

論文 コンクリート表面の明度および光沢度に及ぼす表面性状の影響に関する研究

深尾 宙彦^{*1}・北垣 亮馬^{*2}・佐藤 幸恵^{*3}・野口 貴文^{*4}

要旨: 水和反応に伴う表面形状の変化がコンクリート表面の外観に及ぼす影響を明らかにすることを目的とし、水セメント比および脱型時期の異なるモルタル試験体の表面形状と明度・光沢度の関係性を検討した。表面形状の深度情報をフーリエ変換により振幅と周波数で表現し、周波数帯域別の振幅の変化を視覚的な性能値の変化と関連付けた結果、水和反応初期には、低周波数帯域の振幅の減衰率が大きく、高周波数帯域の振幅は後に加速度的に減衰することが明らかとなった。また、コンクリート表面の視覚的な性能は、光沢度には低周波数帯域が支配的であるのに対して、明度には高周波数帯域が支配的であることが明らかとなった。

キーワード: 打放しコンクリート, 明度, 光沢, 表面形状, 表面積, フーリエ変換

1. はじめに

打放しコンクリート仕上げとは、型枠を外した素地のままのコンクリート面を建築物の意匠とする仕上げ手法であり、建築物の表現手法の一つとして認識され普及している。一方で、熟練した施工業者が経験的知識に基づいて施工する場合を除いて、出来上がったコンクリートの外観は十分に予測・制御されているとは言えず、施工においてどのような仕上がり状態を目標とするかも明確に定められていない場合が多い¹⁾。そのため、施工・設計者・施工者間で打放しコンクリートの印象を決定する色調や光沢度などの情報を共有できていない現状がある。

打放しコンクリートの外観は、その建築物の価値を文化的な位置づけや独自性、意匠性といった観点から左右する重要な要因であり、打放しコンクリートの外観を予測・計画し、任意の状態に制御可能にすることは建築物の価値を向上させるうえでメリットが大きいと考えられる。また、コンクリート表面の明度・光沢度といった視覚的な性能は、コンクリートの組成・組織構造・表面形状によって決まると考えられるが、そうした物性はコンクリートの耐久性を大きく左右するものでもあり、外観に関わる品質を確保することは、コンクリート構造物の長寿命化の観点からもメリットが大きいと考えられる。

こうした観点から、これまでコンクリート工事における各因子の打放しコンクリートの外観への影響が、網羅的にではないが検討されてきており^{2)~5)}、例えば水セメント比を変化させた場合の明度や光沢度の変化など、個別の影響因子がもたらす結果については定性的に明らかになってきている。しかしながら、実際のコンクリート工事における影響因子は多岐に渡っていることに加えて

影響因子同士の相互関係が明らかになっていないといえず、体系的な予測手法の構築に至っていない。

体系的な予測手法を構築するためには、コンクリートの視覚的な性能（ここでは色調および光沢とする）が最終的に硬化コンクリートの構成要素や組織構造、表面形状などの特徴によってどのように決定されているかを明らかにし、コンクリート工事の各種影響因子がどのようなメカニズムで硬化コンクリートの特徴に作用しているか、という観点から整理する方法が考えられる。このようにメカニズムの予測に拠って定量的にコンクリートの色彩を予測しようとした例としては、劉らの提案によるセメント細骨材混合物の色彩・粒径・混合割合に基づく色彩予測モデル⁶⁾があるが、水で練り混ぜをしない乾燥状態における予測にとどまっており、水和反応による構成要素の変化や表面形状の変化が考慮されていない。

表面形状は打放しコンクリート表面の視覚的な性能を決定するうえで、色調にも光沢度にも影響を与える重要な因子であると考えられるが、表面形状が色調と光沢感に及ぼす影響について、その寸法による効果の違いにまで言及し、明らかにした事例はない。セメント硬化体の数 10 μ m 以下の微細な表面形状は、脱型までの水和反応および脱型後の炭酸化反応によって随時変化しており、微細な表面形状の影響を無視して汎用性の高い色彩および光沢度の予測手法を構築することはできない。

そこで、本研究では微細な表面形状がコンクリート表面の視覚的な性能に及ぼす影響に着目し、脱型までの水和反応に伴う表面形状の変化を詳細に分析することによって、微細な表面形状と視覚的な性能との関係を明らかにすることを目的とする。

