

論文 コンクリート表面の色むら発生に及ぼす要因に関する実験的検討

温品 達也*1・渡邊 賢三*2・坂田 昇*3・柳井 修司*4

要旨: コンクリート表面の色むら発生に関する実験的検討を実施した。実構造物に散見される、長期的に残留する色むらの再現と発生要因を特定するために、配合、施工方法、環境条件を要因とした室内実験を実施した。その結果、本論文で検討した実験条件では、脱型直後にのみ確認できる色むらの発生要因が見出されたものの、この色むらは経時的に消失し、実構造物に見られる色むらとは異なることが分かった。さらに、長期的に残る色むらの発生は水や剥離剤の存在が影響している可能性を示した。

キーワード: 色むら, 表層品質, ブリーディング, 締固め方法, 色彩色差

1. はじめに

近年、コンクリートの耐久性確保のため、コンクリート構造物の表層品質向上に注目が集まっている。構造物の表層に相当するかぶり部は、劣化因子が最初に浸透する部分である一方で、打ち込んだコンクリートが材料分離しやすい箇所であることから、耐久性の観点から最も重要で施工の難しい部位である。かぶり部の品質を向上させるためには、施工の良し悪しを踏まえ、その品質を合理的に評価し、有効な手段を講じていくことが重要である¹⁾。

コンクリート構造物の品質は、豆板、コールドジョイント等の初期欠陥に加え、表面気泡、砂すじ、沈みひび割れなどを起因として経年劣化によって低下する。耐久性の高い構造物を構築するためには、これらの欠陥等を未然に防ぐ必要がある。一方、コンクリートの耐久性に直接的な影響はないと考えられるものの、その美観に関わるものとしてコンクリート表面の「色むら」が挙げられる。実構造物における色むらは、脱型後徐々に消失していく場合もあるものの、写真-1に示すように、長期間経過しても確認できる場合も散見される。この色むらについては、様々な研究が行われているが、その発生要因は明らかにされておらず有効な制御方法が確立されていないのが現状である。筆者らは、構造物の美観に関わるコンクリート表面の見映えは、コンクリート技術者が目指す一つの目標であると考え、その第一歩として長期間

経過しても残る色むらの抑制技術を探索している。

本論文においては、どのような要因が色むらの発生に影響を与えるのかを検討するため、実構造物に発生する色むらを実験的に再現することを試みた結果について報告する。

2. 要素供試体を用いた実験的検討

2.1 実験目的

実構造物に発生する色むらを室内実験において再現し、コンクリートの配合や施工方法が色むらの発生に及ぼす影響を明らかにするために、コンクリートのブリーディング量や締固め方法等、種々の項目を要因として、要素供試体を作製し、その供試体表面の色むら进行评估した。

2.2 実験概要

(1) 供試体概要

要素供試体は、φ150×300mmの円柱供試体とし、各要因において3体ずつ作製した。打込み方法は2層打ち(150mm/層)とし、1層目を打ち込み、所定の打重ね時間間隔の後に2層目を打ち込んだ。打込み後、直ちに上面を封かんし、所定の材齢が経過した後に脱型し、その後は20℃、60%RHの室内にて静置した。

(2) 実験要因

本実験において着目した各要因を表-1に示す。コンクリートの配合を表-2に、使用材料を表-3に示す。

「ブリーディング量」については、コンクリートのブリーディング量が色むら発生に与える影響を検討するため、ブリーディング大および小の2種類の配合を用いた。それぞれの配合のブリーディング量をJIS A 1123に準拠して測定したところ、ブリーディング大は0.37cm³/cm²、ブリーディング小は0.12cm³/cm²であった。なお、ブリーディング量以外の検討要因については、ブリーディング小の配合を用いた。



写真-1 コンクリート構造物に生じた色むら

*1	鹿島建設株式会社	技術研究所	土木材料グループ	研究員	修士(工学) (正会員)
*2	鹿島建設株式会社	技術研究所	土木材料グループ	主任研究員	博士(工学) (正会員)
*3	鹿島建設株式会社	土木管理本部	土木技術部	土木技術部長	博士(工学) (正会員)
*4	鹿島建設株式会社	技術研究所	土木材料グループ	上席研究員	修士(工学) (正会員)

