

亜硝酸リチウムを用いたASR抑制工法 ～ASRリチウム工法～

江良 和徳

極東興和株式会社 事業本部事業推進部補修課

〒732-0052 広島市東区光町2-6-31)



ASRの補修工法として、アルカリシリカゲルの非膨張化を目的としたASRリチウム工法が開発、実用化されている。本論では、ASRリチウム工法の概要と主な施工手順を概説するとともに、本工法を適用した構造物の追跡調査結果を報告するものである。追跡調査では、外観目視調査による再劣化の有無を確認するとともに、施工前、施工直後、施工後4年経過時における残存膨張量を比較し、本工法によるASR抑制効果が長期間持続していることを定量的に検証した。

キーワード：ASR、亜硝酸リチウム、内部圧入、長期耐久性、残存膨張量

1. はじめに

近年、アルカリシリカ反応（以下、ASRと呼ぶ）を要因としたコンクリート中の鉄筋破断が報告されたこともあり、現在、アルカリシリカ反応は極めて注目を集めているコンクリート構造物の劣化機構であるといえる。

ASRにより劣化したコンクリート構造物の補修対策として、従来より表面処理による水分浸入の遮断を目的とした補修工法が多く採用されてきた。ASRの劣化メカニズムから判断して、外部からの水を完全に遮断できれば以後のASR進行は抑制されると考えられるが、実際にはこれら表面処理により補修した構造物において再劣化を生じている構造物（図-1）も少なくない。これは、条件によっては水分を完全に遮断することが困難な場合があり、かつ表面被覆材の高い遮水性によって水分をコンクリート内部に閉じ込めることとなり、結果的にASRを



図-1 表面処理によるASR補修後の再劣化事例

助長してしまうこともあることを示している。

そのような中、ASRの補修工法としてアルカリシリカゲルの非膨張化を目的としてリチウムイオンを使用する手法が注目されている^{1), 2)}。リチウムイオンを用いたASR補修工法には、塗布工法、ひび割れ注入工法、内部圧入工法の3種類が実用化されているが、なかでもリチウムイオンをコンクリート内部にまで急速に供給できるリチウムイオン内部圧入工³⁾の実績が増えている。本論は、リチウムイオン内部圧入工として開発・実用化された『ASRリチウム工法』について、工法概要、施工事例および補修効果の検証について報告するものである。

2. ASRリチウム工法概要

2.1 リチウムイオンによるASR抑制メカニズム

ASRとは、建設時に有害な反応性骨材が使用された構造物に見られる劣化である。反応性骨材中のシリカ鉱物がコンクリート中のアルカリ金属イオン（ Na^+ 、 K^+ ）と反応してアルカリシリカゲルを生成し、そこに水分が供給される事でアルカリシリカゲルの吸水膨張反応が生じる。この膨張圧によりコンクリートにひび割れが生じ、構造物の耐久性・耐荷性を低下させる。これがASRによる劣化のメカニズムである。

ここで、アルカリシリカゲル（ $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$ ）にリチウムイオンを供給すると、ゲル中の Na^+ と供給された Li^+ のイオン置換反応が生じ、水に対する溶解性、吸湿性を持たないリチウムモノシリケート（ $\text{Li}_2 \cdot \text{SiO}_2$ ）またはリチウムジシリケート（ $\text{Li}_2 \cdot 2\text{SiO}_2$ ）へと組成変化し、以後の

吸水膨張反応が収束する。これがリチウムイオンによるASR膨張抑制メカニズムである。

2.2 ASRリチウム工法の概要

ASR リチウム工法は、コンクリート躯体に小径の削孔を行い、そこから亜硝酸リチウムを加圧注入してコンクリート内部に浸透させることにより、コンクリート内部の広範囲にリチウムイオンを供給し、以後のASR膨張を抑制する補修工法である。削孔径はコンクリート躯体へのダメージを最小限とするようφ10mmまたはφ20mmとし、削孔深さや部材寸法に応じて選択される。削孔間隔は500mm～750mmとし、亜硝酸リチウム浸透範囲に斑がでにくいように千鳥配置とされる。注入圧力は対象構造物の劣化程度に応じて設定され、一般的に0.5～1.5MPaの範囲とされることが多い。内部圧入する亜硝酸リチウムの量は対象構造物のアルカリ含有量に応じて構造物毎に設定され、その量は $[Li^+]$ [等価Na⁺]モル比1.0となる量とされている。

