

A Basic Study on the Geological Distribution of Alkali-Silica Reactive Rocks in Japan and the Assessment of Alkali-Silica Reactivity for Aggregates by Petrographic Examinations

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-10-05 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/2297/42288

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 International License.



学 位 論 文 要 旨

わが国の反応性骨材の地質学的な分布と岩石学的試験による
骨材のアルカリシリカ反応性の判定に関する基礎的研究

A Basic Study on the Geological Distribution of Alkali-Silica Reactive
Rocks in Japan and the Assessment of Alkali-Silica Reactivity for
Aggregates by Petrographic Examinations

金沢大学大学院自然科学研究科

環境科学専攻

環境創成講座

学 籍 番 号 1223142010

氏 名 廣野真一

主任指導教員名 鳥居和之

Abstract

This study is a basic research for the alkali-silica reaction(ASR) which is one of major factors for deterioration of concrete structures in Japan. ASR deterioration is a damage of concrete caused by ASR reactive aggregate consist of rocks. And it is very important for understanding and correspondence about ASR observing rocks used as aggregate by the petrographic examination. Many of failure case about ASR have been caused by neglecting the petrographic examination in Japan.

Petrographic examinations are conducted by human observation in contrast to the instrumental analysis and measurement. Suitable conclusions are not obtained when petrographic techniques are inferior. Therefore this study shows the appropriate and most recent techniques of petrographic examinations.

ASR has been generated by regional-specific factors, whereas systematic research based on it were few. This study shows typical ASR reactive rocks and their regional distributions in Japan on the basis of the geological background. This paper mentioned that presence of reactive aggregates and the occurrence of ASR are universal in Japan.

This study shows the findings about deteriorations of concrete that occurred in Thailand as a case in different overseas environment and the universal validity of the petrographic examination.

This study shows the most useful countermeasure for ASR mitigation as an example in the Hokuriku District in where a serious ASR has occurred. ASR suppressing effect by high-quality fly ash produced in the Hokuriku District was tested for typical ASR reactive aggregates in the Hokuriku District. In addition, the petrographic examination confirmed the validity of the test results.

As a results, appropriate use of petrographic examinations is considered to be very available for ASR problems.

1. 研究の背景と目的

アルカリシリカ反応（Alkali-Silica Reaction：以下、ASR と略す）は、骨材岩石中の反応性鉱物が引き起こすコンクリートの劣化現象であり、これを理解するには偏光顕微鏡観察に基づく岩石学的試験が必須である。しかし、現実にはその適切な実施と普及は十分ではない。現在、ASR が問題となっている構造物の大半は、1986 年の ASR 抑制対策実施以前に、国内に反応性骨材はほとんど存在しないという認識のもとに建設され、その後の被害が拡大したが、このような誤認は適切な岩石学的試験が行われていれば有り得なかった。なお、ASR 抑制対策実施後も ASR は完全になくなったわけではない。

これらの ASR の原因については岩石学的試験により究明可能であり、得られた結果を今後の対策に反映することができるが、岩石学的試験の実施にあたり、分析機器・技術・手法・知識などの最近の進歩を十分に取り入れて対応していないため、判断を誤っている事例が多い。また、岩石学的試験は反応性鉱物の有無を確認することのみと考える誤解があるが、骨材岩石の反応性のほか、反応性鉱物が実際に反応して膨張を生じている現場確認、ASR ゲルの組成分析による今後の膨張予測、混和材の抑制効果の確認、などに幅広く対応するものである。このようなことも、わが国では十分に認識されていないため、最新の岩石学的試験の方法論を示す必要がある。

