

論文 新潟県におけるコアによる ASR 促進膨張試験と実構造物での ASR 劣化状況との対応関係に関する研究

広野 真一*1・安藤 陽子*2・津田 誠*3・鳥居 和之*4

要旨：北陸3県（富山，石川，福井）と同様に，新潟県でも河川産骨材による ASR が多数発生していることが報告されている。本研究では，新潟県内にて道路橋の橋台からコアを採取し，コアによる ASR 促進膨張試験の結果と使用骨材の岩種および反応性，さらに構造物の ASR 発生状況との対応関係を検討した。その結果，新潟県での ASR は急速膨張性の火山岩類に発生していたが，アルカリ溶液浸漬法は遅延膨張性の岩石の ASR をも促進し，リスクを過大に評価していた。それに対して，飽和 NaCl 溶液浸漬法は急速膨張性の火山岩類の ASR のみを促進しており，実構造物の ASR 発生状況との対応より，より適切な試験法であると判断された。

キーワード：アルカリシリカ反応，新潟県，コアによる ASR 促進膨張試験，岩石学的試験，偏光顕微鏡

1. はじめに

北陸地方では，橋梁やトンネル，ダム，擁壁などの各種コンクリート構造物にアルカリシリカ反応（以下，ASR と略す）が発生しているが，とくに富山，石川，福井の北陸3県においては，これらの ASR はオパールまたはクリストバライト，トリディマイトの鉱物を含み，反応性が非常に高い火山岩類を含む急速膨張性骨材により引き起こされていることが，長年の研究により明らかにされてきた。一方，新潟県に関しては，上記の北陸3県と同様に河川産骨材が使用されてきたが，河川水系ごとの骨材の岩石・鉱物学的調査がこれまで実施されておらず，新潟県内の地域毎の ASR 発生状況と構造物の ASR 劣化度の関係が不明であった。しかし，新潟県も北陸3県と同様に地質学的にはグリーンタフ地域であり，現在の火山帯の一部でもある。したがって，同様な反応性骨材が新潟県にも分布する。近年，実際に著者らによる新潟県での ASR 劣化構造物の調査により，新潟市や長岡市の周辺では阿賀野川産の骨材，上越市や糸魚川市の周辺では濁川や姫川産の骨材による ASR 劣化構造物が多数確認されており，北陸3県と同様に河川産骨材に混入した火山岩類（安山岩や流紋岩など）が主要な反応性の岩種であることが判明している¹⁾。コアによる ASR 促進膨張試験としては，JCI DD2 法（湿気槽養生）の他に，いわゆるカナダ法（1N の NaOH 溶液浸漬法）やデンマーク法（飽和 NaCl 溶液浸漬法）が提案されている²⁾。しかし，実構造物の ASR 発生状況や劣化度との関係を詳細に調べたものは非常に少ないのが実状である。そこで本研究では，新潟県内にて道路橋の橋台からコアを採取して，コアによる ASR 促進膨張試験の結果と使用骨材の岩種および ASR 反応性，さらに構造物の ASR 発

生状況との関係を詳細に検討した。

2. 新潟県の骨材供給状況と本調査試料

新潟県での ASR は，各種道路や鉄道，電力施設などの構造物での発生が確認されている。本調査では新潟県内に位置する道路橋（5 橋梁）について，それぞれの橋台から，コンクリートコア試料（直径 55mm，長さ 150mm 程度）を採取（湿式）し，コアによる各種試験を実施した（採取：2011 年）。コア試料を採取した橋梁の位置図を図-1 に示す。また，橋梁に関するデータと採取されたコアの圧縮強度試験結果を表-1 に示す。図-1 には，使用骨材の河川水系や産地を考慮した新潟県の区分りも併記してある。すなわち，A 橋と B 橋が位置する柏崎～新潟地域では阿賀野川産と信濃川産の骨材が多く流通しているが，工事記録では A 橋には荒川産も使用された。前二者は急速膨張性の新期火山岩類と遅延膨張性のチャートなどを含み，一般に ASR のリスクが高い。一方，荒川の流域には花崗岩や砂岩などが広く分布するため，骨材の反応性は低いと考えられる。C 橋と D 橋が位置する柏崎～糸魚川地域では，妙高市の濁川付近で採取される山砂利と山砂が多く流通している。この山砂利，山砂を構成する礫層は急速膨張性の安山岩や遅延膨張性のチャートなどの礫で構成されることが報告³⁾されており，ASR のリスクは高い。工事記録では C 橋，D 橋ともに，当該地域の山砂利と山砂が使用された。E 橋が位置する新潟以北地域では，荒川産，胎内川産，阿賀野川産骨材が主に流通しているが，工事記録によると阿賀野川産と荒川産が使用された。実際の構造物の ASR 劣化度は，A 橋で「中程度」，B 橋で「軽微」，C 橋・D 橋・E 橋は「ほぼ健全」とそれぞれ評価されていた。

