

塩害環境下におけるコンクリート構造物の維持管理

材料研究室

1. はじめに

塩害は、コンクリート中の鋼材の腐食が塩化物イオンにより促進され、腐食生成物（錆）の体積膨張がコンクリートにひび割れを引き起こしたり鋼材の断面減少等を伴うことにより構造物の性能が低下する現象である。コンクリート表面にひび割れ等の変状が現れた時点では、すでに多くの塩化物イオンがコンクリート中に浸透し、内部鋼材が相当量腐食している。さらに一旦ひび割れが発生し、塩分、酸素などが直接鋼材表面に達する状態では、鋼材腐食、構造物劣化が加速度的に進行するという特徴を有する。このため、コンクリート橋の塩害に関する特定点検結果¹⁾を有効活用するなど、塩害が疑われる構造物を早期に発見し、コンクリート中の鋼材が塩化物イオンにより腐食する前に予防保全的な補修を行うことが重要である。

本稿は、最近の動向をふまえながら、塩害が懸念される地域に建設されたコンクリート構造物の維持管理手法について解説したものである。

2. 塩害について

塩害は、①海からの飛来塩分や凍結防止剤散布による塩分の供給②コンクリート表面への付着③コンクリート中への浸透④鋼材の腐食という過程を経るが、それぞれの過程において環境及び使用条件の違い、コンクリート表面の状態、コンクリートの密実性、鋼材のかぶりなどの様々な要因が複雑に作用する。塩害を受けたコンクリート構造物への対策は、これらのどの要因に着目するかを明確にし、構造物の重要度や経済性を考慮して行うことが重要である。

また、塩害による単独の劣化の他に図-1²⁾に示す様に他の劣化との複合劣化を考慮する必要がある。特に北海道のような寒冷地では、凍害と塩害との複合劣化を考慮した対策を行う必要がある。コンクリートが凍結融解を繰り返すとコンクリートの内部組織の緻密性が低くなり容易に塩分が浸透しやすくなる³⁾。また、凍結融解を繰り返すことにより塩化物イオンが凍結部

