1070540 町田雅彦・西浦正展・那須清吾 By Masahiko MACHIDA・Masanobu NISHIURA・Seigo NASU

1. はじめに

現在までに建設された港湾や橋梁などの社会資本 の多くは高度経済成長期に集中的に整備されたもの で、今後老朽化した構造物の数が加速度的に増加し ていくと考えられる。

成熟社会を迎え各自治体の公共事業費削減が進め られている今、構造物の現状の劣化状況を診断し、 将来どのように劣化していくのかを予測した上で安 価で効率的な維持管理手法を選定する必要がある。 劣化状況は環境条件により塩害・中性化・アルカリ 骨材反応・凍害と様々である。本研究においては鉄 筋コンクリート構造物の劣化要因である塩害を対象 とする。塩害による鉄筋コンクリートへの影響をシ ミュレーションにより導出することで、最適な予算 配分や補修時期・補修工法の選択が可能となると考 えられる。

塩害は、コンクリートに侵入した塩分中の塩化物 イオンが鉄筋を腐食させ膨張し、鉄筋の膨張に伴い、 コンクリートに引っ張り力がはたらきひび割れを生 じる。ひび割れが生じたコンクリートはますます腐 食物質(水、酸素、二酸化炭素、塩化物イオンなど) の侵入を許し、鉄筋の劣化、コンクリートの剥落へ と発展する。

安価で効率的な維持管理手法を構築するためには、 飛来塩分がどのような地域のどのような構造物に多 く付着するのかという様々なケースを熟知した上で 提案する必要があるが、その為には物理的劣化予測 システム及び入力すべき環境条件を知る必要がある。

一般に、硬化コンクリート中の塩分量は、コンク リートコアの採取、コンクリートドリルによる粉末 試料を用いて塩分分析により求められてきた。しか し、試料の作成・分析に多くの労力や時間・費用を 要するため、多くの構造物断面を対象とすることは 困難である。さらに上記の方法では計測面の強度低 下の恐れがある。分光放射計は安価で迅速かつ膨大 なデータの計測ができ、さらに現場でリアルタイム に塩化物イオン濃度を知ることが可能である。又、 非破壊なので構造物にダメージを与えることがない という特徴を持っている。 本研究では塩害シミュレーションを行う前の基礎 研究として、分光放射計を用いて塩化物イオンの特 定波長を導出し濃度を算出するためのモデル式を構 築した上で、実際のコンクリート構造物表面の塩化 物イオン濃度を計測可能とすることを目的としてい る。

### 2. 分光放射計を用いた計測とは

物質は、電磁波(光)を当てると特定の波長におい て光を反射・吸収する分光特性を持っている。そこ で、分光放射計はその性質を利用して、物体から反 射した光をセンサーで計測し、光の波長域ごとの分 光反射率を分析することでその物質に含まれる構成 成分や濃度を特定することを目的としている。分光 反射率とは、物体がどの波長の光をどれだけ反射す るのかを示したものであり以下の式より導出される。

## **分光反射率**= 供試体の放射輝度 白色板の放射輝度

計測には、アメリカの ASD 社 (Analytical Spectral Devices, Inc.) 製の Field Spec PRO という分光反射計を使用した。この分光放射計は、350 ~2500nm と広い波長域を 0.1 秒で高速スキャンニングでき、連続波長をリアルタイムに表示することが可能である。

この分光放射計は、輝度だけでなく反射率も計測 することができるが、時間変化や連続で計測し続け た際に生じる誤差の原因を検証するために輝度を計 測して分析を行った。

また光源には、計測する 350-2500nm での発光特 性が高く、全波長域において安定して輝度が計測で きるハロゲンランプを使用した。

表	2-1	:	分光放射計の仕	:様
---	-----	---	---------	----

Field Spec Pro FR		
350-2500 nm		
3nm@700nm		
30nm@1400&2100nm		
1.4nm@350-1050nm		
2nm@1000-2500nm		
100ミリ秒		
±1nm		

## 3. 室内実験計測手順

分光放射計を用いて塩化物イオン濃度を計測する ための計測方法と精度検証を以下に記す。

### (1) モデル式構築

a) 塩分濃度が異なる 9 種類のモルタルテストピ ースを作製

塩化物イオン濃度の変化に比例して特有の波長に 対する反射率の変化が見られると考えられるので、 土木学会コンクリート標準示方書のコンクリート表 面塩化物イオン濃度と鉄筋の腐食限界濃度を想定し て無混入から飛沫帯とされるCI-濃度 0~13.0 kg/m<sup>3</sup> となるように塩化ナトリウムを混入した。

