

廃陶器粉末とセメント系材料との融合による 意匠構造材料の開発

井上 真澄¹・岡本 享久²・平尾 和洋³・児島 孝之⁴

¹正会員 北見工業大学助教 工学部社会環境工学科 (〒090-8507 北海道北見市公園町165番地)

E-mail: m-inoue@mail.kitami-it.ac.jp

²正会員 立命館大学教授 理工学部環境システム工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

³立命館大学教授 理工学部建築都市デザイン学科 (同上)

⁴正会員 立命館大学教授 理工学部建築都市デザイン学科 (同上)

本研究では、日本の伝統的景観素材である土壁や土塀のような意匠性を持ちながら強度と耐久性に優れる意匠構造材料の開発を目的として、産地や色彩の異なる8種類の廃陶器粉末を着色材として使用した場合のモルタルおよびコンクリートの力学的特性および着色効果について実験的検討を行った。その結果、廃陶器粉末の置換が強度や耐久性に及ぼす影響は小さく、水セメント比や廃陶器置換率を適切に設定することで普通コンクリートと同等の性能を発揮すること、また既存の景観素材に調和可能な色彩を発現することを確認した。さらに、実躯体への適用を想定し、廃陶器粉末による着色効果と表面処理方法が躯体の意匠性に与える影響についても考察した。

Key Words : waste earthenware powder, color, strength, weatherability, design

1. はじめに

従来、コンクリートはその優れた特性と経済性から、鋼とともに主要な建設材料として用いられてきた。道路、橋梁、鉄道、ダム、建築物等のコンクリート構造物は、社会基盤を支える重要な役割を果たしている。その一方で、鉄筋コンクリート造や鉄骨造への建て替えに代表される都市の耐震不燃化や道路交通の近代化に伴って、都市景観や自然環境が重大な危機に瀕している。今後、コンクリートには、土木・建築構造物を支える構造材料としての機能のみならず、都市景観や環境と調和する景観素材としての役割が一層強く求められると考えられる。







一般にコンクリートは、木材や石材のような天然の素材に比べて無機質で単調なため、冷たい人工的な印象を与えている¹⁾。しかし、顔料により着色したカラーコンクリートを用いれば、「やさしさ」や「やわらかさ」をもつ印象となり、コンクリートの機能性とともな景観素材としても表現できる²⁾。また、コンクリート表面の洗い出しや研磨といった表面処理あるいは模様付き型枠を用いて仕上げ面に凹凸を付ける³⁾ことにより、壁の威圧感を和らげたり、曲線や曲面を利用して周囲の景観に溶け込ませるなど様々な工夫や表現方法が実用化されている。このようにコンクリートの着色や仕上げ面の処理は、

従来のコンクリートがもつ冷たさや無機質感、圧迫感などを緩和し、景観素材として表現の幅を広げる有効な手法と言える。

一方、我が国におけるセメント系材料の着色技術は、欧米（主にドイツ）のメーカーに大きく依存している。しかし、日本の伝統的な建造物や都市景観、自然環境を保全し後世に継承していくためには、日本独自の発想に基づいた着色技術の開発も必要と考えられる。例えば、歴史的建造物や古い町並み等、伝統的・個性的な特色のある景観を形成している地域においては、その地域を構成する材料に地域性のある自然素材を積極的に活用することは有効であり、その一つとして我が国の伝統工芸である陶器が挙げられる。陶器は、地場の粘土を原料とし、地域特有の製造方法により様々な色彩を発し、独特の素材感を有する。この陶器とセメント系材料を融合して着色することができれば、高耐久性と景観素材としての機能を有する新たな材料の開発が可能になると考えられる。

近年、陶器業界では、資源の枯渇や廃棄物処理場の問題等から廃陶器のリサイクル・再資源化が強く要望されているが、その年間排出量は食器類だけでも年間約15万tと推計されている。現在、廃瓦^{4), 5)}や衛生陶器⁶⁾など一部の陶器の廃材や不良品については、リサイクルに向けた技術開発は進められてはいるが、未だ十分に普及し

表-1 廃陶器粉末の種類

種類	産地	密度 (g/cm ³)	粉末度 (cm ² /g)	色彩値			
				L*	a*	b*	
				H	V	C	
A	萬古	2.51	1930	45.8	8.3	11.8	
				5.0YR	4.5	2.5	
B		2.57	2450	45.3	5.5	10.6	
				7.7YR	4.5	1.9	
C	丹波	2.48	1830	54.3	6.3	14.6	
				8.3YR	5.4	2.6	
D		2.41	1520	45.6	10.9	16.1	
	信楽	2.47	9570	5.2YR	4.5	3.3	
E				61.7	15.5	28.9	
				6.4YR	6.2	5.6	
F	信楽	2.40	2070	55.0	23.4	25.6	
				1.9YR	5.5	6.5	
G		2.55	1750	65.6	11.6	18.7	
	信楽	2.54	2140	5.3YR	6.5	3.9	
H				65.5	12.2	18.5	
				5.4YR	6.4	4.0	

ていないのが現状であり、新たな用途の開拓が望まれている。

そこで、本研究は日本の伝統的景観素材である土壁や土塀のような意匠性を持ちながら強度と耐久性にも優れる意匠構造材料の開発を目的として、産地や色彩の異なる8種類の廃陶器粉末を着色材として使用した場合のモルタルおよびコンクリートの力学的特性とともに、廃陶器粉体による着色効果や既存景観との調和性について実験的検討を行った。さらに、実躯体への適用を想定し、廃陶器粉末による着色効果と表面処理方法が躯体の意匠性に与える影響についても考察した。

2. 廃陶器粉末により着色したモルタルの強度と色彩

(1) 概要

本実験は、廃陶器粉末の着色材としての基本物性を明らかにすることを目的として、産地と色彩の異なる8種類の廃陶器粉末を選定し、これをモルタルに混入した場合の強度および色彩について実験的検討を行った。

(2) 使用材料

表-1に実験に使用した廃陶器を示す。一般に陶器は、産地により原料と製法が異なり、様々な発色をするものがある。そこで、近畿圏内の主要な陶器産地の中から、三重県四日市市（萬古焼）、兵庫県丹波市（丹波焼）、滋賀県甲賀市（信楽焼）を選定し、各産地より色彩の異なる廃陶器を計8種類採取した。本研究では、土壁や土塀のような意匠材料の開発に視点を置いていることから、伝統的地域の町並みを形成する直立壁面材料を対象とした色彩調査結果⁹⁾を参考にして、黄・茶・赤を発色する廃陶器を中心に選定した。

