世界各国におけるアルカリシリカ反応性岩石 (その2)

脇坂 安彦*

Alkali-Silica Reactive Rocks in the World (Part 2)

Yasuhiko WAKIZAKA*

1. はじめに

(その1)ではアルカリシリカ反応性のある鉱物および岩石の概要と、アルファベット順にアメリカからイギリスまでの9か国における反応性岩石について述べた。本編では、アイスランド以降の残りの国々の反応性岩石について述べ、さらに日本と各国の反応性岩石の比較を行う。

2. 世界各国のアルカリシリカ反応性岩石

(1) アイスランド

アイスランドではRIKHARDUR¹⁾がアルカリ骨材反応が家屋のコンクリートで重大な問題になっていると述べている。

骨材の反応性についてはGUDMUNDSSON and ASGEIRSSON²⁾がガラス質火山岩, OLAFSSON³⁾がHvalfjord sandに反応性があるとしている。

(2) インド

GOGTE⁴⁾が、花崗岩、花崗閃緑岩、チャノッカイト、玄武岩、砂岩、珪岩および片岩類について岩石記載学的試験とモルタルバーテストを実施している。モルタルバーテストはASTM C 227 (セメントと骨材の組合せによる潜在的アルカリ反応性に対する標準試験方法 (モルタルバー法))の保管温度40°Cを50°Cに変更して準用している。50°Cにされたのは、インドではコンクリート表面

の温度が45~50°Cになるためである。また、有害、無害の判定値も6か月時の膨脹量0.10%を0.05%に変更している。モルタルバーテストの結果、テストに供されたすべての岩型で有害と判定された試料があった(この結果は判定基準を0.1%/6か月にしても同様である)。花崗岩、花崗閃緑岩およびチャノッカイトで、モルタルバーの膨脹量が0.1%を超えている試料には、強く波動消光(波動消光角18~27°)をしていて、割れており、粒状の石英が35~40%含まれている。モルタルバーの膨脹量が0.06~0.09%のものには、適度に波動消光(波動消光角10~24°)する石英が25~35%含まれている。膨脹量が0.05%以下のものには、ひずんだ石英が20%以下または波動消光をわずかにするか、全くしない石英が含まれている。玄武岩で有害となったものは、玉ズイまたはソーダ雲母を二次鉱物として伴い、ガラスを本質的に含んでいる。砂岩ではチャートや微晶質石英を含んでいるものが有害となっている。珪岩ではチャート質のものや波動消光を示す石英が膨脹している。片岩類ではチャートを12%含んでいる千枚岩と、ひずんでいる粒状石英を40%含んでいるものが有害となっている。以上のようなことから、GOGTE⁴⁾は岩石のアルカリ反応性を示す指標として、岩石中のひずみ(波動消光角)と粒度を重要視している。

VISVESVARAYA *et al.*⁵⁾はコンクリートダムのギャラリーにアルカリシリカ反応が起こっており、骨材として花崗岩が使われていたことを報告している。

MULLICK *et al.*⁶⁾はひずんだ石英を含んだ珪岩、粗粒玄武岩、花崗岩、千枚岩、砂についてASTM C 289 (骨材の潜在的反応性に対する標準試験方法 (化学法))およびC 227を実施している。その結果、これらはNaOH浸漬が24時間のASTM C 289では無害であるが、7日間に行うと反応性ありと判定されることを示している。また、

* 建設省土木研究所地質化学部地質研究室 Geology Division, Department of Geology and Chemistry, Public Works Research Institute, Ministry of Construction (現在, 建設省九州地方建設局河川部, River Department, Kyushu Regional Construction Bureau, Ministry of Construction)

モルタルバーの膨脹量と岩石中の石英の大きさとの間には関係はなく、ひずんだ石英の量および波動消光角との間には相関があることを示している。

以上のようにインドでは、アルカリ反応性岩石はひずんだ石英を含んだものが主体をなしているようである。

(3) イタリア

イタリアでのアルカリ骨材反応の最初の報告は、ROSSETTI⁹⁾による industrial floor のホップアウトに関するものである。

BARONIO⁸⁾は建築物にクラックと多量のゲルがあり、アルカリ骨材反応による劣化を生じているとしている。骨材は石灰質粒子 (ときどき泥灰質となり、しばしばひずんだ石英を含む。波動消光角は数度~20°以上)、いろいろな割合の珪質粒子 (チャート礫) から構成されている沖積層の礫である。

BARONIO *et al.*⁹⁾の表には、建設7年後と1年後のコンクリートがアルカリシリカ反応を起こした例が示されている。前者には骨材として石灰質な細粒物、ひずんだ石英、チャートが、後者には石灰質物、チャート、ひずんだ石英および玉ズイが含まれている。

BARONIO and BERRA¹⁰⁾はコンクリート製煙突に map-cracking と白色の浸出物があり、アルカリ骨材反応を起こしていると報告している。粗骨材、細骨材はチャート、玉ズイ、ひずんだ石英粒子を含んだ石灰質礫である。

BARISONE *et al.*¹¹⁾はイタリア半島の一部について河川別に反応性鉱物 (オパール、ジャスパー、玉ズイ、放散虫岩) 量と沖積堆積物中のチャート (フリント) の含有量の高低を図示している。

以上のように、イタリアで反応性骨材とされているのは、主にチャート (フリント) およびひずんだ石英を含んだ岩石である。

(4) 日本

日本国内で初めてアルカリシリカ反応による劣化が報告されたのは1951年のことである¹²⁾。劣化が生じていたのは山形県内最上川に架かる村山橋、長崎橋である。両橋に使用されていた粗骨材は最上川産の頁石・砂岩・ヒン岩・浮岩・凝灰岩等で、これらのうち頁石・浮岩の反応性が高いことが報告されている。近藤・北川¹²⁾はこの被害報告と同時に全国各地の骨材の反応性試験結果を報告している。この試験結果から、日本ではアルカリシリカ反応を起こす骨材はアメリカほど多くはないと結論されていることと、次に被害が報告されたのが1965年のみ¹³⁾

