

劣化機構に応じた 補修工法選定の基本的な考え方

一般社団法人コンクリートメンテナンス協会

技術委員長 江良和徳

劣化機構に応じた補修工法選定の基本的な考え方

1. はじめに

2. 塩害補修の基本的な考え方

- 塩害の劣化メカニズム
- 塩害の補修工法選定

潜伏期・進展期・加速期・劣化期

3. ASR補修の基本的な考え方

- ASRの劣化メカニズム
- ASRの補修工法選定

潜伏期・進展期・加速期・劣化期

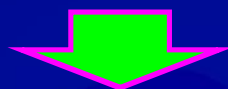
4. おわりに

1. はじめに

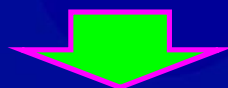
【これで十分でしょうか？】

例えば、

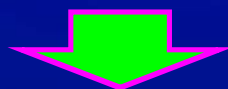
- ・塩害による鉄筋露出が生じている ⇒ 断面修復
- ・ASRによるひび割れが生じている ⇒ ひび割れ注入＋表面含浸



これらは決して間違った判断ではない。選択肢としてはあり得る。
ただ、これらの対策工法で十分か否かの根拠はあるか？



原因と程度によって、補修工法に要求される性能が変化する。
劣化は進行する。補修した箇所も劣化は進行する。



『劣化機構、劣化程度に応じた補修要求性能の設定』
『ライフサイクルを考慮した維持管理方針(シナリオ)の策定』

2. 塩害補修の基本的な考え方



塩害の劣化メカニズム

原因

- ・種々の原因で塩分がコンクリート中に浸入
- ・浸入した塩分は、塩化物イオンとしてコンクリート表面からコンクリート内部へ浸透



劣化進行

- ・塩化物イオンが鉄筋位置に到達
- ・鉄筋位置の塩化物イオン量が一定量を超えると、鉄筋の不動態皮膜が破壊され、鉄筋腐食が生じる



性能低下

- ・ひび割れ、コンクリートの浮き・はく離、鉄筋露出など
- ・コンクリートと鉄筋との付着が低下
- ・鉄筋断面の減少

塩分の侵入

- ・沿岸地域における飛来塩分の浸透(外来塩分)
- ・山間部積雪地帯における凍結防止剤の散布(外来塩分)
- ・洗浄不十分な海砂の使用(内在塩分)

腐食発生限界塩化物イオン濃度

- ・鋼材位置におけるコンクリート中の塩化物イオン濃度が 2.0kg/m^3 を超えると、鉄筋が腐食環境(不動態皮膜破壊)となる



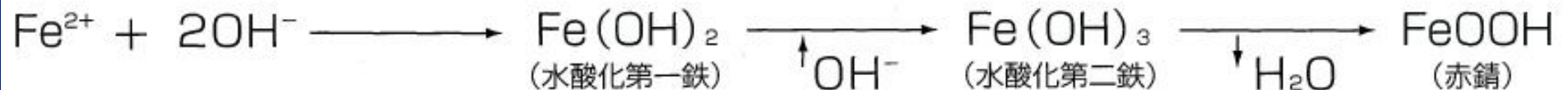
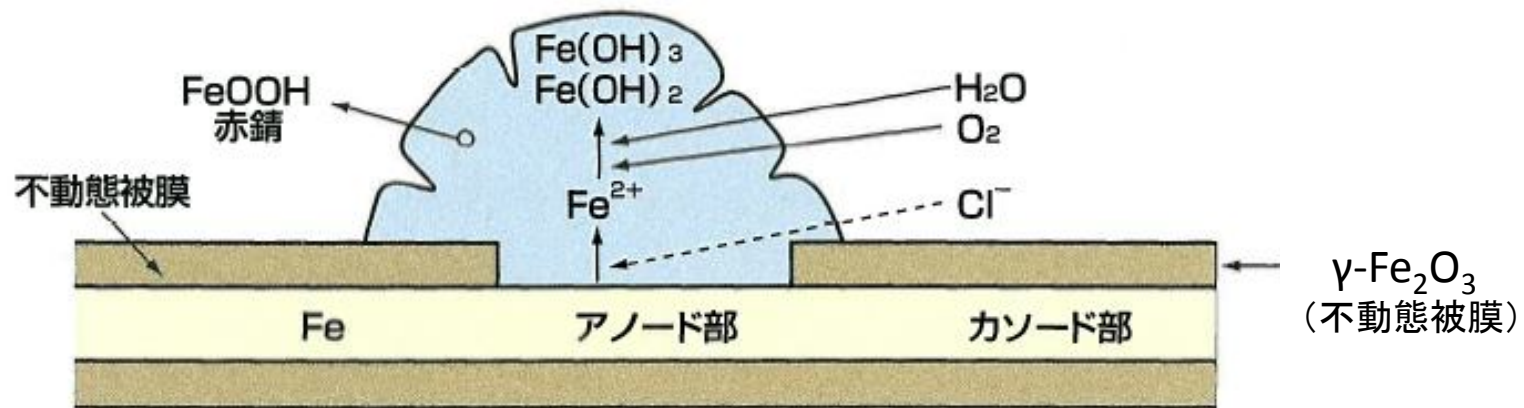
(土木学会 コンクリート標準示方書の例)

留意点

- ・塩害において、『塩化物イオン』は鉄筋腐食のトリガー。
- ・鉄筋腐食が開始した時点で、劣化を進行させる因子は『塩化物イオン』⇒『水と酸素』にかわる。

【鉄筋の腐食】

技術資料P.3



- アノード反応 : 電子2個を鉄筋中に残し、鉄がイオンとなって溶出する反応
- カソード反応 : アノード反応によって生じる電子を消費する反応



この2種類の反応が同時に起こるのが鉄筋腐食反応

【塩害による劣化事例】

技術資料P.4



塩害の補修工法選定

【塩害の補修工法と要求性能】

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)

【表面含浸工法】

【表面被覆工法】

【ひび割れ注入工法】

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)

【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)

【電気防食工法】

【鉄筋防錆材の活用(例; 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、はく離、鉄筋露出部の修復)

【断面修復工法】

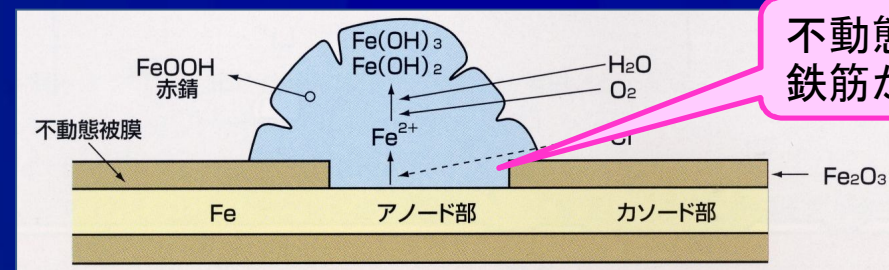
③鉄筋腐食の抑制

【鉄筋防錆材の活用(亜硝酸リチウム)】



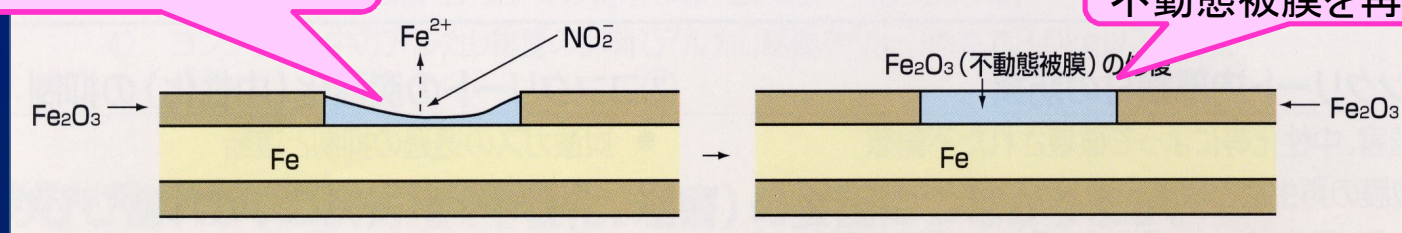
【活用方法】

- ・内部圧入工法
- ・ひび割れ注入工法
- ・表面含浸工法
- ・表面覆材工法
- ・断面修復工法



不動態被膜が破壊され、鉄筋が腐食している状態

鉄筋周囲に亜硝酸イオン (NO_2^-) が供給されると...



