

論文 亜硝酸リチウムによる劣化コンクリートの補修に関する検討

刈谷 潤貴*1・小林 勝也*2・野村 昌弘*3・金子 泰士*2

要旨：塩害補修として亜硝酸リチウムを混入した防錆剤混入モルタルを用いた部材からコア採取し、亜硝酸イオン拡散の状況を追跡するとともに濃度の分布と差分法による予測結果との整合性を検討した。さらに、ASR 補修として亜硝酸リチウム内部圧入工法を適用した道路橋 下部工からコアを採取し、補修前後における ASR の状況を偏光顕微鏡にて確認し、亜硝酸リチウムによる ASR 劣化コンクリートへの補修材としての適用性について考察を行った。

キーワード：亜硝酸リチウム、塩害、アルカリシリカ反応、拡散係数、拡散予測、差分法、偏光顕微鏡

1. はじめに

亜硝酸リチウムがコンクリートの補修材料として使用されてから久しい。亜硝酸イオンは鉄筋の防錆効果が高める一方で、リチウムイオンはアルカリシリカ反応(以下、ASR と略記)の補修対策としても期待されている。本材料の適用は堀¹⁾により提案されたものであるが、供試体による研究事例は数例あるものの実構造物での報告事例は少ない。

1988 年に供用した北陸自動車道・親不知海岸高架橋では、日本で初めて塩害に対しての性能照査型の考えを取り入れた経緯があったが²⁾、供用から 10 年後、橋脚の幅止め筋にて十分なかぶりが確保されていないことが原因で塩害による劣化が顕在化してきた。補修として亜硝酸リチウムを混入したポリマーセメントモルタル(以下、防錆剤混入モルタルと略記)にて、断面修復による部分補修とポリブタジエン系の表面被覆を適用した。これは、外部からの塩化物イオンの浸透抑制および鉄筋以深に残留した腐食発生限界以上の塩化物イオンによる再劣化を抑制するためであった。補修は 1998 年～2001 年にかけて実施されたが、補修から 20 数年経過後、表面被覆の一部に経年劣化が認められるものの浮き等の塩害による再劣化は生じていない。なお、野上³⁾は 1999 年本橋中央の P49 橋脚にて、亜硝酸イオン濃度を 5 種類に変化させた防錆剤混入モルタルを貼付け、亜硝酸イオンの拡散を 15 年間にわたり追跡した結果を報告している(写真-1 参照)。

亜硝酸イオンについて、福田⁴⁾は沖縄県にて暴露した大型供試体により得られた結果をもとに防錆剤混入モルタル、既設コンクリートとの境界部および既設コンクリートにおける見掛けの拡散係数を変化させ、防錆剤混入モルタルを 1mm 間隔、既設コンクリートを 10mm 間隔による一次元の差分法による解析を行っている。

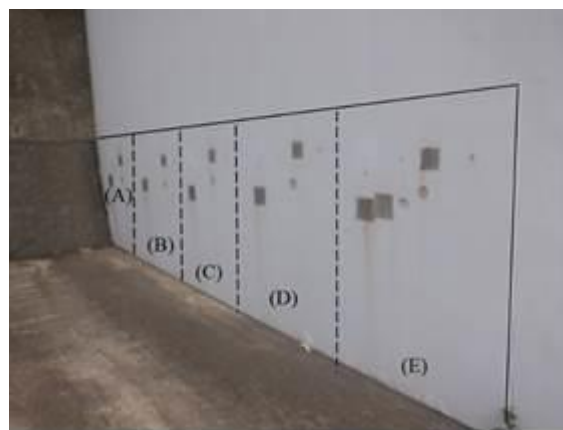


写真-1 亜硝酸イオン濃度を変化せた防錆剤混入モルタルによる試験施工(親不知海岸高架橋 P49)

青山⁵⁾は防錆剤混入モルタルからの亜硝酸イオンの拡散を 5mm 間隔による一次元の差分法による予測を提案している。福田⁴⁾による解析結果では、防錆剤混入モルタル内での見掛けの拡散係数は $1.1 \sim 2.7 \times 10^{-12} \text{ cm}^2/\text{sec}$ 、防錆剤混入モルタルから既設コンクリートへの流出係数を $0.9 \sim 3.5 \times 10^{-10} \text{ cm}^2/\text{sec}$ とすることで実測値との残差が最小となったことを示している。一方、青山⁵⁾は既設コンクリートへの流出係数を考慮せず、防錆剤混入モルタル内の亜硝酸イオンおよび塩化物イオンの拡散係数を $0.3 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{sec}$ 、既設コンクリート内の亜硝酸イオンの拡散係数を塩化物イオンの見掛けの拡散係数と同じとして解析することを提案している。両者の拡散係数の解析結果には大きな差がある。M 社のポリマーセメントモルタル(亜硝酸リチウム混入なし)における塩化物イオンの拡散係数が $0.9 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{sec}$ であることを考慮すると、青山らの解析結果が妥当と推定される。なお、北陸自動車道・親不知海岸高架橋の上部工では、予防保全的にエポキシ樹脂系の表面被覆と防錆剤混入モルタルに

