

# 論文 富山産河川砂利のアルカリシリカ反応性と ASR 劣化橋梁の発生状況

津田 誠\*1・野村 昌弘\*2・安藤 陽子\*3・鳥居 和之\*4

**要旨：**石川県珠洲市では、昭和 40 年代から富山県産河川砂利が多く使用され、これら骨材にて ASR が生じている。本研究では、富山県産河川砂利の ASR 反応性を調べるため、化学法および促進膨張量試験を実施した。さらに、ASR に対する塩化物イオンの影響を調査するため、長期間にわたる塩水養生による膨張量試験を実施した。その結果、JIS による骨材の ASR 判定試験結果にて無害と判定された骨材が塩化物イオンにて ASR が促進される可能性があることが判明した。さらに、橋梁の詳細点検結果より ASR 劣化状況の特徴を調査した結果、骨材の ASR 反応性と ASR 劣化橋梁の分布に相関があることがわかった。

**キーワード：**ASR, 安山岩砕石, 劣化橋梁, 塩化物イオン, モルタルバー法, 促進膨張量試験

## 1. はじめに

石川県能登半島に位置する奥能登地方では砂利資源に乏しく、このため、安山岩砕石などの火山岩類を重要な骨材資源として使用していた。その一方で、安山岩砕石を使用したコンクリート構造物で深刻なアルカリシリカ反応(以下、ASR と記す)による劣化が発生している。

能登半島北西部の地質で、もっとも広大な面積を占めるのは、穴水累層と呼ばれる中新世の火山性岩石であり、主として安山岩質の溶岩および火砕岩からなっている。このような火山岩類は一般に、火山ガラスやクリストバライトなどを含み ASR による劣化を発生させてきた。

また、わが国の ASR 抑制対策は、アルカリ総量規制値(3kg/m<sup>3</sup>)を基本に据えているが<sup>1)</sup>、骨材から溶出したアルカリの影響により、ASR が長期にわたり進行する可能性があることも指摘されている<sup>2)</sup>。一方、ASR 抑制対策の1つとして、アルカリ総量規制を遵守しているが、現在でも ASR が発生しているコンクリート構造物が確認されている。その原因として、骨材からのアルカリの溶出、凍結防止剤の散布および飛来塩分などの使用環境による影響などがある。

しかしながら、地産地消および環境への負荷軽減ならびに現在の社会情勢から、ASR に対して全くリスクを伴わない骨材を選択することは現実的ではなく、むしろ、地元で産出される骨材を有効に利用し、当該地域ごとに、使用する骨材にあった抑制対策のルール作りを行い、ASR による劣化のないコンクリート構造物を構築することが重要であると考えている。

図-1 に示すように、急速膨張性の反応鉱物を含む岩石として新第三紀と第四紀の新しい火山岩類は日本全国に分布しており、日本各地で ASR が発生してもおかしくない状態であることが分かる。このため、現在 ASR の発

生が報告されていない地域でも潜在的に ASR 劣化した構造物が多く存在し、それら ASR 劣化に対するリスクマネジメントについても研究が進められている<sup>4), 5)</sup>。

