

論文 表面色によるコンクリート表層部の物質移動抵抗性の非破壊評価に関する基礎的検討

西尾 壮平^{*1}・上田 洋^{*2}・岸 利治^{*3}

要旨: コンクリート表層部の物質移動抵抗性は、耐久性に大きく影響することが知られている。本研究では、実構造物のコンクリートに対して適用可能な、簡便かつ非破壊によるコンクリート表層部の物質移動抵抗性の評価手法を検討した。モルタル供試体による実験の結果、モルタルの表面色は、配合、養生および脱型時期の影響を反映することが明らかとなった。色差計などの測色機器を用いて、水分散布時に生じる表面色の経時変化を定量的に評価することで、表層部の物質移動抵抗性に関する品質差が非破壊的に評価できる可能性が示された。

キーワード: 物質移動抵抗性, 吸水特性, 表面色, 測色, 色彩, 明度, L*a*b*表色系, 養生方法, 脱型時期

1. はじめに

従来、構造物に施工されたコンクリートの品質は圧縮強度によって評価あるいは管理されてきた。コンクリートの圧縮強度は、構造材料として設計上重要な指標であるものの、材料劣化に対する抵抗性など、コンクリートの耐久性を考える上での評価指標とは必ずしも合致しない。耐久性に多大な影響を及ぼす指標として考えられるのが、二酸化炭素、塩化物イオンや水といった各種物質の移動に対する抵抗性であり、一般的には透気性、透水性、塩化物イオン拡散や中性化速度のような考え方に基づいた評価が行われる。しかし、これらの評価を実構造物のコンクリートに対して行う際に、コア試験体の採取を伴う手法では、コストや外観ならびに構造上の理由などから実施が制限される場合が多い。また、非破壊的に評価を行う手法も各種が提案されているが、非破壊であるが故に各手法で得られる評価値の解釈には専門性を有する。そのため、実構造物におけるコンクリート品質の評価および管理は、施工と同時期に作製された円柱供試体の破壊試験により得られる圧縮強度を品質指標とするだけに留まっているのが現状である。

本研究では、表面が露出した実構造物のコンクリートに関して、現場で、簡便かつ非破壊的に、物質移動抵抗性を評価可能とする手法の構築を目的とした。評価手法が非破壊試験であることは、実構造物に対して広く活用する上で非常に重要と捉え、主に製造分野の品質管理などで活用事例の多い色彩値による非破壊評価に着目した。色彩値は、人間の視覚によって感じ取られる定性的な特性を定量的に評価することが可能な指標である。そのため、非破壊的に得られる測定値でありながら、測定者の感覚的な評価と相互補完が可能なデータが採取さ

れることにも特徴がある。

コンクリート構造物の色彩に関する研究としては、測色機器によって得られる各種色彩値により、工場製品や打放しコンクリートの仕上がり状態、色調、色むら、美観や汚れといった観点で表面色の評価を行った例^{1),2),3),4)}や、コンクリートの各種物性値の推定を試みた例⁵⁾が見られる。また、コンクリートの色彩値には、配合、養生、型枠、脱型時期、セメントや細骨材の色彩値などが影響を及ぼすものとされ、美観や仕上がりに対する性能が求められる構造物におけるコンクリート表面の色調制御に関して重要となる知見が報告されている^{6),7)}。

一方、表面が露出した実構造物においては、雨で表面の濡れた部位のコンクリートが乾燥した部位に比べて明らかに黒っぽく感じられるように、コンクリートの表面色は水分の存在によって大きく変化する。著者らは、各種実構造物の調査において、乾燥したコンクリート表面に意図的に散水した際に、対象としたコンクリートの品質が著しく劣る場合、水分の逸散が速くなる傾向にあることを経験的に見出してきた。そこで、本研究では、散水によるコンクリート表面色の変化性状に着目し、測色機器を用いた定量的な評価を試みた。

2. コンクリート表面色の測定

2.1 表色系および測定機器

物体の色を定量的に表現するには、色を数値で表現する方法すなわち表色系を規定した上で、色を測定する測色機器が必要である。本研究では、色彩に関する多くの分野で一般的な表色系であり、コンクリート表面色の評価指標としても研究事例の多く見られるL*a*b*表色系⁸⁾を用いた。L*a*b*表色系では、色の三属性のうち明度を