*1 (株)ネクスコ・エンジニアリング新潟 本社 土木管理部(正会員)

*2 (株)ネクスコ・エンジニアリング新潟 長岡点検事務所 調査課(正会員)

*3 (株)野村昌弘の研究所 代表取締役 博士(工学)(正会員)

よる亜硝酸イオンの濃度差拡散を期待した補修を実施してきた⁹⁾。亜硝酸イオンによる塩害補修は、NEXCOにて標準的な工法の一つとなっている。拡散予測は、5mm 間隔による一次元の差分法によることとしている⁷⁾。

福田ら⁴⁾は、防錆剤混入モルタルから濃度差によるコンクリートへの拡散が、亜硝酸イオン>塩化物イオン>リチウムイオンの順で速いことを指摘している。一方、江良ら⁸⁾は亜硝酸リチウム溶液をコンクリート内部へ圧入することで濃度差拡散に比較して速い効果を期待している。2022 年制定土木学会コンクリート標準示方書維持管理編では、ASR 劣化過程の進展期および加速期にて標準的な工法の一つとして亜硝酸リチウム内部圧入工法(以下、圧入工法と略記)を挙げている。リチウムイオンの ASR 抑制はアルカリシリカゲルの非膨張化であり、Li/Na モル比を 1.0 以上確保するよう圧入量を決定している⁹⁾。リチウムイオンの効果検証には圧入前後におけるコアの促進膨張試験により、圧入前より圧入後にてコアの膨張率が低下していることで効果を確認している。しかし、コアの膨張率が低下したということは、逆にいえば圧入工法によって ASR を促進させた可能性も考えられる。

本稿では、亜硝酸リチウムのコンクリート構造物への補修について、野上ら²⁾の報告と同時期(1999 年)に補修した親不知海岸高架橋 下部工にて、防錆剤混入モルタルにより補修した箇所から採取したコアにより亜硝酸イオン濃度を分析し、防錆剤混入モルタルにおける亜硝酸イオンの拡散係数を青山ら⁵⁾の手法をもとに検証した。また、凍結防止剤による塩害劣化を受けた RC 床版端部に適用した防錆剤混入モルタルで亜硝酸イオン濃度の分布と予測結果との整合性を検討した。さらに、ASR 補修として圧入工法を実施した道路橋 下部工にて、補修前後

に採取したコアによるアルカリ溶液浸漬法の結果を示すとともに補修前のコア、補修前のアルカリ溶液浸漬後のコア、圧入工法後のコア、圧入工法後アルカリ溶液浸漬後のコアより、断片試料および薄片を作製し、実体顕微鏡および偏光顕微鏡にて ASR の進行状況を確認した。

2. 亜硝酸イオンについて

2.1 亜硝酸イオン拡散係数の検討

北陸自動車道・親不知海岸高架橋の下部工にて実施した防錆剤混入モルタルによる試験施工および補修箇所にて、コア(φ50mm)を採取して 10mm ピッチのスライスカット片を切り出した。亜硝酸イオン濃度は、武内らの研究¹⁰⁾に基づきスライスカット片を JISA1154:2012「硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法」付属書 B(参考)「硬化コンクリート中に含まれる温水抽出塩化物イオンの分析方法」に準拠し、コンクリート中の亜硝酸イオンを温度 50℃の温水(蒸留水)で抽出した。抽出液はろ過し、ろ液の NO₂⁻の濃度をイオンクロマトグラフィーで分析した。

試験結果を表-1 に示す。P49(A)~P49(E)の結果は、既設橋脚の表面を 4 種程度のケレン後、厚さ 20mm の防錆剤混入モルタルを亜硝酸リチウムの含有量を変化させた野上ら²⁾の報告である。P13、P40 および AP4 は塩害による浮き等の劣化が発生した箇所をはつり取り、防錆剤混入モルタルにて断面修復したものである。混入した亜硝酸リチウム濃度は、既設コンクリートに残留した塩化物イオン濃度の総量により変化させている。回収率とは防錆剤混入モルタルに添加した亜硝酸リチウム量に対して 50℃の温水抽出により分析した亜硝酸イオン濃度との比率である。防錆剤混入モルタルから既設コンクリート

