すると、膨張可能な量の反応ゲルが生成されることを示している。これよりアルカリ添加による促進試験としてのセメント中のアルカリ量は $R_2O = 1.5\%$ ほどが目安になると思われる。

今回はセメント中のアルカリ濃度を NaOH を添加して高めているが、造岩鉱物中のアルカリ成分や海砂に含まれる Na_2CO_3 等セメント以外から供給されるアルカリ成分も多いことから、一定のアルカリ条件下での反応性に対する詳細な検討が必要となる。また、高アルカリ濃度での促進試験は「安全側」で有効な試験方法になると言えるが、実際のコンクリート中に存在するアルカリ量との関連でその濃度を決定する必要がある。

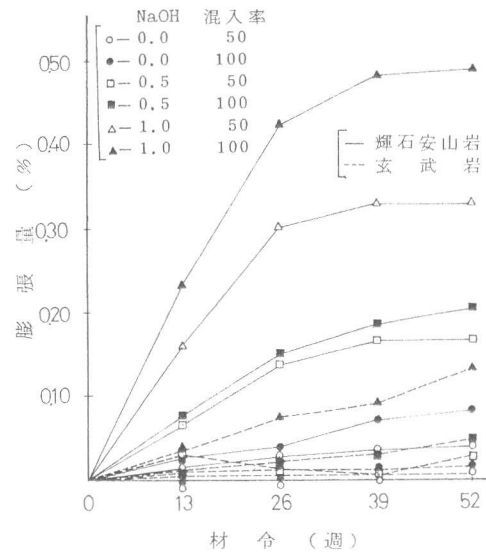
3.4 輝石安山岩碎石の骨材混入率と膨張量

高アルカリ環境下における輝石安山岩碎石の骨材混入率とモルタルバーの膨張量との関係を図・2 に示す。これによれば、NaOH が無添加の場合にはベシマム混入率は 40% であるが、1.0 モル添加するとベシマム混入率は 80% と大きく変化している。そして、いずれの場合もベシマム混入率までほぼ直線的に膨張量が增大しており、アルカリ濃度が高いほどその膨張量は大きくなる傾向を示している。

これより、骨材中に含有される有害鉱物の種類やその含有量によってもベシマム混入率は異なるが、アルカリ・シリカ反応にともなう生成ゲルは、①セメント間隙溶液中のアルカリ濃度が高いほど、骨材表面上に領域の大きい反応層を速やかに形成するが、②一定の反応層の領域に達するとそれ以降のゲルの生成はゆるやかになる。これは微小硬度計による川村らの研究結果にも認められる。そして、この反応ゲルは写真・1 に見られるように反応層周辺のセメントペーストや骨材の空隙を満たしてからモルタルバーを膨張させるようである。また、③周囲から一定量以上の水分を吸収すると粘性の低いゾルに変化するが、アルカリ・シリカ比によってはその膨張特性が大きく変

表・3 化学方法による測定結果

岩石名	Sc mM/l	Rc mM/l	Sc/Rc	判定区分
石英安山岩	32.7	46.7	0.70	無害
石英斑岩	38.2	43.3	0.88	無害
硬質石岩	30.1	56.7	0.53	無害
玄武岩	85.2	128.3	0.66	無害
輝石安山岩	552.0	176.7	3.12	潜在的有害
同上 (F)	330.3	123.3	2.68	潜在的有害
同上 (B)	584.2	183.3	3.19	潜在的有害
同上 (C)	431.5	130.0	3.32	潜在的有害



図・1 モルタルバー方法による膨張量と材令との関係例

わたるとの報告⁷⁾もある。このため、骨材自身の反応性や全表面積が変化すると、反応生成ゲルの量的要因や質的要因に大きな影響を及ぼし、ベシマム混入率が生ずるものと思われる。

3 5 輝石安山岩砕石の骨材粒度と膨張量

高アルカリ環境下における輝石安山岩砕石の粒度とモルタルバーの膨張量との関係を図・3に示す。これによれば、セメント中のアルカリ濃度が高くなると各粒径における膨張量は大きくなりベシマム粒度は粒径の大きい方に変化する傾向を示している。一般に反応性骨材の粒径が大きくなると、それに伴う骨材の表面積が小さくなり、ゲルの生成量が増すことによって膨張量も大きくなる。しかし、さらに反応性骨材の粒径が大きくなると、骨材周辺のアルカリ濃度との関係にもよるが、かえって反応ゲルの生成量が減少するためにベシマム粒度が複雑に現われてくるものと思われる。いずれにせよ、骨材の反応性の違いによっても大きく異なるが、前述の如く反応生成ゲルの量的・質的要因の組み合わせによるものと言える。

