

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に影響を及ぼす諸要因の検討

中澤 文香*1・村上 祐貴*2・上村 健二*3・井林 康*4

要旨: コンクリート構造物における表層品質の向上は、耐久性を確保する上で極めて重要である。コンクリート構造物の表層品質を定量的に評価する代表的手法として、表面吸水試験や表層透気試験がある。両手法は表層品質を定量値に基づいて評価できる点が利点であるが、測定領域が小さく、構造物全体の表層品質評価には多定点での測定が必要であり、多大な労力を有する。著者らはこの問題を解決すべく、吸水させたコンクリート表面の輝度の時間変化に基づき表層品質を広範囲に評価可能な手法を提案した。本研究では、実環境で測定可能な吸水方法について検討するとともに、測定結果に及ぼす風の影響について検討した。

キーワード: 表層品質, XYZ カメラ, 輝度, 表面吸水試験

1. はじめに

現在、コンクリート構造物の表層品質を定量的に評価する代表的な手法としては、表面吸水試験と表層透気試験(トレント法)が挙げられる。この2つの手法はコンクリート表面の吸水性能や透気性能を計測し、コンクリートの表層品質を定量的に評価する試験であるが、一回の測定で計測可能な領域は小さく、広範囲での表層品質評価が困難である。

このような背景から、著者らは、従来手法に比べて、一回の測定で広範囲の表層品質評価を可能とする新たな評価手法を提案した¹⁾。一定時間吸水させたコンクリートを大気中に静置した際、表層部が緻密なコンクリートほど、吸水量が小さいため早期に乾燥する。著者らの提案手法は一定時間吸水させたコンクリート表面の輝度の時間変化率の大きさから表層品質を評価するものである。コンクリート表面の輝度はカメラで測定するため、解像度を考慮しなければ測定領域に制限は無い。また、測定後に任意の領域での表層品質評価が可能である。

既往の研究で表層品質の異なる試験体に対し、本提案手法を適用した結果、測定開始から1時間後の試験体表面の輝度と表面吸水試験で測定した表面吸水速度の間に高い相関を確認することができた。一方で、既往の研究では吸水量を一定にするため、測定面を下向きにした状態で、30分間水に浸漬させた後、測定面上の余剰水を布で取り除いた後に測定を開始したが、実環境で同様の測定を行うことは難しい。また、実環境では風の影響も受けると考えられるが未検討である。そこで本研究では、提案手法の評価に影響を及ぼす諸要因について検討するとともに現場で実施可能な吸水方法について検討した。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体の形状寸法は図-1に示すように、300mm(W)×300mm(D)×200mm(H)の角柱試験体である。コンクリートの示方配合を表-1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。測定面は打込み時の側面とした。測定面以外の面からの吸水を防ぐ目的で、図-2に示すように試験体側面には測定面から奥行き方

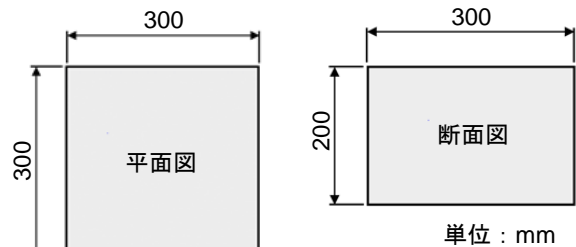


図-1 試験体形状寸法

表-1 示方配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	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	44.0	40.4	4.5	149	339	733	1123	3.61

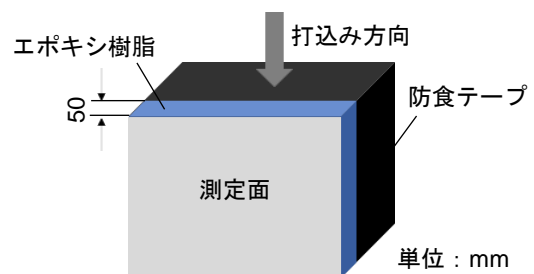


図-2 試験体概要

*1 長岡工業高等専門学校専攻科 環境都市工学専攻 (学生会員)
 *2 長岡工業高等専門学校 環境都市工学科准教授 工博 (正会員)
 *3 長岡工業高等専門学校 電子制御工学科 工博
 *4 長岡工業高等専門学校 環境都市工学科教授 工博 (正会員)

