

論文 富山県内の高速道路橋から採取したコアによるアルカリシリカ反応性と潜在膨張性の評価

可計 皓規*1・河尻 留奈*2・名古屋 通義*3・鳥居 和之*4

要旨：富山県内の高速道路橋では、河川産骨材が使用されており、河川水系ごとの後背地の岩石・地質条件の相違により、所謂、「急速膨張性」と「遅延膨張性」の両反応性骨材が存在する。そこで本研究では、富山県内の河川水系による流域区分を考慮して、河川産骨材の岩石学的特徴とアルカリシリカ反応性の大きさを調べるとともに、高速道路橋の2橋梁・橋台から採取したコアにより、構造物のASR劣化度とコンクリートの潜在膨張性との関係について検討した。

キーワード：ASR、骨材の岩石・鉱物学的調査、構造物のASR劣化度、コンクリートの潜在膨張性

1. はじめに

富山県内の高速道路橋では、長年にわたり河川産骨材をコンクリートに使用してきた。特に、富山市周辺の常願寺川や神通川の流域では、昭和50年代に建設された橋梁の下部工などで鉄筋破断やコンクリートの脆弱化を伴う、深刻なASRが発生している¹⁾。このため、構造物の重要度とASR劣化度に応じた対策(補修から補強、さらに打替え)を実施してきた。しかし、40年以上が経過した構造物でもASRが継続しているものがあり、構造物のASR対策が十分に確立されているとは言えなかった。一方で、セメントのアルカリ量は、昭和50年代の0.8%から現在の0.6%にまで大きく減少しているが、組成ペシマムが顕著である、常願寺川産のものなどはアルカリ総量規制値(JIS A 5308)以下の2kg/m³程度でもASRが実際に発生していた²⁾。富山県内の河川水系ごとにASR劣化橋梁を分類すると、常願寺川や神通川の富山市内、庄川や小矢部川の高岡市を中心とする地域でASR発生率が多いのが特徴であった¹⁾。これを県内の地質・岩石分布に重ね合わせると、富山県内のASRは火山岩系(安山岩、流紋岩など)の常願寺川・神通川産のものと堆積岩系(流紋岩質溶結凝灰岩など)の庄川・小矢部川産のものに大別できた。

ASR劣化構造物の調査診断と対策の決定では、(1)ひび割れなどの変状がASRによるものか(原因究明)と、(2)今後のASR進行の程度を予測する(劣化予測)が必要になる。この際に、最も信頼がおける方法は構造物のモニタリングによる定期的な観察であるが、富山県内では実施例が少なく、構造物からのコアによる潜在膨張性試験が適用されてきた経緯があった³⁾。この評価には、当初、湿気槽養生法(JCI-DD2, 温度40℃, 相対湿度95%以上)を適用してきたが、実構造物からのコアはほとんど膨張

せず、「潜在膨張性なし」と判定された。しかし、補修後の構造物は数年で表面被覆材にひび割れやふくれが発生し、再劣化が大きな課題となった。このため、富山県内の高速道路橋の潜在膨張性の評価では、短期間(2週)で判定できる利点から、通称、カナダ法(温度80℃, 1N・NaOH溶液浸漬)を適用してきた経緯があった⁴⁾。

そこで本研究では、富山県内の流域河川の地域区分を考慮して、代表的な河川産骨材の岩石学的特徴とアルカリシリカ反応性の関係を調べるとともに、高速道路橋の2つの橋台(富山市内および南砺市内)から採取したコアにより、構造物のASR劣化度とコンクリートの潜在膨張性、さらに反応性岩石の特徴との関係を検討した。

