

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

中川直人*1・村上祐貴*2・上村健二*3・井林康*2

要旨：コンクリートの表層品質を定量的に評価する手法の代表的なものとして表面吸水試験と表面透気試験がある。これらの既存の手法では一回の測定で計測可能な領域は調査対象物の狭小な領域であり、広範囲での表層品質を評価するには、多数回測定を行う必要がある。そこで本研究では、従来の手法に比べて、一回の測定で広範囲の表層品質評価を可能にすることを目的として、吸水させたコンクリート表面の輝度をXYZカメラを用いて計測し、輝度の時間変化から表層品質を評価する手法を提案した。

キーワード：表層品質, XYZカメラ, 輝度, 表面吸水試験

はじめに

コンクリート構造物の劣化は、塩化物イオンや二酸化炭素等の劣化因子がコンクリート内部に侵入して鋼材腐食を引き起こす化学的現象と、凍害・すり減り等の物理的現象の二つに大別することができる。いずれもコンクリート表層部の密実性と関係が深く、材料的観点や施工の観点からの種々の工夫で表層部を緻密化することで外部からの劣化因子の影響を受けにくくなり、高い耐久性が確保される。

表層品質を調査する手法としてはコア試験体の採取があるが、少なからず実構造物に損傷を与えてしまうため適用される場合は少ない。そのため、近年では表層品質の調査手法として非破壊試験手法の重要性が高まっている。現在、用いられているコンクリート表層部の品質を定量的に評価する代表的な手法としては、表面吸水試験装置を用いて試験を行う表面吸水試験とダブルチャンバーを用いて試験を行う表面透気試験（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調査対象物の狭小な領域であり、広範囲での表層品質を評価するためには測定を多数行う必要がある。

そこで、本研究では、従来の手法に比べて、一回の測定で広範囲の表層品質評価を可能にするために、XYZカメラを用いて計測した、吸水させたコンクリート表面の輝度の時間変化から表層品質評価を行うことを目的とする。コンクリート表面の輝度の時間変化に着目した表層品質評価については、西尾ら¹⁾によって検討されている。西尾らが提案した「散水測色試験」と称された手法は乾燥したコンクリート表面にスプレーによって散水し、その明度変化や余剰水の流下距離からコンクリートの品質

を評価するものである。しかしながら、この手法では、コンクリートの含水状態の影響を受けることが検討課題となっていた。そこで本研究では測定面を水で浸漬させ、表層のコンクリートが水で飽和された状態を初期値とすることで、この問題を解決できると考えた。本稿では角柱試験体および大型試験体を対象とし、既存の非破壊試験手法である表面吸水試験装置を用いた表面吸水試験の評価を基に、XYZカメラで得られたコンクリート表面の輝度の時間変化とコンクリートの表層品質との関係性について検討した。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

試験体形状寸法は図-1に示すように、300mm(W)×300mm(D)×200mm(H)の角柱試験体である。試験体の示方配合を表-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。

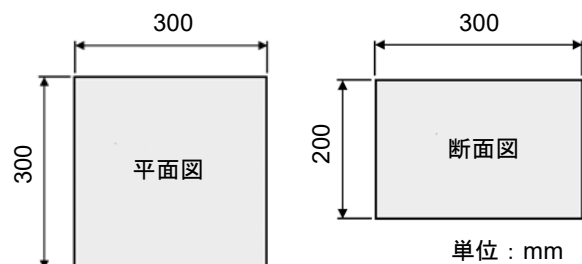


図-1 試験体寸法

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

*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 電子制御工学科准教授 工博

2.2 実験パラメータ

実験パラメータを表-2に示す。コンクリートの表層品質は、脱型材齢、養生方法の影響を受けることが既往の研究で報告されている²⁾。本実験では、表層品質に影響を及ぼすこれらの因子に加え、養生温度を実験パラメータとした。締固め方法は、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。試験体の脱型時期は材齢1日および7日の2水準とした。養生方法は脱型までは封緘養生とし、脱型後は気中養生および水中養生の2水準とした。養生温度は気中養生の場合、0℃および20℃の2水準、水中養生の場合は水中20℃とした。脱型後の養生は試験体No.1～No.4は、所定の養生温度環境下で材齢7日の時点まで養生を行い、その後は室温20℃設定の実験室内で測定までのおよそ7か月間、気中養生を行った。試験体No.5は、材齢7日の時点まで水中養生を行い、その後は試験体No.1～No.4と同様に実験室内で測定までのおよそ7か月間気中養生を行った。また、試験体は各実験パラメータにつき3体製作した。なお、養生温度が0℃の場合は、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、輝度値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。

