

論文 能登産安山岩砕石のアルカリシリカ反応性と ASR 劣化橋梁の分布状況

津田 誠^{*1}・澤 彩夏^{*2}・広野 真一^{*3}・鳥居 和之^{*4}

要旨: 石川県能登半島では安山岩が砕石として多く利用されてきた。一方、能登半島北部の橋梁においてアルカリシリカ反応による劣化が報告されている。本研究では、当該地域で使用されてきた、コンクリート用骨材の岩石・鉱物学的特徴とアルカリシリカ反応性を検討するとともに、橋梁の詳細点検結果より ASR 劣化橋梁の分布状況とその劣化度の特徴を調査した。その結果、3 箇所の採取場所ごとに安山岩砕石に含有される鉱物や反応性に違いがあり、それらと ASR 劣化橋梁の分布状況とに相関があることが分かった。さらに、ASR 発生橋梁を地区および建設年ごとに調査した結果、ASR の発生率とその劣化度に違いがあることが判明した。

キーワード: ASR, 安山岩砕石, 劣化橋梁分布, 反応性骨材, 火山ガラス, フライアッシュ

1. はじめに

石川県能登半島では安山岩が広く分布しており、砂利資源に乏しい、能登地方では安山岩などの火山岩類は重要な骨材資源である。その一方で、これら安山岩砕石を使用したコンクリート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、中新世の火山性岩石であり、穴水累層と呼ばれ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パライトなどを含み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/m³）を基本に据えているが¹⁾、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場合があることも指摘されている²⁾。

東日本大震災以降、原子力発電所の多くは運転停止となり、そのため、県内にある石炭火力発電所はフル稼働を続けている。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、石炭火力発電所より発生する、分級フライアッシュおよび地元の火山岩類を骨材として有効に利用し、かつ ASR による劣化のないコンクリートを構築することは極めて重要である。

一方で、県内では高度成長期に大量に構築された社会資本の劣化が顕在化してきており、橋梁においては全 2100 橋のうち、20 年後には建設から 50 年を経過する橋梁が約 61%にも達する。それに伴い、維持管理費も今後 100 年で 3200 億円と膨大な額になると予測され、現在県内の各自治体で行われている橋梁の長寿命修繕化計画では将来にわたって予算面で課題が残る状況である。

そこで、本研究では、橋梁の保守点検において、将来

にわたり持続可能な維持管理計画の立案を最終的な目的とし、当該地方の橋梁の劣化原因で深刻な ASR に着目し、能登半島北部の各地域で使用されてきた、コンクリート用骨材の岩石・鉱物学的特徴と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より ASR 劣化橋梁の分布状況とその劣化度の特徴を調査し、それらの関連性について検討した。

2. 調査概要

2.1 調査位置および使用骨材の岩石学的特徴

調査対象とした地域、橋梁および安山岩の分布状況と代表的な 3 箇所の砕石の産地を図-1 に示す。安山岩 A（門前）、B（石休場）、C（太田原）の 3 種とも北陸地方の能登半島北部でこれまで砕石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。いずれも、北陸地方に共通する第三紀中新世以降に生成した新鮮ないしやや変質した安山岩⁴⁾であり、前述の安山岩 3 種を使用した、レディーミクストコンクリート工場（以下、

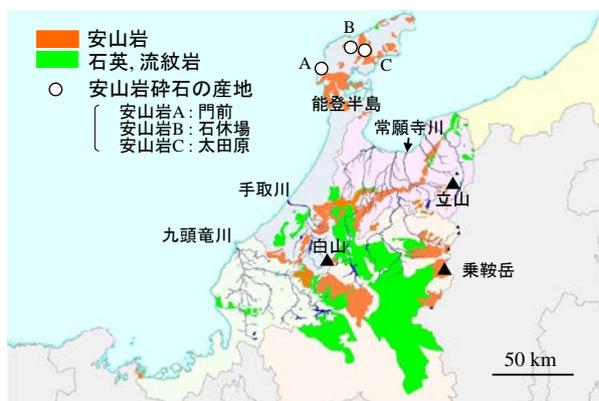


図-1 調査対象地域と安山岩砕石の産地³⁾

*1 金沢大学 自然科学研究科 環境科学専攻 (正会員)