*1 (公財) 鉄道総合技術研究所 材料技術研究部 コンクリート材料 副主任研究員 修士 (工学) (正会員)

*2 (公財) 鉄道総合技術研究所 材料技術研究部 コンクリート材料 研究室長 博士 (工学) (正会員)

*3 東京大学 生産技術研究所 教授 博士 (工学) (正会員)

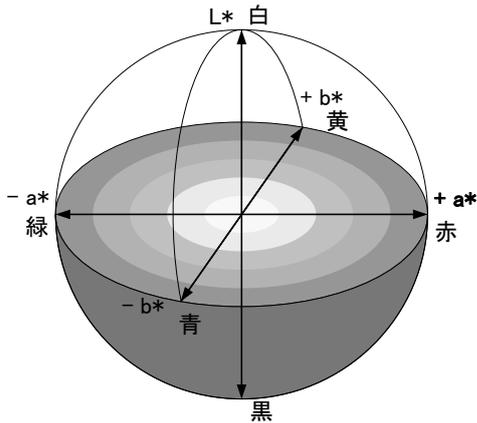


図-1 L*a*b*表色系による色の表示

明度指数 L^* で表し、色相と彩度がクロマティックネス指数 a^* 、 b^* の組み合わせで表記される。明度指数 L^* は 0~100 の値を取り、0 が黒、100 が白を示す。クロマティックネス指数 a^* 、 b^* は、明度や色相によって異なる範囲内で正負の値を取り、絶対値が大きいほど高彩度で色が鮮やかであることを示す。 $a^*=b^*=0$ の場合は無彩色であることを示し、 $+a^*$ は赤、 $-a^*$ は緑、 $+b^*$ は黄、 $-b^*$ は青の色合いを示す。 L^* 、 a^* および b^* を直交軸とした座標空間により、 $L^*a^*b^*$ 表色系における色の表現イメージを図示すると、図-1 のようになる。 $L^*a^*b^*$ 表色系は均等色空間のひとつである。つまり、空間内の等しい距離が人間の視覚により等しい色差として知覚されるように意図された空間であり、2 色間の色差 ΔE^*_{ab} は、空間内における 2 点間の距離を示す次式(1)により計算される。

$$\Delta E^*_{ab} = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (1)$$

ここで、 ΔL^* は 2 色間の明度指数の差、 Δa^* および Δb^* は 2 色間のクロマティックネス指数の差である。色差計算における各指数の寄与率は同一となる。

表-1 に、本研究で使用した測色機器の概要を示す。本研究では、測色方式などの異なる A 機、B 機の 2 種類の測色機器を使用した。これらの機種は据置き型の測色機器とは異なり、現場への携帯が可能な小型・軽量の機

表-1 使用機器および測定条件の概要

機種	A 機	B 機
表色系	$L^*a^*b^*$	$L^*a^*b^*$
測色方式	分光測色式	刺激値直読式
測定径	ϕ 11mm	ϕ 50mm
照明・受光方式	環状照明垂直受光方式 (45° : 0°)	拡散照明垂直受光方式 (正反射光含)
観察光源	C	C
視野角度	CIE 2°	CIE 2°
特記事項	光沢度同時計測 (照射角度 60°)	自動計測機能搭載 (最短 3 秒間隔)

種であり、測定作業は単独で実施できる。A 機では測色と同時に照射角度 60° の光沢度が測定されるため、光沢度に関する検討が可能となる。B 機は測定径が大きいため、測定面における凹凸や気泡の存在が不可避であるコンクリートに対して、平均的な評価を行うのに適した機種として選定した。

