論文　木調外観を有するコンクリートの表面色に関する研究

寺本　篤史[*1]・依田　侑也[*2]・黒田　泰弘[*1]

要旨：木製の型枠を使用した場合にコンクリートの表面色が木調色（b*＝黄色成分が大きい）となる現象に着目し，この現象の原因，制御方法について実験的検討を実施した。その結果，b*の大きい表面色を得るには，結合材として中庸熱ポルトランドセメントを避け，細骨材として石灰砕砂を使用したほうがよいこと。また，木製型枠からコンクリート表面に有機物が含浸することによってb*が大幅に増大すること。有機物の候補の一つにタンニン酸が挙げられ，4～7%のタンニン酸水溶液をコンクリート表面に塗布することによって，木製型枠を使用した場合のコンクリート表面色を再現することが可能であることが明らかになった。

キーワード：表面色，セメント種類，細骨材種類，スギ，タンニン酸

1. はじめに

コンクリートの打放し仕上げは構造材料の力強さや素材感を表現することが可能であり，高い意匠性を有している。しかしながら表面コンクリートの質感は，施工段階では調合条件や施工の影響を受け，長期的な使用に際しては，黒カビ，錆汁等の汚れ，乾燥収縮ひび割れ等によって設計者の意図とは異なる仕上りになる場合がある。

近年，打放し仕上げの一つに，スギ板などの木製型枠を使用してコンクリートに木目や木調色を転写する仕様が増加傾向にあるが，これらの有機的な質感については，特に学術的な知見が少なく，再現性については作業員の経験に頼る部分が大きい。

本検討では，コンクリート打放し仕上げの表面色に着目し，コンクリート表面が木調色となりやすい母材コンクリートの調合の検討や，木調色の転写機構，制御方法について検討を行う。

2. コンクリートの色相に及ぼす調合の影響

材料がコンクリートの表面色に及ぼす影響は，粒径が小さいものの方が大きく，粗骨材はその影響度合いが比較的小さい[1)]。石灰砕石等の微粉付着量が大きい粗骨材ではその限りではないと推察されるが，本検討ではコンクリートの構成要素のうち，セメントペースト部分と細骨材に着目して実験的検討を行った。

2.1 実験概要

本実験では，平滑な底面を有するφ100mm程度のプラスチックケースに，セメントペーストもしくはモルタルを打設し，脱型後の試験体底面の色相変化を色彩色差計（KONICA MINOLTA製CR-410CIE，測定径：φ50mm）で得られる1976色空間のL*, a*, b*によって評価した。測定は重複領域を含む3か所で実施し，測定値としては3か所の平均値を用いた。ただし，a*は本実験の色相にほとんど寄与しなかったため以下の議論では省略した。

(1) セメント種類及び水セメント比の影響

セメント種類及び水セメント比をパラメータとし，セメントペーストの色相変化を得た。使用したセメント種類及び水セメント比を**表－１**に示す。

表－１　セメントペーストの試験水準

使用セメント種類	記号	水セメント比（%）
普通ポルトランドセメント	N	30，40，50，60
中庸熱ポルトランドセメント	M	30
低熱ポルトランドセメント	L	30
早強ポルトランドセメント	H	30
高炉セメントB種	BB	30
シリカフュームプレミックスセメント	SFPC	30

普通ポルトランドセメントについては水セメント比の影響を確認するため30%から60%の4水準を設けた。また，その他のセメント種類については，セメントの影響が顕著にみられ，かつブリージングの影響が小さい調合として水セメント比30%を選択した。

(2) 細骨材種類及び量の影響

モルタル試験体の色相測定に関しては，普通ポルトランドセメントを使用して，細骨材の種類及び量をパラメータとした。この際，水セメント比は50%に固定した。

表－２　モルタルの試験水準

使用骨材種類	記号	砂セメント比
君津市産山砂	山	1:0.5，1:1，1:1.5，1:2
吾川郡産石灰砕砂	石	1:0.5，1:1，1:1.5，1:2
八王子市産硬質砂岩砕砂	硬	1:2
海砂	海	1:2
珪砂	珪	1:2

