

論文 福井県の骨材のアルカリシリカ反応性と ASR 劣化橋梁に関する調査

丑屋 智志*1・出口 一也*2・野村 昌弘*3・鳥居 和之*4

要旨: 本研究では、福井県の九頭竜川流域のアルカリシリカ反応 (ASR) が発生した 5 橋梁からコアを採取し、コンクリートに使用された骨材の岩石・鉱物学的特徴やコアの力学的性質や残存膨張性を調べた。また、それらの橋梁の調査結果を整理して、福井県の ASR 劣化橋梁の実態を明らかにするとともに、それらの橋梁の対策における基本的な考え方を提示した。

キーワード: 福井県, ASR, 反応性骨材, 岩石・鉱物学的調査, 橋梁の長寿命化修繕計画策定

1. はじめに

北陸地方では、白山や立山などの火山帯を起源とする岩体 (グリーンタフ) から火山岩系の岩石 (安山岩, 流紋岩) が河川産骨材に混入しており、幅広い地域で ASR により劣化したコンクリート構造物が存在している¹⁾。これまで、石川県および富山県の両県については、著者らにより詳細な ASR 調査が実施されており、反応性骨材の岩石・鉱物学的特徴と ASR 劣化橋梁の地域的な分布が明らかにされている^{2), 3)}。一方、両県以外では、ASR に関する本格的な調査が実施されていなかったが、近年、福井県の橋梁の長寿命化計画策定の作業の中で、県職員の目視調査の結果に基づく、ASR 劣化橋梁の地域的な分布図が作成されている。それによると、福井県の ASR 劣化橋梁の多くは、九頭竜川の流域に分布しており、石川県や岐阜県と繋がる国道 157 号や国道 158 号の山間部の橋梁の一部に深刻な ASR による劣化が発生していると報告されている。また、福井県の「橋梁長寿命化修繕計画策定委員会 (委員長: 鳥居和之)」では、ASR 劣化橋梁に使用した骨材のアルカリシリカ反応性 (岩石・鉱物学的特徴, 骨材の ASR 試験結果) やコアの力学的性質 (圧縮強度や弾性係数, 残存膨張性など)、ASR 劣化橋梁の実態を把握するための ASR 対策 WG を組織し、国道 305 号の塩害対策 WG と併せて、福井県全体の橋梁の維持管理と補修・補強の総合的な対策を策定することとしている。

そこで本研究では、ASR 劣化橋梁が分布している九頭竜川流域より、代表的な 5 橋梁を選別し、橋梁の目視観察とコア採取を実施することにより、使用骨材の岩石・鉱物学的特徴やコアの力学的性質 (圧縮強度や弾性係数, 残存膨張性など) を調べた。さらに、ASR 劣化橋梁の調査結果より、それらの橋梁の維持管理計画を提案した。

2. 調査概要

2.1 橋梁の位置と目視点検による ASR 判定

福井県の ASR 劣化橋梁の地域的な分布と調査 5 橋梁の位置を図-1 に示す。また、調査 5 橋梁の使用・環境条件と目視点検による判定結果を表-1 に示す。

調査 5 橋梁は、いずれも ASR 抑制対策 (昭和 61 年) 以前に建設されたものであり、建設後に 30 年から 50 年が経過している。A 橋 (上流域 (山間部), 写真-1 (1) 参照) は、ASR による劣化は軽微であるが、凍害によるひび割れやスケーリングの発生が顕著に認められた。とくに、鋼桁の RC 床版はポットホールが多数発生し、ポットホール付近はコンクリートの泥寧化が観察された。また、粗骨材には最大寸法が 40mm 程度のものが使用されていた。A 橋の橋台からは、凍害が発生している箇所と比較的健全な箇所の 2 か所からコアを採取した。

B 橋 (上流域 (平野部), 写真-1 (2), (3), (4) 参照) は、橋脚の PC 梁部と橋台で 2mm から 3mm のひび割れが発生し、はつり調査の結果、せん断補強筋の破断が確認された。また、フーチングにもひび割れが多数発