*1 東京大学大学院工学系研究科 工修 (学生会員)

*2 東京大学大学院工学系研究科 講師 工博 (正会員)

*3 東京都市大学工学部 講師 工博 (正会員)

*4 東京大学大学院工学系研究科 准教授 工博 (正会員)

2. 実験方法

2.1 実験の概要

打放しコンクリート表層部は壁面効果を考慮するとコンクリート中のモルタル成分であると考えられるため、本研究ではモルタル試験体を用いて表面性状の比較を行った。

水和反応の進行度とそれに伴って変化する表面形状がモルタル表面の視覚的な性能に及ぼす影響を検討するため、水セメント比および脱型時期の異なるモルタル試験体の表面形状および視覚的な性能値の測定を行った。

2.2 モルタル試験体の作製

モルタル試験体の水準を表-1に示す。型枠はポリスチレンフォームで試験体の寸法が幅 8 cm×高さ 10 cm×厚さ 2 cmとなるように作製した。8 cm×10 cmの試験面に接する型枠の材質は、型枠材の品質のばらつきや吸水の影響を排除するため、平滑な塩ビ板とした。材料は表-2に示す普通ポルトランドセメントと大井川産細骨材を使用した。なお、表中に示す材料の色彩値は、各材料をガラスシャーレに充填し、その底面の色彩を後述する測色計を用いてSCI方式で測定したものである。調合は水セメント比を0.4、0.5、0.6、細骨材とセメントペーストの体積比を1:1とした。型枠内養生期間は1、3、7日とし、コンクリート壁面を模擬するため、脱型後は試験面一面のみを20℃、60%RH、無風の気中に露出し、他の面はアルミテープにより封緘状態とした。

2.3 測定項目および測定方法

モルタル試験体の脱型後、表-3に示す項目を測定した。

表層部の組織構造を推察するため、脱型後の試験体の質量および水分率の経時変化を測定した。水分率の測定には高周波容量式のモルタル水分計を使用した。

試験体表面の視覚的な性能値として、光沢度と色彩値の測定を行った。60度鏡面反射率を光沢度とし、グロスチェッカを用いて測定面の上下2ヶ所において測定した。色彩値は分光測色計を用いてCIE（国際照明委員会）が定めるL*a*b*表色系の各色度を、試験体の上中下3ヶ所において、表面形状の影響を考慮するため、SCI方式（8度鏡面反射光を含む全反射成分）とSCE方式（8度鏡面反射光を含まない拡散反射成分のみ）の2方式で測定した。L*値は明度を表し、0のとき黒色、100のとき白色を表す。a*値、b*値はそれぞれ、正の値のとき赤み、黄みの強さを表し、負の値のとき、緑み、青みの強さを表す。また、a*値、b*値を座標軸としたときの原点からの距離を彩度C*と定義する。

脱型した各試験体の質量及び光沢度、各色彩値の乾燥に伴う変化が収束した時点で、色彩測定点の表面形状および算術平均粗さをレーザー光走査式顕微鏡で測定した。

表-1 モルタル試験体の水準

要因	水準
水セメント比 (W/C)	0.4, 0.5, 0.6
細骨材ペースト体積比	1
型枠存置期間 (d)	1d, 3d, 7d
型枠の材質	塩ビ板 0.5mm厚
試験体寸法	W×H×D=8cm×10cm×2cm (試験面8×10, 打設面8×2)
脱型後の養生方法	20℃,60%RH, 無風環境気中養生

表-2 使用材料

普通ポルトランドセメント	密度 3.16 比表面積 3360 cm ² /g (L*,a*,b*)=(53.59,-0.99,9.3)
大井川産陸砂 0~5mm	表乾密度 2.60 粗粒率 2.66 (L*,a*,b*)=(42.23,0.29,13.52) (L*,a*,b*)=(52.29,1.14,19.59)* <small>*75μ以下の粒径の色彩値</small>

