

コンクリート構造物の 健康寿命を延ばすための 維持管理の考え方

一般社団法人コンクリートメンテナンス協会

江良 和徳

<https://www.j-cma.jp/>

1. コンクリートの劣化

- 塩害、中性化、ASR
- 劣化メカニズムと劣化過程

2. コンクリート構造物の維持管理の考え方

- 塩害・中性化の補修工法選定
 - 予防保全の事例にて
 - 事後保全の事例にて

1. コンクリートの劣化

● 塩害・中性化



塩害の劣化メカニズム

【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
- ・ 侵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



【劣化の進行】

- ・ 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る
- ・ そこに水、酸素が供給されることにより鉄筋が腐食



【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

塩害の劣化事例



塩害の劣化事例



中性化の劣化メカニズム

【原因】

- ・ 大気中の二酸化炭素がコンクリート中に浸入
- ・ 二酸化炭素がセメント水和物と炭酸化反応
- ・ 細孔溶液中のpHが低下（ $\text{pH}=11$ 以下）



【劣化進行】

- ・ 中性化領域がコンクリート表面から内部に向かって進行
- ・ 中性化領域が鉄筋付近まで到達すると不動態皮膜が破壊
- ・ そこに水、酸素が供給されることにより鉄筋が腐食



【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

中性化の劣化事例



不動態皮膜と鉄筋腐食

- ・ 塩害、中性化は共にコンクリート内部の鋼材腐食による性能低下
- ・ 鋼材が腐食環境（不動態皮膜の破壊）となる原因が塩害と中性化で異なる

【塩害】

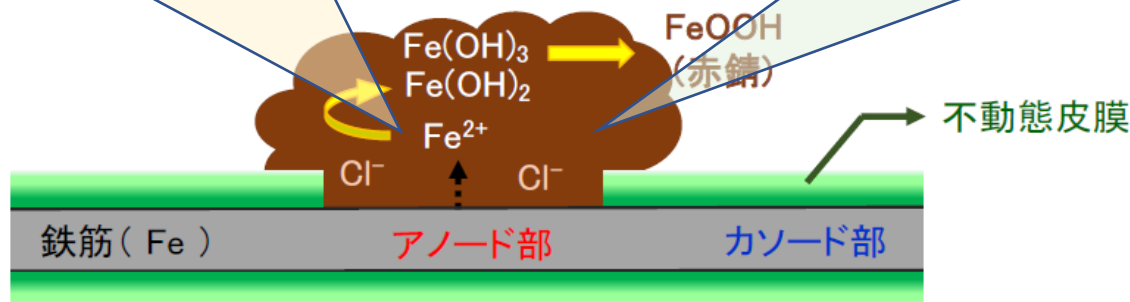
高い塩化物イオン量
により不動態皮膜が破壊される

↓
鋼材腐食 → ひび割れや浮き剥離

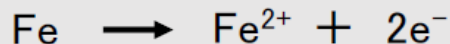
【中性化】

コンクリートのpHの低下
により不動態皮膜が破壊される

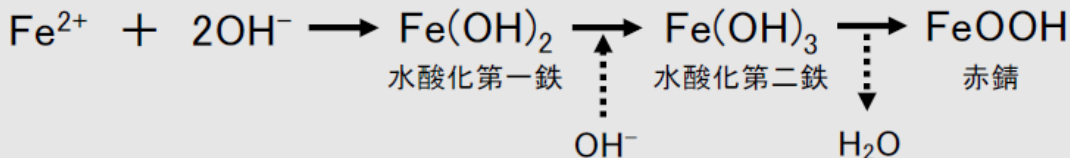
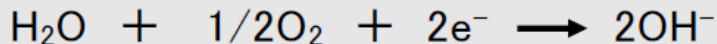
↓
鋼材腐食 → ひび割れや浮き剥離



アノード部



カソード部



塩害の劣化過程

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	外観上の変状が見られない，鋼材腐食発生塩化物イオン濃度以下
グレードⅡ	進展期	外観上の変状が見られない，鋼材腐食発生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みられる，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）

〔塩害の劣化指標〕

潜伏期、進展期
加速期以降

⇒ 塩化物イオン濃度
⇒ 鋼材腐食量
腐食ひび割れ等の変状

中性化の劣化過程

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	外観上の変状が見られない，腐食 開始前
グレードⅡ	進展期	外観上の変状が見られない，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）