表-2 モルタルの配合およびフレッシュ試験結果

セメント	陶器	P/(C+P) (%)	単位量(kg/m ³)				Ad ₁ (%)	Ad ₂ (%)	フロー (mm)	空気量 (%)
			W	C	P	S				
普通ポルトランドセメント	—	0	276	369	0	1474	0	1.0	200	4.0
	A	20	277	369	92	1380	0	2.0	220	5.0
		30	276	368	158	1313	0	1.5	211	3.5
		40	275	367	245	1224	0	1.5	206	3.6
		50	275	367	367	1100	0	2.0	179	3.7
	B	20	276	368	92	1381	0	1.5	221	4.9
		30	276	368	158	1315	0	2.0	220	4.2
		40	276	368	246	1227	0	2.0	206	3.7
		50	276	368	368	1104	0	2.2	197	3.0
	C	20	276	368	92	1380	0	1.0	224	4.2
		30	276	367	158	1312	0	1.5	214	3.0
		40	275	367	245	1223	0	2.0	201	3.4
		50	274	366	366	1098	0	2.2	191	3.2
	D	30	275	367	157	1310	0	1.8	214	3.4
		50	273	364	364	1093	0	2.4	181	4.8
	E	20	276	368	92	1379	0.5	0.5	200	4.2
		30	275	367	157	1312	1.0	0.0	185	3.7
		40	275	367	245	1222	1.9	0.4	180	3.5
		50	274	366	366	1097	3.5	0.0	154	6.0
	F	20	277	369	92	1383	0.0	2.0	220	5.0
		30	277	369	158	1317	0.0	1.5	213	3.0
		40	277	369	246	1230	0.0	1.8	206	4.2
		50	277	369	369	1107	0.0	1.8	184	3.1
	G	20	276	368	92	1381	0.0	1.5	215	4.5
		30	276	368	158	1315	0.0	1.5	213	5.1
		40	276	368	245	1226	0.0	1.2	200	4.0
		50	276	367	367	1102	0.0	1.5	194	4.8
	H	20	276	368	92	1381	0.0	1.5	210	4.5
		30	276	368	158	1314	0.0	1.0	205	3.6
		40	276	368	245	1226	0.0	1.2	200	4.0
		50	275	367	367	1102	0.0	1.5	181	4.4
ホワイトセメント	—	0	275	367	0	1468	0.0	1.5	200	4.0
	A	30	275	366	157	1307	0.0	2.2	200	3.0
		50	274	365	365	1095	0.6	0.5	189	3.6
	B	30	275	367	157	1309	0.0	2.8	217	3.0
		50	275	366	366	1099	0.6	0.5	217	3.2
	C	30	274	366	157	1306	0.0	2.3	210	3.6
		50	273	364	364	1093	0.6	0.5	204	3.9
	D	30	274	365	157	1304	0.0	2.3	216	3.1
		50	272	363	363	1088	0.6	0.2	220	4.9
	E	30	275	366	92	1373	1.2	0.0	220	4.2
		50	273	364	364	1092	3.0	0.0	188	5.3
	F	30	275	367	157	1311	0.0	2.1	205	3.3
		50	276	368	368	1103	0.6	0.5	191	3.6
	G	30	275	366	157	1309	0.0	1.5	210	4.5
		50	274	366	366	1098	0.6	0.5	194	4.5
	H	30	275	366	157	1308	0.0	1.5	205	4.1
		50	274	366	366	1097	0.6	0.5	190	3.6

注)W/C=75%, (S+P)/C=4で一定
Ad₁, Ad₂:セメント質量に対する割合(%)

セメント[C]は、普通ポルトランドセメント（密度3.16g/cm³、比表面積3300cm²/g）とホワイトセメント（密度3.05g/cm³、比表面積3660cm²/g）の2種類を使用した。細骨材[S]は、野洲川産川砂（表乾密度2.61g/cm³、F.M.2.88、吸水率1.42%）を使用した。混和剤は、高性能AE減水剤[Ad₁]（主成分：ポリカルボン酸系特殊高分子界面活性剤）とAE助剤[Ad₂]（主成分：ポリオキシエチレンアルキルエーテル硫酸ナトリウム塩）を使用した。

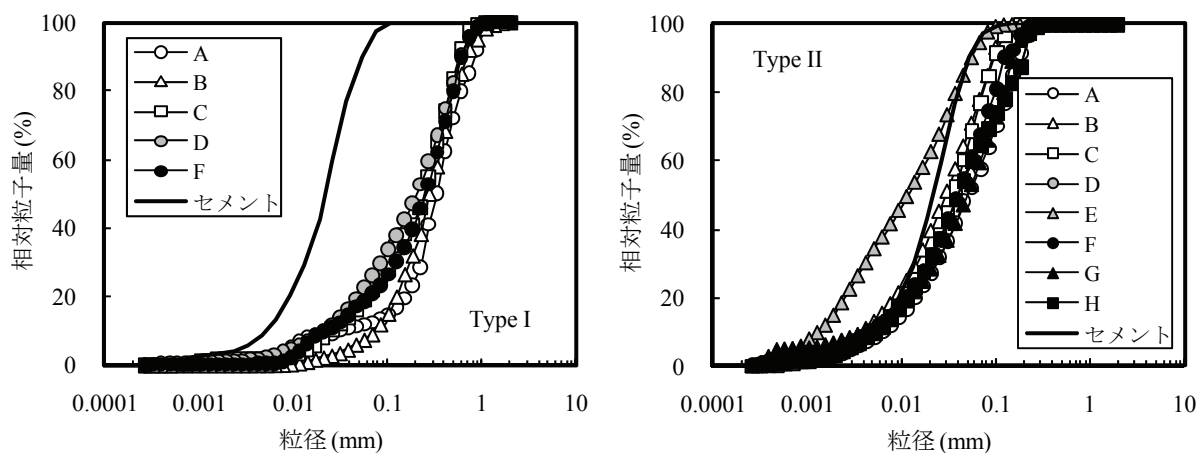


図-1 廃陶器粉末の粒度曲線

(3) モルタルの配合

表-2にモルタルの配合を示す。水セメント比および細骨材セメント比を一定として、廃陶器粉末の置換率を変化させた場合に、目標フローと目標空気量に調整可能な配合を試験練りにより選定した。その結果、水セメント比 $[W/C]$ は75%、細骨材セメント比 $[(S+P)/C]$ は4で一定とした。全粉体質量 $[C+P]$ に占める廃陶器粉末質量 $[P]$ の割合（以下、廃陶器置換率 $[P/(C+P)]$ と称す）が廃陶器粉末による着色効果に大きな影響があると考え、廃陶器置換率が0～50%となるように、細骨材の内割置換率 $[P/(S+P)]$ を決定した。目標フローは $180 \pm 20 \text{ mm}$ 、目標空気量は $4 \pm 1\%$ とし、混和剤（ Ad_1 , Ad_2 ）の添加量により調整した。

(4) モルタル供試体の作製方法および測定項目

供試体は、 $\phi 50 \times 100 \text{ mm}$ の円柱供試体とし、打設後型枠上面をガラス板で覆い、2日間恒温恒湿室（ $20 \pm 1^\circ \text{C}$ 、 $90 \pm 5\% \text{ RH}$ ）内に静置した。脱型後は、材齢28日まで標準水中養生（ $20 \pm 1^\circ \text{C}$ ）を行った。その後、「円柱供試体を用いたモルタルまたはセメントペーストの圧縮強度試験方法（JSCE-G 506 1999）」に準じて圧縮強度試験を行った。


色彩は、脱型後、恒温恒湿室（ $20 \pm 1^\circ \text{C}$ 、 $60 \pm 5\% \text{ RH}$ ）内で材齢28日まで養生したモルタル供試体の型枠面に対して接触型分光色差計を用いて測色した。供試体表面には若干の色むらが観察されたため、各供試体の型枠面からランダムに選定した20点で測定を行い、その平均を色彩値とした。

(5) 色彩の評価方法


色彩は、接触型分光色差計を用いて $L^*a^*b^*$ 表色系、マンセル表色系（ $H V/C$ ）で表した。照明、受光方式はJIS Z 8722の条件bに準拠し、測定波長範囲は $400 \sim 700 \text{ nm}$ 、測定波長間隔は 20 nm 、反射率測定範囲は $0 \sim 150\%$ 、分解能は 0.01% 、測色条件は光源D65、視野角条件 10° 、測定

径 8 mm である。

$L^*a^*b^*$ 表色系は、CIE（国際照明委員会）で規格化されており、日本ではJIS Z 8729に規定されている。 L^* は明度指数といい、100から0までの範囲の値で明るさを示し、この値が高くなるほど白、低い場合は黒となる。 a^* と b^* はクロマティクネス指数（色質指数）といい、-120から120の値を示す。 a^* がプラスの場合は赤色、マイナスの場合は緑色に近くなる。また、 b^* がプラスの場合は黄色、マイナスの場合は青色に近い色となる。 a^* と b^* の組み合わせによって色相（色合い）と彩度（鮮やかさの度合い）の関係を表す¹⁰。数値（絶対値）が大きくなるに伴い色鮮やかになり、小さくなるに伴いくすんだ色になる。以下に、その表記例を示す。

