

コンクリートの劣化と 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

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

2

塩害



3

塩害

技術資料P.3

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
- ・塩化物イオンが鉄筋位置に到達



劣化進行

- ・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
- ・鉄筋が腐食するとコンクリートにひび割れ、はく離が生じる

4

塩分の侵入

- ・沿岸地域における飛来塩分の浸透(外來塩分)
- ・山間部積雪地帯における凍結防止剤の散布(外來塩分)
- ・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 1.2kg/m^3 を超えると、鉄筋の腐食がはじまる



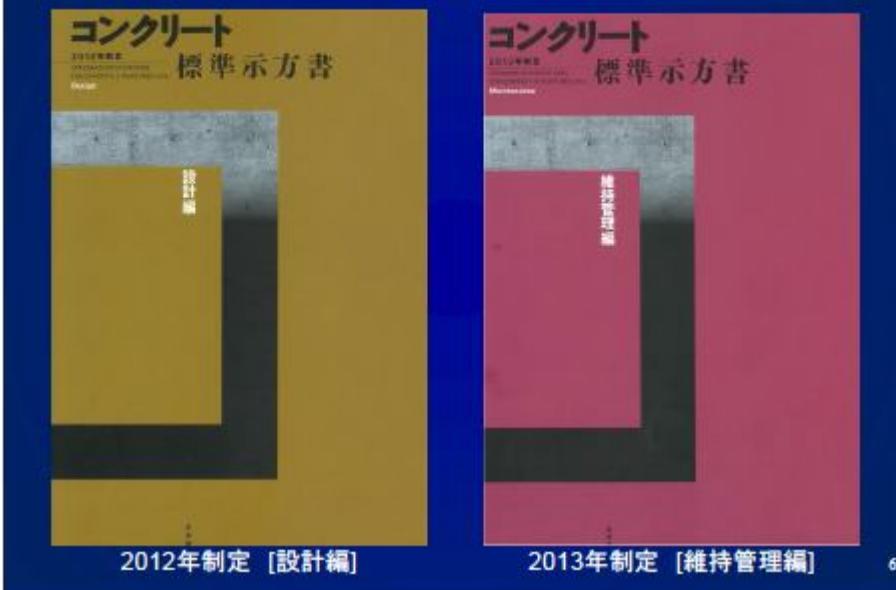
数値の変更

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。

5

コンクリート標準示方書[維持管理編](土木学会)の改訂



コンクリート標準示方書[維持管理編](土木学会)における 塩化物イオンの『腐食発生限界濃度』に関する記述

【2007年制定 維持管理編における記述】

- ・構造物の点検結果から腐食発生塩化物イオン濃度を求めるなどを原則
- ・それらで求められない場合には、1.2kg/m³とみなしてもよい

【2013年制定 維持管理編における記述】

- ・構造物の点検結果から腐食発生塩化物イオン濃度を求めるなどを原則
- ・それによらない場合には、類似構造物の点検結果に基づいて求める
- ・なお、港湾構造物では2.0kg/m³とすることが多い
- ・類似の構造物の点検結果がない場合には、セメントの種類や水セメント比を確認したうえで以下の式にて算出してもよい

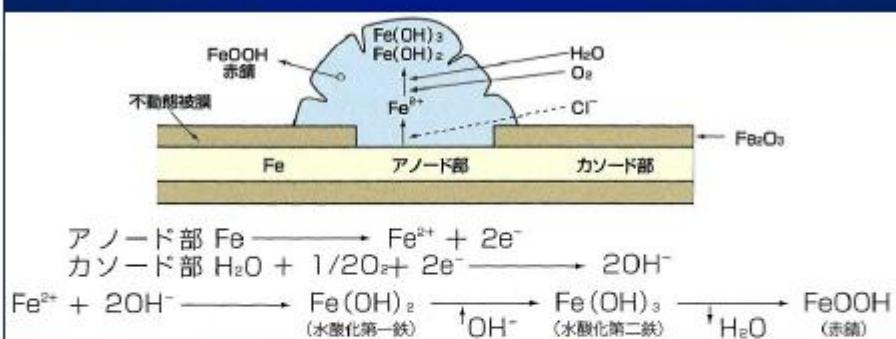
普通ポルトランドセメントを用いた場合

$$C_{\text{lim}} = -3.0(W/C) + 3.4$$

例) W/C=0.3のとき、2.5kg/m³

W/C=0.55のとき、1.75kg/m³

【鉄筋の腐食】



- 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

技術資料P.4

【塩害による劣化事例】



床版下面の錆汁



コンクリートのはく離・はく落

- ・沿岸部にある海洋構造物
- ・飛来塩分による塩害

- ・河口付近にある道路橋
- ・飛来塩分による塩害
- ・一部、コンクリートがはく離して鉄筋が露出している



主桁下面の鉄筋腐食



補修箇所の再劣化

- ・平野部にあるPC上部工
- ・凍結防止剤による塩害
- ・鉄筋だけでなく、PC鋼材も腐食しており、一部には破断も認められた
- ・耐久性能のみならず、耐荷性能までも著しく低下している

- ・過去に鋼板接着+表面被覆による補修、補強がなされている
- ・鉄筋腐食が再び進行し、鉄筋位置にてコンクリートがはく離している

【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」

【塩害の補修工法】

【塩害】補修工法の種類と要求性能

- 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)

- 【表面被覆工法】
- 【表面含浸工法】
- 【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)

- 【全断面修復工法】
- 【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】
- 【亜硝酸リチウムによる鉄筋防錆】

①劣化因子の遮断

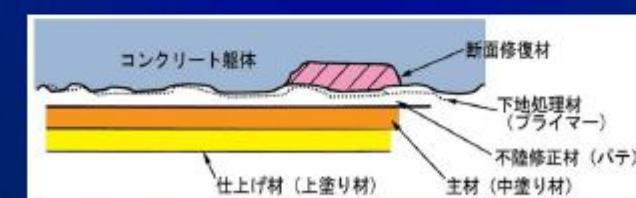
【表面被覆工法】



・コンクリート表面を有機系、無機系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(塩化物イオン、水、酸素)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



①劣化因子の遮断

【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
- ・撥水効果付与 : シラン系など
- ・ぜい弱部の強化 : けい酸塩系など

