

# 防水ジャーナル

ROOFING / SIDING / INSULATION / RENEWAL

2023

2

No.615

特集2 特集1

表面含浸材の効果検証

長寿命化建築に挑む防水



# 『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)』改訂概要と併用型工法の適用事例

江良 和徳

一般社団法人コンクリートメンテナンス協会 技術委員長

## 1 はじめに

四方を海に囲まれたわが国は必然的に飛来塩分による塩害のおそれが存在する。また内陸部であっても山間部や積雪地帯で散布される凍結防止剤が塩害を誘引する原因となり、塩害による劣化は全国各地で顕在化しているのが実情である。また、アルカリシリカ反応（以下、ASR）の補修は容易ではなく、再劣化している構造物が後を絶たない。コンクリート構造物の補修技術にはさまざまなものが開発、実用化されているが、その一翼を担う補修材料として亜硝酸リチウムの活用が着目されている。

亜硝酸リチウムはコンクリート構造物の延命化を目的とした補修材料として広く認識されており、ひび割れ注入工、表面含浸工、表面被覆工、断面修復工、内部圧入工などさまざまな補

修工法として実用化されている<sup>1)</sup>。近年では特に表面含浸工法に亜硝酸リチウムを併用する工法の適用事例が増えている。そのような状況の中、当協会では2020年4月に『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)』<sup>2)</sup>（以下、設計施工指針）を発刊し、コンクリート補修技術としての亜硝酸リチウムの活用方法を示した。そして2022年4月、設計施工指針の内容の一部を改訂し、第2版<sup>3)</sup>として発刊した（写真1）。

本稿では、『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) 第2版』の主な改訂点を踏まえ、亜硝酸リチウムの特性と活用方法を概説するとともに、適用事例が増えている亜硝酸リチウム併用型表面含浸工法の設計、施工の解説および実際の適用事例について紹介する。

## 2 亜硝酸リチウムについて

### 2.1 亜硝酸リチウムの特性

まず、技術の核となる亜硝酸リチウムの特性について示す。亜硝酸リチウム（Lithium Nitrite;  $\text{LiNO}_2$ ）は、リチウムイオン  $[\text{Li}^+]$  と亜硝酸イオン  $[\text{NO}_2^-]$  とがイオン結合した化合物であり、主に濃度40%の亜硝酸リチウム水溶液として製品化されている。亜硝酸リチウムの成分のうち、亜硝酸イオン  $[\text{NO}_2^-]$  は鋼材表面の不動態皮膜を再生する効果があり、塩害や中性化などの鋼材腐食に起因する劣化の補修材料と



写真1 『コンクリート構造物を対象とした亜硝酸リチウムを用いた補修の設計・施工指針(案) 第2版』

して適用される。亜硝酸イオンは2価の鉄イオンと反応してアノード部からの鉄イオンの溶出を防止し、不動態皮膜として鋼材表面に着床することによって鋼材腐食反応を抑制する。不動態皮膜が再生されると、以後の鋼材の腐食反応は不活性な状態となり、進行が抑制される（図1）。

一方、リチウムイオン  $[\text{Li}^+]$  はアルカリシリカゲルを非膨張化する効果があるため、ASR劣化の補修材料として適用される。リチウムイオンのASR膨張抑制メカニズムは、コンクリート中の反応性骨材周囲に生成したアルカリシリカゲルの吸水膨張反応抑制とされることが多い<sup>4)</sup>。すなわち、アルカリシリカゲルにリチウムイオンが供給されることによって、その一部が水に対する溶解性や吸湿性を持たないリチウムシリケートに置換され、アルカリシリカゲルが非膨張化される。この反応によりアルカリシリカゲルの吸水膨張反応は収束し、以後のコンクリートの膨張は進行しない（図2）。

### 2.2 浸透拡散型亜硝酸リチウム

このようなメカニズムを有する亜硝酸リチウム40%水溶液として、一般型と浸透拡散型という粘性の異なる二つのグレードが製品化されている（表1）。浸透拡散型は一般型に比べて粘性が低い分、コンクリート中の浸透性能に優れる。設計施工指針の初版では、従来からの慣習にしたがって表面含浸工、表面被覆工、断面修復工に一般型亜硝酸リチウムを、ひび割れ注入工および内部圧入工に浸透拡散型亜硝酸リチウムを適用することとしていた。しかし、コンクリート表面への塗布や断面修復材への混入という活用方法においても、コンクリート中の亜硝酸リチウムの浸透性能に優れた浸透拡散型を使用することで補修効果の向上が期待できるはず

