

一般財団法人新潟県建設技術センター

平成 30 年度 研究助成事業報告書

画像解析に基づくコンクリート表層品質評価試験法の開発に関する事業

平成 31 年 3 月

長岡工業高等専門学校 電子制御工学科 上村 健二 (研究代表者)

長岡工業高等専門学校 環境都市工学科 村上 祐貴 (研究分担者)

長岡工業高等専門学校 環境都市工学科 井林 康 (研究分担者)

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。測定面以外の面から吸水されることを防ぐ目的で、図-2に示すように試験体側面は測定面から50mm程度の高さ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覆った。

試験体は、内部振動機を打込み面中心に挿入し、15秒間締め固めた後、木槌で型枠を叩き、脱泡した。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℃で材齢7日の時点まで養生を行い、その後は室温20℃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℃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℃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℃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。

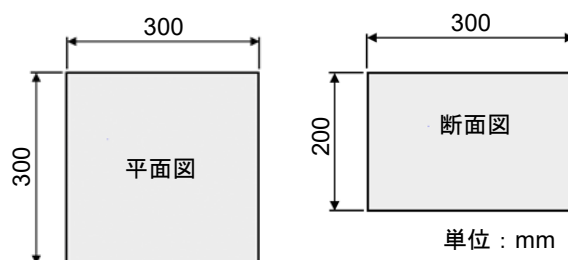


図-1 試験体形状寸法

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

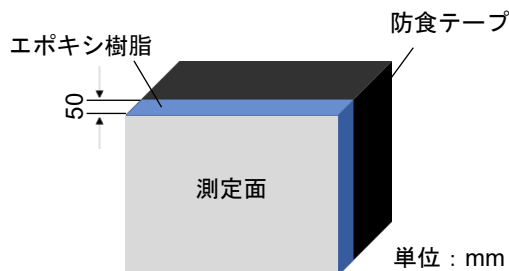


図-2 試験体概要

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 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。ただし、写真-1 に示すように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-3 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。

吸水カップには鉛直のシリンダーが接続され、シリンダー内の上縁まで水を満たし、吸水に

よる水の減少量を高さの変化として自動で読み取ることで、微小な吸水量を計測する。吸水カップ内に設置された水圧センサーを用いて、シリンダー内の水の体積の変化を水位変化によるセンサーの圧力変化として検知し、データロガーにより連続的(0.5 秒毎)に計測する。初期水頭はコンクリートの吸水面中心において 300mm であり、吸水の進行と吸水カップ下部に接続したチューブ及び注水タンクを用いて重力により水を注入し、注入開始から 5 秒程度で注水が完了する。熱膨張による測定中の水の体積変化を避けるために、事前に測定面の表面温度や測定する試験体の環境下に合わせて水温を調整する必要がある。計測時間は 10 分間である。計測開始から 10 分時点での表面吸水速度(以下、表面吸水速度)が得られる。この得られた表面吸水速度を文献³⁾にある吸水抵抗性の指標である表-2 の良、一般、劣の値と比較し、表層品質の良否を判断することができる。

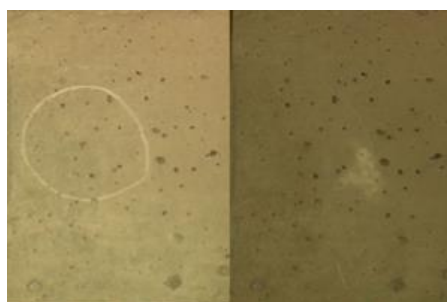


写真-1 コンクリートの乾燥時(左)と吸水時(右)

