

論文 電磁波による鉄筋コンクリート中の塩分測定法の実構造物への適用性に関する検討

溝淵 利明^{*1}・林 大介^{*2}・須田 久美子^{*3}・横関 康祐^{*2}

要旨：鉄筋コンクリート構造物の塩化物量を電磁波で評価することを目的に，Sパラメータ法を用いてモルタル中の含水率及び塩化物量を変化させた場合の複素比誘電率の測定を行った。また，塩化物を外部から浸透させた供試体での電磁波による塩化物量の測定及び実構造物での測定を行った。その結果，複素比誘電率の虚数部は塩化物量の影響を受けること，実構造物に対して本手法の適用の可能性を見出すことができた。

キーワード：非破壊試験，電磁波，塩化物イオン量，Sパラメータ法，複素比誘電率

1. はじめに

コンクリート中の塩化物イオン量を把握するためには，一般にコアを採取して，塩分量を分析する必要がある¹⁾。この場合，同一部位での塩分量を経時的に測定することは難しい。一方，筆者らは，室内の限られた条件ではあるが，非破壊試験法の一つである電磁波波形を用いることによってコンクリート内の塩化物量をおおよそ推定できることを示している^{2)~4)}。ただし，これまでの室内試験では練混ぜ時に塩化ナトリウムを混入させており，コンクリート打込み後に外部から塩化物が浸透した状態での検討がなされていない。また，これまでの研究では実構造物での適用を前提として，周波数が固定されている市販の測定機を用いて塩分推定を行ってきたが，コンクリート中の含水状態，塩化物量の違いによって卓越する周波数が異なることも考えられる。さらに，電磁波の減衰に影響を与える複素比誘電率の虚数部の測定を行うことにより，塩化物イオンの存在と虚数部との関係を定量的に評価していく必要があると考えられる。

そこで，本研究では含水率及び塩化物イオン量を変化させたモルタル供試体を用いて，複素比誘電率及び複素比透磁率を求め，含水率及び

塩化物量と電磁波減衰との関係について検討を行うために，周波数を 0.5GHz ~ 2GHzまで変化させて，含水率及び塩化物量の違いによって卓越する周波数帯の存在の有無に関する検討を行った。また，塩化物をコンクリート表面から浸透させることによってコンクリート内で塩化物イオンを分布させた供試体について，電磁波測定を行い，これまでの室内試験結果^{2)~4)}を基に推定した塩化物量とコア採取による分析結果との比較を行った。さらに，これらの室内試験結果を踏まえて実構造物（棧橋）での電磁波測定結果から塩化物量を推定した結果と，コア採取して塩化物量を分析した結果とを比較した。

2. Sパラメータ法による比誘電率の測定

媒質中に電磁波が伝搬する場合，電氣的定数である比誘電率 ϵ_r 及び比透磁率 μ_r は，媒質で損失がある場合，以下に示すような複素数で表される^{5), 6)}。

$$\begin{aligned} \epsilon_r &= \epsilon_r' - j\epsilon_r'' \\ \mu_r &= \mu_r' - j\mu_r'' \end{aligned} \quad (1)$$

ここで， ϵ_r' 及び μ_r' は比誘電率及び比透磁率の実数部であり，電磁波測定などで用いられる比誘電率はこの実数部に相当する。 ϵ_r'' 及び μ_r'' は比誘

*1 法政大学 工学部都市環境デザイン工学科教授 工博 (正会員)

*2 鹿島建設(株) 技術研究所 材料・LCEグループ (正会員)

*3 鹿島建設(株) 技術研究所 材料・LCEグループ 工博 (正会員)

電率及び比透磁率の虚数部であり、 j は虚数単位($j = \sqrt{-1}$)である。 ϵ_r'' 及び μ_r'' は、媒質を電磁波が伝搬した場合に電磁波を減衰させる項となる。一般に、材料中での電磁波の進行方向での電界 \dot{E} (複素数)は以下の式で表される。

$$\dot{E} = \dot{E}_0 e^{j\omega t - \dot{\gamma} z} \quad (2)$$

ここで、 \dot{E}_0 (複素数)は振幅定数であり、 ω は角周波数 $\omega = (2\pi f)(1/\text{秒})$ 、 f は周波数(1/秒)、 t は経過時間(秒)、 $\dot{\gamma}$ (複素数)は伝搬定数、 z は進行距離(m)である。伝搬定数 $\dot{\gamma}$ は、複素比誘電率及び複素比透磁率を用いて以下の式で表される。

$$\dot{\gamma} = \alpha + j\beta = j\beta_0 \sqrt{\dot{\epsilon}_r \dot{\mu}_r} \quad (3)$$

