

## 【資料】亜硝酸リチウムを用いた補修対策の考え方

### (1) 亜硝酸リチウムを用いた ASR の補修工法

構造物の外観変状調査の結果、ひび割れや白色ゲル析出など ASR による劣化が疑われた場合、コア採取による詳細調査を実施して劣化要因が ASR であるかどうかを判定します。ASR に関する試験方法としては、膨張量試験、岩種判定、アルカリ含有量分析、アルカリシリカゲルの確認などが挙げられます。

劣化要因が ASR であると判定されると、次に ASR 対策工法の選定を行います。ASR 対策工法を適切に選定するためには、以下のような着目点について考慮しておくことが重要です。

#### ① ASR の膨張性

- ・残存膨張量試験により、今後も有害な膨張が進行するか否かを推定する
- ・過去の定期的なひび割れ調査結果などから、ASR の進行性や進行速度を推定する

#### ② 構造物の立地・環境条件等

- ・水分遮断による ASR 抑制効果が期待できる環境か否か？
- ・構造物へのアプローチは容易か否か？

#### ③ 構造物の予定供用年数

- ・予定供用年数は？

ASR によるコンクリートの膨張性は非常に大きく、その膨張も長期間継続することが知られています。その結果、ASR 補修を施工しても短期間のうちに再劣化を引き起こしている構造物も少なくありません。したがって、ASR で劣化した構造物の対策工法を選定するにあたり、将来的な ASR 膨張性、進行性を把握し、今後も有害な膨張が進行するか否かを適切に評価することは極めて重要です。ASR の膨張性を評価する方法として、コア採取による残存膨張量試験が挙げられます。残存膨張量試験には、「JCI-DD2 法」、「カナダ法」、「デンマーク法」などがあり、それぞれ促進条件や試験期間、判定基準などが異なります。いずれの試験方法を用いた場合でも、それぞれの判定基準を超える膨張量を示した場合には、今後も有害な膨張が進行することを前提として対策工法を選定することが重要となります。

ここで、いずれの試験方法においても当該構造物の将来的な ASR 膨張進行の可能性を定量的に示すことができるのですが、反応性骨材の種類によっては、ある試験方法では膨張性を適切に評価できずに「無害」と誤診する可能性があることも指摘されています。例えば、JCI-DD2 法における判定基準値のひとつとして、13 週間の促進環境下における膨張量が 0.05% 以上を示したものを有害と判定する基準値がありますが、遅延膨張性を示す骨材などでは実際には有害な膨張性を秘めているにもかかわらず、試験結果では 0.05% を下回るということもあります。残存膨張量試験の結果はあくまである一定の促進環境下における膨張量を示すものであり、以後の ASR 膨張の可能性を示すひとつの目安程度と捉える姿勢も必要となります。過去の定期

的な調査結果から、ひび割れ幅や延長の進展がみられる場合には、残存膨張量試験によらず ASR の進行性が大きいと判断することもできます。

ASR 対策工法を選定する場合、今後も有害な膨張が進行するか否かによって選択される工法が異なってきます。ASR の膨張性が大きい場合と小さい場合に分けて、先述した①～③の着目点を考慮した ASR 対策工法選定の考え方について以下に示します。

#### ASR 膨張性が十分に小さい場合

ASR 膨張性が十分に小さいと判断される場合には、対策工法をシンプルに選定できます。このケースの特徴は以下の通りです。

- ゲルの膨張性は既に収束していると考えられ、今後の有害な膨張を想定しなくてもよい。
- ということは、今発生している変状さえ対処すればよい。
- 対策後に多少の水分が供給されても再劣化のリスクは低い。

亜硝酸リチウムの使用目的は膨張性の高いゲルを非膨張化させることですので、既に膨張性が収束しているような場合では、補修材料に亜硝酸リチウムを用いる必要性は低いといえます。これらを踏まえて、ASR の進行性が小さいと判断される場合に適用可能な対策工法を表-1 に示します。