*2 金沢大学 理工学域環境デザイン学類

*3 (株)太平洋コンサルタント (学生会員)

*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)

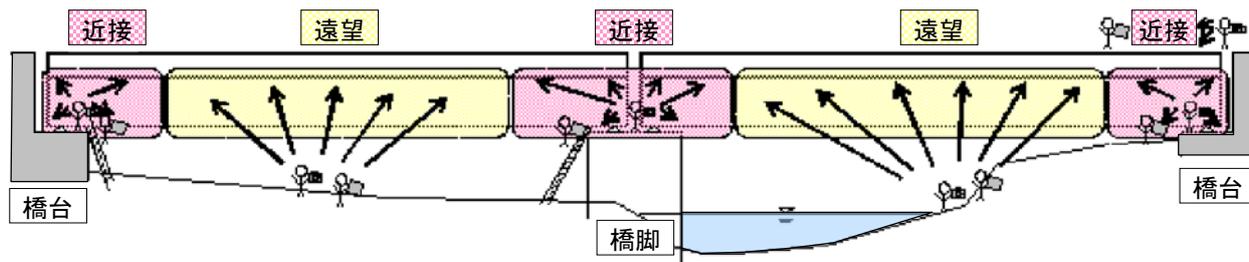


図-2 橋梁点検手法の概要図

生コン工場と記す) で出荷した、コンクリートを用いた橋梁について詳細点検を実施し、使用した安山岩ごとに地区別に分類し、ASR劣化の状況や健全度を調査した。

2.2 コンクリート用骨材の流通経路調査結果

能登地区では昭和 40 年代後半より、生コン工場によるコンクリートの製造が開始され、それと時期を同じくして、粗骨材は門前町刃地(安山岩 A)、輪島市石休場(安山岩 B)、能都町太田原(安山岩 C)の主に3箇所の安山岩砕石が主に使用されてきた。調査結果より、旧の行政区分ごとに、表-1 に示すとおり、能登地方北部では、それぞれ3箇所の骨材を使用した生コン工場が、概ね、同一地区にある橋梁にコンクリートを供給していることが判明した。

2.3 岩石の試験方法

(1) 安山岩砕石の岩石・鉱物学的試験

促進モルタルバー法 (ASTM C 1260) 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) 骨材の反応性と鉱物質混和材による ASR 抑制効果の検証試験

安山岩 3 種につき、ASTM C 1260 (温度 80℃, 1N の NaOH 溶液に浸漬) による促進膨張試験を行い、骨材としての潜在的な反応性、ならびに分級フライアッシュと高炉スラグ微粉末による ASR 抑制効果を検証した。

今回実施した促進膨張試験の概要は以下のとおりである。

安山岩 3 種のアルカリシリカ反応性と分級フライアッシュ (略号FA) あるいは高炉スラグ微粉末 (略号BFS) のASR抑制効果を確認する⁵⁾。FAは原料炭をオーストラリア産の 2~3 種のJIS灰製造が可能な原粉に選別し、サイクロンで分級化し、ブレン比表面積 4800cm²/g、ガラス質成分が 73.2%と多く、累積 50%粒径は 7.61μmであり 1種に近い2種灰である。FAあるいはBFSの置換率は、JIS A 5308 の混合セメントによるASR抑制効果の推奨値を参考に、普通ポルトランドセメント(OPC)の内割でそ

表-1 安山岩砕石と地区別流通との相関表

骨材名	骨材の産地	骨材の反応性	橋梁の地区
安山岩A	門前町刃地	大	門前地区
安山岩B	輪島市石休場	中	輪島地区
安山岩C	能都町太田原	小	町野地区

表-2 ASR 判定の区分表⁶⁾

ASR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を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

表-3 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 (鉄筋破断なし)	
認ASR (鉄筋破断あり)	