表記例) $L^*=42.8$, $a^*=28.4$, $b^*=8.46$ []

マンセル表色系は、「三属性による色の表示方法」としてJIS Z 8721で採用されており、色相（色合い）をH、明度（明るさ）をV、彩度（鮮やかさ）をCで表す。色相は1～10の数字とアルファベット（赤はR、茶はYR、黄はYなど）で、明度を0（完全暗黒）から10（完全純白）の数字で、最後に彩度を0（無彩色）から始まる数字で表す¹¹。以下に、その表記例を示す。

表記例) 9.3Y 8.9 / 13.8 []

(6) 廃陶器の微粉碎と粒度調整

廃陶器は着色材として使用するため、採取後粉碎机およびボールミルを用いて微粉碎したものを使用した。一般に、着色材の着色力は、粒子が細かいほど比表面積が大きくなるため着色力が強く、その着色力は粒子径の2乗に反比例する⁹。そこで、できるだけ細かく微粉碎することを試みたが、一部の廃陶器を除き、粉碎工程において、粒子がセメントよりも細かくなると、粉体の色彩が極端に淡くなることを目視で確認した。

一方で、セメントよりも粒度が大きい2種類（Type IおよびII）の粉体でモルタルへの着色効果を予備実験にて確認した。図-1にその廃陶器粉末の粒度曲線を示す。粒

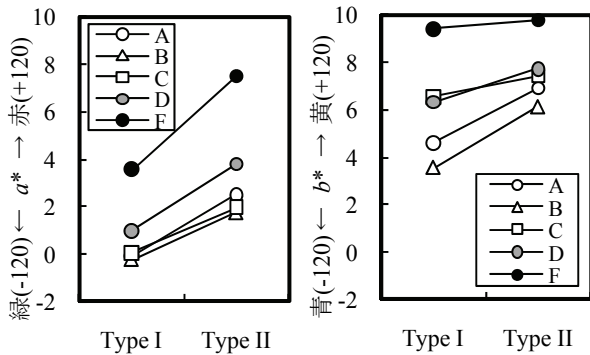


図-2 モルタルの色彩測定結果 (予備実験)

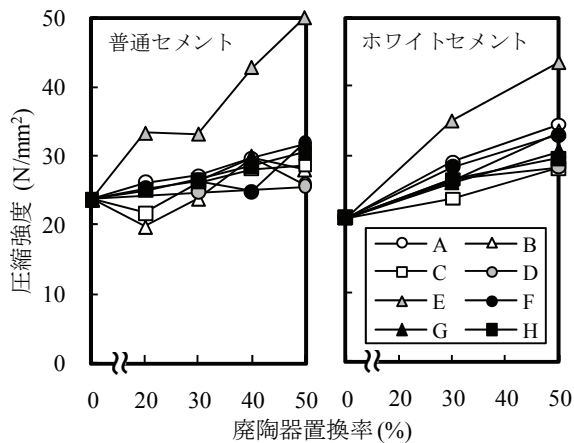


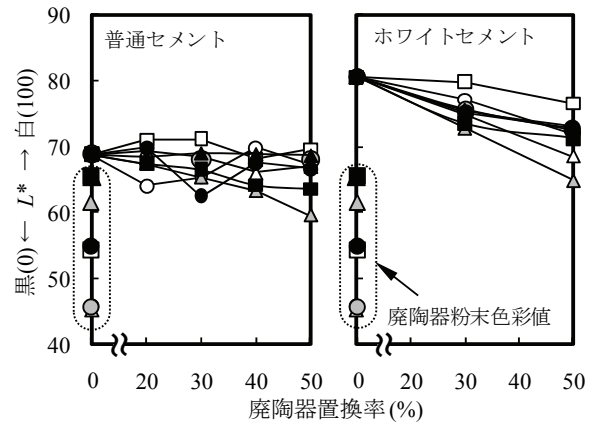
図-3 モルタルの圧縮強度と廃陶器置換率の関係

度は、レーザ回折式粒度分布測定装置を用いて測定した。予備実験では、廃陶器A, B, C, D, Fの5種類を対象とし、モルタルの廃陶器置換率は50%とした。図-2に作製したモルタル表面の色彩値 (a^* 値および b^* 値)を示す。その結果から、セメントの粒度に比較的近いType IIの粉体を用いたモルタルの色彩値は、赤色あるいは黄色側へ明確に変化することが確認できる。同時に、目視においても色彩に明確な差異が観察された。そこで本研究では、着色材としてType IIの廃陶器粉末を用いることとした。表-1には、Type IIの廃陶器粉末の物性試験結果および粉末の色彩値を示す。なお、廃陶器粉末Eについては、他のものと同様の方法で微粉碎をしたにも関わらず、初期の粉碎過程でセメントよりも粒度が小さい微粉末となった。しかし、粉末の発色に変化は観察されなかったことから粒度調整は行わずそのまま使用した。

(7) 実験結果および考察

a) 廃陶器粉末がモルタル強度に及ぼす影響

図-3に廃陶器粉末で着色したモルタルの圧縮強度 (材齢28日) と廃陶器置換率の関係を示す。セメントの種類に関わらず、廃陶器置換率の増加に伴い、圧縮強度が増加する傾向を示した。これは、モルタル中の微粉末量が増加することにより、モルタル硬化体の組織が緻密化し

図-4 廃陶器粉末で着色したモルタルの色彩値 ($L^*a^*b^*$) と置換率の関係

たことが原因と考えられる。

廃陶器の種類で比較した場合、廃陶器粉末E以外はほぼ同程度の強度を発現した。本実験で対象とした廃陶器は、産地や種類により物性に差異はあるものの、粒度が同等であればモルタル強度に及ぼす影響は小さいものと考えられる。廃陶器粉末Eでは、他の廃陶器に比べ強度が大きく、廃陶器置換率の増加に伴う強度の増加傾向が顕著であった。図-1の粒度分布が示すように廃陶器粉末Eの粒径は他の廃陶器に比べてかなり小さいことから、モルタル組織の緻密化による強度増進効果が顕著に表れたものと推察される。ただし、練混ぜ時のフローは、他の廃陶器に比べ極端に低下したため、混和剤の添加量が

表-3 コンクリートの示方配合

配合 名称	P/(C+P) (%)	P/(S+P) (%)	水粉体比 (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					混和剤		スランブ (cm)	空気量 (%)
					W	C	P	S	G	Ad ₃	Ad ₄		
S60-0	0	0	W/C =60%	48	174	290	0	880	974	580	870	6.0	3.6
S60-20	20	8.69		46			72	753	1012	1088	1451	6.0	3.7
S60-30	30	15.6		44			125	666	1050	1443	2071	8.0	4.7
S60-40	40	25.4		42			194	562	1088	1934	2901	7.0	2.1
C50-0	0	0	W/(C+P) =50%	44	171	342	0	787	1024	855	1710	9.0	4.0
C50-20	20	7.8				274	68	812	1056	684	1368	7.5	3.1
C50-30	30	11.1				239	103	825	1073	599	1197	7.5	3.9
C50-40	40	14.0				205	137	837	1089	513	1026	9.5	5.1
C50-50	50	16.8				171	171	850	1105	428	855	8.0	5.0