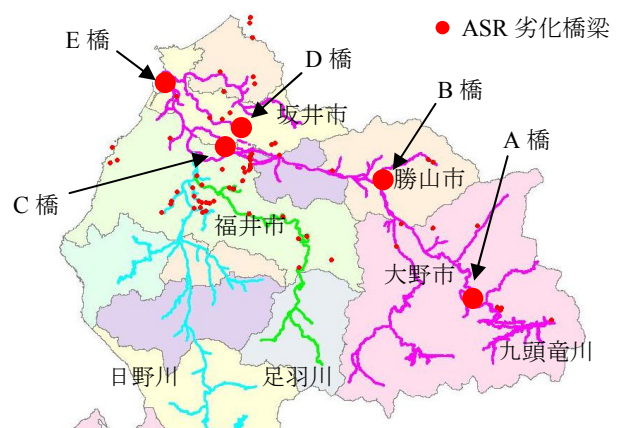


図-1 九頭竜川流域における ASR 劣化橋梁の分布状況

*1 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)

*2 福井県 土木部道路保全課道路維持補修グループ主事 (正会員)

*3 中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋(株) 金沢支店 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 (正会員)

表-1 九頭竜川流域の調査対象橋梁の概要

橋梁名	竣工年	流域	部位	設計基準強度	ASR 劣化度 (目視)	使用・環境条件
A (鋼橋)	1967	上流域 (山間部)	橋台	21N/mm ²	不明	九頭竜湖の付近にあり、凍害によるひび割れやスケーリングが顕著である
B (PC 橋)	1980	上流域 (平野部)	橋脚 (PC 梁部)	30N/mm ²	4	日射、降雨の影響を受ける部分とそうでない部分とで劣化状況が相違する
			橋脚 (RC 柱部)	24N/mm ²	2	
			フーチング	21N/mm ²	3	
C (鋼橋)	1955	中流域 (平野部)	橋台	21N/mm ²	3	九頭竜川に架かる3径間の、大きな橋梁である
D (鋼橋)	1972	中流域 (山間部)	橋台		2	平野部の山間に位置する
E (鋼橋)	1981	下流域 (平野部)	橋台		2	海岸から約3kmの地点にあり、潮風の影響を若干受ける

劣化度 (目視)

- 1 : ASR のひび割れが発生していないもの
- 2 : 構造物の隅角部などに ASR のひび割れがごく一部発生しているもの
- 3 : ASR のひび割れが構造物の約 1/3 以上の面積で発生しているもの
- 4 : ASR の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もの



(1) 高欄 (A 橋) のスケーリング



(2) PC 梁部 (B 橋) のひび割れ状況



(3) PC 梁部 (B 橋) の鉄筋破断状況



(4) フーチング (B 橋) の健全な鉄筋



(5) 橋脚 (C 橋) のひび割れ状況



(6) RC 梁部 (D 橋) のひび割れ状況

写真-1 調査対象橋梁の外観観察の結果

生しており、はつり調査を実施したが、鉄筋破断は確認されなかった。これは、橋脚の PC 梁部とフーチングの設計基準強度がそれぞれ 30N/mm² および 21N/mm² であり、部位によりセメント量が大きく相違したことが原因と考えられた。PC 梁部からは、日射の影響を受けている

