

MATERIAL STAGE

巻頭

Chinaplas2019 (広州) 視察報告

特集

自動車室内で発生する VOC, においとその低減材料開発

建築・インフラ補修に求められる高分子材料とその開発例

水系樹脂の最新材料開発事例

連載

「レオロジー」超入門

～メカニズム, 測り方, データ解釈と工業的応用～ 第4回

10

2019◆Oct

コンクリート構造物の劣化と補修技術

江良 和徳 (一社) コンクリートメンテナンス協会 技術委員長

1 はじめに

戦前、戦後を通じて蓄積された膨大な量のコンクリート構造物は年月の経過とともに老朽化が進んでおり、「建設の時代」から「維持管理の時代」へ移行しつつある。さらに、コンクリート内部の鋼材腐食に起因する塩害や中性化、反応性骨材の吸水膨張反応に起因するアルカリシリカ反応など、主に化学的要因によって進行するコンクリートの劣化も深刻さを増している。このように老朽化または劣化により耐久性、耐荷性能が低下した膨大なコンクリート構造物を全て更新することは経済的に困難であり、適切な補修を行うことによって構造物の長寿命化、延命化を図ることが急務である。

そのような社会情勢を鑑み、本稿では特に塩害により劣化したコンクリート構造物を対象とし、劣化メカニズムを整理したうえで劣化機構に応じた補修の考え方について論じる。

2 塩害の劣化メカニズム

塩害とは、コンクリート中への塩化物イオン侵入に起因する鋼材腐食によってコンクリート構造物の性能が低下する劣化現象である¹⁾。一般に、コンクリート中の細孔はセメントの水和反応による飽和水酸化カルシウム水溶液で満たされており、飽和水酸化カルシウム水溶液のpH値が12～13であるためコンクリートは強アルカリ性を示す。このような高アルカリ環境の中にある鋼材表面には酸素が化学吸着して緻密な酸化層が生じることにより、厚さ数nm程度の不動態皮膜($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$)が形成される。その不動態皮膜によってコンクリート中の鉄筋は腐食から守られる(不動態化する)といわれている。しかし、

コンクリート中に許容濃度以上の塩化物イオン(Cl^-)が存在する場合、鋼材表面の不動態皮膜が破壊される。コンクリート中には十分な量の酸素と水が存在するため、不動態皮膜が破壊されると鋼材は酸化反応を起こし、腐食が開始する。コンクリート中への塩化物イオンの侵入経路としては、①沿岸部の海水飛沫や冬季間の凍結防止剤散布などによる塩化物の浸透(飛来塩分)、②海砂や塩化物含有混和剤の使用など、コンクリート材料に由来する塩化物(内在塩分)などが考えられる。そのような原因によりコンクリート中の塩化物イオン量が腐食発生限界濃度を越えた場合、不動態皮膜は破壊される。

不動態皮膜が破壊された後の鋼材腐食は電気化学的反応として図1のように表すことができる。アノード反応は電子2個を鋼材母材中に残して鉄がイオンとなって溶出する反応であり、そのアノード反応によって生じる電子を消費するのがカソード反応である。この2種類の反応が同時に起こるのが鋼材腐食反応であり、反応の進行に従い水酸化第一鉄、水酸化第二鉄、赤錆が生成される。鋼材が腐食すると腐食箇所の体積が2.5倍程度に膨張するため、その膨張圧によってコンクリートにひび割れが発生する。そのひび割れを通じて水分、酸素、塩化物イオンなどの劣化因子の侵入が容易になるため、さらに鋼材腐食が促進され、コンクリートはく離やはく落、

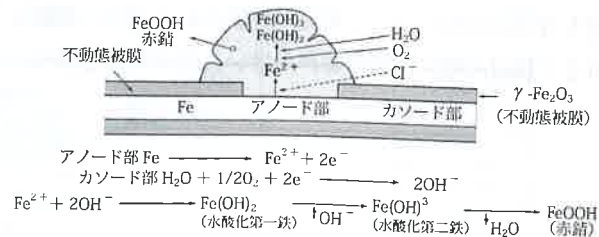


図1 コンクリート中の鋼材腐食の模式図

鋼材の断面減少などを生じ、構造物の耐久性能および耐荷性能が低下する。これが塩害によるコンクリート構造物の劣化メカニズムである。塩害により劣化したコンクリート構造物の例を図2に示す。



図2 塩害によるコンクリート構造物の劣化事例

3 劣化機構を考慮した塩害補修の考え方

3.1 塩害補修の基本的な考え方

塩害の補修工法を選定するにあたり、劣化メカニズムを十分に考慮し、現時点での劣化状況や将来の劣化予測に基づいて補修工法に要求する性能を定める。さらに、対策後にこの構造物をどのように維持管理していくかという方針（シナリオ）も検討する。この維持管理シナリオは残存供用年数を設定した上でライフサイクルコスト