2. 試験および調査概要

2.1 骨材のASR試験

骨材のASR試験に関しては、富山県内には、所謂、「遅延膨張性」である流紋岩質溶結凝灰岩(庄川水系)と「急速膨張性」である安山岩(常願寺川水系)が混在している状況があり、両反応性骨材に対して適切に判定できる骨材のASR試験法が求められている。このため、化学法(JIS A 1145)と促進モルタルバー法(ASTM C 1260)の両試験により判定することにした。また、後者の試験は、「遅延膨張性」の岩種にも適用できるとされている。骨材の岩石学的調査では、主要な反応性岩石である安山岩および流紋岩質溶結凝灰岩とそれら以外の非反応性岩石である花崗岩および閃緑岩の岩石構成率を目視にて判定することにした。

2.2 コアの潜在膨張性試験

コアの潜在膨張性試験に関しては、まず試験体の大きさおよび手順を統一することが必要であり、(1)地上1.5mの位置から直径55mmおよび長さ250mmのコアを採取

*1 中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋(株)金沢支店 道路技術部 構造技術課 (正会員)

*2 中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋(株)金沢支店 道路技術部 構造技術課 博(工) (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 道路技術部 試験研究課

*4 中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋(株)テクニカルアドバイザー 工博 (フェロー会員)

する、(2)膨張測定用のコアはかぶり部分（50mm 程度）を避けて内部より試験体（直径：55mm,長さ：200mm）を切り出す、(3)ASTM C 1260 に準拠して浸漬期間 2 週にて判定する、ことを基本とした。なお、北陸地方の高速道路では、Katayama ら⁵⁾の研究結果によりコアの 3 週での膨張率(0.1%)を「潜在膨張性の有無」の判定基準としてきた。なお、河尻ら⁶⁾の最近の研究結果により、表-1 に示す判定基準値が新たに提案されている。

表-1 潜在膨張性の判定基準値⁶⁾

膨張率(14日) ^{※1, 2}	潜在膨張性の判定
0.05%未満	構造物の現在および将来の維持管理にて、ASRは問題とならない(潜在膨張性なし)。
0.05%以上0.10%未満	反応性岩石が少ないまたはほとんど無い(潜在膨張性は極めて小さい)。
0.10%以上0.20%未満	反応性岩石を少量含有するが、遅延膨張性骨材の膨張挙動を示す。ASRはほぼ収束している(潜在膨張性は小さい)。
0.20%以上	反応性岩石を多く含有しており、とくに、0.4%以上はASR膨張が継続する。急速膨張性骨材の膨張挙動を示す(潜在膨張性は大きい)。

※1 ASTM C 1260の判定結果と対応させたもの。

※2 0.05%未満は「非ASR」と扱う。それ以外は「認ASR」とする。

2.3 構造物の ASR 劣化度評価

高速道路橋の橋台および橋脚（設計基準強度 24N/mm²）の調査・診断に関しては、巨視的ひび割れ（構造体）から微視的なひび割れ（内部組織）の観察への展開，すなわち、構造物のひび割れ発生度（表面外観）とコアの健全度（内部外観），骨材周囲の ASR 発生度（実体・偏光顕微鏡観察）の 3 段階により，さらに構造物の ASR 劣化度を総合的に評価する手法を導入した。構造物の ASR 劣化度調査の全体像を図-1 に示す。

