

電磁波を用いた塩化物イオン量推定のための電磁波減衰特性に関する研究

法政大学 大学院	正会員	○野嶋 潤一郎
法政大学 大学院	学生会員	内田 真未
法政大学 大学院	非会員	池田 大樹
法政大学	正会員	溝渕 利明

1. 研究目的

鉄筋コンクリート構造物の劣化現象のひとつである塩害は、環境条件によって早く進行する場合があります、かぶりコンクリートの剥落や鋼材断面積の減少によって耐力低下に至る場合があります。塩害の評価方法は、構造物からコアを採取し、化学分析を行うことによってコンクリート中の塩化物イオン量を求める方法が一般的である。しかし、コア採取による評価方法は、その測定点のみの評価であること、構造物に弱点部を生じさせる場合があること、また同一箇所での継続的な塩化物イオン量評価が行えないなどの課題を有している。

そこで本研究では、非破壊試験の一つである電磁波を用いたコンクリート内の塩化物イオン量推定技術¹⁾の適用範囲拡大ならびに高精度化を目的とし、電磁気学の理論を元に減衰特性シミュレーションの基礎検討を実施した。

2. 電磁波とは

2.1 電磁波の分類

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。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への適用を考えていることから、電磁波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。

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

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

$$\text{div } \mathbf{B} = 0 \quad (3)$$

$$\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{i} + \partial \mathbf{D} / \partial t \quad (4)$$

D: 電束密度(C/m²), E: 電界(V/m), ρ: 電荷密度(C/m³), B: 磁束密度(T), H: 磁界(A/m), i: 電流密度(A/m²)

式(1)～(4)より、電磁波の特性について述べる。

- 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持っていることが分かる。

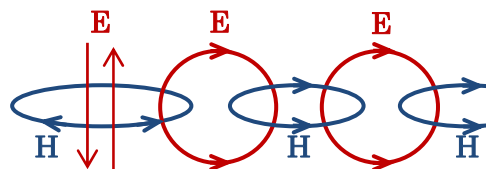


図1 電磁波伝搬のイメージ

3. 媒質中における電磁波の減衰

3.1 電磁波の減衰について

電磁波は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、損失しながら伝搬する。なお、電磁波減衰における物質の材料定数は、誘電率εと透磁率μで示される。電磁波が単一角周波数ωで正弦振動をしている場合、1次元波動方程式として仮定すると、ベクトル波動方程式を用いて式(5)が導かれる。なお、時間因子として交流理論と同じ複素記号法を用いている。

$$\nabla^2 \mathbf{E} + k^2 \mathbf{E} = 0 \quad (5)$$

$$k^2 = \omega^2 \epsilon \mu - j \omega \mu \sigma \quad (6)$$

ここで、k は伝搬定数と呼ばれており、σは導電率(S/m)を示す。一般に伝搬定数kが複素数である場合には、実数部と虚数部に分けて、

$$k = \sqrt{\omega^2 \epsilon \sigma - j \omega \mu \sigma} = \beta - j \alpha \quad (\alpha > 0, \beta > 0) \quad (7)$$

とおくと、αとβは次のようになる。

$$\alpha = \omega \sqrt{\epsilon \mu / 2} \left\{ \sqrt{1 + \sigma^2 / \omega^2 \epsilon^2} - 1 \right\}^{1/2} \quad (8)$$

$$\beta = \omega \sqrt{\epsilon \mu / 2} \left\{ \sqrt{1 + \sigma^2 / \omega^2 \epsilon^2} + 1 \right\}^{1/2} \quad (9)$$

ここで、x方向に偏波をもつ平面波が、z方向に伝搬

しているとき、 α と β の項で表すと、

$$E = \hat{x} E_0 \exp(-jkz) = E_0 \exp(-\alpha z - j\beta z) \quad (10)$$

式(10)で示される伝搬定数 k の虚数部 β は位相定数であるが、実数部 α は減衰定数と呼ばれ、電磁波が伝搬するにつれて次第に減衰していくことを示す項となる。なお、電磁波は、周波数によって媒質性質が変化する特性を有している。 $\sigma/\omega\epsilon$ の大きさによって、減衰定数および位相定数は以下に示すとおり異なる数式によって導かれることとなる。

$$\sigma/\omega\epsilon < 1$$

$$\alpha \cong (\sigma/2)\sqrt{\mu/\epsilon}, \quad \beta \cong \omega\sqrt{\mu\epsilon} \quad (11)$$

$$\sigma/\omega\epsilon > 1$$

$$\alpha \cong \sqrt{\omega\sigma\mu/2}, \quad \beta \cong \sqrt{\omega\sigma\mu/2} \quad (12)$$