*1 (株) 太平洋コンサルタント 解析技術部 博(工) (正会員)

*2 金沢大学 理工研究域 環境デザイン工学専攻 (正会員)

*3 石川工業高等専門学校 環境都市工学科 准教授 博(工) (正会員)

*4 金沢大学 理工研究域 環境デザイン学系 教授 工博 (フェロー会員)

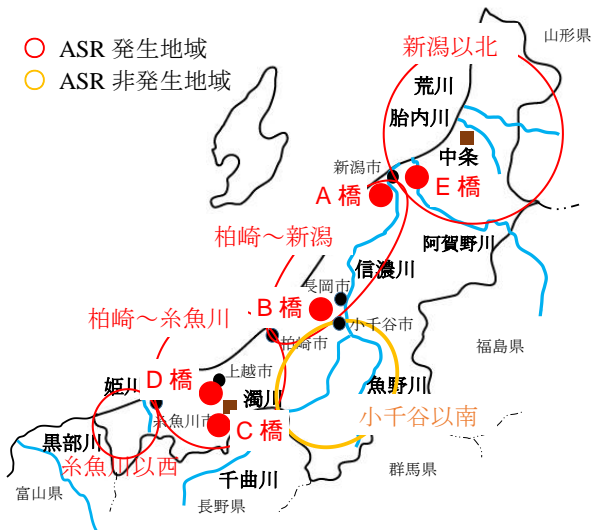


図-1 コア試料を採取（2011年）した橋梁の位置図¹⁾

表-1 構造物および使用骨材に関する ASR 調査データ

試料	供用年	粗骨材	細骨材	ASR 劣化度
A 橋	1978.9	阿賀野川	信濃川・荒川混合	2 (41.4)
B 橋	1982.3	信濃川	信濃川	1 (30.0)
C 橋	1997.10	下濁川（山砂利）	下濁川（山砂）	0 (23.3)
D 橋	1999.10	上越市（山砂利）	上越市（山砂）	0 (28.3)
E 橋	1994.7	阿賀野川	荒川	0 (43.3)

※ ASR 劣化度（下段（）内は採取したコアの圧縮強度試験結果 N/mm²）

- 0：ひび割れなし。
- 1：隅角部などにひび割れがごく一部発生。
- 2：ひび割れが構造物の約 1/3 以上の面積で発生。
- 3：ひび割れが広範囲に多数発生し、段差やずれも認められる。

3. 調査方法

3.1 採取試料の岩石学的評価

(1) 骨材の岩種の評価

コア試料を切断し、その切断面に表れた粗骨材の種類や岩種を観察した。粗骨材の岩種構成は、切断面における各岩種の面積割合として、ポイントカウンティングにより求めた。さらに、コンクリートより、厚さ 20 μ m 程度の薄片試料を作成した。これを偏光顕微鏡下で観察し、細骨材を構成する岩石や構成鉱物などを特定した。また、偏光顕微鏡下でのポイントカウンティングにより、その構成割合を求めた。

(2) ASR の進行状況の評価

コンクリートより、厚さ 20 μ m 程度のコンクリート薄片試料を作成した。これについて偏光顕微鏡下で、ASR の発生および進行状況を含むコンクリート組織の観察を行った。ASR の進行状況は Katayama ら⁴⁾に従って分類

