

# 近赤外分光法を用いた 塩化物イオン濃度の現地測定システム

やまかわかずき やまもとてるお こおりまさと ふじたたつや  
山川和輝<sup>1</sup>・山本晃臣<sup>1</sup>・郡政人<sup>1</sup>・藤田達也<sup>1</sup>

<sup>1</sup> (株) フジタ建設コンサルタント (〒771-0204 徳島県板野郡北島町鯛浜字原87-1)

著者らは塩害環境下にあるコンクリート構造物の効率的な劣化診断手法の確立を目的として、近赤外分光法による反射型測定法を用いて、コンクリート中に含まれる塩化物イオン濃度の推定手法について検討を行ってきた。本稿は北陸地方整備局管内における実構造物を対象とした試行調査結果の報告である。試行調査の結果からは、本手法を用いることで従来技術である「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 (JIS A 1154)」と同等程度の精度が得られることが確認できた。

**Key Words** : 近赤外分光法, 吸光度スペクトル, 塩化物イオン濃度, 差スペクトル法, 重回帰分析, 塩分濃度分布

## 1. はじめに

近年、コンクリート構造物の早期劣化が顕在化するとともに、コンクリート構造物の耐久性や品質に対する社会的関心が高まっており、コンクリート構造物の劣化状態を効率的に検査・診断する技術が強く求められている。特に、塩害環境下にあるコンクリート構造物は、劣化損傷がコンクリート表面に顕在化する前に、コンクリート中の塩化物イオン（以降、 $\text{Cl}^-$ と記述する）の濃度分布を把握した上で、適切な予防保全対策を講じる必要がある。そこで、著者らは塩害環境下にあるコンクリート構造物の効率的な劣化診断手法の確立を目的として、近赤外分光法による反射型測定法を用いて、供試体や実構造物を対象とした実験により、コンクリート中に含まれる塩化物イオン濃度の推定手法について検討を行ってきた<sup>1)~3)</sup>。その結果、セメント種類、細骨材種類、塩分種類および塩分浸透形態が異なる場合においても、ドリル穿孔による穿孔先端面の吸光度スペクトルを測定することで、コンクリート中に含まれる全 $\text{Cl}^-$ 濃度を精度よく推定することが可能であることを明らかにしている<sup>4), 5)</sup>。

本稿では、北陸地方整備局において実施された「鉄筋コンクリートならびにプレストレストコンクリート構造物のかぶり部における塩化物イオン含有量の非破壊、微破壊調査が可能な技術」の試行調査結果を報告する。

## 2. 近赤外分光法

近赤外分光法は、波長800~2,500nmの近赤外領域の光を対象物に照射し、透過光あるいは反射光の吸収に基づく分光法である<sup>6), 7)</sup>。近赤外分光はエネルギーの低い電磁波を用いるため、試料を損傷することがほとんどなく、様々な状態にある試料の測定に適用することができる。また、装置の自由度が高く、1回の測定が1秒以下の短時間でできることから、建設分野においても現位置の非破壊・微破壊診断手法として注目されている<sup>8), 9)</sup>。図-1には、著者らが採用している本手法の測定概念を示す。本手法は、表面付近の中性化の影響を小径ドリルにより排除し、穿孔先端面を測定する微破壊検査である。