次に、ASR に関する国内の研究は数多いが、その内容は ASR の反応機構の解明や骨材の反応性の判定試験方法、ASR の抑制などの室内実験に関するものが非常に多い。一方、実際の ASR は反応性骨材の分布やコンクリートの置かれた環境などの地域特有の要因により発生する現象にも関わらず、わが国にはそれを意識し、現実被害を発生している ASR に対して行われた系統的な研究は、阪神地区・北陸地方・東海地方のものにほぼ限定され、非常に少ない。現実の ASR に適切に対処するためには、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示すことが非常に重要であるとともに、それを基に同様な反応性の高い岩石種の分布を知ることも非常に有益である。

このように ASR は反応性骨材の分布やコンクリートの置かれた環境などの地域特有の要因により発生する現象である。したがって、ASR 抑制対策についても地域性を考慮したものである必要があるが、ここでは北陸地方の場合を例として示し、結果を岩石学的試験で検証する。

2. コンクリートの岩石学的診断手法の現状と知見

岩石学的試験は合理的な方法で適切に行う必要があるため、現在の技術を用いた ASR の診断や分析の方法とその活用方法などについて述べる。これらは最新技術を用いた技術的に理想的な方法論であるため、費用や時間の制約もある個別の事例に対して、必ずしもこれらの全てを行わなければ結果が得られないということではない。しかし、この方法論に示される基本的な原理や考えかたを無視しては、現代の技術レベルに沿った適切な結果を得ることも技術の進歩もない。