ここで、実数部の α は減衰定数(N/m)であり、電磁波が伝搬するにつれて吸収、減衰する程度を示す項である。 β は位相定数(N/m)であり、 $\beta_0 = \omega \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$ は真空中の位相定数である。

本実験では、写真-1に示すようにサンプルホルダーに供試体を挿入させ、サンプルホルダー内に電磁波の周波数を変化させながら、反射や透過損失などの電気回路特性を計測することのできるネットワークアナライザを用いて、入射波と反射波の比で定義されたSパラメータ法(同軸管反射・透過法)⁷⁾による反射減衰量及び透過減衰量から、複素比誘電率及び複素比透磁率を求めた。

2.1 実験の概要

実験は、水セメント比50%、セメント砂比1:2.2で、表-1に示す材料を用いて塩化ナトリウムを練混ぜ時に0, 1, 2, 3kg/m³混入した100×100×400mmの供試体を作製し、硬化後外径38.5mm、内径17.0mm、長さ50mmのコアをそれぞれ1本採取した。採取したコアは、水中で十分吸水させた状態でSパラメータ法による比誘電率の測定を行い、その後室内で乾燥させ、乾燥開始から1日、5日、14日でそれぞれSパラメータ法による比誘電率の測定を行った後、乾燥炉で絶乾にしてから測定を行った。

表-1 使用材料(モルタル)

| 材料 | 摘要 |
|------|---|
| セメント | 普通ポルトランドセメント 密度:3.15(g/cm ³), 比表面積:3240(v ² /g) |
| 細骨材 | 鬼怒川産川砂 表乾密度:2.52(g/cm ³), 吸水率(%), 粗粒率:2.70 |



写真-1 Sパラメータ法による測定

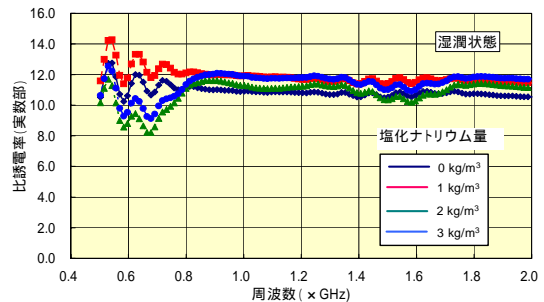


図-1 塩化物イオン量と比誘電率(実数部)との関係(湿潤状態)

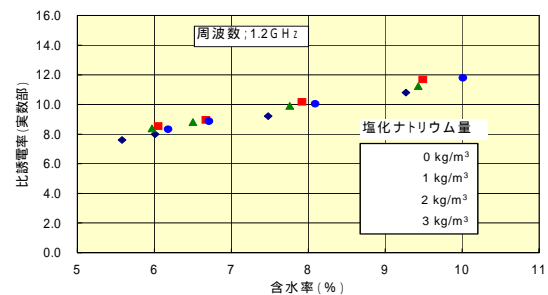


図-2 含水率と比誘電率(実数部)との関係

2.2 実験結果及び考察

ネットワークアナライザで周波数を0.5~2GHzまで変化させて、Sパラメータ法で求めた比誘電率の実数部の湿潤状態での測定結果を図-1に示す。比誘電率は、今回測定した周波数範囲において、これまでの研究成果²⁾⁻⁴⁾と同様に塩化ナトリウム量の影響をほとんど受けていないことがわかる。また、各測定時での供試体質量から算定したモルタルの含水率⁴⁾と比誘電率

との関係を図 - 2 に示す。図 - 2 から、これまでいわれているように含水率の低下に伴い比誘電率が低下する結果となった。また、図 - 2 から塩化ナトリウム量の影響はほとんど受けないことがわかる。

