

論文 廃陶器微粉末を用いたコンクリートの力学的特性および色彩評価

井上 真澄^{*1}・平尾 和洋^{*2}・児島 孝之^{*3}

要旨：本研究では、都市景観への調和を可能にする意匠性と構造性能を両立する防災構造材料の開発を最終目標に、コンクリートに色彩を付与する着色材料として廃陶器の再利用に着目し、これを微粉砕してモルタルおよびコンクリートに混入した場合の力学的特性および色彩について検討を行った。その結果、廃陶器微粉末を細骨材置換したコンクリートは、京都東山伝統的地区の景観素材の色彩調査結果を概ね満足するとともに、廃陶器微粉末無置換のコンクリートと同等以上の強度を発現することを確認した。

キーワード：廃陶器微粉末、強度、色彩、リサイクル、着色材

1. はじめに

京都に代表される歴史的な都市において、地震や火災など自然災害に対する都市防災を考える場合、土木・建築の防災構造材料として強度と耐火性に優れるコンクリートの果たす役割は非常に大きい。また、同時に既存の町並みへの調和など都市景観の保全に対して十分な配慮が要求される。一般にコンクリートは、構造材料として優れた性能を有する反面、木材や石のような天然の素材に比べて無彩色で単調なため、見る人に人工的な印象を与えやすい。この場合、周辺環境に合わせて顔料等により着色をするカラーコンクリートやコンクリートの表面処理(洗い出し、研磨など)、化粧型枠によって様々な凹凸をつけるなどの方策が有効である。

一方で、環境に対する取り組みは各業界において年々活発化しており、ゴミ処理も廃棄から分別回収によるリサイクル再資源化、粗大ゴミもリサイクル法による収集で、資源の再利用およびリサイクルが整備されつつある。陶器業界においても資源の枯渇化、廃棄物処理場の問題等から陶器製品のリサイクル再資源化が求められているが、陶器製品の製造過程で発生する不良品は、産業廃棄物として埋め立て処理されて

いるのが現状である。舗装材料や陶器製品への再利用に関する技術開発が進められているものの、そのリサイクル率は低く新たな用途の開発が望まれる。

本研究は、都市景観への調和を可能にする意匠性と構造性能を両立する防災構造材料の開発をめざす一連の研究の一部をなすものである。ここでは、コンクリートに色彩を付与する方策の一手段として、廃陶器のコンクリート用混和材料としての再利用に着目し、これを微粉砕してモルタルおよびコンクリートに混入した場合の力学的特性および色彩について検討を行った。陶器類には様々な色彩を有するものがあり、微粉砕してコンクリートに混入できれば着色効果が期待される。また、資源の有効利用の観点からも廃陶器の混和材料としての再利用に関する検討は非常に有意義と考えられる。

2. 廃陶器微粉末および使用材料

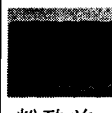
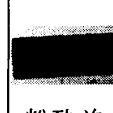
廃陶器は植木鉢および外装用タイルを対象とし、色彩の異なる計4種類を選定した。採取後廃陶器は、ジョークラッシャ、ロールクラッシャ、ボールミルを用いて順に微粉砕した。表-1に廃陶器微粉末の物性を示す。一般に着色材の

*1 立命館大学 COE 推進機構 ポストドクトラルフェロー 博(工) (正会員)

*2 立命館大学 理工学部建築都市デザイン学科 助教授 博(工)

*3 立命館大学 理工学部建築都市デザイン学科 教授 工博 (正会員)

表-1 使用材料

材料	主な性質			
セメント	C	普通ポルトランドセメント (密度 3.16g/cm ³ , 比表面積 3260cm ² /g)		
廃陶器 微粉末 (P)	植木鉢 PA (密度 2.63g/cm ³)	外装用タイル PB (密度 2.55g/cm ³)	外装用タイル PC (密度 2.64g/cm ³)	外装用タイル PD (密度 2.52g/cm ³)
	 粉碎前	 粉碎前	 粉碎前	 粉碎前
	 粉碎後	 粉碎後	 粉碎後	 粉碎後
細骨材	S	野洲川産川砂 (表乾密度 2.61g/cm ³ , F.M.2.68, 吸水率 1.25%)		
粗骨材	G	高槻産硬質砂岩碎石 (表乾密度 2.70g/cm ³ , F.M.6.78, 吸水率 0.92%, 最大骨材寸法: 20mm)		
混和剤	Ad ₁	AE 助剤 (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)		
	Ad ₂	AE 減水剤 (主成分: リグニンスルホン酸塩とポリオール複合体)		
	Ad ₃	AE 助剤 (主成分: アルキルアリルスルホン酸塩)		