れぞれ 15%あるいは 42%（現在の高炉B種の平均的な置換率）の質量置換とした（略号 FA15%, BFS42%）。モルタルバーの作製は使用セメントのアルカリ量を調整せず、水：（セメント+FA, (BFS)）：骨材=0.47：1：2.25、モルタルバーの寸法は 25×25×285mm、打設後 24 時間で脱型し、80℃の水中養生をさらに 24 時間実施した。実施後の長さを基長とした。その後、80℃の 1NのNaOH溶液に浸漬し、以降を促進養生期間として、28 日間の長さの変化を計測した。ASTM C 1260 による骨材の反応性の評価は、促進養生期間 14 日間で 0.1%未満が「無害」、0.1%～0.2%が「不明確（有害と無害の両者が存在する）」、0.2%以上が「有害」であるとされた。

2.4 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 298 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。橋梁の点検は図-2 に示すように、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。

一方、健全度は点検結果の他に橋梁の構造、架設年度、立地条件等を考慮して判定した。ASR 劣化については目視での点検であることを鑑み、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 による劣化を生じているか否かを表-2 に示す 3 段階で判定した。さらに、点検後に補修工事を実施した橋梁にて、ASR が原因での鉄筋破断が確認された場合、「鉄筋破断あり」として、判定区分に追加した。それら判定例を表-3 に示す。

一方、橋梁建設時に使用した生コン工場を地区別に調べ、その工場で当時使用されていた、骨材の産地とその種類を年代別に調査した。橋梁の健全度および ASR 劣化度毎に橋梁の位置を地図にプロットし、骨材の産地とそれら産地別の ASR 反応性および損傷程度の分布状況を重ね合わせ、総合的に考察した。

3. 調査結果

3.1 安山岩碎石の岩石・鉱物学的試験

安山岩碎石の薄片資料を用いた偏光顕微鏡（単ニコール）による観察結果を写真-1 に示す。安山岩碎石 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

