

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

Concrete Diagnosis Technique with Chemometrics Spectral Method

戸田 勝 哉 技術開発本部基盤技術研究所構造研究部
 倉田 孝 男 石川島検査計測株式会社研究開発事業部基盤技術部 次長
 高岡 啓 吾 営業統括本部プロジェクト推進営業部 主査
 西土 隆 幸 技術開発本部基盤技術研究所構造研究部 部長 博士（工学） 技術士（建設部門）

コンクリートの非破壊検査技術は、超音波法、レーダ法、打音法、赤外線法などさまざまあり、ひび割れ深さ、鉄筋位置、強度の推定、はく離の有無の検出に使用されている。一方、マルチスペクトル法は、物質に当てた光の反射光をスペクトル解析することによって、物質の状態を定量的に知る技術として果物の糖度計、森林種類の調査などに使われている。本技術をコンクリートに適用して、コンクリート表面の塩化物イオン量を類推することを試みた。この結果、塩害や中性化などによるコンクリートの劣化現象の測定に、本技術は有効であることを確認した。

Diagnostic and non-destructive tests of concrete have used such methods as ultrasonic wave, the radar, the rebound hammer and the infrared spectroscopy to measure crack depths. The multi-spectral method, on the other hand, has been used to analyze fruit sugar content, or types of forests, using light reflection. This paper describes the results from the use of the multi-spectral method to estimate the chloride ion density on the concrete surface. This proved the method is useful to measure defects by chloride attack, carbonation.

1. 緒 言

現在、塩害や中性化などで劣化したコンクリート構造物の診断手法は、コア抜きによるサンプリングを行い電位差滴定法やフェノールフタレンを用いることが一般的である。しかし、コア抜きは診断箇所が点であるため構造物全体の診断精度が良いとは言えず、採取した箇所は補修が必要であり課題が多い。非破壊検査などで1次検査を行い、コア抜きする箇所の劣化因子の濃度が事前に分かっているならば、精度の高い診断が可能になる。

東京大学生産技術研究所（以下、東大生研と呼ぶ）や財団法人エンジニアリング振興協会（以下、エン振協と呼ぶ）では、この課題を解決するために非接触、非破壊のマルチスペクトル法によるコンクリート劣化センシング技術を開発してきている^{(1)~(3)}。当社でも本技術の開発に2004年から取組み、その有効性を確認してきている⁽⁴⁾。

2. マルチスペクトル法

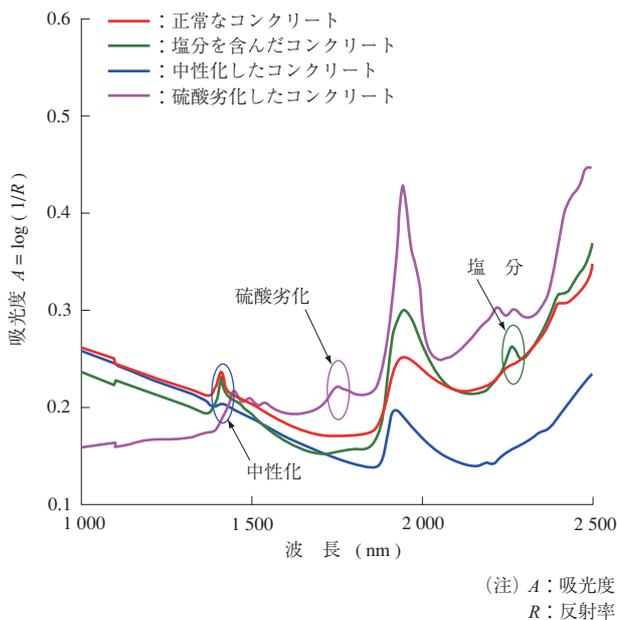
コンクリートの非破壊検査技術は多数存在するが、マルチスペクトル法はそのなかで新しい技術といえる。マ

ルチスペクトル法は、果物の糖度計、森林種類の調査などの分野で発展している技術である。本技術は、近赤外線域での反射光をスペクトル解析することによって、劣化因子の定量化が試みられている。金田⁽⁵⁾の研究では、塩分を含んだコンクリート、中性化したコンクリート、硫酸劣化したコンクリートの特定波長域でピークが現れたり消滅したりすることを確認している。

