

亜硝酸リチウムを用いた 港湾コンクリート構造物の補修

江良 和徳

(一社)コンクリートメンテナンス協会 専務理事

1 はじめに

わが国の社会資本の根幹をなすさまざまなコンクリート構造物の中でも、港湾コンクリート構造物は必然的に飛来塩分による塩害環境下に存在するため、一般的な構造物に比べて劣化のリスクが潜在的に高いといえる。また、環境条件や使用材料によっては塩害単独による劣化に留まらず、中性化や凍害、アルカリシリカ反応（以下、ASR）などと複合することも充分に考えられるため、より綿密な維持管理計画が必要となる。

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。本稿では、塩害およびASRの複合劣化が生じた港湾コンクリート構造物の補修として亜硝酸リチウムを活用した事例について紹介する。

2 補修対象構造物

2.1 構造物の概要

対象構造物は広島港内に位置し、5000t級の船舶が停泊可能なRC造の大規模港湾施設である。対象構造物の外観を写真1に示す。本構造物はかつて都市ガスの原料となる石炭の受入れ施設として1972年に竣工したものの、天然ガス転換に伴い1995年に一旦役目を終えた。しかし、2021年にバイオマス混焼発電所の運転開始に向けてバイオマスおよび石炭の受入れ施設として再整備されることとなった。

2.2 劣化状況

本構造物の梁部および床版部にはコンクリートの浮き、剥離、鉄筋露出が広範囲に発生していた。はつり調査の結果、主鉄筋および配力鉄筋には著しい腐食が認められた。塩化物イオン含有量は最大で4.2kg/m³であり、鉄筋は腐食環境にあると判断された。また、梁部には亀甲状または水平方向のひび割れが多数発生しており、そのひび割れ延長や密度は10年前の調査時から大きく進展していることが判明した。また、走査型電子顕微鏡による観察の結果、アルカリシリカゲル特有の反応生成物が検出された。以上により、



写真1 施工対象構造物

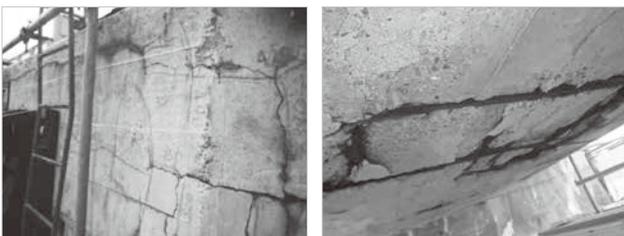


写真2 劣化状況（ひび割れ、鉄筋露出）

本構造物の劣化原因は塩害とASRの複合劣化であり、鉄筋腐食およびASRによる膨張はいずれも進行過程にあると評価された。代表的な劣化状況を写真2に示す。

3 亜硝酸リチウムを用いた補修

3.1 亜硝酸リチウムの特性

亜硝酸リチウムは鉄筋腐食抑制効果およびアルカリシリカゲル非膨張化という二つの効果を持つコンクリート用補修材料(図1)として広く認識されており、主として塩害、中性化およびASRで劣化したコンクリート構造物の補修材料として活用される。亜硝酸リチウムの成分のうち、亜硝酸イオン $[\text{NO}_2^-]$ は鉄筋表面の不動態皮膜を再生する効果を有する。不動態皮膜の再生により以後の鉄筋腐食反応は不活性な状態となり、進行が抑制される。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を有する。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の吸水膨張反応は収束して以後のアルカリシリカゲル膨張が抑制される¹⁾。その用途もひび割れ注入工、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²⁾。

3.2 補修工事

(1) 補修工法の選定

本構造物の補修工法は、変状の状態、劣化原因、劣化予測および補修後の維持管理シナリオを考慮して選定された。まず、現時点で発生しているコンクリートの浮き、剥離に対してはその脆弱部を修復するために断面修復工を施す。ひび割れを閉塞するためにひび割れ注入工を施す。また、これらの変状が塩害およびASRに起因するものであるため、適用する各補修工法は単なる物理的な補修に留まらず、鉄筋腐食抑制およびアルカリシリカゲル膨張を抑制し得る亜