以上より、橋梁の維持管理が今まで以上に重要とされ、これら ASR 劣化構造物に対して維持管理手法の確立が、今後の構造物の長寿命化対策の1つであると考えられる。

そこで本研究では、将来にわたり持続可能な構造物の維持管理計画の立案を最終的な目的とし、当該地方のコ

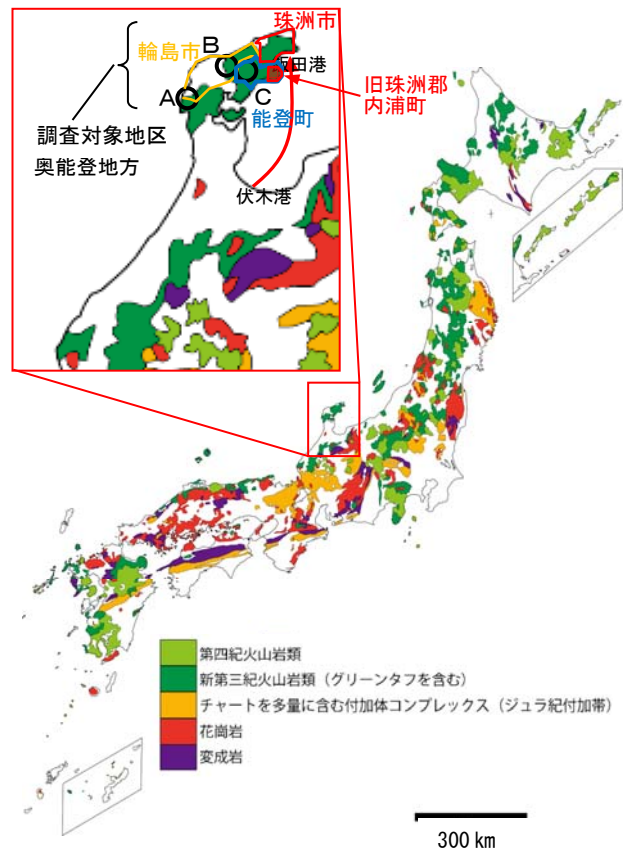


図-1 調査対象地区と ASR と関連の深い地層や岩体<sup>3)</sup>

\*1 石川工業高等専門学校 環境都市工学科 准教授 博士(工学)(正会員)  
 \*2 (株)野村昌弘の研究所 博士(工学)(正会員)  
 \*3 (株)太平洋コンサルタント 解析技術部 (正会員)  
 \*4 金沢大学理工研究域地球社会基盤学系 特任教授 工博 (フェロー会員)

ンクリート構造物の劣化原因で深刻な ASR に着目し、石川県および富山県にて使用されてきた、コンクリート用骨材のアルカリシリカ反応性を調査するとともに、近年実施された橋梁の詳細点検結果により ASR 劣化橋梁の分布状況や劣化度の特徴を調査し、それらの関連性について検討を行った。

## 2. 調査概要

### 2.1 調査位置および使用骨材の供給状況

調査対象地区および安山岩の分布状況とコンクリート用骨材の供給経路を図-1に示す。図-1の赤丸示す珠洲市および旧の珠洲郡には、内湾の静穏な海域を利用して船によって輸送された、富山県産の河川産砂利や砂（庄川など）が使用されていた。このため、珠洲市および旧の珠洲郡は同じ能登半島にありながら、奥能登地方で ASR 劣化の原因となった安山岩砕石を使用していない地区となっている。

一方、珠洲市および旧珠洲郡以外の奥能登地方では図-1に示す安山岩 A（門前）、B（石休場）、C（太田原）の3種の砕石が主に粗骨材として使用されており、また代表的な ASR 反応性を示す岩種である。細骨材は ASR 非反応性の山砂が主に使用されてきた。

奥能登地方では昭和 40 年代後半より、レディーミクストコンクリート工場によりコンクリートの製造が開始され、調査結果より、旧の行政区分ごとに、表-1に示すとおり、同一地区にある橋梁にコンクリートを供給していた。

### 2.2 岩石の試験方法

#### (1) 岩石・鉱物学的試験

促進モルタルバー法（ASTM C1260）に規定されたサイズ（4.75～0.15 mm）と粒度組成に調整した安山岩砕石 3 種をエポキシ樹脂で固化したものから、20×20mm のチップを切り出した。これをスライドガラスに接着し、厚さ 15～20μm の薄片試料を作成し、偏光顕微鏡下で観察を行い、構成する岩石の特徴や構成鉱物を検討した。

#### (2) 骨材の ASR 試験

骨材の ASR 試験として、化学法（JIS A 1145）およびモルタルバー法（JIS A 1146）ならびに促進モルタルバー法（ASTM C1260）を実施した。ASTM C1260 の ASR 判定は、材齢 14 日において膨張率が 0.1%未満のものを「無害」、0.1%以上 0.2%未満のものは無害と有害が混在しているとして「不明確」、0.2%以上は「有害」と判定する。

さらに、沿岸部における海水や海水飛沫帯による外部塩分の影響でアルカリシリカ反応が誘発されることがあるかどうかを検討する目的で、塩水養生によるモルタルバー法を実施した。試験方法は JIS 規定のモルタルバー法を参考に、普通セメントを使用し、アルカリ量は

表-1 地区別骨材流通相関表

橋梁の地区	骨材名	骨材の産地	骨材の反応性	
珠洲市	庄川産	富山県庄川	小	
能登町	旧珠洲郡内浦町	庄川産	富山県庄川	小
	旧鳳至郡能都町	安山岩C	能都町太田原	中
	旧鳳至郡柳田村	安山岩C	能都町太田原	中
輪島市	門前地区	安山岩A	門前町劔地	大
	輪島地区	安山岩B	輪島市石休場	中
	町野地区	安山岩C	能都町太田原	中