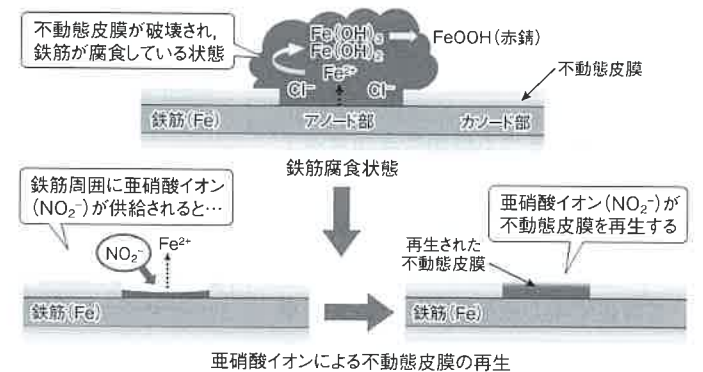


図1 亜硝酸イオンによる鉄筋腐食抑制メカニズム

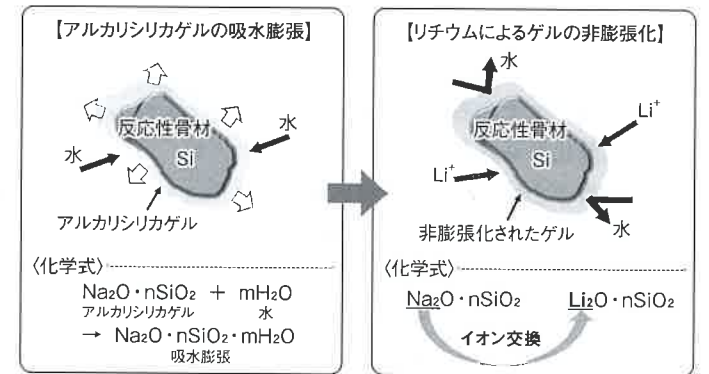



図2 リチウムイオンによるASR膨張抑制メカニズム

表1 亜硝酸リチウムの品質規格

グレード	一般型	浸透拡散型
濃度	40±1%	40±1%
密度	1.25±0.05 g/cm <sup>3</sup>	1.25±0.05 g/cm <sup>3</sup>
pH	9.0±1.0	9.0±1.0
粘度	50mPa·s以下	20mPa·s以下
外観	 青色透明	 黄色透明

である。そこで、それらの工法においても浸透拡散型の適用が検討され、各種の効果確認試験によりその優位性が確認されたため、設計施工指針第2版ではすべての補修工法に対して浸透拡散型亜硝酸リチウムを適用することに変更されている。



### 3 亜硝酸リチウム併用型表面含浸工法の設計

#### 3.1 亜硝酸リチウム併用型表面含浸工法の概要

亜硝酸リチウムを用いた各種補修工法のうち、本稿では表面含浸工法について詳述する。亜硝酸リチウム併用型表面含浸工法における使用材料は、浸透拡散型亜硝酸リチウムおよびシラン・シロキサン系表面含浸材の2種類の組合せとする。

本工法を塩害、中性化の補修として適用する場合、その目的は「塩化物イオン、二酸化炭素、水分、酸素の侵入抑制」および「不動態皮膜再生による鋼材腐食抑制」となる。それらの補修効果のうち劣化因子の侵入抑制を担うのはシラン・シロキサン系表面含浸材であり、コンクリート表層部に撥水層を形成することによって外部からの劣化因子の侵入を抑制する。鋼材腐食抑制効果を担うのは浸透拡散型亜硝酸リチウムであり、そのメカニズムは先述したとおりである。本工法を塩害、中性化補修として適用する場合の概念を図3に示す。

本工法をASR補修として適用する場合、その目的は「水分の侵入抑制」および「アルカリシリカゲルの非膨張化による膨張抑制」となる。それらの補修効果のうち劣化因子の侵入抑制を担うのはシラン・シロキサン系表面含浸材であり、ASR膨張抑制効果を担うのは浸透拡散型亜硝酸リチウムである。本工法をASR補修として適用する場合の概念を図4に示す。