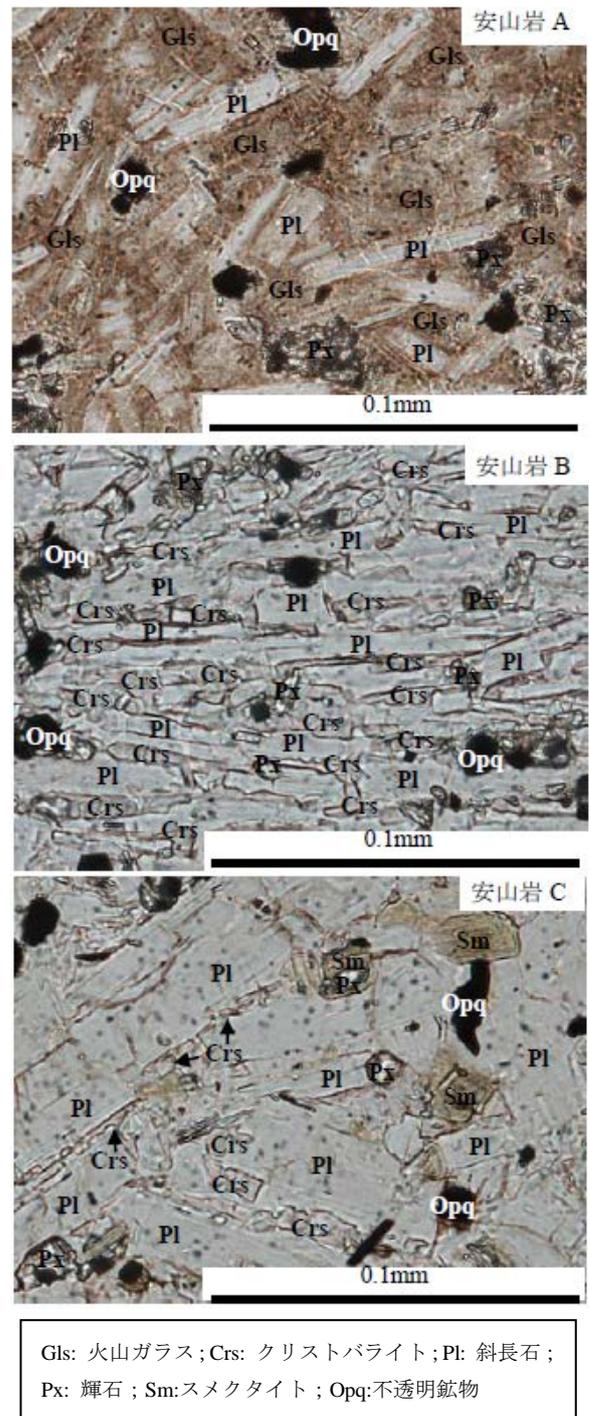


写真-1 安山岩碎石の薄片試料による偏光顕微鏡写真

されていた。

これらの構成鉱物の量比はそれぞれで異なり、ASR 反応性を有する鉱物について、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（SiO₂）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。スメクタイトはアルカリを吸着するので、JIS A 1146によるモルタルバー法では、このスメクタイト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⁷⁾。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 骨材の反応性と鉱物質混和材による ASR 抑制効果の検証試験

ASTM C 1260 による促進モルタルバー試験の結果を図-3に示す。OPC ではいずれの安山岩砕石も、促進養生期間14日で0.2%を超える有害な膨張を示した。また、安山岩砕石の種類による膨張率の大小では、安山岩Cが最も小さく、この結果は岩石・鉱物学的試験の観察結果とも一致していた。それに対して、FA15%ではいずれの安山岩砕石とも、判定基準となる促進養生期間14日間の膨張率は0.1%以下で「無害」の判定となった。

また、BFS42%では「無害」の判定は安山岩Cのみであったが、いずれの安山岩砕石も膨張が大きく低減し、同様なASR抑制効果が認められた。ただし、いずれの安山岩砕石とも、またFAまたはBFSの混和の有無に関わらず、促進期間14日の判定以降も膨張は継続していた。以上の結果より、ASTM C 1260 法はスメクタイトを含有する安山岩砕石のASRと、鉱物質混和材によるASR抑制効果を早期に判定することに、有効であることが示された。しかし、この判定結果は、あくまでも高濃度のアルカリ溶液が常時供給される厳しい条件下での判定結果であることに、注意することが必要である。また、ASTM C 1260での評価に適さない岩種（例えばチャート）があることにも注意する必要がある⁴⁾。

3.3 橋梁の調査結果

(1)健全度評価

図-4に橋梁を健全度別に色分けし、地区別に各健全度の数および橋梁位置を示す。橋梁の健全度は表-4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た。

これらを地図へのプロットを行った結果、旧行政地区同一の生コン工場ごとに健全度に大きな差があることが判明した。安山岩Aを多く供給している、門前地区では今後さらに追跡点検が必要な、健全度3より悪い橋梁の割合が、隣接地区である輪島地区の12%に対して、2倍以上の26%であることが分かった。記録する損傷が認められないとされている、健全度5の橋梁の割合は他地区がほぼ50%に対して、旧門前地区では22%と極端に少ない結果となった。

