

# 論文 北陸地方の ASR 劣化コンクリートの岩石・鉱物学的調査

佐藤 良恵\*1・山戸 博晃\*2・藤村 友城\*3・鳥居 和之\*4

要旨：本研究では、北陸地方の ASR 劣化構造物における劣化状況とコンクリートの微視的内部組織の特徴との関係を把握することを目的とし、石川県、富山県および福井県の約 30 の ASR 劣化構造物からのコアについて薄片研磨試料を作製し、偏光顕微鏡観察により骨材の岩石・鉱物学的特徴を調べた。その結果、北陸地方での ASR 劣化は火山岩系の骨材によるものであり、建設後約 30 年が経過した ASR 劣化構造物ではコンクリート中に多数のひび割れが発生し、とくに安山岩および流紋岩が ASR の主要な岩種であるのが確認できた。本論文では、これらの代表的なものである石川県および富山県の 3 事例ずつを調査結果として示した。

キーワード：アルカリシリカ反応，反応性骨材，岩石・鉱物学的試験，偏光顕微鏡観察

## 1. はじめに

北陸地方では、アルカリシリカ反応（以下、ASR）によるコンクリート構造物の損傷が多数報告されている<sup>1)</sup>。図-1 に石川県および富山県の ASR 劣化構造物の分布状況を示す。北陸地方の反応性骨材としては、石川県能登半島北部で産出する安山岩砕石が有名であるが、同地域の安山岩には風化・変質の影響を受けたものが多くあり、現行の骨材の ASR 試験での判定が困難であることが指摘されている<sup>2)</sup>。また、北陸地方にはグリーンタフと呼ばれる火山岩を主体とする地層が分布しており、同地方で産出する河川産の骨材にも反応性の高い安山岩粒子や流紋岩粒子が含まれている<sup>3)</sup>。河川産の骨材は河川水系ごとに多種多様な岩種構成をもつこと、同一の河川水系であっても採取場所や採取時期によって岩種の構成比率が相違すること、などの理由により骨材の ASR 試験を実施する場合には岩石・鉱物学的特徴を事前に把握しておくことが重要である。

ASR 劣化構造物の調査・診断に関して、北米、欧州、オーストラリアなどでは岩石・鉱物学的評価に基づいた試験法の開発および抑制対策がとられている<sup>4)</sup>。一方、わが国においては、ASR が疑われる劣化構造物の調査・診断は維持管理を目的としており、ASR 劣化の原因となる骨材の岩石・鉱物学的特徴の調査はほとんど実施されていないのが実状である。そのため、現行の骨材の ASR 試験法および補修工法が本当に有効であったのかどうかについては、不明確なままである。

本研究では、北陸地方の ASR 劣化構造物における劣化状況とコンクリートの微視的内部組織の特徴との関係を把握することを目的とし、北陸地方の ASR 劣化構造物からのコアについて、偏光顕微鏡観察および X 線回折分析により骨材の岩石・鉱物学的特徴を調べた。

## 2. 調査概要

### 2.1 調査対象構造物

本研究では石川県、富山県および福井県の約 30 の ASR 劣化構造物を対象とし、平成 20 年度に採取したコアより薄片研磨試料を作製した。本論文では、これらの中から北陸地方の ASR 劣化の代表的なものとして岩種および ASR 劣化度の異なる 6 事例（石川事例、富山事例それぞれ 3 例ずつ）の調査結果について示す。表-1 に構造物の概要を示す。