本工法における浸透拡散型亜硝酸リチウムの標準塗布量は、過去の施工実績を考慮して0.3kg/m<sup>2</sup>とした。ただし、塩害補修として本工法を適用する場合、塩化物イオン量に応じて亜硝酸リチウム必要量を算出し、標準塗布量を超える設計塗布量を設定することもできる。シラ

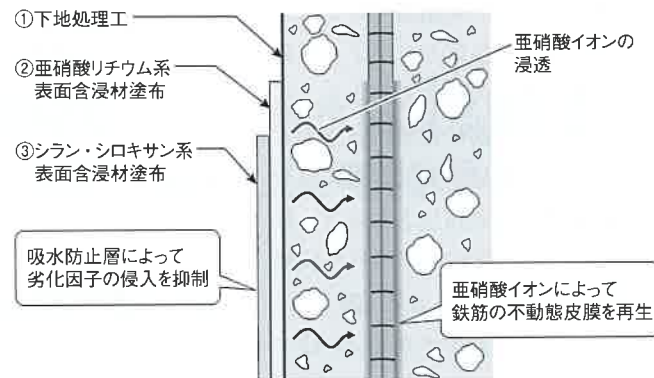


図3 亜硝酸リチウム併用型表面含浸工法の概念(塩害, 中性化補修)

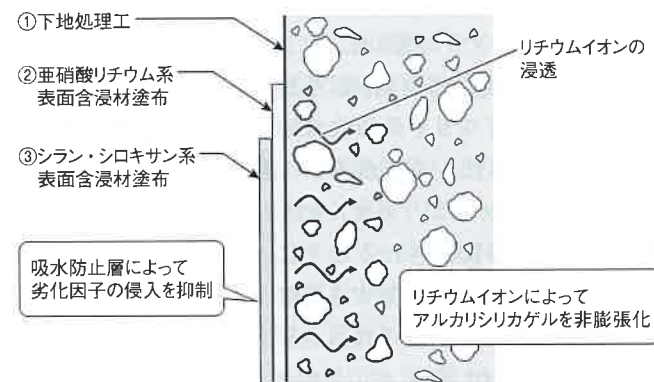


図4 亜硝酸リチウム併用型表面含浸工法の概念(ASR補修)

表2 亜硝酸リチウム併用型表面含浸工の性能試験結果

試験項目		実測値	グレード
含浸深さ試験	含浸深さ	16.2mm	—
透水量試験	透水抑制率	84%	A
吸水量試験	吸水抑制率	86%	A
透湿度試験	透湿比	64%	B
中性化に対する抵抗性試験	中性化抑制率	100%	A
塩化物イオン浸透に対する抵抗性	塩化物イオン浸透抑制率	100%	A

ン・シロキサン系表面含浸材の塗布量は劣化機構に関わらず0.18kg/m<sup>2</sup>とする。この両材料を標準塗布量で塗布した場合の本工法の性能については、土木学会「表面含浸材の試験方法(案)JSCE-K 571-2013」に準じて建設技術センターにて確認している。試験項目および結果を表2に示す。

#### 3.2 亜硝酸リチウム併用型表面含浸工法の設計の考え方

##### (1) 塩害, 中性化補修として

塩害における潜伏期とは、鉄筋位置での塩化物イオンがまだ腐食発生限界値(例えば1.2kg/m<sup>2</sup>や2.0kg/m<sup>2</sup>など)を超えていない状態を指す。また中性化における潜伏期とは、二酸化炭素の侵入によるコンクリートのpH低下の影響がまだ鉄筋にまで及んでいない(例えば中性化残りが10mm以上)状態を指す。したがって、塩害および中性化の潜伏期においては、以後の塩化物イオンまたは二酸化炭素の侵入を抑制することで充分な予防保全を図ることができる。すなわち、補修工法の主たる要求性能は単に「劣化因子の侵入抑制」とすることができ、亜硝酸リチウムを併用する必要性は必ずしも高くはない。

しかし、塩害が進展期に達して腐食発生限界を超える塩化物イオンが鉄筋周囲に存在する場合、もしくは中性化が進展期に達して中性化残りが10mm未満となっている場合には、すでに鉄筋の不動態皮膜は破壊され、鉄筋腐食が開始しているとみなすべきである。したがって、塩害および中性化の進展期においては、以後の劣化因子の塩化物イオン、二酸化炭素の侵入抑制だけでなく、すでに腐食が進行している鉄筋の防錆にも着目することが重要である。すなわち、補修工法の主たる要求性能を「劣化因子の侵入抑制」および「不動態皮膜の再生による鉄筋腐食抑制」とすることで充分な予防保全を図ることができ、亜硝酸リチウムを併用する必要性が高いと考えられる。

