

『調査・診断・補修設計から 補修工事・追跡調査まで』

平成23年11月22日



コンクリートメンテナンス協会 東北支部
江良 和徳（極東興和株）

1

本日の主な内容

- はじめに
- 塩害で劣化したコンクリート構造物への対応
 - 塩害とは
 - 調査・診断
 - 塩害補修工法
 - 塩害対策の事例
 - 追跡調査
- ASRで劣化したコンクリート構造物への対応
 - ASRとは
 - 調査・診断
 - ASR補修工法
 - ASR対策の事例
 - 追跡調査
- おわりに

2

1. はじめに

3

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

4

劣化した構造物に対する適切な対処

・コンクリートに生じた変状は、全てに原因がある

- ⇒その原因に応じて
 - ⇒その劣化度に応じて
 - ⇒対象構造物の立地・環境条件に応じて
 - ⇒対象構造物の維持管理シナリオに応じて
- 対策方針が異なる



個々の状況に応じて最適な補修技術・補修材料を選定

- ① 『定期点検』
- ② 『詳細調査』
- ③ 『劣化要因の判定』と『健全度評価』
- ④ 『補修要否の判定』と『維持管理シナリオ』
- ⑤ 『補修工法・補修材料の選定』
- ⑥ 『補修工事の施工』
- ⑦ 『補修効果の確認』と『定期的な監視』

5

2. 塩害で劣化した コンクリート構造物への対応

6

2.1 塩害とは

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、鉄筋の不動態被膜が破壊され、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



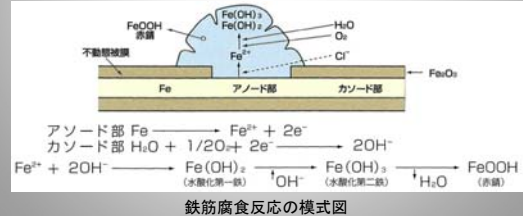
7

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 1.2kg/m^3 を超えると、鋼材の腐食がはじまる



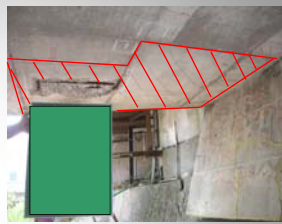
8

塩害による劣化事例



床版下面の錆汁

- ・沿岸部にある海洋構造物
- ・飛来塩分による塩害
- ・潮を受けやすい端部の劣化が著しい



コンクリートのはく離・はく落

- ・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
- ・タタキ点検の結果、斜線部の範囲のコンクリートもはく離していた

9



主桁下面の鉄筋腐食

- ・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



補修・補強箇所の新劣化

- ・過去に表面保護工による補修および鋼板接着工による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
- ・既に鋼板接着による補強効果は期待できない

10



桁端部で局部的に発生した塩害(凍結防止剤による塩害)

- ・上部工の掛け違い部では、伸縮継手からの漏水が桁端部に作用する。
- ・この漏水に凍結防止剤などに起因する塩化物イオンが含まれる場合は、桁端部において局所的な塩害を生じやすい。
- ・塩化物イオンを含む桁端部の漏水は、PC定着具や端部付近のPC鋼材を腐食させる恐れがある。

11

2.2 調査・診断

塩害劣化が疑われる構造物に対して



【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現時点での塩害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】

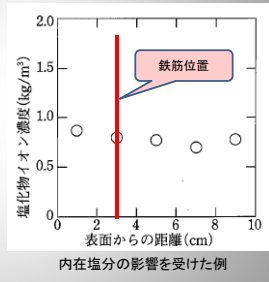
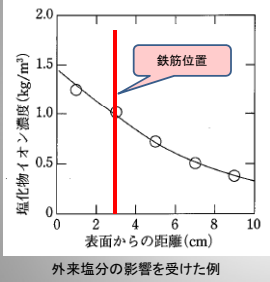
- ・塩化物イオン拡散予測 (Fickの拡散方程式)

12

【①劣化要因は塩害なのか？】

・塩化物イオン含有量試験

⇒ コンクリート表面からコアを採取し、それを2cm毎にスライスする。各スライス試料中に含まれる塩化物イオン量を分析し、グラフ化する。



『非破壊試験を用いた土木コンクリート構造物の健全度診断マニュアル』より

【②現時点での塩害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）

構造物の外観上のグレード (劣化過程)	劣化の状態
状態Ⅰ-1(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
状態Ⅰ-2(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
状態Ⅱ-1(加速期前期)	腐食ひび割れが発生。錆汁が見られる。
状態Ⅱ-2(加速期後期)	腐食ひび割れが多数発生。錆汁が見られる。部分的なはく離・はく落が見られる。腐食量の増大。
状態Ⅲ(劣化期)	腐食ひび割れが多数発生。ひび割れ幅が大きい。錆汁が見られる。はく離・はく落が見られる。変位・たわみが大きい。

・鉄筋腐食度調査（はつりによる目視調査）



【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）

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

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)。

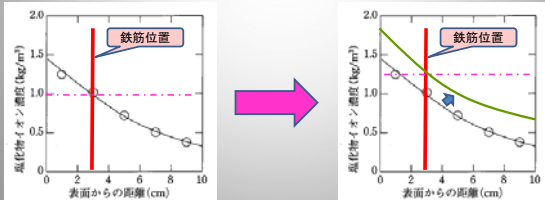
C_0 ：コンクリート表面における塩化物イオン濃度 (kg/m³)。

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)

$\operatorname{erf}()$ ：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



【参考：コンクリート中の塩化物イオン濃度分布簡易分析シート】

『独立行政法人 土木研究所 HPより』

コンクリート中の塩化物イオン濃度分布 簡易分析シート

試料採取位置 (mm)	塩化物イオン濃度実測値 (kg/m ³)	深さ (mm)	深さ (cm)	深さ (mm) 別の塩化物イオン濃度 (kg/m ³)	
				実測値	計算値
データ1	0	20	2	0.194	0.020
データ2	20	40	4	0.327	0.050
データ3	40	60	6	0.459	0.080
データ4	60	80	8	0.585	0.110
データ5	80	100	10	0.712	0.140
データ6					
データ7					
データ8					
データ9					
データ10					