亜硝酸イオン (NO_2^-) が不動態被膜を再生する

亜硝酸イオン (NO_2^-) による不動態被膜再生メカニズム

【塩害の劣化過程】

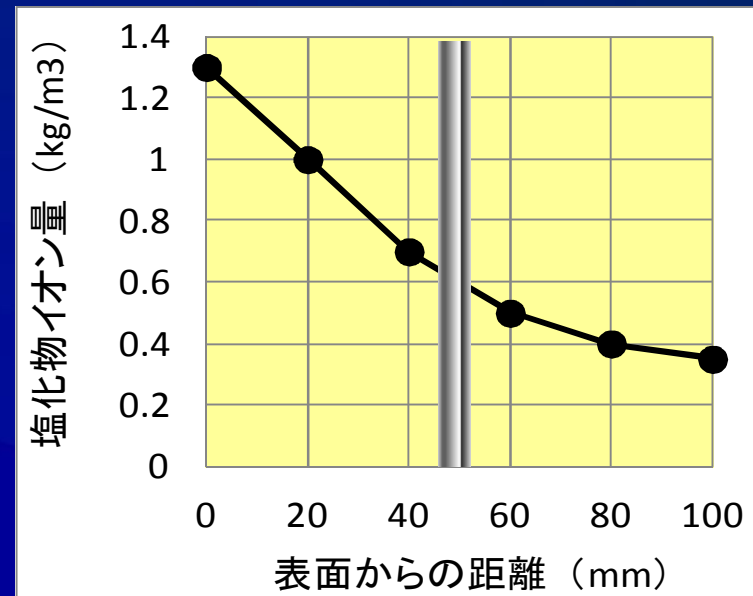
表 2-1 塩害を受ける鉄筋コンクリート構造物の外観上のグレードと劣化の状態

構造物の外観上のグレード	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, 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	腐食ひび割れが発生, 錆汁が見られる.
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はく離・はく落が見られる, 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はく離・はく落が見られる, 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:「2013 年制定 コンクリート標準示方書[維持管理編] 土木学会」

- 各劣化過程では**何が起きているのか？**
- 次の劣化過程に進行させない**ためには何をすればよいのか？

1. 潜伏期



【劣化の状態】

- ・外観上の変化は見られない
- ・腐食発生限界塩化物イオン濃度以下
⇒ まだ鉄筋腐食環境には陥っていない

【定量的な劣化指標】

- ・塩化物イオン濃度の測定値
⇒ 腐食発生限界未満であるか？

1. 潜伏期

【補修工法の主たる要求性能】

- ・塩化物イオンを侵入させない
（劣化因子の遮断）
⇒ 鉄筋の腐食環境をつくらない



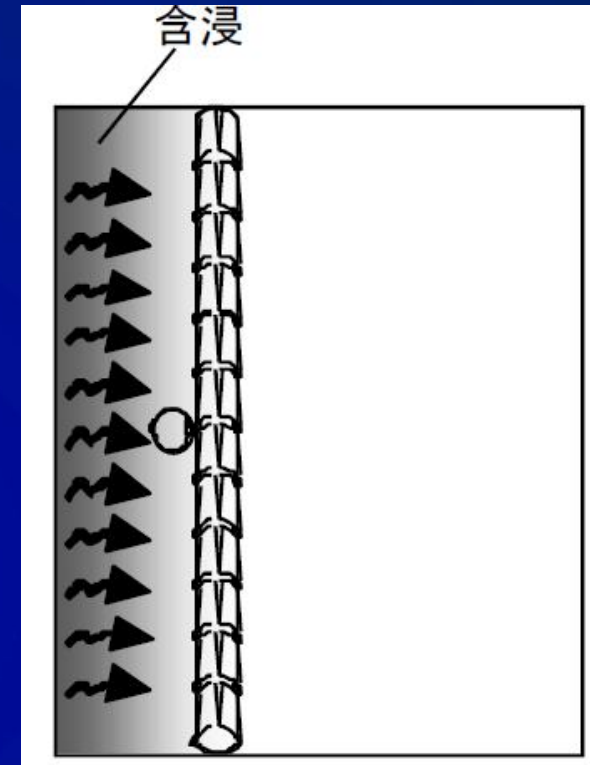
【補修工法の選定】

- ・劣化因子の遮断性を有する工法から選択
⇒ 表面保護工法
 - 表面含浸工法 …… 安価、モニタリング性が高い
 - 表面被覆工法 …… 美観性向上、遮塩性が高い

【備考】

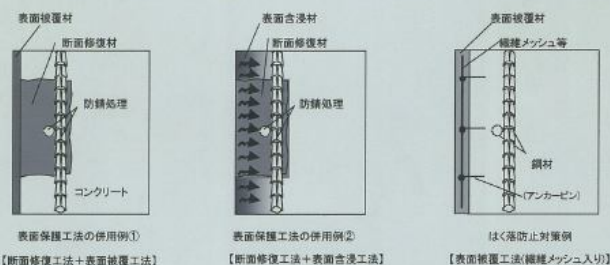
- ・鉄筋周囲を腐食環境にさせないための予防保全

【表面含浸工法】

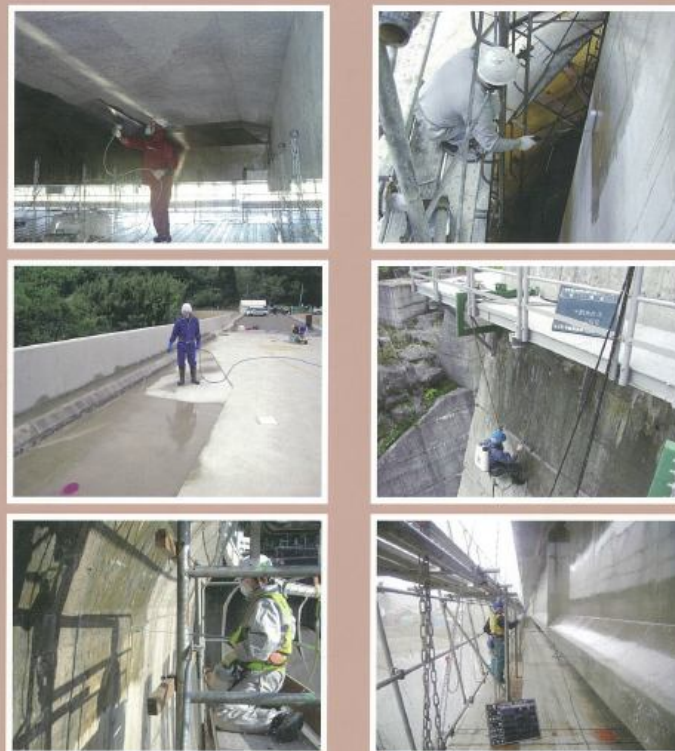


- ・ハケ, ローラーにより塗布含浸する
- ・含浸深さは数mm～数十mmで, 使用材料によって異なる
- ・シラン系含浸材 : 撥水効果付与
- ・けい酸塩系含浸材 : コンクリートの緻密化

表面保護工法 設計施工指針（案）



けい酸塩系表面含浸工法の設計施工指針（案）



けい酸塩系表面含浸工法の設計施工指針（案） P.27より抜粋

『本指針（案）では、けい酸塩系表面含浸工法が単独で適用できる範囲を、劣化過程が潜伏期までにある構造物を原則とした。』

【表面含浸工法】

種別		特長	備考
シラン系		・疎水性のアルキル基によりコンクリート表層部に吸水防止層(撥水層)を形成。 ・細孔を埋めないため呼吸性を損なわない。	・環境によっては中性化を促進することもある。 ・滞水する部位では適用困難。
けい酸塩系	反応型 けい酸塩系	・けい酸ナトリウム系 ・けい酸カリウム系 ・水酸化カルシウムと反応し、C-S-Hゲルを生成して空隙を充填する。 ・水分供給により再度溶解。	・微細ひび割れを閉塞。 ・中性化が進行した領域ではカルシウム分が減少しており、反応困難。
	固化型 けい酸塩系	・けい酸リチウム系 ・材料自体の乾燥固化により空隙を充填する。 ・固化物は難溶性。	・微細ひび割れを閉塞。 ・表面硬度の向上。 ・劣化因子遮断性はやや低い。

