論文　ASR 劣化構造物の経年劣化と補修効果の検証

大代　武志[*1]・平野　貴宣[*2]・西川　元気[*3]・鳥居　和之[*4]

要旨：富山県では，県内の主要な河川に架かる 27 橋梁の ASR による劣化状況を平成 2 年度に調べている。本研究は，調査対象 27 橋梁のその後の経年変化と補修効果を調べるとともに，橋梁で使用された反応性骨材の岩石学的特徴に基づいて，富山県での橋梁の地域的な ASR 劣化状況の分類を試みたものである。その結果，富山県の ASR は河川産骨材中の安山岩によるものであり，その含有率と反応性から地域的な区別ができること，安山岩を多く含む骨材を使用したコンクリートほど ASR が進行し，補修後の再劣化が発生していること，構造物の経年劣化はコアの残存膨張性試験より予測できること，などが明らかとなった。

キーワード：ASR，補修，経年変化，点検調査，河川産骨材

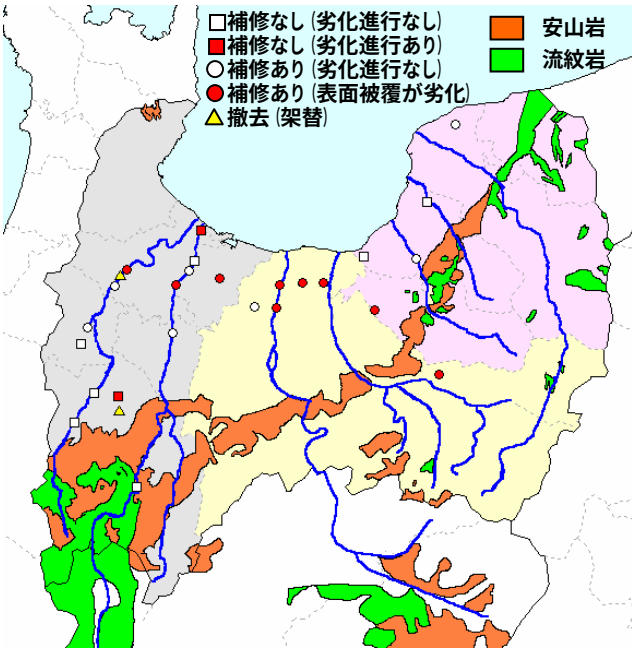
1．はじめに

北陸地方では，アルカリシリカ反応（以下，ASR）による劣化が生じている構造物が多く報告されている。富山県では，平成 2 年度に ASR の疑いのある橋梁の下部工（調査時の橋梁の建設後の経過年数は 15～28 年である）を対象に詳細な調査が実施され，構造物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が調べられた[1)]。一方，富山県では，ASR の進行を抑制する対策として，総プロ[2)]の規格に準じた，ひび割れ注入と表面被覆による補修工法を主に採用してきた。しかし，富山県では，冬期間における凍結融解や凍結防止剤の散布など，他地域に比べて厳しい環境条件が重なり，補修後に再劣化するものが多くあった。また，それらの構造物の補修後の点検や追跡調査はほとんど行われておらず，再劣化の原因がどこにあるのかが，明確になっていないのが現状である。幸いなことに，当時の ASR 劣化橋梁の現況が分かる資料が金沢大学にすべて保管されていたので，第 1 回目の調査より 16 年が経過した，平成 18 年度に第 2 回目の調査を実施し，その後の ASR の進行状況と対策（補修，補強）の適否を検証することができた。このような調査事例は全国的にも非常に少なく，ASR 劣化構造物の維持管理方法を確立する上で重要な情報を提供すると考えられる[3)]。

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とともに，橋梁で使用された反応性骨材の岩石学的特徴に基づいて，富山県での橋梁の地域的な ASR 劣化状況の分類を試みたものである。

2．ASR 劣化橋梁の地域的な分布と経年変化

富山県での ASR の経年変化の調査を実施した 27 橋梁の分布（調査橋梁は富山県の主要な河川を網羅し，図中に補修の有無や撤去橋梁を明記している）を**図－1** に示す。橋梁の建設時期は昭和 37 年から昭和 50 年であり，建設後 31 年～44 年が経過している。現地調査では，外観近傍目視により，コンクリートのひび割れや表面被覆の変状など，ASR の進行状況や補修後の再劣化に着目して検証した。平成 2 年度の調査と比較して，ASR の進行が確認できたものは 11 橋（全体の 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%），塗膜にひび割れや膨れ，剥離が生じたものが 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（8%）であった。これらの橋梁を河川水系により西部（庄



