

論文 施工条件等を考慮した電磁波による塩化物イオン量推定に関する検討

池田 大樹^{*1}・村田 和哉^{*1}・野嶋潤一郎^{*2}・溝渕 利明^{*3}

要旨：本研究は、電磁波を用いた塩化物イオン量推定の実験的検討として、実構造物を模擬した供試体を作製し、塩化物イオン混入量やかぶり深さの違い、質量減少率の変化が電磁波測定値に及ぼす影響を考察した。また、振幅値、比誘電率、かぶり、水セメント比を用いて重回帰分析を行い、塩化物イオン量推定式の精度の向上を検討するとともに、非破壊検査としての実用性を検討した。結果として、振幅値の推定関数 $f'(\varepsilon, c, W/C)$ を算出し、振幅値の解析値 f との比 (f/f') を用い、また質量減少率を用いて重回帰分析を行うことで、比較的高い精度で塩化物イオン量推定を行うことができた。

キーワード：電磁波、非破壊検査、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、目視によって劣化度が判断できない段階で腐食部を特定することは難しい。また、試料採取は実構造物からコア抜きをする必要があり、実構造物に局所的な損傷を与える。また、採取した試料を切断、粉碎し化学分析を行うためには多くの時間や費用がかかり、容易に行うことができないなどの問題点を有している。

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特定することができる。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^{1)~10)}。電磁波による非破壊検査では、鉄筋近傍の塩化物イオン量を把握することは難しいが、鉄筋位置までの平均塩化物イオン量を把握することが可能であるので、大規模な部材において広範囲に渡って推定を行うこ

とが可能である。しかし、電磁波によるコンクリート中の塩化物イオン量推定において、電磁波による測定値がコンクリートの配合や含水率、鉄筋のかぶり深さなどの影響を大きく受けることが明らかとなっている^{1)~10)}。そこで、実構造物において塩化物イオン量を精度良く推定するためには、これらの要因が電磁波の測定値に及ぼす影響を評価する必要がある。

本研究では、実構造物を模擬した供試体を作製し、塩化物イオン混入量やかぶり深さの違い、質量減少率が電磁波の測定値に及ぼす影響を検討した。また、振幅値、比誘電率、かぶり、水セメント比を用いて重回帰分析を行い、算出した塩化物イオン量推定式の精度の向上を検討するとともに、非破壊検査としての実用性を検討した。

2. 実験の概要

2.1 電磁波試験の概要

電磁波法とは、電磁波の放射から受信に要した伝播時間より、埋設物の配置や距離を求める方法である。電磁波レーダから放射した電磁波は電氣的性質(比誘電率、導電率)の異なる物体(鉄筋、埋設管など)で反射し、アンテナに受信される。測定器の仕様を表-1に示す。

表-1 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
かぶり深度	5~300mm
かぶり分解能	浅モード:1mm 深モード:2mm
水平方向距離分解能	2.5mm

*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 (正会員)

*2 開発設計コンサルタント 土木事業本部 水力・河川部 (正会員)

*3 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)

2.2 供試体の概要

本研究では、電磁波測定を実構造物で行う際と同様の距離測定(測定器をコンクリート表面上で走査させて測定する手法)で検討するために、高さ 200mm×幅 200mm×長さ 800mm の鉄筋コンクリート供試体を 13 体作製した。供試体の概要を図-1 に示す。セメントは、海洋構造物でよく使用される高炉セメント B 種(以後、BB と称す)とし、比較用として普通ポルトランドセメント(以後、N と称す)を使用したものを 1 体作製した。土木学会コンクリート示方書によると、塩化物イオンの浸透による鋼材の腐食発生限界量は、一般的に $1.2 \sim 2.4(\text{kg}/\text{m}^3)$ の範囲とされている。この範囲を参考に、コンクリート中に存在する塩化物イオン量の違いが振幅値に与える影響を評価するために、供試体に混合する塩化物イオン量を 0, 1.2, 2.4, $4.8(\text{kg}/\text{m}^3)$ として検討を行った。また、鉄筋のかぶり深さと振幅値の関係性を考察するために、1 体の供試体につき鉄筋を 3 本埋設し、それぞれのかぶり深さを 50mm, 70mm, 100mm とした。供試体は、打込み 7 日後で脱枠し、以後は温度 20℃、湿度 60% の恒温恒湿室で養生を行った。本試験に用いた供試体の要因と水準を表-2 に示すとともに、各供試体の配合を表-3 に示す。

