

論文 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

津田 誠^{*1}・麻田 正弘^{*2}・参納千夏男^{*3}・鳥居 和之^{*4}

要旨：石川県能登半島の奥能登珠洲地区では、昭和 40 年代から富山県産河川砂利が多く用いられ、これらの骨材にて ASR が生じている。本研究では、北陸地方で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検討するとともに、橋梁およびトンネルの詳細点検結果より ASR 劣化状況の特徴を調査した。その結果、塩化物イオンが関係したコンクリート用骨材の ASR の特徴と、ASR 劣化橋梁およびトンネルの劣化状況に相関があり、さらに、ASR を発生したトンネルの覆工コンクリートをコア採取により調査した結果、表面の外観調査結果と覆工内部の ASR の劣化度に違いがあることが判明した。

キーワード：ASR, 安山岩碎石, 劣化橋梁, 劣化トンネル, ゲルフルオレッセンス法, 塩化物イオン

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、これら安山岩碎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。

能登半島北西部の珠洲地区では半島の先端部を回り込むように国道および主要地方道があり、コンクリート構造物の一部で ASR による劣化が発生している。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⁾。また、ASR 抑制対策の 1 つとして、アルカリ総量規制を順守しているが、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、構造物の供用時の外的な環境作用の 1 つとして、飛来塩分の影響がある。

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。

一方で、県内では高度成長期に大量に構築された社会インフラ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、将来の予算面で課題が残る状況である。

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およびトンネル覆工コンクリートの詳細点検結果並びに使用環境条件により ASR 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供給状況

調査対象とした地域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。A (橋梁)、B (橋梁・トンネル)、C (プレテンション橋梁製造工場) の 3 箇所とも、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 (庄川, 神通川など) が使用されていた。表-1 に示すとおり、対象構造物はほぼ同時期に建設されており、経過年は 40 年前後である。

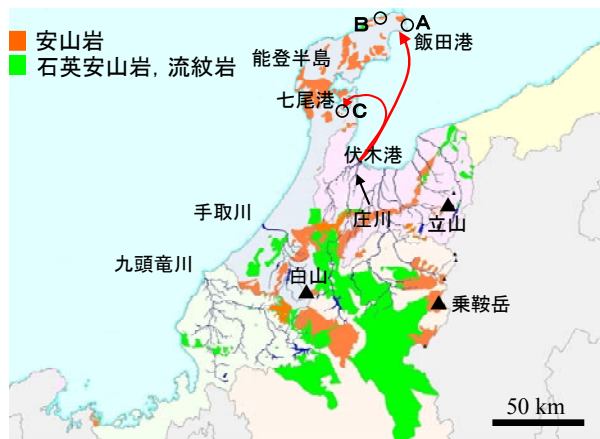


図-1 調査対象地域と骨材の供給経路³⁾

*1 金沢大学 自然科学研究科 環境科学専攻 (学生会員)

*2 金沢大学 自然科学研究科 環境科学専攻 (正会員)

*3 北陸電力(株) 土木部土木技術チーム 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)

2.2 岩石の試験方法

(1) 岩石・鉱物学的試験

コア側面の展開写真にて、直径 5mm 以上の骨材を対象に各岩種の面積を算出し、岩種構成率を算出した。さらに、厚さ 15~20 μ m の薄片試料を作成し、偏光顕微鏡下で観察を行い、アルカリシリカ反応が生じている骨材の岩種やひび割れの状況を確認し検討した。

(2) 骨材の ASR 試験

骨材の ASR 試験として、化学法およびモルタルバー法 (JIS A 1145 および JIS A 1146) を実施した。さらに、沿岸部における海水や海水飛沫体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の準拠し、供試体を 1N の NaCl 溶液 (20 $^{\circ}$ C) 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・トンネルの調査方法

(1) 外観変状調査

橋梁の点検は足場を設置し外観調査を実施した。点検後、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、ASR 劣化については目視での点検であることを鑑み、ASR による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石川県での区分に従い、表 2 に示す 3 段階で判定した。

