

コンクリート構造物の維持管理

～塩害・中性化・ASR補修の考え方～

技 術 資 料

Ver. 4.3

一般社団法人コンクリートメンテナンス協会

目 次

1. はじめに	1
2. コンクリート構造物の主な劣化とその補修対策	
2. 1 塩害	
(1) 塩害とは	5
(2) 塩害による劣化事例	6
(3) 塩害の補修工法	7
(4) 塩害の補修工法選定の基本的な考え方	15
2. 2 中性化	
(1) 中性化とは	18
(2) 中性化による劣化事例	18
(3) 中性化の補修工法	19
(4) 中性化の補修工法選定の基本的な考え方	27
2. 3 アルカリシリカ反応 (ASR)	
(1) ASR とは	30
(2) ASR による劣化事例	31
(3) ASR の補修工法	33
(4) ASR の補修工法選定の基本的な考え方	39
3. 亜硝酸リチウムを用いた補修工法	
3. 1 亜硝酸リチウムとは	
(1) 亜硝酸リチウムとは	43
(2) 亜硝酸リチウムによる鉄筋腐食抑制効果	44
(3) 亜硝酸リチウムによる ASR 抑制効果	45
(4) 浸透拡散型亜硝酸リチウム 40%水溶液	47
3. 2 亜硝酸リチウムを用いた塩害・中性化の補修工法	
(1) 亜硝酸リチウムを用いた塩害・中性化補修の基本的な考え方	48
(2) 亜硝酸リチウムを用いた具体的な塩害・中性化補修工法	52
3. 3 亜硝酸リチウムを用いた ASR の補修工法	
(1) 亜硝酸リチウムを用いた ASR 補修の基本的な考え方	58
(2) 亜硝酸リチウムを用いた具体的な ASR 補修工法	64

3. 4	亜硝酸リチウムを用いた補修工法選定の考え方	
(1)	亜硝酸リチウムを用いた補修技術一覧	70
(2)	塩害・中性化の補修工法選定の考え方	71
(3)	ASR の補修工法選定の考え方	72
4.	亜硝酸リチウムを用いた補修工法の比較選定事例	
4. 1	塩害の補修工法選定事例	
(1)	劣化程度が軽微な場合の例(予防保全的な対策)	73
(2)	劣化程度が重篤な場合の例(根本的な対策)	77
4. 2	ASRの補修工法選定事例	
(1)	残存膨張量が小さい場合	81
(2)	残存膨張量が大きい場合	85
5.	亜硝酸リチウムを用いた補修工法の施工事例	
5. 1	各工法の施工手順	
(1)	塩害で劣化した PC 上部工の補修(表面含浸工)	89
(2)	塩害で劣化した RC 上部工の補修(断面修復工、表面被覆工)	91
(3)	塩害で劣化した RC 床版の補修(内部圧入工)	94
(4)	ASR で劣化した橋台の補修(内部圧入工)	97
(5)	ASR で劣化した擁壁の補修(ひび割れ注入工+表面被覆工)	100
5. 2	各工法の適用事例	
(1)	ひび割れ注入工法(リハビリシリンダー工法)の適用事例	103
(2)	表面含浸工法(プロコンガードシステム/S)の適用事例	107
(3)	表面被覆工法(リハビリ被覆工法)の適用事例	110
(4)	断面修復工法(リハビリ断面修復工法)の適用事例	114
(5)	内部圧入工法(リハビリカプセル工法)の適用事例	117
(6)	内部圧入工法(ASR リチウム工法)の適用事例	120
5. 3	亜硝酸リチウムの安全性について	
(1)	亜硝酸リチウムの化学薬品としての分類	127
(2)	亜硝酸リチウムの安全性	127
(3)	亜硝酸リチウムの発がん性	128
(4)	亜硝酸リチウムに関連する法規制・基準など	128
6.	亜硝酸リチウム関連論文一覧	131

1. はじめに

コンクリートは安価で優れた構造材料としてあらゆる社会資本の根幹を成すものであるが、それら多くのコンクリート構造物は既に高齢化が進んでいるのが現状である。これらの老朽化したコンクリート構造物を全て更新することは経済的に困難であり、適切な維持管理を行うことによって構造物の長寿命化、延命化を図ることが急務である。

適切な維持管理とは、コンクリート構造物の点検、調査、診断、補修、補強、モニタリングなど多岐にわたる。適切な調査、診断を行うためにはコンクリートの劣化機構とそのメカニズムを理解することが不可欠であるとともに、それらを定量的に評価するための非破壊検査手法や分析方法の知識も求められる。そうした適切な調査、診断の結果が得られてはじめて適切な補修、補強へと進むことができる。そして調査、診断、補修、補強の技術は常に進化し続けており、新しい技術、材料、工法は次々と生み出され、実用化されている。

維持管理分野における新たな知見を反映するために、2013年には土木学会のコンクリート標準示方書〔維持管理編〕が改訂されている。コンクリート工学会では、コンクリートの維持管理分野の重要性を鑑み、「コンクリート診断士」制度を推進しており、既に10,000人を超えるコンクリート診断士が日本全国で活躍している。維持管理分野の適切な知識と技術を有する技術者が、常に新しい知見を吸収し、活躍することによってのみ、既設コンクリート構造物の長寿命化、延命化が図られるのである。持続可能な社会の形成。これこそが今後我々が進むべき将来像である。

このような状況の中、この度一般社団法人コンクリートメンテナンス協会の技術資料が改訂されることとなった。主な内容は当協会が取り組んできたコンクリート構造物の維持管理技術のうち、特に「コンクリートの塩害、中性化、アルカリシリカ反応（ASR）」と「亜硝酸リチウムを用いたコンクリート補修工法」に主眼を置いてとりまとめたものであるが、前述の通り新たな知見と技術の進歩を反映させた内容となっている。今後のコンクリート構造物の適切な維持管理において、本書が有効に活用されれば幸いである。

近未来コンクリート研究所
代表 十河茂幸

コンクリートメンテナンス協会の考えるコンクリート補修のあるべき姿
～コンクリート構造物の定量的な維持管理～

コンクリート構造物の点検、調査、診断、補修、補強などの維持管理業務に対する関心が高まり、それらの重要性が広く認識されるようになりました。それに伴ってコンクリート構造物の維持管理の取り組みも黎明期から成熟期へと移行しつつあると実感しております。

我々はこれまで多くのコンクリート補修工事に携わってきた経験がありますが、黎明期に経験した補修工事の内容を見ると、『ひび割れが生じているからひび割れ注入を行う』『鉄筋露出しているから断面修復を行う』といった、いわば変状に対する対処療法的な工法選定が多かったように感じます。ここに欠落していたのは、『なぜ、ひび割れが発生したのか？』『なぜ、鉄筋が腐食したのか？』という根本的な原因推定です。劣化原因も明確にしないまま闇雲に補修を行っているわけですから、せっかく補修を行ったにもかかわらず多くの構造物に再劣化が発生しました。

やがて、塩害、中性化、アルカリシリカ反応（以後、ASR と称す）などの劣化に関する知見も整理蓄積され、その調査方法なども確立されていきました。コンクリート構造物に生じたひび割れや浮き・剥離などのさまざまな変状に対し、詳細調査、室内試験などを実施して劣化機構を明らかにするという手順を踏むことが一般的となり、劣化の原因を特定して、その劣化機構に対して効果があるとされる補修工法、補修材料が選定されるようになりました。補修分野の新材料、新工法が精力的に開発され、補修のメニューは大変豊富な状況となりました。しかし、残念ながら補修後の再劣化が後を絶たないのが現状です。コンクリート補修の難しさを痛感いたします。

我々は考えました。『塩害に効く』とはいったい何を指しているのか？ 『ASR を抑制する』とはいったいどのような状況を指しているのか？ それらを明確にしなければ、また再劣化を繰り返してしまうはずだ、と。その結果、劣化機構に応じて補修工法を選定するだけでなく、それを定量的な観点に立って設計しなければならないとの結論に達しました。

定量的な補修工法選定とは何か。我々は次のように考えています。例えば塩害の場合。塩害の補修といっても、その目的は「塩化物イオンを侵入させない」「水、酸素を侵入させない」「鉄筋腐食反応の速度を緩和させる」「鉄筋腐食反応そのものを停止させる」「腐食によって断面減少した鉄筋量を補う」「部材としての耐荷性能を回復させる」など、置かれている劣化過程によってさまざまです。まずは、補修工法にどんな要求性能を設定するかを明確にする必要があります。また、塩害の調査診断では必ず塩化物イオン含有量を測定しますが、せっかく測定したのに「測定値が腐食発生限界塩化物イオン量を超えているため、劣化機構は塩害と判定する」というだけではもったいないでしょう。塩化物イオン濃度の大小は内部の鉄筋腐食速度の大小と関係性があります。さらに、塩化物イオン濃度に対してモル比 1.0 となる亜硝酸イオンを防錆材として供給すると、以後の鉄筋腐食抑制効果が期待できることが既往の研究で明らかになっています。これらの知見を活用すれば、表面含浸工法も単なる劣化因子の遮断のための工法にとどまらず、鉄筋位置での塩化物イオン量に応じて亜硝酸イオン供給量を計算して塗布量を設定することで、鉄筋腐食抑制効果を付加できます。同様に、断面修復工法でも必要な亜硝酸イオン量を算出してポリマーセメントモルタルに混入する量を設定できます。さらに、内部圧

入工法では鉄筋かぶりが大きい構造物、塩化物イオン濃度が高い構造物、鉄筋腐食が既に顕著な構造物に対しても、亜硝酸イオン量を定量的にかつ早急に鉄筋位置に供給できます。

上述した内容は、我々が考える定量的な補修の考え方の一部です。また、この定量的な補修工法選定に加え、補修後の維持管理シナリオを時間軸で捉えることも重要です。再劣化しない補修工法を選定することが常に最善だとは言いきれません。費用を投じて根本的な補修を行い、以後の再劣化を許容しないという維持管理シナリオもありますし、まずは必要最小限の補修を行い、その後の再劣化も許容して再劣化と再補修を繰り返しながら供用するという維持管理シナリオが選択されることもあります。このように定量的な工法選定と将来の維持管理シナリオを総合的に評価することで、コンクリート構造物の長寿命化の実現、ひいては持続可能な社会の実現に寄与できると考えています。

一般社団法人コンクリートメンテナンス協会
会長 徳納 剛

2. コンクリート構造物の主な劣化とその補修対策

2. 1 塩害

(1) 塩害とは

塩害は、文字通り“塩”の害であり、鉄筋コンクリート中の鉄筋腐食による劣化現象の一つです。一般に、コンクリート中の細孔はセメントの水和反応による飽和水酸化カルシウム水溶液で満たされています。飽和水酸化カルシウム水溶液のpH値は12～13なので、コンクリートは強アルカリ性を示します。このような高アルカリ環境の中にある鉄筋表面には酸素が化学吸着し、緻密な酸化物層が生じることによって、厚さ3nm程度（1nm



図 2-1 塩害による劣化の例

は1mの10億分の1)の不動態被膜($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$)が形成されます。その不動態被膜によってコンクリート中の鉄筋は腐食から守られる(不動態化している)といわれています。

しかし、コンクリート中に許容濃度以上の塩化物イオン(Cl^-)が存在する場合、鉄筋表面の不動態被膜が破壊されてしまいます。コンクリート中には十分な量の酸素と水が存在するため、不動態被膜が破壊されると鉄筋は酸化反応を起こし、腐食が開始してしまいます。コンクリート中に塩化物イオンが存在する理由としては、

①沿岸部の海水飛沫や冬季間の凍結防止剤散布などによる塩化物の浸透(飛来塩分)

②海砂や塩化物含有混和剤の使用など、コンクリート材料に由来する塩化物(内在塩分)などが考えられますが、いずれの場合においても限界濃度以上の塩化物イオンの存在により不動態皮膜が破壊され、酸素と水によって鉄筋腐食が進行することには変わりはありません。これまで土木学会では腐食発生限界塩化物イオン濃度を 1.2kg/m^3 と定めていましたが、2013年制定の「コンクリート標準示方書[維持管理編]」では、コンクリートの種類に応じた算定式にて求める手法が提案されるとともに、みなし規定として 2.0kg/m^3 という値も提示されています。

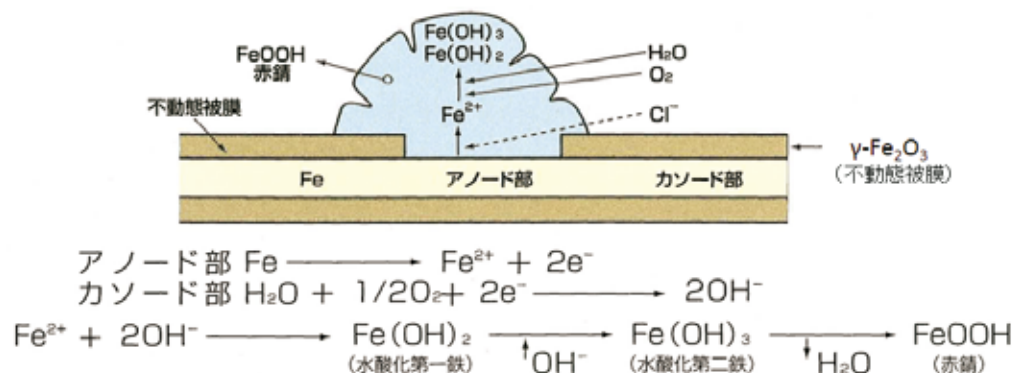


図 2-2 鉄筋腐食反応の模式図

不動態被膜が破壊された箇所では鉄筋腐食が生じますが、このコンクリート中の鉄筋腐食は電気化学的反応として図 2-2 のように表すことができます。

アノード反応は電子 2 個を鉄筋母材中に残して鉄がイオンとなって溶出する反応であり、鋼材が腐食することそのものです。このアノード反応によって生じる電子を消費するのがカソード反応です。この 2 種類の反応が同時に起こるのが鉄筋腐食反応であり、反応の進行に従い水酸化第一鉄、水酸化第二鉄、赤錆が生成されます。

鉄筋が腐食すると腐食箇所の体積が 2.5 倍程度に膨張するため、その膨張圧によってコンクリートにひび割れが発生します。そのひび割れを通じて水分、酸素、塩化物イオンなどの劣化因子の供給が容易になるため、さらに鉄筋腐食が促進され、コンクリート剥離や剥落、鉄筋の断面減少を生じ、構造物の耐久性能、耐荷性能が低下していきます。これが塩害によるコンクリート構造物の劣化メカニズムです。

(2) 塩害による劣化事例

塩害によるコンクリート構造物の劣化は、『塩化物イオンの侵入』→『不動態被膜の破壊』→『鉄筋腐食の発生と進行』→『腐食膨張圧によるコンクリートひび割れ』→『かぶりコンクリートの浮き・剥離』という過程を経ると考えられます。すなわち、塩害による劣化がコンクリート表面のひび割れとして顕在化した時点で、コンクリート内部の鉄筋腐食はかなり進行していると考えられます。

図 2-3 は護岸構造物の床版下面に見られたコンクリートのひび割れおよびさび汁の滲出で、飛来塩分による塩害です。図 2-4 は RC 上部工コンクリートの一部が剥離し、鉄筋が露出して



図 2-3 床版下面のさび汁



図 2-4 コンクリートの剥離・剥落



図 2-5 主桁下面の鉄筋腐食



図 2-6 補修箇所の再劣化

います。一見、鉄筋露出箇所以外は健全なようにも見えますが、タタキ点検の結果、斜線部の範囲のコンクリートが剥離していることが分かりました。外観変状として表れていなくても内部の鉄筋腐食は進行していることがあります。図 2-5 は PC 上部工の主桁下面コンクリートが剥落している状況です。この事例では、鉄筋だけでなくシース内の PC 鋼材も腐食していました。冬季に散布する凍結防止剤により局部的に塩化物イオンが供給され、著しい鋼材腐食を生じた塩害の例です。図 2-6 は塩害の再劣化事例です。過去に RC 上部工の主桁と横桁に表面保護工による補修が、主桁下面には鋼板接着工による補強がなされています。

しかし、既にコンクリート中に侵入した塩化物イオンと水、酸素の影響により鉄筋腐食が進行してしまい、さらなる腐食膨張圧が生じたことにより、再び鉄筋位置のコンクリートが剥離しています。こうなると、鋼板も主桁との一体化を保つことができず、補強効果は期待できません。このように、塩害による劣化はコンクリート内部の鉄筋腐食の進行に伴って進行するものであり、その進行速度は環境条件（海岸からの距離や凍結防止剤の散布量など）によっては極めて大きいことが特徴です。

(3) 塩害の補修工法

塩害により劣化したコンクリート構造物の補修工法を選定するにあたっては、構造物の劣化状況が潜伏期、進展期、加速期、劣化期のどの劣化過程にあるかを十分に見極め、補修工法に期待する要求性能を明確にする必要があります。塩害による構造物の外観上のグレード（劣化過程）と劣化の状態との関係を表 2-1 に示します。

表 2-1 外観上のグレードと劣化の状態

外観上のグレード	劣化過程	劣化の状態
グレードⅠ	潜伏期	外観上の変化が見られない、鋼材腐食発生限界塩化物イオン濃度以下
グレードⅡ	進展期	外観上の変化が見られない、鋼材腐食発生限界塩化物イオン濃度以上、腐食が開始
グレードⅢ-1	加速期前期	腐食ひび割れや浮きが発生、さび汁が見られる
グレードⅢ-2	加速期後期	腐食ひび割れの幅や長さが大きく多数発生、腐食ひび割れの進展に伴うかぶりコンクリートの部分的な剥離・剥落が見られる、鋼材の著しい断面減少は見られない
グレードⅣ	劣化期	腐食ひび割れの進展に伴う大規模な剥離・剥落が見られる、鋼材の著しい断面減少が見られる、変位・たわみが大きい

出典：「2018 年制定 コンクリート標準示方書[維持管理編] 土木学会」

劣化過程を評価する上では、鉄筋腐食に関する定量的なデータを得るために、かぶりコンクリートをはつり出し、腐食の有無、位置、面積、孔食の有無などの鉄筋腐食調査を行うことが重要です。また、コンクリート中の含有塩化物イオン量の測定、特にコンクリート表面からの深さ方向の塩化物イオン量の分布を測定することが、Fick の拡散方程式などを用いて今後の劣化進行度合いを推定する上で重要となります。これらの調査、診断結果を十分考慮して補修要

否を判定し、要求性能を満たす補修工法を選定します。

塩害の補修工法に期待する効果（要求性能）は次のようになります。

【塩害補修工法の要求性能】

- ①劣化因子の遮断（コンクリート中への塩化物イオン、水、酸素の侵入を低減する）
- ②劣化因子の除去（既にコンクリート中に侵入した塩化物イオンを除去する）
- ③鉄筋腐食の抑制（既に腐食が開始している鉄筋の腐食進行を抑制する）
- ④コンクリート脆弱部の修復（コンクリート浮き、剥離、鉄筋露出部を修復する）

上記①～④の各要求性能に該当する補修工法として、以下のようなものが挙げられます。

①劣化因子の遮断（コンクリート中への塩化物イオン、水、酸素の侵入を低減する）

- ・表面保護工法（表面被覆工法、表面含浸工法など）
- ・ひび割れ注入工法（超微粒子セメント系、エポキシ樹脂系など）

②劣化因子の除去（既にコンクリート中に侵入した塩化物イオンを除去する）

- ・脱塩工法

③鉄筋腐食の抑制（既に腐食が開始している鉄筋の腐食進行を抑制する）

- ・電気防食工法（外部電源方式、流電陽極方式）
- ・鉄筋防錆材の活用（亜硝酸リチウムなど）

④コンクリート脆弱部の修復（コンクリート浮き、剥離、鉄筋露出部を修復する）

- ・断面修復工法（部分断面修復工法、全断面修復工法など）

次頁より、要求性能①～④に応じた各補修工法の概要を記します。

①劣化因子の遮断（コンクリート中への塩化物イオン、水、酸素の侵入を低減する）

【表面保護工法】

塩害における劣化因子とは、不動態被膜を破壊する塩化物イオン、鉄筋を腐食させる水と酸素を指します。コンクリート表面から侵入し、内部へと浸透拡散する塩化物イオン（飛来塩分）、水、酸素に対しては、表面保護工法によって侵入を抑制することができます。表面保護工法は「表面被覆工法」と「表面含浸工法」の2種類に分類できます。

(1)表面被覆工法

表面被覆工法は、コンクリート表面に有機系もしくは無機系の被覆材をはけ、ローラー、コテなどで塗布して表面を覆うことにより、外部からの劣化因子の侵入を遮断する工法です（図 2-7）。一般的にはプライマー、中塗材、上塗材と複数の種類の材料を重ね塗ります。有機系被覆材にはさまざまな種類があり、柔軟性や膜厚などを環境条件に応じて比較的自由に計画することができます。無機系被覆材は、主としてポリマーセメント系表面被覆材が用いられます。



図 2-7 表面被覆工法

近年では第三者被害を防ぐための剥落防止機能を備えた表面被覆材も実用化されています。また、ポリマーセメント系表面被覆材は亜硝酸リチウムを混入して塗布できるため、表面被覆工による劣化因子の遮断効果に加え、亜硝酸リチウムによる鉄筋防錆効果を付与することも可能となります。亜硝酸リチウムを用いた表面被覆工法については、第 3 章にて詳細に記述します。

(2)表面含浸工法

表面含浸工法は、シラン系やけい酸塩系などに代表される含浸材をコンクリート表面にはけやローラーで塗布、含浸させることにより、外部からの劣化因子の侵入を遮断する工法です（図 2-8）。シラン系含浸材はコンクリート表層に含浸して撥水層を形成する効果があり、けい酸ナトリウムやけい酸リチウムなどのけい酸塩系含浸材はコンクリート表層部の組成を緻密化し、改質する効果があります。このように表面含浸材の種類によって劣化因子の侵入抑制メカニズムは異なります。



図 2-8 表面含浸工法

劣化因子の遮断効果や耐用年数は一般的に表面被覆工に比べて劣るといわれています。しかし、この工法は表面被覆材のようにコンクリート表面に被膜層を設けないため、構造物の外観を変えることがなく、以後のモニタリングが容易であるという利点もあり、適用される事例が増えています。また、表面被覆工法と同様に亜硝酸リチウムと併用することもできます。亜硝酸リチウムを用いた表面含浸工法については第 3 章にて詳細に記述します。

【ひび割れ注入工法】

コンクリートにひび割れが存在する場合、ひび割れを介して塩化物イオン、水分、酸素が鉄筋位置に直接供給されることから、十分なかぶりが確保されていても鉄筋腐食が進行する可能性が高まります。このため、ひび割れ注入工により劣化因子の侵入を阻止する必要があります。

ひび割れ注入工法は、スプリング圧やゴム圧による低压注入器を用いて、セメント系、ポリマーセメント系、エポキシ樹脂やアクリル樹脂などの有機系



図 2-9 ひび割れ注入工法

材料をひび割れ内部に低压、低速で注入し、閉塞させる工法です（図 2-9）。ひび割れ注入工法は、コンクリート表面のひび割れ幅が 0.2mm～10.0mm 程度のものに適用可能です。単なるひび割れ補修では、ひび割れ幅が大きいものには経済性の理由により、ひび割れ充填工法（Uカット）を適用する場合があります。しかし、鉄筋腐食抑制の観点からはひび割れ充填工法より、ひび割れ注入工法の方が抑制効果は高いと考えられるので、劣化要因に応じた工法選定を行う必要があります。

エポキシ樹脂などの有機系注入材を使用する場合には、ひび割れ内部が乾燥した状態で施工する必要があります。ひび割れ内部が湿潤状態の場合には注入材の硬化が阻害され、十分な付着性が得られないことがあるので、湿潤面硬化型の注入材を使用するなどの対処が必要です。逆に、セメント系注入材はひび割れ内部が乾燥した状態では注入材の流動性、充填性が低下します。従って、セメント系注入材を使用する場合には、ひび割れ内部に十分な水通し（プレウエッティング）を行った上で施工する必要があります。セメント系注入材の中でも、流動性に優れ、ひび割れ先端部の微細な隙間にまで注入可能な超微粒子セメント系注入材の使用が増えています。

セメント系注入材は亜硝酸リチウムと併用して注入することができるため、ひび割れ注入工法による劣化因子の遮断効果に加え、亜硝酸リチウムによる鉄筋防錆効果を付加することも可能となります。亜硝酸リチウムを用いたひび割れ注入工法については第 3 章にて詳細に記述します。

②劣化因子の除去（既にコンクリート中に侵入した塩化物イオンを除去する）

【脱塩工法】

コンクリート中の塩化物イオン量が腐食発生限界を超えており、鉄筋腐食が開始しているような場合には、塩化物イオンをコンクリート外部へ除去して、鉄筋の腐食環境を改善する方針を採ることができます。脱塩工法は、コンクリート表面に陽極材と電解質溶液を設置し、陽極からコンクリート中の鉄筋（陰極）へ直流電流を流すことによってコンクリート中の塩化物イオン（陰イオン）を外部の陽極側へ電気泳動させ、コンクリート内部の塩化物イオン量を低下させる方法です（図 2-10）。脱塩工法を施工することで、鉄筋位置の塩化物イオン量が低下し、鉄筋腐食環境が改善されます。脱塩を行うための電流量は通常 1A/m^2 程度で、約 8 週間の通電を行うのが一般的です。通電が終わると陽極材は撤去されます。

かぶりコンクリートが比較的健全な状態の場合では、コンクリートをはつることなく塩化物イオンのみを除去できるため、このような劣化程度の構造物に対して適応性が高いといえます。塩害環境が厳しい場合には、脱塩工法を施工した後に再び塩化物イオンが侵入することのないよう、表面保護工などの対応策を併せて実施する必要があります。

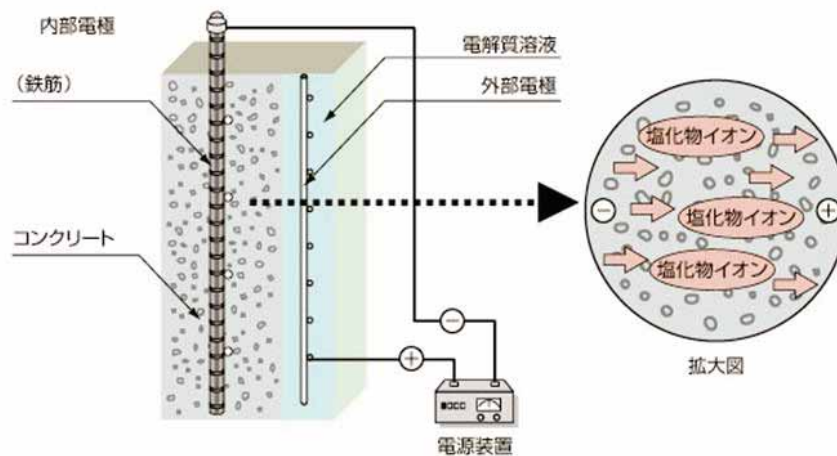


図 2-10 脱塩工法の概念図

出典:「コンクリートのひび割れ調査、補修・補強指針-2013-」

③鉄筋腐食の抑制（既に腐食が開始している鉄筋の腐食進行を抑制する）

【電気防食工法】

塩害によるコンクリート中の鉄筋腐食の程度が著しい場合、あるいは今後の鉄筋腐食が著しく進行すると想定される場合には、電気化学的な手法を用いて鉄筋腐食進行を抑制する方針を採ることができます。電気防食工法は、継続的な通電を行うことによってコンクリート中の鉄筋の腐食反応を電気化学的に制御し、劣化の進行を抑制する工法です（図 2-11）。電気防食工法では、コンクリート表面に陽極材を設置し、陽極材からコンクリート中の鉄筋（陰極）へ継続的に直流電流（防食電流）を流します。この防食電流が適切に流れている期間は鉄筋の腐食は抑制されます。

電気防食を行うための電流量は通常 $0.001 \sim 0.03 \text{ A/m}^2$ 程度で、対象構造物の供用期間を通じて通電を行う必要があります。従って、電流供給システムの耐久性などを考慮し、定期的なメンテナンスが必要となります。

なお、電気防食工法を大別すると、先述したような外部の電源から強制的に防食電流を流す外部電源方式と、鉄筋と陽極材との電池作用により防食電流を流す流電陽極方式（犠牲陽極方式）の 2 種類があります。

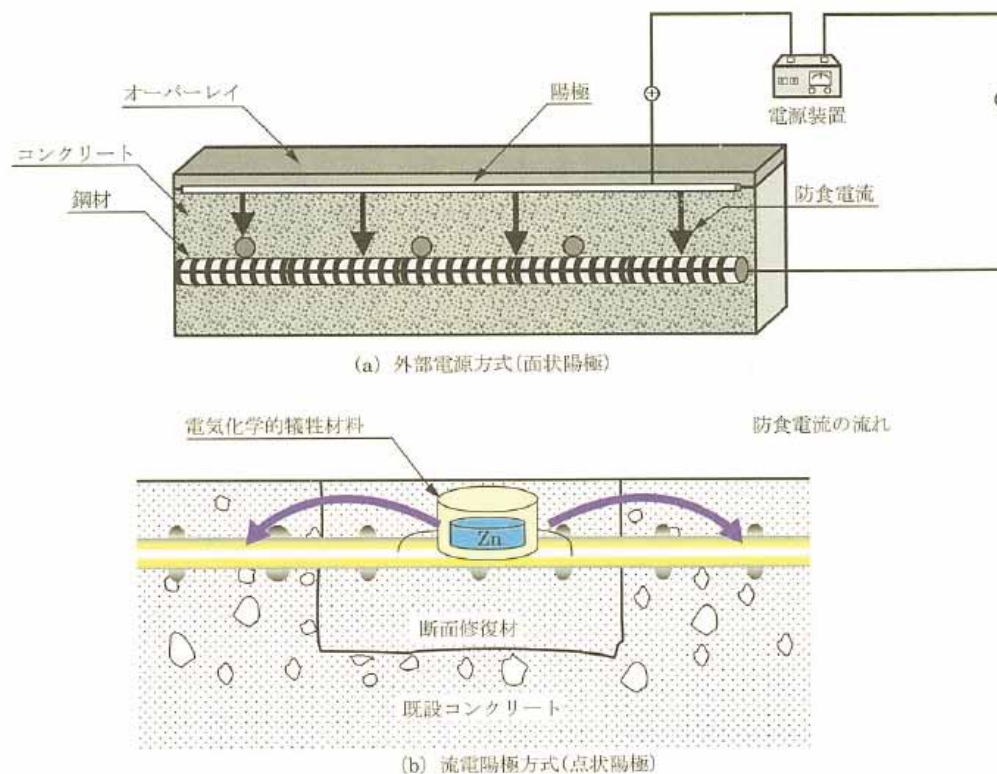


図 2-11 電気防食工法の概念図

出典：「コンクリートのひび割れ調査、補修・補強指針-2013-」

【鉄筋防錆材の活用（亜硝酸リチウム）】

亜硝酸イオンには鉄筋防錆効果があるので、塩害によるコンクリート中の鉄筋腐食の程度が著しい場合、あるいは今後の鉄筋腐食が著しく進行すると想定される場合には、鉄筋防錆材として亜硝酸イオンを活用する方針を採ることができます。亜硝酸イオンを含む代表的な防錆材として亜硝酸リチウム（図 2-12）が挙げられます。

亜硝酸リチウムを鉄筋防錆材として使用または併用する手段として、以下の 5 種類の方法が実用化されています。

亜硝酸リチウムを用いた補修工法

- ・表面被覆工法
- ・表面含浸工法
- ・ひび割れ注入工法
- ・断面修復工法
- ・内部圧入工法

表面被覆工法、表面含浸工法、ひび割れ注入工法においては、各補修工法の主たる要求性能はあくまで『劣化因子の遮断』ですが、その補修材料に亜硝酸リチウムを使用または併用することにより鉄筋腐食抑制効果も一部付与できます。断面修復工法においては、その主たる要求性能は『劣化因子の除去（全断面修復）』、『コンクリート脆弱部の修復（部分断面修復）』ですが、補修材料に亜硝酸リチウムを併用することにより鉄筋腐食抑制効果（マクロセル腐食抑制効果も含む）も付与できます。

ここで、『鉄筋腐食の抑制』を主たる要求性能とする補修工法として、内部圧入工法が挙げられます。これは亜硝酸リチウムによる鉄筋腐食抑制効果を最も積極的に活用する工法といえます。この工法ではコンクリートに削孔した小径の圧入孔から亜硝酸リチウムを内部圧入することで鉄筋表面に亜硝酸イオンを供給し、破壊されていた鉄筋不動態被膜を再生します。

これらの亜硝酸リチウムを用いた塩害補修工法については第 3 章にて詳細に記述します。



図 2-12 亜硝酸リチウム

④コンクリート脆弱部の修復（コンクリート浮き、剥離、鉄筋露出部を修復する）

【断面修復工法】

断面修復工法といえば、一般的にはコンクリート脆弱部（浮き、剥離、鉄筋露出、断面欠損などの箇所）の修復という目的で、部分的に適用される部分断面修復工法を指すことが多いのですが、コンクリート中の塩化物イオン量が腐食発生限界を超えており、鉄筋腐食が開始している場合には、塩化物イオンを含むコンクリートをはつり取り、断面修復材を用いて断面欠損部分を修復するという方針を採ることができます。断面修復材には母材コンクリートとの付着性、一体性を要求されるので、その性能を満たす材料としてポリマーセメントモルタルが多く用いられています。

a) 部分断面修復工法

塩害による鉄筋腐食が進行すると、コンクリート表面に浮き、剥離、鉄筋露出などが生じます。それらの変状箇所を部分的にはつり取り、断面修復材で埋め戻すのが部分断面修復工法です。部分断面修復工法は1カ所あたりの施工範囲が比較的小規模な場合が多いため、主に左官工法（図 2-13）が適用されます。これにより「コンクリート脆弱部の修復」を図ることができますが、部分断面修復を施した範囲以外のコンクリートにも塩化物イオンは存在しているため、将来的には新たな鉄筋腐食の進行が予測されます。さらに、断面修復部と未修復部との境界面においてマクロセル腐食が生じる可能性も指摘されており、注意が必要です。断面修復部に犠牲陽極材を設置する方法や、断面修復材に亜硝酸リチウムを混入して使用する方法により、鉄筋防錆効果を付与すると同時に、マクロセル腐食を低減できます。亜硝酸リチウムを用いた断面修復工法については第 3 章にて詳細に記述します。

b) 全断面修復工法

鉄筋位置での塩化物イオン濃度が腐食発生限界を超えている場合、鉄筋の不動態被膜が破壊され、鉄筋が腐食環境に置かれます。そこで、鉄筋周囲に存在する塩化物イオンを全て除去することを目的としてかぶり範囲のコンクリートを全てはつり取り、断面修復材にて埋め戻すのが全断面修復工法です。従って、全断面修復工法はコンクリート表面の浮き、剥離の有無にかかわらずコンクリート表面全体を施工対象とします。全断面修復工法は、対象部位や施工の方向、施工規模などに応じて左官工法、吹付け工法（図 2-14）、充填工法などを使い分けます。