1. 潜伏期

【維持管理シナリオに応じた補修工法】

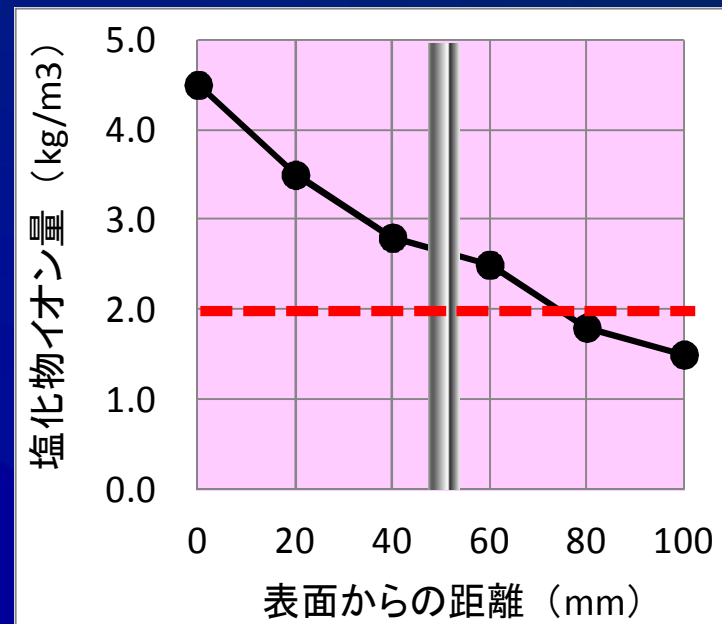
(1) 存置、経過観察

- ・現時点で何ら変状が生じていないので、しばらく様子を見る
- ・劣化予測にて腐食発生限界を超えるまでの期間に余裕がある場合
- ・定期的な塩化物イオン濃度測定
 - ⇒ 点検、調査による継続的な状況把握

(2) 表面保護工を定期的に行う

- ・劣化因子を遮断して鉄筋腐食環境を作らないための予防保全
- ・適用する材料には耐用年数があるため、定期的に再補修を行う
 - ⇒ 劣化因子遮断性を途切れさせない
 - ⇒ 軽微な処置を繰り返すことで塩害劣化を顕在化させない

2. 進展期



【劣化の状態】

- ・外観上の変化は見られない
- ・腐食発生限界塩化物イオン濃度以上
⇒ 不動態皮膜の破壊、鉄筋腐食が開始

【定量的な劣化指標】

- ・塩化物イオン濃度の測定値
⇒ 腐食発生限界を超えているか？

2. 進展期

【補修工法の主たる要求性能】

- ・塩化物イオン、水、酸素をこれ以上侵入させない
- ・鉄筋腐食の進行速度を抑制する
 - ⇒ 鉄筋腐食を遅らせ、変状をできるだけ顕在化させない



【補修工法の選定】

- ・劣化因子の遮断性を有する工法から選択
 - ⇒ 表面保護工法
 - 表面含浸工法 …… 安価、モニタリング性が高い
 - 表面被覆工法 …… 美観性向上、遮塩性が高い
 - ⇒ 鉄筋腐食抑制という付加価値

【備考】

- ・ひび割れ等の変状を発生させないための予防保全

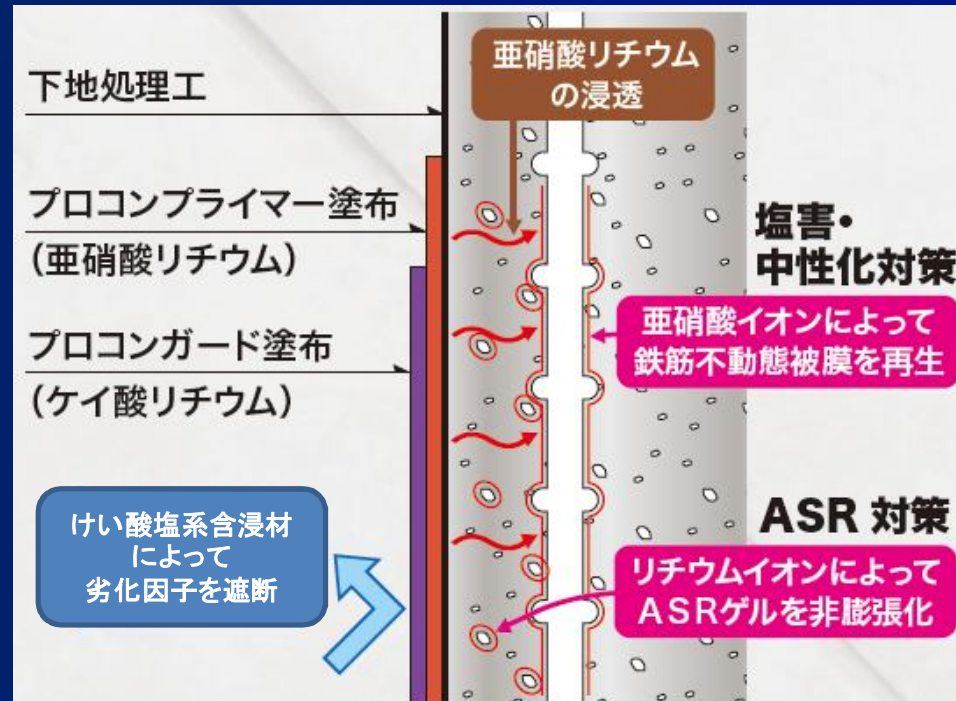
【付加価値のある表面含浸工法の例】

種別	特長	備考
鉄筋腐食抑制タイプ 含浸系表面保護材	・コンクリート表面に塗布するだけで深く浸透し、塩化物イオンの侵入を阻止する吸水防止層を形成。 ・さらに、鉄筋のまわりに不動態皮膜にかわる保護層を形成し腐食を抑制。	劣化因子遮断 ＋ 鉄筋腐食抑制
亜硝酸リチウム併用型 表面含浸材	・1層目の亜硝酸リチウム系含浸材により鉄筋不動態皮膜を再生して鉄筋腐食を抑制。 ・2層目のけい酸塩系含浸材が表面で乾燥固化し、劣化因子を遮断。 ・塩化物イオン濃度に応じて亜硝酸リチウム塗布量を設定。	劣化因子遮断 ＋ 鉄筋腐食抑制

【亜硝酸リチウム併用型表面含浸工法】

『表面含浸材による劣化因子の遮断』

プラスアルファとして『亜硝酸イオンによる鉄筋腐食の抑制』を付与



- ①コンクリート表面を下地処理する
- ②亜硝酸リチウム系含浸材を塗布し、内部へ含浸させる ⇒ 鉄筋防錆
- ③亜硝酸リチウムの溶出を防ぐために、けい酸塩系含浸材を塗布する
⇒ 劣化因子の遮断

『劣化因子の遮断』 + 『鉄筋腐食の抑制』

2. 進展期

【維持管理シナリオに応じた補修工法】

(1) 存置、経過観察

- ・現時点で何ら変状が生じていないので、しばらく様子を見る
- ・ただし鉄筋は腐食環境にあるため、将来的には変状が顕在化することを想定
⇒ 対策工実施の優先順位の検討

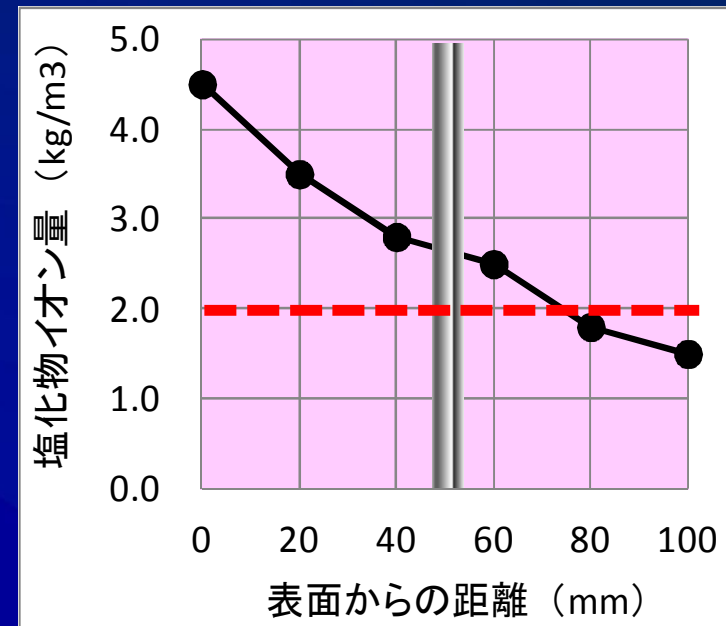
(2) 表面保護工を定期的に行う

- ・劣化因子を遮断して変状の顕在化を遅らせる
- ・適用する材料には耐用年数があるため、定期的に再補修を行う
⇒ 既に塩化物イオン濃度は腐食発生限界を超えているため、鉄筋腐食抑制効果を併せ持つ材料、工法を選択するのも効果的

(3) 費用を投じて以後のメンテナンスをフリーとする

- ・脱塩工法（塩化物イオンを除去して鉄筋腐食環境を改善）
- ・電気防食工法、亜硝酸リチウム内部圧入工法（鉄筋腐食を根本的に抑制）
- ・全断面修復（塩化物イオンを含むコンクリートを完全に除去）
⇒ 構造物の重要性や費用対効果、LCC等を十分に検討したうえで適用