塩害または中性化に起因するひび割れやコンクリートの浮き、剥離などの変状が発生している構造物の事後保全対策のうち、劣化過程が加速期前期と判定される段階においては、ひび割れ注入工や断面修復工による補修に加えて本工法を併用することができる。すでに鉄筋腐食が進行している構造物であるため、ひび割れ注入工、断面修復工および表面含浸工のそれぞれに亜硝酸リチウムを併用することで、より鉄筋腐

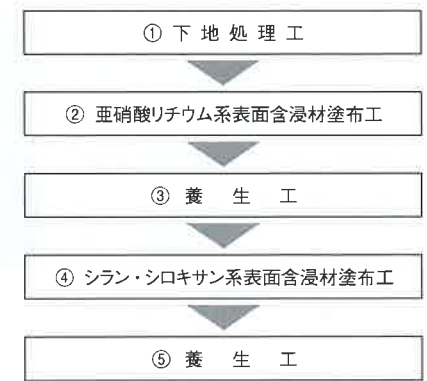


図5 亜硝酸リチウム併用型表面含浸工法の施工フロー

食抑制効果の高い補修工法の組合せとすることができる。ただし、劣化過程が加速期後期または劣化期にまで至っている場合には変状の程度も著しく、表面含浸工法のみによる補修を行っても充分な補修効果が期待できないと考えられるため、適用範囲外とした。

##### (2) ASR補修として

ASRの潜伏期とは、アルカリシリカゲルの膨張によるコンクリートのひび割れなどが生じていない状態を指す。しかし、ASRの潜伏期において予防保全的な補修を行う場面はそれほど想定されず、潜伏期における本工法の必要性は必ずしも高くはない。

ASRに起因するひび割れなどの変状が発生している構造物の事後保全対策のうち、劣化過程が加速期前期と判定される段階においては、ひび割れ注入工と本工法とを併用して適用することができる。この時、両工法に亜硝酸リチウムを併用することで、よりASR膨張抑制効果の高い補修工法の組合せとすることができるため、構造物の長寿命化に対して効果が高いと考えられる。ただし、劣化過程が加速期または劣化期にまで至っている場合には変状の程度も著しく、表面含浸工法のみによる補修を行っても充分な補修効果が期待できないと考えられるため適用範囲外とした。ここで、リチウムイオンがコンクリート中を浸透、拡散するためには長時間を要するため、本工法で得られるASR膨張抑

制効果はコンクリート表層部のみに限られることも考慮しておく必要がある。

#### 4 亜硝酸リチウム併用型表面含浸工法の施工

##### 4.1 施工手順と施工上の留意点

本工法の施工フローを図5に示す。

- ①下地処理工では、コンクリート表面に付着しているホコリ、遊離石灰、油脂類、塩分などを、シンナー拭き、ワイヤーブラシ、ディスクサンダー、高圧水洗浄などによって入念に除去する。
- ②亜硝酸リチウム系表面含浸材塗布工では、コンクリート表面にローラーまたは刷毛を用いて浸透拡散型亜硝酸リチウムを塗布する。この時、塗り残しのないよう規定量を均一に塗布する。塗布回数は2回または3回を標準とし、施工時のコンクリート表面の状況をよく観察した上で判断する。
- ③養生工では、浸透拡散型亜硝酸リチウムを規定量塗布した後、シラン・シロキサン系表面含浸材を塗布するまでに12時間以上の養生時間を置く。その間、施工面に雨水などが直接かからないよう、必要に応じてシート養生などを行う。養生工の終了時期はコンクリート表面の表面水分率が6%以下となっていることの確認をもって判断する。6%を超えている場合は養生時間を延長する。
- ④シラン・シロキサン系表面含浸材塗布工では、コンクリート表面の表面水分率が6%以下であることを確認した後、ローラーまたは刷毛を用いてシラン・シロキサン系表面含浸材を塗布する。塗布回数は1回を標準とする。
- ⑤養生工では、シラン・シロキサン系表面含浸材を塗布した後12時間以上の養生時間を置く。その間、施工面に雨水などが直接かからないよう、必要に応じてシート養生などを行う。