「締固め程度」については、既往の研究によれば締固め時間が長いほど色むらの程度は小さくなるとの報告もあるが²⁾、土木学会コンクリート標準示方書[施工編]に記載されている時間以上の過剰な締固めを実施した場合には、色むらの程度が大きくなると考えた。そこで、締固め程度の要因は JIS A 1132 に準拠した締固め方法、内部振動機による過剰な締固め方法の 2 種類とした。

「滴下水量」とは、一層目を打ち込んだ後 2 層目を打込む直前に打重ね面に水を滴下した水量を指す。これによって、層打ちの際に下層(1層目)の上面に溜まったブリーディング水がコンクリートの色むらに与える影響について検討を試みた。なお、滴下水量 88ml とは、ブリーディング量 $0.5\text{cm}^3/\text{cm}^2$ に相当する。

「作用圧力」については、鋼製型枠に打ち込んだ供試体をビニル袋に入れて水槽に沈め、水槽内を加圧することによって検討した。 $0.2\text{N}/\text{mm}^2$ は、打上り高さ約 9m の側圧に相当する。

「型枠温度」については、鋼製型枠を 60°C の加温炉で熱し、打込み後は 20°C で養生した。 60°C の加温は、夏期に鋼製の型枠が直射日光によって熱せられた場合を想定した。

「型枠内面の汚れ」については、1 層目を打ち込んだ後、2 層目の型枠内面をモルタルによって汚し 2 時間静置してから 2 層目を打ち込んだ。これは、打込み時に型枠に付着したモルタルを清掃しないで打ち込むことを模擬した。

(3) 測定項目

脱型後から経時的に外観を写真撮影することによって、各要因がコンクリートの色むらに与える影響を確認した。撮影は 20°C 、60%RH の室内にて供試体から 1.5m 離れた距離から実施し、撮影時期は脱型直後、脱型から 1.5 時間、4 時間、7 日、14 日、21 日(材齢 28 日に相当)において実施した。

2.3 実験結果

表-4 に本検討に用いたコンクリートのフレッシュ性状を、表-5 に要因ごとの供試体の外観写真を示す。本論文では表中の(A)に示すような白黒のまだら模様を「色むら」とし、(B)に示すような供試体の打重ね上下に見られる色の違いで、1 層目が黒く、2 層目が白くなるようなものを打重ねによる「色違い」と定義した。

まず、脱型 1.5 時間後においては、全体的に各要因により色むらや色違いが認められたものの、脱型 7 日後においては、時間経過によって供試体は黒色部が減少し、写真-1 に示したような明確な色むらにはならなかった。したがって、現場で散見される長期間に残る色むらは、本実験で設定した要因では再現できておらず、他の要因によって生じている可能性が示唆された。なお、写真-1

表-1 要素供試体の検討要因

検討要因	付与条件
ブリーディング量 (配合要因)	ブリーディング大： $0.37\text{cm}^3/\text{cm}^2$ / ブリーディング小： $0.12\text{cm}^3/\text{cm}^2$
締固め程度	25 回突き+たたき(木槌) / 30sec 振動($\phi 30\text{mm}$ 内部振動機)
打重ね時間間隔	間隔無し / 3 時間
滴下水量	0ml / 88ml($0.5\text{cm}^3/\text{cm}^2$)
剥離剤	塗布($2\text{g}/\text{m}^2$) / 塗りむらを設けた塗布($14\text{g}/\text{m}^2$)
作用圧力	加圧無し / $0.2\text{N}/\text{mm}^2$
脱型時期	材齢 1 日脱型 / 材齢 7 日脱型
型枠温度	20°C / 60°C (夏期日射を想定)
型枠内面の汚れ	汚し無し / 上層(2層目)汚し

表-2 コンクリートの配合表

配合名	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m^3)				
			W	C	S	G	AD
ブリーディング大	60.0	42.0	175	292	765	1060	2.04
ブリーディング小	40.0	45.0	160	400	796	977	4.00