3. 加速期前期



【劣化の状態】

- ・腐食ひび割れや浮きが発生
 - ・錆汁が見られることもある
- ⇒ 既に鉄筋腐食が進行している

【定量的な劣化指標】

- ・鉄筋の腐食程度、腐食速度
- ⇒ 腐食度目視確認、自然電位や分極抵抗の測定値など
(塩化物イオン濃度は当然腐食発生限界を超えている)

3. 加速期前期

【補修工法の主たる要求性能】

- ①鉄筋腐食の進行速度を抑制する
- ②鉄筋腐食の進行を根本的に抑制する
⇒ これ以上の変状の増大を防ぐ



【補修工法の選定】

- ①劣化因子の遮断性を有する工法から選択
⇒ 表面保護工＋ひび割れ注入工
(必要に応じて部分断面修復工を併用)
- ②鉄筋腐食を根本的に抑制できる工法から選択
⇒ 電気防食工法 (塩分存在下でも鉄筋腐食を抑制)
亜硝酸リチウム内部圧入工法 (塩分存在下でも鉄筋腐食を抑制)
全断面修復工法 (塩分を含むコンクリートを完全に除去)

【備考】

- ・塩害による変状が顕在化している構造物は全て加速期前期以上

3. 加速期前期

【維持管理シナリオに応じた補修工法】

(1) ひび割れ注入、表面保護、部分断面修復など最小限の補修を定期的に行う

- ・劣化因子を遮断して劣化の進行速度を遅らせる
- ・既に鉄筋腐食が著しく進行しているため、これらの対策では早期に再劣化
- ・再劣化したら速やかに再補修を行うために、点検強化やモニタリングを併用
- ・外観変状がまだ比較的軽微な段階ではLCCでも有利となることもある
 - ⇒ 補修のインシヤルコストを最小とし、再劣化と再補修を繰り返す維持管理シナリオを選択するという考え方
 - 各工法に鉄筋腐食抑制効果を併せ持つ材料を選択するのも効果的

(2) 鉄筋腐食の根本的な抑制という工学的判断に基づく対策

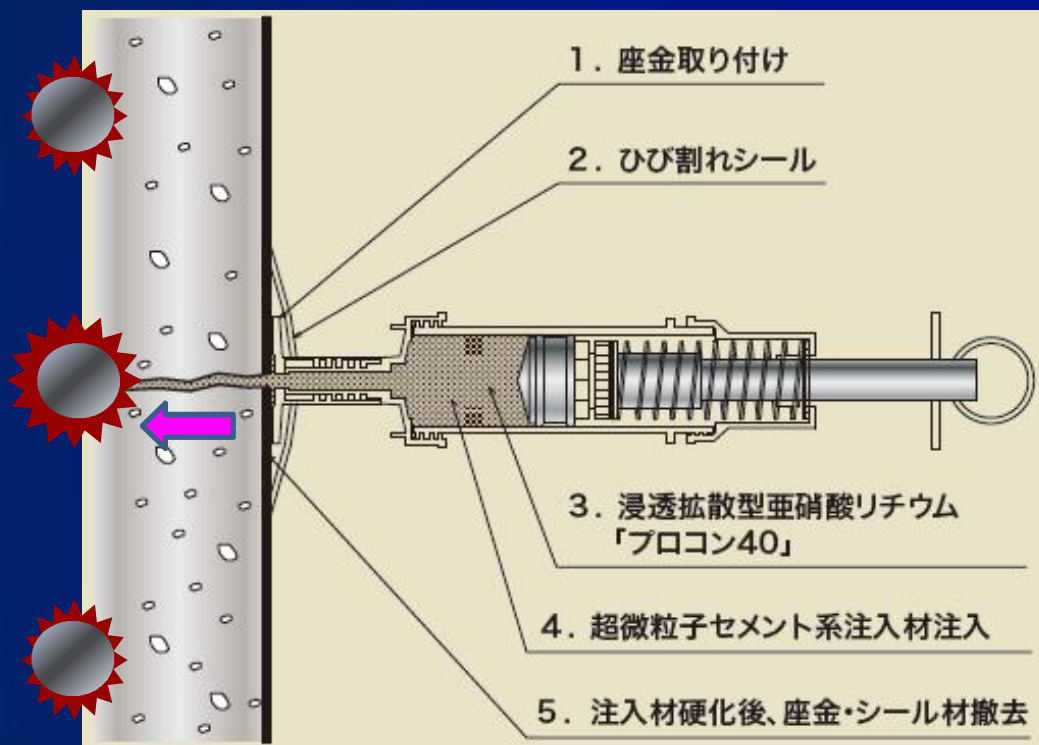
- ・電気防食工法（鉄筋腐食を根本的に抑制）
- ・亜硝酸リチウム内部圧入工法（鉄筋腐食を根本的に抑制）
- ・全断面修復（塩化物イオンを含むコンクリートを完全に除去）
 - ⇒ これらの工法を適用すれば、再劣化のリスクを限りなく低減できる
 - 構造物の重要性や費用対効果を十分に検討したうえで適用

【亜硝酸リチウムを併用したひび割れ注入工法】

(NETIS:CG-110017-A)

『ひび割れ注入材による劣化因子の遮断』

プラスアルファとして『亜硝酸イオンによる鉄筋腐食の抑制』を付与



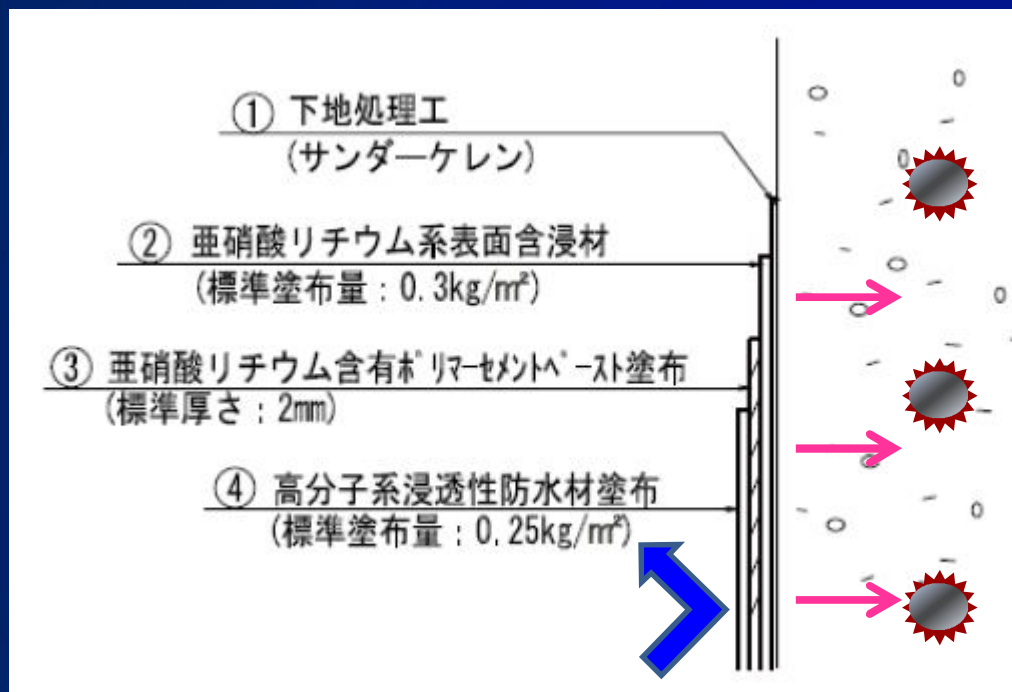
- ①自動低圧注入器をひび割れに沿って設置する
- ②亜硝酸リチウム水溶液を先行注入する ⇒ 鉄筋防錆
- ③超微粒子セメント系注入材を本注入 ⇒ ひび割れ閉塞、劣化因子遮断