(2) コアを使用したコンクリート試験

1) 力学的試験

コンクリートの強度および ASR による劣化の程度を確認するため、コアカットにより、 ϕ 100 のコアを採取し、圧縮強度および静弾性係数試験を実施した。

2) 残存膨張量試験

ASR による膨張が今後進行するか評価するために残存膨張試験アルカリ溶液浸漬法 (カナダ法-温度 80 $^{\circ}$ C, 1N・NaOH 溶液浸漬) により実施した。判定基準としては、北陸自動車道での管理基準である、養生期間 21 日での膨張量が 0.1%以上で有害な骨材が含まれる、0.1%以下で無害とした⁵⁾。

3) 塩化物イオン含有量試験

対象構造物の立地条件が塩害対策区分の S に該当するため、飛来塩分による上部工の補強材への影響およびアルカリシリカ反応との関係性を把握するため、塩化物イオン含有量調査をドリル法にて実施した。

4) ゲルフルオレッセンス法

簡易な ASR 診断手法の 1 つとして、放射性溶液としての取扱いの必要な酢酸ウラニル蛍光法に代わる方法とし

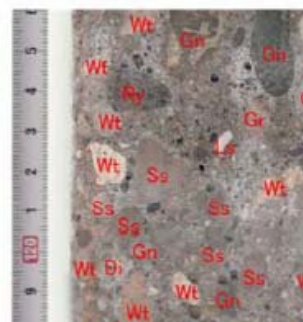
表 1 対象構造物の特徴と使用骨材

位置	構造物種類	立地条件 塩害対策区分	完成年	経過年	骨材産地
A	ポストテンション PC橋	内湾側 S	S44	44	富山県産 川砂利
B	プレテンション PC橋	外浦側 S	S45	43	Cで製作
	トンネル覆工 (在来工法)		S49	39	
C	プレキャスト PC橋工場	内湾側 S	-	-	富山県産 川砂利

表 2 ASR 判定の区分表⁴⁾

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 岩種構成率の算定表 (A 橋)



Sh:頁岩; Ss:砂岩; Ls:石灰岩;
Tf: 凝灰岩; Wt:流紋岩質溶結
凝灰岩; Ry:流紋岩; An:安山
岩; Gr:花崗岩; Di:閃緑岩;
Gn:片麻岩

岩種	Picel	構成率
安山岩*	2,886	2.5%
流紋岩*	9,237	8.2%
花崗岩	6,610	5.8%
閃緑岩	5,260	4.6%
片岩・片麻岩	21,697	19.1%
流紋岩質溶結凝灰岩*	40,450	35.7%
凝灰岩*	1,440	1.3%
砂岩	24,415	21.5%
珪質頁岩*	1,207	1.1%
石灰岩	128	0.1%
計	113,330	100.0%

写真 1 岩種構成率算定状況 (A 橋)



図 2 岩種構成率算定状況



写真 2 コアによる観察状況

て、低濃度の酢酸とウラニルを含む希釈酢酸ウラニル溶液を用いて判定を行う、ゲルフルオレッセンス法⁶⁾を用いた。この手法で使用されている試薬は一般に市販されており、取扱いも用意で、かつ試薬を塗布後5分程度で反応し、短時間で結果がわかる特徴がある。

3. 調査結果および考察

3.1 橋梁の調査結果

写真-1にA橋の岩種構成率の算出を行った写真を示す。丸みを帯びた多種の岩石が確認され、骨材として、河川産骨材が使用されていた。アルカリシリカ反応性の岩種として、火山岩系岩石の安山岩、流紋岩、流紋岩質熔結凝灰岩、凝灰岩、堆積岩として珪質頁岩が確認された。表-3により、北陸地方でのアルカリシリカ反応性の高い安山岩の構成率は2.5%と少なく、流紋岩質熔結凝灰岩が35%と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。