技術資料P.7

14

①劣化因子の遮断

【ひび割れ注入工法】



自動低圧注入器による注入状況

※ひび割れ注入工とひび割れ充填工

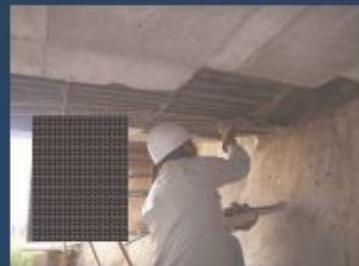
- ・ひび割れ幅が大きいものには経済性の理由によりひび割れ充填工法(Uカット)を適用する場合もある
- ・しかし、鉄筋腐食抑制の観点からはひび割れ充填工法よりもひび割れ注入工法の方が抑制効果が高いと考えられる
- ・劣化要因に応じた工法選定を行うことが重要

技術資料P.8

15

②劣化因子の除去

【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取り取り、断面修復材にて埋め戻す
- ・はつりとっ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

技術資料P.9

【全断面修復】

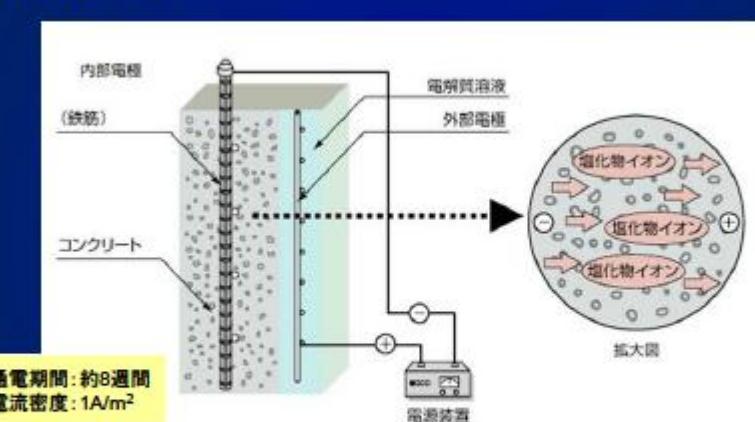


- ・鉄筋位置での塩化物イオン濃度が腐食発生限界を超えている
- ・かぶり範囲のコンクリートを全てはつり取り、断面修復材にて埋め戻す
- ・「劣化因子の除去」という要求性能を満たすための断面修復工法はこの全断面修復工法を指す

16

②劣化因子の除去

【脱塩工法】



- ・コンクリート表面に電解質を介して外部電極を設置する
- ・コンクリート中の鋼材を陰極として直流電流を流す
- ・コンクリート中の塩化物イオンを陽極側へ電気泳動させて取り除く

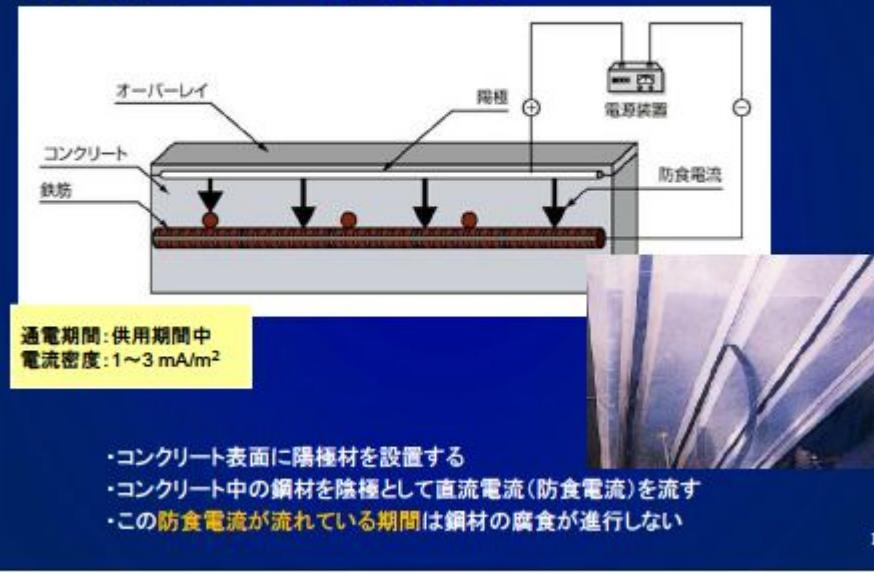
技術資料P.10

17

③鉄筋腐食の抑制

技術資料P.11

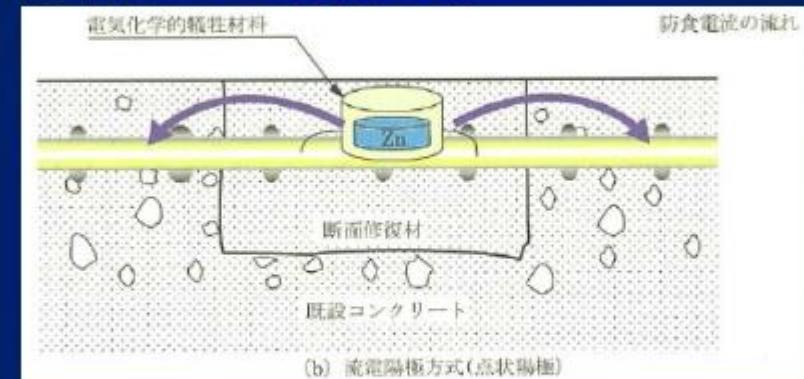
【電気防食工法 － 外部電源方式】



③鉄筋腐食の抑制

技術資料P.11

【電気防食工法 － 流電陽極方式】



- 外部電源不要
- 犠牲陽極材と鉄筋の金属的性質の違いにより防食電流が自然に流れる
- 犠牲陽極材の寿命は15~20年とされている
- 断面修復部のマクロセル腐食抑制としての適用も多い

19

③鉄筋腐食の抑制

技術資料P.12

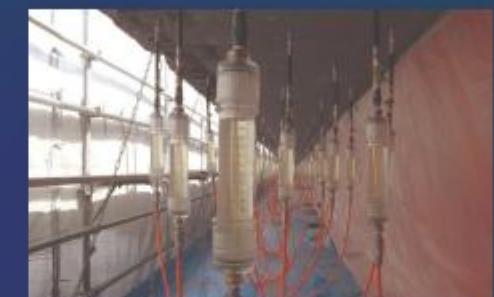
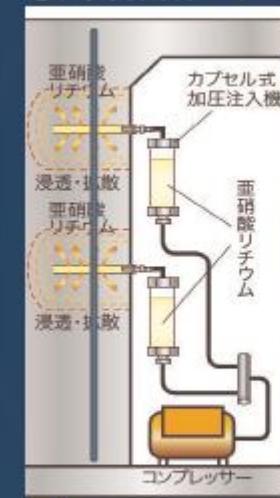
【鉄筋防錆材の活用(亜硝酸リチウム)】