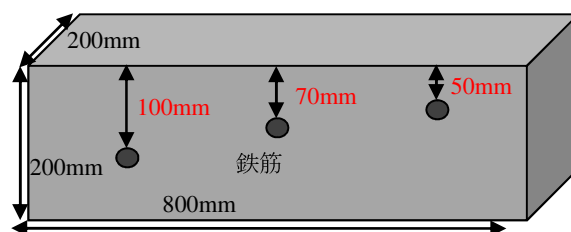


図-1 供試体概要図

表-2 供試体の要因と水準

要因	水準			
W/C(%)	45	50	55	50
セメント種	BB			N
塩化物イオン量 (kg/m^3)	0	1.2	2.4	4.8
かぶり(mm)	50	70	100	

※Nは比較用とし、W/C=50%、 $\text{Cl}^- = 1.2(\text{kg}/\text{m}^3)$ のみ作成

2.3 電磁波測定、波形解析方法

電磁波測定は打込み 7 日後から 1 週間に 1 回、質量測定は、材齢 28 日までは 1 週間に 1 回、以後は 2 週間に 1 回質量変化がなくなるまで行った。電磁波測定は距離測定とし、測定器を供試体上面の端に静置した後、他端まで走査させて行った。電磁波測定の様子を写真-1 に示す。供試体で電磁波測定を行った波形の一例を図-2 に示す。



写真-1 電磁波測定の様子

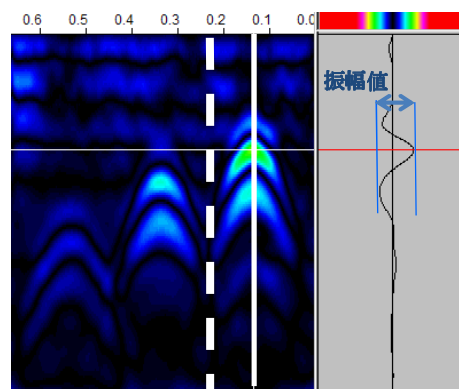


図-2 電磁波 測定波形

図-2 は、かぶり 50, 70, 100mm の鉄筋からの反射波を示したものである。電磁波測定の無筋部分の波形(図-2, 点線部)を減算処理することで、コンクリート表面部や供試体底面、端面からの反射波の影響を除き、鉄筋のみの反射の振幅値の最大値を測定した(図-2, 実線部)。以下、これを振幅値、または振幅値の解析値 f と記す。また、波形の鉄筋部の頂点の深さを実際のかぶりと一致させることで、各測定時のコンクリートの比誘電率を逆算して求めた。

表-3 コンクリートの示方配合

粗骨材の 最大寸法 (mm)	セメント の種類	スランブ (cm)	水セメント 比 (%)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m^3)				
						水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	AE 減水剤 ($\text{ml}/\text{c}=100\text{kg}$)
20	N	12	50	4.5	43	160	320	772	1051	250
20	BB	12	45	4.5	42	160	356	738	1045	250
20	BB	12	50	4.5	43	160	320	769	1045	250
20	BB	12	55	4.5	44	160	291	798	1040	250

3. 実験結果および考察

3.1 質量と振幅値の経時変化

振幅値の経時変化の一例として、水セメント比 45%、塩化物イオン量 0(kg/m³)のかぶり深さごとの振幅値の変化を図-3 に示す。振幅値は、材齢の経過に伴って緩やかに増加する傾向を示した。これは、電磁波の振幅値が若材齢時のセメントの水和反応の進行に伴い、自由水が消費されたことに起因するものと、コンクリート表面からの水分の逸散によるものと思われる。一方、材齢 80 日経過後に関して、若干のばらつきはあるが、ほぼ増加が見られなかったことから、水和に伴う自由水の消費及び水分逸散による影響が少なくなったものと考えられる。

供試体の質量減少比と材齢の関係の一例を図-4 に示す。図-4 から、質量減少比の変化は 0.01 以下であり、更に材齢 75 日以降は質量減少の程度が小さいと思われる。そこで、十分材齢が経過した材齢 120 日以降の測定値に着目し、以下の考察を進めることとする。

