

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 3 日現在

機関番号：32675

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420463

研究課題名(和文)非破壊によるコンクリート表層部の塩化物量推定手法の開発

研究課題名(英文)Development of estimation method of chloride ions in concrete surface by non-destructive test

研究代表者

溝渕 利明(MIZOBUCHI, Toshiaki)

法政大学・デザイン工学部・教授

研究者番号：60339504

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、電磁波を用いたコンクリート表層部の塩化物イオン量の推定に関して、実構造物でも適用可能な評価システムを構築するために、適用に際して課題であったいくつかの項目について検討を行った。実用化に際しての課題としては、電磁波で推定できる塩化物イオン量がかぶり部の平均値であり、鉄筋腐食の開始を判定するためには、鉄筋位置での塩化物イオン量を推定・評価する必要がある。検討の結果、電磁波測定に影響を与える含水率、電面粗度を考慮した推定式を提案するとともに、実構造物での比較検証を実施し、評価する可能性を見出した。

研究成果の概要(英文)：In this study, for the purpose of estimation of chloride ions in the concrete surface using the electromagnetic waves, in order to construct the applicable evaluation system to the existing structures, investigation was carried out on some items which were problems to be solved in the application. As the problems in the application, it is necessary that content of chloride ions is estimated and evaluated at the position of reinforcing bar in order to judge the start of corrosion of reinforcing bar because content of chloride ions which is able to be estimated using electromagnetic waves is the mean value in the cover concrete. As the results of the investigation, while the estimation formula considering with water content and surface roughness of concrete which measurement of the electromagnetic waves was influenced was proposed, the possibility which was possible to estimate the content of chloride ions at the position of reinforcing bar at the good accuracy was found.

研究分野：工学

キーワード：電磁波 表層品質 塩化物イオン量

1. 研究開始当初の背景

(1) コンクリート構造物の老朽化に伴う劣化
コンクリート構造物は、1980年代初頭まではメタナンスフリーで半永久的なものとされてきた。しかしながら、戦後の高度成長期に大量に施工されたコンクリート構造物の早期劣化が顕在化するに至って、コンクリート構造物自体は時間経過とともに劣化し、定期的に劣化状況を把握、劣化状況に応じた補修、補強等のメンテナンスを実施していかなければならない構造物であることが認識されるようになってきた。コンクリート構造物の劣化要因は各種あるが、四方を海に囲まれた我が国では、特に塩害による劣化がコンクリート構造物にとって深刻な問題であるといえる。さらに、塩害は沿岸部だけでなく、融雪剤など散布する山間部においても深刻な課題となっている。カナダやアメリカ北部などでは、すでに融雪剤の被害が深刻化しており、その対策が急務となっている。

塩害は、コンクリート内部に塩化物イオンが浸透し(潜伏期)、限界塩分量を超えた段階で水と酸素が供給可能な環境であれば、コンクリート内部の鉄筋が腐食膨張し(進展期)、コンクリート表面にひび割れが生じ、さらに鉄筋腐食が進行し(加速期)、コンクリートの剥落や鋼材の断面欠損によって、耐力が低下する現象である。特に、コンクリート表面にひび割れが生じた後は、劣化の進行が速いことから、早期に劣化状況を把握し、進行の抑制等の対策を講じる必要がある。そのためには、かぶり部分の塩化物イオン量ができるだけの確に把握することが重要となってくる。かぶり部分の塩化物イオン量の調査には、調査対象位置からコアを採取し、化学分析を行う方法がこれまで行われてきた。ただし、この方法ではコンクリートを局所的ではあるが損傷を与えること、同一箇所での経時的な変化を捉えることができないこと、コア採取箇所のみでしか塩化物イオン量が把握できず、対象構造物全体の塩化物量を把握することができない等の課題を有している。

(2) 非破壊試験による劣化調査の重要性

上述したように、塩害による劣化状況の把握において、構造物に少なからず損傷を与える方法でしかコンクリート内部の塩化物イオン量を調査することができず、またどの部位に塩化物イオン量が多く内在しているのか現行の方法では把握できないのが現状である。コンクリート内部の塩化物イオン量を非破壊で調査することができれば、構造物に損傷を与えることなく、同一箇所の時間経過に伴う塩化物イオン量の変化を把握することができるようになる。また、調査箇所の位置情報を組み込めば、点ではなく面的な情報を取得することが可能となってくる。このような非破壊で塩化物イオン量を調査する方法が確立されれば、塩害による進行の早期発見を行うことができ、調査時間の短縮や調査

