

# 論文 北陸地方における ASR 構造物の NaOH 溶液浸漬法を用いた補修工法の選定手法の提案

小松原 昭則\*1・野村 昌弘\*2・鳥居 和之\*3

**要旨**：北陸地方の ASR は、1980 年代より顕在化し、その抑制のため、ひび割れ注入および表面被覆により補修されてきたが、数年後に被覆材に損傷が発生した。2001 年より第 2 次補修としてコンクリート片のはく落防止や鉄筋の腐食抑制のため表面被覆などの補修が実施されてきたが、この中には 10 年経過後も健全な状態を保っているものも少なくない。このため、補修を行った構造物について表面被覆材やコンクリートの性状などを把握することで、構造物の使用・環境条件に適合した補修工法や材料を選定できる可能性が考えられた。本研究は、補修工法ごとに構造物におけるコアの残存膨張性の評価より、各種補修工法の適合性について考察したものである。

**キーワード**：アルカリシリカ反応, NaOH 溶液浸漬法, 表面被覆工法, 表面含浸材, 断面修復工法

## 1. はじめに

北陸地方ではコンクリート用骨材として主に河川産骨材が用いられてきたが、一部の火山系岩石（安山岩、流紋岩および凝灰岩）とアルカリ量の多いセメントを使用したことによりアルカリシリカ反応（以下 ASR）が発生し、多くの構造物に被害を与えている<sup>1)2)</sup>。当該地方の ASR は、主に 1980 年代より顕在化したものであるが、当時のコアによる残存膨張性の評価は、JIS A1146「骨材のアルカリシリカ反応性試験法（モルタルバー法）」に準拠したコアを用いた湿気槽養生法（JCI-DD2, 温度 40°C・相対湿度 95%以上の養生）によるものであった。しかし、コアは試験時にほとんど膨張せず、「残存膨張性なし」と判断された<sup>1)</sup>。構造物の補修は 1988 年よりひび割れ注入と表面被覆を実施してきたが、補修後数年で表面被覆材にひび割れやふくれが発生することが多くあり、コアによる残存膨張性の評価と現場での ASR による劣化の実態が相違する結果となった。このような理由で、2000 年頃よりコアによる残存膨張性の評価手法として外部からアルカリを供給する NaOH 溶液浸漬法（温度 80°C, 1 N・NaOH 溶液浸漬）を採用した経緯があった<sup>3)</sup>。この試験法では、多数の構造物よりコアを採取し、コアの膨張率と試験日数の関係を検討した結果から閾値（試験日数 21 日での膨張率 0.1%以上の場合「残存膨張性あり」）を設けることで、NaOH 溶液浸漬法によるコアの膨張率の試験結果と継続調査による構造物でのひび割れの挙動との関係がほぼ一致することができた。また、NaOH 溶液浸漬法の特徴として含有する反応性骨材が多くなるほど膨張率が増加し<sup>4)</sup>、ASR が進行した場合、「NaOH 溶液浸漬法によるコアの膨張率」が低下する傾

向を示すことがわかってきた<sup>5)</sup>。このため、同一の構造物に NaOH 溶液浸漬法を定期的実施することによって ASR 挙動、すなわち収束や継続の方向性を判断できる可能性が確認されている<sup>5)</sup>。

その一方で、2001 年より、第 3 者に対するコンクリート片のはく落防止や鉄筋の腐食抑制を目的として、ひび割れ注入と表面被覆工法、断面修復工法、コンクリート巻立てなどによる二次補修が実施されてきている<sup>6)</sup>。これらの補修材料の中には数年でひび割れが発生したものもあれば、10 年経過後も健全な状態を保っているものもある。したがって、構造物における残存膨張性の傾向やコンクリート性状を把握することによって、構造物に適合した補修工法や材料を選定できると考えた。

そこで本研究は、二次補修を行いたいいくつかの工法別に、「NaOH 溶液浸漬法によるコアの膨張率」を二次補修前と二次補修後約 10 年後のデータと比較した（以下、「補修」とは基本的に「二次補修」を指す）。これにより、コンクリートの ASR 膨張の進行性を把握し、北陸地方の ASR 構造物を維持管理する上で必要とされる補修工法の選定手法について提案した。