*1 清水建設　技術研究所構造生産技術センター　博士（工学）　(正会員)
*2 清水建設　技術研究所構造生産技術センター　修士（工学）　(正会員)

使用した細骨材の種類は，鉱物組成及び粒径が異なるであろう 5 種類を用意し，君津市産山砂と吾川郡産石灰砕砂については，細骨材量の影響を確認するため，砂セメント比の異なる 4 水準をそれぞれ設けた。それぞれの水準を**表－２**に示す。

試験体は打設直後から 20℃封緘養生を行い，材齢 3 日で脱型，その後測定面である底面を上面にして，20℃・60%の恒温恒湿室で養生を行った。その後，測定材齢において色相測定，写真撮影を行った。

測定材齢は，セメントペースト試験体では，材齢 3, 4, 5，14，28，91 日とし，91 日経過後に，表乾状態及び，絶乾状態の色相を得た。各状態を得るために，それぞれ 24 時間以上の水中養生及び，105℃乾燥を実施した。モルタル試験体では材齢3日，及び91日に測定を実施した。

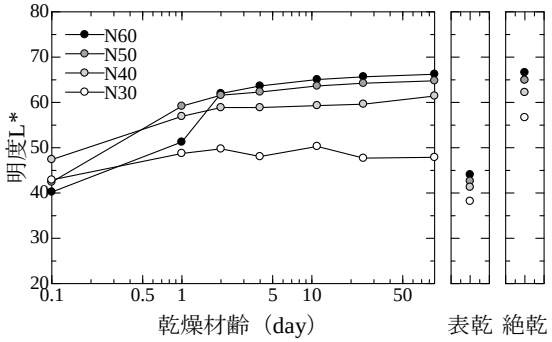
2.2 実験結果及び考察

(1) セメント種類及び水セメント比の影響

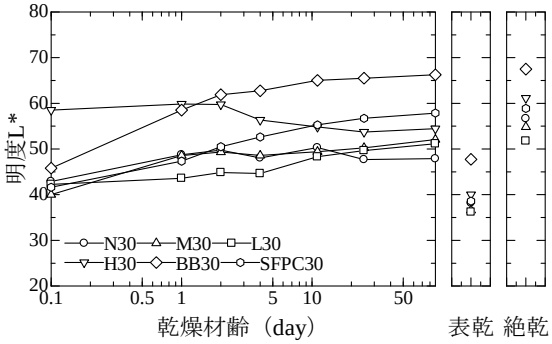
図－１，**図－２**に脱型以降の材齢（乾燥材齢）による各セメントペーストの L*＝明度の変化を示す。また**図－３**には，乾燥による L*の変化を水セメント比毎に示した。

従来の知見の通り，H30 を除きセメントペーストは乾燥に伴い L*が上昇することがわかる。その速度及び終局値は調合によって異なるが，本実験の条件では，脱型直後から数日の間で急激に変化し，材齢 14 日で定常状態となっている調合が多い。

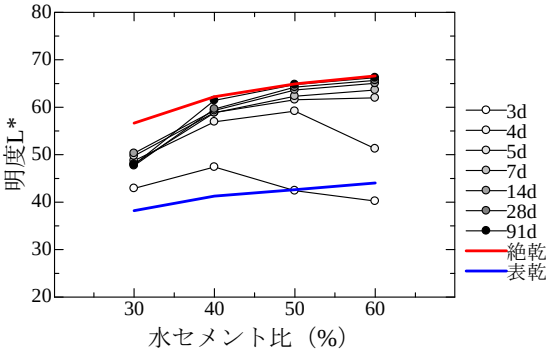
また，**図－３**によると，各試験体の L*は，水和の進行や乾燥によって変化していくものの，十分に硬化した状態の絶乾時と表乾時の間で概ね推移していることから，L*は乾燥の程度から概ね予測可能であるといえる。