### 2.2 構造物の外観調査

外観の近傍目視によりコンクリートのひび割れや ASR ゲルの滲出、塗膜の再劣化状況などを調べた。

### 2.3 岩石・鉱物学的試験

#### (1) 研磨薄片の偏光顕微鏡観察

構造物から採取したコアについて薄片研磨試料（25mm×40mm、厚さ約 20 μm）を 2 枚ずつ（粗骨材お

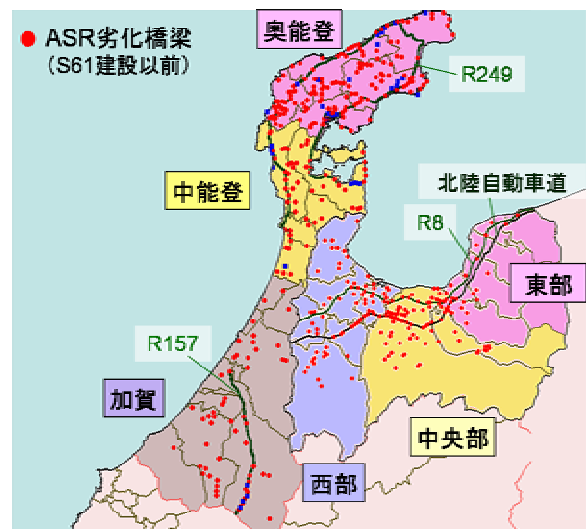


図-1 北陸地方における ASR 劣化橋梁の分布状況

\*1 住友大阪セメント（株）（正会員）

\*2 金沢大学 理工研究域 環境デザイン学系（正会員）

\*3 金沢大学大学院 自然科学研究科 社会基盤工学専攻（正会員）

\*4 金沢大学 理工研究域 環境デザイン学系 教授（正会員）

表-1 調査対象構造物の概要

No.	所在地 (構造)	建設	f'ck	劣化 度*	鉄筋 破断	使用環境条件	使用骨材		反応性 岩種***
							細骨材	粗骨材	
石川県	I-1 奥能登 (橋脚フーチング)	1979	24		有	土中 地下水の供給	川砂	安山岩碎石**	An
	I-2 中能登 (PC・箱桁)	1982	40		無	海上大気中 飛来塩分あり	川砂**	川砂利**	An, Ry, Op
	I-3 加賀 (水利構造物 ・ダム堤体)	不明	21		無	水中または大気中 河川水の供給	川砂**	川砂利**	Ry, An
富山県	T-1 中央部 (橋脚梁部)	1972	21		有	河川内大気中 路面排水	川砂**	川砂利**	An, Op
	T-2 中央部 (橋脚梁部)	1966	21		無	大気中 路面排水	川砂**	川砂利**	Ry, An, Tu
	T-3 高速道路 (PC・箱桁)	1975	40		無	大気中 路面排水(凍結防止剤)	川砂**	川砂利**	Tu, Ry, An

\* : 軽微なひび割れ, : 局部的なひび割れ (幅 1mm 以上), : 連続的なひび割れ (幅 1mm 以上),  
: 鉄筋破断をともなう連続的な割れ (幅 5mm 以上)  
\*\* 偏光顕微鏡観察の結果, 反応環 (リム) および ASR ゲルの生成が確認されたもの  
\*\*\* An: 安山岩, Ry: 流紋岩, Tu: 溶結凝灰岩, Op: オパール

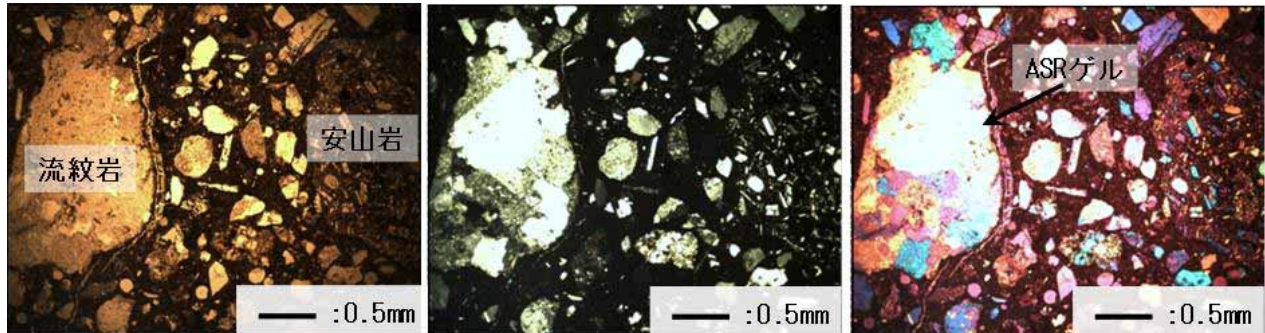


写真-1 偏光顕微鏡観察結果の一例 (左: 単ニコル, 中: 直交ニコル, 右: 直交ニコル (鋭敏色検板使用))