箇所と影響を受けない箇所の 2 カ所からコアを採取した。なお、上部工 (ポステン T 桁) のフランジにも方向性のあるひび割れが ASR により発生していた。

C 橋 (中流域 (平野部)、写真-1 (5)) は、九頭竜川に架かる橋脚と橋台に ASR によるひび割れが発生して

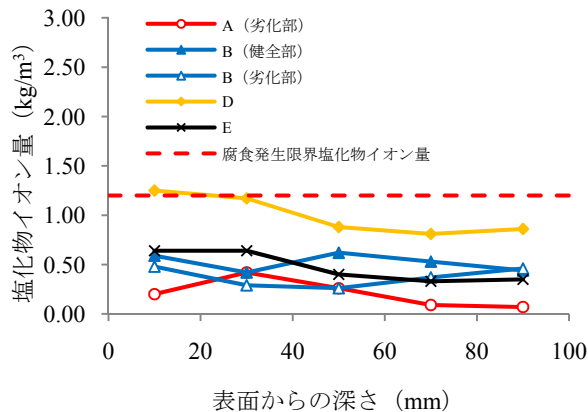


図-2 塩化物イオン量の測定結果

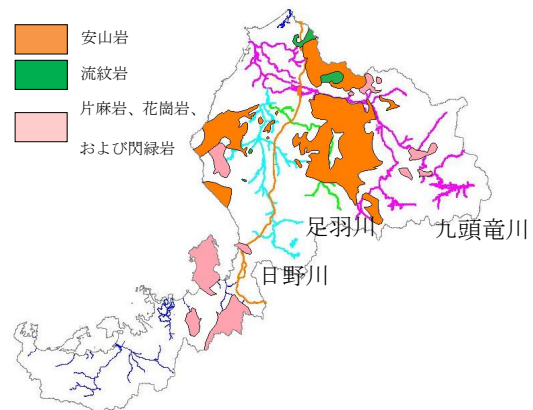


図-3 福井県の岩体分布図

いた。また、本橋梁では、コンクリート躯体に表面被覆が部分的に実施されていたが、表面被覆部は再劣化が認められた。

さらに、D橋（中流域（山間部）、写真-1（6））とE橋（下流域（平野部））は、橋脚や橋台にASRによるひび割れが発生していたが、ひび割れ幅はいずれも0.5mm以下と軽微なものであった。全体として、九頭竜川の流域では、上流域から中流域、下流部になるにつれて、目視観察による橋梁のASR劣化度の判定は軽微なものに推移することが確認できた。

調査5橋梁の中で、A、B、C、Dの4橋梁では凍結防止剤（塩化ナトリウム）が散布され、E橋梁（海岸付近）では飛来塩分の影響が若干考えられた。このため、橋台からのコアにより中性化深さと塩分量を測定した。この結果、中性化深さは最大でも5mm程度であり、図-2に示すように、鋼材位置（60～80mm）での塩分量も0.3～0.6kg/m³と比較的少なかった。同様に、一部の橋梁のはつり点検の結果でも鋼材腐食はA橋のRC床版や橋台以

外のもは軽微であった。

2.2 試験項目

九頭竜川流域に位置する5つの橋梁からコア（コア径φ=55mmまたは100mm）を採取した。コアの採取に当たっては、ASRの発生状況を観察し、構造物全体の劣化状況を把握できる、代表的な箇所を選定した。コア径φ=55mmのものは、岩種構成率、圧縮強度、弾性係数、超音波パルス速度、偏光顕微鏡観察のための薄片研磨試料（厚さ20μm）などに使用した。また、コア径φ=100mmのものは、鉄筋位置まで採取し、鉄筋の腐食状況を観察するとともに、中性化深さの測定（1%のフェノールフタレイン・エタノール水溶液の噴霧）および塩化物イオン量の測定（2Nの硝酸溶解）を実施した。試験項目とその詳細を表-2に示す。

3. 骨材の岩石学的特徴とアルカリシリカ反応性

5橋梁が建設された、昭和50年当時における福井県の骨材の流通状況は、榎場⁴⁾により調べられており、その

表-2 コアによるASR判定のための各種試験方法の概要

試験項目	試験方法	
粗骨材の岩種構成率	コンクリートコア（カナダ法用φ=55mm, L=150mm）に存在する粒子径が5mm以上の粒子に対し、岩種ごとの面積を算出し、その構成率を算出した。	
圧縮強度試験および静弾性係数	コアより試験体（φ=55mm, L=110mm）を切り出し、圧縮強度および静弾性係数（JIS A 1108）を測定した。	
超音波パルス伝播速度	圧縮強度試験前のコアを使用し、伝播時間から速度を算出した。	
偏光顕微鏡によるコアの薄片の観察	コンクリート断片（25×35mm程度）の研磨薄片試料（厚さ：20μm）を作製し、偏光顕微鏡により骨材の反応環およびASRゲルの生成状況を観察した。	
残存膨張性試験	カナダ法	コンクリートコア（φ=55mm, L=150mm）を温度80℃、1NのNaOH溶液に浸漬し、膨張率の経時変化を測定した。
	デンマーク法	コンクリートコア（φ=55mm, L=150mm）を温度50℃、飽和NaCl溶液に浸漬し、膨張率の経時変化を測定した。
中性化深さ	フェノールフタレイン水溶液を噴霧し、中性化深さを測定した。	
塩化物イオン量	硝酸銀滴定法（2Nの硝酸溶解）にて塩化物イオン量を測定した。	