## 2. 調査対象の構造物の概要

調査対象とした構造物は、富山県内の道路構造物（橋脚、橋台およびカルバートボックス、コンクリートの設計基準強度：24N/mm<sup>2</sup>）である。これらの構造物はほぼ同じ水系（常願寺川および神通川）の河川産骨材を使用しており、冬期間には凍結防止剤の影響を受けている。当該地方の ASR は、河川産骨材中の安山岩や流紋岩質溶結凝灰岩が顕著に反応しており、反応性鉱物として、オ

\*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 榊野村昌弘の研究所 代表取締役・榊フルテック 代表取締役 博（工）（正会員）

\*3 金沢大学理工研究域環境デザイン学系 教授 工博（正会員）

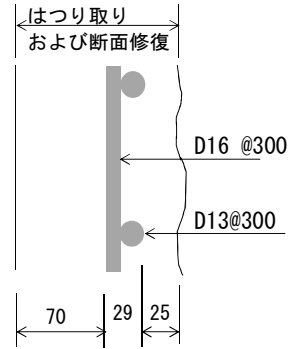
表-1 表面被覆工の種別と対象構造物

第1次補修	エポキシ樹脂系のひび割れ注入+エポキシ樹脂系の表面被覆			
第2次補修の材料	アクリルゴム系塗装	ポリウレタン系塗装	ウレタン系塗装	エポキシ系塗装
構成	上塗：アクリルウレタン系 (300g/m <sup>2</sup> ) 中塗：アクリルゴム系 (2000g/m <sup>2</sup> ) 下塗：エポキシ系 (200g/m <sup>2</sup> )	上塗：アクリルシリコン系 (100g/m <sup>2</sup> ) 中塗：ポリウレタン系 (500g/m <sup>2</sup> ) 下塗：シラン系 (150g/m <sup>2</sup> )	上塗：フッ素系 (300g/m <sup>2</sup> ) 中塗：ウレタン系 (2500g/m <sup>2</sup> ) 下塗：ウレタン系 (200g/m <sup>2</sup> )	上塗：ポリウレタン系 (120g/m <sup>2</sup> ) 中塗：エポキシ系 (700g/m <sup>2</sup> ) 下塗：エポキシ系 (400g/m <sup>2</sup> )
構造物名	A	B	C	D, E
供用年	1975	1975	1975	1975
第2次補修年	2001	2001	2001	2004
調査年	2012	2012	2012	2012
部位	橋台	橋台	橋台	橋脚
試料採取位置の環境	直接日射の影響を受けない。凍結防止剤の影響を受ける。			

表-2 連続繊維シートの種別と対象構造物

第1次補修の材料	連続繊維シート		
構成	上塗：アクリル系 (300g/m <sup>2</sup> ) 炭素繊維 (繊維目付317g) 含浸接着剤：エポキシ系	上塗：アクリル系 (300g/m <sup>2</sup> ) アラミド繊維 (繊維目付650g) 含浸接着剤：エポキシ系	上塗：アクリル系 (300g/m <sup>2</sup> ) ポリエチレン繊維 (繊維目付189g) 含浸接着剤：エポキシ系
構造物名	F		
供用年	1980		
第1次補修年	2002		
調査年	2012		
部位	橋台		
試料採取位置の環境	直接日射の影響を受けない。凍結防止剤の影響を受ける。		

表-3 ポリマーセメントモルタルによる断面修復工法の種別と対象構造物

第1次補修	エポキシ樹脂系のひび割れ注入+エポキシ樹脂系の表面被覆	
第2次補修の材料	ポリマーセメントモルタル	
構成		
構造物名	G, H, I, J	K
供用年	1975	1975
第2次補修年	2001	2001
調査年	2012	2012
部位	橋台	橋台
工法	湿式吹付工法	注入打設工法
試料採取位置の環境	直接日射の影響を受けない。凍結防止剤の影響を受ける。	

