# 論文 電磁波による塩化物イオン量推定手法を用いた塩害の劣化進行予測 に関する研究

野嶋潤一郎\*1·池田 大樹\*2·内田 真未\*3·溝渕 利明\*4

要旨:本研究では、電磁波を用いた塩化物イオン量推定の基礎実験として、塩化ナトリウム水溶液を媒質とした場合の、導電率の変化に伴う振幅値の減衰を検討した。また、実構造物を対象に塩化物イオン量の推定 を行い、かぶり間の平均塩化物イオン量、鉄筋位置における塩化物イオン量推定の推定精度や実用性の検討 を行った。結果として、塩化ナトリウム濃度が高くなるにつれて導電性に変化が生じ、振幅値が小さくなる 傾向を示した。電磁波によって推定したかぶり間の平均塩化物イオン量推定値と、化学分析によって測定し た塩化物イオン量分析値の範囲がほぼ一致し、本手法の塩化物イオン量推定の実用性を示した。 キーワード:非破壊検査、電磁波、塩化物イオン量

#### 1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の劣化要因のひとつに塩害が 挙げられる。塩害は、塩化物イオンがコンクリート中に 浸透することによって鋼材が腐食、膨張し、ひび割れが 発生する現象であり、劣化が進行するとかぶりコンクリ ートの剥落など,構造物の耐久性能を損なう要因となる。 現在、塩害によるコンクリートの劣化を評価する手法と して,実構造物から試料を採取して化学分析を行い,深 さごとの塩化物イオン量を測定する方法が用いられてい る。この手法を用いると、鉄筋近傍のコンクリートの塩 化物イオン量を把握することが可能であるが、試料採取 部の塩化物イオン量しか把握することができないため, 大規模な土木構造物を対象とする場合、潜伏期、進展期 に鉄筋腐食部を特定することは難しい。そこで、実構造 物からの試料採取、化学分析に代わる手法のひとつとし て、非破壊検査がある。非破壊検査でコンクリート中の 塩化物イオンを測定することができれば、実構造物に損 傷を与えることなく、より簡易に劣化部を予測すること ができる。筆者らは、これまでに電磁波を用いてコンク リート表面から鉄筋位置までの平均塩化物イオン量を推 定することが可能であることを報告している<sup>1)~9)</sup>。電磁 波による非破壊検査では,大規模な部材において広範囲

の推定を行うことが可能である。 本研究では、電磁波を用いた塩化物イオン量推定にお ける基礎実験として、塩化ナトリウム水溶液とコンクリ ート供試体を媒質とした場合の導電率の変化に伴う振幅 値の減衰を検討した。また、フィールド調査を3年間行 った実構造物において、塩化物イオン量の推定を行い、 推定精度や実用性の検討を行った。2012 年度調査を行っ た実構造物では,鉄筋位置における塩化物イオン量推定 を行い,かぶり間の平均塩化物イオン量,かぶりと合わ せた塩害の劣化進行予測の評価手法を検討した。

#### 2. 電磁波による塩化物イオン量推定法の概要

#### 2.1 電磁波とは

電磁波(electromagnetic wave)とは、電気と磁気の両方の 性質を持ち、電界 E と磁界 H が互いに直交して進む横波 の総称である。空気中を伝搬する電磁波の速度 c は、光 と同じ秒速 30 万 km であるから、周波数 f [Hz] に対す る波長  $\lambda_0$  [m] は次式で示される。

 $\lambda_0 = c \, / \, f$ 

 $c = 3 \times 10^8 [m/s]$ 

一般的に電磁波は、周波数と波長によって分類されることが多く、電波(radio wave)と光波(optical wave)、X線(X rays)、ガンマ線(gamma rays)などに分けられる。
表-1に、電磁波の分類表を示す。

名称	周波数	波長
電波	30GHz 以下	0.1mm 以上
赤外線	3THz – 380THz	$0.78 \mu m - 0.1 mm$
可視光線	380THz – 790THz	$0.38 \mu m - 0.78 \mu m$
紫外線	790THz – 100PHz	3nm – 0.38µm
X 線	$100PHz - 10^4PHz$	30pm – 3nm
ガンマ線	10 <sup>4</sup> PHz 以上	30pm 以下