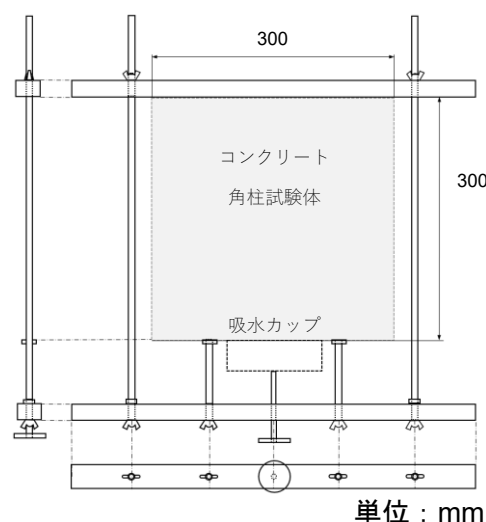


図-3 製作した固定フレーム

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、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 のように測定面を横向きにして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、測定面の輝度を XYZ カメラで 1 時間測定した。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。測定面と同じ大きさの湿潤養生マットを、養生テープで試験体に密着させてから、湿潤養生マットと測定面の間をホースで 10 分間散水した。散水後 10 分間放置した後、湿潤養生マットを取り除き、XYZ カ

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	0.25～0.500
劣	0.500超過

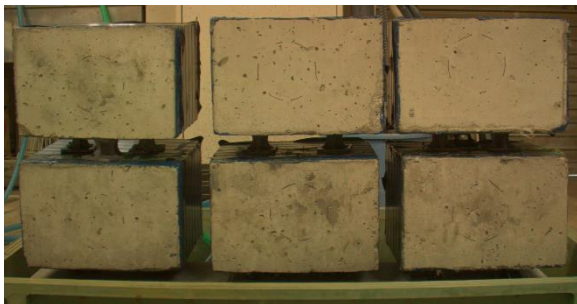


写真-2 試験体の配置

メラで測定面を 10 秒間隔で 1 時間撮影した。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。

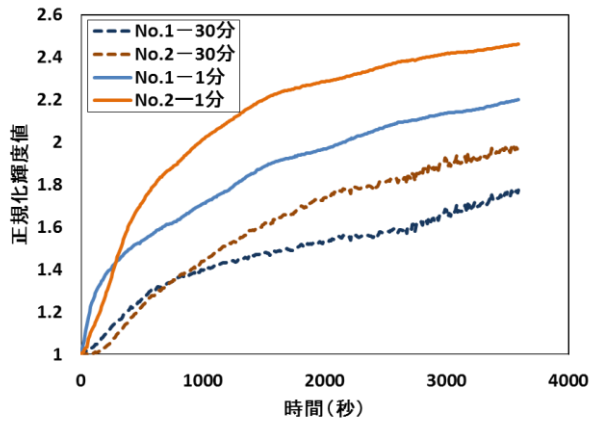
(4) 屋外環境での試験

将来的には(3)の結果を利用した補正を行うことにより、屋外環境でも輝度測定のみで品質判定することを目指す。提案手法の屋外における有効性確認するため、定面の数点で既存の表面吸水速度試験を実施し、同領域での測定終了時の輝度と表面吸水速度を関連付け、その関係に基づき任意の領域の輝度から、表面吸水速度を推定し、表層品質評価を行う。対象には屋外に設置した大型試験体を利用する。また、その際、実際の応用を考慮して安価な産業カメラ及び、民生ビデオカメラでの利用の検討も合わせて行う。