した。偏光顕微鏡下で観察される ASR は、1（反応リムの形成）から 2（骨材粒子内に ASR ゲルが充填した膨張ひび割れ形成）、3（膨張ひび割れのセメントペーストへの進展）、4（膨張ひび割れの密集化と、セメントペーストの気泡へのひび割れを經由した頻繁な ASR ゲル浸入）、の順序で進行し、これが構造物の外観目視による ASR 劣化状況と対応することが知られている。

(3) 水溶性アルカリ量の分析

水溶性アルカリ量の測定については、「建設省総合技術開発プロジェクト コンクリートの耐久性向上技術の開発報告書<第二編> 3.3 コンクリート中の水溶性アルカリ金属元素の分析方法（案）」に準拠した。分析位置は凍結防止剤の影響を考慮し、コアの深部（深さ 150mm 程度）を使用した。

3.2 採取したコアによる ASR 促進膨張試験

採取したコアは乾燥を避けて保管し、すみやかに ASR 促進膨張試験に供した。

(1) アルカリ溶液浸漬法による ASR 評価

「アルカリ溶液に浸漬したコア試料のアルカリシリカ反応による膨張率の測定方法（案）⁵⁾」に従い、促進膨張試験（アルカリ溶液浸漬法）を行った。さらに、促進膨張試験終了後の試験体より、厚さ 20 μ m 程度の薄片試料を作製した。また、薄片試料を偏光顕微鏡下で観察し、ASR の発生・進行状況を含むコンクリート組織を、同様に、Katayama ら⁴⁾に従って評価した。

(2) 飽和 NaCl 溶液浸漬法による ASR 評価

「飽和 NaCl 溶液に浸漬したコア試料のアルカリシリカ反応による膨張率の測定方法（案）⁵⁾」に従い、促進膨張試験（飽和 NaCl 溶液浸漬法）を行った。さらに、促進膨張試験終了後の試験体より、厚さ 20 μ m 程度の薄片試料を作製した。また、薄片試料を偏光顕微鏡下で観察し、ASR の発生・進行状況を含むコンクリート組織を、同様に、Katayama ら⁴⁾に従って評価した。

4. 調査結果と考察

4.1 採取試料の岩石学的評価

(1) 骨材の岩種の評価

コアにおける粗骨材と細骨材の岩種構成率を試料ごとに、図-2 に示す。A 橋は工事記録によると、粗骨材に阿賀野川産川砂利を使用しているが、観察結果は安山岩や新期の流紋岩を多く含み、工事記録と整合する。これらの岩石は反応性の非常に高いクリストバライトやトリディマイト、オパールを含み、「反応性は高い（急速膨張性）」と考えられた。また、古期の流紋岩やチャート、珪質頁岩、ホルンフェルスに代表される隠微晶質石英を含有し遅延膨張性を示す岩石も多く含む。細骨材は花崗岩やそれを起源とする結晶片を主とし、「反応性は低い」