表-3 コンクリートの使用材料

材料	記号	種類	摘要
セメント	C	普通 ポルトランドセメント	密度： $3.16\text{g}/\text{cm}^3$ 比表面積： $3320\text{cm}^2/\text{g}$
細骨材	S	山砂 (千葉県君津産)	表乾密度： $2.61\text{g}/\text{cm}^3$ 吸水率：2.11% 粗粒率：1.61
		砕砂 (東京都青梅産)	表乾密度： $2.65\text{g}/\text{cm}^3$ 吸水率：0.96% 粗粒率：2.98
		山砂：砕砂=15:85 (粗粒率:2.68)	
粗骨材	G	碎石 (東京都青梅産)	表乾密度： $2.65\text{g}/\text{cm}^3$ 吸水率：0.58% 粗粒率：6.71 実積率：62.6%
混和剤	AD	AE 減水剤 (高機能タイプ)	リグニンスルホン酸塩 界面活性剤

とは色むらの程度が異なるものの、脱型 7 日後において、色むらや色違いが確認できる要因に対する考察を以下に示す。

「ブリーディング量」と「滴下水量」を要因とした場

合について、脱型 1.5 時間後においては、ブリーディング量および滴下水量の多い方が色むらや色違いの程度は大きい傾向にあった。また、時間経過によって希薄化するものの、他の要因に比べて色むらや色違いが残留した。この原因は、飯島³⁾、吉田⁴⁾に示されたように、ブリーディング量の多いコンクリートを打ち込んだ場合は、ブリーディング水が型枠との界面に比較的多く集積し、集積した水が光の屈折率を変化させることによって黒色部が発生し、これが色むらや色違いとなって現れたと考えられる。

「剥離剤の塗布」については、ブリーディングの要因と同様に脱型 7 日後の時点で色むらが希薄化するものの、剥離剤を塗布し、さらに塗りむらを生じさせた場合に色むらが残ることが確認された。

「作用圧力」については 0.2MPa で加圧した方が大気圧下で養生した場合に比べて黒色度の大きい傾向にあり、脱型 7 日後以降においてもその差は残留した。これより、実際のコンクリート構造物において、コンクリート打込

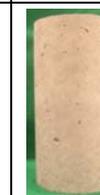
み時にある程度のコンクリート圧を受けている場合には、経時的にも色むらが残留する可能性があるものと考えられる。

「締固め程度」、「打重ね時間間隔」、「脱型時期」、「型枠温度」、「型枠内面の汚れ」については、色むらや色違いが脱型 1.5 時間後に認められる場合があるものの、脱型 7 日後において希薄化してほぼ均一色となった。したがって、これらの要因が複合した場合には、色むらに何らかの影響を与える可能性があるが、それぞれ一つ一つ

表-4 フレッシュ性状試験結果

配合名	スランプ (cm)	空気量 (%)	備考
ブリーディング大	15.0	4.3	ブリーディング量が多く材料分離しやすい配合
ブリーディング小	7.5	4.1	適度な材料分離抵抗性を有し、良好なワーカビリティを有する配合

表-5 要素供試体の各要因における外観写真

撮影時期	検討要因								
	ブリーディング量	締固め程度	打重ね時間間隔	滴下水量	剥離剤	作用圧力	脱型時期	型枠温度	型枠内面の汚れ
脱型 1.5 時間後	 2.8%	 25 回突き	 間隔無し	 0ml	 均一塗布	 0MPa	 材齢 7 日	 20°C	 無し
	 8.3%	 30sec 振動	 3 時間	 88ml	 塗りむら	 0.2MPa	 材齢 1 日	 60°C	 有り
脱型 7 日後	 2.8%	 25 回突き	 間隔無し	 0ml	 均一塗布	 0MPa	 材齢 7 日	 20°C	 無し
	 8.3%	 30sec 振動	 3 時間	 88ml	 塗りむら	 0.2MPa	 材齢 1 日	 60°C	 有り

の要因だけでは原因にならないものと考えられる。

以上より、全ての要素供試体の検討においては、経時的に色むらや色違いの程度が小さくなることを確認した。また、わずかに認められた色むらに対しては、ブリーディング量、剥離剤の塗布、作用圧力などが影響している可能性が示された。

3. 柱の供試体を用いた実験的検討

3.1 実験目的

要素供試体の検討では、脱型直後については色むらや色違いを再現できたが、それらは経時的に希薄化した。そこで、供試体が小さいゆえに実構造物における打込みが模擬できなかったものと考え、中規模の柱の供試体を作製して長期的に残留する色むらの再現を試みた。なお、検討する要因は、要素供試体の検討を踏まえ、色むらの発生に影響すると考えられたブリーディング量、剥離剤の塗布条件とした。さらに、要素供試体において検討することができなかった側圧に対する型枠の剛性を要因に加え、締固め程度、打込み温度の違いについても検討した。

