

コンクリート構造物の補修・補強に関するフォーラム 講演用資料
【広島・山口・大阪・福岡・東京会場】

劣化機構に応じたコンクリート補修の 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
極東興和株式会社

江良 和徳

本日の主な内容

1. はじめに
2. 塩害・中性化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. 劣化機構に応じた補修工法の選定の考え方

1. はじめに

【急増するコンクリート構造物の劣化】

- ・高度経済成長期に大量に建設された社会資本ストックが、まもなく50年を迎える
- ・その当時は、塩害やASRに対する知見が十分でなかった

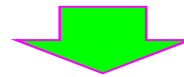


個々の状況に応じて最適な補修技術・補修材料を選定することが重要

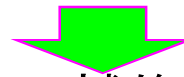
【これで十分でしょうか？】

例えば、

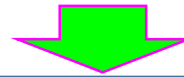
- ・塩害による鉄筋露出が生じている ⇒ 断面修復
- ・ASRによるひび割れが生じている ⇒ ひび割れ注入＋表面含浸



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？



劣化の原因と程度によって、補修工法に**要求される性能**が異なる。
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・中性化補修の基本的な考え方



【塩害】・・・劣化メカニズム

原因

- ・種々の原因で塩化物イオンがコンクリート中に浸入
- ・浸入した塩化物イオンはコンクリート表面から内部へ浸透



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(腐食発生限界)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

【塩害】 … 劣化事例



【中性化】・・・劣化メカニズム

原因

- ・大気中の二酸化炭素がコンクリート中 (pH=12以上) に浸入
- ・コンクリート中の水酸化カルシウムが二酸化炭素と反応して炭酸カルシウムを生成
- ・その結果, コンクリート中のpHが低下 (pH=11以下) する



劣化進行

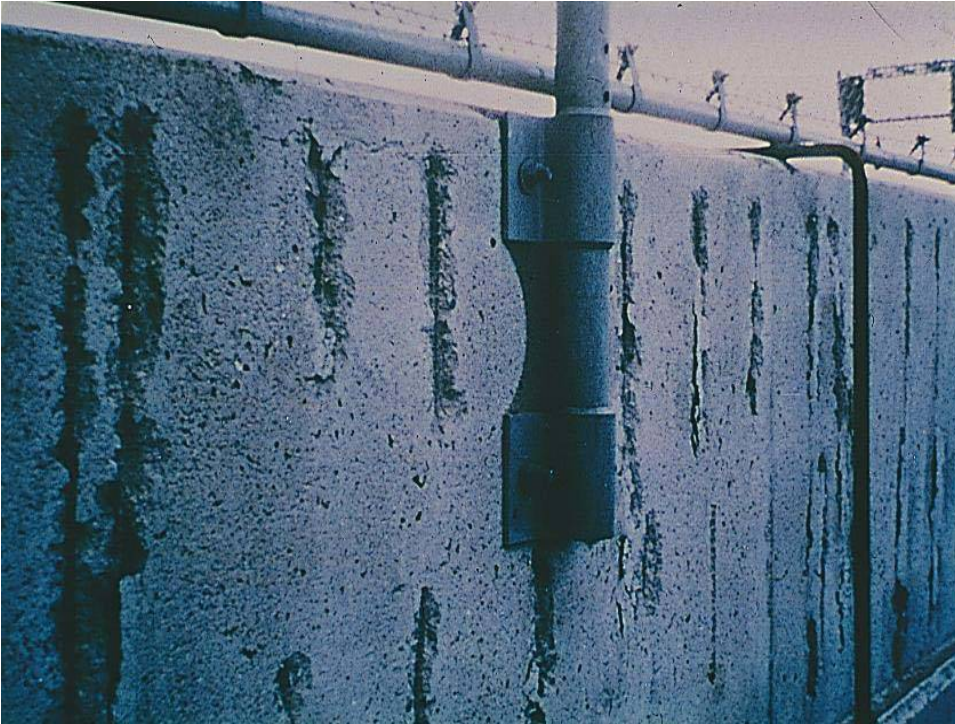
- ・中性化領域はコンクリート表面から内部に向かって進行する
- ・中性化領域が鉄筋付近まで到達すると鋼材の不動態皮膜が破壊され, 鉄筋が腐食する



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

【中性化】 … 劣化事例



壁高欄のコンクリートはく落

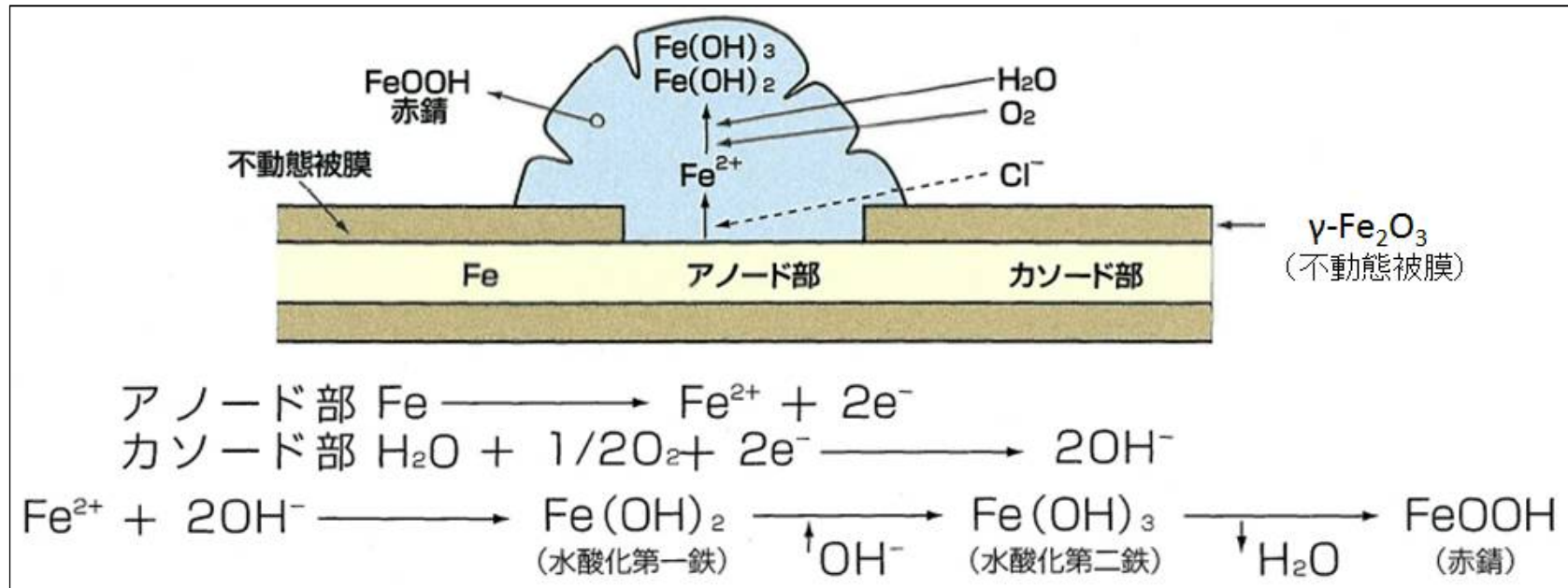
- ・道路橋壁高欄
- ・自動車の排気ガスによるCO₂供給
- ・はく離箇所以外の鉄筋も腐食



張出し床版下面の鉄筋露出

- ・RC上部工の張出し床版下面
- ・もともと鉄筋かぶりが不足
- ・早期に中性化領域が鉄筋位置に到達

【塩害・中性化】 … 鉄筋腐食の模式図



- 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】・・・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？

【中性化】・・・劣化過程

表 2-2 中性化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	外観上の変化が見られない, 中性化残りが発錆限界以上.
グレードⅡ	進展期	外観上の変化が見られない, 中性化残りが発錆限界未満, 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はく離・はく落が見られる, 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はく離・はく落が見られる, 鋼材の断面欠損が生じている.