第1図に劣化したコンクリートのスペクトルを示す。このピークの大小と劣化因子の量との相関関係を求めることができれば、マルチスペクトル法によるコンクリート診断が可能である。本研究では、マルチスペクトル法を用いたコンクリート劣化診断に、統計処理手法の一つであるケモメトリックス手法を適用し、その有効性を確認した。

3. 試験方法

本試験では、骨材の影響、塩化物イオン量を調べるために室内で試験体を作製した。さらに、実構造物は屋外にあるため、上記影響因子に加え、日照、汚れなどのさまざまな影響を受ける。これらの影響を調べるため、室内試験体および実構造物試験体に小型分光器を用いて劣化度を計測した。なお、室内試験体は未粉碎のセメントペースト、モ



第1図 劣化したコンクリートのスペクトル
Fig. 1 Spectral results of deteriorated concrete

ルタル、コンクリートの塩害を模擬したもの、実構造物試験体は、海洋に面した護岸を用いた。

3.1 使用機器

分光器は、コンクリート表面にハロゲンランプを当て、その反射光を特殊なチップによって分光してスキャンするシステムである。光源は、100 W のハロゲンランプを用いた。システム構成図を第2図に示す。なお、分光器は広範囲の領域を測定するため、波長域の異なる2種類（使用機器A：波長域：900～1700 nm，使用機器B：波長域：1700～2500 nm）の機器を用いた。

3.2 基礎実験

室内試験体は、計測時から2年前に作製したもので表

面は中性化していると考えられる。室内試験体の仕様を次に示す。

形状

セメントペースト試験体	4 × 4 × 16 cm
モルタル試験体	4 × 4 × 16 cm
コンクリート試験体	10 × 10 × 40 cm
測定時の試料の状態	粉碎および未粉碎で使用

配合

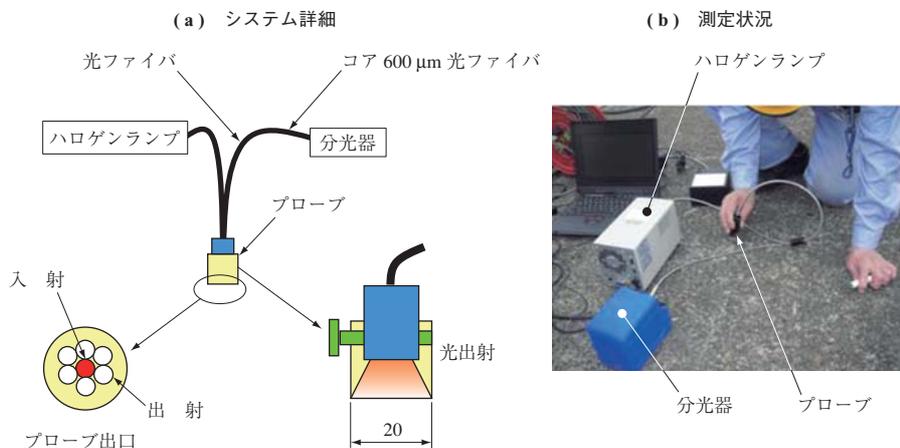
水/セメント比	48.5%
設計塩化物イオン濃度	0, 1, 3, 5, 10, 20 kg/m ³

3.3 実構造物の計測

計測した場所は、1962年に施工された飛まつ帯に属するコンクリート製護岸である。第3図に護岸での測定状況を示す。化学分析法で測定した結果、塩化物イオン量は表面に12～16 kg/m³存在することが分かっている。



第3図 護岸での測定状況
Fig. 3 Inspection on caisson

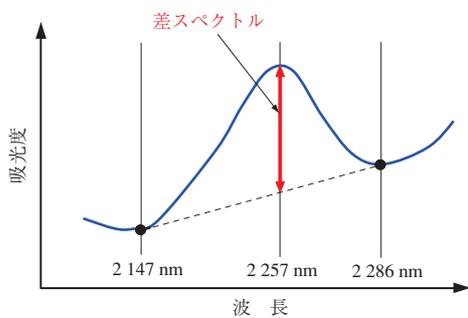


第2図 システム構成（単位：mm）
Fig. 2 System configuration (unit : mm)

