

報告 わが国の代表的な反応性骨材と ASR の発生に関するデータ整理

広野 真一*1・山田 一夫*2・佐藤 友美*3・鳥居 和之*4

要旨：わが国で ASR を発生してきた代表的な岩石について述べ、その分布と被害事例のごく一部を示した。新第三紀以降の火山岩類は、古くから多数の被害を発生してきた代表的な岩石であるが、チャート・珪質頁岩・珪質粘板岩、砂質岩・泥質岩起源のホルンフェルス、広域変成岩類、断層岩類、なども各地で被害を発生している。発生した ASR について、地域と反応性骨材、環境要因などの詳細を明らかに示し、それに基づき、同様な岩石の分布や発生要因を知ることは、今後の対応に非常に有益である。このような情報は非常に少ないが、研究機関などによる全国を網羅したデータベース化が切望される。

キーワード：アルカリシリカ反応, ASR, 反応性骨材, 安山岩, 火山岩類, チャート, 岩石学的試験

1. はじめに

アルカリシリカ反応（以下、ASR）は骨材岩石に発生する現象であり、地質学的背景に従って分布する反応性の岩石や気候などの、いずれも地域特有の要因に密接に関連している。しかし、現実被害を発生している ASR に対して、このことを意識して行われた系統的な研究は一部地域に限定され、わが国で広く発生している ASR の全貌は明らかでない。ASR の被害は、1986 年に抑制対策が行われるようになって以降も、完全に収束したわけではない^{1),2),3),4)}など。その原因は、アルカリ総量規制の限界や骨材の反応性評価方法、運用方法などが考えられる。一方、抑制対策実施後か否かを問わず、発生した ASR については、地域と反応性骨材、環境要因などの発生原因の詳細を明らかに示し、それに基づき、同様な岩石の分布と、それが ASR を生じる環境条件を知ることが、今後の予測や対策などのために非常に重要である。しかし、このような情報は現在、一部地域を除いて極めて少ない。

本報告では地質学的背景に基づき、わが国でコンクリート用骨材に含まれることが多く、反応性の高い岩石の最も代表的なものの分布を検討し、若干の被害事例を報告する。これにより、上述の研究の進展に貢献したい。

2. 概要

ASR はコンクリート中のアルカリ溶液に骨材中のシリカ鉱物や非晶質シリカが溶解することによって生じる現象である。コンクリート用骨材の大半には、近隣地域の岩石や鉱物の集合である砂利や砂、または岩石を破碎した碎石や砕砂が使用されている。したがって、骨材事情は近隣に分布する地質に依存する。わが国は狭い国土であるが複雑な地質から構成され、また環太平洋火山

帯・地震帯に位置し、火山活動や造山運動、断層運動などの活発な地殻変動の影響を強く受けている。このような背景をもつ地質から産出し、強度などの物理的性質を兼ね備えた岩石や鉱物が、コンクリート用骨材に利用されている。ASR を生じた岩石の種類はわが国に多様であるが、本報告では国内に広く分布し、碎石として頻繁に利用され、または砂利・砂に混入し、実際に ASR の被害が特に多い岩石について、その分布と若干の事例を示す。

3. 反応性鉱物とそれを含む代表的な岩石

3.1 反応性鉱物

アルカリ骨材反応には、アルカリシリカ反応（ASR）、アルカリ炭酸塩岩反応（ACR）、アルカリシリケート反応があるとされてきたが、近年の研究⁵⁾などにより、これらによるコンクリートの膨張と劣化の原因は ASR であると考えられるようになった。シリカ（SiO₂）は結晶質、非晶質を問わず、アルカリ溶液に溶解して ASR の原因となるが、シリカを構成する珪素（Si）は地殻を構成する元素のなかで、酸素（O₂）に次いで最も多く含まれ、それに酸素が結びついた SiO₂ の組成をもつシリカ鉱物またはその非晶質は地表に露出する岩石の大半に含まれている。SiO₂ の物質のうち、常温常圧下で安定な石英は比較的溶けづらく、微細で過大な表面積を持つ場合（隠微晶質石英・微晶質石英）は緩慢に溶解するのを除き、実用的にはコンクリート中で溶解しないとみなされている。したがって、粗粒な石英を除いたシリカ鉱物や非晶質が反応性鉱物である。言い換えれば、結晶構造上または熱力学的に不安定な状態にあるシリカであり、隠微晶質石英、微晶質石英、カルセドニー、クリストバライト、トリディマイト、オパール、火山ガラスなどである。隠微

