

アルカリ骨材反応に関する研究 (その1)

—岩種別のアルカリ・シリカ反応性試験—

喜田大三 千野裕之

Studies on Alkali-Aggregate Reaction (Part 1)

—Tests on Alkali-Silica Reaction by Rock Types—

Daizo Kita Hiroyuki Chino

Abstract

Recently, a number of concrete structures have been damaged by cracking due to alkali-silica reaction. Therefore, tests are being carried out on aggregates to preclude such reaction. ASTM testing methods (chemical method, mortar bar method) were applied to 56 aggregate samples that had been obtained. The results were arranged focusing on rock types and mineral components. The following useful items of information were obtained. (1) Non-volcanic rock aggregates, except for a very small part, did not contain deleterious silica minerals and were judged to be harmless in tests. (2) Volcanic rock aggregates were low in crystallinity and often contained deleterious silica minerals and were apt to be harmful on performing ASTM tests. (3) Mineralogical examinations as well as ASTM tests are useful in predicting injuriousness of aggregates.

概 要

近年、阪神地区を中心とする地域で、一部のコンクリート構造物にアルカリ・シリカ反応によるひびわれ被害が発生した。そこで、現在はアルカリ・シリカ反応を未然に防止するために、骨材試験を行なっている。

この試験では、入手した骨材56点についてASTMの試験法(化学法・モルタルバー法)を適用した。それらの結果を岩種と含有鉱物に着目し整理したところ、以下のような有用な知見が得られた。(1) 非火山岩系の骨材はごく一部を除いて、有害なシリカ鉱物が認められず、各試験で無害と判定された。(2) 火山岩系の骨材は結晶度が低く、有害なシリカ鉱物を含むことが多く、各試験で有害と判定されやすかった。(3) 骨材の有害性を予測するうえで、ASTMの試験に加えて鉱物学的試験も有力な手がかりとなる。

1. まえがき

アルカリ骨材反応は、セメント中のアルカリ成分と骨材中のある種の成分とが反応し、セメント硬化体を膨張させ、コンクリートに異常なひびわれを生じさせる現象である。通常、次の3種に分類されている。

- (1) アルカリ・シリカ反応
- (2) アルカリ・炭酸塩反応
- (3) アルカリ・シリケート反応

このうち、(2)と(3)の反応を引き起こす骨材の発生地域は限定されており¹⁾、我が国で、この反応による被害は確認されていない。そこで、この報告においては、(1)のアルカリ・シリカ反応に関して扱うものとする。

アルカリ・シリカ反応は1940年に T. E. Stanton によって発見され²⁾、米国では1930年代から1940年代にかけてダム堤体、道路橋、河川堤体などにおいて、この反応による被害が発生し重大な問題となった。

我が国においては、1950年頃の調査においては、アルカリ・シリカ反応は極めてまれであった³⁾。しかし、近年、阪神地区を中心として、全国的にこの反応によると判断されるコンクリートの損傷事故が顕在化し、問題となってきている。この背景としては、以下のことが指摘されている⁴⁾。

- (1) いままで使用実績のない骨材から反応性骨材を選別する方法の不備
- (2) セメント製造法の変化によるセメント中のアルカ

量の増加

(3) セメント量の増加, および水セメント比の低下に伴う間げき溶液中のアルカリイオン濃度の上昇

(4) 海砂などの塩分による反応の助長

したがって, アルカリ・シリカ反応を防止するために, 上記を踏まえて研究を進めていくことが急がれている。

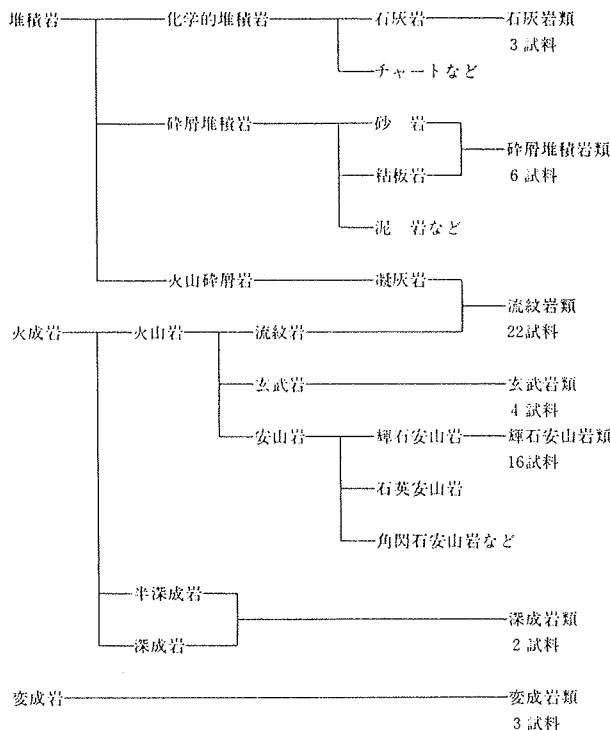
現在, 技術研究所では, プロジェクトテーマのもと, 反応機構の解明, 骨材判定試験法の確立, 無害化技術の開発, 補修法の確立にむけて, 鋭意研究を進めている。