表-1 亜硝酸イオン濃度の分析結果

橋脚名	LiNO ₂ 添加量 (kg/m ³)	補修からの 経過時間	貼付け		既設コンクリート表面からの深さ (mm)										回収率 (%)
			20-10	10-0	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	
P49(A)	25.7	7年後	25.1	16.6	1.4	0.9	0.6	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-	100.5
		15年後	19.4	13.3	1.8	1.4	0.7	0.5	0.2	0.2	0.2	0.2	-	-	84.8
P49(B)	34.3	7年後	25.2	22.8	1.4	1.3	0.8	0.2	0.0	0.4	0.0	0.1	-	-	87.7
		15年後	21.6	19.6	1.8	1.8	1.6	0.7	0.7	0.2	0.2	0.2	-	-	81.3
P49(C)	42.9	7年後	31.6	28.3	2.8	2.0	1.4	0.0	0.0	0.2	0.1	0.0	-	-	89.2
		15年後	24.8	19.6	2.5	2.9	2.0	1.8	1.1	0.9	0.5	0.2	-	-	75.6
P49(D)	55.8	7年後	43.0	37.8	4.8	3.6	2.3	1.5	0.8	0.5	0.3	0.2	-	-	97.9
		15年後	27.5	30.6	4.7	5.2	2.9	2.3	1.4	0.9	0.7	0.5	-	-	79.0
P49(E)	68.6	7年後	53.2	47.5	6.6	4.4	2.1	1.1	0.6	0.2	0.1	0.4	-	-	97.5
		15年後	37.8	36.2	7.7	8.1	5.0	3.4	2.3	1.6	1.1	0.9	-	-	87.3
P13	36.8	10年後	-	-	32.5	33.4	29.9	24.7	10.5	6.9	4.3	3.1	2.5	1.5	93.5
		15年後	-	-	30.2	29.5	27.5	25.7	19.4	6.5	4.1	3.4	2.9	2.9	95.1
P40	36.6	10年後	-	-	36.4	36.8	32.8	28.6	9.7	6.8	5.4	5.3	3.6	2.9	105.9
		15年後	-	-	28.1	30.4	28.8	27.7	22.3	11.0	7.7	5.6	4.1	3.4	106.4
AP4	42.1	10年後	-	-	37.8	33.2	32.5	28.1	23.5	11.5	6.0	5.8	4.2	2.6	84.5
		15年後	-	-	25.0	23.0	21.8	12.6	7.0	3.6	4.5	2.9	2.5	1.6	95.3

着色部分は防錆剤混入モルタルの部分を示している、LiNO₂ 添加量は固形分としての重量を表している

への亜硝酸イオンの拡散が確認できた。また、P49 では防錆剤混入モルタル中の亜硝酸イオン濃度を高くするほど、時間の経過とともに深部へと濃度が高くなる傾向があった。早期に鉄筋周囲にて防錆雰囲気を形成したい場合、高濃度の亜硝酸イオンを混入したモルタルを使用することが有効と考える。P49 の試験施工における亜硝酸イオンの回収率は75～101%，平均で88%，既設コンクリート表面をはつり取った箇所の亜硝酸イオンの回収率は85～106%，平均97%であった。50℃の温水抽出により、コンクリート中の亜硝酸イオンがほぼ抽出できるものと考えられた。

青山ら⁵⁾の亜硝酸イオンの差分法による拡散シミュレーションの考え方を式(1)に示す(図-1 参照)。

$$N(X_i, t + \Delta t) = DN \times \frac{A}{(\Delta X)^2} \times \Delta t + N(X, t) \quad (1)$$

$$A = [N(X_{i-1}, t) - 2 \times N(X_i, t) - N(X_{i+1}, t), t]$$

N：亜硝酸イオン濃度(kg/m³)

D：亜硝酸イオンの拡散係数(cm²/sec)