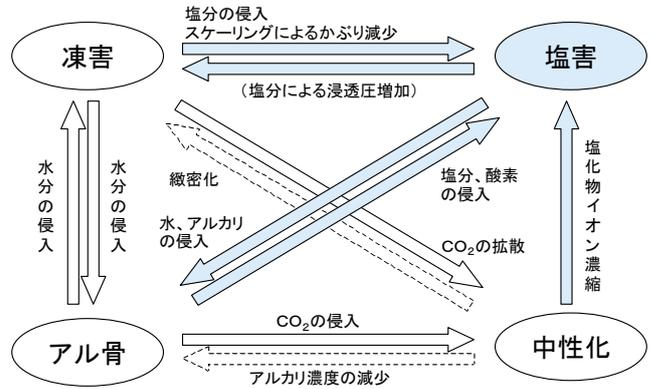


図-1 塩害と他の要因との複合劣化の相関図

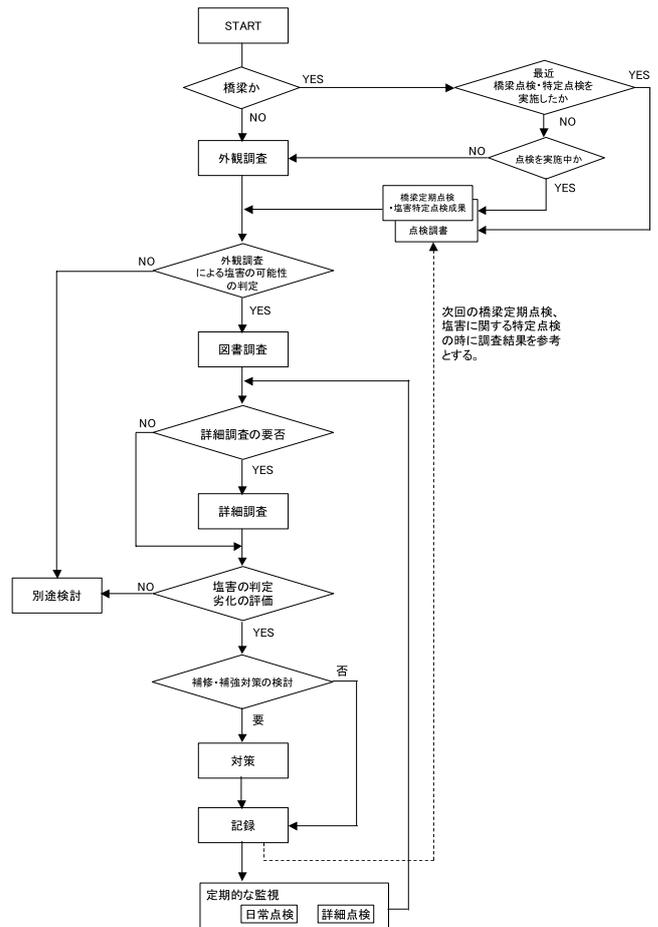


図-2 塩害が疑われる構造物の調査フローの例

から未凍結部へ移動し、塩化物イオンの移動が促進される場合がある。塩化物イオンは凍害に対しても劣化を促進させるため、塩害と凍害は互いの劣化を増長させる関係にある。

アルカリ骨材反応によるひび割れは、コンクリート中の鋼材への塩化物イオンや酸素の供給を促進することにより塩害を促進する。また、コンクリート中の塩化物イオンは化学的に固定化されて存在するものと細孔溶液中に存在するものがあるが、中性化により固定化されている塩化物イオンが細孔溶液中に遊離すると濃度勾配が生じ塩化物イオンの移動が促進され、鋼材位置での塩化物イオン濃度が上昇することも指摘されている。

3. 維持管理の流れ

コンクリート構造物に塩害によるものと疑われる変状が生じている場合に、調査、対策を行う上でのフローの例を図-2に示す。図は、コンクリート標準示方書〔維持管理編〕⁴⁾を基本として整理したフローである。橋梁の場合、別途橋梁定期点検、コンクリート橋の塩害に関する特定点検も実施しているため、これらの調査結果を利用し対策に役立てることが重要である。以下に主要な調査検討項目について述べる。

4. 調査

4.1 外観目視調査

写真-1に塩害によりひび割れが生じたPC橋の例を示す。構造物の塩害が進行していくと、コンクリート表面に鋼材に沿ったひび割れ、錆汁、浮き、剥離等が変状として現れる。海岸地域における飛来塩分による塩害は、海岸への距離が近いほど発生しやすく、海中よりも飛沫帯で発生しやすい。これは、乾湿繰り返しによる塩化物イオンの濃縮と、腐食に必要な酸素の供給が多いためである。また、一つの構造物において、海側に面した部材よりも陸地側に位置する部材の方が塩化物イオンの浸透量が多い場合がある。これは陸地側に風の流れを遮るような法面や構造物があると飛来塩分の滞留が発生するためである。さらに一つの部材でも雨掛かりなどにより表面の塩分が洗い流されるか否かによって表面塩化物イオン量が大きく異なる場合がある。これらのことは、塩害に対する調査を行う場合、構造物周辺の環境を含め調査することが重要であることを示している。また、近年、塩化物系の凍結防

止剤の散布量の増加に伴い、写真-2のように内陸部の構造物においても塩害が顕在化している。図-3は、凍結防止剤が散布される内陸部の橋梁について、下部工の各部位の塩分浸透量調査結果における表面塩化物イオン量の例である。路面に散布された凍結防止剤は、