2.3 XYZカメラによる評価手法

(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値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浸漬させた時、表層部が緻密であるほど水が内部まで浸透しづらく、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輝度値の時間変化は表層品質によって異なると考えられる。そこで、吸水させたコンクリート表面の輝度値を、カメラで一定時間撮影した。

コンクリート表面の撮影には、XYZカメラを用いた。XYZカメラとは、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の色は無彩色であり、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。

表-2 実験パラメータ

試験体 No.	養生方法 (脱型後)	養生温度 (°C)	養生湿度 (% R.H.)	脱型材齢 (日)	締固め方法
1	気中養生	0	60	1	パイプ (15秒) + たたき
2				7	
3		1			
4		7			
5	水中養生	20	—	1	

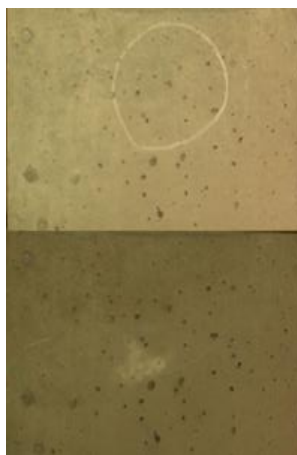


写真-1 コンクリートの乾燥時(上)と吸水時(下)



写真-2 XYZカメラの測定イメージ

(2) 実験方法

実験は以下の手順で行うこととする。まず、試験体の測定面を下にして水槽内に設置し、試験体の表層部である測定面からおよそ10mm程度まで水を入れ、30分間浸漬する。次に、試験体を水槽から取り出し、浸漬面の余剰な水分を不織布でふき取り、浸漬面を上向きにし、大気中に置く。その後、吸水させたコンクリート表面をXYZカメラを用いて、インターバル10秒で1時間撮影を行った。撮影後、各試験体の撮影面での平均Y値を抽出した。室内環境でのY値は照明の影響を大きく受けるため撮影開始の時点でY値は場所によって異なる。そのため、各時刻でのY値を撮影開始時のY値(Y_0)で正規化をした。測定風景のイメージを写真-2に示す。

2.4 表面吸水試験装置による評価手法

本研究で提案する手法の表層品質評価の妥当性を確認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⁴⁾。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-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

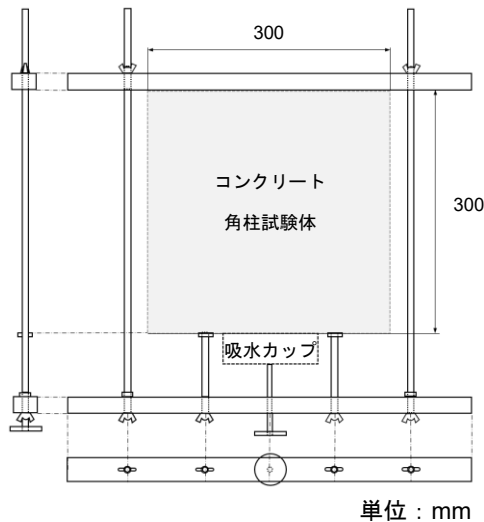


図-2 製作した固定フレーム

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	0.25~0.500
劣	0.500超過

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。計測後、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⁵⁾にある吸水抵抗性の指標である表-3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。

3. 実験結果及び考察

3.1 表面の輝度値と表面吸水速度

XYZカメラによる吸水させたコンクリート表面の輝度値から表層品質評価を行うためには、測定結果に及ぼす測定環境下の温度の影響について確認する必要がある。そこで、温度・湿度を任意の値に設定することのできる