面積の拡大などこれまでの方法に比べ飛躍的に向上すると考えた。非破壊による塩化物イオン量の推定については、電磁波を用いる方法を約10年前に見出しており、これまで室内実験による検討を行ってきた。

電磁波は、探査対象との電気的性質の違いから発生する反射波が異なることから、部材内部の材質の違いが推定可能となる。コンクリート用電磁波測定では、電磁波がコンクリートと電気的性質(比誘電率)の異なる物体(鉄筋等)との境界面で反射する。一方、コンクリート中に塩化ナトリウムのような電解質が存在している場合、塩分がない場合に対して電気的性質が変化していると見ることができる。また、塩化物イオン濃度の違いによって電解質の量が異なってくる。この違いは、真水と海水の比誘電率が同じとした場合、伝播速度にはほとんど影響を与えない代わりに、導電性が変化することから受信波形に影響を与えることとなる。さらに、塩化物イオン濃度や含水率の違いも受信波形に影響することがこれまでの研究で明らかとなっている。この性質を利用すれば、電磁波を用いてかぶり部分の塩化物イオン量を推定することが可能となる。ただし、実構造物への適用に際しては、多くの課題を克服していく必要がある。

2. 研究の目的

(1) コンクリートの表層品質を考慮した鉄筋位置での塩化物イオン量の推定手法の検討

電磁波を用いたコンクリートかぶり部分の塩化物イオン量の推定値は、鉄筋からの反射波形を分析することから、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していることとなる。本研究では、鉄筋位置での塩化物イオン量を推定するための方法について検討を行っていく。検討方法としては、中性化などの複合劣化を生じていると思われる実構造物の調査を行い、中性化深さの予測と中性化による塩化物イオン量分布の変化を考慮した推定手法を開発していく。また、コンクリートのかぶり部分は一概とは限らず、溶脱等で表面部が粗となっている場合がある。このようなコンクリート表層品質が電磁波波形及び塩化物イオン量分布にどのような影響を与えるのか検討するために、表層部分の細孔構造を調査し、塩化物イオン量の拡散と関係などについて評価としていくこととする。

(2) 各種施工条件、環境条件を考慮した塩化物イオン量の推定手法の検討

実構造物では、塩害対策として表面に被覆材が塗布されていたり、スラブ上面には走行のためのアスファルトが敷設されていたりしており、コンクリート以外の材料で構成されている部材が多いことから、これらの誘電率の異なる異種材料下においても塩化物量の推定を可能とするための検討を行っていく。また、コンクリートの含水状態が電磁波に大きく影響することから、構造物周辺の環

境状況（温度，湿度，風向，波かがりの有無）と電磁波出力との関係について検討を行っていくものとする。

3. 研究の方法

本研究では，研究目的で挙げた2つの項目を達成させる必要がある。研究方法としては，電磁波を用いたコンクリート表層部の塩化物イオン量の推定に関して，実構造物でも適用可能な評価システムを構築するために，いくつかある課題のうち，適用に際して優先的に解決すべき研究目的で挙げた項目を実施していくこととした。電磁波で推定できる塩化物イオン量は，かぶり部の平均値であり，鉄筋腐食の開始を判定するためには，鉄筋位置での塩化物イオン量を推定する必要がある。また，中性化や凍害，溶脱などによる表層部組織の変状が，かぶり部の塩化物イオン量の分布に大きな変化を与えることから，このような複合劣化が生じた場合でも，電磁波による平均塩化物イオン量から鉄筋位置での塩化物イオン量を推定するための手法を確立していくこととした。さらに，かぶり部はアスファルト等の異種材料を用いている場合もあり，これらの材料を介しても鉄筋位置での塩化物イオン量を推定するための評価方法の検討を行った。