〔中性化の劣化指標〕

潜伏期、進展期 ⇒ 中性化深さ

加速期以降 ⇒ 鋼材腐食量、腐食ひび割れ等の変状

● アルカリシリカ反応 (ASR)



ASRの劣化メカニズム

【原因】

- ・コンクリート中は高アルカリ環境
- ・コンクリート構造物は雨水や地下水などによる水分供給
- ・コンクリートの骨材としての反応性骨材の使用



【劣化の進行】

- ・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
- ・コンクリート内部へ水分が侵入
- ・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発生



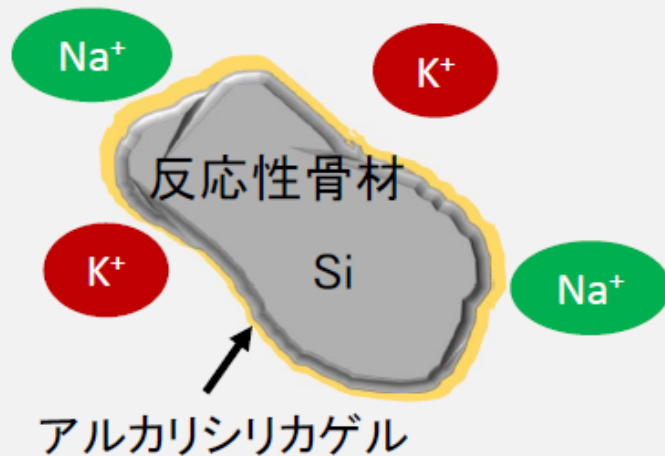
【性能低下】

- ・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

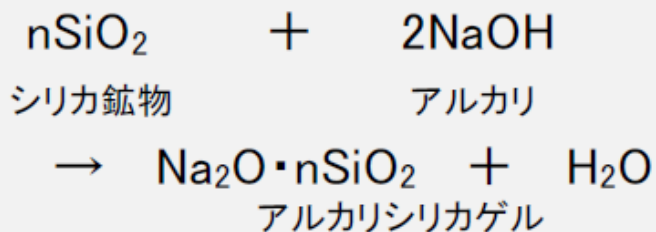
アルカリシリカゲルの生成と膨張

第1ステージ

『アルカリシリカゲルの生成』



《化学式》

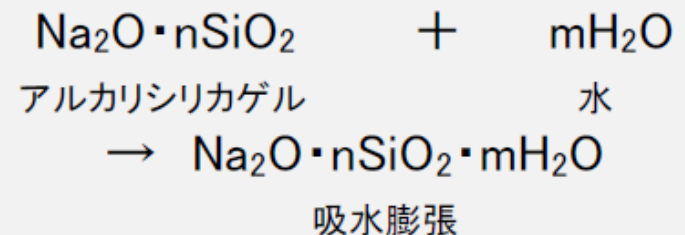


第2ステージ

『アルカリシリカゲルの膨張』



《化学式》













ASRの劣化過程

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もある。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，ひび割れの幅および密度，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〕（土木学会）