よび細骨材, 各 1 枚) 作製し, 偏光顕微鏡観察を実施した。偏光顕微鏡観察は, 単ニコル, 直交ニコルおよび直交ニコル (鋭敏色検板使用) で実施した。偏光顕微鏡観察結果の一例を写真-1 に示す。

(2) 粉末 X 線回折分析

コアより主要な岩石を採取し, メノウ乳鉢で指頭に感じなくなるまで粉碎した粉末試料を使用して, X 線回折装置 (XRD, Cu k $\alpha$ -Ni フィルター, 40kV-20mA) により含有鉱物の同定を行った。

3. 石川県における ASR 劣化の特徴

3.1 反応性岩体と ASR 劣化構造物の分布状況

石川県の主要な河川と岩体の分布状況を図-2 に示す。能登半島の北部に安山岩の岩体が帯状に分布しており, この地域に多くの安山岩の碎石場がある<sup>5)</sup>。石川県内の ASR 劣化構造物の多くは奥能登地域に存在しているが,



図-2 石川県における岩体の分布状況



写真-2 石川県における代表的な ASR 劣化構造物の外観

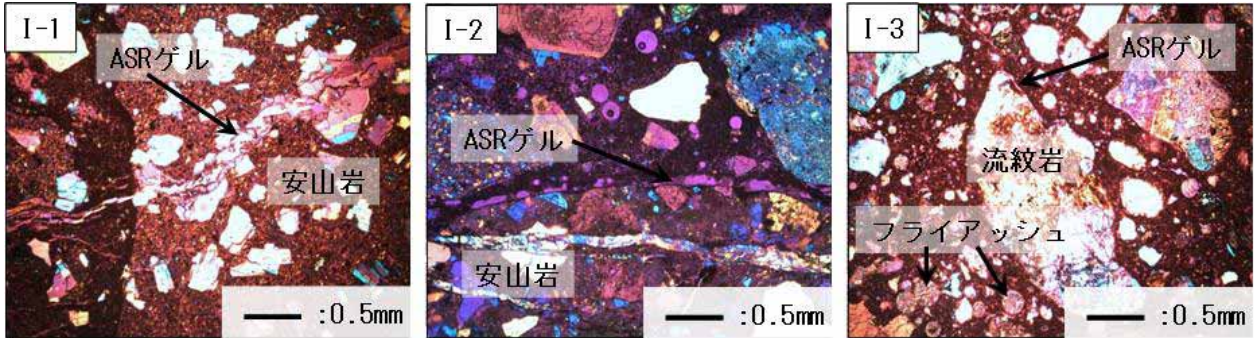


写真-3 石川県の ASR 劣化コンクリートの研磨薄片の偏光顕微鏡観察結果（直交ニコル・鋭敏色検板使用）

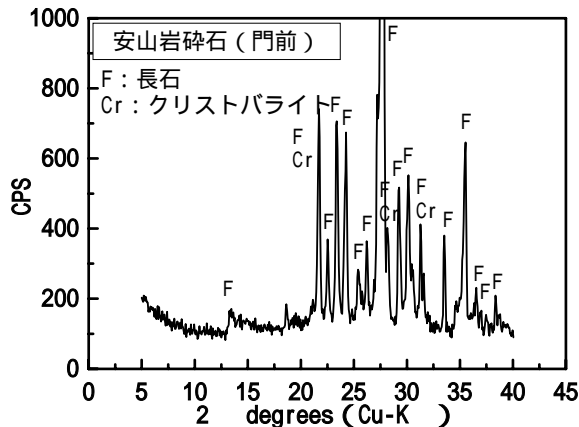


図-3 安山岩砕石（門前産）の X 線回折分析結果

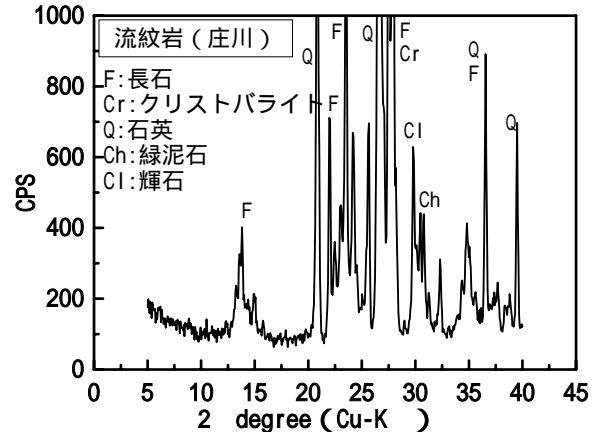


図-4 流紋岩（庄川産）の X 線回折分析結果

これらのほぼすべては安山岩砕石によるものであることが明らかとなっている（図-1 参照）。一方、中能登地域では能登産の安山岩砕石とともに富山県から輸送された川砂および川砂利による ASR も発生している。また、加賀地区で発生した ASR の一部は手取川の川砂および川砂利によるものであることが判明している。これは、手取川の上流部には安山岩および流紋岩の岩体が存在しており、上流部の川砂および川砂利の一部には反応性の岩種が混入しているためである。

### 3.2 反応性骨材の岩石・鉱物学的特徴

石川県の ASR 劣化構造物の事例について、外観の劣化状況および薄片研磨試料の偏光顕微鏡観察結果をそれぞれ写真-2 および写真-3 に示す。

石川事例 I-1 は能登有料道路の橋梁（橋脚フーチング）である（写真-2、I-1 参照）。建設後約 30 年が経過しており、鉄筋破断をともなう損傷が確認されたため、RC