B橋を製作したプレキャストPC工場ではほぼ同時期である昭和49年に製作された橋梁の岩種構成率を算定した結果を図-2に示す。安山岩の構成率が少なく、流紋岩質熔結凝灰岩の構成率が多く、前述のA橋とほぼ同じ産地と推測され、この工場では継続的に同一の産地の骨材を使用していると推定された。また、この橋梁においても、写真-2に示すASRが見られた。

写真-3, 4にA橋およびB橋の外観状況を示す。これら3橋はすべてCに位置するプレキャストPC橋メーカーが築造していた。A橋では限定的な範囲で軽微なひび割れが見られ、表-2の判定では「疑ASR」判定であったのに対し、B橋では主桁下フランジに軸方向に幅0.2mmを超えるひび割れが多くあり、判定は「認ASR」となった。また、表-4のとおり、B橋のひび割れは桁下フランジ下面にほぼ全面に見られた。

圧縮強度および静弾性係数試験の結果、B橋において、コンクリート標準示方書に示す基準値と比較し、静弾性係数は50%~60%に低下していた。この低下の理由もASRが原因と考えられる⁷⁾。

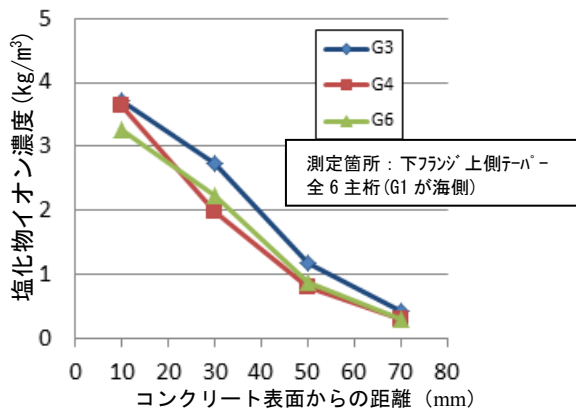


図-3 A橋の塩化物イオン含有量



写真-3 A橋の外観状況



写真-4 B橋の外観状況

表-4 B橋のひび割れ延長 (0.5mm以上)

箇所	延長計
主桁下面	
G1主桁下面	0.30
G2主桁下面	9.53
G3主桁下面	8.70
G4主桁下面	5.70
G5主桁下面	1.70
G6主桁下面	5.00
G7主桁下面	0.90
G8主桁下面	0.47
G9主桁下面	7.65
G10主桁下面	2.60
G11主桁下面	5.10
G12主桁下面	7.35
G13主桁下面	1.50
G14主桁下面	2.15
G15主桁下面	4.90
G16主桁下面	4.90
G17主桁下面	2.75
G18主桁下面	3.55
G19主桁下面	1.50
G20主桁下面	3.95
G21主桁下面	4.40
G22主桁下面	3.20
G23主桁下面	8.53
合計	96.33

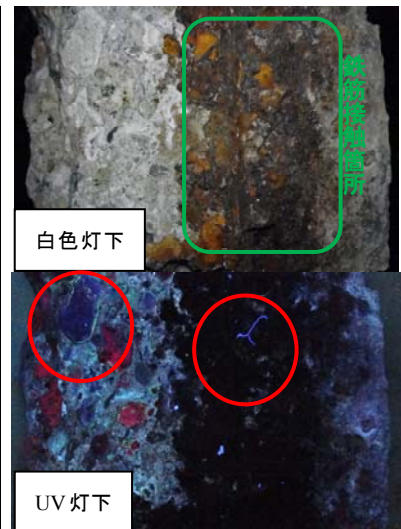


写真-5 発光状況写真

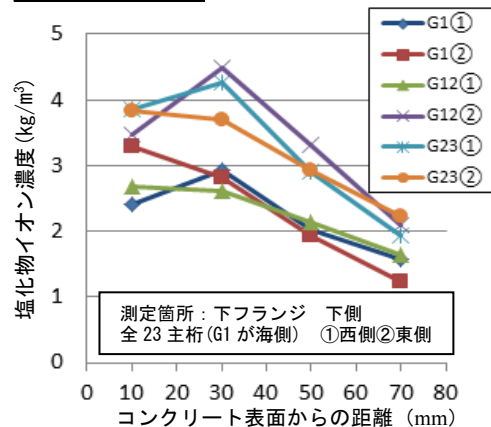


図-4 B橋の塩化物イオン含有量

写真-5 に B 橋のゲルフルオレッセンス法による、紫外線照射による発光状況を示す。緑色に発光しているのが ASR ゲルであり、骨材の周囲や骨材を貫通するひび割れ、セメントペースト部に ASR ゲルの存在が認められ、B 橋において ASR の進行が、ASR 生成物の観点でも確認された。