この報告では, 入手した骨材について, ASTMが定めるアルカリ・シリカ反応の二つの判定試験(化学試験, モルタルバー試験)を実施した。さらに, 岩種, 含有鉱物を鑑定する鉱物学的試験を実施し, 判定結果を骨材の岩種, 含有鉱物に着目し, 整理したところ有用な知見が得られたのでこれを報告する。なお, 本報告の一部は土木学会第40回年次学術講演会で発表している⁵⁾。

2. 試験概要

2.1. 供試試料

試験には骨材56点を供試した。これを岩種別にみると表一のとおりである。



表一 供試骨材の岩種別試料数

2.2. 試験方法

(1) 鉱物学的試験 岩石薄片の偏光顕微鏡観察による鉱物鑑定を実施するとともに, X線回折法による鉱物分析を実施し, 岩種, 含有鉱物を判定した。

(2) 化学試験 ASTM C 289骨材の潜在反応性試験(化学法)を実施した。

(3) モルタルバー試験 ASTM C 227骨材の潜在アルカリ反応性試験(モルタルバー法)を実施した。このとき, セメントには普通ポルトランドセメント(Na_2O 等価アルカリ量0.97%)を使用した。輝石安山岩の一部では, この岩種と珪砂を混合した試験も実施した。

3. 試験結果と考察

鉱物学的試験, 化学試験は全骨材56点について, モルタルバー試験は代表的骨材28点について行なった。

代表的骨材28点についての試験結果を一覧表にして表一2に示す。化学試験の結果は図一1の化学的判定図上にプロットし, その分布領域は, 56点すべての骨材の結果を踏まえて示した。また, モルタルバー試験の結果は図一2に例示し, モルタルバーの膨張量が90日で0.05%以上あるいは180日で0.1%以上となった骨材を有害と判定した。

さて, 骨材のアルカリ・シリカ反応はセメント中のアルカリ分と骨材中のある種のシリカ鉱物が反応するもので, その反応の有無には, 骨材に含まれるシリカ鉱物の種類と結晶性が大きく影響してくると予想される。

ところで, 岩石の生成過程を考慮すると, 火山岩系のもと非火山岩系のもとでは, 含有鉱物の結晶状態が大きく異なる。そこで, 供試骨材を上述の両者に大別して, 試験結果を考察する。

3.1. 非火山岩系について

石灰岩類, 変成岩類, 深成岩類, 砕屑堆積岩類などの非火山岩系の骨材は, 化学試験におけるシリカ溶出量が, 後述の火山岩系のそれと比較して小さく, 図一1の化学的判定図上で上記の岩種の順に左下部から中央下部にプロットされる。そして, 砕屑堆積岩の一部を除いて, すべての非火山岩系の骨材は, 化学試験とモルタルバー試験の結果, 無害と判定された。無害と判定された骨材については, 含有鉱物中にアルカリ・シリカ反応に有害であるとされているクリストバライトなどのシリカ鉱物は認められなかった。以下に, 各岩種ごとに詳述する。

(1) 石灰岩類

化学試験におけるシリカ溶出量が5 mmol/l未満と低く, 図一1の判定図上で最左端の下部に位置し, 化学試験, モルタルバー試験とともに無害と判定された。含有鉱物は方解石とドロマイトであり, シリカ鉱物をほとんど含まないため, 上述のようなASTMの試験結果となることは言うまでもない。