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？

【塩害・中性化】 … 一般的な補修工法と要求性能

①劣化因子の遮断（塩化物イオン, 二酸化炭素, 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

【脱塩工法】（コンクリート中に浸入した塩化物イオンを除去；塩害）

【再アルカリ化】（中性化したコンクリートのアルカリ性を回復；中性化）

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（亜硝酸リチウム）の活用】

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】

【塩害・中性化補修の基本的な考え方】 … 1. 潜伏期

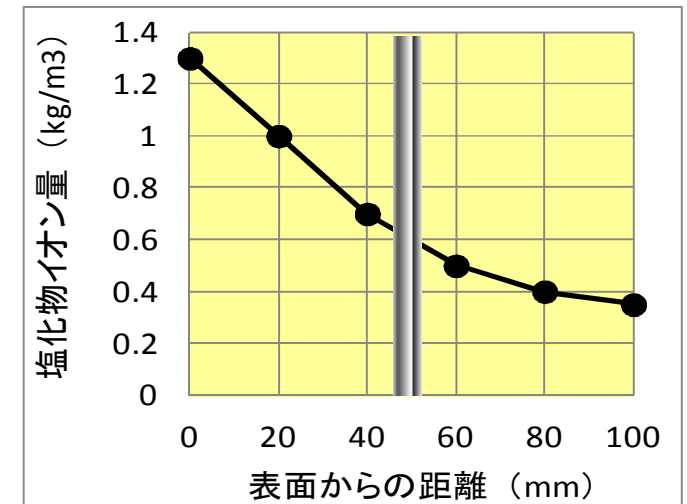
【劣化の状態】

- ・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(塩害の場合)
- ・中性化残りが発錆限界以上(中性化の場合)
⇒ 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
- ・中性化深さの測定値
⇒ 腐食発生限界を超えているか？



【塩害・中性化補修の基本的な考え方】 … 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(塩害の場合)
 - ・二酸化炭素を侵入させない(中性化の場合)
- ⇒ 鉄筋の腐食環境をつくらない

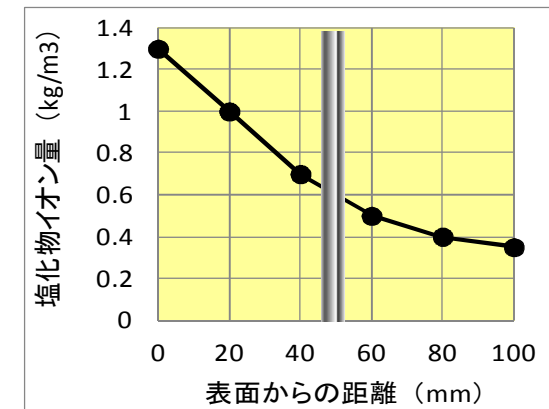
【工学的判断による補修工法の選定】

- ・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**



【塩害・中性化補修の基本的な考え方】 … 1. 潜伏期

【維持管理シナリオに応じた補修工法の選定】

(1) 経過観察による維持管理シナリオ

- ・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
⇒ 点検強化、モニタリングによる継続的な状況把握が必須

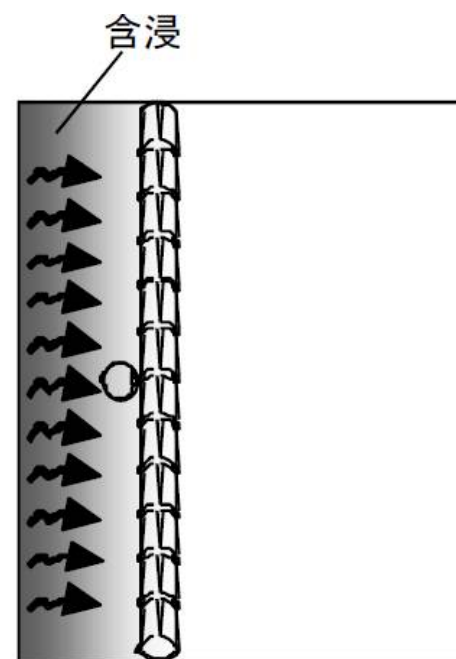
(2) 工学的判断に基づく表面保護工を定期的に行う維持管理シナリオ

- ・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

【参考：表面含浸工法】

目的：劣化因子の侵入抑制

- ・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

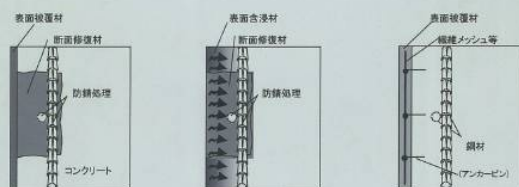
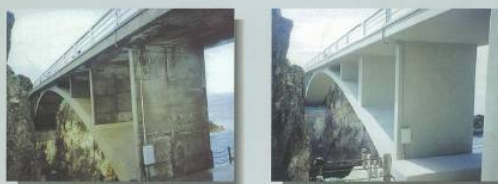


- ・ハケ, ローラーにより塗布含浸する
- ・含浸深さは数mm～数十mmで, 使用材料によって異なる

【参考：表面含浸工法】

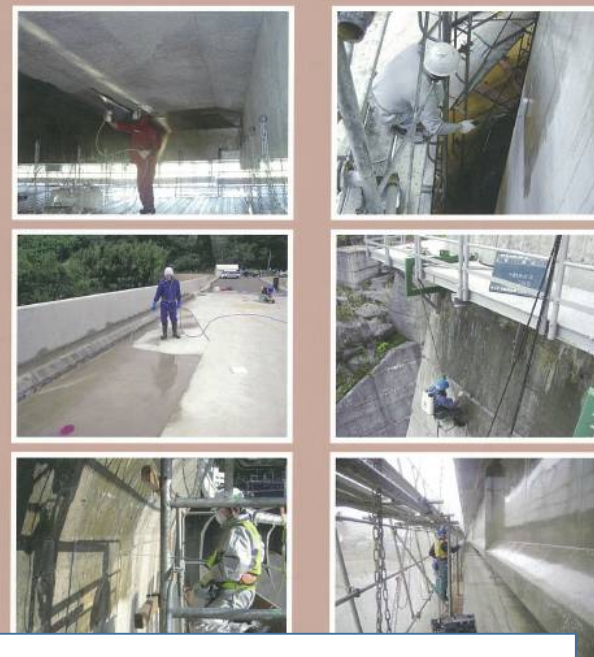
119 コンクリートライブラリー

表面保護工法 設計施工指針（案）



137 コンクリートライブラリー

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。』

【参考：表面含浸工法】

種別		特長	備考
シラン系		<ul style="list-style-type: none"> 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。 	<ul style="list-style-type: none"> 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	<ul style="list-style-type: none"> 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。 	<ul style="list-style-type: none"> 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	<ul style="list-style-type: none"> 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。 	<ul style="list-style-type: none"> 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。