2.2 測定例

骨材の露出などのない通常のコンクリートにおける表面色は広義に灰白色で彩度が低いため、クロマティックネス指数 a^* 、 b^* の測定値は比較的小さい値となる。一方、明度指数 L^* は雨後のコンクリート表面色が黒味を帯びるように、コンクリートの湿潤状態に依存して大きく変化することが経験的にも広く知られている。表-2 に、本研究で得られた色彩値の概略を示す。測色機器は A 機を用い、測定の対象はモルタル試験体の打設面、型枠に接していた側面および底面、ならびに実構造物の側面とした。測定環境として、モルタル試験体は温度 20°C、相対湿度 60% の試験室内における気中乾燥状態にて、実構造物は雨水などのかかっていない平常時の状態に屋外にて測定を行った結果である。表面の研磨など特殊な処置は行っていない。本研究の測定結果では、ある程度の乾燥状態にあるコンクリートにおいても、明度指数 L^* は 50~90 程度の範囲に分布し、クロマティックネス指数 a^* 、 b^* に比べて幅広い分布を示した。コンクリートにおける色彩値の特徴は明度指数 L^* に強く現れるものと考えられる。なお、雨などの水分で表面が濡れた場合、明度は低くなり、明度指数 L^* が 30 程度まで低下することを確認している。

一方、モルタル供試体に比べて実構造物における b^* の測定値は大きく、標準偏差も大きい。これは屋外曝露による塵埃などの影響と思われる、コンクリート表面がやや黄色い色合いを示したことが窺い知れる。表面色の変化を色差 ΔE^*_{ab} で評価し、実構造物と室内試験データを比較するような際には b^* の影響を留意する必要がある。また、経年に伴う擦り減りなどの作用によって骨材が露出した場合は、骨材の表面色により色彩値の測定範囲は変動するものと予測される。

表-2 モルタルおよびコンクリートの色彩値

測定対象	モルタル試験体 (n=702)			実構造物 (n=118)		
	L^*	a^*	b^*	L^*	a^*	b^*
最小値	53.7	-1.5	0.6	53.4	-2.2	6.5
最大値	85.5	-0.5	10.5	79.8	0.3	18.2
平均値	70.3	-0.9	6.2	71.2	-0.5	11.0
標準偏差	5.9	0.2	1.7	6.0	0.5	2.7

3. 品質の異なるモルタル供試体による実験的検討

3.1 実験概要

(1) 供試体

配合および脱型・養生条件により表層部の物質移動抵抗性に関わる品質の差異化を図ったモルタル供試体を作製し、供試体表面の色彩値との関連性を検討した。表-3に、モルタル供試体の作製条件を示す。セメントは普通ポルトランドセメントを使用し、細骨材は標準砂とした。配合は水セメント比を3段階に設定し、細骨材量はセメントに対する質量比を3.0で統一した。

供試体は所定の時期に脱型し、材齢28日までを初期養生期間とした。初期養生を終えた供試体は温度20℃、相対湿度60%に制御された恒温恒湿試験室（以下、試験室とする）内に材齢56日まで静置した。

材齢56日の時点における供試体の基本性状試験として、直径50mm×高さ100mmの円柱供試体による圧縮強度試験を行った。供試体本数は各3本とした。図-2に、圧縮強度試験結果を示す。養生条件の違いによる圧縮強度の差は、水セメント比の低いW/C=40%で顕著である。養生環境の乾燥化に伴って供試体表層の水分逸散が促進されるものと捉えた場合、水セメント比の低いW/C=40%では供試体内部の余剰な水分が少ないため、乾燥化の影響を大きく受け、強度の低減が大きくなったものと考えられる。養生条件の影響は、脱型時期を遅らせたW/C=50%の7日脱型の供試体で最も小さく、気中養生および乾燥養生条件下では、1日脱型時のW/C=40%より高い圧縮強度を示した。脱型時期の延伸により、養生条件の乾燥化に伴って生じる供試体表層からの水分逸散が抑制されたものと思われる。

(2) 物質移動抵抗性に関する検討

作製したモルタル供試体の物質移動抵抗性について評価を行うため、100×100×100mmの角柱供試体による完全浸漬吸水試験および散水測色試験を実施した。ここで、散水測色試験とは、本研究で提案するコンクリート表層部の物質移動抵抗性に関わる非破壊試験方法である。すなわち、散水によってコンクリート表面に水分を付与することで生じる表面色の変化を測色機器によって定量的に評価するものである。図-3に、散水測色試験の概要を示す。試験開始時の供試体の含水状態は、試験室内の重量変化記録に基づき、気乾状態であることを確認して試験に供した。散水測色試験では、付与する水分の量および領域のほか、粒径などを考慮することが望ましいが、本研究では試行的に、常温の純水と市販の手持式スプレーを用い、ノズル部分の調整および試作した治具により散水量および散水領域を安定化させて使用し、基礎的な検討を行った。試験環境は試験室内（20℃、60%RH）とし、散水および測色は測定対象面を水平とな

