

論文 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

原田 健二*1, 下村匠*2

要旨: 非破壊によるコンクリートの水分量の計測から自由塩化物イオン濃度の簡易推定手法の構築のために、近赤外線分光法によるコンクリート中の液状水量推定に及ぼす影響要因について検討した。実験結果より、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、波長 1443nm と 1365nm の吸光度の差分と水分量は線形関係を有し、さらに、W/C が小さいほど同一液状水量時の吸光度の差分は小さいことが明らかとなった。そして、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ペースト中の水分量を精度よく推定できることが明らかになった。

キーワード: 近赤外線分光法, 吸光度, 水分, 塩分

1. はじめに

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。塩害の有無を判定する際には、コンクリート表面や内部の塩化物イオン濃度を測定する必要がある。この測定は、一般的に構造物から直接試料を採取するコア抜きを用いられることが多い。しかし、コア抜きによる方法は、試料の分析の時間がかかること、補修が必要なこと、コア抜きによる評価は点であるため構造物全体の判定には不向き等の問題がある。そのため、コンクリート構造物の塩害の有無の判定を簡易かつ非破壊で求める手法が求められている。

非破壊でコンクリート表面の塩化物イオン濃度を測定する手法としては、例えばマルチスペクトル法がある。既往の研究¹⁾によるマルチスペクトル法ではコンクリート中に固定されている固定塩化物イオンを測定しているといわれている。固定塩化物イオンは、中性化により消失することがあるため、実構造物の表面塩化物イオン濃度を測定するためには、液状水中に溶解している自由塩化物イオン濃度を測定することが望ましいと考えられる。

既往の研究²⁾より、コンクリート中の液状水に塩分が存在すると、蒸気圧降下によりコンクリートは湿潤傾向となる。この性質を利用して、近赤外線分光法等によりコンクリートの含水状態を測定することで、コンクリートの液状水中に溶解している自由塩化物イオン濃度を間接的に測定できると考えられる。

以上のことから、非破壊によるコンクリートの水分量の計測からコンクリート表面の自由塩化物イオン濃度の簡易推定手法の構築のために、本研究では、骨材の有無、W/C の違い、セメント硬化体空隙中の液状水に溶解して

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

いる塩分の有無および濃度が近赤外線領域の吸光度に及ぼす影響を検討する。続いて、それらが近赤外線分光法によるコンクリート中の液状水量の検量線の作成に及ぼす影響を明らかにする。

2. コンクリートの近赤外線領域の吸光度に及ぼす影響要因の検討

2.1 実験概要

本研究では、コンクリート表面を模擬するために薄板のセメントペースト供試体およびモルタル供試体を実験に用いた。

供試体中の液状水量、骨材の有無、W/C、液状水中に溶解している塩分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 のモルタルおよびセメントペーストである。配合を表-1 に示す。表-1 の骨材率はモルタル中の細骨材の体積割合である。詳細を以下に示す。

*1 木更津工業高等専門学校 環境都市工学科 助教(正会員)

*2 長岡技術科学大学 環境社会基盤系 教授 工博(正会員)



図-1 吸光度の測定に用いた分光器

28日以上封かん養生が終了した供試体を110°C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°C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°C、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、図-1に示すような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。

供試体中の液状水の体積は供試体の質量測定により求めた液状水の質量を液状水の密度で除すことで求めた。NaCl濃度と液状水の密度の関係は文献の実測値³⁾を近似式により表現したものを用いた。供試体中の液状水のNaCl濃度は水分の蒸発に伴い逐一計算し、それに伴い液状水の密度も変化させている。ただし、液状水のNaCl濃度は26.4%（NaCl溶液の飽和濃度）以上にならないものとし、水分の蒸発に伴い析出するNaCl結晶は飽和度（体積比）を計算するにあたり無視する。

NaCl溶液は水道水と純度99%以上のNaCl結晶を用いて作製した。なお、溶液の濃度は溶質の質量を溶液（溶質+溶媒）の質量で除した質量濃度で表している。

2.2 供試体の水分平衡特性

供試体の吸水質量（溶質+溶媒）及び吸水体積を図-1に示す。供試体の吸水質量は吸水に用いたNaCl溶液の濃度増加に伴い増加しているが、配合が同じであれば、吸水体積はほぼ同じであることが確認された。