表-2 橋梁の健全度判定表<sup>6)</sup>

健全度	石川県		国土交通省
	損傷状況及び対応の概念		
良 ↑ ↓ 悪	5	点検の結果から記録する損傷は認められない。	1
	4	損傷が認められ、その程度を記録する必要がある。	
	3	損傷が認められ、追跡調査を行う必要がある。	2
	2	損傷が大きく、詳細調査を実施し、補修・補強の要否の検討を行う必要がある。	3
	1	損傷が著しく、交通安全確保の支障となる恐れがある。	4

表-3 ASR 判定の区分表<sup>7)</sup>

判定区分	具体的な内容
非ASR	ASRの症状がなく、健全な場合
擬ASR	ASRに類似した劣化がみられるが、状況、位置および範囲等により判断困難な場合、もしくは補修（コンクリート保護塗装）および落橋防止工が施工されているので、正確な判断は困難であるが、他の部材にASRの症状が見られ、施工時期、工区からASRの疑いがもたれる場合 上部工：幅0.2mm未満の軸方向ひび割れが広範囲で生じている場合 下部工：幅0.2mm以上の格子状のひび割れが部分的に生じている場合
認ASR	いくつかのASRの特徴づける劣化が見られ、明らかにASRと判断できる場合 上部工：幅0.20mm程度を超えるひび割れが広範囲で生じている場合 下部工：幅0.60mm以上の格子状のひび割れが全面に生じている場合、または幅1.0mm程度を超える軸方向ひび割れが広範囲で生じている場合

Na<sub>2</sub>O<sub>eq</sub> でセメント量に対して 1.2%とした。供試体を 1N の NaCl 溶液（20℃）に浸漬した。また、養生塩水は供試体体積の 3 倍以上となるように管理した。

### 2.3 橋梁の調査および評価方法

対象橋梁は橋長 5m 以上の橋梁 661 橋で、上、下部構造および高欄、防護柵や伸縮装置といった付属物も点検対象とした。橋梁の点検は支点付近については近接目視、支間部は遠望目視により実施した。自治体策定の点検要領にて点検実施後、過去の橋梁長寿命化計画の作成の際の点検結果に対する、経過観察および新たな劣化の発生と、損傷の有無を確認し、劣化原因を推定した。橋梁の健全度は表-2 の定義により各損傷の種類において、最も悪い損傷程度を代表損傷程度として健全度を算出し、国土交通省の規定の健全度評価に変換した。

ASR の判定は目視での点検であることを鑑み、上下部構造において ASR 特有のひび割れの有無および ASR ゲルの滲出状況を確認し、各部材が ASR による劣化を生じ

表-4 ASR 判定区分写真例

ASR判定区分	具体的な事例
非ASR	ASRの症状がなく、健全な場合
擬ASR	
認ASR	

ているか否かを表-3 に示す 3 段階で判定した。それらの判定時の具体例を表-4 に示す。

### 3. 調査結果および考察

#### 3.1 河川産砂利および安山岩砕石の岩石・鉱物学的試験

図-2 に庄川産砂利の岩種構成率を示す。石川県能登地方で多く用いられているアルカリシリカ反応性の高い安山岩の構成率は少なく、砂岩や花崗岩が高い構成率を示した。この岩種構成率は庄川産河川砂利の特徴である。

さらに、庄川産砂利を使用した構造物から採取したコアから研磨薄片を作成し、偏光顕微鏡観察（直交ニコル）を行った。この結果、写真-1 に示すとおり、変質している長石を含む安山岩が見られた。安山岩中の長石の変質はコンクリート中で生じたかどうかは不明であるが、変質した長石はスメクタイト化により、アルカリが溶出しやすくなる可能性が考えられた。