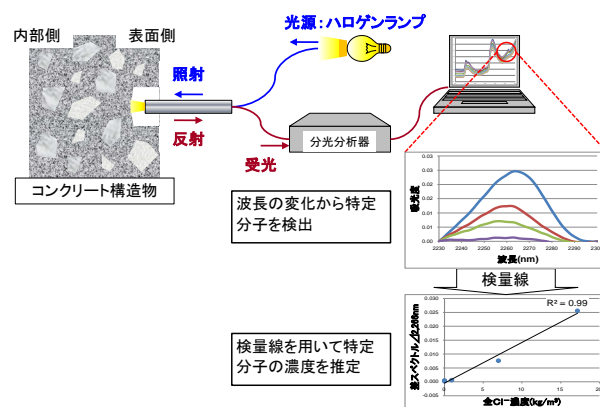


図-1 本手法の測定概念

### 3. 試行調査の概要

#### (1) 試行調査の目的

試行調査では、「鉄筋コンクリートならびにプレストレストコンクリート構造物における塩化物イオン含有量（かぶり部）の非破壊、微破壊調査が可能な技術」として、従来技術である「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（JIS A 1154）」（以降、JIS法と記述する）と同等程度の計測が可能で、かつ、構造物本体への影響を少なくすることが可能な技術について、活用効果の確認が行われた。なお、試行調査では表-1の要求性能が示されており、要求性能の確認は、図-2に示す新潟県村上市府屋の一般国道7号の海岸部に位置する府屋大橋（1981年完成）において、海側に面した歩道部のコンクリート壁高欄側面を対象とした現場技術検証が行われた。

表-1 要求性能

①計測可能深度：コンクリート表面から90mm以上（橋梁下部工） コンクリート表面から70mm以上（橋梁下部工以外）
②計測可能塩化物イオン量：0～2.5kg/m <sup>3</sup> 程度
③計測可能頻度：コンクリート表面から深さ方向に1cm毎
④計測精度（分解能）：0.1kg/m <sup>3</sup> 単位
⑤調査条件：非破壊もしくは微破壊の場合、小径コアφ50mm以下



図-2 現場技術検証における対象構造物

#### (2) 測定方法

本手法を用いた測定では、図-3に示すように1次診断と2次診断の2段階の調査方法を採用している。

##### a) 1次診断における測定手順

構造物表面付近のスクリーニングを目的とした1次診断では、対象構造物に対して測定範囲を設定し、構造物表面付近の中性化部や付着物の除去をφ25mmのハンマードリルにて数mm～数cm穿孔した後、測定範囲内に設定した格子点毎に光源受光一体型の細径棒状プローブ（φ6mm）を用いて吸光度スペクトルの測定を行う。吸光度スペクトルの測定では、格子点毎に粗骨材部の測定データを排除し、モルタル部のみを5点測定した後、吸光度スペクトルの平均化処理を行ったものを格子点毎の測定値とする。

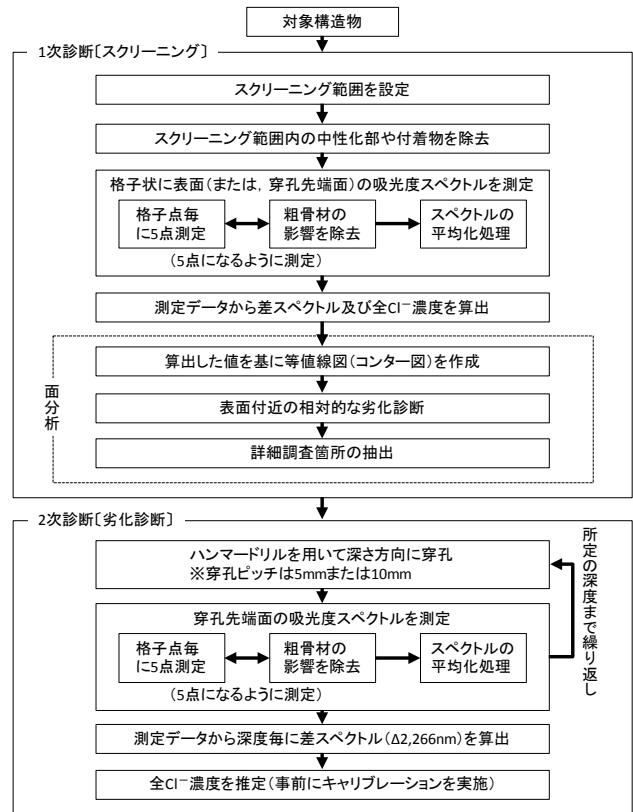


図-3 測定手順

格子点毎に平均化処理された測定値は、式(1a)に示す波長2,266nmにおける差スペクトル $\Delta A_{2,266}$ を算出した後、式(1b)から全Cl<sup>-</sup>濃度の簡易的な推定（以降、差スペクトル法と記述する）を行う。これらの式は、筆者らの既往研究<sup>1),3)</sup>において、波長2,266nm付近の吸光度スペクトルの変化とフリーデル氏塩の生成量とが相関関係にあることを確認した式である。なお、この方法は2次診断で行う検量線を用いた方法に比べて絶対値の精度はやや劣るものの、相対的な全Cl<sup>-</sup>濃度を把握することができ、キャリブレーション前の面的な全Cl<sup>-</sup>濃度の分布状況把握、ならびに、2次診断における全Cl<sup>-</sup>濃度の推定結果の速報値としての利用が可能である。

