

## 報告 石川県の ASR 劣化構造物の実態調査と反応性骨材の地域的な分布

麻田 正弘\*<sup>1</sup>・鳥居 和之\*<sup>2</sup>

**要旨:** 金沢大学は 2014 年に SIP (戦略的イノベーション創造プログラム) インフラ維持管理・更新・マネジメント技術の研究課題に採択され (研究責任者: 鳥居和之 教授), 北陸地方における塩害や ASR により早期劣化が生じた地方道路橋のメンテナンスマネジメントの開発に取り組んでいる。このうち ASR 分科会 (WG2) では, 北陸地方における骨材の地質・岩石学的分布と ASR 発生区域, 構造物の使用・環境条件との関係を調べている。本報告はその一環として, 石川県における反応性骨材の地域的な分布と ASR 劣化構造物の発生区域との関係, および使用骨材のアルカリシリカ反応性について取りまとめたものである。

**キーワード:** ASR 劣化構造物, 反応性骨材, シリカ鉱物, 化学法, モルタルバー法,

### 1. はじめに

北陸地方ではこれまでに, ASR で劣化したコンクリート構造物に対する調査, 診断, 対策にいたる取り組みが, 精力的に行われてきた<sup>1),2)</sup>。ASR の発生は, その地域に分布する反応性骨材と深く関係しており, 北陸地方では, とくに地質学・岩石学的な見地から調査, 診断が行われてきた<sup>3)</sup>。この地方では, 安山岩をはじめとする新第三期以降の火山岩類が広く分布しており, コンクリート用骨材として使用されてきたが, 火山岩類は熱力学的に不安定なシリカ鉱物であるクリストバライト, トリディマイト, 火山ガラスやオパールなど, ASR 反応性鉱物を含んでいるため, 急速膨張性の ASR を発生させた原因となっていた<sup>4)</sup>。コンクリート用骨材の供給源は, 標高 3000m 級の山々が連なる中部山岳地帯から流下する大川であり, 流域全体が豊富な砂利資源となっている。

石川県では, 白山を主峰とする加越山地から一級河川手取川が流下し, 金沢平野の一部である手取川扇状地を形成している。この扇状地は, コンクリート用骨材の砂利, 砂の供給源となっている。一方, 能登半島には大きな河川がなく, 砂利資源に乏しかった。1970 年頃から, この地域で大規模な建設工事が始まると, 生コン工場でのコンクリートの製造とともに, 能登半島北部の低山地で産出される両輝石安山岩がコンクリート用骨材として使用され始めた。現在, 能登半島全域に見られる ASR で劣化した構造物は, この安山岩砕石を使用したものである。既往の研究<sup>5),6),7)</sup>により, 能登地域の安山岩砕石, 手取川流域の砂利, 砂に関する骨材の岩石・鉱物学的特徴, およびアルカリシリカ反応性は, おおむね把握されている。また, トンネルの実態調査から<sup>8)</sup>, 石川県内で ASR により劣化した構造物の多くは, 1970 年頃から 1990 年頃までの約 20 年間に建設されたものであることが分かっている。この期間は, 能登地域の安山岩砕石が使用さ

れ始めた時期と, 1989 年に当時の建設省から ASR 抑制対策が通達された時期とおおむね一致している。ただし, ASR 抑制対策のうちアルカリ総量規制に関して, 国内でアルカリ量が 0.9~1.1%の高アルカリセメントが出回った時期は, 1965 年から 1986 年までであり<sup>9)</sup>, その後, 普通ポルトランドセメントのアルカリ量は低下してきている (現在は 0.5%程度<sup>10)</sup>)。抑制対策後, ASR の発生が減少してきた一因は, セメントのアルカリ量が低下してきたことによるところが大きい。一方で, アルカリ総量規制値を遵守していたにもかかわらず, その後, ASR が発生している構造物が報告されている<sup>8)</sup>。したがって, 石川県では ASR を発生させずに, 地域の砂利, 砂や砕石などの骨材資源を有効に活用するために, セメントのアルカリ量の低下だけに期待するのは十分でないと考えられている。

