

令和 3 年 6 月 21 日現在

機関番号：52501

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2020

課題番号：19K15064

研究課題名（和文）コンクリートの含水率測定による表面塩分量の非破壊推定法の構築

研究課題名（英文）Construction of non-destructive estimation method of amount of surface chloride by measuring amount of water in concrete

研究代表者

原田 健二（Harada, Kenji）

木更津工業高等専門学校・環境都市工学科・助教

研究者番号：20804876

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,500,000円

研究成果の概要（和文）：コンクリート中の水分量を測定することで、コンクリート表面塩分量を推定する方法について検討した。コンクリート中の水分量は、波長1443nmと1365nmの吸光度の差分にW/Cによって変化する定数に乗じることで推定できることを明らかにした。塩分の存在による水分量の増大は、高湿度であるほど顕著になることを明らかにした。これらのことから、高湿度環境下であれば、近赤外線分光法により推定されたコンクリート中の水分量からコンクリート中の自由塩分量の大小を定性的に推定できる可能性がある。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、コンクリート中の水分に溶解している塩分により、コンクリートは湿潤傾向になり、その傾向を近赤外線分光法により非破壊で測定できた。この結果は、コンクリート表面の水分量より、表面塩分量を推定できる可能性を示している。近赤外線分光法による水分量の推定は安全かつ迅速に行うことができるため、この研究結果は、今後のコンクリート構造物の塩害の判定の効率化に大きく貢献していくと考えている。今後も研究を継続していきたいと考えている。

研究成果の概要（英文）：Estimation method for the amount of surface chloride on concrete by measuring the amount of water in the concrete was investigated. It was clarified that the amount of water in concrete can be estimated by multiplying the difference in absorbance at wavelengths 1443 nm and 1365 nm by value that changes with W / C. It was clarified that in the higher humidity environment, amount of water in the concrete increases due to the chloride in the water. These show that in a high humidity environment, it may be possible to qualitatively estimate the amount of chloride in concrete from the amount of water in concrete estimated by NIRS.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：近赤外線分光法 自由塩分 水分 非破壊検査 表面塩分量

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

飛来塩分の影響を受ける沿岸部や凍結防止剤散布地域では、塩害によりコンクリート構造物の劣化が顕在化している。コンクリート表面の塩分量は塩害の進行を予測するために必要な重要なパラメータである。コンクリート表面の塩分量は、構造物の周囲の環境や構造物の部位によって異なるため、構造物を合理的に維持管理していくうえでは、これを正確に把握する必要がある。従来の実構造物の表面塩分量を測定する方法は、構造物を傷つけるため、構造物の面的データを計測することが困難という欠点がある。そのため、非破壊によりコンクリート表面の塩分量を測定する手法が必要とされている。

コンクリート中の塩分は、コンクリート中の液状水中に溶解している自由塩分とセメント硬化体中に固定されている固定塩分の2種類が存在している。ちなみに、自由塩分がコンクリート中の鋼材に到達し、不動態皮膜を破壊することでコンクリート構造物の塩害劣化が生じる。非破壊によりコンクリート表面の塩分量を測定する従来の研究としては、マルチスペクトル法を用いてコンクリート中の固定塩分を測定している。固定塩分は、コンクリートの中性化により消失することがあるため、実環境下の構造物の表面塩分量を正確に把握することができないという懸念がある。もし、自由塩分を測定することができるのであれば、この懸念は解消され、塩害の進行に大きな影響を及ぼすパラメータを把握することができるようになる。

2. 研究の目的

本研究では以下の2つを明らかにすることを目的とする。

- ・ マルチスペクトル法によるコンクリート表面の水分量の測定方法の構築すること。
- ・ コンクリート中の液状水に溶解している塩分がコンクリートの含水状態に及ぼす影響を把握すること。

3. 研究の方法

マルチスペクトル法によるコンクリート表面の水分量の測定方法を構築するために、コンクリート中液状水量、骨材、W/C、液状水中に溶解している溶質が近赤外線領域の吸光度に及ぼす影響を検討する。