(2) 変成岩類・深成岩類

化学試験におけるシリカ溶出量が, 変成岩類で9~22

mmol/l, 深成岩類で 10~20 mmol/l と低く, 両岩種は図-1 の判定図上で左下部に位置した。そして, 化学試験, モルタルバー試験で両者とも無害と判定された。鉱物学的試験の結果, 両岩種の含有鉱物の結晶度は高く, かつ有害なシリカ鉱物も認められず, 上述の ASTM の試験結果を裏づけていた。石英斑岩の偏光顕微鏡写真を写真-1 に例示するように, この岩石は完晶質であり, 有害なシリカ鉱物を含んでいない。

(3) 砕屑堆積岩類

化学試験によるシリカ溶出量が 19~71 mmol/l であり, 砕屑堆積岩類は, 図-1 の判定図上で有害と無害の判定曲線をはさんで中央下部に分布した。そして, 化学試験, モルタルバー試験で大部分は無害と判定されたが, 粘板岩の一部は両試験で有害と判定された。両者の違いは鉱物学的試験の結果にも認められ, 前者には有害なシリカ鉱物が検出されなかったのに対して, 後者には二次的な晶出物と思われる細粒な石英の結晶が多数認められた。この細粒な石英がアルカリ・シリカ反応の原因物質であろうと予想されるが, 詳細は今後検討する予定である。

3.2. 火山岩系について

流紋岩類・玄武岩類・輝石安山岩類などの火山岩系の骨材は化学試験におけるシリカ溶出量が前述の非火山岩系と比較して大きく, 図-1 の判定図上で, 上記の岩種の順に中央下部から右上部にプロットされた。当然, 化学試験で有害あるいは潜在的有害と判定されるものが多い。そしてモルタルバー試験でも実施した骨材の約四割が有害と判定された。

ところで, 火山岩はマグマが地表あるいは地下の浅い所で急に冷却され生成した岩石である。このため, 鉱物学的試験の結果でも, 結晶度は低く, 非晶質のガラスやトリディマイトなどの有害なシリカ鉱物を含むことが多かった。以下に, 各岩種ごとに詳述する。

(1) 流紋岩類

化学試験におけるシリカ溶出量が約 20~100 mmol/l であり, 図-1 の判定図上で判定曲線をはさんで比較的集中して分布した。そして, 化学試験を行なった22点のうち約3分の1が有害と判定され, モルタルバー試験を行なった7点のうち1点が有害と判定された。