表-3 モルタル供試体の作製条件

W/C (%)	S/C	脱型時期	初期養生方法 (材齢28日まで)
40	3.0	1日	・標準水中養生 ・気中養生 (20℃, 60%RH) ・乾燥養生 (20℃, 40%RH)
50		1日	
		7日	
60		1日	

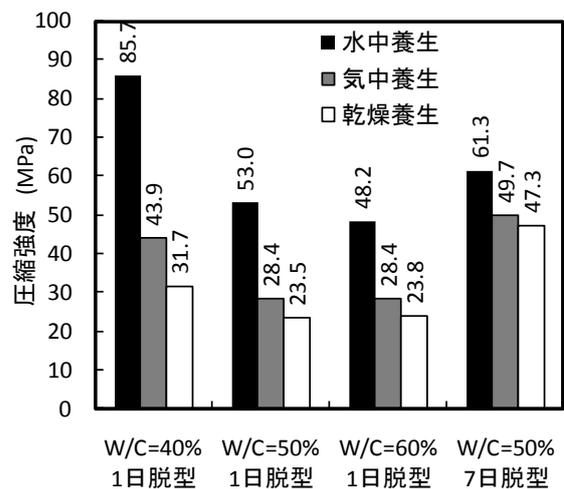


図-2 モルタル供試体の圧縮強度

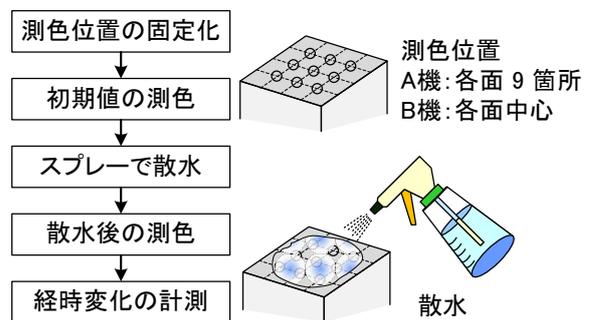


図-3 散水測色試験の概要

るよう設置した上方から行った。

3.2 実験結果

(1) 吸水特性

図-4に、水槽内に完全浸漬させたモルタル供試体の累積吸水量の経時変化を示す。累積吸水量は所定の時期に水中から取り出した供試体の重量から試験開始前の気乾状態における重量を差し引いて算出した。同図より、配合、養生および脱型時期により吸水特性が大きく異なることが明らかである。同一配合内で比較すると、7日脱型のシリーズを除き、初期養生時の条件が乾燥環境であるほど吸水曲線が高い位置を取ることが分かる。7日脱型のシリーズで初期水中養生による吸水抑制効果が明瞭でない原因は、打設面の影響が考えられる。今回の供試体は他試験への用途を確保するため、吸水面を特定の面に限定するような被覆などの処置は行っていない。