写真2 橋梁上部工の塩害補修事例

##### 4.2 施工事例

###### (1) 橋梁上部工の塩害補修事例

最初の施工事例は沿岸地域に位置するRC上部工(床版橋下面)である(写真2)。定期点検の結果、ひび割れなどの変状は認められていないものの、沿岸地域に位置することと、同様の塩害環境にある同種構造物に塩害による変状が生じていたことを鑑み、塩化物イオン含有量試験および鉄筋腐食状況調査が実施された。その結果、鉄筋位置で腐食発生限界を超える2.8kg/m<sup>3</sup>程度の塩化物イオン量が検出され、はつり出された鉄筋の表面には点錆が点在する状況が確認された。これにより、劣化原因は塩害、劣化過程は進展期であると診断され、予防保全的に対策を講じることとなった。塩害の進展期ということは、すでに不動態皮膜を破壊するのに十分な塩化物イオンが侵入した後であるため、対策工法に要求する性能を「劣化因子の遮断」のみとすることは適切ではない。不動態皮膜が破壊され、鉄筋腐食が進行している状況であるため、鉄筋腐食そのものの進行を抑制するために「不動態皮膜の再生効果」を要求性能として追加すべきである。このような設計思想の下、「劣化因子

の遮断+不動態皮膜再生」という要求性能を満たす補修工法として、亜硝酸リチウム併用型表面含浸工法が採用となった。

施工方法は前述したとおり、浸透拡散型亜硝酸リチウムとシラン・シロキサン系表面含浸材を塗り重ねる。ここで使用する材料はいずれも無色透明であり、施工完了後もコンクリート表面の外観を変えずに補修効果を付与することができる。補修効果確認の一環として、霧吹きによって施工面に水を噴霧することで、シラン・シロキサン系含浸材による撥水状態を検査することができる。

塩害の進展期はひび割れなどの変状はまだ生じていない段階であるため、外観では潜伏期と判別することはできない。しかし潜伏期と進展期では内部の鉄筋腐食状況やひび割れ発生のリスクが大きく異なることを認識し、適切に予防保全を行うことが重要であると考えている。

###### (2) 歴史的建築構造物の中性化補修事例

次に示す施工事例は内陸部に位置する町役場のRC造庁舎である(写真3)。登録有形文化財に指定された歴史的建造物である本構造物には、微細なひび割れなどの軽微な変状が認められていた。塩化物イオン含有量は腐食発生限界に満たないものの、中性化残りが5mm程度と鉄筋位置付近まで進行しており、進展期から加速期前期に移行しつつある中性化と診断された。ひび割れ幅は最大で0.15mm程度であるためにひび割れ補修までは必要ないと判断されたものの、内部の鉄筋は既に腐食環境にあることは明確であり、補修工法に要求する性能は「劣化因子の遮断+不動態皮膜再生」と定められた。

ここで、歴史的建造物の補修対策においてはオーセンティシティ(authenticity)を確保する観点から、施工後も外観を変えないことが許容されないことが多い。その点、表面含浸工法は外観を変更することがないため、適用性が高いといえる。ただし、表面含浸工法が適用できる劣



写真3 歴史的建築物の中性化補修事例

化過程は潜伏期や進展期の予防保全段階、または加速期前期の比較的軽微な事後保全までとなるため、適切な施工時期を逃さないための意思決定のタイミングが重要であると考えている。

#### 5 おわりに

本稿では、2022年4月に当協会より発行された『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工法の設計・施工指針(案)第2版』における改訂点を踏まえ、特に適用事例が増えている亜硝酸リチウム併用型表面含浸工法の概要および施工事例について紹介した。本稿の執筆にあたり、施工事例データの提供に協力いただいた発注者およびコンクリートメンテナンス協会各位に深く感謝する次第である。

##### 参考文献

- 1) 江良和徳, 三原孝文, 山本貴士, 宮川豊章: リチウムイオンによるASR膨張抑制効果に関する一考察, Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.58, No.8, pp697-702, 2019
- 2) コンクリートメンテナンス協会: 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), 2020.4
- 3) コンクリートメンテナンス協会: 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)第2版, 2022.4
- 4) M.D.A.Thomas, R.Hooper and D.B.Stokes, "Use of Lithium Containing Compounds to Control Expansion in Concrete Due to Alkali-Silica Reaction," Proceedings of 11th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, pp.783-792, 2000