であったことから、以後、一般に日本ではアルカリシリカ反応はないものと認識されていた (しかし、近藤らは結語で、「最上川砂・砂利の如く反応質骨材があって村山橋、長崎橋の被害を起こすから、さらに全国的なアルカリ骨材反応試験を行わなければならない」と警告しているのである)。例えばコンクリート便覧¹⁴⁾には、「外国、特にアメリカでは、多くの例が報告されているが、我が国では、わずか最上川の骨材が反応性を示したと報告されている程度で、あまり見られない」とあり、また、コンクリート工学ハンドブック¹⁵⁾には、「アルカリ骨材反応を起こす骨材は外国、特にアメリカで多く報告されているが、日本では最上川の骨材にこの反応が見られたという報告があり、また、鳥取県の某電力会社の建物にこの反応による被害が認められたとの報告がある程度で、極めて少ないようである」と記述されている。

次に劣化が報告されたのは既述のように1965年で、鳥取県内の鉄筋コンクリート建物パラペットコンクリートの一部が、アルカリシリカ反応と凍結融解作用の共同作用により、はく離脱落しているのが見付かっている¹³⁾ (これはコンクリート工学ハンドブックに引用されている鳥取県の建物である)。使用されていた骨材は皆生浜産の安山岩の砂利であった。

1965年までの間に、森平¹⁶⁾は奈良県吉野郡竜門村に建設予定の津風呂堰堤の骨材と基盤岩石について化学法を実施している。基盤岩石や骨材の一部にアメリカで反応性があるといわれている千枚岩¹⁷⁾が含まれていたため試験が行われたのである。結果はすべて無害であった。また、有泉ほか¹⁸⁾は反応性があると考えられる55試料の岩石および3か所のダム建設箇所の骨材の化学法を実施している。試験の結果、有泉ほか¹⁸⁾は本邦岩石にもアルカリ骨材反応を示す恐れのある骨材が各所に存在すること、安山岩・石英粗面岩には反応性を示すものが多いこと、チャート質珪石は反応性を示すこと、石英粗面岩質凝灰岩・砂岩・凝灰質頁岩にも反応性があるものがあることを述べている。また、熱海近辺の安山岩、伊豆万歳山のガラス質の多い石英粗面岩の反応性が高いことにも言及している。

1979年に太田ほか¹⁹⁾はコンクリート用骨材中に含まれる化学的に不安定な鉱物の存在を明らかにすることと、骨材の反応性を定量的に把握するために、国内各地の29試料の骨材を対象に各種試験とともにモルタルバー法および化学法を実施している。試験の結果はモルタルバー法、化学法ともに、すべての試料で無害であった。

以上のように1965年以降、我が国におけるアルカリシリカ反応による構造物の劣化に関する報告は見られなく

なったが、1982年頃の関西地区でのアルカリシリカ反応による構造物の劣化の発見^{20),21)}を機会に各地で劣化構造物が確認されるとともに研究が活発に行われるようになってきた。

これまでに報告されている被害構造物（主に土木構造物）をまとめると表-1のようになる。いずれもアルカリシリカ反応によって劣化したものである。今までにアルカリシリカ反応以外のアルカリ骨材反応によってコンクリートが劣化した例は、藤原ほか²⁷⁾による報告があるのみである。それによると、海岸の消波ブロックがアルカリ炭酸塩岩反応によって劣化している。このように我が国で問題となっているのは、今のところアルカリシリカ反応である。アルカリシリカ反応の原因となった岩石（反応性岩石）は表-1のように圧倒的に安山岩類が多く、次いでチャートの順になっている。

1983年以降の研究で、岩石・骨材のランダムな採取をしてそれらの反応性を報告しているものには、福島・二村²¹⁾、二村・福島^{29),34),35)}、田澤ほか³⁶⁾、喜田ほか³⁷⁾、添田ほか³⁸⁾、藤崎ほか³⁹⁾、KATAYAMA and KANESHIGE⁴⁰⁾、白木ほか⁴¹⁾および脇坂ほか⁴²⁾がある。

KATAYAMA and KANESHIGE⁴⁰⁾は80試料の火山岩類に化学法を実施し、その結果と続成作用との関係を論じている。彼らは白亜紀から第四紀までの火山岩類を粘土鉱物によって非変質帯、弱変質帯、スメクタイト帯、緑泥石帯に区分している。非変質帯と弱変質帯のものは有害または潜在的有害である。すなわち、これらの帯の安山岩の多くは、火山ガラス、クリストバライト、トリディマイトなどの反応性鉱物を少量（15%以下）含んでおり、潜在的有害である。一方、サヌカイトや一部の新鮮な玄武岩のように反応性鉱物（ガラス、クリストバライト）に富むものは、有害である。すべてのガラス質流紋岩（黒曜岩、真珠岩、ピッチストーン、ガラス質流紋岩、ガラス質溶結凝灰岩）は有害である。スメクタイト帯の岩石は、反応性鉱物の有無によって潜在的有害か無害となっている。すなわち、クリストバライト、トリディマイト、オパールを含む岩石は潜在的有害、このような鉱物がないものは無害である。中新世のヒン岩や白亜紀の再結晶した流紋岩のような強く変質をした緑泥石帯の岩石は、ほとんど無害である。これは再結晶作用によってこれらの岩石は、稀にしか反応性鉱物を含まない不活性な岩石に変わっているからだとしている。このように火山岩類は続成作用によって反応性を失っていくとされている。