断面の平均：0.049

計算値と実測値の比較

2.3 塩害補修工法

【塩害補修工法の種類と要求性能】

- ①塩化物イオンのコンクリート中への侵入を低減する（劣化因子の遮断）
 - 【表面被覆工法】
 - 【表面含浸工法】
 - 【ひび割れ注入工法】+亜硝酸リチウム
- ②既にコンクリート中に浸入した塩化物イオンを除去する（劣化因子の除去）
 - 【断面修復工法】+亜硝酸リチウム
 - 【脱塩工法】
- ③腐食が開始した鉄筋の腐食進行を抑制する（鉄筋腐食の抑制）
 - 【電気防食工法】
 - 【亜硝酸リチウムの内部圧入工法】

亜硝酸リチウムとは

- ・リチウム系化合物のコンクリート補修材料
- ・原材料は「ナフサ」、「リシア輝石」
- ・外観は青色または黄色の透明水溶液



[Lithium Nitrite ; LiNO₂]

亜硝酸イオン NO₂⁻

不動態被膜の再生により鉄筋腐食を抑制する

『塩害対策』

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』

亜硝酸リチウムによる鉄筋腐食抑制効果

- 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**鉄筋腐食を抑制**すること
- 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

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

①塩化物イオンのコンクリート中への侵入を低減する

【表面被覆工】

- 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
- 無機系被覆材+亜硝酸リチウムの組合せにより鉄筋防錆効果を付与

①下地処理 (高圧水洗ケレン)

②浸透型無機系鉄筋リチウム40%水溶液 0.3 kg/m²

③亜硝酸リチウム含有ペースト 4 kg/m²

④アクリル系エマルジョン塗料 0.25 kg/m²

①塩化物イオンのコンクリート中への侵入を低減する

【表面含浸工】

- 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 : シラン系撥水材など
- ぜい弱部の強化 : ケイ酸ナトリウム系など

①塩化物イオンのコンクリート中への侵入を低減する

【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(**塩化物イオン、水分、酸素**)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
- セメント系注入材+**亜硝酸リチウム**の組合せにより、鉄筋防錆効果を付与

②既にコンクリート中に侵入した塩化物イオンを除去する

【断面修復工法】

- コンクリート中の塩化物イオン量が腐食発生限界を超えている
- 鉄筋腐食が開始しており、コンクリートがはく離している
- 塩化物イオンを含むコンクリートをはつきり取り、断面欠損部分を断面修復する
- 母材との附着性のよいポリマーセメントモルタルが用いられる
- 左官工法、モルタル注入工法(プレバッド工法)、吹付け工法

②既にコンクリート中に侵入した塩化物イオンを除去する

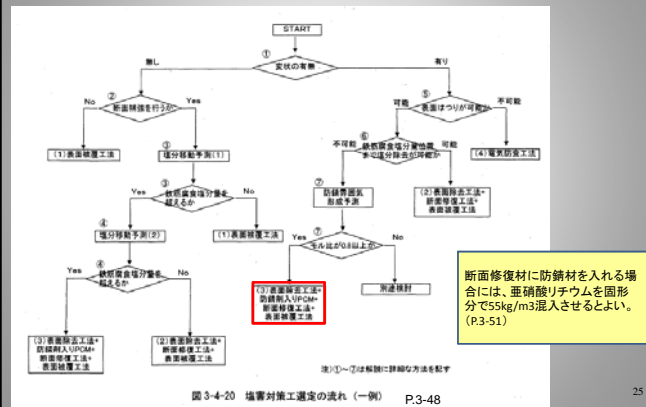
【断面修復工法】

左官工法 吹付け工法(乾式)

- はつきり範囲は鉄筋背面側が露出するまでとするが、実際は困難な場合が多い
⇒ コンクリート内部に除去しきれない塩化物イオンが残る
- 断面修復部の境界部において**マクロセル腐食**が懸念される
- ポリマーセメントモルタルに**亜硝酸リチウム**を混入することにより、マクロセル腐食を低減させることも可能

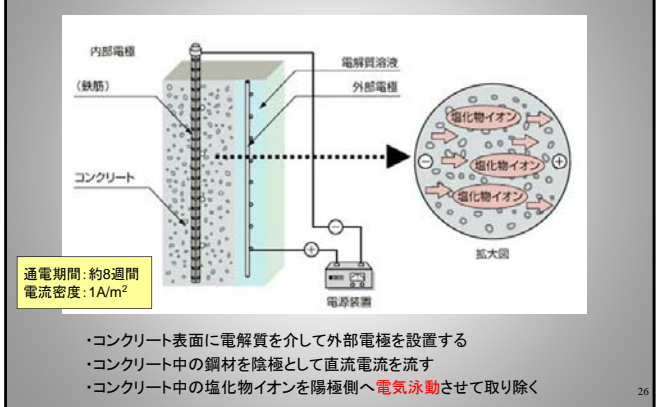
②既にコンクリート中に侵入した塩化物イオンを除去する

【断面修復工法】『NEXCO 設計要領 第二集 橋梁保全編』の記載内容



②既にコンクリート中に侵入した塩化物イオンを除去する

【脱塩工法】



②既にコンクリート中に侵入した塩化物イオンを除去する

【脱塩工法】



外部電極の設置

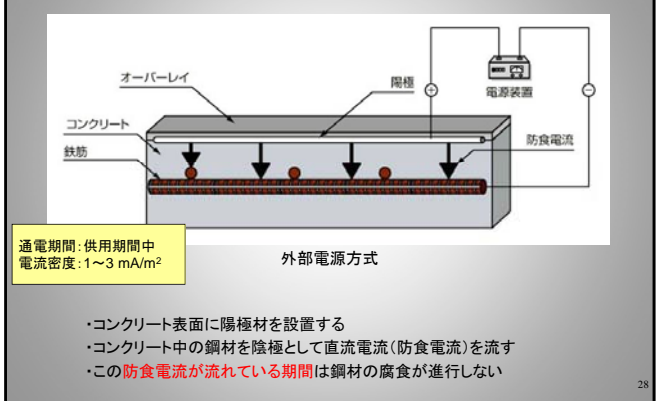


通電時の状況

- ・コンクリートをはつことなく、塩化物イオンのみ除去できる
- ・かぶりコンクリートが比較的健全な場合に効果的
- ・施工後は新たな塩化物イオンの浸入防止を目的として表面保護工を施す
- ・PC構造物に適用する場合には、PC鋼材の水素脆化が生じないよう配慮が必要

③腐食が開始した鉄筋の腐食進行を抑制する

【電気防食工法 - 外部電源方式】



③腐食が開始した鉄筋の腐食進行を抑制する

【電気防食工法 - 外部電源方式】



線状陽極材の設置例



面状陽極材の設置例

- ・供用期間中、防食電流を供給し続ける必要がある
- ・適用後には配電設備等の定期的なメンテナンスが必要
- ・PC構造物に適用する場合には、PC鋼材の水素脆化が生じないよう配慮が必要