表-1 電磁波の分類表

本研究で取り扱う周波数帯は、厚さ 10cm 程度のコン クリートかぶりの鉄筋反射波を用いることから、電磁波

\*1 法政大学大学院デザイン工学研究科都市環境デザイン工学専攻 博士課程 (正会員)
\*2 法政大学大学院デザイン工学研究科都市環境デザイン工学専攻 修士課程 (会員外)
\*3 法政大学デザイン工学部都市環境デザイン工学科 (会員外)
\*4 法政大学デザイン工学部都市環境デザイン工学科教授 博士(工学) (正会員)

の到達深さおよび分解能を考慮して電波の周波数帯に該 当する 0.3~2.3GHz を適用している。

#### 2.2 電磁波の特性

電磁波の基本的な特性については、電磁気学における マクスウェルの方程式(Maxwell's equation)で以下のとお り示されている。

div $D = \rho$	(	(1)
div $\mathbf{D} = \boldsymbol{\rho}$		(1)

rot $\mathbf{E} = -\partial \mathbf{B}/\partial \mathbf{t}$	()	2)	

- $\operatorname{div} \mathbf{B} = 0 \tag{3}$
- $\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{i} + \partial \mathbf{D} / \partial \mathbf{t} \tag{4}$

D: 電束密度(C/m<sup>2</sup>) E: 電界(V/m) ρ: 電荷密度 (C/m<sup>3</sup>) B: 磁束密度(T) H: 磁界(A/m) i: 電流 密度(A/m<sup>2</sup>)

- 式(1)~(4)より、電磁波の特性として以下のことがいえる。
  - ① 電荷があれば、そこから電界が発散する・・・(1)
  - ②磁荷は存在しないから、磁界の発散はない・・・(3)
  - ③回転する磁界をつくるものは、電流と変化する電界 である・・・(4)
  - ④回転する電界をつくるものは、磁流はないので、変 化する磁界だけである・・・(2)

以上のことから,電磁波は電界 E,磁界 H が時間的に 変化して空間あるいは物質の中を伝搬する波動であり, 電場が磁場を発生させ磁場が電場を発生させるという相 互関係を有することが分かる。

#### 2.3 媒質中における電磁波の減衰

電磁波の特性の一つとして,真空あるいは空気中であ れば無損失伝搬するが,媒質が電磁波を減衰する特性を 有している場合は損失を受けながら伝搬するという特性 が挙げられる。なお,電磁波的にみた物質の材料定数は, 誘電率  $\epsilon$  と透磁率  $\mu$  で示される。

電磁波が単一角周波数  $\omega$  で,正弦振動をしている場合 の一次元波動方程式を仮定すると、電波的に損失をもつ 材料では、誘電率、透磁率とも複素数となり、複素誘電 率  $\epsilon$ ,複素透磁率  $\mu$  となる。また、真空の誘電率  $\epsilon_0$ ,ある いは透磁率  $\mu_0$  との比も複素数となり、複素比誘電率  $\epsilon_r$ 複素比透磁率  $\mu_c$  となり、次式で示される。

ε <sub>r</sub>	$=\varepsilon_r - j\varepsilon_r$ "	(5)

 $\mu_r = \mu_r' - j\mu_r'' \tag{6}$ 

ここで,実数部の  $\epsilon_r$ 'および  $\mu_r$ 'は,一般的に言われて いる比誘電率  $\epsilon_r$ および比透磁率  $\mu_r$ に相当する項である。 また,虚数部の  $\epsilon_r$ "および  $\mu_r$ "は,それぞれ誘電損失およ び磁性損失に起因する項である。すなわち,損失媒質を 電波が伝搬すると,これら虚数部の項によって電波は減 衰を受けることになる。この電波減衰を受けることは, 電波エネルギーが熱エネルギーに変換されることを意味 する。損失材料中での z 方向に進む平面波の式を,以下 に示す。