*1 (株) 太平洋コンサルタント 解析技術部 博(工) (正会員)

*2 (国研) 国立環境研究所 資源循環・廃棄物研究センター 主任研究員 博(工) (正会員)

*3 (株) 太平洋コンサルタント 解析技術部 博(理)

*4 金沢大学 理工研究域 環境デザイン学系 教授 工博 (正会員)

晶質石英・微晶質石英の緩慢な反応は遅延膨張性 ASR と呼ばれるが、これは 1990 年代、カナダの CSA 規格で“緩慢/遅延膨張性アルカリシリケート/シリカ反応”と呼ばれていたものを 1997 年に片山が短く言い換えたもの⁹⁾である。遅延膨張性 ASR による国内の被害も最近になって広く知られるようになったが、わが国で規定されている骨材の反応性試験である JIS A 1145（化学法）または JIS A 1146（モルタルバー法）のような方法では、その反応性が検出されない場合がある⁷⁾。このような ASR が遅延膨張性 ASR である。これに対し、反応性の顕著なオパール、クリストバライト、トリディマイトは急速膨張性であり、従来から甚大な被害を多発してきた。また、カルセドニーや火山ガラスは一般に遅延膨張性との中間的であり、これらも急速膨張性に含める場合がある。火山ガラスの反応性は、その組成や含水率により変化する⁹⁾。

3.2 わが国で ASR 事例の多い岩石

わが国に広く分布し、ASR の被害事例の多い主要な岩石について述べる。また、それらを頻繁に含むなど ASR に特に重要な地層や岩体の分布を図-1 に示す。これは独立行政法人産業技術総合研究所地質標本館グラフィックシリーズ 8 日本の鉱物資源⁹⁾に示された各種の地層や岩体の分布から、ASR に関連の深いものを抽出して作成したものである¹⁰⁾。なお、山砂利・川砂利または山砂・陸砂などの未固結な砂利・砂の資源は第四紀または第三紀の堆積岩に分類され、この図に示されないが、砂利や砂を構成する粒子の反応性は後背地の地質を反映する。