石川県における ASR 劣化構造物の維持管理の問題への取り組みは, 2004 年に「ASR 対策検討委員会」が発足し, ASR で劣化した橋梁の地域的な分布や維持管理方針が取りまとめられている<sup>11)</sup>。2005 年にはトンネルについても同様な分布図が作成された<sup>8)</sup>。また, 県都金沢市と能登半島を結ぶ能登有料道路 (現: のと里山海道) では, 1994 年から ASR 劣化橋梁の対策に着手し, 大規模な橋脚はりの打ち換えなどが実施されていた。そして, 2007 年の能登半島地震を機に, 10 橋に及ぶ耐震補強を兼ねた橋脚柱の RC 巻立てや PC 巻立て, さらにフーチングの部分打換えや増厚補強など, 全国に先駆けた ASR 対策工が実施された<sup>12),13)</sup>。

一方, ASR 問題を抱えるこの地域で, 良質かつ耐久性に優れた構造物を新設していくための取り組みも必要であった。豊富な地域の骨材資源を有効に活用していくためには, 先述のとおり, アルカリ総量規制だけでは不十分である。その理由として, この地域は, 冬期の飛来塩

\*1 アルスコンサルタンツ株式会社 技術本部長 博士(工学) (正会員)

\*2 金沢大学 理工研究域環境デザイン学系 教授 工博 (正会員)

分や凍結防止剤の散布により、外部からコンクリート中にアルカリが侵入することや、さらに骨材自身からアルカリが溶出する問題を抱えているためである<sup>14)</sup>。したがって、新設構造物の ASR 問題への取り組みとして、混合セメント等の使用に期待が寄せられていった。とくに、地域内で得られる石炭火力発電所の副産物であるフライアッシュを使用する ASR 抑制対策は、地産地消による環境負荷の低減と骨材資源の有効利用を兼ねたものとして、前向きに取り組まれた<sup>3)</sup>。2011 年に、産学官連携による「北陸地方におけるコンクリートへのフライアッシュの有効利用促進検討委員会」が設立され、2013 年には、報告書(富山・福井・石川版)が発表された<sup>15)</sup>。これにより、北陸地方におけるフライアッシュコンクリートの配合・製造および施工に関する標準化が示され、これを機に、フライアッシュコンクリートの JIS 認証を取得する生コン工場が増え、現在、フライアッシュコンクリートの利用促進が大きく期待される状況となっている。

以上、石川県における ASR 問題への取り組みは、全国で同じような問題を抱えている地方や地域で、共有・活用できると考えられる。最近の調査では、東北地方や北海道において、凍害による劣化に ASR が関与していることも明らかになっている<sup>16)</sup>。とくに ASR 問題は、岩石・鉱物学的なアプローチが必要になるため、調査や診断において、本質的な理解が遅れていると考えられる。

そこで、本報告では石川県における事例として、県内全域の地質分布と河川水系の概要を示し、岩石体の分布状況を明らかにしたうえで、骨材の産地と供給状況を把握し、既往の試験データに基づいた骨材のアルカリシリカ反応性について述べる。そして、これまでに調べられた ASR 劣化構造物の実態調査から、代表的な構造物を選定し、外観劣化や反応性骨材の使用状況などを取りまとめ、ASR 劣化構造物を維持管理していくうえでの基礎資料を得ることを目的とする。

## 2. 石川県の地質概要と骨材の供給状況

### 2.1 地質概要と河川水系

石川県は日本海に突き出した能登半島を含む南北に細長い地形で、県都金沢以北は、能登北部(低山地)、能登中部(丘陵地)、そして金沢以南は、加賀低地(扇状地、潟埋積平野)、南部山地(白山を含む)に大別される。石川県の地質概要を図-1に示す。また、河川水系を図-2に示す。図-2には石川県の各地域名を併記している。図-1より、能登地域では七尾以北には穴水累層と呼ばれる安山岩質溶岩が広く分布し、その中で剣地には黒崎安山岩が分布している。花崗岩は宝達山の全体に露出し、能登南部では二宮に分布する。砂岩は七尾、高浜、志雄地区に、溶結火砕岩は内浦地区に分布している。

