

論文 電磁波による塩分量推定における影響要因に関する検討

村田 和哉^{*1}・池田 大樹^{*1}・田中 峻^{*2}・溝渕 利明^{*3}

要旨：本研究は、電磁波によって推定される塩化物量に対して、コンクリート中の含水率の影響を極力除いた状態で、配合条件、施工条件の違いがどのように影響するかについて検討を行った。試験に用いた供試体は、硬化後十分吸水させ、さらに水分の逸散が生じないように封かんしたものを用いた。また、供試体は塩化物を練混ぜ時に混入させ、塩化物量既知の状態、水セメント比、鉄筋位置を変化させて電磁波測定を行った。その結果、電磁波によって推定される塩化物量に対して、水セメント比および鉄筋位置が及ぼす影響を見出すことができた。

キーワード：非破壊試験、塩化物量、電磁波、含水率

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の劣化現象には種々あるが、その中で塩害は環境条件によって早く進行する場合があります。特にコンクリート表面にひび割れが生じた場合には、鉄筋腐食が加速され、かぶりコンクリートの剥落や鋼材断面積の減少による耐力低下に至る場合があります。また、塩害の場合コンクリート表面にひび割れが生じるまではコンクリート内部での劣化の進行状況を確認することが難しく、ひび割れ発生後ではコンクリート構造物に大きな損傷がすでに生じている場合があることから、早期に塩害によるコンクリート内部の劣化状況を把握することが重要である。

従来、塩害による劣化状況を評価するためには、構造物からコアを採取し、深さ方向に一定の間隔で分割した試験体について化学分析を行い、鉄筋近傍でのその時点における塩化物イオン量を算定し、腐食発生限界濃度に達しているかどうか判断する必要がある。ただし、コアの採取は局所的ではあるが構造物に損傷を与え、また同一箇所による経時変化を見ることが難しいなどの課題を有している。

一方、非破壊試験でコンクリート内部の塩化物イオン量を求めることが可能となれば、構造物に損傷を与えることなく同一箇所での塩化物イオン量の経時変化を把握することが可能となる。筆者らは、これまでに電磁波を用いることで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)}。ただし、電磁波のみではコンクリート内部の塩化物イオン量の分布状態を把握することができず、鉄筋位置で塩化物イオン量が腐食発生限界に達しているかどうか推定することができないという課題を有している。また、電磁波による測定値はコンクリ

ート内部の含水率や配合条件、鉄筋位置などの影響を強く受けることがこれまでの研究で明らかとなっている^{1)~10)}。そこで、実構造物における測定精度向上のためには、各々の要因が電磁波の測定値にどのような影響を及ぼしているかを検討する必要がある。

本研究は、電磁波によって推定される塩化物量に対して、含水率の影響を極力除いた場合に、上記の要因がどのように影響しているのか検討を行った。供試体は、塩化物 (NaCl) を練混ぜ時に混入させ、塩化物量既知の状態、水セメント比、鉄筋位置を変化させて、各々の要因が電磁波の測定値に及ぼす影響についてとりまとめたものである。

2. 実験の概要

2.1 電磁波試験の概要

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、鉄骨、埋設管など) で反射し、アンテナに受信される。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、埋設物までの距離を求める方法である。電磁波測定は、表-1 に示す仕様器材を用いて行った。

本研究では、鉄筋および無筋のコンクリート供試体を用い、得られた波形から減算処理を行うことで、表面波

表-1 電磁波測定器仕様

項目	仕様
アンテナ周波数	1.0GHz
計測モード	時間, 距離測定
方式	インパルス方式
発信電圧	17Vp-p (50Ω 負荷時)
水平分解能	80mm

*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 法政大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (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)

やその他の反射波の影響を除き、鉄筋からの反射波のみを抽出した。電磁波測定の概要を図-1 に示し、減算処理の概要を図-2 に示す。図-2 において、左が鉄筋供試体での波形、中央が無筋供試体での波形、右が鉄筋供試体の波形から無筋供試体の波形を差し引いた波形である。また、電磁波による測定状況を写真-1 に示す。