X：深さ (mm)，T：時間 (sec)，Δt：10 日間

ΔX：5mm

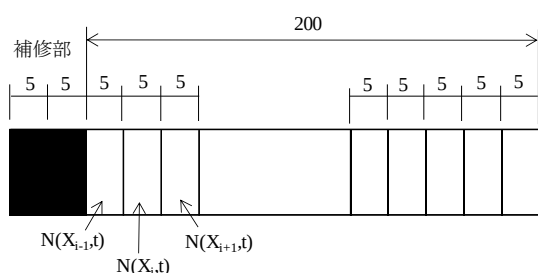


図-1 差分法におけるモデル⁵⁾

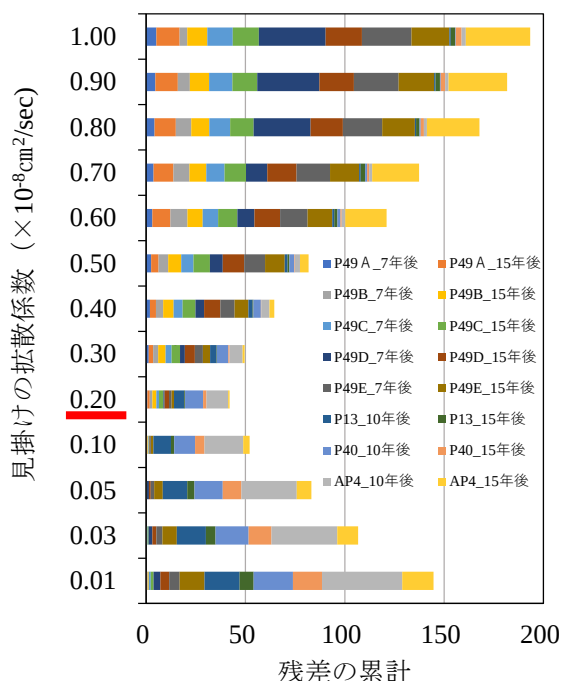


図-2 残差の累計の集計結果

既設コンクリートにおける亜硝酸イオンの拡散係数は、青山ら⁵⁾の研究をもとに塩化物イオン濃度の見掛けの拡散係数と同じとした。ここでは青山らの親不知海岸高架橋の下部工における見掛けの拡散係数の平均値 $3.6 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{sec}$ を用いた¹¹⁾。亜硝酸イオンの拡散予測値では、既設コンクリートにおける表-1 に示す亜硝酸イオン濃度の実測値との差における2乗の和が最小となる残差を求めた。結果を図-2 に示す。防錆剤混入モルタルにおける亜硝酸イオンの拡散係数は、 $0.2 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{sec}$ で最小となり、青山ら⁵⁾の提案とほぼ同様な結果が得られた。

2.2 道路橋桁端部における防錆剤混入モルタルでの検証

道路橋の支承周辺部では写真-2 に示すように冬期に散布される凍結防止剤により塩害劣化が顕在化しており、鉄筋以深に腐食発生限界塩化物イオン濃度以上が浸透しているケースが多い¹²⁾。この塩害補修として、図-3 に示すような防錆剤混入モルタル(固形分として亜硝酸リチウムを 55 kg/m³ 含有)の厚みを 20mm とし亜硝酸イオンの拡散を期待した経済的な工法を適用した。

補修から3年後にコア(φ70mm)を採取して亜硝酸イオン濃度の分布を 5～10mm ピッチにて前項と同様に温度 50℃の温水抽出、ならびにコアの一部にて JSCE G574-2005 に従い EPMA により N の元素濃度分布を測定した。



写真-2 道路橋の支承周辺部での塩害劣化

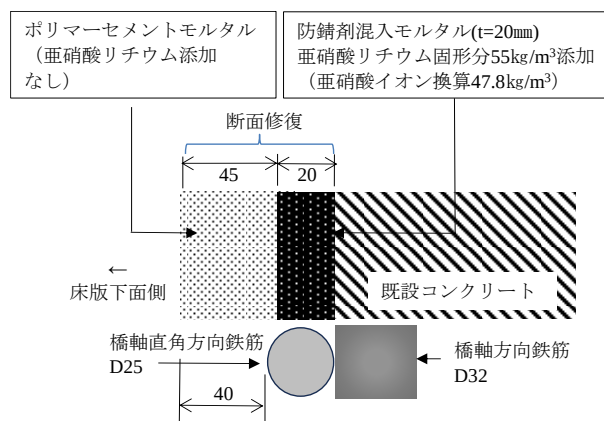
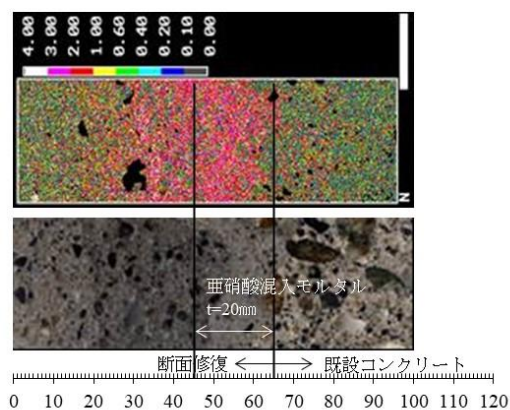