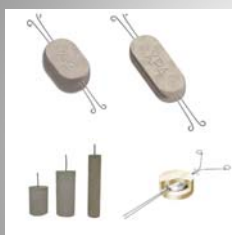
③腐食が開始した鉄筋の腐食進行を抑制する

【電気防食工法 - 流電陽極(犠牲陽極)方式】



③腐食が開始した鉄筋の腐食進行を抑制する

【電気防食工法 — 流電陽極(犠牲陽極)方式】



犠牲陽極材



犠牲陽極材の設置状況

出典: 犠牲陽極材「ガルバニール工法」(NETIS)

・断面修復工法のマクロセル腐食対策としても活用される

③腐食が開始した鉄筋の腐食進行を抑制する

【亜硝酸リチウムによる鉄筋防錆】



・亜硝酸リチウムには鉄筋防錆効果がある

【使用方法】

- ・ひび割れ注入材と併用する
- ・表面被覆材に混入する
- ・断面修復材に混入する
- ・内部圧入する



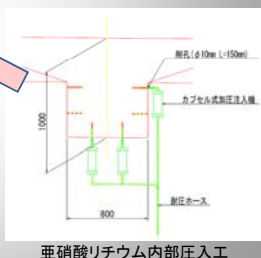
・各補修工法の本来の目的(劣化因子の遮断, 除去)に加え, 亜硝酸リチウムによる鉄筋防錆効果を付与することができる

③腐食が開始した鉄筋の腐食進行を抑制する

【亜硝酸リチウムによる鉄筋防錆】・・・内部圧入工法



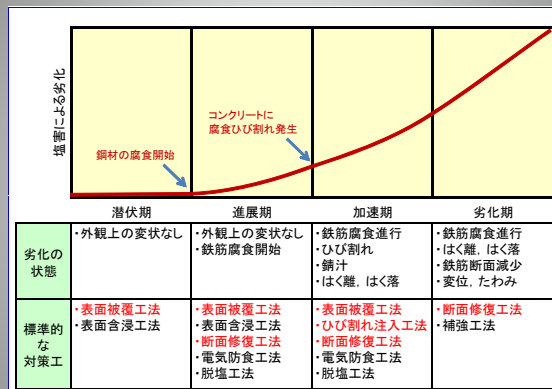
『鉄筋腐食を抑制したいが、電気防食まではやりたくない』という場面で活用できる。



亜硝酸リチウム内部圧入工

- ・コンクリートに削孔(φ10mm, L=150mm)
- ・そこから亜硝酸リチウムを内部圧入
- ・鉄筋周囲に亜硝酸イオンが浸透
- ・鉄筋防錆効果を発揮

【塩害の劣化グレードと適用可能な補修工法との関係】



赤字は亜硝酸リチウムを使用可能な工法を示す

【塩害対策の基本的な考え方】

- ①鉄筋位置の塩化物イオン濃度が腐食発生限界濃度を超過しているか?
 - ・腐食発生限界濃度未満の場合 ⇒ 『劣化因子(塩化物イオン)の遮断』
 - ・腐食発生限界濃度に達していても, 鉄筋腐食が進行していない場合 ⇒ 『劣化因子(水分, 酸素)の遮断』
 - ⇒ 『劣化因子の除去』

塩化物イオンが限界濃度を超過, 鉄筋腐食も進行した状態

- ②鉄筋腐食はどの程度進行しているか?
 - ・コンクリートにひび割れ, 錆汁, はく離・はく落が生じている場合 ⇒ 『鉄筋腐食の抑制』

- ③今後も著しい劣化因子の侵入が想定される環境か?
 - ・劣化程度と劣化環境条件に応じて対策工法の要求性能を組み合わせる ⇒ 『鉄筋腐食の抑制』
 - ⇒ 『鉄筋腐食の抑制』+『劣化因子の遮断』
 - ⇒ 『鉄筋腐食の抑制』+『劣化因子の除去』

主たる要求性能が『鉄筋腐食の抑制』の場合

適用できる対策工	概要
【断面修復工法】	・劣化しているコンクリート表面をはつりとり, 亜硝酸リチウムを含むポリマーセメントモルタルにて断面を修復する。 ・鉄筋周囲に十分な亜硝酸イオン量を供給することができるため, 以後の鉄筋腐食進行を抑制することができる。
【ひび割れ注入工法】	・無機系注入材と亜硝酸リチウムを併用してひび割れを閉塞する。 ・ひび割れを通じた劣化因子の侵入を遮断する効果に加え, 将来的にはひび割れ近傍のコンクリートに亜硝酸イオンが浸透し, 鉄筋の腐食を抑制する。
【内部圧入工法】	・コンクリートに削孔し, 鉄筋周囲のコンクリートに亜硝酸リチウムを加圧注入することで, 鉄筋腐食を抑制する。 ・鉄筋腐食が進行しているもの, かぶりコンクリートが比較的健全であるような場合において適用性が高いと考えられる。
【電気防食工法】	・コンクリート表面に設置した陽極材からコンクリート内部の鉄筋へ直流通電を流すことによって, 以後の鉄筋腐食反応を停止させる。 ・供用期間中は電流を流し続ける必要がある。

2.4 塩害対策の事例

採用された工法：『断面修復工法 + 表面被覆工法』
(亜硝酸リチウムを併用する)

【対象構造物】

・臨海地域にあるRC上部工

【塩害による劣化状況】

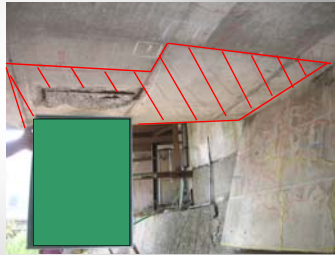
・コンクリートはく離、鉄筋露出
・コンクリート浮き(斜線部)

【塩害の抑制方針】

・鉄筋腐食の抑制
・劣化因子(Cl⁻)の除去、遮断

【補修工法の選定】

(1) 断面修復工
+
(2) 表面被覆工



①着工前(劣化状況)

37

(1) 断面修復工

【使用機材】

・ハンドハンマ



②コンクリートはつり

コンクリート表面をたたき点検し、浮きのある箇所をはつり落とす



③はつり完了

(鉄筋露出部以外でも鉄筋腐食は進んでいる)