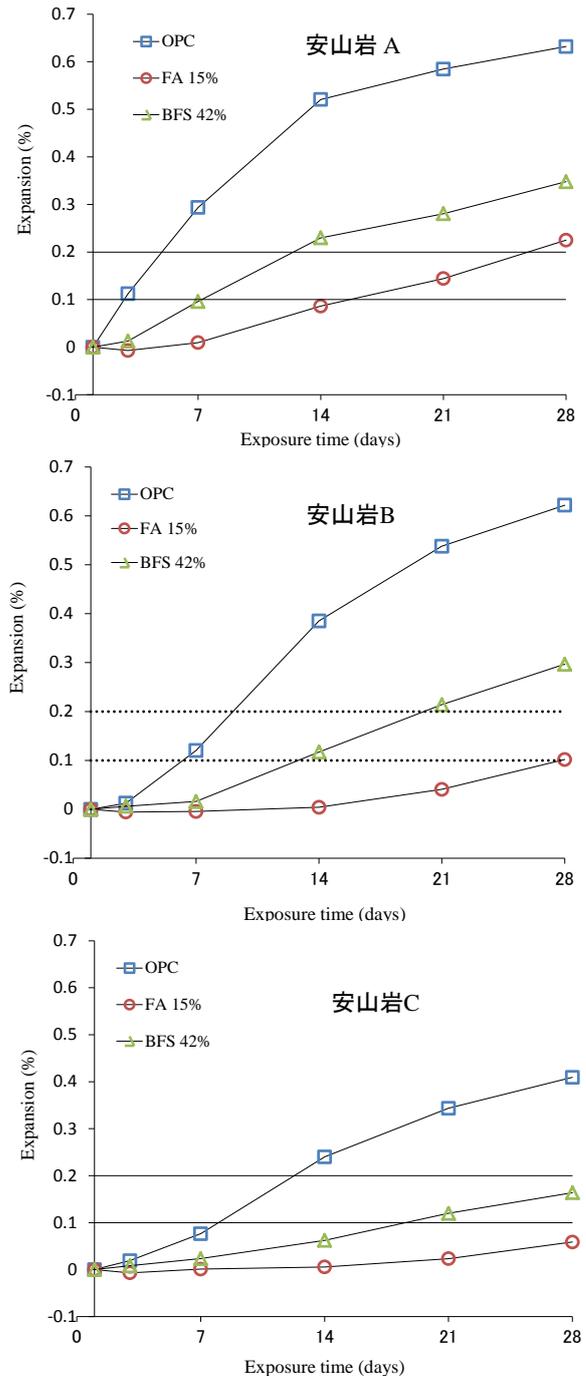


図-3 ASTM C 1260 による促進モルタルバー試験結果

(2) ASR 劣化度評価

図-5に橋梁のASR劣化度別に色分けし、地区別に各ASR判定橋梁数および橋梁位置を示す。門前地区にASR、擬ASRと判定された橋梁が多く分布していることが判明した。門前地区のASR発生率は地区にある約半分の橋梁の47%であり、他地区の約20%強と比較し突出している結果となった。一方、輪島地区ではASR劣化の橋梁の割合が他地区に比較し、少ない結果となった。