（以下、LCCと称す）も考慮して策定する。これら「工学的判断に基づく補修要求性能の設定」と「LCCを考慮した維持管理シナリオの策定」を総合的に評価することで最適な補修工法を選定できると考えられる。それらを踏まえて、劣化過程と適用可能な補修工法との関係の例を図3に示す。以下、劣化過程ごとに塩害の補修工法選定の考え方について示す。

3.2 劣化過程に応じた塩害補修の考え方

3.2.1 潜伏期

潜伏期は塩化物イオンの侵入の兆しが見られるものの、その濃度はまだ腐食発生限界に達していない状態を指す。現時点では鋼材が腐食する理由はなく、外観には何ら変状が見られない状態である。潜伏期における対策工への要求性能は、『外部からの劣化因子の侵入抑制』に尽きる。この段階で塩化物イオン侵入を阻止できれば、将来的にも鋼材腐食が生じることはない。この要求性能に適する工法は表面含浸工法または表面被覆工法で、最も上流側の予防保全的な適用となる。ここで、塩化物イオンの拡散予測の結果次第では腐食発生限界濃度を超えるまでに十分な余裕がある場合も想定される。その場合はすぐに対策工を施さず、しばらく経過観察を行うという選択も考えられる。

3.2.2 進展期

進展期は鋼材位置における塩化物イオン量が腐食発生限界を超えた状態を指す。すなわち、既に不動態皮膜は破壊され、鋼材腐食が開始している可能性があるものの、まだひび割れなどの変状は生じておらず、潜伏期と同様に外観には何ら変状が見られない状態である。したがって、進展期における対策工への要求性能は、『外部からの劣化因子の侵入抑制』に加え、以後の『鋼材腐食の進行抑制』となる。既に不動態皮膜を破壊するのに十分な塩化物イオンは侵入しているものの、水分や酸素の侵入を抑制して鋼材腐食速度を緩和させることにより、ひび割れ発生などの変状の顕在化をできるだけ阻止することを考える。この要求性能に適する工法は、表面含浸



	潜伏期	進展期	加速期前期	加速期後期	劣化期
劣化の状態	・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	・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	・腐食ひび割れ発生 ・錆汁 ・コンクリートの浮き	・腐食ひび割れが大きく多数発生 ・コンクリートのはく離、はく落	・大規模なはく離、はく落 ・鋼材の著しい断面減少 ・変位、たわみ
工法選定の例	・存置、経過観察 ・表面含浸工 ・表面被覆工	・存置、経過観察 ・表面含浸工 ・表面被覆工 ・（脱塩工） ・（電気防食工） ・（断面修復工） ・（内部圧入工）	・（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）	・（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	・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

図3 劣化過程と適用可能な補修工法との関係の例（塩害）

工法または表面被覆工法となり、変状が生じる前に施す対策工となるので予防保全の範疇と考えられる。一般的には表面含浸工法は潜伏期に適用される補修工法に分類されるが、鋼材腐食抑制効果を併せ持つ表面含浸工法または表面被覆工法を選択すれば、『鋼材腐食の進行抑制』という要求性能にも対応できるため、進展期に対しての適用性がより高まる。鋼材腐食抑制効果を併せ持つ表面含浸工法として、亜硝酸リチウム併用型表面含浸工法²⁾の概念図を図4に、その施工状況を図5に示す。

ここで、近年着目されている亜硝酸リチウムについて概説する。亜硝酸リチウムとは亜硝酸イオン (NO_2^-) とリチウムイオン (Li^+) を有するコンクリート補修材料であり、亜硝酸イオンは鋼材の不動態皮膜を再生する効果があり³⁾、塩害や中性化などの鋼材腐食に起因する劣化の補修材料として活用されている。一方、リチウムイオンはアルカリシリカゲルを非膨張化する効果があり⁴⁾、ASR劣化の補修材料として活用されている。