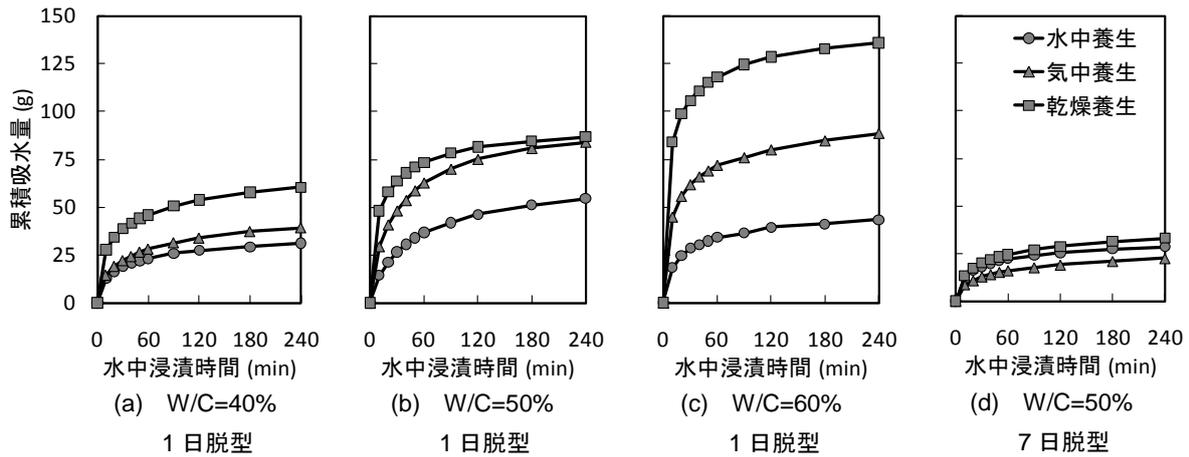


図-4 吸水試験結果

そのため、型枠存置期間の影響が現れない打設面からの吸水については誤差要因となる。次に、各配合間で比較すると、水中養生の W/C=60%と W/C=50%で吸水曲線の位置関係が水セメント比から推測される品質に沿ったものとならず、W/C=60%で吸水曲線が下に位置し、最終的な吸水量も小さくなっている。この原因は不明であるが、試験開始時における気乾状態の設定誤差が現れた可能性が考えられる。

(2) 散水測色試験における色彩値の変化特性

ここでは、測色機器 A 機を用いた試験結果を示す。色彩値の特徴は主に明度指数 L^* に現れていたことから、クロマティックネス指数 a^* , b^* の結果については割愛する。測定値は、供試体各面 9 箇所ノの平均値を示し、側面については 4 面、36 箇所ノの平均値となる。図-5 に、モルタル供試体の気乾状態における明度指数 L^* を示す。初期養生方法が異なる供試体間で比較すると、水中養生を行った供試体で明度が高いことがわかる。これは水槽内に養生されることで表面に析出したカルシウム塩類の影響と推測される。測定面の種別で比較すると、明度は打設面が高く、底面で低い傾向にあり、脱型時期を延伸した 7 日脱型の供試体で顕著である。養生方法および型枠の

脱型時期がモルタル表面の明度に大きく影響することが本研究においても確認された。

次に、モルタル表面に散水を行い、表面を湿润状態とした際の明度を測定した。ここで、湿润状態とは、供試体測定面全体にスプレーで十分に散水して吸水させるとともに、表面に浮き水を生じた状態とし、表面付近は飽水状態に近いものと見なした。詳細は省略するが、湿润状態であることを定量的に示す指標として、測色機器 A 機において計測される光沢度が活用可能であることを確認している。図-6 に、モルタル供試体の湿润状態における明度指数 L^* を示す。同図より、散水によって明度が全体的に低下したことが明らかである。また、気乾状態と比較すると、水中養生時および打設面における明度の向上が、より明瞭となった。つまり、気乾状態から湿润状態へ散水によって強制的に移行したことで、モルタルの表面付近に付与された水分の影響により表面の明度は変化し、明度指数 L^* の変化量は、養生の程度や部材の部位などによって生じていると思われるモルタル表層付近の品質差を反映している可能性があることを示唆している。

