

論文 吸水させたコンクリート表面の輝度の時間変化に基づく 表層品質評価の広域化

宮 翼*1・陽田 修*2・上村 健二*3・村上 祐貴*4

要旨: コンクリートの表層品質を、一度の測定で広範囲を評価可能な反射輝度法が提案された。本研究では、表面吸水速度が既知である小型コンクリートパネルを用いて、実構造物を対象とした表層品質評価を行なうとともに、検討が不十分であった測定開始時の余剰水の影響について評価した。その結果、小型コンクリートパネルの表面吸水速度と反射輝度の時間変化の関係から算定した対象構造物の表面吸水速度と実測の表面吸水速度には差異が生じた。また、提案する測定方法では測定開始時の余剰水が表面給水速度の算定に及ぼす影響は小さいことが確認された。

キーワード: 表層品質, 反射輝度, 表面吸水試験, 偏光フィルタ

1. はじめに

コンクリート構造物の表層部の密実性は、構造物の劣化を防ぐための重要な品質要素である。現在、コンクリート表層部の密実性（以下、表層品質）を定量的に評価する代表的な手法として、表面吸水試験と表層透気試験が実用化されているが、これらの手法は一回の測定で評価可能な領域が狭小であり、広域な表層品質の評価を行うには測定を多数行う必要がある。

このような背景から、中川らは吸水したコンクリートの反射輝度の時間変化を XYZ カメラで測定し、従来方法と比べ一度の測定で広範囲の表層品質を定量的に評価する新たな評価手法（以下、反射輝度法）を提案した¹⁾。また、小宮らは、測定中の照度の時間変化や外気温の変化等の外乱の影響を補正することで、屋外環境下においても RGB カメラを使用して反射輝度に基づく表層品質評価が可能であることを示した²⁾。

一方で、様々な環境条件にある供用中の実構造物を対象とした反射輝度法の測定は行われていない。また、環境作用による外乱の他に、散水により測定開始時のコンクリート表面に滞留する余剰水の影響について検討が不十分であった。そこで本研究では、供用中の実構造物を対象に反射輝度法を用いて表層品質評価が可能かどうか検討を行った。

2. 反射輝度法の測定原理

図-1 に示すように、コンクリート表層部の色合いは、乾燥時と吸水時で明らかに異なる。この違いは反射輝度に起因しており、コンクリート表層部の凹凸が水で充填され乱反射が発生しにくくなるためである。コンクリー



図-1 コンクリートの乾燥時（左）と吸水時（右）

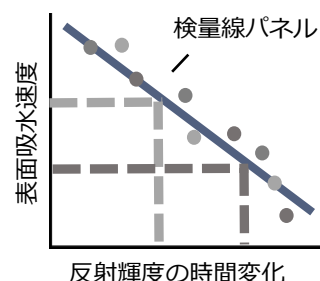


図-2 検量線の作成原理

表-1 使用したカメラとレンズの仕様

RGBカメラ	カメラ本体	東芝テリー株式会社BU238MCF
	映像素子	CMOSイメージセンサ
	有効画素数	1936×1216
レンズ	レンズ本体	富士フイルム株式会社HF8XA-5M
	焦点距離	8[mm]
	絞り(F値)範囲	1.6-16
	画角	58.4×44.6[deg]
	フィルタ径	M25.5×0.5

ト表面から水を吸水させた場合、ひび割れ等の欠陥がなく、表層品質が良いほど吸水量が少なく、その分乾燥が早くなる。この性質に着目し、吸水させたコンクリート表面の反射輝度の時間変化から表層品質評価を行う手法が反射輝度法である。吸水させたコンクリート表面の撮影には、RGB カメラを用いた。RGB カメラと装着したレンズの仕様を表-1 に示す。

*1 長岡工業高等専門学校 環境都市工学専攻 (学生会員)

*2 長岡工業高等専門学校 環境都市工学科教授 博(工) (正会員)

*3 長岡工業高等専門学校 電子制御工学科准教授 博(工) (正会員)

*4 長岡工業高等専門学校 環境都市工学科教授 博(工) (正会員)