パール、クリストバライト、トリディマイト、火山ガラス、隠微晶質石英が含まれている<sup>4),7)</sup>。また、コンクリート中のアルカリ量が多くなるほど ASR の劣化も深刻になっており<sup>8)</sup>、そのアルカリ起源のほとんどがセメント（セメントアルカリ量：0.6～1.2%）に由来するものであるが<sup>2)</sup>、混和剤や骨材に由来するアルカリの影響もあると報告されている<sup>8)</sup>。また、構造物表面部では凍結防止剤由来（岩塩（NaCl）を使用）のアルカリ量が高いものもあった<sup>1),2)</sup>。調査対象とした構造物の二次補修工法を表-1～表-4に示す。補修は、表面被覆工法として、アクリルゴム系、ポリウレタン系、ウレタン系、エポキシ系、3種類の連続繊維シート、また断面修復工法として、ポリマーセメントモルタルおよびコンクリート巻立てである。

### 3.表面被覆工法および連続繊維シートにより補修を行った構造物の被覆材の損傷状況の経時変化とコアによる残存膨張性の評価との関係

調査対象とした構造物（補修前）にはすべて ASR によるひび割れが発生していた。補修として柔軟型エポキシ系のひび割れ注入材を使用した後に、各表面被覆工法お

表-4 コンクリート巻立てによる  
断面修復工法の種別と対象構造物

第1次補修	エポキシ樹脂系のひび割れ注入後、エポキシ樹脂系の表面被覆	
第2次補修の材料	コンクリート	
構成	<p>コンクリート巻立て</p> <p>追加鉄筋 D13@300</p> <p>既設鉄筋 D16@300</p> <p>追加鉄筋 D13@300</p> <p>既設鉄筋 D13@300</p> <p>30 70 29 34</p> <p>はつり取り</p>	
構造物名	L, M, O	P
供用年	1975	1975
第2次補修年	2004	2002
調査年	2012	2012
部位	橋台	橋台
工法	—	—
試料採取位置の環境	直接日射の影響を受けない。凍結防止剤の影響を受ける。	

よび連続繊維シートを適用した。これらの補修は、凍結防止剤の浸透抑制や第三者に対するコンクリートはく落片のはく落防止を目的としている。補修後の損傷状況の比較を写真-1に示す。構造物 A, C, F では表面被覆および連続繊維シートの未施工部でひび割れから溶出消石灰が発生しているが、補修を行った箇所では損傷が表面化していなかった。一方、構造物 B, D, E では ASR による膨張を抑制できず、表面被覆にひび割れが発生していた。ひび割れの発生により、凍結防止剤の成分がコンクリート中に浸透し、鉄筋腐食を助長する可能性が推察

された。被覆箇所には損傷が発生しているものは中塗材の塗布量が  $700\text{g/m}^2$  以下のものであり、健全なものは  $2,000\text{g/m}^2$  以上であった。したがって、中塗材を厚くすることで、ASR 膨張によるひび割れ追従性を確保でき、被覆材自身の損傷のリスクを低減できるものと考えられた。

コアの薄片観察による ASR の発生状況を写真-2に示す。各構造物とも安山岩や流紋岩質溶結凝灰岩を含有する砂利や砂が激しく反応し、骨材中からセメントペースト中にゲルが進展していた。また、骨材中にはロゼット状のゲルが形成し、気泡内には非晶質のゲルが沈殿していた。補修を適用した各構造物において、ASR による劣化の差はほとんどないものと判断された。