〔ASRの劣化指標〕

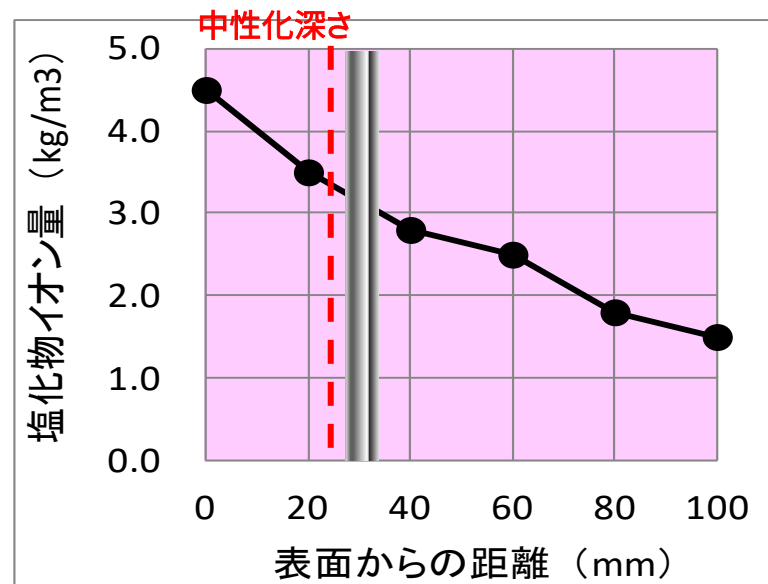
- ・ ひび割れ状況

〔劣化過程の留意点〕

- ・ あくまで調査時点での外観上のグレード
- ・ 将来の膨張性の有無は考慮されていない

2. コンクリート構造物の 維持管理の考え方

● 塩害・中性化の補修の考え方





[条件]

- ・ 道路橋RCけた
- ・ 海岸線から200mに位置し、**飛来塩分**の影響を受ける
- ・ 定期点検および外観目視調査の結果、ひび割れ等の**変状なし**

[着目点]

- ・ 環境条件より塩害および中性化による劣化進行を想定
- ・ 塩化物イオン含有量試験および中性化深さ試験を実施
- ・ 「**潜伏期**」または「**進展期**」を判別
- ・ 工学的判断と維持管理シナリオに応じて工法選定

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	外観上の変状が見られない，鋼材腐食発生塩化物イオン濃度以下
グレードⅡ	進展期	外観上の変状が見られない，鋼材腐食発生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みられる，変位・たわみが大きい

『潜伏期』と『進展期』の違いは？

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）

[塩害の劣化指標]

潜伏期、進展期

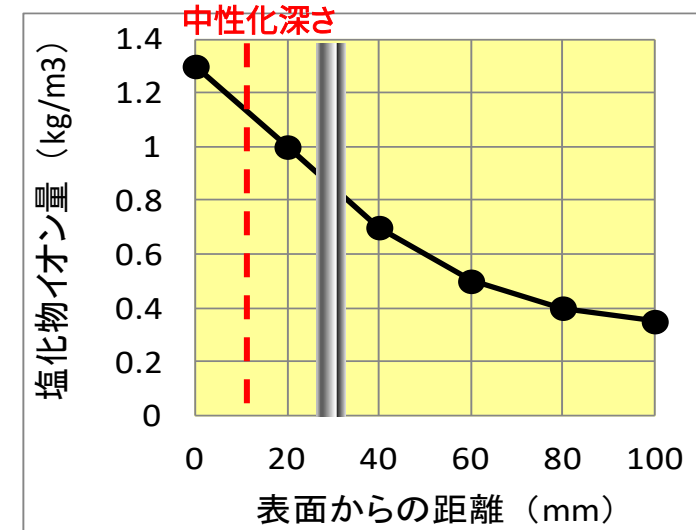
⇒ 塩化物イオン濃度

加速期以降

⇒ 鋼材腐食量

腐食ひび割れ等の変状

劣化過程が
【潜伏期】
の場合



[劣化指標]

- ・ 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）
- ・ 中性化残りが発錆限界以上（中性化）
⇒ まだ鉄筋が腐食する理由はない状態

[補修工法の主たる要求性能]

- ・ 劣化因子の遮断
⇒ 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）

劣化過程が **【潜伏期】** の場合

[維持管理シナリオに応じた補修工法の選定]

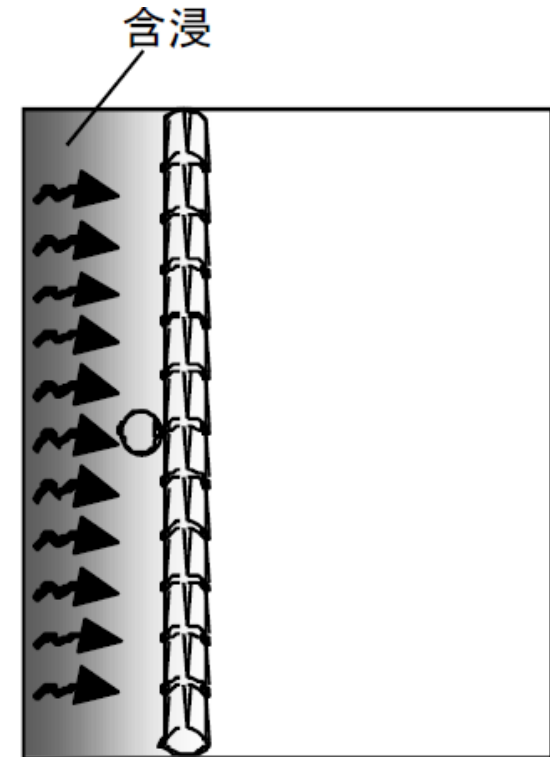
(1) 経過観察シナリオ

- ・健全な状態で当面は性能低下の懸念はない
- ・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) 要求性能を満たす表面含浸工を定期的に行うシナリオ