反射輝度法の表層品質評価には、表層品質の異なる小型コンクリートパネル（以下、検量線パネルと称する）を複数用いる。測定対象の近傍に検量線パネルを設置し、測定対象と同様に散水し吸水させる。検量線パネルを対象面と同じ画角内に収まるように配置し、反射輝度を測定する。検量線パネルはあらかじめ吸水量と表面吸水速度を測定し、図-2 のように検量線パネルの反射輝度と吸水量、あるいは表面吸水速度との関連付けを行う（検量線の作成）。測定対象の任意の領域における吸水量、あるいは表面吸水速度は、作成した検量線から算出する。

3. 実験概要

3.1 検量線パネルの表層品質評価試験

(1) 検量線パネルの概要

検量線パネルの形状寸法は、150mm (W) ×150mm (D) ×100mm (H) の角柱形状である。コンクリートの計画配合を表-2 に示す。セメントは早強ポルトランドセメントを使用した。水セメント比は3水準(45%, 55%, 65%)とした。測定面は打込み時の側面とし、測定面以外の面からの吸水を防ぐ目的で、図-4 に示すように側面には測定面から奥行き方向 30mm 程度までエポキシ樹脂を塗布し、その他の部分は防食テープでシールした。検量線パネルは材齢 1 日で脱型し、その後の養生方法は4水準（気中 30℃、15℃、5℃、水中 20℃）とした。検量線パネルは各パラメータにつき3体作製した。気中養生の検量線パネルは、材齢 7 日の時点まで所定の温度に設定された恒温室内で養生した。その後は室温 20℃設定の実験室内で気中養生を行った。水中養生の検量線パネルは、材齢 7 日の時点まで水温 20℃で水中養生を行い、その後は気中養生の検量線パネルと同様、実験室内で測定まで気中養生を行った。なお、水セメント比 65%の気中養生（5℃）、水セメント比 55%の水中養生で作製した検量線パネルは測定面に損傷があり、表面吸水試験を正確に行うことができなかったため、検討対象外とした。

(2) 表面吸水試験

検量線パネルの反射輝度の時間変化と表面吸水速度を関連付ける検量線を作成するため、検量線パネルを対象に表面吸水試験³⁾を行い、表面吸水速度を測定した。表面吸水試験はコンクリート表面に固定した吸水カップに水を注水して行う試験であり、10 分間の注水で表面吸水速度が得られ、この値を表-3 に示す吸水抵抗性の値と比較することで表層品質の良否を判断することができる。

3.2 反射輝度測定試験

(1) 測定対象構造物

測定対象の構造物は、新潟県長岡市内にある国道下のボックスカルバート壁面とした。複数のボックスカルバ

表-2 検量線パネルの計画配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	目標空気量 (%)	単位量(kg/m ³)				
				水	セメント	細骨材	粗骨材	AE減水剤
25	45.0	42.0	4.5	168	373	739	1028	3.73
25	55.0	42.0	4.5	168	305	763	1061	3.05
25	65.0	42.0	4.5	168	258	779	1084	2.58

表-3 吸水抵抗性の指標

吸水抵抗性	表面吸水速度(ml/m ² /s)
良	0.25未満
一般	0.25~0.50
劣	0.50超過

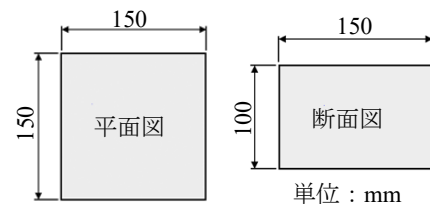


図-3 検量線パネル形状寸法

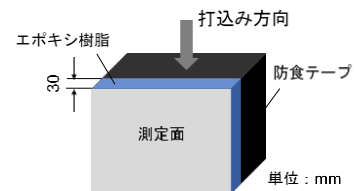


図-4 検量線パネル概要

ートから、2 箇所の壁面を測定範囲として選定し、それぞれを地点 1 および地点 2 とした。測定対象の概要を図-5 に示す。各地点の測定範囲は 3200mm (W) ×1600mm (H) とし、地点 1 では 21 箇所、地点 2 では 20 箇所の領域を選定し番号を付け、その領域について反射輝度(画像上のある領域のピクセルごとの反射輝度をその領域内で平均化したもの)の時間変化を抽出した。また、測定日の概要を表-4 に示す。測定は 2 回ずつ、地点 1 では 10/26、11/14、地点 2 では 11/4、11/30 に行った。