図-7 に、モルタル供試体の散水前後に生じる明度指

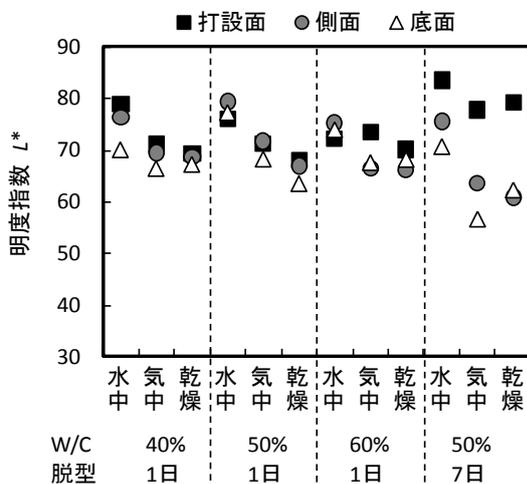


図-5 気乾状態の明度指数

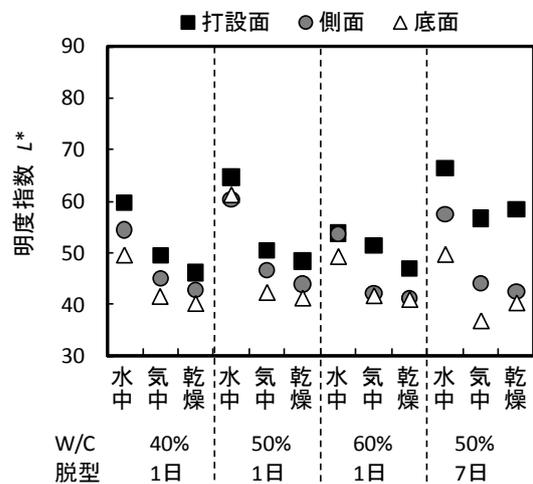


図-6 湿润状態の明度指数

数差 ΔL^* を示す。数値の絶対値の大小が明度変化量の大小を示し、正負は正が明度の向上を、負が明度の低下を示す。同図より、水中養生で明度変化量が小さい。一方、打設面でも明度変化量が小さい。組織が緻密化して物質移動抵抗性が向上するものと仮定した場合に、水中養生による緻密化に対し、測定面種別における打設面の位置付けを考えると両者の関係は相反する。また、全体として、モルタル供試体における圧縮強度や吸水性状に現れたような明瞭な品質の差異を明度指数 L^* の変化のみから得ることはできていない。これらのことから、気乾状態と湿潤状態における色彩値の単純な比較のみによって物質移動抵抗性に対する評価を行うことは困難であるものと考えられる。

(3) 散水測色試験における明度差の経時変化特性

著者らは、実構造物のコンクリート表面において、散水後の水分の逸散状況には、コンクリート品質との関連性を窺わせるような特徴が現れることを経験的に見出してきた。そこで、散水測色試験において、散水後の明度の経時変化に関する検討を行った。