次に、橋梁が建設された年代に着目して調査を実施した。調査対象を全地区の橋梁とし、ASRおよび擬ASRと判定された橋梁の割合を図-6に示す。

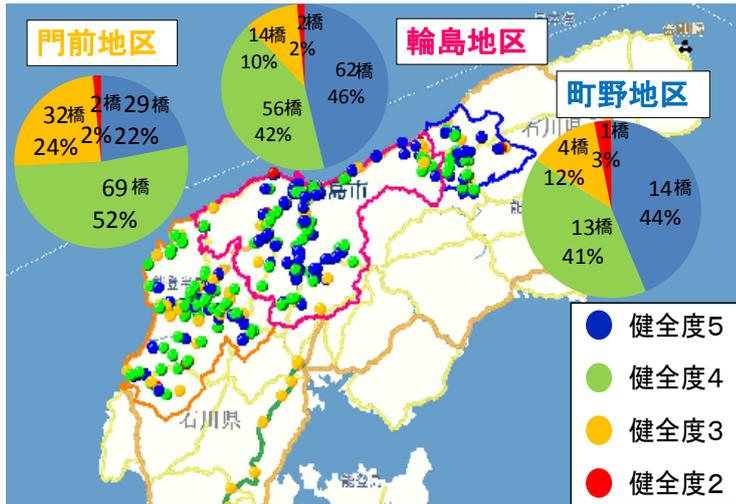


図-4 地区別橋梁健全度分布図

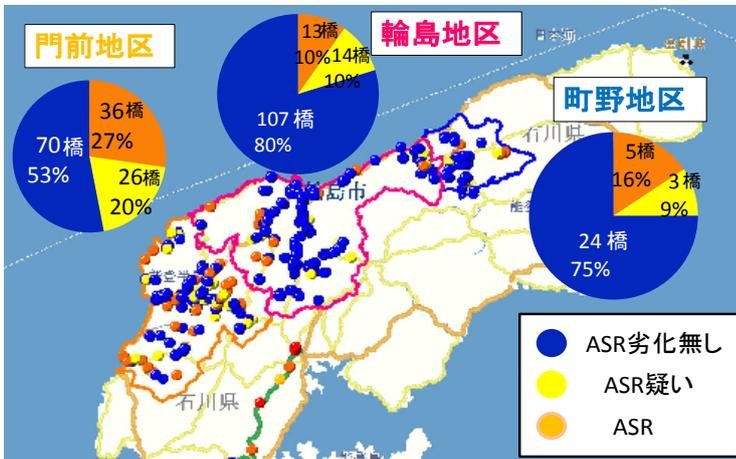


図-5 地区別 ASR 判定度別橋梁分布図

昭和 39 年以前に建設された橋梁において、51 橋中 ASR と判定された橋梁は 14 橋と ASR 発生率が 27%であった。一方、昭和 40 年代に建設された橋梁では、76 橋中 35 橋と ASR 発生率は 46%となり、さらに昭和 50 年代では供用してからの経過年数が短い状況でありながら、85 橋中 59 橋と約 7 割の橋梁で ASR が発生していた。

石川県能登地区では、昭和 40 年代半ばまで建設工事が少なく、その地区の中小河川の砂利や砂を洗浄したものをコンクリート用骨材として使用しており、前述した 3 箇所の安山岩砕石を用いたコンクリートの使用は昭和 40 年代後半からのため、これらが建設年代により ASR 発生率に差が生じた原因と考えられる。

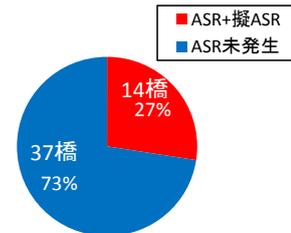
安山岩 A の使用が多い、門前地区には前述した 3 つの年代での全 ASR 発生橋梁 108 橋のうち 57%の 62 橋が集中していることが分かった。

図-7 に石川県の加賀地区と能登地区とをつなぐ高規格幹線道路（旧、能登有料道路）での橋梁の点検結果を示す。本道路は南北に長く、多くの自治体を經由している。前述の門前地区に隣接した区間では、同様に ASR が

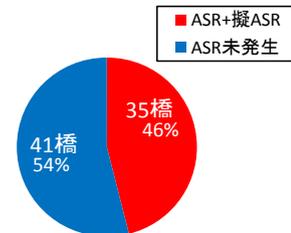
表-4 橋梁健全度判定表⁷⁾

健全度	損傷状況及び対応の概念
良 ↑ 5	点検の結果から記録する損傷は認められない。
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	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。
↓ 悪 1	損傷が著しく、交通安全確保の支障となる恐れがある。

建設年度：昭和 39 年以前



建設年度：昭和 40 年～49 年



建設年度：昭和 50 年～59 年

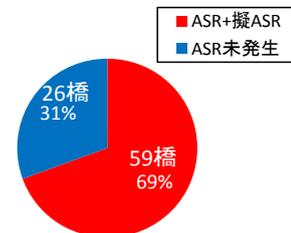


図-6 建設年代別 ASR 発生率図

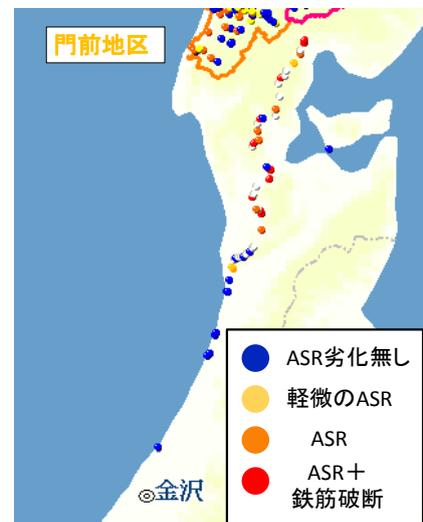


図-7 高規格幹線道路での ASR 判定度別橋梁図

発生している橋梁が多数あり、その橋梁の多くで安山岩 A を使用していたことが明らかになっている。それらの中には ASR 劣化に起因して、鉄筋破断やコンクリートの剥落などの深刻な ASR 劣化を生じている橋梁もあった。