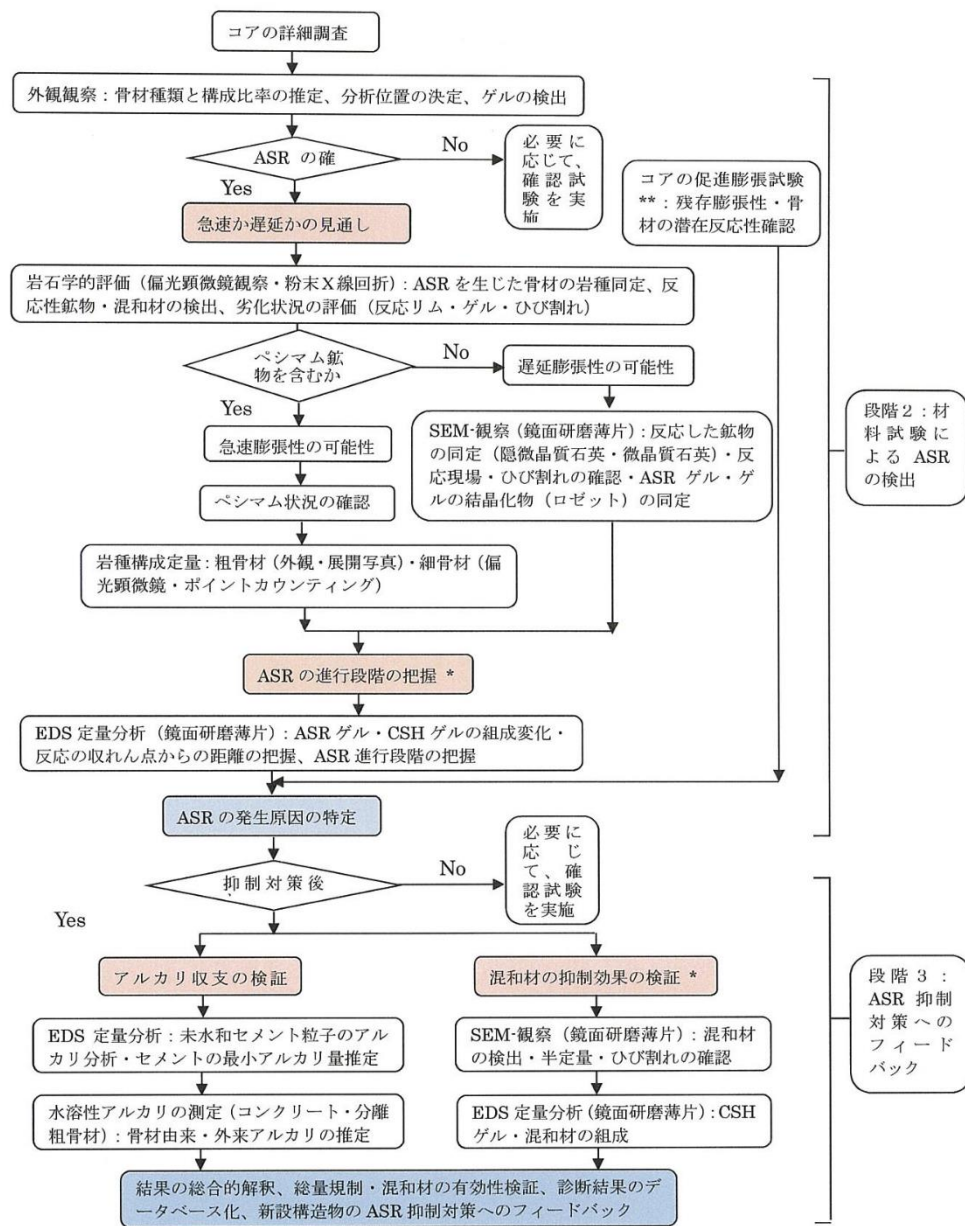


図 2.2（続き） コンクリート構造物の ASR 診断フロー（案）

* Katayama et al. (2004, 2008)、EDS:エネルギー分散型スペクトル分析装置

**Katayama et al. (2004)の方法（ $\phi 5\text{cm} \times \text{L}13\text{cm}$, 80°C 1M NaOH 浸漬）、または JCI-DD2

図-2.1 最新技術を用いた合理的で適切な ASR 診断フロー¹⁾

採取されたコンクリートコア試料についての ASR 診断フローを図-2.1 に示す。これは、最近になって原子力用コンクリートに提案されたものであるが、内容はコンクリート全般について適用すべきであるので、これに従い各項目について述べる。診断フローは段階 2 と

段階 3 の 2 段階からなる構成となっている。段階 2 は、外観観察、岩石学的評価ならびに SEM 観察／EDS 定量分析などを行うことにより、ASR の発生や進行段階、反応した岩石・鉱物を特定するための材料試験、段階 3 はコンクリートのアルカリ収支や混和材の抑制効果の検証により ASR の発生原因を特定し、ASR 抑制対策へフィードバックするための試験と位置づけられている。なお、ここに示されてない段階 1 は、コア採取にいたる前段階の予備調査である。

外観観察では、肉眼や実体顕微鏡などにより可能な限りの観察を行い、その後の詳細な観察・分析の方針や研磨薄片試料の作製位置を決定する。ASR は骨材粒子からセメントペーストへとその影響が拡大していく現象であるので、進行過程の確認には反応した骨材粒子と周囲のセメントペーストを含む適切な位置の決定が極めて重要である。

岩石学的評価では、コンクリート研磨薄片試料を偏光顕微鏡下で観察し、混和材の有無を含む構成材料を確認するとともに、組織を観察して劣化の原因・過程を読み解く。また、岩石種ごとに ASR を観察し、ASR によるコンクリートの劣化程度を分類する。

偏光顕微鏡下で観察した研磨薄片試料をさらに SEM 観察することにより、反応性鉱物と、その溶解現場（ASR ゲル生成現場）を確認し、ASR の現象と原因の確実な同定を行うことができる。また、ASR ゲルと CSH ゲルの組成変化について EDS 定量分析を行うことにより、それらの組成線と収斂点が画かれる。ASR ゲルの組成線の形や組成線上での分布状態は構造物の置かれた環境を反映したものであるので、これを検討することにより、ASR の進行段階（発生～終息）を推定可能になってきている。

偏光顕微鏡観察で確認した鏡面研磨薄片の未水和セメントや混和材、ボゾラン反応生成物の微細な領域について、SEM 観察-EDS 定量分析を行うことにより、コンクリートのアルカリ収支や混和材の抑制効果の検証が可能であり、これを ASR 抑制対策へフィードバックすることができる。