③鉄筋腐食の抑制

技術資料P.12

【鉄筋防錆材の活用(亜硝酸リチウム)】



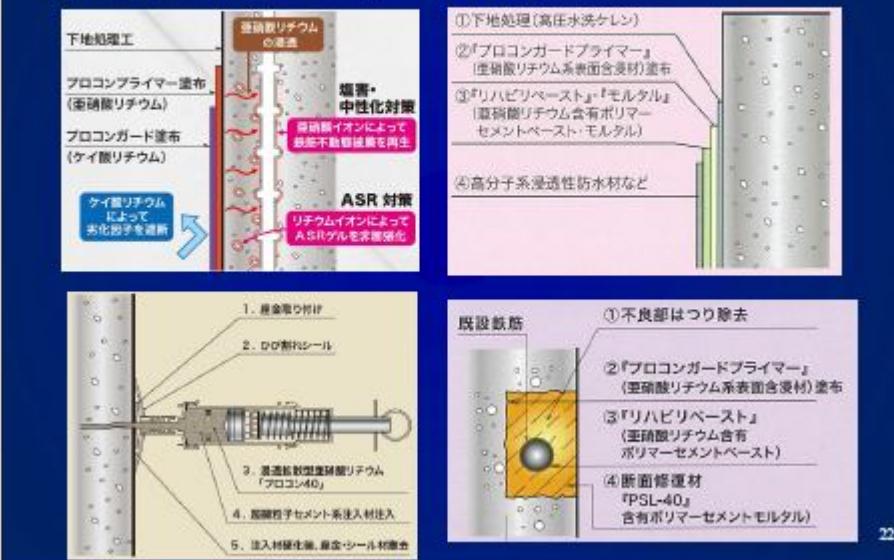
- コンクリートにφ 10mm、L=100mm程度の削孔を500mmの間隔で行う
- カプセル式加圧装置を設置して亜硝酸リチウム水溶液を内部圧入する ⇒ 鉄筋防錆
- 削孔箇所を充填材にて埋め戻す

削孔箇所から鉄筋周囲へ亜硝酸イオンを圧入する

21

③鉄筋腐食の抑制

【鉄筋防錆材の活用(亜硝酸リチウム)】



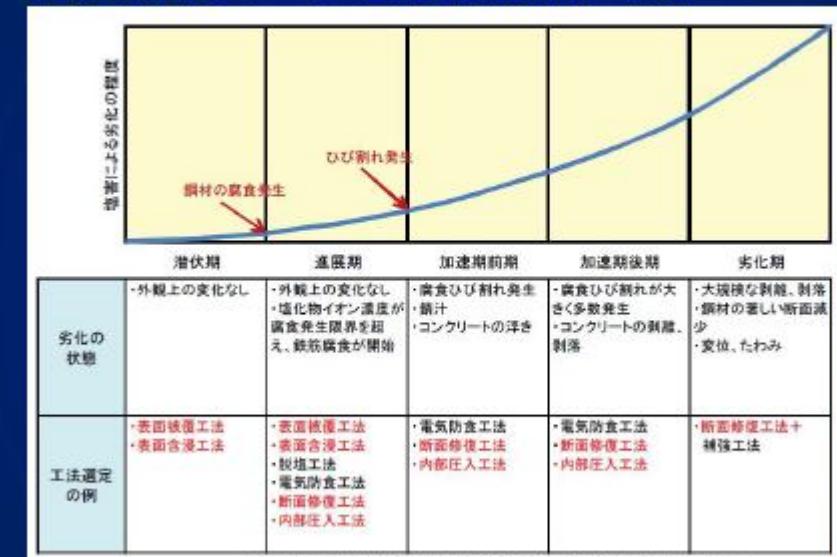
技術資料P.12

中性化



24

【塩害の劣化グレードと適用可能な補修工法】 技術資料P.13



23

中性化

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

- ・中性化は一般的にコンクリート表面から進行する
- ・中性化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
- ・鋼材が腐食するとコンクリートにひび割れ、はく離が生じる

25

技術資料P.15

中性化の反応



中性化の影響範囲

中性化残りが10mmよりも小さくなったら、その鉄筋は腐食環境にある
(塩化物イオンの影響がある構造物では15mmとされる)

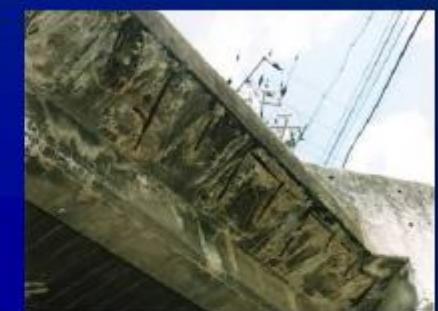
留意点

- ・中性化において、『中性化領域』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
『二酸化炭素』 ⇒ 『水と酸素』にかわる。

【中性化による劣化事例】



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が不足
- ・早期に中性化領域が鉄筋位置に到達

【中性化の劣化過程】

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」

【中性化】補修工法の種類と要求性能

①劣化因子の遮断

(外部からの二酸化炭素、水、酸素の侵入を低減)

- 【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)

- 【断面修復工法】
- 【再アルカリ化工法】

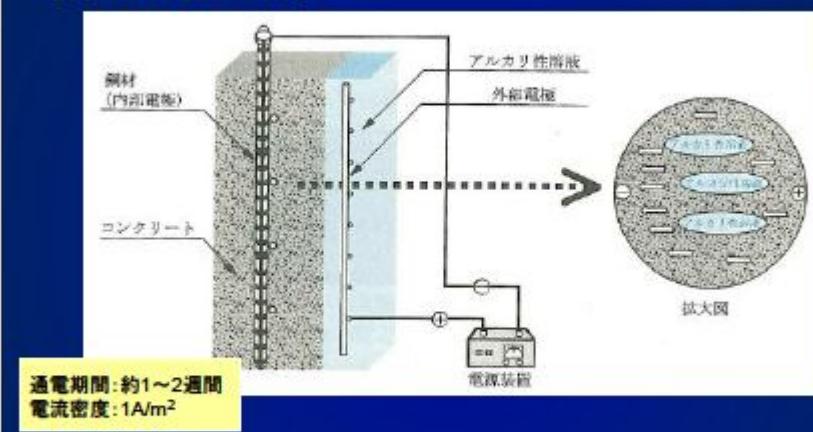
③鉄筋腐食の抑制

(既に腐食が進行している鉄筋を防錆)