向 50mm 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。

試験体は、内部振動機を打込み面中心に挿入し、15 秒間締め固めた。脱型時期は材齢 1 日である。養生方法は 2 水準 (No.1, No.2) とし、それぞれ試験体を 3 体 (A,B,C) 作製した。まず、試験体シリーズ No.1 は脱型後、養生温度 0°C で材齢 7 日の時点まで養生を行い、その後は室温 20°C 設定の実験室内で気中養生を行った。試験体シリーズ No.2 は、材齢 7 日の時点まで養生温度 20°C で水中養生を行い、その後は試験体 No.1 と同様、実験室内で測定まで気中養生を行った。なお、養生温度 0°C で気中養生する際、恒温恒湿室の不具合により数日間試験室内の温度が 0°C を保持できなかった。ただし、本実験の目的は、輝度に基づく表層品質評価手法の検討であり、養生条件が表層品質に及ぼす影響を評価することが目的ではないことから、試験パラメータ間で表層品質に差異が生じていれば問題はないと考える。

2.2 実験方法

(1) 提案する表層品質評価手法

写真-1 に示すように、乾燥時と吸水時のコンクリート表面の輝度が異なることは目視でも確認できる。コンクリート表層部を水に吸水させた時、表層部が緻密である程内部まで水が浸透しにくく、吸水後に大気中に放置した際には表面が乾きやすい。したがって、吸水させたコンクリート表面の色情報の変化は表層品質によって異なると考えられる。

そこで、本研究では、一定時間吸水させたコンクリート表面の乾燥過程での色情報の時間変化からコンクリートの表層品質を定量的に評価する手法の確立を目指す。

色情報の測定には XYZ カメラを使用する。このカメラは、人間の知覚できる色を忠実に取得可能なカメラであり、撮影した画像は CIE-XYZ 表色系で表される。CIE-XYZ 表色系は色を定量的に扱う際の利便性を考慮して、国際照明委員会で定義された色の表し方であり、CIE-RGB 表色系に比べ、知覚する色を全て正值で表現でき、色変化を評価し易いメリットがある。X, Y, Z 値は直感的ではないため、本研究では、輝度を示す Y 値と明るさを無視した色度座標 (x, y) で表される Yxy 表色系を用いる。

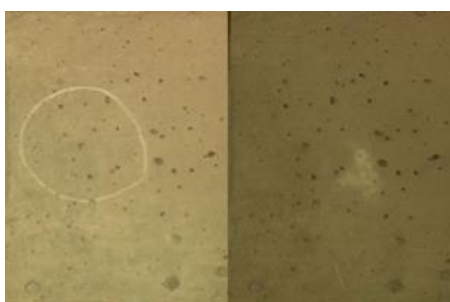


写真-1 コンクリートの乾燥時(左)と吸水時(右)

ただし、コンクリートは無彩色であり、吸水による主たる変化は明度であることから、本稿では Y 値のみに着目して評価を行った。

(2) 表面吸水試験装置による表層品質評価

本提案手法の妥当性を検証する目的で表面吸水試験を行った。表面吸水試験装置は、コンクリート面に設置した円形の断面形状を持つ吸水カップを通じてコンクリートが吸水する水量を計測するものである²⁾。吸水カップの端面には非吸水のゴムスポンジを用い、吸水カップとは別に設置した固定フレームから反力をとりコンクリート面に押し付ける構造である。通常の使用では、固定フレームの設置には真空ポンプを用いてコンクリート面に吸着させる。本試験体には本装置を用いる場合、試験体の寸法上、既存のフレームで吸水カップを試験体に設置させることが困難であったため、図-2 に示すフレームを製作し、吸水カップを固定した。また、本実験では 1 か所のみを計ることを目的としたため吸水カップの使用を 1 つとした。

表面吸水試験の測定方法は参考文献 1) を参照されたい。表面吸水試験で得られる計測開始から 10 分時点での表面吸水速度をもとに表-2 に示すように表層品質の良否を判断することができる³⁾。このように表面吸水速度が小さいほど、表層のコンクリートは緻密であり、物質移動抵抗性が高いと言える。