3.4 差スペクトル法およびケモメトリックス手法

第4図に、東大生研などが実施している差スペクトル法の原理を示す。差スペクトル法は、特定波長ピークがバックグラウンドよりどのくらい高いかの程度を表す。一方、今回用いたケモメトリックス手法の原理を第5図に示す。

ケモメトリックス手法は、複雑な波形をもつ複数の波長に対して、特定波長ピークの大きさを調べることに効果を発揮する。差スペクトル法は、特定波長ピークが環境要因などによってシフトした場合、測定することができなくなる。これに対し、ケモメトリックス手法は、たとえ特定波長ピークがシフトしたとしても、ほかの複数の波長ピークを統計処理することで測定が可能である⁽³⁾。

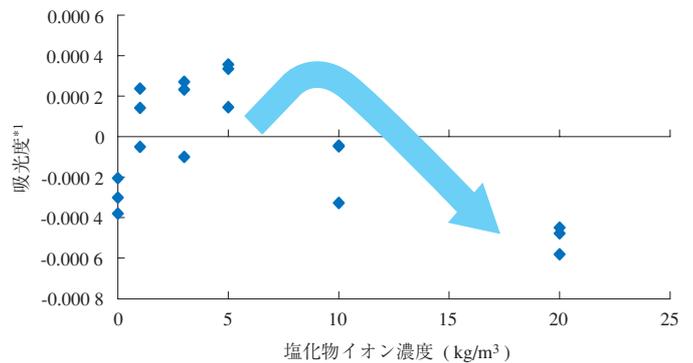


第4図 差スペクトル法の原理
Fig. 4 Theory of the differential spectral method

4. 試験結果および考察

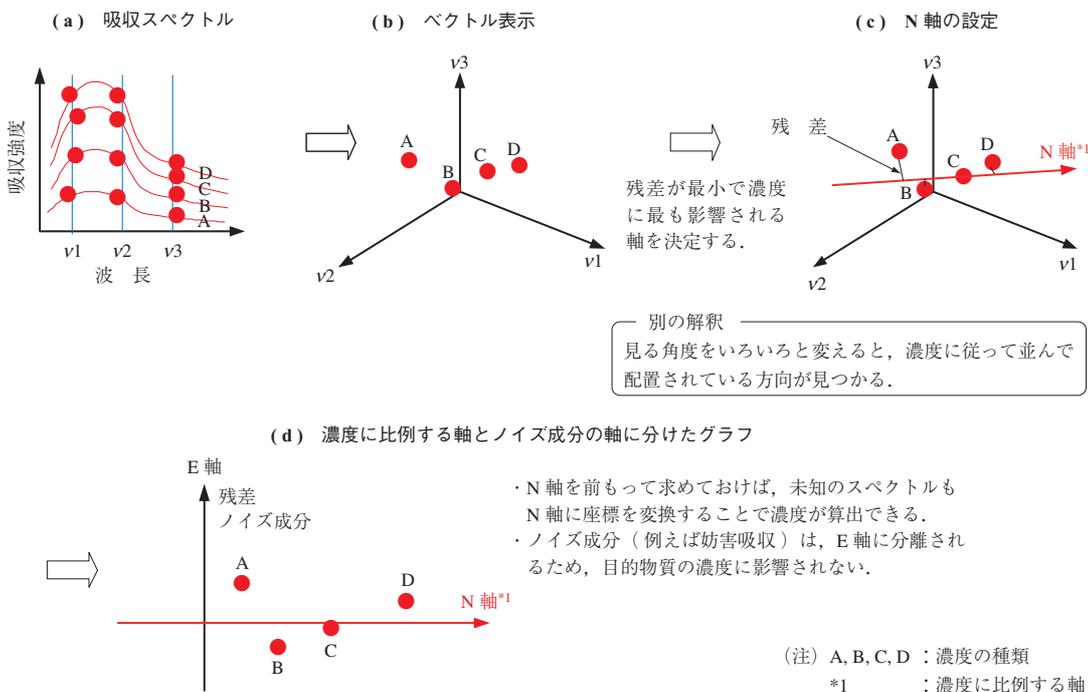
4.1 試験体による計測結果

第6図に、モルタルの試験体の吸光度を差スペクトル法で解析した結果を示す。この結果から、塩化物イオン濃度が5 kg/m³までは濃度と吸光度が比例関係にあるが、それ以上の濃度では反比例の関係にあることが分かる。つまり、本結果は実際に測定する際、塩化物イオン濃度が高い値を示しているにも関わらず、少ないという誤った診断を起こすことを示している。この原因は、材齢が2年以上経過したため、モルタル試験体表面が中性化してし



(注) *1: 2265 nmにおける吸光度

第6図 差スペクトル法で測定したモルタルの結果