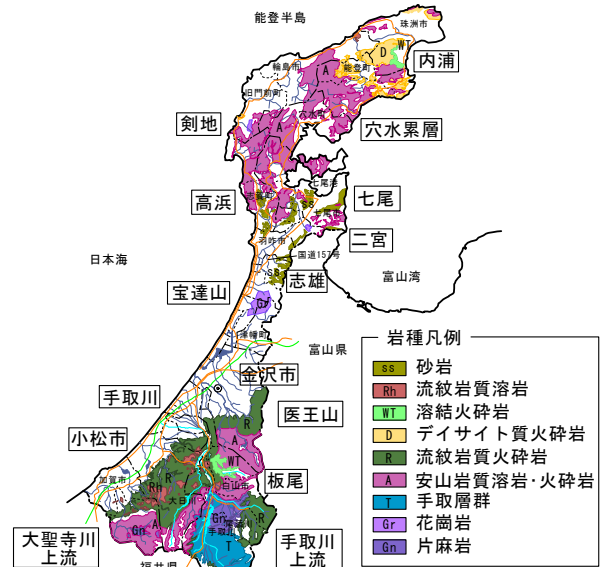


図-1 石川県の地質概要<sup>17)</sup>

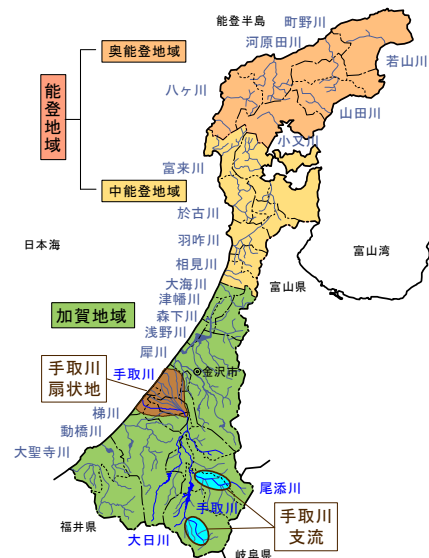


図-2 石川県の河川水系<sup>17)</sup>

一方、加賀地域では金沢以南の山地部、大聖寺川上流域に安山岩質溶岩が分布し、医王山、手取川中流域、小松東南部山地一帯にかけて流紋岩質火砕岩が広く分布する。溶結火砕岩は板尾地区に分布する。手取川上流域では、礫岩からなる五味島層、砂岩と頁岩の互層からなる桑島層などの手取層群が分布している。以上、これらの岩石体はいずれも石川県における骨材資源となっている。次に、図-2に示す石川県の河川水系より、比較的行程の長い河川は34河川あるが、県内で唯一、最大の扇状地が広がるのは手取川である。手取川扇状地では陸砂利・陸砂が、上流域の支流では川砂利・川砂の採取が行われている。

### 2.2 石川県内の骨材供給状況

ASR 劣化構造物を維持管理していく上で、建設当時の骨材産地と供給状況を把握し、反応性骨材の分布や使用

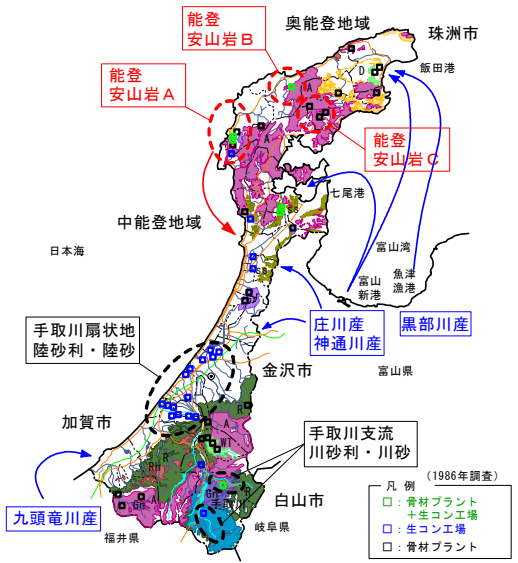


図-3 石川県の骨材供給状況 (1986年調査) <sup>18)</sup>

状況など、地域的な骨材情報を把握しておくことが有効な手段となる。1986年当時の石川県内の骨材の供給状況は、図-3に示すとおりであった<sup>18)</sup>。奥能登地域では、能登の安山岩砕石が広く使われていた。800~900万年前の比較的新鮮な安山岩(安山岩A)と2000万年前の安山岩質溶岩(安山岩B, C)である。珠洲市では、富山県から海上輸送された庄川産、黒部川産の川砂利が使われた。また、中能登地域では、能登の安山岩砕石および富山県から輸送された川砂利が使われた。金沢市およびその近郊では、手取川扇状地の陸砂利・陸砂が広く使われ、一部、富山県の川砂利も使われた。白山市山間部では、手取川支流の川砂利・川砂が使われ、加賀市では、福井県九頭竜川産の川砂利も使われた。