リチウムイオン内部圧入工の概要図を図-2に示す。

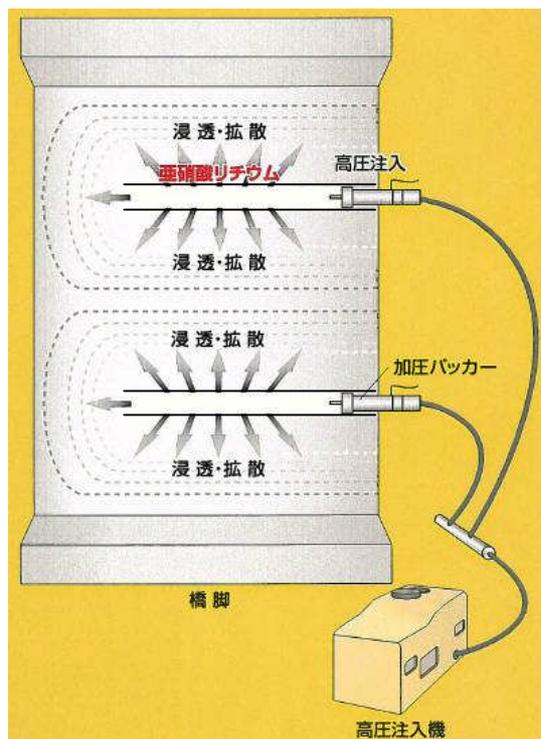


図-2 工法概要図

3. 施工事例

3.1 工事概要

工事名：平成17年度管内補修工事
 工事場所：一般国道32号 無名橋（陶橋）他1橋
 工期：平成17年7月～平成17年12月
 発注者：国土交通省四国地方整備局

対象構造物：道路橋下部工（橋台4基）
 施工数量：対象コンクリート体積 235m³
 圧入孔本数（φ20mm） 834孔
 亜硝酸リチウム40%水溶液 5,156kg

3.2 圧入仕様の設計

ASRリチウム工法において、設計で決めるべき主な圧入仕様は、「亜硝酸リチウム設計圧入量」「上限注入圧力」および「推定圧入時間」の3種類である。これらは対象構造物から採取したコンクリートコアによる室内試験の結果を基に算出する。

亜硝酸リチウム設計圧入量は、コンクリート中のアルカリ総量試験結果より求める。すなわち、アルカリ総量を測定し、そこで得られた[等価Na⁺]とモル比で等価となる（ $[Li^+]$ [等価Na⁺]モル比1.0）リチウムイオン量を供給するように亜硝酸リチウム圧入量を決定する。これは、コンクリート中のアルカリ含有量が高いほど、多くの亜硝酸リチウムが必要となることを示している。

上限注入圧力は圧縮強度試験値の1/30の圧力として定める。これは、コンクリート引張強度を圧縮強度の1/10と仮定し、さらに安全率3を見込むことにより、当該コンクリートがもつ引張強度から十分に余裕（安全率）を見込んだ圧力を上限値と設定するものである。

推定圧入日数は、弾性係数試験および圧縮強度試験の結果より算出する。同じ圧力で亜硝酸リチウムを圧入しても、コンクリートの現有強度や密実性、そしてASR劣化の程度などにより圧入に要する時間が大幅に変化することが経験的に分かっている。それらのコンクリートの状態を圧縮強度および弾性経緯数で代表させた圧入日数推定式により、推定圧入日数を定めている。