Fig. 6 Results of mortar obtained by the differential spectral method



第5図 ケモメトリックス手法の原理
Fig. 5 Theory of chemometrics method

まい 2 265 nm のピークが消滅したためと考えられる。

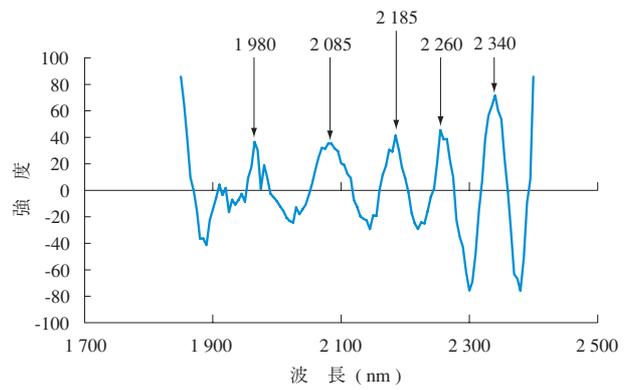
第 7 図に、セメントペースト (-(a))、モルタル (-(b))、コンクリート (-(c)) の吸光度をケモメトリックス手法で解析した結果を示す。これらの結果は、配合設計上の塩化物イオン濃度とケモメトリックス手法から算出した結果との相関関係が表れており、表面が中性化しても計測可能であることを示している。

第 8 図に、波長域 1 850 ~ 2 400 nm におけるコンクリートの回帰スペクトルの結果を示す。この結果は、塩化物イオン濃度と相関がある波長は、2 260 nm 以外にも複数存在することを示している。以上から、1 波長を注目する差スペクトル法よりも、設定した広域の波長を解析するケモメトリックス手法の方が優れていることが分かった。

4.2 実構造物の計測結果

今までは室内試験で行っていたが、次に実構造物を用いてフィールドでの測定結果を述べる。室内試験体の場合、材料の組成、塩化物イオン量などがある程度分かっているため、たとえ測定誤差が生じても原因を考察することが可能である。しかし、実構造物の場合、材料の組成が分からず、しかも置かれている環境条件も室内試験体とは大きく異なるため、誤差が生じてもその考察は困難である。