3. わが国の ASR の特長と代表的な反応性骨材の地域的分布

コンクリート用骨材の大半には、地産地消に近い形で、近隣地域の岩石や鉱物の集合である砂利や砂、または岩石を破砕した碎石や砕砂が使用されている。したがって、コンクリート用骨材事情は近隣の地質学的背景と切り離して述べることはできない。

粗粒な石英を除いたシリカ鉱物または非晶質シリカが骨材岩石に含まれている場合、ASR が発生する可能性がある。このような反応性鉱物とは、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。微晶質石英・隠微晶質石英の緩慢な反応（遅延膨張性）に対し、オパール・クリストバライト・トリディマイトは急速に反応し（急速膨張性）、カルセドニー・火山ガラスは一般に中間的である。

これらの反応性鉱物を一定量含み、反応性の高いわが国の代表的な岩石種を以下に述べ、それらと関連の深い地層や岩体の分布を図-3.1 に示す。なお、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、上述の反応性の高い岩石としては示されないが、砂利や砂の一粒一粒の岩石種は、それを供給した後背地(上流側の出所)の地質を反映しており、これらの堆積物の反応性は後背地の地層や岩体の特性を反映する。

新第三紀～現世にいたる比較的新しい火山岩類には、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、ならびに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のほか、火山ガラスの変質などにより生成したオパールを含む場合が多く、急速膨張性の反応性が顕著である。日本国内では特に安山岩による ASR が早くから注目され、現在も顕著な ASR では安山岩が主要因のことが多い。近畿地方などで問題となった“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 などは、いずれも安山岩をはじめとする火山岩類によるものである。

チャートは隠微晶質・微晶質石英やカルセドニーから主に構成される岩石、珪質頁岩はそれらのほかにやや多くの泥分を含む岩石である。これらの多くは海洋プレート沈み込みに伴い、日本列島に付加された遠洋の珪質堆積物と考えられている。古生代～新生代の地層中に含まれるが、ジュラ紀の付加体には特に多く含まれている。これは頁岩や砂岩から主に構成されるジュラ紀までの地層中に、チャートや石灰岩、緑色岩などのより古い異地性の岩塊を含んだものである。チャートや珪質頁岩は、愛知県などでの ASR 被害が多く研究されている。

日本列島には花崗岩類が広く分布する。砂質・泥質岩起源のホルンフェルスは、砂岩や泥岩などが花崗岩などを生成したマグマに接触し、高温で焼かれたことにより（接触変成作用）生成した変成岩であり、主に花崗岩類の周囲に分布する。多くの場合は接触変成作用により隠微晶質・微晶質石英が多量に生成し、遅延膨張性の反応性を示す。なお、図-3.1 に分布を示す花崗岩などの深成岩類そのものは通常は非反応性であるが、その周囲にホルンフェルスが分布する。

既存の岩石が地下深くに持ち込まれ、高い温度と圧力にさらされると、上述の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、ホルンフェルスとは異なり、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は、広域変成岩と呼ばれる。変成岩（広域変成岩）類では、特に泥質・砂質岩およびチャート起源で変成度が比較的低く、再結晶作用が不十分なものに、隠微晶質・微晶質石英を多く含む傾向が強いが、粗粒な片麻岩にも粗粒結晶の粒界に微晶質石英を含む場合がある。変成岩の多くないしほとんどは、様々な程度の遅延膨張性を示す反応性の岩石である。

このように、わが国には多様な反応性骨材と ASR の被害があるが、主なものに安山岩をはじめとする火山岩類、チャート・珪質頁岩、砂質岩・泥質岩起源のホルンフェルス、変成岩（広域変成岩）類がある。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。