写真-1 塩害によりひび割れが生じたPC橋



写真-2 凍結防止剤が散布される内陸部の橋梁の錆汁

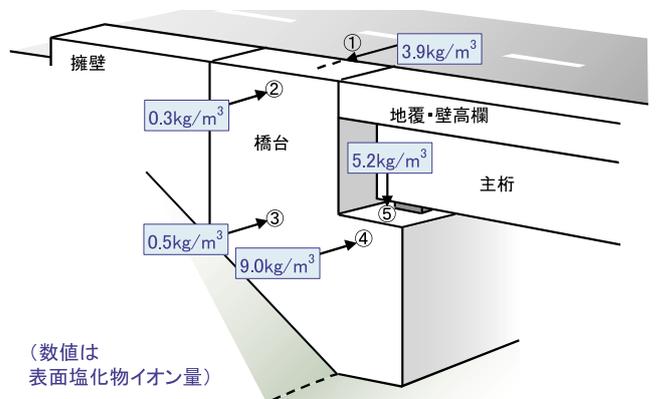


図-3 凍結防止剤が散布される内陸部の橋梁の表面塩化物イオン量の例

地覆・壁高欄の車道面、また、写真－3の様にジョイントからの漏水が橋座面に流れている場合、その周辺において多い傾向を示している。

4.2 図書調査

図書調査では、過去に塩害に関する特定点検を行っている場合にはその記録を調査したり、構造物の竣工時に記録保管される「建設材料の品質記録」などの資料を収集し、塩害に対する評価に役立てる。「建設材料の品質記録」の記録内容のうち、コンクリート中への塩化物イオンの浸透に特に関係する初期塩化物イオン量はもちろん、セメントの種類と水セメント比に関する情報を得ることが重要である。塩化物イオンが浸透する速さは、セメントの種類や水セメント比に大きく影響を受けるためである。

4.3 詳細調査

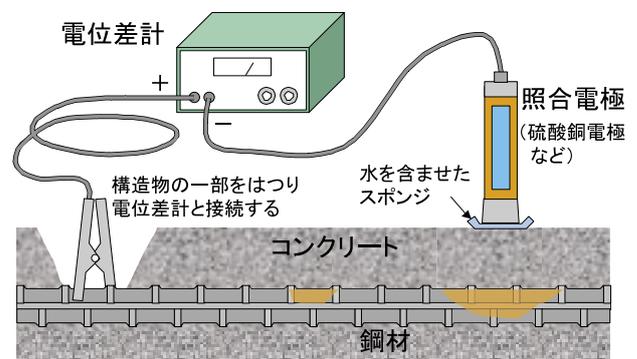
塩害に対する詳細調査には、劣化の程度を把握するための詳細な目視点検、コア採取による塩化物イオン濃度の測定、非破壊試験として電磁誘導法による鋼材かぶりの調査、自然電位測定による鋼材の腐食状態の確認などが挙げられる。また、構造物へのダメージを与えない程度に部分的にはつりを行い、鋼材のかぶりおよび鋼材の腐食状況を調査することによって、より精度の高い腐食度の評価を行うことができる。

コア採取における塩化物イオン濃度の測定は、塩害に対する詳細調査の中で基本となるものであり、コンクリート中の各層毎の塩化物イオン量をもとに塩化物イオンの拡散係数、表面塩化物イオン量のパラメータを求めることにより、塩分浸透量の将来予測をすることができる。また、同コアにおいて中性化深さや超音波伝播速度測定による凍害深さ等を合わせて測定することも重要である。中性化によって中性化フロントより内部に塩化物イオンの濃縮が見られる場合がある。また、凍害によってコンクリート表層部の超音波伝播速度が低下している場合がある。

図－4に塩害による鋼材腐食に対する非破壊調査例として一般的な自然電位測定方法を示す。自然電位は、鋼材が腐食しやすい環境にあるかを示す指標であり、鉄筋の腐食量、腐食速度などの情報は直接的には得られないものの、構造物全体の中で腐食の可能性の高い箇所を把握することにより間接的に腐食状況を調べることができる。表－1にASTM C 876による鉄筋腐食性評価例を示す。自然電位の測定値により鉄筋腐食の可能性を推定することができる。また、実構造物の