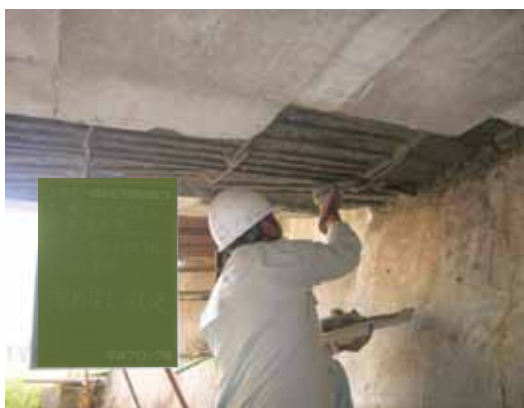


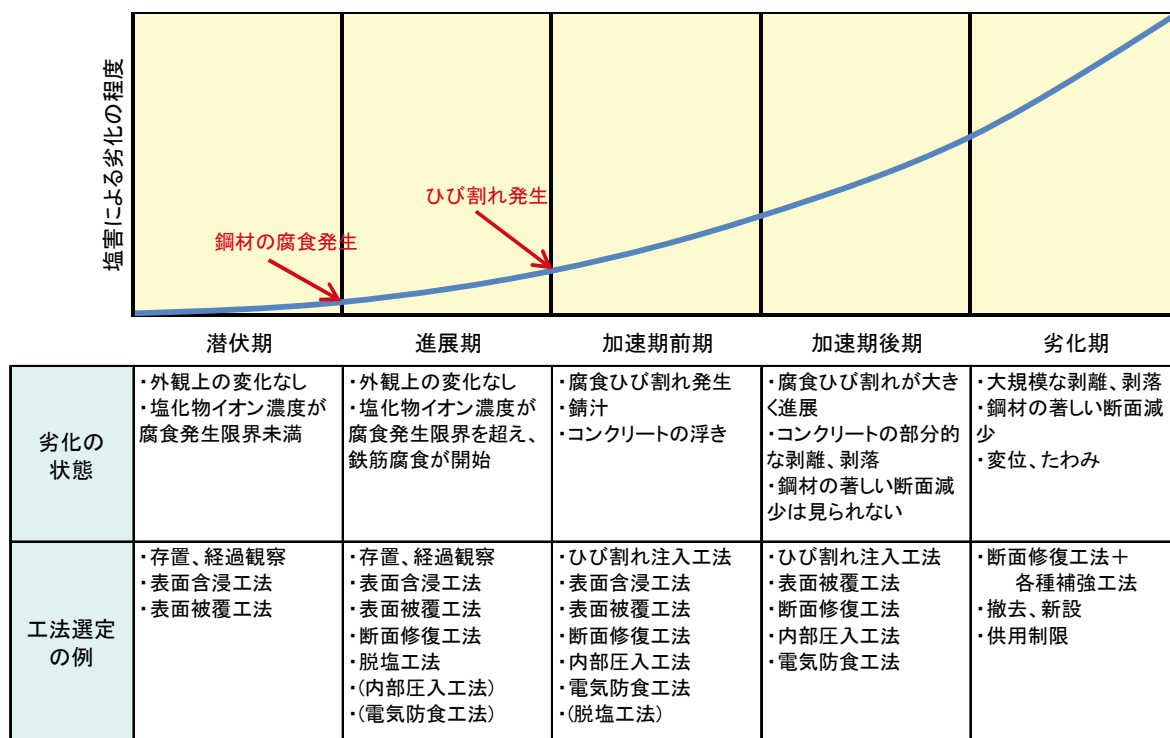
図 2-13 断面修復工法(左官工法)



図 2-14 断面修復工法(吹付け工法)

(4)塩害の補修工法選定の基本的な考え方

塩害の補修工法を選定するためには、まず現時点での劣化状況や将来の劣化予測結果に基づいて補修工法に要求する性能を評価します。さらに、対策後にこの構造物をどのように維持管理していくかという方針（シナリオ）も考慮すべきです。この維持管理シナリオは残存供用年数を設定した上でライフサイクルコスト（以下、LCC と称す）も考慮して策定します。これら「工学的判断に基づく補修要求性能の設定」と「LCC を考慮した維持管理シナリオの策定」の検討を行うことで最適な補修工法を選定できると考えられます。それを踏まえて、劣化過程と適用可能な補修工法の関係の例を図 2-15 に示します。



※ ()内は維持管理シナリオによって選択される可能性のある工法を示す

図 2-15 塩害の劣化過程と適用可能な補修工法との関係

以下、劣化過程ごとに塩害の補修工法選定の基本的な考え方について示します。

【潜伏期】

潜伏期は、塩化物イオンの侵入の兆しが見られるものの、その濃度はまだ腐食発生限界に達していない状態を指します。現時点では鉄筋が腐食する理由はまだないので、外観には何ら変状が見られない状態ですが、このまま放置すると将来的には腐食環境となることが予測されます。従って、潜伏期における対策工への要求性能は、外部からの劣化因子の侵入抑制となります。この段階で塩化物イオン侵入を阻止できれば、将来的にも鉄筋腐食が生じることはありません。この要求性能に適する工法は表面含浸工法または表面被覆工法で、予防保全的な適用となります。

ここで、塩化物イオンの拡散予測の結果次第では腐食発生限界濃度を超えるまでに十分な余裕がある場合も想定されます。その場合、すぐに対策工を施さず、しばらく経過観察を行うと

いう選択もあります。

【進展期】

進展期は、鉄筋位置で塩化物イオンが腐食発生限界濃度を超えた状態を指します。これにより鉄筋周囲は腐食環境となり、不動態被膜は破壊され、鉄筋腐食が開始します。ただし、まだひび割れなどの変状は生じていないので、やはり外観には何ら変状が見られない状態です。外観だけでは潜伏期と進展期は区別がつかないのですが、内部での鉄筋腐食状況は大きく異なっています。このまま放置すると近い将来には鉄筋腐食によるひび割れの発生が予測されます。進展期における対策工への要求性能は、外部からの劣化因子の侵入抑制および以後の鉄筋腐食の進行抑制となります。既に不動態被膜を破壊するのに十分な塩化物イオンは侵入していますが、水分や酸素の侵入を抑制して鉄筋腐食速度を緩和させることにより、ひび割れ発生などの変状の顕在化をできるだけ阻止するという考え方です。この要求性能に適する工法は、表面含浸工法または表面被覆工法となります。この場合も変状が生じる前に施す対策工となるので予防保全の範疇と考えられます。一般的には表面含浸工法は潜伏期に適用される補修工法に分類されますが、鉄筋腐食抑制効果を併せ持つ表面含浸工法を選択すれば潜伏期を超えても適用可能と考えられます。

ここで、塩化物イオン濃度が高い場合や劣化の顕在化を許容しない維持管理が要求される場合は、この段階で電気防食工法や亜硝酸リチウム内部圧入工法など、塩化物イオン存在下でも鉄筋腐食を完全に停止させる工法の適用を検討することもあります。また、全断面修復工法や脱塩工法によって鉄筋周囲の塩化物イオンを完全に除去し、鉄筋腐食環境の改善を検討する場合もあります。ただし、これらの工法は初期費用が大きくなるため、構造物の重要性や費用対効果、LCCなどを十分に考慮して適用の検討を行う必要があります。

【加速期前期】

加速期前期は、鉄筋の腐食膨張圧によってひび割れやコンクリートの浮きなどが発生している状態を指します。すなわち、鉄筋腐食に起因する何らかの変状が表れた時点で劣化過程は加速期前期に達していることになります。鉄筋位置での塩化物イオンは腐食発生限界濃度を超えていることは言うまでもありません。加速期前期における対策工への要求性能は、既に進行中の鉄筋腐食反応を抑制または停止させることになります。鉄筋腐食が進行し、ひび割れなどの変状が生じているので、ひび割れ注入工と表面保護工（含浸または被覆）を組み合わせることで劣化因子の侵入を抑制し、鉄筋腐食速度を緩和させることにより、これ以上の変状の増大を阻止するという考え方です。しかし、これらの工法は鉄筋腐食反応を完全に停止させるものではないため、将来的には再劣化を生じる可能性があることを認識しておく必要があります。つまり、現時点での劣化状況に対して最小限の対策を講じ、再劣化が生じれば速やかに再補修を行うという維持管理のサイクルを想定する考え方です。

それに対し、何度も再補修を繰り返すのではなく再劣化を許容しない維持管理が要求される場合には、この段階で電気防食工法や亜硝酸リチウム内部圧入工法など、塩化物イオン存在下でも鉄筋腐食を完全に停止させる工法の適用を検討することもあります。また、全断面修復工法によって鉄筋周囲の塩化物イオンを完全に除去し、鉄筋の防錆処理を完全に行うことで鉄筋腐食環境を改善する場合もあります。ただし、これらの工法は初期費用が大きくなるので、構造物の重要性や費用対効果、LCCなどを十分に考慮して適用の検討を行う必要があります。

【加速期後期】

加速期後期は、加速期前期の状態がさらに進展した状態を指しており、ひび割れの幅や延長の増大、コンクリートの部分的な剥離、剥落も進行する過程です。加速期後期における対策工への要求性能は、既に進行中の鉄筋腐食反応を抑制または停止させることになります。加速期後期を過ぎると劣化期に陥ってしまい、耐久性能だけでなく耐荷性能を損なう状況となるので、これ以上の性能低下の許容はできません。鉄筋腐食の進行が著しいこの段階で、確実に鉄筋腐食を抑制または停止するためには、電気防食工法や亜硝酸リチウム内部圧入工法など、塩化物イオン存在下でも鉄筋腐食を完全に停止させる工法の適用を検討します。また、全断面修復工法によって鉄筋周囲の塩化物イオンを完全に除去し、鉄筋の防錆処理を完全に行い、鉄筋腐食環境を改善することもあります。これらの工法を適用した場合、以後の鉄筋腐食のリスクを低減し、構造物の性能低下を阻止することが可能であると考えられます。

それに対し、残存供用年数が比較的短い場合や補修の初期費用をそれほどかけられないと判断される場合は、ひび割れ注入工、表面保護工、部分断面修復工など最小限の対策を講じ、鉄筋腐食速度をできる限り軽減して変状の増大を緩和するという考え方を採ることもあります。しかし、これらの工法は鉄筋腐食反応を完全に停止させるものではなく、将来的には早期に再劣化が生じる可能性が高いと認識しておく必要があります。すなわち、現時点での劣化状況に対して最小限の対策を講じ、再劣化が生じれば速やかに再補修を行う維持管理のサイクルを想定するという考え方です。ただし、加速期後期では劣化進行速度も大きく、早いサイクルで再劣化と再補修を繰り返す維持管理シナリオとなるため、LCCが高価となることも少なくありません。

【劣化期】

劣化期は、大規模な剥離、剥落や腐食による著しい鉄筋断面減少など、甚大な変状が生じている状態を指し、構造物の耐久性能のみならず耐荷性能の低下が考えられます。そもそも劣化期になるまで放置すべきではありませんが、もし、劣化期に至った場合は大規模な断面修復工法が必要となります。また、それと併用して不足する耐荷性能を補うために適切な補強工法を併用する必要も生じます。劣化期の補修または補強には大きな費用を要することが多いため、撤去、新設という選択肢も視野に入れた総合的な評価が重要となります。

2.2 中性化

(1) 中性化とは

中性化とは、pH が 12～13 の強アルカリ性であるコンクリートに大気中の二酸化炭素 (CO₂) が侵入し、水酸化カルシウムなどのセメント水和物と炭酸化反応を起こすことによって細孔溶液の pH を低下させる劣化現象です。この反応は図 2-16 に示す反応式で表すことができます。中性化の劣化因子は二酸化炭素なので、中性化はあらゆるコンクリート構造物にとって切実な問題となります。大気中の二酸化炭素濃度は年々増加の傾向を示しており、それに加えて自動車などの排気ガス中の亜硫酸ガス (SO_x)、それを含んだ酸性雨などもコンクリートを中性化させる原因となります。

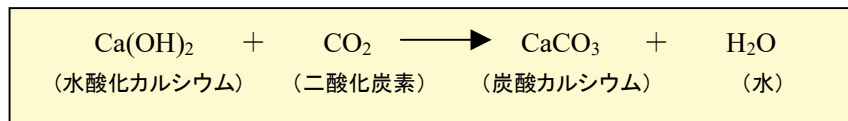


図 2-16 中性化の進行過程

高アルカリ環境のコンクリート中にある鉄筋表面には不動態被膜が形成されていますが、pH がおおむね 11 より低くなると不動態被膜は破壊され、鉄筋が腐食環境下に置かれることとなります。不動態被膜が破壊された後の鉄筋腐食の進行は、塩害の節で述べたとおりです (図 2-2 参照)。鉄筋が腐食すると腐食箇所の体積が膨張し、その膨張圧によってコンクリートにひび割れが発生します。そのひび割れを通じて水分、酸素などの劣化因子の供給が容易になると、さらに鉄筋腐食が促進され、コンクリート剥離や剥落、鉄筋の断面減少が生じ、構造物の耐久性、耐荷性能が低下していきます。これが中性化によるコンクリート構造物の劣化メカニズムです。鉄筋の腐食開始時期の判定基準は、一般的に中性化残り 10mm 以下とされています。

中性化はコンクリート表面から内部へ向かって進行していきます。その進行速度は、コンクリートの通気性、含水率、強度、セメントの種類、配合、施工条件などのほか、温度、湿度、二酸化炭素濃度などの環境条件にも影響を受けることが知られています。

(2) 中性化による劣化事例

中性化によるコンクリート構造物の劣化は、『二酸化炭素の侵入による pH 低下』→『不動態被膜の破壊』→『鉄筋腐食の発生と進行』→『腐食膨張圧によるコンクリートひび割れ』→『かぶりコンクリートの浮き・剥離』という過程を経ると考えられます。すなわち、中性化による劣化がコンクリート表面のひび割れとして顕在化した時点で、コンクリート内部の鉄筋腐食はかなり進行しているものと考えられます。

図 2-17 は中性化により鉄筋が腐食し、かぶりコンクリートが剥落している状況です。自動車の排気ガスなどにより、二酸化炭素の供給が多い構造物は中性化による劣化を受けやすいといえます。図 2-18 は道路橋の張出し床版下面において、腐食した鉄筋が露出している状況です。もともと鉄筋かぶりが不足しており、早期に中性化領域が鉄筋位置まで到達し、鉄筋が腐食したものと考えられます。



図 2-17 壁高欄のコンクリート剥落



図 2-18 張出し床版下面の鉄筋露出

(3) 中性化の補修工法

中性化により劣化したコンクリート構造物の補修工法を選定するにあたっては、構造物の劣化状況が潜伏期、進展期、加速期、劣化期のどの劣化過程にあるかを十分に見極め、補修工法に期待する要求性能を明確にする必要があります。中性化による構造物の外観上のグレード（劣化過程）と劣化の状態との関係を表 2-2 に示します。

表 2-2 外観上のグレードと劣化の状態

外観上のグレード	劣化過程	劣化の状態
グレードⅠ	潜伏期	外観上の変化が見られない、腐食開始前
グレードⅡ	進展期	外観上の変化が見られない、腐食が開始
グレードⅢ-1	加速期前期	腐食ひび割れが発生
グレードⅢ-2	加速期後期	腐食ひび割れの進展とともに剥離・剥落が見られる、鋼材の断面欠損は生じていない
グレードⅣ	劣化期	腐食ひび割れとともに剥離・剥落が見られる、鋼材の断面欠損が生じている

出典:「2018 年制定 コンクリート標準示方書[維持管理編] 土木学会」

中性化の劣化過程を評価する上では、塩害と同様に鉄筋腐食に関する定量的なデータを得ることが重要です。また、フェノールフタレイン溶液によるコンクリートの中性化深さ測定や、 $\sqrt{t}$ 則を用いた今後の中性化進行予測を行うことも重要となります。

中性化による劣化はコンクリート中への中性化領域の進展に伴う鉄筋腐食によって進行するため、中性化の補修工法に期待する効果（要求性能）は以下のようになります。

【中性化補修工法の要求性能】

- ①劣化因子の遮断（コンクリート中への二酸化炭素、水、酸素の侵入を低減する）
- ②中性化領域の回復（既に中性化したコンクリートのアルカリ性を回復する）
- ③鉄筋腐食の抑制（既に腐食が開始している鉄筋の腐食進行を抑制する）
- ④コンクリート脆弱部の修復（コンクリート浮き、剥離、鉄筋露出部を修復する）

上記①～④の各要求性能に該当する補修工法として、以下のようなものが挙げられます。

①劣化因子の遮断（コンクリート中への二酸化炭素、水、酸素の侵入を低減する）

- ・表面保護工法（表面被覆工法、表面含浸工法など）
- ・ひび割れ注入工法（エポキシ樹脂系、超微粒子セメント系など）

②中性化領域の回復（既に中性化したコンクリートのアルカリ性を回復する）

- ・再アルカリ化工法

③鉄筋腐食の抑制（既に腐食が開始している鉄筋の腐食進行を抑制する）

- ・電気防食工法（外部電源方式、流電陽極方式）
- ・鉄筋防錆材の活用（亜硝酸リチウムなど）

④コンクリート脆弱部の修復（コンクリート浮き、剥離、鉄筋露出部を修復する）

- ・断面修復工法（部分断面修復工法、全断面修復工法など）

次頁より、要求性能①～④に応じた各補修工法の概要を記します。

①劣化因子の遮断（コンクリート中への二酸化炭素、水、酸素の侵入を低減する）

【表面保護工法】

中性化における劣化因子とは、コンクリートの pH を低下させ不動態被膜を破壊する二酸化炭素、鉄筋を腐食させる水、酸素を指します。表面保護工法によって二酸化炭素の侵入が低減されると中性化領域の進展が抑制され、鉄筋腐食環境の拡大を阻止します。また、鉄筋腐食を生じさせる水分や酸素の侵入も併せて阻止できます。表面保護工法は「表面被覆工法」と「表面含浸工法」の 2 種類に分類できます。これらの基本的な考え方は塩害の場合と同様です。

(1)表面被覆工法

表面被覆工法は、コンクリート表面に有機系もしくは無機系の被覆材をはけ、ローラー、コテなどで塗布して表面を覆うことにより、外部からの劣化因子の侵入を遮断する工法です（図 2-19）。一般的にはプライマー、中塗材、上塗材と複数の種類の材料を重ね塗ります。有機系被覆材にはさまざまな種類があり、柔軟性や膜厚などを環境条件に応じて比較的自由に計画することができます。無機系被覆材は、主としてポリマーセメント系表面被覆材が用いられます。



図 2-19 表面被覆工法

近年では第三者被害を防ぐための剥落防止機能を備えた表面被覆材も実用化されています。また、ポリマーセメント系表面被覆材は亜硝酸リチウムを混入して塗布できるため、表面被覆工による劣化因子の遮断効果に加え、亜硝酸リチウムによる鉄筋防錆効果を付与することも可能となります。亜硝酸リチウムを用いた表面被覆工法については第 3 章にて詳細に記述します。

(2)表面含浸工法

表面含浸工法は、けい酸塩系などに代表される含浸材をコンクリート表面にはけやローラーで塗布、含浸させることにより、外部からの劣化因子の侵入を遮断する工法です（図 2-20）。けい酸ナトリウムやけい酸リチウムなどのけい酸塩系含浸材はコンクリート表層部の組成を緻密化し、改質する効果があります。一般的にシラン系含浸材は中性化に対する適応性が低いといわれています。



図 2-20 表面含浸工法

劣化因子の遮断効果や耐用年数は一般的に表面被覆工に比べて劣ると言われていますが、この工法は表面被覆材のようにコンクリート表面に被膜層を設けないため、構造物の外観を変えることがなく、以後のモニタリングが容易という利点もあり、適用される事例が増えています。また、表面被覆工法と同様に亜硝酸リチウムとの併用もできます。亜硝酸リチウムを用いた表面含浸工法については、第 3 章にて詳細に記述します。

【ひび割れ注入工法】

コンクリートにひび割れが存在する場合、ひび割れを介して水分、酸素、二酸化炭素が鉄筋位置に直接供給されることから、十分なかぶりが確保されていても鉄筋腐食が進行する可能性が高まります。中性化と塩害は劣化因子が異なるものの、最終的には鉄筋腐食を抑制する対策に帰着するので、中性化も塩害と同様にひび割れ注入工により劣化因子の侵入を阻止する必要があります。

ひび割れ注入工法はスプリング圧やゴム圧による低圧注入器を用いて、セメント系、ポリマーセメント系、エポキシ樹脂やアクリル樹脂などの有機系材料をひび割れ内部に低圧、低速で注入し、閉塞させる工法です（図 2-21）。ひび割れ注入工法はコンクリート表面のひび割れ幅が 0.2mm～10.0mm 程度のものに適用可能です。単なるひび割れ補修では、ひび割れ幅が大きいものには経済性の理由によりひび割れ充填工法（Uカット）を適用する場合もあり



図 2-21 ひび割れ注入工法

ますが、鉄筋腐食抑制の観点からはひび割れ充填工法よりもひび割れ注入工の方が抑制効果が高いと考えられるので、劣化要因に応じた工法選定を行う必要があります。

エポキシ樹脂などの有機系注入材を使用する場合は、ひび割れ内部が乾燥した状態で施工する必要があります。ひび割れ内部が湿潤状態の場合には注入材の硬化が阻害され、十分な付着性が得られないことがあるので、湿潤面硬化型の注入材を使用するなどの対処が必要となります。逆に、セメント系注入材はひび割れ内部が乾燥した状態では注入材の流動性、充填性が低下します。従って、セメント系注入材を使用する場合は、ひび割れ内部に十分な水通し（プレウエティング）を行った上で施工する必要があります。セメント系注入材の中でも、流動性に優れ、ひび割れ先端部の微細な隙間にまで注入可能な超微粒子セメント系注入材の使用が増えています。

セメント系注入材は亜硝酸リチウムと併用して注入できるため、ひび割れ注入工による劣化因子の遮断効果に加え、亜硝酸リチウムによる鉄筋防錆効果を付加することも可能となります。亜硝酸リチウムを用いたひび割れ注入工法については第 3 章にて詳細に記述します。

②中性化領域の回復（既に中性化したコンクリートのアルカリ性を回復する）

【再アルカリ化工法】

コンクリート中の鉄筋位置まで中性化が進行している場合、あるいは今後の中性化進行が将来的に鉄筋位置に到達すると想定される場合には、電気化学的な手法を用いて中性化したコンクリートにアルカリ性を再付与する方針を採ることができます。再アルカリ化工法は、コンクリート表面に陽極材と電解質溶液を設置し、陽極からコンクリート中の鉄筋（陰極）へ直流電流を流すことによってアルカリ性溶液をコンクリート中に浸透させ、コンクリート本来の pH 値程度まで回復させる工法です（図 2-22）。再アルカリ化工法でコンクリートの pH が回復することにより、鉄筋腐食環境が改善されます。再アルカリ化を行うための電流量は通常 $1\text{A}/\text{m}^2$ 程度で、約 1～2 週間の通電を行うのが一般的です。通電が終わると陽極材は撤去されます。

かぶりコンクリートが比較的健全な状態なら、コンクリートをはつことなく中性化深さを 0（ゼロ）に戻すことができるため、このような劣化程度の構造物に対して適応性が高いといえます。再アルカリ化工法を施工した後に再び二酸化炭素が侵入することを防ぐために、表面保護工などの対応策を併せて実施することも検討すべきです。

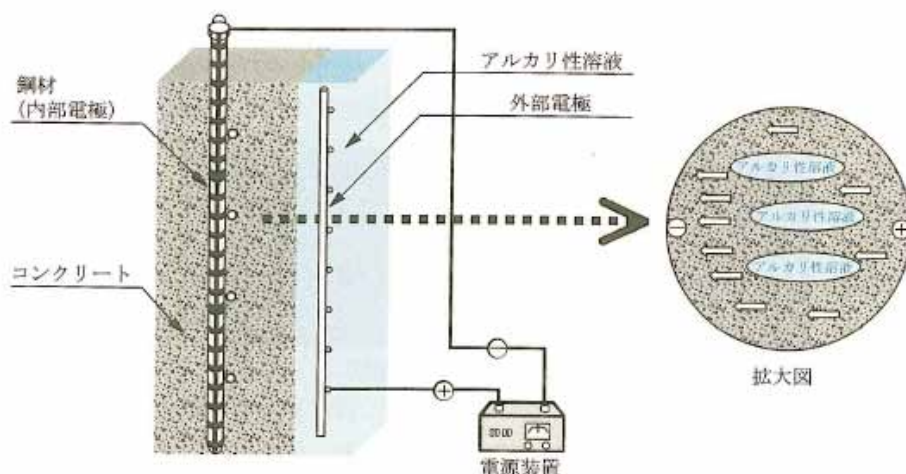


図 2-22 再アルカリ化工法の概念図

出典：「コンクリートのひび割れ調査、補修・補強指針-2013-」

③鉄筋腐食の抑制（既に腐食が開始している鉄筋の腐食進行を抑制する）

【電気防食工法】

中性化によるコンクリート中の鉄筋腐食の程度が著しい場合、あるいは今後の鉄筋腐食が著しく進行すると想定される場合には、塩害の場合と同様に電気化学的な手法を用いて鉄筋腐食進行を抑制する方針を採ることができます。電気防食工法は、継続的な通電を行うことによってコンクリート中の鉄筋の腐食反応を電気化学的に制御し、劣化の進行を抑制する工法です。電気防食工法では、コンクリート表面に陽極材を設置し、陽極材からコンクリート中の鉄筋（陰極）へ継続的に直流電流（防食電流）を流します。この防食電流が適切に流れている期間は鉄筋の腐食は抑制されます（図 2-23）。

電気防食を行うための電流量は通常 $0.001 \sim 0.03 \text{ A/m}^2$ 程度で、対象構造物の供用期間を通じて通電を行う必要があります。従って、電流供給システムの耐久性などを考慮し、定期的なメンテナンスが必要となることに留意します。

なお、電気防食工法を大別すると、先述したような外部の電源から強制的に防食電流を流す外部電源方式と、鉄筋と陽極材との電池作用により防食電流を流す流電陽極方式（犠牲陽極方式）の 2 種類があります。

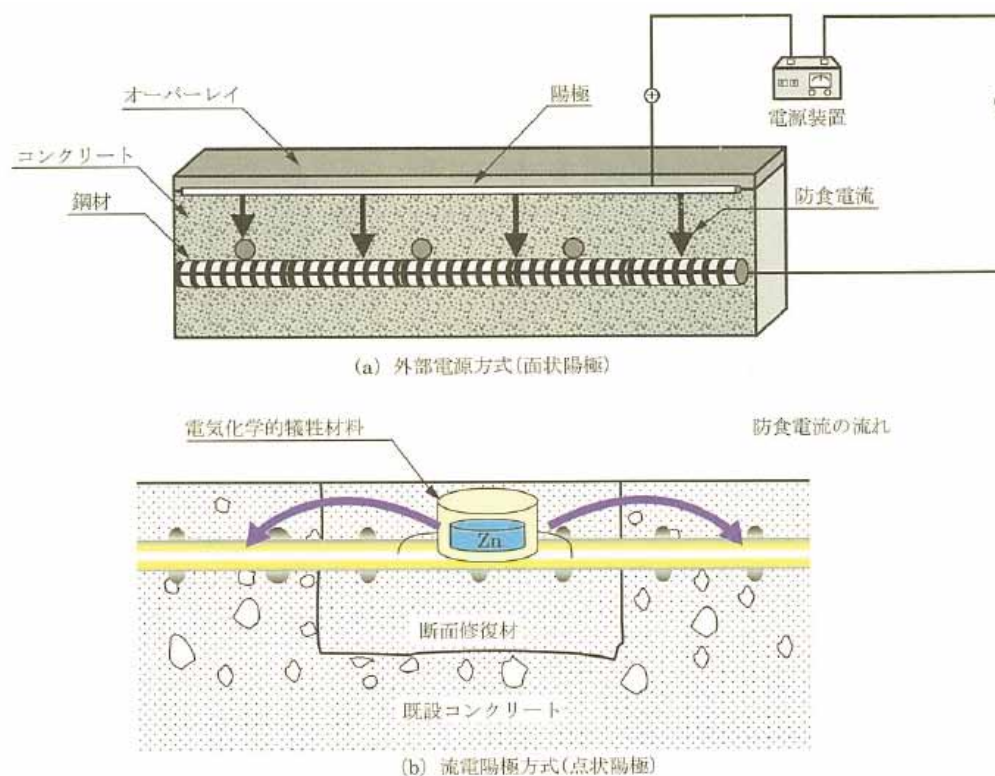


図 2-23 電気防食工法の概念図

出典：「コンクリートのひび割れ調査、補修・補強指針-2013-」

【鉄筋防錆材の活用（亜硝酸リチウム）】

亜硝酸イオンには鉄筋防錆効果があるので、中性化によるコンクリート中の鉄筋腐食に対しても、塩害の場合と同様にコンクリート中の鉄筋腐食の程度が著しい場合、あるいは今後の鉄筋腐食が著しく進行すると想定される場合には、鉄筋防錆材として亜硝酸イオンを活用する方針を採ることができます。亜硝酸イオンを含む代表的な防錆材として亜硝酸リチウム(図 2-24)が挙げられます。

亜硝酸リチウムを鉄筋防錆材として使用または併用する手段として、以下の 5 種類の方法が実用化されています。

亜硝酸リチウムを用いた補修工法

- ・表面被覆工法
- ・表面含浸工法
- ・ひび割れ注入工法
- ・断面修復工法
- ・内部圧入工法

表面被覆工法、表面含浸工法、ひび割れ注入工法では、各補修工法の主たる要求性能はあくまで『劣化因子の遮断』ですが、その補修材料に亜硝酸リチウムを使用または併用することにより鉄筋腐食抑制効果も一部考慮できます。断面修復工法では、その主たる要求性能は『劣化因子の除去（全断面修復）』、『コンクリート脆弱部の修復（部分断面修復）』ですが、補修材料に亜硝酸リチウムを併用すれば、鉄筋腐食抑制効果（マクロセル腐食抑制効果も含む）も考慮することができます。

ここで、『鉄筋腐食の抑制』を主たる要求性能とする補修工法として、内部圧入工法が挙げられます。これは亜硝酸リチウムによる鉄筋腐食抑制効果を最も積極的に活用する工法といえます。この工法ではコンクリートに削孔した小径の圧入孔から亜硝酸リチウムを内部圧入することで鉄筋表面に亜硝酸イオンを供給し、破壊されていた鉄筋不動態被膜を再生します。

これらの亜硝酸リチウムを用いた塩害補修工法については、第 3 章にて詳細に記述します。



図 2-24 亜硝酸リチウム

④コンクリート脆弱部の修復（コンクリート浮き、剥離、鉄筋露出部を修復する）

【断面修復工法】

断面修復工法といえば、一般的にはコンクリート脆弱部（浮き、剥離、鉄筋露出、断面欠損などの箇所）の修復という目的で部分的に適用される部分断面修復工法を指すことが多いのですが、コンクリート中の鉄筋位置付近まで中性化が進行し、鉄筋腐食が開始している場合は、中性化した範囲のコンクリートをはつり取り、断面修復材を用いて断面欠損部分を修復するという方針を採ることができます。これにより、断面修復した範囲の中性化深さは0(ゼロ)に戻ることになります。断面修復材には母材コンクリートとの付着性、一体性が要求されるので、その性能を満たす材料としてポリマーセメントモルタルが多く用いられています。

a) 部分断面修復工法

中性化による鉄筋腐食が進行すると、コンクリート表面に浮き、剥離、鉄筋露出などが生じます。それらの変状箇所を部分的にはつり取り、断面修復材で埋め戻すのが部分断面修復工法です。部分断面修復工法は1箇所あたりの施工範囲が比較的小規模な場合が多いため、主に左官工法（図 2-25）が適用されます。これにより「コンクリート脆弱部の修復」を図ることができますが、はつり範囲以外のコンクリートも中性化は進行しているため、将来的には新たな鉄筋腐食の進行が予測されます。

b) 全断面修復工法

鉄筋位置付近まで中性化が進行している場合、鉄筋の不動態被膜が破壊され、鉄筋が腐食環境に置かれます。そこで中性化深さを0（ゼロ）に戻す目的で、かぶり範囲のコンクリートを全てのはつり取り、断面修復材で埋め戻すのが全断面修復工法です。従って、全断面修復工法はコンクリート表面の浮き、剥離の有無にかかわらずコンクリート表面全体を施工対象とします。全断面修復工法は、対象部位や施工の方向、施工規模などに応じて左官工法、吹付け工法（図 2-26）、充填工法などを使い分けます

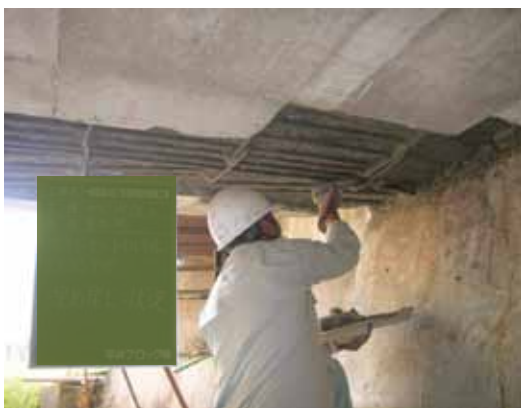


図 2-25 断面修復工法(左官工法)



図 2-26 断面修復工法(吹付け工法)

(4) 中性化の補修工法選定の基本的な考え方

中性化の補修工法を選定するためには、まず現時点での劣化状況および将来の劣化予測結果に基づいて補修工法に要求する性能を評価します。さらに、対策後にこの構造物をどのように維持管理していくかという方針（シナリオ）も考慮すべきです。この維持管理シナリオは残存供用年数を設定した上でライフサイクルコスト（以下、LCC と称す）も考慮して策定します。これら「工学的判断に基づく補修要求性能の設定」と「LCC を考慮した維持管理シナリオの策定」の検討を行うことで最適な補修工法を選定できると考えられます。それを踏まえて、劣化過程と適用可能な補修工法の関係の例を図 2-27 に示します。

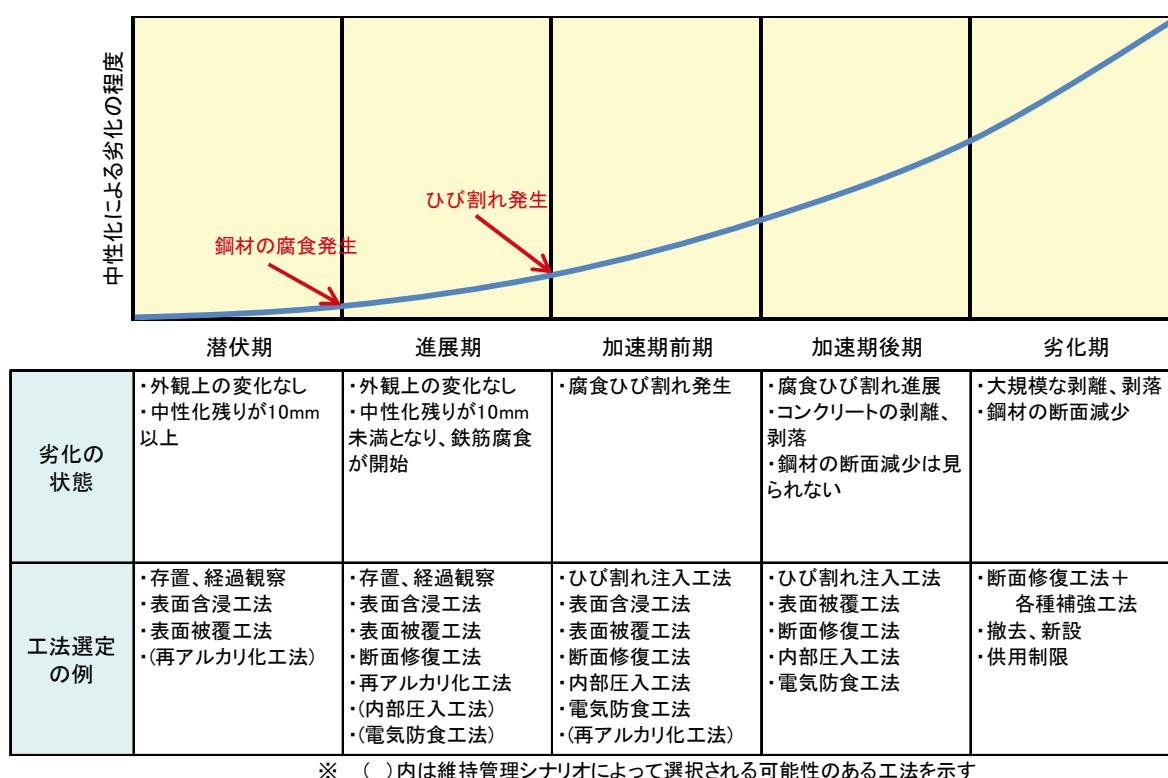


図 2-27 中性化の劣化グレードと適用可能な補修工法との関係

以下、劣化過程ごとに中性化の補修工法選定の基本的な考え方について示します。ここで、中性化と塩害は共に鉄筋腐食に起因して構造物の性能が低下するという点でメカニズムが共通しているので、補修工法の考え方も共通する部分が多いといえます。