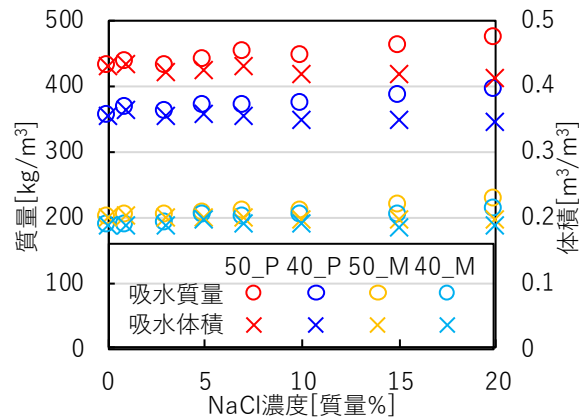


図-1 供試体の吸水量

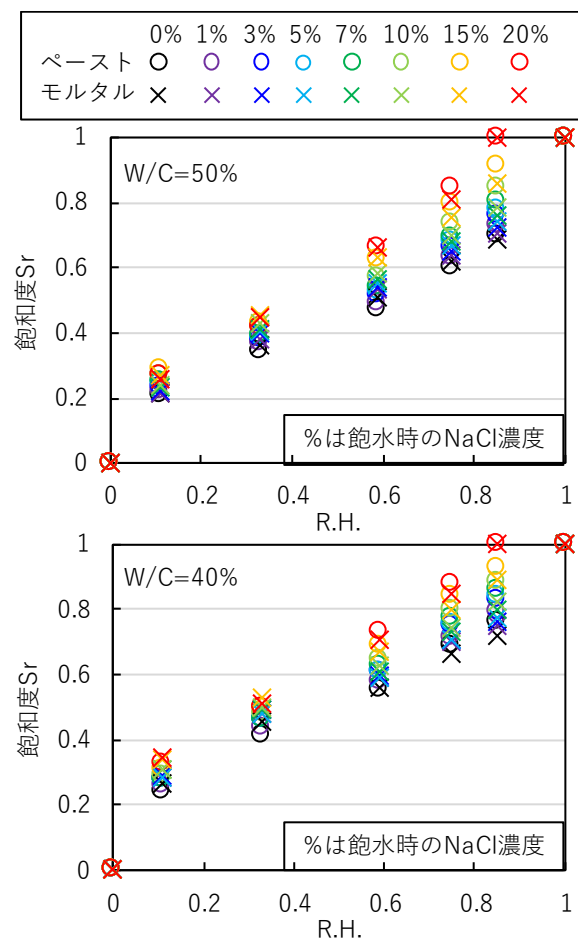


図-2 供試体の水分平衡特性

種々の濃度のNaCl溶液を用いて飽和させた供試体の各湿度環境下における平衡時の体積飽和度を図-2に示す。塩分が存在することで、平衡時の体積飽和度が増加することが確認できる。そして、W/Cが同一で吸水させたNaCl溶液が同じ濃度のセメントペーストとモルタルの各相対湿度の平衡時の体積飽和度は概ね一致していることが確認できる。このことからW/Cが同じであればセメントペーストとモルタルの水分平衡特性はほぼ同じであることが確認できる。

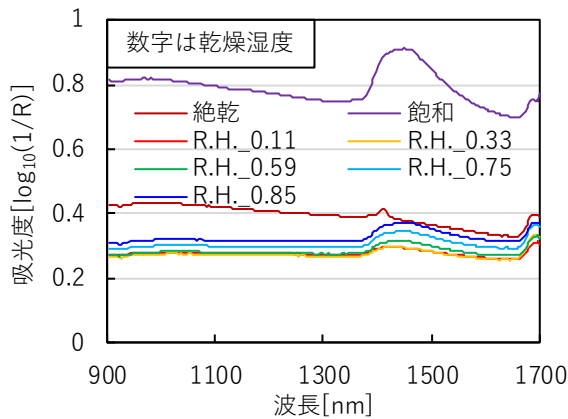


図-3 吸光度 (50_P_0)