図-3 防錆剤混入モルタルによる断面修復



上段：マッピング画像，下段：実画像

図-4 EPMAによるNのマッピング

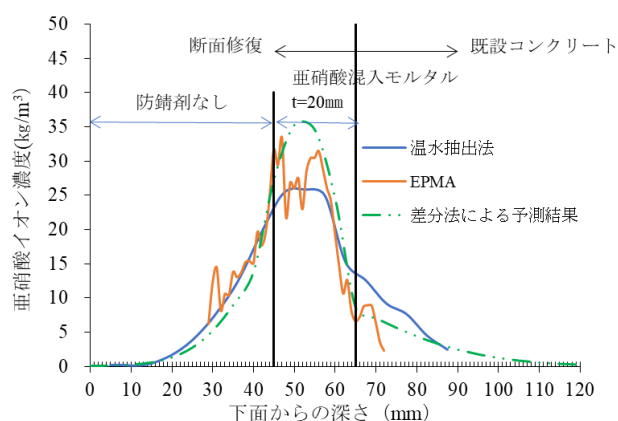


図-5 亜硝酸イオンの拡散予測と分析結果の照合結果

EPMA の分析条件は、加速電圧 15kV、照射電流 200nA、プローブ径 50 μ m、ピクセルサイズ 100 μ m、計測時間 50msec/pixel である。EPMA の値(単位: kg/m³)は、EPMA による測定値(mass(%))と温度 50℃の温水抽出による測定値(kg/m³)の両者の相関式を求め、その式を用いて単位を換算した。

EPMA における N のマッピング画像を図-4 に示す。防錆剤混入モルタルに含有した高濃度の亜硝酸イオンが拡散する現象が確認できた。ポリマーセメントモルタルにおける亜硝酸イオンの拡散係数を塩化物イオンの拡散係数と同じ $0.9 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{sec}$ 、防錆剤混入モルタルにおける亜硝酸イオンの拡散係数を $0.2 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{sec}$ 、既設コンクリートにおける亜硝酸イオンの拡散係数を $3.6 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{sec}$ と仮定した場合について、3 年経過後の差分法による予測結果を併せて図-5 に示す。防錆剤混入モルタルから亜硝酸イオンが床版下面側および上面側へ両方拡散すること、温水抽出よりも EPMA による分析結果が差分法による予測結果と対応した。本傾向については限られたコアで分析試料を確保していることから、偏りが生じた可能性が考えられる。

3. リチウムイオンについて

3.1 アルカリ溶液浸漬法

X 県の山間部に位置する 2 つの道路橋下部工(A 橋(1969 年供用)、B 橋(1979 年供用))にて、圧入工法による ASR 補修を実施した。事前に採取したコア($\phi=55\text{mm}$ 、深さ 300mm 程度のスライスカット片厚さ 30mm 程度)にて、コンクリート中のアルカリ量を 40℃の温水抽出法により Na^+ イオンおよび K^+ イオンを原子吸光光度計にて分析し、 $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ を算出した¹³⁾。圧入した 40%亜硝酸リチウム水溶液は Li/Na モル比を 1.0 以上確保するため、A 橋では 13.4 kg/m³、B 橋では 10.3 kg/m³とした。圧入工法前後におけるコアのアルカリ溶液浸漬法(温度 80℃、1 N の NaOH 溶液浸漬)の結果を図-6 に示す。試験結果は、B 橋は A 橋より相対的にコアの膨張率が大きくなった。これは、反応性骨材が A 橋より B 橋で多いことや B 橋で比較的新しい年代の骨材が使用されたことによるものと考えられた。圧入前より圧入後でコアの膨張率が低下する傾向が確認できた。しかし、圧入後のコアでも試験日数に伴い、膨張率が増加する傾向を示したことから、圧入工法後においても潜在的に ASR による膨張余力が残っている可能性も推定された。