- ・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
⇒ 軽微な処置を繰り返すことで劣化を顕在化させない

参考 : 一般的な表面含浸工法の場合

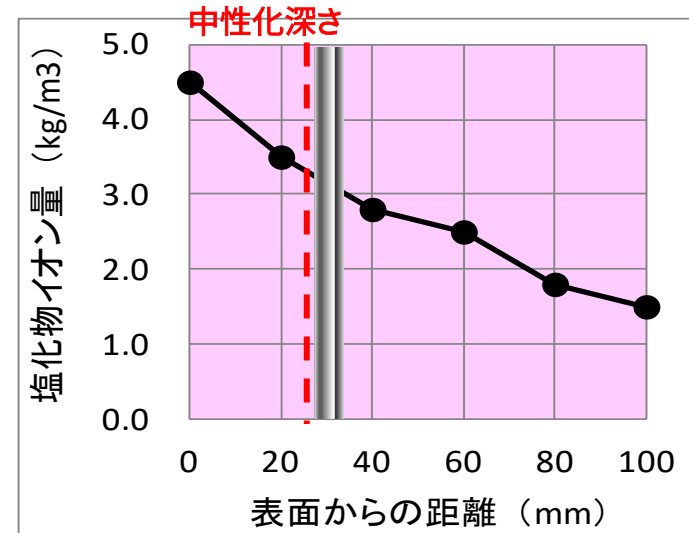


- ・ ハケ, ロールローにより塗布含浸する
- ・ 含浸深さは数mm～数十mmで, 使用材料によって異なる
- ・ シラン系含浸材 : 撥水効果付与
- ・ けい酸塩系含浸材 : コンクリートの緻密化

劣化過程が

【進展期】

の場合



[劣化指標]

- ・ 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）
 - ・ 中性化残りが発錆限界未満（中性化）
- ⇒ 変状は生じていないが、**鉄筋腐食は開始**

[補修工法の主たる要求性能]

- ・ 劣化因子の遮断（特に水、酸素）
 - ・ **鉄筋腐食の抑制**
- ⇒ 予防保全の段階であるが、劣化因子の遮断だけでは不十分

劣化過程が **【進展期】** の場合

[維持管理シナリオに応じた補修工法の選定]

(1) 経過観察シナリオ

- ・現時点で変状が生じているわけではないため、しばらく様子を見る
- ・ただし鉄筋は腐食環境にあり、将来的には変状が生じることを想定
⇒ それほど長くは放置できない

(2) 要求性能を満たす表面含浸工を定期的に行うシナリオ

- ・劣化因子を遮断して鉄筋腐食進行を遅らせる
- ・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
⇒ 既に不動態皮膜は破壊され、鉄筋腐食が開始しているため、
鉄筋腐食抑制効果を併せ持つ材料、工法を選択するのも有効

参考 : 鉄筋腐食抑制効果を併せ持つ表面含浸材の例

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層目のシラン・シロキサン系含浸材が撥水効果を発揮し、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



[条件]

- ・海上部に位置するRC構造物
- ・鉄筋位置での塩化物イオン量は腐食発生限界を**超えている**
- ・ひび割れ、錆汁、コンクリートの浮き・はく離、鉄筋露出等の**変状が見られる**

[着目点]

- ・変状の規模、鉄筋腐食の程度等を調査
- ・「**加速期前期**」または「**加速期後期**」を判別
- ・工学的判断と維持管理シナリオに応じて工法選定

塩害・中性化の補修工法選定の例 ～ 事例2：事後保全 ～

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	外観上の変状が見られない，鋼材腐食発生塩化物イオン濃度以下
グレードⅡ	進展期	外観上の変状が見られない，鋼材腐食発生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・たわみが大きい