巻き立てによる補強が実施された。橋脚のコンクリートには細骨材として「無害」の川砂が、粗骨材として門前産の安山岩砕石が使用されていた。門前産の安山岩砕石の X 線回折分析の結果を図-3 に示す。安山岩砕石は反応性鉱物であるクリスタバライトと火山ガラスを含有していた。偏光顕微鏡観察の結果（写真-3、I-1 参照）、粗骨材内部にもひび割れが生じ、モルタル部分に進展している様子が観察された。また、ひび割れの多くは ASR ゲルが充填されていた。安山岩砕石中には、斑晶として斜長石、輝石が認められた。一方、石基部分には微細な斜長石および輝石類の粒間に火山ガラスが含まれていた。ガラスは光学的に等方体であるため、直交ニコル下では黒色を呈することより、直交ニコル下での黒色部分の 2 値化の画像解析からガラス率を求めたところ、ガラス率は 60～70%であった。また、能登半島北部で産出される安山岩砕石に含まれるモンモリロナイトなどの粘

土鉱物（火山ガラスの風化・変質による）は観察されなかった。さらに、能登有料道路の比較的離れた場所に位置する 3 橋梁においても同様の分析を実施したところ、含有する構成鉱物およびガラス率がほぼ同一であったことから、能登有料道路では、主に門前地区のガラス質両輝石安山岩が砕石として使用されていたことが判明した。

石川事例 I-2 は、中能登地域の海上架橋の上部工（PC・箱桁）である（写真-2、I-2 参照）。本橋梁では、骨材の輸送コストの関係から、富山県庄川産の川砂および川砂利が使用されていた。川砂および川砂利は化学法（JIS A1145）において「無害」と判定されていたが、富山県西部で産出する川砂および川砂利の一部は、化学法（JIS A1145）の判定基準では境界線付近に分布するものが多く、判定が困難であることが指摘されている<sup>6)</sup>。偏光顕微鏡観察の結果（写真-3、I-2 参照）、川砂利中には安山岩粒子および流紋岩粒子が含有しており、一部に反応の痕跡が確認された。庄川産の川砂利に含まれる流紋岩粒子の X 線回折分析の結果を図-4 に示す。庄川産の流紋岩は火山ガラスとクリストバライトを含有しており、安山岩と同様に反応性を有するものと判断できた。また、オパールとみられる、直径 0.5mm 程度の非晶質の球形粒子が確認された。この球形粒子は激しく ASR を生じており、粒子全体がほぼ溶解していた。オパールはクリストバライトとともに最も反応性が顕著な鉱物であることが知られている<sup>3)</sup>。

石川事例 I-3 は加賀地方の手取川水系の水利構造物（ダム堤体）である（写真-2、I-3 参照）。本構造物のコンクリートには、石川県手取川産の川砂および川砂利が使用されていた。偏光顕微鏡観察の結果（写真-3、I-3 参照）、川砂中の流紋岩粒子に反応リムと ASR ゲルが観察された。ガラス質流紋岩粒子は骨材自身からもアルカリを溶出するので、今後も ASR が進行していくことが予想される。また、フライアッシュと思われる直径が数十 μm の球形粒子が観察された。フライアッシュの添加は ASR 抑制に有効であるが、本構造物では ASR による損傷が実際に生じており、フライアッシュの置換率が小さいために、十分な ASR 抑制効果が得られなかったものと推察される。