$$\Delta A_{2,266} = A_{2,266} - \left\{ A_a + \frac{A_b - A_a}{\lambda_b - \lambda_a} \times (\lambda_{2,266} - \lambda_a) \right\} \quad (1a)$$

$$Cl_{all} = \alpha \times \Delta A_{2,266} + \beta \quad (1b)$$

ここに、

$\Delta A_{2,266}$  : 波長2,266nmにおける差スペクトル

$A_{2,266}$  : 波長2,266nmの吸光度

$A_a, A_b$  : 波長a, bの吸光度

$\lambda_a, \lambda_b$  : 波長a (2,230nm), 波長b (2,290nm)

$Cl_{all}$  : 全Cl<sup>-</sup>濃度 (kg/m<sup>3</sup>)

$\alpha, \beta$  : 係数

これら格子点毎に算出した全Cl<sup>-</sup>濃度の推定結果を基に濃度マッピング（以降、面分析と記述する）を作成し、相対的に全Cl<sup>-</sup>濃度が高いと推察される詳細調査箇所の抽出を行う。



b) 2次診断における測定手順

2次診断では、面分析で抽出された詳細調査箇所に対して、3~4孔の調査孔（粗骨材最大寸法により設定）を選定し、構造物表面から深さ方向にφ25mmのハンマードリルにて10mm間隔（任意の間隔で設定可能）に穿孔しながら、深度毎に穿孔先端面の吸光度スペクトルを測定する。この測定データを用いて、予め作成した検量線により深さ方向の全Cl<sup>-</sup>濃度分布の推定を行うものである。

c) キャリブレーションによる検量線作成

全Cl<sup>-</sup>濃度を求める検量線は、深度毎の吸光度スペクトル測定に併せて採取した粉体試料を用いて、JIS法による全Cl<sup>-</sup>濃度の測定を行い、これらの測定結果を基に式（2）に示す重回帰分析により作成を行う。重回帰分析に用いる説明変数は、既往の研究結果<sup>4),5)</sup>と同様に、Cl<sup>-</sup>量の混入により変化する波長範囲として波長2,230nmおよび2,300nm、フリーデル氏塩のピーク波長2,266nm、モノサルフェートのピーク波長2,252nm、ならびに、中性化に影響する波長1,412nmおよび1,430nmの6波長の吸光度とし、JIS法により測定した全Cl<sup>-</sup>濃度を目的変数とする。

$$C_{total} = a + b \cdot A_{1,412} + c \cdot A_{1,430} + d \cdot A_{2,230} + e \cdot A_{2,252} + f \cdot A_{2,266} + g \cdot A_{2,290} \quad (2)$$

ここに、

- $C_{total}$  : 全Cl<sup>-</sup>濃度 (kg/m<sup>3</sup>)
- $a \sim g$  : 切片および定数
- $A_n$  : 波長n (nm) における吸光度

4. 試行調査の結果

(1) 1次診断の結果

図-4 に試行調査における測定範囲、図-5 に測定状況を示す。1次診断では、測定範囲内に対して構造物表面付近の中性化部（1cm程度）や付着物の除去（数mm）を行い、測定範囲内に設定した格子状の交点（延長方向60cm間隔、高さ方向20cm間隔）毎に吸光度スペクトルの測定を行った。

図-6 には、式（1b）により格子点毎に算出した全Cl<sup>-</sup>濃度による面分析の結果を示す。測定対象の壁高欄には鉄筋腐食などの外観上の変状は認められず、壁高欄としての機能は確保されているが、全体