$E = E_0 \times exp(j\omega_t - r_z)$	(7)

 $H = E_0 / Zc \times exp(j\omega t - r_z)$ (8)

ここで, r は伝搬定数, Zc は特性インピーダンスであり, 複素数である。式(5)~(8)より, 次式が示される。

 $\dot{\mathbf{r}} = \alpha + \mathbf{j}\beta$  $= \mathbf{j}\beta_0(\mathbf{\epsilon}_r \times \mathbf{\mu}_r)^{0.5}$ (9)

$$\dot{Z}c = (\mu/\epsilon)^{0.5} = Z_0 (\mu_r/\epsilon_r)^{0.5}$$
(10)

この式で示される伝搬定数 r の虚数部  $\beta$  は,位相定数 であるが、実数部  $\alpha$  は減衰実数と呼ばれ、電磁波が伝搬 するにつれて吸収され、しだいに減衰していくことを示 す項となる。すなわち、電界の大きさ |  $\dot{E}$  | は次式のよ うに示され、z 方向に電磁波が進むにつれて指数関数的 にその大きさが減少し、電磁波が減衰することが分かる。

•	•	
E   =	$=  E_0  \times exp(-\alpha z)$	(11)

$\alpha \approx \sigma/2 \times (\mu/\epsilon)^{0.5}$	(	12	)
	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		

α: 減衰実数 σ: 導電率(S/m;=1/Ωm)

一方,減衰実数は式(12)で表され、コンクリートの電気的性質に支配されるが、コンクリートの透磁率は電界が一定であることから変化しないとされており、従って減衰特性は誘電率と導電率によって変化する<sup>2)</sup>。ただし、塩分濃度による比誘電率は真水と海水の比誘電率が81であることから変化はないと考えられるが、導電率は変化するものされており、例えば、真水で10<sup>-4</sup>(S/m)、海水で4(S/m)程度の値が示されている<sup>2)</sup>。

以上のことから,媒質となるコンクリート中に塩化物 イオンが存在すると導電率が変化し電磁波の減衰特性に 影響を及ぼすことが分かる。ただし,コンクリートの含 水状態によって比誘電率および導電率が変化するため, 含水率の影響も考慮する必要があると推察される。

#### 2.4 基礎実験による検証

塩化物イオンの混入により,電磁波の減衰がどのよう に確認されるか,塩化ナトリウム水溶液を媒質とした室 内試験を実施した。電磁波の測定に電磁波レーダを用い, 電磁波の減衰を振幅値で観測した。表-2に,塩化ナト リウム水溶液の水準を,図-1に実験の概要図を示す。





塩化ナトリウム水溶液を媒質とした場合の電磁波波形 を図-2に示す。図-2より,塩化ナトリウム濃度が高く なるにつれて振幅値が小さくなる傾向を示した。この結 果より,媒質中に塩化物イオンが多く存在することによ り電磁波が伝播する際の導電率が異なり,振幅値に変化 が生じたと考えられる。この特性を応用することで,実 構造物を対象とした場合においても電磁波測定による振 幅値からコンクリート中の塩化物イオン量を推定できる 可能性がある。

### 3. 塩化物イオン量推定手法の実構造物への適用

#### 3.1 フィールド調査概要

電磁波を用いたコンクリート中の塩化物イオン量推 定手法の実用性を検討するため、実構造物を対象とした フィールド調査を実施した。調査を実施した構造物に用 いられたコンクリートのセメント種類及び水セメント比, 竣工年数を表-3に示す。実構造物Aにおいては、2010 ~2012年にかけて3年間調査を実施した。実構造物Bに おいては、2012年に調査を行った。測定器の仕様を表-4に示す。