図－1　ASR 劣化橋梁の位置図

*1 金沢大学大学院　自然科学研究科環境科学専攻　（正会員）
*2 西日本旅客鉄道（株）　（正会員）
*3 鹿島建設（株）
*4 金沢大学大学院　自然科学研究科社会基盤工学専攻　教授　工博　（正会員）

川，小矢部川），中央部（常願寺川，神通川），東部（早月川，黒部川）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健全なものが多かった。富山県では河川水系毎に骨材の反応性が相違しており，反応性の高い骨材を使用した中央部の地域では，ASR が長期間継続し，補修後の再劣化が多く発生したものと考えられた。

平成 2 年度に実施したコアの残存膨張性試験（建設省法（湿気槽養生）およびデンマーク法（飽和 NaCl 溶液浸せき））の代表的な結果を**表－1** に示す。富山県の西部，中央部および東部の代表的な橋梁の平成 2 年度と平成 18 年度の外観の比較を**写真－1** に示す。橋脚・梁の張出部（西部，**写真－1（a）**参照）ではひび割れの進展や ASR ゲルの滲出が顕著であった。また，橋脚（中央部，**写真－1（b）**参照）では補修後に著しい再劣化が生じており，これらの状況は「残存膨張性あり」と判定されたコアの試験結果ともよく一致していた。それに対して，コアが「残存膨張性なし」と判定された橋台（東部，**写真－1（c）**参照）および橋脚（西部，**写真－1（d）**参照）では，補修後も大きな変状は認められず，塗膜の健全性も保持しており，平成 2 年度の段階で ASR がほぼ収束していたためと推定された。

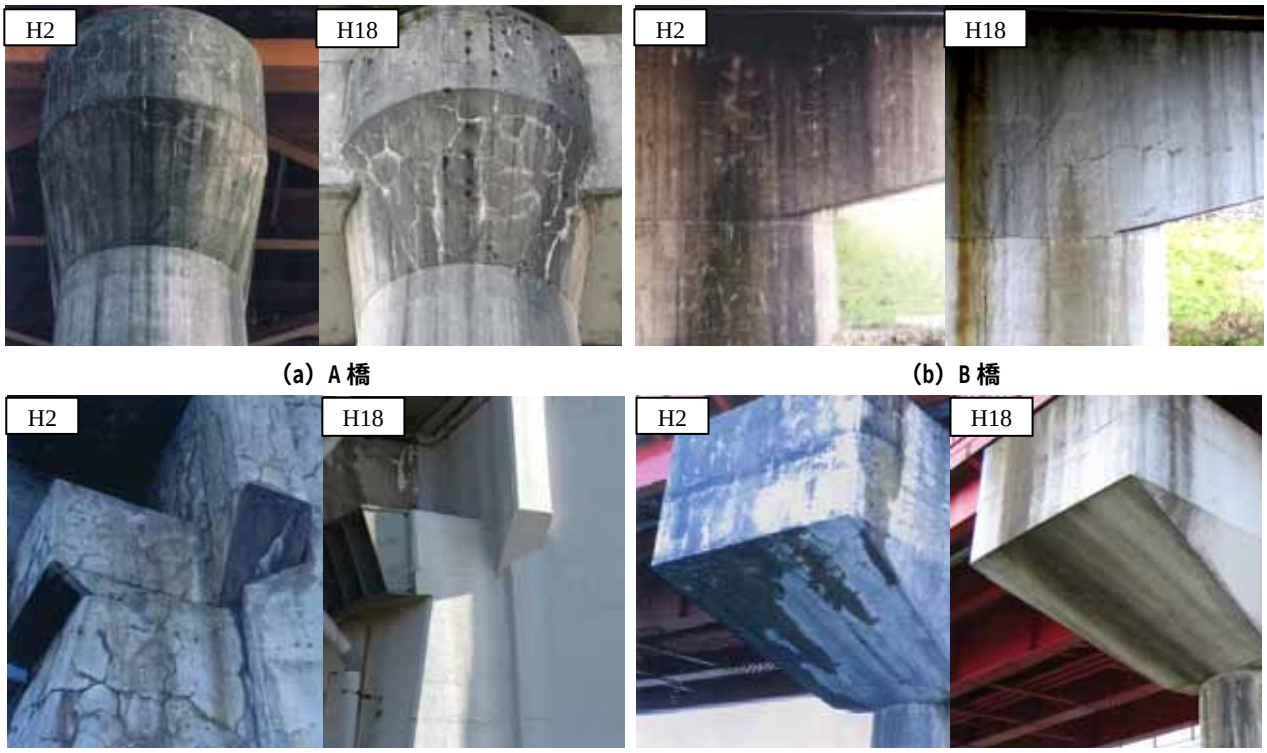
コアの残存膨張性試験の適否に関して，当時の建設省法（温度 40℃，湿度 100％の湿気槽養生）にて「残存膨張性なし」と判定されたものにも，ASR の進行によるひび割れの進展があったことから判断すると，川砂，川砂利中の安山岩（反応性鉱物：クリストバライト）を主要な岩種とする富山県の構造物には，より厳しい試験条件であるデンマーク法（飽和 NaCl 溶液浸せき養生）によるコンクリートの残存膨張性の評価が適しているようであった[4]。