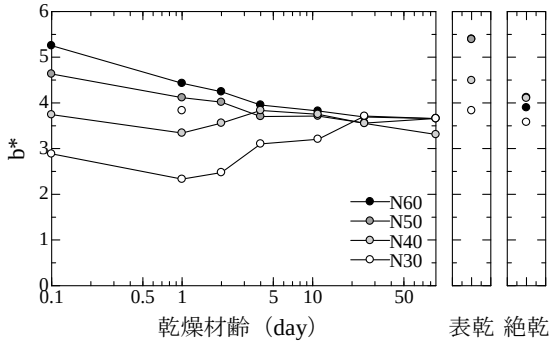
図－１　普通ポルトランドセメントペーストの乾燥による L*の変化



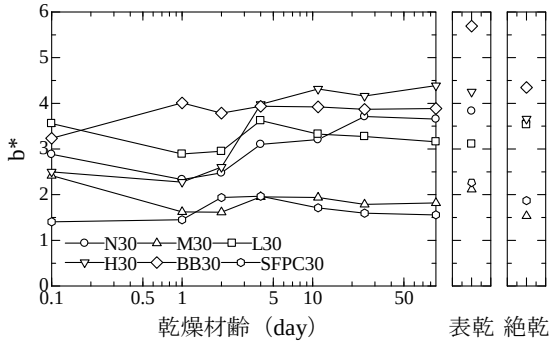
図－２　各種セメントペーストの乾燥による L*の変化



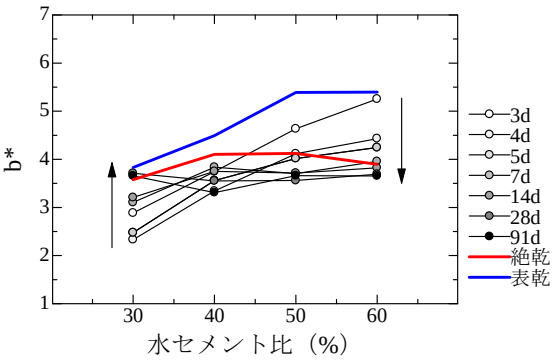
図－３　普通ポルトランドセメントペーストの乾燥による L*の変化に及ぼす水セメント比の影響



図－４　普通ポルトランドセメントペーストの乾燥による b*の変化



図－５　各種セメントペーストの乾燥による b*の変化



図－６　普通ポルトランドセメントペーストの乾燥による b*の変化に及ぼす水セメント比の影響

次に，本実験で測定したセメントペースト試験体の b*の変化を**図－４**及び**図－５**にそれぞれ示す。b*は，正の値が黄色成分，負の値が青色成分を意味している。次章で述べる木調色のコンクリートは，b*が大きいことに特徴があるため，通常のセメントペーストで調合及び養生が b*の変化に及ぼす影響を把握することが，木調色のコンクリートの表面色制御にとって重要と考えられる。

図－４に示されるように，b*の変化の傾向は水セメント比によって大きく異なる。つまり，高水セメント比のものは，高い値から一様に減少傾向を示し 3.6～3.9 程度に収束しているのに対し，N30, N40 のように低水セメント比では，脱型直後からいったん減少した後，乾燥材齢 1 日以降増加し，材齢 91 日で 3.8 を示している。

既往の研究[2] において，コンクリートの彩度は材齢の経過に伴い減少するとの報告があるが，本実験の範囲内では，水セメント比によってはこの通りではないことが明らかになった。一方，硬化後の試験体で表乾時と絶乾時の b*を比較すると，いずれの水セメント比でも表乾時＞絶乾時となっており，この結果は同一の水和状態であれば乾燥によって b*が低下することを示唆している。