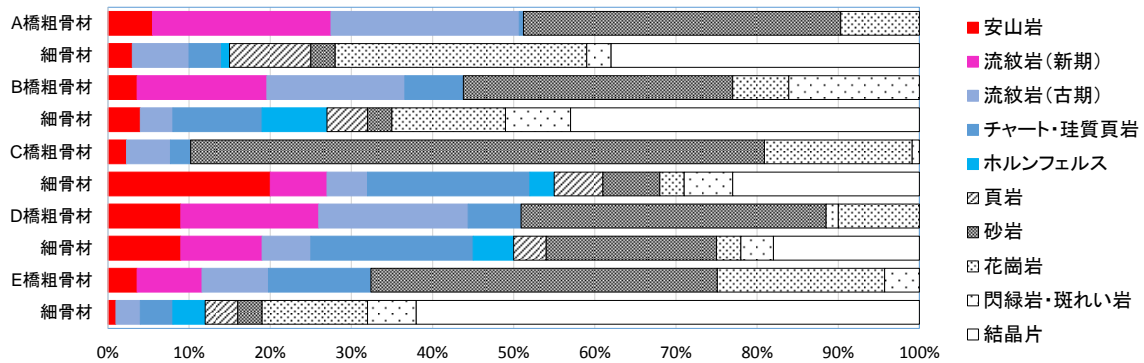


図-2 コアにおける粗骨材と細骨材の岩種構成率

と考えられた。工事記録では細骨材は信濃川と荒川の混合砂であり、荒川産川砂の影響が大きいと考えられた。

B橋は工事記録では粗骨材、細骨材ともに同じ採取地の信濃川産川砂利・川砂を使用しているが、観察結果において、粗骨材には急速膨張性の安山岩、新期流紋岩、また遅延膨張性の古期流紋岩、チャート、珪質頁岩などを比較的多く含んでいた。一方、細骨材では花崗岩や閃緑岩、それらを起源とする結晶片が相対的に多く、「反応性は低い」と考えられた。粗骨材と細骨材の岩種構成の相違は、砂礫が川床を運搬された母岩からの距離と、粒径に相関があるためと考えられる。

C橋の工事記録では粗骨材、細骨材ともに濁川地区の山砂利・山砂が使用されていた。観察結果においては、粗骨材は砂岩を主とし、想定された岩種構成とは異なっていた。一方、細骨材は、急速膨張性の安山岩や遅延膨張性のチャートなどを比較的多く含んでいた。

D橋の工事記録では、粗骨材には濁川付近で採取された山砂利が使用された。観察結果では急速膨張性の安山岩や流紋岩を比較的多く含んでいた。細骨材の工事記録は、いずれも濁川付近の山砂2種の混合であり、観察結果も急速膨張性の安山岩や流紋岩、遅延膨張性のチャートなどの粒子を比較的多く含んでいた。

E橋の粗骨材は工事記録によると阿賀野川産であった。観察結果では、安山岩、流紋岩、チャートなどの反応性の岩石を比較的少量ではあるが含んでいた。細骨材には工事記録によると荒川産川砂が使用されており、観察結果も花崗岩とそれを起源とする結晶片を主とする「反応性の低い」と考えられる砂であり、整合した。

(2) ASR の進行状況の評価

試料を採取した構造物の ASR 劣化度と、ASR が認められた岩石に関して、その進行状況の観察結果を表-2 に示す。構造物の ASR 劣化度と ASR の発生・進行状況の観察結果とは概ね一致していた。また、コンクリートに膨張を発生させると考えられる進行状況3または2以上の ASR は、主に急速膨張性を示す流紋岩または安山岩に発生していた。なお、セメントペースト中にフライ

アッシュや高炉スラグ微粉末などは認められず、使用セメントは普通ポルトランドセメントであった。

表-2 構造物の ASR の発生・進行状況

試料	構造物劣化度	急速膨張性岩石	遅延膨張性岩石
A 橋	2	流紋岩(3), 安山岩(3)	チャート(2)
B 橋	1	流紋岩(2), 安山岩(2)	ホルンフェルス(1)
C 橋	0	流紋岩(1)	
D 橋	0	流紋岩(1)	チャート(1)
E 橋	0	流紋岩(1)	

(3) 水溶性アルカリ量の分析

等価アルカリ量 (Na₂Oeq.) の分析結果を表-3 に示す。数値は、総プロ法によるアルカリの回収率補正を行ったものである。コンクリートの単位容積質量は 2250 kg/m³ と仮定している。

アルカリ総量の推定値は、劣化の認められた A 橋と B 橋が、劣化のない C 橋、D 橋、E 橋よりも、やや高くなっていた。しかし、いずれも総量規制値 3.0kg/m³ 以下であった。北陸地方の河川産骨材では、組成ペシマムの影響によりこのような比較的少ないアルカリ量でも ASR が実際に発生していることに注意が必要であった⁹⁾。また、ASR の劣化程度とアルカリ量の大小とは必ずしも対応していなかった。

表-3 水溶性アルカリ量 (Na₂Oeq.) の分析結果

試料	A 橋	B 橋	C 橋	D 橋	E 橋
アルカリ量 (kg/m ³)	1.97	2.31	1.73	1.76	1.53

4.2 採取したコアによる ASR 促進膨張試験

(1) アルカリ溶液浸漬法による ASR 評価

アルカリ溶液浸漬法 (カナダ法) の試験結果を図-3 に示す。Katayama らは、北陸地方の ASR 劣化構造物から採取したコアは試験日数 21 日で 0.10%以上の膨張を示すことを明らかにした⁷⁾が、この基準を適用すると、