多くなった(表-2参照)。したがって、粒度が小さい場合には、フレッシュ性状への留意が必要となる。

b) 廃陶器粉末によるモルタルの着色効果

図-4に廃陶器粉末で着色したモルタルの色彩値($L^*a^*b^*$)と置換率の関係を示す。図中には、廃陶器粉末自体の色彩値もプロットした。明度を表す L^* 値は、廃陶器の種類により幾分変動はあるが、全体としては廃陶器置換率の増加に伴い、明度が低下する傾向にある。また、ホワイトセメントを使用した場合の方が明度 L^* は大きく、全体として明るい発色を示すが、普通ポルトランドセメントでは淡い発色を示した。一方、緑から赤を示す a^* 値は、廃陶器置換率の増加に伴い、赤色側(+側)に数値が増加する傾向を示している。特に、廃陶器粉末EとFは、その増加傾向が顕著であり、青から黄を示す b^* 値も同様に、数値に明確な変化が認められた。また、ホワイトセメントを使用した場合の方が a^* 値および b^* 値ともに大きくなる傾向を示した。

廃陶器粉末EおよびFで着色したモルタルの色彩値は、いずれも廃陶器粉末自体の色彩値に追従して変化する傾向を示しており、廃陶器粉末による着色効果が得られたと考えられる。それら以外の廃陶器については、置換率が増加しても a^* 値や b^* 値に大きな変化はなく、目視観察においても、普通モルタルと比較して、色彩に明確な差異は観察されなかった。このように、廃陶器粉末による着色効果は、粉末自体の色彩によって大きく異なり、その着色効果は、セメントの種類、配合、骨材の種類に影響を受ける。しかし、廃陶器粉末EおよびFの粉末自体の色彩値(表-1参照)から判断すると、 a^* 値が15以上かつ b^* 値が25以上の色彩値を有する廃陶器粉末を用いて、全粉体質量に対し20%以上置換することにより着色材として機能するものと考えられる。

3. 廃陶器粉末により着色したコンクリートの諸特性

(1) 概要

本実験は、廃陶器粉末のコンクリート用着色材への適

用性を明らかにすることを目的とする。前章のモルタル実験の結果から各種廃陶器粉末による着色効果とフレッシュ性状への影響を考慮して、廃陶器粉末Fを最適なコンクリート用着色材として選定した。実験では、廃陶器粉末Fにより着色したコンクリートの各種物性試験および色彩測定を行った。さらに着色材としては、長期間にわたって変退色しないかどうかが重要な性能であることから、廃陶器粉末Fにより着色したコンクリートを屋外環境に長期間暴露し、その色彩の経時変化を計測した。

(2) 使用材料

前述のように着色材には、表-1に示す廃陶器粉末Fを使用した。セメント[C]は、普通ポルトランドセメントのみを使用した。細骨材[S]は、モルタル実験と同様の野洲川産川砂を、粗骨材[G]は高槻産硬質砂岩碎石(表乾密度2.70g/cm³, F.M.6.84, 吸水率0.67%, M.S.20mm)を使用した。混和剤は、AE減水剤[Ad₃](主成分:リグニンスルホン酸塩とポリオール複合体)とAE助剤[Ad₄](主成分:アルキルアリルスルホン酸塩)を使用した。

(3) コンクリートの配合

表-3にコンクリートの示方配合を示す。廃陶器粉末Fの置換方法は、細骨材の内割置換とセメントの内割置換の2パターンとした。普通強度コンクリートを想定して、細骨材置換の場合は、水セメント比[W/C]は60%、廃陶器置換率[P/(C+P)]は0~40%となるように配合を決定した。一方、セメント置換の場合は、水粉体比[W/(C+P)]は50%、廃陶器置換率[P/(C+P)]は0~50%とした。いずれも目標スランブは8±2cm、目標空気量は4±1%とし、細骨材率と混和剤(Ad₃, Ad₄)により調整した。

(4) コンクリート供試体の作製方法および測定項目

コンクリート供試体は、材齢1日で脱型後、所定の試験材齢(28, 91, 180日, 1年, 5年)まで標準水中養生を行った。各種試験は、JISに準拠し、スランブ、空気量、圧縮強度、曲げ強度、割裂引張強度、静弾性係数を測定した。また、乾燥収縮試験として、供試体(100×100×400mm)を材齢7日まで水中養生(20±1℃)した

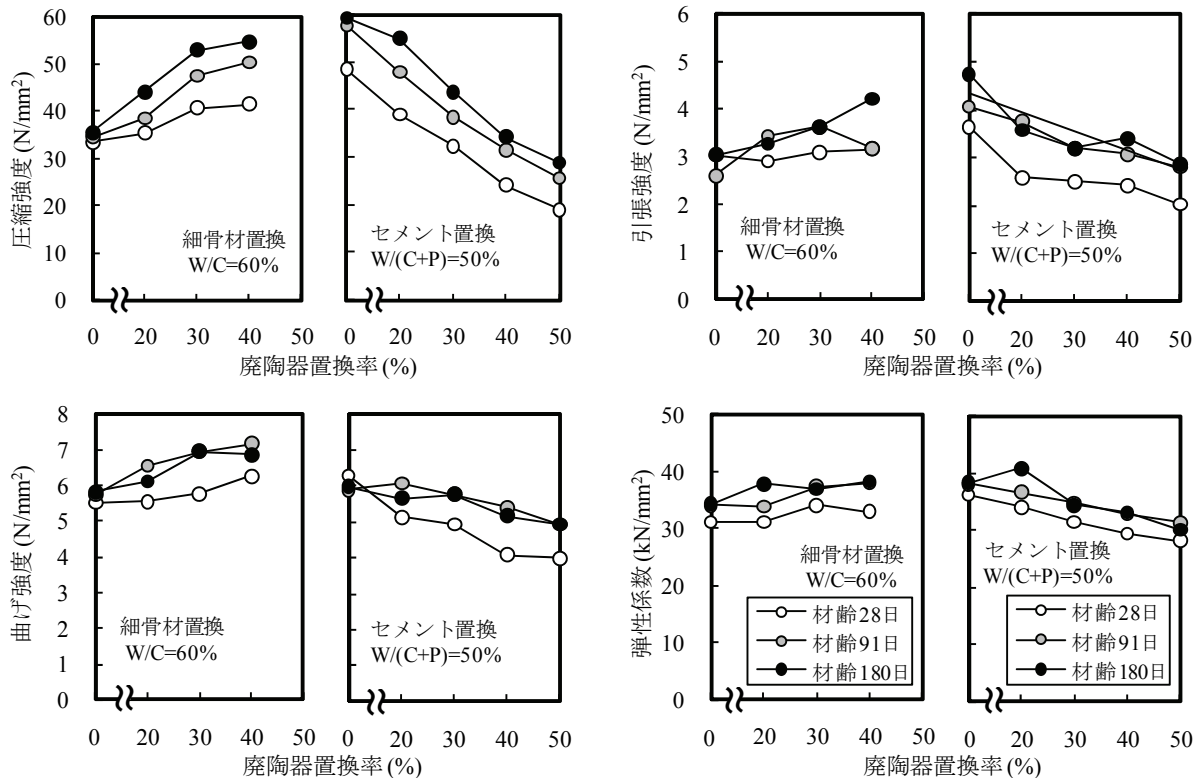


図-5 廃陶器粉末Fにより着色したコンクリートの各種強度および弾性係数

後、 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 、 $60 \pm 5\%$ RHの環境下で実施した。乾燥収縮ひずみの測定は、JIS A 1129に準拠し、コンタクトゲージ法で行った。

色彩は、モルタル実験と同様、脱型後、恒温恒湿室（ $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 、 $60 \pm 5\%$ RH）内で材齢28日まで養生したコンクリート供試体の型枠面に対して接触型分光色差計を用いて測色した。また、打設後28日間水中養生したコンクリート供試体（ $\phi 10 \times 20\text{cm}$ ）を屋外環境と屋内環境（ $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 、 $60 \pm 5\%$ RH）に暴露し、供試体型枠面にて色彩の経時計測を行った。屋外暴露用供試体は、立命館大学キャンパス内（滋賀県草津市）の屋外暴露試験場に設置した。なお、暴露期間中の年平均気温は 15.3°C 、年降水量は 1440mm 、年日照時間は 1700 時間である（隣接する大津市の気象データより）。