表 3-1: 塩化ナトリウム混入量と塩化物イオン濃度

CI濃度(kg/m <sup>3</sup> )	CI濃度(%)	NaCI混入量(g/1.5L)
無混入	0.0	0.000
0.6	0.0278	1.483
1.2	0.0556	2.966
1.5	0.0695	3.708
2	0.0926	4.944
3	0.1389	7.415
4.5	0.2082	11.123
9	0.4155	22.246
13	0.5990	32.134

表 3-2: コンクリート表面における塩化物イオン 濃度(kg/m<sup>3</sup>)

志计性	海岸 カ	腐食				
ポ冻市	汀線付近	0.1	0.3	0.5	1.0	光生限界
13.0	9.0	4.5	3.0	2.0	1.5	1.2

d) 試薬試験により粉体試料の中に含まれる塩化 物イオン濃度を計測

後述する分光反射率と塩化物イオン濃度との関係 モデル式により分光放射計で計測した濃度と実際の 濃度の整合性を確認するため、予めモルタルテスト ピースをコンクリートカッターにより切断した際に 採取した粉体を濃度毎に試薬試験によって計測した。

計測には、ダイアインスツルメンツ社の自動滴定 装置 GT100 を使用した。この機械は以下の反応よ り消費された硝酸銀から、サンプル中の塩化物イオ ン量を計測するというものである。GT100の結果は 全体の重量比で表れるため、単位体積当りに含まれ る塩化物イオン量に換算する必要がある。

 $AgNO_3 + NaCl \rightarrow AgCl + NaNo_3$ 

結果は目標値とほぼ同じ値を確認することが出来 た。目標値より高い値・低い値が確認できるが、切 断面における塩化物イオン濃度を計測しているため 濃度が不均一だという事が原因として考えられる。 又、濃度が高い箇所は、細骨材やセメントの中に元々 含まれていた塩分の影響だと考えられる。今後この 数値を使いモデル式を構築していく。

表 3-3: 試薬試験の結果(kg/m<sup>3</sup>)

目標値	0.0	0.6	1.2	1.5	2.0	3.0	4.5	9.0	13.0
実際の値	0.1	0.7	1.1	1.2	2.1	2.7	3.9	8.1	12.1
誤差	-0.1	-0.1	0.1	0.3	-0.1	0.3	0.6	0.9	0.9

e)分光放射計によりモルタルテストピース 側面を計測

分光放射計で対象物を計測する手順は、まず分光 反射率の分母となる白色板の輝度を計測。次に、対 象物を計測する。

対象物の計測を行う際は、計測面に対し、センサ ーの角度が 45 度ということから、モルタル表面の 凹凸と濃度のムラによる影響を排除するために 90 度ずつ回転させながら行い、最終的に 4 方向の値を 平均するようにした。

## (2) 精度検証

分光放射計の精度を検証するために、本体とコン タクトプローブの電源を点けた直後から白色板の同 じ箇所を連続で 5000 回計測した。(図 3-1 参照)

この結果、時間依存による精度変化が確認できた。 300回と2000回付近で不連続なデータが確認できる。そして約2500回までは輝度が下がっていき、 その後安定するという傾向が確認できる。

これらは機械の暖機がされていない為であると考 える。そこで1時間20分暖機した後に対象物を計 測することにした。



図 3-1: 白色板連続 5000 回計測データ

# 4.特定波長から塩化物イオンの濃度を算出するためのモデル式の提案

本章では、モルタルテストピース側面の計測デー タから塩化物イオンの特定波長を推定し、濃度を算 出するためのモデル式の提案までを記す。

# (1) モルタル供試体の反射率と波長の関係分析

反射率からは塩化物イオンの特定波長を断定

する有用な相関は確認できなかった。 これは、供試体表面の色合いや凹凸が反映され

ているためと考えられる。(図 4-1 参照)



図 4-1: 塩分濃度が異なる供試体と反射率の関係

## (2) モルタル供試体の分光反射率の微分値と 波長の関係分析

供試体表面の色合いや凹凸の影響を排除するため に微分値をとり、傾きにより特定波長を推定するこ とにした。

結果、以下の2種類の波長域で塩分濃度と反射率の微分値に有用な相関を確認することができた。

- 1. 2233nm
- 2. 2234nm



図 4-2: 塩分濃度が異なる供試体と反射率の微分値 関係

## (3) 塩化物イオンの特定波長の推定・モデル 式構築

(2) で確認できた 2 種類の波長域のうち、
2234nm において塩化物イオン濃度と反射率の微分値間に最も高い相関関係が確認できた。そこで、
2234nm を塩化物イオンの特定波長として選定し、以下のモデル式を導出した。