3.2 実験概要

(1) 供試体概要

柱の供試体においては、その寸法を 450×450×900mm

とし、各要因において1体ずつ作製した。打込み方法は2層打ち(450mm/層)とし、1層目を打ち込んでから1時間後に2層目を打ち込んだ。打込み後、直ちに上面を封かんして、材齢7日において脱型し、その後は雨がかりのない環境に静置した。型枠にはコンクリート型枠用合板(コンパネ)を用いた。

(2) 実験要因

本実験において着目した各要因を表-6 上部に示す。

「打込み温度」については、打込み温度を 15℃(3月)、30℃(9月)として作製および養生した。

「ブリーディング量」については、要素実験と同じブリーディング大および小2種類の配合について検討した。

「型枠剛性」については、一般的な型枠(高さ方向に単管パイプ2箇所配置/面)を「剛」とし、単管パイプを高さ方向に1箇所配置/面としたものを「軟」とした。なお、打込みによって発生した型枠の最大はらみは剛で0.4mm、軟で3.9mmであった。

「締固め程度」については、φ30mmの内部振動機を各層の隅角部4箇所に挿入し、総締固め時間は1箇所につき15および55秒とした。

「剥離剤」について、油性剥離剤は塗りむらの有無にかかわらず33g/m²、水性剥離剤は37g/m²塗布した(いずれもメーカー推奨塗布量)。

表-6 柱供試体の各要因における外観変化

	打込み温度：15℃				打込み温度：30℃			
	ブリーディング大			ブリーディング小	ブリーディング大			
	型枠剛	型枠剛	型枠軟	型枠剛	型枠剛			
	15sec 締固め	55sec 締固め	15sec 締固め	15sec 締固め	15sec 締固め			
	剥離剤無塗布*				剥離剤 無塗布*	油性剥離剤 (均一塗布)	油性剥離剤 (塗りむら)	水性剥離剤 (均一塗布)
	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8
脱 型 後 1.5 時 間								
脱 型 後 21 日								

*剥離剤無塗布：新品のコンパネをそのまま用いたもの

(3) 測定項目

要素供試体と同様に、脱型後から経時的に外観写真を撮影し、さらに、供試体撮影時に分光測色計(JIS Z 8729)によって供試体側面の明度を測定し色むらの定量化を試みた。明度とは物体の白さ(黒さ)を示す指標であり、明度が高いほど白く、完全白色の場合その値は100となる。1回の測定は、1側面につき18箇所を113mm間隔で2回ずつ(36回/面)実施した。

3.3 実験結果

(1) 外観

脱型1.5時間後および21日における外観写真を表-6に示す。表に示すように脱型直後においては、色むらや色違いが確認されたものの、これらの色むらは要素供試体と同様、経時的に希薄化した。これより、本実験供試体寸法や実験条件でも写真-1に示す実構造物に散見される時間が経過しても残留する色むらは再現できないことが確認された。ここで、時間経過によって希薄化する色むらや色違いに着目すると、ブリーディング量の多い、締固め程度が過剰、型枠剛性が小さい、剥離剤を塗布したそれぞれの場合において色むらの程度が大きくなった。これらの色むらが経時的に希薄化したことから考えて、コンクリートの水分の集積と蒸発によって色が変化するものと考えられる。なお、剥離剤の種類による色むらの程度の差は認められず、さらに、30℃で打ち込んだ方が15℃よりも表面は全体的に白くなる傾向にあった。

(2) 明度

先述のとおり、脱型直後の色むらは、脱型21日後において希薄化しており、その経時変化について着目した。図-1に分光測色計によって測定した各要因における明度の平均値の経時変化を示す。これより、いずれのケースも脱型後まもなく明度が大きくなり、脱型1日目で収束していることが分かる。