白木ほか⁴¹⁾は潜晶質石英を含む砂岩、チャート、ノバキュライトタイプのチャートの化学法の結果と石英の結

晶度との関係を論じている。石英の結晶度はMURATA and NORMAN⁴³⁾の方法によって求められている。その結果、珪質堆積岩類の溶解シリカ量と石英の結晶度との間には高い相関があり、石英の結晶度の変化に対する溶解シリカ量の変化の割合は、砂岩、チャート、ノバキュライトタイプのチャートの順に大きくなるとしている。チャートの溶解シリカ量の変化率が砂岩よりも大きいのは、同じ結晶度には結晶としての安定性に差がないと仮定すると、潜晶質石英の粒子径が小さいことによるものとされている。また、ノバキュライトタイプのチャートの変化率がチャートよりも大きいのは、粒径の違いよりも、結晶格子のひずみにより結晶の内部エネルギーが大きくなり、結晶の不安定性が大きくなることの影響の方が大きいと推定されている。

脇坂ほか⁴²⁾は北海道を除く全国367箇所の碎石場および104箇所の露頭から試料を採取し、それらについて化学法およびモルタルバー法を実施している。その結果、反応性がある試料が含まれている岩型は、玄武岩、玄武岩質安山岩、安山岩、石英安山岩、流紋岩の火山岩類、凝灰岩、石英安山岩質火砕岩の火砕岩類、石英片岩の変成岩類、砂岩、頁岩、泥岩、粘板岩、珪質岩、チャート、輝緑凝灰岩の堆積岩類で、深成岩類やほとんどの変成岩類には反応性のあるものが無いことが示されている。これらの各岩型に反応性をもたしているのは、火山岩類では、クリストバライト、トリディマイトおよび火山ガラスで、堆積岩類では粒度の小さな石英であるとされている。また、火山岩類の反応性は生成年代とも関係しており、反応性があるのは中新世以降の新しい火山岩類で、漸新世以前の古い火山岩類には反応性を示すものはほとんど無いとされている。

(5) ニュージーランド

KENNERLEY *et al.*⁴⁴⁾によると、ニュージーランドでセメント中のアルカリと骨材との反応の研究が始まったのは1943年である。アルカリシリカ反応によるコンクリートの劣化がいつ頃発見されたのかは不明であるが、KENNERLEY *et al.*⁴⁵⁾は4件の構造物の劣化を報告している。それらは3件の鉄道橋とNew PlymouthにあるTe Henui橋で、骨材としてEgmont安山岩（通常脱ガラス化しており、石基中に少量のクリストバライト、トリディマイトが入っている）が使用されていた。

ST JOHN⁴⁶⁾はニュージーランドの建築用骨材の反応性を表-2のようにまとめている。表のように、反応性があるのは沖積層の礫が主体で、岩型別にはグレイワック、安山岩および流紋岩が大勢を占めている。この表では反

表-1 日本においてアルカリシリカ反応による被害を受けた構造物

構造物の種類	反応の原因となった岩石・鉱物	文 献
橋	頁岩・浮石（最上川砂利）	近藤・北川 ¹²⁾
パラペット	皆生浜産砂利（トリディマイトを多量に含有した安山岩の周囲にのみreaction rimがある）	村田ほか ¹³⁾
阪神地区の構造物	輝石安山岩（クリストバライト）	福島・二村 ²¹⁾
コンクリートスラブ	古銅輝石安山岩（ガラス）	川村ほか ²²⁾
コンクリート構造物	古銅輝石安山岩（ガラス）	川村ほか ²²⁾
壁用モルタル	トリディマイト・クリストバライト	川村ほか ²²⁾
コンクリート水路	ハリ質斜方輝石安山岩	森野 ²³⁾
壁・高欄・堤防・橋梁（梁端部・柱・橋・脚・梁）・建物外壁	古銅輝石安山岩	小野・吉岡 ²⁴⁾
鉄道橋脚	古銅輝石安山岩	川村ほか ²⁵⁾
パラペット・ドルフィン・住宅地コンクリート側壁	輝石安山岩・石英・ガラス質の記載があるが反応性物質の特定はされていない。	鈴木ほか ²⁶⁾
橋脚・棧橋	輝石安山岩（クリストバライト・ガラス），（千枚岩）	藤原ほか ²⁷⁾
擁壁	粘板岩，（角礫岩）	藤原ほか ²⁷⁾
橋脚	川砂利	藤原ほか ²⁷⁾
道路環境ブロック橋梁	チャート	森野 ²⁸⁾
地下外壁コンクリート	輝石安山岩（クリストバライト），ガラス質安山岩（ガラス），川砂利	二村・福島 ²⁹⁾
鉄塔基礎	斜方輝石安山岩（クリストバライト）	西林ほか ³⁰⁾
Rc橋脚	チャート・粘板岩	西林ほか ³⁰⁾
テトラポット	両輝石安山岩（クリストバライト）	西林ほか ³⁰⁾
橋梁・堰・水門・高架橋・流路工・跨線橋・防波堤・砂防ダム	安山岩・石英安山岩・流紋岩・チャート・珪質頁岩・頁岩	桑原ほか ³¹⁾
壁体・堤防・擁壁・橋台・橋脚・T型橋脚・ボックスカルバート・高欄・無筋コンクリート・屋外階段	古銅輝石安山岩	小野 ³²⁾
堤防・擁壁・橋台・中空三角ブロック	チャート・粘板岩	小野 ³²⁾
壁式橋脚	凝灰岩	小野 ³²⁾
20件の構造物	クリストバライト・トリディマイト・火山ガラスなどを含む輝石安山岩，微晶質・潜晶質石英を含むチャート・粘板岩・砂岩	高田ほか ³³⁾

