

分光分析法を用いたコンクリート劣化診断システムの開発

System to Diagnosis Concrete Deterioration with Spectroscopic Analysis

戸田 勝 哉 株式会社 IHI インフラシステム 技術本部開発部 博士 (工学)
中村 善 彦 株式会社 IHI インフラシステム 技術本部開発部 主幹 技術士 (建設部門)
倉田 孝 男 株式会社 IHI 検査計測 研究開発事業部基盤技術部 次長

塩害劣化を受けたコンクリート構造物の診断方法は、コア採取を行い化学分析する方法が一般的である。しかし、コア採取は点的な評価であり、さらに補修を伴うため構造物全体の診断には不向きである。分光分析法を用いることで、非破壊検査によってコンクリート表面の塩化物イオン濃度の分布をコンター図で表すことができる。本稿では、飛来塩分や融雪剤の影響を受ける供用中の橋梁に本システムを適用し、構造物全体の診断を実施した結果を紹介する。

The most popular method for inspecting concrete structures for deterioration (for example, due to chloride attack) is sampling. But sampling inspections are destructive and only point out which structures need repairs. On the other hand, spectroscopic analysis can display chloride ion distributions with contour lines. It is better to diagnosis concrete structures with spectroscopic analysis, rather than point-by-point by using sampling. This paper presents the results of diagnosis of structures in service affected by chloride ions from the sea and snow-melting agents.

1. 緒 言

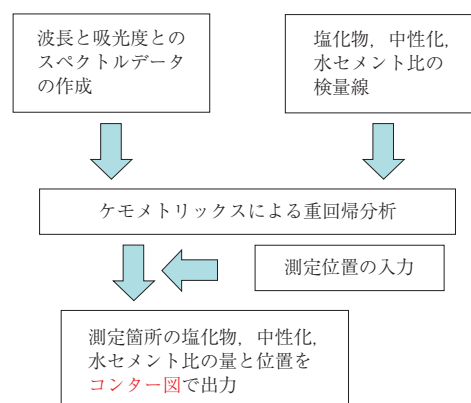
コンクリート構造物を診断する方法は、① 目視 ② 非破壊検査 ③ コア抜き、による調査の順に精度が向上するが、これらの測定範囲は限定的になる。また、コア抜きによる調査は、測定箇所において事前に鉄筋の位置を確認し、試験体を採取した後に補修が必要であるなど条件が加わるため、新設の構造物には適さない。分光分析は、非破壊検査でありながら短時間でコンクリート表面の塩化物イオン濃度の分布を出力することができる新しい診断システムである⁽¹⁾。本システムを用いることで、自然電位法などの非破壊検査測定やコア抜き箇所のスクリーニングをすることが可能である。また、補修範囲の決定や補修方法の選定などにおいても有効である。

IHI グループでは、これまで分光分析による診断システムの研究成果を報告している^{(2)~(5)}。本稿では、この診断システムを実橋梁に適用し、橋梁の周辺環境や橋梁形式が異なる 3 橋について、分光分析による非破壊検査と破壊検査の精度検証を実施した。

2. 分光分析システム

2.1 システム概要

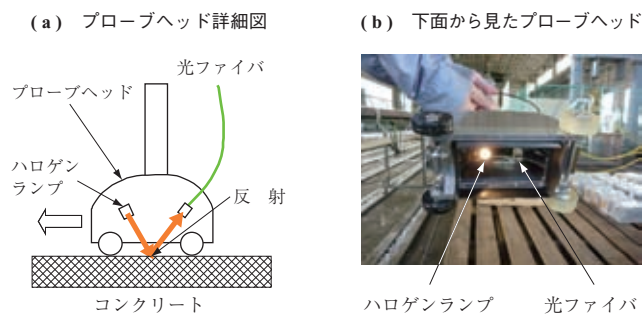
分光分析とは、第 1 図に示すフローのとおりケモメトリックス (計量化学) を用いた重回帰分析を用いるシス