2.2 供試体の概要

電磁波による測定値（振幅値、比誘電率）が、塩化物量や配合、鉄筋位置などによってどのように変化するか検討するための供試体を作製した。供試体は、図-3 に示すように高さ 100mm×幅 100mm×長さ 400mm とした。塩化物イオンの浸入による鋼材の腐食発生限界量は、一般的に 1.2~2.4kg/m³ の範囲とされている。この範囲を参考に、塩化物量 0, 1, 2, 3, 5, 10kg/m³ の 6 水準で実験を行った。なお、塩化物 (NaCl) は練混ぜ水に溶かして混入させた。また、鉄筋位置までの電磁波に対する鉄筋位置の影響を検討するために、鉄筋位置 50mm, 70mm, 無筋の供試体を作製した。無筋の供試体は底面に鉄板を敷くことで鉄筋位置 100mm の供試体とし、コンクリート面の上に置くことで減算処理用の供試体として用いた。水セメント比は海洋構造物を想定し、35, 45, 55% の 3 水準とした。本試験の要因と水準を表-2 に、試験に用いた供試体の配合を表-3 に示す。

2.3 養生方法

供試体は、打込み後 28 日間水中養生を行った。28 日以降は、含水率の影響を極力少なくするために、水分の逸散が生じないように封かん養生を行った。封かん養生時の供試体は、全面にエポキシを塗布した場合、測定面のエポキシ塗布による測定値への影響が生じる可能性があるため、図-4 に示すように供試体の両側面および両端面にエポキシを塗布した。その後供試体に十分吸水させ、ビニルラップを供試体全体に巻き、20℃の恒温室内で養生した。封かん養生の様子を写真-2 に示す。

2.4 実験方法

電磁波測定は、要因別に計 54 体のコンクリート供試体を作製し、測定を行った。測定は、同一塩化物量の供試体ごとに行い、鉄筋コンクリート供試体の電磁波による測定値から、無筋コンクリートの測定値を差し引くことで鉄筋からの反射波のみを抽出した。また、水中養生中の測定は測定日の前日に供試体の水上げを行い、表面を乾燥させた状態で電磁波測定を行った。

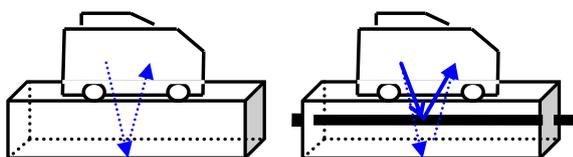


図-1 電磁波測定概要

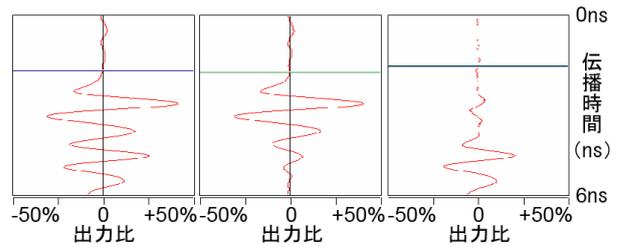


図-2 減算処理概要

(左：鉄筋あり，中央：鉄筋無し，右：減算処理後)



写真-1 電磁波による測定状況

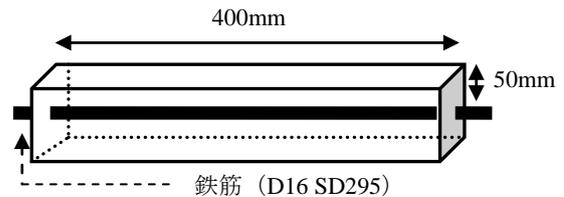


図-3 供試体概要 (例) 鉄筋位置 50mm

表-2 要因と水準

要因	水準
塩化物量 (kg/m ³)	0, 1, 2, 3, 5, 10
鉄筋位置 (mm)	50, 70, 100
水セメント比 (%)	35, 45, 55

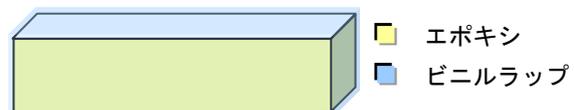


図-4 封かん養生の概要



写真-2 封かん養生中の供試体

表-3 コンクリート配合

組骨材の最大寸法 (mm)	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	高性能 AE 減水剤 (ml/c=100kg)
20	12	35	4.5	40	160	456	673	1037	1000
20	12	45	4.5	42	160	356	741	1053	250
20	12	55	4.5	44	160	290	800	1048	250