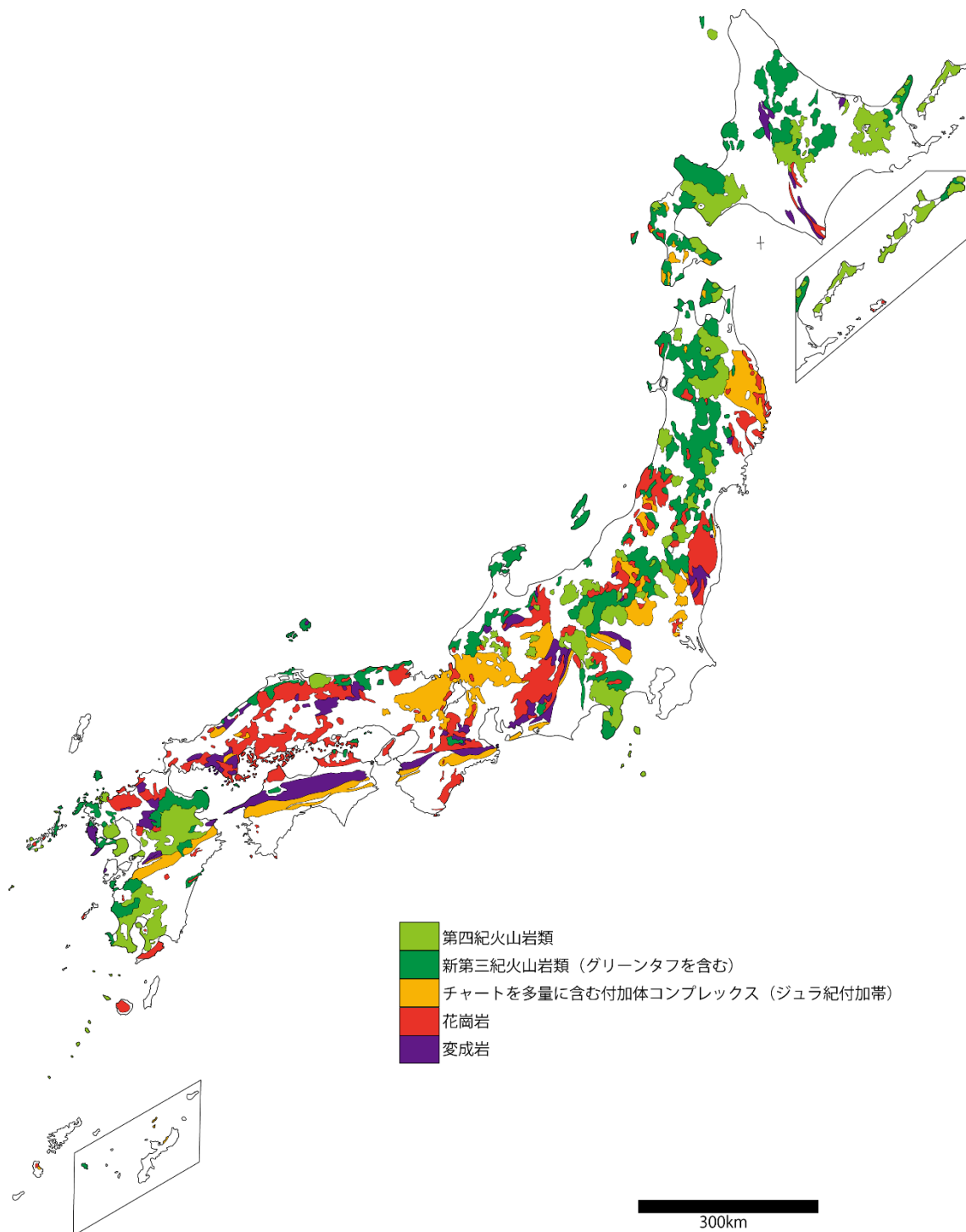


図-3.1 ASR と関連の深い地層や岩体

4. タイ国の ASR 事例における反応性骨材の岩石学的特長と損傷形態

日本国内での ASR について述べてきたが、海外での骨材事情やコンクリートの置かれる環境などは、わが国での状況と同じと限らない。ここでは国外で発生した ASR の診断事例として、タイ国の高速道路構造物に発生した ASR の調査結果について述べる。