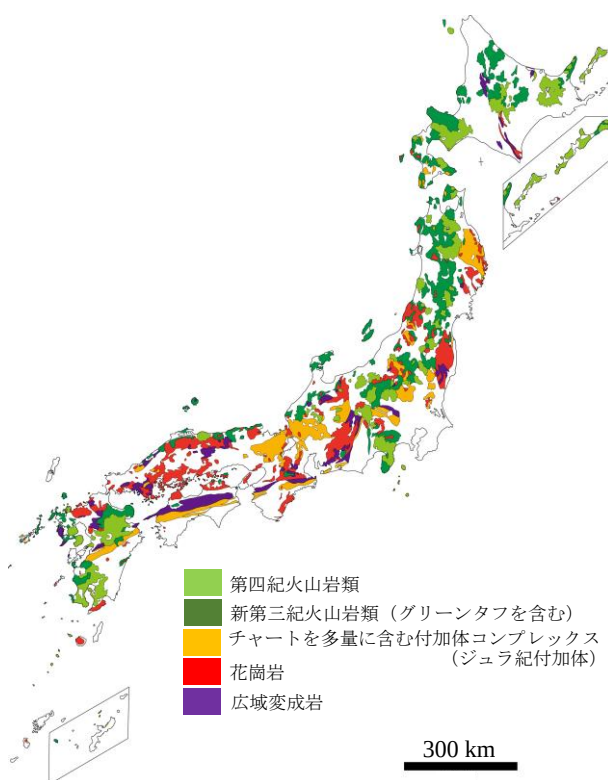


図-1 ASR と関連の深い代表的な地層や岩体

(1) 新第三紀以降の火山岩類（安山岩など）

日本列島は環太平洋火山帯に位置し、千島列島、北海道から南西諸島に至るまで、多くの火山が分布する。火山活動はマグマが地表付近に噴出する現象であるが、マグマが地表付近で急速に冷却して生成した岩石が、玄武岩、安山岩、流紋岩などの火山岩類である。通常、火山岩類は、高温のマグマから晶出したシリカ鉱物の高温変態であるクリストバライトやトリディマイト、また急冷されたマグマが結晶化することなく固化した火山ガラスを含み、急速膨張性の反応性を示す。さらに、クリストバライト、トリディマイト、オパールは、脱ガラス化作用や変質の過程で二次的に生成することもある。写真-1、写真-2、写真-3、写真-4 は偏光顕微鏡下で観察された安山岩中のクリストバライト、トリディマイト、火山ガラス、オパールであるが、後二者のような非晶質は粉末 X 線回折では検出できないことには注意が必要である。これらのシリカ鉱物や非晶質は、一般に岩石全体のシリカ分の高い順と一致し、多く含まれるものから、流紋岩、安山岩、玄武岩の順である。それにも関わらず、わが国の ASR は安山岩が主要因のことが多いが、これは主には新第三紀以降の日本列島では安山岩質の火山活動が卓越し、新期の火山岩類では流紋岩より安山岩の分布が広いためと考えられる。新第三紀より古い白亜紀～古第三紀の火山岩類には流紋岩などが大量に分布するが、このような古い岩石では、特に反応性の高いクリストバライトやトリディマイト、火山ガラスなどは、現在では隠微晶質石英などの少し安定な形態（遅延膨張性）に変化している¹¹⁾。

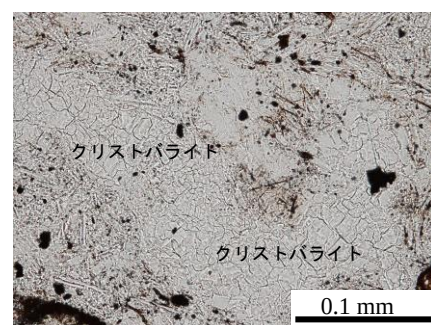


写真-1 安山岩中のクリストバライト

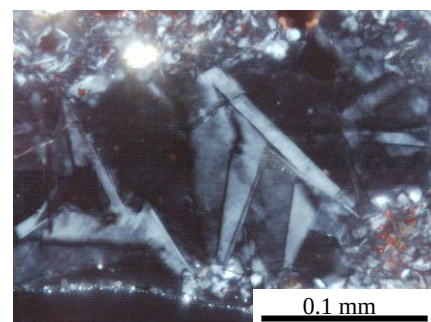


写真-2 安山岩中のトリディマイト：直交ポラー

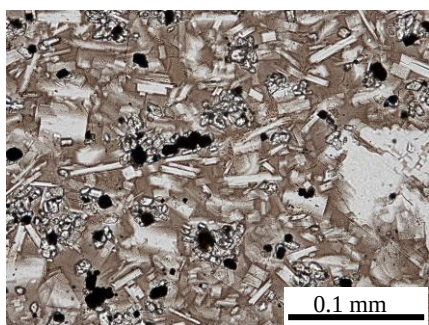


写真-3 安山岩中の火山ガラス（褐色の部分）

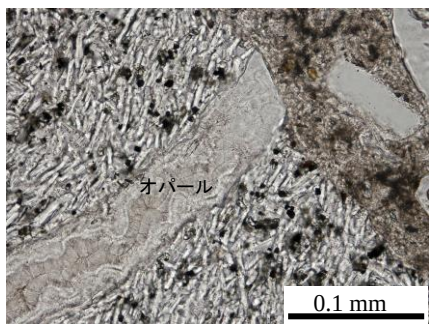


写真-4 安山岩中のオパール脈

図-1 には急速膨張性の新第三紀と第四紀の新しい火山岩類の分布をそれぞれ示してある。北海道から東北地方、北関東・信越地域、九州地方、山陰から北陸地方など、わが国全般に広く分布している。近畿地方などで早くから知られている“古銅輝石安山岩”による ASR や、北陸地方の川砂利や碎石による ASR^{12),13)}などは、いずれもこれによるものである。写真-5 は北陸地方での被害事例、写真-6 は山陰地方での被害事例である。