的に塩分が分布している状況が確認された。なお、面分析の結果からは複雑な塩分の分布状況が見られるが、これについては、対象構造物周辺の海側に導流堤や護岸が設置されているため、時々刻々と風向きが変化することで様々な塩分供給の状況が生じたものと推察される。

ここで、2次診断用の詳細調査箇所として、図-6の面分析の結果から、全Cl<sup>-</sup>濃度が相対的に高い2箇所（CAはキャリブレーション用、TPは試行調査用）を選定した。

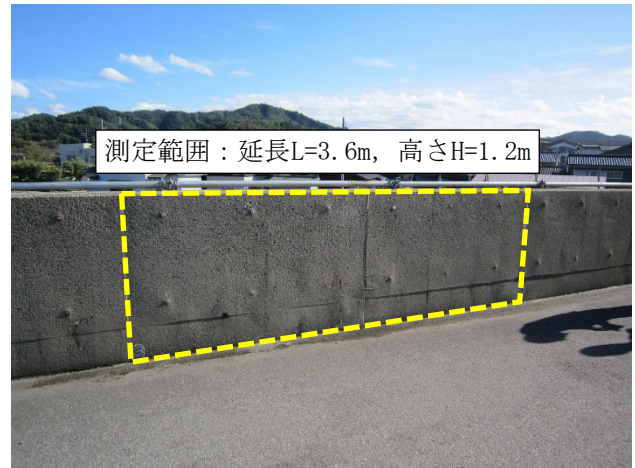


図-4 測定範囲（黄色破線枠内）



図-5 測定状況

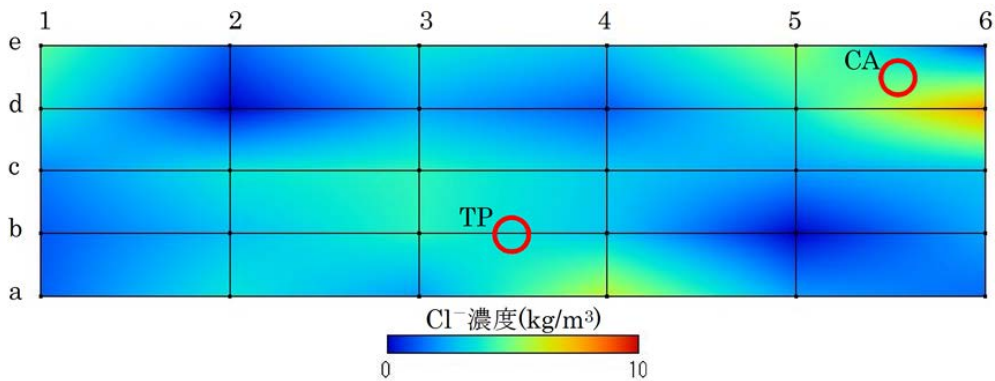


図-6 1次診断の結果

## (2) 2次診断の結果

2次診断では、図-6 で選定したCA位置において4孔の調査孔を設定し、構造物表面からハンマードリルにて深さ方向に10mm間隔で穿孔しながら、深度毎に穿孔先端面の吸光度スペクトル測定を行った(図-7)。また、測定に併せてドリル穿孔時の粉体試料を採取し、JIS法による全Cl<sup>-</sup>濃度の測定を実施した。これらの測定結果を用いて、式(2)に示す重回帰分析を行い、TP位置における全Cl<sup>-</sup>濃度を推定するための検量線の作成を行った。



図-7 吸光度スペクトルの測定状況

図-8 には、CA位置と同様の方法で測定を行った吸光度スペクトルを用いて、CA位置で作成した検量線から算出したTP位置における全Cl<sup>-</sup>濃度の推定結果を示す。また、推定精度を検証するため、CA位置と同様の方法で採取したTP位置での粉体試料によるJIS法の測定結果を併せて示す。両者の全Cl<sup>-</sup>濃度分布は全体的に一致しており、本手法を用いることで従来技術であるJIS法と同程度の精度が得られることが確認できた。なお、今回の試行調査では、JIS法による全Cl<sup>-</sup>濃度の測定以外の現地作業を1日で完了しているため、現地作業では式(1a)、式(1b)に示す差スペクトル法を用いて全Cl<sup>-</sup>濃度の推定を行っている。

