

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

大代 武志*1・鳥居 和之*2

概要：本研究は、金沢大学が平成2年度と18年度の2回にわたり実施した、富山県内のアルカリシリカ反応（ASR）が発生した27橋梁の実態調査の結果に基づき、ASR劣化による橋梁の経年変化と補修・補強の効果を検証するとともに、ASR劣化橋梁で使用された河川産骨材の岩石・鉱物学的特徴より、富山県のASR劣化橋梁の河川水系ごとの地域的な区分とASR劣化度による対策の階層化を試みたものである。さらに、富山県のASR劣化橋梁にて実施した対策の問題点を明確にすることにより、富山県の反応性骨材に対応したASR抑制対策とASR劣化橋梁の維持管理への提言を行ったものである。

キーワード：アルカリシリカ反応（ASR）、実態調査、反応性骨材、補修・補強、抑制対策、維持管理

1. はじめに

富山県は、日本海側に位置する積雪寒冷地域にあり、海岸から20～30kmに近接する北アルプスの山岳地帯がこの地域の厳しい気象・地形条件を特徴づけている。一方、富山県には、第三紀中新世前期～中期の火山活動により海底で噴出し、熱水作用による変質を受けて緑色を呈する火山岩から構成されるグリーンタフが広く分布している¹⁾。特に、富山平野の東部から南西部の呉羽丘陵地や山地にかけて、わが国の代表的な反応性骨材の一つである安山岩や流紋岩の岩体が細長い帯状に分布しており、このことが富山県のASR劣化橋梁の地域的な分布状況と密接に関係していることが知られている^{2), 3)}。また、富山県では、コンクリート用骨材として生コンプラントの付近の河川から産出する川砂や川砂利が使用されてきた。その一方で、富山県内の河川産骨材は、河川の上流域の地質条件から多種多様な岩種が混在しており、このため河川水系ごとに、反応性岩種である安山岩、流紋岩などの種類とそれらの混合割合が大きく相違し、この地域の骨材のアルカリシリカ反応性の評価・判定をより複雑なものにしてきた^{4), 5)}。

金沢大学は、富山県内のASRの疑いのある橋梁の下部工のASR劣化度調査を平成2年度に実施し、建設後15～28年経過した橋脚や橋台から採取したコアを使用して、骨材の岩石・鉱物学的特徴やコンクリートの力学的性質を調べた経緯があった⁶⁾。その後、富山県では、橋梁の

ASR対策として、総プロ⁷⁾の提案に従ってひび割れ注入と表面被覆を基本とする補修を実施してきた。一方、富山県では、冬期間における凍結融解作用や凍結防止剤の散布などの影響も受け、補修後に再劣化するものが多くあった。しかし、それらの構造物の補修後の追跡調査は実施されておらず、再劣化の原因だけでなく、補修材料の耐久性や補修工法の適否が明確になっていないのが実状であった。このため、平成2年度の第1回目のASR調査より約16年が経過した平成18年度に第2回目のASR劣化橋梁の実態調査を実施した。本調査では、橋梁のASR劣化の進行状況と補修・補強の適否を河川水系ごとの橋梁に着目して検証することを目的とした。このような実態調査の事例は全国的にも少なく、ASR劣化構造物の抑制対策および維持管理を確立する上で重要な情報を提供するものと期待される。

本研究は、富山県におけるASR劣化橋梁の経年変化と補修後の再劣化について追跡調査することにより、総プロの提案に従って施工された補修の適否やその問題点を検証している。また、富山県の河川水系ごとの反応性骨材の岩石・鉱物学的特徴の調査結果に基づいて、ASRが発生した橋梁の地域的な分布状況とASR劣化度との関係を考察している。さらに、富山県内の代表的な反応性骨材である川砂および川砂利を対象にして、コンクリートのASR抑制対策に関する一連の試験を実施し、混合セメントの使用によるASR抑制対策を提案するとともに、既存のASR劣化橋梁の診断結果を活用することによるASR

*1 金沢大学大学院博士課程院生 自然科学研究科環境科学専攻（正会員）〒920-1192 金沢市角間町

*2 金沢大学教授 理工研究域環境デザイン学系 工博（正会員）〒920-1192 金沢市角間町

表-1 ASR 劣化橋梁の調査結果の一例

富山県の3地域区分		富山県西部			富山県中央部		富山県東部		
橋梁名		17-T 橋	16-D 橋	24-O 橋	9-J 橋	4-T 橋	6-O 橋	1-M 橋	
構造物の劣化状況	H2年とH18年の比較によるASR劣化の進行状況	劣化進行(補修なし)	進行なし(表面塗膜)	進行なし(表面塗膜)	再劣化(表面塗膜)	再劣化(表面塗膜)	再劣化(表面塗膜)	進行なし(表面塗膜)	
強度試験	圧縮強度 f_c (N/mm ²)	25.1	37.1	35.8	26.3	21.5	25.9	31.3	
	静弾性係数 E_c (kN/mm ²)	12.6	20.6	25.0	11.7	6.9	11.9	19.8	
	E_c/f_c	502	555	698	445	321	459	633	
コアの膨張性試験 ^{※1}	JCI-DD2法 判定	膨張性なし	膨張性なし	膨張性なし	膨張性あり	膨張性あり	膨張性なし	膨張性なし	
	膨張率(%)	0.031	0.046	0.046	0.060	0.087	0.014	-0.016	
	デンマーク法 判定	膨張性あり	膨張性なし	膨張性あり	膨張性あり	膨張性あり	膨張性あり	膨張性なし	
	膨張率(%)	0.560	-0.066	0.151	0.463	0.560	0.335	0.034	
	湿潤砂養生法 判定	膨張性なし	膨張性なし	膨張性なし	膨張性なし	膨張性あり	膨張性なし	膨張性あり	
	膨張率(%)	-0.080	0.040	0.075	-0.045	0.260	-0.045	0.205	
	水中養生法 判定	膨張性なし	膨張性なし	膨張性なし	膨張性なし	膨張性あり	膨張性なし	膨張性なし	
	膨張率(%)	-0.060	0.000	0.025	-0.070	0.105	-0.050	0.025	
化学法 ^{※2}	細骨材	Sc (mmol/l)	497	256	588	199	542	518	20
		Rc (mmol/l)	101	154	113	84	212	135	106
		判定	有害	潜在的	有害	潜在的	潜在的	潜在的	無害
	粗骨材	Sc (mmol/l)	223	74	73	199	392	72	78
		Rc (mmol/l)	65	27	35	84	64	30	55
		判定	有害	有害	有害	有害	有害	有害	有害
偏光顕微鏡観察 ^{※3}	細骨材	安山岩	○	○	○	○	○	○	○
		流紋岩	○	○	○	○	○	×	○
	粗骨材	安山岩	○	×	○	○	○	○	○
		流紋岩	○	○	○	○	×	×	○

※1 平成2年の調査時で建設後約20年が経過している

コアの膨張性試験では、JCI-DD2法は0.05%以上(3ヵ月または6ヵ月材齢)、デンマーク法、湿潤砂養生法および水中養生法は0.1%以上(3ヵ月または6ヵ月材齢)を「膨張性あり」と判定した。

※2 ASTM C 289-1993の判定図に基づいて「有害」、「潜在的有害」、「無害」と判定している

※3 コアの偏光顕微鏡観察により確認された岩石(○: ASRが発生している, ×: ASRが発生していない)

劣化橋梁の維持管理を提案している。

2. 調査概要

2.1 目視点検による橋梁の実態調査

平成2年度に調査した富山県内の27橋梁の橋脚および橋台に対して、写真記録の残っている同一の部位について平成18年度に再度調査し、約16年経過した橋梁のASRによる変状および経年劣化を調べた。現地調査では、ASRの進行状況や補修後の再劣化に着目して、外観の目視によりコンクリートのひび割れやASRゲルの滲出、表面被覆材のふくれやはがれ、浮きなどを調べた。目視による判定基準は、無補修のもの内、ひび割れの進展やASRゲルの滲出が認められるものを「劣化進行」、補修したものの内、塗膜の表面にひび割れやゲルが認められるものを「再劣化」、それ以外で劣化が認められないものを「劣化進行なし」とした。なお、27橋梁では平成2年度の調査以後にASRによる損傷の大きいものから順番に補修が実施されている。ASR劣化橋梁の調査結果の一例を表-1に示す。なお、表-1に示すコアによるASRに関する各