#### 4. 富山県における ASR 劣化の特徴

##### 4.1 反応性岩体と ASR 劣化構造物の分布状況

富山県の主要な河川と岩体の分布を図-5 に示す。富山県内の ASR は川砂および川砂利に混入した、高い反応性を持つ安山岩粒子によるものであることが明らかとなっている<sup>7)</sup>。富山平野の東部から南西部の丘陵地や山地には、安山岩の岩体が細長い帯状になって分布しており、

南西部の丘陵地には流紋岩の岩体が分布している。これらの岩体は、いずれも主要な河川水系の上流部に位置していることから、県内の河川流域で産出する川砂および川砂利には、火山岩系の反応性骨材である安山岩および流紋岩が少なからず混入している。そのため、構造物の規模や ASR 劣化度とは無関係に ASR 劣化構造物の分布状況を見ると、ほぼ県内全域に存在しているのが特徴である（図-1 参照）。また、岐阜県北部を源流とする神通川や庄川には、飛騨山地の火山岩も混入している。

##### 4.2 反応性骨材の岩石・鉱物学的特徴

富山県の ASR 劣化構造物の事例について、外観の様子および薄片研磨試料の偏光顕微鏡観察結果をそれぞれ写真-4 および写真-5 に示す。

富山事例 T-1 は富山県中央部の一級河川にかかる道路橋（橋脚梁部）である（写真-4、T-1 参照）。建設後約 20 年で ASR による損傷が確認され、補修としてひび割れ注入および表面被覆を実施したが、補修後約 15 年で再劣化により鉄筋破断を伴う損傷が確認されたため、橋脚の打替えが実施された<sup>8)</sup>。橋脚のコンクリートには富山県常願寺川産の川砂および川砂利が使用されていた。常願寺産の川砂利に含まれる安山岩粒子の X 線回折分析の結果を図-6 に示す。安山岩粒子には反応性鉱物としてクリストバライトと火山ガラスが含有されていた。主な反応性鉱物としてクリストバライトを含有するものはペシマム混合率をもつことが知られている<sup>3)</sup>。常願寺川産の川砂および川砂利には、反応性の高い安山岩粒子が 30～40% 程度含有されていた。これはペシマム混合率とほぼ一致するものであったため、本橋脚で顕著な ASR が発生した一つの要因であると推察された。偏光顕微鏡観察の結果（写真-5、T-1 参照）、川砂利中の安山岩粒子