これらより、A 橋と B 橋では同一骨材を使用し、供用年数もほぼ同じでありながら、ASR 劣化の進行度が異なっている。この理由として、この 2 橋は同じ市の海岸に隣接しているが、使用環境条件が大きく異なることが考えられる。

図-3 および図-4 に表面からの深さごとの塩化物イオン含有量を示す。塩化物イオン濃度は、A、B 橋とも表面では 3kg/m^3 を超える高濃度であったが、ASR 劣化の激しい B 橋において表面から 70mm の位置においても鉄筋の発生限界である 1.2kg/m^3 を大きく超える濃度の塩化物イオンが検出され、ほぼ全面に均一に塩分が浸透していた。また、B 橋よりコアにより採取した 4 試料にて塩化物イオン量を測定した結果、表面から 50mm 付近で $0.34\sim 0.87\text{kg/m}^3$ の値を示し、建設当初からの塩分の混入は少なかったと考えられる。同じ塩害対策区分 S で、かつ水面からの高さもほぼ同じ橋梁ではあるが、塩化物イオン含有量に差が生じていた。図-5 に本橋近隣の気象庁観測所での最大風速の方角データより、本地域では北西から西風が卓越していることが分かった。これらより、内湾に面している A 橋から見て東方向に海岸があるのに対し、B 橋がある外浦側では北西方向にあるため、B 橋は冬季の季節風からの飛来塩分の影響を多く受けたと考えられる。

図-6 に A 橋上部工の残存膨張試験結果を示す。この結果より、膨張率 0.2% を超えているため、現在も膨張が収束しておらず、今後膨張するポテンシャルが残っているが、供用後 40 年経過しても、ASR による劣化の程度が軽微であった。

ホーラスラブ橋は桁内のポイドの中に水が滞水し、ASR 劣化が顕著になっている橋梁が報告されているが、B 橋では I 桁を連結されて、内空をコンクリートで充填する PC 中埋床板橋のため、内空の滞水の影響は受けない。また、鉱物の組成ではガラス質である流紋岩質溶結凝灰岩が多く、ペシマムの影響も小さいと考えられる。それでもありながら、前述に示すとおり、A 橋と B 橋において、ASR 劣化の程度に大きな差異がある結果となっている理由として、ASR の劣化の促進に塩化物イオンが寄与している可能性が考えられる。