第 1 図 システムの出力フロー
Fig. 1 System output flowchart

テムである。このシステムは、果実の非破壊検査による糖度計として、すでに確立されている技術である。本システムはその技術を応用したもので、出力結果に測定位置を入力することによって、測定箇所の塩分濃度をコンター図で表すことができる。また、炭酸カルシウム濃度などの検量線を用いることで、中性化の診断をすることも原理的には可能である。ほかにも、非破壊検査と破壊検査との間に相関関係を見いだすことができれば、アルカリ骨材反応やほかの化学的劣化の診断に対しても可能性がある。

本システムは、プローブヘッドと呼ばれる 150 × 100 mm 程度の機器を第 2 図に示すようにコンクリート表面を走査することで測定ができる。測定方法は、太陽光などの外乱



第 2 図 プローブヘッドの概要
Fig. 2 Outline of probe head

光が入らない閉鎖系の中で、ハロゲンランプをコンクリート表面に照射して、その反射光を光ファイバに集光させる。

2.2 検量線の作成

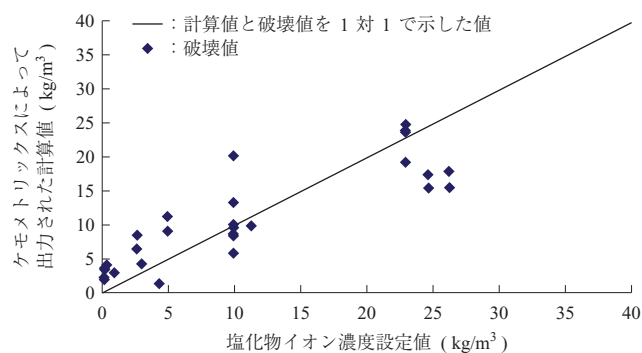
コンクリートは、打設直後は高いアルカリ性であるが空気中の二酸化炭素と反応することで表面のアルカリ性は失われる。この現象は、塩化物イオンと反応したコンクリート中のフリーデル氏塩（化学式： $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaCl}_2\cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ）の溶解を引き起こす⁽⁶⁾。よって、塩化物イオンを大量にもつコンクリートであっても、表面はそれらの数値がかなり減少した結果になるため、内部の塩化物イオン濃度の推定に支障をもたらすことになる。

ケモメトリックス手法は、この問題を解決するもので、塩化物イオン濃度や水酸化カルシウムに起因するピークを

複数選出することで、第 3 図に示すような相関が取れている検量線を得ることができる。この結果から、中性化の影響を受けずに表面塩化物イオン濃度を正しく測定することが可能になる。

2.3 測定方法

第 4 図に本システムの測定状況 (- (a)) とデータの出力方法 (- (b)) を示す。ここでは、PC (Prestressed Concrete) 桁の下面を測定した例を示す。この桁の幅は 500 mm あるため、プローブヘッドの幅の大きさから 5 ラインで測定することが可能である。そこで、長手方向に 50 mm ピッチごとに波長と吸光度 (第 4 図 - (c)) のデータを得ることができるため、測定箇所での塩化物イオン濃度の出力が可能になる。