図-5 富山県における岩体の分布状況



写真-4 富山県における代表的な ASR 劣化構造物の外観

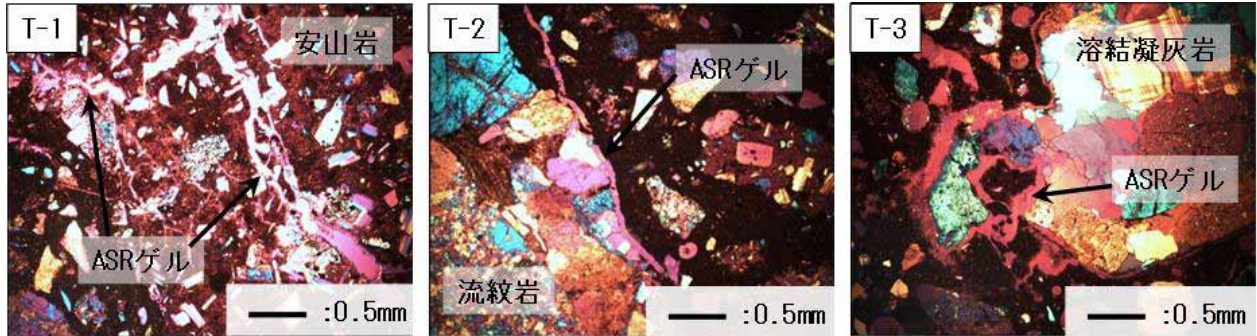


写真-5 富山県の ASR 劣化コンクリートの研磨薄片の偏光顕微鏡観察結果（直交ニコル・鋭敏色検板使用）

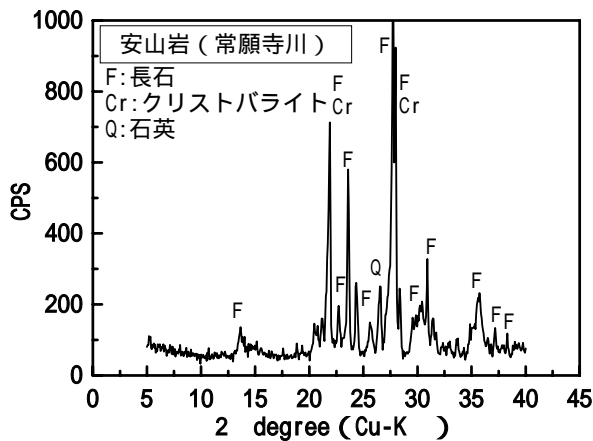


図-6 安山岩（常願寺川産）の X 線回折分析結果

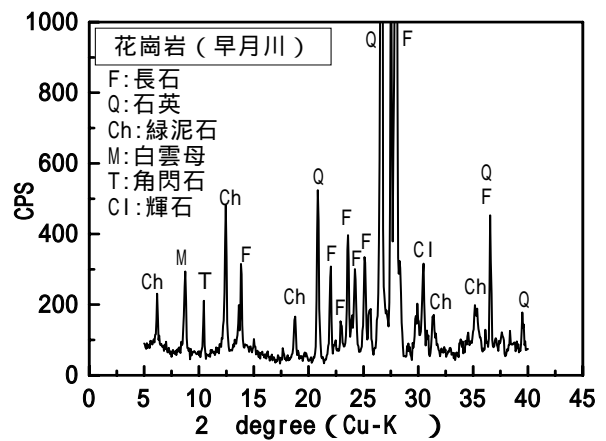


図-7 花崗岩（早月川産）の X 線回折分析結果

の多くはひび割れが生じており、セメントモルタルのひび割れと繋がっていた。また、セメントモルタルのひび割れや空隙の内部は ASR ゲルにより充填されていた。安山岩粒子にひび割れが発生すると、粒子内部での反応がさらに促進され、ASR ゲルの生成量が増大することから、コンクリートの劣化がより顕著になると考えられた。川砂および川砂利中の安山岩粒子には結晶性のもの（灰色）とガラス質のもの（黒色）とが混在しており、クリストバライトを含む前者のものが後者よりも活発に反応している様子が観察された。また、石川事例 I-2 と同様のオパールとみられる球形粒子の溶解も観察された。

富山事例 T-2 は、富山県中央部の跨線橋（橋脚）である（写真-4, T-2 参照）。建設後約 25 年で ASR による損傷が確認され、補修としてひび割れ注入および表面被覆を実施したが、補修後約 15 年で表面の防水塗装がひび割れにより再劣化しているのが確認された<sup>8)</sup>。本橋脚の

コンクリートには、富山県産の川砂および川砂利が使用されていた。偏光顕微鏡観察の結果(写真-5, T-2 参照)、反応性骨材として安山岩、流紋岩および溶結凝灰岩が認められ、庄川水系のものであると推察された。とくに、流紋岩粒子は激しく反応しており、流紋岩粒子周囲にはひび割れが生じていた。さらに、骨材周囲のひび割れは ASR ゲルで充填されていた。

富山事例 T-3 は富山県内の高速道路の橋梁の上部工（PC・箱桁）である（写真-4, T-3 参照）。PC は、高強度のコンクリート（低水セメント比）であるので、ASR に対しては、水分やアルカリの移動度を低下させることによる抑制効果と、単位セメント量の増大（アルカリの増大）にともなう促進効果との相反する要因があるとされている。コンクリートには、富山県神通川または早月川産の川砂および川砂利が使用されていた。神通川産の川砂および川砂利には、常願寺川産の川砂および川砂利