3.2 トンネルの調査結果

トンネルの調査はトンネル坑口部とトンネル内の覆工部で実施した。トンネル内覆工部の調査箇所を選定

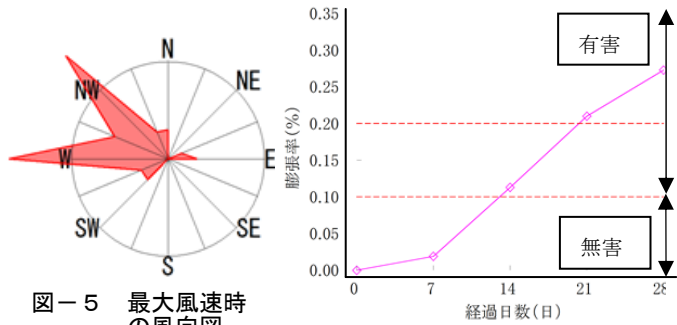


図-5 最大風速時の風向図

図-6 ASTM C 1260 による残存膨張量試験結果



写真-6 終点側トンネル坑口の ASR 劣化状況

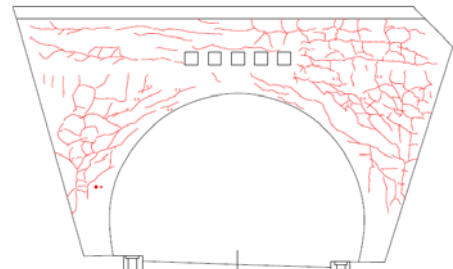


図-7 終点側トンネル坑口のひび割れ図

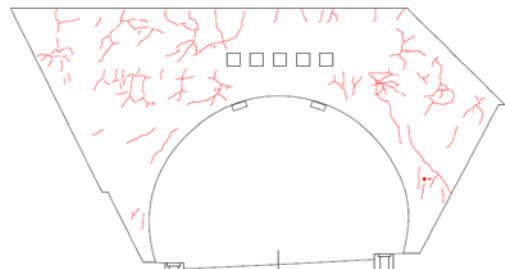


図-8 起点側トンネル坑口のひび割れ図

表-5 坑口部の岩種構成率

岩種	起点側坑口	終点側坑口
	構成率	
安山岩	2.0%	0.3%
流紋岩	1.2%	0.5%
流紋岩質溶結凝灰岩	25.6%	24.1%
花崗岩	17.6%	11.7%
閃緑岩	8.0%	9.4%
片麻岩	41.6%	43.3%
砂岩	0.5%	1.3%
頁岩	0.4%	1.1%
片岩	0.4%	1.1%
蛇紋岩	2.7%	7.2%
計	100.0%	100.0%

は、前年度に実施されたトンネル点検において、トンネル下部にある排水柵の蓋が圧壊している箇所があり、その原因を調査するため、圧壊している箇所（劣化部）としていない箇所（健全部）の2箇所とした。

写真-6に示すとおり、トンネル坑口の面壁部にASR劣化と考えられるひび割れが多く確認できる。図-7、8に面壁部のひび割れ図を示す。また、表-5に各坑口の岩種構成率を示す。これより、ほぼ同一の骨材でありながら、明確に起終点でASR劣化の程度に差が生じており、終点部はかなりASR劣化が進行していることが分かる。本トンネルは前述のB橋と同じ外浦側にあり、トンネルは東西方向に位置している。このため、トンネルの起点側は東方向、終点側は西に向いており、図-5に示すとおり、特に終点側に風向が卓越している。また、両坑口とも地山より突き出る構造となっており、雨水の影響はほぼ同一と推定され、使用されているコンクリート強度等は完成書類により同じであった。

圧縮強度および静弾性係数の試験結果を図-9に示す。ひび割れが多く見られた坑口終点側と覆工劣化部において、健全なコンクリートでの弾性係数に比較して、約2割程度の弾性係数であり、ASRの影響により大きく低下していることが分かった⁷⁾。一方でひび割れが比較的少ない起点側トンネル坑口と覆工健全部では、比較的高い弾性係数の値であった。さらに、写真-7に示すとおり、終点部の蛍光顕微鏡での観察結果、骨材を貫通したASRによるひび割れが入っていた。

これらより、同一トンネルの坑口部において、ASR劣化の進行度が異なっており、この理由として、前述の橋梁のケースと同様に、使用・環境条件の差と推測し、表-6に示す塩化物イオン濃度を調査した。結果、風向が卓越している西面である坑口終点部において、 4kg/m^3 を超える高い濃度の塩化物イオンが検出された。また、本箇所は波の花と呼ばれる泡状のものが発生し、飛来する。これらの要因により、高い塩化物イオン濃度がASR劣化を促進させた可能性があると考えられる。

トンネル内部の覆工コンクリートにおいて、劣化部は図-9より、健全なコンクリートの弾性係数と比較し1割にも満たない値しかない状態であることから判断して、健全部と比較し、ASRによる劣化が進行していると考えられた⁷⁾。なお、ひび割れは覆工表面には現れず、内部でASRが進行していた。この現象は覆工コンクリート内部の湿度分布が影響していると推測された⁸⁾。