本結果においても ASR 劣化を生じていた A 橋と B 橋で有害な膨張を生じた。一方、D 橋と E 橋も、試験日数を 28 日に延長した場合は有害な膨張に達した。

試験日数 28 日を終了後の試験体より作成した薄片試料を偏光顕微鏡下で観察した結果として、ASR が認められた岩石に関して、その促進状況の観察結果を表-4

に示す。ここでは、促進膨張試験前後での比較として示してある。いずれの試料でも、急速膨張性の岩石（新期流紋岩と安山岩）と遅延膨張性の岩石（チャートまたは頁岩、古期流紋岩）の両方で ASR が促進されているのが確認された。一例を写真-1 に示す。

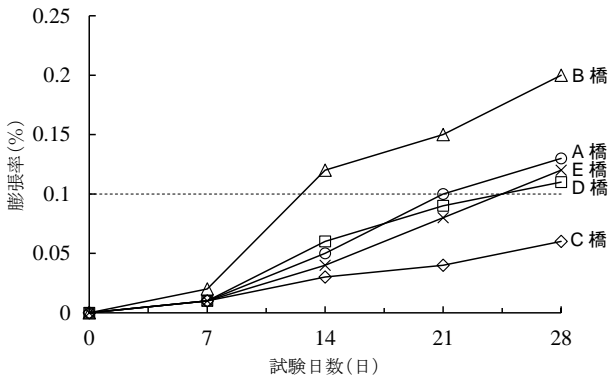


図-3 アルカリ溶液浸漬法の試験結果

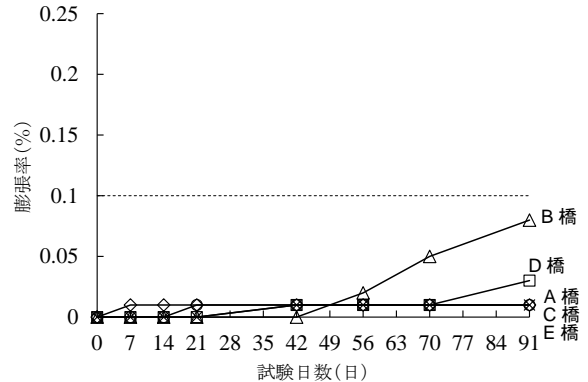


図-4 飽和 NaCl 溶液浸漬法の試験結果

表-4 ASR の促進状況（アルカリ溶液浸漬法）

試料	急速膨張性岩石	遅延膨張性岩石
A 橋	流紋岩(3→3)*, 安山岩(3→3)*	チャート(2→2), 頁岩(→1)
B 橋	流紋岩(2→3), 安山岩(2→3)	ホルンフェルス(1→1), チャート(→3), 頁岩(→3)
C 橋	流紋岩(1→2), 安山岩(→2)	チャート(→2)
D 橋	流紋岩(1→2), 安山岩(→2)	チャート(1→2),
E 橋	流紋岩(1→3), 安山岩(→3)	古期流紋岩(→3)

※ ひび割れ幅が拡大

表-5 ASR の促進状況（飽和 NaCl 溶液浸漬法）

試料	急速膨張性岩石	遅延膨張性岩石
A 橋	流紋岩(3→3), 安山岩(3→3)	チャート(2→2)
B 橋	流紋岩(2→3), 安山岩(2→3)	ホルンフェルス(1→1), チャート(→1)
C 橋	流紋岩(1→1)	
D 橋	流紋岩(1→2), 安山岩(→2)	チャート(1→2)
E 橋	流紋岩(1→1), 安山岩(→2)	