『加速期前期』と『加速期後期』
の違いは？

[塩害の劣化指標]

潜伏期、進展期 ⇒ 塩化物イオン濃度

加速期以降 ⇒ 鋼材腐食量

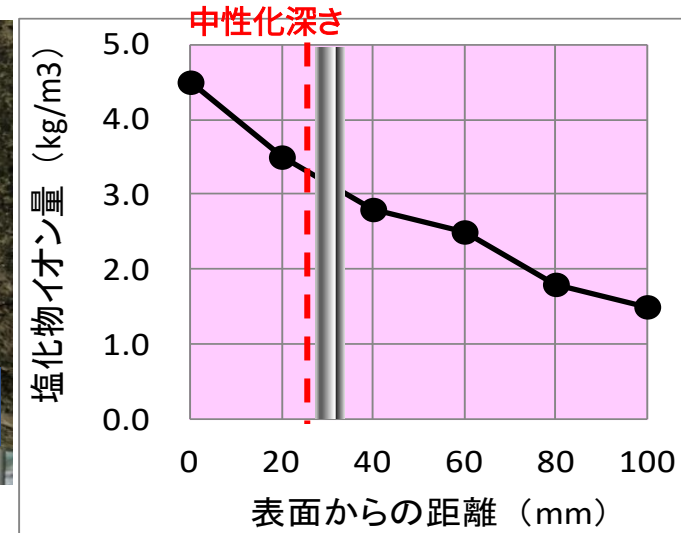
腐食ひび割れ等の変状

【管理編】（土木学会）

劣化過程が

【加速期前期】

の場合



[劣化指標]

- ・ 腐食ひび割れやコンクリートの浮き・はく離の程度
- ・ 鉄筋腐食量、腐食速度

⇒ ひび割れを通じた劣化因子の直接侵入により鉄筋腐食が加速

[補修工法の主たる要求性能]

- ・ 劣化因子の遮断（特に水、酸素）
- ・ 鉄筋腐食の抑制

⇒ 変状はまだ軽微であり、ひび割れも浮き剥離も増やしたくない

劣化過程が **【加速期前期】** の場合

[維持管理シナリオに応じた補修工法の選定]

(1) 変状に応じた必要最小限の補修を定期的に行うシナリオ

- ・ ひび割れ注入工、部分断面修復工、表面保護工による必要最小限の補修
- ・ ただし、これらの対策では再劣化する可能性がある
- ・ 外観変状がまだ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
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)
⇒ これらの工法により、再劣化のリスクを限りなく低減
重要性や費用対効果を十分に検討したうえで適用

「変状に応じた必要最小限の補修を定期的に行うシナリオ」で適用される補修工法



表面保護工（表面含浸工）



表面保護工（表面被覆工）



ひび割れ注入工



部分断面修復工

劣化過程が

【加速期後期】

の場合



[劣化指標]

- ・ 腐食ひび割れやコンクリートの浮き・はく離の程度
- ・ 鉄筋腐食量、腐食速度
 - ⇒ ひび割れや浮き剥離を通じ、腐食鉄筋への劣化因子の供給が増大
 - ⇒ 劣化速度がさらに加速し、変状の範囲拡大

[補修工法の主たる要求性能]

- ・ 鉄筋腐食の抑制
 - ⇒ これ以上の変状の増大は許容できない
 - ⇒ これ以上の鉄筋断面減少は許容できない
 - ⇒ 劣化期への転落は何としても回避したい

劣化過程が **【加速期後期】** の場合

[維持管理シナリオに応じた補修工法の選定]