表-1 ASR の膨張性が十分に小さい場合の対策工法

適用できる対策工	概要
ひび割れ注入工法	・発生しているひび割れを閉塞する。 ・膨張進行を考慮する必要がないので、使用材料に「ひび割れ追従性」などは要求されない。
表面被覆工法	・外部からの水分を遮断するとともに、美観を向上させる。 ・膨張進行を考慮する必要がないので、使用材料に「ひび割れ追従性」などは要求されない。
断面修復工法	・劣化しているコンクリート表面をはつりとり、コンクリートやポリマーセメントモルタルにて修復する。 ・護岸コンクリートや重力式擁壁など、主に荷重を受け持たないコンクリートの ASR 対策として適用されることが多い。

以後の ASR 膨張性が十分に小さい場合とは、既に ASR 膨張が収束している場合を指します。ASR 膨張が収束するのは、一般的に ASR の劣化過程が「劣化期」となった段階であるため、この時点での構造物の耐久性は著しく低下していると考えられます。また、この段階ではコンクリート強度や弾性係数の低下、鉄筋破断なども生じている可能性が高く、耐久性のみならず耐荷性にも著しい低下が想定されます。ASR 膨張性が小さい場合の対策工法選定の考え方は、以後の膨張を考慮しなくてよいために確かにシンプルなのですが、変状の状況によっては補修対策だけでなく、補強工法も併せて検討することも必要になることがあります。

## ASR 膨張性が大きい場合

ASR 膨張性が大きいと判断される場合（今後も有害な膨張が見込まれる場合）には、工法選定を慎重に行う必要があります。このケースの特徴は、以下の通りです。

- 今後も進行する有害な膨張に対応可能な工法を選定する必要がある。
- 従来のひび割れ注入工法や表面被覆工法のような対処療法的な補修工法では早期に再劣化することを認識しておく必要がある。

ASR 膨張性が大きく、今後も有害な ASR 膨張が生じると推測されるようなコンクリートに亜硝酸リチウムを供給すると、アルカリシリカゲルが非膨張化され、以後の ASR 膨張進行を抑制する効果が期待できます。現在実用化されている補修材料のなかで、アルカリシリカゲルの膨張を化学的に抑制できるのはリチウム化合物のみであり、そのリチウム化合物のなかで最も使用実績の多い材料が亜硝酸リチウムです。

亜硝酸リチウムを用いた ASR 対策工法として、「リチウムイオン内部圧入工法」「ひび割れ注入工法」「表面被覆工法」が実用化されており、亜硝酸リチウムを供給できる範囲によって、ASR 膨張抑制効果の期待度が異なります。

これらを踏まえて、ASR 膨張性が大きい場合において、ゲルの非膨張化による ASR 抑制を目的とした対策工法を表-2 に示します。

表-2 ASR の膨張性が大きい場合の対策工法(亜硝酸リチウムを用いた ASR 対策工法)

適用できる対策工	概要
リチウムイオン内部圧入工法  (【ASR リチウム工法】 【リベリカプセル工法】)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・コンクリートに削孔し、亜硝酸リチウムを加圧注入することでコンクリート全体にリチウムを供給する。コンクリート全体のゲルが非膨張化されるため、以後の ASR 膨張は根本的に抑制される。</li> <li>・対策後はたとえ水分の供給があっても ASR 膨張が進行しないので、再劣化のリスクが低い。したがってこの工法による ASR 補修効果は、対象構造物の立地条件や環境条件等に左右されない。</li> <li>・初期コストは高価であるが、予定供用年数が長い場合は LCC で有利になる場合が多い。</li> </ul>
ひび割れ注入工法  (【リベリシリンダー工法】)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・無機系注入材と亜硝酸リチウムを併用してひび割れを閉塞する。</li> <li>・ひび割れ近傍のコンクリートにリチウムが浸透し、その部分のゲルが非膨張化するため、注入材による水分浸入の遮断効果に加え、ゲルの膨張抑制効果を部分的に付与することができる。</li> </ul>
表面被覆工法	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ポリマーセメントモルタル系被覆材と亜硝酸リチウムを併用してコンクリート表面を被覆する。</li> <li>・コンクリート表層部にリチウムが浸透し、その部分のゲルが非膨張化するため、被覆材による水分浸入の遮断効果に加え、ゲルの膨張抑制効果を部分的に付与することができる。</li> </ul>