【潜伏期】

潜伏期は、二酸化炭素の侵入により中性化進行の兆しが見られるものの、中性化残りが発錆限界（例えば中性化残り 10mm）以上である状態を指します。現時点では鉄筋が腐食する理由はまだないので、外観には何ら変状が見られない状態ですが、このまま放置すると将来的には腐食環境となることが予測されます。従って、潜伏期における対策工への要求性能は、外部からの劣化因子の侵入抑制となります。この段階で二酸化炭素の侵入を阻止できれば、それ以上中性化領域が広がらないため、将来的にも鉄筋腐食が生じることはありません。この要求性能

に適する工法は表面含浸工法または表面被覆工法となり、予防保全的な適用となります。

ここで、 $\sqrt{t}$ 則を用いた今後の中性化進行予測の結果次第では、中性化残りが発錆限界を超えるまでに十分な余裕がある場合も想定されます。その場合、すぐに対策工を施さず、しばらく経過観察を行うという選択もあります。

【進展期】

進展期は、中性化残りが発錆限界未満となった状態を指します。これにより鉄筋周囲は腐食環境となるので、不動態被膜は破壊され、鉄筋腐食が開始します。ただし、まだひび割れなどの変状は生じていないので、やはり外観には何ら変状が見られない状態です。塩害と同様に、中性化も外観だけでは潜伏期と進展期は区別がつかないのですが、内部での鉄筋腐食状況は大きく異なっています。このまま放置すると近い将来には鉄筋腐食によるひび割れの発生が予測されます。進展期における対策工への要求性能は、外部からの劣化因子の侵入抑制および以後の鉄筋腐食の進行抑制となります。既に不動態被膜を破壊するのに十分な中性化領域が広がっていますが、水分や酸素の侵入を抑制して鉄筋腐食速度を緩和させることにより、ひび割れ発生などの変状の顕在化をできるだけ阻止するという考え方です。この要求性能に適する工法は表面含浸工法または表面被覆工法となります。この場合も変状が生じる前に施す対策工となるので予防保全の範疇と考えられます。一般的には表面含浸工法は潜伏期に適用される補修工法に分類されていますが、鉄筋腐食抑制効果を併せ持つ表面含浸工法を選択すれば潜伏期を超えても適用可能と考えられます。

ここで、構造物の重要度が高く、劣化の顕在化を許容しない維持管理が要求される場合は、この段階で電気防食工法や亜硝酸リチウム内部圧入工法など、中性化深さが発錆限界未満となった環境下でも鉄筋腐食を完全に停止させる工法の適用を検討することもあります。また、全断面修復工法や再アルカリ化工法によって中性化したコンクリートのアルカリ性を回復させ、鉄筋腐食環境の改善を検討する場合もあります。ただし、これらの工法は初期費用が大きくなるので、構造物の重要性や費用対効果、LCCなどを十分に考慮して適用を検討する必要があります。

【加速期前期】

加速期前期は、鉄筋の腐食膨張圧によってひび割れやコンクリートの浮きなどが発生している状態を指します。すなわち、鉄筋腐食に起因する何らかの変状が表れた時点で劣化過程は加速期前期に達していることになります。中性化深さが発錆限界未満であることは言うまでもありません。加速期前期における対策工への要求性能は、既に進行中の鉄筋腐食反応を抑制または停止させることになります。鉄筋腐食が進行し、ひび割れなどの変状が生じているので、ひび割れ注入工と表面保護工（含浸または被覆）を組み合わせることで劣化因子の侵入を抑制し、鉄筋腐食速度を緩和させることにより、これ以上の変状の増大を阻止するという考え方です。しかし、これらの工法は鉄筋腐食反応を完全に停止させるものではないため、将来的には再劣化が生じる可能性を認識しておく必要があります。すなわち、現時点での劣化状況に対して最小限の対策を講じ、再劣化が生じれば速やかに再補修を行う維持管理のサイクルを想定するという考え方です。

それに対し、何度も再補修を繰り返すのではなく再劣化を許容しない維持管理が要求される場合は、この段階で電気防食工法や亜硝酸リチウム内部圧入工法など、中性化深さが発錆限界

未満となった環境下でも鉄筋腐食を完全に停止させる工法の適用を検討することもあります。また、全断面修復工法によって鉄筋周囲の中性化領域を除去し、鉄筋の防錆処理を完全に行うことで鉄筋腐食環境を改善する場合があります。ただし、これらの工法は初期費用が大きくなるので、構造物の重要性や費用対効果、LCCなどを十分に考慮して適用の検討を行う必要があります。

【加速期後期】

加速期後期は、加速期前期の状態がさらに進展した状態を指しており、ひび割れの幅や延長の増大、コンクリートの部分的な剥離、剥落も進行する過程です。加速期後期における対策工への要求性能は、既に進行中の鉄筋腐食反応を抑制または停止させることになります。加速期後期を過ぎると劣化期に陥ってしまい、耐久性能だけでなく耐荷性能を損なう状況となるので、これ以上の性能低下は許容できません。鉄筋腐食の進行が著しいこの段階で、確実に鉄筋腐食を抑制または停止するためには、電気防食工法や亜硝酸リチウム内部圧入工法など、中性化深さが発錆限界未満となった環境下でも鉄筋腐食を完全に停止させる工法の適用を検討します。また、全断面修復工法によって鉄筋周囲の中性化領域を除去し、鉄筋の防錆処理を完全に行い、鉄筋腐食環境を改善することもあります。これらの工法を適用した場合、以後の鉄筋腐食のリスクは低減し、構造物の性能低下を阻止することが可能と考えられます。

それに対し、残存供用年数が比較的短い場合や補修の初期費用をそれほどかけられないと判断される場合は、ひび割れ注入工、表面保護工、部分断面修復工など、最小限の対策を講じ、鉄筋腐食速度をできる限り軽減し、変状の増大を緩和するという考え方を採ることもあります。しかし、これらの工法は鉄筋腐食反応を完全に停止させるものではなく、将来的には早期に再劣化が生じる可能性が高いことを認識しておく必要があります。すなわち、現時点での劣化状況に対して最小限の対策を講じ、再劣化が生じれば速やかに再補修を行う維持管理のサイクルを想定するという考え方です。ただし、加速期後期では劣化進行速度も速く、短いサイクルで再劣化と再補修を繰り返す維持管理シナリオとなるため、LCCが高価となることも少なくありません。

【劣化期】

劣化期は、大規模な剥離、剥落や腐食による著しい鉄筋断面減少など、甚大な変状が生じている状態を指し、構造物の耐久性能のみならず耐荷性能が低下していると考えられます。そもそも劣化期になるまで放置すべきではありませんが、もし、劣化期に至った場合は大規模な断面修復工法が必要です。また、それと併用して不足する耐荷性能を補うために適切な補強工法を併用する必要も生じます。劣化期の補修または補強には大きな費用を要することが多いため、撤去、新設という選択肢も視野に入れた総合的な評価が重要となります。

2.3 アルカリシリカ反応(ASR)

(1)ASRとは

従来、アルカリ骨材反応は、骨材中のシリカ成分とアルカリが反応するアルカリシリカ反応（以下、ASR と呼ぶ）と、ドロマイト質石灰石とアルカリが反応するアルカリ炭酸塩反応との2種類があるとされていましたが、アルカリ炭酸塩反応とされてきた反応も実際には石灰石中の微晶質シリカに起因する ASR であることが明らかになったため、本書では ASR を対象として記述します。

コンクリートは本来、高いアルカリ性を有しています。そのアルカリ分がコンクリートに使用さ

れた反応性骨材中のある種の反応成分と化学反応を起こし、反応生成物であるアルカリシリカゲルを生成します。アルカリシリカゲルは強力な吸水膨張性があり、コンクリート外部からの水分供給により膨張します。このアルカリシリカゲルの膨張によってコンクリート内の組織に内部応力が発生し、反応性骨材周囲のセメントペーストを破壊します。時間の経過に伴って ASR が進行すると、反応性骨材の周囲に発生した微細なひび割れが進展し、やがてコンクリート構造物の表面に巨視的なひび割れが発生します（図 2-28）。これが ASR によるコンクリートの劣化メカニズムです。

ASR 劣化の進行過程は、第 1 ステージ『骨材中のシリカ鉱物（ $n\text{SiO}_2$ ）とコンクリート中のアルカリ金属との化学反応によってアルカリシリカゲル（ $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$ ）が形成される過程』と、第 2 ステージ「アルカリシリカゲル（ $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$ ）が水分を吸収して膨張する過程」に分離することができます。それらを模式図と化学式で表すと図 2-29 のようになります。



図 2-28 ASR による劣化

	第1ステージ 『アルカリシリカゲルの生成』	第2ステージ 『アルカリシリカゲルの膨張』
概念図		
反応式	$n\text{SiO}_2 + 2\text{NaOH} \rightarrow \text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ (シリカ鉱物) (アルカリ) (アルカリシリカゲル)	$\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2 + m\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2 \cdot m\text{H}_2\text{O}$ (アルカリシリカゲル) (水) (吸水膨張！)

図 2-29 ASR 劣化の進行過程

ASRの進行過程の反応機構をみると、十分な水、十分なアルカリ金属イオン、および骨材中の反応性シリカの存在、という3つの条件が揃ったときにASRによるコンクリートの劣化が生じると理解できます。ここで、アルカリシリカゲルの生成は、全ての種類の骨材で発生するのではなく、ある種の不安定な鉱物（シリカ鉱物など）を含む反応性骨材が混入している場合に発生する可能性があります。わが国で確認されている反応性骨材の主なものとして、火山岩が起源の骨材（安山岩、流紋岩など）や堆積岩が起源の骨材（チャート、砂岩、頁岩など）が挙げられます。

(2)ASRによる劣化事例

ASRによるコンクリート構造物の劣化は、ひび割れ、変位・変形、段差、変色、ゲルの滲出などの現象として表面化することが多く、その中でもひび割れの発生状況は特徴的です。無筋または鉄筋量の少ないコンクリート構造物では、網の目状または亀甲状のひび割れが多く見られます。図 2-30 に示す擁壁のひび割れや、図 2-31 に示す橋脚はり部のひび割れの状況がこれに相当します。一方、軸方向鉄筋や PC 鋼材により ASR による膨張が拘束されている鉄筋コンクリートやプレストレストコンクリート構造物では、拘束方向に直交する方向のひび割れが発生しにくいため、軸方向鉄筋や PC 鋼材に沿った方向性のあるひび割れが多く見られます。図 2-32 は PC 桁の下フランジ下面に発生した ASR ひび割れの状況を示しています。

ASR は構造物が置かれた環境条件（温度、湿度、日射、雨掛かりなど）の影響を受けやすいため、同一の構造物においても部位や位置によって ASR の劣化程度が大きく異なることもあります。図 2-33 に示す橋脚では、はりの張出し部において著しいひび割れが発生しています



図 2-30 擁壁のひび割れ



図 2-31 橋脚はり部のひび割れ



図 2-32 PC 桁下面のひび割れ



図 2-33 部位によるひび割れの状況

が、はり中央部や柱部ではそれほどひび割れが見られません。

ASR により劣化したコンクリートは、圧縮強度や静弾性係数の低下が多く見られ、特に圧縮強度と比較して静弾性係数の低下が顕著で、より鋭敏に現れることが知られています。また、鉄筋とコンクリートとの付着力の低下も懸念されます。さらに近年、ASR によるコンクリートの膨張により鉄筋コンクリート構造物中の鉄筋の曲げ加工部や圧接部での鉄筋破断事例が複数報告されています。鉄筋破断が確認されているのは大部分が橋梁構造物であり、橋脚のはり部やフーチングなどでの事例が報告されています。図 2-34 は ASR によって生じた鉄筋破断の事例で、はり先端部の鉄筋曲げ加工部に破断が見られます。

ASR の劣化のうち、特徴的なのが「再劣化」です。ASR の膨張性は非常に大きく、長期間に及ぶので、構造物の環境条件によっては ASR 補修効果を維持できず、再劣化に至ることが少なくありません。図 2-35 は過去に表面被覆工法により補修された橋脚はり部に生じた ASR の再劣化状況です。橋脚はり部には伸縮継手を通じて橋面からの排水が流れ込みますが、はり天端には桁や支承、アンカーバーなどがあり、十分な被覆作業が困難であることが多いため、水分遮断効果が十分に得られなかったものと考えられます。図 2-36 は過去に表面被覆工法により補修された橋台に生じた ASR の再劣化状況です。橋台や擁壁の背面は土砂に接していて背面側を被覆できないため、水分浸入の完全な遮断は困難です。図 2-37 は ASR で劣化していた橋脚に対し、耐震補強工事として RC 巻立て工を施工した直後、巻立てコンクリート表面にひび割れが発生した事例です。巻立てコンクリートを打設した段階で既設の ASR コンクリートに十分な水分と高温を与えた結果、ASR を促進してしまい、その ASR 膨張が巻き立てコン



図 2-34 ASR による鉄筋破断



図 2-35 橋脚はり部の再劣化



図 2-36 橋台の再劣化



図 2-37 RC 巻立て後の再劣化

クリート表面まで伝播した可能性が考えられます。

このように、ASR の補修にあたっては、対象構造物の環境条件や構造条件を十分に考慮して、適切な工法や材料を選定することが重要です。

(3)ASR の補修工法

ASR により劣化したコンクリート構造物の補修工法を選定するにあたっては、構造物の劣化状況が潜伏期、進展期、加速期、劣化期のどの劣化過程にあるかを十分に見極め、補修工法に期待する要求性能を明確にする必要があります。ASR による構造物の外観上のグレード（劣化過程）と劣化の状態との関係を表 2-3 に示します。

ASR の劣化過程は主に外観変状によるグレーディングで判断しますが、このとき、構造物の残存膨張性を把握し、現時点の劣化状況から将来的にどれだけ膨張が進行する可能性があるのか、十分考慮した補修工法を選定が重要です。例えば、外観上のグレードが加速期に相当する劣化状況であっても、以後のアルカリシリカゲルの膨張性が高い状態であれば、その高い膨張性を見越して膨張抑制効果の高い補修工法を選択すべきですし、同じ加速期の劣化グレードでも膨張性が低い状態の場合は、単にその時点で生じている変状を補修するだけでよいと判断できます。

表 2-3 外観上のグレードと劣化の状態

外観上のグレード	劣化過程	劣化の状態
グレードⅠ	潜伏期	ASR による膨張およびそれに伴うひび割れがまだ発生せず、外観上の変状が見られない。
グレードⅡ	進展期	水分とアルカリの供給下において膨張が継続的に進行し、軽微なひび割れが発生する。変色、アルカリシリカゲルの滲出が見られる場合がある。しかし、鋼材腐食によるさび汁は見られない。
グレードⅢ	加速期	ASR によるひび割れが進展し、ひび割れの幅や密度、範囲が増大する。また、鋼材腐食によるさび汁が見られる場合もある。
グレードⅣ	劣化期	ひび割れの幅および密度がさらに増大し、段差、ずれや、かぶりの部分的な剥離・剥落が発生する。鋼材腐食が進行しさび汁が見られる。外力の影響によるひび割れや鋼材の損傷が見られる場合もある。変位・変形が大きくなる。

出典：「2018 年制定 コンクリート標準示方書[維持管理編]」

ASR による劣化はアルカリシリカゲルの吸水膨張によって進行するため、ASR の補修工法に期待する効果（要求性能）は以下のようになります。

【ASR 補修工法の要求性能】

- ①劣化因子の遮断（コンクリート中への水分の侵入を低減する）
- ②ゲルの非膨張化（アルカリシリカゲルの膨張性を消失させる）
- ③コンクリートの膨張拘束（外部拘束により ASR 膨張を物理的に抑制）

上記①～③の各要求性能に該当する補修工法として、以下のようなものが挙げられます。

①劣化因子の遮断（コンクリート中への水分の侵入を低減する）

- ・表面保護工法（表面被覆工法、表面含浸工法など）
- ・ひび割れ注入工法（エポキシ樹脂系、超微粒子セメント系など）

②ゲルの非膨張化（アルカリシリカゲルの膨張性を消失させる）

- ・内部圧入工法（亜硝酸リチウム）

③コンクリートの膨張拘束（外部拘束により ASR 膨張を物理的に抑制）

- ・接着工法、巻き立て工法（鋼板、FRP シートなど）

次頁より、要求性能①～③に応じた各補修工法の概要を記します。

①劣化因子の遮断（コンクリート中への水分の侵入を低減する）

【表面保護工法】

ASR によるコンクリートの膨張は、反応性骨材の周囲に生成したアルカリシリカゲルの吸水膨張によって進行します。従って、表面保護工法によって外部からの水分供給を遮断、低減すれば ASR の膨張を抑制することができます。表面保護工法は「表面被覆工法」と「表面含浸工法」の2種類に分類されます。

(1)表面被覆工法

表面被覆工法は、コンクリート表面に有機系もしくは無機系の被覆材をはけ、ローラー、コテなどで塗布して表面を覆い、外部からの劣化因子の侵入を遮断する工法です（図 2-38）。一般的にはプライマー、中塗材、上塗材と複数の種類の材料を重ね塗ります。有機系被覆材にはさまざまな種類があり、柔軟性や膜厚などを環境条件に応じて比較的自由に計画することができます。無機系被覆材は、主としてポリマーセメント系表面被覆材を用います。



図 2-38 表面被覆工法

ASR 補修として表面被覆工法を適用する場合、将来的な ASR 膨張進行を見込んで、ひび割れ追従性のある柔軟型の被覆材を用いることもあります。しかし、対象構造物の残存膨張量が大きい場合、被覆材の伸び能力が対策後の ASR 膨張進行に追従できずに再劣化を生じ、定期的に再補修を繰り返すような維持管理が必要となることもあります。表面被覆工法を適用した構造物の再劣化は水分浸入を完全に遮断できなかった場合に生じていることが多いため、十分な補修効果が得られるか否かを十分考慮して適用することが重要となります。

近年では第三者被害を防ぐための剥落防止機能を備えた表面被覆材も実用化されています。また、ポリマーセメント系表面被覆材は亜硝酸リチウムを混入して塗布することができるため、表面被覆工による劣化因子の遮断効果に加え、亜硝酸リチウムによるゲルの膨張抑制効果を部分的に付与することも可能です。亜硝酸リチウムを用いた表面被覆工法については第 3 章にて詳細に記述します。

(2)表面含浸工法

コンクリート内部に存在する水分の量によっては、外部からの水分を抑制しても ASR 膨張の進行を完全に停止できないことがあります。また、表面被覆工法の高い遮水性によってコンクリート内部に水部を閉じ込めてしまい、逆に ASR 進行を助長したケースも見受けられます。そこで、外部からの水分を抑制すると同時に、コンクリート内部の水分を逸散させることを目的とした表面含浸工法の適用も多くな



図 2-39 表面含浸工法

っています。表面含浸工法は、シラン系やけい酸塩系などに代表される含浸材をコンクリート表面にはけやローラーで塗布、含浸させて、外部からの劣化因子の侵入を遮断する工法です(図 2-39)。シラン系含浸材はコンクリート表層に含浸して撥水層を形成する効果があり、けい酸ナトリウムやけい酸リチウムなどのけい酸塩系含浸材はコンクリート表層部の組成を緻密化し、改質する効果があります。このように表面含浸材の種類によって劣化因子の侵入抑制メカニズムは異なります。

劣化因子の遮断効果や耐用年数は一般的に表面被覆工に比べて劣ると言われますが、この工法は表面被覆材のようにコンクリート表面に被膜層を設けないため、構造物の外観を変えることがなく、以後のモニタリングが容易という利点もあり、適用される事例が増えています。また、表面被覆工法と同様に亜硝酸リチウムとの併用もできます。亜硝酸リチウムを用いた表面含浸工法については第 3 章にて詳細に記述します。

【ひび割れ注入工法】

ひび割れ注入工法は、ASR によりコンクリート表面に発生したひび割れに対し、樹脂系または無機系の材料を注入し、ひび割れを通じた水分浸入の低減を目的とした工法です。また、ひび割れの存在により鉄筋腐食が生じることもあるので、ひび割れ注入工法は鉄筋腐食を抑制する効果も期待しています。

ひび割れ注入工法はスプリング圧やゴム圧による低圧注入器を用いて、セメント系、ポリマーセメント系、エポキシ樹脂やアクリル樹脂などの



図 2-40 ひび割れ注入工

有機系材料をひび割れ内部に低圧、低速で注入し、閉塞させる工法です(図 2-40)。ひび割れ注入工法はコンクリート表面のひび割れ幅が 0.2mm~10.0mm 程度のものに適用可能です。ASR 補修としてひび割れ注入工法を適用する場合、将来的な ASR 膨張進行を見込んでひび割れ追従性のある注入材を用いることもあります。

エポキシ樹脂などの有機系注入材を使用する場合には、ひび割れ内部が乾燥した状態で施工する必要があります。ひび割れ内部が湿潤状態の場合には注入材の硬化が阻害され、十分な付着性が得られないことがあるので、湿潤面硬化型の注入材を使用するなどの対処が必要です。逆に、セメント系注入材はひび割れ内部が乾燥した状態では注入材の流動性、充填性が低下します。従って、セメント系注入材を使用する場合は、ひび割れ内部に十分な水通し(プレウエッティング)を行ってから施工する必要があります。セメント系注入材の中でも、流動性に優れ、ひび割れ先端部の微細な隙間にまで注入可能な超微粒子セメント系注入材の使用が増えています。

セメント系注入材は亜硝酸リチウムと併用して注入できるため、ひび割れ注入工による劣化因子の遮断効果に加え、亜硝酸リチウムによるゲルの膨張抑制効果を部分的に付与することも可能となります。亜硝酸リチウムを用いたひび割れ注入工法については第 3 章にて詳細に記述します。

②ゲルの非膨張化（アルカリシリカゲルの膨張性を消失させる）

【内部圧入工法（亜硝酸リチウム）】

ASR により反応性骨材の周囲に生成したアルカリシリカゲルの吸水膨張は、リチウムイオンの供給により抑制できます。リチウムイオンはアルカリシリカゲル中のナトリウムやカリウムと置換して、吸水膨張性を示さないリチウムシリケートを生成することで、ゲルを非膨張化するとされています。ASR で劣化したコンクリートへの亜硝酸リチウムの供給方法としては、内部圧入工法、表面被覆工法、ひび割れ注入工法などが実用化されていますが、コンクリート中へのリチウムイオンの供給速度や供給量などの点で内部圧入工法が最も信頼性が高いと考えられます。リチウムイオンを含む ASR 抑制材料として一般的なのは亜硝酸リチウムです。内部圧入工は、まず ASR 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、ASR 膨張を抑制する補修工法です。削孔径は $\phi 10\text{mm}$ または $\phi 20\text{mm}$ とし、その削孔間隔は $500\sim 1,000\text{mm}$ と設定されます。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 $0.5\sim 1.5\text{MPa}$ の範囲とされます。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ごとに設定され、その量は Li/Na モル比 0.8 となる量とされています。内部圧入工の工法概要図を図 2-41 に、施工状況を図 2-42 に示します。

内部圧入工法はゲルの膨張性を根本から抑制する工法であるため、構造物の劣化過程が進展期、加速期にあり、特に残存膨張性が高い構造物に対して多く適用されています。亜硝酸リチウムによって、いったんゲルが非膨張化すると、以後、構造物に水分が浸入しても膨張反応は生じないため、再劣化を生じる可能性が極めて低い工法といえます。亜硝酸リチウム内部圧入工法については、第 3 章にて詳細に記述します。

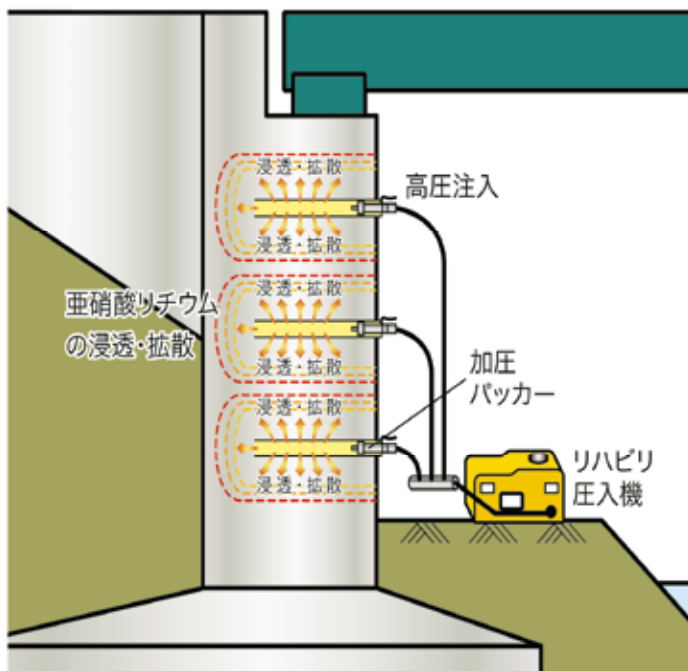


図 2-41 内部圧入工法



図 2-42 内部圧入工の施工状況

③コンクリートの膨張拘束（外部拘束により ASR 膨張を物理的に抑制）

【接着工法・巻き立て工法】

この工法は、ASR によるコンクリート膨張に対し、コンクリート表面に部材を追加して ASR 膨張を物理的に拘束することを目的としたものです（図 2-43）。膨張拘束のために追加する部材として、FRP シート、鋼板、PC パネルなどがあります。目的が膨張の抑制であるため、構造物の劣化過程が進展期、加速期にあり、特に残存膨張性が高い構造物に対して適用されることがあります。

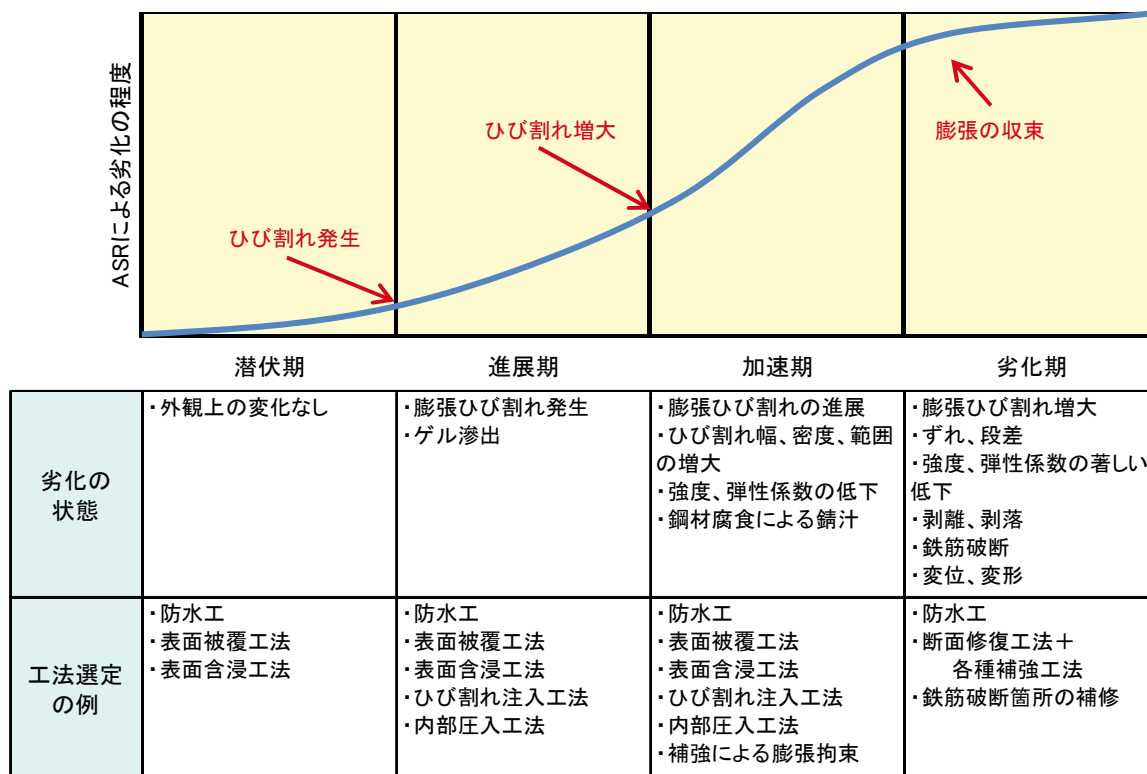
ただし、部材形状が複雑な場合や設置可能範囲が限られている場合などでは膨張拘束効果を得ることができないため、適用にあたっては拘束効果が発揮されるか否かを十分に検討する必要があります。また、橋脚柱部材では耐震補強としての各種巻き立て工法と兼用される場合がありますが、膨張拘束のために必要な補強量の算定方法が明確にされていないこともあり、適用にあたっては事前に詳細な検討を行う必要があります。



図 2-43 鋼板巻き立てによる膨張拘束

(4)ASR の補修工法選定の基本的な考え方

ASR の補修工法を選定するためには、まず現時点での劣化状況や将来の劣化予測結果に基づいて補修工法に要求する性能を評価します。さらに、対策後にこの構造物をどのように維持管理していくかという方針（シナリオ）も考慮すべきです。この維持管理シナリオは残存供用年数を設定した上でライフサイクルコスト（以下、LCC と称す）も考慮して策定します。これら「工学的判断に基づく補修要求性能の設定」と「LCC を考慮した維持管理シナリオの策定」を検討することで最適な補修工法が選定できると考えられます。それを踏まえて、劣化過程と適用可能な補修工法の関係の例を図 2-44 に示します。



※ あらゆる劣化グレードにおいても水処理は実施すべきである

図 2-44 ASR の劣化グレードと適用可能な補修工法との関係

以下、劣化過程ごとに ASR の補修工法選定の基本的な考え方について示します。特に将来の劣化予測（ASR 膨張の進行性）は工法選定に対して重要な情報として着目します。

【潜伏期】

潜伏期は、アルカリシリカゲルの生成過程と位置付けられており、ASR そのものは進行するものの、膨張やそれに伴うひび割れなどの変状は見られません。しかし、このまま放置すると将来的には ASR 膨張によるひび割れの発生が予測されます。従って、潜伏期における対策工への要求性能は、外部からの劣化因子の侵入抑制となります。この段階で水分の侵入を阻止することができれば、将来的なアルカリシリカゲルの吸水膨張反応とそれに起因するひび割れが生じることはありません。この要求性能に適する工法は表面含浸工法または表面被覆工法となり、予防保全的な適用となります。

ここで、潜伏期の時点では外観上何も変状が生じていないため、すぐに対策工を施さずしばらく経過観察を行うという選択もあります。

【進展期】

進展期は ASR 膨張が継続的に進行し、ひび割れが発生している状態を指します。この段階でのひび割れ状況はまだ比較的軽微なので、進展期の対策工への主たる要求性能は劣化因子の侵入抑制と考えることができ、ひび割れ注入工法と表面含浸工法や表面被覆工法などを組み合わせて水分の浸入を遮断し、以後の ASR 膨張の進行を抑制するという方針を採ることができます。ここで ASR 膨張は長期間にわたって継続することが知られているので、膨張の進行性の大小（有害/無害）に応じて適切な対策工法を選定する必要があります。

膨張の進行性が大きい（例えば、残存膨張量試験の結果が有害）と推察される場合には、ひび割れ注入工法と表面含浸工法または表面被覆工法の組合せだけで完全に ASR 膨張を停止させることは容易ではなく、将来的に再劣化が生じる可能性があることを認識しておく必要があります。すなわち、現時点での劣化状況に対して最小限の対策を講じ、再劣化が生じれば速やかに再補修を行う、維持管理のサイクルを想定するという考え方です。それに対し、何度も再補修を繰り返すのではなく再劣化を許容しない維持管理が要求される場合は、この時点で亜硝酸リチウム内部圧入工法を適用し、以後の膨張を根本から停止させるという方針を採ることもできます。ただし、この工法は初期費用が大きくなるので、構造物の重要性や維持管理のしやすさ、費用対効果、LCCなどを十分に考慮して適用を検討する必要があります。

骨材の種類やペシマムなどの条件によっては、稀に進展期でも ASR 膨張が収束することがあります。膨張の進行性が小さい（例えば、残存膨張量試験の結果が無害）と推察される場合には、現時点で生じている変状に対して必要最小限の対策を講じればよいことになります。ひび割れ注入工法と表面含浸工法または表面被覆工法の組合せを施せば、ASR に起因する再劣化の懸念はありません。

【加速期】

加速期は、ASR による膨張速度が最大を示す段階を指します。この過程ではひび割れ幅や延長（密度）も著しく増大するため構造物の耐久性能が急速に低下します。また、圧縮強度や弾性係数などの力学的性能も低下し始めるので、劣化過程が加速期にある構造物は、これ以上劣化を進行させないことが重要です。加速期の対策工への要求性能は劣化因子の侵入抑制と ASR ゲルの非膨張化であり、膨張の進行性の大小（有害/無害）に応じて適切な対策工法を選定する必要があります。

膨張の進行性が大きいと推察される場合には、まず主たる要求性能を ASR ゲルの非膨張化とし、以後の ASR 膨張性を確実に停止させる工法を検討すべきです。この要求性能を満たす工法として亜硝酸リチウム内部圧入工法が挙げられます。また、構造物の形状によっては ASR 膨張拘束を目的とした巻き立て工法や接着工法を適用できる場合があります。これらの工法を適用した場合、以後の ASR 再劣化のリスクを低減し、構造物の性能低下を阻止できると考えられるため、何度も再補修を繰り返すのではなく再劣化を許容しない維持管理シナリオとなります。一方、要求性能を劣化因子の侵入抑制とした場合、ひび割れ注入工法と表面含浸工法または表面被覆工法を組合せて行いますが、この対策では完全に ASR 膨張を停止させることは容易ではなく、膨張速度が極めて速いため早期に再劣化が生じる可能性が高いことを認識して

おく必要があります。これは現時点での劣化状況に対して最小限の対策を講じ、再劣化が生じれば速やかに再補修を行うという維持管理のサイクルを想定するという考え方ですが、加速期では劣化進行速度も大きく、早いサイクルで再劣化と再補修を繰り返す維持管理シナリオとなるため、LCCが高価となることも少なくありません。構造物の重要性や維持管理のしやすさ、費用対効果、LCCなどを十分に考慮して適用を検討する必要があります。

骨材の種類やペシマムなどの条件によっては、稀に加速期でも ASR 膨張が収束することがあります。膨張の進行性が小さい（例えば、残存膨張量試験の結果が無害）と推察される場合は、現時点で生じている変状に対して必要最小限の対策を講じればよいことになります。ひび割れ注入工法と表面含浸工法または表面被覆工法の組合せで、ASR に起因する再劣化の懸念はありません。

【劣化期】

劣化期は、大規模なひび割れや異常膨張、鉄筋破断などの甚大な変状が生じている状態を指し、構造物の耐久性能のみならず耐荷性能が低下していると考えられます。そもそも劣化期になるまで放置すべきではありませんが、もし、劣化期に至った場合はコンクリートの劣化部、不良部の範囲も大きいため、補修規模も大規模になります。ただし、劣化期までくると、構造物の膨張性は既に収束していることが多いので、この段階では内部圧入工法のようなゲルの膨張抑制を対策方針として掲げる必要はなくなります。また、鉄筋破断やコンクリートの圧縮強度や静弾性係数など、構造物の耐荷性能が低下している場合は、適切な補強対策を講じる必要があります。劣化期の補修または補強には大きな費用を要することが多いため、撤去、新設という選択肢も視野に入れた総合的な評価が重要です。

3. 亜硝酸リチウムを用いた補修工法

3.1 亜硝酸リチウムとは

(1) 亜硝酸リチウムとは

亜硝酸リチウム（Lithium Nitrite ; LiNO_2 ）とはコンクリート補修用混和剤として開発された工業用化学製品であり、その原料は「天然ガス」と「リシア輝石」です。リシア輝石とはリチウムの原料となる希少鉱物です。

亜硝酸リチウム（ LiNO_2 ）は、正の電荷を帯びたリチウムイオン（ Li^+ ）と、負の電荷を帯びた亜硝酸イオン（ NO_2^- ）とがイオン結合した物質で、水に溶けやすい性質を持っており、亜硝酸リチウム水溶液として製品化されています（図 3-1）。色は薄い黄色または青色の透明な水溶液です（図 3-2）。



図 3-1 亜硝酸リチウムの荷姿



図 3-2 亜硝酸リチウムの外観

亜硝酸リチウムの成分のうち、亜硝酸イオンは鉄筋表面の不動態被膜を再生する効果があり、塩害や中性化などの鉄筋腐食に起因する劣化の補修材料として適しています。一方、リチウムイオンはアルカリシリカゲルを非膨張化する効果があり、ASR 劣化の補修材料として適しています（図 3-3）。