本試験では、塩化物イオン濃度を変えた試験体の測定結果を用いて検量線を作成し、ケモメトリックス手法を用いて、実構造物の吸光度から塩化物イオン濃度を算出するこ

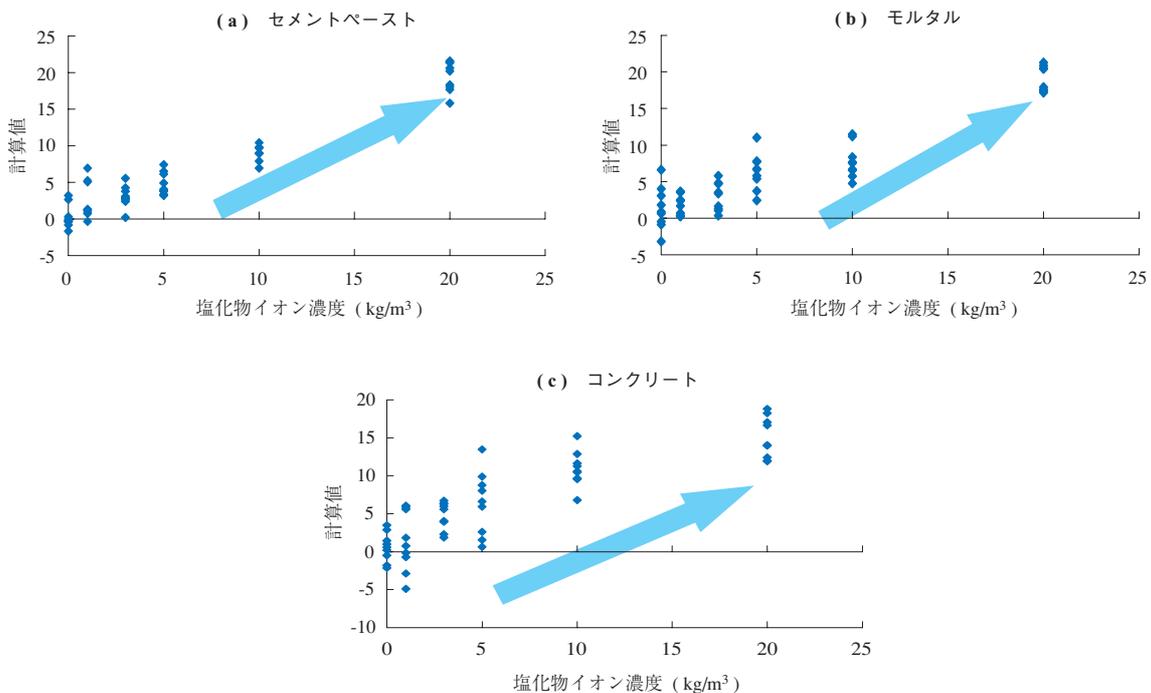


第 8 図 コンクリートの回帰スペクトルの結果
Fig. 8 Results of concrete by regression spectral analysis

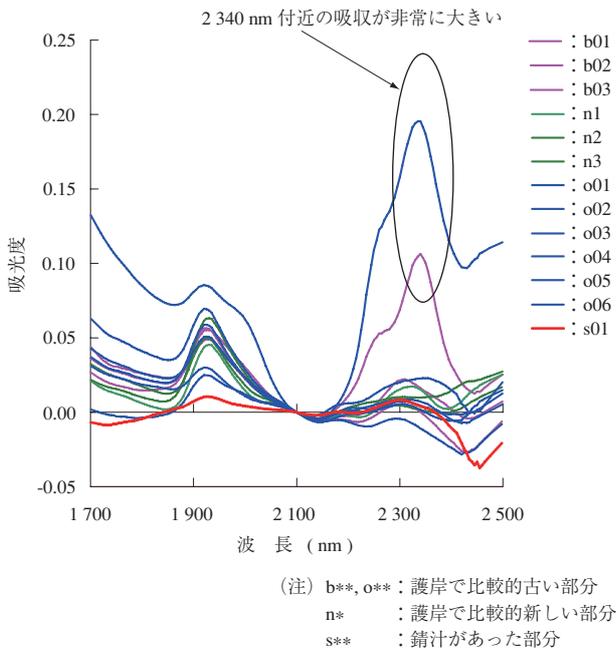
とを試みた。

第 9 図に、吸光度と波長の関係を示す。この図から、2 340 nm 付近に粘土の吸収と見られる大きな吸収ピークが観測された。このことは、塩化物イオンが存在しても必ずしも 2 260 nm にピークが現れないことを示している。この結果は、既往の研究で見られる波形とは大きく形が異なることを示している。

第 10 図に、従来の差スペクトル法を用いて、2 260 nm の吸光度を測定した結果を示す。3.2 節で述べたように、計測した護岸は、塩化物イオンが表面に存在することが分かっている。それに関わらず、すべての計測点で、塩化物イオン濃度の指標であるこの波長のピークが表れていな