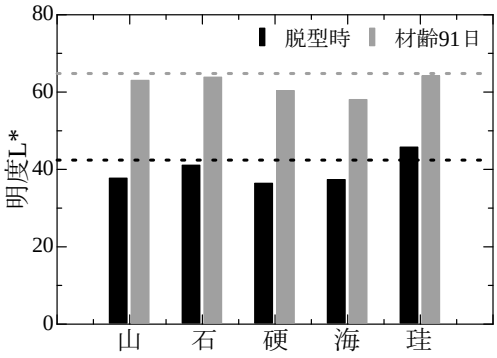
図－６は，水セメント比による b*の変化を材齢ごとにプロットしたものであるが，上述のように，高水セメント比と低水セメント比ではその変化の傾向が異なり，低水セメント比では材齢の経過に伴い増加を，高水セメント比では減少を示しているものの，材齢 91 日時点あるいは絶乾時には，概ね同程度の b*をとることが確認される。また，**図－３**の L*と異なり，気乾養生状態の b*は，必ずしも表乾時と絶乾時の間の値をとるとは限らない。これは，b*が乾燥の影響のみならず，水和反応や中性化の影響を受けることを示唆するものである。

図－５において水セメント比 30%の各種セメントペーストを見ると，セメント種類によって b*の初期値，終局値に差異があり，ともに広範の値をとることが確認できる。特に，早強ポルトランドセメントや，高炉セメント B 種では，比較的大きい b*をとり，中庸熱ポルトランドセメント，シリカフュームプレミックスセメントでは 2 程度と小さい b*を示している。

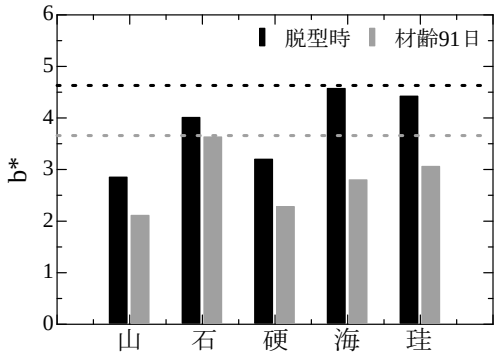
(2) 細骨材種類及び量の影響

コンクリート表面色に及ぼす細骨材種類の影響を確認するため，脱型直後及び，材齢 91 日（乾燥材齢 88 日）におけるモルタルの L*及び b*を**図－７**, **図－８**に示す。細骨材量は C:S＝1：2 である。図には参考として，母材セメントペーストである N50 の脱型時及び材齢 91 日における L*を点線で示した。

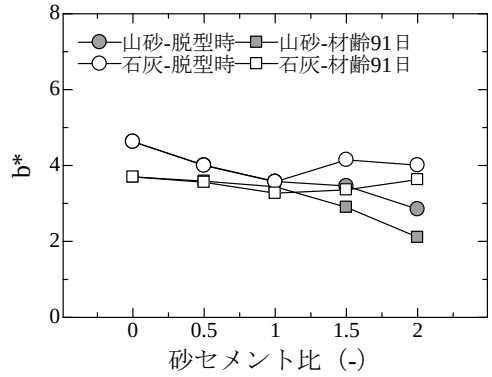
母材セメントペーストの L*と比較して，各種モルタルの L*は一部を除き，やや小さい値となっている。モルタルの L*は，細骨材の L*と線形の相関関係があるとの報告[3] があるが，本実験では，細骨材の色相を得ていないため，厳密な考察はできていない。



図－７　モルタルの L*に及ぼす細骨材種類の影響



図－８　モルタルの b*に及ぼす細骨材種類の影響



図－９　モルタル中の砂セメント比が b*に及ぼす影響

次に，**図－８**に示す b*をみると，b*の測定値は細骨材種類によって大きく異なり，特に山砂と硬質砂岩砕砂では脱型時から b*の低下がみられる。また，海砂や珪砂といった粒径の小さい細骨材では，脱型時の b*はセメントペーストとほとんど変わらないが，材齢 91 日時点では b*が減少している。反対に，石灰砕砂は長期にわたり比較的高い b*を保持しており，石灰砕砂を使用することで長期的に b*の高いモルタルを生産可能であるといえる。