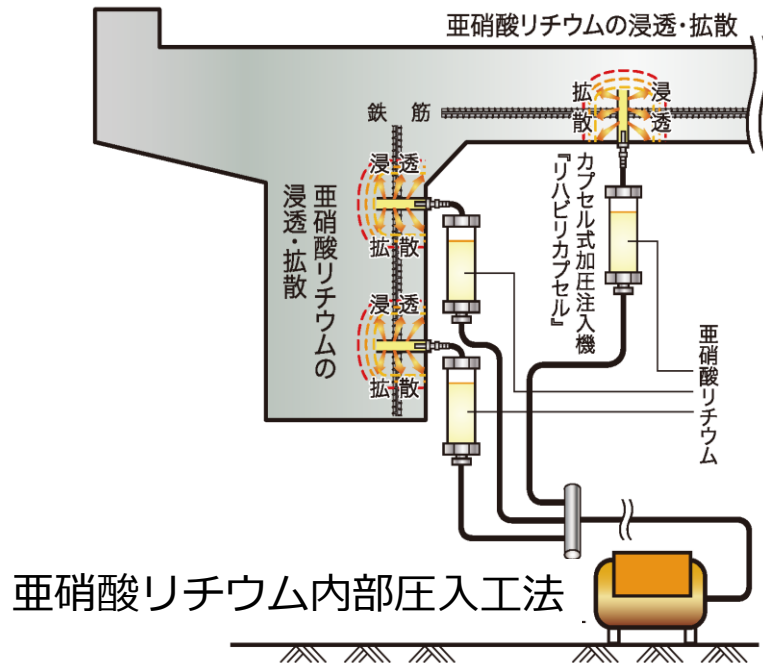
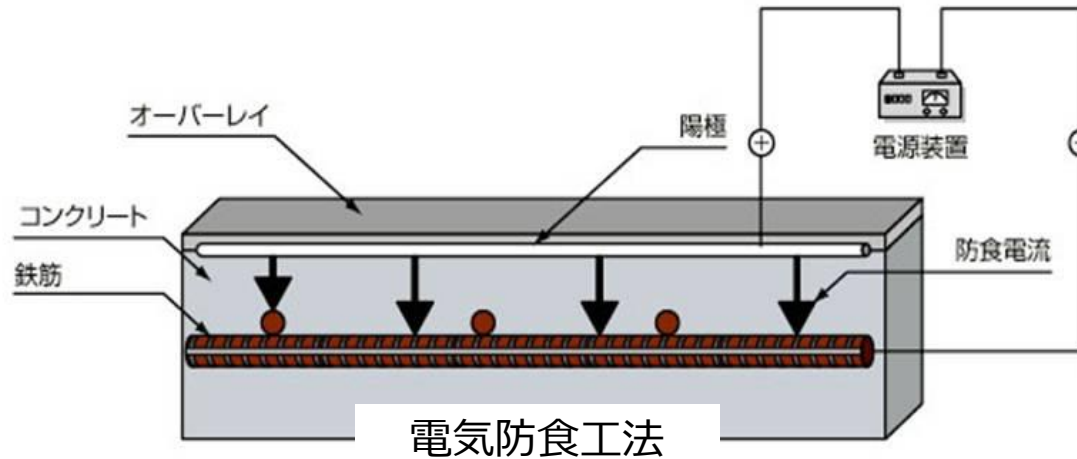
(1) 変状に応じた必要最小限の補修を定期的に行うシナリオ

- ・ ひび割れ注入、部分断面修復に加え、表面保護による必要最小限の補修
- ・ ただし、これらの対策では鉄筋腐食の原因を完全に取り除いていない
- ・ 早いサイクルで再劣化を繰り返すと**LCCで劣る**と考えられる
 - ⇒ 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も考慮