2.3 実験パラメータ

(1) 吸水時間の検討

既往の研究では吸水時間を 30 分間としたが、吸水時間を短縮することができれば、より効率よく表層品質評

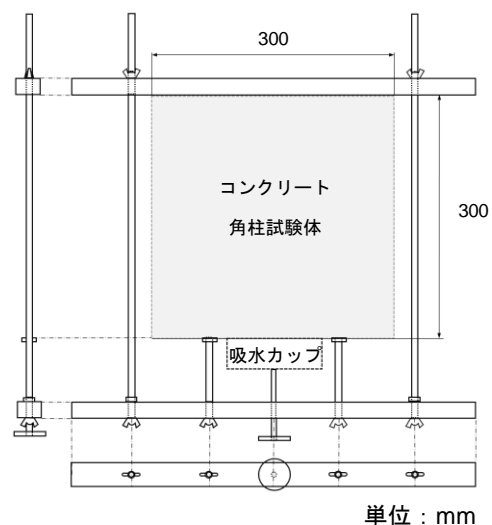


図-2 製作した固定フレーム

表-2 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

価試験を行うことができる。そこで、吸水時間が輝度の時間変化に及ぼす影響について検討した。測定面が下向きになるように試験体を水槽内に設置し、試験体を測定面から 10mm 程度の深さまで水で浸漬した。浸漬時間は 1 分、3 分、10 分とし、所定の時間で浸漬後、測定面が上向きになるように試験体を並べ、測定面の余剰水を拭き取った後、XYZ カメラで測定面の輝度を 10 秒間隔で 1 時間測定した。また、室内環境での輝度は照明の影響を大きく受けるため撮影開始の時点で輝度は場所によって異なる。そのため、各時刻での輝度を撮影開始時の輝度で正規化した。なお、輝度を抽出した領域は、表面吸水試験を実施した際の吸水カップの領域であり、以降の検討項目でも同様である。また、試験体の浸漬時間を 10 分、20 分、30 分、40 分、50 分、60 分とし、各浸漬時間での試験体の質量を測定し、吸水量を算出した。

(2) 吸水方法の検討

実構造物では、上述した重力の影響を排除した吸水は、ほとんどの部位で実施することは困難である。そこで、現地での測定環境を考慮した吸水方法について検討した。写真-2 のように測定面が鉛直になるよう設置し、試験体シリーズ毎に並べ、測定面をホースで 10 分間散水することで吸水させた。散水後の測定面の輝度を XYZ カメラで 1 時間測定した。散水後、測定面を布で拭かずに測定するケースと布で拭いた後に測定する 2 ケースで検討した。また、測定面に湿潤養生マットを貼り付けた吸水方法についても検討を行った。使用した湿潤養生マットは、レーヨン、オレフィン不織布とポリプロピレン (PP) 系フィルムで構成されており、厚さは約 0.7 mm である。測定面と同じ大きさの湿潤養生マットを、テープを用いて測定面に設置した後、湿潤養生マットと測定面の間をホースで 10 分間散水後、測定面と養生マットを密着させた。散水後 10 分間静置した後、湿潤養生マットを取り外し、測定面を布で拭かずに、XYZ カメラで測定面を 10 秒間隔で 1 時間撮影した。また、本実験も室内環境での輝度は照明の影響を大きく受けるため、各時刻での輝度を撮影開始時の輝度で正規化した。なお、再現性の確認のため、実験は 2 回ずつ実施し、取得した輝度を平均化している。

(3) 風の検討

本提案手法は吸水後の測定面は直接大気と接するため、測定結果に外気温、湿度、風の影響を受けると考えられる。本研究では、最も影響が大きいと思われる測定面に作用する風の影響について検討することとした。試験体の配置は前項(2)と同様である。吸水方法は、上述した湿潤養生マットを用いた方法を採用した。XYZ カメラで測定面を撮影している間、2 段置きした試験体の中央付近の高さになるようにサーキュレーターをそれぞれ設置し