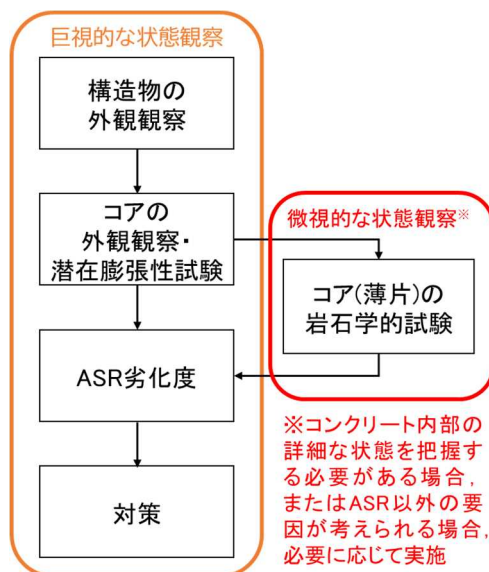


図-1 構造物の ASR 調査の全体像

まず、橋台のひび割れ発生状況より、図-2 に示すように、河尻ら⁶⁾の最近の研究結果による評価方法に従って、構造物の ASR 劣化度を 4 段階（I：健全（ASR のひび割れが発生していないもの）、II：軽微（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）、III：中程度（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）、IV：深刻（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））と評価した。次に、図-3 に示すように、河尻ら⁶⁾の研究結果による評価方法に従って、コアのひび割れや断裂、内部圧壊の程度により、コンクリートの劣化状況を同様に評価した。さらに、岩種の同定や反応状況の確認などの目的に応じて、硬化体組織の診断を詳細に行うため実体顕微鏡による切断面観察と偏光顕微鏡による薄片観察（厚さ：20 μm）を実施した。この構造物の ASR 劣化度評価を A 橋（富山市内、常願寺川水系）と B 橋（南砺市内、庄川水系）の 2 橋梁・橋台に適用した。橋梁の所在地および概要を表-2 に示す。

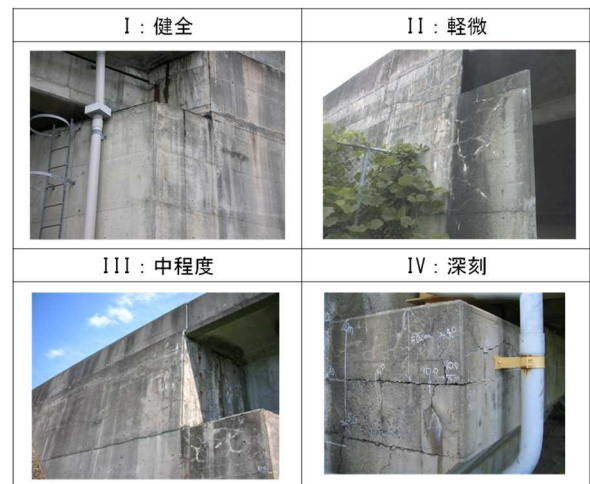


図-2 外観による ASR 劣化度の評価⁶⁾



図-3 コアによる劣化状況の評価⁶⁾

表－2 橋梁の所在地および概要

橋梁名	A橋	B橋
橋長	199.080m	101.000m
供用開始	1975 (S50)	1992 (H4)
所在地	富山県富山市	富山県南砺市
骨材産地	常願寺川水系	庄川水系
コア採取箇所	A1橋台	A1橋台

表－3 骨材の ASR 試験の結果と反応性骨材の岩種構成率の特徴

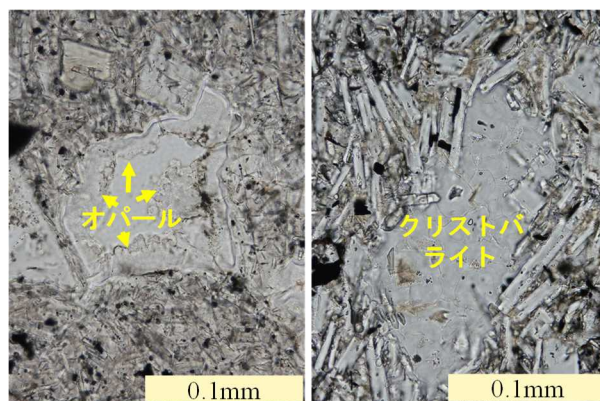
骨材産地	アルカリシリカ反応性試験		骨材の主要な岩種
	化学法 (JIS A 1145)	促進モルタルバー法 (ASTM C 1260)	
早月川産	無害	無害	花崗岩、閃緑岩 (非反応性)
黒部川産	無害	不明確※	
常願寺川産	無害でない	有害	安山岩、流紋岩 (反応性)
神通川産	無害	有害	
庄川産	無害	不明確※	溶結凝灰岩、流紋岩 (反応性)
小矢部川産	無害	不明確※	