ここで、既往の研究^{2),5)}と同様に、色むらの程度を定量的に評価するために、各供試体の明度の標準偏差を算出した。標準偏差が大きいほど、明度のばらつきが大きく色むらや色違いの程度が大きいと評価できる。図-2、図-3に各要因における明度の標準偏差を材齢ごとに示す。No.1, 2, 3, 6, 8については、概ね脱型直後の偏差が大きく、経時的に低下し、脱型1日以降においては収束していることが認められる。したがって、ブリーディング量、締固め程度、型枠剛性、剥離剤などの影響により脱型直後に存在した色むらが、脱型1日後は希薄化し消失しているといえる。また、No.7(塗りむら有り)とNo.6(塗りむらの無し)を比較した場合、No.7の偏差の方が顕著に大きく、さらに時間が経過しても偏差が小さくならない傾向にあった。これらの結果については、外観による評価結果と概ね相関が得られており、測色計によ

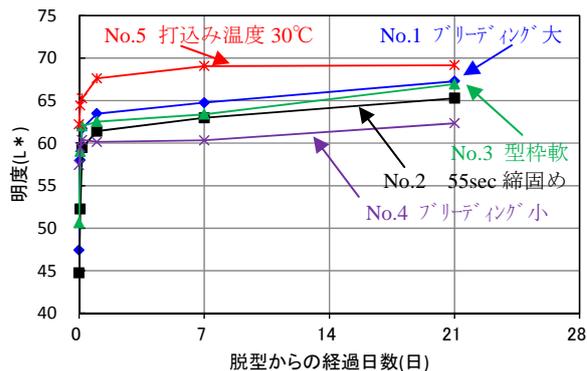


図-1 色差計測定結果(平均値)

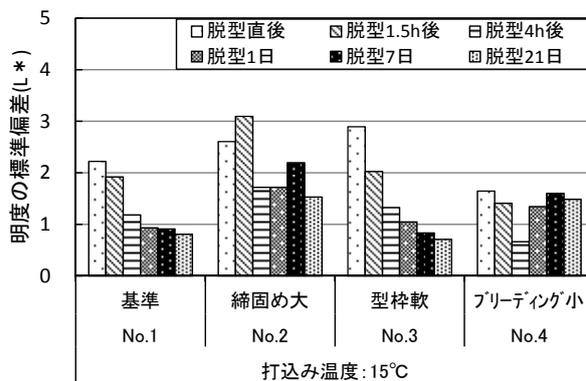


図-2 色差計測定結果 (No.1~4の標準偏差)

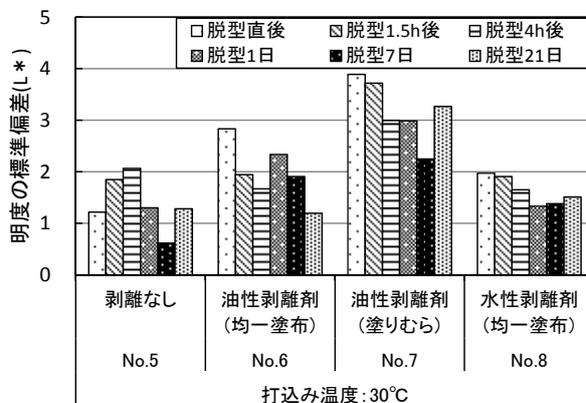


図-3 色差計測定結果 (No.5~8の標準偏差)

る明度の標準偏差の大小は、目視による色むらの大小を定量的にとらえていると判断される。

(3) 色むらの発生要因

外観および明度によるいずれの評価においても、脱型直後はブリーディング量が多いほど、締固め程度が過剰であるほど、黒色部が多くなり色むらの程度が大きくなる傾向が認められた。一方、柱の供試体においても発生した色むらは経時的に消失し、実構造物と同じように残留するものではなかった。実構造物においては、本実験で作製した供試体に比べてブリーディング量、締固め程度、剥離剤の塗りむら、作用圧力などのばらつきがさら

に大きくなり、これに加えて、雨がかり、外気温、部材温度など脱型後の環境も影響しているものと考えられる。

4. 注水実験

4.1 実験目的

ここまでの検討から、色むら(黒色部)の発生には水や剥離剤が少なからず影響すると判断された。ここでは、経時的に消失した色むらの発生は、水の存在が要因となっていると仮定し、それを視覚的に確認するため、透明型枠にモルタルを打ち込み、型枠界面に注水する実験を実施した。なお、剥離剤の影響については、条件によってコンクリートとの混合・反応が生じ、色むらの発生につながると考えられる。これについては、今後の課題としたい。