表-3 測定項目および測定方法

測定項目	測定方法
算術平均粗さ Ra(μm)	レーザー光走査式顕微鏡
表面形状 (μm)	
光沢度 (%)	グロスチェッカ
色彩値 (L*a*b*表色系)	分光測色計 (SCI方式,SCE方式)
質量変化 (g)	電子天秤
表面水分率 (%)	高周波容量式モルタル水分計

3. 実験結果および考察

3.1 表層部の組織構造に関する考察

図-1に各試験体の質量減少率（質量減少量の脱型時質量に対する割合）と表面水分率との関係を示す。脱型からの経過時間をt(s)とおくとき、tの平方根を横軸、時刻tにおける蒸発水量M_t(g)を縦軸とするグラフの傾きをAとし、以下の式(1)によって水分蒸発係数Dを定義し、表層部の緻密さを表す指標として求めた⁷⁾。ここで、M_∞は質量変化が一定となるまでの蒸発水量(g)、2Lはモルタル試験体の厚さ(m)とする。

$$A = \sqrt{\frac{4D}{\pi L^2}} \cdot M_{\infty} \quad \text{式(1)}$$

図-2に各試験体の水分蒸発係数を示す。水セメント比が大きく、脱型時期が早い試験体ほど水分蒸発係数が大きく、表層部の組織構造が粗であることが分かる。

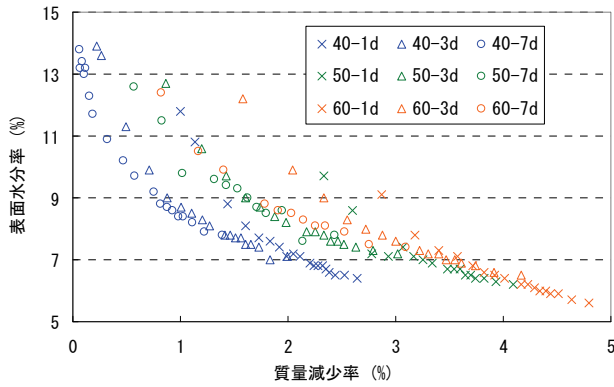


図-1 各試験体の質量減少率と表面水分率

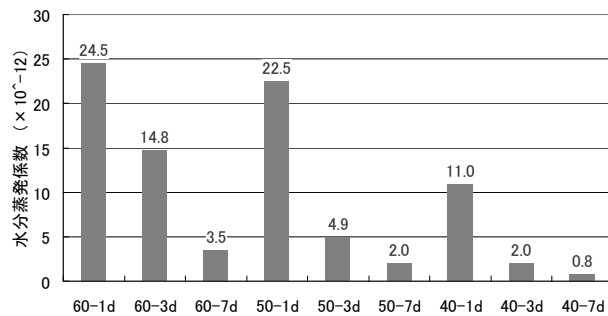


図-2 各試験体の水分蒸発係数

3.2 視覚的な性能の測定結果

各試験体の色彩値および光沢度は質量変化と共に一定の値に収束した。図-3 に色彩値の収束値を示す。

色みの強さをあらわす a^* 値, b^* 値に関しては, L^* 値に比べてその絶対値が微小であり, 材料の偏りや測定箇所によるばらつきの影響が大きいとも考えられるが, 全体的には型枠内養生期間が長いほど b^* 値の値が減少し, a^* 値の負の絶対値が微増する傾向が見られた。これは使用材料の色彩値に基づく, 黄色みの強い細骨材微粒分の色彩への影響が水和反応の進行によって低下し, 僅かに緑みがあったほぼ無彩色のセメントおよびセメント水和物の影響が大きくなった結果であると推察される。 L^* 値に関しては, 水セメント比が小さく, 脱型時期が遅い試験体ほど値が小さくなっており, 柏木ら⁴⁾が, ウレタン塗装合板を型枠に用いて作製したコンクリート試験体の色調を評価した研究事例と同様の傾向である。

図-4 に各モルタル試験体の光沢度を, 図-5 に 8 度鏡面反射成分の受光の有無による L^* 値の差を SCI 方式による L^* 値で除した値を示す。後者の値は理論的には 8 度鏡面反射率を表す数値である。両者はともに, 水セメント比が小さく脱型時期が遅い試験体において値が大きくなる傾向を示している。明度の測定結果と合わせて考察すると, 鏡面反射成分の大きな試験体ほど目視の印象に近い SCE 方式では明度が小さく, 鏡面反射成分の違いが明度の変動要因の一つになっていることが確認できる。