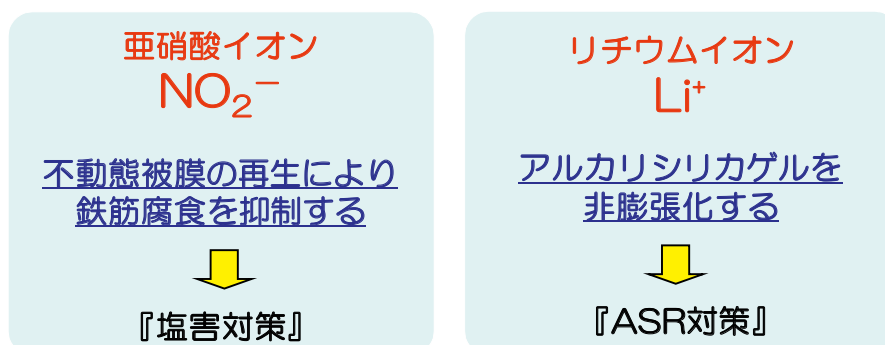


図 3-3 亜硝酸イオンおよびリチウムイオンの効果

(2) 亜硝酸リチウムによる鉄筋腐食抑制効果

亜硝酸リチウムの成分である亜硝酸イオンとリチウムイオンのうち、塩害や中性化の抑制に寄与するのは「亜硝酸イオン」です。塩害と中性化は、劣化要因や劣化メカニズムは異なるものの、両者とも最終的には不動態被膜の破壊による鉄筋腐食の問題に帰着します。換言すれば、塩害や中性化の抑制とは、共に鉄筋腐食を抑制することと理解することができます。

亜硝酸イオン (NO_2^-) の防錆効果についての研究成果は、1960 年代に入って国内外で多数報告されています。亜硝酸イオンによる鉄筋腐食抑制メカニズムには諸説あり、亜硝酸イオンがアノード型インヒビターとして働く酸化剤としての効果（不動態被膜再生効果）、亜硝酸イオンが鉄筋表面に吸着することにより鉄の溶解を抑制する効果などが提唱されており、それらが複合的に働いている可能性もあります。ここで、不動態被膜再生に着目すると、亜硝酸イオン (NO_2^-) は 2 価の鉄イオン (Fe^{2+}) と反応してアノード部からの Fe^{2+} の溶出を防止し、不動態被膜 (Fe_2O_3) として鉄筋表面に着床することによって鉄筋腐食反応を抑制します。これらを反応式で表すと図 3-4 のようになります。

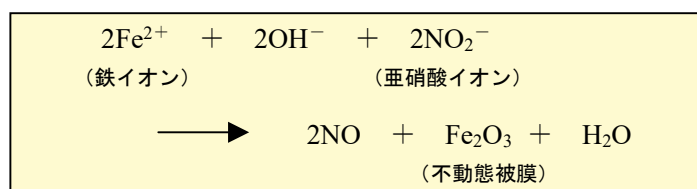


図 3-4 亜硝酸イオンによる不動態被膜の再生

亜硝酸イオン (NO_2^-) と鉄イオン (Fe^{2+}) との反応により不動態被膜が再生されるため、以後の鋼材の腐食は進行しません。これが亜硝酸イオンによる鉄筋腐食の抑制メカニズムです。図 3-5 に鉄筋腐食の模式図を、図 3-6 に亜硝酸イオンによる不動態被膜の再生の模式図を示します。

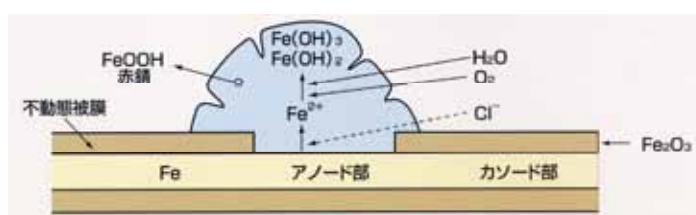


図 3-5 鋼材の腐食

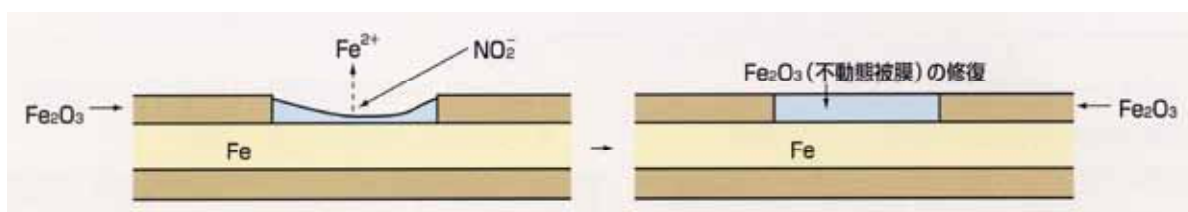


図 3-6 亜硝酸イオンによる不動態被膜の再生メカニズム

(3) 亜硝酸リチウムによる ASR 抑制効果

亜硝酸リチウムの成分である亜硝酸イオンとリチウムイオンのうち、ASR の抑制に寄与するのは「リチウムイオン」です。MacCoy らが 1951 年に発表した論文でリチウムイオンによる ASR 抑制効果が初めて示され、それ以降、さまざまなリチウム化合物を用いた ASR 抑制効果に関する多くの実験的研究が国内外でなされています。いずれの研究においてもおおむね反応性骨材を使用したコンクリートまたはモルタルを練り混ぜる段階で一定量以上のリチウム化合物を供給した場合、ASR 膨張の抑制が検証されています。

第 2 章に記述したとおり、ASR の進行過程は第 1 ステージ「骨材中のシリカ鉱物とコンクリート中のアルカリ金属との反応によってアルカリシリカゲル ($\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$) が形成される過程」と、第 2 ステージ「アルカリシリカゲル ($\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$) が水分を吸収して膨張する過程」に分離して考えることができます (図 3-7)。ASR の進行過程の反応機構をみると、十分な水、十分なアルカリ金属イオン、および骨材中の反応性シリカの存在、という 3 つの条件が揃ったときに、ASR によるコンクリートの劣化が生じると理解できます。換言すれば、これら 3 条件のうちいずれか 1 条件の成立を阻止することにより、ASR によるコンクリートの劣化を抑制できると考えられます。

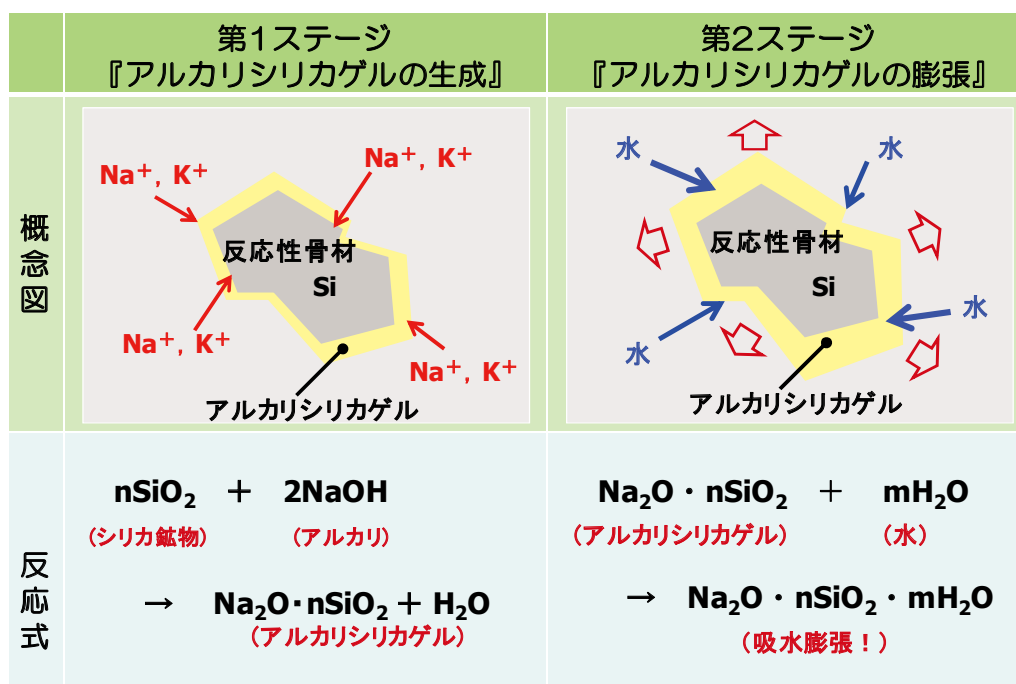


図 3-7 ASR 劣化の進行過程 (再掲)

従来、ASR によって劣化したコンクリート構造物の補修工法として、表面保護工により外部からの水分供給を遮断する対策が多く採られてきました。これは図 3-7 中の第 2 ステージに示されるゲルの吸水膨張を阻止することを目的としています。しかし、例えば橋台や擁壁などのように背面土砂側からの水の供給の遮断が困難な場合もあり、条件によっては外部からの水の供給を完全に遮断することは難しい場合があります。

ここでリチウムイオンが登場します。リチウムイオンによる ASR 膨張抑制メカニズムは諸

説ありますが、現時点ではリチウムイオンがアルカリシリカゲルを非膨張化させるという考え方が一般的です。図 3-7 に示した ASR の進行過程のうち、リチウムイオンの存在下では第 2 ステージのアルカリシリカゲルの膨張が抑制されます。すなわち、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 (Li^+) が供給されることによって、水に対する溶解性や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 ($\text{Li}_2 \cdot 2\text{SiO}_2$) に置換され、アルカリシリカゲルが非膨張化されるのです。これらを反応式で表すと図 3-8 のようになります。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ると、吸水膨張反応が収束するため、以後、コンクリートのひび割れは進行しなくなります。これがリチウムイオンによる ASR 抑制のメカニズムです。

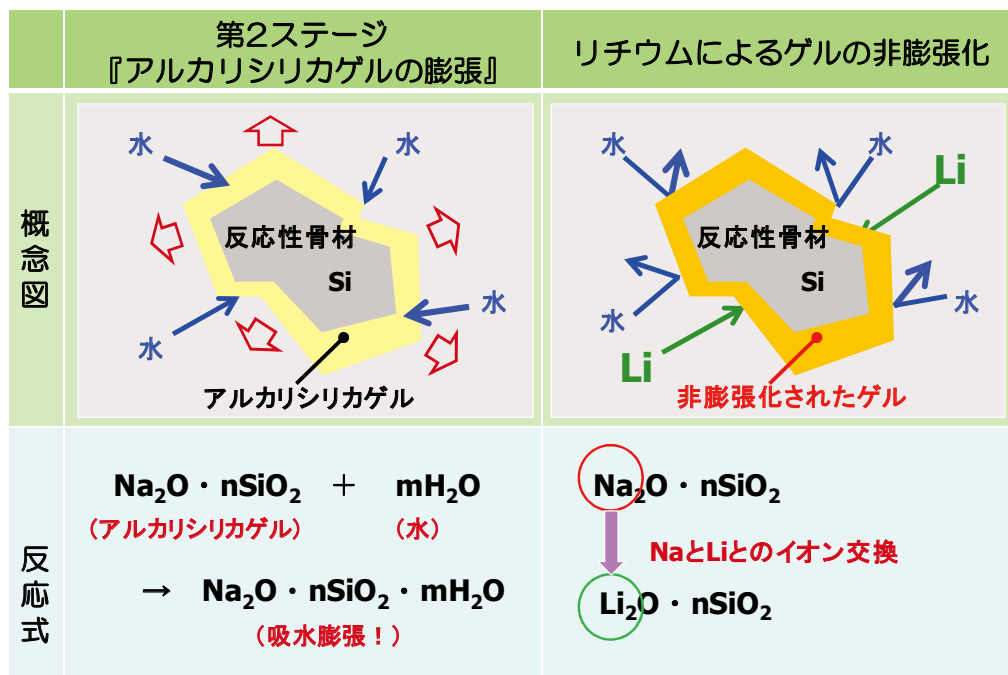


図 3-8 リチウムイオンによるゲルの非膨張化

(4)浸透拡散型亜硝酸リチウム 40%水溶液

塩害、中性化、ASR によって劣化したコンクリート構造物の補修材料である亜硝酸リチウムのうち、コンクリート中での浸透性・拡散性に優れた浸透拡散型亜硝酸リチウムがあります。浸透拡散型亜硝酸リチウムは、製造過程での不純物混入を極力抑えた高機能材料であり、内部圧入工法やひび割れ注入工法などのようにコンクリート中に圧力をかけて亜硝酸リチウムを浸透させる場合の浸透性が向上しています。従って、これらの工法に浸透拡散型亜硝酸リチウムを使用することにより、亜硝酸リチウムの有効成分の浸透範囲が拡大するとともに、浸透の確実性が向上します。



図 3-9 浸透拡散型亜硝酸リチウム 40%水溶液

浸透拡散型亜硝酸リチウムと従来の亜硝酸リチウム製品 2 種類における浸透性能を確認するために、『JSCE-K571-2004「表面含浸材の試験方法（案）」6.3 透水量試験』に準拠した透水量試験が実施されています。透水量試験の状況と結果を図 3-10、図 3-11 に示します。この試験結果より、一定水圧作用下における各種亜硝酸リチウムのコンクリート中への浸透性能には差異が認められ、浸透拡散型の方が従来品よりも 25%程度向上していることが分かります。この試験は亜硝酸イオンやリチウムイオンのイオン拡散性ではなく、水溶液の状態でのコンクリート中の浸透を測定したものです。従って、本試験の結果は、浸透拡散型亜硝酸リチウムが内部圧入工法やひび割れ注入工法など、圧力を作用させて使用する場合の施工において優位性を発揮することを示しているといえます。

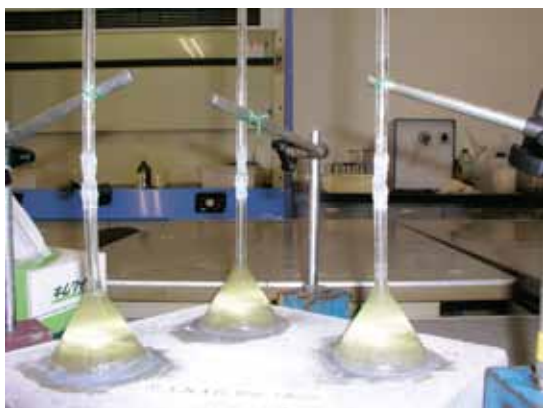


図 3-10 透水量試験の状況

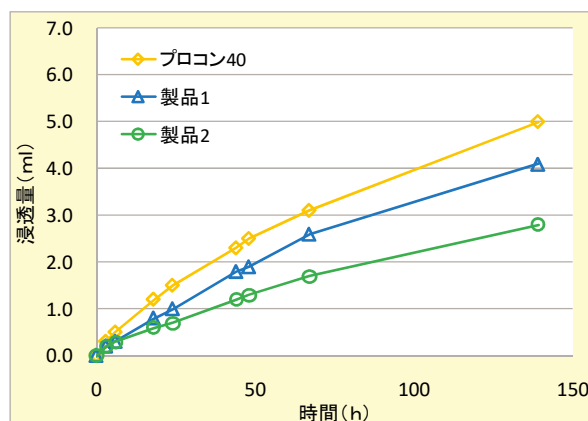


図 3-11 透水量試験結果

参考材料 『プロコン 40（浸透拡散型亜硝酸リチウム 40%水溶液）』

3. 2 亜硝酸リチウムを用いた塩害・中性化の補修工法

(1) 亜硝酸リチウムを用いた塩害・中性化補修の基本的な考え方

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滲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、鉄筋の腐食度の評価が重要で、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の併用も効果的です。

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することが重要です。

- ・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？(塩害の場合)
- ・中性化残りが発錆限界(例えば 10mm)未満にまで進行しているか？(中性化の場合)
- ・鉄筋腐食はどの程度進行しているか？(塩害・中性化共通)
- ・今後も著しい劣化因子の浸入が想定される環境か？(塩害・中性化共通)

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 1.2kg/m^3 や 2.0kg/m^3 など)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滲出、剥離・剥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 10mm)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」です。また、既に鉄筋位置まで中性化した後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滲出、剥離・剥落などが生じている場合は、既に鉄筋腐食の進行を示しているため、この段階で選定する対策工は「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、コンクリート内部の鉄筋腐食がまだ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。潜伏期ではコンクリート中の鉄筋周囲が腐食環境となる前の状態のため、純粋に劣化因子の遮断のみを要求性能としてよい段階です。従って、劣化過程が潜伏期にある場合には亜硝酸リチウムを使用しない一般の表面含浸工法や表面被覆工法が適用できます。しかし、劣化過程が進展期となった場合には、既に不動態皮膜が破壊され、鉄筋腐食が始まっている状態なので、単なる劣化因子の遮断に加えて亜硝酸イオンによる鉄筋腐食抑制効果をプラスすることで補修効果の期待度を向上させることができます。潜伏期や進展期はまだコンクリート表面に変状が発生していないので、予防保全的な対策の範疇となります。ここでの亜硝酸リチウムの役割は、将来的に生じうる鉄筋腐食に対して、あらかじめ亜硝酸イオンを供給しておくことです。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 3-1 に示します。

表 3-1 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
亜硝酸リチウム併用型 表面含浸工法	・コンクリート表面に亜硝酸リチウム系含浸材を塗布した後、シラン・シロキサン系含浸材を塗布する。 ・亜硝酸リチウム（亜硝酸イオン）イオンがコンクリート内部へ浸透し、将来的な鉄筋腐食を抑制する。また、シラン・シロキサン系含浸材が外部からの劣化因子の侵入を遮断して腐食環境の悪化を抑制するとともに、亜硝酸リチウムの溶出を防ぐ。 【参考工法：プロコンガードシステム S】
亜硝酸リチウム併用型 表面被覆工法	・コンクリート表面に亜硝酸リチウム系含浸材を塗布した後、亜硝酸リチウムを混入したポリマーセメントモルタル系表面被覆材にて表面を被覆する。 ・塗布した亜硝酸リチウム系含浸材や表面被覆材に含まれる亜硝酸イオンがコンクリート内部へ浸透して将来的な鉄筋腐食を抑制する。また、表面被覆材が外部からの劣化因子の侵入を遮断し、腐食環境の悪化を抑制する。 【参考工法：リハビリ被覆工法】

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。コンクリート表面に変状が顕在した段階で劣化過程は加速期前期とみなされます。そのひび割れからは錆汁の滲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剥離・剥落が生じます。変状の進行度合いに応じて加速期前期と加速期後期に区分されます。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劣化期に至ります。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、既に上記のようなコンクリートの変状が顕在化した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、塩害で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、中性化で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。

鉄筋の腐食が始まっ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よく適用されている「断面修復工法」に加えて、近年では「内部圧入工法」も実用化され、実績が増えています。また、塩害や中性化で発生しているひび割れの奥には腐食した鉄筋が存在するはずなので、「ひび割れ注入工法」によって亜硝酸リチウムを直接供給することもできます。ここでの亜硝酸リチウムの役割は、既に腐食が進行している状態の鉄筋に対して直ちに亜硝酸イオンを供給し、以後の鉄筋腐食反応を抑制することです。

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剥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 3-2 に示します。

なお、劣化状況によってはこの段階で表面被覆工法や表面含浸工法を適用することもあります。その場合は亜硝酸イオンが鉄筋位置に浸透するまでに長時間かかることと、供給可能な亜硝酸イオン量に制限があることなどから、根本的かつ確実な鉄筋腐食抑制効果が発揮されるとはいえません。この場合は再劣化を想定した維持管理シナリオをあらかじめ想定しておく必要があります。

表 3-2 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
亜硝酸リチウム併用型 ひび割れ注入工法	・ひび割れに浸透拡散型亜硝酸リチウムを先行注入した後、無機系注入材を本注入してひび割れを閉塞する。 ・先行注入した亜硝酸リチウムが腐食した鉄筋に到達し、以後の腐食を抑制する。本注入した無機系ひび割れ注入材がひび割れを閉塞し、ひび割れを通じた劣化因子の侵入を遮断する。 【参考工法：リハビリシリンダー工法】
亜硝酸リチウム併用型 断面修復工法	・劣化しているコンクリート表面をはつり取り、鉄筋表面に亜硝酸リチウム系防錆材を塗布した後、亜硝酸リチウム含有ポリマーセメントモルタルで断面を修復する。 ・部分断面修復、全断面修復のいずれにも適用可能で、鉄筋表面に亜硝酸イオンを物理的に直接供給できる。 ・左官工法、吹付工法のいずれにも適用可能。 【参考工法：リハビリ断面修復工法】
亜硝酸リチウム 内部圧入工法	・コンクリートに小径の削孔を行い、そこから鉄筋周囲のコンクリートに浸透拡散型亜硝酸リチウムを内部圧入する。 ・内部圧入によって十分な量の亜硝酸イオンが鉄筋周囲へ短時間で供給されるため、直ちに鉄筋腐食抑制効果が発揮される。 【参考工法：リハビリカプセル工法】

(2) 亜硝酸リチウムを用いた具体的な塩害・中性化補修工法

1. 表面含浸工法

目的：『劣化因子の遮断』＋『鉄筋腐食の抑制』

塩害や中性化における劣化因子（塩化物イオン、二酸化炭素、水分、酸素）がコンクリート内部に侵入することを表面含浸材により遮断します。表面含浸工法の主たる目的は「外部からの劣化因子の遮断」ですが、補修材料に亜硝酸リチウムを併用することにより将来的な「鉄筋腐食の抑制」効果をプラスアルファとして付与することができます。主としてコンクリート表面にひび割れなどの変状が現れる前段階（潜伏期、進展期）に予防保全的に適用するのが効果的ですが、変状が表面化し始めた軽微な劣化程度の段階（加速期前期）に適用されることもあります。

表面含浸工法では、まずコンクリート表面をサンダーケレンまたは高圧洗浄にて下地処理します。施工面全体に亜硝酸リチウムを刷毛またはローラーで入念に塗布した後、シラン・シロキサン系表面含浸材を刷毛またはローラーで塗布します。コンクリート表面に塗布された亜硝酸リチウムは将来的にはかぶり範囲にイオン浸透し、鉄筋の腐食を抑制する効果が期待できます。表面含浸材は亜硝酸リチウムとの相性のよい材料を選定する必要があり、シラン・シロキサン系含浸材が推奨されます。図 3-12 に亜硝酸リチウムを用いた表面含浸工法の概念図を、図 3-13 に施工状況を示します。

表面含浸工法では、亜硝酸リチウムの標準塗布量が 0.3kg/m^2 とされています。これは一般条件下での標準的な塗布量であり、塩化物イオン濃度などに応じて定量的に塗布量を設定できる場合もあります。亜硝酸リチウムの浸透の目安は 5 カ月間で 30mm という実験結果が得られていますが、コンクリートの強度や状態によって変わってくると考えられます。

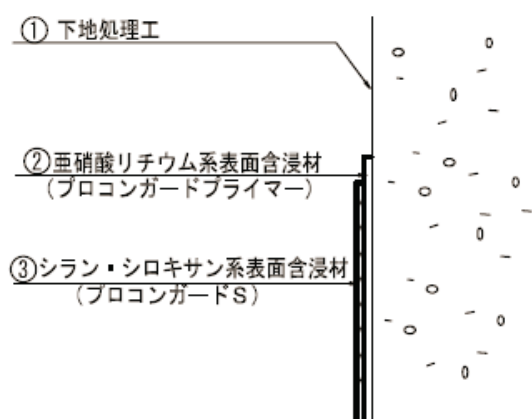


図 3-12 表面含浸工法の概念図の例



図 3-13 表面含浸工法の施工状況

参考工法 『プロコンガードシステム S』 NETIS 登録申請中(令和 2 年 3 月現在)

使用材料：プロコンガードプライマー（亜硝酸リチウム系表面含浸材）

プロコンガード S（シラン・シロキサン系表面含浸材）

2. 表面被覆工法

目的：『劣化因子の遮断』＋『鉄筋腐食の抑制』

塩害や中性化における劣化因子（塩化物イオン、二酸化炭素、水分、酸素）がコンクリート内部に侵入することを表面被覆材により遮断します。表面被覆工法の主たる目的は「外部からの劣化因子の遮断」ですが、補修材料に亜硝酸リチウムを併用することで、将来的な「鉄筋腐食の抑制」効果をプラスアルファとして付与できます。一般的には、まだ鉄筋腐食が顕在化していない段階（潜伏期、進展期）で適用するのが効果的ですが、鉄筋腐食が進行した段階（加速期前期、加速期後期）でひび割れ注入工法や断面修復工法と組み合わせて適用されることもあります。

表面被覆工法では、まずコンクリート表面をサンダーケレンまたは高圧洗浄で下地処理します。施工面全体に亜硝酸リチウムを刷毛またはローラーで入念に塗布した後、亜硝酸リチウムを含有するポリマーセメント系表面被覆材でコンクリート表面をコーティングします。被覆工はコテ、刷毛、ローラーなどで行います。コンクリート表面に塗布された亜硝酸リチウムは将来的にはかぶり範囲にイオン浸透し、鉄筋の腐食を抑制する効果が期待できます。ポリマーセメント系表面被覆材の上には、被覆層を保護するための上塗りを行う必要があります。上塗り材は亜硝酸リチウムを含有したポリマーセメント系表面被覆材と相性のよい材料の選定が重要となります。図 3-14 に亜硝酸リチウムを用いた表面被覆工法の概念図を、図 3-15 に施工状況を示します。

表面被覆工法では亜硝酸リチウムの標準塗布量が 0.3kg/m^2 、亜硝酸リチウム含有ポリマーセメントペーストの標準厚さが 2mm とされていますが、必要に応じて亜硝酸リチウム系表面含浸材の塗布量や、ペースト・モルタルの塗布厚さを変えて亜硝酸リチウム供給量の調整もできます。亜硝酸リチウムの浸透の目安は 5 カ月間で 30mm という実験結果が得られていますが、コンクリートの強度や状態によって変わってくると考えられます。

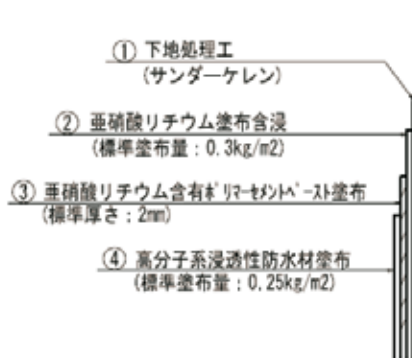


図 3-14 表面被覆工法の概念図の例



図 3-15 表面被覆工法の施工状況

参考工法 『リハビリ被覆工法』

使用材料：プロコンガードプライマー（亜硝酸リチウム系表面含浸材）

リハビリペースト（亜硝酸リチウム含有ポリマーセメントペースト）

アイゾール EX（高分子系浸透性防水材）など

3. ひび割れ注入工法

目的：『劣化因子の遮断』＋『鉄筋腐食の抑制』

塩害や中性化の劣化により鉄筋腐食が進行したコンクリートの表面には、鉄筋に沿ったひび割れが発生してくる（加速期前期、加速期後期）ので、ひび割れ注入工法によってひび割れを通じた劣化因子の侵入を遮断する必要があります。ひび割れ注入工法の主たる目的は「外部からの劣化因子の遮断」ですが、補修材料に亜硝酸リチウムを併用することにより、「鉄筋腐食の抑制」効果をプラスアルファとして付与できます。

ひび割れ注入工法では、まずコンクリート表面のひび割れ内部に亜硝酸リチウムを先行注入します。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、ひび割れ深部の腐食した鉄筋に亜硝酸イオンを供給して鉄筋腐食抑制効果を付与します。亜硝酸リチウムを先行注入した後、ひび割れ内部が乾燥しないうちに超微粒子セメント系注入材を本注入します。超微粒子セメント系ひび割れ注入材は流動性に優れるため、ひび割れ先端まで確実に充填することができます。注入作業は先行注入、本注入ともに自動低圧注入器を用います。図 3-16 に亜硝酸リチウムを用いたひび割れ注入工法の概念図を、図 3-17 に施工状況を示します。

ひび割れ注入工法には、注入・圧入専用の浸透拡散型亜硝酸リチウムを使用することができます。ただし、亜硝酸リチウムの注入可能量はひび割れ幅と深さによって決まるため、塩化物イオン濃度などに応じて定量的に注入量を設定するわけではありません。

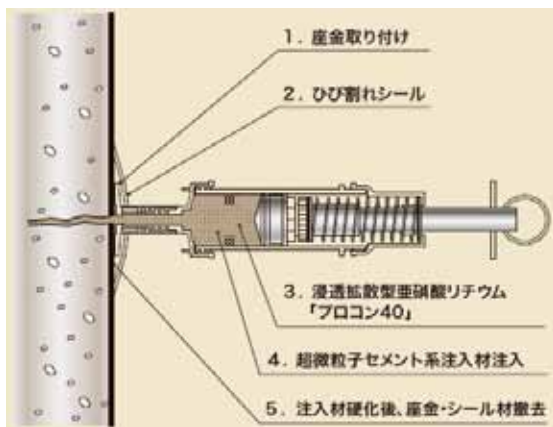


図 3-16 ひび割れ注入工法の概念図



図 3-17 ひび割れ注入工法の施工状況

参考工法 『リハビリシリンダー工法』 NETIS 登録番号;CG-110017-VR

使用材料：プロコン 40（浸透拡散型亜硝酸リチウム 40%水溶液）

アーマ #600（超微粒子セメント系ひび割れ注入材）

4. 内部圧入工法

目的：『鉄筋腐食の抑制』

塩害または中性化による劣化は鉄筋腐食に起因しています。すなわち、塩害、中性化により劣化したコンクリート構造物の補修対策とは、最終的に鉄筋腐食をいかに抑制するかに帰着します。亜硝酸リチウムは鉄筋腐食を化学的に抑制できる補修材料であり、それを防錆対象とする全ての鉄筋周囲に満遍なく供給すれば、以後の鉄筋腐食反応を抑制することができると考えられます。そのための手段が亜硝酸リチウム内部圧入工法であり、亜硝酸リチウムによる鉄筋腐食抑制効果を最も積極的に活用する工法といえます。

【亜硝酸リチウム内部圧入工法(カプセル式)】

塩害、中性化対策としてのカプセル式内部圧入工法は、劣化したコンクリート躯体に小径の削孔（ $\phi 10\text{mm}$ 、 $L=100\text{mm}$ 程度）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の鉄筋周辺部に浸透させる工法です。加圧注入に先立ち、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や表面被覆工法で閉塞します。これは亜硝酸リチウム水溶液を加圧注入する際に表面への漏出を防止するための処置です。コンクリート表面の漏出防止工が完了した後、圧入孔を削孔します。削孔間隔は 500mm の千鳥配置を標準とします。全ての圧入孔にカプセル式圧入装置を設置し、設計で求めた亜硝酸リチウム設計注入量を加圧注入圧入します。注入圧力は 0.5MPa を標準とします。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ますが、一般的には7～10日程度となります。内部圧入工が完了したら、圧入孔を充填して施工完了となります。カプセル式内部圧入工法の概念図を図 3-18 に、施工状況を図 3-19 に示します。

内部圧入工法には、注入・圧入専用の浸透拡散型亜硝酸リチウムを使用できます。

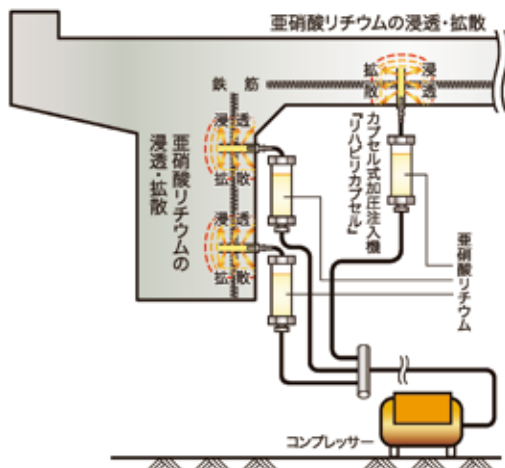


図 3-18 内部圧入工法の概念図



図 3-19 内部圧入工法の施工状況

参考工法 『リハビリカプセル工法』 NETIS 登録番号;CG-120005-VR

使用材料：プロコン 40（浸透拡散型亜硝酸リチウム 40%水溶液）

内部圧入する亜硝酸リチウムの設計注入量は、塩害対策の場合、対象構造物の塩化物イオン含有量に応じて構造物ごとに設定され、その量は既往の研究により $\text{NO}_2^-/\text{Cl}^-$ モル比 1.0 となる量とされます。

【亜硝酸リチウム設計注入量の算定方法】

内部圧入工法における亜硝酸リチウムの設計注入量は下記の要領で算定します。

①塩害の場合

コンクリート表面から鉄筋位置までの塩化物イオン濃度分布を測定し、それら測定値の最大の値に対して亜硝酸イオンと塩化物イオンのモル比 ($\text{NO}_2^-/\text{Cl}^-$ モル比) が 1.0 となる量の亜硝酸リチウムを設計注入量とします。すなわち、コンクリート中の塩化物イオン濃度が高いほど、鉄筋防錆のために必要となる亜硝酸リチウムの量が多くなります。

塩化物イオン濃度と亜硝酸リチウム設計注入量との関係を図 3-20 に示します。ここで、図中の亜硝酸リチウム設計注入量とは亜硝酸リチウム 40% 水溶液としての量を示しています。

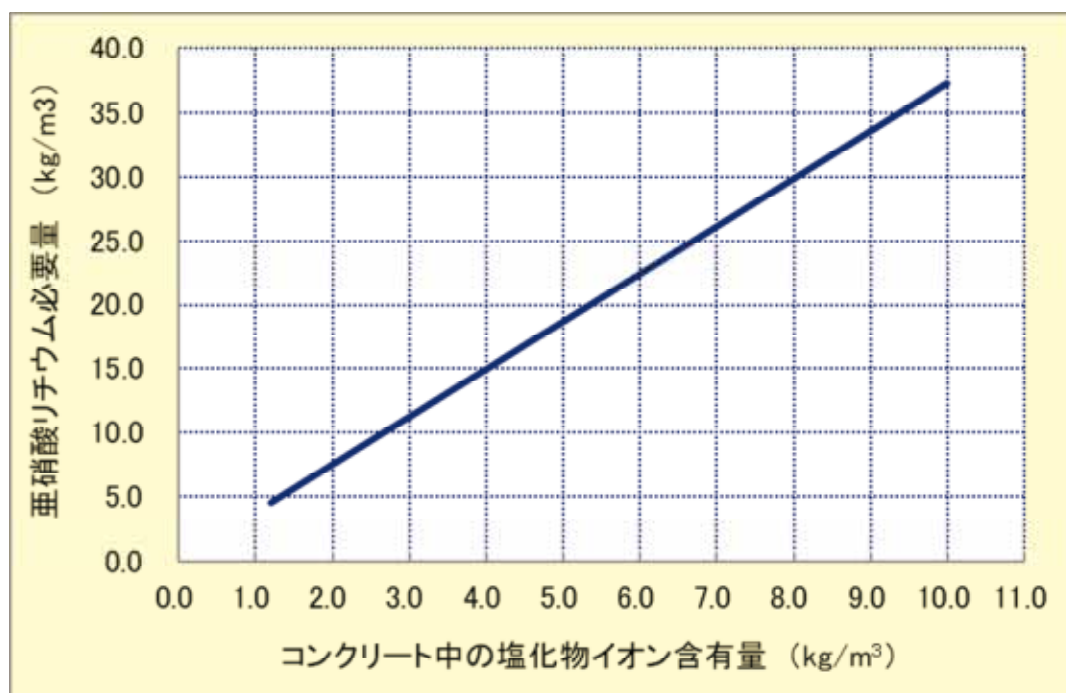


図 3-20 亜硝酸リチウム設計注入量(塩害の場合)

②中性化の場合

中性化対策として亜硝酸リチウム内部圧入工法を適用する場合は、過去の実績から塩害対策における塩化物イオン濃度 2.0kg/m^3 に対する亜硝酸リチウム設計注入量を用いています。すなわち、中性化対策の場合、 7.47kg/m^3 の亜硝酸リチウムを設計注入量とします。現時点では中性化深さや pH のように中性化特有の試験値と亜硝酸リチウム設計注入量とが関連付けられていないため、塩害によって破壊された不動態被膜を修復しうる最小の亜硝酸リチウム量を適用しているということです。