- 【電気防食工法】※
- 【鉄筋防錆材(亜硝酸リチウム)の活用】

※劣化進行が早い場合に適用される

【再アルカリ化工法】



- ・コンクリート表面にアルカリ性溶液を介して外部電極(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を流す
- ・アルカリイオンを陰極側へ電気泳動させてアルカリ性を回復させる

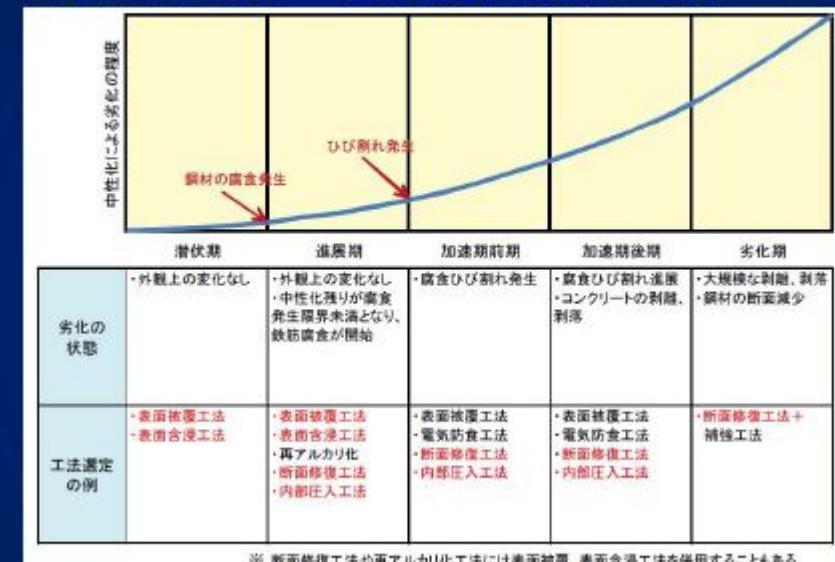
30

ASR



32

【中性化の劣化グレードと適用可能な補修工法】 技術資料P.24



* 断面修復工法や再アルカリ化工法には表面被覆、表面含浸工法を併用することもある
ひび割れが発生している場合にはひび割れ注入工法が併用される
赤文字は重硝酸リチウムを使用可能な工法を示す

31

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、アルカリ、水と反応して膨張する性質の反応性骨材が使用されることがある