3. 実験結果および考察

3.1 電磁波による測定値の経時変化

水セメント比 45%, 塩化物イオン量 0kg/m³ の鉄筋位置ごとの振幅値の経時変化を振幅値の測定結果の一例として図-5 に示す。なお、封かん養生の処理を行った期間を斜線部分で示す。図-5 から、振幅値は材齢の経過に伴って大きくなる傾向を示した。ただし、材齢の経過に伴い、増加の割合が比較的小さくなる結果となった。これは、セメントの水和反応が進行したためと考えられる。また、鉄筋位置と振幅値の関係は、これまでの研究成果より鉄筋位置が深いほど電磁波が減衰し、振幅値が小さくなる傾向を示すことが報告されている^{1)~10)}。本測定結果は、鉄筋位置 50mm と 70mm においては既往の研究と同様の傾向を示したものの、鉄筋位置 100mm については推定される振幅値より大きな値となった。これは、鉄筋位置 100mm の測定に鉄板を用いたために、鉄筋と異なり、電磁波をほぼ全反射したことから、既往の研究成果と異なった結果になったものと考えられる。

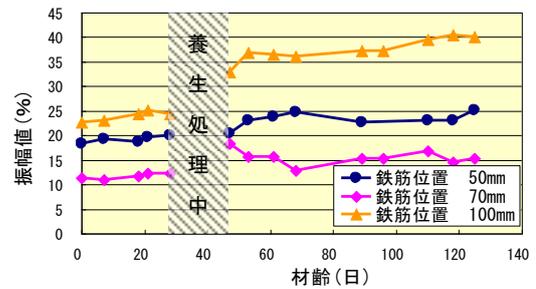


図-5 振幅値と材齢との関係 (水セメント比: 45%, 塩化物イオン量: 0 kg/m³ の場合)

水セメント比 45%, 塩化物イオン量 0kg/m³ の鉄筋位置ごとの比誘電率の経時変化を比誘電率測定結果の一例として図-6 に示す。なお、封かん養生の処理を行った期間を斜線部分で示す。図-6 から、一部測定値にばらつきはあるものの、比誘電率は計測開始時からほぼ一定の数値を示す結果となった。鉄筋位置によって比誘電率が異なっているのは、コンクリート内部の含水率が影響しているのではないかとと思われる。

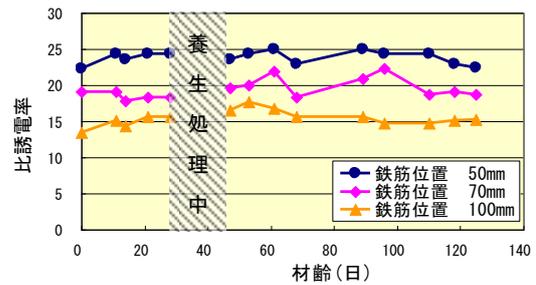


図-6 比誘電率と材齢との関係 (水セメント比: 45%, 塩化物イオン量: 0 kg/m³ の場合)

3.2 測定値における質量変化の影響

封かん養生開始時からの水セメント比ごとの質量変化率を図-7 に示す。図-7 から、封かん養生を行った場合でも、多少の質量減少が確認された。しかし、材齢の経過に伴い、質量変化率が小さくなっており、質量変化率-0.5%程度で安定した。この安定区間内を含水率の影響を極力除いた場合として電磁波測定を行った。図-7 において、水分影響がほとんどなくなり、振幅値と比誘電率が安定したと判断した地点を点線部に示す。

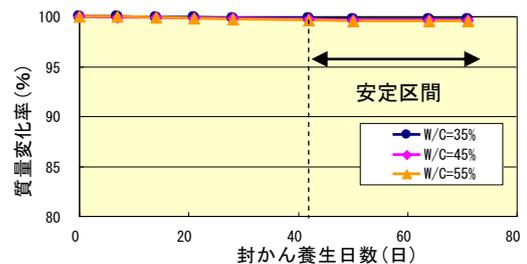


図-7 封かん養生開始時からの質量変化 (塩化物イオン量: 0 kg/m³, 鉄筋なしの場合)