3.2 偏光顕微鏡観察

コアの側面より円磨された数種類の岩種が確認された。道路橋の位置関係より Y 川水系の川砂、川砂利がコンクリート用骨材として使用されたものと推定された。Y 水系の川砂、川砂利を使用したことにより深刻な ASR が発生していることが報告されている¹⁴⁾。主な岩種は、火山岩類の安山岩*、流紋岩*、溶結凝灰岩*、深成岩類および変成岩類の閃緑岩、花崗岩、片麻岩、ホルフェンス*、堆積岩類の砂岩、チャート*、頁岩*、泥岩*であった。一般的にアルカリシリカ反応性を示す岩種は*を付したものであった。

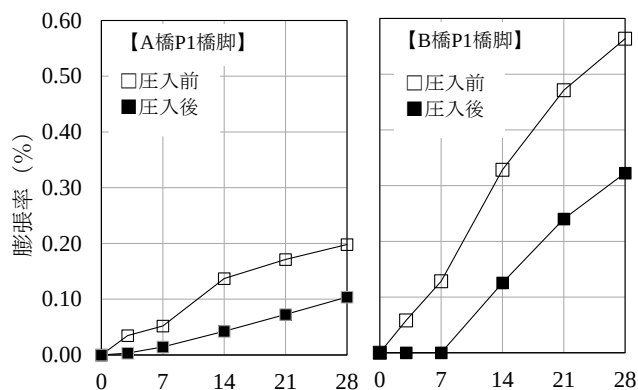
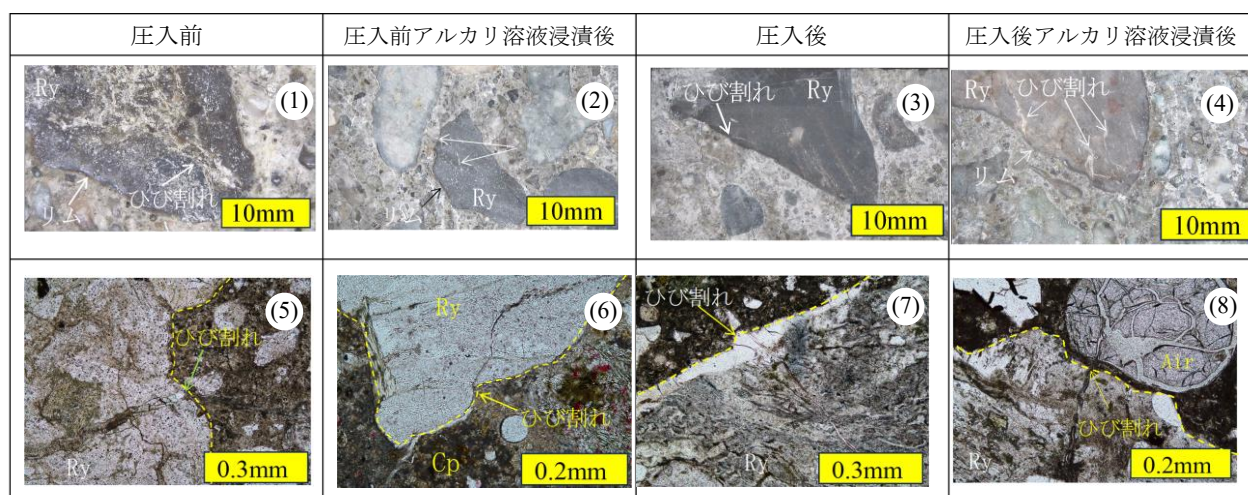
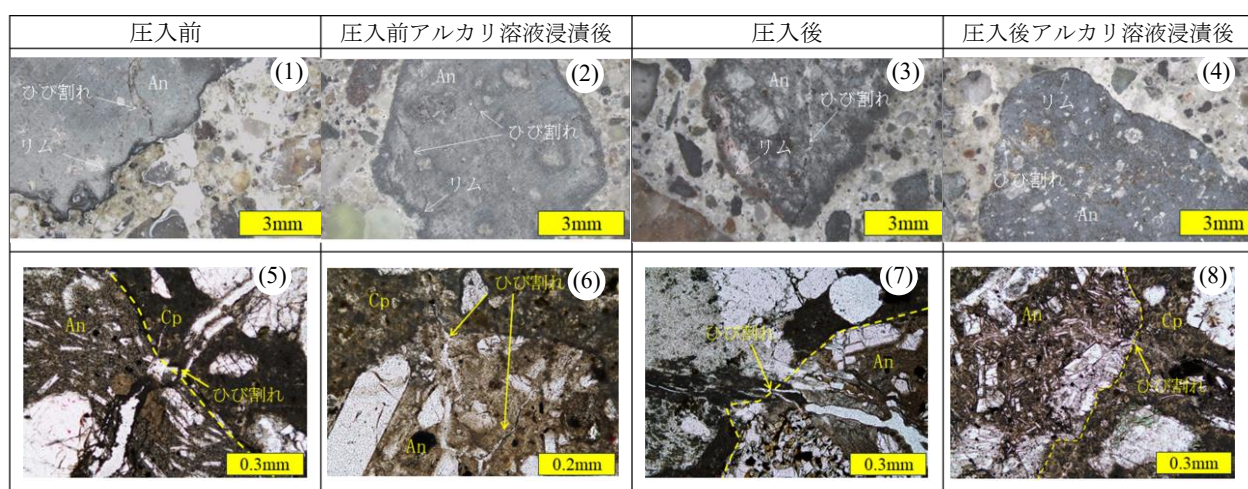