本橋のA1橋台およびA2橋台のコンクリート試験結果と、それらから設定した圧入仕様を表-1に示す。

表-1 無名橋(陶橋)の圧入仕様の設定

無名橋 (陶橋) A1橋台	圧縮強度	35.4N/mm ²	→	上限圧力	1.1MPa
	静弾性係数	12.7kN/mm ²		推定圧入日数	14日
	アルカリ総量	4.6kg/m ³		亜硝酸リチウム量	19.7kg/m ³
無名橋 (陶橋) A2橋台	圧縮強度	29.0N/mm ²	→	上限圧力	0.9MPa
	静弾性係数	10.5 × kN/mm ²		推定圧入日数	11日
	アルカリ総量	6.0kg/m ³		亜硝酸リチウム量	25.6kg/m ³

3.3 施工手順

ASRリチウム工法の主な施工手順を以下に示す。

①下地処理:

コンクリート表面を高圧洗浄する。

②表面漏出防止工:

幅0.2mm以上のひび割れはひび割れ注入を行う。

幅0.2mm未満のひび割れや表面のジャンカには表面シールを行う。これらにより、亜硝酸リチウム内部圧入時の表面からの漏出を防止する（図-3）。

③鉄筋探査工:

削孔に先立ち、鉄筋探査機により既設鉄筋位置を墨だした後に削孔位置を確定させる。

④削孔工:

ダイヤモンドコアドリルにて、亜硝酸リチウムを圧入するための圧入孔を削孔する(図-4)。

⑤圧入装置の設置:

加圧パッカー、耐圧ホース、分配器、加圧注入機を配置する。

⑥加圧注入工:

亜硝酸リチウム設計圧入量をコンクリート内に確実に供給する(図-5)。

⑦圧入孔充填

圧入が完了した後に、圧入孔を無収縮グラウト材にて充填する。

⑧完了

必要に応じて表面処理を行い、足場を撤去して完了。

4. ASR 抑制効果の長期耐久性

4.1 検討概要

ASR リチウム工法による ASR 抑制効果の長期耐久性を検討するために、本工法を施工して4年経過した海田高架橋(図-6)および5年経過した陶橋(図-7)の追跡調査を行い、外観変状の有無を確認した。また、ASR リチウム工法による ASR 抑制効果を定量的に確認するために、某施設内擁壁(図-8)において、施工前、施工直後および施工4年後に残存膨張量試験を実施し、比較検討した。検討の対象とした構造物は、いずれも竣工後30年程度経過し、現在も供用中の橋台、橋脚および擁壁である。これらの構造物の詳細調査が行われた結果、ASR による劣化と判定され、2004年から2005年にかけて ASR リチウム工法が施工された。いずれの構造物もコンクリート中のアルカリ総量試験結果を基に、 $[Li]^+/[Na]^+$ モル比 1.0 となる量の亜硝酸リチウムを0.5~1.2MPaの圧力で内部圧入して



図-3 表面漏出防止工



図-6 海田高架橋(2004年施工)



図-4 削孔工(ダイヤモンドコアドリル)



図-7 陶橋(2005年施工)



図-5 加圧注入工



図-8 某施設内擁壁(2005年施工)

4.2 外観目視調査結果

(1)海田高架橋の調査結果

海田高架橋橋脚の施工前（2004年5月）と施工後5年経過時（2009年5月）の状況を図-9に示す。施工前の変状としては、橋脚はり部に幅0.5～5.0mmのひび割れが多数見られ、はり上縁部および下縁部の鉄筋曲げ加工部には鉄筋破断も認められた。施工後5年の外観状況を見ると、コンクリート表面に施してある柔軟型ポリウレタン樹脂系表面保護材の表面の膨れや割れなど、ASRの再劣化またはその前兆とみなせるような外観変状は認

められなかった。

本橋脚はASRリチウム工法の施工よりも以前に表面保護工によるASR補修がなされており、そのわずか数年後にASR再劣化が生じた履歴をもつ。このように本橋脚はASR膨張の進行が速いコンクリートであったが、リチウムイオンを内部圧入して5年経過した時点でもASR抑制効果は持続していると考えられる。

