

コンクリートの内部状態を検知できる現場調査技術と補修材料

櫻庭浩樹・佐々木 巖・古賀裕久

1. はじめに

コンクリート構造物のメンテナンスにおいては、点検結果をもとに損傷メカニズムを推定し、その進行状態に応じた適切な措置を講じることが重要である。コンクリート構造物の主要な損傷メカニズムには、塩害、中性化、凍害、アルカリシリカ反応などがある。

このうち特に塩害（海から飛来する塩分や凍結防止剤に起因するコンクリート内部の鋼材腐食）は、いったん腐食が始まると損傷メカニズムの中でも特に進行が速く、構造物の性能への影響は大きい。また、腐食した鉄筋の膨張によるひび割れなど、変状が顕在化した時点ではすでに内部に多量の塩分が浸透しているために、確実な補修を行うことが難しい。したがって、海岸近くで新設時に表面保護工が適用されていない場合など、経時的に塩分が浸透する条件下にあるコンクリート構造物では、定期的に塩分の浸透状況を調査し、将来的に塩害のおそれがある場合には塩分の浸透量が少ないうちに表面保護工法等の対策を講じるなど、予防保全型メンテナンスを行うことが特に有効である（図-1）。

本報では、上記のような予防保全型メンテナンスの信頼性向上に向けた、既に浸透した塩分を確実に除去するための技術、表面被覆による補修後も目視点検を阻害しない技術の開発事例を紹介する。

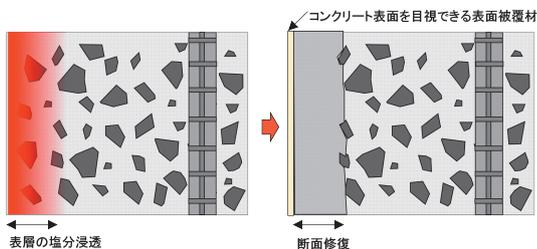


図-1 予防保全型メンテナンスの信頼性向上技術イメージ

2. 塩害対策の信頼性向上に向けた技術開発

塩害による鋼材腐食の顕在化前、あるいは、顕在化後もごく軽微な段階であれば、コンクリート中

に塩分が浸透した箇所をはつり（ブレーカー等を用いて削り取る）ことによって除去し、断面修復を行って、その後の塩分浸透を防ぐことで、構造物の補修を行うことが可能である。

コンクリート中に既に塩分が浸透した箇所を除去するためには、局所的なはつりを行うことが一般的である。このとき、採取したコアの塩分分析結果から塩分浸透深さを判断し、コンクリートの除去深さ（はつり深さ）を設定するのが一般的である。しかし、塩分浸透深さは構造物の部位によってばらつきが大きいこと、コアの採取でも構造物を傷つけるおそれがあり事前の調査数は制約されることから、除去深さを適切に設定することは容易ではない。このため塩分の除去が不十分となり、断面修復後の再損傷も発生していた（写真-1）。そこで、土木研究所では、はつり後に、塩分が十分に除去できているかを簡単に確認できる調査技術として、電極を用いた方法を開発した。第3章でこの技術を紹介する。



断面修復部のはく落の例

写真-1 断面修復後の再損傷事例



写真-2 表面被覆後の再損傷事例

塩分を十分に除去し、断面修復を行った場合は、補修箇所へのその後の塩分浸透を防ぐため、表面被覆（塗装）などを行うのが一般的である。表面被覆工法は、形成する塗膜が高い遮蔽性を有するため、適切に施工されれば、高い防食効果が期待できる。

なお、コンクリートの水和熱に起因するひび割れなど材料・施工の理由と推定されるひび割れ等に対して、それらが耐久性上の欠陥にならないように表面被覆される場合もある。

ただし、一般的な表面被覆材料を施すと、コンクリート表面が目視できなくなり、以後の点検を阻害する点が課題である。写真-2は、表面被覆工法を適用した後に再損傷が生じ、錆汁等が生じた事例である。このような顕著な再損傷を防ぐためには、なるべく早期にその兆候を発見する必要がある。

このような弱点への対策としては、①コンクリート表面が変形した際に、それが表面被覆材上にも現れるモアレ縞などの利用、②表面被覆材を透明なものにする、などが考えられる。本稿では、土木研究所が民間材料製造会社との共同で開発した透明な表面被覆材の事例を第4章で紹介する。また、類似の材料が開発された場合に、材料選定を適切に行うための表面被覆材の透明性評価方法もあわせて紹介する。