5. 断面修復工法

目的：『脆弱部の修復』＋『鉄筋腐食の抑制』

塩害や中性化によって鉄筋が腐食している場合、かぶりコンクリートを除去して鉄筋を露出させ、防錆材として亜硝酸リチウムを塗布した後に断面を修復することで、以後の鉄筋腐食を抑制できます。亜硝酸リチウムを用いた断面修復工法では、「亜硝酸イオンによる鉄筋腐食の抑制」、「コンクリート脆弱部の修復」および、それに伴う「コンクリート内部の塩化物イオンの除去」を行うこととなります。

断面修復工法には、コンクリート浮き・剥離箇所のみをはつり取って修復する一般的な「部分断面修復」と、かぶりコンクリートを全てはつり取って劣化因子を除去する「全断面修復」とがあり、要求される性能に応じて選定する必要があります。

断面修復工法では、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ます。次に鉄筋周囲をワイヤーブラシやディスクサンダーで鉄筋をケレンし、錆を入念に除去します。その後、防錆材として亜硝酸リチウム水溶液と亜硝酸リチウム含有ペーストを鉄筋周囲とはつり面全体に塗布します。ペーストが完全に硬化しないうちに、ポリマーセメントモルタルまたは亜硝酸リチウム含有ポリマーセメントモルタルを左官工法もしくは吹付け工法で断面修復します。このとき、1層の埋め戻し厚さは20～30mmを目安とし、下地のモルタルが十分硬化したのを確認して、次のモルタル層を重ねます。断面修復工法の概念図を図3-21に、施工状況を図3-22に示します。

断面修復材はポリマーセメントモルタルを単体で使用するもありますが、亜硝酸リチウムを混入することでより防錆効果が高まり、マクロセル腐食を抑制する効果も期待できます。このとき、亜硝酸リチウムの混入量は塩化物イオン量に応じて設定できますが、みなし規定として亜硝酸リチウムの固形分で55kg/m³という数値も提案されています。

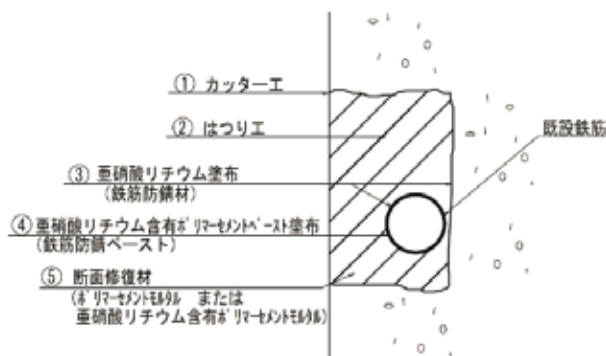


図 3-21 断面修復工法の概念図



図 3-22 断面修復工法の施工状況

参考工法 『リハビリ断面修復工法』

使用材料：プロコンガードプライマー（亜硝酸リチウム系表面含浸材）

リハビリペースト（亜硝酸リチウム含有ポリマーセメントペースト）

マスターエマコ S990（ポリマーセメントモルタル）など

PSL-40（断面修復工法用亜硝酸リチウム40%水溶液）

3.3 亜硝酸リチウムを用いた ASR の補修工法

(1) 亜硝酸リチウムを用いた ASR 補修の基本的な考え方

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 に関する試験方法には、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。従って、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」、「アルカリ溶液浸漬法（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た対策工法の選定が重要となります。

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です。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状況には、「もともと ASR 膨張性がそれほど大きくない」場合と、「既に甚大な膨張を生じたあと収束した」場合とがあります。両者は劣化の程度が大きく異なりますが、対策の考え方は共通した部分があります。

- ゲルの膨張性が小さいため、今後の有害な膨張の進行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。

まず、もともと ASR 膨張性がそれほど大きくなかったケースを考えます。反応性骨材の種類や混合比率（ペシマム）などの条件によってはこのようなケースもあります。ゲルの膨張性が小さいとはいえ、ASR で既に劣化している構造物ですので、将来的な膨張進行がゼロというわけではありません。最低限の水分遮断は図るべきです。換言すると、この段階では補修工法の主たる要求性能は「劣化因子の遮断」ということです。「劣化因子の遮断」を目的とした工法は、表面含浸工法、表面被覆工法、ひび割れ注入工法が挙げられますが、ここに亜硝酸リチウムを併用すれば「劣化因子の遮断」に加えて「ゲルの非膨張化」もコンクリート表層部程度には期待できます。ASR 膨張性が小さいコンクリートなので、亜硝酸リチウムの活用方法もこの程度の軽微なもので済みます。また、ASR ひび割れの箇所と鉄筋が交差している場合にはひび割れを通じて劣化因子が侵入し、局所的な鉄筋腐食を引き起こす原因にもなるので、鉄筋腐食抑制を目的として補修材料に亜硝酸リチウムを使用するという意味もあります。

次に、既に甚大な膨張を生じたあと収束している場合を考えます。ASR 膨張が収束するのは、一般的に ASR の劣化過程が「劣化期」となった段階のため、コンクリート表面には無数のひび割れなどの変状が現れています。これらを一つずつひび割れ注入することもあります。表面全体をはつり取って断面修復してしまう方が経済的な場合もあります。もちろん、将来的に膨張が進行しないことが適用条件です。ここでひとつ注意が必要なのは、劣化期にまで進行しているということは、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ることです。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必要があります。

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 3-3 に示します。

表 3-3 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
亜硝酸リチウム併用型 表面含浸工法	・コンクリート表面に亜硝酸リチウム系含浸材を塗布した後、シラン・シロキサン系含浸材を塗布する。 ・亜硝酸リチウム（リチウムイオン）がコンクリート内部へ浸透し、コンクリート表層部の ASR ゲルの膨張を低減する。また、表面含浸材が外部からの水分侵入を遮断するとともに、亜硝酸リチウムの溶出を防ぐ。 【参考工法：プロコンガードシステム S】
亜硝酸リチウム併用型 表面被覆工法	・コンクリート表面に亜硝酸リチウム系含浸材を塗布した後、亜硝酸リチウムを混入したポリマーセメントモルタル系被覆材にて表面を被覆する。 ・塗布した亜硝酸リチウムと被覆材に含まれるリチウムイオンがコンクリート内部へ浸透し、コンクリート表層部の ASR ゲルの膨張を低減する。また、表面被覆材が外部からの水分侵入を遮断する。 【参考工法：リハビリ被覆工法】
亜硝酸リチウム併用型 ひび割れ注入工法	・ひび割れに浸透拡散型亜硝酸リチウムを先行注入した後、無機系注入材を本注入してひび割れを閉塞する。 ・先行注入した亜硝酸リチウム（リチウムイオン）がひび割れ周辺のコンクリートへ浸透し、ASR ゲルの膨張を低減する。 ・本注入した無機系ひび割れ注入材がひび割れを閉塞し、ひび割れを通じた水分侵入を遮断する。 【参考工法：リハビリシリンダー工法】
亜硝酸リチウム併用型 断面修復工法	・劣化しているコンクリート表面をはつり取り、コンクリートやポリマーセメントモルタルで修復する。 ・コンクリート表面の変状が著しいものの、膨張が既に収束している場合に適用されることがある。 【参考工法：リハビリ断面修復工法】

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 膨張の継続期間は骨材の種類や配合比率（ペシマム）などに大きく影響を受けるため、一律に論じることはできませんが、少なくとも数十年単位で膨張が進行するといわれており、ASR 膨張は長期間に及ぶことが知られています。ASR 膨張の継続期間を精度よく予測することは困難であり、残存膨張量試験を実施してもその膨張量と実際の膨張期間とを関連付けることは容易ではありませんが、試験などにより ASR 膨張性が大きいと判定された場合には、将来的に有害な膨張が進行することを想定した工法選定が重要です。将来的に有害な ASR 膨張の進行を想定した維持管理シナリオとは、『再劣化を許容して定期的に再補修を行う』という

ケース、『再劣化を許容せず根本的な対策を講じる』というケースが考えられます。どちらの維持管理シナリオを選択するかは、対象構造物の置かれている環境条件、構造特性、重要度などを総合的に判断する必要があります。

表 3-4 ASR の膨張性が大きい場合の対策工法

適用できる対策工	概要
亜硝酸リチウム 内部圧入工法	・コンクリートに小径の削孔を行い、そこから亜硝酸リチウムを内部圧入することでコンクリート全体にリチウムイオンを供給する。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。 ・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、再劣化を許容しない構造物の補修工法として適用性が高い。 ・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。 【参考工法：ASR リチウム工法】
亜硝酸リチウム併用型 表面含浸工法	・コンクリート表面に亜硝酸リチウム系含浸材を塗布した後、シラン・シロキサン系含浸材を塗布する。 ・亜硝酸リチウム（リチウムイオン）がコンクリート内部へ浸透し、コンクリート表層部の ASR ゲルの膨張を低減する。また、表面含浸材が外部からの水分侵入を遮断するとともに、亜硝酸リチウムの溶出を防ぐ。 ・ただし、ASR 膨張抑制効果は限定的であり、再補修を前提とした維持管理シナリオの下で適用される。 【参考工法：プロコンガードシステム S】
亜硝酸リチウム併用型 表面被覆工法	・コンクリート表面に亜硝酸リチウム系含浸材を塗布した後、亜硝酸リチウムを混入したポリマーセメントモルタル系被覆材で表面を被覆する。 ・塗布した亜硝酸リチウムと被覆材に含まれるリチウムイオンがコンクリート内部へ浸透し、コンクリート表層部の ASR ゲルの膨張を低減する。また、表面被覆材が外部からの水分侵入を遮断する。 ・ただし、ASR 膨張抑制効果は限定的であり、再補修を前提とした維持管理シナリオの下で適用される。 【参考工法：リハビリ被覆工法】
亜硝酸リチウム併用型 ひび割れ注入工法	・ひび割れに浸透拡散型亜硝酸リチウムを先行注入した後、無機系注入材を本注入してひび割れを閉塞する。 ・先行注入した亜硝酸リチウム（リチウムイオン）がひび割れ周辺のコンクリートへ浸透し、ASR ゲルの膨張を低減する。 ・本注入した無機系ひび割れ注入材がひび割れを閉塞し、ひび割れを通じた水分侵入を遮断する。 ・ただし ASR 膨張抑制効果は限定的であり、再補修を前提とした維持管理シナリオの下で表面含浸または表面被覆工法と併用して適用される。 【参考工法：リハビリシリンドー工法】

『再劣化を許容して定期的に再補修を行う』場合の補修工法の主たる要求性能は「劣化因子の遮断」となります。「劣化因子の遮断」を目的とした工法は表面含浸工法、表面被覆工法、ひび割れ注入工法が挙げられますが、ここに亜硝酸リチウムを併用すれば「劣化因子の遮断」に加えて「ゲルの非膨張化」もコンクリート表層部程度には期待できます。ただし、ASR 膨張性が大きいコンクリートなので、亜硝酸リチウムの供給範囲が表層部のみとなるこれらの工法では根本的な ASR 膨張抑制までは期待できません。求める効果はあくまで水分遮断であり、プラスアルファとして部分的にゲルの膨張抑制効果が付加される程度と認識すべきです。そして補修後の劣化進行を経過観察し、再劣化が顕在化した段階で再び補修を繰り返すことになります。

『再劣化を許容せず根本的な対策を講じる』場合の補修工法の主たる要求性能は「ゲルの非膨張化」となります。「ゲルの非膨張化」を目的とした工法は内部圧入工法が挙げられます。内部圧入工法は亜硝酸リチウムをコンクリート部材全体に供給する工法で、コンクリート全体の ASR 膨張抑制効果が期待できる最も信頼性の高い工法といえます。

これらを踏まえて、ASR 膨張性が大きいと判断される場合に適用可能な対策工法を表 3-4 に示します。

表 3-4 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内部圧入工法が最も高いため、ASR 膨張性が大きい場合の対策工法としては内部圧入工法が最も適しているといえます。しかし、再劣化を許容する場合や ASR 膨張性が比較的穏やかな場合は、ひび割れ注入工法と表面保護工法（表面含浸または表面被覆）に亜硝酸リチウムを併用することで、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一般的な ASR 補修工法よりも延命化を図ることができます。内部圧入工法とひび割れ注入工法・表面保護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 3-23、図 3-24 に示します。

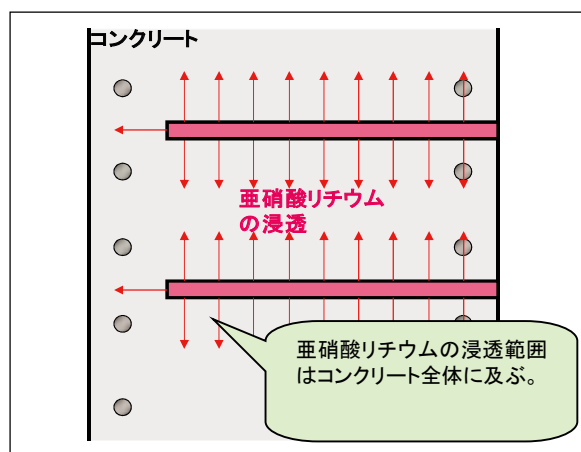


図 3-23 内部圧入工法の場合

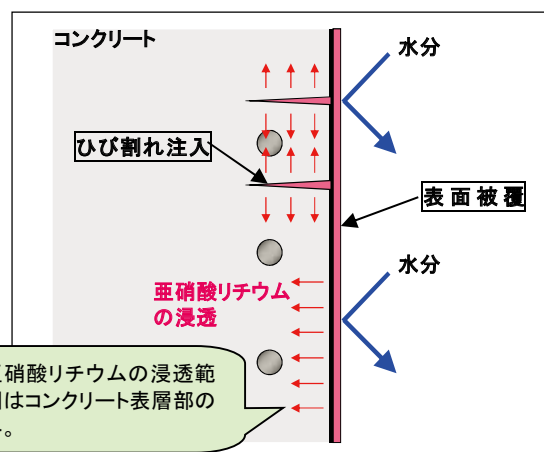


図 3-24 ひび割れ注入・表面保護工法の場合

ASR 膨張性が大きい場合に適用される「内部圧入工法」と「ひび割れ注入工法・表面保護工法」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保護工などでは十分な 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、内部圧入工法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です。

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。このような場合は、ひび割れ注入工法と表面保護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、再劣化までの期間の延長が可能に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内部圧入工法で根本的な対策を講じ、それ以外は表面保護工法で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、鉄道など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、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いえます。

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が採れる場合には、ひび割れ注入工法と表面保護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 年間程度しか供用する予定がない構造物に対して、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、ひび割れ注入工法と表面保護工法に亜硝酸リチウムを併用すれば、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、内部圧入工法により根本的に ASR 抑制を図り、再劣化のリスクを低減しておく方が LCC（ライフサイクルコスト）の観点からも有利になると考えられます。

(2) 亜硝酸リチウムを用いた具体的な ASR 補修工法

1. 表面含浸工法

目的：『劣化因子の遮断』＋『ASR ゲルの非膨張化』

ASR はゲルの吸水膨張に起因するので、表面被覆工法により外部からの水分浸入を抑制できれば以後の ASR 進行は低減できます。表面含浸工法の主たる目的は「外部からの水分遮断」ですが、補修材料に亜硝酸リチウムを併用することにより、「ゲルの非膨張化」効果をプラスアルファとして付与できます。このときの亜硝酸リチウムの浸透範囲の概念は図 3-24 に示したとおりです。表面含浸工法で水分を完全に遮断することは容易ではなく、一般的には ASR 膨張性が小さい場合に適用されることが多いのですが、膨張性が大きい場合でも再補修を繰り返す維持管理シナリオの下で適用されることもあります。水分遮断効果は表面被覆工法よりもやや劣りますが、内部の水分を閉じ込めることがなく、以後のモニタリングも容易という利点があります。

表面含浸工法では、まず、コンクリート表面をサンダーケレンまたは高圧洗浄で下地処理します。施工面全体に亜硝酸リチウムを刷毛またはローラーで入念に塗布した後、シラン・シロキサン系表面含浸材を刷毛またはローラーで塗布し、散水養生を行います。コンクリート表面に塗布された亜硝酸リチウムは将来的に表層部にイオン浸透し、その範囲のゲルが非膨張化されます。表面含浸材は亜硝酸リチウムとの相性のよい材料を選定する必要があり、シラン・シロキサン系含浸材が推奨されます。図 3-25 に亜硝酸リチウムを用いた表面含浸工法の概念図を、図 3-26 に施工状況を示します。

表面含浸工法では、亜硝酸リチウムの標準塗布量が 0.3kg/m^2 とされています。これは一般条件下での標準的な塗布量であり、必要に応じて亜硝酸リチウム供給量を調整することもできます。亜硝酸リチウムの浸透の目安は 5 カ月間で 30mm という実験結果が得られていますが、コンクリートの強度や状態によって変わってくると考えられます。

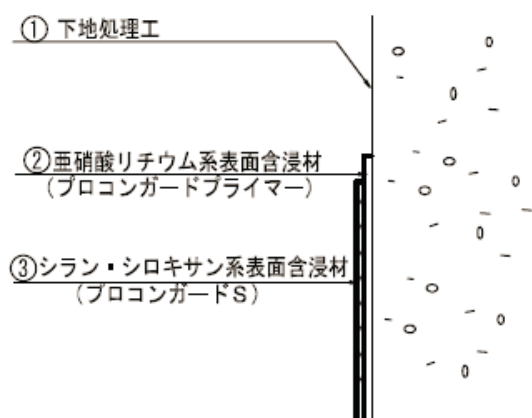


図 3-25 表面含浸工法の概念図の例



図 3-26 表面含浸工法の施工状況

参考工法 『プロコンガードシステム S』 NETIS 登録申請中(令和 2 年 3 月現在)

使用材料：プロコンガードプライマー（亜硝酸リチウム系表面含浸材）

プロコンガード S（シラン・シロキサン系表面含浸材）

2. 表面被覆工法

目的：『劣化因子の遮断』＋『ASR ゲルの非膨張化』

表面含浸工法と同様に、表面被覆工法の主たる目的は「外部からの水分遮断」ですが、補修材料に亜硝酸リチウムを混入または併用することにより、「ゲルの非膨張化」効果をプラスアルファとして付与できます。このときの亜硝酸リチウムの浸透範囲の概念は図 3-24 に示したとおりです。表面被覆工法で水分を完全に遮断するのは容易ではなく、一般的には ASR 膨張性が小さい場合に適用されることが多いのですが、膨張性が大きい場合でも再補修を繰り返す維持管理シナリオの下で適用されることもあります。

表面被覆工法では、まずコンクリート表面をサンダーケレンまたは高圧洗浄で下地処理します。施工面全体に亜硝酸リチウムを刷毛またはローラーで入念に塗布した後、亜硝酸リチウムを含有するポリマーセメントモルタル系表面被覆材でコンクリート表面をコーティングします。被覆工はコテ、刷毛、ローラーなどで行います。コンクリート表面に塗布された亜硝酸リチウムは将来的に表層部にイオン浸透し、その範囲のゲルが非膨張化されます。ポリマーセメントモルタル系表面被覆材の上には、被覆層を保護するための上塗りを行う必要があります。上塗り材は亜硝酸リチウムを含有したポリマーセメントモルタルとの相性のよい材料を選定することが重要です。図 3-27 に亜硝酸リチウムを用いた表面被覆工法の概念図を、図 3-28 に施工状況を示します。

表面被覆工法では亜硝酸リチウムの標準塗布量が 0.3kg/m^2 、亜硝酸リチウム含有ポリマーセメントペーストの標準厚さが 2mm とされていますが、必要に応じて亜硝酸リチウム系表面含浸材の塗布量や、ペースト・モルタルの塗布厚さを変えて亜硝酸リチウム供給量を調整することもできます。亜硝酸リチウムの浸透の目安は 5 カ月間で 30mm という実験結果が得られていますが、コンクリートの強度や状態によって変わってくると考えられます。

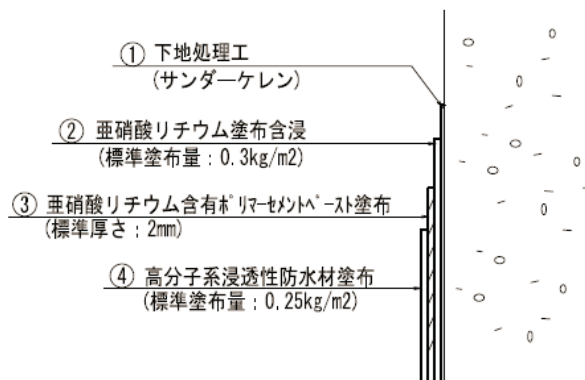


図 3-27 表面被覆工法の概念図の例



図 3-28 表面被覆工法の施工状況

参考工法 『リハビリ被覆工法』

使用材料：プロコンガードプライマー（亜硝酸リチウム系表面含浸材）

リハビリペースト（亜硝酸リチウム含有ポリマーセメントペースト）

アイゾール EX（高分子系浸透性防水材）など

3. ひび割れ注入工法

目的：『劣化因子の遮断』＋『ASR ゲルの非膨張化』

ASR で劣化したコンクリートの表面には多くのひび割れが発生しているので、ひび割れ注入工法によってひび割れを通じた水分浸入の抑制が必要となります。ひび割れ注入の主たる目的は「外部からの水分遮断」ですが、補修材料に亜硝酸リチウムを併用することにより、「ゲルの非膨張化」効果をプラスアルファとして付与できます。このときの亜硝酸リチウムの浸透範囲の概念は図 3-24 に示したとおりです。ASR 補修としてひび割れ注入工法が単体で適用されることは少なく、表面含浸工法や表面被覆工法などとの併用が多いようです。一般的には ASR 膨張性が小さい場合に適用されることが多いのですが、膨張性が大きい場合でも再補修を繰り返す維持管理シナリオの下で適用されることもあります。また、ASR ひび割れの箇所と鉄筋が交差している場合にはひび割れから劣化因子が侵入し、局所的な鉄筋腐食を引き起こす原因にもなるので、鉄筋腐食抑制を目的として補修材料に亜硝酸リチウムを使用することもあります。

ひび割れ注入工法では、まずコンクリート表面のひび割れ内部に亜硝酸リチウムを先行注入します。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、ひび割れ周辺のコンクリートにイオン浸透し、その範囲のゲルが非膨張化されます。亜硝酸リチウムを先行注入した後、ひび割れ内部が乾燥しないうちに超微粒子セメント系ひび割れ注入材を本注入します。超微粒子セメント系ひび割れ注入材は流動性に優れるため、ひび割れ先端まで確実に充填できます。注入作業は先行注入、本注入ともに自動低圧注入器を用います。図 3-29 に亜硝酸リチウムを用いたひび割れ注入工法の概念図を、図 3-30 に施工状況を示します。

ひび割れ注入工法には、注入・圧入専用の浸透拡散型亜硝酸リチウムを使用できます。ただし、亜硝酸リチウムの注入可能量はひび割れ幅と深さによって決まるため、アルカリ総量などに応じて定量的に注入量を設定するわけではありません。

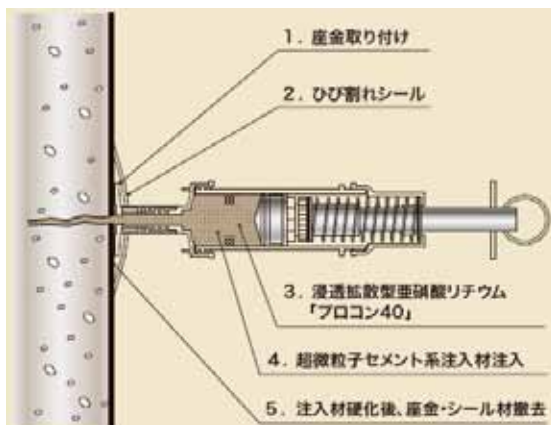


図 3-29 ひび割れ注入工法の概念図



図 3-30 ひび割れ注入工法の施工状況

参考工法 『リハビリシリンダー工法』 NETIS 登録番号;CG-110017-VR

使用材料：プロコン 40（浸透拡散型亜硝酸リチウム 40%水溶液）

アーマ # 600（超微粒子セメント系ひび割れ注入材）

4. 内部圧入工法

目的：『ゲルの非膨張化』

表面被覆工法や表面含浸工法など、多くの ASR 補修工法の要求性能は「水分侵入の遮断」ですが、外部から水分を完全に遮断することは極めて困難で、早期には再劣化を引き起こす場合もあります。亜硝酸リチウムは ASR ゲルの膨張性を化学的に抑制できる補修材料であり、それを対象コンクリート部材全体に満遍なく供給できれば、全ての ASR ゲルが非膨張化されるため、以後の ASR 膨張を抑制できると考えられます。そこで実用化されたのが亜硝酸リチウム内部圧入工法です。内部圧入工法は、亜硝酸リチウムの持つ ASR 膨張抑制効果を最も積極的に活用する工法といえます。このときの亜硝酸リチウムの浸透範囲の概念は図 3-23 に示したとおりです。

ASR 対策としての亜硝酸リチウム内部圧入工法には、部材寸法が厚い構造物（おおむね 500mm 以上）に適用される油圧式圧入装置と、部材寸法が薄い構造物（おおむね 500mm 未満）に適用されるカプセル式圧入装置の 2 種類があります。

【亜硝酸リチウム内部圧入工法（油圧式）】

亜硝酸リチウム内部圧入工法（油圧式）は、橋台、橋脚、擁壁、ダム、構造物基礎など、土木構造物一般に適用されます。ASR 劣化したコンクリート躯体に小径の削孔（ $\phi 20\text{mm}$ ）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ます。加圧注入に先立ち、コンクリート表面に生じているひび割れを、ひび割れ注入工法や表面被覆工法で閉塞します。これは亜硝酸リチウム水溶液を加圧注入する際に、表面への漏出を防止するための処置です。コンクリート表面の漏出防止工が完了した後、圧入孔を削孔します。削孔間隔は 750mm の千鳥配置が標準ですが、コンクリート圧縮強度や部材形状などに応じて調整する場合もあります。

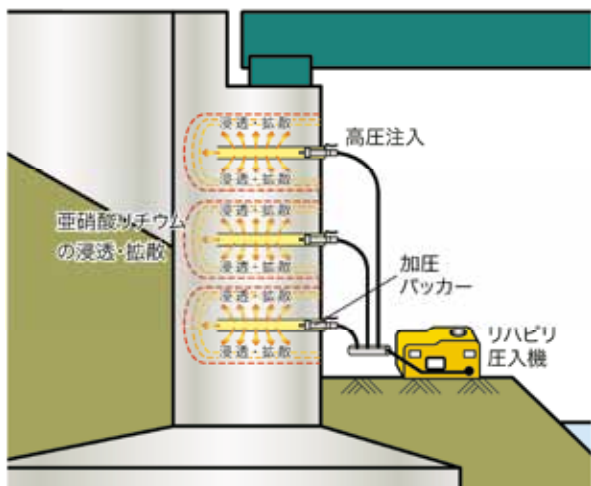


図 3-31 内部圧入工法（油圧式）の概念図



図 3-32 内部圧入工法の施工状況

参考工法 『ASR リチウム工法』

使用材料：プロコン 40（浸透拡散型亜硝酸リチウム 40%水溶液）

注入圧力は対象構造物の劣化程度に応じて設定し、一般的に 0.5～1.5MPa の範囲とされます。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ごとに設定し、その量は Li/Na モル比 0.8 となる量とされます。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ますが、一般的には 20～30 日程度となります。内部圧入工が完了したら、圧入孔を充填して施工完了です。油圧式内部圧入工法の概念図を図 3-31 に、施工状況を図 3-32 に示します。内部圧入工法には、注入・圧入専用の浸透拡散型亜硝酸リチウムを使用できます。

【亜硝酸リチウム内部圧入工法(カプセル式)】

亜硝酸リチウム内部圧入工法（カプセル式）、上部工、RC 床版、ボックスカルバート、橋台のパラペットやウィングなど、比較的薄い部材に適用されます。コンクリート躯体に小径の削孔（φ10mm）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ます。加圧注入に先立ち、コンクリート表面に生じているひび割れを、ひび割れ注入工法や表面被覆工法で閉塞します。これは亜硝酸リチウム水溶液を加圧注入する際に表面への漏出を防止するための処置です。コンクリート表面の漏出防止工が完了した後、圧入孔を削孔します。削孔間隔は 500mm を標準とし、亜硝酸リチウム浸透範囲に斑ができにくいように千鳥配置とします。注入圧力は 0.5MPa を標準とします。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ごとに設定し、その量は Li/Na モル比 0.8 となる量とされます。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ますが、一般的には 10～15 日程度となります。内部圧入工が完了したら、圧入孔を充填して施工完了です。カプセル式内部圧入工法の概念図を図 3-33 に、施工状況を図 3-34 に示します。内部圧入工法には、注入・圧入専用の浸透拡散型亜硝酸リチウムを使用できます。

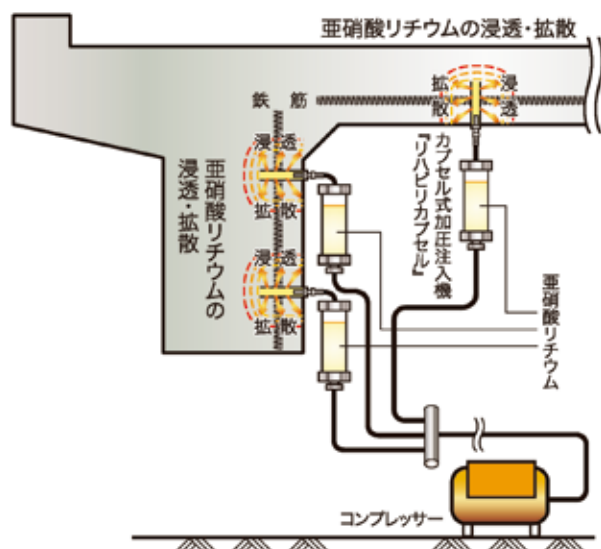


図 3-33 内部圧入工法(カプセル式)の概念図



図 3-34 内部圧入工法の施工状況

参考工法 『リハビリカプセル工法』 NETIS 登録番号;CG-120005-VR

使用材料：プロコン 40（浸透拡散型亜硝酸リチウム 40%水溶液）

【亜硝酸リチウム設計注入量の算定方法】

ASR 対策として内部圧入工法において、亜硝酸リチウムの設計注入量は次の要領で算定します（油圧式、カプセル式共通）。

対象コンクリートのアルカリ総量を測定し、それら測定値の最大の値に対してリチウムイオンとナトリウムイオン（等価アルカリ量）のモル比（ Li^+/Na^+ モル比）が 0.8 となる量の亜硝酸リチウムを設計注入量とします。すなわち、コンクリート中のアルカリ含有量が高いほど、ASR 膨張抑制のために必要となる亜硝酸リチウムの量が多くなります。

アルカリ総量と亜硝酸リチウム設計注入量との関係を図 3-35 に示します。ここで、図中の亜硝酸リチウム設計注入量とは亜硝酸リチウム 40% 水溶液としての量を示しています。

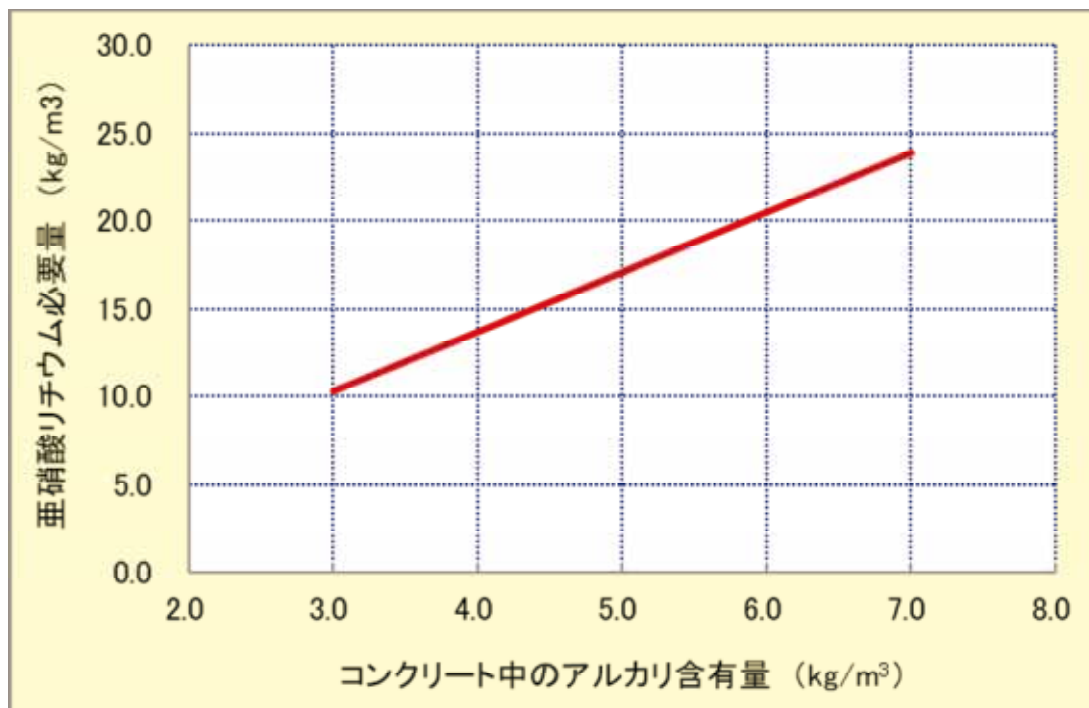
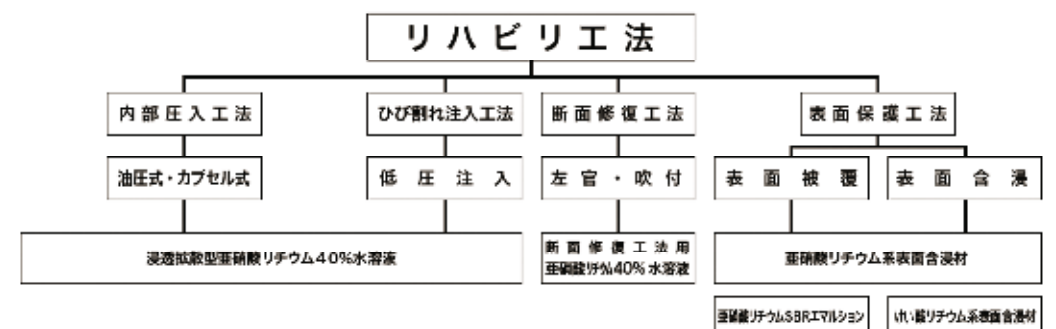


図 3-35 亜硝酸リチウム設計注入量 (ASR の場合)

3.4 亜硝酸リチウムを用いた補修工法選定の考え方

(1) 亜硝酸リチウムを用いた補修技術一覧

「リハビリ工法」は、塩害・中性化・ASRによって劣化したコンクリート構造物の亜硝酸リチウムを用いた補修技術の総称で、以下の表から成り立ちます。これらの工法は、それぞれの補修工法(圧入工法、ひび割れ注入工法、断面修復工法、表面保護工法)に適した亜硝酸リチウムを使用して構造物の劣化機構の程度や部位、規模などに応じて使い分けることができます。