【塩害・中性化補修の基本的な考え方】 … 2. 進展期

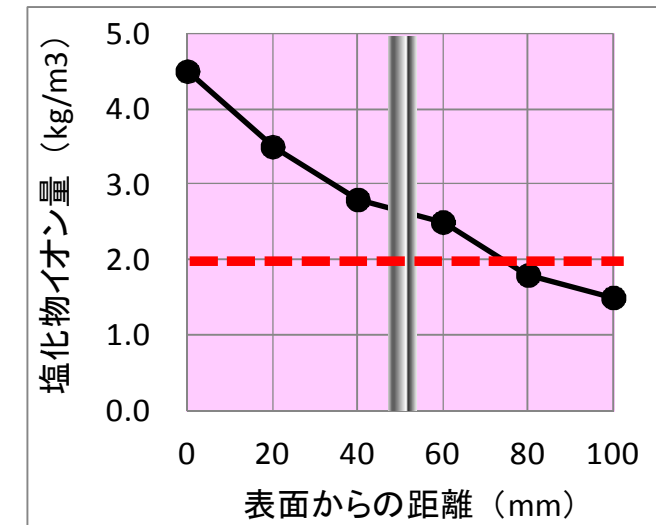
【劣化の状態】

- ・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(塩害の場合)
- ・中性化残りが発錆限界未満(中性化の場合)
⇒ 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(塩害の場合)
- ・中性化深さの測定値(中性化の場合)
⇒ 腐食発生限界を超えているか？



【塩害・中性化補修の基本的な考え方】 … 2. 進展期

【補修工法の主たる要求性能】

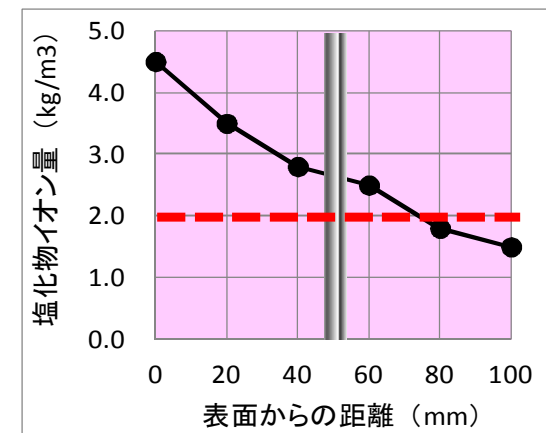
- ・塩化物イオン、二酸化炭素、水、酸素をこれ以上侵入させない
- ・鉄筋腐食の進行速度を抑制する
 - ⇒ 鉄筋腐食を遅らせ、変状をできるだけ顕在化させない

【工学的判断による補修工法の選定】

- ・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**



【塩害・中性化補修の基本的な考え方】 … 2. 進展期

【維持管理シナリオに応じた補修工法】

(1) 経過観察による維持管理シナリオ

- ・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) 工学的判断に基づく表面保護工を定期的に行う維持管理シナリオ

- ・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

【参考：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	<ul style="list-style-type: none">・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	<ul style="list-style-type: none">・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

【塩害・中性化補修の基本的な考え方】 … 3. 加速期前期

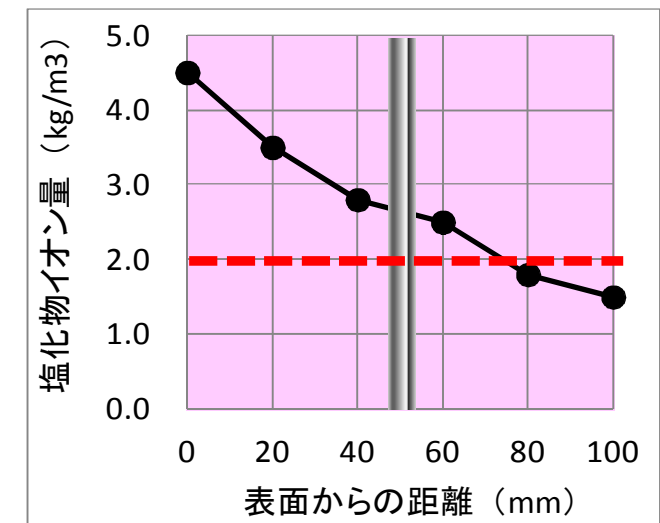
【劣化の状態】

- ・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



※ 既に腐食発生限界を超えている状態であることは明らか

【塩害・中性化補修の基本的な考え方】 … 3. 加速期前期

【補修工法の主たる要求性能】

- ・塩化物イオン、二酸化炭素、水、酸素をこれ以上侵入させない
- ・鉄筋腐食の進行を抑制する
 - ⇒ これ以上の変状の増大を防ぐ

【工学的判断による補修工法の選定】

- 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



【塩害・中性化補修の基本的な考え方】 … 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維持管理シナリオ

- ・劣化因子を遮断して劣化の進行速度を遅らせる
- ・既に鉄筋腐食が進行しているため、これらの対策では再劣化する可能性を考慮
- ・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本シナリオがLCCでも有利となることが多い
 - ⇒ 補修のインシヤルコストを最小とし、必要に応じて再補修を繰り返すという選択
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) 鉄筋腐食を根本的に抑制し、将来的な再劣化を許容しない維持管理シナリオ

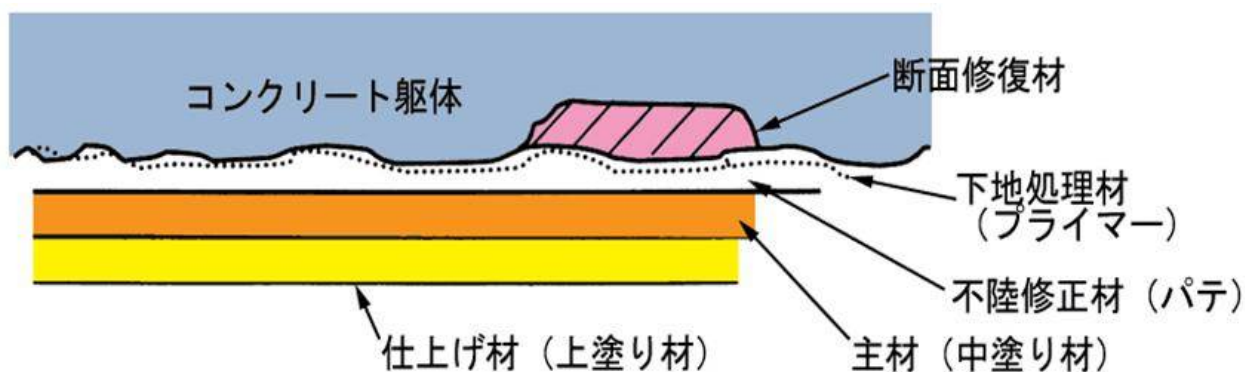
- ・電気防食工法（鉄筋腐食を根本的に抑制）
- ・亜硝酸リチウム内部圧入工法（鉄筋腐食を根本的に抑制）
- ・全断面修復（塩化物イオンを含むコンクリートを完全に除去）
 - ⇒ これらの工法を適用すれば、再劣化のリスクを限りなく低減できる
構造物の重要性や費用対効果を十分に検討したうえで適用