※無害と有害の両者が存在する

3. 富山県内産骨材の反応性岩種、アルカリシリカ反応性と構造物の ASR 劣化度

3.1 反応性岩石の特徴と地域分布状況

富山県内の代表的な骨材のアルカリシリカ反応性試験の結果と反応性骨材の岩種を表－3 に示す。富山県の生コン工場は4地区内の主要河川に隣接して立地しており、河川水系ごとに使用する骨材がほぼ決まっており、地区内の ASR 発生状況を特徴づけることができた。ただし、建設工事が増大した昭和50年代前半は、供給量に優れた常願寺川産の陸砂および陸砂利が幅広く地区内外に流通していた。常願寺川産には反応性が高い安山岩が約30%含まれているのに対して、庄川産には流紋岩・流紋岩質溶結凝灰岩が約60%含まれている、という岩種構成率の相違が確認された。また、両岩石中の反応性鉱物の偏光顕微鏡観察(写真－2)より、常願寺川産の安山岩(急速膨張性)はオパール、クリストバライトを含むのに対して、庄川産の流紋岩質溶結凝灰岩は隠微晶質石英および火山ガラスを含むことが同定されている。これらの反応性鉱物で、特にオパールはきわめて反応性が高く、現行の JIS A 5308 によるアルカリ総量規制値(3 kg/m³)を遵守しても ASR の発生を抑制することができないものであることが知られている¹⁾²⁾。それに対して、早月川・黒部川水系は非反応性の花崗岩および閃緑岩が多く含まれており、この流域での ASR の発生率はかなり小さかった¹⁾²⁾。



写真－2 常願寺川産骨材(安山岩)の反応性鉱物の偏光顕微鏡による観察結果

3.2 骨材のアルカリシリカ反応性と構造物の ASR 劣化度

富山県内の河川産砂利および砂の化学法の判定結果を図－4 に示す。化学法(JIS A 1145)の判定基準に従うと、常願寺川産の川砂および川砂利は溶解シリカ量(Sc)が200から300 mmol/l となり、すべて「無害でない」と判定された。また、常願寺川産の Sc/Rc の値はペシマム現象が顕著になるとされる、ASTM C 289 による「潜在的有害」のライン付近に分布していた。それに対して、庄川産の砂および砂利は溶解シリカ量(Sc)が50から100 mmol/l となり、多くが「無害」と判定された。さらに、JR 東日本の新しい判定基準(2010 制定)⁷⁾では「E 有害」、「準有害」、「E 無害」の3種類に区分されている。これに従うと、富山県内の骨材で「E 無害」と判定されるものは、利賀川産や百瀬川産のみであり、従来、JIS 規格では「無害」と判定されたものが「準有害」と判定された。富山県内の構造物の ASR 劣化度調査より、Sc が50 mmol/l 以下の骨材を使用した構造物は ASR 劣化が比較的軽微(ASR 劣化度 I または II)であるのに対して、Sc が100 mmol/l 以上の骨材を使用した構造物は深刻かつ継続的な ASR (ASR 劣化度 III または IV)が発生していることが明らかになった。

富山県の代表的な河川産骨材(川砂利および川砂)の促進モルタルバー法の結果を図－5 に示す。常願寺川産および庄川産の砂および砂利は、浸漬期間とともに膨張率がほぼ直線的に増大しており、いずれも「有害」と判定された。また、常願寺川産の膨張率は庄川産の3倍以上となるとともに、砂と砂利がほぼ同一の膨張挙動を示すことが明らかになった。促進モルタルバー法による測定結果より、富山県内の河川産骨材は、黒部川・早月川産<庄川産<神通川産<常願寺川産の順番で、骨材の ASR 反応性が高くなり、骨材の岩種構成率(安山岩および流紋岩・流紋岩質溶結凝灰岩の比率)とも一致していた。これらの結果は、骨材の ASR 試験に関して、現行の化学法