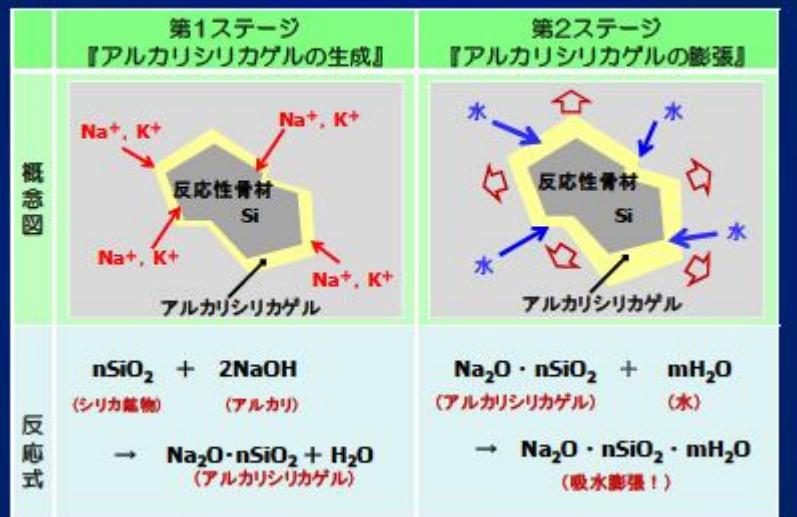


劣化進行

- ・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

33

ASR劣化の進行過程



34

【ASRによる劣化事例】



擁壁のASR劣化

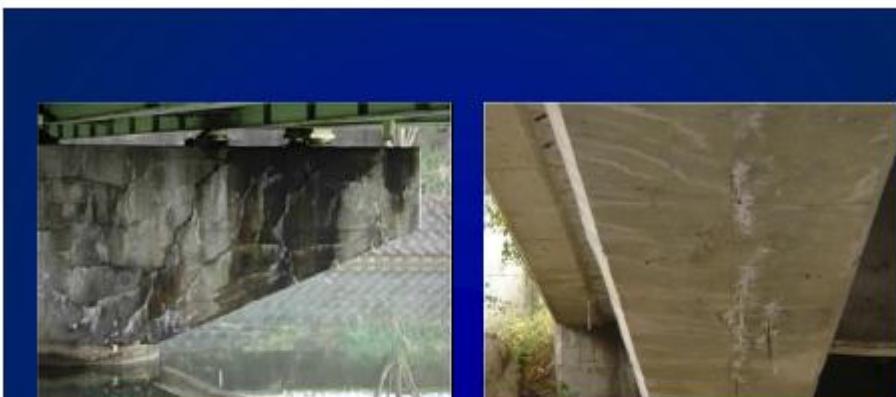


橋台のASR劣化

- ・亀甲状のひび割れ

- ・表面からは雨水、背面から地下水
- ・伸縮縫手からは橋面水が供給
- ・橋台の両端部(雨がかり)の進行が著しい場合がある

35



橋脚のASR劣化

PC上部工のASR劣化

- ・亀甲状のひび割れ
- ・白色ゲル析出
- ・表面からは雨水、伸縮縫手からは橋面水が供給

- ・PC鋼材に沿った橋軸方向に卓越したひび割れが発生することが多い
- ・PC鋼材の腐食やDEFIによる変状のパターンと類似するため注意が必要

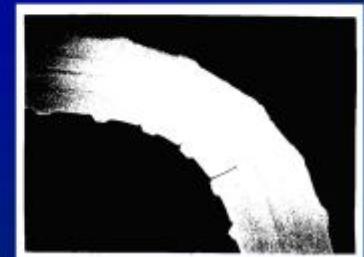
36

ASRによる鉄筋破断



【ASRによる鉄筋破断メカニズム】

- ・曲げ加工部の加工硬化による脆化
- ・ひずみ時効による脆化の進行
- ・水素脆化による割れ
- ・ASR膨張による鉄筋の曲げ戻し力



37

【ASRによる再劣化事例】

技術資料P.28



橋台の再劣化事例

- ・橋台や擁壁の背面は土砂に接しており、背面を被覆することができない



橋脚はり部の再劣化事例

- ・橋脚はり部には、伸縮維手を通じて橋面からの排水が流れ込む。
- ・しかし、はり天端は桁や支承、アンカーバーなどがあり、十分な被覆作業が困難



- ・水分浸入を完全に遮断することが困難



38

【橋脚のASR再劣化事例(表面被覆の下は…?)】



39

【橋脚のASR再劣化事例(表面被覆を剥がしてみると…!)】



【ASRの劣化過程】

技術資料P.29

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]」

41

【ASRの補修工法】

技術資料P.30

【ASR】補修工法の種類と要求性能

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】

42

①劣化因子の遮断

【表面被覆工】



表面被覆工(無機系)



表面被覆工(有機系)

- ・コンクリート表面を有機系、無機系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(水分)の浸入を防ぐ
- ・水分を遮断することにより、アルカリシリカゲルの吸水膨張を抑制する
- ・ASR対策としての実績は最も豊富
- ・膨張に追随させるため、伸び能力の高い柔軟型の有機系被覆材を使用することも
- ・無機系被覆材 + 亜硝酸リチウムの組合せも可能

43

①劣化因子の遮断

技術資料P.31

【表面含浸工法】



表面含浸工(シラン系の例)

- ・コンクリート表面にシランなどの撥水系表面含浸材を塗布することにより、表面から内部へ含浸させ、コンクリート表層部に撥水層を形成する
- ・外部からの水分を遮断する一方で、内部からの水分逃散は阻害しない
- ・ASR対策としての実績が増えている
- ・劣化進行が比較的軽微な段階で適用すると効果が高い
- ・以後のモニタリングも容易

44

①劣化因子の遮断

技術資料P.32

【ひび割れ注入工法】



自動低圧注入器(スプリング圧タイプ)



自動低圧注入器(ゴム圧タイプ)

- ・ひび割れを通じた劣化因子(水分)の侵入を遮断する
- ・セメント系、ポリマーセメント系、樹脂系などさまざまな種類がある
- ・膨張に追随させるため、伸び能力の高い樹脂系注入材を選定することも
- ・セメント系注入材 + 亜硝酸リチウムの組合せが可能

45

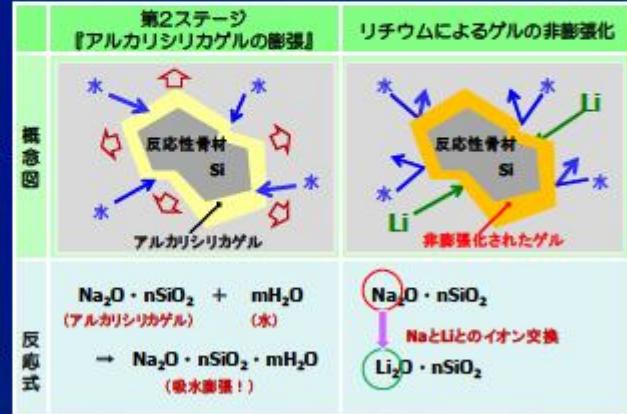
②ゲルの非膨張化

【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



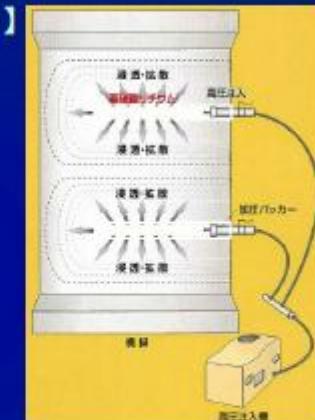
46

②ゲルの非膨張化

【ASR抑制剤の活用(亜硝酸リチウム)】



亜硝酸リチウム内部圧入工施工状況

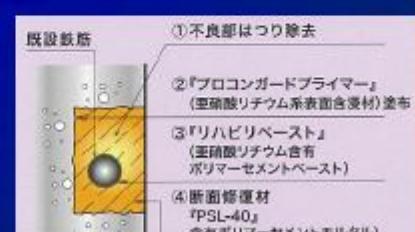
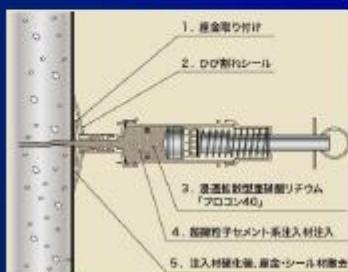
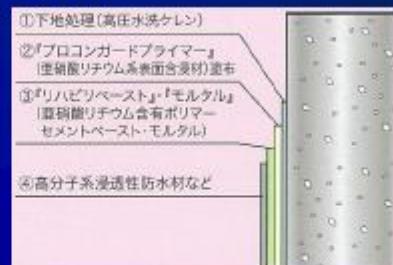
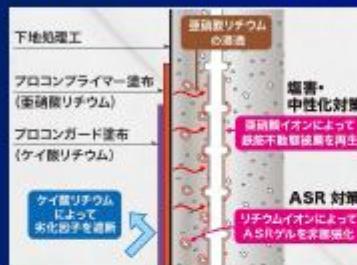


- ・コンクリート内部に亜硝酸リチウムを加圧注入し、アルカリシリカゲルにリチウムイオンを供給する
- ・リチウムイオンがアルカリシリカゲルを非膨張化するため、以後のASR膨張は抑制される
- ・詳細は後半にて！