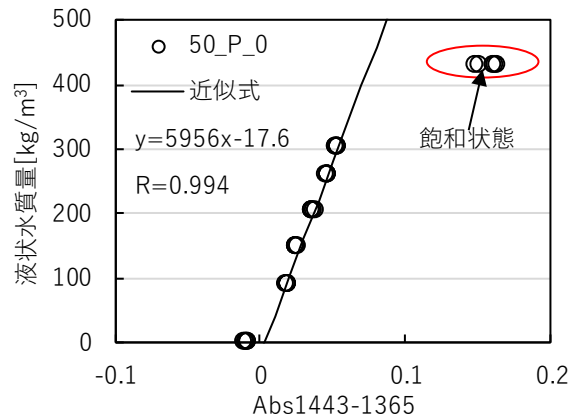


図-4 吸光度の差分と液状水量の関係 (50_P_0)

2.3 液状水量の違いが近赤外線領域の吸光度に及ぼす影響の検討

近赤外線領域では、水は波長 1940nm, 1450nm, 980nm, 740nm に強い吸収ピークが存在している⁹⁾といわれている。そして、そのピークは複数の物質が存在する場合、各種成分が互いに影響し、幅広になり、特定の物質量と相関があるのは、特定波長同士の吸光度の差分といわれている⁹⁾。さらに、既往の研究⁹⁾より、モルタルの場合、波長 1425nm と波長 1350nm の吸光度の差分は水分の存在により増加することが確認されている。

本節では、コンクリート中の液状水の存在により従来確認されている水の吸収ピークが存在し、ピークの吸光度と特定の波長の吸光度の差分により液状水量を定量的に表現することが可能か検討する。

図-3 に水道水を吸水させた 50_P の各乾燥環境の平衡質量時の波長 900nm~1700nm の吸光度を示す。吸光度は 5 点の平均値を示す。図-3 より、液状水量の増加に伴い、水の吸収ピークの近傍である波長 1443nm で確認できる凸部が大きくなることが確認できる。

液状水量と相関がある吸光度の差分を抽出する必要がある。本研究では、この吸光度の差分をできるだけ大きくするために、極値であろう波長 1443nm と 1365nm の吸光度の差分を用いる。

図-4 に水道水を吸水させた 50_P の吸光度の差分と液状水量の関係を示す。飽和状態の吸光度の差分は飽和状態以外の測定結果と比較すると大きくばらつくことが確認できる。そして、飽和状態のものを除くと、吸光度の差分は液状水量と線形関係があることが確認できる。飽和状態の吸光度の差分がばらつく理由としては、波長 1450nm の水の吸収ピークは強いため、飽和状態のように供試体表面が水でおおわれている状況下では測定に適していないことが関係している⁴⁾と考えられる。これらのことから、飽和状態を除けば、コンクリート中の液状水量は波長 1443nm と 1365nm の吸光度の差分により推

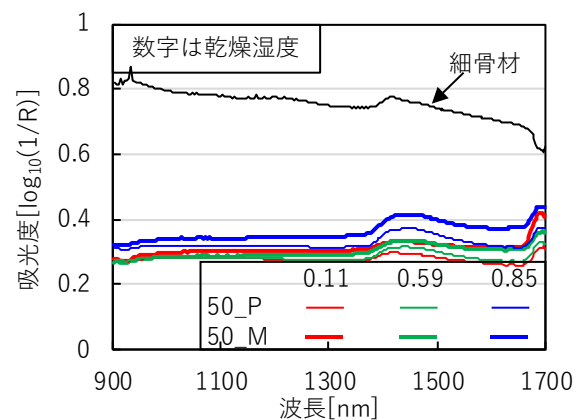


図-5 吸光度 (50_M_0, 40_P_0)

定ができると考えられる。

以降の検討では、飽和時の結果を除いて、骨材の有無、W/C の違い、セメント硬化体空隙中の液状水に溶解している塩分の有無および濃度の違いが波長 1443nm と 1365nm の吸光度の差分に及ぼす影響について検討する。

2.4 骨材の有無が吸光度の差分に及ぼす影響の検討

本節では、波長 1443nm と 1365nm の吸光度の差分の平均値とモルタルの液状水量、セメントペーストの液状水量の相関を比較することで骨材の有無が及ぼす影響を検討する。

図-5 に水道水で吸水させた 50_M と 50_P の各乾燥環境の平衡時およびモルタルに使用した細骨材（表面水率 0.92%）の波長 900nm~1700nm の吸光度の測定結果の一部を示す。モルタルもセメントペーストと同様に波長 1443nm で確認できる凸部が液状水量の増加に伴い大きくなることが確認できる。このことから、モルタルの吸光度は骨材表面を覆うペーストが吸光度に大きな影響を及ぼしていると考えられる。