『ひび割れ閉塞』 + 『鉄筋腐食の抑制』

【亜硝酸リチウムを併用した表面被覆工法】

『表面被覆材による劣化因子の遮断』

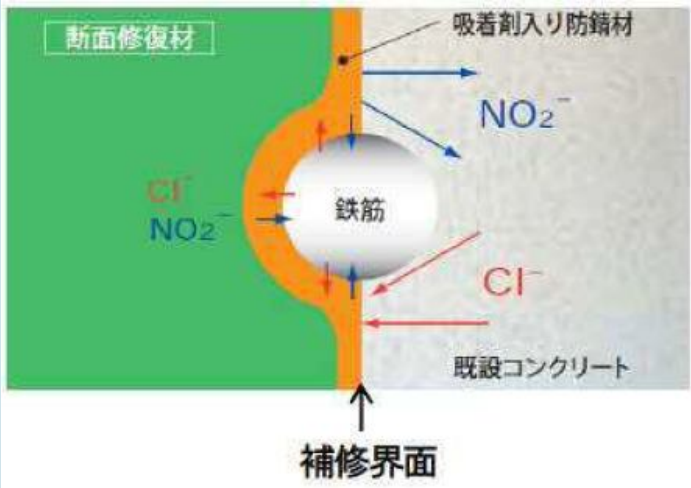
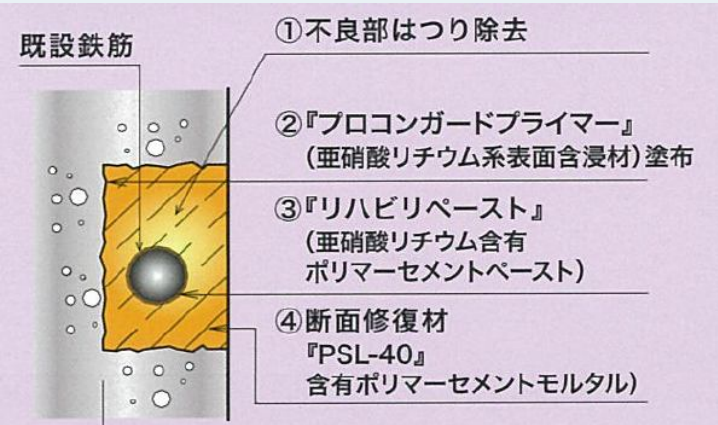
プラスアルファとして『亜硝酸イオンによる鉄筋腐食の抑制』を付与



- ①コンクリート表面を下地処理する
- ②亜硝酸リチウム水溶液を塗布し、内部へ含浸させる ⇒ 鉄筋防錆
- ③亜硝酸リチウムを含有したポリマーセメントモルタル系表面被覆材にてコンクリート表面をコーティングする ⇒ 鉄筋防錆、劣化因子の遮断
- ④被覆層の保護のために、上塗りを行う

『劣化因子の遮断』 + 『鉄筋腐食の抑制』

【付加価値のある断面修復工法の例】

種別	特長	備考
塩分吸着剤を 配した 断面修復工		・コンクリート中の塩化物イオンを塩分吸着剤により吸着固定し、かつ亜硝酸イオンをコンクリート中に放出する。 ・長期的にわたりコンクリート中に高い防錆環境を創出するコンクリート体質改善型断面修復技術
亜硝酸リチウム 併用型 断面修復工		・コンクリートをはつりとり、鉄筋を露出させる ・鉄筋の錆をケレンした後、亜硝酸リチウム系防錆材を塗布 ・亜硝酸リチウム含有ポリマーセメントモルタルにて断面欠損部を修復する ・塩化物イオン量に応じて亜硝酸リチウム混入量を設定

4. 加速期後期



【劣化の状態】

- ・ひび割れ本数、幅、長さの増大。
- ・コンクリートの浮き、はく離、はく落が見られる。
⇒ 鉄筋腐食が著しく進行し、その速度が最大

【定量的な劣化指標】

- ・鉄筋の腐食程度、腐食速度
⇒ 腐食度目視確認、自然電位や分極抵抗の測定値など
(塩化物イオン濃度は当然腐食発生限界を超えている)

4. 加速期後期



【補修工法の主たる要求性能】

- ・鉄筋腐食の進行を根本的に抑制する
⇒ 鉄筋腐食を抑制し、構造物の性能低下を防ぐ

【補修工法の選定】

- ・鉄筋腐食を根本的に抑制できる工法から選択
⇒ 電気防食工法（塩分存在下でも鉄筋腐食を抑制）
亜硝酸リチウム内部圧入工法（塩分存在下でも鉄筋腐食を抑制）
全断面修復工法（塩分を含むコンクリートを完全に除去）

【備考】

- ・加速期前期からさらに変状が進行し、耐久性能低下が著しい状態

4. 加速期後期

【維持管理シナリオに応じた補修工法】

(1) ひび割れ注入、表面保護、部分断面修復など最小限の補修を定期的に行う

- ・劣化因子を遮断して劣化の進行速度を遅らせる
- ・既に鉄筋腐食が著しく進行しているため、これらの対策では早期に再劣化
- ・再劣化したら速やかに再補修を行うために、点検強化やモニタリングを併用
- ・外観変状が甚大な段階ではLCCで劣ることもある

⇒ 残存供用年数が少ない場合などでは適用されることもある

再劣化と再補修を繰り返すたびに、保有性能は低下し続けることを認識

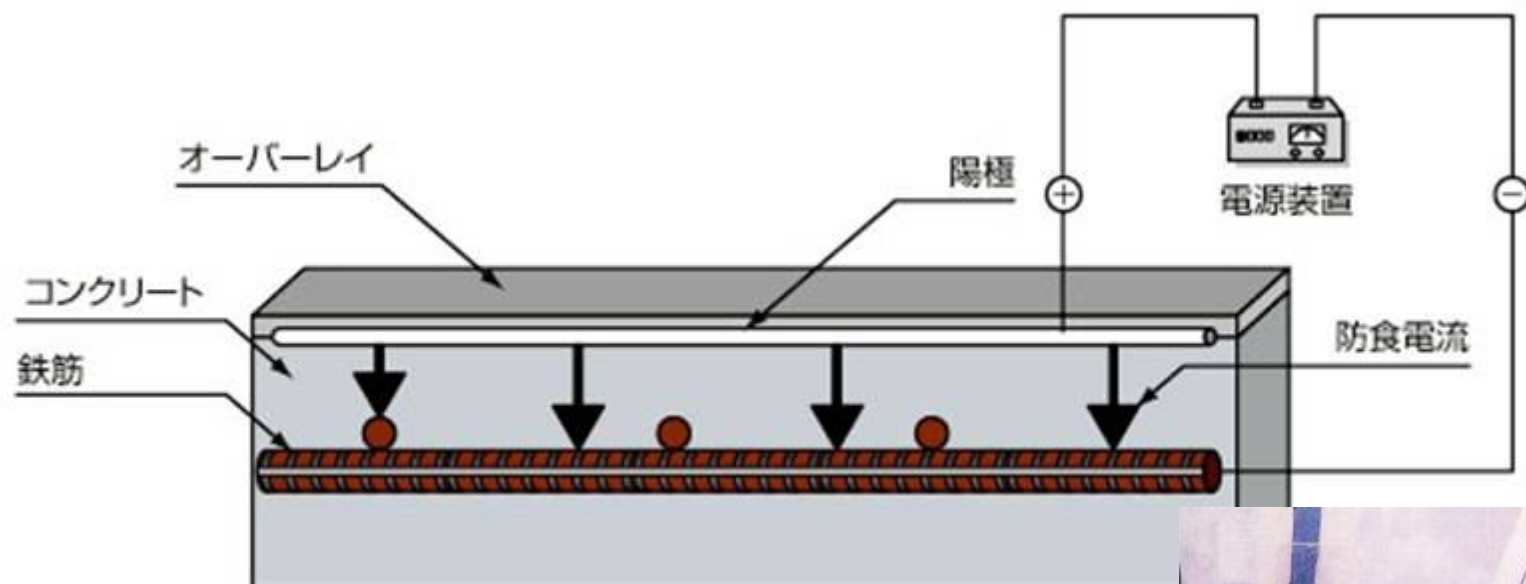
(2) 鉄筋腐食の根本的な抑制という工学的判断に基づく対策

- ・電気防食工法（鉄筋腐食を根本的に抑制）
- ・亜硝酸リチウム内部圧入工法（鉄筋腐食を根本的に抑制）
- ・全断面修復（塩化物イオンを含むコンクリートを完全に除去）

⇒ これらの工法を適用すれば、再劣化のリスクを限りなく低減できる。

イニシャルコストでは高価となるがLCCでは優れる場合が多い

【電気防食工法 — 外部電源方式】

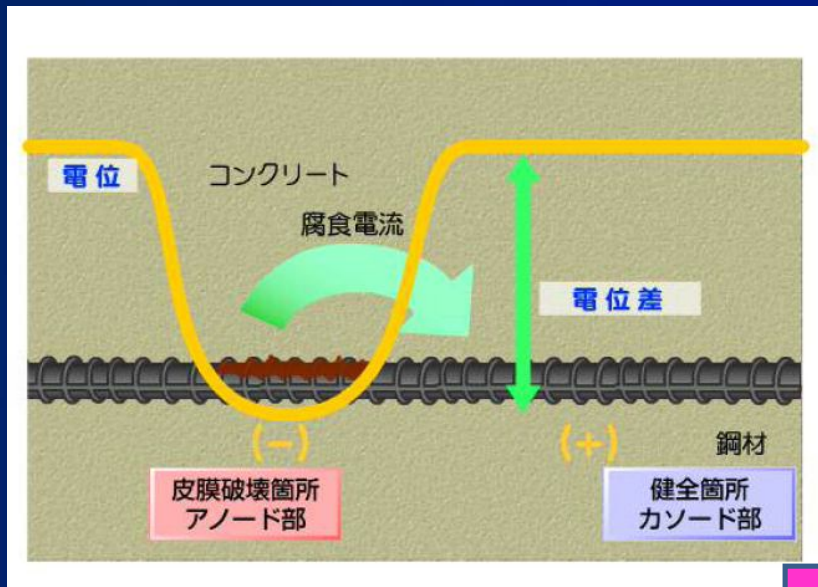


通電期間: 供用期間中
電流密度: $1 \sim 3 \text{ mA/m}^2$

- ・コンクリート表面に陽極材を設置する
- ・コンクリート中の鋼材を陰極として直流電流(防食電流)を流す
- ・この防食電流が流れている期間は鋼材の腐食が進行しない