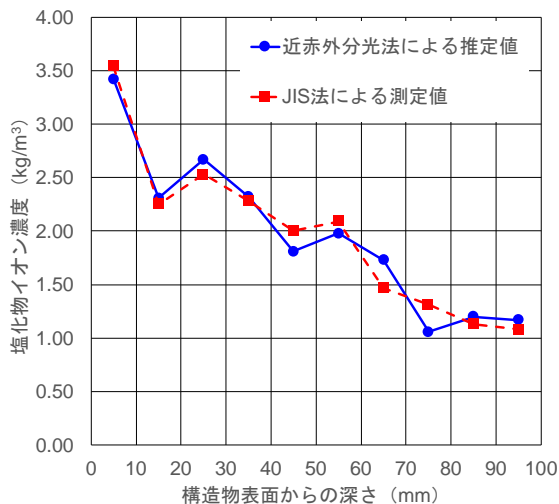


図-8 TP位置における2次診断の結果

## 5. まとめ

近赤外分光法を用いた塩化物イオンの現地測定システムについて、北陸地方整備局管内の実構造物を対象に現場技術検証を行った。その結果、本手法を用いることで、従来技術であるJIS法と同等程度の精度が得られることが確認できた。また、本手法の特徴である2段階調査により、広範囲な面分析によって維持管理上の重点箇所を容易に確認することができ、かつ、差スペクトル法や重回帰分析による全Cl<sup>-</sup>濃度の推定手法を用いることで、比較的短時間に少ない労力によって現位置での劣化診断を可能とした。

このように、調査内容や要求性能に応じて本手法を使い分けることで、塩害環境下にあるコンクリート構造物の効率的な劣化診断に寄与できるものと考えている。

**謝辞：**本調査は、国土交通省の新技术活用システムにおけるテーマ設定型（技術公募）として実施し、評価登録がNETIS 維持管理支援サイトに掲載されています。ここに記して感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 郡 政人, 古川智紀, 上田隆雄, 水口裕之: 近赤外分光法を用いたセメント硬化体中の塩化物イオン量の推定: Cement Science and Concrete Technology, No.61, p.189-196, 2008.
- 2) Masato, K. Takao, U. and Hiroyuki, M.: Application of a Near-infrared Spectroscopic Technique to Estimate the Chloride Ion Content in Mortar Deteriorated by Chloride Attack and Carbonation, Journal of Advanced Concrete Technology, 8(1), pp.15-25, 2010.
- 3) 古川智紀, 上田隆雄, 郡 政人, 七澤 章: 近赤外分光法によるモルタル中のフリーデル氏塩含有量の推定, コンクリート工学年次論文集, Vol. 30, No. 1, pp. 843-848, 2008.
- 4) 山本晃臣, 上田隆雄, 郡 政人, 七澤 章: 塩分浸透形態が近赤外分光法の吸光度スペクトルに与える影響, コンクリート工学年次論文集, Vol. 32, No. 1, pp. 1667-1672, 2010.
- 5) 山本晃臣, 上田隆雄, 郡 政人, 七澤 章: 近赤外分光法による実構造物の塩害劣化診断方法の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 34, No. 1, pp. 1744-1749, 2012.
- 6) 尾崎幸洋, 河田 聡: 近赤外分光法, 日本分光学会測定法シリーズ32, 学会出版センター, 1998.
- 7) 岩本睦夫, 河野澄夫, 魚住 純: 近赤外分光法入門, 幸書房, 1994.
- 8) 石川幸宏, 金田尚志, 魚本健人, 矢島哲司: 近赤外分光イメージングによるコンクリート中の塩分の定量化に関する提案, コンクリート工学年次論文集, Vol. 28, No. 1, pp. 1865-1870, 2006.
- 9) 戸田勝哉, 倉田孝男, 喜多達夫, 魚本健人: ケモメトリックス手法を用いた近赤外領域でのコンクリート診断技術開発, コンクリート工学, Vol. 45, No. 11, pp. 20-26, 2007.