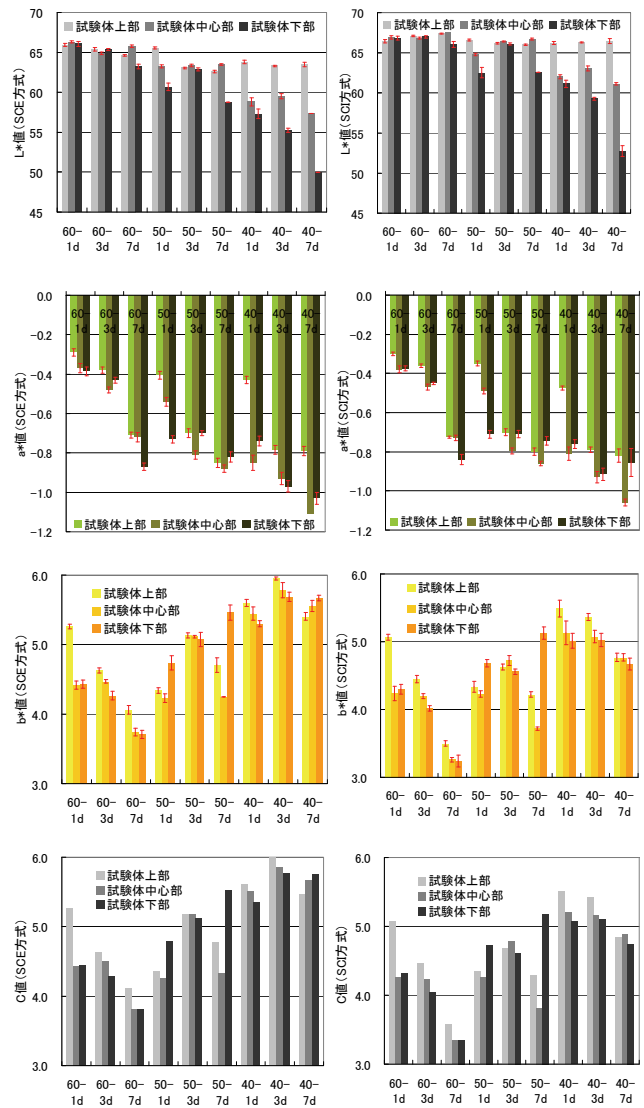


図-3 各試験体の色彩値の収束値

3.3 表面形状の測定結果

図-6 に各試験体の算術平均粗さ $Ra (\mu m)$ を示す。ここで, 算術平均粗さは以下の式(2)によって求められる表面粗さの代表値であり, $x (\mu m)$ は測定長さの座標, $f(x)$ は粗さ曲線を表す関数, $l (\mu m)$ は基準長さである。

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |f(x)| dx \quad \text{式(2)}$$

水セメント比が小さく, 脱型時期が遅いほど算術平均粗さが小さいことから平滑化が進行していることが分かる。また, 図-4 との比較により算術平均粗さ Ra と光沢度とは負の相関関係を持ち, 平滑化にともなう鏡面反射率が増加により拡散反射成分が減少し, 明度の測定値が減少する, といった表面の視覚的な性能値に対する表面形状の影響を把握することが可能である。

また, 図-7 に各試験体の表面形状を示す。これらより,

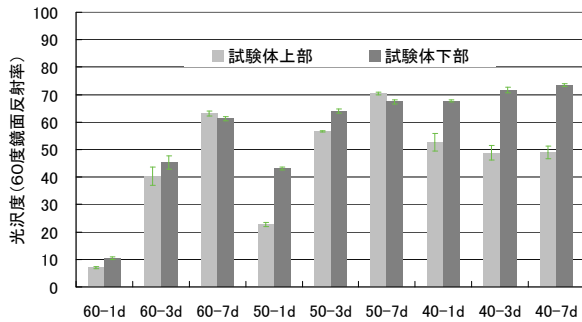


図-4 各試験体の光沢度 (60度鏡面反射率)