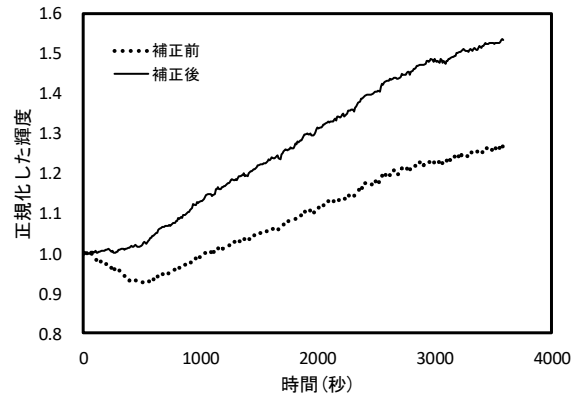


図-3 鏡面反射した表面の正規化した輝度値の時間変化(No.5)

恒温恒湿室内で実験を行った。室内湿度は60%R.H.で一定に設定し、設定した温度は、年間の外気温変化を想定し、冬季5℃、春・秋季15℃、夏季25℃の3水準とした。また、上記の条件で表面吸水試験装置による表面吸水試験も行った。

図-3に一例として3体ある試験体No.5の内、1体の正規化した輝度の時間変化を破線で示す。同図に示すように時間の経過とともに正規化した輝度が大きくなることが確認できた。測定開始直後の輝度値に着目すると、図-3の破線に示すように測定開始直後は余剰水分の消失により正規化した輝度が減少した。これは、測定面の水分のふき取り不足により、測定開始時に鏡面反射を起こしていたことが要因として挙げられる。そこで、このような場合には、当該試験体の撮影面を9等分し、鏡面反射を起こしていない領域の平均値Yを求めることにより補正を行った。図-3の実線に示すように正規化した輝度が初期値より小さくなる現象を低減することができた。

次に、表面吸水試験との整合性について考察する。図-4は測定環境下温度5℃の場合の結果である。測定結果は表面吸水速度が小さい順、すなわち表層品質が高い順に並べ替えた。測定終了時の正規化した輝度は表層品質が高い程、大きい値を示すと考えられるが、完全には整合しなかった。しかしながら、脱型材齢別で比較してみると脱型材齢1日(No.1, No.3, No.5)では表面吸水速度が大きくなるに従い、正規化した輝度が減少し、整合性が取れている。脱型材齢7日(No.2, No.4)でも同様な傾向が認められ、これは輝度の変化が脱型材齢の影響を受けている可能性が考えられる。

3.2 経過時間と正規化した輝度の関係より得られる係数と表面吸水速度との関係

図-5に測定終了時の正規化した輝度と表面吸水速度の関係を示す。全体的な傾向としては、表面吸水速度の増加に従い、正規化した輝度値は低下する傾向にある。

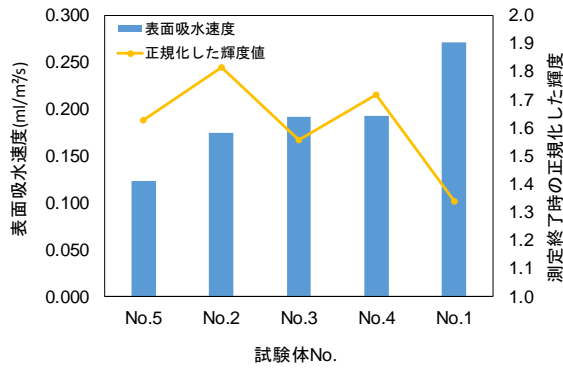


図-4 正規化した輝度と表面吸水速度(5°C)