表-2 に示したとおり、亜硝酸リチウムによる ASR 抑制効果の期待度は、リチウムイオン内部圧入工法が最も高いといえます。そのため、ASR 膨張性が大きい場合の対策工法としてはリチウムイオン内部圧入工法が最も適しています。ASR 膨張性が比較的穏やかな場合では、ひび割れ注入工法と表面被覆工法に亜硝酸リチウムを併用することにより、部分的にゲルを非膨張化

できるため、従来のひび割れ注入や表面被覆による補修工法よりも延命化を図ることができます。リチウムイオン内部圧入工法とひび割れ注入工法・表面被覆工法における亜硝酸リチウムの浸透範囲のイメージをそれぞれ図-1、図-2 に示します。

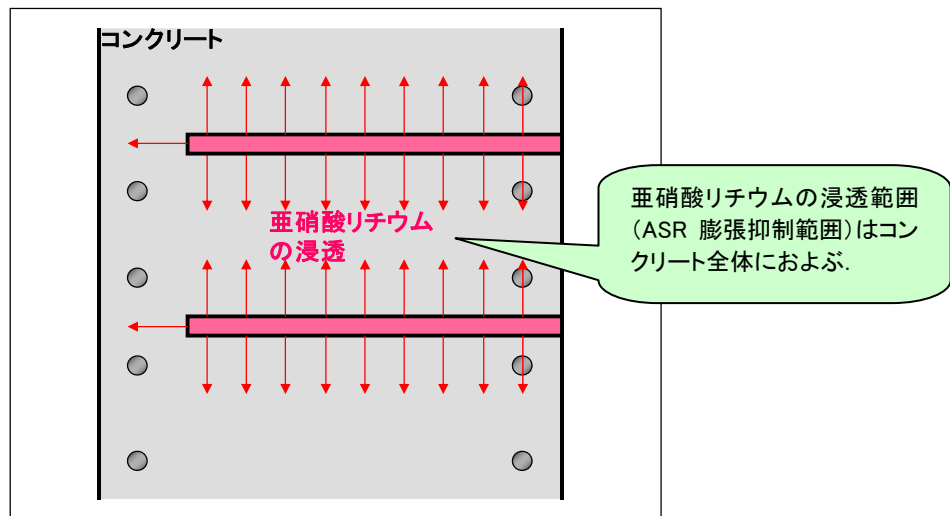


図-1 リチウムイオン内部圧入の場合

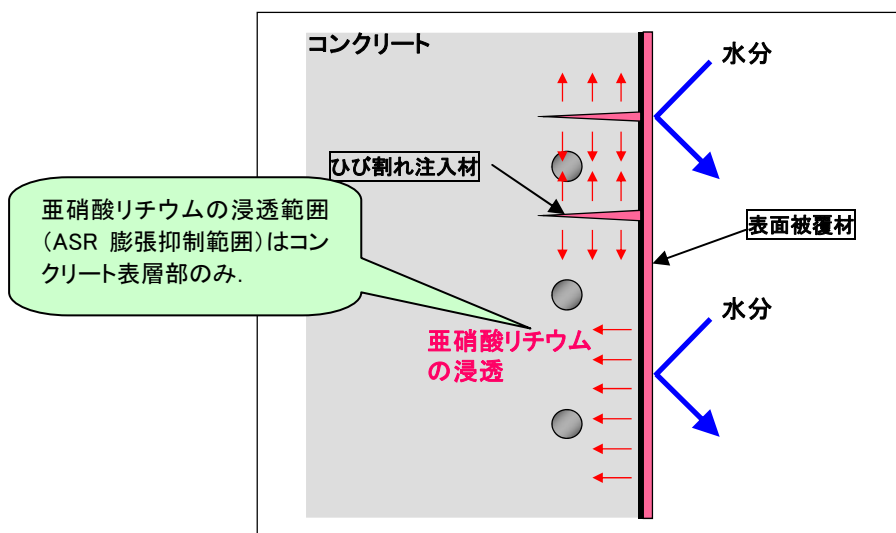


図-2 ひび割れ注入・表面被覆の場合

ASR 膨張性が大きい場合に適用される「リチウムイオン内部圧入工法」と「ひび割れ注入工法・表面被覆工法」について、その適用区分に関する基本的な考え方について以下に示します。