4. むすび

今回の研究の結果をまとめると次のようなことが言える。

(1)骨材のアルカリ・シリカ反応の可能性を迅速に試験する場合にはASTMの化学方法と有害鉛物を判断できる粉末X線回折法等と組合わせて行なうことが望まれる。そして、同一産地の骨材でも外観上から分類できるものは、夫々についての検討を要する。

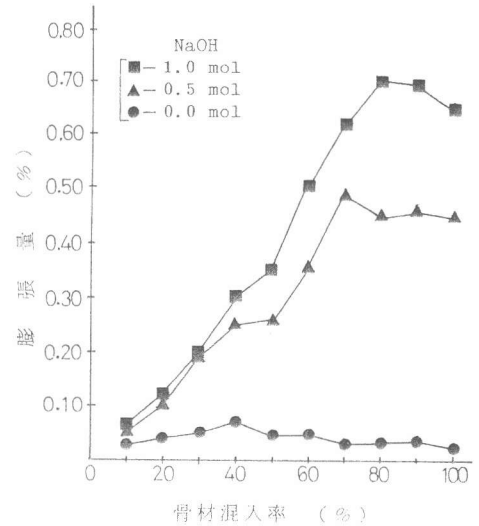
(2)セメント中のアルカリ濃度を高めた場合のモルタルバー方法は安全側の結果を与えるが、セメント以外からのアルカリ成分の供給もあるので、一定の高アルカリ条件下での試験が望まれる。

(3)アルカリ・シリカ反応ではベシマムの混入率や粒度が存在するため、コンクリート用粗骨材に対する試験としてモルタルバー方法を適用する場合には、これらを含めた検討が必要となる。

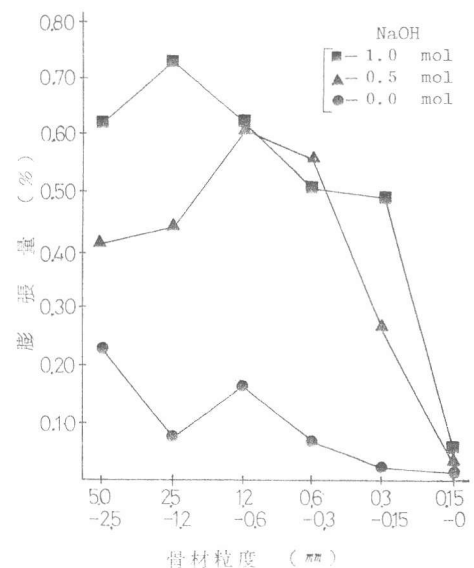
なお、本研究の一部は文部省科研費(昭58年度)による。

参考文献

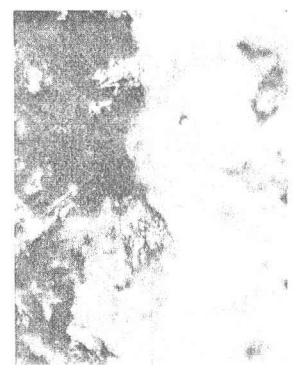
- 1) T. E. Stanton: ASCE, Vol. 66, 1940.
- 2) J. E. Gillot: Engineering Geology, 1975.
- 3) 福島・二村: セメント・コンクリート, No. 438, Aug, 1983.
- 4) 例えば、有泉: 粘土科学, Vol. 19, 1979.
- S. Diamond: Cem. and Concre. Res, Vol. 5, No. 4, 1976.
- 5) H. E. Vivian: Aust. J. Appl. Sci, Vol. 2, 1951.
- 6) 川村・柳場: コンクリート工学, Vol. 22, No. 2, Feb, 1984.
- 7) L. T. Struble, S. Diamond: Cem. and Concre. Res, Vol. 11, No. 4, 1981.
- 8) D. W. Hobbes, W. A. Gutteridge: Mag. Concre. Res, Vol. 31, No. 109, 1979.



図・2 骨材混入率と膨張量との関係



図・3 骨材粒度と膨張量との関係



写真・1 ベースト中(左)に浸入してきている反応ゲル