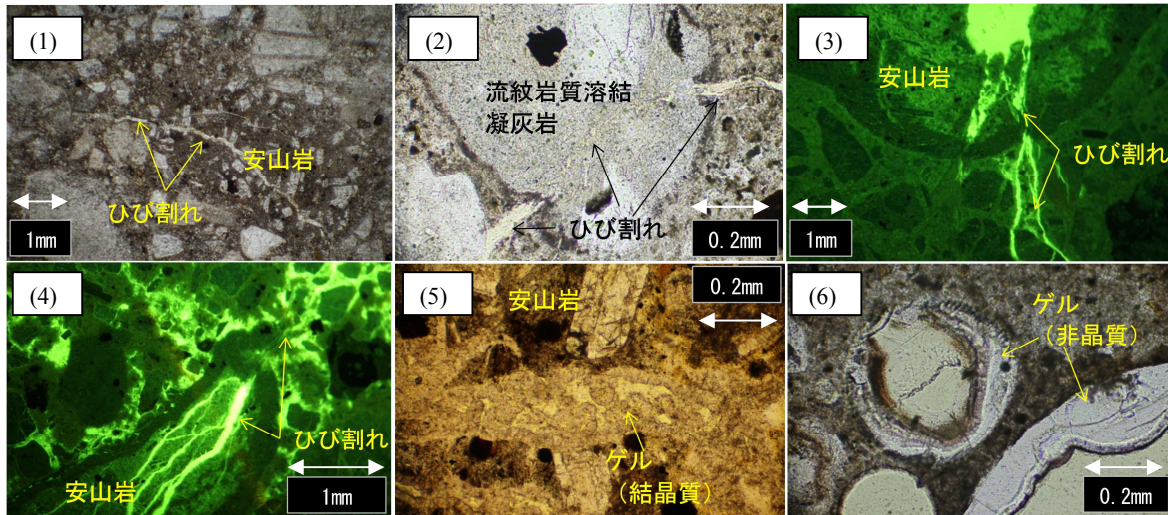
各構造物で分析した川砂利のアルカリシリカ反応性の面積率（コア側面に現れた直径 5mm 以上の骨材を対象に面積率を算出）と水溶性アルカリ量（温度  $40^\circ\text{C}$  の温水抽出法）の関係を図-1に示す。「ASR の発生なしあるいは発生しても軽微なエリア」は、北陸地方の調査結果に基づいて決定したものである<sup>9)</sup>。高反応性岩種としては、偏光顕微鏡観察の結果から安山岩および流紋岩質溶結凝灰岩の構成率の合計としている。各構造物とも高反応性岩種の含有とコンクリート中のアルカリ量の状況から、水分の供給があればアルカリシリカ反応が起こる潜在性がある。

「NaOH 溶液浸漬法によるコアの膨張率」の経時変化を図-2に示す。被覆材に損傷が発生しなかった構造物 A および C では、「NaOH 溶液浸漬法によるコアの膨張率」にほとんど変化はなかった。これは、これらの補修材が ASR の進行を抑制していたものと判断された。一方、被覆材に損傷が発生した構造物 B, D および E では、「NaOH 溶液浸漬法によるコアの膨張率」が時間の経過に伴い低下しており、被覆材による ASR 抑制効果が発揮されず、損傷が発生したものと考えられた。



写真-1 表面被覆材の損傷状況の比較 (A~F: 構造物名, 2012年12月の現状)





(1) 安山岩 (砂) から発生したひび割れ (単ニコル, 構造物 D), (2) 流紋岩質溶結凝灰岩 (砂) から発生したひび割れ (単ニコル, 構造物 B), (3) および (4) 安山岩 (砂利) から発生したひび割れ (蛍光, 構造物 E および C), (5) 安山岩 (砂利) 中の結晶質のゲル (単ニコル, 構造物 D), (6) 気泡内の非晶質のゲル (単ニコル, 構造物 B)