両試験の結果を比較すると, 化学試験で有害と判定された骨材は必ずしもモルタルバー試験で有害とはなっていない。

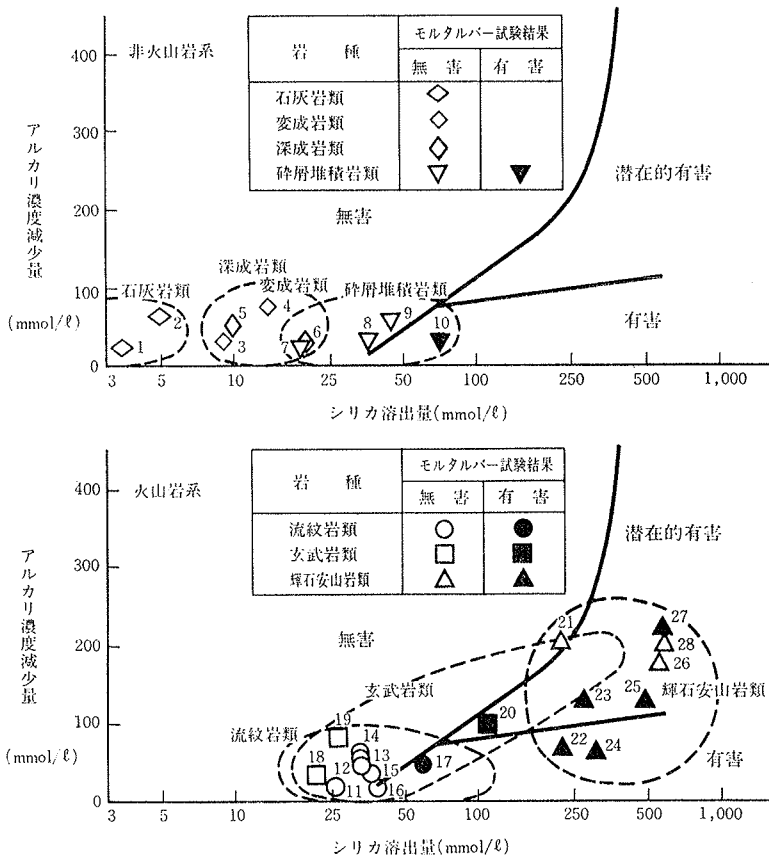
試料番号	岩種	岩石名	含有鉱物 ^{*1}										化学試験		モルタルバー試験			
			石英	斜長石	アルカリ長石	黒雲母	角閃石	輝石	かんらん石	方解石	ガラス	緑泥石	その他の鉱物	Se ^{*2} (mmol/l)	Re ^{*2} (mmol/l)	^{*3} 判定	90日 膨張率 (%)	180日 膨張率 (%)
1	石灰岩	石灰岩											3.5	22	無	0.001	0.006	無
2	岩類	"									◎		5.0	63	無	0.006	0.0094	無
3	変成	ホルンフェルス	◎										9.2	30	無	0.002	0.013	無
4	岩類	角閃岩	○	○	○	△	◎				○		16	88	無	0.005	0.015	無
5	深成	石英斑岩	◎	◎	○	△					△		10	50	無	0.0068	0.011	無
6	岩類	アンプライト	◎	○	◎								20	29	無	0.008	0.020	無
7	砕屑堆積岩類	砂岩	◎	◎	○	△				△		○	19	33	無	0.003	0.003	無
8	"	"	◎	◎	△					△		○	26	53	無	0.003	0.006	無
9	"	"	◎	◎	◎	△				△		△	44	59	無	0.012	0.028	無
10	"	粘板岩	◎	△	○							○	71	30	有	0.070	0.217	有
11	流紋岩類	細粒凝灰岩	◎	◎	◎						△		26	18	無	0.012	0.016	無
12		流紋岩質凝灰岩	◎	◎	○	○							33	43	無	0.014	0.031	無
13		"	◎	◎	○	○							33	44	無	0.008	0.016	無
14		粘結凝灰岩	◎	○	◎	△					△	△	33	55	無	0.012	0.016	無
15		流紋岩質粘結凝灰岩	◎	◎	○	△						△	36	33	無	0.013	0.033	無
16		流紋岩	◎	◎	◎	△						△	38	16	有	0.024	0.038	無
17		流紋岩質粘結凝灰岩	◎	◎	○	△					△	○	△	59	47	有	0.026	0.121
18	玄武岩類	かんらん石玄武岩		◎	△					△	◎		22	34	無	0.011	0.017	無
19		かんらん石粗面玄武岩		◎	△					△	◎		27	81	無	0.080	0.017	無
20		かんらん石ソレアイト質玄武岩		◎	◎						△	◎	△	112	97	潜	0.160	0.202
21	輝石安山岩類	輝石安山岩		◎						◎			223	201	無	0.000	0.013	無
22		"		◎						◎			224	66	有	0.235	0.308	有
23		"		◎						◎		○	275	127	有	0.056	0.076	有
24		"	△	◎						◎		△	303	61	有	0.286	0.336	有
25		"		◎						◎			488	126	潜	0.122	0.147	有
26		"	△	◎						◎			568	173	潜	0.009	0.019	無
27		"	△	◎	○					◎		△	582	221	潜	0.292	0.338	有
28		"	△	◎	◎					◎			592	201	潜	0.010	0.023	無