3.3 塩化物イオン量が測定値に与える影響

点線部以降の区間で、コンクリート中の含水率の影響を極力除いた場合の電磁波測定を行った。

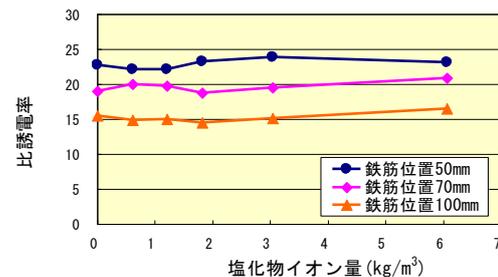


図-8 塩化物イオン量と比誘電率との関係 (水セメント比: 35%の場合)

一例として、水セメント比 35%における鉄筋位置ごとの塩化物イオン量と比誘電率の関係を図-8 に示す。ここで、塩化物イオン量とは、塩化物量(NaCl)における塩素イオンに相当する量を示すものである。図-8 から、塩化物イオン量と比誘電率の関係は、塩化物イオン量に関わらずほぼ一定の比誘電率を示す結果となった。

水セメント比 35%における鉄筋位置ごとの塩化物イオン量と振幅値の関係を図-9 に示す。図-9 から、振幅値は一部測定値にばらつきはあるものの、塩化物イオン量が増加するのに伴って減少する傾向を示した。ただし、測定値のばらつきは鉄筋位置 100mm の測定結果に比べ、鉄筋位置 50mm および 70mm の測定結果では大きい結果となった。これは、鉄筋位置 50mm および 70mm の測定は鉄筋位置 100mm の測定に用いた鉄板と異なり、鉄筋上での測定となっており、部分反射となったことが影響したためと思われる。したがって、本検討ではこれ以降鉄筋位置 50mm および 70mm について行うものとする。

3.4 塩化物イオン量の推定

図-9 における塩化物イオン量と振幅値との関係から、塩化物イオン量を逆数とすれば、振幅値と比例関係になるのではないかと推察した。その結果を図-10 に示す。図-10 から、鉄筋位置 50mm では明確な関係は見られなかったものの、鉄筋位置 70mm では塩化物イオン量の逆数と振幅値には、比例関係に近い傾向がみられた。そこで、各鉄筋位置での塩化物イオン量の逆数を目的変数とし、水セメント比および振幅値を説明変数として重回帰分析を行った。各鉄筋位置での塩化物イオン量の推定式を以下に示す。

鉄筋位置 50mm, 重相関係数 : 0.314

$$C_e = \frac{1}{0.0813\alpha + 0.0108W/C - 1.63} \quad (1)$$

鉄筋位置 70mm, 重相関係数 : 0.888

$$C_e = \frac{1}{0.200\alpha + 0.0247W/C - 3.59} \quad (2)$$

ここで、 C_e は塩化物イオン量 (kg/m^3)、 α は振幅値 (%), W/C は水セメント比 (%) である。

式(1)及び式(2)を用いて推定した塩化物イオン量と実際の塩化物イオン量とを比較した結果を図-11, 図-12 に示す。図-11 から、鉄筋位置 50mm においては塩化物イオン量の推定値と塩化物イオン量の混入値との間に相関関係は確認できなかった。しかし、図-12 から鉄筋位置 70mm においては、塩化物イオン量の推定値と塩化物イオン量の混入値との間に比較的高い相関関係が確認できた。

図-10 において、水セメント比の違いによる振幅値の差異がそれほど見られなかったことから、各塩化物イオン量に対して振幅値の平均値を求め平均振幅値 α^* とし

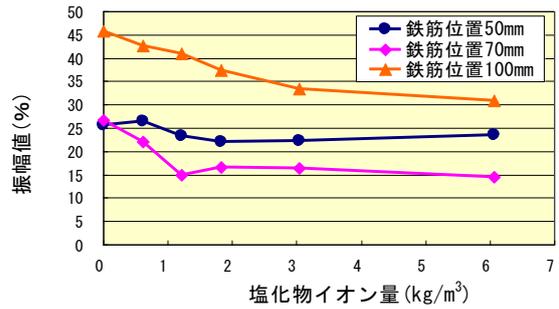


図-9 塩化物イオン量と振幅値との関係 (水セメント比 : 35%の場合)

