

令和元年度 企業庁土木技術研修 資料

コンクリート構造物の劣化メカニズムと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

1

【略歴】

- 出身
昭和44年6月25日生まれ(50歳)
出身地 福岡県福岡市
- 学歴
平成5年 佐賀大学理工学部 建設工学科卒業
平成22年 京都大学大学院 社会基盤工学専攻博士後期課程修了
- 職歴
(株)建設技術研究所 (建設コンサルタント)
日特建設(株) (特殊ゼネコン)
極東興和(株) (橋梁メーカー)
- 資格
博士(工学)、技術士(総合技術監理)、技術士(建設)、コンクリート診断士、コンクリート構造診断士、コンクリート技士、プレストレストコンクリート技士、ほか
- 社外活動
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
ASRリチウム工法協会 技術積算委員長
鳥取大学非常勤講師 ほか



2

主な内容

- はじめに
- コンクリートの劣化
 - 塩害の劣化メカニズム
 - 中性化の劣化メカニズム
 - ASRの劣化メカニズム
- コンクリート補修の基本的な考え方
 - 塩害・中性化の補修工法選定
- 亜硝酸リチウムを用いた補修技術
 - ひび割れ注入工、表面含浸工、断面修復工
 - 内部圧入工

3

1. はじめに

4

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

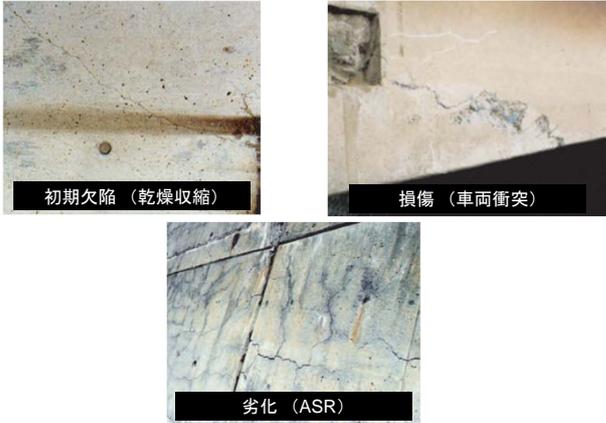
著しく劣化したコンクリート構造物の急増



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

5

例えば、『ひび割れ』



初期欠陥 (乾燥収縮) 損傷 (車両衝突)

劣化 (ASR)

6

変状の種類

【初期欠陥】
 施工時に発生した変状
 (乾燥収縮、ジャンカ、コールドジョイント、砂すじ, etc.)

【損傷】
 地震や衝突などによるひび割れや剥離など、短時間のうちに発生し、時間経過によって進行しないもの

【劣化】
 時間の経過に伴って進行するもの
 (中性化、塩害、凍害、化学的侵食、ASR、疲労, etc.)

7

コンクリートの主な劣化

- 塩害
- 中性化
- アルカリシリカ反応
- 凍害
- 化学的侵食
- 疲労

8

2. コンクリートの劣化

- 塩害
- 中性化
- ASR

9

2.1 塩害・中性化

10

【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
- ・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

11

【塩害】…劣化事例

必ず鉄筋腐食の進行に伴ってコンクリート構造物(部材)の性能低下が生じる

12

【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に浸入
- ・二酸化炭素がセメント水和物と炭酸化反応を起こし、細孔溶液中のpHを低下(pH=11以下)させる

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
- ・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**が破壊される
- ・さらに**水分が供給**されることによって**鉄筋が腐食**する

性能低下

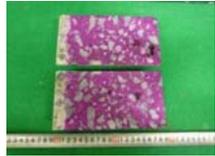
- ・ひび割れ、コンクリートの浮き・はく離、鉄筋露出など
- ・コンクリートと鉄筋との付着が低下
- ・鉄筋断面の減少

13

【中性化】・・・中性化深さと水掛かり

中性化深さ

- ・フェノールフタレイン溶液を吹き付けたときの**非発色部分**
- ・コア試料、はつり箇所、ドリル削孔による粉末等により試験を実施
- ・一般的に鋼材腐食発生限界は**中性化残り10mm**