#### 3.2 塩化物イオン量推定方法

実構造物の測定面を対象とし,鉄筋に直行するように 電磁波距離測定を行った。波形解析を行い,測定面全体 の鉄筋のかぶりと振幅値を算出した。また,測定面から コア試料を採取し,電位差滴定法により表面から 10mm ごとの塩化物イオン量を測定した。目的変数にかぶり間 の平均塩化物イオン量(以降平均塩化物イオン量と記 す。),説明変数に振幅値,かぶりを用い,重回帰分析に よって塩化物イオン量推定式を算出し,塩化物イオン量 推定式を用いて,測定面全体の塩化物イオン量の推定を 行った。

#### 4. フィールド調査結果

#### 4.1 実構造物 A の結果

#### (1) 塩化物イオン量分析結果

桟橋スラブから採取した試料の見かけの拡散係数,表 面塩化物イオン量を表-5に示す。表-5より,表面塩化 物イオン量は試料採取箇所により異なるが,同一面から 採取した試料の塩分分析結果から算出した見かけの拡散 係数は,調査年によらずほぼ同等の値を示した。桟橋ス ラブから 2012 年に採取した試料の塩化物イオン量分布 を図-3に示す。分析結果から,Fick の拡散方程式の解 (13)を用いて回帰分析した結果を赤線で示す。

表 — 3	構造物に用いられたコンクリ-	-トの条件

名称	セメント種	水セメント 比(%)	竣工年
実構造物 A	Ν	55	1988
実構造物 B	FA	53	1980



図-2 振幅値の減衰比較

$$C(x,t) = C_{os} \left\{ 1 - erf\left(\frac{x}{2\sqrt{D_{aps} \cdot t}}\right) \right\} \quad (13)$$

- x : 暴露面から全塩化物イオン量濃度を測定した箇 所までの距離(cm)
- t : 供用期間(年)
- C(x,t):距離 x(mm),供用期間 t(年)の塩化物イオン濃度 (kg/m<sup>3</sup>)

Cos : 表面における全塩化物イオン濃度(kg/m<sup>3</sup>)

D<sub>aps</sub> : 見かけの塩化物イオン拡散係数(cm<sup>2</sup>/年)

erf : 誤差関数

表-4 電磁波測定器 仕様

項目	仕様	
周波数帯域	300~2300kHz	
計測モード	距離測定	
測定可能深さ	5~300mm	
深さ方向分解能	浅モード:1mm 深モード:2mm	
水平方向距離分解能	2.5mm	

32 0	表	€-5	調査年こ	ごとの塩ケ	分析結果	(桟橋ス	ラ	ブ	)
------	---	-----	------	-------	------	------	---	---	---

調査年	見かけの 拡散係数 (cm <sup>2</sup> /year)	表面塩化物 イオン量 (kg/m <sup>3</sup> )	材齢 (year)
2010	0.32	4.0	23
2011	0.37	3.4	24
2012	0.29	4.2	25

# (2) 平均塩化物イオン量推定

測定面の塩化物イオン量を面的に把握するため,目的 変数をかぶり間の平均塩化物イオン量,説明変数を振幅 値,かぶりとして重回帰分析を行い,塩化物イオン量推 定式(14)を算出した。 (14)

重相関係数 0.825

Cc:平均塩化物イオン量推定値(kg/m<sup>3</sup>)

Cc = 0.001 a - 0.008 c + 1.569

a:振幅値 c:かぶり(mm)

重回帰分析の結果,推定式(14)の重相関係数は0.825 となり、比較的高い相関が得られる結果となった。推定 式(2)を用いて算出した平均塩化物イオン量推定値と、平 均塩化物イオン量分析値の関係を図-4に示す。この結 果より、同一部材の測定面を対象とした場合、同じ推定 式を用いて比較的高い精度で塩化物イオン量の推定がで きることを示した。これは、調査年が異なっても含水率 や比誘電率がほぼ同じ値であるためだと考えられる. 桟 橋スラブにおける塩化物イオン量推定分布を図-5,塩化 物イオン量推定値のヒストグラムを図-6に示す。なお, 鉄筋の反射波を用いたため、図-5における色分布は格 子状に示されている。図-5,6によると、桟橋スラブに おいては塩化物イオン量1~2(kg/m3)の範囲が広く、ほぼ 一様に分布する結果となった。これは、図-4の桟橋ス ラブから採取した試料の塩化物イオン量分析値の範囲と ほぼ一致しており,本手法を用いた塩化物イオン量推定 の実用性を示す結果となった。