安山岩砕石の薄片試料を用いた偏光顕微鏡（単ニコル）による観察結果を写真-2 に示す。安山岩砕石 3 種は、いずれも安山岩のみから構成され、斑晶（斑点状の大きな鉱物）として主に斜長石、斜方輝石と単斜輝石を含む両輝石安山岩であった。石基（斑晶と粒間の細かな部分）は、安山岩 A、B、C のいずれとも主には斜長石、輝石（単斜輝石または斜方輝石）、クリストバライトの細かな結晶と、それらの粒間を埋める火山ガラスから構成されていた。安山岩 A は火山ガラスを非常に多く含み、安山岩 B はクリストバライトを比較的多く含んでいた。それに対して、安山岩 C は火山ガラスとクリストバライトのいずれも少量であった。安山岩 B は、安山岩 A、C と比較してシリカ分（SiO<sub>2</sub>）に富み、またガラスを多く含む安山岩 A（海岸付近）は生成時に急冷されたものであった。

一方、岩石の生成以降の現在にいたる期間に輝石の変質などにより生成したスメクタイト（粘土鉱物の一種）が、安山岩 C に多く含まれていた。骨材に含まれている

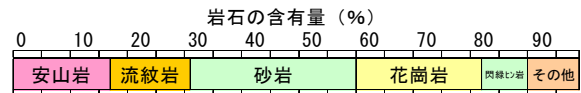


図-2 庄川産砂利の岩種構成率

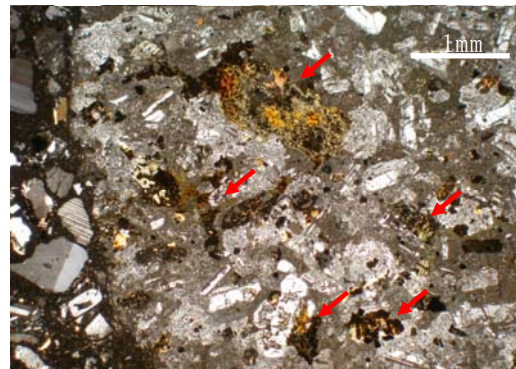
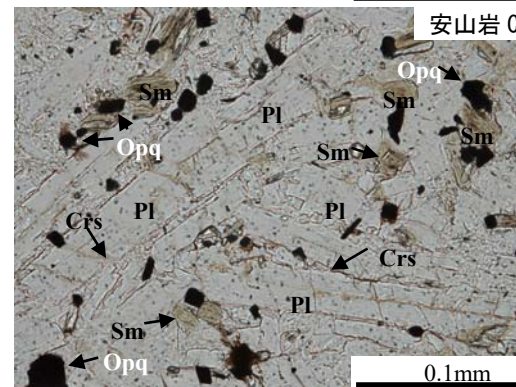
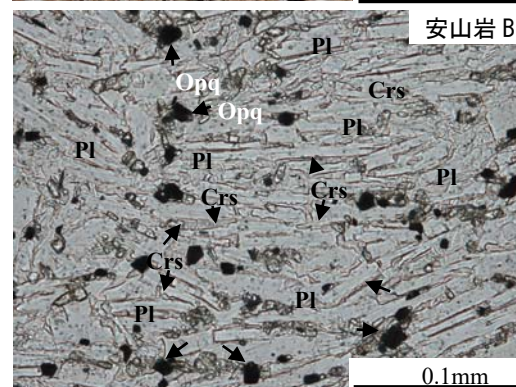
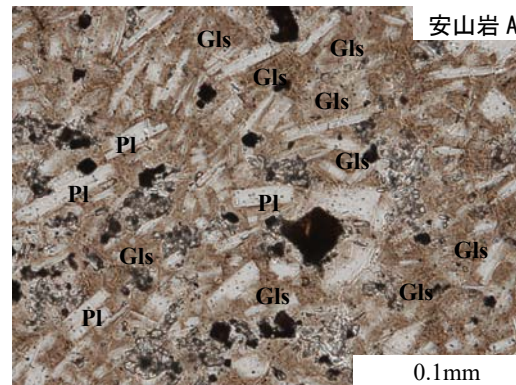


写真-1 庄川産砂利の偏光顕微鏡写真



Gls: 火山ガラス; Crs: クリストバライト; Pl: 斜長石; Px: 輝石; Sm: スメクタイト; Opq: 不透明鉱物

写真-2 安山岩砕石の偏光顕微鏡写真

スメクタイトなどの粘土鉱物はアルカリを吸着する特徴があるため、JIS A 1146によるモルタルバー法では、このスメクタイトなどの粘土鉱物の含有の影響により、骨材のASR反応性を適切に評価できないことが知られている<sup>8)</sup>。したがって、いずれの安山岩砕石も潜在的な反応性を有するが、安山岩Cの反応性は安山岩A、Bと比較して低いものと考えられた。