写真-2 コアの薄片観察による ASR 発生状況の比較

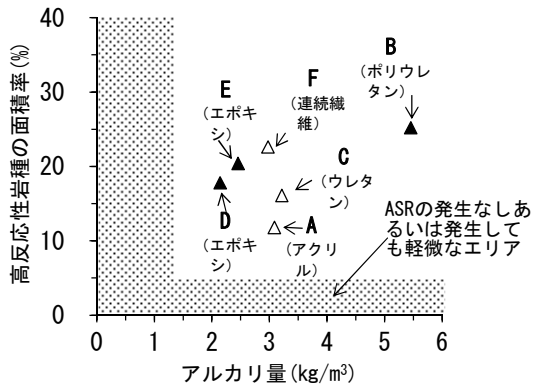


図-1 高反応性岩種とアルカリ量との関係

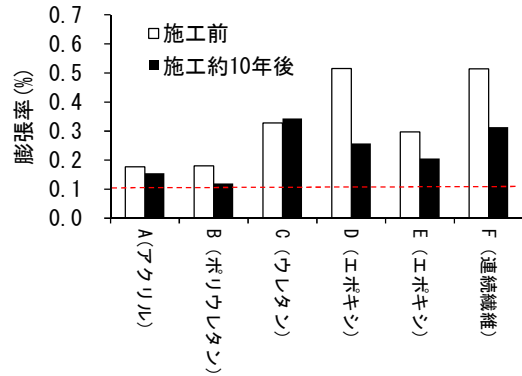


図-2 「NaOH 溶液浸漬法によるコアの膨張率」の経時変化

また、構造物 F では NaOH 溶液浸漬法の膨張率が時間の経過に伴い低下しており、ASR が進行したものと判断されるが、シート自体が耐久性に優れ、被覆材に損傷が発生しなかったものと考えられた。この結果より、「NaOH 溶液浸漬法によるコアの膨張率 (試験日数 21 日)」が約 0.2% 程度以下であればアクリルゴム系、膨張率が 0.35% 程度以下であればウレタン系の表面被覆材が適用できる可能性があった。このように NaOH 溶液浸漬法を継続的に実施することで補修材料の適合性の判断するうえで重要なデータが蓄積できるものと考えられた。

#### 4. 断面修復により補修を行った構造物の修復材の損傷状況の経時変化とコアによる残存膨張性の評価との関係

##### 4.1 ポリマーセメントモルタルによる断面修復

構造物 G, H, I, J, K では、かぶり部分を除去し、ポリマーセメントモルタルにより断面修復を実施した。補修は、凍結防止剤の浸透抑制や第 3 者に対するコンク

リートはく落片のはく落防止を目的としている。使用したポリマーセメントモルタルは同一会社の製品 (F 社製、プレミックスタイプ) である。この中にはひび割れを防止するためのビニロン繊維 (O 社製) を 1.5% 混入している。しかし、補修直後より、構造物 K を除き、幅 0.1~0.5 mm 程度のセメントモルタルの乾燥収縮および自己収縮によるひび割れが発生した。その後、構造物内部の ASR の進行による膨張を反映した形態の 2 方向のひび割れが発生し、ひび割れの延長は時間の経過とともに増加した (写真-3 参照)。ひび割れが発生した構造物 G~J は湿式吹付工法であり、ひび割れの発生がなかった構造物 K は注入打設工法と、工法の違いがあった。ひび割れが発生すると、凍結防止剤の成分の浸透を抑制できず鉄筋腐食を助長することやモルタル片の落下に繋がる可能性があった。コアの薄片を観察した結果、安山岩や流紋岩質溶結凝灰岩の砂利および砂がともに反応し、もっとも反応性の高いオパール粒子の存在も確認できた。ゲルは骨材からセメントペーストに発達するものが多くあり、

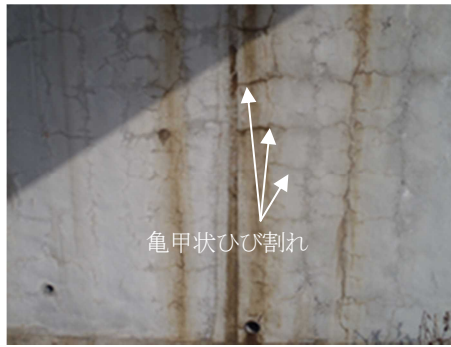


写真-3 ひび割れの発生状況  
(構造物 I, 2012 年 12 月の現状)