*1 含有鉱物の記号で, ◎は多く含有, ○は中程度含有, △は少量含有を示す。

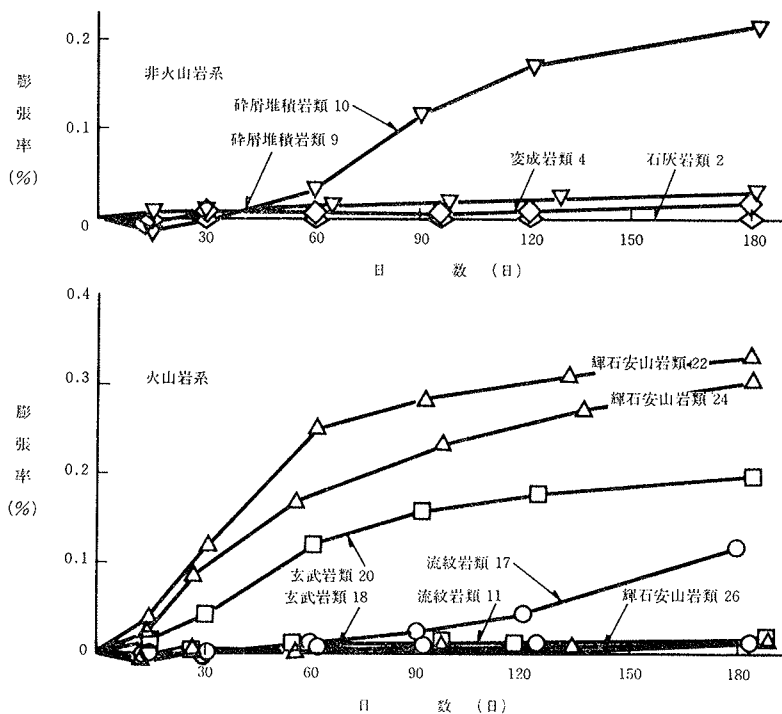
*2 Seはシリカ溶出量, Reはアルカリ濃度減少量を示す。

*3 判定結果の無は無害, 有は有害, 潜は潜在的有害を示す。

表-2 各種骨材の試験結果一覧表



* 図中の番号は表一2の試料番号を示す
 図一1 化学試験による判定図



図一2 モルタルバー試験による膨張量の経時変化例

いない。この原因としては、今回のモルタルバー試験に用いたセメントのアルカリ量などの性質が考えられ、今後、詳細に検討する予定である。

なお、鉱物学的試験の結果、全体に結晶度は低く、石基（基質）部分は細粒あるいは隠微晶質であり、一部に非晶質ガラスなどの有害なシリカ鉱物の存在が認められた。

(2) 玄武岩類

化学試験におけるシリカ溶出量が約 20~300 mmol/l であり、玄武岩類は図一1の判定図上で中央下部から右上部に広い範囲に分布した。化学試験で無害あるいは潜在的有害と判定されるものが半々であり、モルタルバー試験では化学試験で潜在的有害とされた骨材が有害と判定された。

両試験で無害となった骨材は、鉱物学的試験で、完晶質であり、有害なシリカ鉱物が認められなかったのに対して、有害となった骨材は結晶度が低く、その一部に有害なシリカ鉱物である非晶質ガラスが認められた。

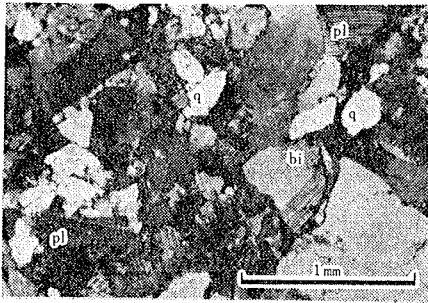
以上のように、玄武岩はその骨材によってアルカリ・シリカ反応性が大きく異なることが特徴であった。

(3) 輝石安山岩類

化学試験におけるシリカ溶出量が約200~700 mmol/l と大きく、アルカリ濃度減少量も 200 mmol/l を越える大きなものがあるのが他の岩種に比べて特徴的であり、図一1の判定図上で最右端の上部から下部に広く分布した。当然、化学試験で、一試料を除いて、すべて潜在的有害あるいは有害と判定された。

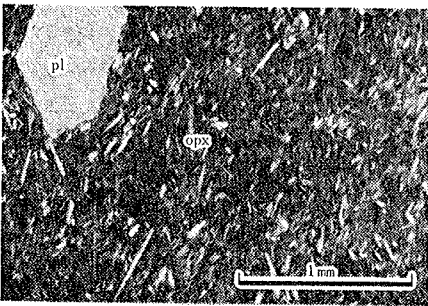
鉱物学的試験の結果、上記の化学試験の結果と対応していた。すなわち、すべての骨材の結晶度は低く、また、非晶質ガラスや繞成作用でガラスが変質して生じたと考えられるモンモリロナイト、さらには結晶性の低いシリカ鉱物であるトリディマイトが一部で認められた。有害なシリカ鉱物を含む輝石安山岩の偏光顕微鏡写真を写真一2に例示する。