相関係数 R<sup>2</sup>=0.98

$$Y = 3.0000 \times 10^7 x^2 + 2851.8x + 0.4555$$

Y=塩化物イオン濃度(kg/m<sup>3</sup>) x = 反射率の微分値



図 4-3:2234nm における反射率の微分値と塩化物 イオン濃度の関係

## 5. 現場計測

本章では現場計測で得られたデータに基づき室内 実験で得られたモデル式により塩化物イオン濃度を 推定するとともに、物理的手法(試薬試験)により 直接得られた塩化物イオン濃度との整合性を検証す る。また現場における計測及び推定上の問題点の検 出・解決を図る。

今回の計測は、高知県安芸市の"赤の橋"にて行 い海側から1桁目・5桁目の表と裏の合計4箇所を 計測した。

- (1) 現場計測手順
- グラインダーで構造物表面を削る(計測面 の汚れを除去)
- 2. 分光放射計により計測

グラインダーで研磨した面の中央を分光放射 計により計測する。

#### (2) モデル式との整合性の検証

室内実験により得られたモデル式と現場計測の値 の整合性を確認するために以下の検証を行った。

a) 粉体試料の濃度測定

グラインダーで表面を削った際に採取した粉体 を用いて室内実験と同じく自動滴定装置 GT100 で 塩化物イオン濃度の測定を行った。単位体積当りの 塩化物イオン量を導出する際には実構造物の配合を 知る必要があるため、竣工当時の時代背景と粉体に 含まれる水分量を調査することで配合を推定した。

b) 分光放射計で計測したデータ分析

その結果、実際の粉体の濃度とモデル式による計 算値には誤差が生じた。(表 5-1、図 5-1 参照)

原因としては、室内実験での計測面はモルタルテ ストピース側面であるが、テストピースのサイズが 4×4×16cm と小さいため現場の計測面と同じ面 積・深さの粉体を採取するのは困難であったため、 コンクリートカッターにより切断し採取した粉体の 塩化物イオン濃度をモデル式構築時に使用した。

上記の粉体には細骨材が含まれているが、実際に は骨材の中に塩化物イオンは侵入しない。そのため 分光放射計で計測した側面のセメントペースト部分 の結果は実際より濃度が高く出ていると考えられる。 そこで、モルタル部分における細骨材面積とセメン トペースト面積の比より実際の濃度を導出した。(図 5-2 参照)

さらに現場計測において、採取した粉体はセメン トペーストであるが計側面はモルタルである。既往 の研究においてコンクリート表面から約 1.2mm ま では塩化物イオン濃度が変化しないということから、 構造物表面とグラインダーで研磨した後の計測面の セメントペースト部分の濃度は同様と考えられる。 そこで、前述したモルタルテストピースと同様の考 え方で計測面の塩化物イオン濃度を導出した。(図 5-3 参照)

## 表 5-1:粉体濃度とモデル式による 計算値の比較(kg/m<sup>3</sup>)

計測場所	粉体濃度	計算値	誤差
1桁目(海側)	4.2	0.4	3.8
1桁目(山側)	3.9	0.6	3.3
5桁目(海側)	3.5	0.6	2.9
5桁目(山側)	3.2	0.4	2.8



図 5-1:モデル式と現場計測データ 1



図 5-2:モデル式と現場計測データ 2



図 5-3:モデル式と現場計測データ 3

## (4)現場における計測及び推定上の問題点と解決方法

現場においてはコンタクトプローブの固定が最大 の重要点である。なぜならセンサーを少しでも動か すと受光角度が変化し輝度が上下することで正確な 値を計測することが困難なためである。室内実験で は、計測対象が比較的小さなものだったため対象物 の上から固定することができた。しかし、実際の構 造物においては困難である。そこで本研究ではコン タクトプローブの固定に長方形のプラスチックを使 用した。

#### 6. 考察と今後

以上より、分光放射計を用いて塩化物イオン濃度 を算出するためのモデル式を構築し、実際のコンク リート構造物表面の塩化物イオン濃度を計測可能と する検証ができた。

今後として、今回は現場計測において濃度の高い 箇所のデータ数が不足していたため、より多くのデ ータを計測することでモデル式の精度検証を行い実 用的であるか確認していく必要がある。

また、今回のように表面が汚れている場合等でも計 測可能であるか検証する必要があると考える。

### 参考文献

1) 金田尚志,魚木健人:マルチスペクトル法を用い たコンクリート表面の塩化物量の推定,土木学会第 58 回年次学術講演会(平成 15 年 9 月)