種試験は平成2年度に実施したものである。

2.2 骨材の岩石・鉱物学的特徴とアルカリシリカ反応性

(1) 粉末X線回折による含有鉱物の同定

川砂および川砂利中の岩種を目視により識別した後に、メノウ乳鉢で指頭に感じなくなるまで粉碎した粉末試料を使用して、X線回折装置(XRD, Cu K α -Ni フィルター, 40kV-20mA)により含有鉱物の同定を行った。

(2) 骨材のアルカリシリカ反応性の判定

河川水系を代表する川砂および川砂利のアルカリシリカ反応性を化学法(JIS A 1145-2001)およびモルタルバー法(JIS A 1146-2001)により判定した。

2.3 コアを使用したコンクリートの物性の評価

(1) コアから採取した骨材の化学法(JIS A 1145-2001)による判定

橋脚および橋台から採取したコアを粗粉碎し、細骨材と粗骨材とに分離した後に、付着セメントモルタルを取り除くために5%のHCl溶液に数回浸せきした。その後、骨材は蒸留水で十分に洗浄し化学法の試料とした。

(2) コアの残存膨張性の評価

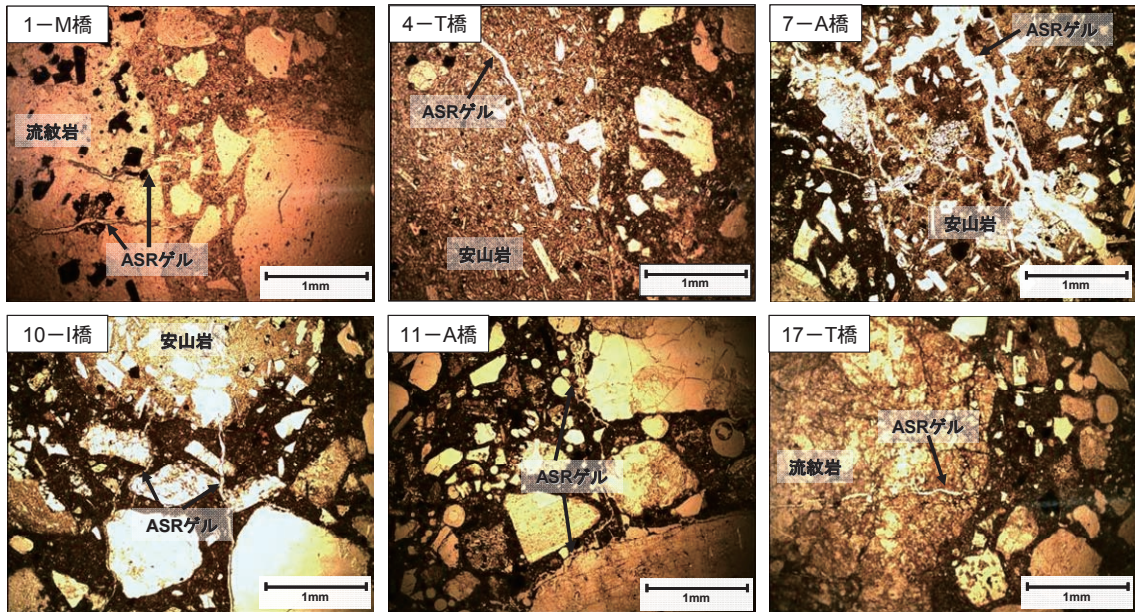


写真-1 コアの偏光顕微鏡による観察結果

表-2 コンクリートの配合および骨材の物理的性質

	空気量 (%)	s/a (%)	W/B (%)	単位量(kg/m ³)					
				水	セメント※1	FA※2	BFS※3	細骨材※4	粗骨材※5
OPC	2	46	50	160	320	0	0	875	1013
FA15	2	46	50	160	272	48	0	867	1005
FA20	2	46	50	160	240	80	0	862	999
BFS40	2	46	50	160	192	0	128	870	1007
BFS50	2	46	50	160	160	0	160	867	1007

※1 普通ポルトランドセメント(Tセメント社製, 等価アルカリ量:0.68%, 密度:3.16g/cm³, プレーン比表面積:3330cm²/g)

※2 FA: 石川県N石炭火力発電所からのII種灰(JIS A 6201-1999)(密度:2.32g/cm³, プレーン比表面積:4070cm²/g)

※3 BFS: 高炉スラグ微粉末(Sセメント社製, 密度:2.90g/cm³, プレーン比表面積:4380cm²/g)

※4 川砂(常願寺川産): 密度:2.62g/cm³, 吸水率:1.6%

※5 川砂利(常願寺川産): 粗骨材最大寸法:25mm, 密度:2.63g/cm³, 吸水率:1.6%

橋脚および橋台から採取したコアを用いて2種類の促進養生条件による残存膨張性試験を実施した。TI-B51⁸⁾(デンマーク法)に準拠した試験では、直径50mmおよび長さ150mmのコアを50℃の飽和NaCl溶液中に浸せし、コアの膨張量を測定した。また、当時の建設省法(JCI-DD2法)に準拠した試験では、直径100mmおよび長さ200mmのコアを温度40℃、相対湿度95%以上の湿気槽に保管し、コアの膨張量を測定した。残存膨張性試験に用いたコアの大きさは、デンマーク法ではNaCl溶液のコアへの浸透性の確保を、JCI-DD2法ではコアからのアルカリ溶出の影響の軽減を考慮して決定している。なお、コアの残存膨張性の明確な判定基準はないので、通常は骨材のアルカリシリカ反応性の判定基準に準拠した値を使用している⁹⁾。

(3) コアの圧縮強度および静弾性係数の測定

橋脚および橋台から採取したコア(直径100mmおよび長さ200mm)を使用して圧縮強度試験を実施した。

(4) コアの薄片試料の偏光顕微鏡および蛍光顕微鏡による観察

コンクリート断片を厚さ5mmに切断し、蛍光塗料入り

のエポキシ樹脂を含浸した後、ガラス板に張り付けて、厚さ20μmまで研磨することにより、コンクリートの薄片研磨試料(40mm×50mm)を作製した。薄片研磨試料を偏光顕微鏡および蛍光顕微鏡で観察することにより、ASRが発生した岩石の種類とその反応状況、コンクリートのひび割れの発生状況などを調べた。コアの薄片研磨試料の偏光顕微鏡(単ニコル使用)による観察結果の一例を写真-1に示す。川砂および川砂利中の主要な反応性の岩種としては、安山岩および流紋岩が同定された。ASRが発生したコアでは、安山岩および流紋岩粒子の内部や周囲のモルタル中のひび割れがASRゲルによって充填されている様子が観察できる。コア薄片の偏光顕微鏡観察における安山岩および流紋岩粒子の反応環(リム)の存在とASRゲルの生成状況に着目して、表-1に示すように、川砂および川砂利中の安山岩および流紋岩粒子ごとに「ASRが発生している」、「ASRが発生していない」を判定している。

2.4 混合セメントを使用したコンクリートのASR抑制効果の確認

代表的な反応性骨材である常願寺川産の川砂および川

砂利を使用したコンクリートを作製し、混合セメントによるコンクリートの ASR 抑制対策を検証した。コンクリートの配合を表-2 に、骨材の物理的性質を脚注に示す。コンクリート試験体 (75mm×75mm×400mm) の促進養生条件は、湿気槽養生法 (温度 40℃, 相対湿度 100%) および飽和 NaCl 溶液浸せき養生法 (温度 50℃, 飽和 NaCl 溶液浸せき) の 2 種類とし、コンクリートの膨張率および動弾性係数を定期的に測定した。

3. ASR 劣化橋梁の実態調査

富山県における ASR が発生した 27 橋梁の分布状況を図-1 に示す。平成 2 年度の調査は、富山県が管理する主要な河川に架かる 27 橋梁を対象にしており、図中に補修の有無や撤去の履歴とともに県内の安山岩、流紋岩の分布状況を記載している。なお、図-1 は参考文献 10 に加筆したものである。これらの橋梁の建設時期は昭和 37 年から昭和 50 年であり、平成 18 年の時点で建設後 30 年から 45 年が経過しているものである。一方、富山県内の河川産骨材による ASR が一般に認識されたのは昭和 50 年代後半であり、それ以前の昭和 30 年代や 40 年代に建設された橋梁にも ASR が発生しているのがこの地域の特徴であった。