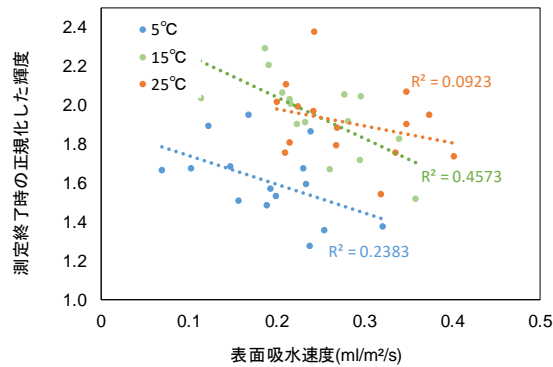


図-5 温度別の輝度と表面吸水速度

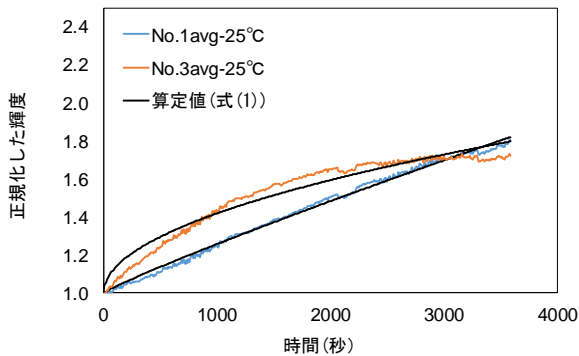
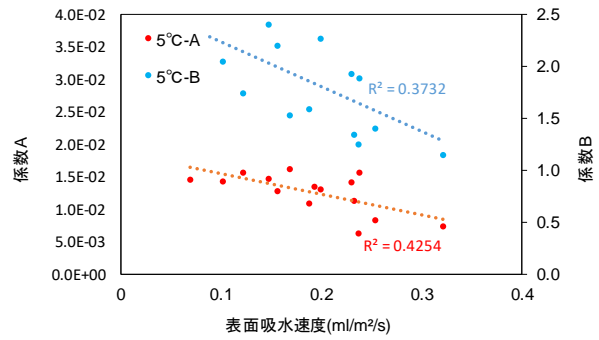
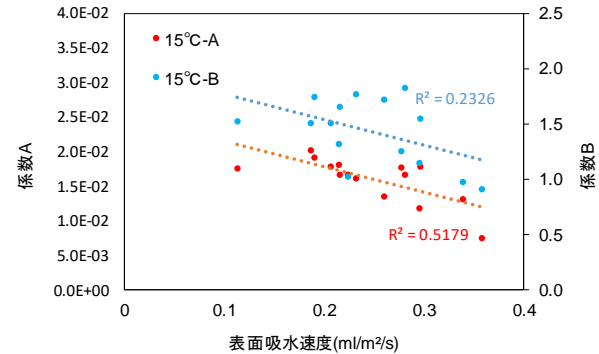


図-6 正規化した輝度値の時間変化(No.1, No.3)

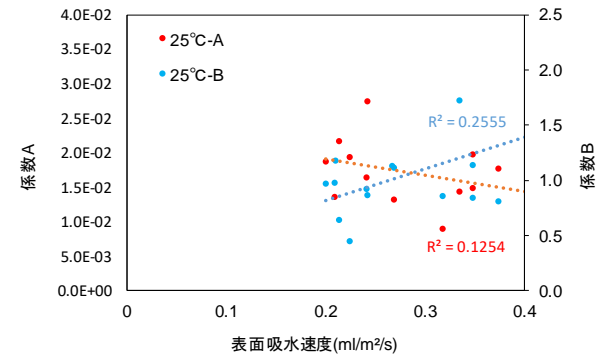
測定環境温度 5°Cでの正規化した輝度が 15°Cおよび 25°Cの場合と比較して全体的に小さい分布となっているのは、比較的冷温な環境下であり、水で浸漬させた表層部が相対的に乾燥しづらいためと考えられる。測定環境温度 25°Cの場合に着目すると、両者に相関関係が認められない。これは、比較的高温下であることから 1 時間の測定を終了する前に、早々に乾ききってしまい、輝度値が変化しづらくなったことが考えられる。一例として測定環境温度 25°Cの場合の試験体 No.1 と No.3 の正規化した輝度値の時間変化を図-6 に示す。同図に示すように最終的な値は両試験体ともに同程度である。図-5 では最終的な輝度値を用いているため、高い相関が得られなかったと考えられる。これより、各試験体の輝度値の時間変化を用いて評価することとした。以下の式(1)でカーブフィッティングさせ Y 値との時間変化と表面吸水速度の関係について考察する(図-6 参照)。