3. はつり部位の残存塩分の現地確認技術

3.1 概要

硬化コンクリート中の塩化物イオン量を調査する信頼性の高い方法は、コア試料等を採取して微粉砕し、JIS A 1154（硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法）により、コンクリート中の塩化物イオン量を定量分析するものである。しかし、試験室での試料の調整や測定が必要になることから、はつり作業などと並行して行い、残存塩分の確認に用いることは現実的ではない。

近年では、より簡易に試料中の塩分量を分析する手法として、蛍光X線や近赤外分光を用いる方法等も提案されているが、特殊な機器や器具が必要であること、測定誤差の要因が必ずしも明確でないことなどの課題がある。

そこで、著者らは、銀塩化銀電極を用いたセンサ（以下「塩分センサ」という。）と電圧計を用いて、はつり部位の残存塩分を簡易に調査する方法を提案した。この方法は、使用する機器が安価であること、現場ですぐに結果が得られることに利点がある。

測定に用いる塩分センサと基準電極を図-2に示す。塩分センサは直径0.5mmの銀線を銀塩化銀で被覆した銀塩化銀電極であり、基準電極は内部溶液が飽

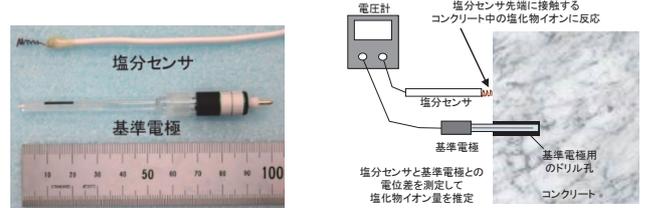
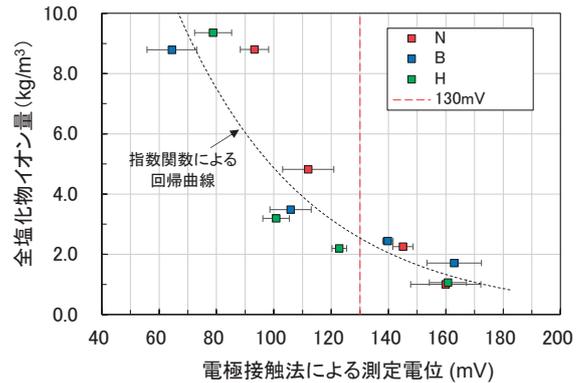


図-2 塩分センサと基準電極

図-3 塩分センサを用いた測定状況の概要



凡例、N：W/C50%（普通ポルトランドセメント）、B：W/C50%（高炉セメントB種）H：W/C36%（早強ポルトランドセメント）

図-4 塩分量と測定電位の関係

和塩化カリウムの銀塩化銀電極である。塩分センサを用いた測定状況を図-3に示す。まず、電圧計のプラス端子に塩分センサを、マイナス端子に基準電極を接続する。次に、基準電極と塩分センサをドリル孔先端に接触させて電極間の電極電位を測定する。電極電位は、硬化コンクリート中の塩化物イオン量に応じて変化し、その値を推定することができる。ただし、この方法で得られる塩化物イオン量は、塩分センサが接触している位置の局所的な値である。

なお、過去に本誌において、かぶり深さ方向の塩分分布に関する塩分センサを用いた実験を行い、コアを採取してJIS A 1154により定量分析した結果と概ね対応することを報告した²⁾。本報は、この結果を応用し、はつり部位の残存塩分の検知を検討したものである。既報で検討した実験の結果を図-4に示す。全塩化物イオン量が2.4kg/m³以上になると鋼材が著しく腐食することが知られているが³⁾、配合によらず、測定電位130mVが全塩化物イオン量およそ2.4kg/m³に相当した。このため、測定電位130mVを目安とすることで、塩害のおそれの大きいかどうかを区別できることを提案していた。

3.2 検証実験

約16年間塩害環境に供用されていたポストテン

ション方式3径間PC単純T桁（2主桁）を検証対象とした。600×600mmの範囲をはつり面とし、ブレーカーを用いてはつり作業を行った測定方法検証のために、はつり深さを0～70mmの範囲で変化させた。はつり作業の後に、塩分センサによる電位測定および、JIS A 1154による全塩化物イオン量測定を行い、これらの結果を比較した。