(2)陶橋橋台の調査結果

陶橋橋台の施工前（2005年9月）と施工後4年経過時（2009年8月）の状況を図-10に示す。施工前の変状と



図-9 海田高架橋橋脚 施工前状況と施工後5年経過時の状況

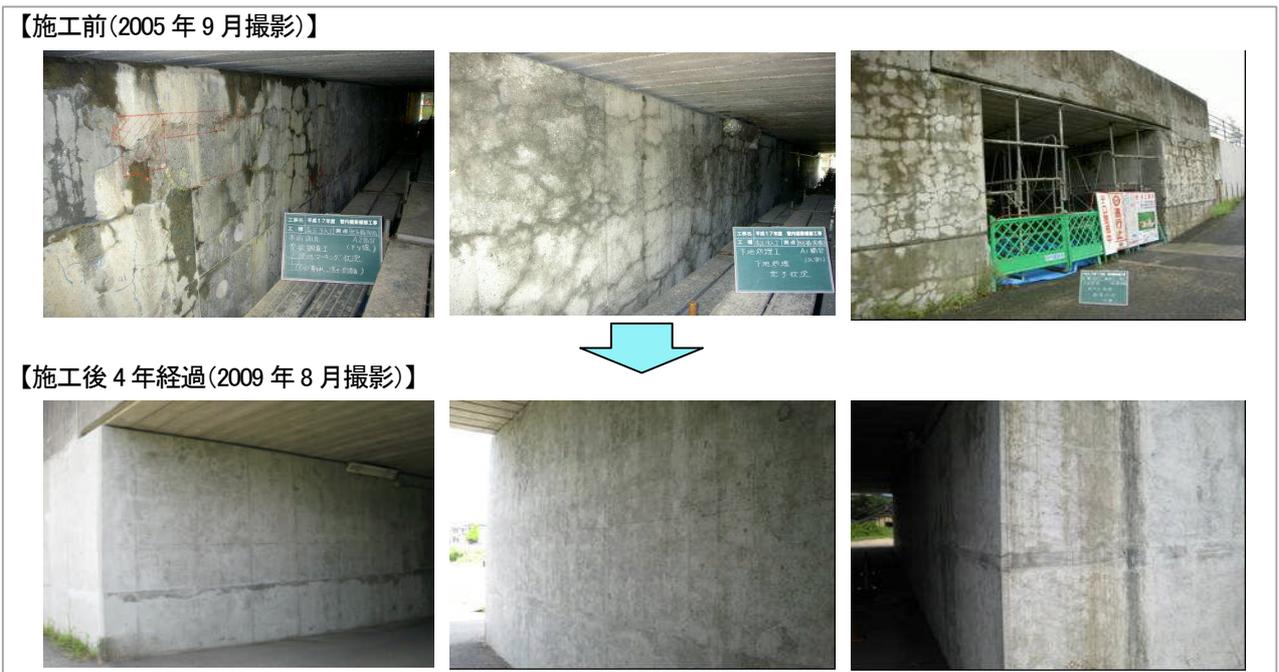


図-10 陶橋橋台 施工前状況と施工後4年経過時の状況

しては、亀甲状のひび割れが多数発生しており、ひび割れの一部からは漏水が見られていた。また、橋台支承面や背面からの水分がコンクリート内部およびひび割れを通じて橋台前面側へと浸透している状況が見られていた。

本橋台の補修工事では、亜硝酸リチウムを内部圧入した後のコンクリート表面に表面保護工を施していないため、4年経過した時点でのコンクリート表面の状況を直接確認することができる。本橋台のコンクリート表面を入念に近接目視調査した結果、ASR再劣化またはその前兆とみなせるような外観変状は認められなかった。橋台前面に見られるひび割れ注入跡を図-11に示す。これは亜硝酸リチウムを内部圧入する前処理として幅0.2mm以上のひび割れに超微粒子セメント系ひび割れ注入材を注入した痕跡である。この注入材はひび割れ追従性を持たない材料であるが、このひび割れ注入跡付近は健全な状態が保たれていた。