応性岩石の合計は18.8%であるが，ST JOHN⁴⁷⁾はニュージーランドで使われている骨材の30%に潜在的に反応性があると述べている。

ST JOHN⁴⁷⁾は Auckland Southern Motorway の橋が Waikato 川の流紋岩の砂で，Taranaki の橋がグレイワッケ（火山岩類が混入している）によってクラックを

発生させていることを報告している。Waikato 川の砂は32%が反応性粒子（流紋岩7～9%，軽石10～13%，火山ガラス7～9%，少量の安山岩，石英安山岩，トリディマイト）である。また，Rangitikei 川では火山ガラス（全粒子の2～3%），流紋岩（2%），安山岩（1%），チャート（1～2%），トリディマイトと軽石（少量）が反応性

表-2 ニュージーランドにおける骨材のアルカリシリカ反応性。ST JOHN⁴⁶⁾の Table-1 より作成。

岩 型	砕 石		沖 積 層	
	非反応性	反応性	非反応性	反応性
グレイワッケ	12.4%	—	39.6%	—
グレイワッケ+その他	—	—	10.1%	7.9%
海浜石英砂	—	—	5.4%	<0.1%
玄武岩, フォノライト	12.3%	—	—	—
流紋岩, 石英安山岩	—	0.3%	—	2.8%
安山岩	—	—	—	7.8%
石灰岩	1.0%	—	—	—
その他	0.4%	—	—	—
合 計	26.1%	0.3%	55.1%	18.5%

骨材であるとされている。

KATAYAMA *et al.*⁴⁸⁾はニュージーランドと日本の火山岩類は、岩型が類似していること、ガラス、トリディマイトおよびクリストバライトの含有量も類似していることを述べている。そして、火山岩類の反応性は両国で同様であろうとしている。

以上のようにニュージーランドの反応性岩石は、主としてグレイワッケおよび火山岩類（トリディマイト、クリストバライト、火山ガラスを含む）である。

(6) ノルウェー

MELAND⁴⁹⁾によるとノルウェーでは、10～15年ほど前に水泳プールとシャワーキャビネットでアルカリシリカ反応による劣化が観察されている。このようなノルウェーでのアルカリシリカ反応は、タイルで被覆されたコンクリートで認められている。そこで MELAND⁴⁹⁾は、タイルに反応性があるのではないかと考え、試験を行っている。その結果、タイルは石英、ムライト、斜長石で構成されており、ASTM C 289で溶解シリカ量は139, 86, 501m mol/l、アルカリ濃度減少量はそれぞれ49, 21, 35 m mol/lを示し有害であることが分った。そして、セラミックタイルはセメントと接触するとアルカリシリカ反応を起こすだろうと結論している。このように、ノルウェーで報告されているアルカリシリカ反応では、原因となったのは天然の骨材ではなく、コンクリート表面に張られたタイルであった。

(7) 南アフリカ

南アフリカで最初にアルカリ骨材反応（原著にはセメント骨材反応と記載されている）が報告されたのは1974年である⁵⁰⁾。

OBERHOLSTER *et al.*⁵⁰⁾は Cape 半島で調査を行った橋梁の40%以上がアルカリシリカ反応によるクラックを生じていること、その他、ダム壁、コンクリート道路、避雷針基礎、けい船柱および建築物などにもこのタイプのクラックが生じていることを報告している。これらのアルカリシリカ反応によるクラックを生じている構造物すべてに Malmesbury 層群の粗骨材（グレイワッケ、ホルンフェルス、千枚岩、粘土質岩および珪岩）が含まれている。ただ1構造物だけ Malmesbury 層群の骨材ではなく、花崗岩質岩が含まれていた。グレイワッケと珪岩には砂粒サイズの石英、長石、岩片、白雲母と基質にパーミキュライト、緑泥石、石英、長石、セリサイトが含まれている。石英は通常、波動消光している。千枚岩とホルンフェルスは極細粒で石英、長石、パーミキュライト、イライト、セリサイト、黒雲母、キン青石を含んでいる。石英は微細であるので波動消光の有無は不明である。花崗岩質岩は細粒花崗岩と2種の花崗片麻岩から構成されており、そのうち1つの花崗片麻岩には石英（すべてひずんでいる）が55%含まれている。彼らは南アフリカのアルカリ骨材反応は、カナダの DUNCAN *et al.*^{51)~53)}が記載している Nova Scotia 地方の反応に類似していると述べている。OBERHOLSTER らは Malmesbury 層群の骨材に関して石英の変形の様子に注目しており、パーミキュライトには関心を払っていない。もし、パーミキュライトが反応に関与していることになると、アルカリシリケート反応のカナダ以外での例ということになる。

VANDERSTRAETEN⁵⁴⁾は Port Elizabeth 市の Pell Street インターチェンジの道路構造物にクラックと反応生成物が発生していることを報告している。粗骨材には珪岩の砕石が使われていた。

STRAUSS and SCHNITTER⁵⁵⁾は Malmesbury 層群の頁岩（ホルンフェルス）を含んだ Cape Town から Somerset West への高速道路のコンクリートが、アルカリ骨材反応を起こしていることを報告している。

OBERHOLSTER⁵⁶⁾は Port Elizabeth 市の Churchill ダムにクラックがあり、劣化の原因が岩石記載的試験、X線回折、走査型電子顕微鏡による試験では典型的なアルカリシリカ反応であることを述べている。骨材には Table 山の珪岩が使われていた。

ALEXANDER *et al.*⁵⁷⁾は10年経過した空港のコンクリートエプロンがアルカリ骨材反応を起こしていることを報告している。粗骨材、細骨材はオールドビス紀 Cape 累層群、Table 山層群起源の珪岩（ひずんだ石英を含んでいる）の礫である。