表－1　橋梁の調査概要（H2 実施）

橋梁名	A 橋	B 橋	C 橋	D 橋
地域	西部	中央部	東部	西部
圧縮強度 (N/mm^2)	25.1	26.3	31.3	37.1
静弾性係数 (kN/mm^2)	12.6	11.7	19.8	20.6
建設省法判定	なし	膨張性あり	なし	なし
膨張率 (%)	0.031	0.060	-0.016	0.046
デンマーク法判定	膨張性あり	膨張性あり	なし	なし
膨張率 (%)	0.56	0.46	0.034	-0.066
補修工法	補修なし	表面塗膜	表面塗膜	表面塗膜
劣化状況 (H18)	劣化進行	劣化進行	健全	健全

3．補修した構造物の経年変化の調査事例

補修後 16 年が経過した橋台の塗膜の劣化状況を**写真－2** に示す。当時の補修材料は，総プロ[2]に準じた，ASR 対策使用の柔軟性エポキシ塗料（塗膜の厚さ：約 1mm）であり，躯体のひび割れにはエポキシ樹脂による注入が行われた。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躯体コンクリートにも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直に割れたものと推察できた。このこ



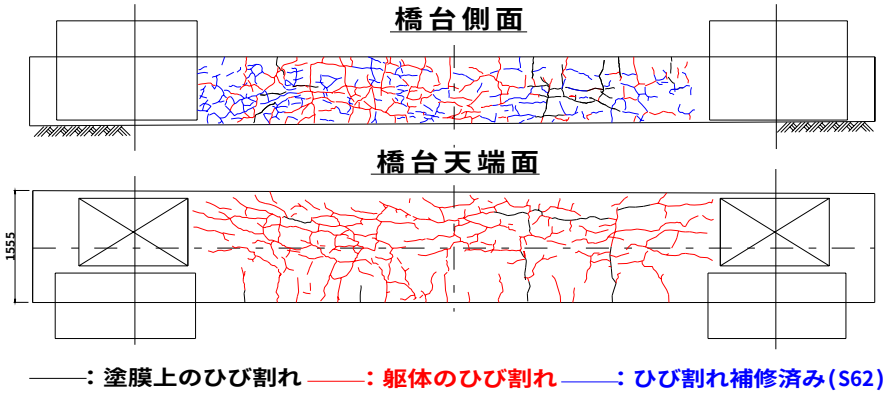
（a）A 橋　（b）B 橋　（c）C 橋　（d）D 橋

写真－1　橋梁の経年劣化の調査事例

写真－2　橋台の塗膜の劣化状況

表－2　橋台のひび割れの調査結果

	ひび割れ	0.1～0.5 mm	0.5～1.0 mm	1.0～2.0 mm	2.0mm 以上	合計 (m)	ひび割れ密度(m/m^2)
A1	塗膜	10.5	1.1	0.0	0.0	11.6	0.65
	躯体	43.9	40.7	6.2	0.4	91.2	5.08
	差	33.4	39.6	6.2	0.4	79.6	4.43
A2	塗膜	23.8	1.5	1.5	1.0	27.8	1.54
	躯体	30.1	23.5	15.5	1.1	70.2	3.88
	差	6.3	22.0	14.0	0.1	42.4	2.34