水掛かりの影響

- ・中性化の進行は**水の影響**を大きく受ける
- ・同一部材、同一コンクリート品質であっても中性化深さに差が生じる
- ・水の影響を受ける場所、受けない場所それぞれ中性化深さ試験を実施
- ・**湿潤環境**では中性化残り10mm以上であっても腐食開始

14

【中性化】・・・劣化事例



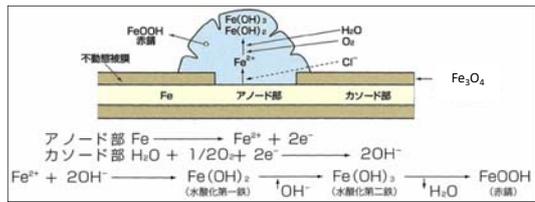
壁高欄のコンクリートはく落 張出し床版下面の鉄筋露出

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

必ず鉄筋腐食の進行に伴ってコンクリート構造物(部材)の性能低下が生じる

15

【塩害・中性化】・・・不動態皮膜と鉄筋腐食



●不動態皮膜：高アルカリ環境下の鋼材において、鋼材表面に酸素が化学吸着して緻密な酸化皮膜を形成し、**腐食しにくい状態**

●不動態皮膜の破壊：腐食発生限界を超える**塩化物イオン**存在下(塩害)鋼材周囲の**pH低下**(中性化)

●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つの反応が同時に生じるのが鉄筋腐食反応

16

【塩害】・・・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-Ⅰ	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-Ⅱ	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】

- ・塩化物イオン濃度
- ・鋼材腐食量
- ・腐食ひび割れ

17

【中性化】・・・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-Ⅰ	加速期前期	腐食ひび割れが発生
グレードⅢ-Ⅱ	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】

- ・中性化深さ
- ・鋼材腐食量
- ・腐食ひび割れ

18

【塩害】 水分の供給条件が塩害劣化進行に与える影響

塩害の劣化進行のしやすさ

飛沫帯 > 干満帯 > 気中 > 水中

飛沫帯: 波しぶき由来の塩化物イオンの侵入と適度の乾湿により、最も厳しい環境
 ○塩化物イオンの侵入速度が速い
 ○鉄筋腐食速度が速い

水 中: 塩化物イオンは多量にあるが、水中は酸素供給がないため、鉄筋腐食が進行しない

19

【中性化】 水分の供給条件が中性化劣化進行に与える影響

中性化の劣化進行のしやすさ

1. 中性化(炭酸化)そのものの進行には適度な水分が必要
 - ・湿度60%程度の環境が最も中性化の進行が速い
 - ・乾燥状態であれば中性化は進行しない
 - ・湿潤状態(水中)であれば中性化は進行しない
2. 鉄筋腐食の進行には水分が必要
 - ・中性化が進行し、鉄筋周囲のpHが低下しても、そこに水分侵入がなければ鉄筋腐食は進行しにくい

20

2.2 アルカリシリカ反応(ASR)

21

【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

22

【アルカリシリカ反応(ASR)]… アルカリシリカゲルの模式図

	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	$n\text{SiO}_2 + 2\text{NaOH} \rightarrow \text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ (シリカ酸物) (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!)

23

【アルカリシリカ反応(ASR)]… 劣化事例

ASRの原因と劣化進行に鉄筋腐食は関与していない
 ただし、ASRひび割れが起点となって鉄筋腐食が進行することもある

24

【アルカリシリカ反応(ASR)】・・・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】
・膨張量
（ひび割れ）

【加速期の定義の変更】
・膨張の進行速度の記述が削除された
（⇒確かめようがないため）

25

【ASR】水分の供給条件がASR劣化進行に与える影響

ASRの劣化進行のしやすさ
気中 > 水中(土中)

気中:
 水降雨による水分供給があり、かつ温度変化(日較差、年較差)も大きいいためASRが進行しやすい

水中(土中):
 水分は多量にあるが、気中と比べて温度変化が少ない。ASRは化学反応であり、その膨張反応には温度の影響を受ける

26

3. コンクリート補修の基本的な考え方

●塩害・中性化の補修工法選定

27

3.1 塩害・中性化の補修工法選定

塩化物イオン量 (kg/m³)

表面からの距離 (mm)

中性化深さ

28

【塩害・中性化の補修工法選定】・・・一般的な補修工法と要求性能

- 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】
- 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)
- 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】
- 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】