と同様に、反応性の高い安山岩粒子がペシマム値に近い値で含有されている。一方、早月川産の川砂および川砂利は花崗岩および閃緑岩を多く含有している。早月川産の花崗岩の X 線回折分析の結果を図-7 に示す。花崗岩中には反応性鉱物が含まれず、緑泥石が多く含まれていた。したがって、本橋梁の ASR は神通川産の川砂および川砂利によるものであると推察される。偏光顕微鏡観察の結果(写真-5, T-3 参照)、反応性骨材として安山岩、流紋岩および溶結凝灰岩が含有されていた。とくに、溶結凝灰岩においては反応により骨材界面が溶解している様子が観察された。

## 7. 結論

本研究では北陸地方の代表的な ASR 劣化構造物のコンクリートより作製した薄片研磨試料の偏光顕微鏡観察と骨材の X 線回折分析を実施した。本研究で得られた主要な結果をまとめると以下の通りである。

- (1) 北陸地方の ASR 劣化は、火山岩系の骨材によるものであり、地域ごとに含有される反応性の岩種が相違しており、ASR 劣化を特徴づけられた。
- (2) 能登有料道路の橋梁のコンクリートに使用された安山岩砕石中には、斑晶として斜長石、輝石が認められた。一方、石基部分には微細な斜長石および輝石類の粒間に火山ガラスが含まれていた。能登有料道路の比較的離れた場所に位置する 4 橋梁の偏光顕微鏡観察より、含有する構成鉱物およびガラス率が同一であった。したがって、能登有料道路では、主に門前地区のガラス質両輝石安山岩が砕石として使用されていたことが判明した。
- (3) 中能登地域の海上架橋では富山県庄川産の川砂および川砂利が使用され、反応性のある安山岩粒子および流紋岩粒子が含有していた。さらに、オパールとみられる球形粒子が含有されており、この球形粒子は ASR により溶解していた。
- (4) 加賀地区の ASR 劣化は手取川産の川砂および川砂利に含有される流紋岩粒子によるものであることが判明した。
- (5) 富山県の ASR 劣化構造物のコンクリートに使用された川砂および川砂利には、反応性骨材として安山岩、流紋岩および溶結凝灰岩が混入しており、それぞれの混入率は河川水系ごとに大きく相違していた。
- (6) 富山県でもっとも反応が顕著な常願寺川産の川砂および川砂利を使用したコンクリートでは安山岩粒子

が激しく反応していた。安山岩粒子は結晶性のもの(灰色)とガラス質のもの(黒色)とが混在しており、クリストバライトを含む前者のものが後者よりも活発に反応している様子が観察された。

## 謝辞

本研究の実施にあたりご協力をいただいた、中日本高速道路株式会社小松原昭則氏、西谷直人氏、中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋株式会社野村昌弘氏に感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 鳥居和之, 野村昌弘, 本田貴子: 北陸地方の反応性骨材の岩石学的特徴と骨材のアルカリシリカ反応性試験の適合性, 土木学会論文集, No.767, pp.185-197, 2004 .
- 2) 南善導, 大代武志, 野村昌弘, 鳥居和之: 骨材のアルカリシリカ反応性試験の判定結果の整合性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.1245-1250, 2007 .
- 3) Katayama, T., Tagami, M., Sarai, Y., Izumi, S., Hira, T.: Alkali-aggregate Reaction under the Influence of Deicing Salts in the Hokuriku District, Japan, Materials Characterization, Vol.53, No.2-4, pp.1065-1070, 2004 .
- 4) 日本コンクリート工学協会・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: 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, 2008.9 .
- 5) 山戸博晃, 南善導, 大代武志, 鳥居和之: 石川県産骨材のアルカリシリカ反応性の評価に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, 2007 .
- 6) 野村昌弘, 鳥居和之, 青山實伸: 北陸地方の河川産骨材を使用したコンクリートのアルカリシリカ反応性の評価法の開発, 材料, Vol.53, No.10, pp.1065-1070, 2004 .
- 7) 野村昌弘, 青山實伸, 平俊勝, 鳥居和之: 北陸地方における道路構造物の ASR による損傷事例とその評価手法, コンクリート工学年次論文集, Vol.13, No.3, pp.105-114, 2002 .
- 8) 大代武志, 原田政彦, 中野政信, 中狭靖: コンクリート橋脚の ASR による再劣化と対策工法の選定, コンクリート工学, Vol.44, No.12, pp.31-38, 2006 .