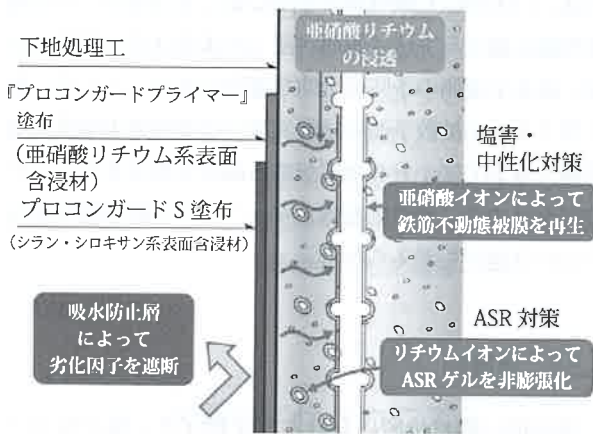


図4 亜硝酸リチウム併用型表面含浸工法の概念



図5 亜硝酸リチウム併用型表面含浸工法の施工状況

3.2.3 加速期前期

加速期前期は鋼材の腐食膨張圧によってひび割れやコンクリートの浮きなどが発生している状態を指しており、鋼材位置での塩化物イオン量が腐食発生限界濃度を超えていることは言うまでもない。加速期前期における対策工への要求性能は、『外部からの劣化因子の侵入抑制』および『鋼材腐食の進行抑制』となる。鋼材腐食の進行によってひび割れやコンクリートの浮きなどの変状が生じているため、まずはひび割れ注入工、部分断面修復工および表面保護工(含浸または被覆)を組み合わせて劣化因子の侵入を抑制することで鋼材腐食速度を緩和させ、これ以上の変状の増大を阻止することを考える。ここで重要なのは、これらの工法の組み合わせは鋼材腐食反応を完全に停止させ得るものではないため、将来的には再劣化を生じる可能性を考慮しておくという点である。つまり、現時点での劣化状況に対して最小限の対策を講じ、再劣化が生じれば速やかに再補修を行うという維持管理のサイクルを想定する考え方となる。ここで、適用する各工法に鋼材腐食抑制効果を併せ持つ工法を選択することにより、『鋼材腐食の進行抑制』という効果が付加され、再劣化が生じるまでの期間を少しでも延長し得る可能性があるため、より適用性が高いと考えられる。鋼材腐食抑制効果を併せ持つ各種補修工法として、亜硝酸リチウム併用型ひび割れ注入工法²⁾の概念と施工状況を図6および図7に、亜硝酸リチウム併用型断面修復工法⁵⁾の概念と施工状況を図8、図9に示す。

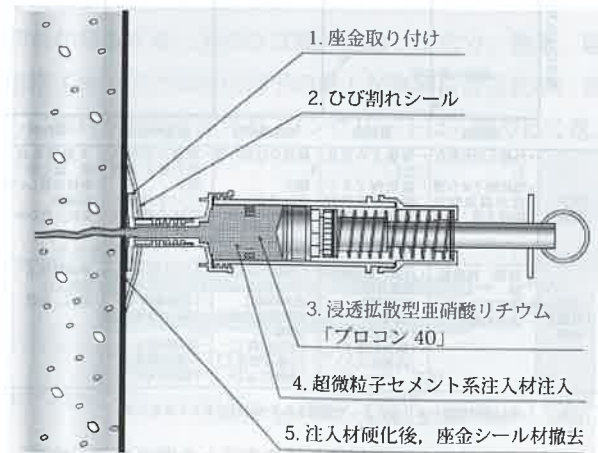


図6 亜硝酸リチウム併用型ひび割れ注入工法の概念



図7 亜硝酸リチウム併用型ひび割れ注入工法の施工状況

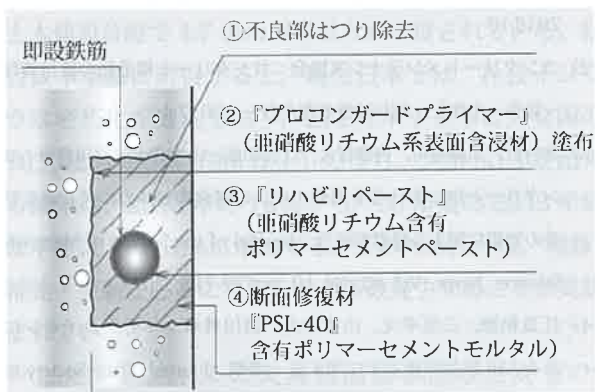


図8 亜硝酸リチウム併用型断面修復工法の概念



図9 亜硝酸リチウム併用型断面修復工法の施工状況

3.2.4 加速期後期

加速期後期は、加速期前期の変状からさらに進行した状態を指しており、著しいひび割れ幅や延長の増大、コンクリートのはく離、はく落範囲の増大などが見られる過程である。もし劣化過程が加速期後期を過ぎると劣化期に陥ってしまい、耐久性能だけでなく耐荷性能を損なう状況となるため、もはやこれ以上の性能低下を許容することはできない。したがって、加速期後期における対策工への要求性能は、『鋼材腐食の進行抑制』に尽きる。変状が著しいこの段階で確実に鋼材腐食を抑制するためには、電気防食工法や亜硝酸リチウム内部圧入工法など、塩化物イオン存在下でも鉄筋腐食を完全に停止させる工法の適用を検討する必要がある。また、全断面修復工法によって鋼材周囲の塩化物イオンを完全に除去し、鋼材の防錆処理を完全に行い、鋼材腐食環境を改善することも考えられる。これらの工法を適用することで以後の鋼材腐食のリスクを低減し、塩害進行によるコンクリート構造物の性能低下を確実に抑制することが可能となる。鋼材腐食を根本的に抑制しうる工法の例として、亜硝酸リチウム内部圧入工法²⁾の概念と施工状況を図10、図11に示す。