図-6 に 50_P の吸光度の差分と液状水量の関係、図-7 吸光度の差分と液状水量をペーストの体積比で除した値の関係を示す。

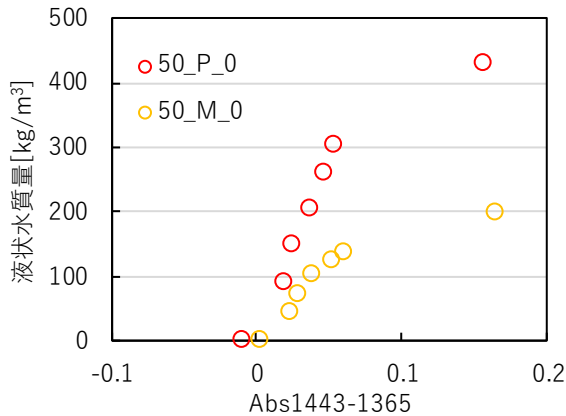


図-6 吸光度の差分と液状水量の関係
(50_P_0, 50_M_0)

図-6より、W/Cが同じセメントペーストとモルタルの結果を比較すると、吸光度の差分の増加に伴う液状水量の増加は明確に異なることが確認できる。一方、図-7より、液状水の物理量をセメントペースト基準の液状水量で比較すると、セメントペーストとモルタルの結果はほぼ同じであることが確認できる。図-2より、W/Cが同じであればセメントペーストとモルタルの水分平衡特性はほぼ同じであることが確認できているため、この結果は、波長1443nmと1365nmの吸光度の差分より推定する液状水量はセメントペースト基準の液状水量であることを示しているといえる。

2.5 W/Cの違いが吸光度の差分に及ぼす影響の検討

本節では、W/Cの違いが波長1443nmと1365nmの吸光度の差分とペースト基準の液状水量に及ぼす影響を検討する。

図-8に水道水で吸水させた50_Pと40_Pの各乾燥環境の平衡質量時の波長900nm～1700nmの吸光度の一部を示す。液状水量の増加に伴う波長1443nmと1365nmの吸光度の差分の増加はW/Cによらず同様の傾向を示すことが確認できる。

図-9に吸光度の差分と液状水量をペーストの体積比で除した値の関係を示す。

図-9より、セメントペースト基準の液状水量で吸光度の差分と液状水量の関係はW/Cによらずほぼ同じであることが確認できる。しかし、詳細にみると、W/Cが低下すると、同程度のセメントペースト基準の液状水量でも、吸光度の差分が小さくなることが確認できる。この理由としては定かではないが、W/Cが小さくなることで相対的にペーストの空隙量が低下し、空隙中に存在する水蒸気等の気体への光の吸収が少なくなることが関係していると考えられる。このことから、波長1443nmと1365nmの吸光度の差分によりコンクリート中の液状水量をより正確に推定する際には、W/Cの違いが吸光度

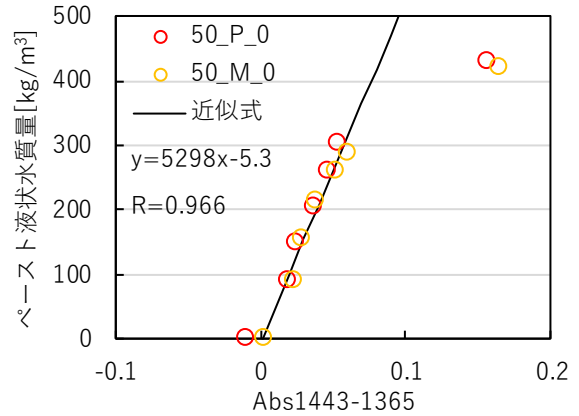


図-7 吸光度の差分とペースト液状水量の関係
(50_P_0, 50_M_0)