比誘電率の虚数部の湿潤状態及び絶乾状態での測定結果を図 - 3, 4 に示す。湿潤状態の場合、図 - 3 に示すように 1GHz までの周波数帯では比誘電率の虚数部にばらつきが見られるものの、1GHz 以上の周波数帯ではほぼ一定の値を示す結果となった。また、1GHz ~ 1.3GHz の周波数領域では塩化ナトリウム量の増加に伴い比誘電率（虚数部）が大きくなる傾向を示していることから、塩化ナトリウム量の増加によって電磁波の減衰も大きくなるものと考えられる。この傾向は、これまでの研究成果^{2)~4)}においても同様な傾向が見られており、塩化物イオンの存在が電磁波の減衰に影響を与えているものと考えられる。絶乾状態では、図 - 4 に示すように今回測定した周波数範囲において塩化ナトリウムの有無に関係なく、比誘電率がほぼ同様の値を示す結果となった。また、比誘電率自体の値も湿潤状態に比べて 1/20 程度となった。このことは、モルタル中に水が存在しないような状況の場合、電磁波の減衰も小さくなること及び塩化物が水溶液中でイオンの状態で存在しないと電磁波の減衰に影響が少ないことを示していると考えられる。したがって、モルタル中での電磁波の減衰には含水状態とイオン量の両者が影響していると考えられることから、図 - 5 に示すように塩化ナトリウム量ごとに含水率と比誘電率（虚数部）との関係で整理した。図 - 5 から、含水率が概ね 7% 以上では塩化ナトリウムの有無によって比誘電率（虚数部）が異なり、含水率の増加に伴い両者の差異が大きくなっているのがわかる。これは、図 - 2 に示した比誘電率の実数部とは大きく異なる傾向を示すものであり、コンクリートが湿潤状態に近く、塩化物が溶解し、イオンの状態で存在していれば、電磁波の減衰の違いによって塩化ナトリウム量を推定で

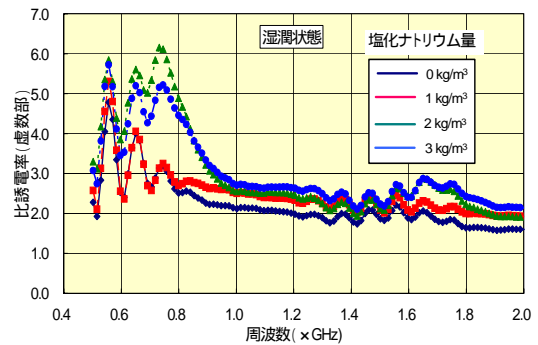


図 - 3 塩化物イオン量と比誘電率（虚数部）

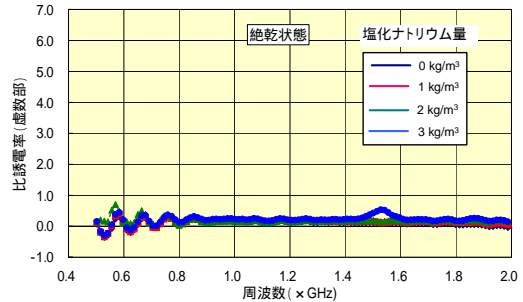


図 - 4 塩化物イオン量と比誘電率（虚数部）との関係（絶乾状態）

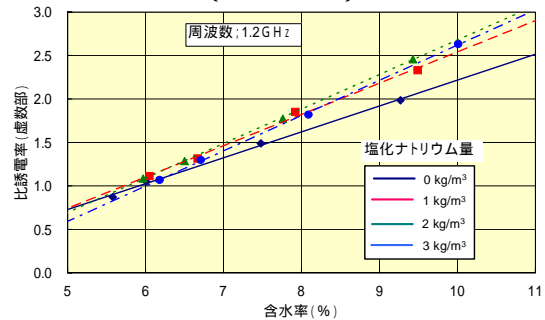


図 - 5 含水率と比誘電率（虚数部）との関係

きる可能性を示唆している。

次に、湿潤状態及び絶乾状態での周波数と減衰定数との関係を図 - 6, 7 に示す。湿潤状態の場合、図 - 6 に示すように周波数が 1.0GHz 以下の範囲では、図 - 3 の比誘電率の虚数部の場合と同様に周波数の変化に伴い減衰定数が振動する傾向が見られ、特に卓越するような周波数帯は見られなかった。周波数が 1.0GHz ~ 1.3GHz の範囲では、特に振動などのばらつきは見られず、周波数の増加に伴い減衰定数が大きくなる傾向となった。また、同一周波数で比較した場合、塩化ナトリウム量の増加に伴い減衰定数が増加する結果となった。1.4GHz 以上の周波数の範囲においても、周波数の増加に伴い減衰定数が増加する傾向が見られたものの、減衰定数