3.2 塩化物イオンと振幅値の関係

振幅値と供試体の塩化物イオン混入量の関係について、一例として水セメント比が 50%、材齢 120 日における測定結果を図-5 に示す。これまでの研究成果より、鉄筋のかぶりが深いほど電磁波の伝播距離が長くなるために振幅が減衰し、値が小さくなる傾向を示すことが報告されている^{1)~10)}。図-5 より、本研究においても同様の傾向がみられた。また、各かぶりにおいて、供試体の塩化物イオン混入量が多いほど振幅値が小さくなる結果となった。これは、供試体内に塩化物イオンが多く存在するほど、導電性が良くなるために、振幅値が小さくなったためと考えられる。

3.3 塩化物イオン量の推定

塩化物イオン量の推定には、振幅値や比誘電率、かぶり、水セメント比が影響することがこれまでの研究成果で明らかとなっている^{1)~10)}。特に振幅値は塩化物イオン量だけでなく、かぶりや水セメント比の影響を受けるため、塩化物イオン量を含まない供試体を対象とし、目的変数を振幅値、説明変数を比誘電率、かぶり、水セメント比として重回帰分析を行った。ただし、振幅値はかぶりや水セメント比によって変化することから、重回帰式において相互の影響を加味した乗法の形で示すため、10 を底とした対数値を用いることとした。なお、振幅値と比誘電率は材齢 56 日～120 日間の測定値の平均値を用いた。算出した重回帰式と重相関係数を以下に示す。

$$f' \left(\varepsilon, c, \frac{W}{C} \right) = \varepsilon^{-1.94} \times c^{-1.77} \times \left(\frac{W}{C} \right)^{0.247} \times 10^{7.566} \quad (1)$$

重回帰係数：0.999

$f'(\varepsilon, c, W/C)$ ：振幅値(推定値)

ε ：比誘電率 c ：かぶり W/C ：水セメント比

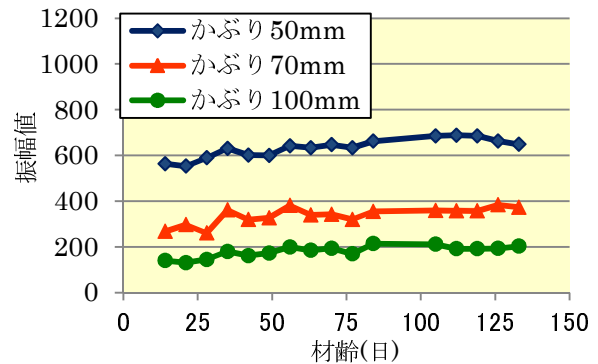


図-3 振幅値と材齢の関係
(高炉 B 種 W/C：45%，Cl⁻=0 kg/m³)

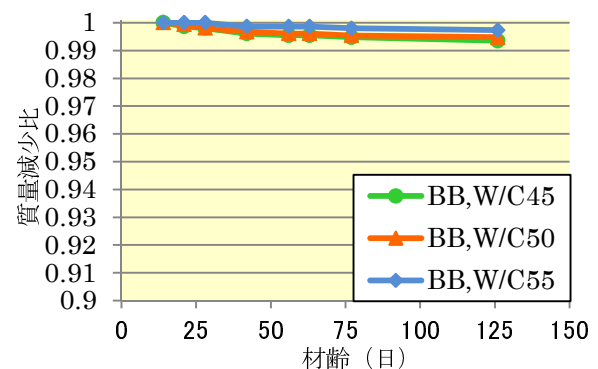


図-4 質量減少比と材齢の関係
(塩化物イオン量 0kg/m³)

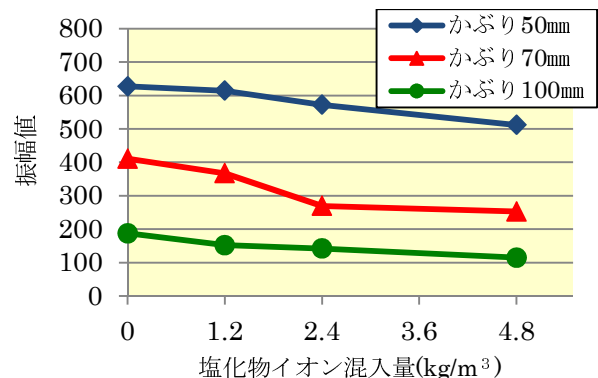


図-5 振幅値と塩化物イオン添加量の関係 (W/C=50%)