29

【塩害・中性化の補修工法選定】・・・事例1: 予防保全

【条件】
 ・道路橋RCけた
 ・海岸線から300m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 ⇒ **劣化過程によって考え方が異なる**
 ・劣化過程と維持管理シナリオに応じて工法選定

30

【塩害】・・・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が見られる、鋼材腐食が顕著
グレードⅣ	劣化完了期	腐食ひび割れが顕著、鋼材腐食が著しく進行

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）

『潜伏期』と『進展期』の違いは？

【塩害の劣化指標】

- ・塩化物イオン濃度
- ・鋼材腐食量
- ・腐食ひび割れ

31

【塩害・中性化の補修工法選定】・・・事例1: 予防保全

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)
- ⇒ まだ鉄筋腐食環境には陥っていない

【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)
- ⇒ 劣化因子を遮断し、鉄筋腐食環境さえ作らなければ鉄筋は腐食しない
- ⇒ 一般的な表面含浸工の適用

※この段階で何らかの対策を実施するのが最も上流の予防保全

32

【塩害・中性化の補修工法選定】・・・事例1: 予防保全

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

- ・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) 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塩害劣化させない
- ⇒ 表面含浸材の劣化因子遮断性能にて材料選定
 - 塩化物イオン浸透に対する抵抗性
 - 中性化に対する抵抗性

33

【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
- ・シリル系含浸材：撥水効果付与
- ・けい酸塩系含浸材：コンクリートの緻密化

34

(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

参考：一般的な表面含浸材の種類

種別	特長	備考	
シリル系	・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。

35

【塩害・中性化の補修工法選定】・・・事例1: 予防保全

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)
- ⇒ 不動態皮膜は既に破壊されている
- ⇒ 鉄筋腐食は既に開始している
- ⇒ ただ、ひび割れ発生には至っていない

【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
- ・鉄筋腐食進行を抑制する
- ⇒ ひび割れが発生しなければ性能低下はない
- ⇒ 既に進行中の鉄筋腐食反応を抑制し、ひび割れを発生させずに供用し続けたい

※まだ変状が生じる前なので予防保全の範疇

36

【塩害・中性化の補修工法選定】・・・事例1: 予防保全

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
⇒ **それほど長くは放置できない**

(2)要求性能を満たす表面保護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**
- 劣化因子の遮断を目的とした材料
- 劣化因子の遮断+鉄筋腐食抑制を目的とした材料

37

【鉄筋腐食抑制効果を併せ持つ表面含浸工法】

基本性能 『シラン・シロキサン系含浸材による劣化因子の遮断』
付加価値 『亜硝酸イオンによる鉄筋腐食の抑制』を付与

38

(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

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

39

【塩害・中性化の補修工法選定】・・・事例2: 事後保全

【条件】

- ・海上部に位置するRC栈橋
- ・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
- ・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**

【着目点】

- ・変状の規模、鉄筋腐食の程度、鉄筋断面減少の有無等を調査
- ・「**加速期前期**」または「**加速期後期**」を判別
- ・劣化過程と維持管理シナリオに応じて工法選定

40

【塩害】・・・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-Ⅰ	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-Ⅱ	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、 鋼材の着しい断面減少は見られない
グレードⅣ	劣化期	腐食ひび割れの幅や長さが増え、大規模な剥離・剥落が見られる、鋼材の着しい断面減少、変位・たわみが大きい

(土木学会)

『加速期前期』と『加速期後期』の違いは？

【塩害】

- ・塩化物イオン濃度
- ・鋼材腐食量
- ・腐食ひび割れ

41

【塩害・中性化補修の基本的な考え方】・・・事例2 事後保全

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
- ⇒ 既に鉄筋腐食が進行し、変状が顕在化
- ⇒ ひび割れを通じて腐食鉄筋に劣化因子が直接作用する
- ⇒ 劣化速度が加速し始める

【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
- ・鉄筋腐食進行を抑制する
- ⇒ ひび割れの進展に伴って耐久性が低下
- ⇒ これ以上の変状の増大を防ぐ

※ 既に腐食環境下にある鉄筋に対して、如何にして腐食進行を抑制するか

42

【塩害・中性化の補修工法選定】・・・事例2:事後保全

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) 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
- これらの対策では再劣化する可能性がある
- 外観変状がまだ比較的小規模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