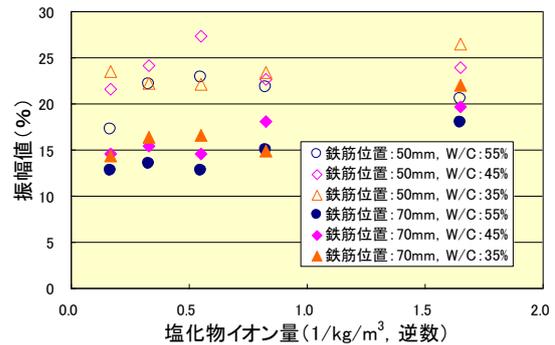


図-10 塩化物イオン量の逆数と振幅値との関係

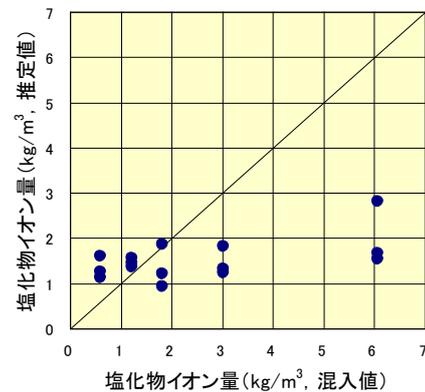


図-11 塩化物イオン量の設定値と推定値の比較 (鉄筋位置 50mm の場合)

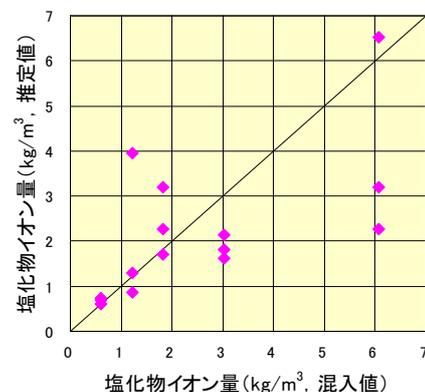


図-12 塩化物イオン量の設定値と推定値の比較 (鉄筋位置 70mm の場合)

た。塩化物イオン量の逆数と各水セメント比の平均振幅値 α^* について単回帰分析を行った。塩化物イオン量の逆数と平均振幅値との関係を図-13 および図-14 に示す。図-13 から、鉄筋位置 50mm の場合、塩化物イオン量の逆数と推定振幅値との間に高い相関関係はみられなかった。一方、鉄筋位置 70mm においては、図-14 に示すように塩化物イオン量の逆数と推定振幅値との間に比較的高い相関関係がみられた。これは、鉄筋位置 70mm の場合と比較して、鉄筋位置 50mm の場合は表面波の影響を大きく受け、測定値にばらつきが生じたことが考えられる。図-13 および図-14 に示す塩化物イオン量の逆数と平均振幅値との関係から求めた推定式を以下に示す。

鉄筋位置 50mm, 重相関係数 : 0.551

$$C_e = \frac{1}{0.251\alpha^* - 5.00} \quad (3)$$

鉄筋位置 70mm, 重相関係数 : 0.974

$$C_e = \frac{1}{0.240\alpha^* - 3.12} \quad (4)$$

ここで、 C_e は塩化物イオン量 (kg/m^3)、 α^* は平均振幅値 (%) である。

式(3)および式(4)を用いて推定した塩化物イオン量と実際に混入させた塩化物イオン量とを比較した結果を図-15 および図-16 に示す。図-15 および図-16 から、塩化物イオン量に対する平均振幅値による推定結果の重相関係数は鉄筋位置 50mm の場合で 0.551、鉄筋位置 70mm の場合で 0.974 となり、鉄筋位置 50mm の場合には水セメント比の影響を考慮しない場合でも、それほど高い推定結果は得られないものの、鉄筋位置 70mm の場合今回検討した範囲においては、特に水セメント比の影響を考慮しなければ比較的高い相関関係が得られる結果となった。実構造物でも水セメント比が明確でない場合があることから、そのような場合には式(4)に示したような振幅値のみで評価することも可能ではないと思われる。