(5) 実験結果および考察

a) 廃陶器粉末Fにより着色したコンクリートの諸特性

図-5に廃陶器粉末Fにより着色したコンクリートの各種強度および弾性係数を示す。廃陶器粉末を細骨材置換した場合は、モルタルの結果と同様、廃陶器置換率の増加に伴い、強度が増加する傾向にある。材齢28日圧縮強度の廃陶器置換率40%では、無置換に対して約24%の強度増加を示した。図-6には、材齢5年までの圧縮強度の経時変化を示す。廃陶器粉末により着色したコンクリートは、長期材齢においても強度を保持していることが確認できる。

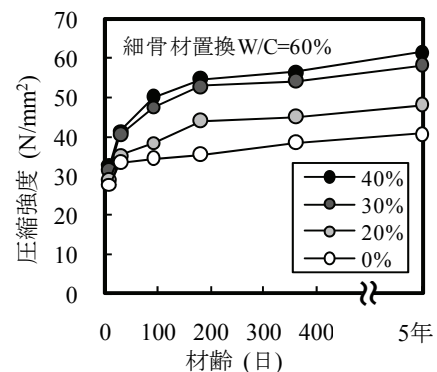


図-6 圧縮強度の経時変化

一方、廃陶器粉末をセメント置換した場合は、廃陶器置換率の増加に伴い、各種強度や弾性係数が低下している。これは、廃陶器粉末量の増加に伴い単位セメント量が減少するため、水セメント比[W/C]が大きくなったことが影響していると考えられる。

図-7に廃陶器粉末Fにより着色したコンクリートの乾燥収縮ひずみの経時変化を、図-8には質量減少率の経時変化を示す。細骨材置換した場合は、廃陶器粉末を無置換した場合に比較して若干小さくなる傾向を示している。セメント置換した場合は、置換率の変化に伴う傾向は明確ではないが、無置換の普通コンクリートとの大きな差異はない。また、質量減少率についても、無置換との大きな差異は観察されなかった。したがって、廃陶器粉末は、置換方法に関わらず、全粉体質量[C+P]に対して

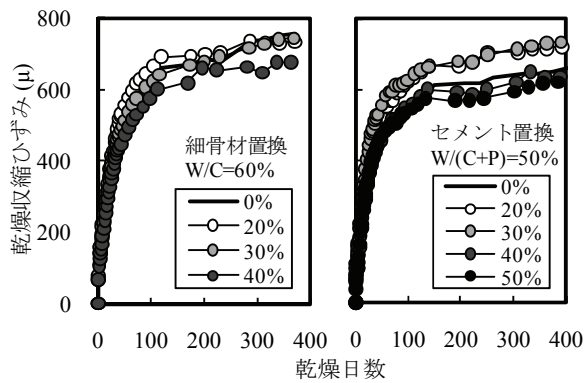


図-7 乾燥収縮ひずみの経時変化

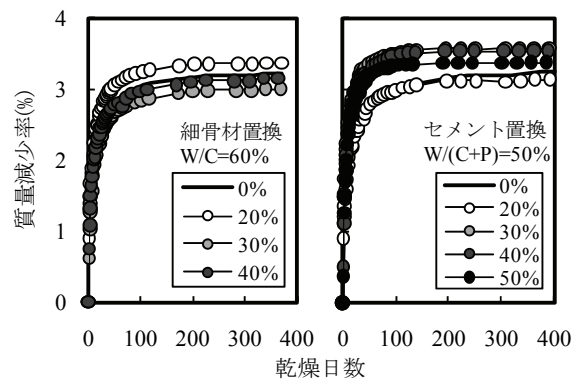


図-8 質量減少率

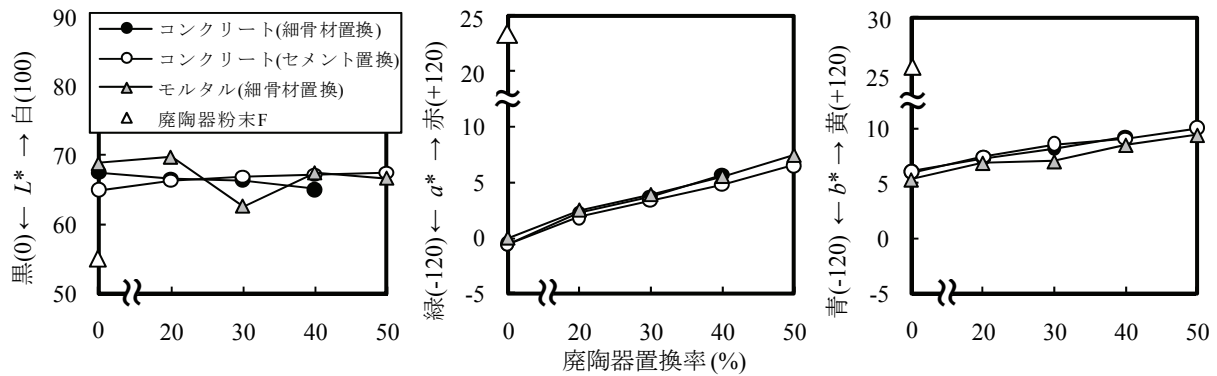


図-9 廃陶器粉末Fにより着色したコンクリートの色彩値と廃陶器置換率の関係

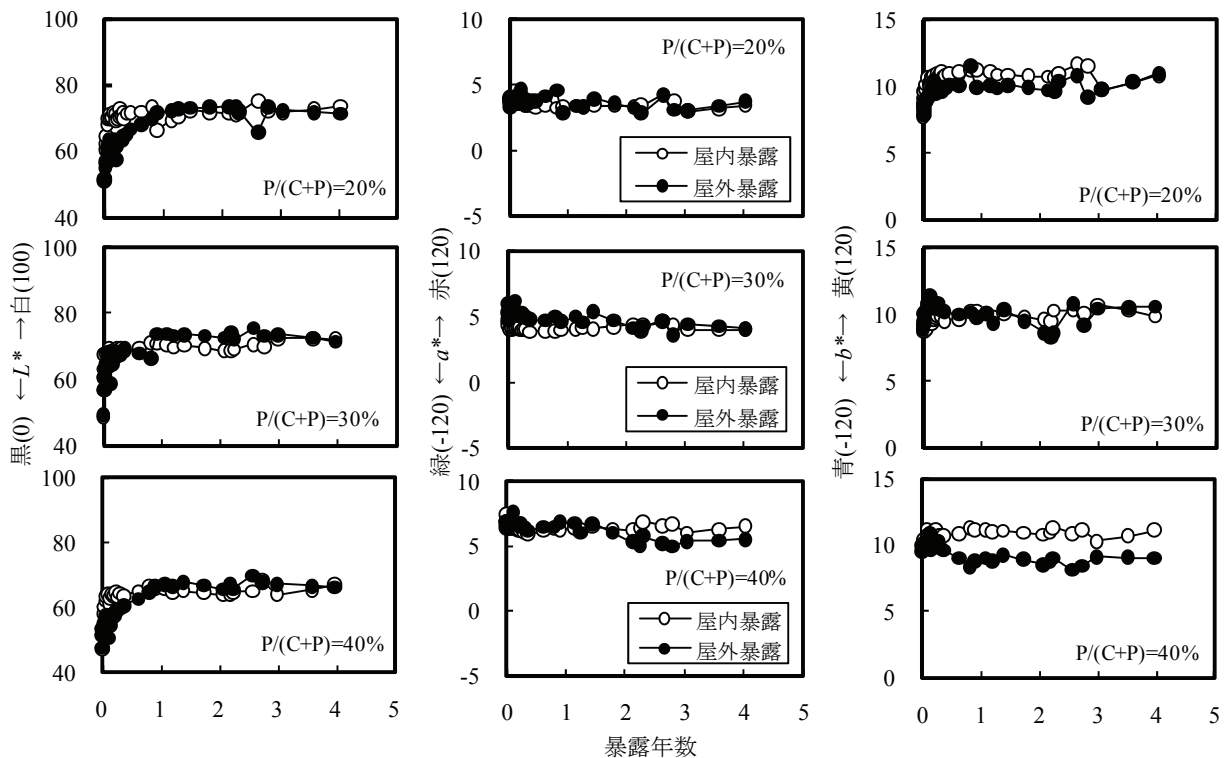


図-10 廃陶器粉末Fにより着色したコンクリートの色彩経時変化

50%まで置換してもコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響は小さいものであり、普通コンクリートと同様に扱って問題はないと考えられる。