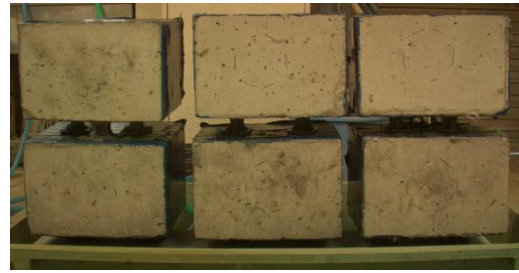


写真-2 試験体の配置

た。サーキュレーターと試験体の距離は 60cm と 120cm の 2 水準とした。3 台のサーキュレーターが稼動した状態で、各試験体の中央での風速を 3 分間計測した結果、距離が 60cm の場合の平均風速は 1.1m/sec、120cm の場合は 0.77m/sec であった。なお、本実験も再現性の確認のため 2 回実施し、取得した輝度を平均化している。

3. 実験結果及び考察

(1) 吸水時間の検討

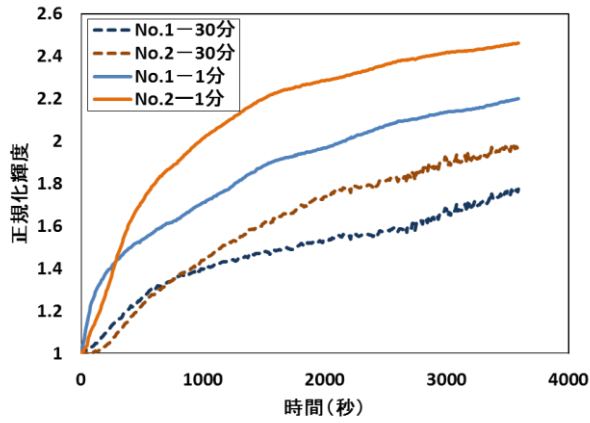
吸水時間別の正規化輝度の時間変化と、既往の研究により得られた吸水時間 30 分での正規化輝度の時間変化を図-3 に示す。全体的な傾向としては、正規化輝度は時間の経過に伴って増加しており、1 時間経過時の正規化輝度は、No.1 よりも No.2 の方が大きい。これは No.2 は表層が緻密であり、吸水量が相対的に少ないことから、早期に測定面が乾くことが要因と考えられる。

図-4 には、各吸水時間における 1 時間経過時の正規化輝度と、表面吸水試験により得られた表面吸水速度との関係を示す。全体的な傾向として、表面吸水速度の増加に伴い、正規化輝度は低下している。自由度調整済み決定係数から、吸水時間が 1 分の正規化輝度は、表面吸水速度との相関が低い。このことも、吸水量が少ないことにより試験時間内に測定面が乾いてしまうため、測定終了時の試験体間の輝度の差異が小さくなってしまったためであると考えられる。一方、吸水時間 3 分と 10 分の正規化輝度は、既往の研究の吸水時間 30 分同様、表面吸水速度との相関を確認することができた。

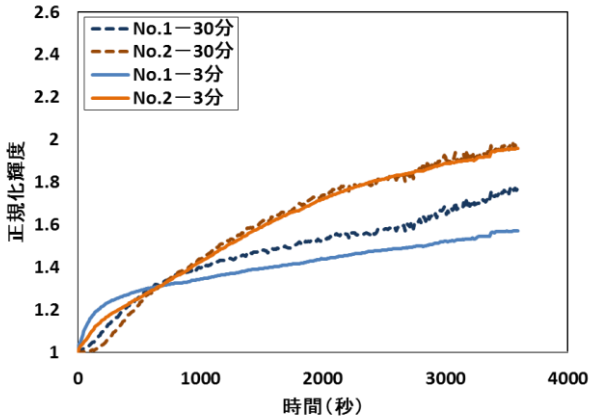
図-5 に各試験体の浸漬時間別の平均吸水量と No.1(A,B,C)と No.2(A,B,C)の平均吸水量の差を示す。浸漬時間 10 分~60 分の間では、浸漬時間の増加とともに両試験体の吸水量は増加するが、両試験体の吸水量の差の時間増加は少ない。また、図-3(b), (c)に示すように、吸水時間 3 分、10 分、30 分では正規化輝度の時間変化は大きな違いはない。以上のことに加えて、表面吸水試験における吸水時間が 10 分間であることを考慮し、吸水時間を 10 分として以降の検討を行った。