そこで、トンネル内部の湿度分布を計測するため、直流電気抵抗式資料水分計を用いて、覆工スパンごとに湿度分布状況の計測を行った結果、劣化部の覆工表面水分率が7%と健全部と比較して、約1.4倍であることが分かった。さらに建設時の完成図書を調査した結果、標準部

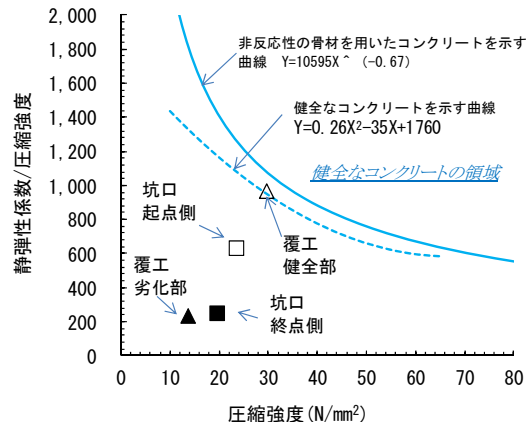


図-9 トンネルの圧縮強度・静弾性係数の試験結果

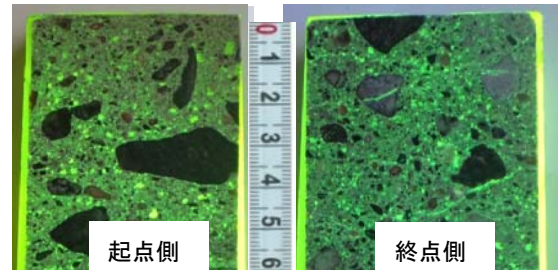


写真-7 トンネル坑口部の蛍光顕微鏡観察状況

表-6 トンネル各部位の塩化物イオン濃度

コア名	塩化物イオン濃度 (kg/m³)		深部の深さ (cm)
	表面部 (0-2cm)	深部	
坑口始点側	2.62	0.35	37-39
覆工健全部	1.91	0.23	37-39
覆工劣化部	0.78	0.16	32-34
坑口終点部	4.60	0.39	35-37

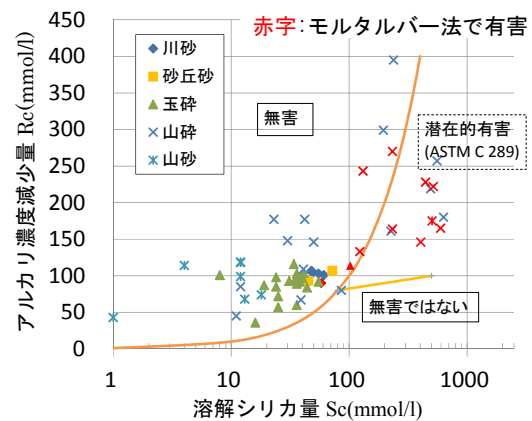


図-10 北陸産骨材の化学法による判定結果

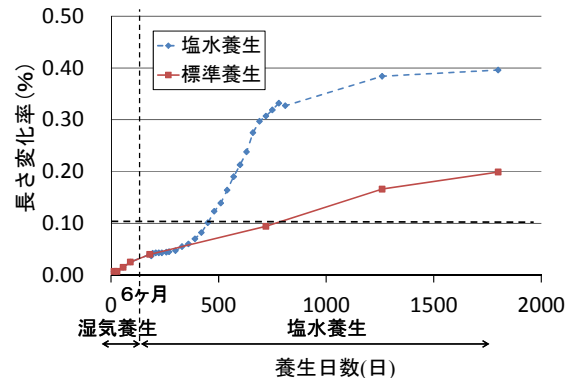


図-11 富山県産河川砂利のモルタルバー法の結果

は掛矢板工法にて施工されているのに対し、劣化部は建設当時から地山の状態が悪く、送り矢板工法により施工されていることが分かり、覆工背面部から水分が供給された結果、湿度が高くなったものと考えられた。