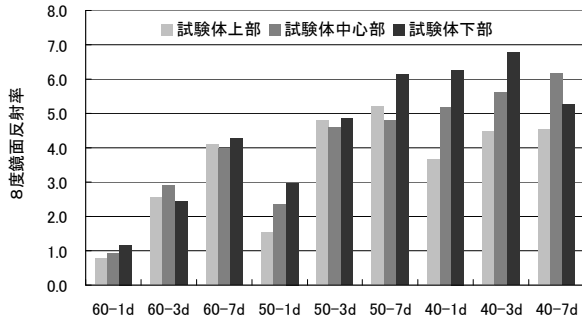


図-5 明度の測定方式による差から求めた8度鏡面反射率

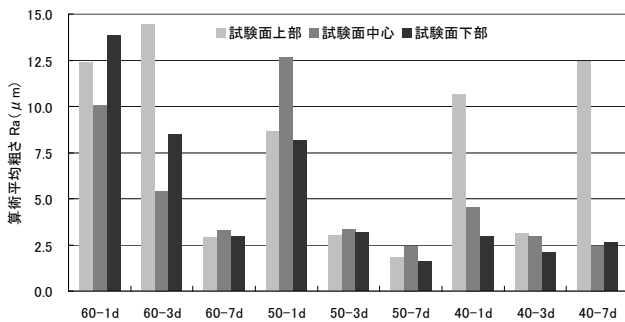


図-6 各試験体の算術平均粗さ

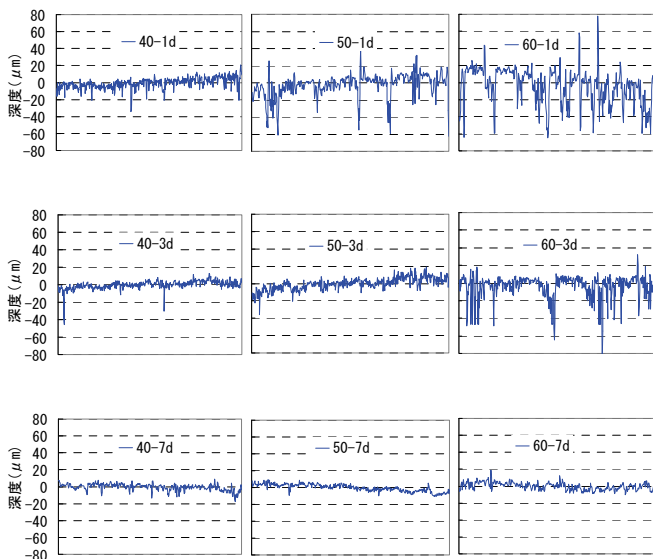


図-7 各試験体の表面形状測定結果

表面形状が平滑化していく過程が直感的に把握できるが、平滑化の過程を特定の数値で表現する手法は算術平均粗さなどの表面粗さの代表値しかなく、表面形状の特徴の一部しか定量的に比較することができない。

表面形状を構成する凹凸はその幅によって表面の視覚的な性能に与える影響が異なると考えられる。次節では表面形状を構成する凹凸の幅に関する情報も含めて詳細に分析するための定量化手法を用いて考察を加えた。

3.4 表面形状波形の特徴量と視覚的な性能に関する考察

(1) 表面形状の分析手法の概要

表面形状 (座標・深度情報の集合) の定量的な情報として凹凸の幅の違いを扱うために表面形状を波形 (周波数・振幅の集合) に見立てて分析および考察を行った。

ここで、正弦波を規定するパラメータは波長・周波数・振幅・位相であり、すべての波は正弦波の集合として表すことができる。このように波を正弦波の集合に変換することをフーリエ変換という。本研究では周波数は 1m のうちに正弦波の山と谷を繰り返す回数と定義し、波長の逆数と等しい。本節では表面形状データをフーリエ変換し、周波数スペクトルを 6 個の周波数帯域に離散化することで水和反応の進行に伴う各周波数帯域の振幅の変化と硬化体表面の視覚的な性能との関係性を検討する。