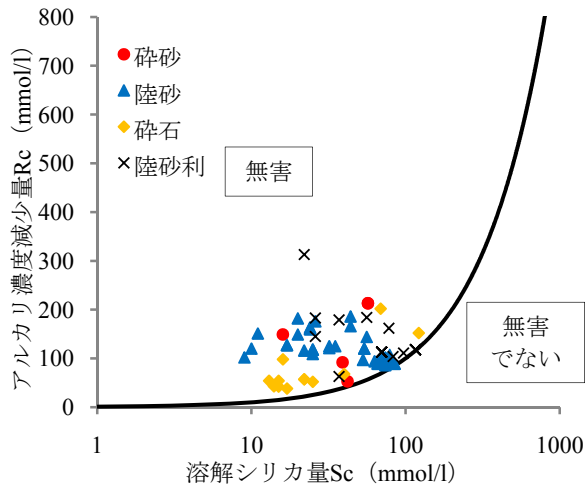


図-4 骨材の化学法 (JIS A1145) の結果

当時、粗骨材は主に九頭竜川流域の川砂利や陸砂利と一部の地域での山砕石が、細骨材は九頭竜川流域や三国の川砂や陸砂、山砂などが使用されていたと報告されている。本年度に実施した、生コン会社への聞き取り調査でもそれぞれの地域での骨材が活用されており、この30年間に骨材の使用状況が大きく変化していないようであった。また、九頭竜川の河川産骨材は石川県の南加賀の一部地域でも使用されているとともに、昭和50年代には九頭竜川河口の浚渫砂(塩分含有)が福井県や石川県の南加賀の一部地域に出回っていたことも明らかになった。柳場⁴⁾の資料から作成した福井県の岩体分布図を図-3に示す。この岩体分布図からは、九頭竜川の本流や足羽川の上流域に安山岩や流紋岩の岩体が広く分布しており、それらが河川産骨材の一部に混入していたことが想定される。これまでの著者らの調査により、福井県では細骨材によるASRの発生が確認されておらず、また足羽川や日野川の河川産骨材のASRも発生が少ないことが判明している。一方、近年、石川県や富山県で問題になっている、工場製作のコンクリート桁(ホロー桁やI桁)のASRの発生が福井県ではこれまで確認されていない。これは、福井県のプレテンPC桁のほとんどが敦賀市にある工場で製造されており、そこでは「無害」と判定された硬質砂岩の砕石(滋賀県産)が使用されてきたことがその理由である。さらに、南条付近の珪石(チャート)を使用したコンクリート製品などのASRの発生も確認されていない。

福井県の骨材の化学法(JIS A1145)の結果を図-4に示す。この図は福井県が収集したデータをもとに金沢大学で作成したものである。図-4に示すように、化学法により「無害でない」と判定されるものが存在していない。この結果は十分に予想されたことである。著者らの調査によると、北陸地方の河川産骨材には、安山岩や流

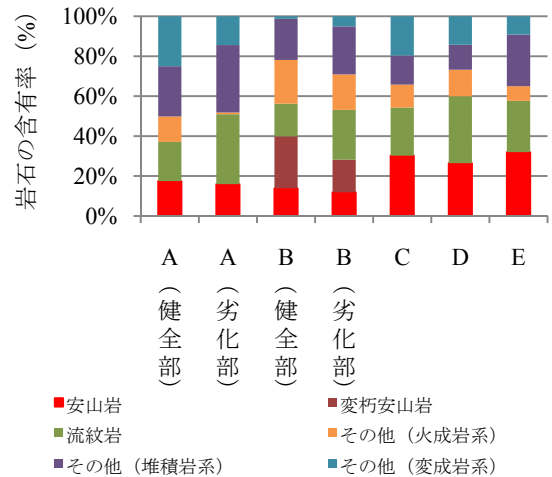


図-5 コアの岩種構成率の結果

紋岩などの反応性のある岩石の他に、深成岩や堆積岩、造岩鉱物(長石、雲母など)など多種多様なものが混在しており、河川産骨材の多くのは化学法の判定図の境界線付近(溶解シリカ量とアルカリ濃度減少量の比 $(Sc/Rc=1)$)に存在することが判明している⁵⁾。このように実際の構造物でのASRの発生状況が的確に反映されていないことから判断すると、この結果は、骨材のASRのスクリーニング試験として、化学法の結果のみで判定することが危険であることを示唆している⁶⁾。