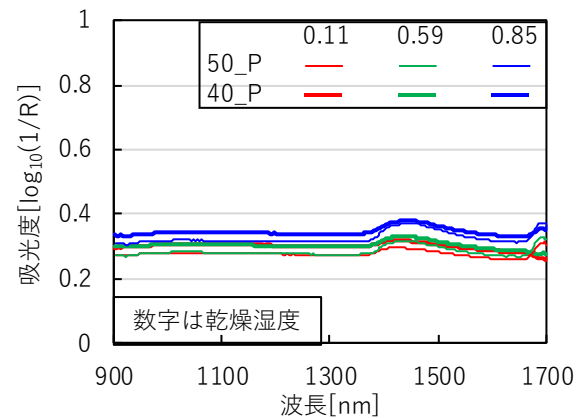


図-8 吸光度 (50_M_0, 40_P_0)

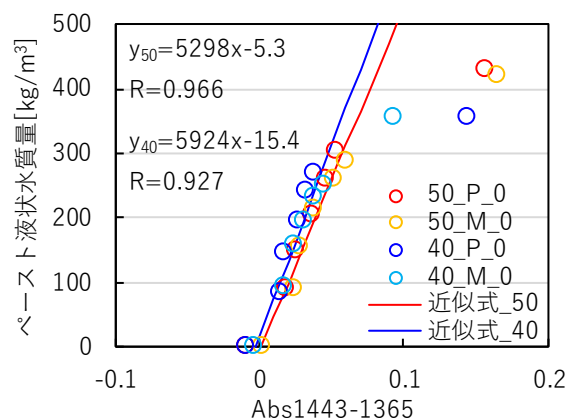


図-9 吸光度の差分とペースト液状水量の関係
(50_P_0, 50_M_0, 40_P_0, 40_M_0)

の差分に及ぼす影響を考慮することが望ましいといえる。

2.6 塩分の有無と濃度が吸光度の差分に及ぼす影響の検討

2.3で述べたように吸光度のピークは複数物質に依存し変化するといわれている。さらに、高濃度の塩分が供給される環境下では、コンクリート中の液状水に溶解し

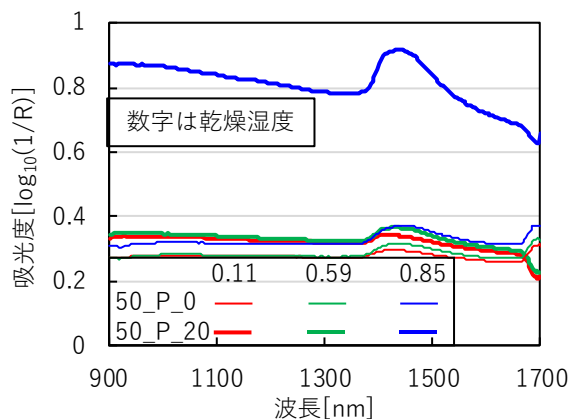


図-10 吸光度 (50_P_0, 50_P_20)

ている塩分の存在により、希薄溶液として取り扱うことができない可能性がある。

本節では、波長 1443nm と 1365nm の吸光度の差分の平均値とセメントペースト中の液状水量の相関を確認することで塩分 (NaCl) の有無及び濃度が吸光度の差分に及ぼす影響を検討する。

図-10 に水道水と 20%NaCl 溶液で吸水させた 50_P の各乾燥環境の平衡時の波長 900nm~1700nm の吸光度の一部を示す。塩分の有無によらず、液状水量の増加に伴い波長 1443nm と 1365nm の吸光度の差分が大きくなり、吸光度の分布の形状は大きな差がないことが確認できる。データ数が多く煩雑になるため、割愛しているが、この傾向は他の濃度の NaCl 溶液で吸水させた供試体でも同様の傾向を示すことが確認できている。

塩分の存在による液状水の密度の変化および水分量 (溶媒量) の変化の影響を検討するために、図-11 に吸光度の差分と体積飽和度の関係、図-12 に吸光度の差分と水分量 (溶媒量) の関係を示す。

図-11, 12 より、吸光度の差分は、体積飽和度及び水分量の増加に伴い明確に増加していることが確認できる。さらに、相関係数を比較すると、吸光度の差分と体積飽和度の相関係数より吸光度の差分と水分量の相関係数の方が大きくなることが確認できる。これらのことから、コンクリート中の液状水の塩分濃度が希薄溶液とみなせないほど高くなる場合、波長 1443nm と 1365nm の吸光度の差分より推定するコンクリート中の液状水量の物理量は水分量を用いることが望ましいといえる。