(2) フーリエ変換による表面形状の定量化手法

表面形状データのフーリエ変換結果から表面形状波形を構成する正弦波の振幅を各周波数別に算出した。この周波数スペクトルを定量的に比較するため、6 つの周波数帯域に分割し、周波数帯域およびその周波数帯域における振幅の総和という離散値によって各試験体の波形の特徴を表現した。ここで、周波数帯域の区分は、最も表面形状が複雑であると考えられる 60-1d のフーリエ変換結果において、各区分の振幅の総和ができるだけ等しくなるように決定し、他の試験体の分析にも同じ周波数区分を適用した。各試験体の表面形状のフーリエ変換結果は、低周波数側ほど試験体間での振幅の違いが大きかったため、このように周波数帯域を決定することで、変化の大きい周波数帯域をより詳細に分析することが可能であると考えられる。図-8 に各試験体の周波数帯域ごとの振幅の総和を、図-9 に脱型時期による各周波数帯域の振幅の総和の推移を水セメント比ごとに示す。尚、図-9 における各プロットは、各周波数帯域における重心の周波数の位置に示しているため、同じ周波数帯域であっても周波数の値が異なっている。

(3) 仮想表面積

ここで、水和反応の進行に伴う緻密化・平滑化によって表面積が小さくなることから、異なる水セメント比の試験体を共通の指標で比較するために、仮想的に表面積に相当する表面形状データの線分の総長を仮想表面積と

定義した。仮想表面積と各試験体の収束状態における蒸発水分率および水分蒸発係数は図-10 のように対応しており、仮想表面積は表面の緻密さを表していると言える。

(4) 水和反応の進行に伴う平滑化過程に関する考察

図-8 からモルタル表面の平滑化過程を、仮想表面積（各グラフに添え字で示す数値）と各周波数帯域の振幅の総和によって、以下のように捉えることができる。

図-8 の上側から下側に向かって各周波数帯域の振幅の総和の変化を段階的に捉えると、仮想表面積約 2500～約 3000 の範囲で定義する第一段階では低周波数帯域の振幅の和の減少が大きく、高周波数帯域ほど減少が小さくなっている。仮想表面積約 1500～約 2500 の範囲で定義する第二段階では、低周波数帯域から高周波数帯域に渡って均等に振幅の総和が減少している。仮想表面積 1290～1500 の範囲では低周波数帯域の振幅の総和が 0-5 μ 程度の微小な値で下限値をとり、高周波数帯域の振幅の減少のみが継続していると考えられる。

このような段階的な変化は、各周波数帯域の振幅が仮想表面積を変数とする関数で表すことができると仮定し、仮想表面積の減少量に対する振幅の減少量の比を振幅の

減少率、振幅の減少率の空間微分を振幅の減少係数と定義するとき、低周波数帯域ほど平滑化初期の振幅の減少率が大きく、高周波数帯域ほど振幅の減少係数が大きいと考えることによって大まかにとらえることができる。

平滑化の第一段階では低周波数帯域ほど振幅の減少率が大きいので振幅の減少が大きく、高周波数帯域の振幅の減少が相対的に小さくなるが、平滑化の第二段階では振幅の減少係数の違いにより、高周波数帯域の振幅の減少率が低周波数帯域の振幅の減少率に近づくため、各周波数帯域で均等に振幅の和が減少する状態となる。その後、各周波数帯域の振幅の総和は下限値に達するまで振幅の減少率を増しながら同様の変化をする。

各段階・各周波数帯域で振幅の減少率および振幅の減少係数がどのように決定されるかについて、更なる検討が必要ではあるが、水和反応の進行に伴う各周波数帯域の振幅の変化を求めることにより、平滑化の各段階における表面凹凸の変化を波長別に把握することが可能であり、将来的に水和反応条件による表面形状の変化をモデル化する上でも有用な知見を得ることができた。