	【概 要】	【効 果】	【適 用】
内部圧入工法 (油圧式)	●ASR膨張が進行している構造物に小径の圧入孔(φ20mm)を穿孔し、部材全体に浸透拡散型亜硝酸リチウムを内部圧入します。 ●塩害、中性化により鉄筋腐食が進行している構造物に対し、鉄筋周囲の範囲に浸透拡散型亜硝酸リチウムを内部圧入します。 ●内部圧入は油圧式圧入装置を使用します。	●鉄筋周囲に亜硝酸イオンを効果的に供給し、以後の鉄筋腐食を抑制します。 ●コンクリート部材全体にリチウムイオンを効率的に供給し、以後のASR膨張を抑制します。	●塩害、中性化による鉄筋腐食が著しい構造物全般の根本的補修。 ●ASRによる劣化が著しい構造物全般の根本的補修。
内部圧入工法 (カプセル式)	●ASR膨張が進行している構造物に小径の圧入孔(φ10mm)を穿孔し、部材全体に浸透拡散型亜硝酸リチウムを内部圧入します。 ●塩害、中性化により鉄筋腐食が進行している構造物に対し、鉄筋周囲の範囲に浸透拡散型亜硝酸リチウムを内部圧入します。 ●内部圧入は小容量タイプのカプセル式加圧注入機を使用します。	●鉄筋周囲に亜硝酸イオンを効果的に供給し、以後の鉄筋腐食を抑制します。 ●コンクリート部材全体にリチウムイオンを効率的に供給し、以後のASR膨張を抑制します。	●塩害、中性化による鉄筋腐食が著しい小規模な構造物または部位の根本的補修。 ●ASRによる劣化が著しい小規模な構造物または部位の根本的補修。
ひび割れ注入工法	●塩害、中性化、ASRによって発生したひび割れに、超微粒子セメント系ひび割れ注入材を低圧注入します。 ●ひび割れ注入材に先立ち、浸透拡散型亜硝酸リチウムを先行注入します。 ●ひび割れ注入には、自動恒圧注入器を使用します。	●注入材の粒子が細かいため、微細なひび割れまで閉塞でき、劣化因子の侵入を抑制します。 ●ひび割れ周辺やコンクリート表層部に亜硝酸イオン、リチウムイオンを供給することができます。	●塩害、中性化による鉄筋腐食が著しい小規模な構造物または部位の根本的補修。 ●ASRによる劣化が著しい小規模な構造物または部位の根本的補修。
断面修復工法	●断面修復工法用亜硝酸リチウムを適量、断面修復材(ポリアーセメントモルタル)に混入し断面修復工法を行います。 ●断面修復は左官工法と吹き付け工法を採用します。 ●全断面修復、部分断面修復で採用します。 ●カプセル式内部圧入工法と部分断面修復工法を組み合わせたことが出来ます。 ●表面保護工法と部分断面修復工法を組み合わせることが出来ます。	●鉄筋周囲に亜硝酸イオンを効果的に供給し、以後の鉄筋腐食を抑制します。	●鉄筋腐食による浮き部、欠損部の部分及び全断面修復工法。
表面被覆工法	●鉄筋腐食抑制目的で、コンクリート表面に亜硝酸リチウム系表面被覆材を塗布します。 ●鉄筋腐食抑制と劣化因子侵入防止目的で、亜硝酸リチウム系表面被覆材塗布後、亜硝酸リチウム含有ポリアーセメントペースト・モルタルを塗布します。 ●劣化因子侵入防止目的で、亜硝酸リチウムと相性確認した高分子系浸透性防水材を塗布します。	●表面から侵入してくる劣化因子を遮断することが出来ます。 ●鉄筋腐食抑制効果およびASR膨張抑制効果をコンクリート表層部に付与することが出来ます。	●コンクリート表層部で鉄筋腐食目的及びASR膨張抑制効果を期待する工法。 ●劣化因子侵入防止工法。 ●ASRによる劣化が著しい小規模な構造物または部位の根本的補修。
表面含浸工法	●コンクリート表層部での鉄筋腐食抑制とASR膨張抑制効果を目指し、コンクリート表面に亜硝酸リチウム系表面含浸材を塗布します。 ●劣化因子侵入防止目的で、亜硝酸リチウム系表面含浸材を塗布します。	●表面から侵入してくる劣化因子を遮断することが出来ます。 ●鉄筋腐食抑制効果およびASR膨張抑制効果をコンクリート表層部に付与することが出来ます。 ●経過観察が可能。	●コンクリート表層部で鉄筋腐食目的及びASR膨張抑制効果を期待する工法。 ●劣化因子侵入防止工法。

図 3-36 亜硝酸リチウムを用いた補修技術一覧

(2) 塩害・中性化の補修工法選定の考え方

塩害、中性化の補修工法を選定する際に重要な視点として、以下の項目が挙げられます。

- ・塩化物イオン濃度が腐食発生限界（例えば 2.0kg/m^3 ）を超えているか？（塩害の場合）
- ・中性化深さが限界値（例えば中性化残り 10mm）を超えているか？（中性化の場合）
- ・既にひび割れや浮き剥離などの変状が生じているか？（鉄筋腐食が発生しているか？）
- ・将来の維持管理シナリオは？（再劣化と再補修を繰り返すか、根本的な対策を講じるか）

それらの視点を踏まえ、塩害で劣化したコンクリート構造物の補修工法選定フローを図 3-37 に示します。中性化の場合には図中の「塩化物イオン濃度」の判定を「中性化深さ」に置き換えて考えます。

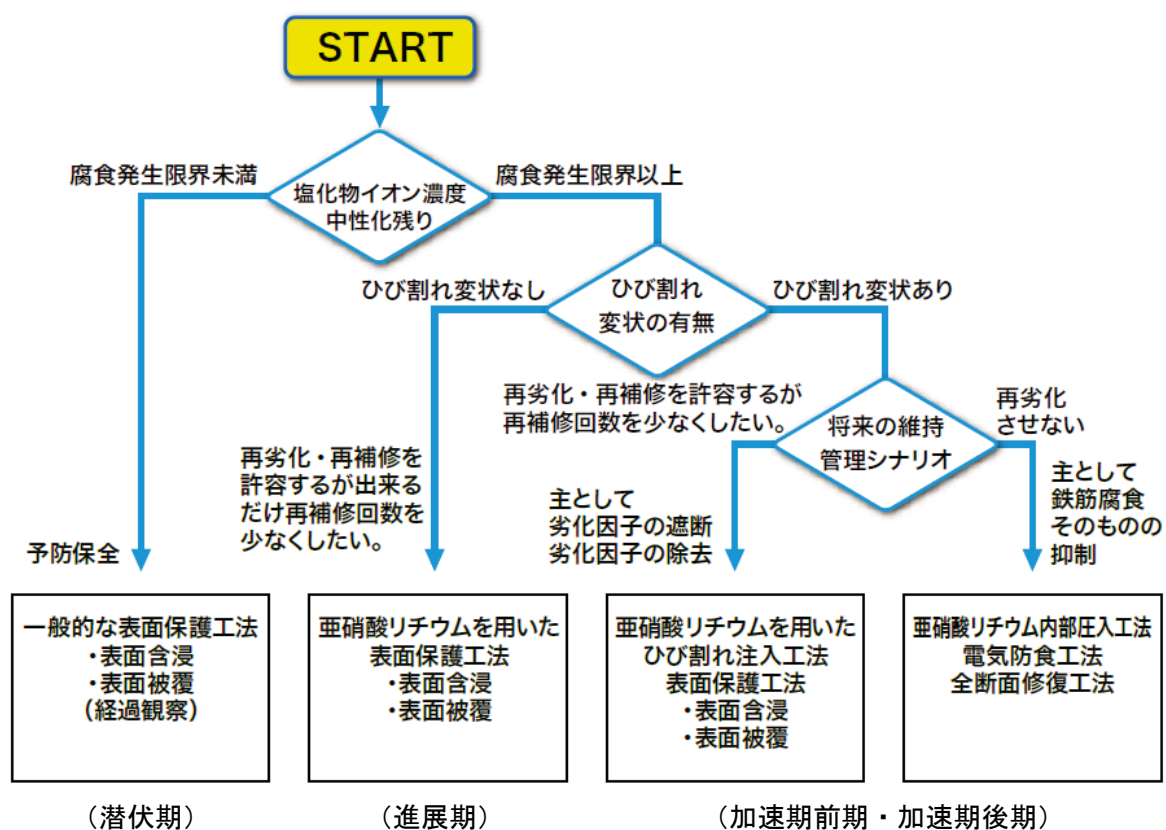


図 3-37 塩害で劣化したコンクリート構造物の補修工法選定フロー

(3) ASR の補修工法選定の考え方

ASR の補修工法を選定する際に重要な視点として、以下の項目が挙げられます。

- ・ ASR の残存膨張性は？（ASR 膨張の将来予測）
- ・ 将来の維持管理シナリオは？（再劣化と再補修を繰り返すか、根本的な対策を講じるか）

特に ASR の場合は、現状の劣化程度だけでなく膨張性の将来予測に応じた補修工法の選定が重要となります。それらの視点を踏まえ、ASR で劣化したコンクリート構造物の補修工法選定フローを図 3-38 に示します。

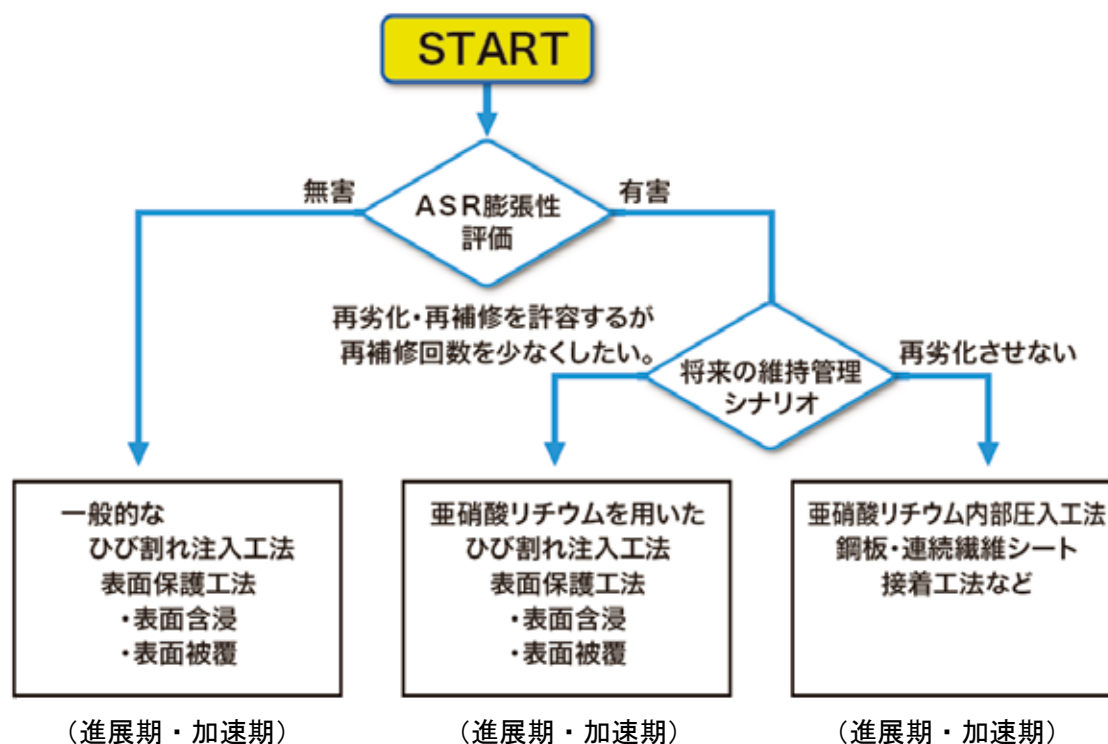


図 3-38 ASR で劣化したコンクリート構造物の補修工法選定フロー

4. 亜硝酸リチウムを用いた補修工法の比較選定事例

4. 1 塩害の補修工法選定事例

(1)劣化程度が軽微な場合の例(予防保全的な対策)

条件

対象構造物	: 道路橋 RC けた
環境	: 海岸線から 700m に位置し、飛来塩分の影響を受ける
試験値	: 塩化物イオン濃度 2.1kg/m^3
外観変状	: 幅 $0.1\sim 0.2\text{mm}$ 程度の微細ひび割れが見られる
鉄筋腐食	: はつり調査の結果、鉄筋腐食はほとんど認められない



補修工法選定の方針

既に腐食発生限界を超えた塩化物イオンが侵入しているものの、鉄筋腐食はまだ顕在化していない。そのため、これ以上の塩化物イオンの侵入を抑制するとともに、鉄筋腐食の原因となる水、酸素の侵入を抑制する。

⇒ 主たる要求性能は【劣化因子の遮断】とする

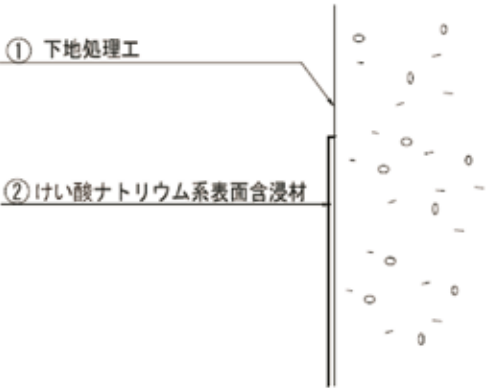
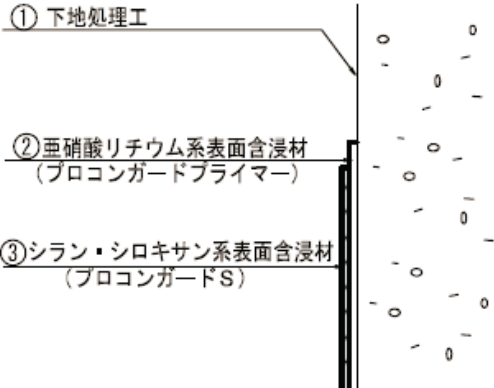
ただし、塩化物イオン濃度から判断して将来的な鉄筋腐食が懸念されるため、単なる劣化因子の遮断だけでなく、鉄筋腐食抑制効果も加味した補修工法が望ましい。

これらの方針を考慮した補修工法比較表の例を図 4-1 に示す。

【塩害補修工法比較表の例（劣化程度が軽微な場合）】

	第 1 案 表面被覆工(有機系被覆材)	第 2 案 表面含浸工(シラン系)
概念図		
工法概要	【目的】 - 外部からの劣化因子の浸入を遮断 【概要】 - 表面被覆材によりコンクリート表面に塗膜を形成することによって、以後の塩化物イオン、水分などの劣化因子の浸入を遮断する。 【施工手順】 - コンクリート表面を下地処理した後、コンクリート表面に有機系表面被覆材を所定の層数塗布する。	【目的】 - 外部からの劣化因子の浸入を抑制 【概要】 - シラン系表面含浸材が浸透したコンクリート表層部は撥水効果が付与されるため、以後の水分の浸入が抑制される。 【施工手順】 - コンクリート表面を下地処理した後、コンクリート表面にシラン系表面含浸材を塗布し、コンクリート内部へ含浸させる。
得失	【長所】 - 外部からの塩化物イオン、水分などの劣化因子浸入を遮断することによって、以後の鉄筋腐食環境の悪化を防ぐ。 - 表面含浸材よりも劣化因子の遮断性は高い。 - 美観性も向上する。 【短所】 - あくまで劣化因子を遮断することを目的としており、鉄筋腐食そのものを抑制するものではない。 - 遮水性の高い材料であるため、コンクリート内部からの水分を外に出すことができない。 - コンクリート表面を皮膜で覆うため、以後のモニタリングが困難となる。	【長所】 - 外部からの塩化物イオン、水分などの劣化因子浸入を抑制することによって、以後の鉄筋腐食環境の悪化を防ぐ。 - 塗布面に塗膜を形成しないため、内部からの水分逸散は阻害しない。 - 施工後もコンクリート表面の外観を変えないため、以後のモニタリングが容易である。 【短所】 - あくまで劣化因子を遮断することを目的としており、鉄筋腐食そのものを抑制するものではない。 - 一般的に、中性化の抑制効果は低いとされている。
総合評価	- 劣化因子の遮断を目的とした工法であり、劣化因子の浸入抑制効果は 4 案中最も高い。 - 以後のモニタリング性の要求が高い場合が適用性に劣る。 - コンクリート内部の水分を閉じ込める可能性があるため、適用部位には注意が必要となる。	- 主として劣化因子の浸入低減を目的とした工法であり、鉄筋腐食が当面は懸念されないような条件下での予防保全として適する。 - ただし、劣化原因に中性化が含まれる場合には注意が必要となる。

図 4-1 塩害補修工法比較表の例

第3案 表面含浸工(けい酸ナトリウム系)	第4案 表面含浸工(亜硝酸リチウム系+シラン・シロキサン系)
	
【目的】 ・外部からの劣化因子の浸入を抑制 【概要】 ・けい酸ナトリウムが浸透したコンクリート表層部は組織が緻密化されるため、以後の塩化物イオン、水分などの劣化因子の浸入が抑制される。 【施工手順】 ・コンクリート表面を下地処理した後、コンクリート表面にけい酸ナトリウム系表面含浸材を塗布し、コンクリート内部へ含浸させる。 ・塗布含浸の後、散水養生を行う。	【目的】 ・外部からの劣化因子の浸入を抑制 ・将来的な鉄筋腐食の抑制 【概要】 ・シラン・シロキサン系含浸材によりコンクリート表層部に撥水効果が付与され、水分や塩化物イオンの侵入が抑制される。 ・亜硝酸リチウムがコンクリート中に浸透して鉄筋位置に到達すれば不動態皮膜が再生され、鉄筋腐食が抑制される。 【施工手順】 ・コンクリート表面を下地処理した後、コンクリート表面に亜硝酸リチウム系表面含浸材を塗布し、コンクリート内部へ含浸させる。 ・次にシラン・シロキサン系表面含浸材を塗布し、コンクリート内部へ含浸させる。
【長所】 ・外部からの塩化物イオン、水分などの劣化因子浸入を抑制することによって、以後の鉄筋腐食環境の悪化を防ぐ。 ・塗布面に塗膜を形成しないため、内部からの水分逸散は阻害しない。 ・施工後もコンクリート表面の外観を変えないため、以後のモニタリングが容易である。 【短所】 ・あくまで劣化因子を遮断することを目的としており、鉄筋腐食そのものを抑制するものではない。	【長所】 ・劣化因子の浸入抑制にとどまらず、亜硝酸リチウムによる将来的な鉄筋腐食抑制効果も付与することができる。 ・塗布面に塗膜を形成しないため、内部からの水分逸散は阻害しない。 ・施工後もコンクリート表面の外観を変えないため、以後のモニタリングが可能である。 【短所】 ・他の表面含浸工法に比べ、作業工程が1工程増える。
・主として劣化因子の浸入低減を目的とした工法であり、鉄筋腐食が当面は懸念されないような条件下での予防保全として適する。	・劣化因子の浸入低減のみならず、鉄筋腐食そのものの抑制効果まで考慮できる表面含浸工法であり、将来的に鉄筋腐食が懸念される環境下での予防保全として適する。

(劣化程度が軽微な場合)

(2)劣化程度が重篤な場合の例(根本的な対策)

条件

- 対象構造物 : 栈橋 RC 床版
環境 : 海岸線から 300m に位置し、飛来塩分の影響を受ける
試験値 : 塩化物イオン濃度 4.5kg/m^3
外観変状 : 幅 0.5～1.0mm 程度のひび割れが見られる
ひび割れの一部からはさび汁の滲出が認められる
コンクリートの浮き、剥離が生じている
鉄筋腐食 : 鉄筋は著しく腐食しており、一部には断面減少箇所も認められる



補修工法選定の方針

腐食発生限界を大きく超えた塩化物イオンの影響により鉄筋不動態皮膜が破壊され、著しい鉄筋腐食が生じている。ここで劣化因子を遮断しても鉄筋腐食の進行を止めることは困難であり、再劣化のリスクが高いと考えられる。

⇒ 主たる要求性能は【鉄筋腐食の抑制】を第一に考える

鉄筋腐食を根本的に抑制する工法として、電気防食工法、亜硝酸リチウム内部圧入工法が挙げられる。これらの工法の適用によって、以後の維持管理における再劣化リスクを低減できる。

これらの方針を考慮した補修工法比較表の例を図 4-2 に示す。

ここで劣化因子の遮断を目的とした補修工法（ひび割れ注入、表面被覆など）を適用する場合は、以後の維持管理において構造物の再劣化を許容し、再劣化と再補修を繰り返すというシナリオを選択することとなる。

【塩害補修工法比較表の例（劣化程度が重篤な場合）】

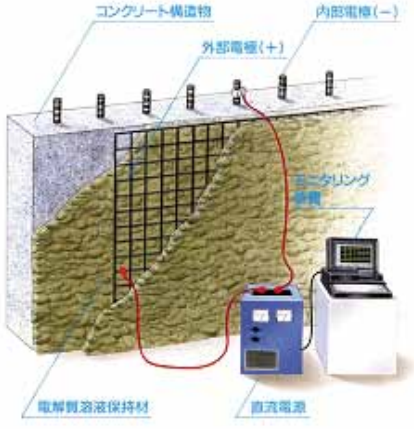
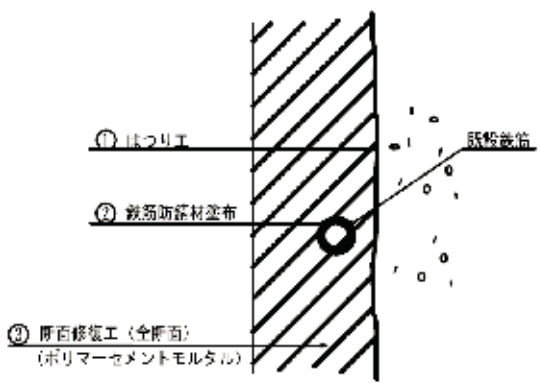
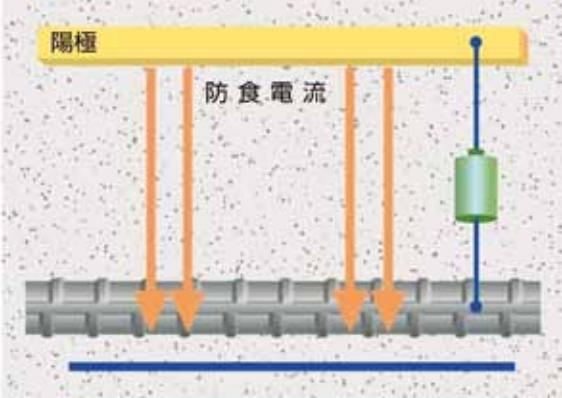
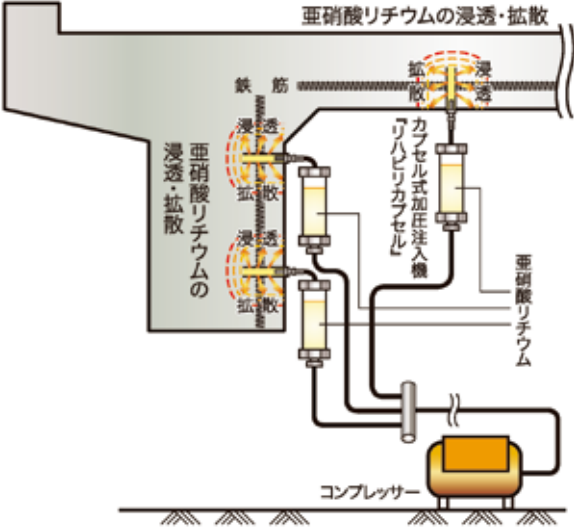
	第1案 電気化学的脱塩工法	第2案 全断面修復工法
概念図		
工法概要	【目的】 - 劣化因子（塩化物イオン）の除去 【概要】 - コンクリート表面に仮設陽極を設置して通電することにより、コンクリート内部に存在する塩化物イオンを電気化学的に除去する。 【施工手順】 - 内部の鉄筋をはつり出し陰極とする。 - コンクリート表面に陽極材を設置し、鉄筋（陰極）と回路を形成して通電する。 - 通電量は $1\text{A}/\text{m}^2$ 程度、通電期間は 8 週間程度とする。 - 通電終了後、陽極材、配線などを撤去する。	【目的】 - 劣化因子（塩化物イオン）の除去 - コンクリート脆弱部の修復 【概要】 - コンクリート表層部を鉄筋背面側まではつり取り、鉄筋周囲の塩化物イオンをコンクリートごと除去する。 【施工手順】 - コンクリート表面をウォータージェットなどにより全面はつり取る。 - 露出させた鉄筋の表面を入念にケレンして防錆材を塗布した後、ポリマーセメントモルタル吹付工法により断面を修復する。
得失	【長所】 - コンクリートをはつることなく内部の塩化物イオンを除去することができる。 - 施工前後の塩化物イオン濃度を測定することにより、補修効果を定量的に評価することができる。 【短所】 - 除去可能な塩化物イオンはかぶり範囲のものに限定され、鉄筋背面側に存在する塩化物イオンには対処できない。 - 通電により発生する水素によって鋼材が水素脆化をおこす可能性があるため注意が必要となる。 - 小規模施工の場合には施工単価が割高になる。	【長所】 - 鉄筋周囲から塩化物イオンを完全に除去できる。 【短所】 - はつり取る範囲はコンクリートの浮き、はく離が生じている範囲だけでなく、全断面とするため、施工時に大断面が欠損した状態となる。
総合評価	- 塩分が腐食発生限界濃度を超過して存在しているものの、鉄筋腐食がまだそれほど進行していない現段階で塩分を除去できれば、それ以降の鉄筋腐食は抑制できる。 - ただし、脱塩工法で除去できる塩化物イオンは鉄筋かぶり範囲のみであり、鉄筋背面側の塩化物イオンは除去できないため、深さ方向の塩化物イオン濃度分布を見て適用可能範囲を定める必要がある。	- 浮き、はく離箇所だけでなく、塩化物イオンを含むコンクリート全面を断面修復することにより、それ以降の鉄筋腐食を抑制できる。 - ただし、供用中のコンクリート構造物の大断面欠損状態となるため、部位、部材の構造特性を十分考慮して適用の可否を検討する必要がある。

図 4-2 塩害補修工法比較表の例

第3案 電気防食工法	第4案 亜硝酸リチウム内部圧入工法
	
【目的】 - 鉄筋腐食の抑制 【概要】 - コンクリート表面に陽極材を設置して通電し、防食電流を流すことによってコンクリート中の鉄筋の腐食反応を電気化学的に抑制する。 - 通電期間中は鉄筋腐食が生じないため、塩害による劣化は進行しない。 【施工手順】 - 内部の鉄筋をはつり出し陰極とする。 - コンクリート表面に陽極材を設置し、鉄筋(陰極)と回路を形成する。 - 通電により防食電流を流し、鉄筋腐食反応を停止させる。 - 通電量は $1\text{mA}/\text{m}^2$ 程度で、残存供用期間を通して通電する。	【目的】 - 鉄筋腐食の抑制 【概要】 - 浸透拡散型亜硝酸リチウムをコンクリート表面層部(鉄筋付近)に内部圧入することによって、鉄筋周囲に急速に亜硝酸イオンを供給する。 - 亜硝酸イオンが鉄筋不動態被膜を再生し、以後の鉄筋腐食を抑制する。 【施工手順】 - コンクリートに $\phi 10\text{mm}$, $L=100\text{mm}$ の圧入孔を 500mm 間隔で削孔する。 - 浸透拡散型亜硝酸リチウムを充填したカプセル式圧入装置を全圧入孔設置し、コンプレッサーで加圧することによって亜硝酸リチウムを内部圧入する。 - 内部圧入完了後、圧入孔をグラウト充填する。
【長所】 - 鉄筋腐食反応そのものを停止させる工法であり、理論的な信頼性は最も高い。 - 塩化物イオンの有無が防食効果を左右しない。 - 内在塩分による塩害に対しても適用性が高い。 【短所】 - 本橋の残りの供用期間を通じて通電し続ける必要があるため、電源装置や回路設備などの定期的な点検、メンテナンス、取り替え、電気代などの費用が発生する。 - 陽極材の耐用年数が $20\sim 25$ 年程度といわれており、その時点で再び電気防食工事を実施する必要がある。	【長所】 - 短期間で亜硝酸リチウムを確実に鉄筋位置に供給できるため、不動態被膜再生効果が直ちに発揮され、以後の鉄筋腐食を抑制できる。 - 塩化物イオン量に応じて亜硝酸リチウム必要量を定量的に定める。 - 内在塩分による塩害に対しても適用性が高い。 【短所】 - 新工法であるため、他案に比べて施工実績が少ない。
- 高濃度の塩化物イオン存在下であっても、以後の鉄筋腐食を確実に抑制できるため、塩害による鉄筋腐食抑制としての適用性は高い。 - ただし、適用にあたっては電気防食システムのメンテナンスやランニングコストを想定した維持管理計画を立案しておく必要がある。	高濃度の塩化物イオン存在下であっても、塩化物イオン量に応じて亜硝酸リチウム必要量を算出するため、塩害による鉄筋腐食抑制としての適用性は高い。

(劣化程度が重篤な場合)

4. 2 ASR の補修工法選定事例

(1) 残存膨張量が小さい場合

条件

- 対象構造物 : RC 擁壁
環境 : 平野部、建設後 35 年経過
試験値 : コンクリート圧縮強度 22.0N/mm^2 、静弾性係数 8.9kN/mm^2
残存膨張量 0.021% (JCI-DD2 法 ; 13 週)
外観変状 : 幅 $0.2\sim 3.0\text{mm}$ 程度のひび割れが擁壁表面全体に見られる



補修工法選定の方針

ASR 補修の基本は劣化因子（水分）の遮断であるため、まずはひび割れ注入工と表面保護工（表面含浸工、表面被覆工）の適用を検討する。ただし、これらの工法を適用した構造物において再劣化が生じたケースが多数報告されている。その理由は、完全な水分遮断ができなかった場合や、ASR の残存膨張性が高かった場合などであることが多い。すなわち、劣化因子の遮断を主目的とする補修工法が適用できる条件は、水分の遮断が十分に見込める場合か、残存膨張性が低い場合となる。

⇒ 主たる要求性能は【劣化因子の遮断】とする

ただし、ASR 膨張が完全に収束しているか否かを判定することは容易ではないため、単なる劣化因子の遮断だけでなく、ASR ゲルの非膨張化を部分的にでも加味した補修工法を選定しておくことが望ましい。

これらの方針を考慮した補修工法選定比較表の例を図 4-3 に示す。

【ASR 補修工法比較表の例（残存膨張量が小さい場合）】

	表面含浸工法	
	第1案 表面含浸工(シラン系) + ひび割れ注入工(エポキシ樹脂系)	第2案 表面含浸工(亜硝酸リチウム+シラン・シロキサン系) + ひび割れ注入工(亜硝酸リチウム+超微粒子セメント系)
概念図		
工法概要	【目的】 ・劣化因子(水分)浸入の抑制 【概要】 ・ひび割れ注入工にてひび割れを閉塞するとともに、シラン系表面含浸工にてコンクリート表面に撥水層を形成し、水分の浸入を抑制する。 【施工手順】 ・幅 0.2mm 以上のひび割れに対し、ひび割れ追従性のある注入材(エポキシ樹脂3種)を注入する。 ・コンクリート表面に下地処理を行った後、シラン系表面含浸材を塗布し、コンクリート内部へ含浸させる。	【目的】 ・劣化因子(水分)浸入の抑制 ・ASR ゲルの非膨張化(表層部のみ) 【概要】 ・ひび割れ注入工にてひび割れを閉塞するとともに、シラン・シロキサン系表面含浸工にてコンクリート表面に撥水層を形成し、水分の浸入を抑制する。 ・ひび割れ注入材、表面含浸材の使用材料に、ASR 膨張抑制効果のある亜硝酸リチウムを併用する。 【施工手順】 ・幅 0.2mm 以上のひび割れに対し、浸透拡散型亜硝酸リチウムを先行注入した後、超微粒子セメント系注入材を注入する。 ・コンクリート表面に下地処理を行い、コンクリート表面に亜硝酸リチウム系表面含浸材、シラン・シロキサン系表面含浸材の順で塗布含浸させる。
得失	【長所】 ・シラン系表面含浸材は被膜を生成せず、細孔を埋めることがないため、内部からの水蒸気透過を阻害しない。 ・エポキシ樹脂注入材 3 種は、以後の多少のひび割れ進展に対して追従性がある。 ・施工後もコンクリート表面の外観を変えないため、以後のモニタリングが容易である。 【短所】 ・期待されるのはあくまで水分の浸入抑制であり、ASR 膨張そのものを抑制する効果はない。 ・水分の遮断性は表面被覆工法よりも劣る。	【長所】 ・ひび割れ注入工、表面含浸材による水分浸入抑制にとどまらず、各補修材に併用した亜硝酸リチウムがコンクリート表層部の ASR 膨張性を低減させる。 ・シラン・シロキサン系含浸材は皮膜を形成しないため、内部からの水蒸気透過を阻害しない。 ・施工後もコンクリート表面の外観を変えないため、以後のモニタリングが容易である。 【短所】 ・ひび割れ注入材にひび割れ追従性はない。 ・水分の遮断性は表面被覆工法よりも劣る。
総合評価	・主として水分の浸入抑制のための工法であり、以後の ASR 膨張性が小さい場合には適用性が高い。 ・以後のモニタリングも容易であり、補修後の経過観察と併せて適用される。	・水分の浸入抑制のみならず、ASR 膨張抑制効果も併せ持つ工法であるため、単なる水分浸入抑制のみの工法に比べて、以後の ASR 膨張の進行を低減することも期待できる。 ・以後のモニタリングも容易であり、補修後の経過観察と併せて適用される。

図 4-3 ASR 補修工法比較表の例

表面被覆工法	
第3案 表面被覆工(有機系被覆材) + ひび割れ注入工(エポキシ樹脂系)	第4案 表面被覆工(亜硝酸リチウム+無機系被覆材) + ひび割れ注入工(亜硝酸リチウム+超微粒子セメント系)
【目的】 - 劣化因子(水分)浸入の遮断 【概要】 - ひび割れ注入工にてひび割れを閉塞するとともに、コンクリート表面に有機系表面被覆材を塗布し、外部からの水分浸入を遮断する。 【施工手順】 - 幅 0.2mm 以上のひび割れに対し、ひび割れ追従性のある注入材(エポキシ樹脂3種)を注入する。 - コンクリート表面を下地処理し、必要に応じて不陸修正を行う。 - プライマー塗布後、エポキシ樹脂系下塗り材1層、アクリルゴム系中塗り材3層、アクリルウレタン系上塗り材2層をローラーで塗り重ね、表面保護層を形成する。	【目的】 - 劣化因子(水分)浸入の遮断 - ASR ゲルの非膨張化(表層部のみ) 【概要】 - ひび割れ注入工にてひび割れを閉塞するとともに、コンクリート表面に無機系表面被覆材を塗布し、外部からの水分浸入を遮断する。 【施工手順】 - 幅 0.2mm 以上のひび割れに対し、浸透拡散型亜硝酸リチウムを先行注入した後、超微粒子セメント系注入材を注入する。 - コンクリート表面に下地処理を行い、コンクリート表面に亜硝酸リチウム系表面含浸材を塗布した後、亜硝酸リチウム含有ポリマーセメントペーストを2mm 厚で塗布し、最後に高分子系浸透性防水材を塗布する。
【長所】 - 表面被覆工法は表面含浸工法に比べて劣化因子の遮断性に優れる。 - エポキシ樹脂注入材3種および柔軟型被覆材は、以後の多少のひび割れ進展に対して追従性がある。 【短所】 - 期待されるのはあくまで水分の浸入抑制であり、ASR 膨張そのものを抑制する効果はない。 - 遮水性の高い材料であるため、コンクリート内部からの水分を外に出すことはできない。 - 被覆材にてコンクリート表面が覆われるため、以後のモニタリングは困難となる。	【長所】 - ひび割れ注入工、表面被覆材による水分浸入抑制にとどまらず、各補修材に併用した亜硝酸リチウムがコンクリート表層部の ASR 膨張性を低減させる。 - 表面被覆工法は含浸工法に比べて水分の遮断性が高い。 【短所】 - ひび割れ注入材、表面被覆材にひび割れ追従性はない。 - 被覆材にてコンクリート表面が覆われるため、以後のモニタリングは困難となる。
- 主として水分の浸入遮断のための工法であるが、各補修材料にひび割れ追従性のある材料を使用するため、以後の ASR 膨張が進展する場合でも再劣化が表面化しにくい。 - コンクリート内部に水分を閉じ込める可能性があるため、適用部位には注意が必要となる。	- 水分の浸入遮断のみならず、ASR 膨張抑制効果も併せ持つ工法であるため、単なる水分浸入抑制のみの工法に比べて、以後の ASR 膨張の進行を低減することも期待できる。 - 以後のモニタリング性よりも水分浸入の遮断性の要求が高い場合は適用性が高い。

(残存膨張量が小さい場合)