2.7 近赤外線領域の吸光度に及ぼす影響のまとめ

本実験により以下が明らかとなった。

- 1) コンクリート中の液状水量の増加に伴い、1443nm と 1365nm の吸光度の差分が増加し、それは、飽和状態のものを除くと、吸光度の差分は液状水量と線形関係がある。
- 2) 1443nm と 1365nm の吸光度の差分は、骨材でなく

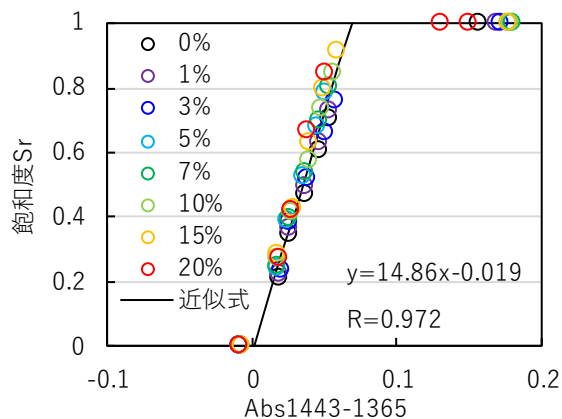


図-11 吸光度の差分と飽和度の関係 (50_P)

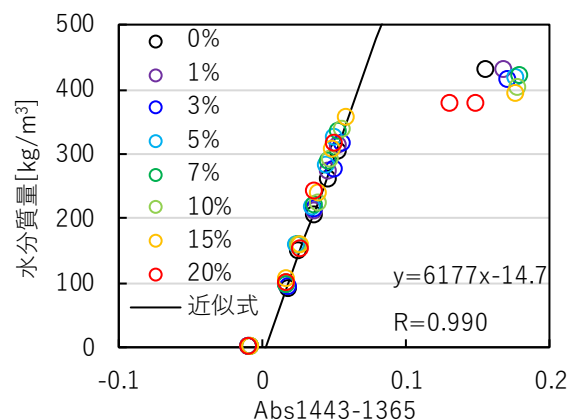


図-12 吸光度の差分と水分量の関係 (50_P)

ペースト中に存在している液状水量と相関がある。

- 3) ペースト中の液状水量と波長 1443nm と 1365nm の吸光度の差分 W/C に依存し、W/C が小さいほど同一液状水量時の吸光度の差分は小さい。
- 4) 同一相対湿度で乾燥させた供試体の平衡時の水分量は塩分の有無および濃度の増加に伴い増加し、それに伴い波長 1443nm と 1365nm の吸光度の差分は増加するが、ペースト中の水分量が同程度であれば、波長 1443nm と 1365nm の吸光度の差分は塩分の有無及び濃度に関わらずほぼ同程度になる。

3. 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

3.1 検量線の作成

2 章の検討結果より、近赤外線分光法により推定するコンクリート中の液状水量を推定するにあたり、入力値を 1443nm と 1365nm の吸光度の差分とし、出力値はセメントペースト基準の水分量が望ましいことが明らかになった。そして、より精度よく推定するには W/C の違いが波長 1443nm と 1365nm の吸光度の差分に及ぼす影響を考慮する必要があることが明らかになった。

以上のことから、波長 1443nm と 1365nm の吸光度の差分とセメントペースト中の水分量は線形関係があり、

傾きが W/C により変化するものとして検量線を作成する。切片については、近似式の傾きと比較して小さいため 0 とする。

検量線を式(1)、検量線の傾きと W/C の関係を式(2)に示す。

$$H_2OP = \alpha(Abs_{1443-1365}) \quad (1)$$

$$\alpha = -185(W/C) + 14500 \quad (40 \leq W/C \leq 50) \quad (2)$$

ここに、 H_2OP ：セメントペースト基準の水分量[kg/m³],
 α ：コンクリートの W/C[%]によって定まる係数,
 $Abs_{1443-1365}$ ：1443nm と 1365nm の吸光度の差分である。

3.2 計算値と実測値の比較

図-13 に全水準の吸光度の差分と水分量をペーストの体積比で除した値の関係を示す。

図-14 に式(1)に示す検量線を用いて求めたセメントペースト基準の水分量の計算値と実測値の比較を示す。図-14 より、飽和状態の結果を除くと、計算値と実測値はほぼ一致していることが確認できる。このことから W/C が 40%～50%の範囲であるのならば、近赤外線分光法によりコンクリート中の水分量を精度よく推定できるといえる。