4. まとめ

本研究では、電磁波によって推定される塩化物イオン量に対して、コンクリート中の含水率の影響を極力除いた状態で、配合条件、施工条件の違いがどのように影響するかについて検討を行った。今回の検討で得られた結果を以下に示す。

- 1) 比誘電率は、既往の研究と同様に、塩化物イオン量の変化の影響を受けることがないことを確認した。
- 2) 塩化物イオン量の逆数と振幅値にはばらつきはあるものの、ほぼ比例する傾向がみられた。
- 3) 鉄筋位置および水セメント比ごとで、振幅値と塩化

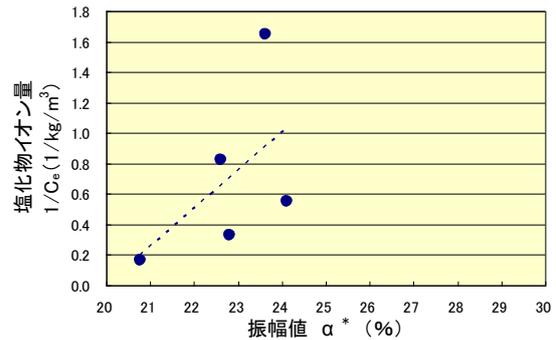


図-13 塩化物イオン量の逆数と振幅値との関係 (鉄筋位置 50mm の場合)

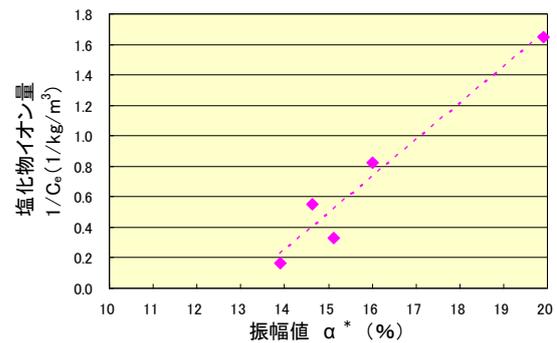


図-14 塩化物イオン量の逆数と振幅値との関係 (鉄筋位置 70mm の場合)

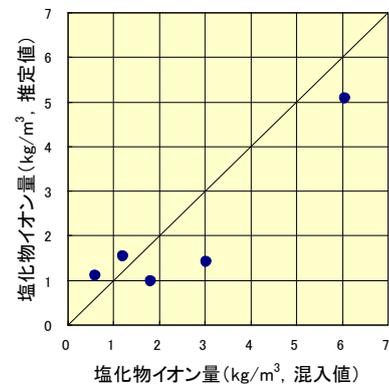


図-15 塩化物イオン量の設定値と推定値の比較 (鉄筋位置 50mm の場合)

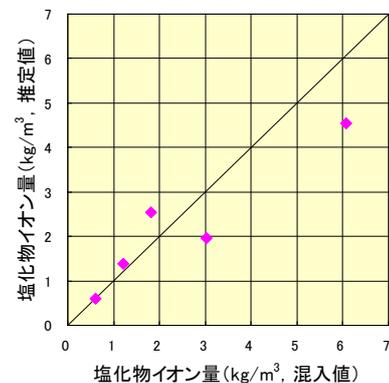


図-16 塩化物イオン量の設定値と推定値の比較 (鉄筋位置 70mm の場合)

物イオン量の逆数を単回帰分析で求めたところ、比較的高い相関関係を確認することができた。

本検討では、鉄筋位置により精度の違いがあるものの、電磁波によって推定される塩化物量に対して、水セメント比および鉄筋位置が及ぼす影響の程度を一部であるが見出すことができたと思われる。

今後は、測定時の電磁波の感度を上げることや、実構造物で実施している距離測定を行うことによって、鉄筋直上での波形取得が可能な測定方法の検討、鉄筋位置が100mm 以上もしくは 50mm 以下の場合での検討を行っていく予定である。また、今回の検討で含水率の影響をできるだけ除いた場合の振幅値と塩化物イオン量との関係にある程度把握することができたことから、今後はコンクリート中の含水状態の変化が振幅値や塩化物イオン量に及ぼす影響について検討していく予定である。

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 , No. 1 , pp. 1673-1678 , 2003.07
- 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