【参考：表面被覆工法】



- ・コンクリート表面を有機系，無機系などの材料にて被覆することにより，コンクリート表面からの劣化因子の侵入を防ぐ

- ・仕様，グレードなど，被覆材の種類が豊富
- ・ハケ，コテ，ローラーにより塗布する



【参考：ひび割れ注入工法】



- ・ひび割れを閉塞することにより、ひび割れを通じた劣化因子の侵入を遮断する
- ・セメント系, ポリマーセメント系, 樹脂系などの種類がある
- ・適用可能なひび割れ幅
0.2mm～10.0mm程度

※ひび割れ注入工とひび割れ充填工

- ・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る
- ・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もひび割れ注入工法の方が抑制効果が高いと考えられる
- ・劣化要因に応じた工法選定を行うことが重要

【参考：断面修復工法（部分断面修復）】



- ・鉄筋腐食によるコンクリートの浮き、はく離、鉄筋露出が発生
- ・それらの変状箇所を部分的にはつり取り、断面修復材にて埋め戻す
- ・はつりとした範囲からは塩化物イオンが除去されている(限定的)
- ・境界面付近にマクロセル腐食を生じる可能性もある

※部分断面修復と全断面修復

- ・浮き、はく離、鉄筋露出など、コンクリート脆弱部のみを抽出して、最小限の範囲のみはつり取り、断面を修復する工法を部分断面修復と称す。
- ・浮きやはく離の有無に関わらず、全断面をはつりとして全断面を修復する工法を全断面修復と称す。

【塩害・中性化補修の基本的な考え方】 … 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】

【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



※ 既に腐食発生限界を超えている状態であることは明らか

【塩害・中性化補修の基本的な考え方】 … 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、確実に構造物の性能低下を防ぐ

【工学的判断による補修工法の選定】

- ・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

【塩害・中性化補修の基本的な考え方】 … 4. 加速期後期

【維持管理シナリオに応じた補修工法】

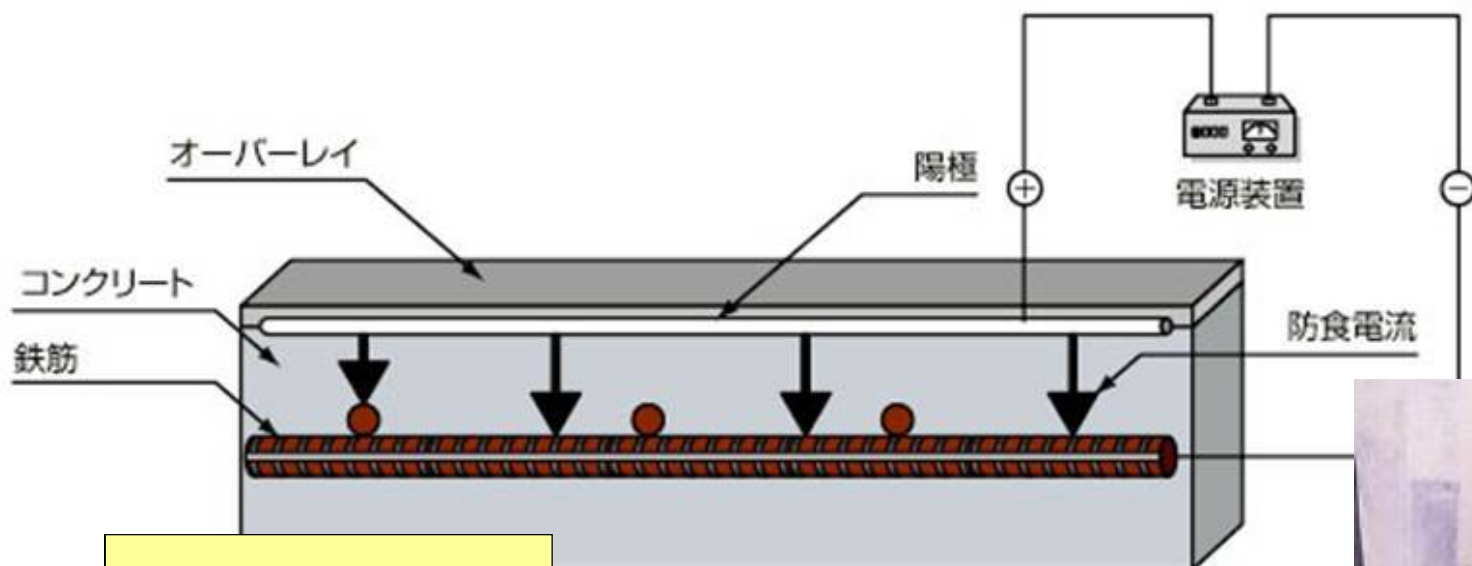
(1) ひび割れ注入、表面保護、部分断面修復など最小限の補修を定期的に行う維持管理シナリオ

- ・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することを覚悟
- ・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) 鉄筋腐食を根本的に抑制し、将来的な再劣化を許容しない維持管理シナリオ

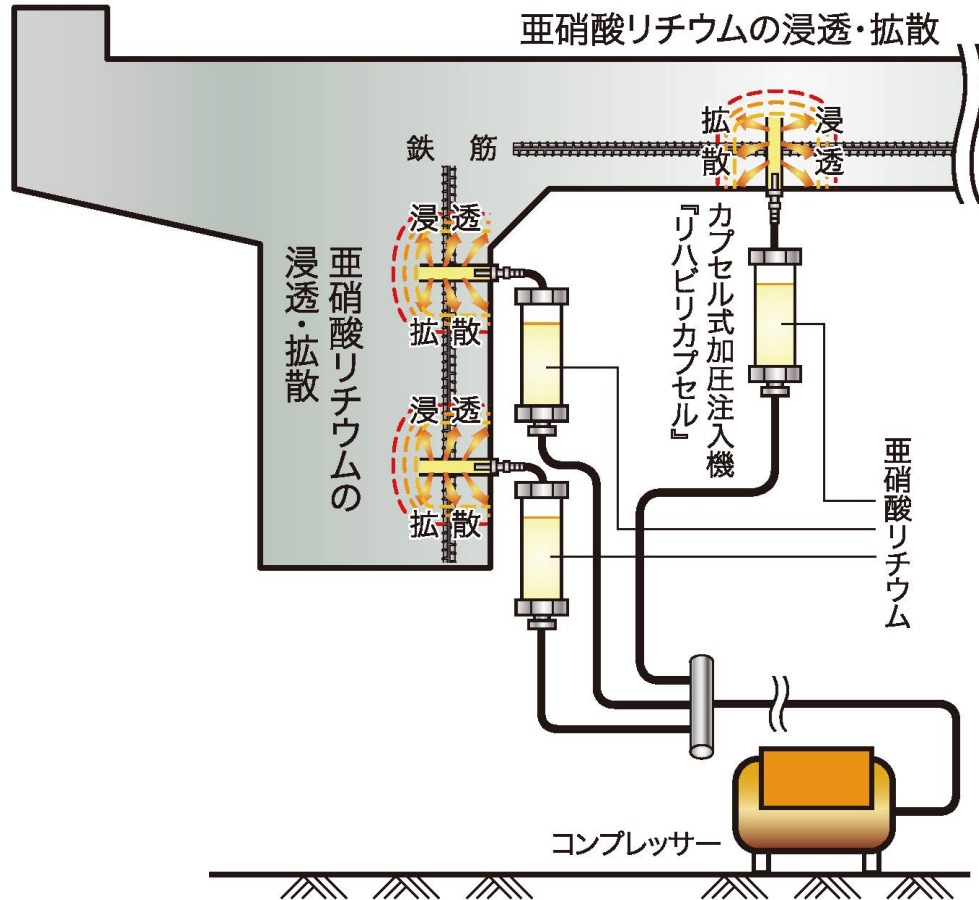
- ・電気防食工法（鉄筋腐食を根本的に抑制）
- ・亜硝酸リチウム内部圧入工法（鉄筋腐食を根本的に抑制）
- ・全断面修復（塩化物イオンを含むコンクリートを完全に除去）
 - ⇒ これらの工法を適用すれば、再劣化のリスクを限りなく低減できる
 - イニシャルコストでは高価となるがLCCでは優れる場合が多い