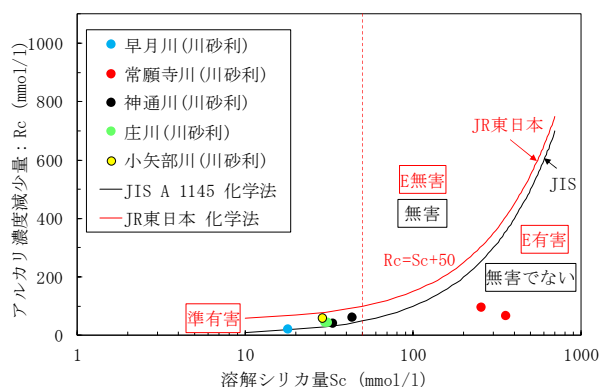
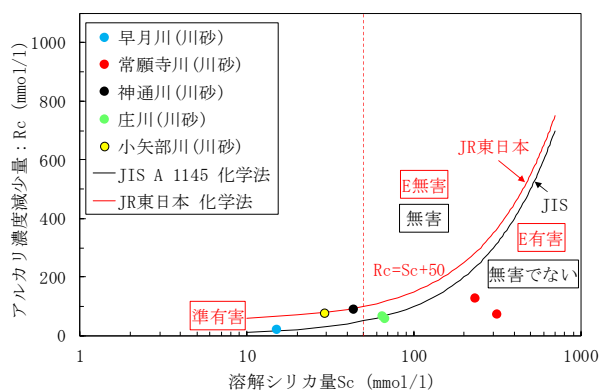


図-4 富山県内の河川産砂利および砂の化学法の判定結果⁸⁾

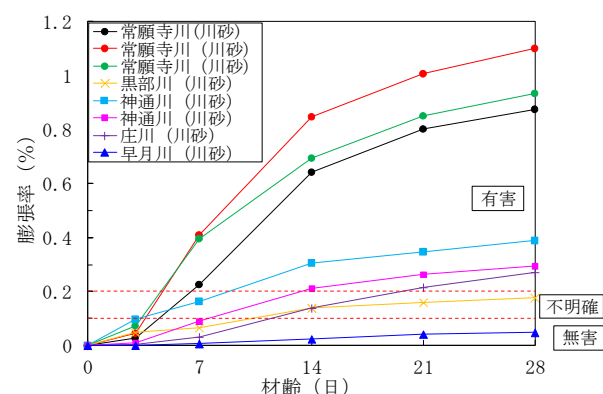
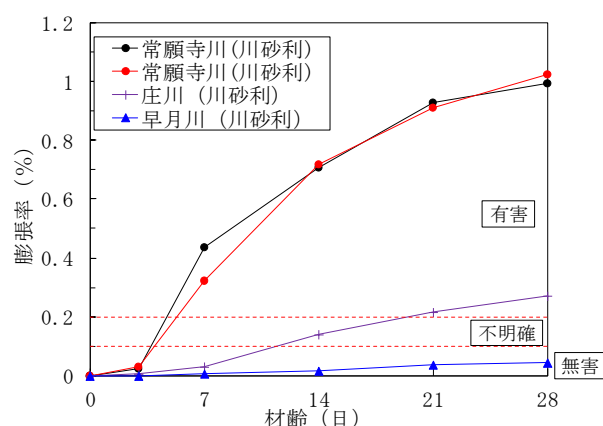