43

(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シナリオ



44

【塩害・中性化の補修工法選定】・・・事例2:事後保全

劣化過程が『加速期後期』の場合

【劣化指標】

- ひび割れ本数、幅、長さの増大
- コンクリートの浮き、剥離、剥落の範囲
- 鉄筋腐食量、腐食速度
 - ⇒ ひび割れや浮き剥離箇所を通じて腐食鉄筋に劣化因子がさらに供給
 - ⇒ 劣化速度がさらに加速し、変状範囲拡大

【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
 - ⇒ まだ鉄筋の断面減少までは至っていない
 - ⇒ この時点で鉄筋腐食を確実に抑制し、これ以上の性能低下を防ぐ
 - ⇒ 劣化期に陥る前にここで食い止める



※ 劣化期にまで性能低下させないための最後の砦

45

【塩害・中性化の補修工法選定】・・・事例2:事後保全

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) 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

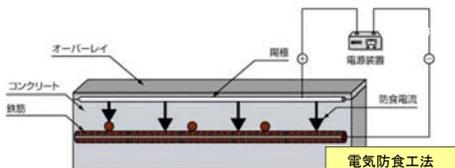
- 劣化因子を遮断して劣化の進行速度を遅らせる
- これらの対策では早期に再劣化することを覚悟
- 外観変状が甚大な段階ではLCCで劣ることもある
 - ⇒ 残存供用年数が少ない場合などでは適用されることもある
 - ⇒ 再劣化と再補修を繰り返すたびに、保有性能は低下し続けることを認識

(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

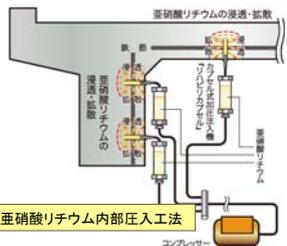
- 電気防食工法（鉄筋腐食を根本的に抑制）
- 亜硝酸リチウム内部圧入工法（鉄筋腐食を根本的に抑制）
- 全断面修復（塩化物イオンを含むコンクリートを完全に除去）
 - ⇒ これらの工法を適用すれば、再劣化のリスクを限りなく低減できる
 - ⇒ インシヤルコストでは高価となるがLCCでは優れる場合が多い

46

(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



亜硝酸リチウム内部圧入工法



全断面修復工法

47

4. 亜硝酸リチウムを用いた補修技術

- 亜硝酸リチウムとは
- ひび割れ注入工法 『リハビリリンダー工法』
- 表面含浸工法 『プロコンガードシステムS』
- 断面修復工法 『リハビリ断面修復工』
- 内部圧入工法 『リハビリカプセル工法』

48

【亜硝酸リチウムとは】

- ・亜硝酸イオン、リチウムイオンを含有するコンクリート補修材料
- ・原材料は「天然ガス」、「リシア輝石」
- ・外観は青色または黄色の透明水溶液
- ・濃度は40% (限界濃度)

Lithium Nitrite : LiNO_2



亜硝酸イオン
 NO_2^-

不動態被膜の再生により
鉄筋腐食を抑制する

↓

『塩害・中性化対策』

リチウムイオン
 Li^+

アルカリシリカゲルを
非膨張化する

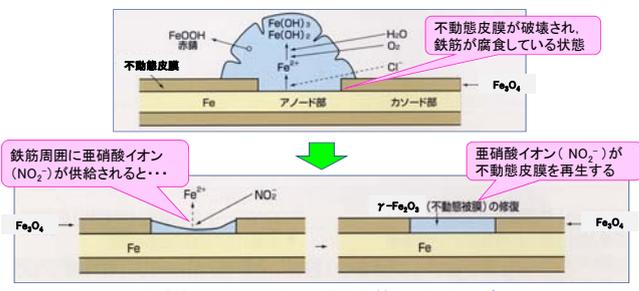
↓

『ASR対策』

49

【亜硝酸リチウムとは】 … 亜硝酸イオンによる鉄筋腐食抑制

- ・塩害, 中性化はいずれも不動態被膜の破壊による鉄筋腐食の問題
⇒ 塩害, 中性化対策とは, 共に鉄筋腐食の抑制を図ること
- ・亜硝酸イオン(NO_2^-)の防錆効果に関する研究は1960年代から多数報告