図-6 圧入前後におけるアルカリ溶液浸漬法によるコアの膨張率の比較



(1)～(4)流紋岩(Ry)の反応リム、白色ゲルの滲出しおよびひび割れの状況(実体顕微鏡観察), (5)～(8)流紋岩(Ry)からセメントペースト(Cp)に進展するゲルを含んだひび割れ(偏光顕微鏡観察・オープンニコル)

写真-3 A 橋における ASR の状況



(1)～(4)安山岩(An)の反応リム、白色ゲルの滲出しおよびひび割れの状況(実体顕微鏡観察), (5)～(8)安山岩(An)からセメントペースト(Cp)に進展するゲルを含んだひび割れ(偏光顕微鏡観察・オープンニコル)

写真-4 B 橋における ASR の状況

圧入工法前後ならびに圧入工法前後におけるアルカリ溶液浸漬法後のコアから断片試料および薄片を作製し、実体顕微鏡および偏光顕微鏡観察を行った。Katayama¹⁵⁾の研究では顕微鏡観察より、1)骨材の反応リムの形成(潜伏期に相当), 2)骨材周辺のゾル・ゲルの取巻き(潜伏期に相当), 3)骨材内のひび割れ形成・ゲルの充填(進展期・加速期に相当), 4)骨材を取り巻くセメントペースト内へのひび割れ形成・ゲル充填(進展期・加速期に相当), 5)セメントペースト中へのひび割れの進展, ならびにひび割れに沿って骨材から離れた気泡内へのゲルの沈殿(加速期・劣化期に相当), 6)ゲルの充たされたひび割れのネットワークの形成(加速期・劣化期に相当), の6段階で ASR が進行することを示しており, 観察結果と照合した。

観察の結果, 火山岩類の安山岩および流紋岩で顕著な ASR が発生していた。反応の状況を写真-3 および写真-4 に示す。砂や砂利からセメントペーストに進展する

ゲルを含有するひび割れが確認された。また, アルカリ溶液浸漬後, 圧入工法後および圧入工法後アルカリ容積浸漬後の試料では, 遅延膨張型のチャート, 頁岩およびホルンフェルスの砂で ASR の進行が認められた。

Katayama¹⁵⁾の研究と A 橋および B 橋の照合結果は, 各工程における ASR は 6 段階中 4)の段階(進展期・加速期に相当)に収まっており, 大きな変化は認められなかった。江良による圧入前後におけるコアの破断面のゲルの形態を電子顕微鏡で比較した結果, 大きな違いが認められなかったことと整合性がとれていた¹⁶⁾。この結果は, 圧入後におけるアルカリ溶液浸漬後にてコアの膨張率が低下したことに關して, 圧入工法により ASR ゲルが非膨張性化した効果によるものと考えられた。なお, 圧入工法後におけるアルカリ溶液浸漬法の結果から, 明確に ASR が収束しているとは判断できなかったことから, 補修後におけるひび割れの状況およびコアによるアルカリ溶液浸

漬法にて膨張率を定期的に測定することで ASR における潜在膨張性の傾向を確認することも必要と考えられた。

4. まとめ

塩害を受けた部材における亜硝酸イオンの拡散性状、ASR による劣化が進行した構造物にて圧入工法前後にコアを採取し、リチウムイオンによる ASR 抑制効果について検討した。得られた結果の主要な部分をまとめると以下のとおりである。