はつり作業を行った部位のコンクリート表面からの全塩化物イオン量の分布を図-5に示す。表面からの距離が大きいほど浸透した塩化物イオン量は低下していた。

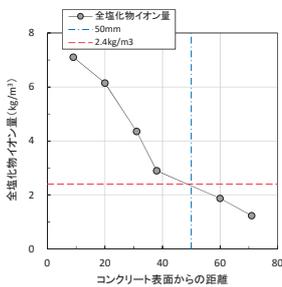


図-5 コンクリート表面からの全塩化物イオン量の分布 (JIS A 1154)

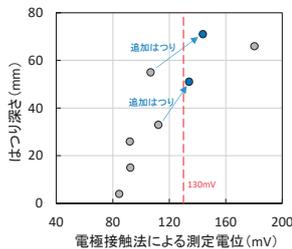


図-6 はつり深さと測定電位

JIS A 1154による測定結果から、表面からの距離を50mmより大きくすれば、鋼材の腐食を促進させ得る全塩化物イオン量2.4kg/m³以上のコンクリートを除去可能と推察される。しかし、実際には、部位によって塩化物イオンの浸透深さにはばらつきがある。はつり作業を、塩分センサによる電位測定を並行して進めた結果の例を図-6に示す。当初50mm程度はつりしても、電位が130mV以下であった。このような部位でも、追加のはつりを行ったところ、電位が130mV以上となった。このように、塩分センサによる塩分除去状況の確認をはつり作業中に実施することで、塩分が多い部位のはつり残しを防ぎ、補修後の再損傷のおそれを低減させることができる技術としての可能性を示すことができた。

4. コンクリートを目視可能な表面被覆技術

4.1 概要

従来の表面被覆材は顔料を含む有色塗料（エナメル）であるため、表面被覆材で補修するとコンクリート表面の状態が直接目視できなくなる。

このため、補修後は、塩害の進行状況や地震等によるひび割れ発生等を目視点検において確認する

ことが困難になるおそれがある。また、もし補修効果が十分に得られずに再損傷してしまう場合に検知が遅れる可能性が危惧されていた。

このような背景から、耐久性向上と補修後の点検の容易さを両立できる材料として、近年、透明な表面被覆材が様々な機関で開発され普及しつつある。透明な表面被覆材を用いると、写真-3に示すように、表面被覆後もコンクリート表面を目視することができる。従来の表面被覆材と同等の品質（遮蔽性やひび割れ追従性等）を有し、かつ、工程短縮が可能な材料も開発されている⁴⁾。



写真-3 コンクリート表面の可視性を有する表面被覆の例



写真-4 塗装による暗色化の例

4.2 透明性の評価方法

透明な表面被覆材は新しい材料であり、その透明性の程度を評価する方法はこれまでになかったため、検討を行った。まず、被覆材によるコンクリート表面の視認性阻害のメカニズムについて検討した結果、表面被覆材自体の透明さ（透明性）だけでなく、素地に直接塗布するプライマ等の材料がコンクリートに浸透した場合に生じる素地の暗色化が大きく関わっていることがわかった。写真-4は、塗装による暗色化の例であり、写真右側は塗装後も透明性を保持したが、写真左側は塗装により元の表面より暗色化した例である。ひび割れは健全な一般部に比べて黒い線状に見えるため、表面が全体に暗色化することは、近接目視点検などにおいてひび割れなどの変状の視認性を低下させる場合もある。

上記の結果を受け、被覆材の透明性と塗布した際の暗色化度合いを指標とし、それぞれについて機器による測定（透明性はJIS法の隠ぺい率、暗色化度合いは塗装面の測色による明度差(-ΔL*)）で数値化した。そして、目視によるひび割れ視認性の主観的評価の結果との対応を実験的に検討した。

供試体として、異なる種類および膜厚をもつ透明な表面被覆材とプライマの仕様を組み合わせ、視認性が異なるのべ42種類を準備した。この供試体を用いて主観的な視認性評価を行い、その判定結果

を集約した。コンクリート材料の専門家から建設材料に関する経験があまりない者までを含めた28名を被験者とし、模擬ひび割れや素地の表面が、よく見える：4点、見える：3点、何とか見える：2点、見えない：1点として集計した。