38

(1) 断面修復工

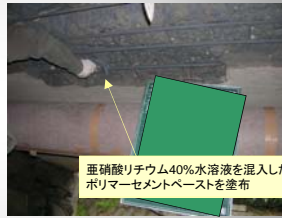
【使用材料】

・ポリマーセメントモルタル系断面修復材
・亜硝酸リチウム40%水溶液



④鉄筋ケレン

腐食した鉄筋の表面をケレンし、入念に錆を落とす



⑤防錆材塗布

亜硝酸リチウム40%水溶液を混入したポリマーセメントペーストを鉄筋表面に塗布する

39

(1) 断面修復工

【使用材料】

・ポリマーセメントモルタル系断面修復材
・亜硝酸リチウム40%水溶液

亜硝酸リチウム40%水溶液を混入したポリマーセメントモルタルをコテ塗り



⑥断面修復

亜硝酸リチウム40%水溶液を混入したポリマーセメントモルタルを左官工法にて断面修復する



⑦断面修復工完了

鉄筋周囲は亜硝酸リチウムを含有した防錆材およびポリマーセメントモルタルで覆われている

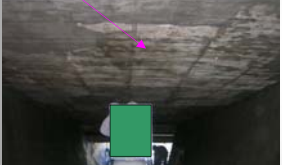
40

(2) 表面被覆工

【使用材料】

・ポリマーセメントモルタル系表面被覆材
・亜硝酸リチウム40%水溶液

亜硝酸リチウム40%水溶液を含浸塗布



⑧亜硝酸リチウム塗布含浸

亜硝酸リチウム40%水溶液をコンクリート表面に塗布し、含浸させる



⑨亜硝酸リチウム含有ポリマーセメントモルタル塗布

ポリマーセメントモルタル系表面被覆材に亜硝酸リチウム40%水溶液を混入し、コンクリート表面に塗布する

41

(2) 表面被覆工

【使用材料】

・ポリマーセメントモルタル系表面被覆材
・亜硝酸リチウム40%水溶液



⑩上塗り

アクリルゴム、アクリルウレタン系塗装材などを用いてポリマーセメントモルタル層を保護する



⑪施工完了

外部からの劣化因子を遮断するとともに、亜硝酸リチウムによる鉄筋防錆効果が付与されている

42

期待される塩害抑制効果

- ・断面修復工により、既に浸入した塩化物イオンを除去
- ・表面被覆工により、今後の塩化物イオンの浸入を抑制
 - ⇒ 塩化物イオンによる鉄筋腐食環境を改善
- ・補修材料中の亜硝酸イオンがコンクリート中に拡散し、鉄筋を防錆
 - ⇒ 亜硝酸イオンが鉄筋の不動態被膜を再生し、鉄筋腐食を抑制

塩化物イオンの遮断に加え、既に腐食している鉄筋の不動態被膜を再生し、以後の鉄筋腐食を抑制する

43

2.5 追跡調査

【事例①】塩害劣化した海洋構造物を、以下の2種類の工法で補修し、その効果を比較した。
 「樹脂系被覆材」
 「亜硝酸リチウム含有ポリマーセメントモルタル」
 補修後10年経過した時点で実施した追跡調査の結果を以下に示す。

【樹脂系表面被覆材による補修箇所】

鉄筋に沿ってひび割れが発生し、錆汁が多量に析出している
鉄筋腐食の進行を抑えられず、再劣化

【亜硝酸リチウム含有PCMIによる補修箇所】

補修後10年経過しても、コンクリートの健全性が保たれている
鉄筋腐食の進行を抑制している

44

【事例②】沖縄県の海洋構造物にて実施した長期暴露実験

- ・柱部材の一部に「亜硝酸リチウム含有ポリマーセメントモルタル」を塗布し、鉄筋防錆効果を調査した。
- ・暴露期間15年における検証結果を以下に示す。

- ・無処理の範囲の鉄筋は塩害により著しく腐食しており、断面欠損も認められた
- ・亜硝酸リチウムを用いた表面被覆を実施した範囲の鉄筋は表面錆程度

45

- ・亜硝酸リチウム含有ポリマーセメントモルタルを塗布した範囲からコアを採取して、深さ方向の亜硝酸イオン濃度分布を調べた
- ・深さ90mmの範囲まで亜硝酸イオンが浸透していた。
- ・その結果、その範囲には鉄筋腐食が見られなかったものと考えられる。

図4 コンクリート中の可溶性亜硝酸イオン量

46

3. ASRで劣化したコンクリート構造物への対応

47

3.1 ASRとは

原因

- ・コンクリート中は高アルカリ環境 (pH=12以上) 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
- ・コンクリートの粗骨材として、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

48

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	$n\text{SiO}_2 + 2\text{NaOH} \rightarrow \text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ <p>(シリカ酸物) (アルカリ) (アルカリシリカゲル)</p>	$\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2 + m\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2 \cdot m\text{H}_2\text{O}$ <p>(アルカリシリカゲル) (水) (載水膨張!)</p>

49

ASRによる劣化事例

擁壁のASR劣化

- 亀甲状のひび割れ
- 表面からは雨水、背面からは地下水が供給

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継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

50

橋脚のASR劣化

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

51

橋脚のASR劣化

- 亀甲状のひび割れ、白色ゲル析出
- 上縁または下縁に沿った幅の大きなひび割れ箇所は鉄筋破断の可能性

【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

亀裂

52

PC桁下面のひび割れ

- RC、PC上部工でもASR劣化
- 軸方向鉄筋やPC鋼材に沿った、方向性のあるひび割れ

橋脚はり部のひび割れ

- 同一の構造物内でも、部位や位置によってASR劣化程度が大きく異なることがある

53

ASRによる再劣化事例

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
- 水分浸入を完全に遮断することが困難

橋脚はり部の再劣化事例

- 橋脚はり部には、伸縮継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

54

3.2 調査・診断

ASR劣化が疑われる構造物に対して

【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ASR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（ASR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。）

55

【①劣化要因はASRなのか？】

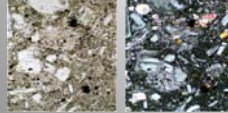
- ・外観目視調査
ひび割れパターン、白色ゲル析出など



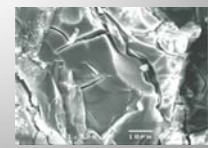
- ・コア観察
ASRゲル、反応リム、骨材の割れ



- ・岩種判定
有害鉱物を含む岩種が認められた場合、ASRを生じる可能性が高い。
偏光顕微鏡⇒火山ガラス、微小石英、オパール など
X線回折 ⇒クリスタライト、トリジマイト、スメクタイト など