4. 研究成果

(1) コンクリートの表面粗度を考慮した場合の塩化物イオン量の推定について

本研究では，電磁波による塩化物イオン量の推定評価手法として，マクスウェルの波動方程式から導かれる減衰方程式を基に，反射波形の減衰に影響すると考えられる要因に影響係数として，塩化物イオン量の変化に直接影響すると考えられる導電率との関係式を導き出し，実構造物での塩化物イオン量の分析結果と比較検討を行った。これまでの研究において，電界の大きさと塩分濃度を变化させた水溶液における電磁波レーダとの出力値との間には高い相関関係のあることを確認していることから，電磁波レーダからの出力値である振幅値と電磁波減衰特性値である導電率，誘電率および距離との関係を求めた結果，以下に示すような関係式が得られた。

$$\sigma_{ca} = \frac{10^3}{2\sqrt{\epsilon_r} \cdot c} \cdot \eta \cdot \ln\left(\frac{|A_w|}{\zeta \cdot \delta \cdot |A_0|}\right), \quad \eta = -\frac{1}{189 \cdot \xi \cdot \kappa_w}$$

ここで， $|A_w|$ は電磁波レーダの出力振幅値， ζ は電磁波の透過および反射に伴う減衰係数， c はセメントの種類の影響係数， $|A_0|$ は個々の電磁波レーダ固有の入力振幅値， t はコンクリート温度より定まる導電率補正係数， w はコンクリート相対湿度より定まる導電率補正係数， κ_w はコンクリートの導電率(S/m)， ξ はコンクリートの比誘電率， z は損失媒質中の伝搬距離(m)， c はかぶり(mm)である。

上記の式において，電磁波の透過および反射に伴う減衰係数は，コンクリートのかぶり，空気中からコンクリートに対して垂直に入

射する場合の境界面での電磁波の透過率と鉄筋からの反射率とを考慮した合成透過散乱及び表面部の粗度を考慮した以下に示す式で表すこととした。

$$\dot{T} = \left\{ z_0 \left(\frac{\epsilon_r^{-0.5} - 1}{\epsilon_r^{-0.5} + 1} \right) + 1 \right\}^2 (-2.7 \times 10^{-3} c + 1.18) \cdot v$$

ここで， v はコンクリート表面の粗度を表す係数とし，図1に示すように3Dスキャナによる表面の凹凸を算術平均した結果から関係式を求めた。実構造物での測定結果において，この表面粗度の影響の有無によって，図2に示すように，推定精度を向上させる結果が得られた。

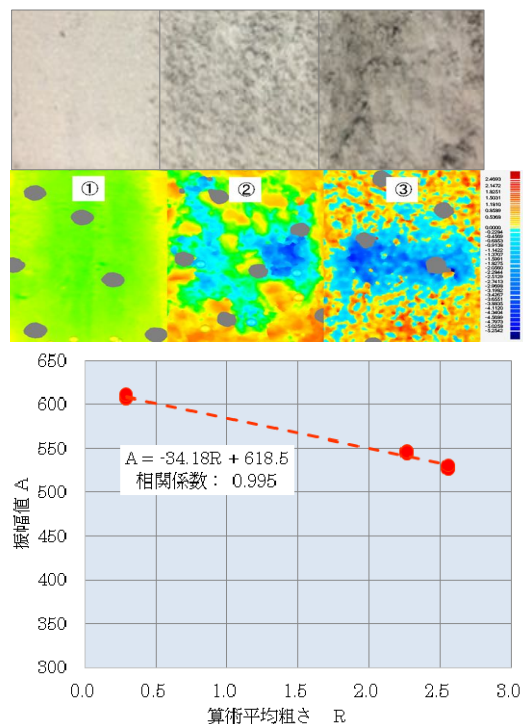


図1 3Dスキャナによる表面粗度の評価

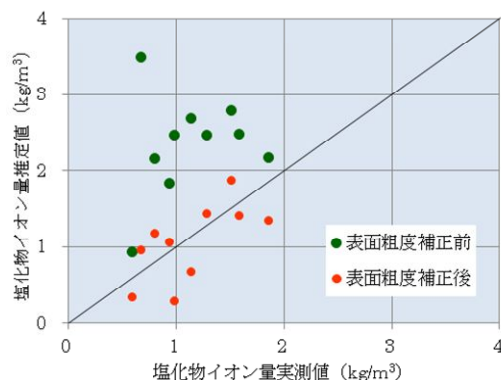


図2 実構造物での表面粗度の影響

(2) 温度・湿度が塩化物イオン量推定に及ぼす影響について

コンクリート温度の影響については，かぶりの異なる供試体について養生温度を5 ~ 30 まで変化させ，電磁波測定を行い，20 養生のかぶり 70mm の測定結果を基準として図3に示すような補正係数を算定した。図