4. 構造物から採取したコアによる各種試験

4.1 骨材の岩種構成率

骨材の岩種構成率を図-5に示す。河川産骨材にはアルカリシリカ反応性をもつ岩種として火山系岩石(安山岩(変朽安山岩)と流紋岩)の混入が認められた。5橋梁のASR劣化度と骨材の岩種構成率との関係を調べると、上流域から中流域、下流域と河川を下るにつれて、安山岩(変朽安山岩)の含有量が少なくなっており、骨材のアルカリシリカ反応性が顕著に低下していることがわかる。このような傾向は、安山岩の含有量とそのペシマム混合率とに密接に関係しており、富山県の常願寺川や石川県の手取川などのASR調査でも確認されている^{2), 3)}。また、九頭竜ダムの近くにあるA橋では、橋梁がダム工事の取り付け道路として建設されたこともあり、コンクリートが現地での生コンプラントではなく、ダム工事用のプラントから供給されたため、九頭竜川の上流域にも係らず、他の橋梁と比較して骨材の安山岩の含有率が大きく減少していた。この結果は、A橋梁の損傷がASRでなく凍害や部材の構造的な要因で発生していたこととも一致している。

4.2 コアの圧縮強度および静弾性係数

コアの圧縮強度と弾性係数の結果を図-6に示す。は

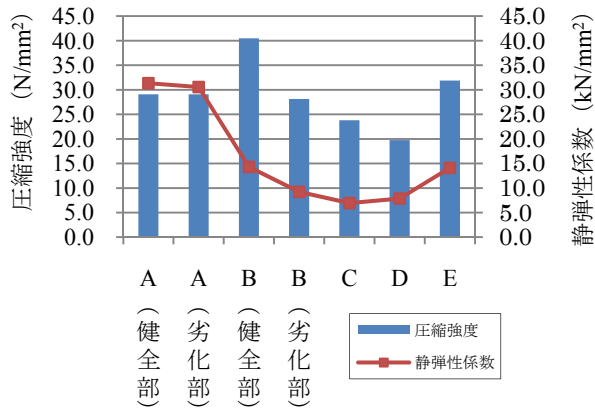


図-6 コアの圧縮強度および静弾性係数

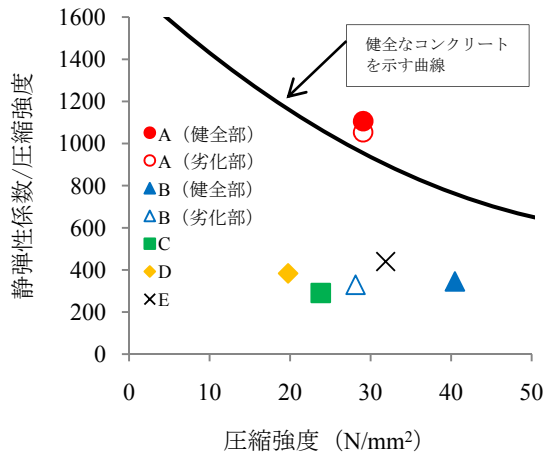


図-7 コアの圧縮強度と静弾性係数の関係

つり調査にて鉄筋破断が確認された B 橋の PC 梁部は、設計基準強度 30N/mm² に対してコアの圧縮強度が 25N/mm² となり、圧縮強度の低下率をもっとも顕著であった。それ以外の橋梁は設計基準強度とほぼ同程度の 21N/mm² または 24N/mm² の値になった。前述したように、最大寸法が 40mm (一部 80mm) と大きい骨材が使用されていた A 橋では、小口径のコアでは適切に強度が評価できていない可能性があった。一方、コアの静弾性係数の値はいずれの橋梁も低下が顕著であり、ASR が発生したコンクリートの力学的性質の特徴が現れている。