47

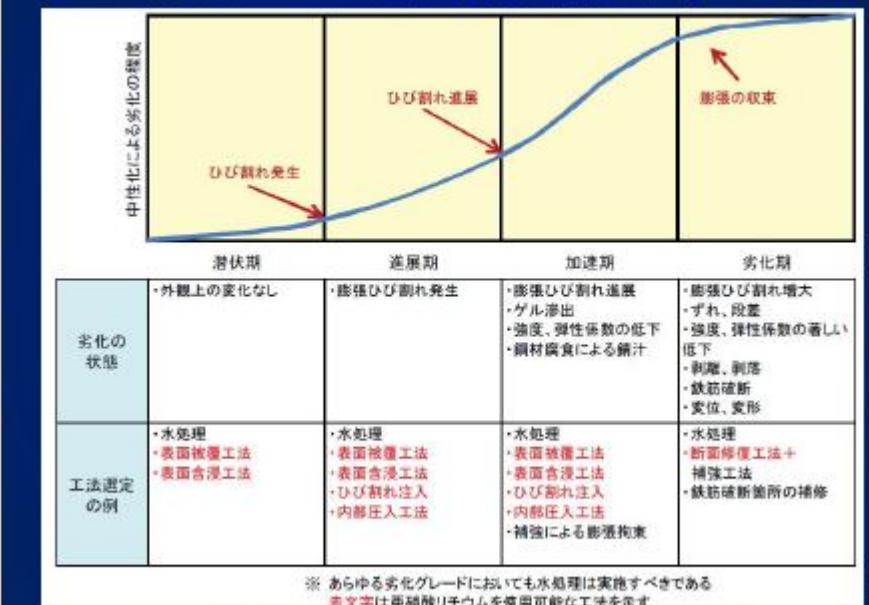
②ゲルの非膨張化

【ASR抑制剤の活用(亜硝酸リチウム)】



48

【ASRの劣化グレードと適用可能な補修工法】



49

補修工法選定の考え方の例

50

【塩害の補修設計の流れ】

【調査段階】

- ・環境条件調査
- ・外観目視調査
- ・塩化物イオン濃度
- ・鉄筋腐食度調査

【診断段階】

- ・劣化程度の評価
- ・将来予測
- ・補修要否判定

【補修設計段階】

- ・補修工法の要求性能
- ・補修工法の比較検討
- ・採用工法による詳細設計

51

【塩害】による劣化の診断 3つの着目点

【①劣化要因は塩害なのか?】

- ・環境条件の確認（沿岸地域、凍結防止剤散布地域）
- ・外観目視調査（ひび割れパターン、錆汁の有無、コンクリートの浮き・はく離）
- ・塩化物イオン含有量試験
⇒ コンクリート表面から深さ方向の塩化物イオン量の分布を測定すると
効果的 … （内在塩分？ 外来塩分？）

【②現時点での劣化程度はどれくらいか?】

- ・外観目視調査（外観上の劣化グレード）
- ・鉄筋腐食度調査（はつりによる目視調査、自然電位法）

【③将来的な塩害の劣化予測】

- ・塩化物イオン拡散予測（Fickの拡散方程式）

52

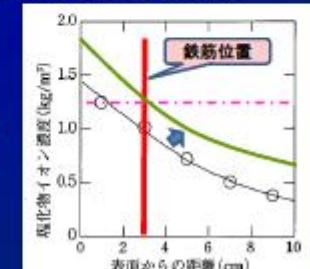
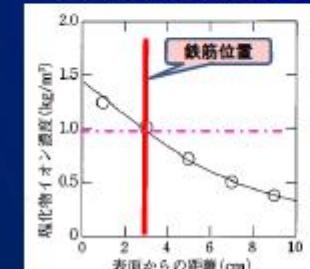
【③将来的な塩害の劣化予測】

・塩化物イオン拡散予測（Fickの拡散方程式）

$$C(x, t) = C_0 \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right] + C \quad (4.1)$$

ここで、
 $C(x, t)$ ：表面からの深さ x (cm) の時刻 t (s) における塩化物イオン濃度
(kg/m³)
 C_0 ：コンクリート表面における塩化物イオン濃度 (kg/m³)
 C ：コンクリート材料に当初から含まれていたと考えられる塩化物イオ
ン濃度 (kg/m³)
 D ：コンクリート中で塩化物イオンの見掛けの拡散係数 (cm²/s)
 $\operatorname{erf}(x)$ ：誤差関数。

『あと何年後に鉄筋位置の塩分量が腐食限界を超えるか』を算出する



53

【塩害】劣化状況・程度に応じた補修工法選定の考え方の例

状況①【鉄筋腐食度は小さく、塩分量も少ない】

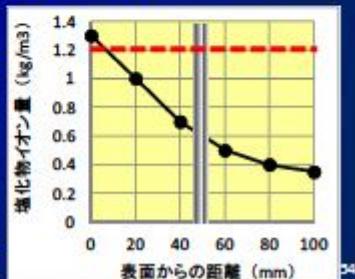
潜伏期

- ・本構造物の環境では、塩害の進行が比較的緩やか
- ・以後の塩分浸入を抑制することで鉄筋腐食を防ぐことが可能となる

- 表面含浸・被覆工法（以後の劣化因子を遮断）
- ✗ 断面修復工法（除去すべき劣化因子が少ない）
- ✗ 脱塩工法（除去すべき劣化因子が少ない）
- ✗ 電気防食工法（無意味ではないが過大）
- ✗ 亜硝酸リチウム内部圧入（無意味ではないが過大）



注意: ○△✗ の評価はあくまで考え方の例です



状況②【鉄筋腐食度は小さいが、塩分量が多い】

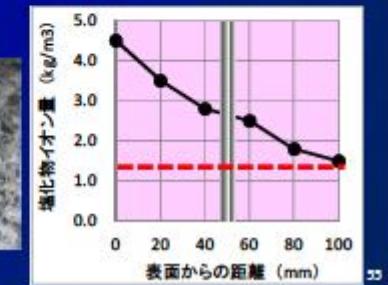
進展期～加速期前期

- ・既に侵入済みの塩分によって鉄筋腐食がこれから顕在化する可能性大

- 表面含浸・被覆工法（水分と酸素を十分に遮断できれば）
- △ 断面修復工法（劣化因子を除去するが健全なコンクリートを痛める）
- 脱塩工法（鉄筋腐食の開始前に劣化因子を除去）
- △ 電気防食工法（塩分存在下でも鉄筋を腐食させないが、過大）
- △ 亜硝酸リチウム内部圧入（塩分存在下でも鉄筋を腐食させない）