図-11 に仮想表面積、水分蒸発係数をそれぞれ横軸と

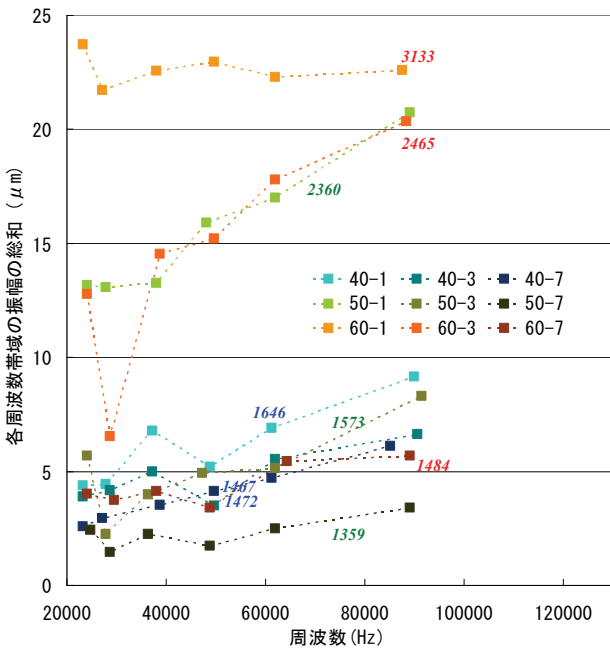


図-8 各周波数帯域の振幅の総和(添え字は仮想表面積)

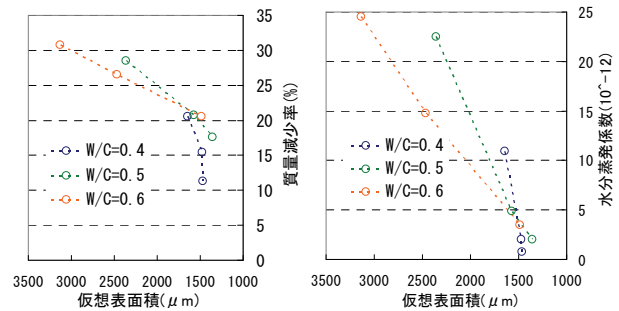


図-10 仮想表面積と蒸発水分率および水分蒸発係数の関係

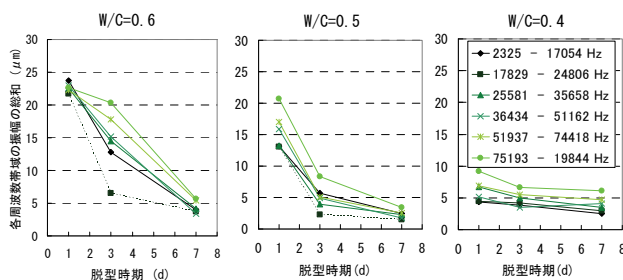


図-9 脱型時期の違いによる各周波数帯域の振幅の推移

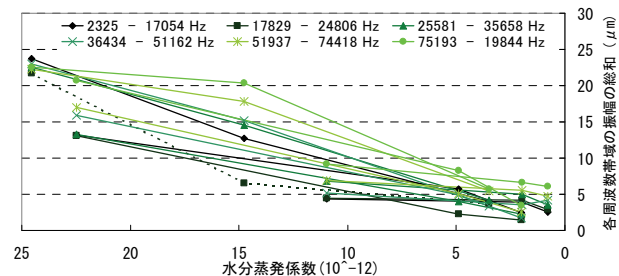
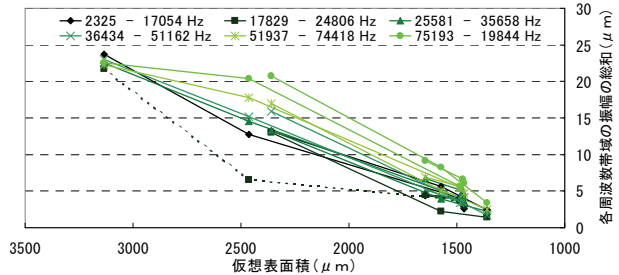