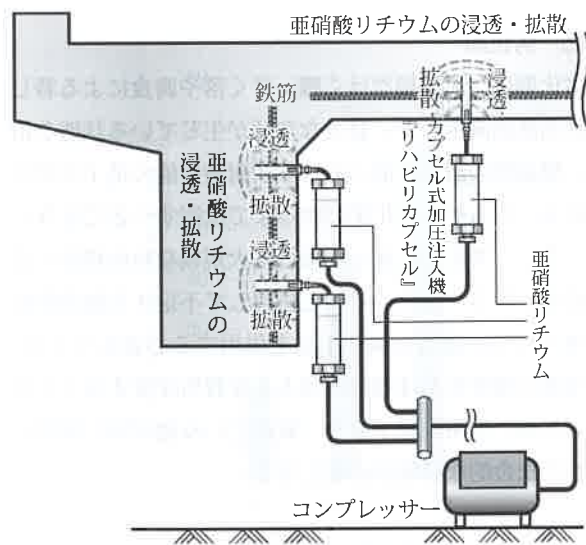


図10 亜硝酸リチウム内部圧入工法の概念

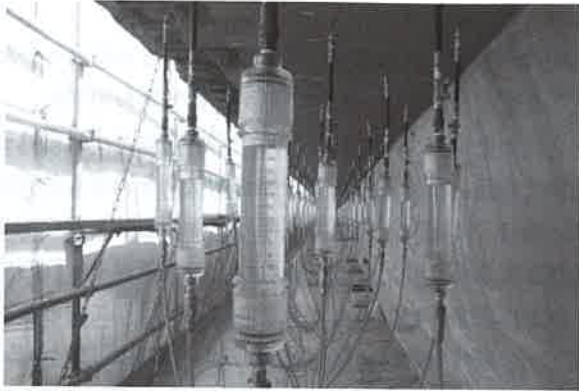


図11 亜硝酸リチウム内部圧入工法の施工状況

ただし、残存供用年数が比較的短い場合や補修の初期費用をそれほどかけられないと判断される場合には、加速期前期と同様にひび割れ注入工、表面保護工、部分断面修復工など最小限の対策を講じ、鉄筋腐食速度をできる限り軽減して変状の増大を緩和するという考え方を採ることもある。ただし、これらの工法は鉄筋腐食反応を完全に抑制できるものではなく、将来的には早期に再劣化が生じる可能性が高いと認識しておく必要があり、早いサイクルで再劣化と再補修を繰り返す維持管理シナリオとなるため、LCCがより高額となることも少なくない。

3.2.5 劣化期

劣化期は、大規模なはく離、はく落や腐食による著しい鉄筋断面減少など、甚大な変状が生じている状態を指し、構造物の耐久性能のみならず耐荷性能の低下が考えられる。そもそも劣化期になるまで放置すべきではないが、もし、劣化期に至った場合は大規模な断面修復工法が必要となる。また、それと併用して不足する耐荷性能を補うために適切な補強工法を併用する必要も生じる。劣化期の補修または補強には大きな費用を要することが多いため、供用制限や撤去、新設という選択肢も視野に入れた総合的な評価が必要となる。

4 おわりに

塩害、中性化、ASRなどで劣化したコンクリート構造物の増加に伴い、調査、診断、補修、補強など一連の維持管理業務の重要性が増大している。しかし、維持管理分野に対して十分な予算が確保されているわけではなく、維持管理に携わる技術者の数も依然として不足している現状が続いている。そのような状況の中、本稿がコンクリート構造物の維持管理を効率的に実施するための一助となれば幸いである。

参考文献

- 1) 土木学会：2018年制定 コンクリート標準示方書 [維持管理編]，2018.10
- 2) コンクリートメンテナンス協会：コンクリート構造物の維持管理～塩害・中性化・ASR補修の考え方～，2017.4
- 3) 高谷哲，須藤裕司，内藤智大，江良和徳，山本貴士，宮川豊章：コンクリート中における亜硝酸イオンの腐食抑制メカニズムおよびその効果に関する基礎的研究：Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol. 63, No. 10, pp722-728, 2014
- 4) 江良和徳，三原孝文，山本貴士，宮川豊章：リチウムイオンによるASR膨張抑制効果に関する一考察，Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol. 58, No. 8, pp697-702, 2019
- 5) 川村満紀，青山賢伸：現場技術者のための塩害対策ノート，2012.7