特集>>> コンクリート工, コンクリート構造

近赤外線を利用したインフラ構造物の 非破壊塩害調査システム

コンクリート構造物の表面塩化物イオン濃度分布を非破壊で見える化

太 田 健 司・中 島 良 光・松 林 卓

コンクリート構造物の塩害調査手法としては、コンクリート構造物からコアを採取し、その試料から塩分分析を行いコンクリート中の塩化物イオン濃度分布を調べる方法などが一般的である。しかしながら、この方法では、コアの採取位置によっては塩分濃度がそれほど高くないことやコア採取時に構造物を傷つけてしまうこと、塩分分析に多大な労力やコストが必要なためサンプル数が限られ、構造物に生じている塩害を正しく評価できない可能性がある。そこで、近赤外分光法により、コンクリート構造物表面の塩化物イオン濃度分布を非破壊で推定することを検討した。

本研究では、非破壊で計測が可能な近赤外分光分析装置を開発し、コンクリート表面へ照射した反射光を分光分析装置により取得し、ケモメトリクス手法により実測した表面の塩分量との回帰分析を行うことで、推定方法を確立した。また、実現場においてコンクリート表面の塩分量を測定しマッピングすることで、構造物表面の塩化物イオン濃度の分布を示すことが可能であることを実証した。

キーワード:近赤外分光法,塩害,非破壊試験,維持管理,塩化物イオン

1. はじめに

日本における道路橋やトンネルをはじめとするインフラ構造物の多くは高度経済成長期に建設され、今後20年で竣工後50年を迎える構造物は加速度的に増加する。国土交通省の調査によると、道路橋(橋長2m以上)においては、建設年度が不明な橋梁を除いたおよそ40万橋のうち、約67%が平成45年3月には竣工後50年を迎える。このような状況で、近年では、インフラ構造物の経年劣化による事故やトラブルが増加しており、橋梁やトンネルなどの構造物に対して5年に1度の近接目視による定期点検が義務化されるなど、維持管理やメンテナンスへの重要性が増加している。

コンクリート構造物の劣化事象は、塩害や中性化進行に伴う鉄筋腐食、凍害による構造物表面のスケーリングなど様々な現象が挙げられる。その中でも、我が国においては、主要なインフラ構造物の多くが沿岸部に建設されていることから、構造物が塩害を受けやすい環境にある。また、沿岸部以外の地域でも、寒冷地や山間部などでは冬期の氷雪対策として凍結防止剤を散布するため、このことによる塩害劣化なども散見される。塩害劣化を受けた構造物の一例として、コンクリート内部の鉄筋の腐食が進行し、かぶり部のコンクリートが剥落した状況を写真一1に示す。このよう

に、塩害劣化によってコンクリート構造物は大きなダメージを受けるため、インフラ構造物の維持管理を行う上で塩害による劣化状況を把握することは非常に重要となる。しかしながら、コンクリート構造物の塩害劣化は、写真—1にあるように、内部の鉄筋腐食が進行し、コンクリート表面にひび割れや錆汁などが生じるなど表面に何らかの変状が発生するまでは目視による確認は難しい。

また,従来から行われている調査手法として,コンクリート構造物からコアを採取し、そのコアサンプルから採取した試料から,塩分分析を行いコンクリート



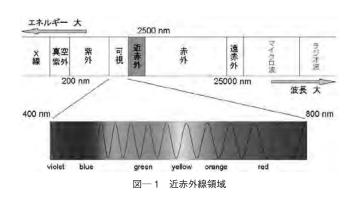
写真― 1 塩害劣化を受けた構造物

中の塩化物イオン濃度分布を調べる方法などがある。 この方法では、コアの採取位置によっては塩分濃度自 体がそれほど高くない位置を選定してしまう可能性が あることやコア採取時に構造物を傷つけてしまう恐れ があること、塩分分析を行うには多大な労力やコスト が必要となることなどからサンプル数が限られるた め、場合によっては構造物に生じている塩害を正しく 評価できない可能性がある。

前述のような課題に対し、コンクリート構造物の表面の塩化物イオン量を非破壊、かつ簡易的に調査し、表面の塩化物イオン量の濃淡を把握し、スクリーニングすることができれば、効率的なコアサンプルの採取が可能となる。そこで、石川らが提案している近赤外線分光スペクトルを用いたコンクリートの劣化因子の検出方法¹⁾ に着目し、コンクリート構造物の表面塩化物イオン量を計測するシステムの開発を行った。