(注) 中性化促進期間：13 週間

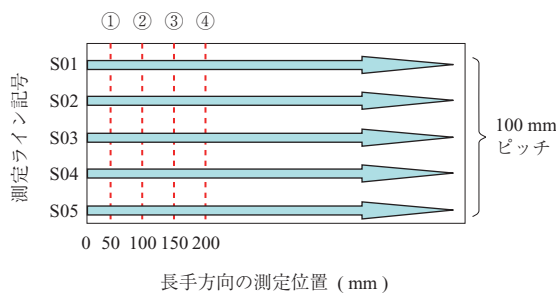
第 3 図 検量線の作成

Fig. 3 Calibration plots for chloride ions

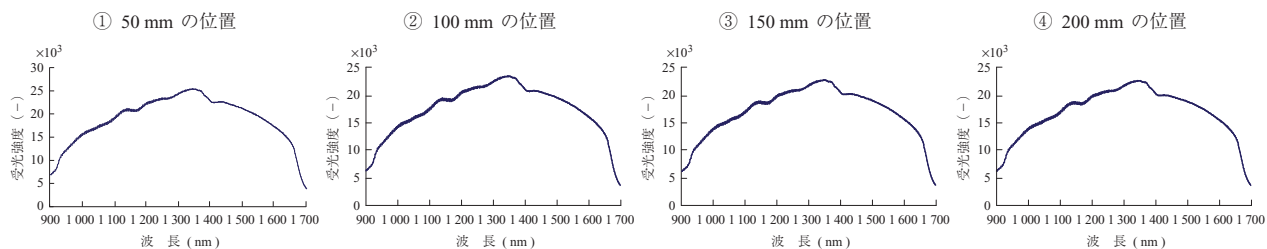
(a) 測定状況



(b) データの出力方法



(c) 1 点当たり (50 mm ピッチ) の波長と吸光度の出力



第 4 図 測定方法
Fig. 4 Inspection method

2.4 出力方法

本システムでは、プローブヘッドにエンコーダが内蔵されているため、走査させた距離を出力することが可能である。よって、第5図に示すように測定距離と塩化物イオン濃度のグラフ化が可能である。この結果をCADで作成した測定箇所に合わせて、第6図に示すようにコンター図で出力することが可能になる。以上の結果から、測定箇所のどここの位置の塩化物イオン濃度が高いかが一目で分かる。

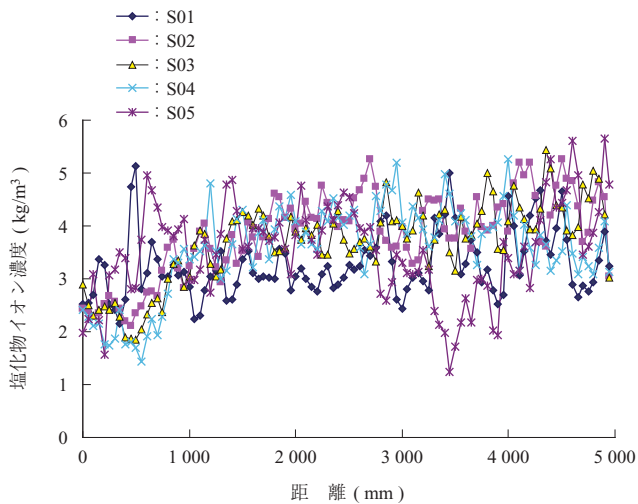
3. 測定橋梁概要

本章では、供用中である3橋の概要について述べる。

3.1 飛来塩分の影響を受ける RC (Reinforced Concrete) 床版 (A 橋)

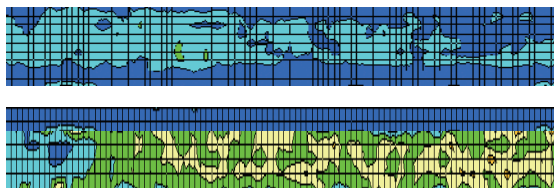
測定対象になる A 橋の外観を第7図に示す。本橋梁は日本海に面しており、海岸からの距離は 250 m である。橋梁形式は、橋長 19.9 m、幅員 8.3 m の 1 径間鋼桁の RC 床版である。

冬季には、季節風の影響を受けている。供用 38 年経過しており、塩害対策のため床版表面にはシラン・シロキサン系表面含浸剤が施工されている。コンクリート表面の劣



第5図 測定距離と塩化物イオン濃度の出力

Fig. 5 Relationship between length and chloride ion concentration



第6図 コンター図による出力結果の例

Fig. 6 Example contour map output



第7図 測定対象橋梁 A の外観

Fig. 7 External view of bridge A

化状況は、飛来塩分や融雪剤の影響のため、張出し部にひび割れが発生しており、ところどころ断面はく離を起している。床版の桁間部分は、特に劣化が見られず健全であった。

3.2 飛来塩分の影響を受ける PC 桁 (B 橋)

測定対象になる B 橋の外観を第8図に示す。本橋梁も日本海に面しており、海岸上に位置する。橋梁形式は橋長 991.6 m、幅員 11.25 m の 31 径間単純ポストテンション T 桁である。測定箇所は、そのうちの陸上部分の 1 径間である。供用 37 年経過しており、コンクリートが露出している箇所は、塩害の影響を受けてひび割れや断面修復の劣化が見られた。