平成 2 年度と平成 18 年度の ASR 劣化 27 橋梁の実態

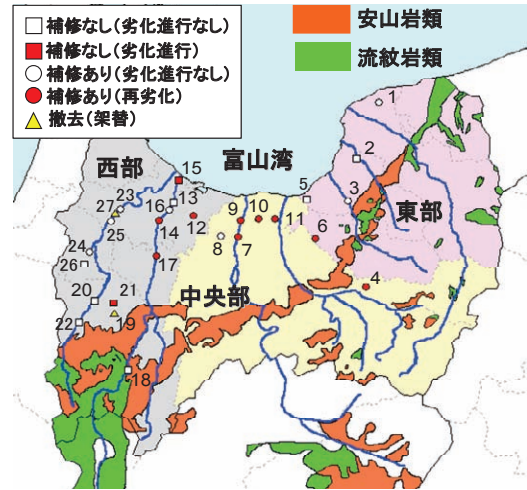
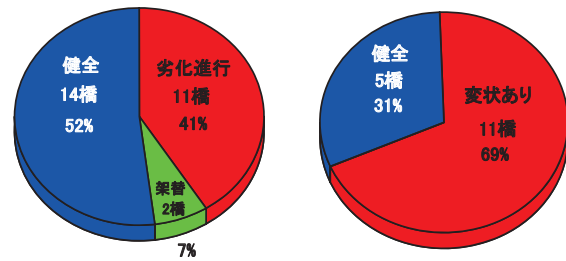


図-1 ASR 劣化が発生した 27 橋梁の分布状況¹⁰⁾



経年劣化の調査結果 (全 27 橋) 表面塗膜の変状調査 (全 16 橋)

図-2 H2 年度と H18 年度の ASR 劣化 27 橋梁の実態調査の結果



写真-2 ASR 劣化橋梁の外観の比較 (左側: H2 年度, 右側: H18 年度)

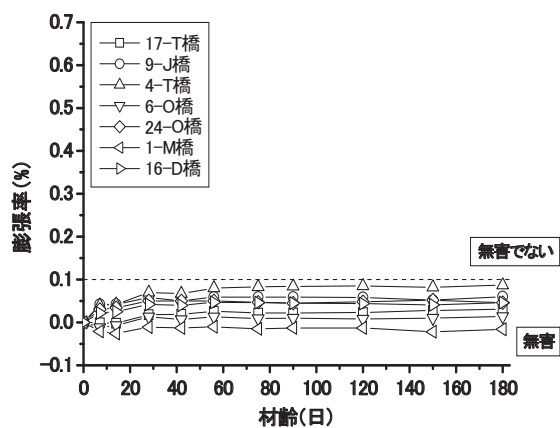


図-3 コアの残存膨張量試験の結果 (JCI-DD2 法)

調査を比較すると、図-2 に示すように ASR の進行が確認できたものは 11 橋 (41%) であった。また、ASR 対策として表面被覆が施された 16 橋の中で、塗膜が健全な状態のものが 5 橋 (31%)、塗膜にひび割れやふくれ、はがれが生じたものが 11 橋 (69%) であった。さらに、現存しない橋梁 (架け替えられたもの) は 2 橋 (7%) であった。これらの橋梁を河川水系により西部 (庄川、小矢部川の水系)、中央部 (常願寺川、神通川の水系)、東部 (早月川、黒部川の水系) の 3 地域に分類すると、補修後の再劣化は中央部の地域に多く発生しており、東部や西部の地域では比較的健全なものが多かった。これまでの橋梁の ASR 調査^{4), 5)}により、富山県では河川水系ごとに骨材の反応性の岩種とそのアルカリシリカ反応性が大きく相違していることが判明している。すなわち、東部の水系の骨材は深成岩系の花崗岩や閃緑岩により構成されているのに対して、中央部、西部の水系の骨材は火山岩系の安山岩や流紋岩、溶結凝灰岩を多く含んでいるのが特徴であった。特に、これらの岩種の中でもっとも反応性の高い安山岩をより多く含有する常願寺川水系のものは、ASR が長期間持続し、このため補修後に再劣化が生じた橋梁が多くなったものと推察できた。

富山県の各地域を代表する ASR 劣化橋梁の平成 2 年度と平成 18 年度での外観の比較を写真-2 に示す。この間、約 16 年が経過しているが、橋脚・はりの張り出し部 (西部、中央部、写真-2(a), (b) 参照) では、補修の有無に関係なく、ひび割れの進展や白色の析出物の滲出が顕著であった。一方、橋台 (中央部、東部、写真-2(c), (d) 参照) では補修後に著しい再劣化が生じていた。それに対して、橋台 (西部、東部、写真-2(e), (f) 参照) では、補修後に大きな変状は発生せず、塗膜の健全性が保持されていた。

4. コアを使用したコンクリートの物性の評価

4.1 コアによる残存膨張性の評価

平成 2 年度に実施したコアの残存膨張性試験 JCI-DD2 法およびデンマーク法⁸⁾の試験結果を図-3 および図-4

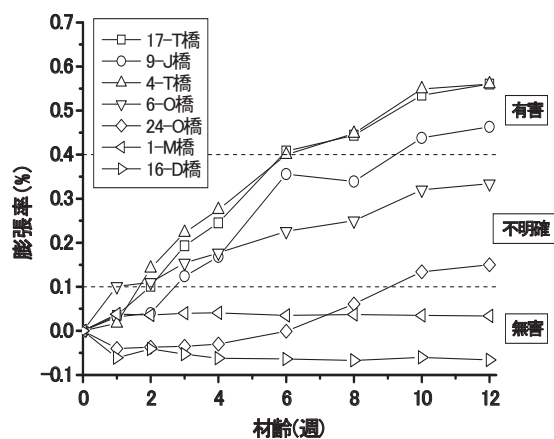


図-4 コアの残存膨張量試験の結果 (デンマーク法)

に示す。デンマーク法では、常に外部からアルカリ (NaCl) が供給されるために、コンクリート中に骨材の反応性鉱物と水酸化カルシウムが十分に残っていれば、NaCl 溶液が内部に浸透するとともにアルカリの雰囲気 (フリーデル氏塩の生成過程で水酸化イオンの濃度が上昇する) が形成され、コンクリートの膨張が発生するものと考えられている⁹⁾。また、デンマーク法では、高温かつ高アルカリ雰囲気での促進養生であるので、全体の膨張量が大きくなり、残存膨張性の有無の判定が容易になるという特徴がある。それに対して、JCI-DD2 法では、採取時や湿気槽養生期間中にコアからアルカリが溶出するため、長期間が経過した構造物からのコアはほとんど膨張が発生しないことが問題になっている⁹⁾。コアによる残存膨張性の評価の適否に関しては、表-1 に示すように、当時の建設省法 (温度 38℃、湿度 95% 以上の湿気槽養生) によって「残存膨張性なし」と判定された橋梁にもその後 ASR によるひび割れの進展が認められることから判断すると、川砂や川砂利中の安山岩や流紋岩を主要な岩種とする富山県の ASR 劣化橋梁の評価には、より厳しい養生条件であるデンマーク法 (飽和 NaCl 溶液浸せき養生) が適しているようであった。

表-1 に示す 7 橋梁で実施したデンマーク法の判定結果を比較すると、図-4 に示すように、中央部の 2 橋のコアの膨張率は骨材のアルカリシリカ反応性が「有害」と判定される 0.4% を超えており、西部のものは 0.4% を超えているものと超えていないものがあり、両地域によりコアの膨張率の判定結果が相違した。また、補修が実施された 6 橋梁のうちコアの膨張率が 0.4% 以上の値となった中央部と東部の 3 橋梁は平成 18 年度に実施した外観調査によりいずれも再劣化が確認された。それに対して、コアの膨張率が骨材のアルカリシリカ反応性が「無害」と判定される 0.1% 未満の値となった西部の 1 橋梁と東部の 1 橋梁は ASR による再劣化が確認されなかった。以上の結果と表-1 に示す構造物の劣化の進行状況を比較すると、デンマーク法によるコアの膨張率より橋梁のその後の ASR の進行状況を予測することは可能であると