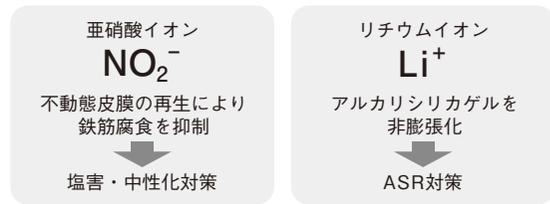


図1 亜硝酸リチウムの補修効果

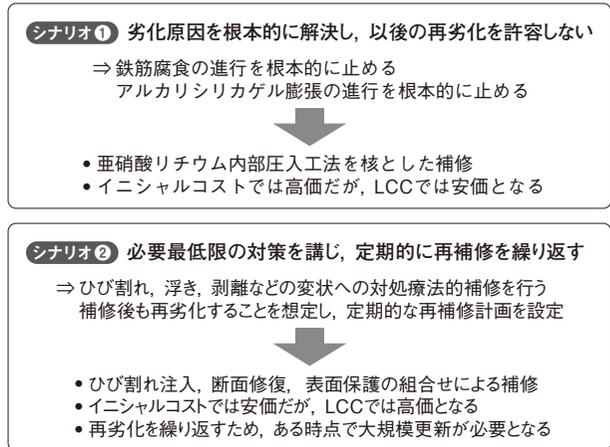


図2 維持管理シナリオに応じた補修工法選定

硝酸リチウムを併用することとした。さらに、これらの塩害およびASRはいずれも将来的に進行すると予測されるため、補修後の維持管理シナリオとして①劣化原因を根本的に解決し、以後の再劣化を許容しない②必要最低限の対策を講じ、定期的に再補修を繰り返すの二つを想定した(図2)。本構造物は頻繁な船舶の停泊が予測される重要施設であり定期的な補修工事を実施できないため再劣化は許容しにくく、さらに残存供用期間におけるLCC評価でも有利となることから、シナリオ①による維持管理を行う方針となり、それに該当する補修工法として表に示す工法が採用された。次節より各工法の概要を示す。

(2) 亜硝酸リチウム内部圧入工法

本構造物の劣化原因が塩害とASRの複合劣化であることを踏まえ、鉄筋腐食およびアルカリシリカゲル膨張の進行を将来にわたり根本的に抑制し得る工法として、亜硝酸リチウム内部圧入工法が選定された。亜硝酸リチウム内部圧

表 補修工法一覧

部位・範囲	補修工法	目的
ひび割れ箇所	ひび割れ注入工	ひび割れの閉塞
浮き、剥離、鉄筋露出箇所	断面修復工	コンクリート脆弱部の修復
コンクリート部材全体	亜硝酸リチウム内部圧入工	鉄筋腐食の根本的抑制 アルカリシリカゲル膨張の根本的抑制
コンクリート表面全体	表面保護工	劣化因子の侵入抑制

入工法は、劣化した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部材内部へ浸透させる工法である。浸透した亜硝酸リチウム（うち亜硝酸イオン）が鉄筋位置に到達すれば不動態皮膜再生効果が発揮され、以後の鉄筋腐食反応が抑制される。また、亜硝酸リチウム（うちリチウムイオン）が反応性骨材周囲のアルカリシリカゲルに到達すればゲルが非膨張化され、以後のアルカリシリカゲル膨張反応が抑制される。そのため、塩害とASRの複合劣化の補修として内部圧入工法を施す場合、亜硝酸リチウムの浸透範囲は対象構造物の部材全体と設定される。

施工手順としては、まずコンクリート表面に生じているひび割れをひび割れ注入工法で閉塞する。コンクリート表面に浮き、剥離が生じている箇所には断面修復工法を施す。これらは亜硝酸リチウムを内部圧入する際に表面への漏出を防止するための事前処置として不可欠な工程である。コンクリート表面の漏出防止工が完了した後、ダイヤモンドコアドリルでφ10mmの圧入孔を削孔する。削孔間隔は500mmの千鳥配置を標準とする。すべての圧入孔にカプセルタイプの圧入装置を設置し、劣化原因に応じて算出した亜硝酸リチウム必要量を内部圧入する。本構造物は塩害とASRの複合劣化であるため、塩化物イオン量から決まる亜硝酸イオン必要量と、アルカリ総量から決まるリチウムイオン必要量の双方を考慮して、15.7kg/m³の亜硝酸リチウムを設計圧入量と定めた。注入圧力は0.5MPaを標準とし、コンプレッサーで加圧する。圧入期間は注入量やコンクリートの状態によって異なり、本構造物では2週間程度（1日8時間施