3.2 塩化物イオンと電磁波減衰の関係

海水の主要なイオンとして、塩化物イオン(Cl^-)とナトリウムイオン(Na^+)があげられ、この2つのイオンで海水の約85%を占める割合となる。一方、電界の基本特性として、電気力線は+の点電荷から発生し、-の点電荷に収束することが言われている。従って、電磁波によって発生した電界は、伝搬媒質にマイナスイオンが介在する場合、そのエネルギーは減衰することが考えられる。以上のことから、媒質となるコンクリート中に海水由来の塩化物イオン(Cl^-)が存在した場合、電磁波が減衰しながら伝搬することとなる。

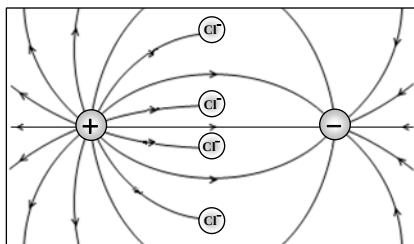


図2 マイナスイオンによる電気力線の減衰

4. 電磁波減衰シミュレーション

波動方程式から求められる減衰定数および実験で使用する塩化ナトリウム水溶液の実測導電率を用いて、電磁波減衰シミュレーションを行った。シミュレーションの条件として電磁波の周波数を2.3GHzとし、z方向の振幅の減衰状態を再現した。また、シミュレーションの結果(図3)を検証するために、塩化ナトリウム水溶液を媒質とした電磁波減衰確認試験(図4)ならびにシミュレーションとの比較結果を示す(図5)。同結果より、電磁波は、塩化物イオン量が多くなるにつれ減衰することがシミュレーションおよび基礎実験の両方で確認できた。

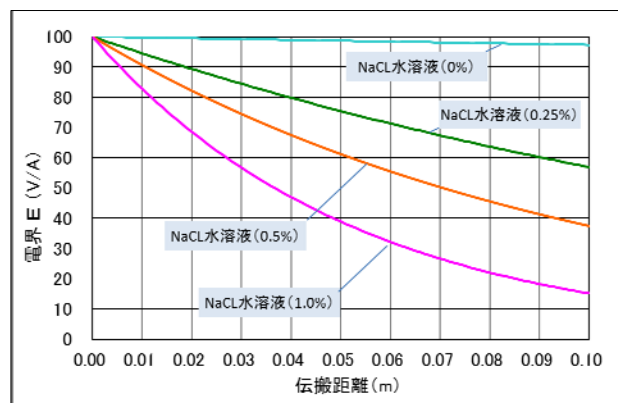


図3 電磁波減衰シミュレーション結果

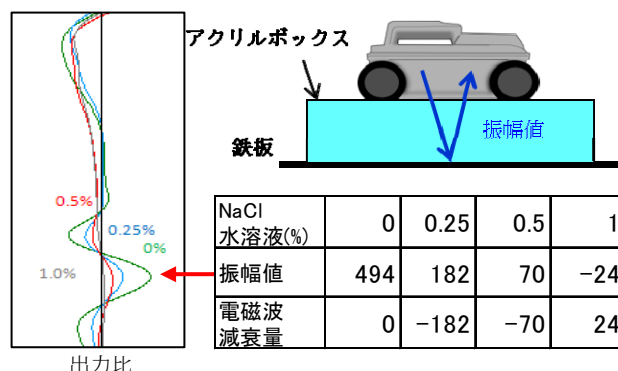


図4 電磁波減衰程度の確認実験結果

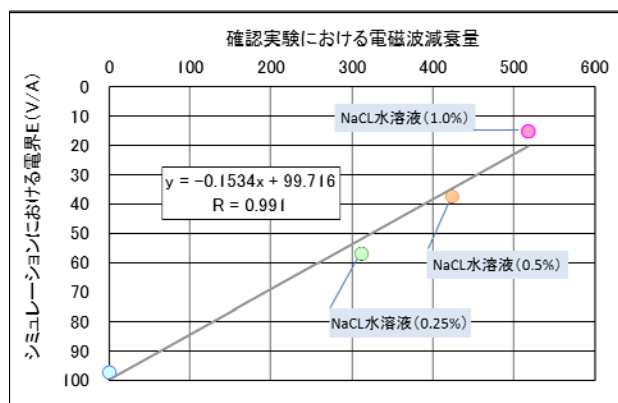


図5 シミュレーションと実験結果の比較 (Z=0.1m)

5. まとめ

本研究で得られた結果より、電磁波による塩化物イオン量推定の基礎理論が確認できた。また、本論では記載できなかったが、コンクリート中の塩化物イオンについても同様の結果が得られている。今後の研究課題としては、①位相定数を含めた高精度電磁波減衰シミュレーションの実施、②湿気移動解析による含水状態の評価、③経年コンクリートの細孔径変化による影響評価などがあげられる。

参考文献

1) 溝渕利明, 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