(a) 5°C



(b) 15°C



(c) 25°C

図-7 係数 A,B と表面吸水速度

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

ここで、 t : 経過時間(秒), Y : 経過時間 t での輝度, Y_0 : 撮影開始時の輝度, A, B : 係数とした。各試験体の係数 A, B は最小二乗法を用いて決定した。係数 A, B 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-7 に各温度の輝度と吸水速度の R^2 値 (自由度調整済み決定係数)を示す。係数 A と表面吸水速度の R^2 値は、計測終了時点の正規化した Y 値と表面吸水速度の関係と比較して相関が高くなっていることが分かる。これより、測定開始から 1 時間経過後の正規化した輝度に着目するのではなく、測定開始からの経時的な輝度の変化に着目することで、より強い相関関係を得ることができた。しかしながら、図-7(c) に示すように測定環境温度 25°C では、図-5 の 25°C の結果と同様に、ほとんど相関は認め

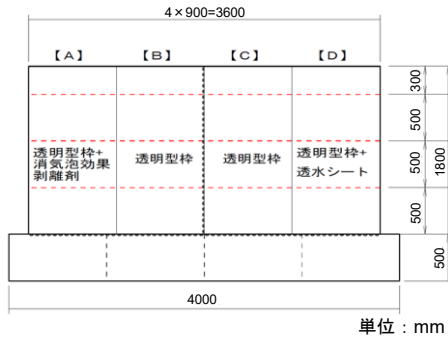
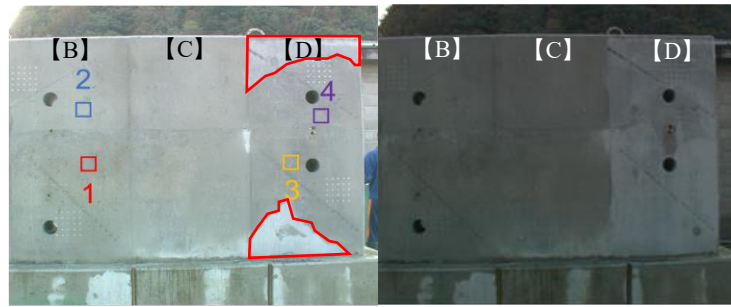
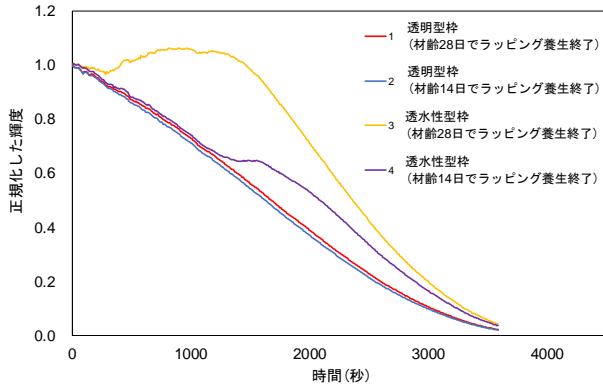


図-8 大型試験体測定面の概要

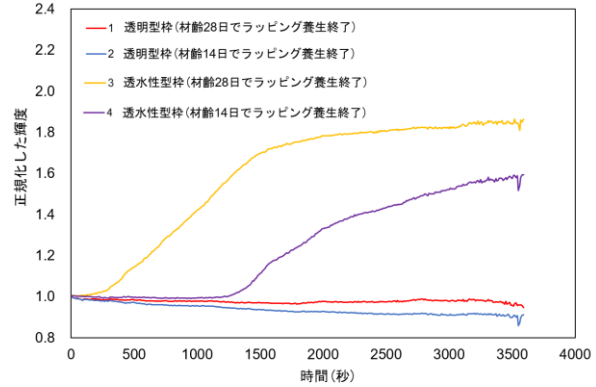


(a) 測定開始時 (b) 測定開始から40分経過時

写真-3 表面吸水試験装置および輝度値の測定箇所



(a) 補正前



(b) 補正後

図-9 各測定個所の正規化した輝度値の時間変化

られなかった。恒温恒湿室で発生する送風や測定環境温度が比較的高い影響を受け、コンクリート表面の乾燥が速く、正規化した輝度の時間変化に差異が生じなかった試験体があったことが要因として考えられるが、確固たる原因は現在検討中であり、今後の検討課題とする。