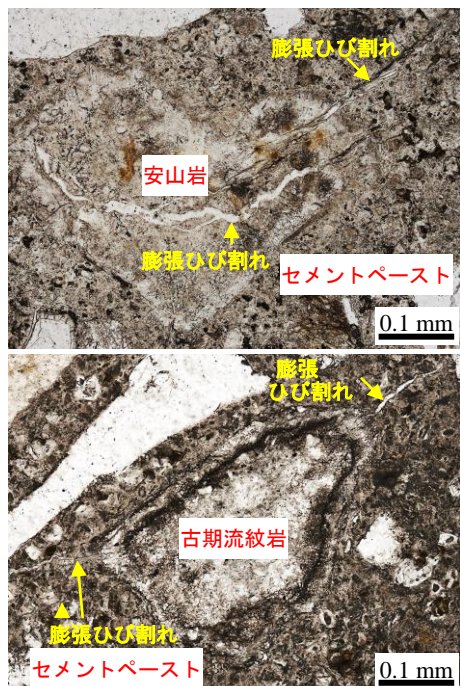


写真-1 アルカリ溶液浸漬法による ASR の促進状況 (上: A 橋・安山岩 下: E 橋・古期流紋岩)

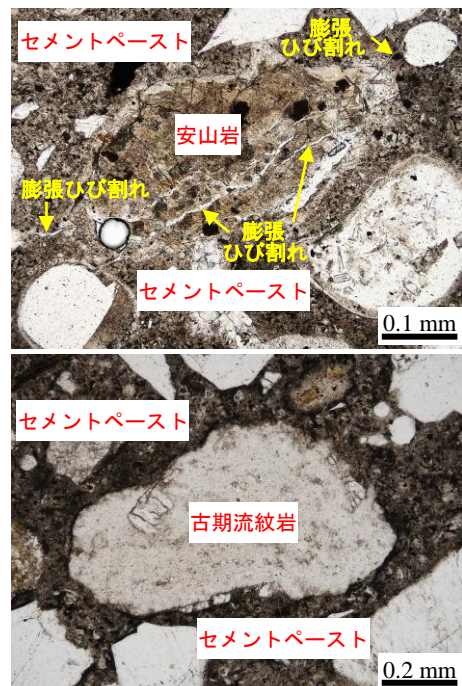


写真-2 飽和 NaCl 溶液浸漬法による ASR の促進状況 (上: B 橋・安山岩 下: E 橋・古期流紋岩)

(2) 飽和 NaCl 溶液浸漬法による ASR 評価

飽和 NaCl 溶液浸漬法（デンマーク法）の試験結果を図-4 に示す。試験日数 91 日の膨張率 0.1% を判定基準と考えた²⁾場合、有害な膨張を示した試料はなかったが、軽微な ASR 劣化の認められていた B 橋のみが、判定基準に近い比較的大きな膨張を示した。

試験日数 91 日を終了後の試験体より作成した薄片試料を偏光顕微鏡下で観察した結果として、ASR が認められた岩石に関して、その促進状況の観察結果を表-5 に示す。ここでは、促進膨張試験前後での比較として示してある。急速膨張性の岩石では、A 橋と C 橋を除き、ASR が促進されたことが確認された。B 橋の安山岩の ASR 促進状況を写真-2 の上写真に一例として示す。一方、遅延膨張性の岩石では、一部でのチャートを除き、促進されなかった。E 橋の古期流紋岩の ASR 促進状況を写真-2 の下写真に一例として示す。

4.3 試験結果の解釈と新潟県産骨材の ASR 反応性評価

コアによる試験の結果を整理し、表-6 に示す。

(1) 骨材の ASR 反応性

今回の試料では骨材の産地として、阿賀野川、荒川、信濃川の河床、ならびに濁川付近の砂礫層が工事記録に残されていた。これらの河川の流域に分布する岩石ならびに砂礫層の礫種と観察された骨材の構成は概ね一致しており、地質のデータから河川産骨材ならびに山砂利（砂）の反応性を予測することの妥当性が確認できた。