図-5 富山県内の河川産砂利および砂の促進モルタルバー法 (ASTM C 1260) の判定結果⁸⁾

よりも促進モルタルバー法がより有効であることを示唆している⁹⁾。

4. コンクリートの潜在膨張性と構造物の ASR 劣化度の総合評価

4.1 コンクリートの潜在膨張性

富山市および南砺市に位置する2橋梁・橋台（堅壁中央）よりコアを採取し、コンクリートの潜在膨張性と骨材の岩種・反応性珪物を詳細に調べた。なお、両高速道路は冬季期間中に凍結防止剤（NaCl）を多量に散布している。コアのNaOH溶液浸漬法における膨張挙動を図-6に示す。コアの膨張率はNaOH溶液浸漬直後より直線的に増大するが、A橋はB橋と比較して大きな膨張率を示した。コアの測定結果は機関によるばらつきが大きいことと、構造物のASR劣化度が大きくなるとともにコアの膨張率が低下する傾向があることに注意が必要である。このため、コアの採取時のコンクリートのひび割れやASRの発生状況などを記録するとともに、健全箇所（コアの潜在膨張率大）とひび割れ箇所（コアの潜在膨張率小）を区別して、構造物全体のASR劣化度を総合的に評価することが望ましい。さらに、コアのNaOH溶液浸漬法は過酷な促進環境条件下での結果であり、実際の構造

物の使用・環境条件とは必ずしも一致しないことにも注意が必要である。

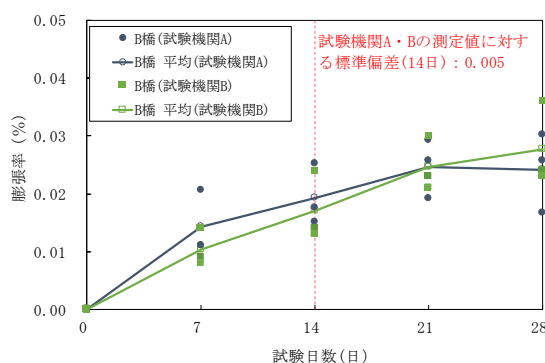
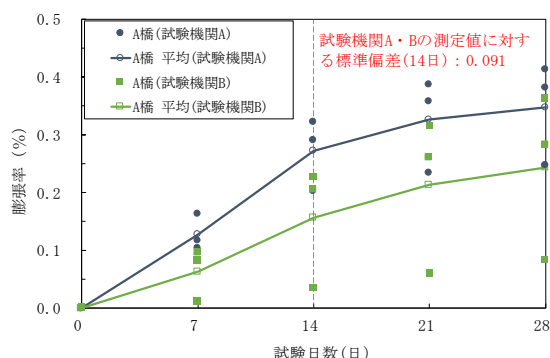
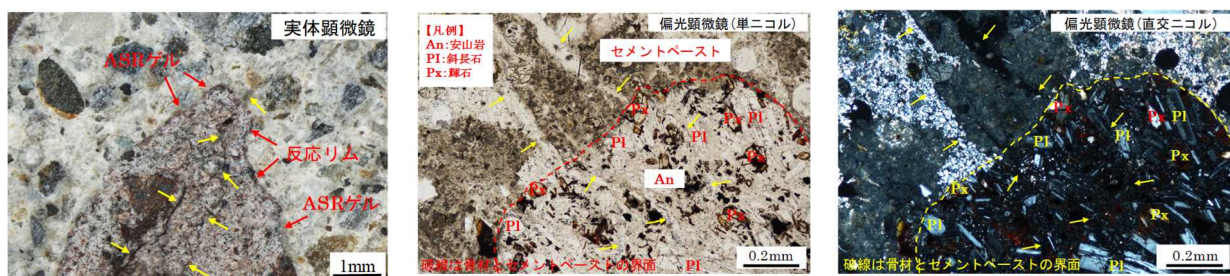
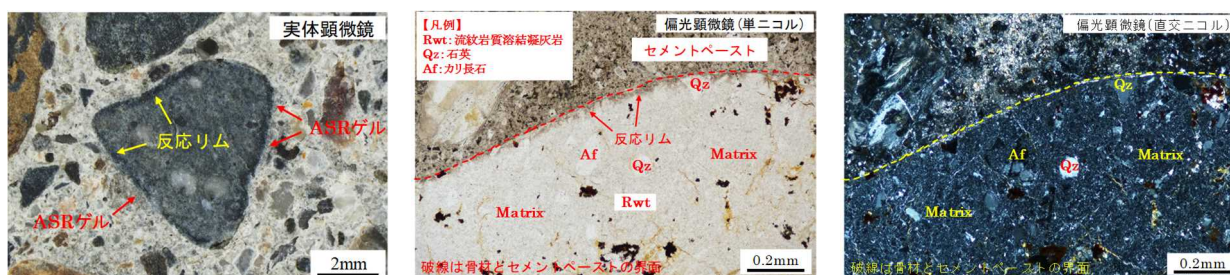