(2) 残存膨張量が大きい場合

条件

対象構造物	: RC 橋台
環境	: 平野部、建設後 30 年経過
試験値	: コンクリート圧縮強度 28.0N/mm ² 、静弾性係数 12.8kN/mm ² 残存膨張量 0.081% (JCI-DD2 法 ; 13 週)
外観変状	: 幅 0.2~6.0mm 程度のひび割れが橋台躯体表面全体に見られる



補修工法選定の方針

ASR 補修の基本となる劣化因子の遮断を主目的とする補修工法が適用できる条件は、水分の遮断が十分に見込める場合か、残存膨張性が低い場合となる。本橋のように背面からの水分侵入を遮断することが困難で、かつ残存膨張性が高い場合には、劣化因子の遮断を主目的とする補修工法を適用しても再劣化のリスクが高いと考えられる。

⇒ 主たる要求性能は【ゲルの非膨張化】とする

ASR ゲルを非膨張化する工法として亜硝酸リチウム内部圧入工法が挙げられ、この工法を適用することによって以後の維持管理における再劣化リスクを低減できる。

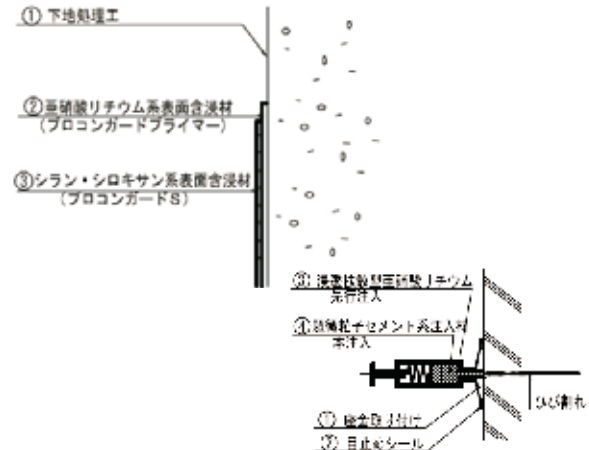
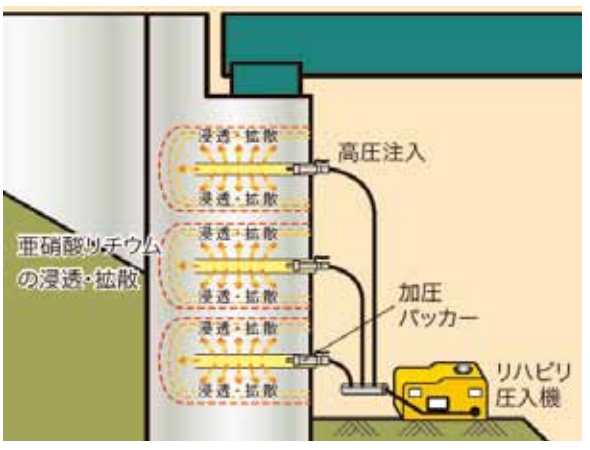
これらの方針を考慮した補修工法選定比較表の例を図 4-4 に示す。

ここで劣化因子の遮断を目的とした補修工法（ひび割れ注入、表面被覆など）を適用する場合は、以後の維持管理において構造物の再劣化を許容し、再劣化と再補修を繰り返すというシナリオを選択することとなる。

【ASR 補修工法比較表の例（残存膨張量が大きい場合）】

	再劣化と再補修を繰り返す維持管理シナリオ	
	第 1 案 表面被覆工(有機系被覆材) + ひび割れ注入工(エポキシ樹脂系)	第 2 案 表面含浸工(シラン系) + ひび割れ注入工(エポキシ樹脂系)
概念図		
工法概要	【目的】 - 劣化因子(水分)浸入の遮断 【概要】 - ひび割れ注入工法にてひび割れを閉塞するとともに、コンクリート表面に有機系表面被覆材を塗布し、外部からの水分浸入を遮断する。 【施工手順】 - 幅 0.2mm 以上のひび割れに対し、ひび割れ追従性のある注入材(エポキシ樹脂3種)を注入する。 - コンクリート表面を下地処理し、必要に応じて不陸修正を行う。 - プライマー塗布後、エポキシ樹脂系下塗り材 1 層、アクリルゴム系中塗り材 3 層、アクリルウレタン系上塗り材 2 層をローラーで塗り重ね、表面保護層を形成する。	【目的】 - 劣化因子(水分)浸入の抑制 【概要】 - ひび割れ注入工法にてひび割れを閉塞するとともに、シラン系表面含浸工法にてコンクリート表面に撥水層を形成し、水分の浸入を抑制する。 【施工手順】 - 幅 0.2mm 以上のひび割れに対し、ひび割れ追従性のある注入材(エポキシ樹脂3種)を注入する。 - コンクリート表面に下地処理を行った後、シラン系表面含浸材を塗布し、コンクリート内部へ含浸させる。
得失	【長所】 - 表面被覆工法は表面含浸工法に比べて劣化因子の遮断性に優れる。 - エポキシ樹脂注入材 3 種および柔軟型被覆材は、以後の多少のひび割れ進展に対して追従性がある。 【短所】 - 期待されるのはあくまで水分の浸入抑制であり、ASR 膨張そのものを抑制する効果はないため、ASR 膨張性は高いまま維持される。 - 遮水性の高い材料であるため、コンクリート内部からの水分を外に出すことはできない。 - 被覆材にてコンクリート表面が覆われるため、以後のモニタリングは困難となる。 - 再劣化の度に圧縮強度や静弾性係数の低下が進み、残存耐久性は低下していく。 - 再補修の度に足場工等の仮設備が必要となる。	【長所】 - シラン系表面含浸材は被膜を生成せず、細孔を埋めることがないため、内部からの水蒸気透過を阻害しない。 - エポキシ樹脂注入材 3 種は、以後の多少のひび割れ進展に対して追従性がある。 - 施工後もコンクリート表面の外観を変えないため、以後のモニタリングが容易である。 【短所】 - 期待されるのはあくまで水分の浸入抑制であり、ASR 膨張そのものを抑制する効果はない。 - 水分の遮断性は表面被覆工法よりも劣る。 - 再劣化の度に圧縮強度や静弾性係数の低下が進み、残存耐久性は低下していく。 - 再補修の度に足場工等の仮設備が必要となる。
総合評価	- 水分浸入遮断により ASR 進行を遅らせる対処療法的な工法であり、ASR 膨張性自体を低減することはできないため、再劣化することを想定した維持管理シナリオの下で適用される。 - コンクリート内部に水分を閉じ込めてしまい、ASR を助長した事例もあるため、適用部位には注意が必要となる。	- 水分浸入抑制により ASR 進行を遅らせる対処療法的な工法であり、ASR 膨張性自体を低減することはできないため、再劣化することを想定した維持管理シナリオの下で適用される。 - 以後のモニタリングは容易であり、補修後の経過観察と併せて適用される。

図 4-4 ASR 補修工法比較表の例

	再劣化を許容しない維持管理シナリオ
第3案 表面含浸工(亜硝酸リチウム+シラン・シロキサン系) + ひび割れ注入工(亜硝酸リチウム+超微粒子セメント系)	第4案 亜硝酸リチウム内部圧入工
	
【目的】 ・劣化因子(水分)浸入の抑制 ・ASRゲルの非膨張化(表層部のみ) 【概要】 ・ひび割れ注入工法にてひび割れを閉塞するとともに、シラン・シロキサン系表面含浸工法にてコンクリート表面に撥水層を形成し、水分の浸入を抑制する。 ・ひび割れ注入材、表面含浸材の使用材料に、ASR膨張抑制効果のある亜硝酸リチウムを併用する。 【施工手順】 ・幅 0.2mm 以上のひび割れに対し、浸透拡散型亜硝酸リチウムを先行注入した後、超微粒子セメント系注入材を注入する。 ・コンクリート表面に下地処理を行い、コンクリート表面に亜硝酸リチウム系表面含浸材、シラン・シロキサン系表面含浸材の順で塗布含浸させる。	【目的】 ・ASRゲルの非膨張化(全体) 【概要】 ・ひび割れ注入工法にてひび割れを閉塞した後、小径の圧入孔を削孔し、そこから浸透拡散型亜硝酸リチウムをコンクリート全体に内部圧入する。 ・コンクリート全体に亜硝酸リチウムを浸透させることにより、全ての ASR ゲルを非膨張化し、以後の ASR 進行を根本的に抑制する。 【施工手順】 ・ひび割れに対しては、事前にひび割れ注入工および表面シール工にて処理する。 ・ダイヤモンドコアドリルにてφ20mm の圧入孔を 750mm 間隔で削孔する。 ・油圧式内部圧入装置を用いて浸透拡散型亜硝酸リチウムをコンクリート全体に内部圧入し、圧入孔を無収縮グラウト材にて埋め戻す。
【長所】 ・ひび割れ注入工、表面含浸材による水分浸入抑制にとどまらず、各補修材に併用した亜硝酸リチウムがコンクリート表層部の ASR 膨張性を低減させる。 ・シラン・シロキサン系表面含浸材は被膜を生成せず、細孔を埋めることがないため、内部からの水蒸気透過を阻害しない。 ・施工後もコンクリート表面の外観を変えないため、以後のモニタリングが容易である。 【短所】 ・ひび割れ注入材にひび割れ追従性はない。 ・水分の遮断性は表面被覆工法よりも劣る。	【長所】 ・亜硝酸リチウムをコンクリート全体に浸透させることにより、コンクリート内の全ての ASRゲルを非膨張化できるため、以後の ASR 膨張を根本的に抑制できる。 ・ASR 抑制効果が水分供給の有無に左右されないため、水分供給を完全に遮断できない条件下でも十分に ASR 膨張抑制効果を期待できる。 ・補修後の ASR 進行を想定しないため再補修が不要となり、LCC で比較すると安価となる。 【短所】 ・施工工種が多く、施工日数が長い。 ・イニシャルコストだけで比較すると他案よりも高価となる。
・水分の浸入抑制のみならず、ASR 膨張抑制効果も併せ持つ工法であるため、単なる水分浸入抑制のみの工法に比べて、以後の ASR 膨張の進行を低減することも期待できる。 ・再劣化することを想定した維持管理シナリオの下で適用される工法であるが、再劣化までの期間を延命することが期待される。 ・以後のモニタリングも容易であり、補修後の経過観察と併せて適用される。	・亜硝酸リチウムによる ASRゲルの非膨張化を最も積極的に図る工法であり、ASR 膨張を根本的に抑制できる唯一の工法である。 ・残存膨張性が高い構造物に対しても適用性が高く、再劣化を許容しない構造物への適用が効果的である。

(残存膨張量が大さい場合)

5. 亜硝酸リチウムを用いた補修工法の施工事例

5.1 各工法の施工手順

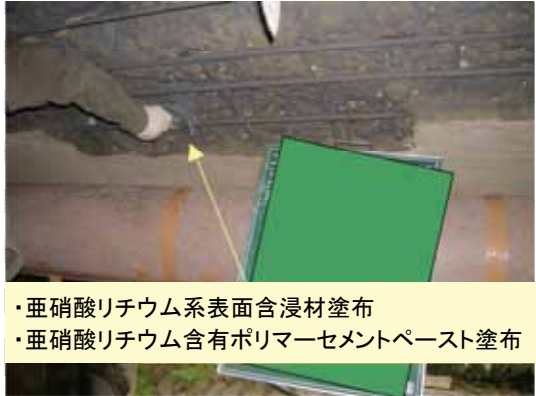
(1) 塩害で劣化した PC 上部工の補修(表面含浸工)

施工概要	
【対象構造物】	塩害環境にある道路橋（上部工）
【劣化状況】	ひび割れ
【塩害の抑制方針】	①劣化因子（ Cl^- ）の遮断 ②鉄筋腐食の抑制
【補修工法の選定】	亜硝酸リチウム併用型表面含浸工法
施工状況写真	施工内容
	1. 下地処理工 ・コンクリート表面の汚れや油分などをディスクサンダーケレン、高圧洗浄により除去する。
	2. 亜硝酸リチウム塗布 ・コンクリート表面に亜硝酸リチウム系表面含浸材をローラーにて塗布する。 【使用材料の例】 表面含浸材：プロコンガードプライマー（亜硝酸リチウム系表面含浸材）
	3. 養生工 ・亜硝酸リチウム系表面含浸材を塗布が完了した後、十分な養生期間を置く。

施工状況写真	施工内容
	4. シラン・シロキサン系表面含浸材塗布 養生期間が経過した後、コンクリート表面にシラン・シロキサン系表面含浸材をローラーで塗布する。 【使用材料の例】 表面含浸材：プロコンガードS(シラン・シロキサン系表面含浸材)
	5. 施工完了 - 亜硝酸リチウムが鉄筋腐食を抑制するとともに、シラン・シロキサン系含浸材によりコンクリート表層部に撥水効果が付与されるため、以後の水分浸入が抑制される。 - 無色透明の表面含浸材であるため、施工後も構造物の外観を変えない。

(2)塩害で劣化した RC 上部工の補修(断面修復工、表面被覆工)

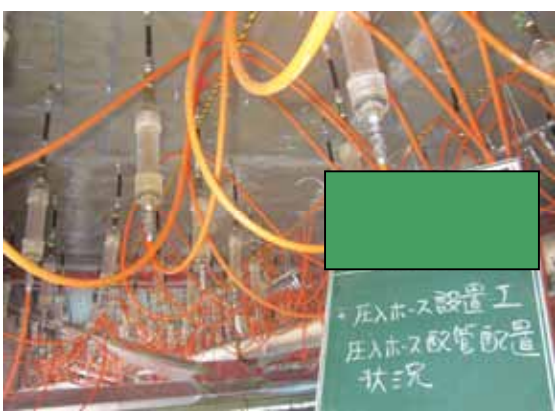
施工概要	
【対象構造物】	沿岸地域にある RC 上部工（床版橋下面）
【劣化状況】	コンクリートの浮き、剥離、鉄筋露出
【塩害の抑制方針】	①劣化因子（ Cl^- ）の遮断 ②鉄筋腐食の抑制
【補修工法の選定】	断面修復工法＋表面被覆工法（共に亜硝酸リチウム併用型）
施工状況写真	施工内容
	1. 着工前 － 劣化の状況 ・着工前は、床版橋下面の一部に鉄筋露出が見られた。 ・たたき点検の結果、斜線部の範囲にコンクリートの浮きが確認された。
	2. 断面修復工 － コンクリートはつり ・コンクリートの浮きが見られる脆弱な範囲を、電動ピックなどではつり取る。
	3. 断面修復工 － はつり完了 ・断面修復を行う範囲のはつり作業完了。 ・着工前の写真と比べると、コンクリートの浮きが生じていた範囲の鉄筋も、既に腐食していたことが分かる。

施工状況写真	施工内容
	4. 断面修復工 — 鉄筋ケレン ・腐食した鉄筋の表面をディスクサンダーなどでケレンし、入念に錆を落とす。
 ・亜硝酸リチウム系表面含浸材塗布 ・亜硝酸リチウム含有ポリマーセメントペースト塗布	5. 断面修復工 — 鉄筋防錆材塗布 ・鉄筋防錆材として、亜硝酸リチウム系表面含浸材と亜硝酸リチウム含有ポリマーセメントペーストを鉄筋表面に塗布する。 【使用材料の例】 プライマー：プロコンガードプライマー(亜硝酸リチウム系表面含浸材) 鉄筋防錆材：リハビリペースト(亜硝酸リチウム含有ポリマーセメントペースト)
亜硝酸リチウム含有ポリマーセメントモルタルをコテ塗り 	6. 断面修復工 — 断面修復 ・亜硝酸リチウムを混入したポリマーセメントモルタルを用い、左官工法で断面修復する。 【使用材料の例】 混和材：PSL-40(断面修復工法用亜硝酸リチウム40%水溶液) 断面修復材：(ポリマーセメントモルタル)
	7. 断面修復工完了 ・鉄筋周囲は亜硝酸リチウムを含有した防錆材とポリマーセメントモルタルで覆われているため、以後の鉄筋腐食反応が抑制される。

施工状況写真	施工内容
亜硝酸リチウム系表面含浸材を塗布 	8. 表面被覆工 — 亜硝酸リチウム塗布 ・断面修復完了後、修復範囲を含むコンクリート表面全体に亜硝酸リチウム系表面含浸材を塗布する。 【使用材料の例】 プライマー：プロコンガードプライマー(亜硝酸リチウム系表面含浸材)
	9. 表面被覆工 — 亜硝酸リチウム含有ポリマーセメントペースト塗布 ・亜硝酸リチウム含有ポリマーセメントペーストをコンクリート表面全体に塗布する。 【使用材料の例】 表面被覆材：リハビリペースト(亜硝酸リチウム含有ポリマーセメントペースト)
	10. 表面被覆工 — 上塗り ・高分子系浸透性防水材、アクリルゴム、アクリルウレタン系塗装材などを用いて上塗りを行い、亜硝酸リチウム含有ポリマーセメントペースト層を保護する。 【使用材料の例】 表面被覆材：アイゾール EX(高分子系浸透性防水材)
	11. 表面被覆工完了 ・表面被覆工により外部からの劣化因子(Cl^-)を遮断するとともに、既に腐食していた鉄筋は亜硝酸リチウムによって防錆効果が付与されている。

(3) 塩害で劣化した RC 床版の補修(内部圧入工)

施工概要	
【対象構造物】	内陸部にある鋼橋 RC 床版
【劣化状況】	コンクリートのひび割れ、鉄筋腐食 内在塩分による塩害
【塩害の抑制方針】	①鉄筋腐食の抑制
【補修工法の選定】	亜硝酸リチウム内部圧入工法（カプセル式）
施工状況写真	施工内容
	1. 着工前 — 劣化の状況 ・着工前は、床版下面にひび割れ、鉄筋露出が見られていた。 ・コンクリート内部まで塩化物イオンが高い濃度で分布しており、内在塩分による塩害であることが明らかになった。
	2. 表面漏出防止工(ひび割れ注入) ・亜硝酸リチウムの内部圧入時にコンクリート表面から漏出することのないように、幅 0.2mm 以上のひび割れに対し、超微粒子セメント系ひび割れ注入材を注入する。 【使用材料の例】 ひび割れ注入材：アーマ#600(超微粒子セメント系ひび割れ注入材)
	3. 表面漏出防止工(表面シール) ・同様に、幅 0.2mm 未満の微細なひび割れやコンクリート表面のジャンカなどに対し、ポリマーセメントモルタルで表面シールを行う。 【使用材料の例】 表面シール材：(NS ポリマーミックス#5)

施工状況写真	施工内容
	4. 鉄筋探査工 ・圧入孔の削孔時に既存の鉄筋を損傷させないように、コンクリート全面の鉄筋探査を行い、鉄筋位置を把握する。
	5. 圧入孔削孔 ・亜硝酸リチウムの圧入孔として、水循環式ハンドドリルで $\phi 10\text{mm}$ の削孔を行う。 ・削孔深さは 75～250mm 程度とする。 ・削孔間隔は 500mm を標準とする。
 ・加圧パッカー(圧入用治具)	6. 加圧パッカー設置工 ・全圧入孔に加圧パッカーを設置する。
 ・圧入ホース設置工 圧入ホース配管配量状況	7. リハビリカプセル設置工 ・加圧パッカーにカプセル式加圧注入器(リハビリカプセル)を設置し、圧入ホースと接続する。 ・圧入ホースは分配器を介してコンプレッサーと接続する。

施工状況写真	施工内容
	8. 内部圧入工 ・全圧入孔に設計で求めた亜硝酸リチウム必要量を内部圧入する。 ・圧入対象はコンクリート表層部 100～200mm とし、鉄筋かぶりに応じて設計する。 【使用材料の例】 亜硝酸リチウム：プロコン 40(浸透拡散型亜硝酸リチウム 40%水溶液)
	9. 圧入孔充填工 ・圧入完了後、エポキシ樹脂または無収縮グラウト材にて圧入孔を充填する。
	10. 表面保護工 ・コンクリート内部への劣化因子の侵入抑制のため、表面含浸工または表面被覆工による表面保護を行う。 【使用材料の例】 表面被覆材：アイゾール EX(高分子系浸透性防水材)
	11. 施工完了 ・内部圧入工により、RC 床版全体の鉄筋周囲に亜硝酸イオンが供給され、以後の鉄筋腐食が抑制された状態となっている。

(4) ASR で劣化した橋台の補修(内部圧入工)

施工概要	
【対象構造物】	橋台 (PC 単純床版橋)
【劣化状況】	亀甲状ひび割れ発生 (最大ひび割れ幅 6.0mm) 残存膨張量 : 0.15% (カナダ法)
【ASR の抑制方針】	アルカリシリカゲルの非膨張化
【補修工法の選定】	亜硝酸リチウム内部圧入工法 (油圧式)
施工状況写真	施工内容
	1. 着工前 — 劣化の状況 ・ ASR による亀甲状のひび割れが橋台躯体のほぼ全面に発生していた。 ・ 残存膨張量も大きく、今後とも有害な膨張の進展が見込まれる状況であった。
	2. 表面漏出防止工(ひび割れ注入) ・ 亜硝酸リチウムの内部圧入時にコンクリート表面から漏出しないように、幅 0.2mm 以上のひび割れに対し、超微粒子セメント系ひび割れ注入材を注入する。 【使用材料の例】 ひび割れ注入材 : アーマ#600(超微粒子セメント系ひび割れ注入材)
	3. 表面漏出防止工(表面シール) ・ 同様に、幅 0.2mm 未満の微細なひび割れやコンクリート表面のジャンカなどに対し、ポリマーセメントモルタルで表面シールを行う。 【使用材料の例】 表面シール材 : (NS ポリマーミックス#5)

施工状況写真	施工内容
	4. 鉄筋探査工 ・圧入孔の削孔時に既存の鉄筋を損傷させないように、コンクリート全面の鉄筋探査を行い、鉄筋位置を把握する。
	5. 圧入孔削孔 ・亜硝酸リチウムの圧入孔として、ダイヤモンドコアドリルで $\phi 20\text{mm}$ の削孔を行う。 ・削孔深さは部材厚-200mm を標準とする。(部材厚 $1,000\text{mm}$ のときの削孔深さは 800mm) ・削孔間隔は 750mm を標準とする。
	6. 圧入装置の設置 ・加圧パッカー、耐圧ホース、加圧装置を配置する。
	7. 試験加圧注入工 ・全孔を1孔ずつ試験的に加圧注入する。 ・この作業により、背面への漏出などの不適切な孔を検出し、対処する。 ・また、各孔の圧入速度を測定し、本加圧注入計画を立案する。 【使用材料の例】 亜硝酸リチウム：プロコン 40(浸透拡散型亜硝酸リチウム 40%水溶液)

施工状況写真	施工内容
	8. 本加圧注入工 ・全圧入孔に設計で求めた亜硝酸リチウム必要量を内部圧入する。 ・内部圧入作業中は、表面からの漏出の有無、累計圧入量、圧入速度を管理する。 【使用材料の例】 亜硝酸リチウム：プロコン 40(浸透拡散型亜硝酸リチウム 40%水溶液)
	9. 圧入孔充填工 ・亜硝酸リチウム必要量の圧入完了後、無収縮グラウト材で圧入孔を充填する。
	10. 表面保護工 ・内部圧入完了後、シール材のポリマーセメントモルタルを除去して表面含浸工または表面被覆工による表面保護を行う。 【使用材料の例】 表面被覆材：アイゾール EX(高分子系浸透性防水材)
	11. 施工完了 ・内部圧入工により、コンクリート部材全体にリチウムイオンが供給され、ASR 膨張性が抑制された状態となっている。 ・ASR 膨張抑制効果は、施工前後にコアを採取して残存膨張量試験を行い、両者を比較することで検証できる。

(5) ASR で劣化した擁壁の補修(ひび割れ注入工＋表面被覆工)

施工概要	
【対象構造物】	擁壁
【劣化状況】	亀甲状ひび割れ発生（最大ひび割れ幅 3.0mm）
【ASR の抑制方針】	①劣化因子（水分）の遮断 ②アルカリシリカゲルの非膨張化
【補修工法の選定】	ひび割れ注入工法＋表面被覆工法（共に亜硝酸リチウム併用型）
施工状況写真	施工内容
	1. 着工前 － 劣化の状況 ・擁壁コンクリートに亀甲状のひび割れが多数発生していた。
	2. ひび割れ注入工 － 高圧洗浄 ・コンクリート表面を高圧洗浄し、表面の汚れに隠れていたひび割れを顕在化させる。
	3. ひび割れ注入工 － 注入器設置 ・ひび割れに沿って、自動低圧注入器を 250mm 間隔で設置する。 ・注入器間のひび割れはポリマーセメントモルタルでシールする。

施工状況写真	施工内容
	4. ひび割れ注入工 － 先行注入 ・自動低圧注入器に亜硝酸リチウム水溶液を充填して先行注入し、ひび割れ面をプレウエッティングする。 ・ひび割れ内部に供給された亜硝酸リチウムは周囲のコンクリートに浸透する。 【使用材料の例】 亜硝酸リチウム：プロコン 40(浸透拡散型亜硝酸リチウム 40%水溶液)
	5. ひび割れ注入工 － 本注入 ・自動低圧注入器にセメント系ひび割れ注入材を充填して本注入し、ひび割れを閉塞させる。 【使用材料の例】 ひび割れ注入材：アーマ#600(超微粒子セメント系ひび割れ注入材)
	6. ひび割れ注入工 － 注入器撤去 ・注入器を撤去した後、ディスクサンダーなどでコンクリート表面を平滑に仕上げる。
	7. ひび割れ注入工完了 ・注入材でひび割れを閉塞したため、ひび割れからの水分浸入は遮断されている。 ・ひび割れ内部に亜硝酸リチウムを供給しているため、ひび割れ周辺のコンクリートはゲルが非膨張化される。

施工状況写真	施工内容
 亜硝酸リチウム系表面含浸材を塗布	8. 表面被覆工 — 亜硝酸リチウム系表面含浸材塗布 ・ひび割れ注入工完了後、コンクリート表面全体に亜硝酸リチウム系表面含浸材を塗布する。 【使用材料の例】 プライマー：プロコンガードプライマー(亜硝酸リチウム系表面含浸材)
 亜硝酸リチウム含有ポリマーセメントペーストをコテ塗り	9. 表面被覆工 — 亜硝酸リチウム含有ペースト塗布 ・亜硝酸リチウム含有ポリマーセメントペーストをコンクリート表面全体に塗布する。 【使用材料の例】 表面被覆材：リハビリペースト(亜硝酸リチウム含有ポリマーセメントペースト)
	10. 表面被覆工 — 上塗り ・高分子系浸透性防水材を用いて上塗りを行い、亜硝酸リチウム含有ポリマーセメントモルタル層を保護する。 【使用材料の例】 表面被覆材：アイゾール EX(高分子系浸透性防水材)
	11. 表面被覆工完了 ・表面被覆工により外部からの劣化因子(水分)を遮断するとともに、コンクリート表層部のゲルは亜硝酸リチウムによって非膨張化される。

5. 2 各工法の適用事例

(1) ひび割れ注入工法(リハビリシリンダー工法)の適用事例

名 称		堂ヶ原橋（リハビリシリンダー工法）	
用 途	橋梁補修	工 事 概 要	山間部に位置する本橋は、ASR と凍結防止剤に起因する塩害の複合劣化(再劣化)により、RC 床版と地覆にひび割れが多数生じていた。 足場設置後に既設塗膜既を撤去したところ、ひび割れ延長や断面修復数量は当初設計の2倍を超える数量であることが明らかになった。
発 注 者	広島市佐伯区土木課		
工事場所	広島市佐伯区五日市町		
工事時期	2011.12～2012.3		
劣化機構	ASR、塩害		
施工数量	橋台2基、地覆、床版 ひび割れ延長：422m		



座金取付状況



ひび割れシール状況



亜硝酸リチウム先行注入状況



無機系注入材本注入状況

名 称		針尾橋（リハビリシリンダー工法）	
用 途	橋脚フーチング補修	工 事 概 要	当初は一般工法による施工が計画されていたが、著しい塩害環境を考慮した技術提案として、施工時に亜硝酸リチウムを用いた補修工法へと変更された。 本事例では、ひび割れ注入工の後に内部圧入工(カプセル式)を施して鉄筋腐食を根本的に抑制した後、湿潤面用エポキシ防水材による表面被覆工が適用された。
発 注 者	長崎振興局		
工事場所	長崎県佐世保市指方町		
工事時期	2014.9～2014.11		
劣化機構	塩害		
施工数量	橋脚 3 基(フーチングのみ) ひび割れ延長：230m		



施工前



座金取付、ひび割れシール状況



ひび割れ注入状況



ひび割れ注入状況

名 称		岡の下橋（リハビリシリンダー工法）	
用 途	橋梁補修	工 事 概 要	中性化の進行により鉄筋腐食含浸が進行し、多数のひび割れが生じていた本橋に対し、単なるひび割れ補修を行うのではなく、そのひび割れを発生させた鉄筋腐食膨張そのものの進行を抑制するために、亜硝酸リチウム併用型ひび割れ注入工法が採用となった。
発 注 者	広島市		
工事場所	広島市佐伯区		
工事時期	2016.4～2016.8		
劣化機構	中性化		
施工数量	ひび割れ延長：280m		



ひび割れシール塗布状況



亜硝酸リチウム先行注入状況



無機系注入材本注入状況



施工完了

名 称	重井田地区洪水吐補修（リハビリシリンダー工法）		
用 途	その他	工 事 概 要	本構造物は ASR と中性化の複合劣化により多数のひび割れが生じていた。構造物の用途として水分供給されやすく、また乾湿を繰り返す使用条件となるため、ASR、中性化それぞれに対して過酷な劣化環境であった。そのため、ASR 膨張抑制および鉄筋腐食抑制効果を併せ持つひび割れ注入工法として本工法が採用となった。
発 注 者	長崎県中央振興局		
工事場所	長崎県大村市重井田町		
工事時期	2018.10～2019.3		
劣化機構	ASR、中性化		
施工数量	ひび割れ延長：2118m		



施工前



足場設置状況



亜硝酸リチウム先行注入状況



施工完了

(2)表面含浸工法(プロコンガードシステム/S)の適用事例

名 称		和食川水門函渠（プロコンガードシステム）	
用 途	函渠補修	工 事 概 要	河口部に位置する函渠に塩害による劣化が生じ、躯体表面にひび割れ、鉄筋露出などの変状が多数見られた。 本事例は、リハビリカプセル工法、リハビリ断面修復工法による塩害補修施工後の表面仕上げとして施工したものである。
発 注 者	高知県安芸土木事務所		
工事場所	高知県安芸郡芸西村		
工事時期	2013.1～2013.3		
劣化機構	塩害		
施工数量	函渠 2 ブロック 施工面積：285m ²		



施工前



プロコンガードプライマー塗布状況



プロコンガード塗布状況



施工完了

名 称		唐津港橋梁補修（プロコンガードシステム S）	
用 途	橋梁補修	工 事 概 要	塩害環境にある本橋に対し、劣化因子（塩化物イオン）の遮断および鉄筋腐食抑制の 2 つの効果を期待する表面含浸工法として本工法が採用となった。施工後には撥水試験も実施している。
発 注 者	佐賀県 唐津土木事務所		
工事場所	佐賀県 唐津		
工事時期	2019.4～2019.6		
劣化機構	塩害		
施工数量	桁下 施工面積：176 m ²		



プロコンガード S 塗布状況



施工完了



撥水検査状況



撥水状況

名 称		加与丁橋（プロコンガードシステム S）	
用 途	橋梁補修	工 事 概 要	ASR で劣化している本橋に対し、劣化因子（水分）の遮断および ASR 膨張抑制の 2 つの効果を期待する表面含浸工法として本工法が採用となった。施工後にも外観を変えないためモニタリング性にも優れる。
発 注 者	佐賀県佐賀市		
工事場所	佐賀県佐賀市		
工事時期	2019.4～2019.6		
劣化機構	ASR		
施工数量	桁下 施工面積：117 m ²		



下地処理状況



プロコンガードプライマー塗布状況



プロコンガード S 塗布状況



施工完了

(3)表面被覆工法(リハビリ被覆工法)の適用事例

名 称		農道整備工事（リハビリ被覆工法）	
用 途	ボックスカルバート補修	工 事 概 要	塩害環境にある本構造物に対し、劣化因子（塩化物イオン）の遮断および鉄筋腐食抑制の2つの効果を期待する表面被覆工法として本工法が採用となった。施工後は美観性も向上している。
発 注 者	呉市		
工事場所	大崎下島		
工事時期	2014.1～2014.3		
劣化機構	塩害		
施工数量	施工面積：53m ²		



施工前



リハビリペースト塗布状況



アイゾール EX 塗布状況



施工完了

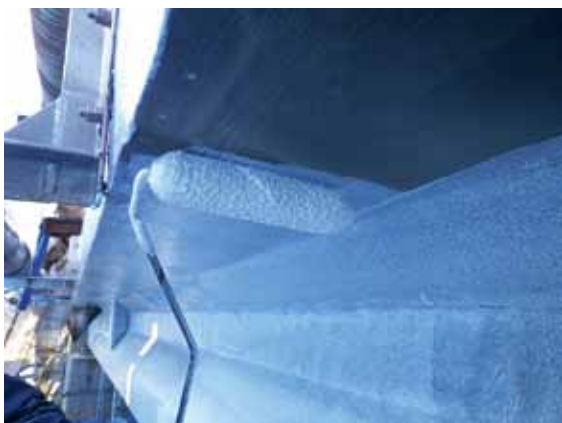
名 称		宮平橋（リハビリ被覆工法）	
用 途	橋梁補修	工 事 概 要	中性化の進行が懸念される本橋の補修として、劣化因子（二酸化炭素）の遮断および鉄筋腐食抑制の 2 つの効果を期待する表面被覆工法として本工法が採用となった。施工後は美観性も向上している。
発 注 者	庄原市		
工事場所	庄原市東城町		
工事時期	2015.11～2016.3		
劣化機構	中性化		
施工数量	橋梁上部工 橋梁下部工 施工面積：105m ²		



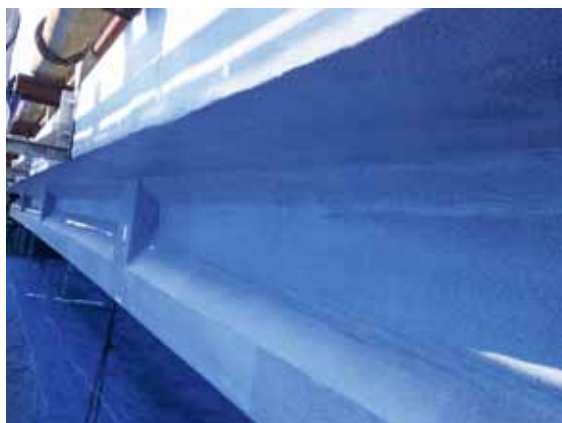
プロコンガードプライマー塗布状況



リハビリペースト塗布状況



アイゾール EX 塗布状況



施工完了

名 称	豊大橋（リハビリ被覆工法）		
用 途	橋梁補修	工 事 概 要	塩害環境にある本構造物に対し、劣化因子（塩化物イオン）の遮断および鉄筋腐食抑制の2つの効果を期待する表面被覆工法として本工法が採用となった。表面含浸工法と比べると以後のモニタリング性に劣るものの、劣化因子の遮断性では表面被覆工法のほうが確実に優れる。
発 注 者	広島県		
工事場所	呉市大崎下島		
工事時期	2016.11～2017.3		
劣化機構	塩害		
施工数量	橋梁上部工 施工面積：1040m ²		



下地処理完了



プロコンガードプライマー塗布状況



リハビリペースト塗布完了



アイゾール EX 塗布完了

名 称	横川橋（リハビリ被覆工法）		
用 途	橋梁補修	工 事 概 要	塩害および中性化の複合劣化の進行が懸念される本橋の補修として、劣化因子（塩化物イオン、二酸化炭素）の遮断および鉄筋腐食抑制の 2 つの効果を期待する表面被覆工法として本工法が採用となった。施工後は美観性も向上している。
発 注 者	広島市		
工事場所	広島市安佐北区		
工事時期	2017.12～2018.3		
劣化機構	塩害、中性化		
施工数量	橋梁上部工 施工面積：254m ²		