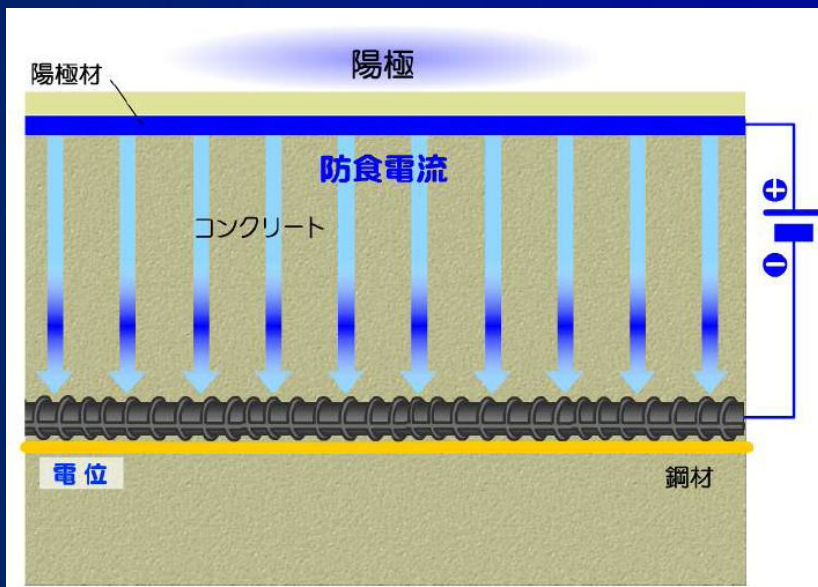


【電気防食工法の概念】



鉄筋腐食

- ・不動態皮膜が破壊された箇所では鉄がイオン化する**アノード反応**、健全な箇所では酸素が還元される**カソード反応**が起こる
- ・アノード部でイオン化した鉄は錆へと変化
- ・このときアノード部とカソード部では**電位差**が生じ、**腐食電流**が流れる



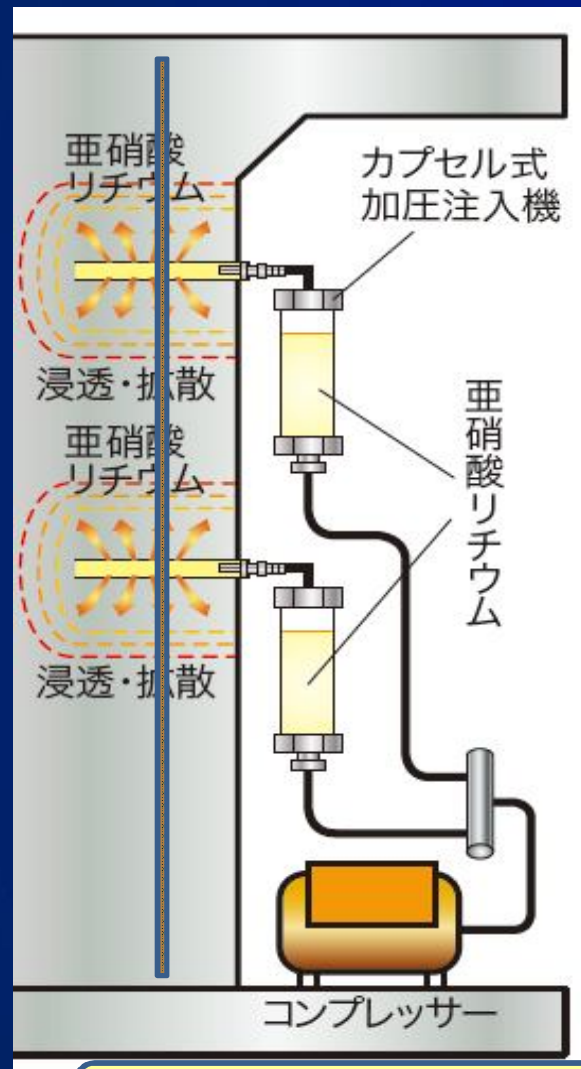
電気防食

- ・コンクリート表面に陽極材を設置し、鉄筋を陰極として微弱な防食電流 (5～30mA/m²程度) を流す
- ・防食電流はカソード部に優先的に流れるため**電位差**が**解消**され、**腐食電流**が**消失**し鋼材表面での化学反応が停止

【亜硝酸リチウム内部圧入工法】・・・リハビリカプセル工法

『亜硝酸イオンによる鉄筋腐食の抑制』

(NETIS:CG-12005-A)



- ①コンクリートにφ10mm、L=100mm程度の削孔を500mmの間隔で行う
- ②カプセル式加圧装置を設置して亜硝酸リチウム水溶液を内部圧入する ⇒ 鉄筋防錆
- ③削孔箇所を充填材にて埋め戻す

亜硝酸イオンによる不動態皮膜再生 ⇒ 『鉄筋腐食の抑制』

5. 劣化期



【劣化の状態】

- ・大規模なはく離、はく落。鉄筋の著しい断面減少。
- ・変位、たわみの発生。
⇒ 耐久性能だけでなく耐荷性能も低下

【定量的な劣化指標】

- ・鉄筋の断面減少率、構造物の耐荷性能
⇒ 断面の断面減少量測定値、たわみ測定値、
載荷試験結果など

5. 劣化期

【補修工法の主たる要求性能】

- ・耐荷性、剛性の回復
⇒ 構造物の安全性を確保



【補修工法の選定】

- ・脆弱化したコンクリート部位を修復し、構造物の安全性を確保
⇒ 断面修復工法
断面修復工法＋補強（鋼板接着、外ケーブルなど）

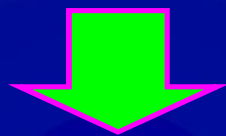
【備考】

- ・そもそも、劣化期に陥るまで放置すべきではない

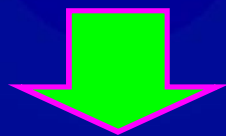
5. 劣化期

【維持管理シナリオに応じた補修工法】

構造物の安全性が損なわれている場合



維持管理シナリオを選択する余裕はない



工学的に必要と判断される対策を速やかに採るべき

ASR補修の考え方



アルカリシリカ反応(ASR)

原因

- ・コンクリート中は高アルカリ環境である
- ・コンクリート構造物は雨水や地下水などにより水分を供給されやすい
- ・コンクリートの骨材として反応性骨材が使用された



劣化進行

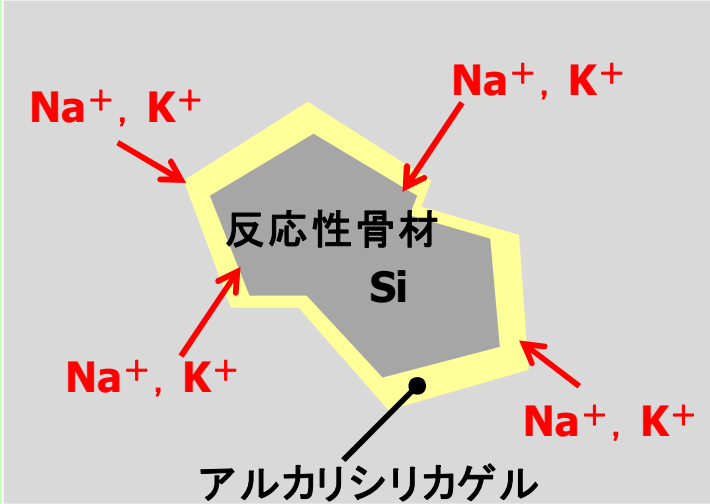
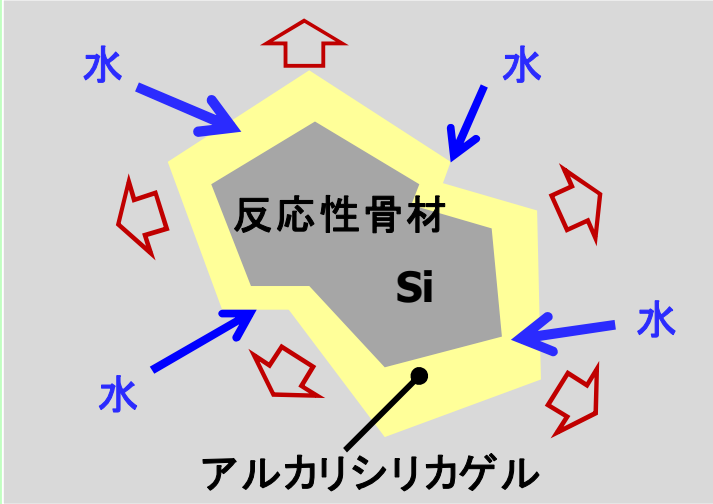
- ・コンクリート中の反応性骨材が、アルカリ分と反応してアルカリシリカゲルを生成
- ・アルカリシリカゲルが水分を吸収して膨張することにより、コンクリートにひび割れが生じる