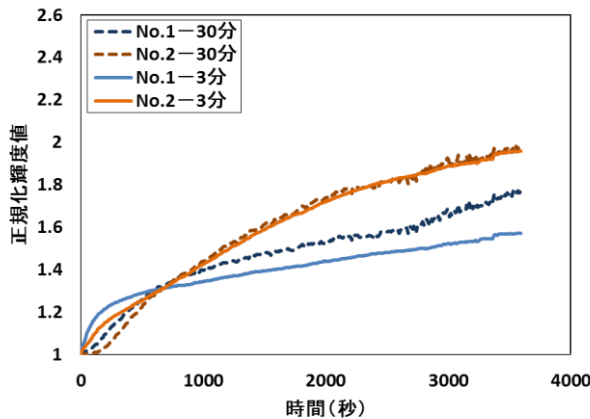
3. 実験結果及び考察

(1) 吸水時間の検討

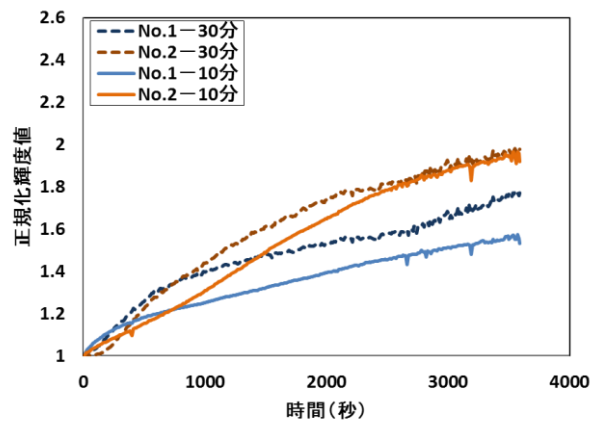
吸水時間別の正規化輝度の時間変化と、既往の研究により得られた吸水時間 30 分での正規化輝度の時間変化を図-4 に示す。全体的な傾向としては、正規化輝度は時間の経過に伴って増加しており、1 時間経過時の正規化輝度は、No.1 よりも No.2 の方が大きい。これは No.2 は表層が緻密であり、吸水量が相対的に少ないことから、早期に測定面が乾くことが要因と考えられる。