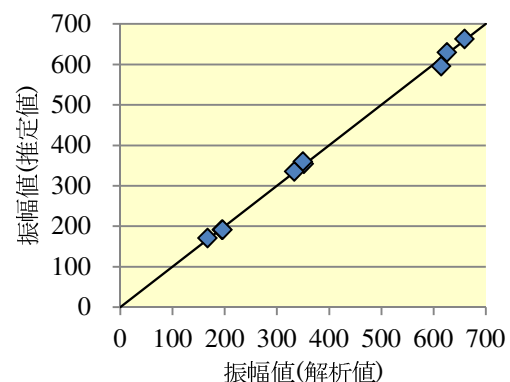


図-6 振幅値の解析値と推定値の関係

重回帰分析の結果、重相関係数は 0.999 となり、高い相関関係を示した。式(1)によって算出した振幅値の推定値と振幅値の解析値の関係を図-6 に示す。ここで、 $f'(\epsilon, c, W/C)$ は比誘電率とかぶり、水セメント比の関数となり、この結果から、比誘電率とかぶり、水セメント比を用いることで、塩化物イオン量を含まない場合の振幅値をある程度推定することが可能であるといえる。

次に、塩化物イオン量 0~4.8 (kg/m³) の供試体に関して、式(1)を適用して振幅値の推定値 $f'(\epsilon, c, W/C)$ を算出し、振幅値の解析値 f との比 (f/f') を算出した。解析値 f と推定値 f' の比 (f/f') と塩化物イオン量の関係を図-7 示す。図-7 より、 (f/f') は塩化物イオン量が多いほど小さくなる傾向を示し、その低減の程度はかぶりが深いほど大きい結果となった。この結果より、塩化物イオン量推定を行う際に、 (f/f') をパラメーターとして用いることで、塩化物イオン量の増加に伴う振幅値の低減を考慮に入れることができる可能性があると考えられる。

目的変数に塩化物イオン混入量、説明変数に (f/f') 、比誘電率、かぶり、水セメント比のそれぞれ 10 を底とした対数値を用いて、重回帰分析を行った。重回帰式と重相関係数を以下に示す。

$$C_{cl} = \log_{10} \left[8.12 \times 10^{-13} \times \left\{ f/f' \right\}^{-22.35} \cdot (\epsilon)^{28.18} \cdot (c)^{-5.774} \cdot (W/C)^{-1.949} \right] \quad (2)$$

重相関係数：0.893

C_{cl} ：塩化物イオン量推定値(kg/m³)

(f/f') ：振幅値の解析値と推定値の比 ϵ ：比誘電率

c ：かぶり(mm) W/C ：水セメント比

重回帰分析の結果、重相関係数は 0.893 となり、比較的高い相関関係を示した。塩化物イオン量推定値と塩化物イオン混入量の関係を図-8 に示す。この結果より、式(1)において塩化物イオン量を含まない場合の比誘電率、かぶり、水セメント比を用いて振幅値の推定値 $f'(\epsilon, c, W/C)$ を算出し、振幅値の解析値 f との比 (f/f') を用いることで、比較的高い精度で塩化物イオン量推定を行うことができることを示した。

3.4 質量減少率を考慮した塩化物イオン量推定

電磁波による測定値に影響を与える要因として、コンクリートの含水率もまた一つの影響因子といえる。本項では、十分に材齢が経過した供試体 4 体(材齢 120 日)を 2 週間水中浸漬させて水分を供給し、水上げ後から電磁波測定を行い、質量減少率と電磁波測定値の関係性について検討した。対象とした供試体を表-4 に示す。

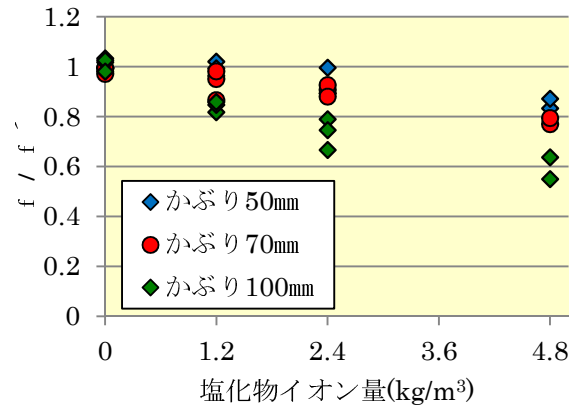


図-7 振幅値とかぶり逆数の関係

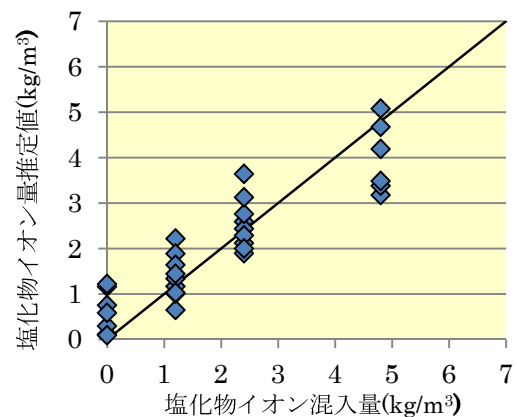


図-8 塩化物イオン量推定値と混入量の関係

表-4 水中養生させた供試体(4体)