性能低下

- ・ひび割れ、白色ゲル析出、段差、異常変形など
- ・圧縮強度、静弾性係数の低下、鉄筋腐食、鉄筋破断など

ASR劣化の進行過程

	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！)

【ASRによる劣化事例】

技術資料P.27



ASRの補修工法選定

【ASRの補修工法の要求性能】

①劣化因子の遮断

（外部からの水分の浸入を低減）

【表面被覆工法】

【表面含浸工法】

【ひび割れ注入工法】

②ゲルの非膨張化

（アルカリシリカゲルの膨張性を消失、低減）

【ASR抑制剤（亜硝酸リチウム）の活用】

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）

【部材接着工法・巻立て工法】

②ゲルの非膨張化

【ASR抑制剤の活用(亜硝酸リチウム)】

【活用方法】

- ・内部圧入工法
- ・ひび割れ注入工法
- ・表面含浸工法
- ・表面覆材工法



	第2ステージ 『アルカリシリカゲルの膨張』	リチウムによるゲルの非膨張化
概念図		
反応式	$\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2 + m\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2 \cdot m\text{H}_2\text{O}$ (アルカリシリカゲル) (水) (吸水膨張！)	$\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2 \xrightarrow{\text{NaとLiとのイオン交換}} \text{Li}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$

リチウムイオン(Li⁺)によるアルカリシリカゲルの非膨張化

表 2-3 ASR による構造物の外観上のグレードと劣化の状態

構造物の外観上のグレード	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、ひび割れが発生し、変色、アルカリシリカゲルの滲出が見られる。しかし、鋼材腐食による錆汁は見られない。
グレードⅢ	加速期	ASR による膨張速度が最大を示す段階で、ひび割れが進展し、ひび割れの幅および密度が増大する。また、鋼材腐食による錆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、かぶりの部分的なはく離・はく落が発生する。鋼材腐食が進行し錆汁が見られる。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:「2013 年制定 コンクリート標準示方書[維持管理編]」

●各劣化過程では**何が起きているのか？**

●**次の劣化過程に進行させない**ためには何をすればよいのか？

1. 潜伏期

【劣化の状態】

- ・外観上の変化は見られない。
⇒ ゲル生成過程で、膨張までは至っていない

【劣化指標】

- ・外観上の変状の有無
⇒ 変状なし

【補修工法の主たる要求性能】

- ・水分をコンクリート内部へ侵入させない(劣化因子の遮断)
⇒ ASRゲルの吸水膨張を起こさせない

【補修工法の選定】

- ・劣化因子の遮断性を有する工法から選択
⇒ 表面保護工法
表面含浸工法 …… 安価、モニタリング性が高い
表面被覆工法 …… 美観性向上、遮塩性が高い

【備考】

- ・ASRゲルの吸水膨張反応が生じる前に行う**予防保全**



1. 潜伏期

【維持管理シナリオに応じた補修工法】

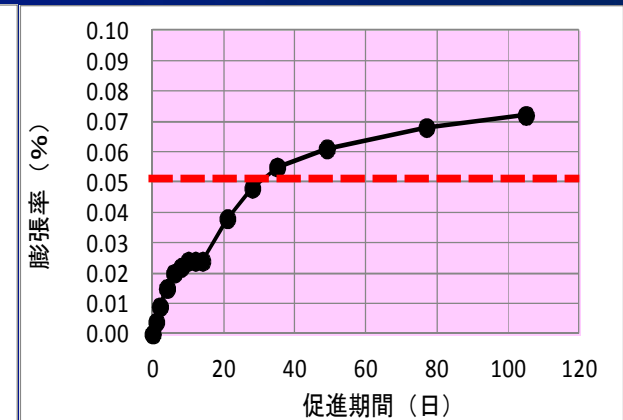
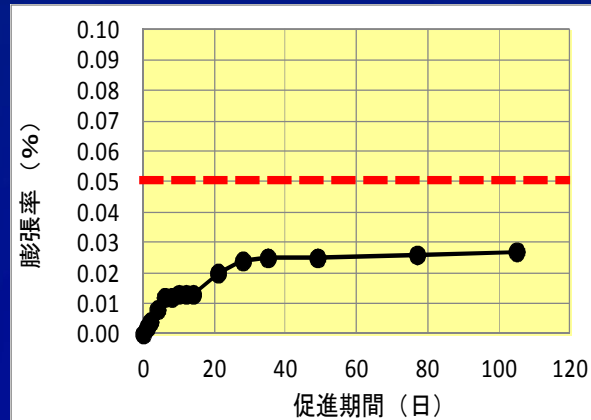
(1) 存置、経過観察

- ・現時点で何ら変状が生じていないので、しばらく様子を見る
- ・定期的な点検、外観目視調査
 - ⇒ 点検、調査による継続的な状況把握

(2) 表面保護工を定期的に行う

- ・表面含浸工、表面被覆工などを定期的に行う
- ・水分を遮断してASRゲルの吸水膨張反応を防ぐために行う予防保全
- ・適用する材料には耐用年数があるため、定期的に再補修を行う
 - ⇒ 劣化因子遮断性を途切れさせない

2. 進展期



【劣化の状態】

- ・ASRゲルの膨張が継続的に進行している
- ・コンクリート表面にひび割れが発生
⇒ ゲル生成過程から膨張過程へと移行

【定量的な劣化指標】

- ・残存膨張量（将来的な膨張性の有無）
⇒ 例えばJCI-DD2法で0.05%、NaOH浸漬法で0.1%など

2. 進展期

【補修工法の主たる要求性能】

①残存膨張量が無害の場合

- ・現時点で生じている変状への対応

②残存膨張量が有害の場合

- ・水分をコンクリート内部へ侵入させない（劣化因子の遮断）
- ・ASRゲルの膨張性を消失、低減させる（ゲルの非膨張化）
⇒ ASRゲル膨張をこれ以上進行させない

【補修工法の選定】

- ・残存膨張量の有無を考慮して、劣化因子の遮断またはゲルの非膨張化を図る工法を選択する
⇒ ひび割れ注入工法、表面保護工法（劣化因子の遮断）
亜硝酸リチウム内部圧入工法（ゲルの非膨張化）

【備考】

- ・劣化過程が進展期の段階で残存膨張性が収束する場合もあり得る
- ・残存膨張性の有無に応じて対策方針を選択する



2. 進展期

【維持管理シナリオに応じた補修工法（残存膨張量が有害の場合）】

（1） 存置、経過観察

- ・変状が軽微な段階で耐久性能への影響が小さいうちはしばらく様子を見る。
- ・定期的な点検、外観目視調査による継続的な状況把握
⇒ 補修対策を実施するための管理限界の設定が必要

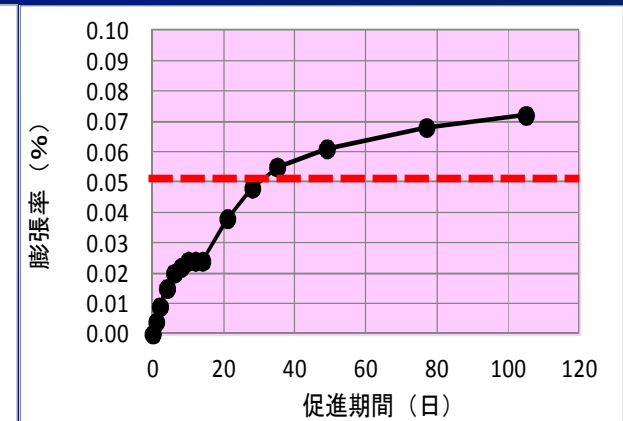
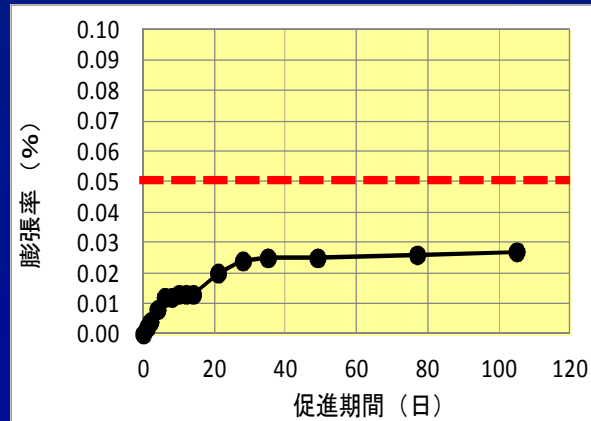
（2） ひび割れ注入工、表面保護工を定期的に行う