そして、コンクリート中の液状水に溶解している塩分がコンクリートの含水状態に及ぼす影響を把握するために、外気環境の条件、コンクリートの細孔構造、液状水より、コンクリート中の液状水に溶解している塩分量を推定できるか検証する。

4. 研究成果

(1) 諸要因が近赤外線領域の吸光度に及ぼす影響の検討に関する実験

方法

液状水量、骨材、W/C、液状水中に溶解している溶質が近赤外線領域の吸光度に及ぼす影響を検討するために、供試体の空隙中を濃度の異なる NaCl 溶液で満たし、温湿度が一定の環境下で供試体質量が概ね変化しなくなるまで乾燥させた後に吸光度を測定する実験を行った。実験に用いた供試体は 50×50×5mm のモルタルとセメントペーストで配合を表-1 に示す。実験の詳細を以下に示す。

表-1 供試体の配合

水準名	骨材率 [%]	W/C [%]	単位量 [kg/m ³]		
			W	C	S
50_P	0	50	612	1224	-
40_P	0	40	558	1396	-
50_M	53	50	282	564	1394
40_M	47	40	295	739	1216

28 日以上封かん養生が終了した供試体を 110 の乾燥炉で 4 日間乾燥させる。このときの質量を絶乾質量と仮定した。乾燥させた供試体を温度 20 の環境で濃度 0% (水道水)、1%、3%、5%、7%、10%、15%、20% の NaCl 溶液中にそれぞれ浸漬し、7 日間吸水させた。絶乾質量からの吸水質量を初期液状水量とした。その後、温度 20、相対湿度 85% (KCl による飽和塩法)、75% (NaCl による飽和塩法)、59% (NaBr による飽和塩法)、33% (MgCl₂ による飽和塩法)、11% (LiCl による飽和塩法) の環境下で段階的に供試体質量が概ね変化しなくなるまで乾燥させ、分光器と光源が一体化した装置の発光部を供試体の型枠面表面に直接接触させ供試体表面 5 点の反射光の強さの測定を行う。吸光度の測定には InnoSpectora 社製の近赤外線分光器 S-G1 (反射型) (波長

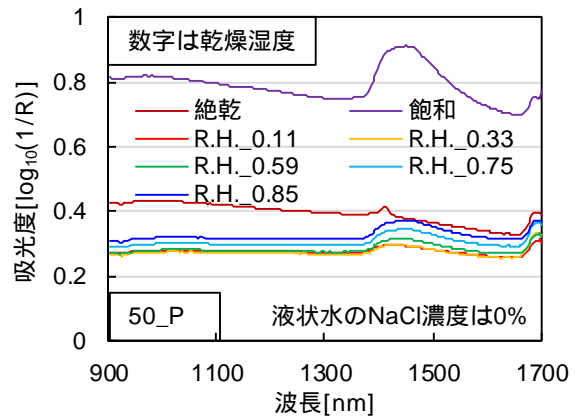


図-1 セメントペーストの吸光度

域：900～1700nm，サンプリング間隔：3.9nm，光源：ハロゲンランプ）を用いた。吸光度は供試体表面の反射率 R より算出する。反射率 R は、供試体の反射光の強さを分光器に記録されている白板の反射光の強さで除すことで求めている。

結果

図-1 に示すように、コンクリートのペースト中の水の吸収ピークは、波長 1450nm 近傍の吸光度に確認された。図-2 に示すように、飽和状態を除けば、波長 1443nm と 1365nm の吸光度の差分と水分量は線形関係を有していることが確認された。そして、その線形関係は、図-3 に示すようにペースト基準の水分量（液状水量をペーストの体積比で除したもの）であれば、セメントペースト、モルタルに関わらず、W/C 変化することを明らかにした。このことから、図-4 に示すように波長 1443nm と 1365nm の吸光度の差分に W/C によって変化する定数を乗じることでコンクリートのセメントペースト基準の水分（ H_2O ）量を $\pm 50kg/m^3$ 程度の精度で推定できることを明らかにした。