が周波数の変化に対して振動しており、特に卓越周波数が存在するような傾向は見られなかった。絶乾状態の場合、図 - 7 に示すように減衰定数が今回測定した周波数範囲においてほぼ同様な値を示す結果となった。ただし、1.3GHz 前後の周波数で減衰定数が若干卓越するような傾向が見られたが、塩化ナトリウム量による差異は見られなかった。

以上の結果から、コンクリート内部がある程度水を含んだ状態であれば、塩化ナトリウム量の違いによって電磁波の減衰の程度が異なることが確認された。また、湿潤状態では塩化ナトリウム量によらず減衰が卓越する周波数はなかったものの、塩化ナトリウム量の違いが電磁波の減衰に明確に表れる周波数の範囲は 1.0GHz ~ 1.3GHz であった。ただし、今回の実験結果から判断して、振動などのばらつきが少なく塩化ナトリウム量に対する差異が明確となっている 1.1 ~ 1.3GHz の周波数領域で測定するのが塩化ナトリウム量の推定に適していると思われる。この点については、さらに検討していく必要がある。

3. 外部から塩化物を浸透させた供試体を用いた電磁波による塩化物量の推定

これまで電磁波による塩化物量の推定のための供試体には、塩化ナトリウムを練混ぜ時に混入したものを用いてきた。実際のコンクリート構造物の多くは、最初から鉄筋を腐食させるほどの塩化物は混入されておらず、コンクリート打込み後に飛来塩分や融雪剤などによってコンクリート表面から塩化物イオンが浸透してくることとなる。そこで、コンクリート表面から塩化物を浸透させた供試体を作製し、電磁波レーダを用いて測定を行い、これまでの室内試験結果と比較検討を行った。

3.1 実験の概要

供試体は、100 × 100 × 400mm の角柱を用い、1 面のみを残してその他の面すべてを塩化物イオンが浸透しないようにシーリングし、塩化ナトリウムの濃度が 3% 及び 10% の水溶液に 3 ヶ月

表 - 2 使用材料 (コンクリート)

| 材料 | 摘要 |
|------|---|
| セメント | 普通ポルトランドセメント 密度: 3.16g/cm ³ , 比表面積: 3320g/cm ² |
| 細骨材 | 静岡産山砂, 表乾密度: 2.62g/cm ³ 吸水率: 1.09%, 粗粒率: 2.57 |
| 粗骨材 | 八王子産硬質砂岩, 表乾密度: 2.65g/cm ³ 吸水率: 0.63%, 実積率: 59.4% |

表 - 3 コンクリート配合

| 粗骨材 最大寸法 (mm) | 水セメント比 (%) | 細骨材率 (%) | 単位量 (kg/m ³) | | | |
|---------------------|---------------|-------------|--------------------------|------|-----|------|
| | | | 水 | セメント | 細骨材 | 粗骨材 |
| 20 | 60 | 45.5 | 165 | 275 | 838 | 1015 |

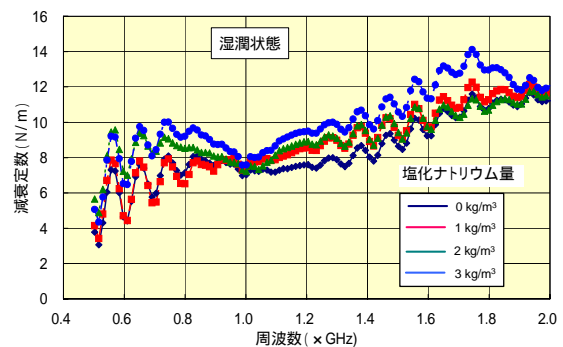


図 - 6 周波数と減衰定数との関係 (湿潤状態)

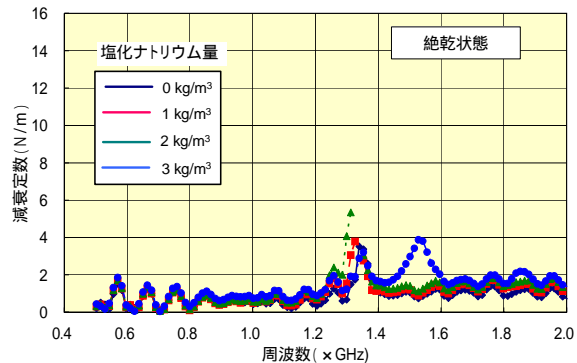


図 - 7 周波数と減衰定数との関係 (絶乾状態)