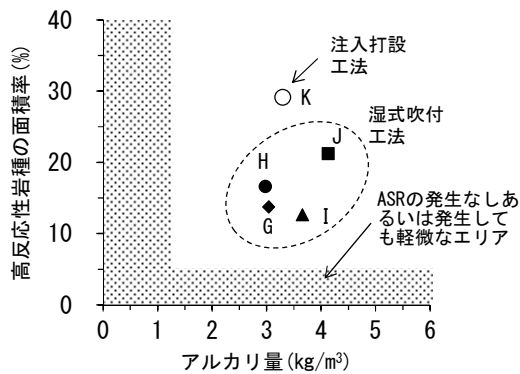


図-3 高反応性岩種とアルカリ量との関係

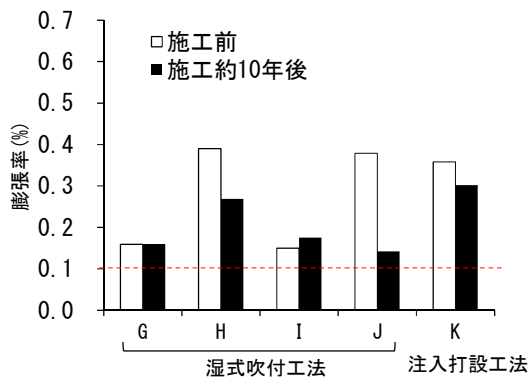


図-4 「NaOH 溶液浸漬法によるコアの膨張率」  
の経時変化

ASR の進行度に各構造物の差は見られなかった。

各構造物で分析した川砂利のアルカリシリカ反応性の岩種面積率および水溶性アルカリ量の結果を図-3 に示す。各構造物とも水分の供給があればアルカリシリカ反応を十分に発生させる要素を備えていた。「NaOH 溶液浸漬法によるコアの膨張率」の経時変化を図-4 に示す。構造物 G および I では「NaOH 溶液浸漬法によるコアの膨張率」に変化がなく ASR を抑制、構造物 H, J および K では「NaOH 溶液浸漬法によるコアの膨張率」が低下しており ASR が進行したと判断された。ポリマーセメン

トモルタルの断面修復による ASR 抑制効果については判断できなかった。なお、ポリマーセメントモルタルによる断面修復のひび割れ拡大は、図-4 の「NaOH 溶液浸漬法によるコアの膨張率」の変化との関係がなかったことから、ASR による膨張のほか凍結融解作用も影響しているものと推察された。初期に発生したセメントモルタルの自己収縮や乾燥収縮を抑制することによって補修材の耐久性は保たれると考えられ、本工法の場合、表面被覆による補修を組み合わせることが重要である可能性がある。

#### 4.2 コンクリート巻き立てによる断面修復

構造物 L, M, O, P では、ASR が発生したかぶり部分を除去し、追加鉄筋 (D13@300) を配置後、コンクリートを巻き立てた。補修は、凍結防止剤の浸透抑制や第 3 者に対するコンクリートはく落片のはく落防止を目的としている。コンクリートには、ひび割れ防止のためビニロン繊維 (K 社製) をセメント量の 0.5% 混入し、膨張材および高性能 AE 減水剤を添加している。しかし、施工から約 10 年後で構造物 O では写真-4 に示すようにひび割れと溶出消石灰が発生した。ひび割れの発生により、凍結防止剤の成分の浸透を抑制できず鉄筋腐食を助長することやコンクリート片の落下に繋がる可能性があった。本構造物も安山岩や流紋岩質溶結凝灰岩がともに反応しており、ASR の反応の程度はほとんど変わらなかった。各構造物で分析した川砂利のアルカリシリカ反応性の岩種面積率および水溶性アルカリ量の結果を図-5 に示す。各構造物とも水分の供給があればアルカリシリカ反応を十分に発生させる要素を備えていた。「NaOH 溶液浸漬法によるコアの膨張率」の経時変化を図-6 に示す。構造物 L, M および P では、「NaOH 溶液浸漬法によるコアの膨張率」が低下していることから、本工法によって ASR を抑制できないものと判断された。これは追加鉄筋を配置したことにより構造物表面に発生する引張力を負担していることでコンクリート巻き立てに損傷が発生しなかったものと推察された。なお、構造物 O で発生した損傷は、



写真-4 ひび割れの発生状況  
(構造物 O, 2012 年 12 月の現状)