以上のように、南アフリカでアルカリシリカ反応（一部にはアルカリシリケート反応の可能性がある）の原因となっている岩石は、グレイワッケ、珪岩などの堆積岩類と千枚岩、ホルンフェルスおよび花崗片麻岩の変成岩類に大別できる。

(8) スウェーデン

NILSSON⁵⁸⁾によるとオパール質フリントと砂岩を含んだコンクリートスラブにアルカリシリカ反応によるポップアウトが生じている。

(9) 西ドイツ

LENZNER⁵⁹⁾はAachenでのアルカリシリカ反応の原因が、オパール質砂岩とフリントであることを述べている。

ドイツで制定された骨材のアルカリシリカ反応性の試験方法であるDIN 4226は、フリントおよびオパール質砂岩に対する方法である。このように、ドイツではオパール質砂岩とフリントが反応性岩石の主体をなしているようである。

(10) イエメン

SIMS and POOLE⁶⁰⁾が北イエメンでのアルカリシリカ反応による構造物の劣化を記載している。一つは1976年に建設後1か月でクラックが生じたもので、粗骨材にガラス質玄武岩（85%）、ガラス質流紋岩（10%）、細骨材にガラス質玄武岩（70%）、ガラス（12%）が含まれている。これらのうち、玄武岩の1/4と流紋岩の1/2にゲルのリムがある。もう一つの例では、粗骨材、細骨材ともにガラス質流紋岩を含んだコンクリートに、建設後12か月でクラックが発生している。SIMS and POOLE⁶⁰⁾は火山岩地域である北イエメンでは、火山ガラスを含んでいる流紋岩、黒曜石、松脂岩、フェルサイト、石英安山岩、安山岩、玄武岩に反応性があるとまとめている。

(11) ザンビア

THAULOW⁶¹⁾がItezhiethziダムの取水塔のコンクリート表面にmap-crackingがあり、アルカリシリカ反応を起こしていることを報告している。反応の原因は風化花崗岩質岩のクラックを充填したオパールだとされている。

(12) その他の国々

今までに述べてきた国々では、アルカリシリカ反応によるコンクリート構造物の劣化が実際に確認されてい

る。これらのほかにアルカリシリカ反応によるコンクリート構造物の劣化は確認されていないが、反応性骨材の産出が報告されている国がいくつかある。

中国では揚子江流域のTuoqingよりも上流では流紋岩、下流ではフリントが反応性骨材の主なものであるとされている⁶²⁾。XU and CHEN⁶³⁾によると、中国でアルカリ骨材反応が生じていないのは、骨材の反応性を事前に調査し、また、抑制対策がとられているからである。彼らは中国で反応性が認められている岩石として、チャート（メノウ、ヘキ玉を含む）、流紋岩、凝灰岩、安山岩、石英安山岩、珪質頁岩、珪質岩（隠微晶質シリカ）を挙げている。

イランではチャートの砂利とオパール質の砂が、ASTM C 289でそれぞれ有害、潜在的有害となっている。しかし、これらはASTM C 227では膨脹せず、ペシマムが存在することが予想されている⁶⁰⁾。

ポーランドではPENKALA⁶⁴⁾がASTM C 227およびC 586（コンクリート用炭酸塩岩の潜在的アルカリ反応性に対する標準試験法（ロックシリンダー法））を実施している。その結果、反応性があるのは、堆積性ドロマイト岩、石灰岩、砂岩、玄武岩、珪質岩類（カルセドナイト）および砂利の中の砂岩、石灰岩、堆積性ドロマイト岩、フリント、珪岩、輝緑岩、泥灰岩であるとされている。

西部サウジアラビアの骨材について、SIMS and POOLE⁶⁰⁾がASTM C 289とC 227を実施している。入手された骨材は流紋岩（45%）、安山岩（20%）、花崗岩/閃長岩（10%）、微花崗岩（9%）、凝灰岩（6%）、風化火成岩（5%）、石英（3%）およびその他（2%）から構成されている。これら全体のASTM C 289は無害を示し、流紋岩と安山岩だけのASTM C 227も無害を示している。しかし、ペシマム混合にすると膨脹をする可能性があるとされている。

トルコではいくつかの大ダムにある種の反応性骨材が使用されているが、コンクリートに劣化は生じていないとされている⁶⁵⁾。またKOCACITAK⁶⁵⁾は25の異なった産地の骨材のうち、29%がASTM C 289とC 227で反応性があったと述べている。

ユーゴスラビアではMAKSIMOVIĆ *et al.*⁶⁶⁾によって初めてアルカリシリカ反応の研究が行われている。この報告では15%のチャートを含んだ骨材は有害と推定されたが、ASTM C 289では無害であった。CMILJANIC and RSUMOVIĆ⁶⁷⁾によると、ユーゴスラビアでアルカリ骨材反応によって劣化したコンクリートの事例はない。しかし、ASTM C 227の結果では、玉ズイ質やオパール質チャートが有害になることが示されているとしてい

このような中で、我が国の反応性岩石の岩型は各国に比べ多岐に及んでいると言える。中でも火山岩類が多く含まれているのが特徴である。また、深成岩類に反応性岩石が認められないのも特徴である。海外でもアメリカ、アルゼンチン、カナダ、イギリス、アイスランド、ニュージーランドおよびイエメンなどでも火山岩類に反応性が認められている。しかし、これらの火山岩類の多くはその反応性を火山ガラスによってもたらされているのに対し、我が国の火山岩類の反応性は、多くはクリストバライト、トリディマイトによってもたらされており^{42),69)}、相違が認められる。この違いはそれぞれの国における火山岩類の生成条件の違いを反映しているとも考えられるが、クリストバライト、トリディマイトが顕微鏡観察やX線回折で容易に検出できないことも一因と考えられる。事実、KATAYAMA *et al.*⁴⁸⁾はニュージーランドの火山岩類で、従来、クリストバライト、トリディマイトが認められないとされていた玄武岩、安山岩について綿密な観察を行った結果、日本の玄武岩、安山岩中と同量のクリストバライト、トリディマイトを見出している。これらはニュージーランドと日本が同じ環太平洋火山帯に属しており、火山岩類の生成条件が同様であるためもあるが、今後、他の国々での検討が待たれるものである。