- (1) コンクリート表面部に亜硝酸リチウムを混入した防錆剤混入モルタルを施工することによって、既設コンクリートへの亜硝酸イオンの拡散が確認できた。
- (2) 防錆剤混入モルタル中の亜硝酸イオン濃度を高くするほど、時間の経過に伴い深部へと浸透濃度が高くなる傾向があり、早期に鉄筋周囲にて防錆雰囲気形成したい場合、高濃度の亜硝酸イオンを混入したモルタルを使用することが有効であった。
- (3) 亜硝酸イオンの拡散は、防錆剤混入モルタルにおける拡散係数を $0.2 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{sec}$ 、コンクリート中では塩化物イオンと同じ見掛けの拡散係数を用い、5mm 間隔による一次元の差分法にて予測することが有効であった。
- (4) 圧入工法前後にて、アルカリ溶液浸漬法によるコアの促進養生試験を適用した結果、圧入工法前より圧入工法後にてコアの膨張率が低下したことを確認した。なお圧入後のコアでも試験日数に伴い、膨張率が増加する傾向を示し、膨張余力が残っているものと推定された。
- (5) 圧入工法前後およびアルカリ溶液浸漬法後のコアで ASR の状況を偏光顕微鏡にて確認した。各工程における ASR は 6 段階中 4) の段階(進展期・加速期)に収まっており、反応に大きな変化は認められなかった。この結果は、圧入工法後におけるアルカリ溶液浸漬後にて、コアの膨張率が低下したことが、リチウムによる ASR ゲルの非膨張性化した効果によるものと考えられた。

参考文献

- 1) 堀孝廣 : <https://www.con-pro.net/readings/mystory/> (閲覧日 : 2023 年 12 月 10 日)
- 2) 青山實伸 : 道路橋における塩害対策, コンクリート工学, Vol.25, No.11, pp. 74-79, 1987
- 3) 野上克宏, 東田典雅, 小川正幸, 天野裕久 : 防錆剤混入モルタルに含まれる亜硝酸イオンの浸透性状について, 土木学会第 70 回年次講演会, V-601, pp.1201-1202, 2015

- 4) 福田杉夫, 舩田佳寛 : 亜硝酸リチウム含有ポリマーセメントモルタルによる塩害抑制効果の評価に関する研究, 日本建築構造系論文集, Vol.78, No.684, pp.251-259, 2013
- 5) 青山實伸, 平野誠志 : 防錆剤混入モルタルを活用した塩害対策, 技術情報誌「EXTEC」77 号, Vol.20, No.1, pp.48-50, 2006
- 6) 齋藤正司, 小野塚和博, 小林弘元, 青山實伸 : 北陸自動車道 親不知海岸高架橋上部工の塩害予防保全対策, コンクリート工学, Vol.46, No.10, pp.23-34, 2008
- 7) 東日本高速道路(株)ほか : 設計要領第二集橋梁保全編, pp. 4-39-43, 2020
- 8) 江良和徳 : リチウムイオン内部圧入によるアルカリシリカ反応の抑制について, コンクリート工学, Vol.50, No.2, pp. 155-162, 2012
- 9) (一)メンテナンス協会 : コンクリート構造物を対象とした亜硝酸リチウムによる補修の設計・施工指針(案), Vol.2, pp.75-76, 2022
- 10) 武内道雄, 須藤裕司, 渡辺二夫 : 飛来塩分環境下に 20 年間暴露したコンクリート供試体に対する亜硝酸系防錆剤の効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.797-802, 2010
- 11) 青山實伸, 丸山大三 : 厳しい塩害環境下のコンクリート橋の塩分浸透性と耐久性評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.999-1004, 2007
- 12) 加賀谷悦子, 五寶光基, 野村昌弘 : 内陸部でのコンクリート構造物の塩害による劣化状況, 土木学会年次学術講演会, V-252, pp.501-502, 2004
- 13) 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, pp.79-294, 1989
- 14) 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.1pp.1251-1256, 2007
- 15) Katayama, T : An attempt estimate past expansion of concrete based on petrographic stage of alkali-silica reaction, Proc. of 30th International Conference on Cement Microscopy, pp.217-236, 2017
- 16) 江良和徳, 三原孝文, 岡田繁之, 宮川豊章 : リチウムイオン内部圧入によるアルカリシリカ反応対策について, 材料, Vol.57, No.10, pp. 993-998, 2008
- 17) 松田啓暉, 野村昌弘 : 新潟県の ASR 構造物における維持管理手法の研究, 土木学会年次学術講演会, V-657, p.V-657, 2023