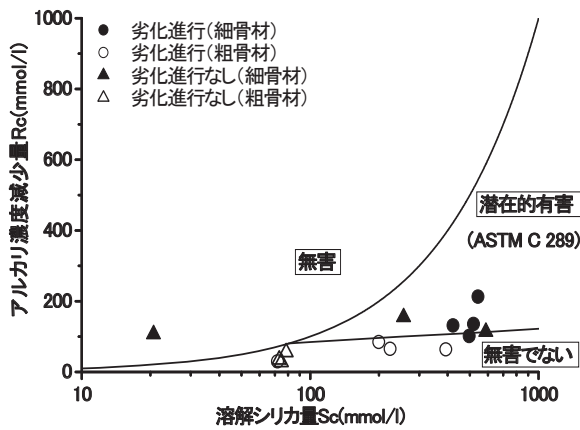


図-5 骨材のアルカリシリカ反応性試験の結果

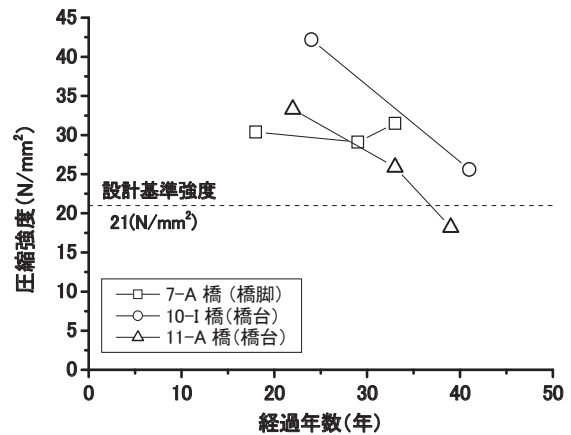


図-7 コアの圧縮強度と経過年数の関係

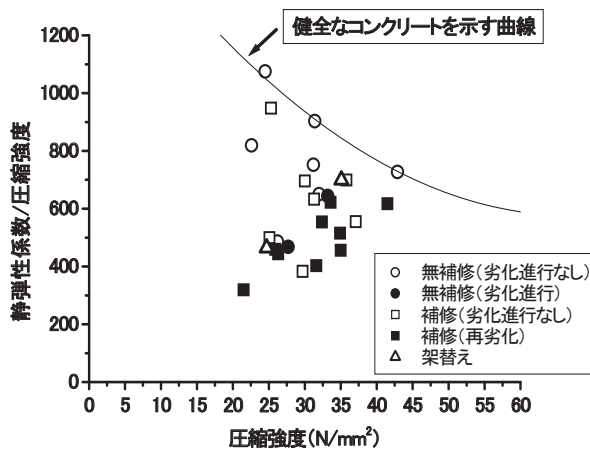


図-6 コンクリートの静弾性係数/圧縮強度の値

考えられた。なお、表-1 では膨張の有無について 2 段階の判定を行ったが、図-4 ではさらに詳しく、3 段階の判定基準を適用した。

4.2 コアから採取した骨材のアルカリシリカ反応性の判定

骨材の化学法によるアルカリシリカ反応性の結果と橋梁のその後の経年劣化の有無との関係を図-5 に示す。コアから採取した骨材の判定では、塩酸処理をすることにより付着モルタルを除去すると、骨材の溶解シリカ量およびアルカリ濃度減少量がともに増大することに注意が必要である¹¹⁾。平成 2 年度の調査では、1 つの細骨材を除いて、ほとんどが「無害でない」と判定されていたが、それらの中で、実橋梁にて「劣化進行」と判定されたものの多くは、溶解シリカ量 Sc が 200mmol/l 以上となった。通常、コアから採取した骨材の化学法の結果は、付着モルタルを削除する際の塩酸処理などの影響によってばらつきが大きくなる傾向があり、その影響は粒径の小さいもの（細骨材）ほどより顕著になることに留意する必要がある。

4.3 コアの圧縮強度および静弾性係数の測定

平成 2 年に実施した 27 橋のコンクリートの静弾性係数/圧縮強度の値と橋梁のその後の経年劣化の有無との

関係を図-6 に示す。平成 2 年度の調査では、橋脚および橋台の地上より 1.5m 付近からコアを 3 本ずつ採取し、その平均値を測定値とした。図中において測定値が原点に近づくにつれて ASR による劣化度がより大きいものと判定できる。橋脚および橋台に使用されたコンクリートの設計基準強度 (21N/mm^2) と比較して、ASR が発生したコアは圧縮強度と比較して静弾性係数が大きく低下している特徴があり、既往の報告¹²⁾ と一致した。実橋梁で劣化進行（無補修）および再劣化（補修）と判定されたものは、コアの静弾性係数/圧縮強度の値が 600 以下のものに多く認められた。これらの橋梁は、平成 2 年の調査時点で ASR がすでにかなり進行していたものと推察できた。それに対して、補修なしで「劣化進行なし」のものは、健全なコンクリートを示す曲線付近に分布しており、これらの橋梁はもともと ASR の発生が軽微であったことによるものと推察できた。

橋脚および橋台（いずれも防水塗装有り）から採取したコアの圧縮強度の経年変化の一例を図-7 に示す。コアの採取位置は前回の調査位置の近傍とした。10-I 跨線橋の橋台は、補修後 17 年が経過しているが、コンクリートの圧縮強度が 61%、静弾性係数が 83% にそれぞれ低下していた。同様に、11-A 跨線橋の橋台は、コンクリートの圧縮強度が 55%、静弾性係数が 49% にそれぞれ低下していた。このように、補修を実施した後でも、コンクリートに残存膨張性がある場合にはコンクリートの圧縮強度および静弾性係数は大きく低下する傾向があった。

5. ASR 劣化橋梁に適用した補修・補強効果の検証

5.1 橋台および橋脚の補修効果の検証

ASR 劣化橋脚に適用された補修・補強の変状を写真-3 に示す。橋台の塗膜の劣化状況の一例を写真-3(a)、(b) に示す。当時の補修材料は、総プロの提案に従った ASR 対策仕様の柔軟性エポキシ塗料（塗膜の厚さ：約 1mm）

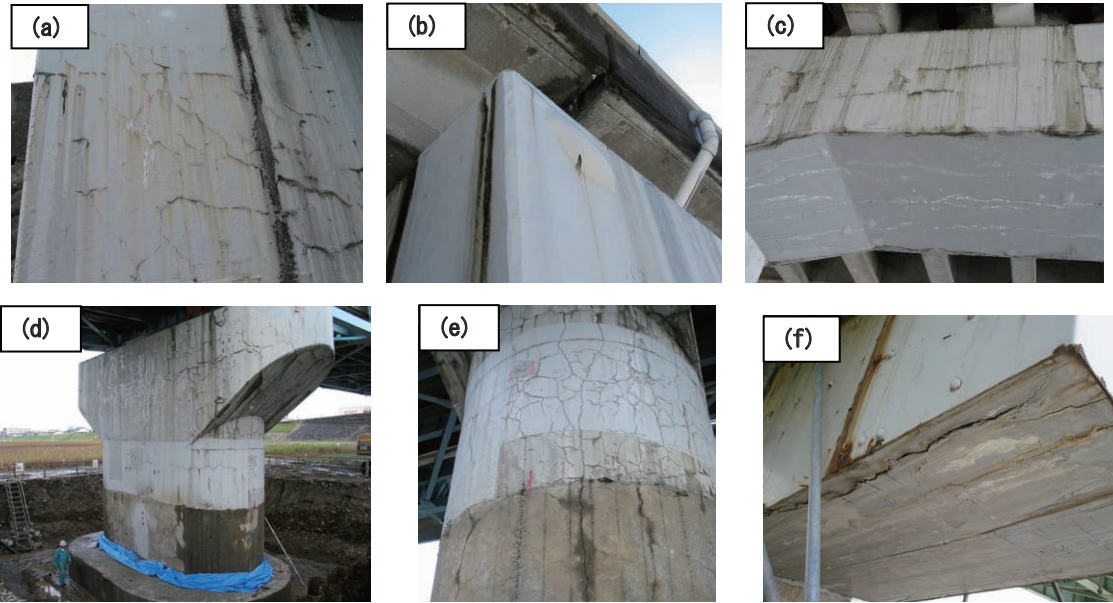


写真-3 ASR劣化橋脚に適用された補修・補強材の変状

であり、コンクリート躯体のひび割れにはエポキシ樹脂の注入が実施された。塗膜表面にひび割れが発生した時期は特定できないが、塗膜にひび割れのある箇所ではコンクリート躯体にもほぼ同様のひび割れが生じていたことから判断すると、コンクリートのひび割れに追従できなくなった時点で塗膜の表面がコンクリート躯体と同様に割れたものと推察できた。この原因は、補修材料の弾性的な性質の消失にともなう塗膜の追随性の低下によるものであった。また、塗膜のはく離と塗膜のひび割れから白色の析出物が多量に滲出していることから判断すると、橋台の背面や上部工の伸縮装置からの水分供給が塗膜自身の耐久性能を大きく低下させているものと考えられた。コンクリート標準示方書[維持管理編]¹³⁾では、橋台や擁壁などの背面に盛土や埋戻し土があり、常時水の供給がある部位には、通常の補修工法が適用できないことが明記されている。実際、富山県内の橋台で表面被覆したものは、比較的早期に塗膜の変状が発生したことから、橋台はコンクリートの残存膨張性が不明である時点では表面被覆をすぐに実施しないことが望ましかった。同様に、石川県のASR対策委員会が作成したASR劣化橋梁の維持管理の手引き(案)¹⁴⁾でも早期に再劣化が発生しやすい橋台などはひび割れの注入のみを実施し、経過観察しながら維持管理することを推奨している。