b) 廃陶器粉末Fにより着色したコンクリートの色彩

図-9に廃陶器粉末Fにより着色したコンクリートの色彩値 ($L^*a^*b^*$ 表色系) を示す。図中には、廃陶器粉末F

で着色したモルタルおよび廃陶器粉末Fの色彩値もプロットした。廃陶器粉末の置換方法や粗骨材の有無に関わらず、廃陶器置換率の変化に伴う色彩値の変化はほぼ同様の傾向を示しており、数値もほぼ一致している。一般に、モルタルやコンクリートなどのセメント系材料の色彩は、水セメント比や使用材料の種類によっても変化するものと考えられる。しかし、廃陶器粉末による着色を考える場合には、廃陶器粉末の色彩値とともに、廃陶器置換率がセメント系材料の色彩値や着色効果に大きく寄与しているものと考えられる。

c) 色彩の経年変化

着色材として要求される重要な性能の一つに長期間にわたって変退色しないかどうか、いわゆる色彩の耐候性が挙げられる。この耐候性の評価には、塗料などの場合暴露促進試験が用いられるが、一般に屋外で使用するコンクリートの場合、日射、雨や風、気温などあらゆる気候条件が複雑に重なり合っており再現することは困難とされる²⁾。そこで、廃陶器粉末Fにより着色したコンクリート供試体を常に日射や風雨に曝される屋外に暴露し、その供試体表面の色彩値の経年変化を長期的に計測した。図-10に暴露4年経過時点までの色彩経時変化を示す。図中には、日射や風雨の影響を全く受けない屋内に暴露した供試体の色彩値も併せてプロットした。明度を表す L^* 値は、廃陶器置換率に関わらず、暴露初期において数値が大きく変化している。これは、供試体が暴露環境下にて乾燥するに伴い、表面が淡白色になったためと考えられる。また、暴露1年以降については、ほぼ一定の数値で推移している。 a^* 値と b^* 値についても、供試体の乾燥による影響で数値に変動が観察されるが、暴露1年以降の数値については、屋外暴露と屋内暴露で数値に大きな差異はなく、ほぼ一定の数値で推移している。目視による外観観察においては、屋外暴露した場合は、風雨等に曝され乾湿の繰返しを受けるため、供試体表面の色に若干のむらが生じる傾向にはあるが、色彩には大きな変化は認められない。このように、暴露4年が経過した時点では、廃陶器粉末は着色材として十分な耐候性を有していると判断されるが、今後さらにデータの蓄積が必要である。

4. 既存景観素材の色彩調査結果との比較検討

(1) 概要

本研究は、日本の伝統的景観素材である土壁や土塀のような意匠性を持ちながら強度と耐久性にも優れる意匠構造材料の開発を目的としている。前述のように、廃陶器粉末を着色材として用いたモルタルおよびコンクリートは、強度や耐久性の面で問題はなく、普通コンクリー

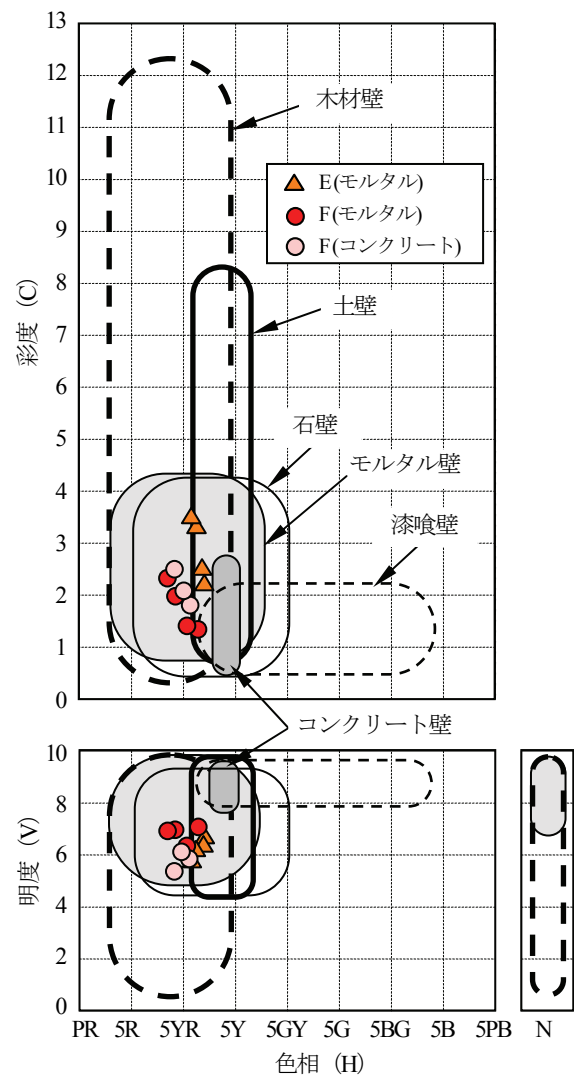


図-11 マンセル色度図

トと同等以上の性能を発揮すること、廃陶器粉末の種類や置換率を適切に選定することで着色材として機能することを確認した。本章では、実際の既存景観との調和性に着目し、廃陶器粉末により着色した材料の色彩と既存景観色との関係を明らかにし、景観素材としての適用性について検討を行った。

(2) 既存景観素材の色彩調査概要

色彩の比較対象は、寺社・仏閣が多く存在する京都東山伝統的地区（東山山麓）における街路沿いの直立壁面材料を対象とした。これは、日本規格協会発行のJIS標準色票（JIS Z 8721準拠、光沢版）を用いた視感測色によって得られたものであり、色彩値はマンセル表色系で表記される⁹⁾。直立壁面材料とは、主に木材壁、モルタル壁、土壁、石壁、漆喰壁などが対象となる。

(3) 色彩調査結果との比較検討

図-11に既存景観素材の色彩調査結果⁹⁾をマンセル色度図にして示す。図中には、各素材に対して視感測色によ

り得られたデータが分布する範囲を枠で囲った。また、2章および3章にて着色効果が得られた廃陶器粉末EおよびFにより着色したモルタルおよびコンクリートの材齢28日における色彩値をプロットした。比較対象とした既存景観素材の色彩は、その素材の種類により差異はあるが、全体としては色相がY（黄）～R（赤）、明度は6～8の高明度、彩度は1～3の低彩度に分布する傾向にある。比較の結果、廃陶器粉末で着色したモルタルおよびコンクリートの色彩値は、既存景観素材、特に土壁や石壁、モルタル壁が集中する範囲内にプロットされることがわかる。一方、ここで比較対象とした既存景観素材と同じく、日本の伝統的な地域の都市を構成する材料は、基本的には地場で産出する建材を使用して建てられてきた。その色彩は地域の自然界の基調となっている土や石や樹木の木肌とほぼ一致しており、具体的にはYR（黄赤）系からY（黄）系の低彩度領域にある¹²⁾ことが知られている。したがって、廃陶器粉末により着色した材料は、伝統的地域の景観との調和性がある素材として適用の可能性があると考えられる。