- ・水分を遮断してASRゲルの吸水膨張を可能な限り抑制する。
- ・適用する材料には耐用年数があるため、定期的に再補修を行う。
⇒ 劣化因子遮断性を途切れさせない
各工法にゲル膨張抑制効果を併せ持つ材料を選択するのも効果的

（3） 費用を投じて以後のメンテナンスをフリーとする

- ・亜硝酸リチウム内部圧入工（ゲルの非膨張化による根本的なASR補修）
- ・巻き立て工法、接着工法（膨張拘束）
⇒ 構造物の重要性や費用対効果、LCC等を十分に検討したうえで適用

3. 加速期



【劣化の状態】

- ・ASRによる膨張速度が最大を示す。
- ・ひび割れ幅、ひび割れ密度が増大。
⇒ 最も活発にASR膨張が進行

【定量的な劣化指標】

- ・残存膨張量（将来的な膨張性の有無）
⇒ 例えばJCI-DD2法で0.05%、NaOH浸漬法で0.1%など

3. 加速期



【補修工法の主たる要求性能】

①残存膨張量が無害の場合

- ・現時点で生じている変状への対応

②残存膨張量が有害の場合

- ・水分をコンクリート内部へ侵入させない（劣化因子の遮断）
- ・ASRゲルの膨張性を消失、低減させる（ゲルの非膨張化）
⇒ コンクリート構造物の性能をこれ以上低下させない

【補修工法の選定】

- ・残存膨張量の有無を考慮して、劣化因子の遮断またはゲルの非膨張化を図る工法を選択する
⇒ ひび割れ注入工法、表面保護工法（劣化因子の遮断）
亜硝酸リチウム内部圧入工法（ゲルの非膨張化）

【備考】

- ・劣化過程が加速期の段階で残存膨張性が収束する場合もあり得る
- ・残存膨張性の有無に応じて対策方針を選択する

3. 加速期

【維持管理シナリオに応じた補修工法（残存膨張量が大きい場合）】

（1） ひび割れ注入工、表面保護工を定期的に行う

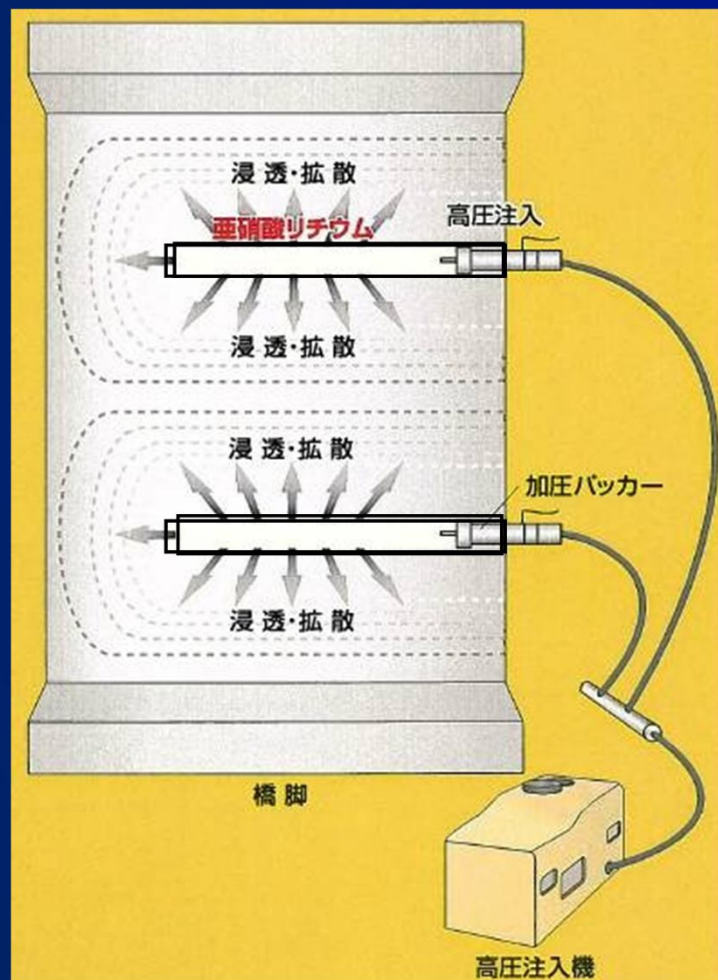
- ・ 水分を遮断してASRゲルの吸水膨張を可能な限り抑制する。
- ・ 適用する材料には耐用年数があるため、定期的に再補修を行う。
⇒ ASR膨張速度が大きいいため、短いサイクルでの再補修が必要
LCCで評価すると割高となることが多い

（2） ASR膨張の根本的な抑制という工学的判断に基づく対策

- ・ 亜硝酸リチウム内部圧入工（ゲルの非膨張化による根本的なASR補修）
- ・ 巻き立て工法、接着工法（膨張拘束）
⇒ これらの工法を適用すれば、再劣化のリスクを限りなく低減できる
イニシャルコストでは高価となるがLCCでは優れる場合が多い

【亜硝酸リチウム内部圧入工法】・・・ ASRリチウム工法

『リチウムイオンによるゲルの非膨張化』



・コンクリートに削孔して、亜硝酸リチウム40%水溶液を加圧注入.

注入量 : Li/Naモル比0.8となる LiNO_2
削孔径 : $\phi 10\text{mm}$, 20mm , 38mm
削孔間隔 : 500mm , 750mm , 1000mm
注入圧力 : $0.5\text{MPa} \sim 1.5\text{MPa}$
注入期間 : 20日～40日程度

- ①ひび割れ注入および表面被覆により、コンクリート表面のひび割れを閉塞する
- ②コンクリートに小径の削孔を行い、圧入孔とする
- ③油圧式圧入装置、配管、パッカーを設置して、亜硝酸リチウムを加圧注入する
- ④所定の量の亜硝酸リチウムをコンクリート内部に圧入した後、削孔箇所を無収縮グラウト材にて埋め戻す

リチウムイオンによる『ゲルの非膨張化』⇒ASR膨張抑制

4. 劣化期



【劣化の状態】

- ・ひび割れがさらに増大。段差やズレも生じる。
- ・鉄筋腐食、鉄筋破断、コンクリート強度の低下。
⇒ 耐久性能だけでなく耐荷性能にも影響

【定量的な劣化指標】

- ・残存膨張量（将来的な膨張性の有無）
- ・構造物の耐荷性能、鉄筋破断の有無
⇒ 劣化期に至ると、既に膨張性が収束している

4. 劣化期



【補修工法の主たる要求性能】

- ・鉄筋破断への対応、コンクリート強度低下への対応
⇒ 構造物の安全性を確保

【補修工法の選定】

- ・既に膨張は収束しているため、現時点で不足する性能を補うための対処
⇒ ひび割れ注入＋表面保護工（鉄筋腐食を抑制）
断面修復工法
断面修復工法＋補強（鋼板接着、連続繊維補強、鋼材追加など）

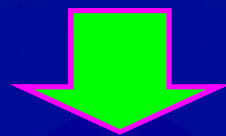
【備考】

- ・そもそも、劣化期に陥るまで放置すべきではない

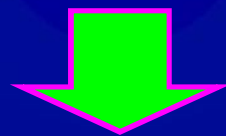
4. 劣化期

【維持管理シナリオに応じた補修工法】

構造物の安全性が損なわれている場合



維持管理シナリオを選択する余裕はない



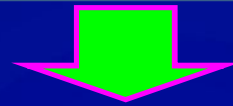
工学的に必要と判断される対策を速やかに採るべき

4. おわりに

【劣化機構に応じた補修工法の選定】

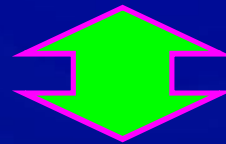
●点検、調査結果が示す劣化状況の定量的な評価

定量的に現状を評価し、補修工法選定に反映。



●補修工法に求める要求性能の定量的評価（工学的判断）

要求性能に合致する補修工法を工学的に判断する
適用する補修工法の限界を明確にする



●補修後の構造物に適用する維持管理シナリオ（時間軸）

維持管理シナリオに応じて要求性能は変わり得る
補修後の構造物の生涯をデザインする