次に，山砂と石灰砕砂の量が b*に及ぼす影響を比較したものが**図－９**である。図より砂セメント比 1 以上の領域で，山砂を使用した場合に細骨材量の増加に伴って b*が減少するのに対して，石灰砕砂を使用したモルタルの

b*は細骨材量の影響を受けにくく，いずれの細骨材量でも概ね同程度の b*を保持している。

以上の知見から，b*の高いコンクリートを製造するための調合として，中庸熱ポルトランドセメントの使用を避け，細骨材に石灰砕砂を使用すること，水セメント比は長期的には特に選ばないといった条件が考えられた。

3. コンクリート表面色に及ぼす木製型枠の影響

既往の研究[3)]において，スギ，マツ，ラワン等の木製材料を型枠として使用した場合に，型枠に接するモルタル表面の L*は低下し, b*が大きく増加することが報告されている。この影響は型枠存置期間が長いほど大きくなり，木製型枠とモルタルとの間で何らかの相互作用が働くことが推察される。しかしながら，コンクリート表面色に及ぼす木製型枠の影響に関する既往の研究は極めて少なく，変色機構も明らかではない。本章では，変色機構を示し人工的に木調色を再現する方法を提案することを目的として，以下に示す各種分析を実施した。

3.1 実験概要

(1) 試験体の製作及び測色

本実験では木製型枠の材料としてスギを使用した。100mm×300mm のスギ板を 4 枚を組み上げたもの（400mm×300mm）を型枠の底面としてセメントペーストを打設した。打設後，材齢 3 日で脱型し，脱型後すぐに色彩色差計によって型枠に接するセメントペーストの L*, a*, b*を測定した。スギ板のように木目が転写されるセメントペースト表面は，場所により色相にばらつきがみられるため，測定値としては 12 点の平均値を用いた。

(2) 変色領域の観測

型枠に接するセメントペースト部分を精密カッターによって切断し, 断面方向を電子顕微鏡によって観察した。電子顕微鏡は日本電子製 JXA8600S を使用した。

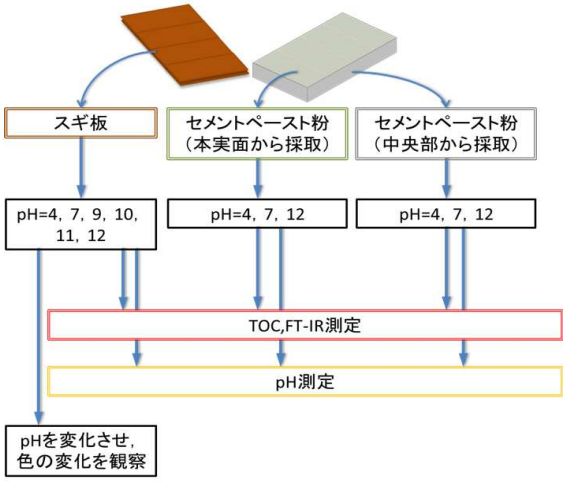
(3) 含浸物質に関する分析手順

セメントペーストの変色部分に含まれる物質を特定するため，木製型枠を用いて成形した試験体で，スギ板に接する変色したセメントペーストと化粧合板に接する変色していないセメントペーストを削りだし酸アルカリ水溶液抽出実験に供した。

また，型枠に使用したスギ板に含まれる成分を調査するため，同種のスギ板を用意し，併せて抽出実験を実施した。分析の手順を**図－10** 及び**表－３**に，分析の詳細を以下に示す。

① セメントペーストの酸アルカリ水溶液抽出実験

図－10 上部の模式図に示すような，スギ板に接する変色したセメントペーストと側面中央部の変色していないセメントペーストから削り出したそれぞれの粉末を使用して，酸アルカリ水溶液抽出実験を行った。抽出物質は