5. 廃陶器粉末による着色と表面処理を施したコンクリート壁供試体の意匠性評価

(1) 概要

前章において、廃陶器粉末により着色したモルタルおよびコンクリートの色彩や景観との調和性は明らかとなった。しかし、実際の景観の中でその意匠性を定量的に評価するには、色彩値という物理量だけの評価だけでは足りず、人々が感じる印象（心理）を捉える、すなわち視覚心理的な評価が必要であると考えられる。また、景観素材への適用を想定した場合には、着色による効果だけでなく、その壁面の表面テクスチャも意匠性に大きな影響を与えると考えられる。そこで本研究では、着色と各種表面処理方法をパラメータとしたコンクリート壁供試体を対象として視覚心理評価実験を行い、廃陶器粉末による着色効果や表面テクスチャが人の心理に及ぼす影響について検討した。

(2) 視覚心理評価実験方法

図-12にコンクリート壁供試体の外観を示す。壁供試体の寸法は、400×400×100mmとした。着色材としては廃陶器粉末Fを使用し、コンクリートは表-3に示す廃陶器置換率50%（C50-50）と0%（C50-0）の2種類とした。表面処理方法は、一般に美観・景観向上のための仕上げ方法として外壁面に使用されている骨材あらわしと模様付き打放し³⁾に、模様なしの打放しを含めた4種類とした。骨材あらわしについては、打設後、コンクリート表面に

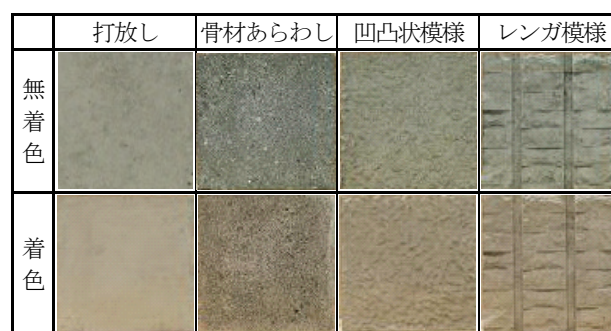


図-12 視覚心理評価実験に使用した壁供試体

表-4 SD法に用いた形容詞対

No.	形容詞対	No.	形容詞対
1	重たいー軽い	13	不自然なー自然な
2	もろいー丈夫な	14	暗いー明るい
3	かたいーやわらかい	15	くすんだー鮮やかな
4	刺激的なー穏やかな	16	地味なー派手な
5	冷たいー暖かい	17	陰気なー陽気な
6	薄っぺらなー深みのある	18	つまらないー楽しい
7	醜いー美しい	19	沈滞したー活気のある
8	親しみにくいー親しみやすい	20	ごみごみしたーすっきりした
9	殺伐としたー雰囲気がある	21	窮屈なー伸び伸びした
10	近代的なー伝統的な	22	うっとおしいーさわやかな
11	新しいー古い	23	平凡なー特徴的な
12	洋風なー和風な		

硬化遅延剤を塗布し、材齢1日で高圧水によって表層を洗い流すことにより骨材を露出させた。模様付き打放しについては、発泡スチロール製の化粧型枠を使用し、型枠に設置しコンクリート打設後、材齢1日で脱型して仕上げた。模様については、ランダムな凹凸の模様を設けたものとレンガ割り肌状の模様を設けたものの2種類とした。

実験方法には、イメージの計量手段として一般に用いられるSD（Semantic Differential）法を用いた。表-4に視覚心理評価実験に用いた23の形容詞対を示す。評価対象物のイメージ評価心理を把握するため、各形容詞対を5段階（1～5）で数値化し被験者全員の平均値を求め、算出した値を用いて因子分析を行った。供試体毎の評価は因子得点で表した。被験者は、立命館大学理工学部環境都市系の学生および教職員を含めた38名である。なお、評価実験に際しては、伝統的な町並みの景観写真をスライドで掲示し、その中に壁供試体が調和するかどうかを念頭において評価するように依頼した。

(3) 表面性状の測定方法

a) 色彩

色彩は、壁供試体表面に対して接触型分光色差計を用いて $L^*a^*b^*$ 表色系により明度 L^* と彩度 C^* を測定した。なお、彩度 C^* は $\sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2}$ で表示した。

b) 表面テクスチャの測定

表面テクスチャを数値情報として抽出する方法にはい

表-5 因子分析結果 (因子負荷量)

因子	形容詞対	因子 1	因子 2
1	陽気な-陰気な	0.990	-0.044
	親しみやすい-親しみにくい	0.980	-0.025
	明るい-暗い	0.980	-0.032
	雰囲気のある-殺伐とした	0.978	0.092
	鮮やかな-くすんだ	0.969	-0.040
	伸び伸びした-窮屈な	0.966	0.026
	楽しい-つまらない	0.956	0.002
	暖かい-冷たい	0.955	0.148
2	伝統的な-近代的な	-0.151	0.959
	和風な-洋風な	-0.456	0.804
	自然な-不自然な	0.344	0.795
寄与率(%)		61.1	16.9
累積寄与率(%)		61.1	78.0

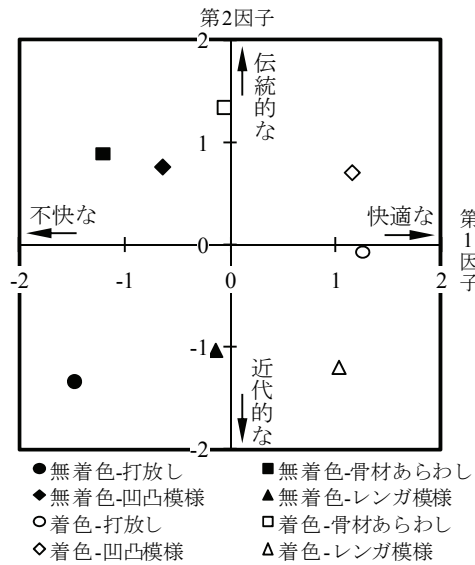


図-13 因子分析結果

くつかある¹³⁾が、本研究では2次元フーリエ変換を用いた画像解析手法を用いて表面テクスチャ特徴の抽出を行った。2次元フーリエ変換より得られる周波数 (f) - パワースペクトル曲線において、テクスチャの大きさや形状を特徴付ける周波数領域 ($3.04 < \log f < 4.5$) の傾き¹⁴⁾により表面テクスチャを数値化した。細かい濃淡の繰返しのあるテクスチャが分散している表面では、特徴領域における傾きが小さくなり、逆に大まかなテクスチャがある表面では傾きが大きくなる。

(4) 実験結果および考察

a) 因子分析結果

表-5に因子分析の結果を示す。因子分析の結果、2つの因子軸で累積寄与率78.0%を得た。第1因子は、「陽気な-陰気な」「親しみやすい-親しみにくい」「明るい-暗い」等の因子負荷量が高く、『快適性因子』と命名した。第2因子は、「伝統的な-近代的な」「和風な-洋風な」「自然な-不自然な」の形容詞対で説明される