【参考：電気防食工法】



- ・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

【参考：亜硝酸リチウム内部圧入工法】



- ①コンクリートに $\phi 10\text{mm}$ 、 $L=100\text{mm}$ 程度の削孔を500mmの間隔で行う
- ②カプセル式加圧装置にて浸透拡散型亜硝酸リチウムを部材表層部に内部圧入する
- ③削孔箇所を充填材にて埋め戻す

不働態皮膜を早急かつ確実に再生する

亜硝酸イオンによる鉄筋腐食抑制効果のみを目的とした工法

【参考：断面修復工法（全断面修復）】



- ・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
- ・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
- ・「劣化因子の除去」という要求性能を満たすための断面修復工法はこの全断面修復工法を指す

※部分断面修復と全断面修復

- ・浮き、はく離、鉄筋露出など、コンクリート脆弱部のみを抽出して、最小限の範囲のみはつりとり、断面を修復する工法を部分断面修復と称す。
- ・浮きやはく離の有無に関わらず、全断面をはつりとして全断面を修復する工法を全断面修復と称す。

【塩害・中性化補修の基本的な考え方】 … 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



【塩害・中性化補修の基本的な考え方】 … 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
⇒ 必要に応じてひび割れ注入、断面修復工法
＋各種補強工法(鋼板接着、外ケーブルなど)

【備考】

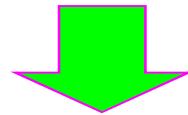
- ・そもそも、劣化期に陥るまで放置すべきではない



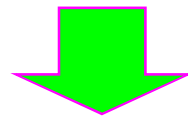
【塩害・中性化補修の基本的な考え方】 … 5. 劣化期

【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

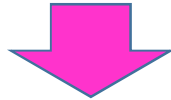
3. ASR補修の基本的な考え方



【アルカリシリカ反応(ASR)】… 劣化メカニズム

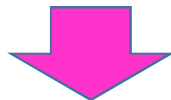
原因

- ・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の**吸水膨張**により、コンクリートにひび割れが生じる



性能低下

- ・ひび割れ進展、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

【アルカリシリカ反応(ASR)】 … 劣化事例



【アルカリシリカ反応(ASR)】・・・劣化過程

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？

【アルカリシリカ反応(ASR)】 … 一般的な補修工法と要求性能

- 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】

※構造形式、対象部位によっては適用できる場合がある

【ASR補修の基本的な考え方】 … 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

【工学的判断による補修工法の選定】

- ・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**



【ASR補修の基本的な考え方】 … 1. 潜伏期

【維持管理シナリオに応じた補修工法】

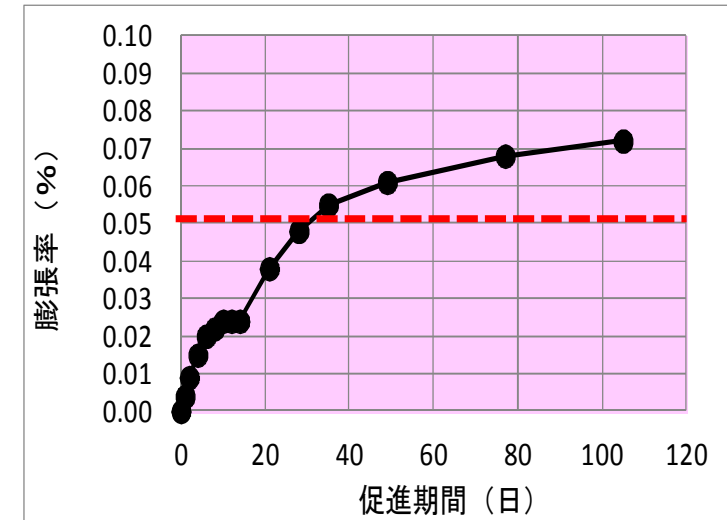
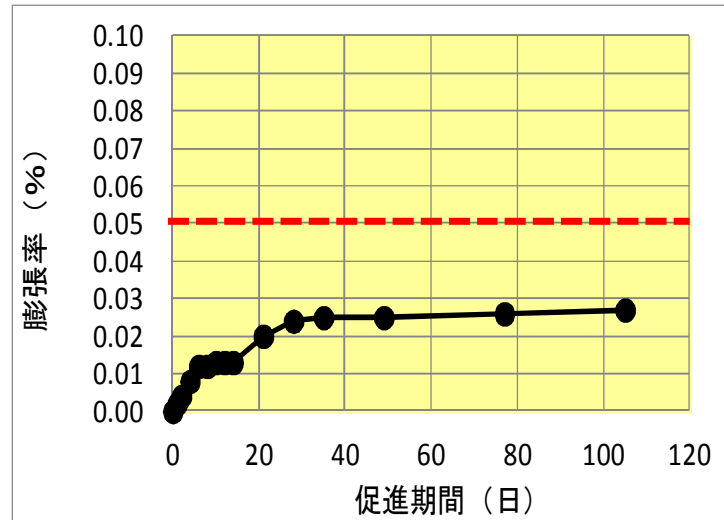
(1) 経過観察による維持管理シナリオ

- ・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
- 点検強化、モニタリングによる継続的な状況把握が必須

(2) 工学的判断に基づく表面保護工を定期的に行う維持管理シナリオ

- ・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
 - ⇒ 軽微な処置を繰り返すことでASR劣化を顕在化させない

【ASR補修の基本的な考え方】 … 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

【ASR補修の基本的な考え方】 … 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（ひび割れ注入工、表面保護工など）