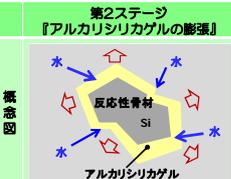


亜硝酸イオン(NO_2^-)による不動態被膜再生メカニズム

50

【亜硝酸リチウムとは】 … リチウムイオンによるゲル非膨張化

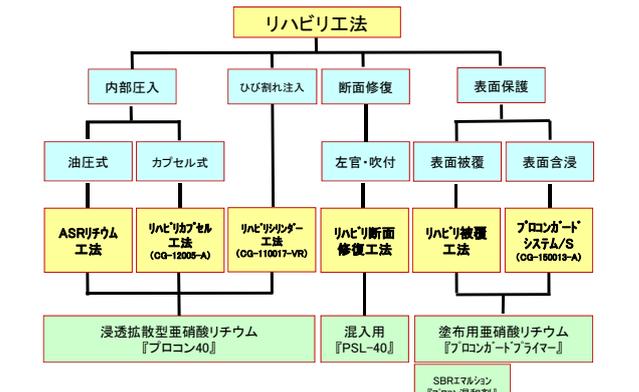
- ・ASRは反応性骨材周囲に生成したアルカリシリカゲルの吸水膨張
⇒ ASR対策とは, ゲルの吸水膨張を抑制すること
- ・リチウムイオン(Li^+)のASR膨張抑制に関する研究は1950年代から多数報告

	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	$\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2 + m\text{H}_2\text{O}$ (アルカリシリカゲル) (水) $\rightarrow \text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2 \cdot m\text{H}_2\text{O}$ (吸水膨張!)	$\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$ ↓ 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

51

【亜硝酸リチウムを用いた補修工法一覧】



52

ひび割れ注入工法
『リハビリシリンダー工法』



NETIS:CG-110017-VR



53

【リハビリシリンダー工法】 … 一般工法との違い

一般的なひび割れ注入工法

材料 ・エポキシ樹脂系注入材(1種、2種、3種)
・セメント系注入材
・ポリマーセメント系注入材 など

目的 ・ひび割れの閉塞
・ひび割れを通じた劣化因子の遮断

⇕

リハビリシリンダー工法

材料 ・セメント系注入材 + 浸透拡散型亜硝酸リチウム

目的 ・ひび割れの閉塞
・ひび割れを通じた劣化因子の遮断
・亜硝酸イオンによる鉄筋腐食抑制 (塩害・中性化)
・リチウムイオンによるASR膨張抑制 (ASR)

54

【リハビリシリンダー工法】…工法概要(塩害、中性化の補修の場合)

基本性能 『ひび割れ注入材による劣化因子の遮断』
付加価値 『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

鉄筋腐食抑制効果を併せ持つひび割れ注入工法

55

【リハビリシリンダー工法】… メリットとデメリット

リハビリシリンダー工法のメリット

- ・単なる劣化因子の遮断だけでなく、**亜硝酸リチウムの効果**を付与
- 塩害・中性化 : 鉄筋腐食抑制
- ASR : ASRゲル膨張抑制
- ・無機系であるため、ひび割れ内部が**湿潤**でも施工可能
- ・超微粒子セメント系であるため、**流動性**は有機系注入材と同等

リハビリシリンダー工法のデメリット

- ・無機系であるため、ひび割れ**追従性**はない
- ・無機系であるため、エポキシ樹脂系に比べて**付着強度**が低い

リハビリシリンダー工法の適用範囲

- ・塩害、中性化の場合、ひび割れ発生後の「**加速期前期**」以降
- ・それ以外の劣化を含む変状に対し、幅0.2mm以上のひび割れ補修

リハビリシリンダー工法の積算

- ・国土交通省標準歩掛に準拠して積算(1橋あたり)
- ・標準的な規模の場合、**8,000~9,000円/m**程度

56

表面含浸工法
『プロコンガードシステムS』



57

【プロコンガードシステム/プロコンガードシステムS】… 一般工法との違い

一般的な表面含浸工法

- 種類
- ・シリル系含浸材
 - ・けい酸ナトリウム系含浸材(反応型けい酸塩系)
 - ・けい酸リチウム系含浸材(固化型けい酸塩系) など
- 目的
- ・コンクリート表面からの劣化因子の侵入抑制