3 から、補正係数はかぶりに関係なく養生温度の変化のみに依存していることから、以下に示す式で温度補正を算定することとした。

$$t = 1.04 \times 10^{-2} T + 0.774$$

ここで、 T はコンクリート温度()である。

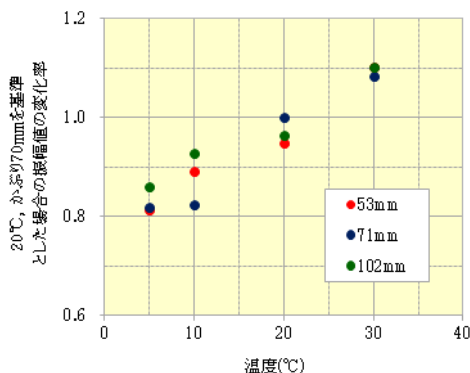


図3 温度影響について

コンクリートの相対湿度の影響については、水セメント比の異なる供試体に高分子湿度センサを埋込み、水中養生後相対湿度60%RHの恒温室において電磁波測定を行い、

$$\kappa_w = 7.18 \times 10^{-4} \times RH^2 - 7.95 \times 10^{-2} \times RH + 3.19$$

相対湿度60%RHにおける振幅値を基準として補正係数を算定した。図4に示すように、水セメント比による差異がなく、相対湿度の変化のみに依存していることから、以下に示す式で湿度補正を算定することとした。

ここで、 RH は相対湿度(%RH, 60 RH 90)である。

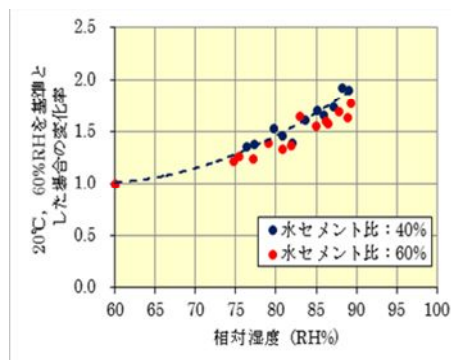


図4 湿度影響について

(3)フィールドにおける塩化物イオン量の推定結果について

これまで6ヶ所の発電所において、電磁波による塩分量推定を行ってきており、60箇所以上からコア採取を行うとともに、採取箇所周囲の電磁波測定を行っている。調査対象部位は、棧橋を中心にスラブ上面や側面での計測およびコア採取を行っている。供用年数は、ほとんどが10年以上経過したものであり、50年以上経過したものについても調査を行っている。セメント種類としては、早強ポルトランドセメントを使用している部位もあるが、調査対象とした部位のほとんどが普通ポルトランドセメントもしくはフライアッシュ

セメントであった。水セメント比については、明確となっていない部位もあるが、45%~60%であった。これらの条件を基にコンクリートの導電率を算定した。ただし、コンクリート温度は調査場所の調査した日の外気温とし、湿度に関してはコンクリート内部での乾燥は少ないと仮定し、90%RHとした。推定したコンクリートの導電率と採取したコアの塩分量の化学分析結果(全塩分量)とを比較した結果を図5に示す。ただし、化学分析結果は全塩分量であり、一方コンクリートの導電率は、細孔溶液内のイオンに対する推定値であることから、既往の研究を参考に、全塩分量を可溶性塩分量に換算した値と比較した。図5から、ばらつきはあるもののコンクリートの導電率の増加に伴い塩化物イオン量が増加する結果となり、相関係数は0.790であった。

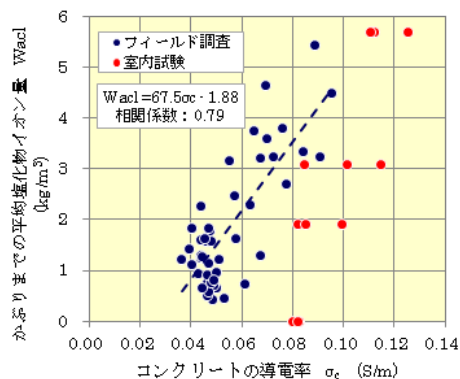


図5 フィールドでの塩化物イオン量の推定結果

(4)蛍光X線によるコンクリート表面の塩化物量の推定

ハンディタイプの蛍光X線測定装置を用い、コンクリート表面部の塩化物イオン量の推定に関する検討を行った。その結果、図6に示すように化学分析結果と比較的高い結果が得られ、コンクリート表面の塩化物イオン推定の可能性を見出すことができた。