3.3 融雪剤の影響を受ける RC 床版 (C 橋)

測定対象になる C 橋の外観を第9図に示す。本橋梁は河口より 1 km 内陸にあるため、飛来塩分の影響はほとんど受けない。しかし、冬季には大量に融雪剤が散布されている。橋梁形式は、橋長 264.6 m、幅員 26 m の 2 径間箱桁、3 径間連続鋼桁である。供用 28 年経過しているが、乾燥収縮と思われるひび割れがところどころ見られる以外は目立った劣化はない。



第8図 測定対象橋梁 B の外観

Fig. 8 External view of bridge B



第 9 図 測定対象橋梁 C の外観
Fig. 9 External view of bridge C

4. 測定結果

本章では、供用中である 3 橋の測定結果について述べる。

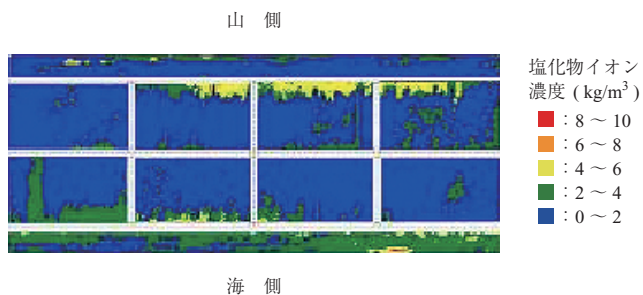
4.1 飛来塩分の影響を受ける RC 床版 (A 橋)

第 10 図に A 橋の塩化物イオン濃度の出力結果を示す。海側張出し部分や桁付近において、塩化物イオン濃度が高い結果になった。これらの結果は、飛来塩分が床版下面に付着した影響と考えられる。このため、張出し部分のかぶりの小さい箇所では、鉄筋腐食による断面はく離が見られた。床版部分のかぶりが大きいため、鉄筋腐食の影響は観測されなかった。

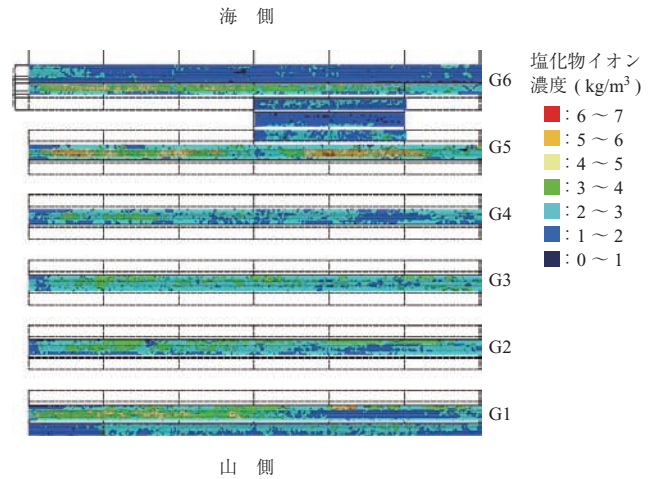
また、測定精度を検証するため、コア抜きによって推定した表面塩化物イオン濃度と、分光分析による結果との比較を行った。3 か所を比較した結果、差は 0.6 kg/m^3 程度でわずかであり、分光分析による出力の値がそのまま表面塩化物イオン濃度になることが確認された。

4.2 飛来塩分の影響を受ける PC 桁 (B 橋)

第 11 図に B 橋の塩化物イオン濃度の出力結果を示す。当初は、海側にある G6 桁の側面が最も塩化物イオン濃度が高くなると予想したが、実際は桁の下面が最も高くなった。またいちばん海側にある G6 桁でなく、一つ内側にある G5 桁の方の塩化物イオン濃度が高くなった。これは、