図－10 分析フロー

表－３ 分析手順

	手順	節
①	スギ板に接する面から採取したセメントペースト粉を各 pH の溶媒へ浸漬	3.1 (3)-①
②	スギ板に接しない面から採取したセメントペースト粉を各 pH の溶媒へ浸漬	3.1 (3)-①
③	スギ板を各 pH の溶媒へ浸漬	3.1 (3)-②
④	①，②の各溶液について TOC を測定	3.1 (4)
⑤	スギ板から抽出した溶液について，pH が変化した場合の溶液の色変化の可逆性を確認	3.1 (3)-②

pH により異なると考えられるため, 酸アルカリ水溶液には, 純水に硫酸および水酸化カルシウム溶液を用いて pH が、4, 7, 12 になるように調整したものを用いた。

抽出は JIS K 0058-1 の試験法を参考に，試料と酸アルカリ水溶液を重量体積比 1：10 で混合し 6 時間振とうした。抽出後，懸濁液を 2000rpm で 10 分間遠心分離し上澄み液をフィルター（0.45μm）でろ過した。ろ液の pH と吸光度の波長スキャンを，それぞれ pH 電極と分光分析装置で測定した。

② スギ板の酸アルカリ水溶液抽出実験

各 pH に調整した酸アルカリ水溶液によってスギ板の酸アルカリ水溶液抽出実験を行った。酸アルカリ水溶液に浸漬するスギ板は 20×80×13 mm のサイズに成形し抽出に供した。酸アルカリ水溶液には pH が 4, 7, 9, 10, 11, 12 になるように調整したものを用いた。

抽出実験は、試験片木材と酸アルカリ水溶液 250mL をポリプロピレン製容器に入れ 1 週間浸漬した。浸漬期間中は試験片木材が水溶液に浮いてしまうため 1 日おきに容器を反転した。実験後の抽出液はフィルター (0.45μm) で吸引ろ過し，ろ液の pH と吸光度の波長スキャンを，それぞれ pH 電極と分光分析装置で測定した。

pH12 のアルカリ溶液から得られた抽出溶液については，濃い褐色を呈していたため，硫酸によって pH を低下させ，その際に生じる色の変化を観察した。

(4) セメントペースト粉に含まれる全有機炭素

3.1 (1) - ①で得られたセメントペースト粉末からの抽出溶液を使用し，全有機炭素量（TOC）計によって TOC の測定を実施した。

3.2 実験結果及び考察

(1) セメントペーストの変色領域

スギ板に接するセメントペーストの L*, a*, b*の測定結果及び2章の N50 脱型時の L*, a*, b*を**表－4** に示す。

既往の研究のとおり，セメントペーストがスギ板に接触した面では，セメントペーストの L*が低下し，b*が大幅に増加していることがわかる。一方で，同一試験体の中で，ウレタン塗装を施した化粧合板に触れている面のセメントペースト表面色は，2 章の N50 とほぼ同様であり，スギ板に直接接する部分でセメントペーストが変色することが再確認された。

変色領域の深さを確認するため，表層近傍の断面を電子顕微鏡（SEM）によって観察した。**図－11** はスギ板に接するセメントペーストの表層断面の反射電子像であるが，表層から約 400μ の範囲とそれ以上の範囲で濃淡に差異があることがわかる。

SEM の反射電子像は，原子番号の大きい元素ほど明るく，原子番号が小さい元素ほど暗く映る。写真をみると，表層からの距離によって元素濃度が異なり，表層に近い部分で小さい元素濃度となっていることが確認される。

この元素濃度の相違に関して，元素マッピングをみると，表層部には炭素原子が多く分布しておりカルシウム原子が少ないことが確認された。カルシウム原子はセメント由来のものと思われるが，表層部で炭素濃度が増大する原因としては，型枠からの炭素の供給，もしくは気中の二酸化炭素による中性化の可能性が考えられた。