4.2 実験概要

写真-2 に実験の概要を示す。モルタルと型枠の界面が観察できるように、型枠には 100mm 角の亚克力ボックスを用いた。配合は、要素および柱の供試体にて用いた「ブリーディング小」のコンクリートから粗骨材を除いたモルタルとした。モルタルの練混ぜは、モルタルミキサを用いて水、セメント、細骨材の順番で投入し、計 2 分間練り混ぜた。JIS R 5201 により本モルタルのフローを測定したところ、123×121mm であった。練り上がったモルタルを 1 層で亚克力容器に打ち込み、直ちに予め水を充填させた注水ホースより $0.5\text{g}(0.005\text{cm}^3/\text{cm}^2)$ 相当の水を注入した。その後の外観の経時変化を写真撮影した。

4.3 実験結果および考察

注水 24 時間後の供試体面を写真-3 に示す。型枠界面に注水された箇所は周囲より黒くなっており、コンクリート表面に水が集中した箇所が黒色化することを実験的に確認することができた。ただし、この黒色部は脱型後、経時的に希薄化するものであった。

先の要素供試体および柱の供試体の脱型直後における色むら(黒色化)は、ブリーディングや加圧に伴う水の作用が影響するケースで観察された。これらのことから、表面の黒色箇所は、それぞれの要因において少量の水が集積することによって発生するものであると推察される。

5. まとめ

本検討をまとめると以下ようになる。

- (1) 実構造物に散見される色むらの発生要因を検討するため、要素供試体や中規模の柱の供試体で再現を試みた結果、本検討の範囲内で発生した色むらは脱型直後には明確であったものの、比較的短期間で黒色部は希薄化し、供試体全体の色調は均一化した。

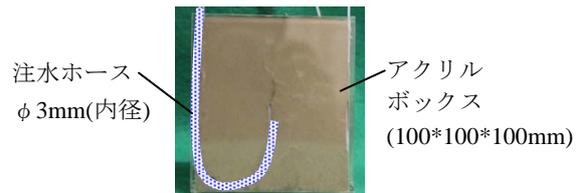


写真-2 実験の概要

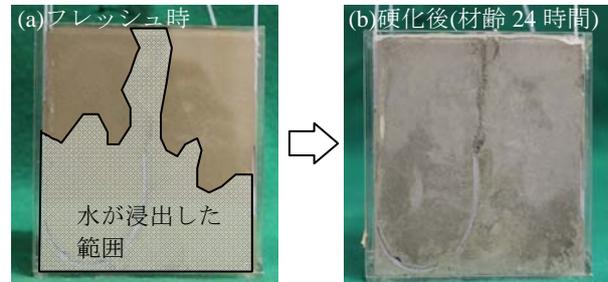


写真-3 注水後の供試体測面

- (2) 色むらは経時変化に伴って消失したが、コンクリートのブリーディング量が多いほど、締固め程度が過剰になるほど、剥離剤の塗りむらの程度が大きいほど、表面に発生する色むらの程度が大きくなることが確認された。
- (3) 注水実験により、コンクリート表面に水が集中した箇所は、脱型直後において黒色化し、経時的に黒色部が希薄化することから、要素および柱の供試体において黒色部が発生した箇所は、水が集積したことに起因する可能性が高いことが示唆された。今後は、長期に渡って残留する色むらの発生要因について検討を加えていく予定である。

参考文献

- 1) 坂田昇, 渡邊賢三, 細田暁: コンクリート構造物の品質向上と表層品質評価手法, コンクリート工学, Vol.50, No.7, pp.601-606, 2012
- 2) 大塚秀三, 中田善久, 藤井和俊, 毛見虎雄: 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集, Vol.29, No.2, 2007.07
- 3) 飯島守, 小俣一夫: 内装タイル目地の色むらその原因と対策, 建設仕上技術, No.176, 1985
- 4) 吉田八郎, 柴崎文雄, 若林敏弘: コンクリート積みブロックの面に発生する色むらに関する一考察, 土木コンクリートブロック 157, 2-13, 1987
- 5) 柏木隆男, 河津龍大, 寺嶋明彦, 太田昇: コンクリートの色調制御その 2, 日本建築学会大会学術講演概要集, 1999.09