日本の政府開発援助 (ODA) により、タイ国に建設された高速道路のコンクリートに生じたひび割れなどによる劣化原因について、岩石学的試験に基づく分析を行った。その結果、粗骨材には花崗岩マイロナイトからなるものと石灰岩などを主体とするものがあり、前者に進行した ASR の発生が認められた。この観察結果は構造物の劣化ともよく対応することから、劣化には粗骨材に発生した ASR の関与が最も大きいと考えられた。花崗岩マイロナイトは微晶質石英を含み、ASR は比較的低アルカリ量の少ない環境下で発生していた。また、エトリングタイトの生成が多く認められたが、ASR によるひび割れなどの既存の空隙に生成しており、エトリングタイトが劣化に寄与した証拠は見出されなかった。一方、細骨材は国内で一般に非反応性と認識される花崗岩であったが、これにも軽微な ASR が発生していた。この花崗岩に含まれる反応性鉱物には、熱帯多雨地域での風化作用が関与している可能性が考えられた。

このように、遅延膨張性骨材による比較的低アルカリ環境下での早期反応や、新たに反応性鉱物を生じる風化作用の可能性、などの熱帯多雨地域における日本国内とは異なる ASR の発生状況が考えられたが、岩石学的試験は特異な事例においても普遍的に対応可能であることが示された。

5. 北陸地方における代表的な反応性骨材の岩石学的特徴と推奨される ASR 抑制対策

北陸地方は骨材資源に恵まれた地域であるが、安山岩系骨材の ASR 反応性が問題となり、地産地消による環境負荷の低減や骨材資源・副産物資源の有効利用、環境条件などを考慮した前向きな ASR 抑制対策の姿として、北陸地方では混合セメントの使用が推奨される。したがって、北陸地方の代表的な砂利と碎石の反応性骨材について、北陸地方で産する高品質なフライアッシュ（分級フライアッシュ）15%または高炉スラグ微粉末 42%をセメントに対して質量置換することによる ASR 抑制効果を検証した。

北陸地方の代表的な砂利資源であり、有数の高反応性骨材でもある常願寺川産の川砂利について、JIS A 1146 とデンマーク法による促進モルタルバー試験で検証した。その結果、分級フライアッシュ 15%置換と高炉スラグ微粉末 42%置換により、JIS A 1146 での膨張が大きく抑制され、とくに分級フライアッシュ 15%置換は膨張を全く示さず、非常に優れた ASR 抑制効果を発揮した。デンマーク法でも、ともに膨張が大きく抑制された。

代表的な安山岩碎石 3 種類については、ASTM C 1260 による促進膨張試験で検証した。その結果、いずれの安山岩碎石でも分級フライアッシュ 15%置換と高炉スラグ微粉末 42%置換により、膨張が大きく低減した。とくに、分級フライアッシュ 15%置換では、判定基

準材齢において、すべての安山岩碎石で「無害」となった。

デンマーク法や ASTM C 1260 などのアルカリ外来型の試験における分級フライアッシュと高炉スラグ微粉末の ASR 抑制効果は、組織緻密化に伴う外部からのアルカリ浸透の抑制によるものが大きいと推察された。これに対し、JIS A 1146 のようなアルカリ内在型の試験において、分級フライアッシュの ASR 抑制効果が特に優位であった理由には、分級フライアッシュの反応領域でのポゾラン反応生成物が 0.9 程度の低 Ca/Si 比の C-S-H を生成していることが確認されたことから、微細な粒子の周囲の反応領域の増大とともに、生成した低 Ca/Si 比の C-S-H によるアルカリの吸着がもたらす細孔溶液の pH 低減作用が最も大きく関与していると推察された。なお、偏光顕微鏡下での観察による ASR の進行程度と試験体の膨張率とはよく対応していた。