4. 考察

安山岩砕石の岩石・鉱物学的試験結果において、安山岩 A は他地区の安山岩に対して ASR の反応性を有する火山ガラスを多く含み、ASTM C 1260 による促進モルタルバー試験の結果では、他安山岩砕石と比較し、OPC と、BFS42% の両者において、有害と判断される 0.2% を超える膨張率があり、安山岩 3 種類の中で最も ASR 反応性が高い砕石であることが分かった。また、火山ガラスを多く含有する安山岩 A はアルカリを溶出する性質があり、これが ASR が長期にわたり継続する一因になっていることも指摘されている⁸⁾。

一方、地区別の橋梁点検結果より、安山岩 A を使用したと考えられる地区に建設された橋梁において、ASR の発生率が際立って高いことが判明した。それに対して、安山岩 C の供給を多く受けた町野地区では ASR 劣化の橋梁が他地区に比較し少ない結果となり、岩石・鉱物学的試験でのスメクタイト含有でのアルカリ吸着の影響や、促進モルタルバー試験での膨張率の結果とも整合した。

以上より、骨材のアルカリシリカ反応性と実橋梁での ASR の発生率とその劣化度には密接な相関があることが分かり、今後、橋梁を調査および診断するうえで、まず使用されている骨材を把握することや、建設時にそれらコンクリートに使用した材料および配合のデータを記録することが重要であると考えられた。

また、ASR 抑制効果の検証試験において、安山岩 A は高炉スラグを混入したケースにおいても有害と判断される結果となり、さらに、いずれの安山岩砕石においても、促進期間 14 日の判定以降も膨張は継続していた。このため、骨材によっては ASR の反応が長期にわたり持続すると予測され、今後、フライアッシュセメントの地域的な活用（標準・汎用化）など、独自のルールを作成することが、この地域の ASR の発生のリスクを下げることできる 1 つと考えられた。

5. まとめ

地方自治体における橋梁の保守点検において、将来にわたり持続可能な維持管理計画の立案を最終的な目的として、能登産安山岩砕石反応性と ASR 劣化橋梁の分布状況について調査および試験を実施した。

本研究より得られた主な結果を次にまとめた。

(1) 能登半島の代表的な産地での安山岩砕石はいずれも、アルカリシリカ反応性を有することが岩石・鉱物学

的試験により確かめられた。

(2) 安山岩の種類により、高炉スラグ微粉末にて置換した場合においても、ASTM C 1260 による促進モルタルバー試験において「有害」となったが、その場合でもフライアッシュを用いた供試体では「無害」と判定された。

(3) 反応性の高い安山岩を用いた地区の橋梁では他地区と比較し、橋梁の損傷度が進んでおり、さらに、ASR の発生率が際立って高い結果となり、骨材のアルカリシリカ反応性と橋梁の ASR 劣化度とは密接な相関があることが分かった。

(4) スメクタイトを多く含有し、ASTM C 1260 による促進モルタルバー試験においても、反応性の低い安山岩砕石を用いた地区の橋梁では、橋梁の ASR 発生率とその劣化度とも低い結果となった。

(5) ASR 劣化橋梁が建設された時期と生コン工場の稼働時期とがほぼ一致した。その原因として、生コン工場稼働にともない、骨材の調達を今までの中小規模の河川からの砂利から、安山岩砕石に切り替えたためと考えられた。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設当時の地区の事情を考慮し、まず使用材料を把握することが非常に重要であることが分かった。

謝辞：本研究の実施にあたり、ご協力いただいた石川県輪島市建設部土木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) 大代武志：河川産骨材のアルカリシリカ反応性と ASR 劣化橋梁の維持管理に関する研究，金沢大学学位請求論文(2009)
- 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，第 62 巻，第 8 号，pp.498-503，2013
- 5) T. Hashimoto and K. Torii, “The Development of Highly Durable Concrete Using Classified Fine Fly Ash in Hokuriku District”, Journal of Advanced Concrete Technology, vol.11, pp.312-321(2013)
- 6) 石川県 ASR 対策検討委員会
- 7) 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
- 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