第 10 図 測定対象橋梁 A の塩化物イオン濃度出力結果
Fig. 10 Chloride ion contour map for bridge A



第 11 図 測定対象橋梁 B の塩化物イオン濃度出力結果
Fig. 11 Chloride ion contour map for bridge B

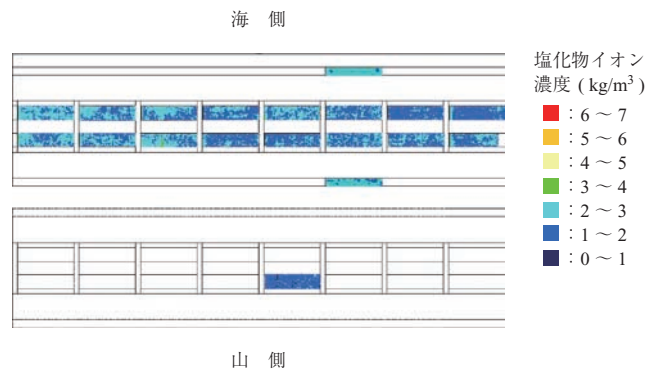
外側の桁は雨水による洗浄の影響があるためと推測される。桁の内側や床版部分は、桁下面に比べて濃度が低くなった。この結果から、B 橋の形式では、桁の間で飛来塩分が付着せず、桁下面で多く付着することが分かった。

4.3 融雪剤の影響を受ける RC 床版 (C 橋)

第 12 図に C 橋の塩化物イオン濃度の出力結果を示す。本橋は内陸にあり、飛来塩分の影響を受けていない。よって表面の塩化物イオン濃度は、 3 kg/m^3 以下がほとんどであり、顕著に高い箇所は見られなかった。最も塩化物イオン濃度が高い箇所は打継ぎ部であり、最大で 4.8 kg/m^3 であった。この結果から、本橋梁は飛来塩分による影響よりも、内陸にあるため局所的な融雪剤による影響を考慮しなければならない。

5. コンクリート内塩分濃度の推定方法

分光分析で出力される値は、コンクリート表面の推定値である。しかし、鉄筋の腐食判定には鉄筋位置での塩化物イオン濃度の推定が必要である。通常は、社団法人土木学



第 12 図 測定対象橋梁 C の塩化物イオン濃度出力結果
Fig. 12 Chloride ion contour map for bridge C

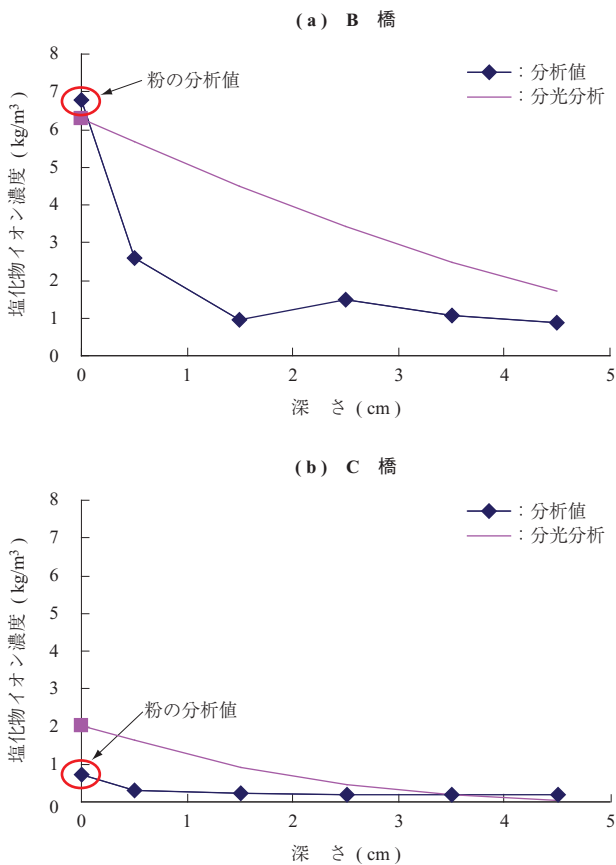
会コンクリート標準示方書設計編に示されている(1)式を用いて推定する⁽⁷⁾。かぶりを求めるには、図面もしくは鉄筋レーダを用いる。拡散係数に関しては、コア抜きによって測定した深さ方向と塩化物イオンとのカーブフィットから求めるか、セメント種類と水セメント比から求める方法がある⁽⁸⁾。

$$C(x,t) = \gamma_{cl} \cdot C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D_{ap} \cdot t}} \right) \dots\dots\dots (1)$$