コアの圧縮強度と静弾性係数の関係を図-7 に示す。プロットが原点に近づくにつれて ASR 劣化度が大きいものと判断される⁷⁾が、A 橋のみが健全なコンクリートを示す曲線付近にプロットされており、ASR が「軽微」または「発生していない」と判定されるものになった。

4.3 コアの残存膨張性

コアの残存膨張量試験の結果を図-8 および図-9 に示す。全体の傾向として、5 橋梁からのコアの残存膨張

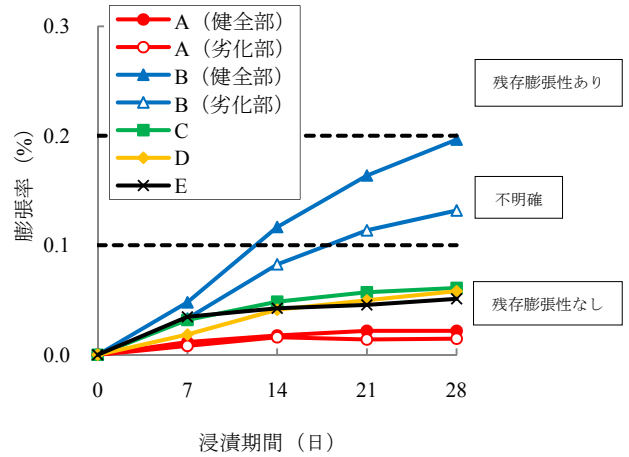


図-8 コアの残存膨張量試験 (カナダ法) の結果

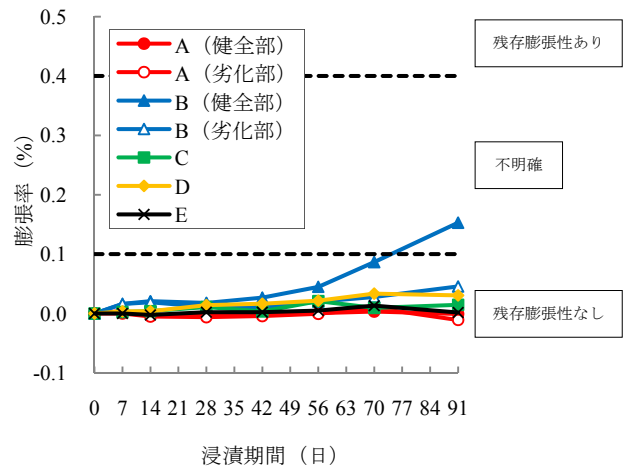


図-9 コアの残存膨張量試験 (デンマーク法) の結果

性はいずれも小さいと判断された。すなわち、カナダ法とデンマーク法の両測定で、B 橋のみが残存膨張率が 0.1% を超えており、残存膨張性の評価基準⁸⁾が「不明確」と判定された。また、B 橋の劣化部と健全部を比較すると、健全部の方の膨張率が少し大きくなった。これは、外部からアルカリが供給される促進養生条件下の測定において、それまでの岩石の ASR 反応の進行度の相違がその後の膨張率に反映されることによるものである⁸⁾。

4.4 偏光顕微鏡によるコアの薄片観察

コアの薄片観察結果より、九頭竜川産の骨材には安山岩 (変朽安山岩) と流紋岩が含有されているが、主に反応しているのは安山岩であり、安山岩中のクリストバライトと火山ガラスが主要な反応性鉱物であると考えられた。この結果は、白山の反対側に位置する石川県の国道 157 号の骨材の ASR 調査の結果とも一致していた。すなわち、ASR 劣化がもっとも顕著であった B 橋では、5mm から 10mm 程度の安山岩粒子が良く反応しており、安山岩粒子からセメントモルタルに多数のひび割れが