- ・アルカリシリカゲルの観察
化学分析⇒生成している白色ゲルの成分に、SiO2が30%以上含まれる場合、その白色ゲルはASRゲルである
SEM観察⇒ASRゲルの特定

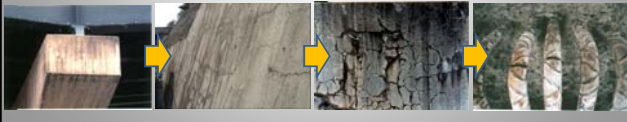


56

【②現時点でのASR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）

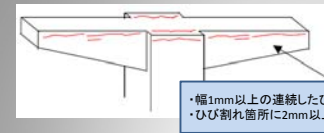
構造物の外観上のグレード (劣化過程)	ASRによる構造物の外観上のグレードと劣化の状態
状態Ⅰ(潜伏期)	ASRによる膨張およびそれに伴うひび割れはまだ発生せず、外観上の変状が見られない。
状態Ⅱ(進展期)	水分とアルカリの供給下において膨張が継続的に進行し、ひび割れが発生し、変色、アルカリシリカゲルの滲出が見られる。しかし、鋼材腐食による錆汁は見られない。
状態Ⅲ(加速期)	ASRによる膨張速度が最大を示す段階で、ひび割れが進展し、ひび割れの幅および密度が増大する。また、鋼材腐食による錆汁が見られる場合もある。
状態Ⅳ(劣化期)	ひび割れの幅および密度がさらに増大し、段差、ずれや、かぶりの部分的なはく離・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。



57

【②現時点でのASR劣化程度はどれくらいか？】

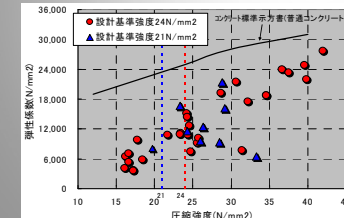
- ・外観目視調査（鉄筋破断の可能性）



鉄筋破断の可能性がある場合には、補強も視野に入れた検討が必要。

- ・はつり調査
- ・非破壊試験による診断

- ・圧縮強度、静弾性係数（ASRにより著しく低下）



【コアの採取箇所の目安】

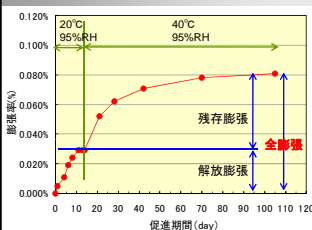
- ・変状が顕著な部位付近
- ・ひび割れを避けた位置
- ・鉄筋かぶりより内部を整形

58

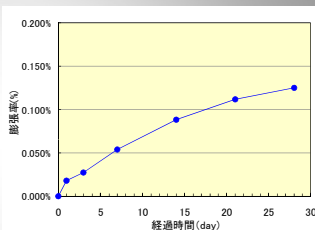
【③将来的なASRの劣化予測】

- ・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カ月
- ・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

59

3.3 ASR補修工法

124

アルカリ骨材反応対策小委員会報告書

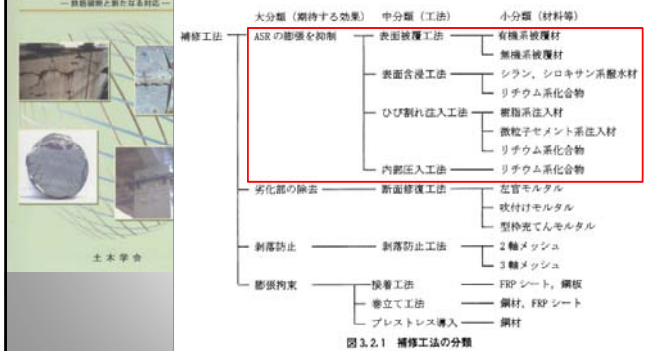


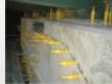
図 3.2.1 補修工法の分類

「アルカリ骨材反応対策小委員会報告書」平成17年8月より

60

【ASR膨張を抑制する工法】

- (1) 表面被覆工法 …水分浸入を抑制
有機系被覆材
無機系被覆材+亜硝酸リチウム
- (2) 表面含浸工法 …水分浸入を抑制
シラン系撥水材 (内部からの水分逸散)
表面改質剤 (コンクリート表面部の緻密化)
- (3) ひび割れ注入工法 …水分浸入を抑制
樹脂系注入材 (ひび割れ追従性)
超微粒子セメント系注入材+亜硝酸リチウム
- (4) 内部圧入工法 …ASRゲルを非膨張化
亜硝酸リチウム



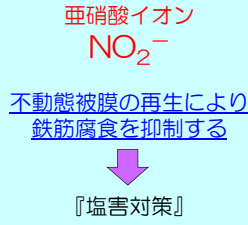
61

亜硝酸リチウムとは

- ・リチウム系化合物のコンクリート補修材料
- ・原材料は「ナフサ」、「ロシア輝石」
- ・外観は青色または黄色の透明水溶液



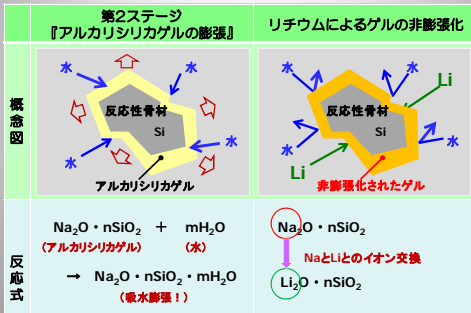
[Lithium Nitrite ; $LiNO_2$]



62

亜硝酸リチウムによるASR抑制効果

- ・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



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

63

(1) 表面被覆工

【基本性能 : 外部からの水分浸入を抑制】



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

- ・有機系被覆材 : 伸び能力の高い柔軟型の材料にてひび割れ追従性を付与
- ・無機系被覆材 : 亜硝酸リチウムとの組合せにてゲルの非膨張化を付与

●水環境条件によっては補修効果が不十分となる場合があるので注意が必要。

64

(2) 表面含浸工

【基本性能 : 外部からの水分浸入を抑制】

- ① 撥水材 (シラン系、シラン・シロキサン系など)
・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、内部からの水分逸散は阻害しない。
- ② 表面改質剤 (ケイ酸系など)
・コンクリート表面にケイ酸ナトリウムなどの改質剤を塗布することにより、表層部の組織を緻密化し、防水性を向上させる。
- ③ 亜硝酸リチウム含浸
・コンクリート表面に亜硝酸リチウムを塗布することにより、表層部のゲルを非膨張化する。