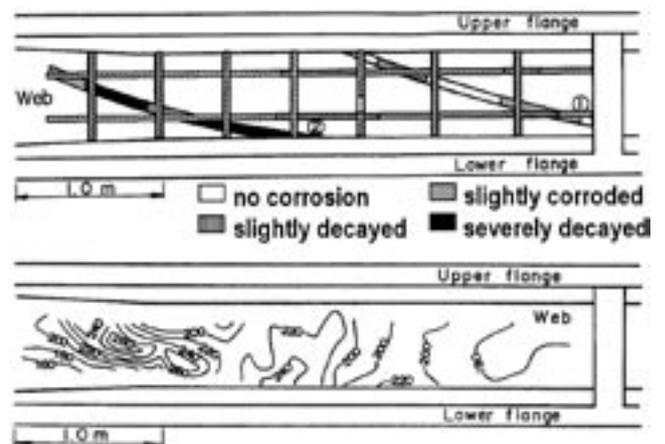
写真－3 下部工への凍結防止剤を含む水の供給



図－4 自然電位測定方法

表－1 ASTM（米国材料試験学会）C 876による鉄筋腐食性評価

自然電位(E) ($V_{vs,CSE}$)	鉄筋腐食の可能性
$-0.20 < E$	90%以上の確率で腐食なし
$-0.35 < E \leq -0.20$	不確定
$E \leq -0.35$	90%以上の確率で腐食あり



図－5 鋼材の腐食と自然電位

自然電位を測定した場合、測定値が $-0.20 \sim -0.35V_{vs}CSE$ となり鉄筋腐食の可能性が「不確定」と判定されることが多い。このため、照合電極を対象となる鋼材上に広範囲に測定し、等電位図を作成後各測定値の分布状態から腐食状況を把握することがある。図-5⁵⁾にPC橋における鋼材の腐食状況と自然電位の等電位線図を示す。鋼材の腐食の著しい箇所の自然電位が周辺に比べ「卑」になっていることがわかる。このように自然電位法により広範囲に鉄筋の腐食の可能性を調査し、部分的なはつり調査を併用し構造物の腐食状態を把握するのがよい。

5. 評価

塩害に対する劣化度の評価は、構造物の外観上のグレードを考慮して行う必要がある。表-2に構造物の外観上のグレードと劣化の状態⁶⁾を示す。外観上の変状に応じて構造物の劣化のグレード分けを潜伏期、進展期、加速期、劣化期に分類している。ただし潜伏期と進展期の違いは外観上からは判別しにくく、コア採取によりかぶり位置での塩化物イオン量が腐食発生限界塩化物イオン濃度 $1.2kg/m^3$ であるかを確認する必要がある。

図-6に劣化と性能低下の関係⁷⁾を示す。図において、コンクリートに徐々に塩化物イオンが浸透し、鋼材のかぶり位置における塩化物イオン濃度が腐食発生限界濃度 $1.2kg/m^3$ に達するまでの期間を潜伏期、鋼材の腐食が進行しコンクリート表面に腐食ひび割れが発生する期間を進展期、腐食ひび割れの発生により腐食速度が増大し、部材の性能が徐々に低下する期間を加速期、腐食量の増加により部材の性能の低下が顕著な時期を劣化期としている。塩害による劣化進行予測は、それぞれの期間の長さを予測することが基本となる。鋼材の腐食開始までの期間の予測は、一般的にはフィックの拡散方程式の解を用いられている。また、鋼材腐食の進行予測は点検結果で得られた腐食量から行う等の方法があるが、予測手法は定量化されていないのが現状である。

コアの採取によりコンクリート中の塩化物イオン浸透量を測定し、計算により将来における塩化物イオンの浸透分布の予測を行う例を示す。図-7はある構造物よりコアを採取したのち塩化物イオン量を測定し、その結果をもとに回帰分析したものである。回帰分析は式(1)に示すフィックの拡散方程式を用いた。最小2乗法による繰り返し計算を行い、式中における表