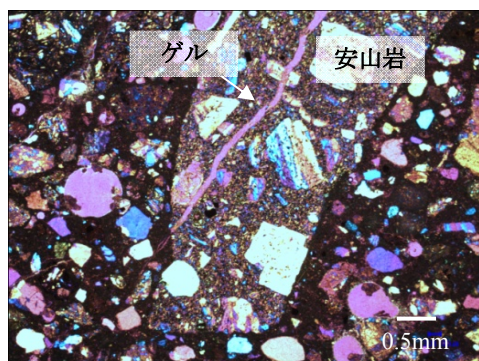


写真-2 コア（B橋）の偏光顕微鏡観察

進展していた（写真-2）。一方、C橋、およびD橋でも安山岩粒子に反応環（リム）や微細なひび割れが観察されたが、安山岩粒子の量とその反応の程度はB橋と比較してかなり低下していた。また、いずれの橋梁でも細骨材には明確な反応の痕跡が観察されなかった。

5. 福井県の橋梁のASR対策と維持管理

九頭竜川流域の橋梁のASR調査の結果より、上流域から中流域にかけて鉄筋破断が発生するような、深刻なASR劣化が一部確認されたが、福井県全体でのASR劣化は富山県や能登半島の事例と比較すると軽微であると判断できた。これは基本的に骨材のアルカリシリカ反応性の相違に基づくものである。現在、福井県では市町村レベルでの橋梁の点検作業が進行中であるが、九頭竜川流域の一部地域（大野市や勝山市）を除くとそれら以外の市町村には深刻なASR劣化が発生していないと考えている。このような見解を示すことは、調査能力に限界がある市町村レベルの今後の点検などに有効に活用できると考えている。その一方で、山間部に位置する国道157号や国道158号では、ASRと凍害の複合的な劣化が発生しているのが明らかになった。これらの橋梁の橋脚や橋台の一部はスケーリングがすでに発生しており、水かかりの処理や防水対策とともに脆弱化した箇所部分的な打替えが早急に必要であると判断している。また、物流や地震時の避難路の確保の点からも最重要となる国道157号や国道158号では、路線全体を念頭に入れた維持管理計画を策定すべきであり、その中で個々の橋梁の補修・補強対策の順位付けが必要になるであろう。とくに、部材の構造的な問題に加え、ASRや凍害が発生している、山間部にある鋼橋のRC床版は取替えを前提にした対策を行う事が重要である。

6. 結論

福井県の骨材のアルカリシリカ反応性とASR劣化橋梁に関して実施した、一連の調査結果についてまとめる、以下の通りである。

- (1) 福井県では、九頭竜川の流域にASR劣化橋梁が分布しており、上流域から中流域、下流域になるにつれてASR劣化度が小さくなった。
- (2) 九頭竜川の河川骨材には、安山岩が含有されており、安山岩の含有率が高いものほどASR劣化度が大きくなった。
- (3) 鉄筋破断が発生した橋梁では、コンクリートの圧縮強度や弾性係数が大きく低下するとともに、コアの促進養生試験でも残存膨張性が認められた。
- (4) コアの偏光顕微鏡観察から得られたASR劣化度は、実橋梁の目視によるASR劣化度の判定とも一致していた。
- (5) 福井県のASR橋梁の調査結果を整理して、ASR劣化橋梁の対策の基本的な考え方を示した。

謝辞：本調査の実施に当たり、ご協力いただいた、(株) 国土開発センターの笹谷輝彦氏並びにメンテナンス調査設計(株)の山川博樹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/V-64、pp.185-197、2004。
- 2) 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。
- 3) 大代武志、鳥居和之：富山県のASR劣化橋梁の実態調査に基づくASR抑制対策および維持管理手法の提案、コンクリート工学論文集、Vol.20、No.1、pp.45-57、2009。
- 4) 榎場重正：北陸地方における骨材品質の現状、セメント・コンクリート、No.415、pp.48-54、1981。
- 5) 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。
- 6) 鳥居和之：アルカリシリカ反応にいかに対応するか《試験、診断と対策の課題》、セメント・コンクリート、No.698、pp.1-9、2005。
- 7) 小林一輔、白木亮司、森 弥広：ASRを生じたコンクリートの圧縮強度性状に関する2、3の考察、土木学会論文集、No.426、pp.91-100、1991。
- 8) 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、pp.64-70、2006。