結果を図-7に示す。供試体の暗色化度合いと被覆材の透明性（隠ぺい率）の測定結果をマトリクス状に示したプロットに、目視による視認性評価結果（28名の平均値）を重ねて示している。被験者経験による結果相違は認められなかった。塗膜の隠ぺい率が大きく不透明になり、かつ素地の暗色化が強い領域（図-7の右上側）において、視認性が悪くなる傾向がわかる。そして、隠ぺい率が大きい不透明の場合は、暗色化度合いにかかわらず視認できないと判定されることから、塗膜の隠ぺい率の上限として15%を設定するのが良いと判断した。一方、隠ぺい率が5%以下ではほぼ透明な場合は、暗色化度合いが20程度でも視認性が良好で、隠ぺい率が5~15%の場合には、塗膜による暗色化度合いが小さい方が、視認性が良い傾向を認められる。

これらの結果から、ひび割れが見えると判断できる範囲を目視評価による視認性評価の平均値が3点以上と設定すると、図-7に矢線で示した領域を判定値として整理できると考えた。

5. まとめ

本報では、塩害を受けるおそれのある構造物に対する予防保全型メンテナンスの信頼性向上に向けて、既に浸透した塩分を確実に除去するための技術、表面被覆による補修後も目視点検を阻害しない技術を紹介した。以下にまとめを示す。

- 1) 断面修復後の再損傷の防止を目的とし、はつり後に、塩分が十分に除去できているかを現地で確認する調査技術として、塩分センサを紹介した。撤去部材を対象とした検証実験で

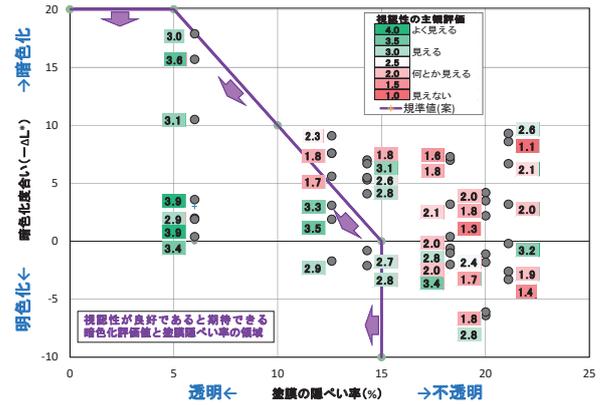


図-7 視認性を確保できる表面被覆材の性能指標の範囲

は、はつり後の残存塩分を検知できることを確認した。

- 2) 表面被覆後の再損傷の兆候を早期に検知することを目的とし、コンクリート表面が目視可能な透明な表面被覆材を紹介した。また、表面被覆材の透明性の評価は、塗膜の隠ぺい率とコンクリート素地の暗色化を指標とすることで可能であることを示した。

参考文献

- 1) 高橋啓太、新田弘之、岸本哲、轟眞市：モアレ縞を活用した画像解析技術によるコンクリートひび割れ幅計測、日本材料学会、第69期学術講演会、2020
- 2) 櫻庭浩樹、西村俊弥、古賀裕久：塩分センサを用いたコンクリート構造物の簡易な塩化物イオン量調査、土木技術資料、第60巻、第10号、pp.44～47、2018
- 3) 土木研究センター：建設省総合技術開発プロジェクトコンクリートの耐久性向上技術の開発、pp.21～33、1988
- 4) 佐々木巖、西崎到、星野匡弥、宮田敦士、今村宗夫：コンクリート素地の視認性を確保できる表面被覆工法、セメント・コンクリート、No.832、pp.50～55、2016

櫻庭浩樹



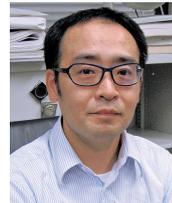
土木研究所先端材料資源研究センター材料資源研究グループ主任研究員、博士（工学）
Dr. SAKURABA Hiroki

佐々木 巖



土木研究所先端材料資源研究センター材料資源研究グループ総括主任研究員、博士（工学）
Dr. SASAKI Iwao

古賀裕久



土木研究所先端材料資源研究センター材料資源研究グループ上席研究員、博士（工学）
Dr. KOGA Hirohisa