要因	水準
W/C(%)	55
セメント種	BB
塩化物イオン量(kg/m ³)	0 1.2 2.4 4.8
かぶり(mm)	50 70 100

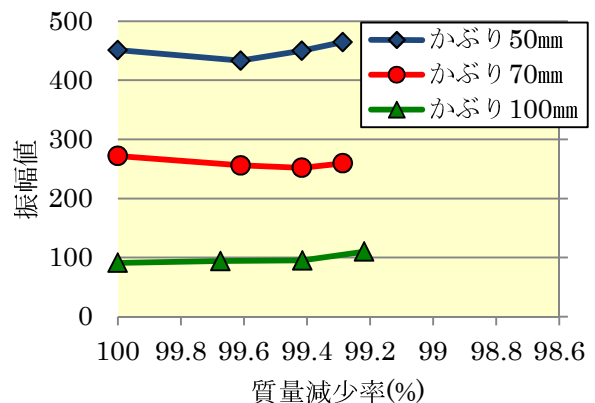


図-9 振幅値と質量減少率の関係

水上げ後、隔週で4回測定を行った。水上げした日の質量を100%とし、塩化物イオン混入量1.2 (kg/m³)の供試体における振幅値と質量減少率の関係を図-9に示す。水上げ後、供試体の水分の逸散に伴い、振幅値は緩やかに増加する傾向を示した。比誘電率と質量減少率の関係を図-10に示す。図-10より、ばらつきはあるものの比誘電率は徐々に減少していった。これは供試体内部の自由水が減少したためと思われる。

塩化物イオン量推定を行う際に、水上げ後の4週分の振幅値、比誘電率、質量減少率を対象データとした。式(1)より、塩化物イオン量を含まない場合の振幅値の推定値 $f'(\epsilon, c, W/C)$ 、及び振幅値の解析値 f と振幅値の推定値 $f'(\epsilon, c, W/C)$ の比 (f/f') を算出した。

目的変数を塩化物イオン混入量、説明変数に (f/f') 、比誘電率、かぶり、質量減少率をそれぞれ10を底とした対数値を用いて重回帰分析を行った。重回帰式と重回帰係数を以下に示す。

$$C_{cl} = \log_{10} \left[7.259 \times 10^{68} \times \left\{ f/f' \right\}^{-18.33} \cdot (\epsilon)^{35.67} \cdot (c)^{-7.143} \cdot (mc)^{-43.8} \right] \quad (3)$$

重回帰係数：0.910

C_{cl} ：塩化物イオン量推定値(kg/m³)

(f/f') ：振幅値の解析値と推定値の比

ϵ ：比誘電率 c ：かぶり(mm)

mc ：質量減少率(%)

重回帰分析の結果、重回帰係数は0.910となり、比較的高い相関関係を示した。塩化物イオン量推定値と塩化物イオン混入量の関係を図-11に示す。この結果より、質量減少率の変化により、各週の振幅値は異なるものの、重回帰分析において比誘電率と質量減少率を考慮し、振幅値の推定値 $f'(\epsilon, c, W/C)$ と振幅値の解析値 f との比 (f/f') を用いることで、一定の精度で塩化物イオン量推定を行うことが可能と考えられる。

4. まとめ

本研究では、実構造物を模擬した供試体を作製し、塩化物イオン混入量やかぶり深さの違い、質量減少率の変化が電磁波の測定値に及ぼす影響を考察した。また、振幅値、比誘電率、かぶり、水セメント比を用いて重回帰分析を行い、算出した塩化物イオン量推定式の精度の向上を検討するとともに、非破壊検査としての実用性を検討した。本研究の結果を以下に示す。