既往の調査では<sup>5),6),7),8)</sup>、ASR劣化構造物に使用された骨材として、能登地域の安山岩砕石、手取川支流の川砂利・川砂、そして富山県の川砂利、福井県九頭竜川の川砂利が報告されている。

### 3. ASR劣化構造物の実態調査

石川県内の道路橋のうち、1963年から1986年の24年間に建設された1001橋と、1929年から2009年の81年間に建設された道路トンネル120箇所について、2004年と2005年にASRに関する実態調査が行われた<sup>8),11)</sup>。橋梁は上部工と下部工を、トンネルは覆工と坑門を対象にしていた。調査方法は外観目視により、ひび割れの特徴(亀甲状あるいは拘束方向に卓越したひび割れ)、およびコンクリート表面の状態(白色析出物の拡がりや段差)からASRの判定を行っている。劣化程度については、軽微なものから顕著なものまでをASR劣化構造物と判定している。調査結果によるASR劣化構造物の分布図を図-4に示す。橋梁、トンネルともASR劣化構造物は、能

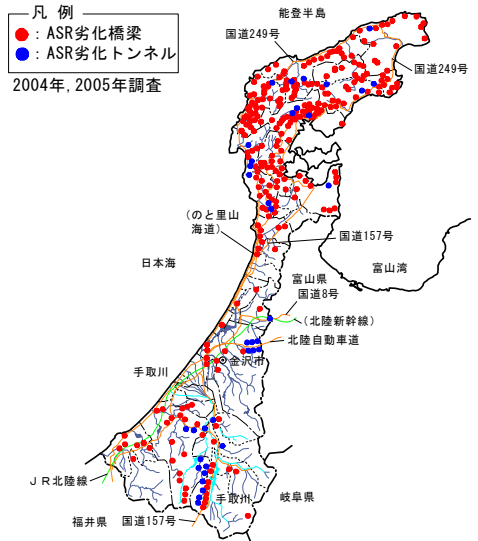
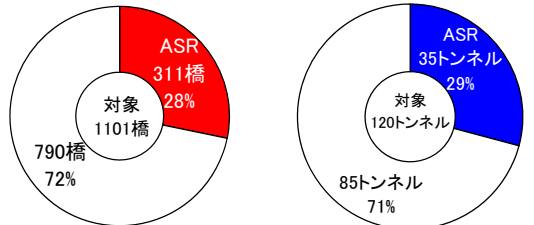


図-4 ASR劣化構造物の分布図(橋梁, トンネル)



ASRが発生した橋梁数 ASRが発生したトンネル数  
図-5 ASR劣化構造物の発生割合

登地域と手取川上流域に多く分布していた。これは、能登地域の安山岩砕石、そして手取川支流の川砂利が、反応性骨材であったことを示していた。図-5はASRの発生割合を示しているが、橋梁、トンネルともASRの発生割合は3割近くであった。

## 4. 骨材のアルカリシリカ反応性とASR劣化構造物

### 4.1 骨材のアルカリシリカ反応性試験

1986年当時、石川県内のすべての骨材プラントから粗骨材48試料、細骨材15試料、合計63試料を採取し、アルカリシリカ反応性試験を実施した<sup>18)</sup>。試験内容はJIS A 1145化学法63試料とJIS A1146モルタルバー法46試料である。図-6に試験を行った63試料の骨材産地と試料数を示す。能登地域の砕石・山砂、加賀地域の砕石・砂丘砂、手取川扇状地の陸砂利・陸砂、そして手取川支流の川砂利・川砂など、石川県内の骨材資源を網羅した試料となっている。このうち能登地域と加賀地域の砕石について、岩種区分を図-7に示した。いずれの地域も安山岩砕石の試料数が全体の7割近くを占めていた。