写真-5 火山岩類による被害事例（北陸地方）



写真-6 火山岩類による被害事例（山陰地方）

(2) チャート・珪質頁岩・珪質粘板岩

チャートは、ほとんどシリカから構成される岩石、珪質頁岩や珪質粘板岩はシリカのほかに泥分を含む岩石である。シリカの起源は主に微生物であり、海洋底に堆積した放散虫殻や海綿骨針、珪藻などに由来する非晶質シリカ（オパール）である。このようなシリカのほか、泥や砂などの堆積物や礫性石灰岩（珊瑚礁など）を載せた海洋プレートの一部が剥ぎ取られて大陸側に付加したものが日本列島の骨格となっている。図-1 には、チャートや珪質頁岩、珪質粘板岩を特に多く含むことが知られるジュラ紀付加体の分布を示してある。分布面積に地域差はあるが、日本列島全般にわたって分布している。日本の主なチャートや珪質頁岩、珪質粘板岩では、オパールは既に比較的安定な隠微晶質石英や微晶質石英、微細な繊維状石英の集合体であるカルセドニーに変化している。写真-7、写真-8、写真-9、写真-10 はそれぞれ、チャートの隠微晶質石英、チャートを原岩とするホルンフェルスの微晶質石英、チャート中のカルセドニー脈、花崗岩質岩の粗粒石英である。偏光顕微鏡下では一目瞭然であるが、粉末 X 線回折での区別は不可能である。

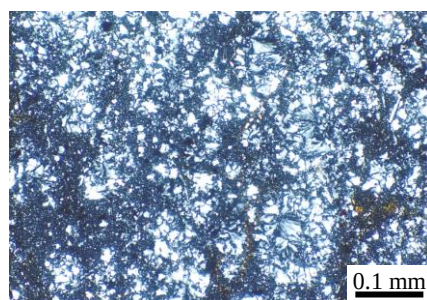


写真-7 隠微晶質石英（チャート）：直交ポーラー

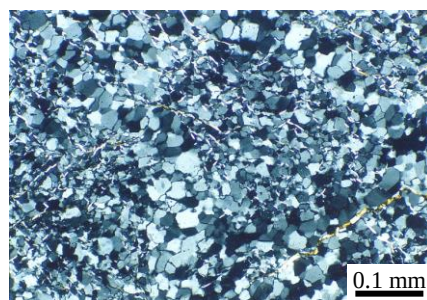


写真-8 微晶質石英(珪質ホルンフェルス)：直交ポーラー

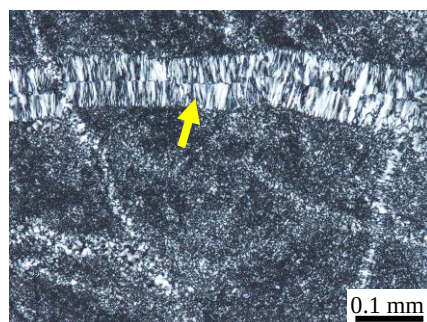


写真-9 チャート中のカルセドニー脈：直交ポーラー

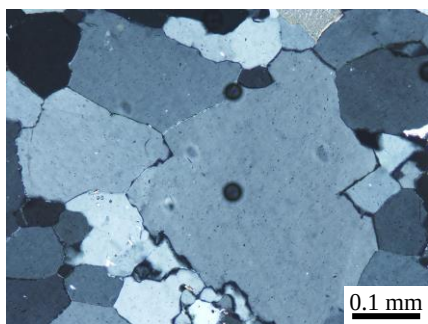


写真-10 粗粒石英（花崗岩質岩）：直交ポーラー

隠微晶質石英・微晶質石英は遅延膨張性の ASR を生じる。例えば中部地方に分布するジュラ紀付加体の一つである美濃帯はチャートや珪質頁岩、珪質粘板岩を多く含み、これに起源をもつ骨材により発生した ASR では施工後 30 年を経過しても残存膨張を示し、反応が長期間継続していることが報告された¹⁴⁾。写真-11 は中部地方での被害事例である。