#### 【構造物の環境条件による適用区分】

ASR 劣化の進行は、その構造物が置かれている環境条件、特に水分供給条件の大小によって大きく異なることがあります。例えば、ASR 膨張性が大きく、かつ著しい水分供給がある環境の構造物では、以後の ASR 劣化の進行速度が速いため、ひび割れ注入工法や表面被覆工などでは十分な ASR 補修効果が得られず、再劣化を引き起こす可能性が非常に高いといえます。このような場合では、リチウムイオン内部圧入工によりコンクリート全体のゲルを非膨張化し、根本的な ASR 抑制を図ることが効果的と言えます。

一方、ASR 膨張性は大きいものの、水分供給が比較的穏やかな環境の構造物では、以後の ASR 劣化の進行速度も緩やかな場合があります。このような場合では、ひび割れ注入工法および表面被覆工法に亜硝酸リチウムを併用し、水分浸入の遮断効果に加えて部分的にゲルの非膨張化を図ることで構造物を延命化することができます。これは、仮に将来的に再補修が必要になるとしても、再劣化までの期間を延長することが可能となるということです。

また、同一構造物においても、部位によっては ASR 劣化の進行速度が異なる場合があります。例えば上部工がかけ違いの橋脚では、はり部には雨が直接降りかかるとともに上部工の伸縮装置から橋面の水が流れ込むため、ASR 劣化が顕著となることが多いといえます。それに比べて柱部は水分供給環境がはり部ほど厳しくないことが多いため、ASR 劣化の程度が穏やかとなる場合があります。このような場合、ASR 劣化速度が速く、今後も膨張が進展しそうな部位のみにリチウムイオン内部圧入工法にて根本的な対策を講じ、それ以外は水分供給を遮断して経過観察する、という対策工法の組み合わせも考えられます。

#### 【構造物の立地条件による適用区分】

構造物の立地条件によっては、補修工事のしやすさが大きく異なります。例えば、ASR 膨張性が大きい構造物で、かつ足場設置が困難な狭隘な場所、住宅密集地、鉄道等に近接した場所など、構造物へのアプローチが困難な立地条件にある場合では、定期的な再補修どころか、詳細調査すら十分に行えないと考えられるため、リチウムイオン内部圧入工により根本的に ASR 抑制を図り、再劣化のリスクを低減しておくことが効率的と言えます。

一方、ASR 膨張性は大きいものの、施工箇所へのアプローチが容易で定期的な再補修計画を採れる場合には、ひび割れ注入工法および表面被覆工法に亜硝酸リチウムを併用し、水分浸入の遮断効果に加えて部分的にゲルの非膨張化を図ることで ASR の進行を遅らせつつ、定期的な再補修計画を立案することもできます。

#### 【構造物の予定供用年数による適用区分】

ASR 劣化した構造物の予定供用年数によっても選定される対策工法は異なってきます。例えば、ASR 膨張性が大きくても、今後 10 年間しか供用しない構造物に対してリチウムイオン内部圧入工法を適用するのは費用対効果の観点から推奨できません。このような場合にはひび割れ注入工法および表面被覆工法に亜硝酸リチウムを併用することで予定供用年数は十分に延命化できると考えられます。

一方、ASR 膨張性が大きく、今後の予定供用年数も十分に長い場合には、リチウムイオン内部圧入工により根本的に ASR 抑制を図り、再劣化のリスクを低減しておくほうが LCC（ライフサイクルコスト）の観点からも有利になります。

## (2) 亜硝酸リチウムを用いた塩害・中性化の補修工法

構造物の外観変状調査の結果、鉄筋に沿ったひび割れや錆汁の析出など塩害や中性化などの鉄筋腐食に起因する劣化が疑われた場合、詳細調査を実施して劣化要因の特定を行います。塩害に関する試験方法としては塩化物イオン含有量試験、中性化に関する試験方法としてはフェノールフタレイン法による中性化深さ試験などが挙げられます。また、塩害、中性化とも、鉄筋の腐食度を評価することが重要となりますので、はつり調査による鉄筋腐食度目視確認に加え、自然電位法や分極抵抗法などの非破壊検査手法を併用することも効果的です。

劣化要因が塩害または中性化であると判定されると、次に対策工法の選定を行います。塩害や中性化の対策工法を適切に選定するためには、以下のような着目点について考慮しておくことが重要です。