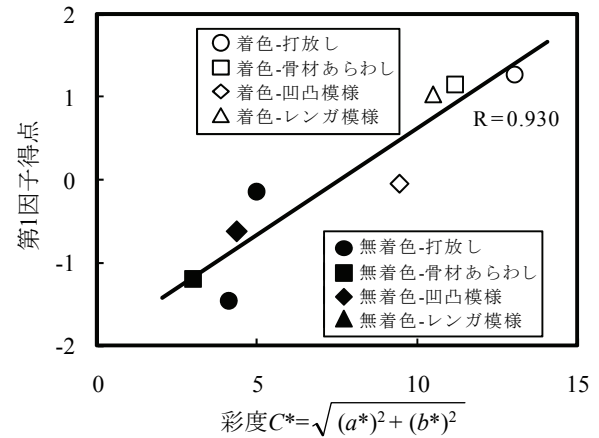
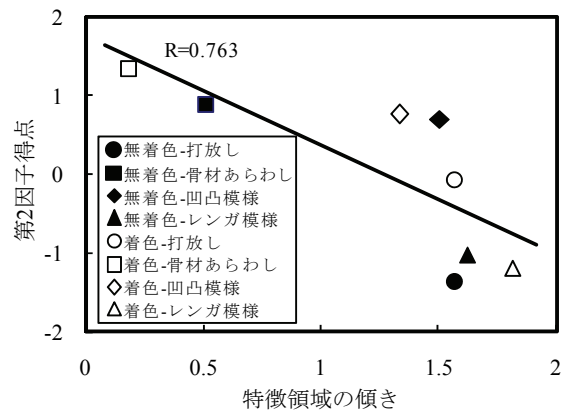
図-14 第1因子得点と彩度 C^* の関係

図-15 第2因子得点と特徴領域の傾きの関係

評価尺度であり、『歴史性因子』と命名した。

図-13に各供試体の因子得点を2軸のグラフ上にプロットしたものを示す。第1軸（横軸）の『快適性因子』に着目すると、廃陶器粉末により着色した場合は得点が高く、陽気で親しみやすく快適性を高める効果があるといえる。第2軸（縦軸）の『歴史性因子』については、着色の有無に関わらず、骨材あらわしが最も得点が高く、次いで凹凸模様の打放しであった。レンガ割り肌状模様の打放しでは着色の有無に関わらず得点は低く、「近代的」で「洋風」なイメージであることがわかった。

b) 色彩が意匠性に及ぼす影響

図-14に第1因子得点と彩度 C^* の関係を示す。ここで、彩度 C^* とは、色の鮮やかさを示す数値であり、彩度 C^* が大きくなると色鮮やかに、逆に小さくなるとくすんだ色合いとなる。この図より、第1因子得点は、彩度 C^* と相関が高いことがわかる。したがって、廃陶器粉末による着色により彩度 C^* を高めることは、コンクリート壁体に対して人が感じる快適性を高める有効な手法といえる。なお、彩度 C^* と第2因子得点および明度 L^* と各因子得点には、相関は認められなかった。

c) 表面テクスチャが意匠性に及ぼす影響

図-15 に第 2 因子得点と周波数特徴領域の傾きの関係を示す。これより、特徴領域の傾きが小さくなるほど、第 2 因子得点が高くなる傾向を示した。これは、歴史性に対して、表面テクスチャの影響があることを示しており、細かい凹凸状のテクスチャを呈している場合に歴史性や伝統的イメージが高まるものと考えられる。したがって、細かい凹凸状の模様を壁面に表現することは、歴史性や伝統性を感じさせる上で有効な手法と考えられる。なお、特徴領域の傾きと第 1 因子得点には相関は認められなかった。

6. まとめ

本研究は、土壁および土塀のような意匠性と強度・耐久性を両立する意匠構造材料の開発を目的として、廃陶器粉末を着色材として使用した場合のモルタルおよびコンクリートの力学的特性とともに、廃陶器粉体による着色効果や既存景観への調和性について実験的検討を行った。以下に、本研究から得られた知見をまとめる。

- (1) Y (黄) から R (赤) を発色する廃陶器粉末は、その色彩値 a^* が 15 以上かつ b^* が 25 以上の色彩値を有するものでモルタルおよびコンクリートの着色材として機能した。
- (2) 廃陶器粉末を着色材として用いたコンクリートは、強度および収縮特性に問題はなく、水セメント比や廃陶器置換率を適切に設定することで普通コンクリートと同等以上の性能を有する。
- (3) 廃陶器粉末により着色したコンクリートは、屋外暴露 4 年が経過した時点ではその色彩に大きな変化はなく、色彩の耐候性を有している。
- (4) 廃陶器粉末で着色したモルタルおよびコンクリートの色彩値は、土壁や石壁、モルタル壁などの景観素材と概ね一致しており、伝統的地域の景観との調和性がある素材として適用の可能性はある。
- (5) 廃陶器粉末によるコンクリートの着色は、コンクリート壁体から人が感じる快適性を高めると同時に、細かい凹凸状のテクスチャが歴史性や伝統的

イメージの向上に寄与することがわかった。

謝辞：本研究の遂行にあたり、滋賀県工業技術総合センター信楽窯業技術試験場および三重県工業研究所窯業研究室のご協力を頂いた。ここに記して、深く感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 近藤高規：カラーコンクリートの着色技術の現状と課題、コンクリート工学, Vol.32, No.8, pp.24-32, 1994.8.
- 2) 近藤高規：景観材料としてのカラーコンクリートの適用性、コンクリート工学, Vol.41, No.9, pp.23-29, 2003.9.
- 3) 坂田 昇：コンクリートの表面仕上げ・表面保護 6.各種仕上げの特長 打放し系、コンクリート工学, Vol.41, No.9, pp.113-118, 2003.9.
- 4) 友竹博一、清水利康、坂本一樹、鳥居和之：廃瓦再生骨材を使用したコンクリート製品の諸性質、コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.1355-1360, 2003.7.
- 5) 上原 匠、梅原秀哲、友竹博一、篠田泰宏：瓦廃材を細骨材として用いたコンクリートの物性、コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.1405-1410, 2005.7.
- 6) 井上正一、黒田 保、吉野 公、金子泰治：廃瓦を再骨材として用いたコンクリートの物性、材料, Vol.56, No.8, pp.730-735, 2007.8.
- 7) 坂本樹彦、宮里心一、柴藤大希、中川貴至：色付ガラス片あるいは衛生陶器片を有効利用したリサイクル率 70% のモルタルの作製、土木学会第 59 回年次学術講演会講演概要集 V, pp.405-406, 2004.9.
- 8) 川崎敏弘、加藤光彦、平尾和洋、山本直彦：京都東山山麓伝統地区における地域色と直立壁面材料の視覚的テクスチャーの定量化、日本建築学会近畿支部研究報告集, 第 44 号, 計画系, pp.461-464, 2004.
- 9) (社)日本材料学会編：コンクリート混和材料ハンドブック, pp.437, エヌ・ティー・エス, 2004.4.
- 10) (財)日本色彩研究所：色彩管理と色差計の活用、日本電色工業, 2001.
- 11) 日本建築学会編：建築の色彩設計法, 丸善, 2005.4.
- 12) 吉田慎悟：景観法を活用するための環境色彩計画, pp.34-42, 丸善, 2007.1.
- 13) 樋渡涓二編：画像工学ハンドブック, pp.236-243, 朝倉書店, 1988.
- 14) 北垣亮馬、兼松 学、野口貴文：2 次元フーリエ変換による打放しコンクリート視覚情報の定量的評価に関する研究、日本建築学会構造系論文集, 第 597 号, pp.33-38, 2005.11.

(2009. 11. 30 受付)

DEVELOPMENT OF DESIGN STRUCTURAL MATERIALS BY USING WASTE EARTHENWARE POWDER AND CEMENTITIOUS MATERIALS

Masumi INOUE, Takahisa OKAMOTO, Kazuhiro HIRAO and Takayuki KOJIMA

The purpose of this study is the development of design structural material which has strength and durability with design of a traditional landscape in Japan. In this study, the mechanical properties and the color evaluation of mortar and concrete colored by using 8 types of the waste earthenware powder were examined.

As a result, it was verified that the strength and durability of the colored concrete were equivalent to those of normal concrete by determining the mix proportion appropriately. And the color of the colored concrete was generally in agreement with that of wall materials in the traditional area. Furthermore, the effects of coloring by using waste earthenware powder and surface treatment methods of design of concrete wall were examined.