表-2 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	劣化の状態
I-1(潜伏期)	外観上の変状が見られない、腐食発生限界塩化物イオン濃度以下
I-2(進展期)	外観上の変状が見られない、腐食発生限界塩化物イオン濃度以上、腐食が開始
II-1(加速期前期)	腐食ひび割れが発生、錆汁が見られる
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、部分的な剥離・剥落が見られる、腐食量の増大
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、部分的な剥離・剥落が見られる、変位・たわみが大きい

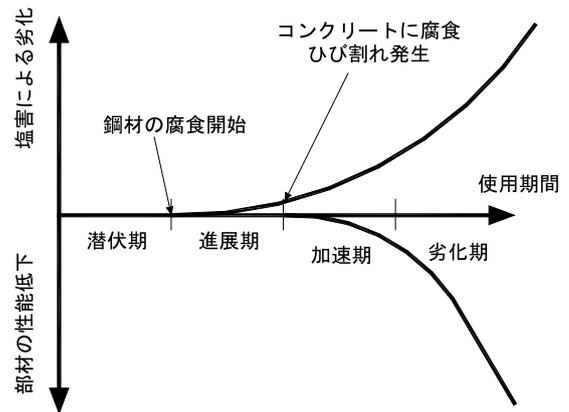


図-6 塩害による劣化進行過程

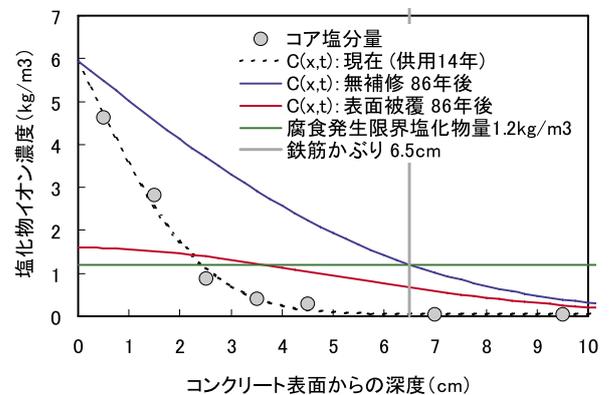


図-7 塩化物イオン浸透分析結果

$$C(x,t) = C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}} \right) \dots \dots \text{式 (1)}$$

$C(x,t)$: 深さ x (cm), 時刻 t (年) における塩化物イオン量 (kg/m^3)

C_0 : 表面における塩化物イオン量 (kg/m^3)

D : 塩化物イオンの見かけの拡散係数 ($cm^2/年$)

erf : 誤差関数

面における塩化物イオン量と塩化物イオンの見かけの拡散係数を求める。その結果、式を用いて任意の深さにおける任意の時刻の塩化物イオン浸透量を求めるこ

とができる。表面被覆などの補修を行わず、供用100年後の塩化物イオン浸透量の予測結果は図-7では青色の線で試算され、かぶり位置では腐食発生限界塩化物イオン量1.2kg/m³を越える。また、コンクリート表面に塗装などを施し、外部からの塩分供給をここでは0と仮定して一次元差分法⁸⁾により塩化物イオン浸透予測を行うと赤線で試算され、かぶり位置では腐食発生限界塩化物イオン量1.2kg/m³以下となる。なお、これらは数値上の解析結果であり、塩化物イオンの拡散の予測は、さらにコンクリートの品質や環境条件等の影響を考慮して行う必要がある。

6. 対策

対策として補修、補強を行う場合には、構造物の要求性能を明確にするとともに、目標となる性能水準、すなわちどこまで回復させるかを設定する必要がある。

表-3に構造物の外観上のグレードと標準的な工法⁹⁾を示す。劣化進行時期によって標準となる補修、補強対策は異なる。例えば、潜伏期において塩化物イオンの浸透量が少ない場合、予防的に表面保護工による塩化物イオンの侵入抑制を行えば補修効果は高いが、加速期において同様に表面保護工を行っても、一時的な美観の向上や外部からの塩化物イオンの侵入抑制に対しては一定の効果はあるものの、すでに内部に残留する塩化物イオンの再拡散により構造物の劣化が進行することが多い。従って、この場合塩分を含むコンクリートを除去し断面修復を行ったり、電気防食などを行う等の対策が必要となる。