表面に付与した水分は、内部への浸透や蒸発により、表面からは徐々に消失していく。つまり、色彩や明度で

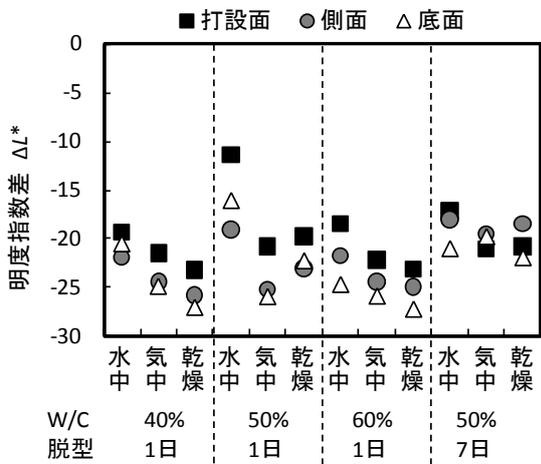


図-7 散水前後の明度指数差

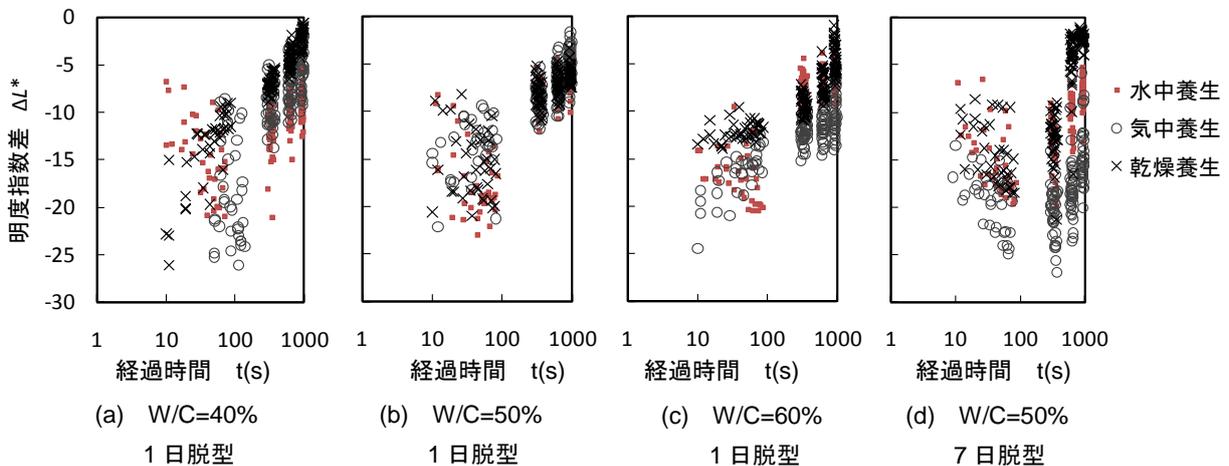


図-8 明度指数差の経時変化

表現すると、黒から白へ徐々に明るくなっていくため、散水によって生じた明度指数差 ΔL^* は時間の経過に従って0へと漸近する。図-8に、少量の散水を行ったモルタル供試体における明度指数差 ΔL^* の経時変化を示す。ここでは、A機によりモルタル供試体の4側面×9箇所にて測定した結果をすべてプロットした。散水量は測定面内に約2.5mlを噴霧した。同図より、明度変化量が最大となる経過時間に差が見られ、特に、7日脱型の供試体で長時間化することがわかる。また、経過時間100秒までの測定値は、明度指数差 ΔL^* で-10~-25程度に幅広く分布し、全体的には水中養生の測定値の分布が上下にばらついている傾向にある。

これまでに示した測定結果は、A機による測定径10mmの測定値を各測定面9箇所で採取した色彩値に基づく評価である。A機では色彩値の分光分布や光沢度が計測される利点があるものの、測定径が小さいため、測定点数を多く取ることとした。そのため、測定位置を固定して秒単位での経時変化を詳細に測定することは不可能であった。図-8において、測定値に幅広い分布が示された理由として、同一測定面とはいえ厳密には測定位置の異なる9箇所の測定結果を同一の時間軸上にすべてプロットしたことが考えられる。また、秒単位で測定値が変化することが示唆されたため、厳密には測定時期も異なる9箇所の測定値を、平均化して評価することも不適当である。以上のことから、散水測色試験においては、散水処理を行った直後の数秒から数分間に生じる明度の経時変化について、測定点を固定して詳細に捉えることが重要であるものと推測された。そこで、散水直後に秒単位で変化する色彩値に対して、より詳細な経時変化を計測するため、B機を用いて検討を行った。B機では、測定位置を固定した上で、測定径50mmの範囲における色彩値の自動計測が可能となる。図-9に、少量の散水を行ったモルタル供試体における明度指数差 ΔL^* の詳細な経時変化を示す。各供試体の測面1面について、