写真-11 チャートによる被害事例（中部地方）

(3) ホルンフェルス

日本列島には花崗岩類が広く分布している。花崗岩類は、地下に貫入したマグマがゆっくりと冷え固まって生成した岩石である。この環境でマグマから生成するシリカ鉱物は粗粒な石英であり、花崗岩類そのものは通常は反応性を示さない。一方、マグマが貫入した周囲の地層などはその熱で焼かれ、もとは異なった岩石となる。このように、花崗岩類などを生成したマグマに接触し、高温に曝されて新たに生成した変成岩がホルンフェルスであり、花崗岩類の周囲に分布する。マグマの貫入した場所が泥質岩や砂質岩（泥岩・頁岩・砂岩など）であった

場合、特に注意が必要である。写真-12 は砂質岩起源のホルンフェルスの組織である。砂岩の砂粒を構成する粗粒な石英や長石の粒間に、もともとの粘土鉱物などを置き換えて、微晶質～隠微晶質な石英・黒雲母・白雲母などが生成している。したがって、隠微晶質・微晶質石英が多量に含まれていることが多い。碎石として砂岩などを使用するような場合でも、付近に存在する花崗岩質岩体の影響により、同じ採石場内であっても、切羽の位置により反応性などの品質が大きく変動することがある。図-1 には大規模な花崗岩類の分布の主なものが示してある。写真-13 は砂質岩起源のホルンフェルスによる中国地方での被害事例である。

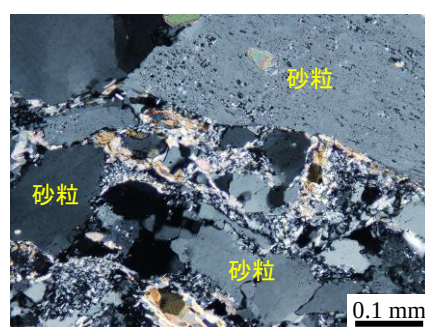


写真-12 砂質ホルンフェルスの微晶質～隠微晶質組織：直交ポーラー



写真-13 砂質ホルンフェルスによる被害事例（中国地方）

(4) 広域変成岩

既存の岩石が地下深くに持ち込まれ、高い温度と圧力に曝されると、ホルンフェルスと同様に、もとは異なった岩石となる。しかし、このような岩石はホルンフェルスとは異なり、通常は広域的な構造運動に伴い生成し、変成岩地帯を形成する結晶片岩や片麻岩などであり、広域変成岩と呼ばれる。広域変成岩においても、ホルンフェルスと同様に既存の鉱物のいくつかが分解し、代わりに高い温度や圧力で安定な変成鉱物が生成する。写真-14 は石英・斜長石・白雲母・黒雲母などからなる泥質片岩の微晶質組織である。変成岩中のこれらの鉱物は温度が上り、変成度が高くなるほど、一般に大きく成長して粗粒となる。しかし、通常、微細な組織が多かれ少なか

れ含まれ、特にシリカ分の高い泥質岩・砂質岩・チャート起源の変成岩には微晶質ないし隠微晶質石英が多量に含まれていることが多い。図-1 には広域変成岩の分布が示されている。変成岩の多くは様々な程度に緩慢な遅延膨張性を示す反応性の岩石である。写真-15 は、このような広域変成岩による九州地方での被害事例である。