図-6 コアのNaOH溶液浸漬法における膨張挙動



写真－3 A橋（常願寺川水系骨材）からのコアの実体および偏光顕微鏡の観察結果



写真－4 B橋（庄川水系骨材）からのコアの実体および偏光顕微鏡の観察結果

表－4 2橋梁のASR劣化度の総合的評価

橋梁名	A橋	B橋
NaOH溶液浸漬法による14日膨張率(%)	0.272	0.019
ASR劣化度評価(外観)*	IV	II
ASR劣化度評価(コア)**	IIIまたはIV	II
ASR劣化度評価(骨材)***	IV	I
備考	補修後劣化	未補修

* 橋台の外観調査に基づくASR劣化度の評価

** コアの健全性(断裂状況)に基づくASR劣化度の評価

*** 偏光顕微鏡観察に基づくASR劣化度の評価

4.2 コアの実体および偏光顕微鏡による組織観察

コアのNaOH溶液浸漬法開始時での実体および偏光顕微鏡による観察結果を写真－3および写真－4に示す。A橋では、粗骨材中の安山岩と、細骨材中の流紋岩および安山岩が反応していた。とくに、安山岩粒子からはASRゲルに充填された膨張性のひび割れがセメントペースト中に進展しており、細骨材および粗骨材の双方がASRを発生することにより、コンクリート内部組織の脆弱化が進行していた。それに対して、B橋では、川砂中の流紋岩および流紋岩質溶結凝灰岩に軽微な反応環（リム）とASRゲルの滲出が観察された。なお、反応性鉱物としては、A橋はオパールとクリストバライト（急速膨張性）が、B橋は火山ガラスと隠微晶質石英（遅延膨張性）が同定された。本合ら¹⁰⁾の研究結果によると、両橋梁で使用された骨材の岩種組成と反応性鉱物の相違に基づいて、構造物のASR劣化度を内部組織の岩石・鉱物的試験の結果より特徴づけられた。

4.3 構造物のASR劣化度の総合的な評価と対策の提案

2橋梁に対して実施した構造物のASR劣化度の総合的な評価を表－4に示す。A橋は供用年数が45年経過して

いるにも関わらず、ASR膨張がいまだに収束しておらず、上部工であるRCスラブ桁にも深刻なASRひび割れと曲げひび割れが発生していた。また、河川内の橋脚ケーソン頂版には2005年に大きな割れとコンクリートの脆弱化が発見され、全面的に打ち替えられた。さらに、A橋は2000年頃より補修効果を検証する目的で、ウイング付近（最劣化部）の縦ひび割れの幅の変化をモニタリングしてきた。写真－5および図－7に示すように、A橋は2005年から2012年までの傾向を見てひび割れ幅の拡大が継続している傾向にあった。A橋・橋台では大規模な更新（補強と打替え）と、RCスラブ桁のひび割れのモニタリングなどの監視強化が必要であると判断した。それに対して、B橋は供用年数が25年と短く、構造物のASR劣化度の評価が低かった。しかし、B橋の位置する富山県の県境付近は、ASRと凍害による複合劣化の発生が懸念される地域であるので、凍結防止剤を含む路面水の躯体への浸透を防止するために、シラン・シロキサン系含浸材の塗布による橋台の予防保全対策とその後の経過観察の強化が必要であると判断した。