図-11 平滑化の進行に伴う各周波数帯域の振幅の総和の変化

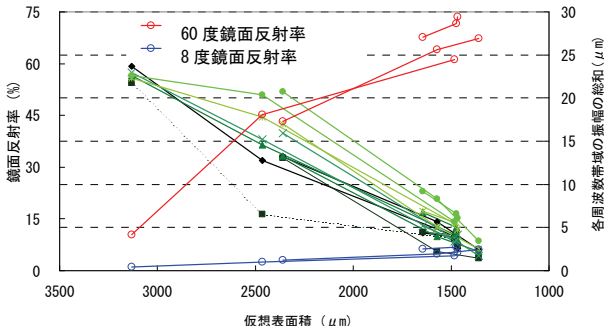


図-12 鏡面光沢度と各周波数帯域の振幅変化の関係

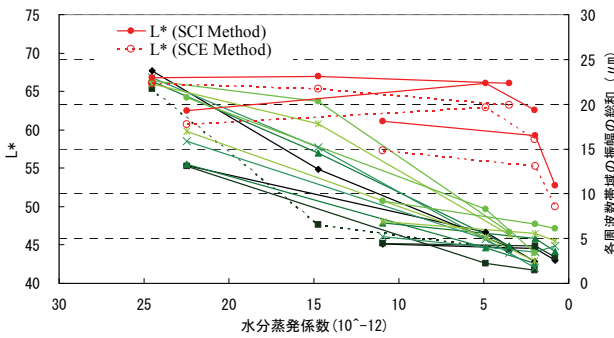


図-13 明度と各周波数帯域の振幅変化の関係

して各周波数帯域の振幅の総和の推移を示す。図-11 のように横軸を仮想表面積に統一して比較することで、低周波数帯域の振幅の総和は仮想表面積に対して一定の割合で減少しているのに対し、高周波帯域の振幅の総和は仮想表面積の減少に対して加速度的に減少している様子を確認できる。また、図-10 において仮想表面積と水分蒸発係数が直線的に対応していることから、図-11 の水分蒸発係数を横軸としたグラフからも同様の傾向を読み取ることができる。

(5) 平滑化と視覚的な性能の対応関係に関する考察

図-12 に仮想表面積に対応する各周波数帯域の振幅の和および60度鏡面反射率、8度鏡面反射率を合わせて示す。60度鏡面反射率が平滑化過程初期に大きくその値が変化している点を除いて考えると、8度鏡面反射率、60度鏡面反射率ともに仮想表面積の減少に対して一定の割合で上昇しており、加速度的な変化は認められないことから、前述の周波数帯域別の振幅の段階的な変化を考慮すると、光沢度に関しては、高周波帯域の平滑化の寄与は少なく、平滑化初期から一定の割合で進行する低周波帯域の平滑化が支配的であることが分かる。

一方で、図-13 に示されるように、水分蒸発係数に対応する各周波数帯域の振幅の和および明度 L* 値との関係は、平滑化の初期段階における明度の変化が僅かであるのに対し、平滑化の後期段階における明度低下が著しい。このことから、明度に関しては平滑化の後期に加速

度的に進行する高周波数帯域の平滑化が支配的であることが分かる。

4. まとめ

本研究では、水セメント比および脱型時期の異なるモルタル試験体の表面形状および表面の視覚的な性能値を測定し、平滑化の過程を詳細に分析することにより、以下の項目を明らかにした。

- 表面形状データのフーリエ変換および各周波数帯域への離散化によって、表面形状データが含む波長と振幅の特徴量を残しながら、異なる表面形状の定量的な比較が可能である
- 水和反応の進行に伴う平滑化初期においては、低周波数帯域の平滑化が卓越しており、平滑化の進行に従って高周波数帯域の平滑化が仮想表面積の減少に対して加速度的に進行する
- 型枠内での水和反応の進行に伴って低周波数帯域の凹凸が平滑化すると光沢度が上昇し、その後高周波数帯域の凹凸の平滑化に伴って明度が減少していることから、光沢度の上昇、明度の減少にはそれぞれ低周波数帯域、高周波数帯域の凹凸の平滑化が支配的に影響していると考えられる

参考文献

- 1) 中田義久, 大塚秀三: 設計者と施工者で共有すべき施工計画, 建築技術 2007 年 10 月号, No.693, pp.102-105, 2007
- 2) 住吉宏, 徳田和雄: 普通セメントの色が硬化コンクリートの色に与える影響, セメント技術年報, No.33, pp.268-271, 1979
- 3) 杉田俊也, 仕入豊和: コンクリートの色むら制御に関する研究—材料・調合・養生条件がコンクリートの色に及ぼす影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.191-192, 1993
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 劉靈芝, 榊田佳寛, 小西敏正: 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
- 7) B. Ellis and M. S. Found, 'The effects of water absorption on a polyester/ chopped strand mat laminate', Composite, 14, 237, 19