- ・鉄筋位置の塩化物イオン濃度が腐食発生限界濃度を超過しているか？
- ・鉄筋位置まで中性化領域が進行しているか？
- ・鉄筋腐食はどの程度進行しているか？
- ・今後も著しい劣化因子の浸入が想定される環境か？

塩害の劣化因子として塩化物イオンを重視するのは、主にコンクリート中の鉄筋位置の塩化物イオン濃度が腐食発生限界を超えるまでの期間です。鉄筋位置に腐食発生限界濃度（例えば  $1.2\text{kg/m}^3$ ）以上の塩化物イオンが侵入し、鉄筋腐食環境が形成（不動態被膜が破壊）されてしまった後は、実際に鉄筋を腐食させる水分と酸素が主たる劣化因子となります。すなわち、まだ鉄筋位置の塩化物イオン濃度が腐食発生限界濃度に達する前の段階であれば、対策工に要求される性能は「劣化因子（塩化物イオン）の遮断」となります。また、既に鉄筋位置の塩化物イオン濃度が腐食発生限界濃度に達した後でも鉄筋腐食がまだ進行していない段階であれば、対策工に要求される性能は「劣化因子（水分、酸素）の遮断」とすることができます。しかし、コンクリートにひび割れや錆汁の析出、はく離・はく落などが生じている場合には、既に鉄筋腐食が進行していることを示していますので、この段階で選定すべき対策工は「鉄筋腐食の抑制」を主たる要求性能とすべきです。また、劣化の程度や環境条件に応じて「劣化因子（水分、酸素、塩化物イオン）の遮断」や「劣化因子（塩化物イオン）の除去」などの要求性能を組み合わせることが重要です。

中性化に関しても同様の考え方ができます。中性化の劣化因子として二酸化炭素を重視するのは、主にコンクリート中の鉄筋位置まで中性化領域が進行するまでの期間です。中性化領域が鉄筋位置（例えば中性化残り  $10\text{mm}$ ）まで進行し、鉄筋腐食環境が形成（不動態被膜が破壊）されてしまった後は、実際に鉄筋を腐食させる水分と酸素が主たる劣化因子となります。すなわち、まだ鉄筋位置まで中性化が進行する前の段階であれば、対策工に要求される性能は「劣化因子（二酸化炭素）の遮断」となります。また、既に鉄筋位置まで中性化した後でも鉄筋腐食がまだ進行していない段階であれば、対策工に要求される性能は「劣化因子（水分、酸素）の遮断」とすることができます。しかし、コンクリートにひび割れや錆汁の析出、はく離・は

く落などが生じている場合には、既に鉄筋腐食が進行していることを示していますので、この段階で選定すべき対策工は「鉄筋腐食の抑制」を主たる要求性能とすべきです。また、劣化の程度や環境条件に応じて「劣化因子（水分、酸素、二酸化炭素）の遮断」や「劣化因子（二酸化炭素）の除去」などの要求性能を組み合わせることが重要です。

これらを考慮して、要求性能に応じた塩害・中性化の対策工法選定の考え方について以下に示します。

#### 主たる要求性能が「劣化因子の遮断」の場合

対策工の主たる要求性能を「劣化因子の遮断」と設定できるのは、まだコンクリート内部の鉄筋腐食がそれほど進行していない段階です。劣化グレードでは潜伏期～進展期に相当します。この段階はまだコンクリート表面に目立った変状が発生していませんので、主に予防保全的な対策工の選定となります。これらを踏まえて、塩害または中性化において、まだ鉄筋腐食が進行しておらず、主たる要求性能が「劣化因子の遮断」となる場合に適用可能な対策工法を表-3に示します。

表-3 まだ鉄筋腐食が進行していない場合の塩害・中性化対策工法

適用できる対策工	概要
表面被覆工法	<ul style="list-style-type: none"> <li>・コンクリート表面を被覆材にてコーティングすることにより、外部からの劣化因子の侵入を遮断する。</li> <li>・想定する主たる劣化因子が塩化物イオンか二酸化炭素かによって、使用する表面被覆材の種類やグレードを選定する。</li> </ul>
表面含浸工法	<ul style="list-style-type: none"> <li>・コンクリート表面に含浸材を塗布・含浸させ、コンクリート表層部を改質することにより、外部からの劣化因子の侵入を遮断する。</li> <li>・想定する主たる劣化因子が塩化物イオンか二酸化炭素かによって、使用する表面含浸材の種類を選定する。</li> </ul>