(2) 反射輝度測定手順

測定対象構造物の近傍に図-6、図-7 に示すような配置で検量線パネルを測定面が鉛直になるように設置した。測定面と同じ大きさの保水シートを、テープを用いて貼りつけ密着させた。近隣に水道設備が存在しないため、貯水タンク内に水中ポンプを設置し、散水ホースのシャワーヘッドで散水することとした。散水設備により時間あたりの散水量は変化するため、本研究では総散水量で吸水量を制御することとした。検量線パネルの測定面および対象構造物に 100L 程度散水した。散水量はシャワーヘッドに取り付けた流量計を用いて確認した。散水時は測定範囲の上部から流下させるように散水するようにし、保水シートにより乾燥を防ぐことで測定範囲内で吸水量に差が極力生じないように留意した。散水後、余剰水

を取り除くため 10 分間静置した。保水シートを取り除き、検量線パネルと対象構造物の四隅に測定中の照度変化の補正を目的としたセラミックパネル（以下、補正用パネル）を設置した。補正用パネルの詳細は後述する。対象構造物および検量線パネルを後述する偏光フィルタを有する RGB カメラおよび偏光フィルタを有しない RGB カメラを用いて、反射輝度を 10 秒間隔で 1 時間撮影した。RGB カメラは測定範囲が画角に収まるよう設置し、定点で撮影した。また、RGB カメラを被写体に対して角度を付けて設置すると強い正反射が発生し、コンクリート表面の乾燥に伴う反射輝度を正確に取得できない可能性があるため、対象構造物に対して垂直に設置した。

(3) 対象構造物の表面吸水試験

本手法の妥当性を検証するため、各地点で表面吸水試験を行った。試験は最後の反射輝度測定日の 3 日後である 12 月 2 日に行い、測定面が十分に乾燥していることを確認し実施した。地点 1 では 5 箇所、地点 2 では 4 箇所表面吸水速度を測定した。測定した表面吸水速度の実測値と同領域の輝度の時間変化から算定した表面吸水速度との比較により評価手法の妥当性を検証した。

3.3 測定結果に影響を与える要因への対策

(1) 補正用パネルによる照度の変化補正

屋外環境下で試験を行う際は、太陽高度の変化等による測定中の照度の変化を無視できない。そこで、照度変化を補正するためセラミックパネル（以下、補正用パネル）を測定対象の検量線パネル及び測定対象範囲の四隅に設置し照度変化の補正を試みた。

測定中の吸水させた試験体の反射輝度の変化量には乾燥による反射輝度の変化と太陽高度の変化等による照度の変化が含まれる。一方、補正用パネルは散水していないため、測定中の反射輝度の時間変化は照度の変化のみである。このことから、四隅の補正用パネルの反射輝度から対象箇所の補正值を求めた。双線形補間の式を式 (1) に示す。

$$Bt = (1-t)f(x_1, y_1) + (1-s)tf(x_2, y_1)a_2 + s(1-t)f(x_1, y_2) + stf(x_2, y_2) \quad (1)$$

ここで、 Bt ：双線形補間から算出された対象領域用パネルの時刻 t における反射輝度、 s ： x 座標の補間パラメータ、 t ： y 座標の補間パラメータ、

$f(x_1, y_1)$ ：左上の補正パネルの反射輝度値、

$f(x_2, y_1)$ ：左下の補正パネルの反射輝度値、

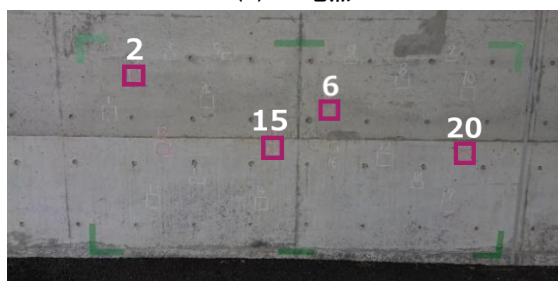
$f(x_1, y_2)$ ：右上の補正パネルの反射輝度値、

$f(x_2, y_2)$ ：右下の補正パネルの反射輝度値である。

また、補間パラメータ t 、 s については式 (2)、(3) の通りである。



(a) 地点 1



(b) 地点 2

図-5 測定対象概要

表-4 測定日概要

地点	日付	気温	湿度
1	R.4.10/26	16.1°C	43%
1	R.4.11/14	12.8°C	70%
2	R.4.11/4	10.8°C	79%
2	R.4.11/30	13.2°C	85%