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

【工学的判断による補修工法の選定】

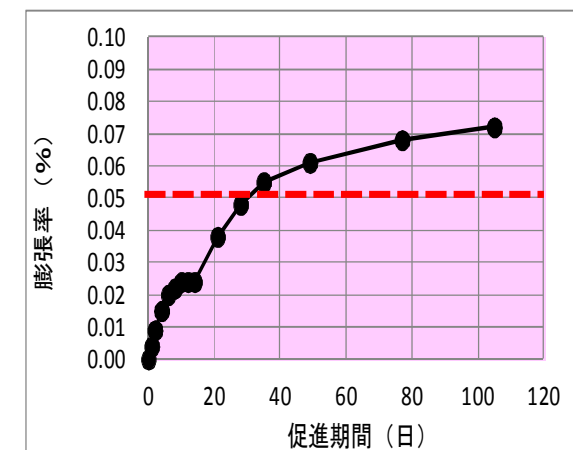
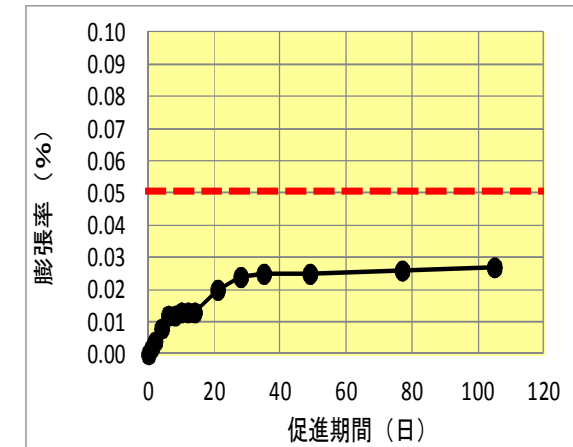
- ・残存膨張量の有無を考慮して、劣化因子の遮断またはゲルの非膨張化を図る工法を選択する

⇒ 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



【ASR補修の基本的な考え方】 … 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）経過観察による維持管理シナリオ

- ・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

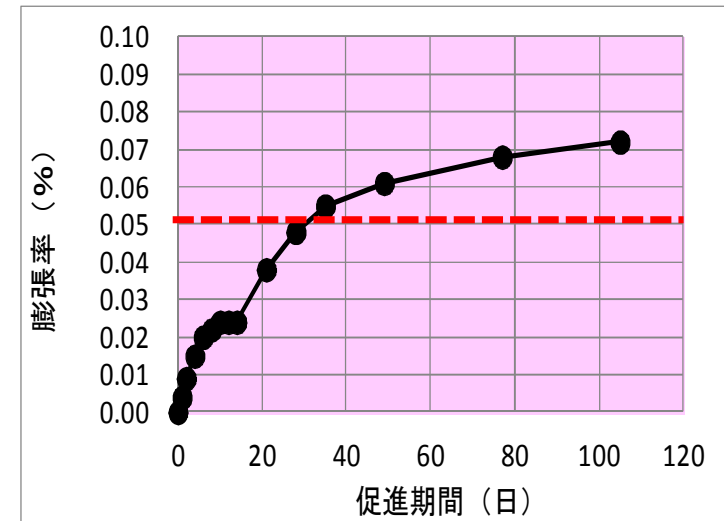
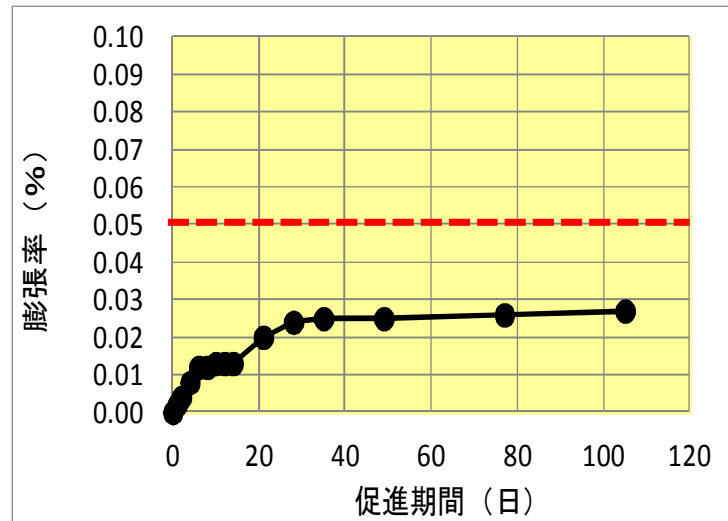
（2）ひび割れ注入工、表面保護工など最小限の補修を定期的に行う維持管理シナリオ

- ・ASR膨張が進行中であるため、これらの対策では再劣化する可能性を考慮
- ・外観変状がまだ比較的軽微な段階では本シナリオがLCCでも有利となることが多い
⇒ 補修のイニシャルコストを最小とし、必要に応じて再補修を繰り返すという選択
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）ASR膨張を根本的に抑制することで、将来的な再劣化を許容しない維持管理シナリオ

- ・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

【ASR補修の基本的な考え方】 … 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

【ASR補修の基本的な考え方】 … 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（ひび割れ注入工、表面保護工など）

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**

【工学的判断による補修工法の選定】

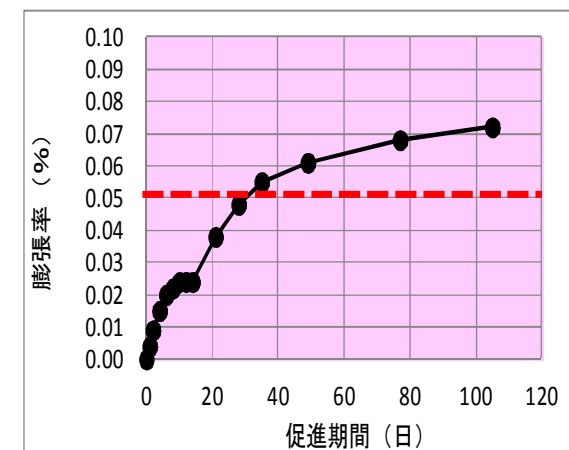
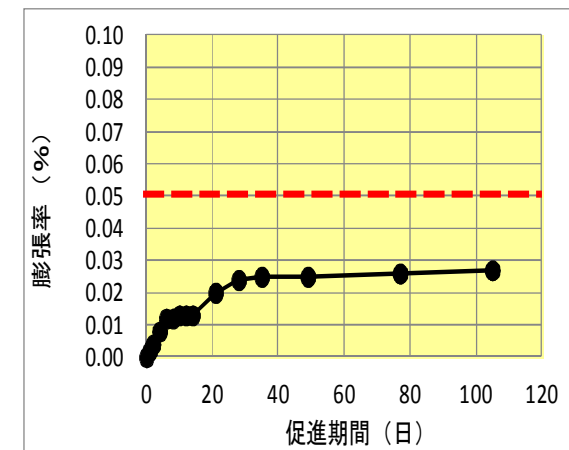
- ・**残存膨張量の有無**を考慮して、劣化因子の遮断またはゲルの非膨張化を図る工法を選択する