表面含浸工 (シラン系)

- いずれも、表面に膜を形成しないため、以後のモニタリングが容易
- 劣化グレードが比較的軽微な段階で適用すると特に効果が高い

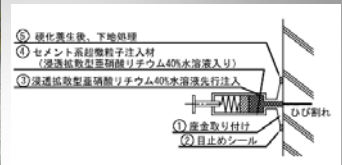
65

(3) ひび割れ注入工

【基本性能 : 外部からの水分浸入を抑制】



自動低圧注入器 (スプリング圧タイプ)



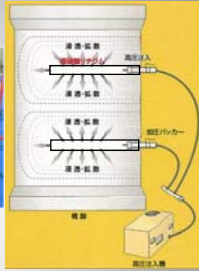
ひび割れ注入工の概念図

- ・ASRによって生じたひび割れを、ひび割れ注入材にて充填・閉塞する
- ・ひび割れを通じた劣化因子 (水分) の侵入を遮断する
- ・ASR対策の場合、基本的にひび割れ注入工単独では適用されず、表面被覆工や表面含浸工などとの組み合わせで施工される。

- ・樹脂系注入材 : 伸び能力の高い材料にてひび割れ追従性を付与
- ・超微粒子セメント系材 : 亜硝酸リチウムとの組合せにてゲルの非膨張化を付与

66

(4) リチウムイオン内部圧入工 【基本性能：ゲルの非膨張化】



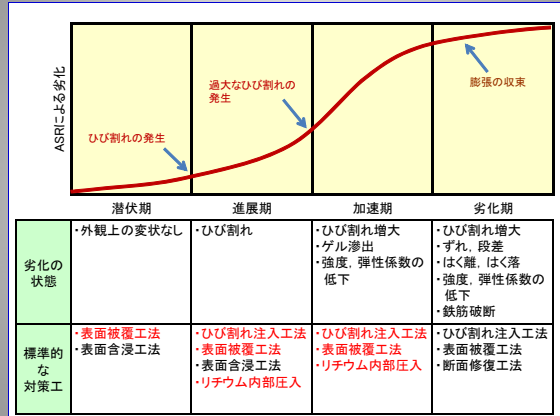
リチウムイオン内部圧入工施工状況

- ・コンクリートに小径の削孔を行って**亜硝酸リチウムを加圧注入**し、コンクリート全体のASRゲルにリチウムイオンを供給する
- ・リチウムイオンが**ASRゲルを非膨張化**するため、以後のASR膨張は抑制される
- ・施工規模に応じて圧入装置を選択することができる

●補修効果が水分の有無に左右されないため、再劣化リスクが低い

67

【ASRの劣化グレードと適用可能な補修工法との関係】



赤字は亜硝酸リチウムを使用可能な工法を示す

68

【ASR対策の基本的な考え方】

対策工法選定の着目点 (ASRの場合)

- ASRの膨張性**
 - ・残存膨張量試験により、今後も有害な膨張が進行するか否かを推定する
 - ・過去の**定期的なひび割れ調査結果**などから、ASRの進行性や進行速度を推定する
 - 構造物の立地・環境条件等**
 - ・水分遮断によるASR抑制効果が期待できる**環境**か否か？
 - ・構造物への**アプローチ**は容易か否か？
 - 構造物の予定供用年数**
 - ・補修した後の**予定供用年数**は？
- 設計者の判断
 ...対象構造物にはどのような対策工が適用可能か？(工学的判断)
 ●オーナーの判断
 ...対象構造物をどのように維持管理していくのか？(維持管理シナリオ)

69

ASR膨張性が十分に小さい場合

- ・ゲルの**膨張性は既に収束**していると考えられ、以後の有害な膨張進行は想定しなくてもよい
- ・ということは、**現時点で発生している変状**さえ対処すればよい
- ・対策後に多少の水分が供給されても**再劣化のリスクは低い**

- ・ただし、一般的には「**膨張の収束＝劣化期**」
- ・劣化期では**著しい強度低下や鉄筋破断**が生じている可能性も⇒**補強**も

適用できる対策工	概要
【ひび割れ注入工法】	・発生している ひび割れを閉塞 する。 ・膨張進行を考慮する必要がないので、使用材料に「ひび割れ追従性」「ゲルの非膨張化」などは要求されない。
【表面被覆工法】	・外部からの 水分を遮断 するとともに、 美観を向上 させる。 ・膨張進行を考慮する必要がないので、使用材料に「ひび割れ追従性」「ゲルの非膨張化」などは要求されない。
【断面修復工法】	・劣化しているコンクリート 表面をはつりとり 、コンクリートやポリマーセメントモルタルにて修復する。 ・護岸コンクリートや重力式擁壁など、主に荷重を受け持たないコンクリートのASR対策として適用されることが多い。

70

ASR膨張性が大きい場合

- ・今後も**有害な膨張が進行**することを前提とした工法選定が必要
- ・従来のひび割れ注入工法や表面被覆工法のような対処療法的な補修工法では**早期に再劣化**することを認識しておく必要がある

適用できる対策工	概要
【ひび割れ注入工法】	・発生している ひび割れを閉塞 して、ASR進行の低減を図る。 ・ セメント系注入材 と 亜硝酸リチウム を注入する場合、ひび割れ近傍のゲルを非膨張化することができる。 ・ 伸び能力の高い樹脂系注入材 を注入する場合、ひび割れ追従性を付与することができる。
【表面被覆工法】 【表面含浸工法】	・外部からの 水分を遮断 して、ASR進行の低減を図る。 ・ 無機系被覆材 と 亜硝酸リチウム にて被覆する場合、表層部のゲルを非膨張化することができる。 ・ 伸び能力の高い有機系柔軟型被覆材 を用いる場合、ひび割れ追従性を付与することができる。 ・ 撥水系含浸材 を用いる場合、内部からの水分逸散効果を付与することができる。
【リチウムイオン内部圧入工法】	・コンクリートに 亜硝酸リチウムを加圧注入 することで コンクリート全体 にリチウムを供給する。コンクリート全体のゲルが非膨張化されるため、 以後のASR膨張は根本的に抑制 される。 ・対策後はたとえ水分の供給があってもASR膨張が進行しないので、再劣化のリスクが低い。