程度浸漬させた。電磁波の測定は、電磁波レーダを用いて供試体下面に鉄板を敷いて上面から行い、アンテナから入射した電磁波 (周波数 1.0GHz) の鉄板からの反射時間及び反射波形を用いて比誘電率及び最大振幅を求めた。さらに、電磁波波形に影響を及ぼすコンクリートの含水率 (測定期間終了後に供試体を乾燥炉に入れて絶乾状態にした質量を基準とした測定時のコンクリート中の水分量と絶乾質量との比) 及び外気温の測定を行った。

これらの測定結果を用いて、これまで室内実

験で得られている塩化物量推定のための重回帰式に代入して、コンクリート表面から鉄板位置までの平均的な塩化物量の推定を行った。

$$C_c = -0.374 \times T + 0.120 \times \mu - 0.114 \times \varepsilon - 0.123 \times \alpha + 18.9 \quad (4)$$

ここで、 C_c は塩化物量(kg/m^3)、 T は外気温()、 μ はコンクリートの含水率(%)、 ε は比誘電率、 α は出力波形において着目している波形の最大値と最小値との差とした振幅である。

供試体作製に用いた材料及びコンクリート配合を表 - 2 及び表 - 3 に示す。

電磁波による測定終了後、供試体からコアを採取し、塩化物量の測定を行った。

3.2 実験結果及び考察

3%及び10%NaCl水溶液にそれぞれ浸漬した供試体から全塩化物及び可溶性塩化物測定のために、一つの供試体から各々2本採取したコアでの塩化物イオン量の分析値及び塩化物イオン量の分析結果から回帰した式を用いて算定した塩化物イオン量の分布を図 - 8 に示す。電磁波を用いて塩化物量を推定する場合、コンクリート表面から電磁波の反射物体(本実験では供試体下に敷いた鉄板)までの間の平均値を推定しているものと思われる。そこで、図 - 8 に示す各ケースの全塩化物と可溶性塩化物の平均値と式(4)に示すこれまでの室内試験で得られている塩化物量の推定式から推定した値を図 - 9 に示す。

図 - 9 から、3%NaCl水溶液で浸漬したケースでの全塩化物の平均値は、推定値の約半分程度の値であり、可溶性塩化物の平均値は推定値の1/3程度であった。10%NaCl水溶液で浸漬したケースでは、推定値が $2.6\text{kg}/\text{m}^3$ であったのに対して、全塩化物の平均値が $2.3\text{kg}/\text{m}^3$ 、可溶性塩化物の平均値が $1.9\text{kg}/\text{m}^3$ であり、推定した値は、全塩化物量に比較的近い値となっている。3%NaCl水溶液のケースで推定値と測定値を基にした算定値に差異が生じた理由としては、塩化物量が図 - 8 に示すようにコンクリート表面から50mm前後までしか浸透していないにもかかわらず、