(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シナリオ

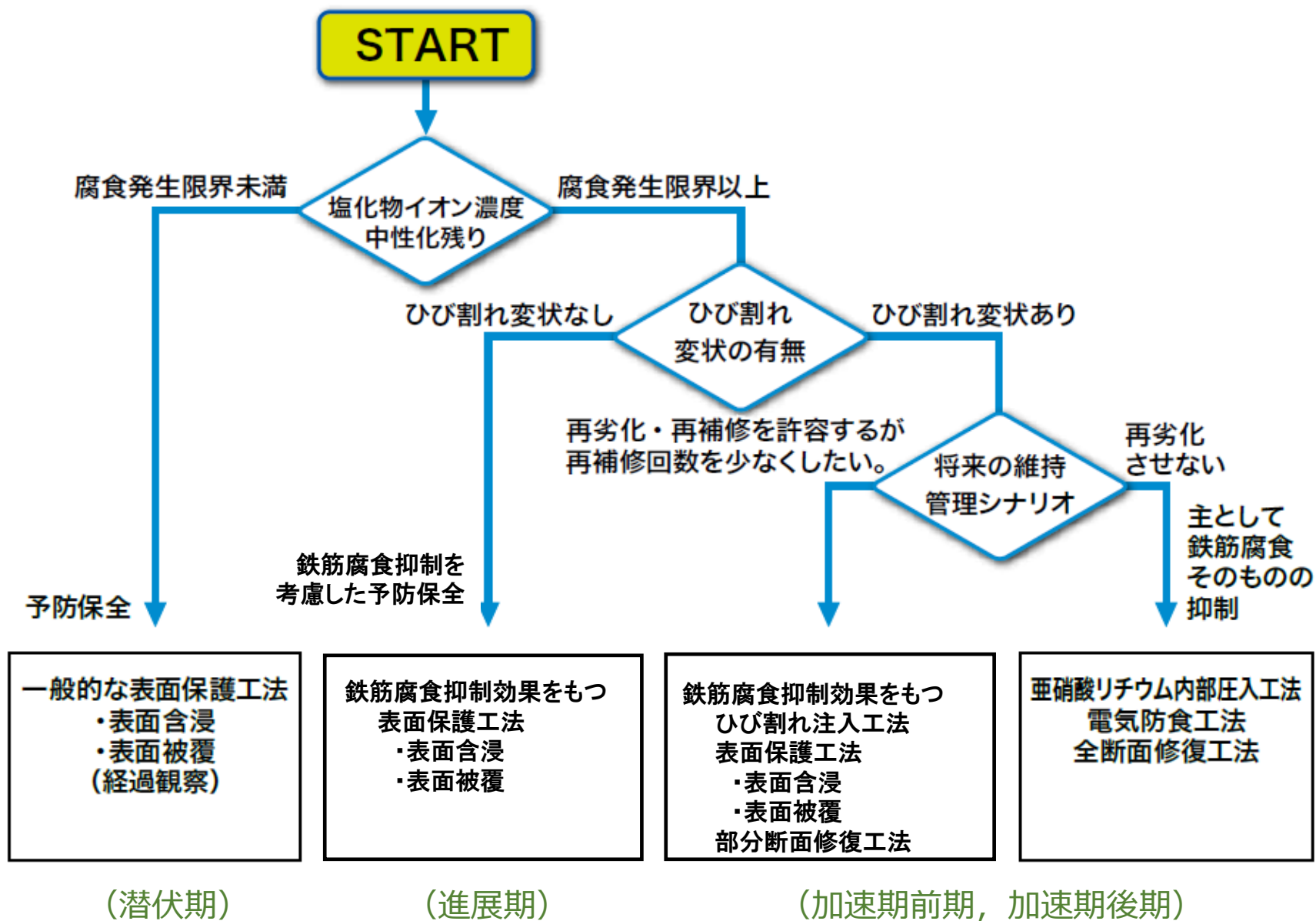
- ・ ひび割れ注入工、部分断面修復工に加え、以下のような対策を併用する
- ・ **電気防食工法** (鉄筋腐食を根本的に抑制)
- ・ **亜硝酸リチウム内部圧入工法** (鉄筋腐食を根本的に抑制)
- ・ **全断面修復** (塩化物イオンを含むコンクリートを完全に除去)
 - ⇒ これらの工法により**再劣化のリスクを限りなく低減**
 - イニシャルでは高価となるが**LCCでは優れる**

「将来的な再劣化を許容しないシナリオ」で適用される補修工法



全断面修復工法

塩害・中性化の補修工法選定フロー



補修工法選定の考え方

工学的な 判断

- ・劣化機構（メカニズム）と劣化過程（程度）に応じて補修工法を選定
 - ⇒ なぜ劣化が生じているのか？
 - ⇒ 次の劣化過程に進行させないために何が必要？

&

時間軸の 判断

- ・補修した後の維持管理シナリオ（方針）を考慮して補修工法を選定
 - ⇒ 再劣化と再補修を繰り返すシナリオ
 - … 補修工法の耐用年数の評価が重要
 - ⇒ 再劣化を許容しないシナリオ
 - … 根本的な補修工法の選定を視野に



これらを総合的に判断して

『適切な維持管理にて構造物の健康寿命を延ばす』

ご清聴ありがとうございました



一般社団法人

コンクリートメンテナンス協会

<https://www.j-cma.jp/>

END