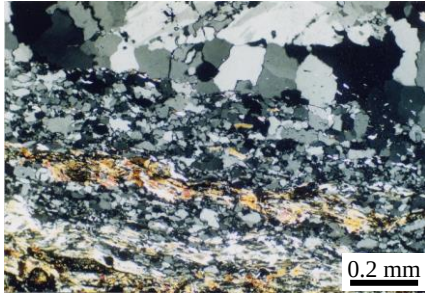


写真-14 泥質片岩の微晶質組織：直交ポーラー



写真-15 広域変成岩による被害事例（九州地方）

(5) 断層岩類

わが国は、いくつかのプレート境界上に位置し、プレート相互の運動で歪みを蓄えたプレートには随所に破壊すなわち断層（地震）が発生し、歪みが解放される。このような断層に伴って、その付近に生成する岩石に、カタクレサイトやマイロナイトなどの断層岩類がある。わが国には、既知未知、活断層か否かを問わず、大小様々な断層が随所に存在し、しばしば社会問題ともなっているが、機械的な破碎が卓越した組織を持った岩石がカタクレサイトであり、一方で地下深部のやや高温下で形成されるとされる動的再結晶・鉱物の塑性変形・岩石の面構造を伴い引き延ばされたような組織をもった岩石がマイロナイトである。いずれも内部に破碎された形跡を残す組織を持ちながら、岩石の固結度は高いため、骨材としての使用に耐える十分な強度をもっている。もとの岩石の種類に関わらず、カタクレサイトやマイロナイトは岩石内部に破碎・圧碎組織を持ち、その一部は微粉碎された隠微晶質または微晶質な組織である。写真-16 は軽微にカタクレサイト化した結晶片岩の組織を、偏光顕微鏡下で観察したものである。写真左半部はこの変成岩本来の組織であり、粗粒な構成鉱物が左右方向に整然と配列しているが、右半部には粉々に粉碎された破碎

組織が認められる。多くの岩石には石英が含まれているため、破碎組織中に隠微晶質石英や微晶質石英を含み、このような岩石は反応性を示す場合が多い。

写真-17 は、ある採石場の切羽である。中央付近左上から右下への向きに小さな断層と破碎帯が分布している。このように、カタクレサイトやマイロナイトは小規模で局所的なものを含めれば随所に存在し、全てを把握することも図示することも不可能に近い。例えば、花崗岩のような通常は非反応性のものであっても、採石場の一部に小規模な断層に伴うカタクレサイト化部が存在する場合、品質のバラツキとして、その部分で反応性が高くなる。このような事情により、ASR 反応性を示さないことを確認済みの骨材を使用しているつもりであっても、ある現場や部位に限り ASR が発生した事例もある²⁾。

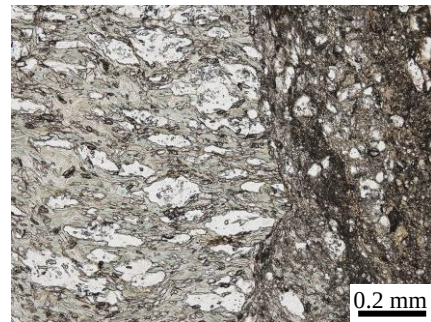


写真-16 カタクレサイトの組織

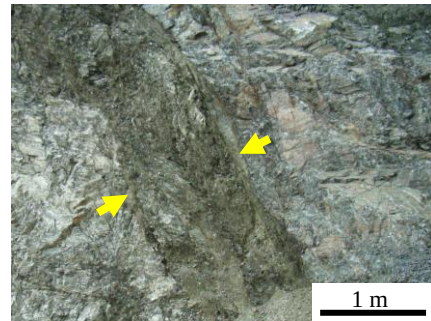


写真-17 採石場切羽の断層と破碎帯

4. 発生した ASR の情報整理の重要性

ASR は骨材岩石に生じる現象であるので、岩石学的試験を含む地質・岩石・鉱物学的な考察は避けられない。ASR の原因となる反応性鉱物は既に明らかにされ、わが国は ASR 抑制対策も既に確立している。しかし、ASR の挙動は、岩石の組織などに起因するアルカリ溶液の浸透しやすさや岩石の強度、アルカリ溶出性状などの様々な要因が関係し、それほど単純ではない。ASR 抑制対策についても、ASR を完全に防ぐ前提ではなく、さらに骨材の反応性試験も全ての岩石や環境に合わせて完全なものなどない。このような状況において、実際に野外の構造物で、どのような地域と環境で、どのような岩石に ASR が発生したのかという情報は、その後の対応に向け

て極めて重要である。現在、このような情報は、ほとんど公開されていない。ASR の被害を公表することにより、責任問題や利害関係を含め、混乱を招く恐れがあるなどの事情も理解できるが、研究機関などにおいて、全国を網羅したデータベース化が行われることが切望される。

5. まとめ

本報告では、わが国で ASR を多く発生している代表的な岩石について述べ、それらの分布と、実際の被害事例のごく一部を示した。なお、本報告で示した反応性の岩石は非常に代表的なものであり、国内で ASR を発生しているものの全てではない。