図-6 測定状況

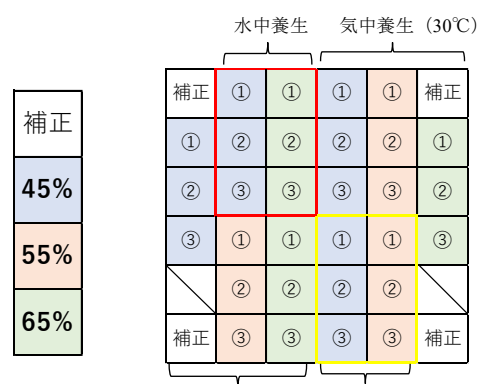


図-7 検量線パネルの配置

$$t = \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} \quad (2)$$

$$s = \frac{y - y_1}{y_2 - y_1} \quad (3)$$

ここで、 x ：左端部を原点とした対象領域の x 座標、

x_1 : 左端部の補正用パネルの中心の x 座標, x_2 : 右端部の補正用パネルの中心の x 座標, y : 上端部を原点とした対象領域の y 座標, y_1 : 左端部の補正用パネルの中心の y 座標, y_2 : 右端部の補正用パネルの中心の y 座標である。

試験体と式 (1) で求めた双線形補間から算出された対象領域の補正用パネルの時刻 T における反射輝度の変化量を算出し、その差を吸水の影響による反射輝度とした。変化量を算出する式については (4) の通りである。

$$Y_{aT} = \left(\frac{Y_T}{Y_{T1}} \right) \left(\frac{B_T}{B_{T1}} \right) - 1 \quad (4)$$

ここで, Y_{aT} : 試験体の時刻 T における反射輝度 (補正後), Y_T : 試験体の時刻 T における反射輝度 (補正前), Y_{T1} : 試験体の測定開始直後の反射輝度, B_T : 双線形補間から算出された対象領域の補正用パネルの時刻 T における反射輝度, B_{T1} : 双線形補間から算出された対象領域の補正用パネルの測定開始直後の反射輝度である。

(2) 測定開始時の余剰水への対策

反射輝度法の測定を行なう際、散水したコンクリート表面に余剰水が存在し、コンクリート表面に微細な鏡面反射が発生することが先行研究で確認されている。照度の変化等の外乱が発生しない屋内環境では測定結果に大きな影響を与えることはないが、屋外環境では太陽高度の変化等により、鏡面反射が顕著に生じる可能性がある。

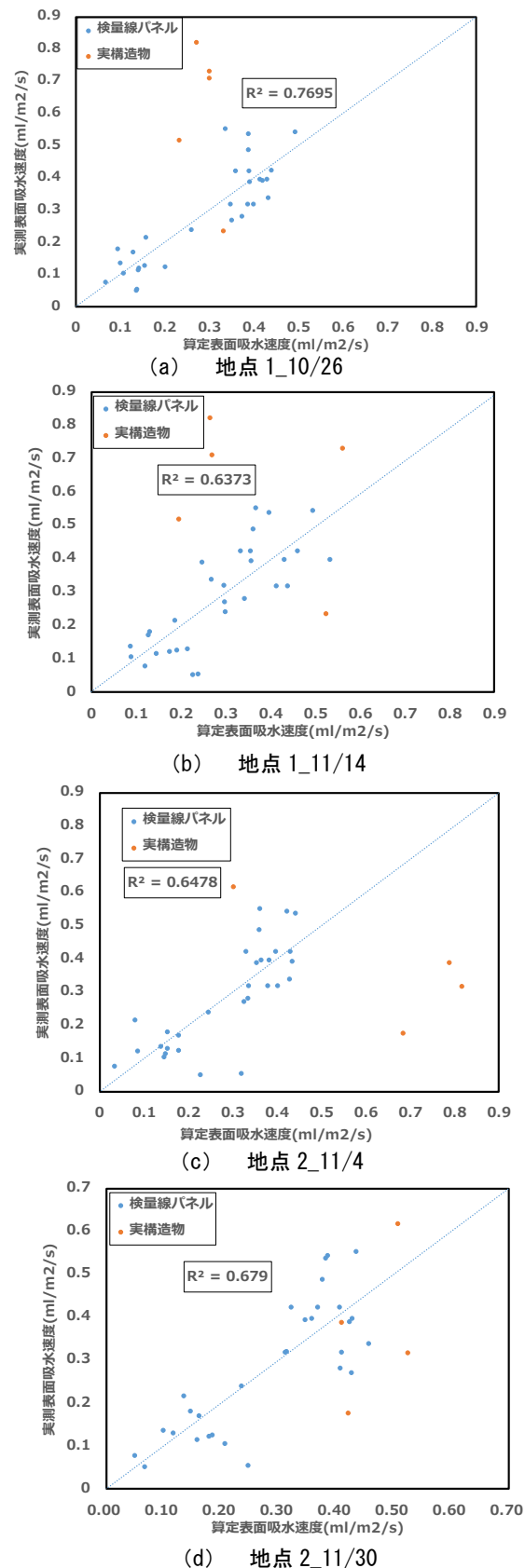
先行研究では、散水の際に保水シート (不織布) を測定対象表面に設置することで表面の余剰水を吸水し、余剰水の流下を低減できることが確認された⁴⁾。一方、測定対象範囲が広がることで保水シート (不織布) 内に気泡ができ、十分に表面の余剰水を吸水できず、鏡面反射の影響を低減できない場合があることが確認された。