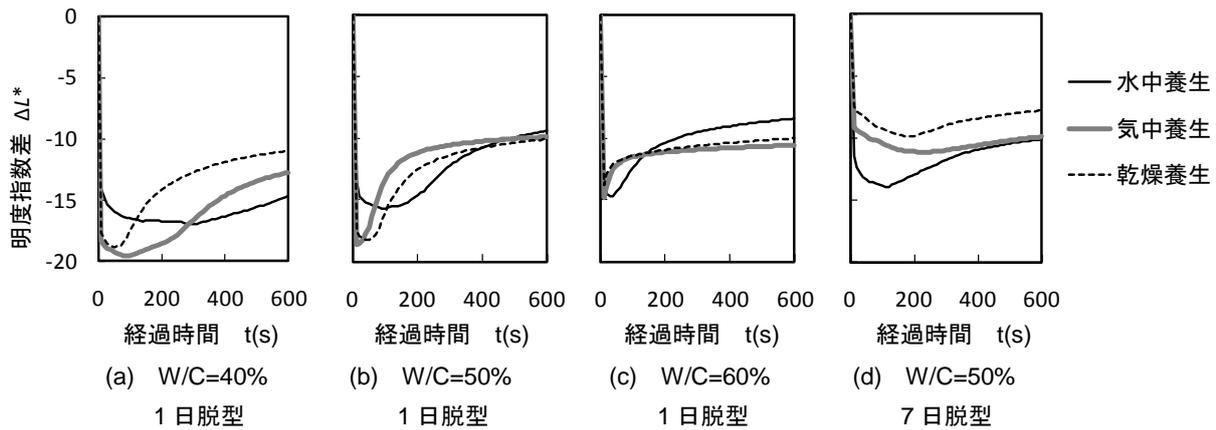


図-9 散水前後に生じた明度指数差の詳細な経時変化

散水領域を治具により直径70mmの円内に制限して均一化を図った上で約0.8mlの散水を行い、B機により、中心位置の直径50mmの領域を10秒間隔で計測した結果である。同図より、水セメント比が低いほど、また、水中養生や型枠脱型時期を延伸した場合に、明度変化量が最大となる経過時間が長時間化することがわかる。さらにこれらの供試体では、明度変化量の最大値を記録した直後における経時変化曲線の勾配が緩やかとなることが明らかとなった。散水測色試験で得られる明度指数差 ΔL^* の経時変化曲線において、明度変化量が最大となる経過時間と曲線の勾配は、コンクリートの配合、養生および脱型時期の相違によって生じる品質差を示す指標となる可能性がある。

4. まとめ

本研究では、コンクリート表面に水を付与した際の表面色の変化性状に着目し、測色機器による定量的な評価を行った。型枠の脱型時期および脱型後の初期養生によって異なる表層品質を再現したモルタル供試体を用いた各種試験により、以下のような知見が得られた。

- (1) 型枠の脱型時期を延伸することで、脱型後の初期養生方法に起因する乾燥によって生じる品質に対する悪影響は小さくなる。
- (2) 型枠の脱型時期の延伸および脱型後の湿潤養生は、モルタルの吸水量を低下させる。
- (3) 直径50mm×高さ100mmの円柱供試体による圧縮強度試験の結果、脱型後の養生条件が圧縮強度に及ぼす影響は、型枠脱型時期を延伸した供試体で小さく、1日脱型では低水セメント比ほど顕著であった。
- (4) モルタルおよびコンクリートの表面色は表層付近の含水状態に依存して大きく変化し、色彩値の変化は $L^*a^*b^*$ 表色系における明度指数 L^* に顕著に現れる。
- (5) 同条件で打設されたモルタルの場合、水槽内にて水中養生を行った供試体の表面は明度が高くなる。ま

た、打設面では明度が高くなり、型枠に接する底面は明度が低くなる。

- (6) モルタルの表面色は脱型時期および脱型後の養生方法など多くの影響要因によって変化するため、色彩値のみで絶対的な評価を行うのは困難である。
- (7) 本研究で提案する散水測色試験により得られる色彩値の経時変化曲線は、コンクリートの品質差に関する評価指標として活用できる可能性がある。

なお、散水測色試験で得られる経時変化曲線の詳細な分析等については、今後の検討課題としたい。

参考文献

- 1) 大塚秀三ほか：調合および施工要因の違いがコンクリート表面の色むらに及ぼす影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.29，No.2，pp.271-276，2007
- 2) 劉 靈芝ほか：打放しコンクリートの色彩に及ぼすセメントおよび細骨材の色彩の影響，日本建築学会構造系論文集，No.612，pp.17-22，2007.2
- 3) 高橋宏樹ほか：コンクリート表面の仕上がり性状に関する実験的研究その1-その2，日本建築学会大会学術講演梗概集A-1，pp.439-442，2004.8
- 4) 地濃茂雄：降雨濡れによるコンクリート表面の色調変化，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.17，No.1，pp.285-288，1993
- 5) 藤森 繁ほか：モルタルの色彩値と力学的特性に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，No.555，pp.17-24，2002.5
- 6) 小林俊秋：材料・養生方法がコンクリートの色調に与える影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.2，pp.949-954，1999.3
- 7) 柏木隆男：打放しコンクリートの色調制御，セメント・コンクリート，No.630，pp.34-41，1999.8
- 8) JIS Z 8729 色の表示方法-L*a*b*表色系およびL*u*v*表色系