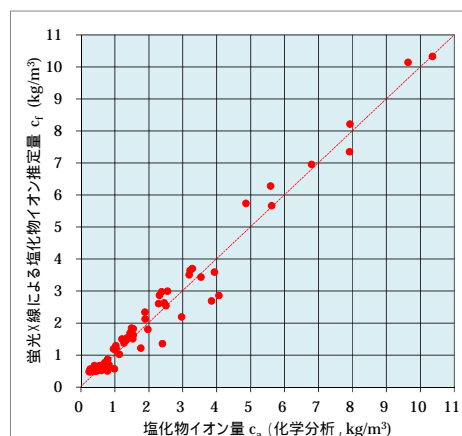


図6 蛍光X線によるコンクリート表面部の塩化物イオン量の推定

(4) まとめ

本研究は、マクスウェルの波動方程式から導かれる減衰方程式を基に作成したコンクリートの導電率とコンクリートのかぶり部分の塩化物イオン量との関係について検討を行い、塩化物イオン量の推定に影響を及ぼす要因を影響係数として取り込んだ推定式を提案した。本提案式を用いて、使用材料、配合条件、環境条件、供用年数等が異なる6ヶ所の実構造物に適用し、塩化物イオン量と比較検討した。その結果、本研究で提案した推定式からかぶり部分の平均塩化物イオン量推定の可能性を見出すことができた。また、蛍光X線によるコンクリート表面部の塩化物イオン量の推定の可能性を見出すことができた。これにより、Fickの拡散方程式を用いて鉄筋位置での塩化物イオン量を推定することが可能となった。ただし、本検討ではごく限られた範囲での検討であることから、さらに多くの検討条件での比較を行う必要があるといえる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 1件)

瀧淵利明，電磁波を利用した非破壊検査の計測原理，非破壊検査，査読有，Vol.64.No.3 Mar, pp99-105, 2015.03

〔学会発表〕(計 8件)

伊藤均，瀧淵利明，RC構造物の構造性能予測に関する複合劣化を生じたコンクリート構造物の評価，第70回土木学会年次学術講演会，査読なし，2016.09

Hitoshi ITO and Toshiaki MIZOBUCHI，STUDY ON PREDICTION OF PERFORMANCE OF RC STRUCTURES DUE TO COMPLEX DETERIORATION，Structural Fault and Repair，査読なし，2016.05

Jun-nichiro Nojima, Mami Uchida, and Toshiaki Mizobuchi, Study on possibility of estimation of chloride content in coastal reinforced concrete structures using electromagnetic waves, International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting, pp.33-38, 査読有, 2015.10

野嶋潤一郎，内田真未，新井淳一，瀧淵利明，電磁波波形を用いたコンクリート中の塩分量推定評価手法に関する一考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp.1675-1680，査読有，2015.07

野嶋潤一郎，内田真未，新井淳一，瀧淵利明，電磁波を用いた塩化物イオン量推定のためのコンクリート内部の陰イオンによる電磁波減衰理論に関する研究，土木学会第69回年次学術講演会，第 部門，pp.151-152，査読なし，2014.09

内田真未，野嶋潤一郎，瀧淵利明：赤外線を用いたコンクリート中の鉄筋腐食状況の把握に関する基礎的研究，土木学会第69

回年次学術講演会，第 部門，pp.201-202，査読なし，2014.09

R. Takatoku, Toshiaki Mizobuchi, Study on effects on distribution of chloride ions by differences of pore structure with various conditions, Concrete Solutions 5th International Conference on Concrete Repair, pp691-696, 査読有，2014.09

Jun-ichiro NOJIMA, Mami UCHIDA & Toshiaki MIZOBUCHI, BASIC STUDY FOR IMPROVEMENT OF ESTIMATION ACCURACY CONTENT OF CHLORIDE ION USING ELECTROMAGNETIC WAVES METHOD, Structural Faults and Repair, 査読なし，2014.07

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

瀧淵 利明 (MIZOBUCHI Toshiaki)

法政大学・デザイン工学部・教授

研究者番号：60339504