⇒ **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



【ASR補修の基本的な考え方】 … 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）】

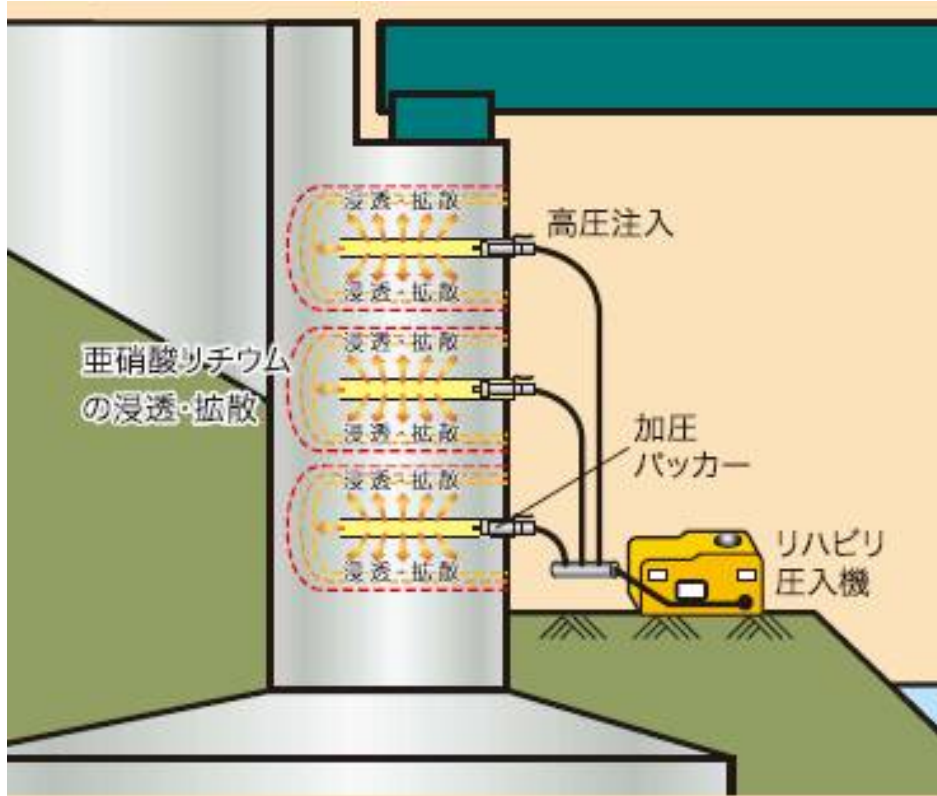
(1) ひび割れ注入工、表面保護工など最小限の補修を定期的に行う維持管理シナリオ

- ・ASR膨張性が顕著であるため、これらの対策では早期に再劣化する可能性を考慮
- ・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) ASR膨張を根本的に抑制することで、将来的な再劣化を許容しない維持管理シナリオ

- ・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

【参考：亜硝酸リチウム内部圧入工法】



- ①コンクリートにΦ20mmの削孔を行い，圧入孔とする
- ②油圧式圧入装置，配管，パッカーを設置して，浸透拡散型亜硝酸リチウムを部材全体に内部圧入する
- ③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，圧入孔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ASR膨張抑制効果のみを目的とした工法

【ASR補修の基本的な考え方】 … 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ことが多い

【ASR補修の基本的な考え方】 … 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

【工学的判断による補修工法の選定】

- ・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＋各種補強（鋼板接着、連続繊維補強、鋼材追加など）

【備考】

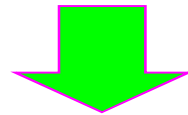
- ・そもそも、劣化期に陥るまで放置すべきではない



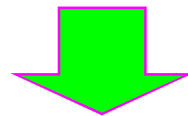
【ASR補修の基本的な考え方】 … 4. 劣化期

【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. 劣化機構に応じた補修工法の選定の考え方

【劣化機構に応じた補修工法の選定の考え方】

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」

コンクリートの劣化の**定量的な評価**



各劣化過程では**何が起きているのか？**



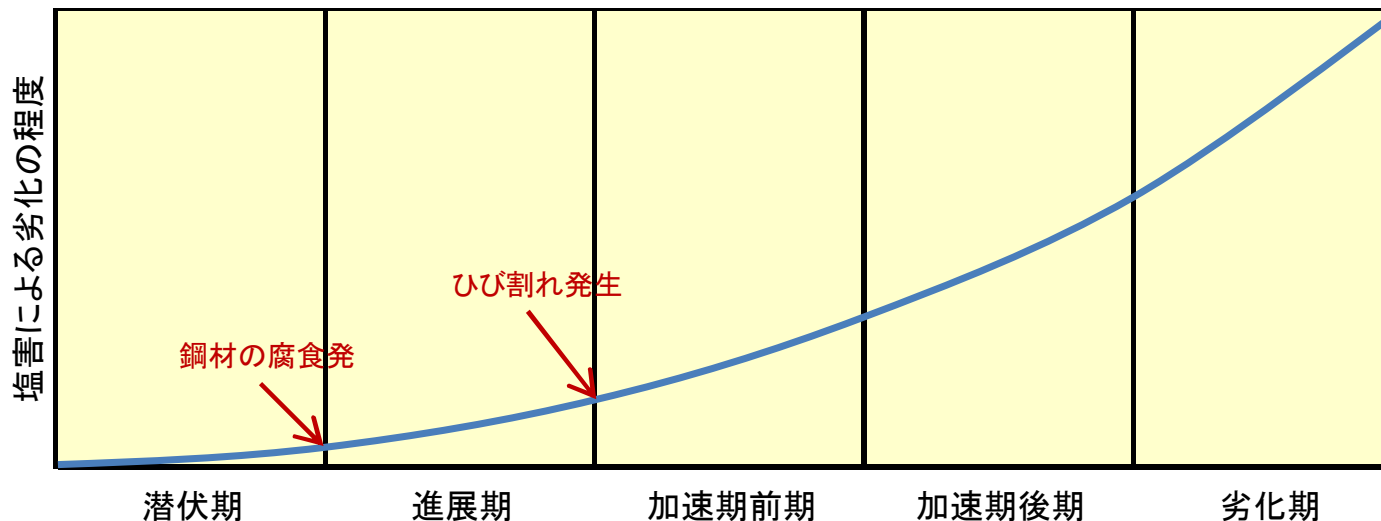
次の劣化過程に進行させないためには何をすればよいのか？

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、アルカリンシ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]」