(2) 吸水方法の検討

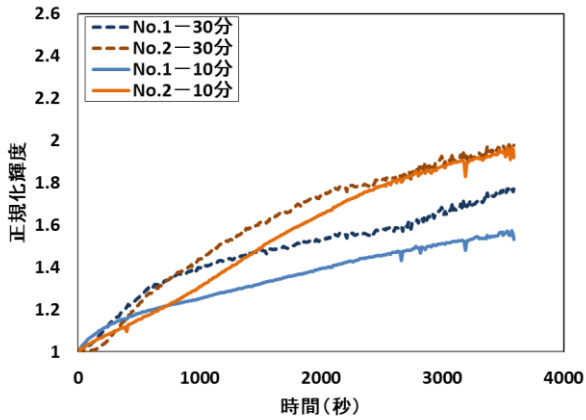
実験により得られた正規化輝度の時間変化を図-6 に示す。なお、2 回の計測での 1 時間経過時の輝度の差異



(a) 吸水時間 1 分と 30 分



(b) 吸水時間 3 分と 30 分



(c) 吸水時間 10 分と 30 分

図-3 吸水時間による正規化輝度の時間変化

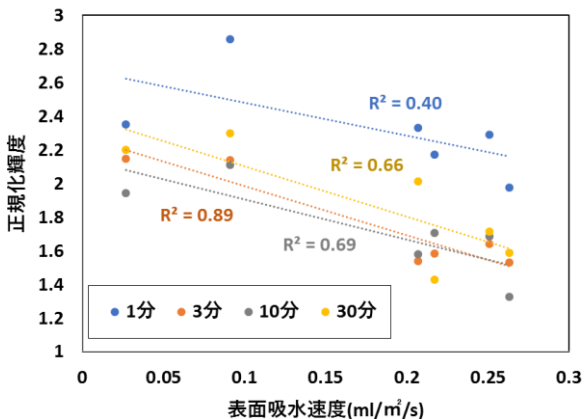


図-4 正規化輝度と表面吸水速度

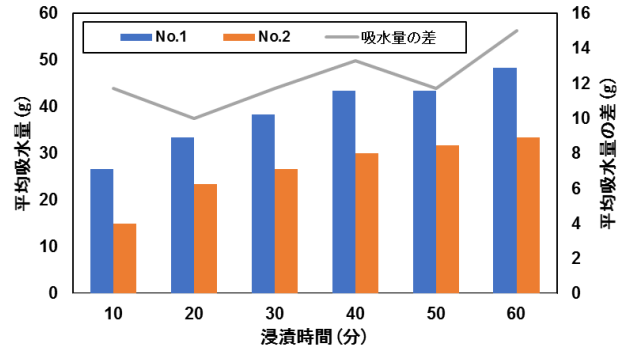
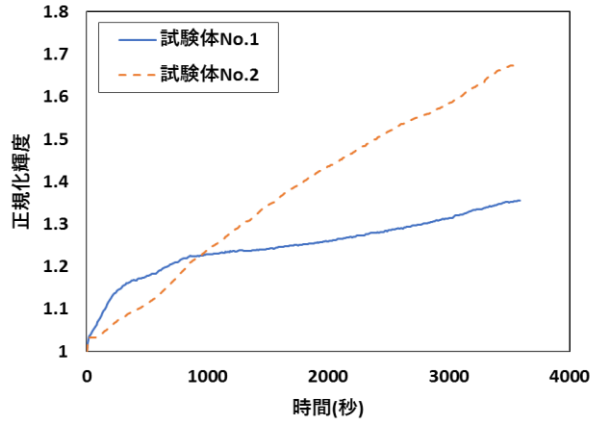
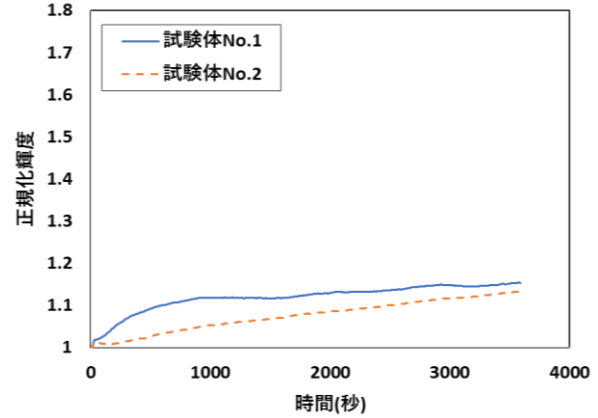