化学法による粗骨材の判定結果を図-8に、細骨材の判定結果を図-9に示す。また、モルタルバーによる粗骨材の判定結果を図-10に、細骨材の結果を図-11に

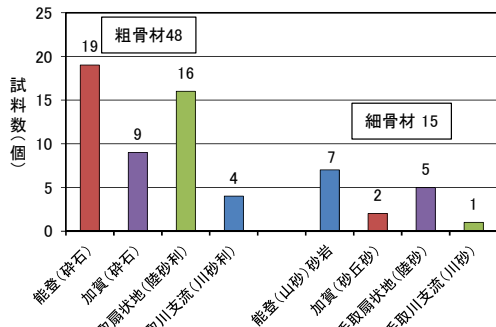


図-6 骨材産地別の試料数(全63試料)

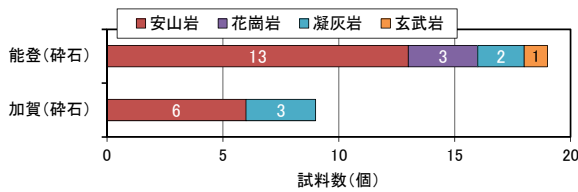


図-7 能登(碎石)と加賀(碎石)における岩種区分

示す。能登地域の安山岩碎石の多くは、化学法で「無害でない」と判定されるとともに、ASTMの「潜在的有害」の範囲にプロットされ、ペシマム混合率を持つことが示唆された。実際、モルタルバー法における能登地域の安山岩碎石のペシマム混合率は50~60%であることが確認されている<sup>1)</sup>。能登地方では、安山岩碎石と「無害」の山砂の組合せが一般的であり、これにより粗骨材と細骨材の重量比でペシマム現象を生じ、ASR膨張が顕著になった可能性が考えられた。一方、加賀地域の安山岩碎石はすべて「無害」の判定となった。その中で、溶解シリカ量  $Sc$  が100(mmol/l)以上の安山岩碎石が1試料あり、モルタルバー法の判定で「無害でない」となった。実際、金沢市山間部で生産されたこの安山岩碎石によりASRが発生していた。また、化学法のJIS判定ライン付近にプロットされた手取川支流の川砂利は  $Sc$  が100(mmol/l)以上を示し、モルタルバー法で「無害でない」となった。この川砂利が採取された支流は分かっており、その付近にはASR劣化構造物が多く存在している。このような実構造物におけるASRの発生状況から、石川県内における化学法の判定では、 $Sc$  が100(mmol/l)を超えるものを「無害でない」とすることが推奨されている<sup>2)</sup>。細骨材の化学法の判定はすべて「無害」であった。しかし、手取川扇状地の陸砂は、モルタルバー法で「無害でない」と判定され、また、手取川支流の川砂は1試料のみの判定であった。多種多様な岩種が入り混じった手取川産の陸砂、川砂は、試料ごとにアルカリシリカ反応性が異なると考えられるので留意すべきである。

#### 4.2 反応性骨材とASR劣化構造物

能登地域の代表的な反応性骨材である安山岩碎石は、

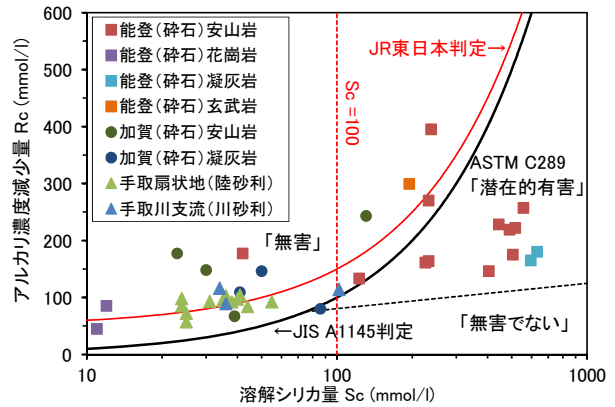


図-8 化学法による判定結果(粗骨材)