#### 主たる要求性能が「鉄筋腐食の抑制」の場合

塩害や中性化により鉄筋が既に腐食すると、その腐食生成物（錆）の膨張圧によりコンクリートにひび割れが生じます。そのひび割れからは錆汁の析出が見られることが多く、さらに腐食が進行するとコンクリートのはく離・はく落が生じます。そして最終的には腐食によって鉄筋断面が著しく減少し、耐久性能のみならず耐荷性能までも損なうこととなります。一般的に、点検業務や調査業務の段階で塩害や中性化による劣化が発見される場合、すでに上記のようなコンクリートの変状が顕在化している状態であることがほとんどです。このような場合には、対策工の主たる要求性能を「鉄筋腐食の抑制」と設定すべきです。なぜなら、塩害にて鉄筋腐食が発生しているということは、既に鉄筋位置での塩化物イオン濃度が十分に高いことを示しており、その段階でいくら外部からの塩化物イオンの侵入を阻止しても鉄筋腐食環境は改善されないからです。同様に、中性化にて鉄筋腐食が生じているということは、既に鉄筋位置まで



中性化が進行していることを示しており、その段階でいくら外部からの二酸化炭素の侵入を阻止しても鉄筋腐食環境は改善されません。この段階では、既に腐食を開始した鉄筋に対し、以後の腐食反応をいかに抑制するかを考えることが重要です。

鉄筋が腐食を開始しているということは、換言すれば鉄筋周囲の不動態被膜が破壊されているということです。一度破壊された不動態被膜は、自然に回復することはありません。しかし、そこに亜硝酸リチウム（の亜硝酸イオン）を供給すると、不動態被膜が再生され、以後の鉄筋腐食反応を抑制する効果が期待できます。亜硝酸リチウムを用いた塩害・中性化対策工法として、「断面修復工法」が実用化されており、さらに近年では「内部圧入工法」も研究されています。また、「表面被覆工法」や「ひび割れ注入工法」にも亜硝酸リチウムによる鉄筋腐食抑制効果を部分的に付与することもできます。

これらを踏まえて、塩害や中性化により鉄筋が腐食し、コンクリートにひび割れやはく離などの変状が生じている場合の、「鉄筋腐食の抑制」を主たる要求性能とした対策工法を表-4に示します。

表-4 既に鉄筋が腐食し、コンクリートに変状が生じている場合の塩害・中性化対策工法

適用できる対策工	概要
断面修復工法	<ul style="list-style-type: none"> <li>・劣化しているコンクリート表面をはつりとり、亜硝酸リチウムを含有するポリマーセメントモルタルにて断面を修復する。</li> <li>・鉄筋周囲に十分な亜硝酸イオン量を供給することができるため、以後の鉄筋腐食進行を抑制することができる。</li> </ul>
表面被覆工法	<ul style="list-style-type: none"> <li>・コンクリート表面を、亜硝酸リチウムを含有したポリマーセメントモルタル系の表面被覆材にてコーティングする。</li> <li>・外部からの劣化因子の侵入を遮断する効果に加え、将来的には亜硝酸イオンがコンクリートのかぶり範囲に浸透し、鉄筋の腐食を抑制する。</li> </ul>
ひび割れ注入工法 <b>（【リハビリシリンダー工法】）</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・無機系注入材と亜硝酸リチウムを併用してひび割れを閉塞する。</li> <li>・ひび割れを通じた劣化因子の侵入を遮断する効果に加え、将来的にはひび割れ近傍のコンクリートに亜硝酸イオンが浸透し、鉄筋の腐食を抑制する。</li> </ul>
リチウムイオン 内部圧入工法 <b>（【ASRリチウム工法】 【リハビリカプセル工法】）</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・コンクリートに削孔し、鉄筋周囲のコンクリートに亜硝酸リチウムを加圧注入することで、鉄筋腐食を抑制する。</li> <li>・鉄筋腐食が進行しているものの、かぶりコンクリートが比較的健全であるような場合において適用性が高いと考えられる。</li> </ul>