図－2　橋台のひび割れ状況

写真－3　橋脚梁下部の塗膜の劣化状況

写真－4　橋脚全面の再劣化状況

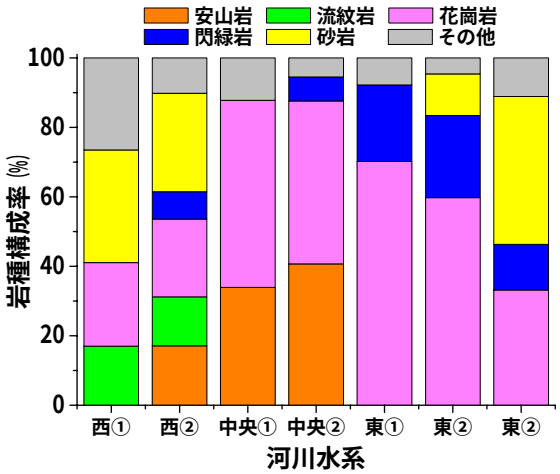
とから，補修材料の弾性的な性質の消失にともなう塗膜の追随性の低下が主要な原因であると推定された。とくに，塗膜のひび割れ部からは ASR ゲルが滲出していることから，橋台背面や伸縮装置からの水分供給が塗膜自身の耐久性能に大きく関係していると推測できた。

橋台の塗膜をすべて剥がし，塗膜のひび割れとコンクリート躯体のひび割れとの関係を調査した結果を**表－2** および**図－2** に示す。コンクリート躯体には，塗膜表面にはない，幅が 1mm 未満のひび割れが存在し，躯体で測定されたひび割れの長さおよび密度は塗膜のものと比べ 2.5 倍となった。また，幅が 1～2mm の大きなひび割れも塗膜表面に現れないものがあったことから，塗膜のひび割れは，コンクリート躯体の ASR 劣化状況を適切に反映していないものと考えられた。また，エポキシ樹脂の注入部では，ひび割れが拡大するとともに，浸透した水の影響でエポキシ樹脂の接着性が完全に失われていた。

橋脚・梁部の塗膜の劣化状況を**写真－3** に示す。橋脚・梁部の下面は塗膜の膨れや剥がれが多く発生していた。この部位では，塗膜内の水分が滞水しやすく，冬期間の凍結時に塗膜が割れ，破損することにより，塗膜の防水機能が損なわれたものと推察された。このため，ジョイントなどから水の供給のある部位では，塗膜の耐用年数は 10 年程度以下とかなり短くなるものと想定された。

橋脚の塗膜の全面にひび割れが生じた劣化状況を**写真－4** に示す。本橋脚では，補修後約 5 年で表面にひび

写真－5　補強後のかぶり部分のはく離



図－3　富山県の河川水系別の岩種構成率

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急速に橋脚全面に進展した。また，建設後約 30 年経過した時点で梁部のスターラップに，鉄筋破断が発見され，平成 16 年度に橋脚全部が打ち替えられた[5)]。

以上の結果より，常願寺川産の骨材のように，ASR による膨脹が長期にわたり継続する場合には，表面被覆は ASR の抑制にほとんど効果がないものと判断された。また，表面塗膜は，外観目視による ASR の劣化進行や経年変化の把握を困難にすることから，ASR 劣化構造物の維持管理上も望ましくなく，ASR による残存膨脹性が確かでない場合（通常，このような場合がほとんどである）には，幅 1mm 以上のひび割れのみを注入しておき，しばらく経過観察し，その状況を確認した後に，現状で考えうる，最適な補修工法を選択するのが良いと考えている。