また、阿賀野川産、信濃川産骨材（川砂利・川砂）や濁川付近で採取される砂礫層（山砂利・山砂）には非常に反応性の高い火山岩類が含まれる場合があった。

(2) ASR 劣化の発生原因

いずれの試料とも同様に、粗骨材または細骨材に反応性の非常に高い岩種を含んでいた。水溶性アルカリ量は、いずれも総量規制値の 3.0 kg/m³ 未満であったにもかかわらず、供用期間の長い A 橋と B 橋では ASR 劣化が発生していた。非常に反応性の高い骨材では、総量規制値以下のアルカリ量で ASR が実際に発生する場合があることは既に確認されている⁶⁾。劣化の生じた A 橋と B 橋の比較では、アルカリ量は B 橋のほうが高いが、劣

化度は A 橋のほうが高くなっている。さらに、ASR 劣化の認められない C 橋、D 橋のアルカリ量も、A 橋と特に大きな差異はない。これには水分供給や日射などの他の要因も検討する必要はあるが、最も年月を経た A 橋で ASR 劣化が大きく進行したためと考えられる。したがって、ASR 劣化度の差異は主に供用期間の差によるものであり、さらには凍結防止剤などの浸透に伴い、アルカリが付加される可能性も考慮すると、同様な反応性骨材を含む C 橋、D 橋、E 橋で、今後は ASR 劣化が顕在化する可能性は十分にある。

なお、ASR 劣化を生じた A 橋と B 橋、構造物の ASR 劣化が現在では認められない C 橋、D 橋、E 橋とも、ASR は急速膨張性の火山岩類に主に発生していた。これは、富山、石川、福井の北陸 3 県と同様であった。

(3) コアによる促進膨張試験結果の解釈

促進膨張試験結果の解釈については、議論となることが多くある。今回の試験では、アルカリ溶液浸漬法での判定基準を 21 日で 0.1% とした場合に、構造物の ASR 劣化とコアによる判定がほぼ一致した。これは従来の北陸地方での事例における結果の解釈⁷⁾とも同様である。一方、試験日数を 28 日に延長すると、C 橋を除く全てが 0.1% を超える膨張を示した。試験終了後の試験体の観察結果では、反応性の非常に高い（急速膨張性）粒子と比較的低い（遅延膨張性）粒子のいずれとも ASR が促進されており、骨材の潜在的な反応性を厳密に検出していると考えられるが、北陸地方の実環境での ASR 劣化は、急速膨張性の火山岩類によりもたらされている⁷⁾ことを考慮すると、ASR のリスクを過大に評価している可能性があった。なお、C 橋の促進膨張率が小さかった原因は、粒径が大きく膨張力が大きい骨材粒子の反応性が低いこととの関連も疑われるが、明らかでない。

飽和 NaCl 溶液浸漬法の判定基準を 91 日で 0.1% とすると、全ての試料で有害な膨張は発生しなかった。判定基準値に近く、最も大きな膨張（0.08%）を示したのは、軽微な ASR 劣化が認められていた B 橋であり、これに対し、劣化の進行していた A 橋は、ほとんど膨張を示さなかった。川端ほか⁸⁾から類推すると、飽和 NaCl 溶液

表-6 コアによる試験（実施：2011 年）の結果

試料 (供用年)	ASR 劣化度	水溶性アルカリ量 Na ₂ Oeq. kg/m ³	ASR 反応性		促進膨張率 (%)	
			粗骨材	細骨材	アルカリ溶液浸漬法 21 日 / 28 日	飽和 NaCl 溶液浸漬法
A 橋 (1978.9)	中程度	1.97	急速+遅延	低い	0.10 / 0.13	0.01
B 橋 (1982.3)	軽微	2.31	急速+遅延	遅延~低い	0.15 / 0.20	0.08
C 橋 (1997.10)	—	1.73	低い	急速+遅延	0.04 / 0.06	0.01
D 橋 (1999.10)	—	1.76	急速+遅延	急速+遅延	0.09 / 0.11	0.03
E 橋 (1994.7)	—	1.53	急速+遅延 ~低い	低い	0.08 / 0.12	0.01