71

3.4 ASR対策の事例

事例①：『リチウムイオン内部圧入工法(油圧式)』

【対象構造物】

・橋台

【ASRによる劣化状況】

- ・亀甲状ひび割れ発生
- ・最大ひび割れ幅：6.0mm
- ・残存膨張量：0.15% (カナダ法)

【ASRの抑制方針】

- ・アルカリシリカゲルの非膨張化

【補修工法の選定】

- ・リチウムイオン内部圧入工



①着工前(劣化状況)

72

リチウムイオン内部圧入工

【使用材料】
 ・超微粒子セメント系注入材
 ・ポリマーセメントモルタル

②表面漏出防止(ひび割れ注入)

コンクリート表面からの漏出防止として、ひび割れ注入工を実施する(幅0.2mm以上)

③表面漏出防止(表面シール)

同様に、幅0.2mm未満のひび割れやジャンカ等に対し、表面シールを行う

73

リチウムイオン内部圧入工

【使用機材】
 ・鉄筋探査機
 ・ダイヤモンドコアドリル

④鉄筋探査工

圧入孔の削孔時に鉄筋を損傷させることのないよう、鉄筋探査を行う

⑤圧入孔削孔

圧入孔として、φ20mmのコア削孔を行う。削孔ピッチは500~1000mm間隔程度。

74

リチウムイオン内部圧入工

【使用機材】
 ・油圧式圧入装置

⑥圧入装置の設置

圧入孔に加圧バッカー、耐圧ホースをつなぎ、圧入装置まで配管する

⑦試験加圧注入工

全孔を1孔ずつ試験的に加圧注入する背面への漏出など不適切な孔を検出する各孔の圧入速度を測定する

75

リチウムイオン内部圧入工

【使用材料】
 ・浸透拡散型亜硝酸リチウム
 ・無収縮グラウト材

⑧本加圧注入工

所定量の浸透拡散型亜硝酸リチウムを加圧注入する

⑨圧入孔充填工

圧入完了後、配管を撤去し、無収縮グラウト材にて圧入孔を充填する

76

リチウムイオン内部圧入工

【使用材料】
 ・シラン系表面含浸材

⑩表面仕上げ(必要に応じて)

本橋台ではシラン系表面含浸材を塗布した

⑪施工完了

リチウムイオン内部圧入工により、コンクリートのASR膨張性が抑制された状態となっている

77

期待されるASR抑制効果

・圧入されたリチウムイオンがコンクリート内部にまで浸透し、ゲルを非膨張化
 ⇒ コンクリート内にあるゲルは非膨張化され、ASRの進行が抑制される

コンクリートに削孔し、亜硝酸リチウムを加圧注入することで、表層部だけでなく、内部のASR膨張を根本的に抑制

ゲルの膨張性を消失させるため、以後の水分供給があっても再劣化しない

劣化進行がはやい構造物や、再劣化を許容しない構造物、水分遮断が困難な構造物などに対する適用が効果的

浸透拡散型亜硝酸リチウムを使用することで、補修効果の信頼度がUP!!

※ASRリチウム工法の詳細については、ASRリチウム工法HP (<http://www.asrli.jp/>) もご参照ください。

78

事例②：『ひび割れ注入工+表面被覆工』

【対象構造物】
・擁壁

【ASRによる劣化状況】
・亀甲状ひび割れ発生
・最大ひび割れ幅:3.0mm

【ASRの抑制方針】
・外部からの水分供給の遮断
・アルカリシリカゲルの非膨張化

【補修工法の選定】
(1)ひび割れ注入工
+
(2)表面被覆工



①着工前(劣化状況)

79

(1)ひび割れ注入工

【使用材料】
・超微粒子セメント系ひび割れ注入材
・浸透拡散型亜硝酸リチウム



②下地処理(高压洗浄)
コンクリート表面を高压洗浄する




③自動低圧注入器の設置
自動低圧注入器を250mm間隔で設置し、注入器の間のひび割れをシールする


80

(1)ひび割れ注入工

【使用材料】
・超微粒子セメント系ひび割れ注入材
・浸透拡散型亜硝酸リチウム



④先行注入(亜硝酸リチウム水溶液)
浸透拡散型亜硝酸リチウムを先行注入し、ひび割れ面をプレウエッティングする



⑤本注入(超微粒子セメント系注入材)
先行注入の後、超微粒子セメント系ひび割れ注入材をひび割れに本注入する

81

(1)ひび割れ注入工

【使用機材】
・ディスクサンダー



⑥注入器撤去
注入器を撤去し、ディスクサンダーにて表面を平滑に仕上げる

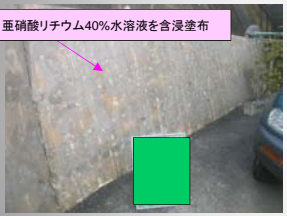


⑦ひび割れ注入工完了
ひび割れからの水分浸入を遮断、ひび割れ周辺のゲルを非膨張化


82

(2)表面被覆工

【使用材料】
・ポリマーセメントモルタル系表面被覆材
・亜硝酸リチウム40%水溶液



⑧亜硝酸リチウム塗布
亜硝酸リチウム40%水溶液をコンクリート表面に塗布し、含浸させる




⑨亜硝酸リチウム含有ポリマーセメントモルタル塗布
ポリマーセメントモルタル系表面被覆材に亜硝酸リチウム40%水溶液を混入し、コンクリート表面に塗布する


83

(2)表面被覆工

【使用材料】
・ポリマーセメントモルタル系表面被覆材
・亜硝酸リチウム40%水溶液



⑩上塗り
アクリルウレタン系塗装材や高分子系浸透性防水材料などを用いて表面保護



⑪施工完了
表面からの水分浸入を遮断、コンクリート表層部のゲルを非膨張化

84

期待されるASR抑制効果

- ひび割れ注入工および表面被覆工により、外部からの水分供給を遮断
⇒ ゲルの吸水膨張反応が抑制され、ASRの進行が抑制される
- 補修材料中のリチウムイオンがコンクリート中に拡散し、ゲルを非膨張化
⇒ コンクリート表面近くにあるゲルは非膨張化され、ASRの進行が抑制される

水分の遮断に加え、ASRが既に進行しているコンクリート表層部のゲルを非膨張化する
まだ劣化がそれほど進行していない進展期や加速期前期での適用が効果的
(ただし、コンクリート内部の膨張ポテンシャルは「眠れる獅子」)