(a) 吸水時間 1 分と 30 分



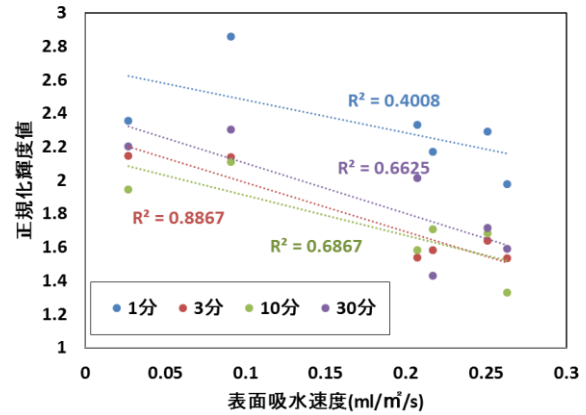
(b) 吸水時間 3 分と 30 分



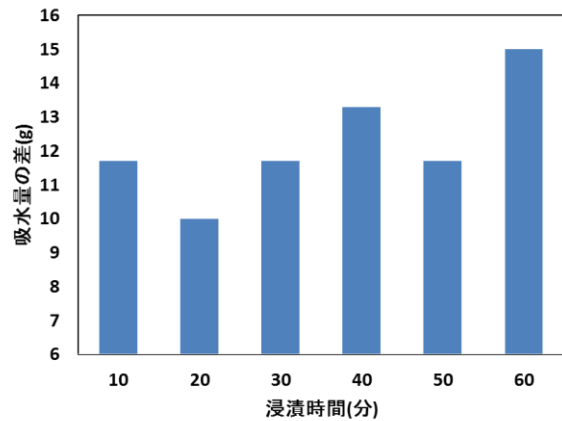
(c) 吸水時間 10 分と 30 分

図－4 吸水時間による正規化輝度の時間変化

図－5 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



図－5 正規化輝度と表面吸水速度



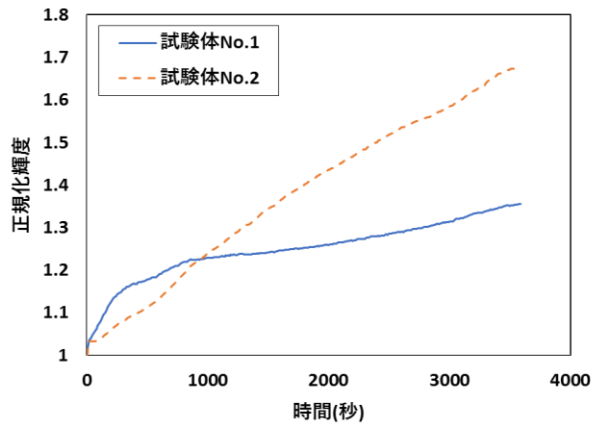
図－6 試験体 No.1 と No.2 の吸水量の差

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。

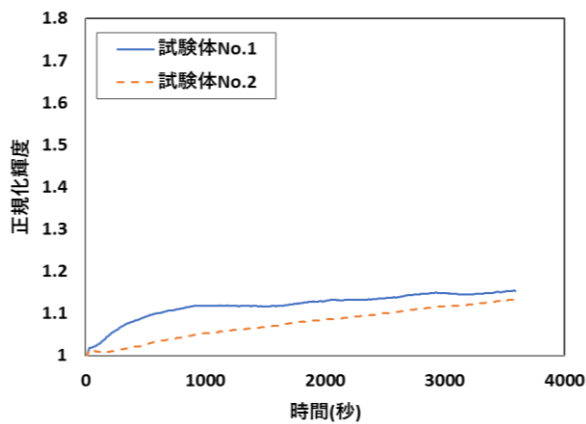
図－6 に、No.1(A,B,C)と No.2(A,B,C)の吸水量の平均値の差を示す。図－6 より、浸漬時間10分～60分の間では、吸水量に明確な差異は認められない。また、図－4(b), (c)に示すよう、吸水時間3分と10分では正規化輝度の時間変化は大きな違いはない。以上のことに加えて、表面吸水試験における吸水時間が10分間であることを考慮し、吸水時間を10分として以降の検討を行った。

(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－7 に示す。(a)は試験体 No.1 を下に設置した実験、(b)は試験体 No.2 を下にに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



(a) No. 1 を下に設置

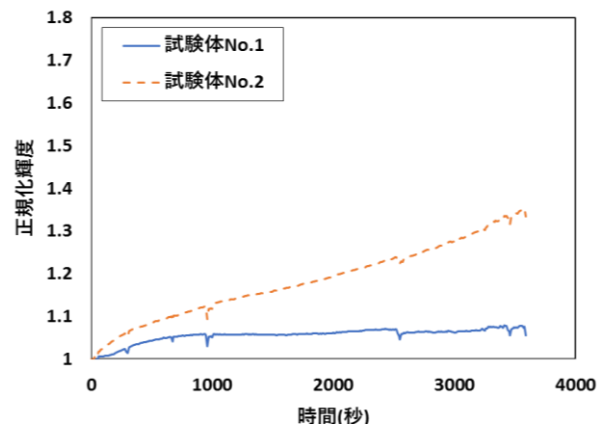


(b) No. 2 を下に設置

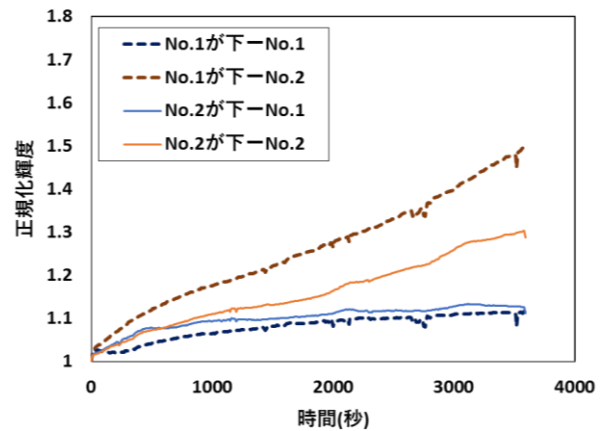
図－7 正規化輝度の時間変化

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－7(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が、実構造物においても、下方部の表層の方が、余剰水により吸水量が多くなることが考えられる。そこで、散水後、吸水後の測定面をウエスで拭いてから測定を行った。その結果を図－8 に示す。