橋脚・はり部の塗膜のひび割れ状況を写真-3(c)に示す。ラーメン式の橋脚・はり部のひび割れは主鉄筋に沿った水平方向に連続して発生しており、下面のひび割れからは白色の析出物が滲出していた。その位置は昭和62年にひび割れ注入した位置とほぼ一致しており、ASRによる膨張が継続したために、ひび割れが再度開口したものであった。また、はり部の張出部には、ボール状の大きなふくれが発生し、その内部は水で満たされていた。

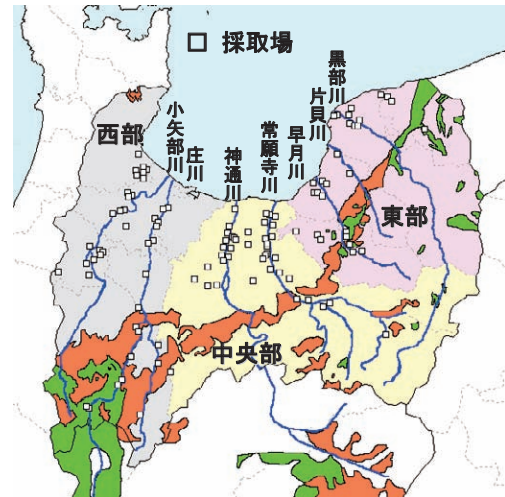


図-8 富山県の反応性岩体の分布と採取場の位置¹⁰⁾

本橋脚のはり部は、伸縮装置からの止水対策がなされておらず、上部工から排水の供給を受ける部位であり、冬期間にふくれが拡大したことから、ふくれの原因は消雪装置からの水の供給によるものであった。また、はり部の天端は上部工の影響により塗装が施工できないことから、天端の未塗装部より水分が容易に浸入するものと推察された。特に、跨線橋などの消雪装置を有する橋梁は、消雪水の影響を受けるので、はり部の塗膜のふくれやがれ、破損などが発生しやすかった。

5.2 鉄筋破断が発生した橋脚の補修効果の検証

鉄筋破断が発生した橋脚の塗膜全面にひび割れが生じた再劣化状況を写真-3(d)に示す。本橋脚では、補修後約5年で塗膜表面にひび割れが発生しており、その後、ASRの進行とともにひび割れが橋脚全面に進展した。また、平成17年度に富山県が実施した橋梁調査ではり部のスターラップに鉄筋破断が発見され、平成18年度に橋脚のはり部および柱部が打ち替えられた¹⁵⁾。橋脚の部位を

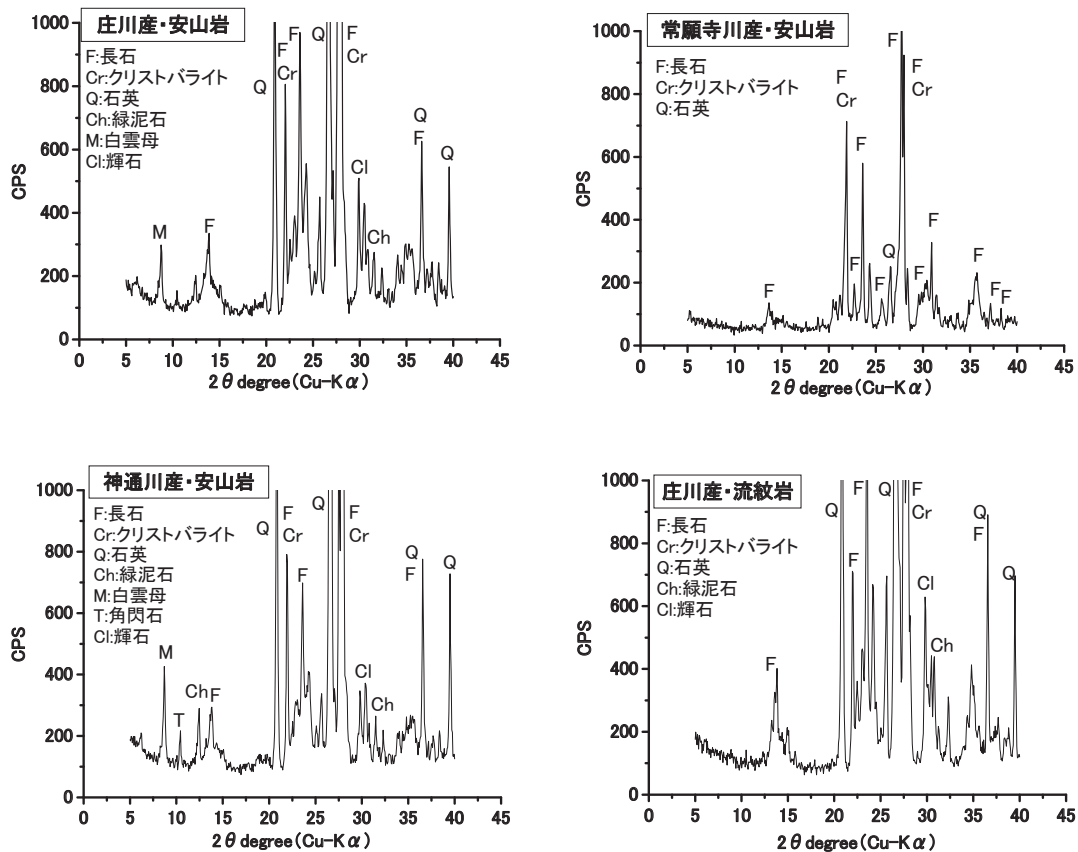


図-9 川砂利中の安山岩および流紋岩粒子の粉末 X 線回折の結果

比較すると、はり部は柱部よりもひび割れ密度が大きく、2mm 以上のひび割れの発生が顕著であった。また、塗膜の弾性的な性質は完全に失われており、コンクリート躯体のひび割れと同様に塗膜も亀甲状に割れていた。橋脚のはり部では、スターラップの折り曲げ加工部では鉄筋破断が 10 箇所発生していたが、水平方向のひび割れや段差は観察されなかった。また、橋脚の柱部では、水平方向に連続したひび割れが複数発生しており、それらははり部の主鉄筋を取り囲む、橋脚天端より 1m 下がったスターラップの末端位置、柱部の主鉄筋の段落とし位置とそれぞれ一致していた。このことから、橋脚では鉄筋量が増える位置が ASR による膨張の弱点部になっていた。また、コンクリートの打継ぎ位置は、柱部の全周にわたってひび割れが発生しており、解体調査の結果よりこの箇所は打継ぎ面のレイタンス層が除去されておらず、コンクリートが一体化していなかったことが原因であったことが判明した。したがって、ASR による深刻なひび割れの発生は、鉄筋破断の箇所だけでなく、コンクリート躯体の配筋不足や施工不良にも起因するものがあることに留意する必要がある。