図-5 各試験体の平均吸水量と平均吸水量の差



(a) No.1 を下段に設置



(b) No.2 を下段に設置

図-6 正規化輝度の時間変化

は平均 0.056、最大 0.14 であり、再現性は高い。図-6(a)は試験体 No.1 を下段に設置した実験、図-6(b)は試験体 No.2 を下段に設置した実験の結果である。表面吸水試験の結果から試験体 No.1 よりも試験体 No.2 の方が高品質と判断される。したがって、図-6(a)のように No.2 は No.1 と比較して、吸水量が小さく早期に乾燥するため、試験終了時の正規化輝度は、No.2 の方が相対的に大きくなると考えられる。しかしながら、測定面をホースで散水時には、試験体 No.2 を下に設置した場合、試験体 No.1 の測定終了時の正規化した輝度の方が、試験体 No.2 より大きい。これは、測定面上に残存した余剰水が下方部に流下したことで、試験体 No.2 が乾きづらくなったことが考えられる。本実験では、試験体が上下で不連続である

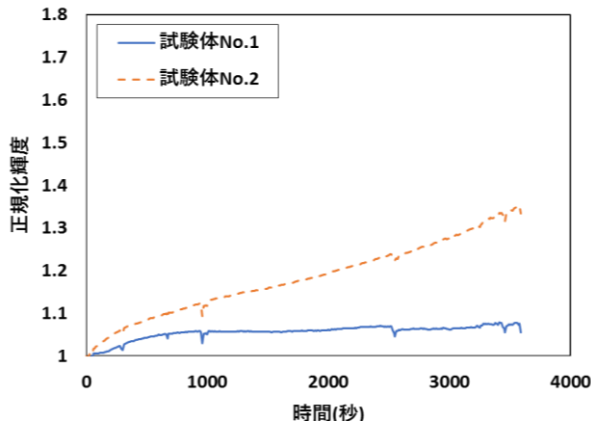


図-7 測定面を布で拭いた際の正規化輝度の時間変化(No.2 を下に設置)

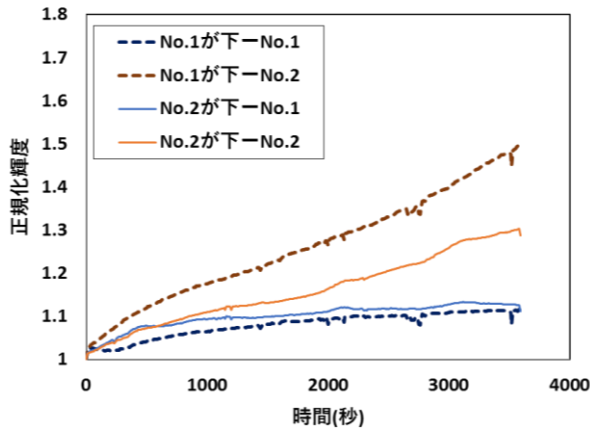


図-8 湿潤養生マットを介して吸水させた際の正規化輝度の時間変化

が、実構造物においても、下方部に余剰水が流下すると考えられる。

一方、図-7 に示すように、吸水後の測定面の余剰水を布で拭くことで、品質の良い試験体の方が正規化輝度は大きくなり、整合性のある結果を得ることができた。しかしながら、実構造物で散水後に測定面の余剰水を布などで取り除くことは多大な労力を要し、広範囲に測定できる本手法の利点が損なわれる。

湿潤養生マットを設置して散水した実験結果を図-8 に示す。湿潤養生マットは吸水後の測定面の余剰水を吸水し、取り除く目的で使用している。図-8 より No.1 と No.2 のいずれを下に設置した場合においても、高品質である試験体 No.2 の正規化輝度値の方が大きくなっていることが確認できた。これより、湿潤養生マットを使用することで、湿潤養生マットが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分かった。