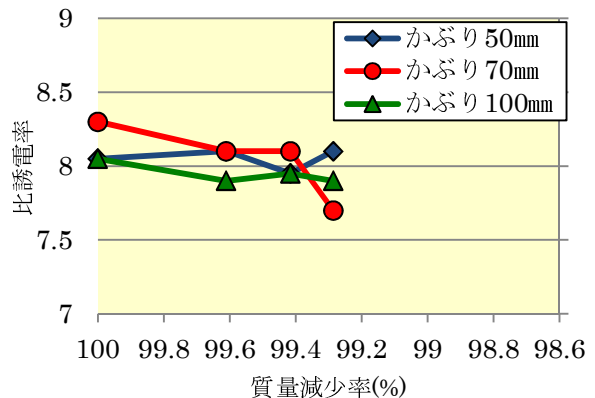


図-10 比誘電率と質量減少率の関係

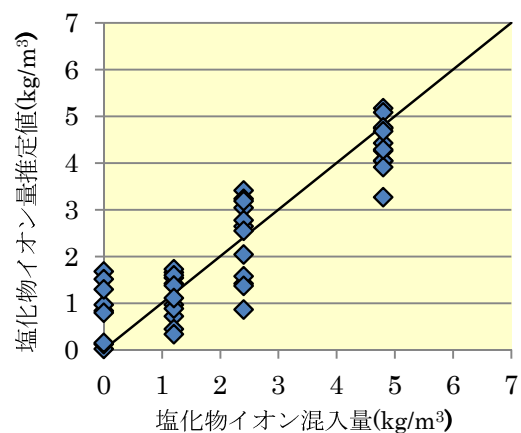


図-11 塩化物イオン量推定値と混入量の関係

- (1) 塩化物イオン量を含まない場合の比誘電率、かぶり、水セメント比を用いて振幅値の推定値 $f'(\epsilon, c, W/C)$ を算出し、振幅値の解析値 f との比 (f/f') を用いて重回帰分析を行うことで、ある程度の精度で塩化物イオン量推定を行うことが可能である。
- (2) 水中浸漬後の4回の電磁波測定において、質量減少率に伴って振幅値は異なるものの、重回帰分析において比誘電率と質量減少率を考慮に入れることで、一定の精度で塩化物イオン量推定を行うことが可能である。

本検討の結果より、振幅値の推定値 $f'(\epsilon, c, W/C)$ を算出し、振幅値の解析値 f との比 (f/f') を用いることで、塩化物イオン量やかぶりの影響による振幅値の低減率を考慮した推定式を算出することができたと考えられる。今後、実構造物においても適用が可能であるか検討を行っていく予定である。また、実構造物において、コンクリートの含水状態を含水率や比誘電率として考慮する必要があるが、含水状態の把握は難しく、比誘電率の逆算にはかぶりの実測値が必要であるため、現段階では適切な評価を行うことができていない。今後はこれらの問題

点を改善し、実構造物においても含水状態を考慮した推定式を適用できるよう、検討を進める予定である。

参考文献

- 1) 溝淵利明, 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) 藤本恭一, 新井淳一, 須田久美子, 溝淵利明: 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
- 3) 神谷武智, 須田久美子, 坂田昇, 溝淵利明: 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, 2005.09
- 4) 中込甲斐, 溝淵利明, 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
- 5) 佐竹伸康, 松本圭司, 小林伶史, 溝淵利明, 坂田昇, 須田久美子, 林大介: コンクリート表面部の測定法に関する考察, 土木学会第 60 回年次学術講演会, 第 V 部門, Vol.5, pp.1199-1200, 2005.09
- 6) 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, Kenzou WATANABE and Masanori HIRAISHI and Ryoichi ASHIZAWA, "Monitoring System of Chloride Content in Cover concrete using Electromagnetic Wave and Impedance Method", Proceedings of the 6th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures, pp.1865-1876, 2007.06
- 8) Toshiaki MIZOBUCHI, Kousuke YOKOZEKI, Kenzou WATANABE and Masanori HIRAISHI and Ryoichi ASHIZAWA, "Monitoring System of Chloride Content in Cover concrete using Electromagnetic Wave and Impedance Method", Proceedings of the 6th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures, pp.1865-1876, 2007.06
- 9) Toshiaki MIZOBUCHI, Kousuke YOKOZEKI and Ryoichi ASHIZAWA, "Applicability of Estimation of Chloride Content using Electromagnetic Wave in coastal Reinforced Concrete Structures", Proceeding of the 5th International Conference on Concrete under Severe Conditions of Environment and Loading, pp.499-512, 2007.06
- 10) 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