- (1) わが国では多種多様な岩石により ASR が発生しているが、主なものとしては、安山岩をはじめとする新第三紀以降の火山岩類、チャート・珪質頁岩・珪質粘板岩、砂質岩・泥質岩起源のホルンフェルス、広域変成岩類、断層岩類、などがある。
- (2) 安山岩などの新第三紀以降の火山岩類は急速膨脹性の高反応性を示す場合が多く、わが国で古くから多数の ASR 被害を発生してきた代表的な岩石である。一方、チャート・珪質頁岩・珪質粘板岩、砂質岩・泥質岩起源のホルンフェルス、広域変成岩類、断層岩類、などについても、隠微晶質～微晶質石英による緩慢な遅延膨脹性を示す場合が多く、各地に被害が発生している。
- (3) 地域により、反応性骨材の種類や分布面積に特徴があるが、わが国の全域に様々な反応性骨材の分布ならびに ASR のリスクと発生が認められる。
- (4) 発生した ASR について、地域と反応性骨材、環境要因などの発生原因の詳細を明らかにし、それに基づき、同様な岩石の分布と、それが ASR を生じる環境条件を知ることが、今後の発生予測や ASR 対策などのためには非常に重要である。現在、このような情報は非常に少ないが、研究機関などによる全国を網羅したデータベース化が切望される。

謝辞

遅延膨脹性 ASR の詳細などで (株) 太平洋コンサルタントの片山哲哉博士から教示を受けた。謝意を表します。

参考文献

- 1) 上田 洋, 松田芳範, 石橋忠良: アルカリ骨材反応の観点からみた骨材の現状, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, pp.607-612, 2001.7.
- 2) 山田一夫, 川端雄一郎, 河野克哉, 林 建佑, 広野真一: 岩石学的考察を含んだ ASR 診断の現実と重要性, コンクリート構造物の補修・補強, アップグレ

ード論文報告集, Vol.7, pp.21-28, 2007.

- 3) 尾花祥隆, 鳥居和之: プレストレストコンクリート・プレキャストコンクリート部材における ASR 劣化の事例検証, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.1065-1070, 2008.7.
- 4) 河村直哉, 川端雄一郎, 片山哲哉: 岩石学的評価に基づいた空港コンクリート舗装の ASR 劣化事例解析, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.1015-1020, 2013.7.
- 5) Katayama, T.: The so-called alkali-carbonate reaction (ACR) - Its mineralogical and geochemical details, with special reference to ASR, Cement and Concrete Research, Vol.40, No.4, pp.643-675, 2010.
- 6) Katayama, T.: Petrography of alkali-aggregate reaction in concrete - Reactive minerals and reaction products, East Asia Alkali-Aggregate Reaction Seminar Supplementary Papers, In Nishibayashi, S. and Kawamura, M. (eds), Tottori, Japan, pp.A45-A59, Nov. 1997.
- 7) 古賀裕久, 松浪良夫: 作用機構を考慮したアルカリ骨材反応の抑制対策と診断研究委員会報告書, 日本コンクリート工学協会, pp.87-99, 2008.9.
- 8) Katayama, T.: Diagnosis of alkali-aggregate reaction - polarizing microscopy and SEM-EDS analysis, Proceedings of the 6th International Conference on Concrete under Severe Conditions (CONCEC' 10), Jun.2010.
- 9) 小笠原正継, 須藤定久: 地質標本館グラフィックスシリーズ 8 日本の鉱物資源, 産業技術総合研究所, 2003.
- 10) Yamada, K., Hirono, S. and Miyagawa, T.: New Findings of ASR Degradation in Japan, Proceedings of the 13th International Congress on the Chemistry of Cement, No.589, CD-R 7pages, Jul. 2011.
- 11) Katayama, T. and Kaneshige, Y.: Diagenetic changes in potential alkali-aggregate reactivity of volcanic rocks in Japan - A geological interpretation, Proceedings of the 7th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Ottawa, Canada, pp.489-495, 1986.
- 12) 大代武志, 平野貴宣, 鳥居和之: 富山県の反応性骨材と ASR 劣化構造物の特徴, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.1251-1256, 2007.7.
- 13) 鳥居和之, 大代武志, 山戸博晃, 平野貴宣: 石川県の反応性骨材と ASR 劣化構造物のデータベース化, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.1017-1022, 2008.7.
- 14) 岩月栄治, 森野奎二: 愛知県の ASR 劣化構造物と反応性骨材に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.999-1004, 2008.7.