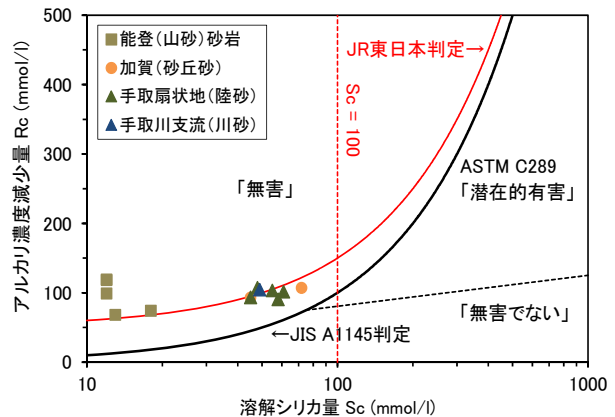


図-9 化学法による判定結果(細骨材)

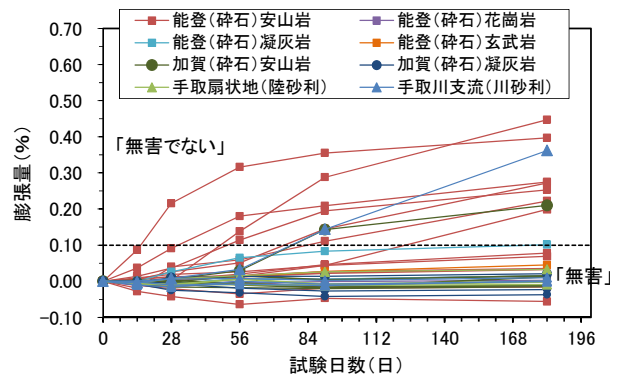


図-10 モルタルバー法による判定結果(粗骨材)

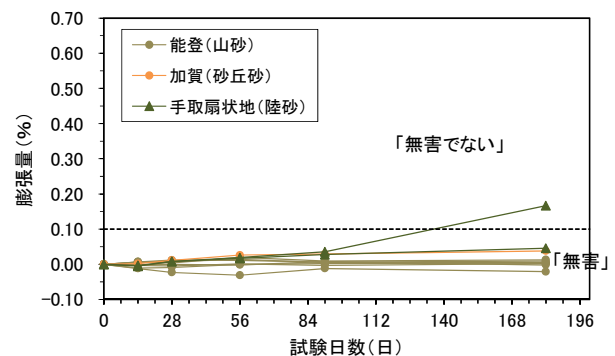


図-11 モルタルバー法による判定結果(細骨材)



図-3 に示すように 3 つの産地に大きく分けられていた (安山岩 A, 安山岩 B, 安山岩 C)。一方, 加賀地域では, 手取川支流の川砂利が代表的な反応性骨材であった。能登地域の 3 種類の安山岩は, 既往の岩石・鉱物学的試験から反応性シリカ鉱物の含有量に違いのあることが分かっている<sup>4)</sup>。安山岩 A は火山ガラスを, そして安山岩 B はクリストバライトを多く含み, 安山岩 C はいずれの鉱物も少量であった。一方, 粘土鉱物の一種であるスメクタイトが安山岩 C に多く見られた。スメクタイトはアルカリを吸着する性質があり, 骨材のアルカリシリカ反応性を適切に評価できない場合があると報告されている<sup>1)</sup>。図-12 に, 手取川支流の川砂利の岩種構成率を調べた結果を示す。反応性の高い安山岩と流紋岩質溶結凝灰岩を合わせた構成率は約 25%であった。

前節の 63 試料の試験結果から, 能登地域の安山岩砕石 A, B, C, および手取川支流の川砂利, 以上 4 種類の反応性骨材に対応する JIS A 1146 モルタルバー法の結果を取り出し, 図-13 を作成した。膨張率は, 安山岩 B が一番大きくなり, 次に川砂利, 安山岩 A, 安山岩 C の順となった。3 種類の安山岩の膨張量の大小は, 反応性シリカ鉱物の種類や含有量に応じた結果となった。急速膨張性の大きなクリストバライトを多量に含んだ安山岩 B が最も大きく, 急速膨張性がやや緩やかな火山ガラスを含んだ安山岩 A がそれに続く結果となった。川砂利は, 反応性骨材の構成率により膨張量に差が生じると考えられ, 試験を行った試料は比較的膨張量が大きく, 反応性骨材の量がペシマムに近いものであったと考えられる。