次に，スギ板に接するセメントペーストと，化粧合板に接する側面中央部のセメントペーストの抽出溶液から得られた TOC の測定結果を**図-12** に示す。

図から，いずれの pH で抽出した場合においても，変色したセメントペーストは，変色していない部分と比較して 5 倍程度の TOC が確認された。

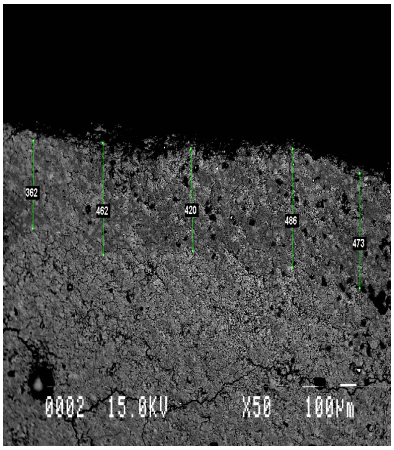
両サンプルはいずれも同程度空気中にさらされていたことを考慮すると，この TOC の差は中性化によるものではなく，スギ板から移動した有機物によるものであると推察される。

(2) セメントペーストを変色させる物質の推定

セメントペーストの変色した部分とそうでない部分の各部位から得られたセメントペースト粉末を pH12 の溶液で抽出した試料について，蒸留水で 100 倍希釈し，分光分析で得られた吸光度スペクトルの結果が**図－13** である。図のように各抽出溶液について明確な差は見られず，セメントペースト粉末から抽出された溶液では，

表－4　スギ板面の色相

	N50（脱型時）	スギ板面
L*	64.8	51.2
a*	-0.2	-0.2
b*	3.7	9.3



図－11　スギ板面の断面表層の SEM 画像

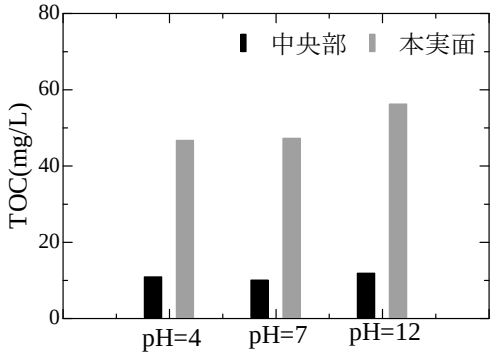


図-12　セメントペースト粉末に含まれる TOC

着色物質の特定は不可能であった。この傾向は他の pH についても同様の結果であった。

セメントペースト粉末から，着色物質を特定することができなかったため，各 pH のときにスギ板から抽出される物質の特定を模索した。抽出物質は pH により異なると考えられるため，pH4, 7, 9, 10, 11, 12 の場合について抽出を行い，そのうち，pH4, 7, 12 の抽出溶液から得られた吸光度スペクトルの結果が**図－14** である。

図から pH4，pH7 で抽出した溶液の吸光度は，波長 270nm でピークを有することが確認できる。また，pH12 の抽出溶液ではこの波長のピークが小さくなり，新たに波長 320nm の吸光度が増加している。これらの特徴的な波形を持つ物質の一つにタンニン酸があり[4)]，この抽出溶液にはタンニン酸が含まれる可能性が考えられた。

また，スギ板を酸アルカリ水溶液で抽出した溶液の色に着目すると，抽出溶液の pH が大きいほど濃い褐色を有していた。抽出後の pH12 の抽出溶液に硫酸を加え，pH を低下させると抽出溶液の色は淡化した。この呈色反

応は可逆的であった。

以上の結果から，スギ板からセメントペーストに含浸した有機物が，セメントペースト中の高アルカリ環境で呈色しセメントペーストを変色させる可能性が示された。

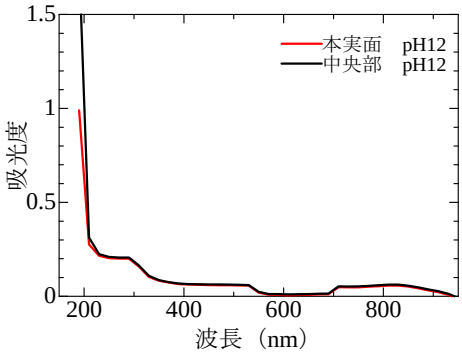
4. 木調色の再現方法

3 章の検討において，コンクリート表面色が木調色となる原因に関しては，スギ板から有機物が移動することによって生じる可能性が示された。また，その有機物の一つとしてタンニン酸の存在が考えられた。しかしながら，スギ等の木材には多種多様の有機物が含まれており，例えばリグニンは，比較的濃い茶褐色を示し色に与える影響が大きく，少量であってもセメントペーストの表面色を変色させる可能性がある。また，これ以外の有機物であってもセメントペーストの変色に関係している可能性は否定できない。