モルタルバー試験においても8点中5点が有害な膨張を示した。ところで、モルタルバー試験で無害であった3点のうち2点は化学試験で潜在的有害と判定されたものである。ASTMでは化学試験で潜在的有害と判定された骨材は、無害骨材との混合割合を5~50%の間で変化さ



pl:斜長石 q:石英 bi:黒雲母

pl:斜長石 q:石英 bi:黒雲母
写真-1 石英斑岩5岩石薄片の偏光顕微鏡写真
(直交ニコル)



pl:斜長石 opx:斜方輝石

pl:斜長石 opx:斜方輝石
写真-2 輝石安山岩22岩石薄片の偏光顕微鏡写真
(直交ニコル)

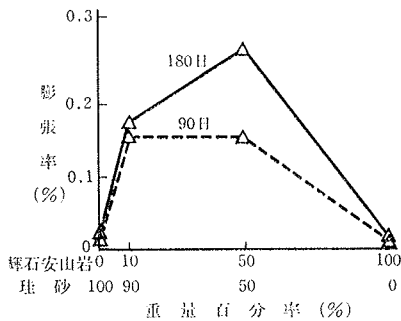


図-3 輝石安山岩26の骨材含有量と膨張量との関係

せ、モルタルバー試験を実施し、有害性の有無を確認せねばならないと定めている⁶⁾。そこで、この骨材を反応性が無害である珪砂骨材と混合し、モルタルバー試験を実施した。この結果、図-3に示すように、骨材に最悪な条件いわゆるペシマム含有量が存在することが判明した。その際、わずか10%の低含有量でも有害な膨脹を示した。このメカニズムについては、今後、検討する予定である。

4. まとめ

入手した骨材56点について、ASTMが定める化学試験、モルタルバー試験を実施し骨材判定を行なった。さらに、岩種と含有鉱物を判定する鉱物学的試験も実施して、骨

材を火山岩系、非火山岩系に大別した。そして判定結果を岩種と含有鉱物に着目し、整理したところ以下のことが判明した。

(1) 石灰岩類、変成岩類、深成岩類などの非火山岩系の骨材は、砕屑堆積岩のごく一部を除き化学試験、モルタルバー試験で無害であった。鉱物学的試験では、石灰岩類は成分にシリカ鉱物を含まず、変成岩類、深成岩類は結晶度が高いため有害なシリカ鉱物が認められず、砕屑堆積岩のうち、上記の2試験で無害であった骨材からも結晶性の低いシリカ鉱物は認められなかった。

(2) 流紋岩類、玄武岩類、輝石安山岩類などの火山岩系の骨材は、化学試験の結果、シリカ溶出量が大きく、有害あるいは潜在的有害と判定されやすく、モルタルバー試験においても有害と判定されるものが多かった。鉱物学的試験ではこれらの岩石の結晶度は低いものが多く、有害なシリカ鉱物の認められるものが多かった。

(3) 上記(1)、(2)から、鉱物学的試験は、アルカリ骨材反応をほとんど示さない岩石か、あるいは火山岩系の岩石のようにアルカリ骨材反応を起こす可能性がある岩石かを確認でき、有害性を予測するうえで有力な手がかりとなる。

この報告で調査を行なった骨材は、短期間で入手可能であったもので、地域的にも地質学的にも片寄ったものであったことは、否定できない。そこで、今後、全国レベルの広い範囲で各種の骨材を入手し、この成果を踏まえて、鉱物学的性質、さらには地質学的な性質なども考慮して検討を加え、アルカリ・シリカ反応を未然に防止する手法を確立することをめざしている。

参考文献

- 1) 小林, 内川, 嵩: アルカリ骨材反応をめぐって, コンクリート工学, Vol. 22, No. 5, (May 1984), pp. 4~15
- 2) Stanton, T. E.: Expansion of Concrete Through Reaction Between Cement and Aggregate, Proc. of ASCE, Vol. 66, (1940), pp. 1781~1811
- 3) 近藤, 北川: アルカリ骨材反応に関する研究, セメント技術年報V, (1951), pp. 379~400
- 4) 川村, 柳場: アルカリ・シリカ反応のメカニズム, コンクリート工学, Vol. 22, No. 2, (Feb. 1984), pp. 6~15
- 5) 喜田, 辻, 千野: 岩種別骨材のアルカリ骨材反応性に関する調査, 土木学会第40回年次学術講演会講演概要集第5部, (1985), pp. 175~176
- 6) American Society for Testing and Materials C 289-81