3.3 北陸産コンクリート用骨材の特徴

これまで、橋梁およびトンネルの調査結果より、ASR劣化の促進に塩化物イオンの影響があることを述べてきたが、北陸産の骨材と塩化物イオンとに特徴的な因果関係があるかについて、当該地域の代表的な骨材を用いて、化学法およびモルタルバー法を行った。

図-10より、北陸地方の河川砂利および砕石とも溶解シリカ量が50mmol/lを超える材料の一部で、化学法では無害であるが、モルタルバー法では有害という結果になるものがあつた。このため、北陸地方の骨材を使用する場合、溶解シリカ量が50mmol/l未満の骨材を使用することが、ASR劣化のリスクを軽減できるのではと考えられる。さらに、図-11より当該地域で使用されていた富山県産の河川砂利について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ヵ月での膨張量は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、本地域でのコンクリート用骨材において、ASRを塩化物イオンが促進させて可能性があることが分かり、実構造物のASR劣化の特徴とも整合した。さらに標準養生においても長期にわたり膨張をしていることから、従来の報告⁹⁾でもある、長期にわたる膨張性の特徴もあるのではと考えられる。

5. まとめ

本研究より得られた主な結果を次にまとめた。

(1) 同一な施工時期でほぼ同じ産地の骨材を使用した異なる環境にある2つの橋梁を調査した結果、ASR劣化には差があり、この理由として、海岸からの飛来塩分の影響が考えられ、卓越した風向にある橋梁において塩化物イオンの濃縮量が多く、ASRにより劣化していた。

(2) 簡易なASR診断手法の1つとして、酢酸ウラニル蛍光法に代わる方法として、低濃度の酢酸とウラニルを含む希釈酢酸ウラニル溶液を用いて判定を行う、ゲルフルオレッセンス法を採用した。本現場においてASRの有無を判定する上で、容易にかつ早期に結果を出すことができ、ASRの有無を判断するには、非常に有効であった。

(3) ASR劣化の進行度が異なっている、同一トンネルの両坑口部において、ASR劣化が進んでいる坑口側にて最大風速時の風向が卓越しており、 4kg/m^3 を超える高い濃度の塩化物イオンが検出された。このことから、ASR劣化を促進させる要因として高い塩化物イオン濃度が関

与していたと考えられる。

(4) トンネル覆工部におけるASR劣化として表面には現れずに、内部で進行していた。この現象は覆工コンクリート内部の湿度分布が影響していた。このため、構造の管理者としてはトンネル坑口等の調査結果によりASRが疑われる場合、トンネル覆工コンクリートの点検において表面の外観だけで劣化の診断を行うことは覆工内部のASRを見逃す危険性があることが推察された。

(5) 化学法およびモルタルバー法による試験結果より、コンクリート用骨材として使用する場合の目安として、無害と判断される骨材を使用することに加えて、溶解シリカ量が50mmol/l未満の骨材を使用することが、ASR劣化のリスクを軽減できるのではと考えられる。さらに、当該地域で使用されていた富山県産の河川砂利について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ヵ月での膨張量は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、当該骨材において、ASRを塩化物イオンが促進させている可能性があつた。

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) 石川県ASR対策検討委員会資料
- 5) 野村昌弘, 平 俊勝, 鳥居和之:コアによるコンクリート構造物のアルカリシリカ反応の判定, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.1, pp.1147-1152, 2001
- 6) 参納千夏男, 丸山達也, 山戸博晃, 鳥居和之:ゲルフルオレッセンス法によるASR簡易診断手法の開発, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.973-978, 2013
- 7) 小林一輔, 森 弥弘, 野村謙二:圧縮荷試験によるアルカリ骨材反応の診断方法, 土木学会論文集, No.640, V-18, pp. 151-154, 1993
- 8) 久保善司, 平 俊勝, 野村昌弘, 鳥居和之:ASRにより損傷したコンクリート構造物の内部湿度分布について, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.1635-1640, 2013
- 9) 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