#### 4.2 実構造物 B の結果

## (1) 塩化物イオン量分析結果

実構造物Bの天端から採取した試料の塩化物イオン量 分布を図-7に示す。分析結果から、Fickの拡散方程式 の解(13)を用いて回帰分析した結果を赤線で示す。実構 造物Bの天端から採取した試料の塩化物イオン量と見か けの拡散係数は、実構造物Aのスラブから採取した試料 の値より大きくなる結果となった。これは、実構造物B の方が供用年数が長く、試料採取箇所が飛沫帯に近い場 所に位置していたためと考えられる。

#### (2) 平均塩化物イオン量推定

測定面の塩化物イオン量を面的に把握するため、目的 変数を平均塩化物イオン量,説明変数を振幅値,かぶり として重回帰分析を行い,塩化物イオン量推定式(15)を 算出した。







図-7 塩化物イオン量分布(天端)

Cc = -0.002 a + -0.076 c + 7.804(15)重相関係数 0.930Cc : 平均塩化物イオン量推定値(kg/m³)a : 振幅値 c: かぶり(mm)

重回帰分析の結果,推定式(15)の重相関係数は0.930 となり,比較的高い相関が得られる結果となった。推定 式(15)を用いて算出した平均塩化物イオン量推定値と, 平均塩化物イオン量分析値の関係を図-8に示す。天端 における平均塩化物イオン量推定分布を図-9に示す。 (3)鉄筋位置における塩化物イオン量推定

本手法を用いることで、かぶり間の平均塩化物イオン 量を推定できる可能性を示したが,塩害による劣化進行, 鉄筋腐食の有無を予測するためには、鉄筋位置における 塩化物イオン量を推定することが必要となる。本手法で 推定する平均塩化物イオン量の概念図を図-10 に示す。 平均塩化物イオン量は、総塩化物イオン量をかぶりで除 した値を示し、塩化物イオン量推定式を用いることで、 電磁波レーダで振幅値とかぶりを測定した全箇所におい て推定することが可能である。また測定面において試料 を採取し、Fick の拡散方程式の解を用いて算出した見か けの拡散係数を測定面全体でほぼ一定と仮定することで, 表面塩化物イオン量と鉄筋位置における塩化物イオン量 を逆算することが可能である。鉄筋位置における塩化物 イオン量分布を図-11に示す。また、天端におけるかぶ りのヒストグラムを図-12に示す。図-12において,各 鉄筋位置における塩化物イオン量推定値を右軸に示す。



図-10 平均塩化物イオン量の概念図



図-8 塩化物イオン量推定値と分析値の関係



図-9 平均塩化物イオン量推定分布(天端)



図-11 鉄筋位置における塩化物イオン量分布(天端)

図-9,11の結果,塩化物イオン量が多く含まれている箇所はほぼ一致する結果となった。また,鉄筋位置における塩化物イオン量推定値が,鋼材の腐食限界量である1.2(kg/m<sup>3</sup>)以上を示した範囲のかぶりは57~83mm であった。図-12によると,この57~83mmの範囲は測定面全体においてかぶりが浅い範囲であり,80mmより浅い範囲で塩化物イオン量が1.2(kg/m<sup>3</sup>)以上になっていることがわかる。一方,かぶりが100mm以上になると,0.5(kg/m<sup>3</sup>)以下となる。これらの結果から,本手法を用いることにより,電磁波本来の用途であるかぶりを広範囲

に調査できることに加え,平均塩化物イオン量,鉄筋位 置における塩化物イオン量の推定結果と合わせて,塩害 の劣化進行や鉄筋腐食範囲の推定を行うことができる可 能性を示した。