3.3 屋外環境への適用

XYZ カメラによるコンクリート表面の輝度値から表層品質の評価が屋外環境でも測定可能かどうか検証した。本実験では、試験的に屋外環境での測定を試みることを目的としたため計測時の気温や風等による計測結果への影響は考慮していない。

図-8 に示すように新潟県糸魚川市内に設置された3600mm(W)×1000mm(D)×1800mm(H)の大型の試験体を対象に、表面吸水試験装置を用いて表面吸水試験およびXYZカメラによるコンクリート表面の輝度値の測定を行った。大型試験体では、水槽を用いたコンクリート表面の浸漬は不可能であるため、コンクリートを湿潤養生する際に用いられる給水マットを使用した。試験体と給水マットの間になるべく隙間ができないように給水マットを設置した後、試験体の上方部からホースによって散水し、試験体への水の浸漬を行った。試験体への散水開始から30分経過後、給水マットを取り除き、測定面をXYZカメラを用いてインターバル10秒で1時間撮影し、輝度値を取得した。輝度値は、写真-3(a)に示す、以前に表面吸水試験を実施した4箇所の測定点から抽出した。なお、写真-3(a)に示すようにパネル【D】については上

部と下部の一部においてマットが密着せず、吸水できていない領域(赤枠部)があった。図-8 に示すように、測定点 No.1, No.2 はアクリル製の透明型枠を用いたコンクリートパネル【B】内にある。測定点 No.3, No.4 は透水シート型枠を用いたコンクリートパネル【D】内にある。試験体は材齢5日で型枠を解体し、その後、ビニールシートでラッピング養生を行った。また試験体の上下で養生期間が異なり上半分の800mmは材齢14日でラッピング養生を終了し、下半分の1000mmは材齢28日でラッピング養生を終了した。したがって、測定点 No.1, No.3 は No.2, No.4 より14日間の追加養生を行った面である。屋内で実施したXYZカメラによる輝度値の測定では測定中の照度の時間変化を考慮する必要はなかったが、屋外で測定を行う場合、特に日没前には照度の時間変化が生じる。本実験においても写真-3(b)に示すように測定開始時から40分の間に測定面の照度が大きく変化した。図-9には写真-3(a)に示した4領域での正規化した輝度を示す。図-9(a)に示すように照度の時間変化の影響により、時間の経過とともに正規化した輝度が低下した。そのため、屋外での測定では測定中の照度の変化について補正を行う必要がある。そこで、前述したようにパネル【D】では、水かかりのないコンクリート部があり、この箇所の輝度値の変化は測定中の照度の変化に起因するものであることから、この領域の測定中の輝度 Y_{bi} の変化を照度の変化とみなすこととした。輝度 Y_{bi} は写真-4に示すROI1の枠線内から取得した(67mm×67mm)。また、

表一4 大型試験体での表面吸水試験結果

測定点	表面吸水速度(ml/m ² /s)	吸水抵抗性
No.1	0.141	良
No.2	0.421	一般
No.3	0.010	良
No.4	0.163	良

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。水かきのある領域の任意時間 t_i における正規化された nY_i 値は、以下の式(2)より算出した。なお Y_0 は撮影開始時の輝度である。