次に, 4 種類の反応性骨材を使用した実構造物の劣化状況を写真-1 示す。安山岩 A を使用した橋脚はり, 安山岩 B を使用した橋台胸壁の外観は, ともに顕著な亀甲状のひび割れが見られ, 劣化状況は同程度であった。それに対して, 安山岩 C を使用したトンネル坑門は比較的軽微なひび割れであった。これより, 外観の劣化程度は, 使用した骨材に含まれる反応性シリカ鉱物の含有量に比例していた。一方, 反応性シリカ鉱物の種類による劣化程度の差は明確ではなかった。川砂利を使用した橋台胸壁・RC 床版は, ASR ゲルの析出が多く見られたのが特徴であった。写真-1(c)を除く 3 つの構造物から  $\phi 55\text{mm}$

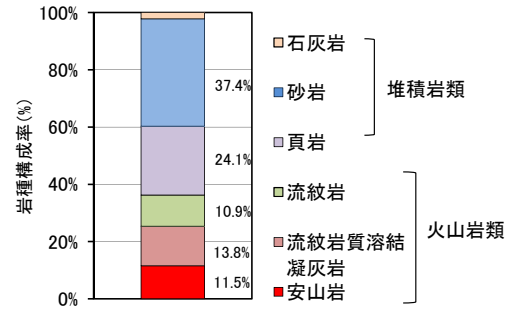


図-12 手取川支流の川砂利の岩種構成率

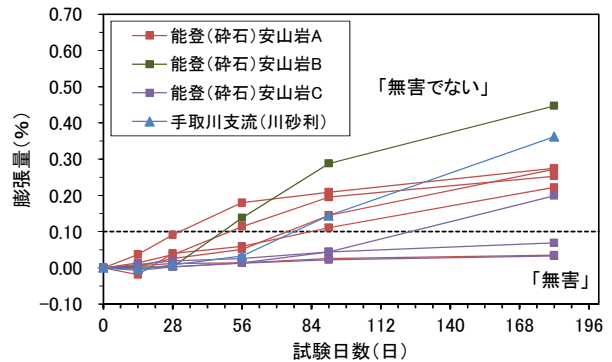


図-13 モルタルバー法による判定結果(反応性骨材)

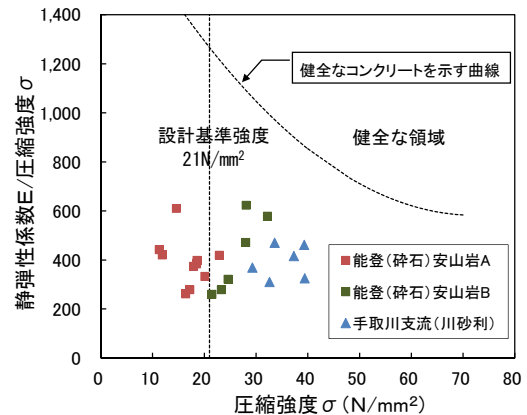


図-14 圧縮強度と静弾性係数試験の関係(反応性骨材)

のコアを採取して, JIS A 1149 に準拠し, 圧縮強度および静弾性係数の測定を行った。その結果を図-14 に示す。プロット点が, 健全なコンクリートを示す曲線から左下がり, 原点に近づくに従い, 静弾性係数が低下しており, 構造物内部の膨張ひび割れが著しくなっていること



(a) 安山岩 A (橋脚はり)

(b) 安山岩 B (橋台胸壁)

(c) 安山岩 C (トンネル坑門)

(d) 手取川砂利 (橋台・RC 床版)

写真-1 反応性骨材と ASR 劣化構造物

を示している。安山岩 A の測定値は、安山岩 B の測定値より原点寄りにプロットされ、安山岩 A の方が内部の膨張が大きく、ミクロなひび割れが著しいと推察された。これはモルタルバー法による膨張量の大小関係とは逆の結果となった。この理由は、モルタルバー法の膨張量は反応性シリカ鉱物の種類や含有量に比例するが、実構造物では、この条件に、雨掛かり・日射などの環境条件、または、鋼材の拘束による構造条件が加わり、ASR 劣化度に影響を与えたためと考えられる。今回の場合、安山岩 A、B を用いた両構造物の環境条件に差はなかったが、安山岩 A の構造物に対し、安山岩 B の構造物の拘束鉄筋は約 2.8 倍の量が配置されており、両構造物の拘束力に差があり、構造条件が異なっていた。