(2) コンクリートの平衡時の水分量から液状水の塩分濃度の推定に関する検討

方法

前節の実験に用いた供試体の各乾燥環境の平衡時の飽和度より、塩分が存在することで、平衡時の水分量が增大し、その増大は相対湿度が高いほど顕著になることが確認できた。

塩分の存在による、液状水量の増大を細孔構造モデルと水分凝縮理論により表現できるか検討した。以下にモデルおよび計算方法を示す。

本研究ではコンクリートの細孔構造を式(a)の以下細孔容積分布関数により表している。

$$V(r) = V_0 \{1 - \exp(-Br^C)\} \quad (a)$$

ここに、 $V(r)$ ：コンクリート単位体積中における細孔半径が r 以下の累積細孔容積 [m^3/m^3]、 r ：細孔半径 [m]、 V_0 ：コンクリート単位体積中における総細孔容積 [m^3/m^3]、 B, C ：細孔容積分布関数の形状を決定するパラメータ [無次元] である。

細孔構造を決定するパラメータは、塩分が存在しない供試体の水分平衡特性より決定する。

コンクリート細孔組織中における気液平衡は毛管凝縮理論により表されるものとし、気液界面が形成される細孔半径と細孔内相対湿度の関係は Kelvin 式(b)により表す。式(a)で表せる細孔半径より小さい細孔は全て液状水に満たされているとすると、細孔容積分布モデルより、平衡時の飽和度は式(c)で表される。

$$r_s = -\frac{2\gamma M_w}{RT\rho_l} \left(\ln \frac{p_v}{p_{v0}}\right)^{-1} \quad (b)$$