### 3.2 骨材のASR反応性試験結果

#### (1) 化学法

対象骨材の化学法(JIS A 1145)による判定結果を図-3に示す。試験結果より、現行のJIS A 1145の基準では庄川産砂利は「無害」と判定され、それら以外の骨材は「無害」もしくは「潜在的有害」であった。さらに、庄川産砂利以外の骨材はすべて溶解シリカ量Scが50mmol/lを上回っており、モルタルバー法にて有害と判定される可能性があることが指摘されている<sup>9)</sup>。

#### (2) 膨張量試験結果

JIS A 1146によるモルタルバー法の結果を図-4に示す。化学法にて「無害」もしくは「潜在的有害」であった安山岩AとCは「有害」と判断されたが、その膨張量は「有害」と判断される膨張量0.1%を僅かに超える値であり、91日以降はむしろ収縮傾向で、サンプルによっては無害と判断される可能性があった。また、溶解シリカ量Scが50mmol/lを下回っていた庄川産砂利はほとんど膨張しなかった。

一方、図-5に示すとおり、ASTM C1260による促進モルタルバー試験の結果では材齢14日時点で「有害」と判定される膨張率0.2%を安山岩AとBは大きく超え、安山岩Cも「有害」となり、庄川産砂利はこの試験においては「不明確」であった。これらより、各試験においてかなり結果に差が見られた。

図-6より庄川産砂利についてJIS A 1146による長期間のモルタルバー法により膨張量を計測した結果、反応性の有無を判断する6ヶ月での膨張量は0.1%未満となり、「無害」と判断されたのに対し、その後供用中の塩化物イオンの影響を模擬した、塩水養生によるケースでは養生1年後程度から激しい膨張を示した。これらより、塩化物イオンによりコンクリート中の水酸化カルシウムが遊離し、水酸化イオンが上昇し、アルカリが増加することにより、本地区の骨材においてASRを促進させている可能性があることが分かった。さらに40℃湿度95%での養生において通常供試体からのアルカリの溶出が予想されるが長期間にわたり膨張をしていることから、従来の報告<sup>8) 10)</sup>でもあり、骨材からのアルカリの溶出の影響などにより長期間にわたる膨張性が示唆された。