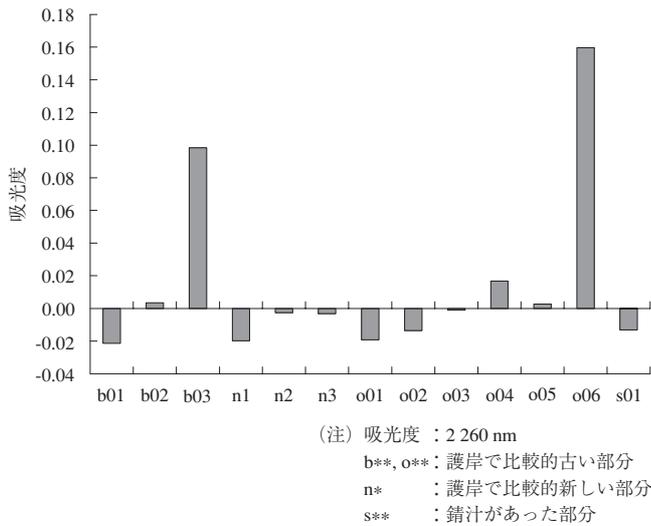


第 7 図 ケモメトリックスの結果
Fig. 7 Results by chemometrics method



第 9 図 護岸における吸光度と波長の関係

Fig. 9 Relationship between light absorption and wave length on caisson

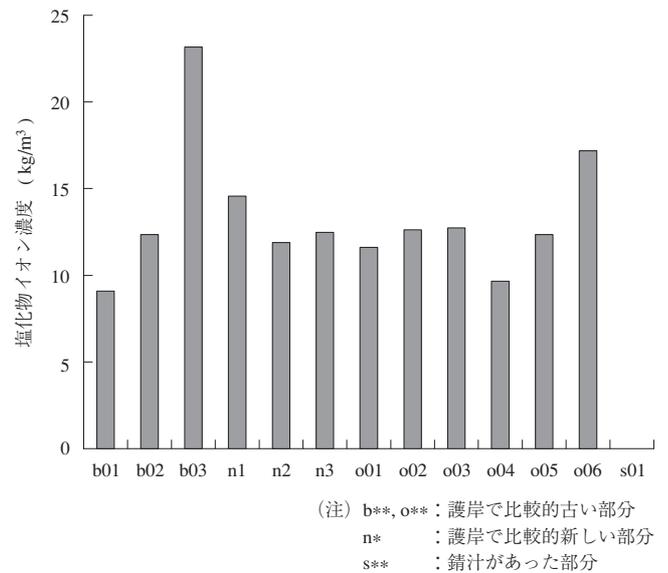


第 10 図 護岸の差スペクトル法による吸光度

Fig. 10 Light absorption on caisson by differential method

いため、本結果は、差スペクトル法を用いては正しく測定できないことを示している。この原因は、検量線作成のために用いた骨材と、実測の骨材の組成が異なるためと考えられる。

第 11 図に、ケモメトリックス手法による塩化物イオン濃度の出力結果を示す。本結果は、塩化物イオン濃度が 10 kg/m^3 付近から 23 kg/m^3 まで分布しており電位差滴定法の結果とおおむね一致する。この結果から、材料の組成の詳細が分からなくても、検量線の結果から実構造物を測