この課題を解決するため、撮影に使用する RGB カメラに偏光フィルタを取り付け、実験を行うこととした。偏光フィルタは、反射光を鏡面反射成分と拡散反射成分に分離することが可能であり、偏光フィルタを通すことで鏡面反射を低減できることが確認されている。本研究では、偏光フィルタを有する RGB カメラと偏光フィルタを有しない RGB カメラで同時に測定を行ない、偏光フィルタによる鏡面反射成分の低減効果を評価した。

4. 実験結果および考察

4.1 検量線の作成

吸水したコンクリートの反射輝度は測定初期に急激に増加し、その後緩やかに増加する。既往の研究から、表面吸水速度と輝度の時間変化の間には相関性があることが確認されている¹⁾。しかしながら、屋外環境下では



図ー8 表面吸水速度の実測値と算定値の相関

外的要因によっても反射輝度が変化するため、表面吸水速度を直接推定することは難しい。そこで、表面吸水速度が既知の 30 体の検量線パネルの反射輝度変化から表面吸水速度の評価モデル (式 5) を重回帰分析で作成し、

算定した。

$$Y = a_1\Delta Y_a + a_2\Delta Y_b + a_3\Delta Y_c + a_4\Delta Y_d + a_5\Delta Y_e + a_6\Delta Y_f + b \quad (5)$$

ここで、Y：表面吸水速度 (ml/m²/S)、 $\Delta Y_a \sim \Delta Y_f$ ：測定開始から 10 分ごとの反射輝度の回帰直線の傾き、 $a_1 \sim a_6$ ：説明変数の係数、b：定数項である。なお、測定日によって照度の強さ、気温、風速等の測定環境は異なることから、重回帰分析を行う際に増減法を用いてデータの有意性を表す P 値が 0.2 を下回る説明変数を求めた。そのため、測定日ごとに使用した説明変数が異なる。また、説明変数として用いた反射輝度のうち、人為的に測定面への光を遮断してしまったことが原因で輝度が急激に変化した測定データはモデル式の推定精度を悪化させる要因となるため除外した。

4.2 各測定範囲の検量線

図-8 に、地点 1 の 2 回の測定 (10/26, 11/14) および地点 2 の 2 回の測定 (11/4, 11/30) における重回帰分析の結果を示す。図中の自由度調整済み決定係数 (R^2 値) は検量線パネルのものである。図に示すように、いずれの測定日においても、検量線パネルの実測表面吸水速度と算定表面吸水速度では比較的高い相関が確認できた。一方、図-8 に示した表面吸水速度の実測値と算定値のグラフを確認すると、近似曲線から離れている試験体があるため、これらの試験体の測定結果の影響を受けている可能性がある。表面吸水速度の測定値や測定日の反射輝度が上手く行えなかった検量線パネルが存在する可能性があるため、今後検討を行っていく。

4.3 偏光フィルタの評価

検量線パネルの中から一枚のパネルを抽出し、各測定日における照度補正前と照度補正後、それぞれの偏光フィルタ有と偏光フィルタ無しの反射輝度変化を図-9 に示す。グラフの左側は照度の補正を行っていないデータ、右側は式 (4) による補正後のデータを表す。いずれの測定日においても、照度補正前の反射輝度の時間変化の傾向は偏光フィルタの有無でほぼ変化しなかった。今回の測定では、測定対象への散水時、保水シートを測定面に密着させ 10 分間の静置を行ったことで、コンクリート表層部に十分に水が浸透し、鏡面反射の影響が明確に現れるほどの水の膜ができなかったことが理由として考えられる。