また、測定終了時の正規化輝度と表層品質の関係を図-9 に示す。測定面に直接散水した場合と湿潤養生マットを貼り付けて散水した場合では、後者の方が明らかに相関が高く、湿潤養生マットを設置して散水することの有効性が確認できる。なお、ホースで散水し吸水させる際、流量やノズル形状が試験体の吸水量に及ぼす影響に

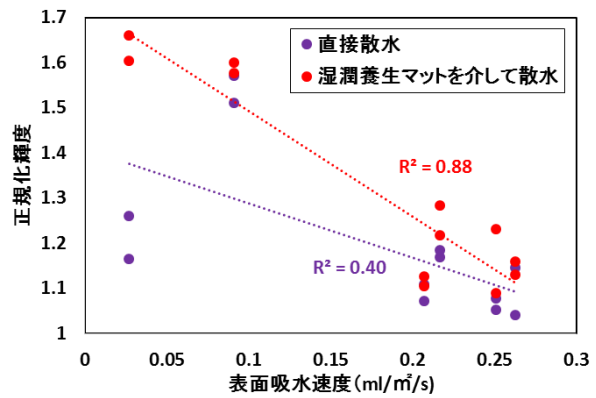


図-9 正規化輝度と表面吸水速度

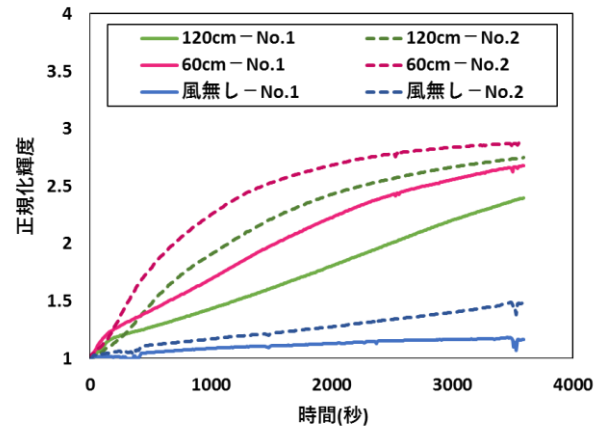


図-10 正規化輝度の時間変化

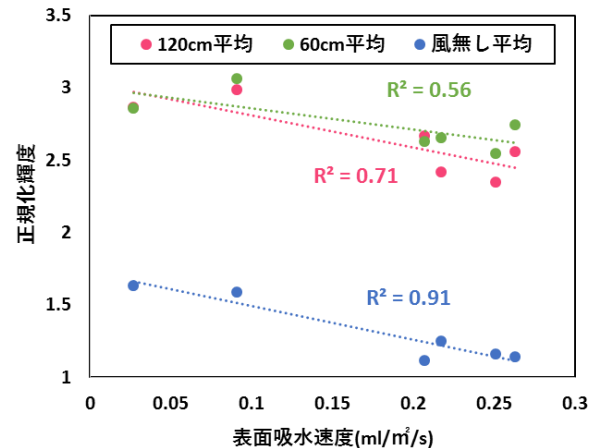


図-11 正規化輝度と表面吸水速度

については今後の検討課題とする。

(3) 風の影響

図-10 に、サーキュレーターとの距離ごとの正規化輝度の時間変化を示す。全体的な傾向として、風が無い場合と同様に、時間の経過に従い、正規化輝度は大きくなっている。また、サーキュレーターとの距離が近い程、正規化輝度は大きくなった。

図-11 に、サーキュレーターとの距離ごとの測定終了時の正規化輝度と表面吸水速度の関係を示す。風が無い場合の相関が最も高く、風がある場合にはサーキュレーターとの距離が近いほど、相関が低くなっているのが分かる。これは風の影響で、測定を終了する前に、測定