以上の結果に基づいて、北陸地方における ASR 抑制対策の基本的な考え方として、分級フライアッシュを通常の使用量で混合することにより、反応性がきわめて高い当該地方の骨材に対しても、十分かつ効果的に ASR を抑制可能なことが示された。また、岩石学的試験が骨材の反応性評価とコンクリートの ASR 検証の双方に有効であることが示された。

6. 結論

本研究は、わが国でコンクリート構造物の耐久性低下の大きな要因の一つである ASR についての基礎的な研究である。ASR はコンクリート中での骨材岩石の反応であることから、主役である岩石を十分に観察する姿勢が ASR の理解には欠かせないが、国内に浸透していないことと不適切な手法による誤認が多いことから、現代における最新適切な手法を示した。次に、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な情報を示すこと、ならびにそれを基に同様な反応性の高い岩石種の分布を知ることが、今後の対応のために非常に重要であることから、わが国に被害事例の多い ASR 反応性の岩石ならびに同様な岩石の分布を日本の地質学的背景に基づいて示し、反応性骨材の分布と ASR の発生は国内に広く見られることを述べた。一方、環境の異なる海外での ASR の事例として、タイ国で発生したコンクリート劣化について得られた知見を示し、岩石学的試験が普遍的に有効であることを示した。推奨される ASR 抑制対策の方法について、北陸地方の事例を示し、岩石学的試験で検証した。

以上の結果を踏まえ、ASR の問題に適切に対応するためには岩石学的試験を十分に実施することが重要であり、わが国においても、今後のさらなる普及と技術の向上、実施体制の構築が必要であるとの結論を得た。

参考文献

- 1) 中野眞木郎：原子力用コンクリートの反応性骨材の評価方法の提案，JNES-RE-レポート，2014.

学位論文審査報告書（甲）

1. 学位論文題目（外国語の場合は和訳を付けること。）

わが国の反応性骨材の地質学的な分布と岩石学的試験による骨材のアルカリシリカ反応性の判定に関する基礎的研究

2. 論文提出者 (1) 所 属 環境科学専攻

(2) 氏 名 ^{ふり} ^{がな} ^{ひろの} ^{しんいち}
廣野 真一

3. 審査結果の要旨（600～650字）

本学位申請論文に対して審査員全員で面接と試問を行うとともに、審査委員会にて論文の内容を検討し、審査方針を決定した。平成27年1月29日に開催した口頭発表並びに同日に開催した審査委員会にて次のように決定した。廣野真一氏は、コアの偏光顕微鏡による薄片観察や電子顕微鏡の観察を通して、わが国の反応性骨材の地質学的分布とその岩種の構成率について詳細に検討してきた。本研究の成果により、わが国の代表的な反応性骨材である火山岩系骨材（安山岩、流紋岩など）と堆積岩系骨材（チャート、粘板岩など）の全国的な分布状況が明らかになり、岩石の反応性鉱物（オパール、クリストバライト、火山ガラスなど）の同定方法とコンクリートのアルカリシリカ反応（ASR）による膨張挙動に及ぼす影響が明確になった。また、北陸地方で深刻なASRによる劣化現象が発生している、富山県の常願寺川産川砂利と石川県の能登産安山岩碎石の岩石学的特徴を比較検討するとともに、北陸産分級フライアッシュの15%添加により両骨材のASRを完全に抑制できることをその機構とともに明らかにしている。本学位請求論文は、地域の骨材とフライアッシュの活用に大きく貢献するものであり、かつ研究内容は実用的に有用な知見を多く含んでいることから、本学位申請者は博士（工学）に値するものと判定した。

4. 審査結果 (1) 判 定（いずれかに○印）○合格 ・ 不合格

(2) 授与学位 博士（工学）