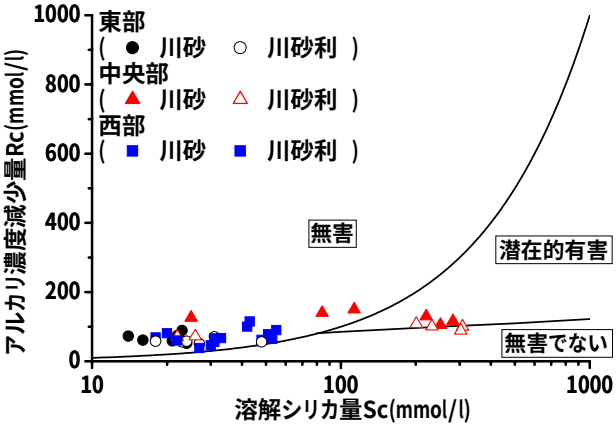
4．補強した構造物の経年変化の調査事例

近年，鉄筋破断が発生した橋脚梁部の補強に鋼板接着工法が採用されている。富山県の中央部にある，鋼板接着工法（昭和 43 年に竣工，その後，鋼板接着を実施）により梁部を補強した約 20 年が経過した橋梁のかぶり部分のはく離状況を**写真－5** に示す。本橋脚には，常願寺川産の川砂および川砂利が使用されたために，鋼板接着を採用した時点でもコンクリートの大きな残存膨張性があったものと推測される。平成 2 年度と平成 18 年度の調査の結果より，河川中に位置する橋脚では ASR によりひび割れが進行するとともに，ジョイントからの水の影響で鋼板の腐食が顕著になっていた。当時は，鋼板接着（鋼板厚さ：9mm）により ASR 膨張を積極的に拘束するという補強設計にはなっていなかったために，鋼板を止めるアンカーボルトがかぶり程度（100mm）までしか打ち込まれていなかった。このため，ASR 膨張が進行するとともに接着した鋼板がかぶりと一緒にはく離するような状態となった。現在，本橋では今後の維持管理を考慮して橋脚の打ち替えが検討されている。このように，ASR 劣化橋脚の鋼板補強では，ASR の進行による鋼板の変形や路面排水による腐食が問題になるとともに，アンカーボルトの設置位置やその本数にも十分な注意を払う必要があると考えられた。

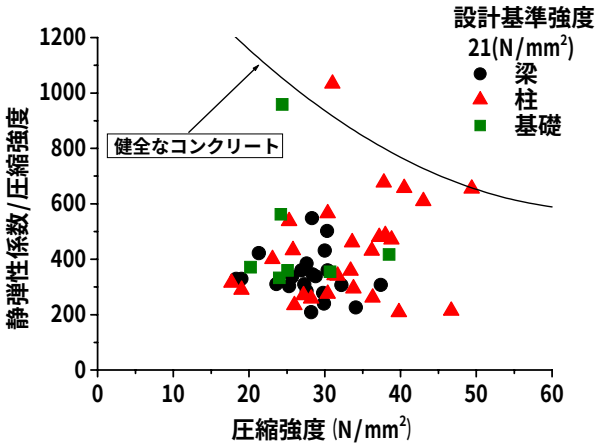
5．コンクリート用骨材の地域的な分布

本研究で調査対象とした，富山県内の７河川水系の川砂利の岩種構成率を**図－3** に示す[6)]。ASR 劣化が構造物に最も顕著にみられた，中央部（常願寺川，神通川）の川砂利は，安山岩を 30%～40%含有しており，この値はペシマムに近いものであった。また，ASR 劣化が一部の構造物にみられた，西部（庄川，小矢部川）の川砂利は安山岩を含有するものとしないものがあり，反応性骨材である流紋岩が比較的多く混入しているのが特徴であった。それに対して，ASR 劣化がほとんどみられなかった，東部（早月川，黒部川）の川砂利は花崗岩および閃緑岩が多く，安山岩は含有していなかった。このように，富山県では，コンクリートに使用された骨材の岩種構成率の相違（主に安山岩の含有率）が地域的な ASR 劣化橋梁の分布とも良く一致しているのがわかる。