いくつかの国では花崗岩類にも反応性が認められている。ザンビアでの構造物の被害は花崗岩中のオパールが原因だとされており⁶¹⁾、初生的な鉱物が原因とは考えられないが、その他の国では花崗岩の反応性は初生的に含まれているひずんだ石英に由来しているとされている^{4),5),50),70)}。我が国にも構造帯中の花崗岩類にはかなりひずんだ石英を含んでいるものあり、反応性のある花崗岩類が存在している可能性がある。しかし既述のように、我が国では今のところ反応性のある花崗岩類は報告されていない。これは今までに花崗岩類についてあまり反応性試験が行われていないことや、反応性試験の試験期間が短いことが原因であると考えられる。例えば、HOOTON and ROGERS⁷¹⁾は反応性のある花崗岩類で作ったモルタルバーの膨脹は後期の材令から始まるとしており、MULLICK *et al.*⁹⁾はASTM C 289の反応時間(24時間)では花崗岩類は無害であるが、反応時間を7日間にすると有害となると述べている。今後、我が国の花崗岩類の反応性について、試験法ならびに劣化構造物中で反応原因となっているものがないかなどを検討していく必要があろう。

いずれにしても我が国の反応性岩石の岩型は多岐にわたっており、他国に比べて多いことは確かである。これは、プレート境界に位置している日本列島の地質の複雑

さを反映したものであると思われる。

5. おわりに

アルカリシリカ反応性がある岩石は、基本的には「その1」で述べたようにオパール、玉ズイ、火山ガラス、隠微晶質石英、トリディマイト、クリストバライトなどを含んだものである。しかし、これらの鉱物を含んで反応性を有している岩石の岩型は、これまでに見てきたように、それぞれの国を構成している地質を反映して国毎に特徴がある。本資料が今後、国内あるいは海外でコンクリートを打設する際の一助となれば幸いである。

謝辞 建設省土木研究所の中村康夫室長、河野広隆氏には粗稿を読んでいただき、有益御助言をいただいた。(社)セメント協会・研究所の高橋 茂氏、(社)日本道路協会の時津氏には、文献の収集で御協力いただいた。建設省土木研究所の成島幸子嬢には、表を作成していただいた。これらの方々に厚く御礼申し上げる。

参考文献

- 1) RIKHARDUR, K. (1979) : Steypuskemmdir-astandkonnun, The Icelandic Building Research Institute.
- 2) GUDMUNDSSON, G. and ASGEIRSSON, H. (1983) : Parameters affecting alkali expansion in Icelandic concrete, Proc. 6th ICAC, pp. 217-221.
- 3) OLAFSSON, H. (1989) : AAR problems in Iceland - Present state, Proc. 8th ICAAR, pp. 65-70.
- 4) GOGTE, B. S. (1973) : An evaluation of some common Indian rocks with special reference to alkali-aggregate reactions, Engineering Geology, 7, pp. 135-153.
- 5) VISVESVARAYA, H. C., RAJKUMAR, C. and MULLICK, A. K. (1987) : Analysis of distress due to alkali-aggregate reaction in gallery structures of a concrete dam, Proc. 7th ICAAR, pp. 188-193.
- 6) MULLICK, A. K., WASON, R. C., SHNHA, S. K. and RAO, L. H. (1987) : Evaluation of quartzite and granite aggregates containing strained quartz, Proc. 7th ICAAR, pp. 428-433.
- 7) ROSSETTI, V. A. (1981) : Osservazioni di pop-outs dovuti alla reazione alcali-aggregati su pavimentazioni in calcestruzzo in Italia, La Pretabbricazione, 6, pp. 262-263.
- 8) BARONIO, G. (1983) : Examples of deterioration by alkalis in Italian concrete structures, Proc. 6th ICAC, pp. 503-510.
- 9) BARONIO, G., BERRA, M., BACHIORRINI, A., DEL-MASTRO, A., MONTANARO, L. and NEGRO, A.