5.3 地中部にある橋脚の補修効果の検証

橋脚・柱部の地中部におけるひび割れ状況を写真-3(e)に示す。橋脚・柱部は、はり部から流下する雨水の水みちに沿って約 1mm の鉛直方向のひび割れが発生して

おり、それらは塗膜がない地中部にも繋がっていた。地中部では 1mm 以上のひび割れがより多く発生していた。また、ケーソンの頂面やその側面においても 1~2mm のひび割れが発生しており、特に柱部からの水みちにあたる河川の上流・下流部におけるケーソンの頂面にひび割れの発生が顕著であった。地中部は温度変化の影響を受けにくく、環境が安定しているが、地中の柱部やケーソンも地上部と同様に ASR により劣化が進行している場合があることを調査時に留意すべきである¹⁶⁾。また、本橋脚では地中部は補修されておらず、地中部のひび割れから浸透した地下水や河川水が柱部の塗膜とコンクリート躯体との間に滞留したことも再劣化の原因となったと推察される。地中部は地下水の影響により遮水が困難であることや、調査には大規模な掘削が伴うことなどの理由で、地中部の ASR の対策は実施されていないのが実状である。しかし、橋脚の地上部だけの補修だけでは十分な効果が得られないのは当然であり、地中部の ASR 対策の基本的な考え方を提示する時期にきている¹⁶⁾。

5.4 鋼板接着工法を適用した橋脚の補強効果の検証

鋼板接着工法（昭和 43 年に竣工し、ASR の発生後、平成 2 年頃に鋼板接着工法を実施）によりはり部を補強した橋脚のはり下面のかぶりの離れ状況を写真-3(f)に示す。本橋脚のはり部は、ASR によるひび割れが顕著となった段階で、はりの形状を保持する目的で、はり部の

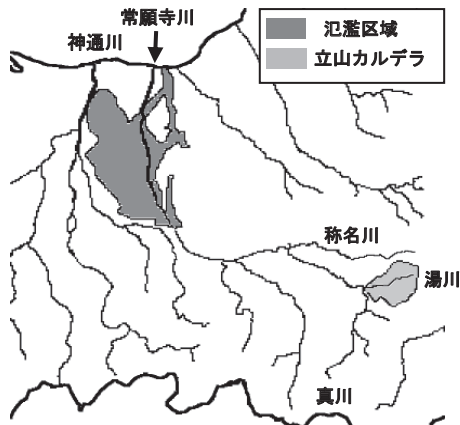


図-10 立山カルデラと常願寺川の氾濫区域¹⁶⁾

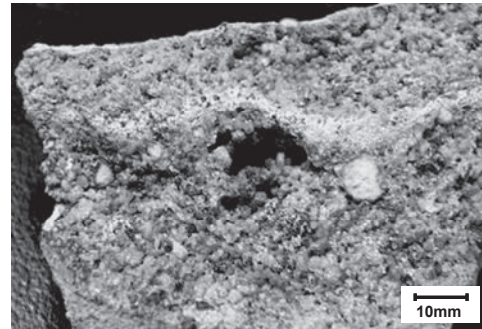


写真-4 玉滴石の岩塊の外観

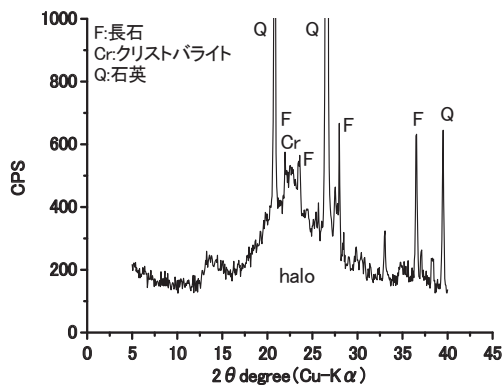


図-11 玉滴石の粉末X線回折の結果

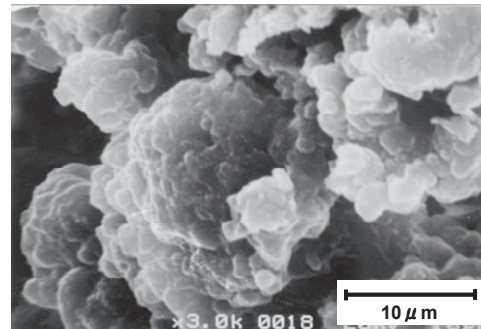


写真-5 玉滴石のSEM観察の結果

側面をひび割れ注入後に、鋼板接着（鋼板厚さ：9mm）により補強したものである。鋼板接着により補強されていないより下面に膨張が集中したために、鋼板を止めるアンカーボルトの末端位置で鋼板に平行な方向に割れが発生し、ASR 膨張が進行するとともに鋼板とかぶり为一体となりはく離したものと想定された。また、平成 18 年度の調査結果より、橋梁のジョイントからの水の影響で鋼板自体の腐食もかなり進行しているのが確認された。ASR 劣化橋脚・はり部における鋼板接着は、ASR の進行により補強した部位の周辺に新たな変形が生じること、路面排水による腐食が発生すること、鋼板接着した部位の内部コンクリート状態が確認できなくなること、などが現地調査で確認された。なお、鋼板接着後の鋼板の部分的な取替えは困難であり、本橋脚は全面的な打替えを現在計画中である。

6. 富山県の反応性骨材の岩石・鉱物学的特徴とアルカリシリカ反応性

6.1 主要な河川水系と反応性骨材の岩石学的特徴

富山県における反応性岩体の分布と採石場の位置図を図-8 に示す¹⁰⁾。また、富山県の主要な河川水系の代表的な反応性の岩種である安山岩粒子および流紋岩粒子の粉末X線回折の結果を図-9 に示す。庄川および神通川産

の川砂利中の安山岩粒子にはクリストバライトが含まれており、安山岩の含有鉱物の種類や粉末X線回折の主要な回折角度の位置に大きな相違が認められないことから、それらは同一の岩体を起源とするものと推察された。これは、庄川および神通川の上流域に分布するグリーンタフの岩体が反応性骨材の供給源となっていることを示唆するものであった。また、別途、測定した庄川の下流域の平野部で採取される陸砂利中の安山岩粒子の粉末X線回折の回折角度の位置は上流域の川砂利中の安山岩粒子とほぼ同一であったことから判断すると、庄川の下流域の陸砂利は庄川の氾濫により堆積したものであることが明らかになった。一方、常願寺川産の川砂利中の安山岩粒子はクリストバライトを多く含有しているが、庄川や神通川産のものとは岩石の構成比率や造岩鉱物の種類が相違していた。これは、常願寺川の反応性骨材は最上流域にある立山カルデラの岩体からのものであることによるものであった。また、庄川産の流紋岩はクリストバライトを含有しており、安山岩と同様に反応性を有するものと判断できた。

6.2 常願寺川産骨材のアルカリシリカ反応性

富山県内では常願寺川水系の骨材を使用したコンクリートで深刻な ASR による劣化が発生している^{4), 5)}。常願寺川は立山連峰を源流域とし、最上流域は立山カルデラが位置し、カルデラ内では 1858 年に発生した飛越地震