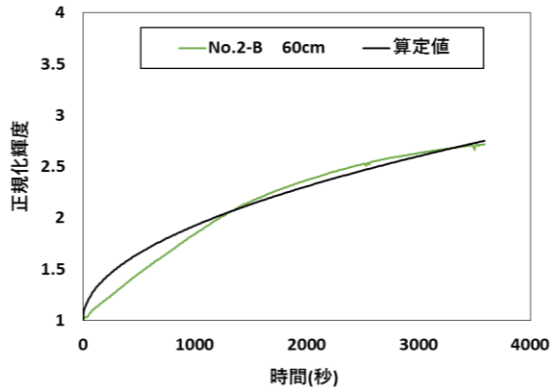


図-12 正規化輝度の時間変化の実験値と算定値

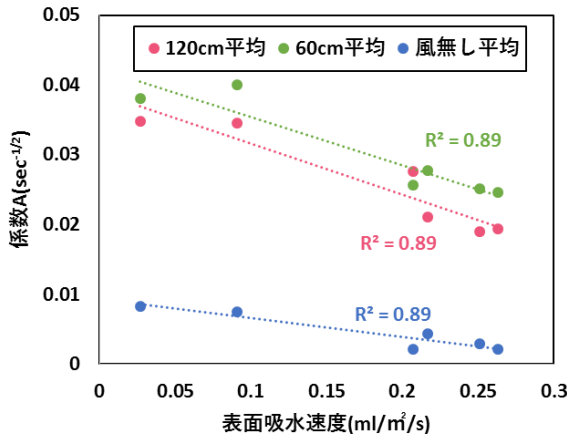


図-13 係数 A と表面吸水速度

面が乾いてしまったことが要因として考えられる。そこで、各試験体の輝度の時間変化を用いて評価することとした。以下の式(1)で実験値をカーブフィッティングし、輝度の時間変化と表面吸水速度の関係について考察する。一例として、試験体 No.2-B の実験値と算定値の正規化輝度の比較を図-12 に示す。

$$\frac{Y}{Y_0} = 1 + A\sqrt{t} \quad (1)$$

ここで、Y：経過時間 t (sec) での輝度、Y₀：撮影開始時の輝度、A (sec^{-1/2})：係数とした。

各試験体の係数 A は最小二乗法を用いて決定した。係数 A によって輝度の時間変化は変わるため、簡便ではあるが各試験体の時間変化を表す係数として用いた。図-13 に係数 A と表面吸水速度の関係を示す。図-11 に示した測定終了時の輝度と表面吸水速度の関係に比べて、係数 A と表面吸水速度の関係はいずれのケースでも相関が高い。試験体毎に実測した輝度と式(1)から算出した輝度を線形近似し、自由度調整済み決定係数 (R²) を算出し、式(1)の適合度を確認した。R² の平均値は 0.93、最小値は 0.80 であり、式(1)は輝度の経時変化を比較的良好的に

表現していた。

現時点では屋外環境下で本手法を適用する際には、表面吸水速度を何点か測定し、係数 A と表面吸水速度との検量線を作成することで、任意の領域の表面吸水速度を推定することが可能であると考えられる。ただし、温度や湿度の影響が係数 A に及ぼす影響については今後検討する必要がある。このように、現状では表面吸水試験との併用となるが、湿度や温度の影響を明らかにし、輝度情報のみで定量的に表層品質評価を行えるかどうか、更なる検討を進めていく。

4. まとめ

本研究では、以下の結果が得られた。

- (1) 吸水させたコンクリート表面の輝度の時間変化は吸水時間の影響を受ける。ただし、吸水時間が 10 分から 60 分の間ではコンクリートの吸水量の差に明確な差異は生じておらず、本手法を適用する際の吸水時間を 10 分まで短縮することが出来た。
- (2) 吸水させたコンクリート表面の輝度の時間変化は、測定面の余剰水の影響を受けるため、湿潤養生マットを用いて表面の余剰水を取り除くことでその影響を低減できることが分かった。
- (3) 吸水させたコンクリート表面の輝度の時間変化は風の影響を受け、測定終了時の輝度と表面吸水速度の相関は風速が大きくなるほど低下することが分かった。
- (4) 本論文で提案した輝度の時間変化の算定式において時間変化を表す係数 A と表面吸水速度は風速によらず高い相関性を示した。

謝辞

本研究は、(一財)新潟県建設技術センターの助成を受けて実施した。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 中川直人, 村上祐貴, 上村健二, 井林康: 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) 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
- 3) 国土交通省東北地方整備局: コンクリート構造物の品質確保の手引き(案)(橋脚, 橋台, 函渠, 擁壁編), 2015年12月