$$Sr = \{1 - \exp(-Br_s^C)\} \quad (c)$$

ここに、 r_s ：液状水が存在する最大細孔半径 [m]、 γ ：液状水の表面張力 [N/m]、 M_w ：水の

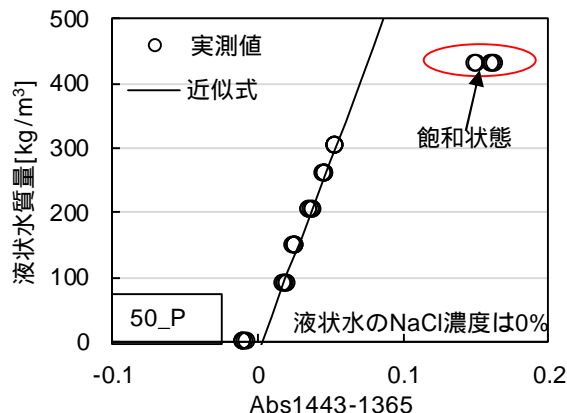


図-2 吸光度の差分と液状水量の関係

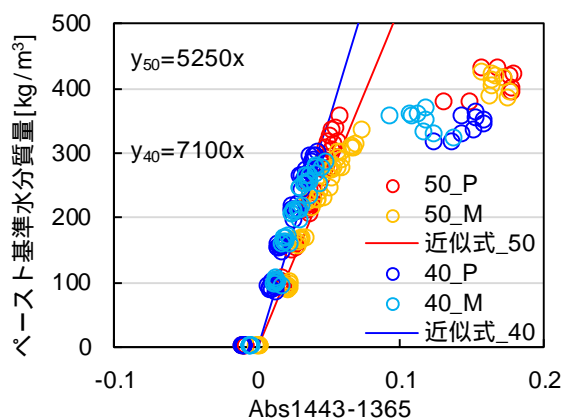


図-3 吸光度の差分とペースト液状水量の関係

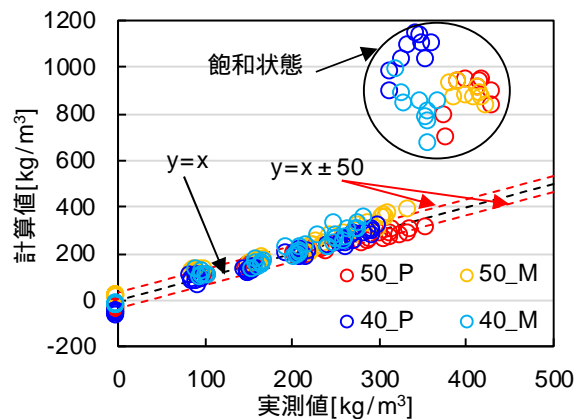


図-4 実測値と近赤外線分光法による推定値の比較

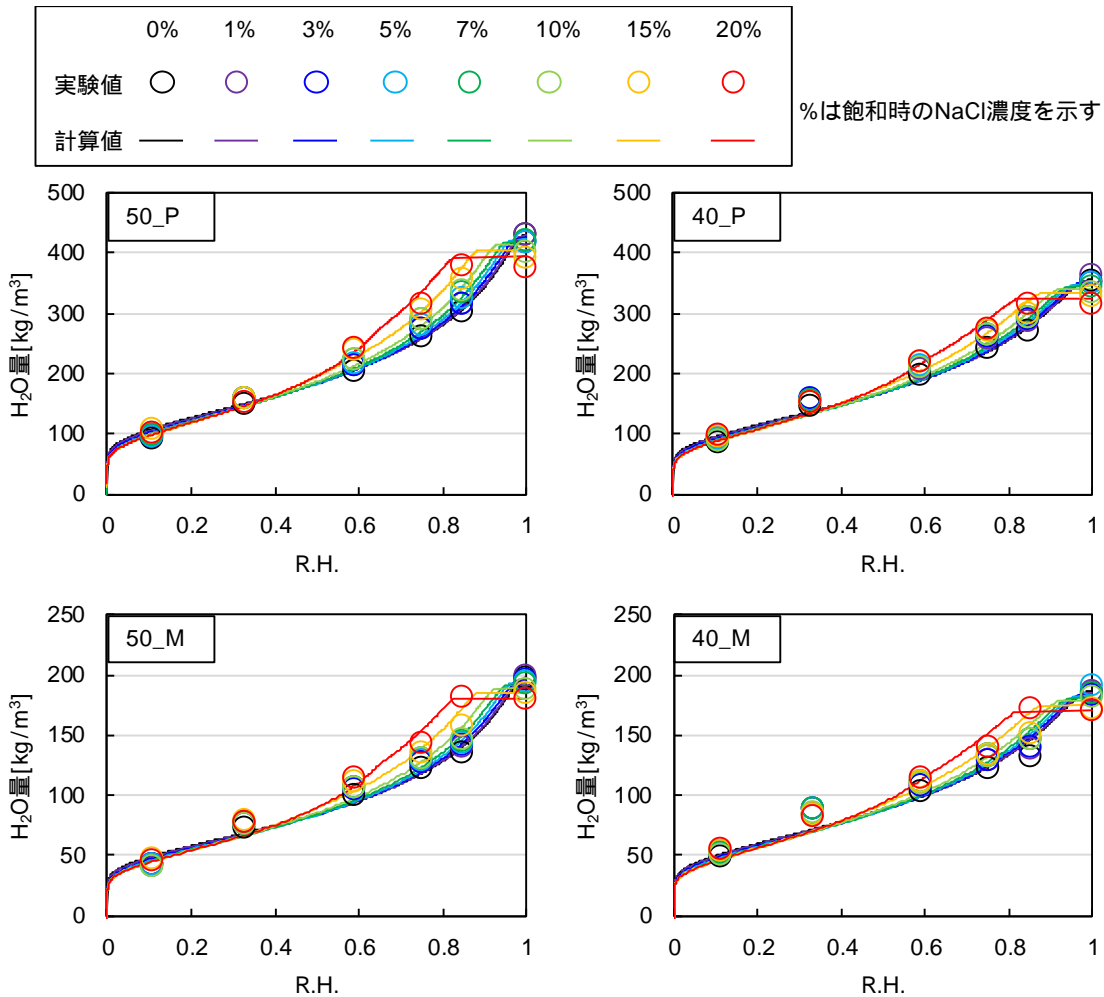


図-5 水分平衡状態の再現計算結果

分子量 [kg/mol] , R : 気体定数 [J/mol·K] , T : 絶対温度 [K] , ρ_l : 液状水の密度 [kg/m³] , p_v : 水蒸気分圧 [Pa] , p_{v0} : 飽和水蒸気圧 [Pa] , S_r : コンクリートの飽和度 [無次元] である .
 液状水の密度 , 表面張力 , 飽和水蒸気圧は液状水の NaCl 濃度により変化することを考慮する .