#### 5. まとめ

本研究では、電磁波を用いた塩化物イオン量推定にお ける基礎実験として、塩化ナトリウム水溶液を媒質とし た場合の導電率の変化に伴う振幅値の減衰を検討した。 また、実構造物を対象に塩化物イオン量の推定を行い、 平均塩化物イオン量、鉄筋位置における塩化物イオン量 推定の推定精度や実用性の検討を行った。結果を以下に 示す。

- (1) 塩化ナトリウム水溶液を媒質とした場合,塩化ナト リウム濃度が高くなるにつれて導電性に変化が生 じ,振幅値が小さくなる傾向を示した。
- (2) 3年間調査を行った桟橋スラブにおいて,電磁波に よって推定した平均塩化物イオン量推定値と,化学 分析によって測定した塩化物イオン量分析値の範 囲がほぼ一致し,本手法を用いた塩化物イオン量推 定の実用性を示した。
- (3) 電磁波レーダで推定したかぶりと平均塩化物イオン量,試料採取によって求めた見かけの拡散係数を用いることにより,鉄筋位置における塩化物イオン量を逆算して求めることが可能である。

本研究の結果より、電磁波を用いてコンクリート中の 塩化物イオン量を推定できる可能性を示した。しかし、 フィールド調査における電磁波測定では比誘電率を一定 の値を用いており、実際は測定箇所や部材によって異な ると考えられる。式(12)に示すように、比誘電率は減衰 実数ならびに振幅値に影響があるため、今後は測定時の 含水率、比誘電率を塩化物イオン量推定に考慮する必要 性がある。また、鉄筋位置における塩化物イオン量を推 定可能であることを示したが、試料採取箇所と測定面全 体で見かけの拡散係数がほぼ同等と仮定した上の推定で あるため、今後のフィールド調査で塩化物イオン量推定 値の実証、見かけの拡散係数の経時的な把握を行い、検 討を進めていく予定である。

#### 参考文献

- 満淵利明,新井淳一,須田久美子,斎藤健一:電磁 波による鉄筋コンクリート中の塩分測定に関する 一考察,第24回コンクリート工学講演会,No.1, pp.1509-1514,2002.6
- 2) 新井淳一, 溝淵利明, 坂田昇, 須田久美子: 非破壊



図-12 かぶりのヒストグラム(天端)

による鉄筋コンクリート中の塩分測定に関する研 究,コンクリート工学年次論文集, Vol.24, №1, 2002

- 3) 藤本恭一,新井淳一,須田久美子,溝渕利明:電磁 波による鉄筋コンクリート中の塩分測定方法にお ける影響要因に関する一考察,コンクリート工学年 次論文集,Vol.25, No.1,pp.1667-1672,2003.07
- 4) 神谷武智,須田久美子,坂田昇,溝渕利明:電磁波 を用いた鉄筋コンクリート中の塩化物量評価に関 する一考察,コンクリート工学年次論文集,Vol.25, №1,2003
- 5) 中込甲斐, 溝渕利明, 新開一生, 坂田昇, 須田久美 子, 林大介:電磁波を用いた塩分量推定における実 構造物への適用に関する一考察, 土木学会第 60 回 年次学術講演会, 第V部門, Vol.5, pp.1181-1182, 2005.09
- Toshiaki MIZOBUCHI, Study on Estimation of Chloride Content in Surface Division of Concrete Using Impedance Method, Advanced testing of fresh cementitious materials, 2006.08
- 7) Toshiaki MIZOBUCHI, Kousuke YOKOZEKI and Ryoichi ASHIZAWA," Applicability of Estimation of Chloride Content using Electromagnetic Wave in coastal Reinforced Concrete Structures", Proceeding of the 5<sup>th</sup> International Conference on Concrete under Severe Conditions of Environment and Loading, pp.499-512, 2007.06
- T. Mizobuchi, K. Yokozeki and R. ashizawa, Applicability of Estimation of Chloride Content in Cover concrete using Electromagnetic Wave and Impedance Method, on Site Assessment of Concrete, Masonry and Timber, 2008.09
- 9) 田中峻・松土雄紀・小俣貴洋・溝渕利明:非破壊に よる鉄筋コンクリート中の塩分量に関する研究,コ ンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, 2009