また、図-7より安山岩Aについては長期間にわたりJIS A 1146の養生を継続した結果、ほとんど膨張量の増

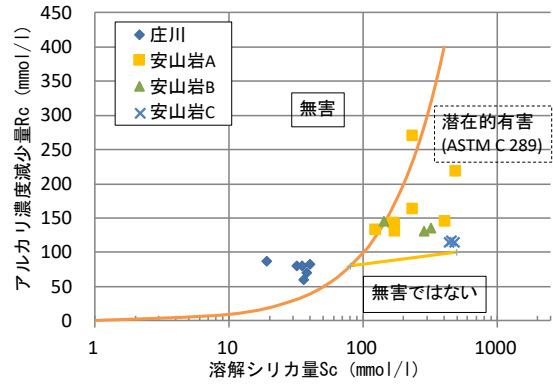


図-3 化学法 (JIS A 1145) による試験結果

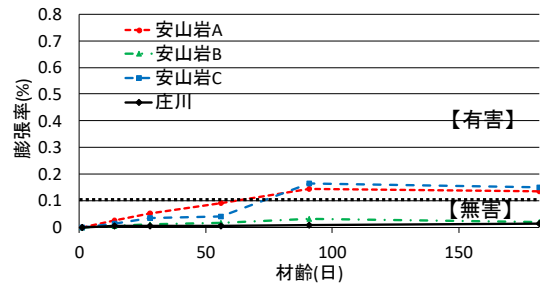


図-4 JIS A 1146によるモルタルバー試験結果

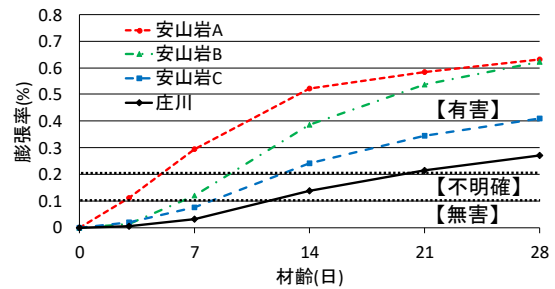


図-5 ASTM C1260による促進モルタルバー試験結果

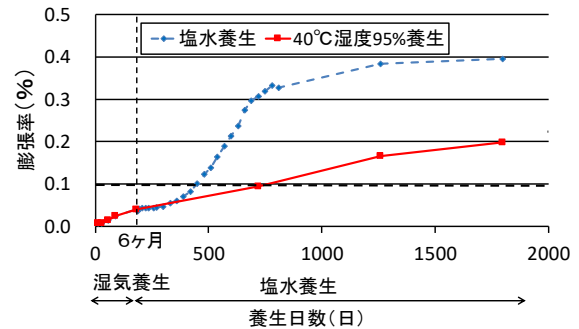


図-6 長期促進膨張試験結果 (JIS A 1146 : 庄川)

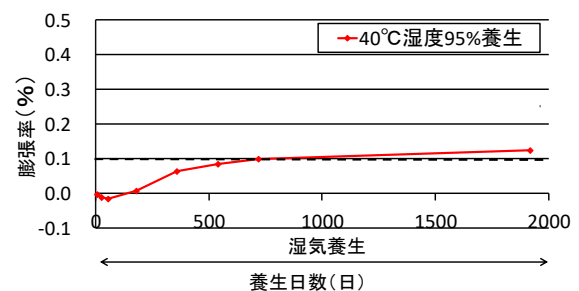


図-7 長期促進膨張試験結果 (JIS A 1146 : 安山岩 A)

加がなかった。既往の研究<sup>11)</sup>より図-3に示すとおり Sc 値に対する Rc 値が増大する傾向では、風化や変質によりスメクタイト化が進んでいると考えられ、これに伴い初期に混入したアルカリが粘土鉱物であるスメクタイトに吸着されることにより膨張量が少なく評価されたのではないかと推察された。

### 3.3 橋梁の調査および評価結果

図-8に地区別に各 ASR 判定橋梁数の割合を示す。安山岩 A が供給された輪島市門前地区の ASR、擬 ASR と判定された橋梁の割合は7割を超える73%であり、同じ輪島市の輪島地区の20%、町野地区の25%と比較し、ASR 発生率が3倍となっている。この理由として、輪島市門前地区には安山岩 A が供給されており、前述の写真-2に示すとおり、安山岩 A には多くの火山ガラスが含有しており、これらが溶解することにより ASR が発生しやすい状況にあると推察された。さらに、図-5に示す ASTM C 1260 による促進モルタルバー試験結果より、膨張率が「有害」と判定される材齢14日において0.2%の約3倍近い値となり、その後も膨張傾向にあることから、安山岩 A は高い ASR 反応性を有しており、このため、安山岩 A が供給された地区の橋梁の ASR 発生率が際立って高い結果になったものと推察された。

図-8に示す能登町は旧の町村ごとに異なる結果となった。安山岩 C の供給を受けていた旧能都町と旧柳田村の ASR 発生率はいずれも20%程度で同じ安山岩 C が供給された輪島市町野地区の ASR 発生率と差がなかった。

一方で同じ能登町旧内浦町の ASR 発生率は8%となっており、珠洲市の発生率と同じ割合であった。旧内浦町は平成の市町村合併により能登町になっているが、以前は珠洲郡に属しており、同町にレディーミクストコンクリート工場がなかったため、隣接の珠洲市からのコンクリートが使用されていた。このため、両市町とも庄川産砂利が供給されており、両市町の橋梁の ASR 発生率が少なかったものと考えられた。

図-9に地区別の国土交通省基準での橋梁健全度分布を示す。ASR 発生率の高い輪島市門前地区の橋梁の健全度は追跡調査が必要な健全度2と判定された橋梁が全体の約1/4を占めて他地区と比較し高い割合となった。また、それ以外の地区は健全度1の割合が8割前後になり、ASR 発生率の低い珠洲市もほぼ同じ傾向であった。この理由として、珠洲市は能登半島の先端に位置しており、海岸に隣接している道路が多く、塩害などの劣化要因が原因の1つと考えられた。

庄川産砂利を使用した橋梁において ASR と判定された橋梁の点検写真を写真-3に示す。本橋梁は2級河川を渡河している橋梁で昭和48年に供用している。橋台には ASR が原因と思われるひび割れが生じており、遊離石