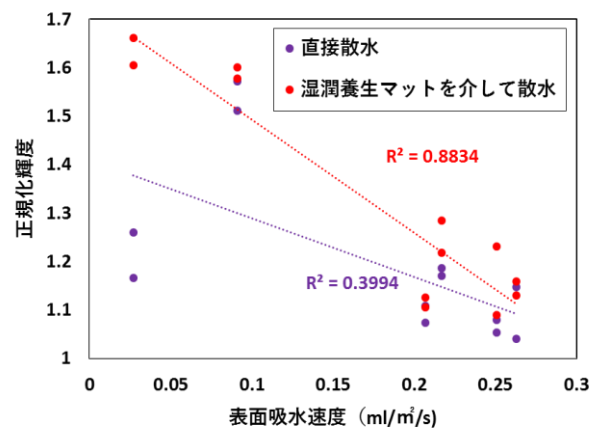
図－8 より、吸水後の測定面の余剰水をウエスで拭くことで、品質の良い試験体の方が正規化輝度は大きくなり、整合性のある結果を得ることがで



図－8 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－9 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



図－10 正規化輝度と表面吸水速度

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ウエス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－9 に示す。図－9 より No.1 と No.2 のい

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、余剰水の流下を低減させることが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-10 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。

(3) 風の影響

図-11 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。全体の傾向として、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。

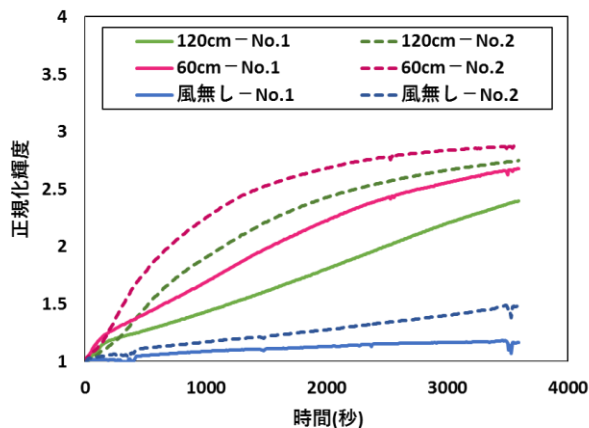


図-11 正規化輝度の時間変化

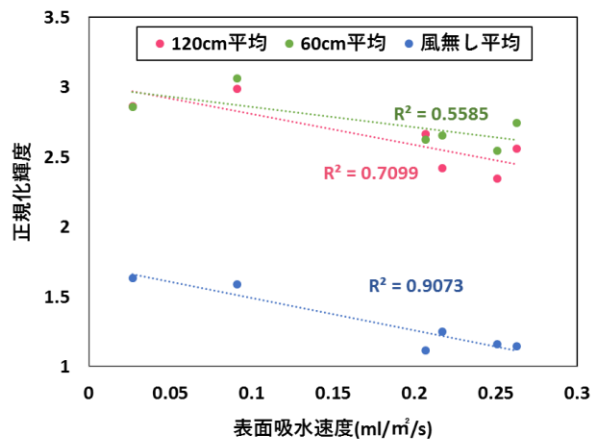


図-12 正規化輝度と表面吸水速度

図-12 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に近いほど、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)でカーブフッティングさせ、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-13 に示す。

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

ここで、Y:経過時間 t での輝度、Y₀:撮影開始時の輝度、A: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ることとする。図-14 に係数 A と表面吸水速度の関係