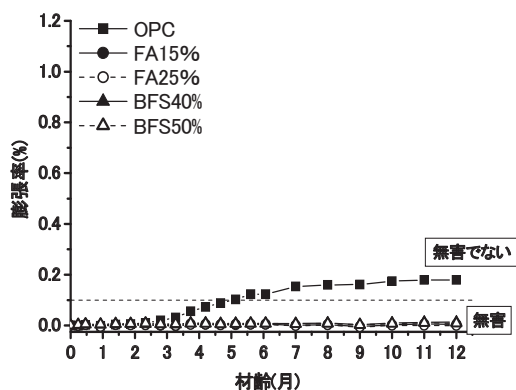


図-12 湿気槽養生法によるコンクリート試験体の膨張挙動

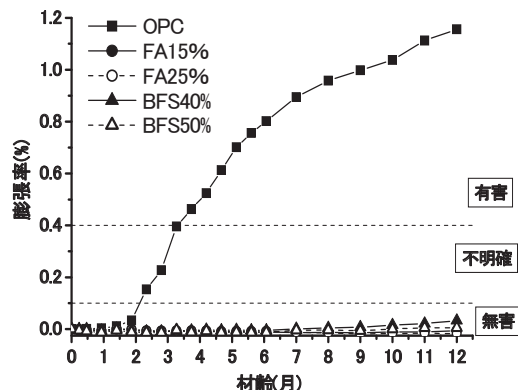


図-13 飽和NaCl溶液浸せき法によるコンクリート試験体の膨張挙動

により崩壊した土砂や風化した火山岩が大量に堆積している。立山カルデラ周辺の河川とその氾濫区域を図-10に示す¹⁷⁾。立山カルデラを流れる常願寺川支流の湯川の右岸沿いには、安山岩や溶結凝灰岩の岩体が帯状に広く分布するとともに、その最上流には安山岩および流紋岩の岩体が存在している。また、立山カルデラの下流で湯川と合流する真川右岸にも安山岩の岩体が存在している。したがって、常願寺川支流の両河川が、県内でもっとも反応性が高いとされる火山岩系の岩石（安山岩、流紋岩および溶結凝灰岩）の供給源となっていることが理解できる。立山温泉新湯（標高1,620m付近）から湯川に注ぐ流出口の湖面露頭より採取した岩塊（玉滴石）を写真-4に示す。ここでは、直径1~2mmの透明なガラス状の粒子が集積した魚卵状の蛋白石（オパール）を産出している。玉滴石の粉末X線回折の結果を図-11に示す。この岩塊には反応性鉱物としてクリストバライトがX線回折により確認されるとともに、X線回折図の22度付近を中心に幅広いハロー（halo）が存在することから、非晶質のシリカ鉱物である蛋白石（オパール）が含まれていることを示唆している。玉滴石の走査電子顕微鏡（SEM）による観察結果を写真-5に示す。玉滴石は1~2 μ mの小さな球形の集合体から構成されている。常願寺川産の川砂および川砂利はこのような蛋白石を含有している可能性があり、これがごくわずかに骨材中に混入している場合でもASRが発生することを示唆するものである。一方、飛越地震時に常願寺川で発生した土石流の氾濫区域は、図-10に示すように富山市街地の東側にまで広く分布していることから判断すると、常願寺川と神通川に挟まれた富山市近郊の平野部で採取されている陸砂利は常願寺川産の骨材と同種のものとして取り扱うべきであると言える。

7. 富山県の反応性骨材に対するASR抑制対策の検証

富山県内の河川産骨材には反応性が高いオパールやクリストバライトを含有する岩種が混入する可能性があ

り、ASR抑制対策はアルカリ総量の規制よりも混合セメントの使用が望ましいと指摘されている^{18), 19)}。促進養生を実施したコンクリート試験体の膨張率の変化を図-12および図-13に示す。湿気槽養生法では、常願寺川産の川砂および川砂利を用いたコンクリートは、材齢3カ月より膨張が始まり、材齢6カ月では試験体に多数のひび割れが発生した。一方、飽和NaCl溶液浸せき養生法では、材齢2カ月より膨張が始まり、コンクリート試験体の表面にポップアウトが発生し、その後材齢の経過とともに膨張率が増大した。コンクリート表面に発生したポップアウトやASRゲルの滲出は表面付近の川砂がASRを生じたことによるものである。実際、常願寺川産の川砂に含有するオパールやクリストバライトの反応によるポップアウトの事例は川村ら²⁰⁾によってもすでに報告されている。一方、フライアッシュで15%および25%置換したものや、高炉スラグ微粉末で50%置換したものは1年が経過してもコンクリートの膨張はまったく発生せず、コンクリートのひび割れやポップアウトも観察されなかった。これらの結果より、現在、富山県にて流通している川砂および川砂利の中でもっとも反応性が高い常願寺川産の骨材に対しては、現行のJIS A 5308-2003の規定のASR抑制対策の一つであるフライアッシュおよび高炉スラグ微粉末をセメントの一部と置換して使用することにより、コンクリートのASRによる膨張を効果的に抑制できることが検証された。

8. 富山県のASR劣化橋梁に対する維持管理手法の一提案

富山県のASR劣化構造物は、補修後に再劣化が多く発生しており、従来のひび割れ注入と表面被覆を組み合わせた補修工法により対応できないものが多いことが判明した。したがって、富山県内のASR劣化構造物の維持管理では、河川水系ごとの反応性骨材の特徴と構造物のASR劣化の予測に基づいて、経済的かつ合理的な維持管理手法を提案する必要がある。富山県におけるASR劣化

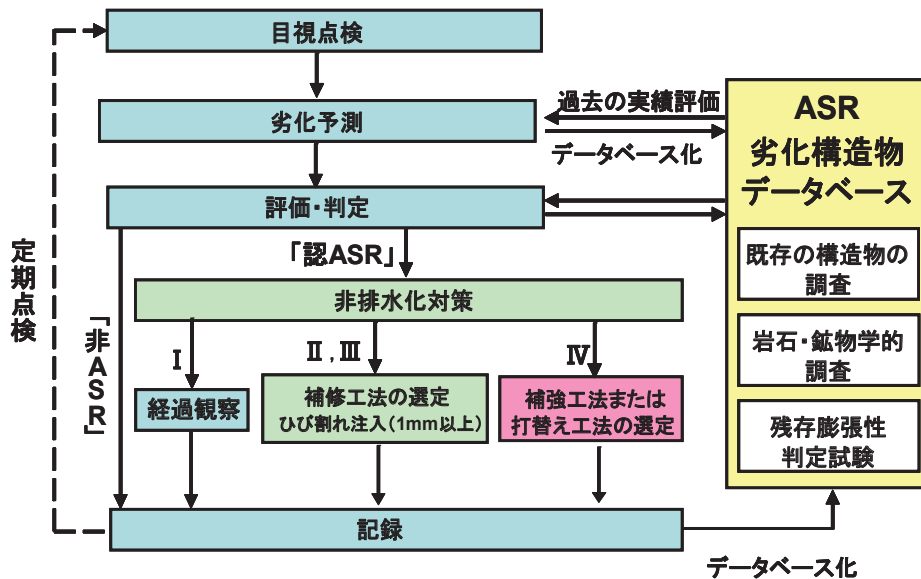


図-14 富山県におけるASR劣化橋梁の維持管理手法の一提案



写真-6 ASR劣化構造物（橋台）のひび割れによる劣化度ランクの一例

〔I：軽微なひび割れ，II：局所的なひび割れ（幅1mm以上），III：連続的なひび割れ（幅1mm以上）
IV：鉄筋破断をともなう連続的な割れ（幅5mm以上）〕

橋梁の維持管理手法の一提案を図-14に示す。既設コンクリート構造物の診断（劣化予測や評価・判定，対策など）の際には，ASR劣化構造物のデータベースを活用することを前提としており，厳しい地方財政の現状を考慮して，過去の点検や詳細調査，補修履歴などを参考にして，評価・判定および対策を実施することを基本としている。現在，金沢大学では，富山県内のASR劣化構造物の河川水系ごとの約50事例のデータベースを所持している。当然，データベースにない地域でのASR劣化構造物の調査時には，反応性骨材の岩石・鉱物学的調査（偏光顕微鏡観察，粉末X線回折など）やコアによる調査（圧縮強度，残存膨張率など）を含めた詳細調査を実施して，データベースの蓄積をはかる必要がある。また，目視による点検で「ASRである（認ASR）」と評価・判定されたものは，伸縮装置の非排水化や橋面防水工，橋面排水管などの排水装置の改修による上部工の止水対策を計画するとともに，野村²¹⁾が富山県内の高速道路で実施したひび割れの目視観察による劣化度ランク（I～IV）の分類を使用して，以下の手順で補修・補強対策を選定することを著者は提案する。なお，ASR劣化構造物（橋台）のひび割れによる劣化度ランク（I，II，IIIおよびIV）の一例を写真-6に示す。

劣化度ランク「I」と判定されたものは，補修を実施せず2年に1回程度定期的に点検する。劣化度ランク「II」および「III」と判定されたものは，建設後の経過年数や点検結果のみで，ASRが収束しているかの判断ができないことから，ASRが継続し，将来的にASRによる劣化進行があることを前提とした対策を実施する。これまでのASR調査より，コンクリート表面における幅1mm以上のひび割れはかぶり部を貫通して鉄筋位置に到達していることが多いことが判明している¹⁵⁾。このため，ひび割れ注入工は，ひび割れからの浸透水による内部鉄筋の腐食を防止する観点から，幅1mm以上のひび割れのみを対象として，浸透水による影響を受けにくいセメント系注入材（PCM）によるひび割れ注入を応急的な対策として実施する。また，幅1mm以下のひび割れは，状況に応じて経過を記録しておくに留める。上記の対策の2，3年経過後に，ひび割れの進展や新たな変状が観察されない場合は，ASRが収束したものと判断して良いことを明記する。また，表面被覆工法は，外観目視によるASRの劣化進行や被覆内部に存在するひび割れの経年変化の把握を困難にすることや，橋脚や橋台では表面被覆により外部からの水分供給を遮断しても，コンクリートに内在していた水分によりASRは進行すること，表面被覆により内在水分