これらの結果から、ASRリチウム工法を施工してから現在までの4年間でASRの進行を伺わせるような変状やその兆候は認められず、ASRリチウム工法によるASR抑制効果は持続しているものと判断することができる。

4.3 施工4年後の残存膨張量試験結果

某施設内擁壁における施工前、施工直後および施工後4年経過時の残存膨張量試験結果（JCI-DD2法）を図-13に示す。全膨張量を見ると、施工前は0.081%を示したのに対し、施工後は0.018%となり、施工前に比べて22.2%にまで低下していた。残存膨張量で比較すると、施工前は0.052%、施工後は0.014%であり、施工前に比べて26.9%にまで低下していた。将来的な膨張の可能性を表す残存膨張量が施工後に元の値の26.9%にまで低減されており、その値もJCI-DD2法の判定基準のひとつである0.05%を下回っているため、ASRリチウム工法によるASR抑制効果が得られていると判断できる。



図-11 ひび割れ注入跡の状況

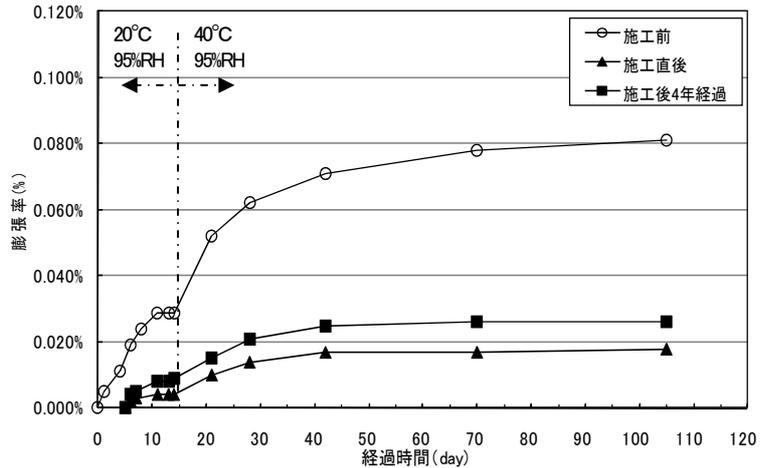


図-13 某施設内擁壁の残存膨張量試験(JCI-DD2法)

次に、施工直後と施工後4年経過時に着目して両者の膨張傾向を比較する。全膨張量を見ると、施工直後で0.018%を示していたのに対し、施工後4年経過時では0.026%と若干高い数値を示した。ただし、13週で0.05%というJCI-DD2法の基準値を大きく下回っているとともに、施工前の値0.081%と比べると、施工後4年経過しても元の値の32.1%にまで低減された状態を維持しており、依然として高いASR膨張低減効果が持続していると判断することができる。

ASRリチウム工法施工後の残存膨張量が低減されている状態とは、コンクリート内部のアルカリシリカゲルがリチウムイオンによって非膨張化され、以後のASR膨張進行の可能性が低減された状態を指すものと考えられる。リチウムイオンによって一旦非膨張化されたゲルは、[等価Na⁺]と[Li⁺]とのイオンバランスが急激に変化しない限り、再び膨張性を獲得することはないと推察される。このことからASRリチウム工法を施工した構造物は、基本的にASRによる再劣化を引き起こす可能性は低いと考えられる。

5. まとめ

- (1)ASRで劣化した構造物の補修工法として、リチウムイオンによるゲルの非膨張化を目的とする『ASRリチウム工法』が注目されており、施工実績も増えてきている。
- (2)ASRリチウム工法を施工した後4~5年経過した橋台、橋脚の外観目視調査を行った結果、ASRの再劣化を伺わせるような変状やその兆候は認められなかった。
- (3)ASRリチウム工法の施工前、施工直後および施工後4年経過した擁壁においてJCI-DD2法による残存膨張量試験を実施した結果、施工4年後の残存膨張量は施工直後の残存膨張量（施工前よりも低減されている値）と同程度で維持されていた。