## 5. まとめ

石川県の ASR 劣化構造物の実態調査と反応性骨材の地域的な分布についてまとめると次のとおりである。

- (1) 石川県では、能登地域の安山岩砕石、手取川扇状地の陸砂利・陸砂、手取川支流の川砂利・川砂、さらに富山県や福井県の川砂利など、多種多様な骨材が使用されていた。
- (2) 橋梁、トンネルなどの ASR 劣化構造物は、能登地域と手取川上流域に多く分布していた。調査対象構造物のうち ASR の発生割合は 3 割近くであった。
- (3) 能登地域の安山岩砕石はペシマム混合率を有し、粗骨材と細骨材の重量比でペシマム現象を生じ、ASR 膨張が顕著になった可能性が考えられた。実構造物における ASR の発生から、石川県内の骨材の化学法の判定では、Sc が 100(mmol/l)を超えるものを「無害でない」とすることが推奨された。
- (4) 骨材のアルカリシリカ反応性は、含有するシリカ鉱物の種類とその量に影響され、実構造物の ASR 劣化度は、骨材のアルカリシリカ反応性に加え、外的な環境条件と構造条件の影響を受けていた。

**謝辞：**本研究は、内閣府・科学技術振興機構（JST）の戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）による研究開発の一環として実施したものであり、関係各位に感謝いたします。

## 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/V-64、pp.185-197、2004.8
- 2) 鳥居和之：アルカリシリカ反応にいかに対応するかー試験、診断と対策ー、セメントコンクリート、

No.696、pp.1-9、2005.2

- 3) 広野真一：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、金沢大学学位論文、2015.3
- 4) 広野真一、鳥居和之：ASTM C 1260 によるフライアッシュ含有モルタルの安山岩に対する ASR 抑制効果の評価、材料、Vol.62、No.8、pp.498-503、2013.8
- 5) 鳥居和之、樽井敏三、大代武志、平野貴宣：能登半島の ASR 劣化構造物に関する一考察、コンクリート工学年次論文集、Vol.28、No.1、pp.779-784、2006.7
- 6) 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、2007.7
- 7) 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、2008.7
- 8) 麻田正弘、鳥居和之：石川県におけるトンネルの ASR 劣化状況と対策に関する実態調査、コンクリート工学年次論文集、Vol.35、No.2、pp.1465-1470、2013.7
- 9) 小林一輔、牛島栄：コンクリート構造物の維持管理、森北出版、pp.19-22、2006.12
- 10) 太平洋セメント株式会社：普通ポルトランドセメント、[http://www.taiheiyo-cement.co.jp/service\\_product/cement/pdf/ncement\\_v3.pdf](http://www.taiheiyo-cement.co.jp/service_product/cement/pdf/ncement_v3.pdf).
- 11) 石川県土木部道路整備課：ASR 劣化橋梁の維持管理の手引き（案）、2005.3
- 12) 鳥居和之、宮村雅之、湊俊彦、他：能登有料道路の基礎構造物の ASR 劣化とその対策、コンクリート工学、Vol.46、No.4、pp.27-33、2008.4
- 13) 湊俊彦、鳥居和之：能登有料道路の ASR 劣化橋梁と反応性骨材の岩石学的特徴、材料、Vol.59、No.10、pp.781-786、2010.10
- 14) 野村昌弘、渡辺暁央、鳥居和之：砂のアルカリ溶出性状と構造物における骨材からのアルカリ溶出の検証、コンクリート工学年次論文集、Vol.29、No.1、pp.153-158、2007.7
- 15) 北陸電力株式会社：北陸地方におけるコンクリートへのフライアッシュの有効利用促進検討委員会 報告書（富山・石川・福井版）、2013.6
- 16) 鳥居和之、広野真一、津田誠：わが国の反応性骨材の岩石学的特徴とコンクリートの ASR 劣化問題の解決、コンクリートテクノ、Vol.34、No.12、pp.16-21、2015.12
- 17) 柏野義夫：新版・石川県地質図（石川県地質誌）、PP.21-53、1993.3
- 18) 金沢大学：アルカリ骨材反応に関する研究、1986.9