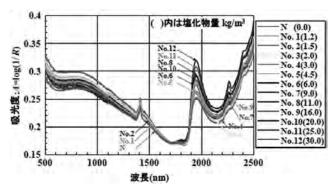
2. 近赤外線を利用した塩化物イオンの測定 原理

近赤外線とは、図―1に示すように、可視光より 波長が長い赤外線領域の中でも可視光に近い、波長が 800 nm ~ 2500 nm の範囲の光である。

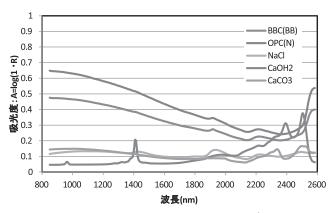


この近赤外線は、ある物質に照射すると特定の波長が吸光されるといった特性を有しており、この吸光される波長を解析することで植物の発育状況を把握できるなど、様々な分野で活用されている。

コンクリートの分野においては、この近赤外線の特徴を利用した石川ら¹⁾ の研究成果から、塩化ナトリウムを混入量の異なるコンクリート試験体に対して近赤外線を照射し、その分光スペクトルの吸光度を分析することで、塩化物イオン量の定量化が可能であることを示している(図一2)。また、普通ポルトランドセメントや高炉セメント B種といったセメント単体に加え、水酸化カルシウムや炭酸カルシウム、塩化ナ



図―2 塩化物量の異なる試料を用いて計測した近赤外線スペクトル分布 の変化 ¹⁾



図─3 各成分の近赤外線スペクトル分布 1)

トリウムの分光スペクトルについても確認しており、その結果を図—3に示す。図—3に示されるように、各材料においてそれぞれ特徴的な吸光特性を示していることがわかる。この特性を利用することで、各種材料が混合した場合においても、重回帰分析や主成分分析、最小二乗法などを用いて分析することで各主成分の定量化が可能となる。

3. 検量線の作成

(1) 測定装置(近接計測タイプ)

写真―2に近赤外線を利用した計測装置―式(近接計測タイプ)を,表―1に計測装置の仕様を示す。計測装置は、ハロゲンランプと近赤外線の発光器および受光器が一体となった光源ユニットと、受光した分光スペクトルを計測する分光器、電源ユニットおよび計測などを制御するノートパソコンから構成される。

(2) 検量線作成に用いた試験体の概要

普通ポルトランドセメントを用いて、配合条件をW/C=60%、S/C=2.5 として、塩化ナトリウムを単位量で $0\sim20\,\mathrm{kg/m^3}$ の割合でそれぞれ混入したモルタル試験体を作製した。モルタル試験体は、温度

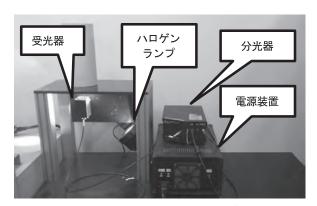


写真-2 計測装置 (近接計測タイプ)

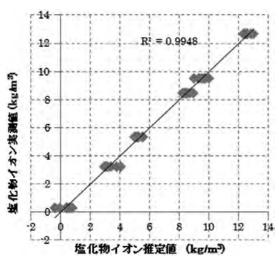
表-1 計測装置の仕様

発光部	ハロゲン光源	出力	100	[W]
	分光器	波長範囲	900-2550	[nm]
受光部		波長分解能	20	[nm]
文儿邮		画素数	256	[pixel]
	光ファイバ	ファイバー径	0.6	[mm]
電源	ハロゲン用	電圧	12	[V]
电你	分光器用	電圧	5.12	[V]

20 ℃, 湿度 60% の条件下で材齢 28 日まで養生を行い. 計測を実施した。

(3) 測定方法

写真—2に示した計測装置の受光器部分と試験体とを接地させ、試験体の中心部分と外周部分を合わせて5か所計測した。計測により得られた近赤外線の分光情報を平均した後、試験体の塩分濃度と分光情報を紐づけすることにより、検量線を作成した。近赤外線による表面塩化物イオン量の推定値と実測値との関係を図—4に示す。