プロコンガードシステム/プロコンガードシステムS

- 種類
- ・**亜硝酸リチウム系含浸材**+けい酸リチウム系含浸材
 - ・**亜硝酸リチウム系含浸材**+シリル・シロキサン系含浸材
- 目的
- ・コンクリート表面からの劣化因子の侵入抑制
 - ・**亜硝酸イオン**による鉄筋腐食抑制 (塩害・中性化)
 - ・**リチウムイオン**によるASR膨張抑制 (ASR)

58

【プロコンガードシステムS】… 工法概要(塩害、中性化の補修の場合)

基本性能 『シリル・シロキサン系含浸材による劣化因子の遮断』
付加価値 『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 劣化因子の侵入を抑制するために、シリル・シロキサン系含浸材を塗布する ⇒ 劣化因子の遮断

鉄筋腐食抑制効果(表層部)を併せ持つ表面含浸工法

59

【プロコンガードシステムS】… メリットとデメリット

プロコンガードシステムSのメリット

- ・単なる劣化因子の遮断だけでなく、**亜硝酸リチウムの効果**を付与できる
- 塩害・中性化 : 鉄筋腐食抑制
- ASR : ASRゲル膨張抑制
- ・塩化物イオン量に応じて**亜硝酸リチウム塗布量**を定量的に設定できる
- 亜硝酸イオンと塩化物イオンのモル比1.0となる量

プロコンガードシステムSのデメリット

- ・**2種類**の材料を塗布しなければならない

プロコンガードシステムSの適用範囲

- ・一般的な表面含浸工法の適用範囲は基本的に「潜伏期」となる
- ・それに対し、劣化因子遮断だけでなく鉄筋腐食抑制も期待できるため、「潜伏期」を超えて「進展期」や「加速期前期」まで適用可能。

プロコンガードシステムSの積算

- ・コンクリートメンテナンス協会標準歩掛にて積算
- ・標準的な規模の場合、**4,800~5,000円/m²**程度

60

断面修復工『リハビリ断面修復工』

61

【リハビリ断面修復工】… 一般工法との違い

一般的な断面修復工法

材料 ・ポリマーセメントモルタル系
 目的 ・コンクリート浮き、はく離部の修復
 ・劣化因子(塩化物イオン)の除去

⇕

リハビリ断面修復工法

材料 ・亜硝酸リチウム含有ポリマーセメントモルタル
 目的 ・コンクリート浮き、はく離部の修復
 ・劣化因子(塩化物イオン)の除去
 ・亜硝酸リチウムによる鉄筋腐食抑制 (塩害・中性化)
 ・亜硝酸リチウムによるマクロセル腐食抑制

62

【リハビリ断面修復工法】… 塩害、中性化の補修の場合

基本性能 『コンクリート脆弱部の除去と修復』
 付加価値 『亜硝酸イオンによる鉄筋腐食の抑制』

- ① 不良部はつり除去
- ② 『フロコガードプライマー』 (亜硝酸リチウム系表面含浸材) 塗布
- ③ 『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)
- ④ 断面修復材 『PSL-40』 (含有ポリマーセメントモルタル)

- ① かぶりコンクリートの不良部をはずり取り、鉄筋を露出させる
- ② 露出した鉄筋の錆をケレンした後、亜硝酸リチウム系含浸材および亜硝酸リチウム含有ペーストを塗布する ⇒ 鉄筋防錆
- ③ 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

鉄筋腐食抑制効果を併せ持つ断面修復工法

63

【リハビリ断面修復工法】… メリットとデメリット

リハビリ断面修復工法のメリット

- ・浮き、はく離部を単に断面修復するだけでなく、**亜硝酸リチウムの効果**を付与できる
- 塩害・中性化 : 鉄筋腐食抑制
- ・特に塩害の場合、塩化物イオン濃度に応じて**亜硝酸リチウム混入量**を定量的に設定することができる。