写真3 亜硝酸リチウム内部圧入工法の施工状況

工)で圧入作業が完了した。内部圧入工が完了した後、圧入孔を充填し、コンクリート表面全体に表面保護工を施工して完了となる。亜硝酸リチウム内部圧入工法の施工状況を写真3に示す。

(3) ひび割れ注入工法

前述した亜硝酸リチウム内部圧入工法が本構造物の劣化補修のためのおもな工法であるのに対し、ひび割れ注入工法はその事前処理として位置づけられる。本構造物には鉄筋腐食に伴う鉄筋に沿ったひび割れやアルカリシリカゲル膨張による亀甲状ひび割れなどが多数発生していたため、内部圧入時の亜硝酸リチウム漏出防止の観点からひび割れを閉塞することが不可欠である。本構造物のひび割れ注入工には、内部圧入工法との併用実績の豊富な亜硝酸リチウム併用型ひび割れ注入工法が選定された。ひび割れ注入工法の本来の目的はひび割れの閉塞およびひび割れを通じた劣化因子侵入の抑制であるが、補修材料に亜硝酸リチウムを併用することで、ひび割れと交差している鉄筋には不動態皮膜再生効果を、ひび割れと交差しているアルカリシリカゲルにはゲルの膨張抑制効果を付与することができる。

施工手順としては、まずひび割れに沿って自

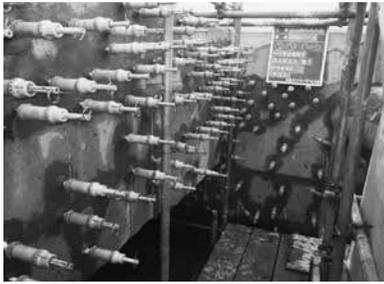


写真4 亜硝酸リチウム併用型ひび割れ注入工法の施工状況



写真5 亜硝酸リチウム併用型断面修復工法の施工状況

動低圧注入器を250mm間隔で設置し、注入器間のひび割れをポリマーセメントモルタルでシールする。注入作業は2段階とし、まず亜硝酸リチウムを先行注入する。これによりひび割れ内部をプレウェッティングすると同時に、鉄筋もしくはアルカリシリカゲルに亜硝酸リチウムを供給する。先行注入の施工完了後、ひび割れ内部が乾燥しないうちに同じ自動低圧注入器を用いて超微粒子セメント系注入材を本注入する。超微粒子セメント系注入材がひび割れ内部で硬化し、ひび割れ部を一体化して閉塞することで以後の劣化因子の侵入を抑制する。亜硝酸リチウム併用型ひび割れ注入工法の施工状況を写真4に示す。

(4) 断面修復工法

前述した亜硝酸リチウム内部圧入工法が本構造物の劣化補修のための主たる工法であるのに対し、断面修復工法もその事前処理として位置づけられる。本構造物には鉄筋腐食に伴うコンクリートの浮き、剥離、鉄筋露出が多数発生していたため、内部圧入時の亜硝酸リチウム漏出防止の観点から物理的な断面修復が不可欠である。本構造物の断面修復工法には内部圧入工法との併用実績の豊富な亜硝酸リチウム併用型断面修復工法が選定された。断面修復工法の本来の目的は漸弱化したコンクリートの除去およびその範囲の物理的な修復であるが、補修材料に亜硝酸リチウムを併用することで、腐食した鉄筋へ不動態皮膜再生効果を付与することができる。

施工手順としては、まずはつり範囲にカッ

ターで縁切りを行い、コンクリート不良部をはつり落とし、腐食した鉄筋を完全に露出させる。次に鉄筋周囲をワイヤーブラシやディスクサンダーでケレンを行い、腐食生成物(錆)を入念に除去する。その後、防錆材として亜硝酸リチウムを鉄筋周囲とはつり面全体に塗布した上で亜硝酸リチウム含有ポリマーセメントモルタルにて断面を修復する。この時、1層の埋戻し厚さは20~30mmを目安とし、下地のモルタルが充分硬化したのを確認して、次のモルタル層を重ねる。亜硝酸リチウム併用型断面修復工法の施工状況を写真5に示す。

4 おわりに

本稿では港湾構造物の補修事例について紹介した。劣化の原因は港湾構造物の宿命ともいえる塩害だけでなくASRとの複合劣化であり、単に変状に対する対症療法的な補修ではなく、将来的な維持管理シナリオを考慮して亜硝酸リチウムを用いた各種補修工法が選定された。本稿が類似構造物の維持管理の参考となれば幸いである。

【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)第2版, 2022.4