図―4 塩化物イオン量の推定値と実測値の関係

4. 現場での実証実験

(1) 現場実証実験の目的

前章までに、今回開発した装置を用いて近赤外線の 分光情報を用いることで、コンクリート表面の塩化物 イオン量を計測可能であることが確認された。しか し、実構造物においては、コンクリート表面の汚れの 状況や複合劣化、周辺環境など室内試験とは計測条件 が大きく異なる。そこで、実構造物を計測し、表面塩 化物イオン量の推定値と実測値を比較することによ り、現場計測への適用性を検証した。

(2) 計測現場の概要

計測は、海岸付近の河川護岸構造物(現場 A)と 桟橋構造物(現場 B)の2現場を対象とした。計測現 場の外観および周辺状況を写真—3(現場 A)および 写真—4(現場 B)に示す。



写真-3 現場 A (河川護岸構造物)



写真-4 現場 B (桟橋)

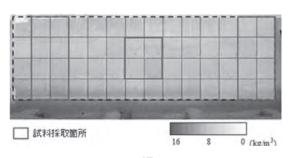
(3) 測定方法

計測は、測定面を 30 cm 角~50 cm 角のメッシュに区切り、1 区画に対して 3 回以上計測を実施した。現場計測により得られた分光情報と事前に室内試験で作成した検量線を用いて塩化物イオン量の推定を行った。また、この推定値と比較を行うため、測定面から数点コアサンプルを採取し、構造物の表層から 5 mm

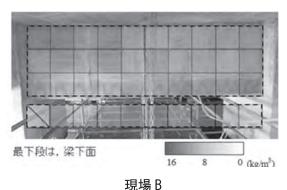
程度までの範囲について、JIS A 1154 に定める電位 差滴定法により全塩化物イオン量の測定を行った。

(4) 計測結果

近赤外線を用いて計測した推定塩化物イオン量の分布を図—5に示す。現場 A においては、構造物の上部から下部にかけて表面の塩化物イオン量が高くなっている。これは、波しぶきなどの影響によるものと推察される。一方、現場 B においては、全体的に塩化物イオン量が高い値を示し、上部でよりイオン量が高い傾向にあった。

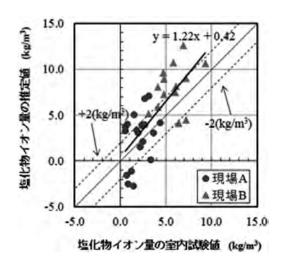


現場A



図一5 近赤外線により計測した塩化物イオン量の分布

近赤外線による塩化物イオン量の推定値と実測値との関係を図—6に、その際の誤差分析結果を表—2に示す。なお、ここでの誤差とは、検量線の作成に使用した室内試験の測定値と現場での推定値との差の絶対値とする。塩化物イオン量の室内試験と推定値の間にはある程度の相関関係が認められるものの、その誤差は平均で2.54 kg/m³である。これら、誤差が2.0 kg/m³以上になる要因としては、近赤外線計測による測定誤差が考えられ、現場測定では、構造物表面の付着物による影響や水分分布による影響などにより近赤外線スペクトルに乱れが生じ、測定誤差になっている可能性が推察される。そこで、これらの計測条件による要因を加味するため、室内試験の計測結果に現場での計測結果を加え、多変量解析を行うことで、現場に対応した検量線を作成した。この検量線を用いて再度塩化



図―6 室内試験値と現場推定値との関係(室内試験時の検量線を使用)

表一2 誤差分析結果 (室内試験時の検量線を使用)

標本数	34
平均誤差	2.54 kg/m^3
標準偏差	2.67 kg/m^3

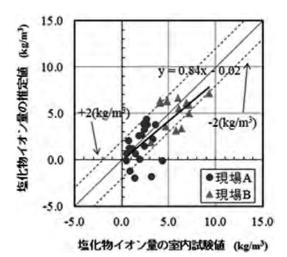


図-7 室内試験値と現場推定値との関係 (現場計測結果を加味した検量線を使用)

表一3 誤差分析結果(現場計測結果を加味した検量線を使用)

標本数	34
平均誤差	$1.52~\mathrm{kg/m^3}$
標準偏差	1.84 kg/m^3

物イオン量の推定を行い、その結果を図-7に、誤差分析結果を表-3に示す。現場に対応した検量線を作成し整理することで、誤差の平均値は $1.52 \, \mathrm{kg/m^3}$ となり、概ね $2.0 \, \mathrm{kg/m^3}$ 以下の値を示している。このように、実構造物の計測により得られた測定結果を用いて検量線を修正することで、今後はより高い精度での推定が可能になると考えられる。