リハビリ断面修復工法のデメリット

- ・亜硝酸リチウム混入量が多くなると、単位当たりの施工費が高価となる

リハビリ断面修復工法の適用範囲

- ・塩害、中性化の場合、浮きや剥離が生じた「加速期前期」以降
- ・他工法との組み合わせによる総合的な補修を図ることが効果的

リハビリ断面修復工法の積算

- ・国土交通省標準歩掛に準拠して積算(1橋あたり)
- ・単位あたり施工費は規模によって大きく変動

64

内部圧入工法 『リハビリカプセル工法』

NETIS:CG-120005-VR

65

【リハビリカプセル工法】… 工法概要(塩害、中性化の補修の場合)

基本性能 『亜硝酸イオンによる鉄筋腐食の抑制』 (NETIS:CG-120005-VR)

- 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

不動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

66



67

【リハビリカプセル工法】 … メリットとデメリット

リハビリカプセル工法のメリット

- 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。
- 塩害の場合、塩化物イオン濃度に応じて亜硝酸リチウム圧入量を定量的に設定することができる。
- 腐食発生限界を超える塩化物イオン存在下でも鉄筋を腐食させない。

リハビリカプセル工法のデメリット

- 亜硝酸リチウム圧入量が多くなると、施工費が高価となる

リハビリカプセル工法の適用範囲

- 塩害、中性化の場合、変状が生じている「加速期前期」以降での適用が多い
- プレストレストコンクリート部材への適用は現時点で実績なし（適用に向けて研究開発に着手）
- 塩化物イオン濃度が過度に含まれている場合は詳細検討が必要（上限の塩化物イオン濃度の目安：10kg/m³程度）

リハビリカプセル工法の積算

- コンクリートメンテナンス協会標準歩掛にて積算
- 単位あたり施工費は規模、塩化物イオン量、コンクリート強度等によって大きく変動

68

【リハビリカプセル工法】 … 亜硝酸リチウム設計圧入量

劣化機構 : 塩害
設計に必要な値 : 塩化物イオン濃度(亜硝酸リチウム圧入量の設定)
 鉄筋かぶり深さ(亜硝酸リチウムの目標圧入深さの設定)
 コンクリート圧縮強度(設計圧入日数の算定)

亜硝酸リチウム必要量の設計 ⇒ 塩化物イオン濃度に応じて設定する
 $[\text{NO}_2^-] / [\text{Cl}^-]$ モル比 = 1.0となる量

【設計上の仮定】
 コンクリート表面から目標圧入深さまで亜硝酸イオンを均一濃度で分布させる

【圧入可能量】
 限界圧入量 : 37kg/m³程度
 (塩化物イオン10kg/m³相当)

69



70

【参考】 … 亜硝酸リチウムの環境への影響

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る

法規制・基準等	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
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
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

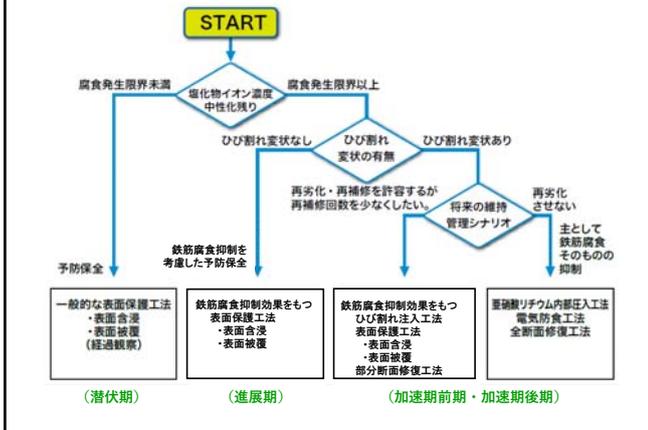
・亜硝酸リチウムを用いた補修工事において、上記の基準値を超える可能性があるのは、不慮の事故または災害等により保管中の亜硝酸リチウム水溶液が大量に流出するような場合のみ
 ・保管時に適切な管理が必要

71

おわりに

72

【塩害・中性化で劣化したコンクリートの補修工法選定フローの例】



73

補修工法の選定方法の基本的な考え方

- ・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する
 - ⇒ 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か？
- ・補修後の維持管理シナリオを考慮して補修工法を選定する
 - ⇒ 今後、どのように維持管理していくつもりなのか？



『適切な維持管理にて構造物の健康寿命を延ばす』

74