$$nY_i = \frac{Y_i}{Y_0 \cdot Y_{bi}} \quad (2)$$

図-9(b)は照度の時間変化を考慮し、補正した輝度値を表している。測定点 No.1 と No.2, No.3 と No.4 を比較した場合、追加養生を行ったパネル下半分内にある測定点の方が正規化した輝度が大きくなっているため追加養生を行わなかったパネル上半分内にある測定点に比べ良好な表面品質である可能性を輝度値から確認することができた。表面吸水試験で得られた表面吸水速度でも、表一4に示すようにXYZカメラと同様、追加養生を行った下方面の方が追加養生を行わなかった上方面に比べ良好な表面品質であると判定され、同一パネルの上下では本手法の評価と同様の結果となった。しかしながら、No.1(透明型枠)と No.4(透水シート型枠)を比較すると、正規化した輝度値では No.4の方が良い表面品質であると推察されるが、表面吸水試験では表一4に示すように、No.1の方が良好な表面品質という結果になった。No.4は、うち重ね線近傍であり、微細ひび割れ等による影響があり、表面吸水試験後の結果が No.1よりも悪くなったと考えられる。正規化した輝度を用いた場合においても No.4の測定開始時における輝度の増加率は No.1と同程度であり、微細ひび割れの影響を受けたと考えられるが、表面吸水試験に比べて試験体に吸水させる水分量が非常に大きいため、ひび割れによる測定結果の影響は鋭敏でないと考えられる。

本研究の手法の大きな特徴は、任意に測定領域を選定可能なことである。そこで、写真-4に示すように透水シートを用いたコンクリートパネル【D】の面を9分割し、領域ごとの表層品質評価の違いについて検討を行った。評価領域はROI3(上段)、ROI4(中段)、ROI9(下段)を対象とした。図-10に示すようにROI4とROI9の輝度の時間変化はほぼ同様であり、この2つの領域では表層品質の差は無いと考えられる。また、ROI3のみ正規化した輝度が小さいことは、給水マットがうまく密着せず、吸水していない領域を含んでいるためである。吸水していない領域は吸水に起因する輝度の時間変化は生じない

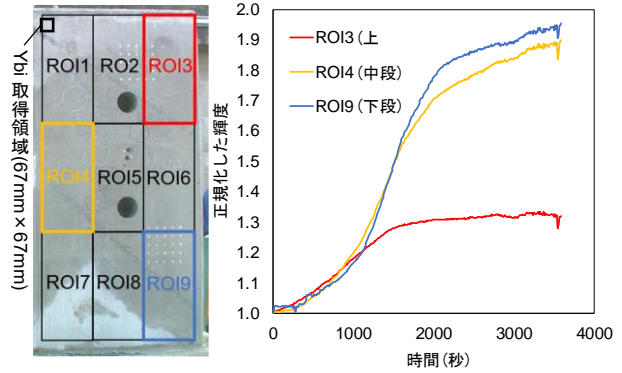


写真-4 測定領域 (パネル【D】)

図-10 任意領域の測定結果 (パネル【D】)

ため、ROI3の平均的な輝度の時間変化は小さくなったと考えられる。今後は、測定面を均一に吸水させる手法を検討する。加えて、輝度の時間変化に着目した表層品質の判定に資する指標を設定し、気温や風等の環境条件の影響について検討していく。

4. まとめ

本研究では、以下の結果が得られた。

- (1) 吸水の影響による正規化した輝度の時間変化と表面吸水試験による表面吸水速度の間には相関性があることを確認できた。
- (2) 吸水の影響による輝度の時間変化と表面吸水試験から得られる表面吸水速度は外気温の影響を受けることが分かった。
- (3) 屋外環境下においても、照度の時間変化を考慮することで、吸水の影響による表面の輝度の時間変化を計測することが可能であった。

参考文献

- 1) 西尾壮平, 上田洋, 岸利治: コンクリート表面における散水時の明度変化特性および水の流下特性による表層品質の非破壊評価, Cement Science and Concrete Technology, Vol.66, 2012
- 2) 井上翠, 澤本武博, 樋口正典, 藤原貴央: コンクリートの表層品質に及ぼす配合および養生方法の影響, Cement Science and Concrete Technology, Vol.68
- 3) 西尾壮平, 上田洋, 岸利治: 散水時の明度変化によるコンクリート表層品質の非破壊評価に移管する基礎的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, 2012
- 4) 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
- 5) 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)