照度補正後では、測定開始から 10~20 分以降において、偏光フィルタ有の反射輝度が偏光フィルタ無しの場合よりも小さくなった。これは、乾燥に伴って現れる微小な凹凸で発生した鏡面反射を偏光フィルタが除去したことで反射輝度の上昇が抑えられたためだと考えられる。

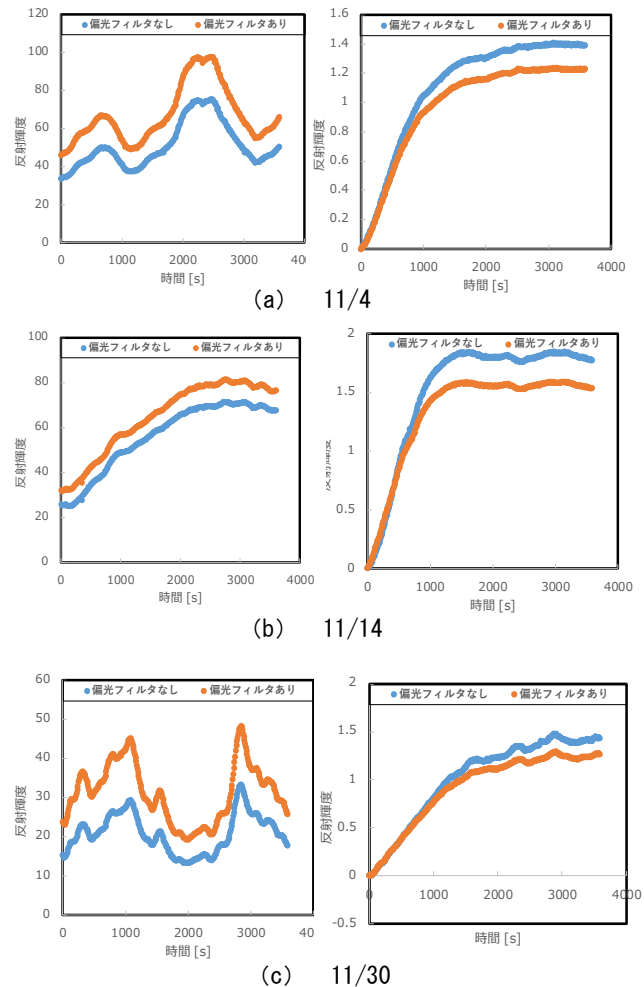


図-9 各測定日の偏光フィルタの有無による輝度変化

そのため、現状の測定方法では偏光フィルタを導入することで本来測定すべき反射輝度の時間変化を測定しにくくなる可能性があり、測定精度を低下させる恐れがある。

表-5 に、各測定日の偏光フィルタを有する場合と偏光フィルタ無しの場合における実測表面吸水速度と算定表面吸水速度の R^2 値を示す。どの測定日においても、偏光フィルタ無しの場合と比較して偏光フィルタを有する場合の方がテストデータの R^2 値が低くなっている。これは、前述したように本来測定すべき反射輝度の時間変化を偏光フィルタが除去してしまい、これが原因で推定精度が悪化していると考えられる。これらの結果から、測定開始に表面の余剰水を十分に除去できれば、偏光フィルタの効果は小さいと考えられる。

4.4 実構造物の表層品質評価

図-10 に、各地点の表面吸水速度の実測値と算定値の比較を示す。地点 1 では 5 箇所、地点 2 では 4 箇所の領域を選定した。

各測定日毎の、反射輝度変化から算定した表面吸水速度の平均値は、地点 1 で、10 月 26 日が 0.286、11 月 14 日が 0.361、地点 2 で、11 月 4 日が 0.648、11 月 30 日が 0.466 であった。測定日によって大きな差異がないことが

ら、反射輝度による表層品質評価の再現性が確認できる。

一方、1番や9番、15番の箇所では結果の再現性が低い傾向にあることが確認される。これらの箇所は測定範囲内でも検量線パネルとの距離が離れており、測定対象と検量線パネルの照度変化が同程度でなくなってしまったことが原因で算定値にばらつきが生じたと考えられる。