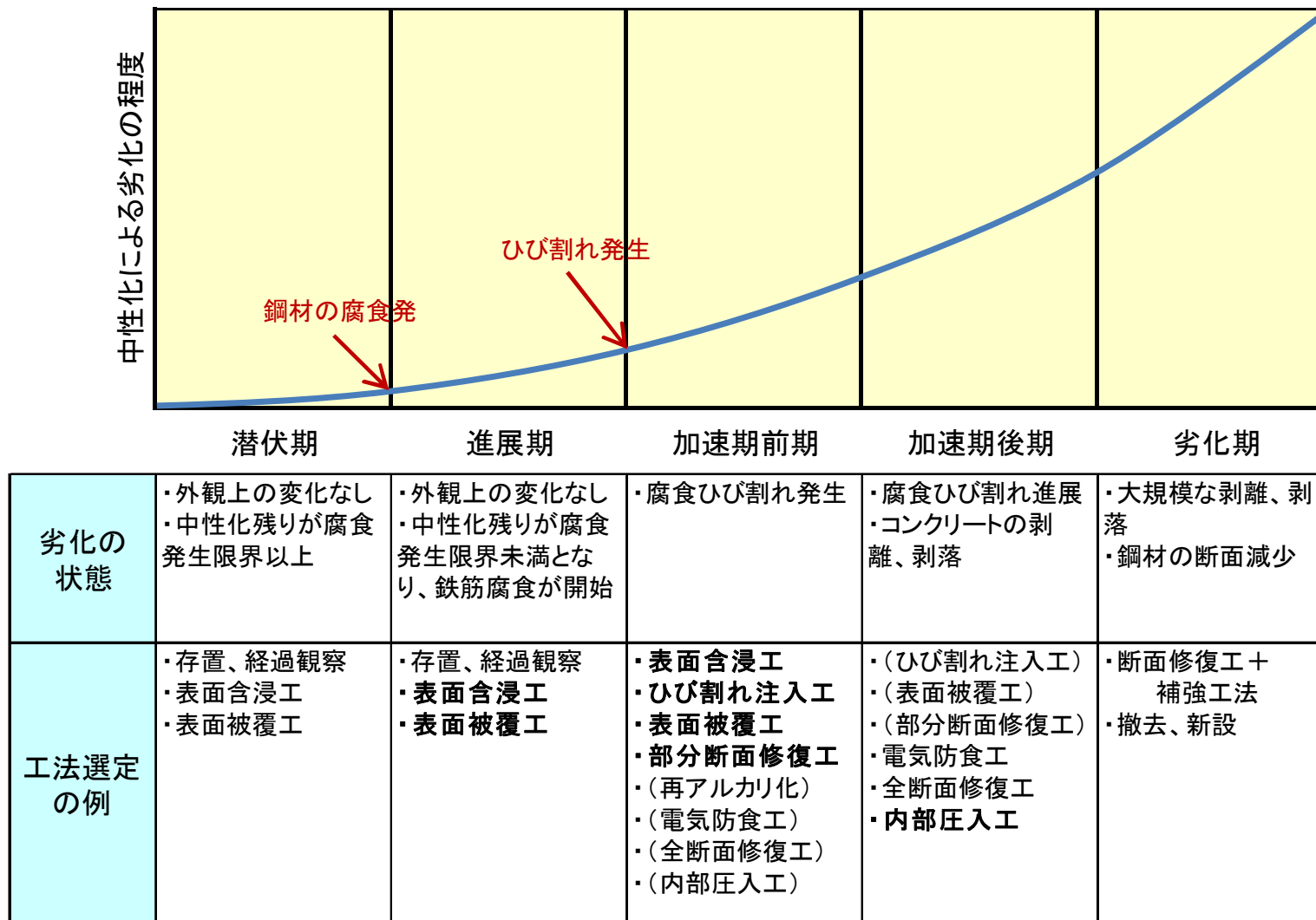
【塩害の劣化グレードと適用可能な補修工法との関係】



	潜伏期	進展期	加速期前期	加速期後期	劣化期
劣化の状態	<ul style="list-style-type: none"> ・外観上の変化なし ・塩化物イオン濃度が腐食発生限界未満 	<ul style="list-style-type: none"> ・外観上の変化なし ・塩化物イオン濃度が腐食発生限界を超え、鉄筋腐食が開始 	<ul style="list-style-type: none"> ・腐食ひび割れ発生 ・錆汁 ・コンクリートの浮き 	<ul style="list-style-type: none"> ・腐食ひび割れが大きく多数発生 ・コンクリートの剥離、剥落 	<ul style="list-style-type: none"> ・大規模な剥離、剥落 ・鋼材の著しい断面減少 ・変位、たわみ
工法選定の例	<ul style="list-style-type: none"> ・存置、経過観察 ・表面含浸工 ・表面被覆工 	<ul style="list-style-type: none"> ・存置、経過観察 ・表面含浸工 ・表面被覆工 	<ul style="list-style-type: none"> ・表面含浸工 ・ひび割れ注入工 ・表面被覆工 ・部分断面修復工 ・(脱塩工) ・(電気防食工) ・(全断面修復工) ・(内部圧入工) 	<ul style="list-style-type: none"> ・(ひび割れ注入工) ・(表面被覆工) ・(部分断面修復工) ・電気防食工 ・全断面修復工 ・内部圧入工 	<ul style="list-style-type: none"> ・断面修復工＋補強工法 ・撤去、新設

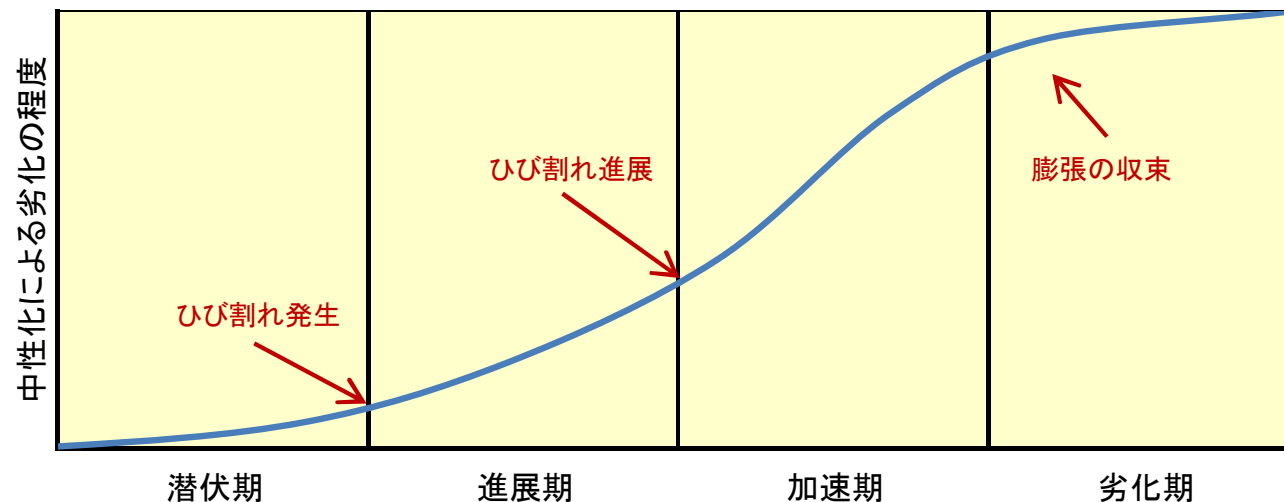
※ ()内は維持管理シナリオによって選択される可能性のある工法を示す

【中性化の劣化グレードと適用可能な補修工法との関係】



※ ()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

【ASRの劣化グレードと適用可能な補修工法との関係】



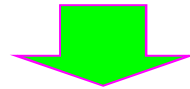
	潜伏期	進展期	加速期	劣化期
劣化の状態	<ul style="list-style-type: none"> ・外観上の変化なし 	<ul style="list-style-type: none"> ・膨張ひび割れ発生 	<ul style="list-style-type: none"> ・膨張ひび割れ進展 ・ゲル滲出 ・強度、弾性係数の低下 ・鋼材腐食による錆汁 	<ul style="list-style-type: none"> ・膨張ひび割れ増大 ・ずれ、段差 ・強度、弾性係数の著しい低下 ・剥離、剥落 ・鉄筋破断 ・変位、変形
工法選定の例	<ul style="list-style-type: none"> ・水処理 ・存置、経過観察 ・表面含浸工 ・表面被覆工 	<ul style="list-style-type: none"> ・水処理 ・(存置、経過観察) ・表面含浸工 ・表面被覆工 ・ひび割れ注工 ・内部圧入工 	<ul style="list-style-type: none"> ・水処理 ・表面被覆工 ・ひび割れ注工 ・内部圧入工 ・補強による膨張拘束 	<ul style="list-style-type: none"> ・水処理 ・表面被覆工 ・ひび割れ注工 ・断面修復 ・耐力回復の補強 ・鉄筋破断箇所の補修

※ ()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

【劣化機構に応じた補修工法の選定】

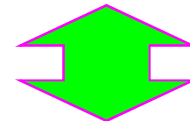
- 点検、調査結果が示す劣化状況の定量的な評価

現状を定量的に評価し、補修設計に反映



- 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補修工法を選定する
補修後の構造物の生涯をデザインする

ご清聴ありがとうございました

END