補強を実施する際、現在の研究レベルでは、コンクリートや鋼材の腐食劣化の評価と構造物全体としての性能の評価との関係が必ずしも明らかにされていないため、必要に応じて載荷試験などによって構造物の耐荷力を直接評価しなければならない。

また、最近では表面保護工法の一つとして表面含浸工法の適用事例が増えている。表面含浸工法は、表面含浸材をコンクリート表層部に含浸させて緻密化、アルカリ性向上、撥水性などを付与し、構造物の耐久性を向上させる工法である。この工法の特徴として、施工自体が容易なことや、コンクリートの表面を被覆しないためコンクリートの外観の確認ができ、維持管理が容易なこと等があげられる。土木学会では、「表面保護工法設計施工指針(案)」¹⁰⁾が示され、シラン系含浸材やケイ酸塩系含浸材を主に性能評価のための試

表-3 構造物の外観上のグレードと標準的な工法

構造物の外観上のグレード	標準的な工法
I-1(潜伏期)	(表面処理) [*]
I-2(進展期)	表面処理, 電気防食, 電気化学的脱塩
II-1(加速期前期)	表面処理, 断面修復, 電気防食, 電気化学的脱塩
II-2(加速期後期)	断面修復
III(劣化期)	FRP接着, 断面修復, 外ケーブル, 巻立て, 増厚

^{*}予防的に実施される工法

験方法や施工方法について取りまとめられている。しかし、耐凍害性や遮塩性能等の長期耐久性については、十分に把握されていないなどの課題も有していることから、適用後においても経過観察、継続調査を実施し、その効果の持続性について調査していくことが必要である。

7. 記録

構造物の維持管理は供用期間を通して長期にわたり行われるため、維持管理を的確にかつ経済的に実施するためには、維持管理の過程における対応結果を確実に記録、保存することが重要である。また、構造物の施工時におけるコンクリートの品質記録などについても有事には重要な情報源となるため、確実に保存する必要がある。

8. まとめ

塩害は、鋼材腐食によってコンクリート表面にひび割れなどの変状が見られた時点ではすでに内部に相当量の塩化物イオンが浸透していることが多く、補修、補強対策も大がかりになるという特徴を有している。コンクリート橋の塩害に関する特定点検要領(案)によって実施された点検結果などを有効に活用し、予防保全的な観点より維持管理を実施することが経済的にも有効であると考えられる。

(文責 小尾 稔)

参考文献

- 1) コンクリート橋の塩害に関する特定点検要領(案), 国土交通省道路局国道・防災課, 平成16年3月
- 2) (社)日本コンクリート工学協会: 複合劣化コンクリート構造物の評価と維持管理計画研究委員会報告書, pp.21, 2001.5
- 3) 遠藤裕丈, 田口史雄, 窪内篤: 海洋コンクリート

構造物の表面はく離要因に関する調査，第46回北海道開発局技術研究発表会発表概要集，2003.2

- 4) 土木学会：2001制定コンクリート標準示方書〔維持管理編〕，pp98. 2001.1
- 5) Toshitaka Ota, Koji Sakai, Minoru Obi, and Sadamu Ono : Deterioration in a Rehabilitated Prestressed Concrete Bridge, ACI Materials Journal, V-89, No.4, pp.328-336, 1992.7-8
- 6) 土木学会：2001制定コンクリート標準示方書〔維持管理編〕，pp108. 2001.1
- 7) 土木学会：2001制定コンクリート標準示方書〔維持管理編〕，pp99. 2001.1
- 8) 守分敦郎，長滝重義，大即信明，三浦成夫：既設コンクリート構造物の塩化物イオンの拡散過程により評価される表面処理工法の適用性，土木学会論文集，No.520/V-28, pp.111-122, 1995.8
- 9) 土木学会：2001制定コンクリート標準示方書〔維持管理編〕，pp111. 2001.1
- 10) 土木学会：表面保護工法設計施工指針（案），コンクリートライブラリー 119, 2005.4