写真-5 A橋・橋台のひび割れ幅の亀裂変位計によるモニタリング状況

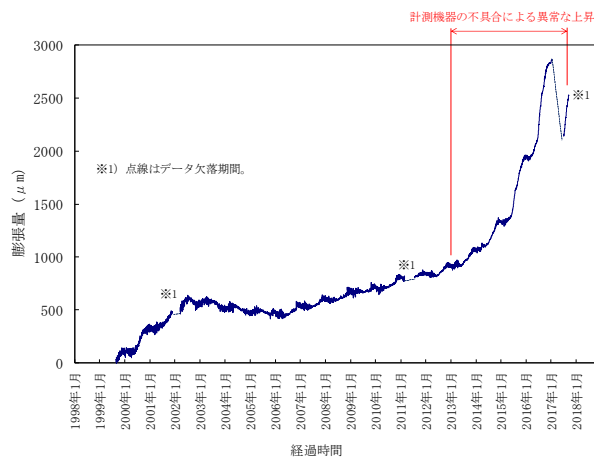


図-7 A橋・橋台のひび割れ幅のモニタリング結果

5. まとめ

本研究にて得られた主要な結果をまとめると、以下のとおりである。

- 1) 富山県内の骨材には常願寺川水系に代表される“急速膨張性”の骨材と庄川水系に代表される“遅延膨張性”の骨材の2種類の岩種があり、骨材のASRの判定には化学法(JIS A 1145)とともに促進モルタルバー法(ASTM C 1260)を併用するのが有効であった。
- 2) 実構造物からのコアによる潜在膨張性の評価において、NaOH溶液浸漬法を適用する際の試験法の基準とその手順を明確にするとともに、コアの促進膨張試験による構造物のASR劣化に対する管理基準値を提案し、富山県内の代表的な2橋梁・橋台の評価に適用した。
- 3) 富山県内の高速道路橋に使用された骨材の岩石・反応性鉱物の特徴とコンクリートの潜在膨張性の結果より、構造物のASR劣化度を巨視的レベル（構造

物のひび割れの外観調査）から微視的レベル（内部組織の微細なひび割れの観察）までの3段階で総合的に評価し、構造物のASR劣化に対する対策を提案した。

謝辞：骨材の岩石・鉱物学的検討およびASRの偏光顕微鏡観察において、太平洋コンサルタント（株）解析技術部より多大な協力を頂きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 大代武志ほか：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
- 2) 大代武志ほか：コンクリート橋脚のASRによる再劣化と対策工の選定，コンクリート工学，Vol.44，No.12，pp.31-38，2006
- 3) （公）日本コンクリート工学会，ASRの現状とあるべき姿研究委員会報告集，pp.316-319，2014
- 4) 鳥居和之ほか：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
- 5) T. Katayama, et.al. : Alkali-aggregate reaction under the influence of de-icing salts in the Hokuriku district, Japan, J. of Materials Characterization, Vol.53, pp.105-122, 2004
- 6) 河尻留奈ほか：コンクリート構造物から採取したコアのアルカリシリカ反応性と潜在膨張性の評価に関する研究，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，Vol.21，pp.520-525，2021
- 7) 松田芳範：JR東日本における混和材使用の現状と課題，コンクリート工学，Vol.52，No.5，pp.459-463，2014
- 8) 大代武志ほか：富山県におけるASR劣化橋梁の実態調査とその地域特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.1，pp.1059-1064，2016
- 9) 鳥居和之ほか：中部地方における反応性骨材の岩石・地質学的調査とフライアッシュコンクリートの地域実装，コンクリート工学，Vol.59，No.4，pp.321-328，2021
- 10) 本合弘樹ほか：コンクリート構造物から採取したコアによるアルカリシリカ反応性の岩石学的検討，セメント・コンクリート論文集，No.75，pp.255-262，2022