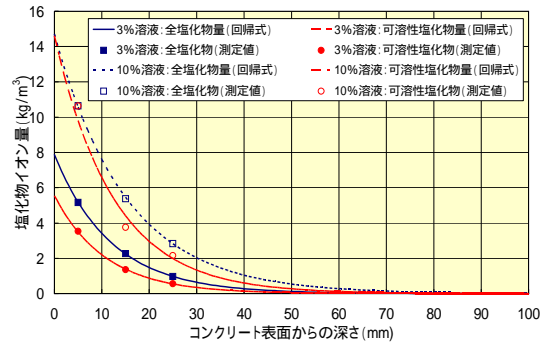


図 - 8 塩化物イオン量分布

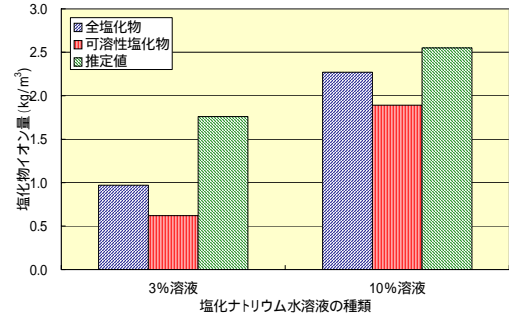


図 - 9 塩化物イオン量の比較

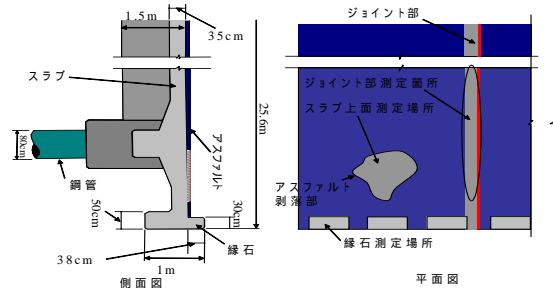


図 - 10 橋橋測定場所の概要

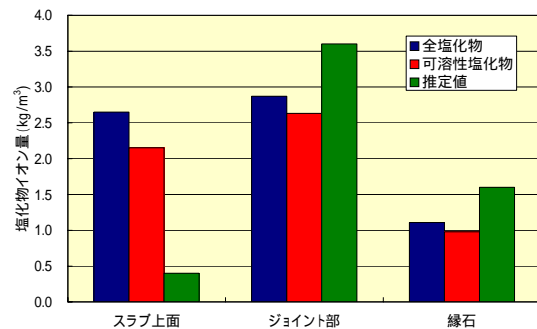


図 - 11 塩化物イオン量の比較(実構造物)

100mmの深さまでの平均として取り扱ったためではないかと思われる。10%NaCl水溶液の場合には、80mm近くまで塩化物が浸透していることから、推定値と平均値が比較的近い値を示したものである。

電磁波が塩化物イオンを含んでいない範囲でほとんど減衰しないと仮定して、塩化物イオン

の浸透している範囲までで平均した場合，3% NaCl水溶液での全塩化物量が 1.9kg/m^3 ，10% NaCl水溶液で 2.6kg/m^3 となり，両ケースともほぼ推定値に近い値となる。ただし，実際の構造物ではどの位置まで塩化物が浸透しているのかわからないことから，対象位置（鉄筋等）まで塩化物が浸透していない場合には電磁波で推定した塩化物量が実際よりも大きな値を推定している可能性がある。この点については，さらに塩化物浸透深さをパラメータとした検討を行う必要がある。

4. 実構造物での電磁波を用いた塩化物推定

電磁波を用いた塩化物量の推定法の実構造物への適用性検討の一環として，棧橋での測定を試みた。対象とした部位は，図 - 10 に示すようにスラブ上面，スラブのジョイント部付近及び縁石の3ヶ所である。電磁波測定では，式(4)に示す重回帰式に測定結果を代入して塩化物量を算定した。ただし，コンクリート内部の湿度を測定することができなかったことから，ここでは相対湿度 80%RH とした。

各部位での電磁波による測定結果と塩化物量の分析結果とを比較したものを図 - 11 に示す。図 - 11 から，縁石及びジョイント部での電磁波による塩化物量の推定結果は，コア採取による塩化物量の分析結果に比較的近い値を示したものの，スラブ上面からの測定値は，分析値を大きく下回る結果となった。この原因については，スラブ下面の配筋状態や鉄筋間隔などの影響が考えられるが，現状では原因が明確になっておらず，今後検討していく必要がある。

5. まとめ

電磁波を用いた塩化物量の推定に関して，Sパラメータ法を用いてモルタル中の含水率及び塩化ナトリウム量を変化させた場合の複素比誘電率の測定を行った結果，コンクリート内にある程度水を含んでいれば，塩化ナトリウム量の違いによって電磁波の減衰の程度が異なるため，取得波形の減衰の違いから塩化物量を推定可能

であることが明らかになった。また，塩化物イオン量の違いが電磁波の減衰に明確に表れる周波数の範囲は 1.1GHz ~ 1.3GHz であった。塩化物を外部から浸透させた供試体での電磁波による塩化物量の推定を行った結果，検討すべき項目はあるものの塩化物量評価の可能性を見出せ，また，実構造物での測定結果に，室内試験結果から得られた塩化物量推定式を適用した結果，適用する条件によっては塩化物イオン量を推定できる可能性が示唆された。ただし，実構造物への適用に関してはまだ多くの課題を有していることから，環境条件や構造物の形状，乾燥状態の影響についてさらに検討していく必要がある。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリートの塩化物イオン拡散係数試験方法の制定と規準化が望まれる試験方法の動向，コンクリート技術シリーズ 55，2003.9
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 清水康敬ほか：電磁波の吸収と遮断，日経技術図書（株），1989.1
- 6) Arthur v. H：Dielectric Materials and Applications，Artech House Publishers，1954.7
- 7) 橋本修：材料定数測定法，森北出版（株），pp.30-44，2003.8