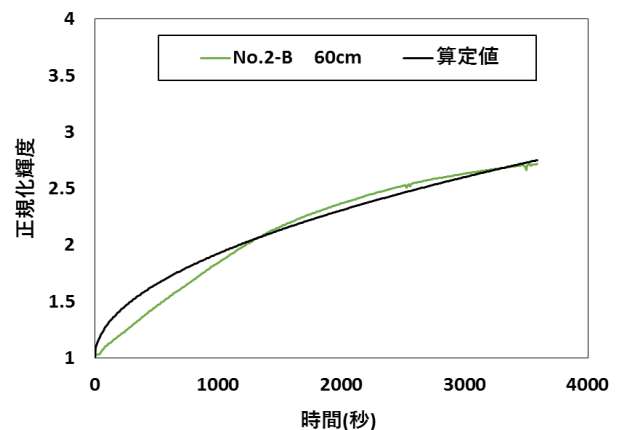


図-13 正規化輝度の時間変化の実験値と算定値

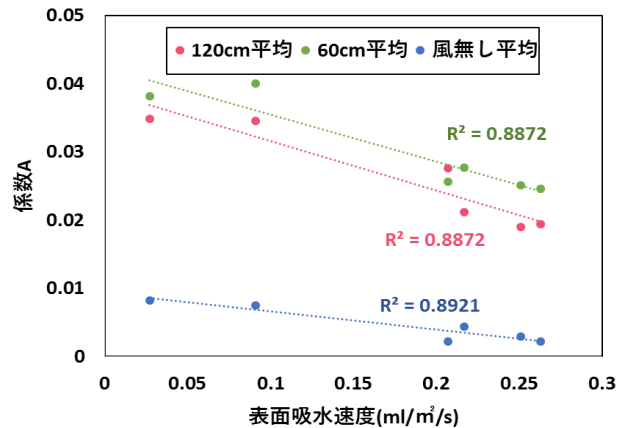


図-14 係数 A と表面吸水速度

を示す。図-12 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。

(4)屋外環境での試験

太陽光は略平行とみなせるため、遮蔽物や反射光がなければ照度の変化は対象面で一定とみなせる。そのため、測定時に大型試験体とは独立したパネルを用意した。このパネルは吸水させないために乾燥による輝度の変化がない。したがって、パネルの輝度の変化率は周囲の明るさの変化であることが考えられる。このパネルによって得られた周囲の明るさの変化率を使用して XYZ カメラによって得られた試験体の輝度の変化率に補正をかける。補正式を式(2)に示す。

$$nY_t = \frac{Y_t}{Y_0 \cdot Y_{bt}} \quad (2)$$

ここで、 nY_t は任意時間 t における補正した輝度の変化率(以後、正規化輝度)、 Y_t は時間 t における試験体表面の輝度、 Y_0 は撮影開始時の試験体表面の輝度、 Y_{bt} は時間 t における補正用パネルの輝度である。

測定結果を図-15 に示す。屋外環境下においても表面吸水速度(測定位置:図-15①~④)と正規化した輝度には相関関係が認められる。この関係を用いて、任意の領域の表面吸水速度を推定した結果(コンター図)に着目すると、ラッピング養生期間 14 日間の打重ね線上部の領域とラッピング養生期間 28 日間の打重ね線下部領域では、養生期間が短い上部領域の表面吸水速度が全体的に大きく、下部領域比べて相対的に表層品質が低いことが分かる。

また、表面吸水速度は、養生期間が同じ上部、あるいは下部領域内でも一様ではないことが分か

る。したがって、既存の手法では測定位置の選定によって、表層品質評価が変わる恐れがある。一方で、本事業で提案した表層品質評価手法では、同図に示すように構造物全体の表層品質を評価可能であり、測定点に依存することなく表層品質を評価することが可能である。

原理検証で使用している XYZ 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非常に高額である。一方、コンクリートは無彩色であり、検証結果より吸水による主たる変化は輝度であることから、測定は安価なカメラで代替可能であると考えられる。

表層品質が異なる試験体を作成し安価なカメラを用いた表層品質評価について検討した。民生用のビデオカメラは、美しい映像記録のため様々な自動補正が働いており、明確な傾向は得られなかった。一方、産業用の USB カメラは USB 民生用のビデオカメラと異なり、周囲環境による自動補正を行わないため、輝度の時間変化の差異が記録できた。