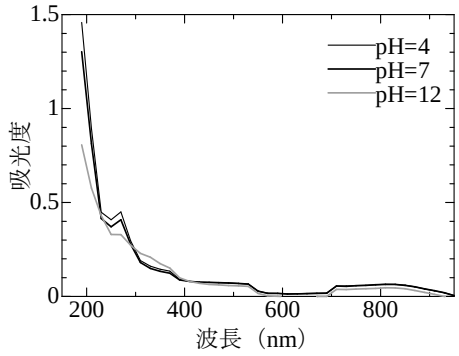
本章では，上記有機物の代表としてタンニン酸の試薬を使用して人工的に木調色のコンクリート表面を再現することを試みた。試薬には加水分解型タンニン酸（和光純薬工業製）を使用し，0～10wt%水溶液を作成し，N50 のセメントペースト試験体に塗布した。各濃度のタンニン酸水溶液を塗布した後のセメントペースト表面色を色差計によって測定した。

図-15 に，各濃度のタンニン酸水溶液を塗付した各場所におけるセメントペースト表面の b*を示した。

図から，塗布するタンニンの濃度が増加するほど b*が増大することが確認された。**表－4** のように，スギ板型枠によって着色したコンクリートの b*は 9.3 であり，この値を再現するためには，3~7%程度の濃度のタンニン水溶液を塗付すればよいことが明らかになった。



図－13　セメントペースト粉末抽出溶液の吸光度



図－14　スギ板抽出溶液の吸光度

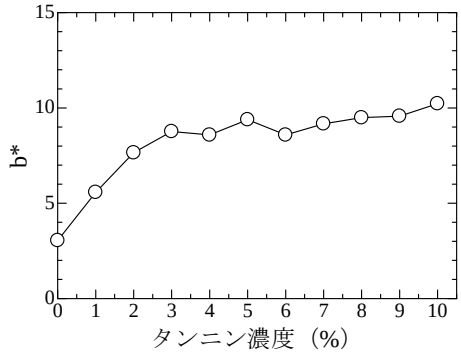


図-15　各濃度のタンニン酸水溶液塗布による セメントペースト表面色の b*の変化

5. まとめ

本研究では，コンクリートの表面色，特に木製型枠と接する面で，木調色に着色される現象に着目して，各種実験的検討を実施した。以下に得られた結論を示す。

(1) セメントペーストの表面色の L*は，調合の影響を受けるが，硬化後の絶乾時と表乾時における L*の値から概ねその L*変化の範囲を知ることができる。

(2) セメントペーストの表面色の b*は，調合によって，傾向が大きく異なり，特に，中庸熱ポルトランドセメントを使用した場合に，低い b*を取る。

(3) 細骨材種類が表面色に及ぼす影響は，L*については比較的小さいが，b*に及ぼす影響は大きく，石灰砕砂を使用することで長期的に高い b*を保つことができる。

(4) 木製型枠に接するセメントペーストの表層は木調色に着色され，この原因は 400μ 程度の深さまで含浸する有機物によるものと推察された。

(5) タンニン酸水溶液を塗布することで，コンクリート表面色の b*を木調色に制御することが可能であった。

参考文献

1) 劉　霊芝，桝田佳寛，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

2) コンクリートの色，ユニオンセメント株式会社，p.10

3) 沢　潤治，山本順一郎，橋本頌造：セメントモルタルの色について，セメント技術年報，XVIII，pp.149-153,1964

4) 荒木　峻，益子洋一郎　訳：有機化合物のスペクトルによる同定法　第 3 版，東京化学同人