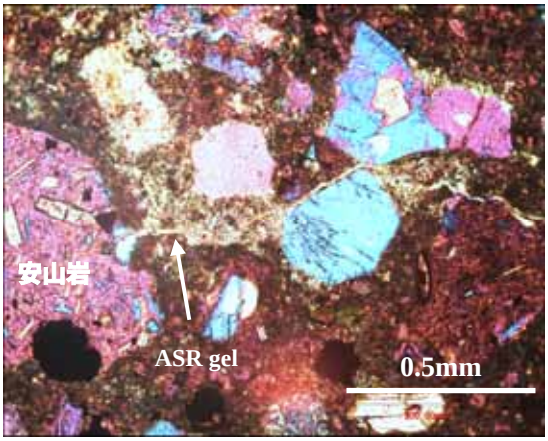
富山県の 3 地域で生産される川砂および川砂利の化学法の結果（JIS A 1145）を**図－4** に示す[6)]。中央部（常願寺川，神通川）の川砂および川砂利は溶解シリカ量が 230～350 mmol/l と高く，「無害でない」と判定されるものが多くあった。また，西部（庄川，小矢部川）の川砂，川砂利はほとんどが「無害」と判定されるが，判定基準の境界線付近（Sc/Rc＝1）に分布するものもあった。この地域は，安山岩および流紋岩の含有率が比較的高いものがあることから，化学法のみで判定するのは適切でない



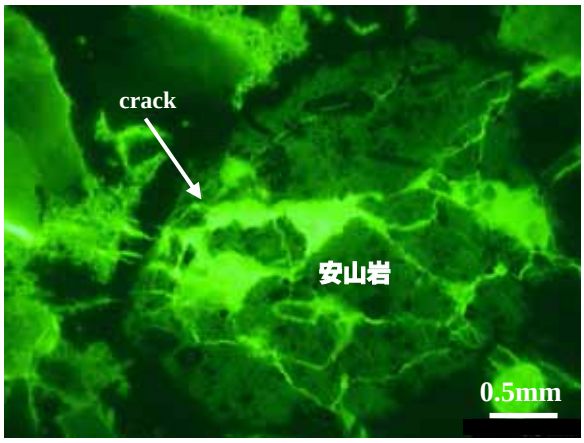
図－4　河川産骨材の化学法の判定図



図－5　コアの圧縮強度と静弾性係数の関係



写真－6　コンクリート薄片の偏光顕微鏡による観察



写真－7　コンクリート薄片の蛍光顕微鏡による観察

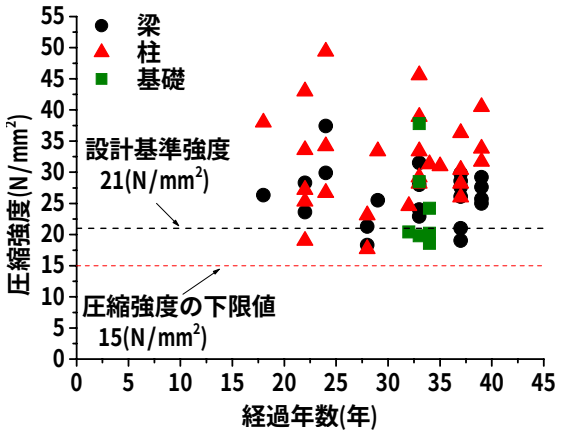
と考えられた[7]。それに対して，東部（早月川，黒部川）では，溶解シリカ量およびアルカリ濃度減少量がともに低く，「無害」と判定された。富山県内の河川産骨材は，川砂と川砂利とがほぼ同様なアルカリシリカ反応性をもつことが知られており，構造物に使用された骨材の河川水系が特定できれば構造物の ASR 劣化が予想できるものと考えられた[8]。

6．構造物から採取したコアの力学的性質およびその経年変化

ASR 劣化橋梁の各部位（橋脚（梁部，柱部，フーチング）および橋台）から採取したコアの圧縮強度と静弾性係数の関係を**図－5** に示す。いずれのコアも健全なコンクリートと比較して，静弾性係数/圧縮強度の値が 1/2～1/3 にまで低下していた。とくに，路面排水の影響を受ける，橋脚・梁部は，柱部や橋台に比較して圧縮強度および静弾性係数の低下が顕著であった。また，フーチングは，ばらつきが大きいが，梁部と同様な傾向があり，土中および河川の水の影響により，コンクリートの ASR が促進されたものと考えられた。前述したように，富山県のコンクリートは，それぞれの地域を代表する河川からの川砂と川砂利がともに使用されているのが特徴である。