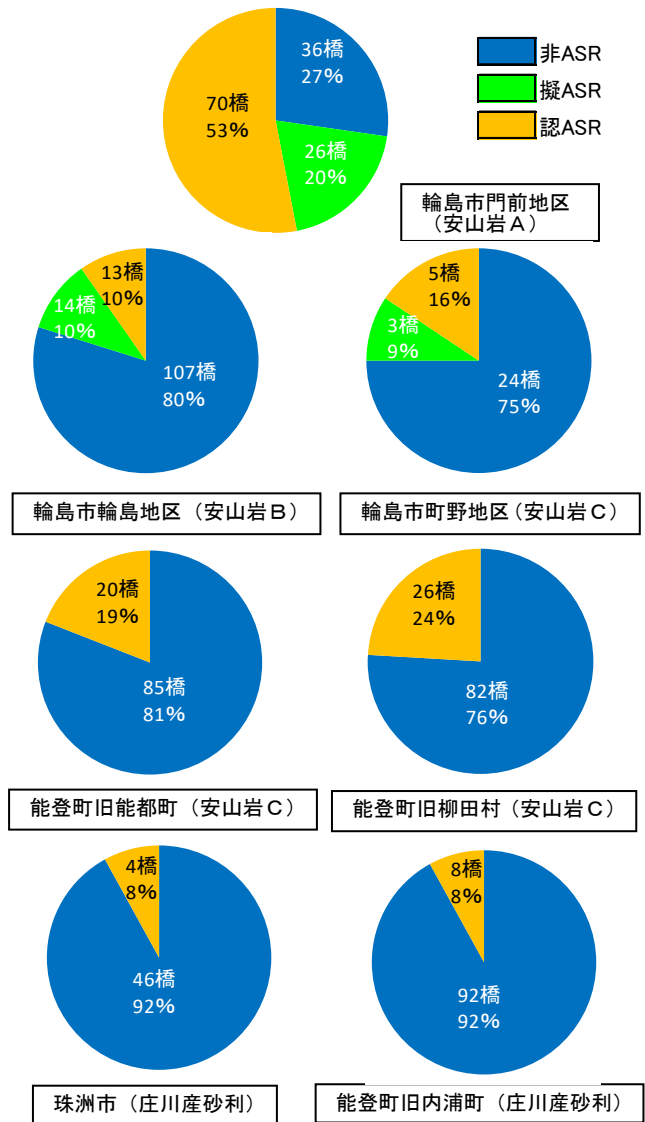


図-8 地区別 ASR 判定橋梁数と発生率

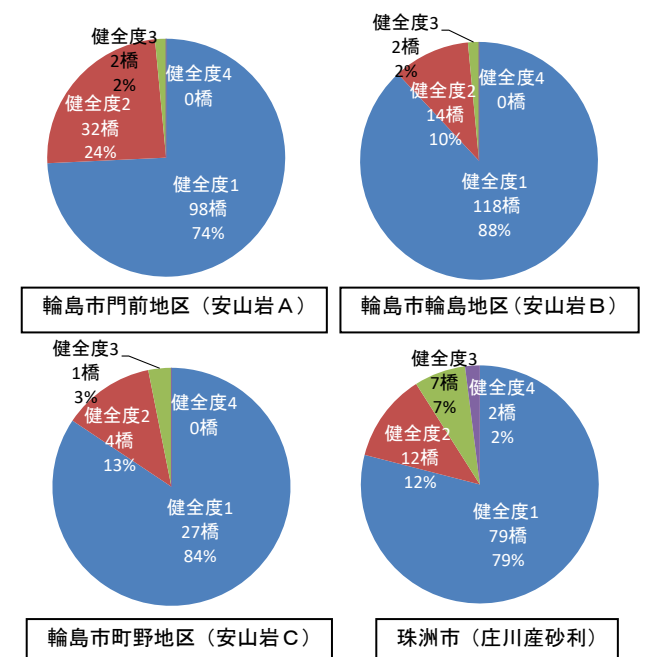


図-9 地区別橋梁健全度分布

灰が析出していた。現地調査の結果、当該橋梁は橋梁のキャンパーと取付け部分の縦断線形が橋梁に向かって下がっている理由で橋梁の伸縮装置部分が最も低くなっており、路面が滞水しやすい状況にあった。このため、写真のとおり晴れているにも関わらず伸縮装置からの漏水により橋台側面に水分が供給され、冬期には凍結防止剤の影響も合わさることにより、反応性が低い骨材でありながら、ASR が発生したものと推測され、図-6 に示す傾向とも整合する結果となった。また、ASR が発生している面が南東方向のため、日射の影響も ASR を促進させた一因と推察された。さらに、図-10 より国土交通省基準での健全度 2, 3 の橋梁が 3/4 を占める結果となり、ASR の発生が橋梁の健全度を下げている結果となった。