- (1987) : Infrared spectroscopy in the evaluation of aggregates in A. S. R. deteriorated concretes from many parts of the world : Comparison with other methods, Proc. 7th ICAAR, pp. 309-313.
- 10) BARONIO, G. and BERRA, M. (1989) : The occurrence of AAR in a concrete structure in Italy, Proc. 8th ICAAR, pp. 71-76.
- 11) BARISONE, G., BOTTINO, G. and PAVIA, R. (1989) : Alkali-silica reaction potentially bearing minerals in alluvial deposits of Calabria, Umbria, and Toscana Regions (Italy), Proc. 8th ICAAR, pp. 507-512.
- 12) 近藤泰夫・北川欣一 (1951) : アルカリ・骨材反応に関する研究, セメント技術年報, 5, pp. 379-398.
- 13) 村田清逸・関 慎吾・藤本洋一 (1965) : アルカリ骨材反応を起したコンクリートの一例, セメント・コンクリート, 220, pp. 7-13.
- 14) 日本コンクリート工学協会編 (1976) : コンクリート便覧, 1220p, 技報堂, 東京.
- 15) 岡田 清・六車 照編 (1981) : 改訂新版コンクリート工学ハンドブック, 1464p. 朝倉書店, 東京.
- 16) 森平信一 (1952) : 津風呂堰堤のアルカリ骨材反応について, セメント・コンクリート, 62, pp. 9-10.
- 17) KAMMER, H. A. and CARLSON, R. W. (1941) : Investigation of causes of delayed expansion of concrete in Buck Hydroelectric Plant, Jour. ACI, Proc., 37, pp. 665-671.
- 18) 有泉 晶・小松原正夫・野本誠三 (1952) : 国産低発熱型セメントの性質および本邦岩石, 堰堤用骨材のアルカリ反応性について, 建設省直轄工事第5回技術研究報告, pp. 17-32.
- 19) 太田 実・小野金蔵・河田博之 (1979) : 骨材の化学的安定性に関する試験, 土木研究所資料, 1536, 108p.
- 20) 幸左賢二・小林和夫・白野弘明 (1984) : 反応性骨材コンクリートの調査と実験の概要, 土木学会第39回年次学術講演会講演概要集, 第5部, pp. 15-16.
- 21) 福島正人・二村誠二 (1983) : コンクリート用砕石のアルカリ骨材反応性, セメント・コンクリート, 438, pp. 8-15.
- 22) 川村満紀・竹本邦夫・加場重正 (1983) : わが国におけるアルカリ骨材反応の2, 3の実例, セメント技術年報, 37, pp. 136-139.
- 23) 森野奎二 (1984) : わが国のアルカリ骨材反応, 骨材資源, 60, pp. 184-193.
- 24) 小野紘一・吉岡保彦 (1985) : アルカリ骨材反応による損傷, アルカリ骨材反応に関するシンポジウム, 日本材料学会, pp. 29-41.
- 25) 川村満紀・竹本邦夫・加場重正 (1985) : アルカリ・シリカ反応による劣化構造物の一調査, セメント技術年報, 39, pp. 344-347.
- 26) 鈴木一孝・西川直宏・大久保総一郎 (1985) : アルカリ・骨材反応に関連するコンクリート建造物劣化の実態とその検討, セメント技術年報, 39, pp. 348-351.
- 27) 藤原 靖・松岡康則・金子誠二・内藤隆史 (1985) : アルカリ骨材反応に関する研究, 大成建設技術研究所報, 18号, pp. 57-65.
- 28) 森野奎二 (1986) : わが国のチャート質骨材のアルカリ骨材反応例, 骨材資源, 70, pp. 63-73.
- 29) 二村誠二・福島正人 (1986) : アルカリ・シリカ反応による劣化コンクリート建物の一調査, セメント技術年報, 40, pp. 292-295.
- 30) 西林新蔵・林 昭富・大西利勝 (1986) : アルカリ骨材反応による損傷と骨材特性, セメント技術年報, 40, pp. 296-299.
- 31) 桑原啓三・平野 勇・脇坂安彦・阿部昌彦・長沢政和・守屋進・西崎 到・小林茂敏・河野広隆・小野金造・窪田洋司 (1986) : コンクリートの劣化実態調査報告(1), 土木研究所資料, 2369, 111p.
- 32) 小野紘一 (1986) : アルカリ骨材反応による構造物の劣化の形態—日本における例—, コンクリート工学, Vol. 24, No. 11, pp. 50-56.
- 33) 高田 潤・立松英信・立屋敷久志・永嶋正久 (1987) : アルカリ骨材反応とコアの膨張試験—とくに骨材の特徴について—, 骨材資源, 75, pp. 133-141.
- 34) 二村誠二・福島正人 (1984) : コンクリート用砕石のアルカリ・シリカ反応による膨張, 第6回コンクリート工学年次講演会論文集, pp. 245-248.
- 35) 二村誠二・福島正人 (1985) : コンクリート用砕石のアルカリシリカ反応機構, 第7回コンクリート工学年次講演会論文集, pp. 133-136.
- 36) 田澤栄一・中本 勝・伊藤祐一 (1985) : 広島近郊産砕石用母岩のアルカリ骨材反応性, セメント技術年報, 39, pp. 324-327.
- 37) 喜田大三・辻 博和・千野裕之 (1986) : 岩種別骨材のアルカリ・シリカ反応性について, 骨材資源, 68, pp. 208-214.
- 38) 添田誠司・大和竹史・江本幸雄 (1986) : 反応性骨材を用いたコンクリートの膨張量および細孔構造, セメント技術年報, 40, pp. 320-323.
- 39) 藤崎邦弥・山本博之・今立文雄 (1987) : ASR 試験における化学法とモルタルバー法との相関性に関する一考察, セメント技術年報, 41, pp. 411-414.
- 40) KATAYAMA, T. and KANESHIGE, Y. (1987) : Diagenetic changes in potential alkali-aggregate reactivity of volcanic rocks in Japan—A geological interpretation, Proc. 7th ICAAR, pp. 489-495.
- 41) 白木亮司・丸 章夫・小林一輔 (1989) : 珪質堆積岩のアルカリ反応性の新しい評価方法, コンクリート工学年次論文報告集, 10-2, pp. 699-704.
- 42) 脇坂安彦・守屋 進・河野広隆・森濱和正・石井良美 (1988) : 我が国におけるアルカリ反応性骨材の特徴と分布, 土木技術資料, 30, pp. 658-663.
- 43) MURATA, K. J. and NORMAN, II, M. B. (1976) : An index of crystallinity for quartz, American Journal of Science, 276, pp. 1120-1130.
- 44) KENNERLEY, R. A., ST JOHN, D. A. and SMITH, L. M. (1981) : A review of thirty years of investigation of the alkali-aggregate reaction in New Zealand, Proc. the ICARC, S252/12, 11p.
- 45) KENNERLEY, R. A., ST JOHN, D. A. and SMITH, L. M. (1975) : Alkali-Aggregate reactivity in New Zealand. Symp. Alkali-Aggregate Reaction, Preventive Measures, Reykjavik, pp. 35-53.
- 46) ST JOHN, D. A. (1987) : New Zealand approach to