浸漬法では遅延膨張性の粒子の ASR は促進されず、実際に今回の観察結果でも ASR が促進されていたのは、一部のチャートを除き、促進膨張試験前から既に ASR が進行していたのと同じく急速膨張性の粒子のみであった。したがって、北陸地方で適用する促進膨張試験としては、実環境での ASR 劣化と ASR が促進される岩種が一致する飽和 NaCl 溶液浸漬法のほうが現実的であると考えられる。飽和 NaCl 溶液浸漬法を北陸地方で用いる利点については、このことのほかコア径や骨材最大寸法の影響が小さいことも含め、野村ほか⁹⁾も指摘している。なお、A 橋が膨張しなかった原因として、一定の条件下での急速膨張性の粒子の反応は既に収束していた可能性があった。一方、粗骨材または細骨材に急速膨張性の粒子を含む C 橋、D 橋、E 橋でも今後の ASR のリスクは高いと考えるが、有意な膨張率としては表れなかった。この原因は不明である。しかし、この場合でも、ASR の進行状況の評価において、「3 (膨張ひび割れのセメントペーストへの進展)」以上の状況が新たに加わらない場合の膨張は小さく、その対応は確認された。

5. まとめ

新潟県内の 5 橋梁から採取したコア試料に対して ASR 促進膨張試験を実施し、促進膨張試験前後での骨材中の各種岩石の反応状況を詳細に調べた結果、以下に示すことが明らかになった。

- (1) 工事記録に残された骨材産地 (河川) 流域の地質から予測される岩種の構成と実際の構成は概ね一致し、河川産骨材の反応性を予測することの妥当性が確認できた。阿賀野川産、信濃川産などには非常に反応性の高い火山岩類が含まれる場合もあった。
- (2) ASR 劣化が発生していた A 橋と B 橋、ASR 劣化が現在は認められない C 橋、D 橋、E 橋ともに、実環境での ASR は急速膨張性の火山岩類に発生していた。
- (3) アルカリ溶液浸漬法では、急速膨張性と遅延膨張性の両者の粒子に ASR が促進されており、骨材の潜在的な反応性を厳密に検出していた。しかし、北陸地方の実際の ASR 被害は急速膨張性の火山岩類により発生していることを考慮すると、ASR のリスクを過大に評価していると判断された。
- (4) 飽和 NaCl 溶液浸漬法により ASR が促進されたのは、促進膨張試験前に既に ASR が進行していたのと同様に、急速膨張性の火山岩類であった。したがって、北陸地方で適用する促進膨張試験としては、飽和 NaCl 溶液浸漬法がより適切であると判断された。

謝辞

本研究は、内閣府・科学技術振興機構による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・マネジメント技術における「コンクリート橋の早期劣化機構の解明と材料・構造性能評価に基づくトータルマネジメントシステムの開発」(研究責任者：鳥居和之)により実施しました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 広野真一, 野村昌弘, 安藤陽子, 鳥居和之: 新潟県産骨材のアルカリシリカ反応性と試験法の適合性, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.907-912, 2017.7
- 2) 鳥居和之, 野村昌弘: コンクリートコアによる ASR 残存膨張性の評価, セメント・コンクリート, No.715, 2006.9
- 3) 柳澤幸夫ほか: 飯山地域の地質. 地域地質報告書 (5 万分の 1 地質図幅), 地質調査所, 2001
- 4) Katayama, T. et al.: Late-Expansive ASR due to Imported Sand and Local Aggregates in Okinawa Island, Southwestern Japan, Proceedings of the 13th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete (ICAAAR), Trondheim, Norway, pp.862-873, Jun. 2008
- 5) 「ASR 診断の現状とあるべき姿研究委員会」報告書: 日本コンクリート工学会, pp.316-323, 2014.7
- 6) 尾花祥隆, 鳥居和之: プレストレストコンクリート・プレキャストコンクリート部材における ASR 劣化の事例検証, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.1065-1070, 2008.7
- 7) Katayama, T., Tagami, M., Sarai, Y., Izumi, S. and Hira, T.: Alkali-aggregate reaction under the influence of deicing salts in the Hokuriku district, Japan, Materials Characterization, Vol.53, nos.2-4, pp.105-122, 2004.
- 8) 川端雄一郎, 山田一夫, 松下博通: 岩石学的分析に基づいた安山岩の ASR 反応性評価および膨張挙動解析, 土木学会論文集 E, Vol.63, No.4, pp.689-703, 2007.12
- 9) 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