以上より、橋梁の ASR 発生率および健全度分布を調査した結果、供給された骨材とその地区における ASR 発生率とは高い相関があり、骨材の ASR の反応性が高い骨材を使用している地区は ASR 発生率が高いことがわかった。特に地方においては地理的な条件からレディーミクストコンクリート工場と供給される地区とは密接な関係があることから、台帳などが未整備で諸元や補修履歴が不明な橋梁を点検および診断を行う際に、コンクリートが供給されたプラントから使用されていた骨材を調査することが重要と考えられる。

#### 4. まとめ

本研究より得られた主な結果を次にまとめた。

(1) 新設構造物にてコンクリートに使用する粗骨材の選定にあたり、岩石・鉱物学的な調査として偏光顕微鏡により、骨材に含まれている鉱物を調査し、合わせて化学法やモルタルバー法などの ASR 反応性試験を併用して行うことで、骨材の ASR 反応性を適切に評価することができると考えられる。

(2) モルタルバー法では、スメクタイトなどの粘土鉱物の含有の影響により、骨材の ASR 反応性を適切に評価できない場合があると考えられる。このため、骨材 ASR 反応性を評価する場合、まず岩石学的評価および化学法を実施し、JIS A 1146 の試験法により適切な判定が得られないと推察された場合、アルカリ溶液浸漬法や飽和塩化ナトリウム溶液浸漬法などの試験法を併用し、総合的に評価することで骨材の ASR 反応性の適切な判定につながると考えられる。

(3) ASR の反応性の高い骨材を用いた地区の橋梁では、他地区と比較して、ASR の発生率が高く、橋梁の健全度分布も今後追跡調査を必要とする橋梁と判定される割合が高い結果となり、骨材の ASR 反応性と橋梁の ASR 発生率とは密接な相関があることが分かった。これらの調査結果を踏まえて、橋梁の調査診断と維持管理では建



写真-3 ASR 判定橋梁

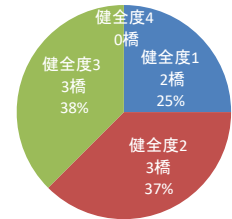


図-10 ASR 判定橋梁の健全度分布 (珠洲市)

設当時の地区の骨材使用事情を考慮し、まず使用材料を正確に把握することが非常に重要であることが分かった。

#### 謝辞

本研究にあたりご協力いただいた石川県輪島市建設部土木課、珠洲市建設課、能登町建設課に感謝いたします。

#### 参考文献

- 1) 国土交通省:アルカリ骨材反応抑制対策(土木構造物)実施要領, 2002
- 2) 鳥居和之, 野村昌弘, 南善導:北陸地方の川砂のアルカリシリカ反応性とアルカリ溶出性状, セメント・コンクリート論文集, No.60, pp.390-395, 2006
- 3) 広野真一, 山田一夫, 佐藤友美, 鳥居和之: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, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.1035-1040, 2016
- 4) 鳥居和之, 橋本徹:今, 何故, 北陸地方でフライアッシュコンクリートなのか, セメント・コンクリート, No.810, pp.18-23, 2014
- 5) 日本コンクリート工学会: ASR 診断の現状とあるべき姿研究委員会報告書, 2014
- 6) 国土交通省:北陸地方における ASR 劣化橋梁コンクリート構造物の維持管理マニュアル(案), 2005
- 7) 石川県 ASR 対策検討委員会資料, 2005
- 8) 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
- 9) 津田 誠, 麻田正弘, 参納千夏男, 鳥居和之:富山産河川砂利のアルカリシリカ反応性と外来塩分環境下での ASR 劣化構造物の特徴, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.2, pp.1363-1368, 2015
- 10) 野村昌弘, 浅江大輔, 加賀谷悦子, 鳥居和之:骨材のアルカリシリカ反応性とアルカリ溶出との関係, 土木学会第 60 回年次学術講演会, No.5-013, pp.25-26, 2005
- 11) 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