図-2 より、雰囲気相の相対湿度に平衡する水分量は液状水中に溶解している塩分量の増加に伴い増加するため、雰囲気相の温湿度が一樣な環境下における構造物表面の水分量を本研究で構築した水分量の推定により、構造物表面の自由塩化物イオン濃度の大小を定性的に推定することができる可能性はあるといえる。

4. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) セメント硬化体中の液状水量の増加に伴い、波長 1443nm と 1365nm の吸光度の差分が増加し、それは、飽和状態のものを除くと、吸光度の差分はセメント硬化体中の水分量と線形関係があることが明らかになった。
- 2) 波長 1443nm と 1365nm の吸光度の差分は、同程度の水分量でも、セメント硬化体中の W/C によって変化することが明らかになった。
- 3) 液状水中に溶解している塩分が波長 1443nm と 1365nm の吸光度の差分に及ぼす影響は、塩分の存在によるセメント硬化体中の水分量の増大に伴う波長 1443nm と 1365nm の吸光度の差分の増加と比較するとほぼないことが明らかになった。
- 4) W/C が 40%～50%の範囲であれば、波長 1443nm と 1365nm の吸光度の差分にコンクリートの W/C によって定まる定数を乗じることで、飽和状態以外の水分量を高精度に把握することができることが明らかになった。

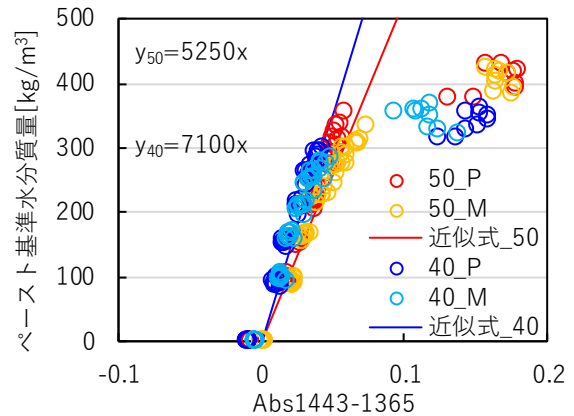


図-13 吸光度の差分とペースト基準水分量の関係 (全水準)

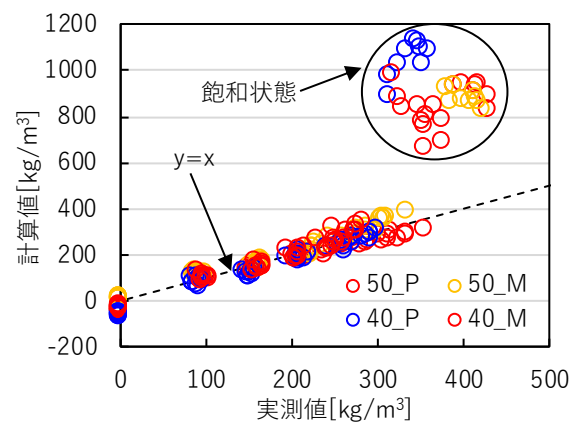


図-14 実測値と計算値の比較

謝辞：本研究は日本学術振興会科学研究費補助金若手研究「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」（研究代表者：原田健二，課題番号：19K15064）を受けて行った。

参考文献

- 1) 金田尚志：マルチスペクトル法によるコンクリートの劣化物質検出手法の開発，東京大学学位論文，2004.
- 2) 原田健二，下村匠：塩分がコンクリートの乾湿挙動に及ぼす影響の解明とそのモデル化，土木学会論文集 E2, Vol.72, No.4, pp.427-439, 2016.
- 3) 日本化学会編：化学便覧基礎編 II 改定 2 版，pp.II-9, 日本化学会，2004.
- 4) 中村睦子，中内茂樹：近赤外分光画像でみる化粧品中の保湿効果，光学，Vol.39, No.11, pp.529-533, 日本光学会，2010.
- 5) 岩本睦夫：近赤外分光法による食品成分の非破壊測定，日本食品工業学会誌，Vol.27, No.9, pp.464-472, 日本食品化学工学会，1980.
- 6) 山川和輝，上田隆雄，郡政人，七澤章：近赤外分光法によるモルタル表層物性の評価に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.35, No.1, pp.1801-1806, 2013.