が滞留し、ASR を進行させる可能性があることなどの理由で、景観・修景を考慮する場合や橋梁の上部工など耐久性の確保が要求される場合を除いて、表面被覆による防水対策は基本的に実施しないものとする¹⁴⁾。劣化度ランク「IV」と判定されたものは、構造物の重要性や残存供用年数、LCCなどを考慮して、解体撤去や部分的打替え、供用制限も含めた、抜本的な対策を選定するものとする。この際に、ASRによる劣化が著しい部位は、できるだけ劣化部分を取り除くことが望ましい。特に、30年以上が経過した構造物では、橋梁設計書が現存しないことや、また配筋が必ずしも設計と一致していないことがあり、配筋不良（配筋量の不足や定着不足）や施工不良などの人為的な要因により、ASRによる構造物の劣化が深刻化している事例があることも判明している^{15)、16)}。このため、劣化度ランク「IV」と判定されたものは、割れや段差が発生した箇所を局部的にはつり、既設構造物の配筋状況を確認した上で、補修・補強設計を策定することにした。

9. 結論

本研究では、富山県内のASRが発生した27橋梁の実態調査に基づいて、ASR劣化による橋梁の経年変化と補修・補強の効果を検証するとともに、ASR劣化橋梁で使用された河川産骨材の岩石・鉱物学的な特徴およびアルカリシリカ反応性より、富山県で実施が可能なASR劣化橋梁の河川水系ごとの区分とその維持管理手法を提案した。

本研究で得られた主要な結果をまとめると、以下のようである。

- 1) 県内の河川産骨材は、河川水系ごとに反応性岩種の種類（安山岩、流紋岩および溶結凝灰岩）やその混合割合が相違しており、この地域の骨材はアルカリシリカ反応性の大小により3地域（東部、中央部および西部）に分類することができた。
- 2) 表面被覆を実施した16橋梁で再劣化が生じていたものは11橋（約70%）あり、これらはアルカリシリカ反応性の高い、常願寺川、神通川の骨材を使用した中央部の地域に集中していた。
- 3) コアの残存膨張性試験の適否に関して、安山岩を主要な反応性の岩種とするコンクリートにはJCI-DD2法よりもデンマーク法が適しており、後者のコアの膨張率が0.4%以上の値を示すものは実橋梁でのASRの進行が確認された。
- 4) コアの力学的性質に関して、コンクリートの静弾性係数/圧縮強度の値は実橋梁のASRの劣化度（進行度）を推定するのに有効な指標となった。
- 5) 表面被覆の効果に関して、橋台では塗膜の変状が多く発生しており、1mm以上のひび割れのみを注

入しておくことが有効であると判断した。また、消雪装置がある橋脚では、消雪水の影響によりはり部の塗膜の変状が多く発生しており、補修以前に路面排水の処理を優先的に実施すべきであった。

- 6) 地中部のフーチングやケーソンにも深刻なASR劣化が発生している場合があり、特に大きな河川内の橋梁では点検および対策を実施する際に留意すべき事項であった。
- 7) 常願寺川産骨材中の安山岩は反応性の高いクリストバライトを多く含有しており、庄川産や神通川産のものとはその含有量が相違していた。また、常願寺川産骨材は蛋白石（オパール）を含有している可能性があった。
- 8) 県内の河川産骨材のASR抑制対策に関して、JIS A 5308-2003に準拠した混合セメントを使用することによりASRの発生を効果的に抑制できた。
- 9) 県内のASR劣化構造物の維持管理に関して、河川水系ごとの反応性骨材の特徴と構造物の劣化予測のデータベースに基づいて、その地域の実情と経済性を考慮した構造物の維持管理手法を提案することができた。

謝辞：本研究を実施するにあたってご指導いただいた金沢大学名誉教授川村満紀先生並びに調査・試験においてご協力いただいた西日本旅客鉄道(株)平野貴宣氏、金沢大学山戸博晃氏および尾花祥隆氏に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 例えば 日本地質学会：日本地方地質誌4. 中部地方，朝倉書店，2006
- 2) 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, pp. 105-122, 2004
- 3) 野村昌弘，青山實伸，鳥居和之：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. 4, pp. 1065-1070, 2004
- 4) 大代武志，平野貴宣，鳥居和之：富山県の反応性骨材とASR劣化構造物の特徴，コンクリート工学年次論文集，Vol. 29, No. 1, pp. 1251-1256, 2007
- 5) 大代武志，平野貴宣，西川元気，鳥居和之：ASR劣化構造物の経年劣化と補修効果の検証，コンクリート工学年次論文集，Vol. 30, No. 1, pp. 1047-1052, 2008
- 6) 竹内勝信，川村満紀，鳥居和之：アルカリシリカ反応によって劣化したコンクリートの組織と残留膨張性の予測，材料，Vol. 43, No. 491, pp. 963-969, 1994
- 7) (財)土木研究センター：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（土木構造物に関する研究成果）アルカリ骨材反応被害構造物（土木）の補修・補強指針（案），pp. 221-289, 1989
- 8) Danish Technological Institute TI-B 51: Test Method for Alkali Silica Reactivity of Sand - Danish Method for Porous Flint, 1985

- 9) 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.
- 10) 藤井昭二: 10 万分 1 富山県地質図説明書, 富山県, 1992
- 11) 鳥居和之, 杉山彰徳, 酒井賢太: 再生骨材コンクリートのアルカリシリカ反応性の評価と抑制対策に関する研究, 土木学会論文集 G, Vol. 63, No. 4, pp. 313-325, 2007
- 12) 小林一輔, 森弥也, 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. 460, pp. 151-154, 1993
- 13) 土木学会: 2007 年制定コンクリート標準示方書[維持管理編], pp. 155-176, 2008
- 14) 石川県道路整備課: ASR 劣化橋梁の維持管理の手引き (案), 2005
- 15) 大代武志, 原田政彦, 中野政信, 中狭 靖: コンクリート橋脚の ASR による再劣化と対策工法の選定, コンクリート工学, Vol. 44, No. 12, pp. 31-38, 2006
- 16) 鳥居和之, 宮村雅之, 湊 俊彦, 西川元気: 能登有料道路の基礎構造物の ASR 劣化とその対策, コンクリート工学, Vol. 46, No. 4, pp. 27-33, 2008
- 17) 廣瀬誠: 越中中山大鷲崩れ—古絵図が語る安政の大災害—, 立山カルデラ砂防博物館, pp. 34-35, 1998
- 18) 川村満紀, 榑場重正: アルカリ・シリカ反応とその防止対策, 土木学会論文集, No. 348, pp. 13-26, 1984
- 19) 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. 696, pp. 1-9, 2005.
- 20) 川村満紀, 竹本邦夫, 榑場重正: 我国におけるアルカリ骨材反応の 2, 3 の実例, セメント技術年報, No. 37, pp. 139-139, 1983
- 21) 野村昌弘: 北陸地方におけるコンクリート用骨材のアルカリシリカ反応性の評価に関する研究, 金沢大学学位請求論文, pp. 119-145, 2007

(原稿受理年月日: 2008 年 5 月 1 日)

A Proposal for the Mitigation and Maintenance Procedure Based on
the Survey on Actual Condition of ASR-affected Bridges in Toyama Prefecture
By Takeshi Daidai and Kazuyuki Torii

Concrete Research and Technology, Vol.20, No.1, Jan.2009

Synopsis : This paper describes the results of the survey on actual condition of 27 ASR-affected bridges in Toyama Prefecture ,where it has been carried out twice in 1990 and 2006 in order to verify the effectiveness of repair and strengthening method applied to them. Especially, by examining the mineralogical feature and alkali-silica reactivity of river sands and gravels used in concrete, the progress of deterioration of concrete with time due to ASR was investigated based on the regional classification of river systems in Toyama Prefecture. Furthermore, the practical ASR mitigation and maintenance procedure in this district was proposed by taking characteristics of reactive aggregates into considerations.

Keywords : Alkali silica reaction (ASR), Survey of actual condition, Reactive aggregate, Repair and strengthening, ASR mitigation, Maintenance