図-16 に産業 USB カメラによる測定結果を示す。この時測定には、東芝テリー株式会社の USB3.0 カメラ(BU series)を使用した。表層品質が悪い No.1 と表層品質が高い No.9 では輝度の時間変化には差異が生じた。XYZ カメラで計測した場合、初期の輝度の時間変化は No.9 の方が大きくなるが、同図に示すように USB カメラの場合では逆の傾向が生じている。これは輝度算出に用いたアルゴリズムが XYZ カメラと異なることが理由と考えられるが、さらなる検討が必要である。しかしながら、No.1 と No.9 の輝度の時間変化には明確な差異を有することから、本評価手法に安価な産業用カメラを適用する可能性は示された。

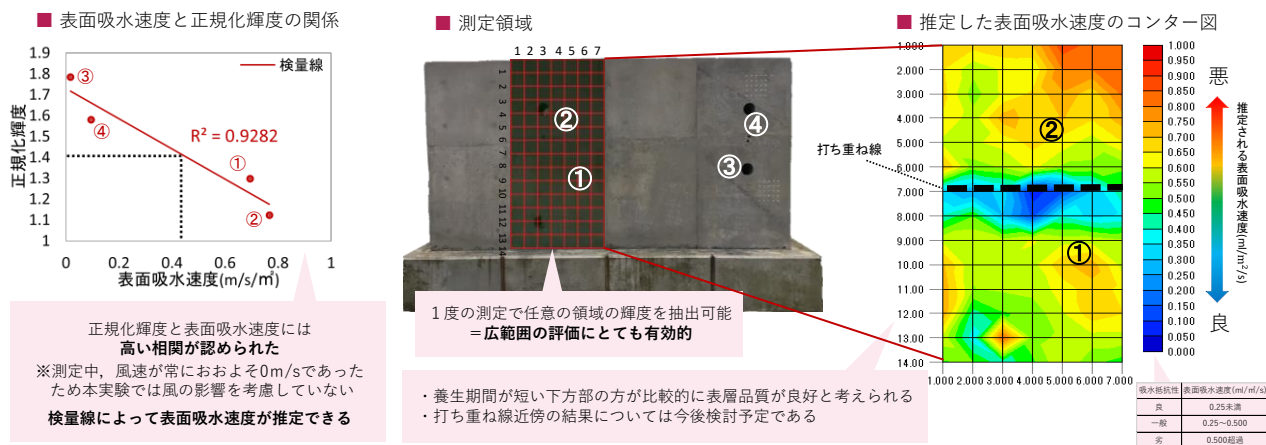
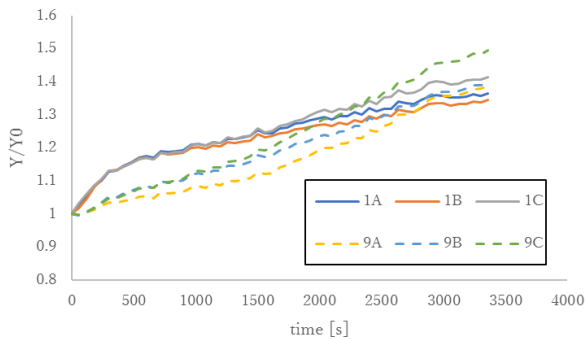


図-15 屋外測定試験結果



図－16 USB カメラを用いた測定試験結果

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、吸水後の余剰水に影響されるため、湿润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。一方で、以下が今後の課題として残された。

- (1) 表面給水速度の検量線を引くために、依然として表面吸水速度を計測する必要があり、専用的高額装置が必要である。温度、湿度、風の影響が測定面の輝度に及ぼす影響について明らかにすることで、輝度のみによる表層品質評価モデルを構築することが必要である。
- (2) 安価な産業用 USB カメラを用いた表層品質評価の可能性が示された。しかしながら、輝度を算出するアルゴリズムの影響により、XYZ カメラと輝度の時間変化の傾向が異なるため、更なる検証が必要である。
- (3) 一般的な構造物は周囲に存在する別の構造物や、植物などの遮蔽、さらには上空の雲が落とす影により、試験範囲全体で均一な照明を得ることが難しく、そのような環境条件下での補正法や測定法の検討が必要である。

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, 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, 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)