施工前



リハビリペースト塗布完了



アイゾール EX 塗布状況



施工完了

(4) 断面修復工法(リハビリ断面修復工法)の適用事例

名 称		野地橋（リハビリ断面修復工法）	
用 途	橋梁補修	工 事 概 要	中性化の進行による鉄筋腐食によってコンクリートに浮き、剥離が生じていた本橋の補修として、亜硝酸リチウム併用型断面修復工法が適用された。これにより、コンクリート脆弱部の修復だけでなく、鉄筋腐食そのものも抑制することが可能となる。
発 注 者	廿日市市		
工事場所	広島県廿日市市		
工事時期	2013.12～2014.3		
劣化機構	中性化		
施工数量	施工面積：13.5m ²		



はつり状況



プロコンガードプライマー塗布状況



リハビリペースト塗布状況



埋戻し状況

名 称		平和大橋（リハビリ断面修復工法）	
用 途	橋梁補修	工 事 概 要	塩害の進行による鉄筋腐食によってコンクリートに浮き、剥離が生じていた本橋の補修として、亜硝酸リチウム併用型断面修復工法が適用された。これにより、コンクリート脆弱部の修復だけでなく、鉄筋腐食そのものも抑制することが可能となる。
発 注 者	広島市		
工事場所	広島市中区		
工事時期	2014.3～2014.4		
劣化機構	塩害		
施工数量	施工面積：9.5m ²		



鉄筋ケレン状況



プロコンガードプライマー塗布状況



リハビリペースト塗布状況



埋戻し状況

名 称	横川橋（リハビリ断面修復工法）		
用 途	橋梁補修	工 事 概 要	塩害および中性化による鉄筋腐食によってコンクリートに浮き、剥離が生じていた本橋の補修として、亜硝酸リチウム併用型断面修復工法が適用された。これにより、コンクリート脆弱部の修復だけでなく、鉄筋腐食そのものも抑制することが可能となる。
発 注 者	広島市		
工事場所	広島市安佐北区		
工事時期	2017.12～2018.3		
劣化機構	塩害、中性化		
施工数量	施工面積：15m ²		



鉄筋ケレン状況



プロコンガードプライマー塗布状況



リハビリペースト塗布状況



埋戻し状況

(5)内部圧入工法(リハビリカプセル工法)の適用事例

名 称	一の宮橋（リハビリカプセル工法）		
用 途	RC 床版補修	工 事 概 要	鋼橋の RC 床版部に塩害による劣化が生じ、ひび割れ、コンクリート浮き、剥離、鉄筋露出が見られた。 塩化物イオン濃度の分布状況から内在塩分による塩害であると判明したため、劣化因子の遮断ではなく鉄筋腐食そのものを抑制するための工法を選定し、リハビリカプセル工法による亜硝酸リチウム内部圧入工が採用された。
発 注 者	鳥取県中部総合建設事務所		
工事場所	東伯郡湯梨浜町		
工事時期	2013.2～2013.7		
劣化機構	塩害		
施工数量	RC 床版 266.6m ² 塩化物イオン濃度：3.0kg/m ² ⇒亜硝酸リチウム圧入量：11.2kg/m ³	—	—



施工対象 RC 床版



鉄筋腐食状況(はつり出し)



リハビリカプセル設置状況



内部圧入工施工状況

名 称	加勢蛇橋（リハビリカプセル工法）		
用 途	橋脚補修	工 事 概 要	河川内に位置する橋脚が塩害により劣化しており、コンクリートの浮き、剥離等の著しい変状が見られた。河川内橋脚の補修には河川締切り等の仮設に多大な費用を要するため、再劣化と再補修を繰り返す維持管理シナリオが適さないと判断され、鉄筋腐食を根本的に抑制できる亜硝酸リチウム内部圧入工法（リハビリカプセル工法）が採用となった。
発 注 者	鳥取県中部総合事務所		
工事場所	鳥取県東伯郡琴浦町		
工事時期	2018.3～2018.4		
劣化機構	塩害		
施工数量	橋脚 3 基 塩化物イオン濃度 3.49kg/m ³	—	—
		—	—



全景



対象構造物



足場設置状況



内部圧入状況

名 称	本谷橋（リハビリカプセル工法）		
用 途	橋脚補修	工 事 概 要	耐震補強としてRC 巻立て工法が適用される本橋の橋脚であったが、詳細調査の結果塩害による劣化が確認された。既設鉄筋の腐食進行を放置したままRC 巻立てを実施すると将来的な劣化進行に対する対処ができなくなると懸念され、まず本工法により確実に鉄筋腐食を抑制した後に耐震補強を行った。
発 注 者	国土交通省四国整		
工事場所	愛媛県四国中央市		
工事時期	2019.2～2019.5		
劣化機構	塩害		
施工数量	橋脚 3 基 塩化物イオン濃度 5.06kg/m ³	—	—
		—	—



全 景



対象構造物



内部圧入状況



内部圧入状況

(6)内部圧入工法(ASRリチウム工法)の適用事例

名 称	陶橋（ASR リチウム工法）		
用 途	橋台補修	工 事 概 要	橋台前面に亀甲状ひび割れが多数発生していた。橋台背面側と伸縮継手位置からの水分侵入が著しく、完全な止水が困難であった。さらに残存膨張量も大きかったため、従来工法では早期に再劣化することが予測され、ASR リチウム工法が採用された。 9 年後の追跡調査でも再劣化がないことを確認している。
発 注 者	国土交通省四国地方整備局		
工事場所	香川県綾歌郡綾南町陶		
工事時期	2005.7～2005.12		
劣化機構	ASR		
施工数量	橋台 2 基 アルカリ総量：4.6kg/m ³ ⇒亜硝酸リチウム圧入量： 19.7kg/m ³	残存膨張量 (JCI-DD2)	施工前:0.081% 施工後:0.018%



施工前の劣化状況(2005 年)



施工後 9 年経過時(2014 年)



施工状況(圧入装置全景)



施工状況(注入状況)

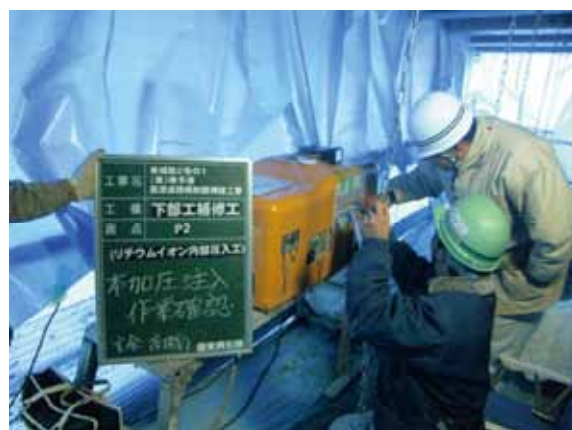
名 称	一ツ橋（ASR リチウム工法）		
用 途	橋脚、橋台補修	工 事 概 要	橋脚はり部に落橋防止装置を設置する計画であったが、設置するはり部に著しい ASR 劣化が生じていた。 来るべき大地震時に落橋防止装置が機能する際に、アンカー定着部と母材側のコンクリートとの付着が ASR 進行によって低下しないよう、耐震補強の効果を担保する目的で ASR リチウム工法を施工した。
発 注 者	愛媛県		
工事場所	愛媛県		
工事時期	2011 年度		
劣化機構	ASR		
施工数量	橋台 2 基 橋脚 2 基	残存膨張量 (JCI-DD2)	施工前： —
			施工後： —



全 景



施工前の劣化状況



内部圧入工施工状況



施工完了

名 称		湯村大橋（ASR リチウム工法、リハビリカプセル工法）		
用 途	橋台補修	工 事 概 要	本橋は A1 橋台、A2 橋台ともに ASR 劣化していたが、A2 橋台は残存膨張量が無害と判定されたため、ひび割れ注入工と表面含浸工のみで補修し、残存膨張量が有害な A1 橋台のみ亜硝酸リチウムを内部圧入した。 部材寸法に応じて最適な内部圧入工法を選定し、躯体たて壁部には ASR リチウム工法を、パラペット部にはリハビリカプセル工法が適用された。	
発 注 者	島根県雲南県土整備事務所			
工事場所	島根県雲南市木次町			
工事時期	2012.9～2012.12			
劣化機構	ASR			
施工数量	橋台 1 基 躯体たて壁：ASR リチウム工法 パラペット：リハビリカプセル工法	残存膨張量 (JCI－DD2)	施工前:0.065%	
			施工後:0.019%	



対象橋台全景



施工前の劣化状況



たて壁部施工状況：ASRリチウム工法



パラペット部施工状況：リハビリカプセル工法

対象部位に応じて圧入方法を選択

名 称		山内高架橋（ASR リチウム工法）	
用 途	橋台・橋脚補修	工 事 概 要	過去に ASR 補修として表面被覆工法（シート併用）が施工されていたが、塗膜の下で著しい再劣化が進行していた。 交通量の多い大規模な高架橋で、一部は JR を跨ぐ跨線橋となっている重要度の高い構造物であり、これ以上の再劣化を許容しないという維持管理シナリオが選択され、ASR リチウム工法が適用となった。 施工後の残存膨張量試験の結果、将来的な膨張性が低減されたことが示された。
発 注 者	佐賀県武雄土木事務所		
工事場所	佐賀県武雄市		
工事時期	2012.12～2013.10（3 工区計）		
劣化機構	ASR		
施工数量	1 工区：橋台 1 基、橋脚 9 基 2 工区：橋台 1 基、橋脚 13 基 3 工区：橋台 1 基、橋脚 8 基	残存膨張量 （JCI-DD2）	施工前:0.180% 施工後:0.012%



山内高架橋全景



過去の補修が再劣化

施工前の橋台たて壁再劣化状況



過去の補修が再劣化

施工前の再劣化状況（近接）



内部圧入工施工状況

名 称	柳川橋（ASR リチウム工法）		
用 途	橋台補修	工 事 概 要	橋台に塩害による劣化が生じ、躯体前面にひび割れ、さび汁滲出が見られた。
発 注 者	国土交通省中国地方整備局		塩化物イオン濃度の分布状況から内在塩分による塩害と判断し、躯体前面側の鉄筋だけでなく背面側の鉄筋も腐食抑制対象とした。リハビリカプセル工法では前面側の鉄筋のみしか対処できないため、躯体内全ての鉄筋に亜硝酸リチウムを供給可能な ASR リチウム工法を塩害対策工法に採用した。
工事場所	山口県防府市		
工事時期	2013.11～2014.2		
劣化機構	塩害		
施工数量	橋台 2 基 塩化物イオン濃度：2.4～2.7kg/m ² ⇒亜硝酸リチウム圧入量 ：9.0～10.1kg/m ³		



柳川橋全景



施工前状況（A2 橋台）

橋台の前面側だけでなく背面側の鉄筋も防錆対象とする



油圧式圧入装置



内部圧入工施工状況

名 称	厳城橋（ASR リチウム工法）		
用 途	橋脚補修	工 事 概 要	ASR で劣化しており、将来的な膨張進行性も高いと判定された本橋の橋脚に対し、ASR 膨張を根本的に抑制することを目的とした本工法が採用された。施工後の残存膨張量試験（カナダ法）では 14 日間で 0.085%と十分に小さい値を示しており、亜硝酸リチウムによって将来の膨張性が確実に抑制されたと判断できる。
発 注 者	鳥取県中部総合事務所		
工事場所	鳥取県倉吉市		
工事時期	2018.11～2019.3		
劣化機構	ASR		
施工数量	橋脚 2 基	残存膨張量 （カナダ法）	施工前： —
			施工後： 0.085%



全 景



対象構造物（梁部）



対象構造物（柱部）



内部圧入工施工状況

名 称	太陽橋（ASR リチウム工法）		
用 途	下部工補修	工 事 概 要	ASR で劣化している本橋の橋台、橋脚 に対し、単なるひび割れ注入工法や表面含 浸工法による対処療法ではなく、ASR 膨 張を根本的に抑制する本工法が採用とな った。前者は再劣化と再補修を繰り返す維 持管理シナリオ、後者は再劣化を許容しな いシナリオであり、本橋では後者の維持管 理シナリオが選択されたこととなる。
発 注 者	知夫村役場		
工事場所	島根県隠岐島		
工事時期	2018.11～2019.3		
劣化機構	ASR		
施工数量	橋台 1 基、橋脚 1 基	残存膨張量	施工前： —
		(JCI-DD2)	施工後： —



対象構造物(A1)



対象構造物(P1)



内部圧入工施工状況(A1)



内部圧入工施工状況(P1)

5.3 亜硝酸リチウムの安全性について

(1) 亜硝酸リチウムの化学薬品としての分類

亜硝酸リチウム 40%水溶液は、毒物、劇物には該当しません。

⇒ マウス経口投与による急性毒性試験を実施して確認されています

亜硝酸リチウムは化学薬品です。化学薬品は、一般的にその毒性により以下の3種類に分類されます。

- 毒物：急性毒性試験による LD₅₀ 値が 30mg/kg 以下のもの
- 劇物：急性毒性試験による LD₅₀ 値が 30～300mg/kg のもの
- 普通物：急性毒性試験による LD₅₀ 値が 300mg/kg 以上のもの

※LD₅₀・・・実験動物群の半数が死亡すると推定される投与量で、実験動物の体重 1kg あたりの投与物質 mg 量で表す。

亜硝酸リチウムの急性毒性試験（雄マウス、亜硝酸リチウム 40%水溶液経口投与）の結果、LD₅₀=419.3mg/kg であり、普通物の範囲である 300mg/kg 以上に相当します。従って、亜硝酸リチウム 40%水溶液は普通物に分類され、毒物、劇物には該当しないことになります。

（参考文献；「亜硝酸リチウム水溶液のマウスを用いる経口投与による急性毒性試験 試験報告書 1995 年 7 月 7 日 日産化学工業㈱」）

(2) 亜硝酸リチウムの安全性

亜硝酸リチウムは権威ある「危険・有害物質リスト」にリストアップされていません。

⇒ 亜硝酸は自然界にも普遍的に存在しています

⇒ リチウムは医療分野でも使用されています

亜硝酸リチウムは、表 5-1 の権威ある「危険・有害物質リスト」にリストアップされておらず、引火性、発火性、爆発性などはいずれもありません。

表 5-1 危険・有害物質リスト

機関	リスト名	発行
EU	危険な物質の分類、包装、表示に関する理事会指令	1997 年 4 月
(社)日本化学物質安全・情報センター	日本における化学物質の危険有害性分類－基準と物質リスト	1994 年 12 月
日本産業衛生学会	許容濃度などの勧告（1996）	1996 年

～亜硝酸イオンとして～

亜硝酸イオンは自然界では、動植物、肥料を由来とするアンモニア、硝酸などが酸化あるいは還元されて普遍的に存在しています（窒素の循環として広く知られています）。従って、亜硝酸イオンそのものは決して安定した状態ではなく、環境条件、微生物の作用などにより常に変化しています。亜硝酸イオンは、自然の河川水中に硝酸、アンモニアなどと同時に含まれており、亜硝酸性窒素として1ppm（亜硝酸として3ppm）程度含まれているとの報告もあります。亜硝酸ソーダは現在、食品添加物として使用されています。

～リチウムイオンとして～

リチウムはナトリウム、カリウムと同様のアルカリ金属イオンです。これらアルカリ金属イオンそのものに対する規制はなく、毒性や有害性は認められません。リチウムは、躁うつ病の改善効果があり、炭酸リチウムは治療薬として使用が許可されています。

(3) 亜硝酸リチウムの発がん性

亜硝酸リチウムは権威ある「発がん性物質リスト」にリストアップされていません。

⇒ ラットによる発がん性試験により安全性が確認されています

亜硝酸リチウムおよび亜硝酸塩は下記の権威ある国際機関、各国政府およびその他の機関による発がん性物質のリストにリストアップされていません。

1. IARC（国際癌研究機関）
2. (社)日本産業衛生学会
3. ACGIH（米国産業衛生専門家会議）
4. 米国EPA（環境保護庁）
5. 米国NTP（国家毒性プログラム）
6. EU（欧州連合）

亜硝酸リチウムの発がん性について、ラットを用いた動物実験が実施されています。ラットに飲料水中濃度0.125%、0.25%の亜硝酸ソーダを2年間投与したが、投与群と非投与群との間に有意差は認められなかったと報告されています。

(4) 亜硝酸リチウムに関連する法規制・基準など

亜硝酸リチウムの使用において遵守すべき規準

⇒ 水質汚濁防止法の排水基準などに対し、亜硝酸性窒素、硝酸性窒素として監視する必要があります

亜硝酸リチウム使用において遵守すべき法規制、基準として、環境省が定める「水質汚濁に関する環境基準」、「水質汚濁防止法の排水基準」などがあります。これらの基準の中では、「硝

酸性窒素」または「亜硝酸性窒素」としての濃度が規制されています。環境中の亜硝酸性窒素、硝酸性窒素は、工場排水、浄化槽排水、畜産事業所排水、一般家庭排水、農業用肥料に起因する排水など、多種多様な発生源から排出されています。亜硝酸リチウムを使用したコンクリート補修施工を行う場合には、対象構造物の立地条件や周辺環境に応じて、表 5-2 に示す法規制や基準類に定められた硝酸性窒素、亜硝酸性窒素量を超えることのないよう監視する必要があります。ちなみに、リチウムに関しては特に規制、基準はありません。

表 5-2 硝酸性窒素、亜硝酸性窒素の基準値

法規制・基準等	基準値	備考
水道水質基準	亜硝酸性窒素 ： 0.05mg/ℓ	飲料水としての基準値
水質汚濁に関する環境基準	亜硝酸性窒素及び硝酸性窒素 ： 10mg/ℓ	亜硝酸イオンとして 32.9ppm
水質汚濁防止法の排水基準	アンモニア性窒素、亜硝酸性窒素、硝酸性窒素の合計 ： 100 mg/ℓ	亜硝酸イオンとして 329.0ppm
特定事業場からの下水の排除の制限に係る水質の基準 (工場排水が 1/4 以上の場合)	アンモニア性窒素、亜硝酸性窒素、硝酸性窒素の合計 ： 125 mg/ℓ	亜硝酸イオンとして 411.3ppm
特定事業場からの下水の排除の制限に係る水質の基準 (工場排水が 1/4 未満の場合)	アンモニア性窒素、亜硝酸性窒素、硝酸性窒素の合計 ： 380 mg/ℓ	亜硝酸イオンとして 1250.2ppm

ここで、亜硝酸リチウムを用いたコンクリート補修工事において上記に示した硝酸性窒素などの基準値を超える可能性があるのは、不慮の事故または災害などにより保管中の亜硝酸リチウム水溶液が大量に流出するような場合のみです。コンクリート表面に塗布したり、コンクリート内部に圧入したりした亜硝酸リチウムがコンクリート外部へと自然溶出する量は極めて微量であり、これが原因で上記の基準値を超えるようなことは想定できません。すなわち、材料保管時に適切な管理を行う限り、亜硝酸リチウムが周辺環境を悪化させることはないと考えられます。

なお、亜硝酸リチウムの取扱いは必ず「製品安全データシート」の指示に従い、正しく使用する必要があります。

6. 亜硝酸リチウム関連論文一覧

No.	発表 年	タイトル	著者	掲載誌情報
1	1987	Li化合物によるアルカリ骨材反応の膨張抑制効果	坂口由里子、堀孝廣、高倉誠	日本建築学会大会学術講演概要集、A、pp.21～22
2	1989	亜硝酸リチウムの含浸によるコンクリートのアルカリ骨材反応膨張抑制効果	北川明雄、友沢史紀、阿部道彦	コンクリート工学年次論文報告集、Vol.11、No.1、pp.117-122
3	1990	アルカリ骨材反応を生じたコンクリートの補修方法に関する1実験--亜硝酸リチウムの含浸による膨張抑制効果	友沢史紀	建築研究報告（124）、pp.1-46
4	1991	リチウム化合物によるアルカリ骨材反応の膨張抑制効果	中村裕二、堀孝廣、松林裕二、原謙治、能登頭一、阿部道彦	日本建築学会大会学術講演概要集（東北）pp.555～556
5	1991	表面被覆材と亜硝酸リチウムによるアルカリシリカ反応抑制効果に関する実験的研究	入田一、谷川伸、岡田一興、山城博隆	コンクリート工学年次論文報告集、Vol.13、No.1、pp.751-756
6	1992	アルカリ骨材反応劣化コンクリートの補修工法に関する実験的研究	宮本征夫、堀孝廣、長尾之彦、今西昭裕	コンクリート工学年次論文報告集、Vol.14、No.1、pp.933-938
7	1992	亜硝酸リチウムによるアルカリ骨材膨張の抑制効果	斉藤満、北川明雄、柳場重正	「材料」、Vol.41、No.468、pp.1375-1381、
8	2000	アルカリ骨材反応を生じたコンクリート橋台の劣化性状	釣田修宏、米倉亜州夫、伊藤秀敏、万治孝二	土木学会第55回年次学術講演会、V-308
9	2001	大型コンクリート部材におけるリチウムのASR抑制効果に関する研究	金好昭彦、内田博之、狩野裕之	コンクリート工学年次論文集、Vol.23、No.1、pp.403-408
10	2004	亜硝酸リチウム高圧注入によるアルカリ骨材反応抑制工法（リハビリ高圧注入）の開発	江良和徳、岡田繁之、三原孝文、河原健児	コンクリート構造物の補修、補強、アップグレードシンポジウム論文報告集、Vol.4、pp.117-122、
11	2005	リチウムによるアルカリ骨材反応の膨張抑制に関する研究（文献調査委員会）	上田隆雄	コンクリート工学、Vol.43、No.6、pp.51-56
12	2005	亜硝酸リチウム高圧注入によるアルカリ骨材反応抑制効果の検証	江良和徳、岡田繁之、三原孝文、河原健児	コンクリート構造物の補修、補強、アップグレードシンポジウム論文報告集、Vol.5、pp.189-194、
13	2006	Interim Recommendations for the Use of Lithium to Mitigate or Prevent Alkali-Silica Reaction(ASR)	Kevin J.Folloard、Michael D.A.Thomas、	FHWA-HRT-06-073
14	2007	リチウムイオンを内部圧入する場合の注入圧力と注入時間に関する考察	江良和徳、為石昌宏、三原孝文、宮川豊章	コンクリート構造物の補修、補強、アップグレードシンポジウム論文報告集、Vol.7、pp.161-166、

No.	発表 年	タイトル	著者	掲載誌情報
15	2008	リチウムイオンの供給方法の相違が ASR 膨張抑制効果に与える影響	江良和徳、阪口晃祐、山本貴士、宮川豊章	コンクリート構造物の補修、補強、アップグレード・シンポジウム論文報告集、Vol.8、pp.185-192、
16	2008	リチウムイオン内部圧入工によるアルカリシリカ反応対策について	江良和徳、三原孝文、岡田繁之、宮川豊章	「材料」、Vol.57、第 10 号、pp.993-998
17	2008	CONTROLLING EFFECT OF LITHIUM NITRITE ON ALKALI-AGGREGATE REACTION	江良和徳、三原孝文、金好昭彦、宮川豊章	13th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete
18	2008	Effect of LiNO ₃ on ASR-Induced Expansion and Dissolution of Silica	X.Feng、M.D.A.Thomas、T.W.Bremner、B.J.Balcom、K.J.Folliard	13th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete
19	2008	Laboratory Test Methods for Determining the Dosage of Lithium Nitrate Required to Control ASR-Induced Expansion	K.J.Folliard、R.C.Barborak、J.H.Ideker、B.Fournire、M.D.A.Thomas	13th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete
20	2008	Effectiveness of Lithium-Based Products in Concrete Made with Canadian Aggregates Susceptible to ASR	C.Tremblay、M.A.Berube、B.Fournier、M.D.A.Thomas	13th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete
21	2008	亜硝酸リチウム塗布およびモルタル混入時の ASR コンクリート中での亜硝酸イオン、リチウムイオンの拡散性状について	杉浦章雄、榊原弘幸	コンクリート構造物の補修、補強、アップグレード・シンポジウム論文報告集、Vol.8、pp.179-184、
22	2009	内部圧入によりリチウムイオンが供給された ASR ゲルの元素分析について	江良和徳、岡田繁之、山本貴士、宮川豊章	コンクリート構造物の補修、補強、アップグレード・シンポジウム論文報告集、Vol.9、pp.151-156、
23	2009	リチウムイオンによる ASR 膨張抑制効果に関する一考察	江良和徳、三原孝文、山本貴士、宮川豊章	「材料」、Vol.58、第 8 号、pp.697-702
24	2010	リチウムイオン内部圧入工を施工した構造物の長期耐久性について	江良和徳、徳納武使、峯松昇司、宮川豊章	コンクリート構造物の補修、補強、アップグレード・シンポジウム論文報告集、Vol.10、pp.167-1172、
25	2010	シラン系表面含浸材および亜硝酸リチウムの ASR 膨張抑制効果に関する基礎的研究	松本茂、新名勉、江良和徳、村橋大介、宮川豊章	土木学会論文集 E、Vol.66、No.3、pp288-300
26	2011	アルカリシリカ反応により劣化した架道橋橋台の補修対策	青山智之	日本鉄道施設協会誌 第 49 巻、第 12 号、pp.57-59
27	2012	CONTROLLING ASR EXPANSION BY LITHIUM ION PRESSURIZED INJECTION METHOD	三原孝文、江良和徳、山本貴士、宮川豊章	14th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete

No.	発表 年	タイトル	著者	掲載誌情報
28	2012	亜硝酸イオン濃度勾配がマクロセル腐食に与える影響に関する基礎的研究	高谷哲、内藤智大、須藤裕司、山本貴士、宮川豊章	コンクリート構造物の補修、補強、アップグレード・シンポジウム論文報告集、Vol.12、pp.483-488、
29	2012	リチウム内部圧入によるアルカリシリカ反応の抑制について (JCI テクニカルレポート)	江良和徳	コンクリート工学、Vol.50、No.2、pp.155-162
30	2013	ASRで劣化した橋台の補修工事の施工と効果の確認について～亜硝酸リチウム内部圧入による ASR 抑制効果～	江良和徳、直野和人、中村裕大	第 1 回北陸道路保全会議論文集
31	2013	Suppression of ASR Expansion by Pressurized Injection of Lithium Nitrite	江良和徳、為石昌弘、内田博之、岡田繁之、宮川豊章	3rd International Conference on Sustainable Construction Materials & Technologies
32		亜硝酸リチウム含有ポリマーセメントモルタルの塩害抑制効果の評価に関する研究	福田杉夫、梶田佳寛	日本建築学会構造系論文集 第 78 巻 第 684 号、251-259
33	2013	LiNO ₂ 圧入工法における NO ₂ の濃度分布に関する研究	内藤智大、高谷哲、須藤裕司、山本貴士、宮川豊章	コンクリート構造物の補修、補強、アップグレード・シンポジウム論文報告集、Vol.13、pp.529-534、
34	2014	亜硝酸リチウム圧入によって補修した ASR 劣化部材の耐荷性能に関する実験的研究	高木雄介、福嶋孝啓、大畑卓也、小林孝一、六郷恵哲	コンクリート構造物の補修、補強、アップグレード・シンポジウム論文報告集、Vol.14、pp.61-66、2014
35	2014	コンクリート中における亜硝酸イオンの腐食抑制メカニズムおよびその効果に関する基礎的研究	高谷哲、須藤裕司、内藤智大、江良和徳、山本貴士、宮川豊章	「材料」、Vol.63、No.10、pp.722～728、2014
36	2015	複数のリチウム塩を組み合わせた電解液の電気浸透性と電気化学的補修に関する検討	七澤 章、梶山璃奈、上田隆雄、塚越雅幸	土木学会第 70 回年次学術講演会 V-599 pp1197-1198
37	2015	防錆材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	野上克宏、東田典雅、小川正幸、天野裕久	土木学会第 70 回年次学術講演会 V-601 pp1201-1202
38	2015	グラウト充てん不足部の亜硝酸リチウム水溶液注入補修の品質管理に関する検討	鴨谷知繁、中司和弘、石井浩司、森川英典	コンクリート工学年次論文集、Vol. 37、No. 1、pp. 907-912
39	2015	亜硝酸リチウム含浸による経年構造物の補修工法に関する屋外暴露試験	濱崎 仁、山田義智、福山智子、須藤裕司	コンクリート工学年次論文集、Vol. 37、No. 1、pp. 1519-1524
40	2016	鉄筋の防食を目的としたコンクリートへの亜硝酸リチウム水溶液の浸透方法に関する検討	北村 実、黒田 保、吉野 公、畑岡 寛、山根隆志、江良和徳	土木学会中国支部第 68 回研究発表会 V-20 pp365-366
41	2016	亜硝酸リチウム系表面含浸材の併用効果に関する基礎的研究	江良和徳、大山省吾、毛利雄紀、十河茂幸	土木学会第 71 回年次学術講演会 V-237 pp473-474

No.	発表 年	タイトル	著者	掲載誌情報
42	2016	断面修復材に混和した亜硝酸リチウムがマクロセル腐食に及ぼす影響に関する研究	西嶋大貴、櫛原弘貴、添田正司、久保田崇嗣、阿部 稜	土木学会第 71 回年次学術講演会 V-239 pp477-478
43	2016	異なる相対湿度環境における亜硝酸リチウム圧入工法の鉄筋腐食抑制効果	李 春鶴、江良和徳、大寺稔雅、堀田成治	土木学会第 71 回年次学術講演会 V-410 pp819-820
44	2016	フライアッシュと亜硝酸リチウムを用いた断面修復材の適用性に関する検討	横山直哉、上田隆雄、高 玉茎、塚越雅幸	コンクリート工学年次論文集、Vol. 38、No. 1、pp. 1905-1910
45	2016	亜硝酸リチウムの圧入時期が ASR 抑制に与える影響	高木雄介、大谷智也、六郷恵哲、小林孝一	コンクリート構造物の補修、補強、アップグレード・シンポジウム論文報告集、Vol. 16、pp. 39-42
46	2016	亜硝酸リチウム水溶液が PC 鋼線の破断特性に与える影響	石井浩司、鴨谷知繁、森川英典	コンクリート構造物の補修、補強、アップグレード・シンポジウム論文報告集、Vol. 16、pp. 627-632
47	2017	ASR 膨張途中における亜硝酸リチウムの含浸性状に関する研究	落合昂雄、江里口玲、金田由久、山田一夫、佐川康貴	土木学会第 72 回年次学術講演会 V-446 pp891-892
48	2017	断面修復工法における界面処理が亜硝酸混和モルタルの補修性能に及ぼす影響	久保田崇嗣、山田正健、櫛原弘貴、添田正司、村上 哲	土木学会第 72 回年次学術講演会 V-500 pp999-1000
49	2017	亜硝酸リチウムを塗布したモルタルの中性化抑制機構に関する基礎的研究	山田正健、櫛原弘貴、江良和徳、添田正司、村上 哲	土木学会第 72 回年次学術講演会 V-509 pp1017-1018
50	2017	相対湿度および亜硝酸リチウムが鉄筋腐食に及ぼす影響に関する基礎的研究	李 春鶴、江良和徳、辻 幸和、郭 度連	コンクリート工学年次論文集、Vol. 39、No. 1、pp. 973-978
51	2017	フライアッシュと亜硝酸リチウムを用いた断面修復材の ASR 劣化コンクリートへの適用に関する検討	横山直哉、上田隆雄、塚越雅幸、江良和徳	コンクリート工学年次論文集、Vol. 39、No. 1、pp. 1675-1680
52	2017	屋外暴露試験による塩害環境下の経年構造物の補修工法に関する腐食抑制効果の評価	澁井雄斗、濱崎 仁、須藤裕司、大嶽理人	コンクリート工学年次論文集、Vol. 39、No. 1、pp. 1747-1752
53	2017	亜硝酸リチウム添加モルタルの中性化抑制機構に関する基礎的研究	山田正健、櫛原弘貴、江良和徳、添田正司、久保田崇嗣	コンクリート工学年次論文集、Vol. 39、No. 1、pp. 1759-1764
54	2018	非削孔による亜硝酸リチウム水溶液を用いた鉄筋防食工法の検討	津村尚侑、三原孝文、黒田 保、北村 実	土木学会第 73 回年次学術講演会 V-117 pp233-234
55	2018	腐食鉄筋に対する亜硝酸 Li の防錆性能効果に関する基礎的研究	大塚柚人、山田浩嗣、櫛原弘貴、添田政司	土木学会第 73 回年次学術講演会 V-118 pp235-236
56	2018	複合劣化環境下における亜硝酸リチウム混和モルタルの防錆効果	山田正健、大塚柚人、櫛原弘貴、添田政司	土木学会第 73 回年次学術講演会 V-189 pp377-378

No.	発表 年	タイトル	著者	掲載誌情報
57	2018	亜硝酸リチウム混入ゲルを用いた複合劣化対策工法の床版採取コアへの適用	加藤了俊、宮里心一、有馬直秀、青山實伸、宮口克一	土木学会第 73 回年次学術講演会 V-190 pp379-380
58	2018	異なる亜硝酸リチウムの量と環境条件が RC 部材の鉄筋に与える影響に関する研究	兒玉悠利、李 春鶴、江良和徳、峯松昇司	土木学会第 73 回年次学術講演会 V-357 pp713-714
59	2018	塩害劣化コンクリートに対するフライアッシュと亜硝酸リチウムを用いた断面修復による補修効果に関する検討	上田隆雄、横山直哉、江良和徳、中村定明	コンクリート工学年次論文集、Vol. 40、No. 1、pp. 1515-1520
60	2019	フライアッシュと亜硝酸リチウムを用いた断面修復材による ASR 劣化コンクリートの補修効果	上田隆雄、島村悠梨乃、高木祐介、江良和徳	土木学会第 74 回年次学術講演会 V-145
61	2019	亜硝酸リチウム溶液の適用方法の相違がコンクリートへの含浸性状に与える影響	前山誠志、久保善司、木虎久人、石井一騎	土木学会第 74 回年次学術講演会 V-159
62	2019	塩害劣化環境下での亜硝酸 Li 圧入による腐食抑制効果に関する基礎的検討	兒島あかり、大塚柚人、樋原弘貴、添田政司、村上 哲	土木学会第 74 回年次学術講演会 V-160
63	2019	塩害と中性化の複合環境における亜硝酸リチウム混和モルタルの劣化抑制効果	深見 桜、佐藤悠士朗、樋原弘貴、添田政司、村上 哲	土木学会第 74 回年次学術講演会 V-351
64	2019	亜硝酸リチウム内部圧入工による ASR 補修の実構造物への適用性に関する検討	鈴木英之、橋爪大輔、藤原理絵、江良和徳、三原孝文	コンクリート構造物の補修、補強、アップグレード・シンポジウム論文報告集、Vol. 19、pp. 337-342
65	2019	亜硝酸系含浸材のコンクリートへの適用方法に関する基礎的研究	前山誠志、久保善司、木虎久人、石井一騎	コンクリート工学年次論文集、Vol. 41、No. 1、pp. 965-970
66	2019	亜硝酸リチウム水溶液先行注入型補修材充填工法により補修した既設 PCT 橋の自然電位モニタリング	山崎誠志、西野英哉、黒岩大地、大嶋俊一	コンクリート工学年次論文集、Vol. 41、No. 1、pp. 1589-1594
67	2019	外観変化を考慮した鉄筋腐食に対する補修工法の検討および評価	望月裕馬、濱崎 仁、澁井雄斗、徳納武使	コンクリート工学年次論文集、Vol. 41、No. 1、pp. 1655-1660
68	2019	SAP を添加したモルタル系断面修復材の基礎物性と修復直後の鉄筋の防食効果	渡邊真織、塚越雅幸、上田隆雄、中山一秀	コンクリート工学年次論文集、Vol. 41、No. 1、pp. 1667-1672
69	2019	塩害劣化を受けたコンクリートへの亜硝酸リチウム圧入工法の適用性に関する基礎的研究	兒島あかり、樋原弘貴、添田政司、大塚柚人	コンクリート工学年次論文集、Vol. 41、No. 1、pp. 1673-1678

コンクリート構造物の維持管理 技術資料
Ver.4.3

発行年月 令和 2 年 4 月

編集・発行 一般社団法人コンクリートメンテナンス協会
〒730-0053 広島県広島市中区東千田町 2 丁目 3 番26号
TEL・FAX 082-541-0133
URL : <http://www.j-cma.jp>

定価 2,000円