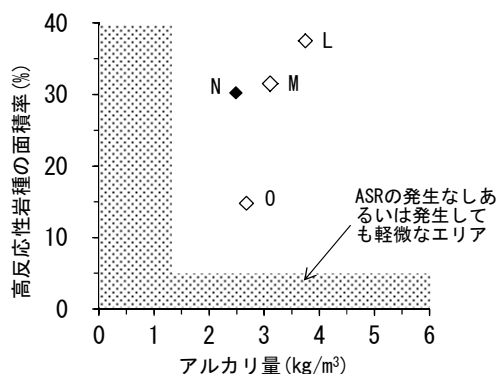


図-5 高反応性岩種とアルカリ量との関係

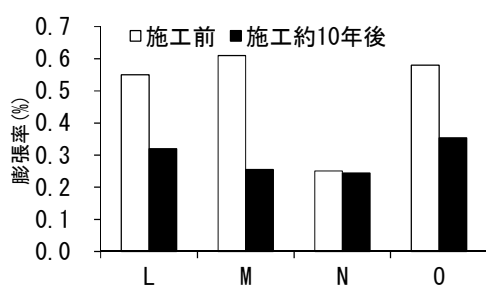


図-6 「NaOH 溶液浸漬法によるコアの膨張率」の経時変化

ひび割れの形態から増厚時の施工段階で発生したコールドジョイントに水が浸入したことによるものと考えられた。

## 5. まとめ

本研究により得られた結果をまとめると以下のとおりである。

- (1) 「NaOH 溶液浸漬法によるコアの膨張率」を継続的に把握することで補修材の ASR 抑制効果を評価できるものと考えられた。
- (2) アクリルゴム系やウレタン系の被覆材（中塗材の塗布量が  $2,000\text{g/m}^2$  以上のもの）は比較的良好な状態を継続していた。中塗材の塗布量を十分に確保することでひび割れ追従性が確保され、損傷のリスクが低減された可能性が考えられた。
- (3) 連続繊維シートによる ASR 抑制効果は期待できなかったものの材料自体が耐久性に優れ、損傷が発生しなかったものと推察された。
- (4) 「NaOH 溶液浸漬法によるコアの膨張率」の結果より、コアの膨張率が  $0.2\%$  以下の場合アクリルゴム系、同じく  $0.35\%$  以下の場合ウレタン系の被覆材が適用できるものと考えられた。
- (5) ポリマーセメントモルタルによる断面修復の ASR 抑

制効果については判断できなかった。なお、初期に発生したセメントモルタルの自己収縮や乾燥収縮を抑制することによって補修材の耐久性は保たれると考えられ、表面被覆を組み合わせることが重要であった。

- (6) コンクリート巻立てによる断面修復の ASR 抑制効果は期待できなかった。追加鉄筋を配置したことにより構造物表面に発生する引張力を負担することでコンクリート巻立てに損傷が発生しなかったものと考えた。

## 参考文献

- 1) 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, コンクリート工学論文集, Vol.13, No.3, pp.105-114, 2002
- 2) Katayama, T., Tagami, M., Sarai, Y., Izumi, S., 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, 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
- 4) 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
- 5) Nomura, M., Komatsubara, A., Kuroyanagi, M., Torii, K.: Evaluation of The Residual Expansivity of Cores due to Alkali-Silica Reaction in Hokuriku District, Japan, Proc. of the 14<sup>th</sup> International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, CD-R 10pages, 2012
- 6) 野村昌弘, 小松原昭則, 丑屋智志, 鳥居和之: ASR 劣化構造物から採取したコアの残存膨張性評価の検証, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.965-970, 2010
- 7) 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, 2009
- 8) 野村昌弘, 西谷直人, 清水隆司, 鳥居和之: 実構造物における骨材からのアルカリ溶出の検証, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.791-796, 2006
- 9) 野村昌弘, 小松原昭則, 畔柳昌巳, 鳥居和之: 北陸地方における反応性骨材の岩石学的特徴とコアの残存膨張性の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.953-958, 2011