注意: ○△✗ の評価はあくまで考え方の例です



状況③【鉄筋腐食度が大きいが、かぶりコンクリートは比較的健全】

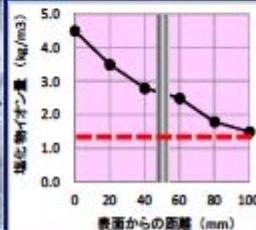
加速期前期～後期

- ・既に鉄筋腐食が著しく進行しているため、この段階で劣化因子（塩分）を遮断するのみでは不十分（手遅れ）
- ・鉄筋腐食を抑制する工法を選定しないと、早期に再劣化

- ✗ 表面含浸・被覆工法（以後の劣化因子の遮断だけでは手遅れ）
- △ 断面修復工法（劣化因子を除去するが健全なコンクリートを痛める）
- ✗ 脱塩工法（ここで劣化因子を除去しても手遅れ）
- 電気防食工法（塩分存在下でも鉄筋を腐食させない）
- 亜硝酸リチウム内部圧入（塩分存在下でも鉄筋を腐食させない）



注意: ○△✗ の評価はあくまで考え方の例です



状況④【鉄筋腐食度が大きく、かぶりコンクリートも脆弱】

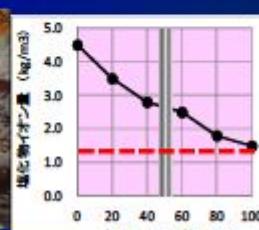
加速期後期～劣化期

- ・鉄筋腐食が著しく、浮き・はく離が生じている状態なので、断面修復は必須
- ・断面修復だけで十分か、他工法と併用すべきかを検討
- ・補修だけでなく補強工法と組合わせる必要があるかを検討

- △ 表面含浸・被覆工法 + 断面修復 (+ 補強)
- △ 断面修復工法のみ (+ 補強)
- ✗ 脱塩工法 + 断面修復 (+ 補強)
- 電気防食工法 + 断面修復 (+ 補強)
- 亜硝酸リチウム内部圧入と断面修復との併用 (+ 補強)



注意: ○△✗ の評価はあくまで考え方の例です

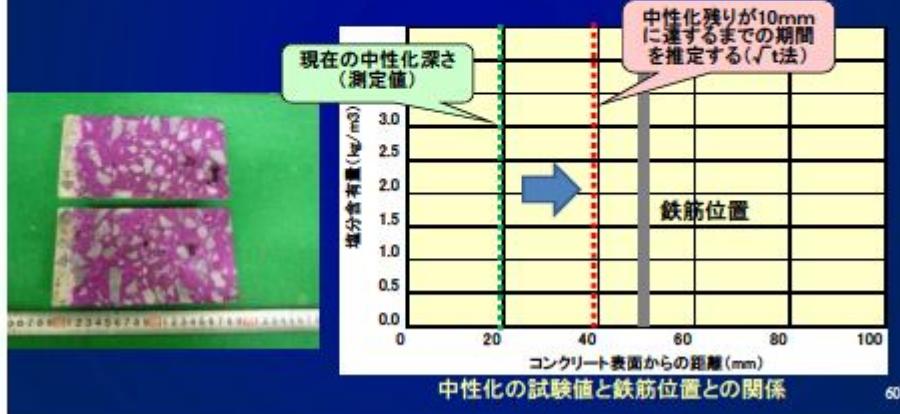


【中性化の補修設計の流れ】



【③将来的な中性化の劣化予測】

- ・ \sqrt{t} 法による劣化予測
 - ⇒ フェノールフタレンイン法により、現在の中性化深さを測定
 - ⇒ 竣工後の経過年数と現時点での中性化深さから、『中性化残りが10mmに達するまでの期間』を予測する



【中性化】による劣化の診断 3つの着目点

【①劣化要因は中性化なのか？】

- ・外観目視調査（ひび割れパターン、錆汁の有無、コンクリートの浮き・はく離）
- ・環境条件の確認（沿岸地域、凍結防止剤散布地域でないか？）
- ・中性化深さ試験（フェノールフタレンイン法）
 - フェノールフタレンイン溶液を噴霧したときの非発色部を中性化領域と判定する（劣化予測にも活用）

【②現時点での劣化程度はどれくらいか？】

- ・外観目視調査（外観上の劣化グレード）
- ・鉄筋腐食度調査（はつりによる目視調査、自然電位法）

【③将来的な中性化の劣化予測】

- ・中性化進行予測（ \sqrt{t} 法）

59

【中性化】劣化状況・程度に応じた補修工法選定の考え方の例

状況① 【鉄筋腐食度は小さく、中性化残りも10mm以上】

潜伏期

- ・本構造物の環境では、中性化による鉄筋腐食が著しく進行しない
- ・以後のCO₂浸入を抑制することで鉄筋腐食を防ぐことが可能となる

- 表面含浸・被覆工法（以後の劣化因子を遮断）
- × 断面修復工法（除去すべき劣化因子が少ない）
- × 再アルカリ化工法（除去すべき劣化因子が少ない）
- × 電気防食工法*（無意味ではないが過大）
- × 亜硝酸リチウム内部圧入（無意味ではないが過大）

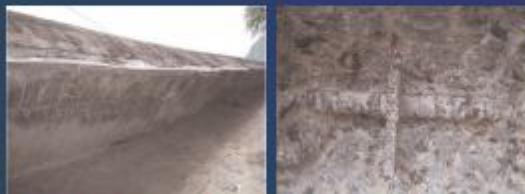


進展期～加速期前期

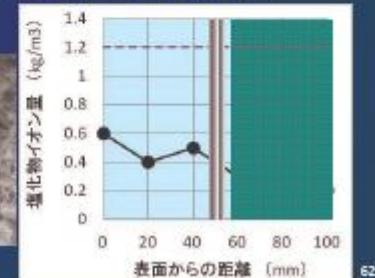
状況②【鉄筋腐食度は小さいが、中性化残りが10mm未満（早期に10mmを超える）】

- ・中性化による鉄筋腐食がこれから顕在化する可能性大
- ・鉄筋が腐食を開始する前に中性化領域を除去

- 表面含浸・被覆工法（水分と酸素を十分に遮断できれば）
- △ 断面修復工法（劣化因子を除去するが健全なコンクリートを痛める）
- 再アルカリ化工法（鉄筋腐食の開始前に劣化因子を除去）
- △ 電気防食工法※（中性化しても鉄筋を腐食させない）
- △ 亜硝酸リチウム内部圧入（中性化しても鉄筋を腐食させない）