5. 遠隔計測装置の開発

(1) 装置の仕様

コンクリート構造物表面の塩化物イオン量を計測する際には、必ずしも構造物に近づいて測定できるとは限らない。そこで遠隔においても同様に表面の塩化物イオン量を計測できる装置についても開発を行った。計測装置一式(遠隔計測タイプ)を図—8に示す。



図―8 計測装置 (遠隔計測タイプ)

計測は、はじめに標準白色板を用いて発光状態と非発光状態で分光スペクトルを取得し、基準となるスペクトルを取得する。ここで、非発光状態について計測する理由としては、外光等の環境条件による影響を排除するためである。実計測についても基準スペクトルと同様に、対象の計測面に対して発光状態と非発光状態で分光スペクトルを取得し、それらの差分から反射光の近赤外線分光スペクトルを作成する。これをケモメトリクス手法を用いて分析し、構造物の表面塩化物イオン量を推定する。なお、計測は一計測点あたり、数秒から十数秒程度である。

(2) 測定距離による誤差の検討

遠隔での計測では、測定距離が離れるほど反射光の強度は距離の二乗に比例して弱まるため、測定誤差が大きくなる。そのため、測定の限界距離を把握するため、測定距離をパラメータとして、近接測定との差を比較する実験を実施した。その結果を図一9に示す。図一9より、測定距離が3m以上で測定結果のバラつきが大きくなり、3.5m以上では平均値も大きく異

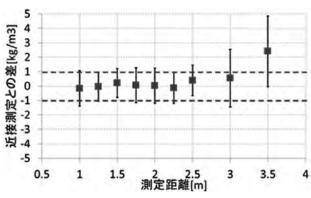


図-9 計測距離による測定誤差

なる結果となった。以上のことから、現状としての計 測距離は 2.5 m を上限として計測を行った。更なる長 距離化は今後の課題とする。

(3) 現場計測による遠隔装置の適用性

遠隔装置においても実現場で計測の適用性について 検討した。計測は前述の現場 B に加え、海に隣接し たクレーン基礎構造物(現場 C)で実施した。遠隔で の測定状況を写真—5 に示す。

現場 B および C での遠隔による遠隔による計測結果と近接による計測結果の関係を図— 10 に示す。現場 B では、桟橋の下面での計測のため、直射日光による影響や降雨などの影響はなかった。一方で、現場 C においては、小雨条件での計測であった。図— 10 より、遠隔計測と近接計測との関係は、相関関係($R^2=0.77$)が認められ、塩化物イオン量の推定値も概ね $\pm 2.0\,\mathrm{kg/m^3}$ の範囲に入る結果となった。しかしながら、現場 C において、小雨の影響で表面に濡れが発生した計測点では、計測結果に大きな差が認められたことから、今後は、測定表面の湿度による補正などについても検討していく必要がある。



写真-5 遠隔での測定状況

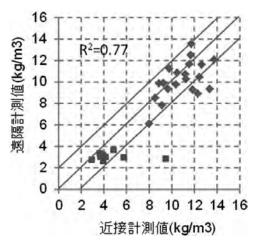


図-10 近接計測と遠隔計測の関係

6. おわりに

本開発により、塩害の可能性のあるコンクリート構造物に対して、近赤外線を利用することにより、非破壊でコンクリート表面の塩化物イオン濃度分布を測定するシステムの開発を行なった。測定誤差や各種のノイズの影響への対応など、課題は残っているものの、概ね実用可能であると考えられる。

今後, 精度向上, 作業効率化, 適用範囲の拡大などをさらに進めるとともに, 適用現場の増加と維持管理分野への活用を進める予定である。

J C M A

《参考文献》

1) 石川, 金田, 魚本, 矢島: 近赤外分光法を用いたコンクリートの劣化 因子の検出, 土木学会第59回年次学術講演概要集, pp.5-152~ 5-153, 2004年9月



[筆者紹介] 太田 健司(おおた けんじ) 前田建設工業㈱ 技術研究所 研究員



中島 良光(なかじま よしみつ) 前田建設工業㈱ 事業戦略本部プロジェクトマネジメント部 シニアマネージャー



松林 卓 (まつばやし たく) 前田建設工業㈱ 技術研究所 社会基盤マネジメント研究室 室長