コンクリートの薄片の偏光顕微鏡（直交ニコル（鋭敏色検板使用））による観察結果を**写真－6** に示す。川砂利中の安山岩粒子からのひび割れは，セメントペーストのひび割れに繋がっており，その内部を ASR ゲルが充填していた。また，安山岩粒子には結晶性のもの（灰色）とガラス質のもの（黒色）とが混在しているが，結晶性のものがより反応しているのが観察できた。蛍光顕微鏡によるコンクリートの観察結果を**写真－7** に示す。安山岩粒子の内部にも微細なひび割れが多数生じていた。このため，常願寺川産のように，反応性の高い安山岩が混入している場合には，安山岩中のクリストバライトやオパール粒子が長期にわたり激しく反応するので，モルタル中に微細なマイクロクラックが多数発生し，コンクリート全体が脆弱化する可能性があった。

ASR 劣化構造物は，経年劣化によりコアの圧縮強度が設計基準強度以下となる場合があるため，補強時の既設コンクリートの評価と設計用値の設定が技術的に大きな課題となっている。建設後 20 年以上を経過した橋梁より採取したコア（φ100）の圧縮強度の経年変化を**図**



図－6　コアの圧縮強度と経年変化

－6 に示す。図中の圧縮強度は補強設計に用いているコアの最低値を示している。橋脚・梁部は柱部に比較して圧縮強度が経過年数とともに低下する傾向があった。それに対して，橋脚・柱部は経過年数に関係なく，圧縮強度がほぼ一定であった。これは，柱部では鉄筋拘束が大きいことにより，ASR 膨張が発生しても圧縮強度が大きく低下しないことを示唆していた。一方，建設後 20 年以上経過すると，設計基準強度（21N/mm^2）以下となるものがみられることから，経年変化の分布より推定すると，建設後 40 年程度までは，補強設計用の圧縮強度値をコアの圧縮強度の下限値である 15N/mm^2 として設計することが妥当であると考えられた。

7．結論

本研究では富山県における 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を行った。以下に，主要な結果を示す。

(1) 表面被覆に再劣化（ひび割れや剥離）が生じたものは，16 橋の中で 11 橋（69%）あり，反応性の高い骨材を使用した中央部（常願寺川，神通川）の地域に集中していた。

(2) コアの残存膨張性試験に関して，当時の建設省法にて「残存膨張性なし」と判定されたものにも，ASR の進展があったことから，安山岩を主要な岩種とする富山県では建設省法よりもデンマーク法が残存膨張性の評価に適していた。

(3) 塗膜表面には発生していないひび割れがコンクリート躯体に存在することから，塗膜のひび割れ状況からは構造物の ASR 劣化状況を適切に評価できなかった。

(4) 上部から水の供給のある橋脚や橋台では，塗膜の膨れや剥がれが早期に発生し，構造物の耐久性が低下した。

(5) 常願寺川産の川砂，川砂利のように，ASR による膨張が長期にわたり継続する構造物には，表面被覆は ASR 抑制に効果がなかった。

(6) 骨材の岩種構成率の相違（主に安山岩の含有率）は，富山県における地域的な ASR 劣化橋梁の分布と良く一致していた。

(7) コアの圧縮強度の経年変化より，建設後 40 年程度までの ASR 劣化構造物では，補強設計用の圧縮強度を 15N/mm^2 とすることが妥当であった。

謝辞：平成 2 年度の富山県 ASR 検討委員会にて，委員長を務められた金沢大学名誉教授川村満紀氏並びに，骨材の岩石・鉱物学的調査を実施された Dr. Susanta Chatterji 氏，（株）アーキジオ竹内勝信氏に心より感謝いたします。

参考文献

1) 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存膨張性の予測，材料，Vol.43，No.491，pp.963-969，1994.

2) （財）土木研究センター：建設省総合技術プロジェクト 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），pp221-289，1989.

3) 河野広隆：コンクリート構造物のアルカリ骨材反応劣化進行と維持管理のあり方に関する研究，京都大学学位請求論文，2005.

4) 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，pp64.-70，2006.

5) 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.

6) 富山県生コンクリート工業組合・コンクリート耐久性向上委員会：富山県内反応性骨材調査報告書，pp.16-24，1993.

7) 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.

8) 野村昌弘，青山實伸，平俊勝，鳥居和之：北陸地方における道路構造物の ASR による損傷事例とその評価手法，コンクリート工学年次論文集，Vol.13，No.3，pp.105-114，2002.