第 11 図 ケモメトリックス手法による塩化物イオン濃度の出力結果

Fig. 11 Results of chloride ion density by chemometrics method

定できたことは評価できる。

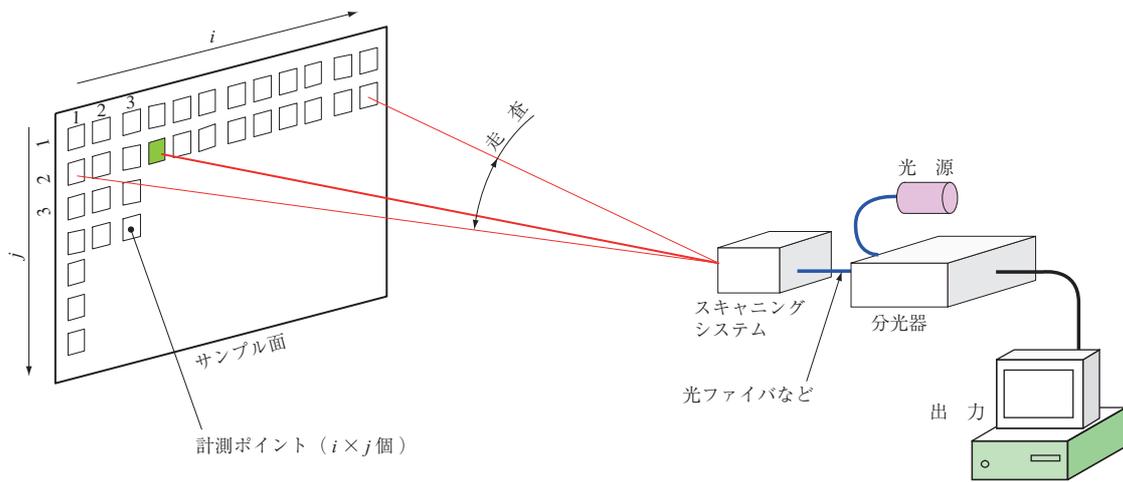
5. 実用化に向けて

マルチスペクトル法を用いた劣化診断は、コンクリート構造物の劣化度を定量的かつ効率的に把握する非破壊検査技術として有効な技術である。今回用いた機器は、点でしか測定できないが縦方向、横方向で走査できれば面で測定することが可能である。面で測定することが可能になれば、壁全体を測定できる。第 12 図に壁面の測定イメージを示す。さらに、短時間で測定が可能になれば、車載によって連続的に測定が可能である。第 13 図に車載による測定イメージを示す。これらを実現するためには、測定結果の分解性能の向上、光源の問題の解決が必要である。

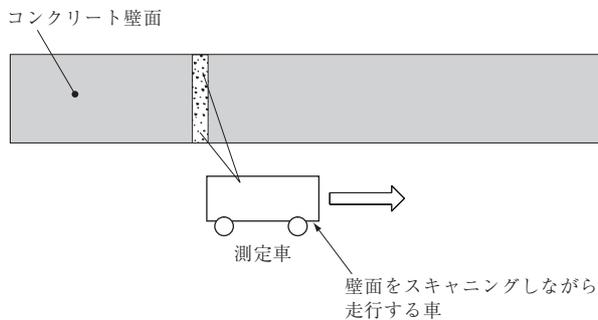
6. 結 言

マルチスペクトル法をコンクリート診断に適用するに当たり、以下のことが明らかになった。

- (1) 既往の研究では、コンクリート表面が中性化することによって塩化物イオン濃度の指標である 2260 nm が消滅する場合があるので、必ずしも十分ではない。一方、ケモメトリックス手法は、上記のピークが消滅したとしても、ほかのピークの相関を取ることによって塩化物イオン濃度を出力することが可能である。
- (2) ケモメトリックス手法は、濃度が未知の実構造物



第 12 図 壁面の測定イメージ
Fig. 12 Wall inspection (image)



第 13 図 車載による測定イメージ
Fig. 13 Inspection car (image)

参考文献

- (1) 金田尚志, 石川幸広, 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) 金田尚志, 石川幸広, 魚本健人 : 近赤外分光イメージングによるコンクリートの分析 コンクリート工学 第 44 号 第 4 号 2006 年 4 月 pp. 26 - 32
- (3) 財団法人エンジニアリング振興協会 : 構造物長寿命化高度メンテナンス技術開発 平成 18 年度戦略的技術開発報告書 2007 年 3 月
- (4) 戸田勝哉, 西土隆幸, 高岡啓吾, 福岡千枝, 倉田孝男 : マルチスペクトル法による中性化および塩害の診断手法に関する研究 土木学会第 61 回年次学術講演会 2006 年 9 月
- (5) 金田尚志 : マルチスペクトル法によるコンクリート劣化物質検出手法の開発 東京大学学位論文 2004 年 9 月

に対してもほかの構造物または試験体で測定した結果を検量線として用いることによって, 塩化物イオン濃度を出力することが可能である. よって, 本手法は, 材料の組成が分からない実構造物に対しても適用できる可能性が高い.

- (3) さらに精度を高めるための手順は, 検量線作成のための母集団を増やすことが考えられる. ケモメトリックス手法は, 測定する母集団の数を増やすことによって, 実構造物の測定精度が向上すると予想される.