結果

図-5 に示すように , 塩分の存在による液状水量の増加は高湿度であるほど顕著になり , その傾向は , 本研究で用いる計算モデルにより , 塩分の存在による水分平衡特性の変化を概ね再現できることが確認できる .
 そして , 図-6 に示すように , 細孔構造 , 外気の温湿度 , 液状水中に溶解している NaCl 量が既知であれば , 本研究で用いる計算モデルにより , コンクリートのセメントペースト基準の水分 (H_2O) 量を $\pm 35 \text{ kg/m}^3$ 程度の精度で推定できることを明らかにした . 換言すれば , この結果は , コンクリート中のペースト中の水分 (H_2O) 量と細孔構造 , 外気の温湿度が既知であれば , 液状水の NaCl 濃度を推定できることを示している .

(3) 近赤外線分光法と計算モデルによるそれぞれの液状水量の推定値に関する検討

方法

本研究を実構造物に適用する場合 , ペースト中の水分 (H_2O) 量は近赤外線分光法により求めた値 , 外気の温湿度 , 細孔構造の形状を仮定し , 同一環境下における水分量の大小により液状水中の塩分量の大小を推定する . そこで , 近赤外線分光法により推定された水分量と計算モデルの水分量が正の相関があるか検討した .

結果

図-7 は , 横軸の値を近赤外線分光法により推定したペースト中の水分 (H_2O) 量を縦軸

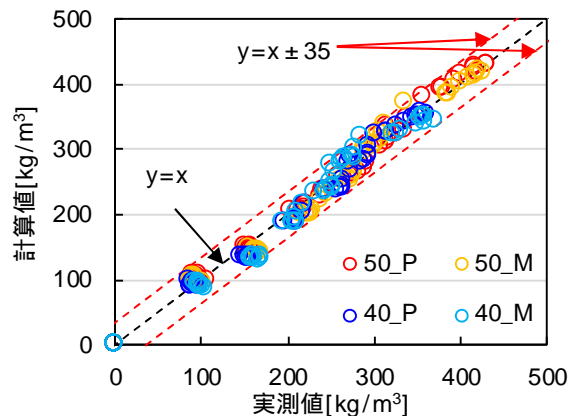


図-6 実測値と計算値の比較

の値を計算モデルにより推定したペースト中の水分(H_2O)量をプロットしたものである。この結果より、近赤外線分光法により推定した水分量と計算モデルの水分量は正の相関を有しており、コンクリートのセメントペースト基準の水分(H_2O)量で $\pm 60\text{kg/m}^3$ 程度の精度があることを明らかにした。この結果は自由塩分の存在による水分量の増加が顕著になる高湿度環境下かつコンクリートの細孔構造が同様であれば、近赤外線分光法により推定された水分量によりコンクリート中の自由塩分量の大小を定性的に推定できる可能性があることを示している。

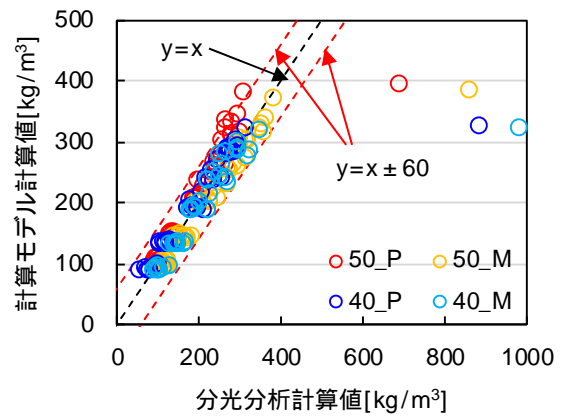


図-7 近赤外線分光法による推定値と計算値の比較

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 原田健二, 下村匠	4. 巻 47
2. 論文標題 近赤外線分光法によるコンクリート中の液状水量の推定に及ぼす影響要因の検討	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 高木岳, 原田健二
2. 発表標題 近赤外線分光法を用いたコンクリートの水分量の推定手法の検討
3. 学会等名 第47回土木学会関東支部技術研究発表会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------