注意: ○△×の評価はあくまで考え方の例です



62

加速期前期～後期

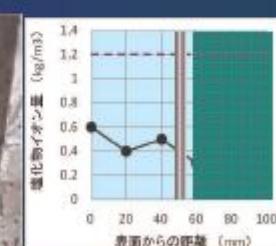
状況③【鉄筋腐食度が大きいが、かぶりコンクリートは比較的健全】

- ・既に鉄筋腐食が著しく進行しているため、この段階で劣化因子(CO_2)を遮断するのみでは不十分(手遅れ)
- ・鉄筋腐食を抑制する工法を選定しないと、早期に再劣化

- × 表面含浸・被覆工法（以後の劣化因子の遮断だけでは手遅れ）
- △ 断面修復工法（劣化因子を除去するが健全なコンクリートを痛める）
- × 再アルカリ化工法（ここで劣化因子を除去しても手遅れ）
- 電気防食工法※（中性化しても鉄筋を腐食させない）
- 亜硝酸リチウム内部圧入（中性化しても鉄筋を腐食させない）



注意: ○△×の評価はあくまで考え方の例です



63

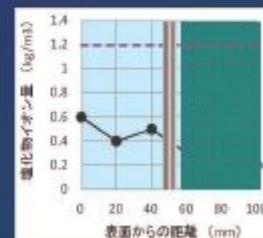
加速期後期～劣化期

状況④【鉄筋腐食度が大きく、かぶりコンクリートも脆弱】

- ・鉄筋腐食が著しく、浮き・はく離が生じている状態
- △ 表面含浸・被覆工法 + 断面修復
- △ 断面修復工法のみ
- × 再アルカリ化 + 断面修復
- 電気防食工法※ + 断面修復
- 亜硝酸リチウム内部圧入と断面修復との併用



注意: ○△×の評価はあくまで考え方の例です



64

【ASRの補修設計の流れ】

【調査段階】

- ・環境条件調査
- ・外観目視調査
- ・コア採取による観察、コンクリート試験
- ・残存膨張量試験



【診断段階】

- ・劣化程度の評価
- ・将来予測
- ・補修要否判定



【補修設計段階】

- ・補修工法の要求性能
- ・補修工法の比較検討
- ・採用工法による詳細設計

65

【ASR】による劣化の診断 3つの着目点

【①劣化要因はASRなのか?】

- ・外観目視調査（ひび割れパターン、白色ゲル析出など）
- ・コア観察（ASRゲル、反応リム、骨材の割れ）
- ・岩種判定（偏光顕微鏡観察、X線回折分析）
- ・アルカリシリカゲルの観察（化学分析、SEM観察）
- ・アルカリ総量試験（ASRの可能性の有無）

【②現時点での劣化程度はどれくらいか?】

- ・外観目視調査（外観上の劣化グレード）
- ・圧縮強度試験、静弾性係数試験、超音波伝播速度（ASRIにより低下）

【③将来的なASRの劣化予測】

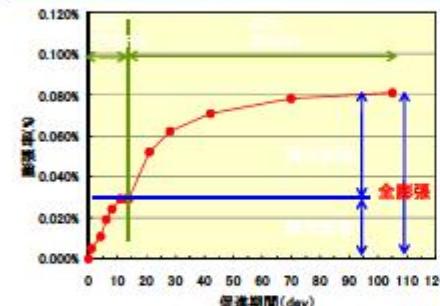
- ・残存膨張量試験（JCI-DD2法、カナダ法など）
- ・外観目視調査（数年の間でひび割れ幅や密度が増大。再劣化。）

66

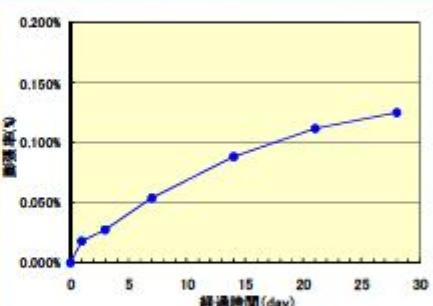
【③将来的なASRの劣化予測】

- ・残存膨張量試験（以後のASR膨張の可能性を定量的に評価）

『JCI-DD2法』



『カナダ法』



- ・環 境：40°C, 95%RH
- ・期 間：3ヶ月
- ・判 定例：0.05%以上を有害（全膨張）
- ・課 題：遅延膨張性の骨材などでは過小評価となる場合あり

- ・環 境：80°C, 1N NaOH溶液浸漬
- ・期 間：21日（または14日）
- ・判 定例：0.1%以上を有害
- ・課 題：強制膨張試験のため、過大評価となる場合あり

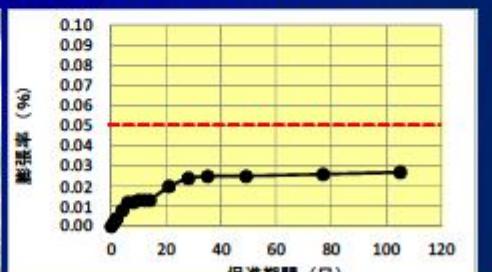
67

【ASR】劣化状況・程度に応じた補修工法選定の考え方の例

状況①【変状は軽微で、残存膨張量は十分に小さい】

進展期

- ・ASR膨張性はもともと大きくない
 - ・以後のひび割れ進行をそれほど考慮する必要はない
 - ・外部からの水分を遮断することで一定の補修効果が期待できる
- 表面含浸工法（以後の劣化因子を遮断）
 △ 柔軟型表面被覆工法（ひび割れ追従性は必要ない）
 × 亜硝酸リチウム内部圧入（膨張を抑制する意味がない）



注意: ○△×の評価はあくまで考え方の例です

状況②【変状は軽微であるが、残存膨張量は十分に大きい】

進展期

- ・これからASR膨張が進行する可能性を考慮する必要がある
 ・ただし、この時点で水分を完全に遮断できればASRは進行しない

- 表面含浸工法（劣化が進行する可能性はある）
- 柔軟型表面被覆工法（劣化が進行する可能性はある）
- △ 亜硝酸リチウム内部圧入（劣化進行を許容しない場合）



注意: ○△×の評価はあくまで考え方の例です

68