また、いずれの測定日においても、表面吸水試験による表面吸水速度の実測値と反射輝度変化からの算定値との差が大きかった。これは、測定対象がボックスカルバート内の壁面であり、左右の入り口から光が差し込む構造であることから、前述したように、検量線パネルと測定対象範囲の照度変化が同程度でないことで推定精度が悪化したと考えられる。今回の測定では、図-5に示すように、検量線パネルを測定対象範囲よりもボックスカルバートの内部に設置したため、ボックスカルバート頂版により日射の一部が遮られ、測定範囲の中で検量線パネルと測定対象の照度に差が生じたと考えられる。そのため、このような箇所で測定を行なう際は、測定範囲を狭め、対象構造物と検量線パネルの距離を近くするなどの対策を講じる必要がある。

5. まとめ

本研究で得られた知見は以下に示す通りである。

- 1) 照度の影響を補正した反射輝度に基づき算定した検量線パネルの表面吸水速度の算定値と実測値は比較的良好な一致を示した。
- 2) 本実験の範囲内では、検量線パネルから算出した実構造物の表面吸水速度は実測の表面吸水速度と差異が生じた。これは検量線パネルの設置位置と測定対象面が離れており、照度の変化が検量線パネルと測定対象面と異なったことが主たる原因として考えられる。
- 3) コンクリート表面が水で覆われることによる鏡面反射を偏光フィルタで軽減し、測定精度の向上を試みた。現状の測定方法では大きな鏡面反射は現れず、偏光フィルタによる測定精度の向上効果は得られなかった。

謝辞

実験に協力いただいた長岡工業高等専門学校 井林康教授、電子機械システム工学専攻 山岸遼平氏、(現)東京電力ホールディングス(株) 小宮陸氏に感謝する。この研究は(一社)新潟県建設技術センター令和4年度研究助成事業の助成を受けて行った。

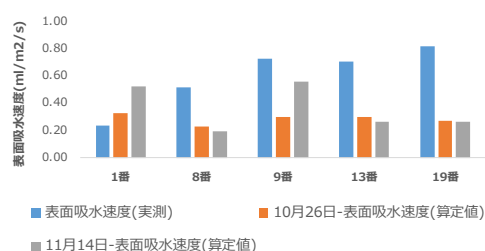
表-5 偏光フィルタの有無によるR²値の比較

(a) 偏光フィルタあり

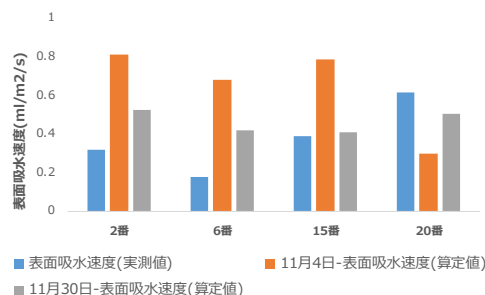
試験日	トレーニングデータ	テストデータ
R4.11/4	0.8287	0.3984
R4.11/14	0.6388	0.4881
R4.11/30	0.7192	0.2932

(b) 偏光フィルタなし

試験日	トレーニングデータ	テストデータ
R4.11/4	0.7832	0.5854
R4.11/14	0.6636	0.5499
R4.11/30	0.6901	0.3628



(a) 地点1_実構造物表面吸水速度



(b) 地点2_実構造物表面吸水速度

図-10 実構造物表面吸水速度の比較

参考文献

- 1) 中川直人, 村上祐貴, 他: 吸水させたコンクリート表面の輝度の時間変化に基づく表層品質評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp.1695-1700, 2018.
- 2) 小宮陸, 他: 屋外環境下における吸水させたコンクリート表面の輝度の時間変化に基づく表層品質評価, 令和4年度土木学会全国大会第77回年次学術講演会, V-45, 2022.
- 3) 林和彦, 細田暁: 表面吸水試験によるコンクリート構造物の表層品質の評価方法に関する基礎的研究, 土木学会論文集 E2, Vol.69, No.1, pp.82-97, 2013.
- 4) 中澤文香, 村上祐貴, 他: 吸水させたコンクリート表面の輝度の時間変化に基づく表層品質評価に及ぼす諸要因の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.1, pp.1877-1882, 2019.7