亜硝酸リチウムの浸透範囲について

【リチウムイオン内部圧入工の場合】

亜硝酸リチウムの浸透範囲 (ASR膨張抑制範囲) はコンクリート全体におよぶ。

- リチウムの浸透範囲が広い
⇒ ASR抑制効果の期待度が高い
- ASR膨張性の大きい場合の対策として最も適する

【ひび割れ注入・表面被覆工の場合】

亜硝酸リチウムの浸透範囲 (ASR膨張抑制範囲) はコンクリート表層部のみ。

- リチウムの浸透範囲が表層に限られる
⇒ 将来的には再劣化する可能性
- 再劣化が顕在化するまでのスパンを延長し、再補修回数を低減

【浸透拡散型亜硝酸リチウム】

- 塩害、中性化、ASRによって劣化したコンクリートの補修対策に亜硝酸リチウムを使用する場合、コンクリート中の**亜硝酸リチウムの浸透範囲の大小**がそのまま**補修効果**に直結する
- できるだけコンクリート中の**浸透性能の高い**亜硝酸リチウム製品が望ましい
- 浸透拡散型亜硝酸リチウム【プロコン40】(NETIS登録技術)

浸透拡散型亜硝酸リチウム【プロコン40】
NETIS登録番号：CG-100022-A

【亜硝酸リチウムの浸透性能確認試験結果】

- プロコン40と従来品の亜硝酸リチウム2種類を用いて**浸透性能確認試験**を実施 (『JSCE-K571-2004「表面含浸材の試験方法(案)」6.3透水量試験』に準拠)
- 一定水圧作用下において、コンクリート中への浸透性能は浸透拡散型のほうが従来品よりも**25%程度向上**
- この試験は亜硝酸イオンやリチウムイオンのイオン拡散性ではなく、**水溶液の状態でのコンクリート中の浸透**を測定したもの
- したがって、浸透拡散型亜硝酸リチウムが**内部圧入工**や**ひび割れ注入工**など、**圧力を作用させて使用する**場合の**施工において優位性を発揮**することを示す

時間 (h)	プロコン40 (mm)	製品1 (mm)	製品2 (mm)
0	0.0	0.0	0.0
50	2.5	1.5	1.0
100	4.0	2.5	1.8
150	5.5	4.0	2.8

3.5 追跡調査

名称	K高架橋橋脚	S橋橋台	A施設内擁壁
施工状況			
概要	広島県 (2004年施工) ・亜硝酸リチウム圧入量 24.8kg/m ³ ・反応性骨材 砂岩(詳細不明) ・圧入後の経過年数 5年	香川県 (2005年施工) ・亜硝酸リチウム圧入量 19.7kg/m ³ ・反応性骨材 安山岩(詳細不明) ・圧入後の経過年数 4年	岡山県 (2005年施工) ・亜硝酸リチウム圧入量 23.5kg/m ³ ・反応性骨材 古銅輝石安山岩 ・圧入後の経過年数 4年
検討項目	外観変状調査 (ASR再劣化の有無)	外観変状調査 (ASR再劣化の有無)	残存膨張量 (JCI-DD2法) (施工前、施工直後および施工後4年経過時)

【外観目視調査によるASR再劣化の有無：K高架橋の場合】

施工前(2004年5月撮影)

【施工後7年経過(2011年4月撮影)】

K高架橋橋脚 施工前状況と施工後7年経過時の状況

【外観目視調査によるASR再劣化の有無：S橋の場合】

【施工前(2005年9月撮影)】



【施工後6年経過(2011年4月撮影)】



S橋橋台 施工前状況と施工後6年経過時の状況

【外観目視調査によるASR再劣化の有無：S橋の場合】



ひび割れ注入跡の状況

ひび割れ注入跡の状況

- ・超微粒子セメント系ひび割れ注入材を注入した痕跡
- ・ひび割れ追従性をもたない材料であるが、この周辺に再劣化は認められない

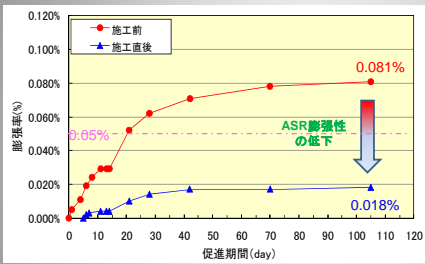


施工境界付近の状況

施工境界付近の状況

- ・未施工部分には幅0.2mm程度のひび割れがみられる
- ・施工済部分には新たなひび割れの発生は認められない

【施工前と施工直後での残存膨張量の比較】



A施設内擁壁

残存膨張量試験 (JCI-DD2法)

施工前の膨張量：0.081%

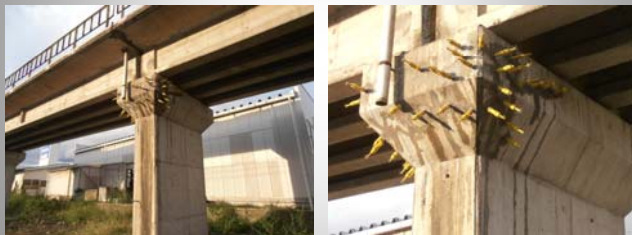
施工直後の膨張量：0.018% (圧入完了後7日でコア採取)

⇒ リチウムイオンを内部圧入したことにより、将来的な膨張の可能性が低下

4. おわりに

【亜硝酸リチウムを用いた補修工法 東北地方での実績】

- 発注者：仙台臨海鉄道株式会社
- 施工者：東日本コンクリート株式会社
- 施工場所：宮城県多賀城市山王 地内～仙台市宮城野区港 地内
- 施工内容：ひび割れ注入工法 (亜硝酸リチウム+超微粒子セメント系注入材)
- 施工対象：RC上部工、橋脚、ボックスカルバート



- ・ひび割れがあれば劣化因子が浸入
- ・鉄筋腐食の懸念

- ・ひび割れ注入工により開口部を閉塞
- ・そのとき、亜硝酸リチウムを併用すれば、鉄筋防錆効果を付与できる

- ・あらゆる原因によるひび割れに対応可能



【公共投資額の縮小】
【土木技術者の減少】

しかし、【老朽化する構造物は増加】



少ない予算、少ない人数で多大な量の
構造物を維持管理していかなければ！

- ・既設構造物を少しでも長く延命化する。
- ・補修効果の耐久性を少しでも延ばし、
LCCのミニマム化を目指す。



それが、

『長寿命化修繕計画』の目指す方向性
すなわち、
維持管理業務に携わる技術者の使命！

97

本日のフォーラムが皆様の業務の
一助となれば幸いです

ご清聴ありがとうございました

END



Kazunori Era

98