ここに

- $C(x,t)$: かぶり x cm, 時間 t 年における塩化物イオン濃度 (kg/m^3)
- γ_{cl} : 安全係数
- C_0 : 表面塩化物イオン濃度 (kg/m^3)
- erf : 誤差関数
- x : かぶり (cm)
- D_{ap} : 拡散係数 (cm^2/y)
- t : 年数 (y)

第13図に、B橋(- (a)) およびC橋(- (b)) のコンクリート内部における塩化物イオン濃度を推定した結果を示す。分析値に関しては、表面の数値は第14図に示すよ



第13図 コンクリート内部における塩化物イオン濃度の推定
Fig. 13 Estimated chloride ion concentration versus depth of concrete



第14図 表面の粉の採取状況
Fig. 14 Sampling powder on surface

うに、グラインダで削った粉をサイクロン式掃除機で吸い取ったものを分析した値である。それよりも深い数値は、コア抜きによって採取したコンクリートをスライスして粉碎、分析したものである。これらの結果を用いて、(1)式にカーブフィットさせて拡散係数を算出した。分光分析による曲線の算出方法は、コア抜きや表面の粉の分析値から求めた拡散係数を用いて測定値 C_0 を代入したものである。今回の分光分析によって予測された数値は、実際のコア抜きによる分析値より数値が大きめに出力された。

以上の方法で、分光分析による表面塩化物イオン濃度から、コンクリート内部の拡散状況の推定が可能である。鉄筋の腐食が発生しているかの判断は、鉄筋位置での深さにおいて、塩化物イオン濃度と規定値（一般には 1.2 kg/m^3 ）を比較して行う。

6. 結 言

本稿で得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 非破壊検査によって、コンクリート表面の劣化因子を、コンター図によって出力することが可能になった。このことから、橋梁単位、部位、測定位置ごとに塩化物イオン濃度を出力することができる。よって、どの位置が何の劣化因子によって最も劣化しているか類推可能である。
- (2) 表面塩分濃度から、式によってコンクリート内部の塩化物イオン濃度の類推が可能である。このことから、劣化度に応じた補修工法の選定に役立つといえる。
- (3) 面的な評価を行うことができるので、橋梁単位での構造物周囲の環境、構造形式による影響などのさまざまな視点から診断することができる。
- (4) 現時点での測定速度の能力は、 $200 \text{ m}^2/\text{d}$ である。

測定を効率的に行えば、さらに能力を上げることが可能である。

参 考 文 献

- (1) 金田尚志, 石川幸宏, 魚本健人: 近赤外分光法のコンクリート調査への応用　コンクリート工学 第43巻第3号 2005年3月 pp.37 - 44
- (2) 戸田勝哉, 倉田孝男, 高岡啓吾, 西土隆幸: ケモメトリックス分光分析法を用いたコンクリート診断技術　IHI 技報 第47巻第4号 2007年12月 pp.173 - 178
- (3) 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 第45巻 第11号 2007年11月 pp.20 - 26
- (4) 戸田勝哉, 中村善彦, 倉田孝男: 分光分析法による実橋梁の診断システムの開発　土木学会第66回年次学術講演会 2011年9月 pp.117 - 118
- (5) 倉田孝男, 戸田勝哉: 分光分析法による実橋梁の診断システムの開発　IIC REVIEW No. 46 2011年10月 pp.28 - 33
- (6) 社団法人日本コンクリート工学協会: コンクリート診断技術'02(基礎編) 2002年 p.35
- (7) 社団法人土木学会: コンクリート標準示方書(設計編) 2008年 p.119
- (8) 社団法人日本コンクリート工学協会: コンクリート診断技術'02(基礎編) 2002年 p.190