- evaluating the alkali-aggregate problem, Proc. 7th ICAAR, pp. 237-241.
- 47) ST JOHN, D. A. (1989) : Alkali-aggregate reaction in New Zealand—A continuing problem, Proc. 8th ICAAR, pp. 51-56.
- 48) KATAYAMA, T., ST JOHN, D. A. and FUTAGAWA, T. (1989) : The petrographic comparison of some volcanic rocks from Japan and New Zealand—Potential reactivity related to interstitial glass and silica minerals, Proc. 8th ICAAR, pp. 537-542.
- 49) MELAND, I. (1989) : Alkali-silica reaction in tilecovered concrete, Proc. 8th ICAAR, pp. 107-113.
- 50) OBERHOLSTER, R. E., BRANDT, M. P. and WEATON, A. C. (1978) : The evaluation of greywacke, hornfels and granite aggregates for potential alkali reactivity, 4th ICEACC, pp. 141-161.
- 51) DUNCAN, M. A. G., SWENSON, E. G., GILLOTT, J. E. and FORAN, M. R. (1973 a) : Alkali-aggregate reaction in Nova Scotia, I. Summary of a five-year study, Cement and Concrete Research, 3, pp. 55-69.
- 52) DUNCAN, M. A. G., GILLOTT, J. E. and SWENSON, E. G. (1973 b) : Alkali-aggregate reaction in Nova Scotia, II. Field and petrographic studies, Cement and Concrete Research, 3, pp. 119-128.
- 53) DUNCAN, M. A. G., SWENSON, E. G. and GILLOTT, L. E. (1973 c) : Alkali-aggregate reaction in Nova Scotia, III. Laboratory studies of volume change, Cement and Concrete Research, 3, pp. 233-245.
- 54) VANDERSTRAETEN, A. T. (1987) : Repair of alkali-aggregate reaction damage to the motorway structures of the Pell Street Interchange, Port Elizabeth, Republic of South Africa, Proc. 7th ICAAR, pp. 194-198.
- 55) STRAUSS, P. J. and SCHNITTER, O. (1987) : Rehabilitation of a Portland cement concrete pavement cracked by alkali-aggregate reaction, Proc. 7th ICAAR, pp. 210-214.
- 56) OBERHOLSTER, R. E. (1989) : Alkali-aggregate reaction in South Africa : Some recent developments in research, Proc. 8th ICAAR, pp. 77-82.
- 57) ALEXANDER, M. G., McIVER, J. R. and GLYNN, S. M. (1989) : Assessment of the deterioration of an airport concrete apron due to AAR, Proc. 7th ICAAR, pp. 483-487.
- 58) NILSSON, L.-O. (1983) : Moisture effects on the alkali-silica reaction, Proc. 6th ICAC, pp. 201-208.
- 59) LENZNER, D. (1983) : Comparative laboratory tests on the alkali-silica reaction, Proc. 6th ICAC, pp. 321-327.
- 60) SIMS, I and POOLE, A. B. (1980) : Potentially alkali-reactive aggregates from the Middle East, Concrete, May, pp. 27-30.
- 61) THAULOW, N. (1983) : Alkali-silica reaction in the Itzhitezh Dam Project, Zambia, Proc. 6th ICAC, pp. 471-477.
- 62) HUARONG, X. and MEILIANG, C. (1983) : Investigation for natural reactive aggregates in gravel alluvium of Yangtze River Basin, Proc. 6th ICAC, pp. 511-517.
- 63) XU, H. Y. and CHEN, M. (1987) : AAR in Chinese engineering practices, Proc. 7th ICAAR, pp. 253-257.
- 64) PENKALA, B. (1987) : Alkali-aggregate reactivity investigations in Poland—A review, Proc. 7th ICAAR, pp. 221-225.
- 65) KOCACITAK, S. (1975) : A note of information regarding to alkali-Aggregate reactions in Turkey, Symp. Alkali-Aggregate Reaction, Preventive Measures, Reykjavik, pp. 259-262.
- 66) MAKSIMOVIĆ, L., RATKOVIC, N. and DUCIC, V. (1962) : Ispitivanje potencijalne reaktivnosti agregata iz nalazista gaocici sa alkali-jama iz cementa, Saopštenja Instituta za ispitivanje materijala Beograd, Gogina X, Broj 16, pp. 24-34.
- 67) CMILJANIC, S. and RSUMOVIĆ, M. (1987) : Study of potential alkali-silicate reactivity of aggregate from fluvial deposits in Serbia (Yugoslavia), Proc. 7th ICAAR, pp. 242-246.
- 68) RSUMOVIĆ, M. and CMILJANIĆ, S. (1987) : Investigations of development and products of alkali-silicate reaction in concrete, Proc. 7th ICAAR, pp. 403-407.
- 69) 市川 慧・平野 勇・脇坂安彦・守屋 進・小林茂敏・河野 広隆・森濱和正・森田良美 (1990) : 日本産岩石のアルカリシリカ反応性, 土木研究所資料, 261p.
- 70) CAVALCANTI, A. J. C. T. (1987) : Alkali-aggregate reaction at Moxotó Dam, Brazil, Proc. 7th ICAAR, pp. 168-172.
- 71) HOOTON, R. D. and ROGERS, C. A. (1989) : Evaluation of rapid test methods for detecting alkali-reactive aggregates, Proc. 8th ICAAR, pp. 439-444.

(1990年3月22日受付, 1990年4月18日受理)