粒子径は 0.1~10 μm 程度であり, 着色力の大きさは粒子径が小さいほど大きい¹⁾。しかし, 廃陶器の粉碎過程において, セメントの粒度より細かくした場合, 乱反射の影響により粉体の色彩が薄れる傾向にあったため, セメントの粒度を目安として粉碎を行った。図-1 に各廃陶器微粉末の粒度曲線を示す。粒度は, レーザ回折式粒度分布測定装置を用いて測定した。

表-1 にはモルタルおよびコンクリートの使用材料の物性も同時に示す。セメントには普通ポルトランドセメントを使用した。

3. 色彩の評価方法と指標

廃陶器微粉末を用いたモルタルおよびコンクリートの色彩は, 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 400~700nm, 測定波長間隔は 20nm, 反射率測定範囲は 0~150%, 分解能は 0.01%, 測色条件は光源 D₆₅, 視野角条件 10°C, 測定径 8mm 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

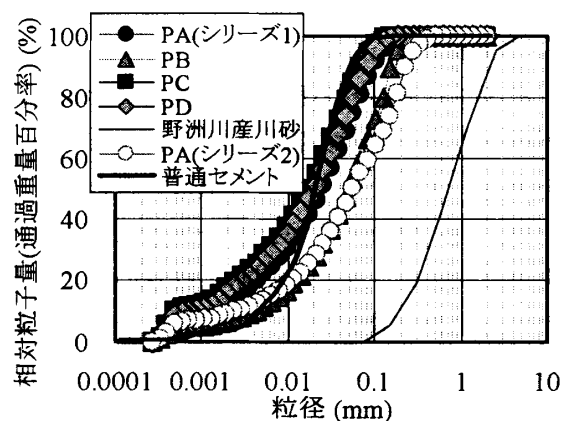


図-1 廃陶器微粉末の粒度曲線

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。一方, 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と鮮やかさの関係を表す²⁾。以下に, $L^*a^*b^*$ 表色系の表記例を示す。

表記例) $L^*=36.94, a^*=21.68, b^*=24.23$ [茶 ■■■]

一方, 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 の数字と記号(赤は R, 黄赤は 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。

表記例) 5R 4/14 [鮮やかな赤 ■■■]

本研究では, 京都に代表される歴史的な都市景観に調和できる意匠性と構造性能を有する材

外壁	土壁						木材壁						コンクリート		漆喰壁						石壁
色相	10YR	2.5Y			5Y			2.5R	2.5YR			2.5Y	5Y	5YR	2.5Y			5Y	2.5Y		
9																					
明8																					
7																					
度6																					
5																					
彩度	3 4	1 2 3 4 6	1 2 3 4			1 2 3 4	1 2 3 4	1 2 3 4	1 2 3 4 6	1 2 3 4 6	1 2	1 2	2 3	1 2 3 4 6	1 2	1 2	1 2				

図-2 東山山麓街路沿いの外壁カラーチャート

料の開発を最終目標としている。そこで廃陶器微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指標には、京都東山伝統的地域色として、東山山麓街路沿いの外壁(土壁、モルタル壁、木材壁、コンクリート壁など景観素材)を対象とした JIS 標準色票(JIS Z 8721 準拠、光沢版)による色彩調査結果(マンセル表色系)³⁾を用いた。図-2 に外壁素材のカラーチャートを示す。素材により傾向は異なるが、全体として色相は Y(黄)から R(赤)、明度は高明度、彩度は低彩度に分布している。

4. モルタルによる試験(シリーズ 1)

4.1 実験概要

(1) 実験要因

表-2 にシリーズ 1 の実験要因を示す。コンクリートによる試験に先立ち、表-1 に示した 4 種類の廃陶器微粉末をモルタルに細骨材置換した場合、置換率がモルタルの圧縮強度と色彩に及ぼす影響を確認した。供試体は $\phi 50 \times 100\text{mm}$ の円柱供試体とし、材齢 28 日において圧縮強度試験と色彩評価を行った。

(2) モルタルの配合

モルタルの配合は、水セメント比[W/C]は 75%、細骨材セメント比[(S+P)/C]は 3.5 とした。全粉体質量[C+P]に占める廃陶器微粉末質量[P]の割合(以下、廃陶器微粉末置換率[P/(C+P)])は 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(Ad₁)を用いて調整した。

(3) モルタル供試体の養生方法と試験項目

供試体は、打設後型枠上面をガラス板で覆い、

表-2 実験要因(シリーズ 1)

要 因		仕 様
廃陶器微粉末		PA, PB, PC, PD
配合要因	水セメント比[W/C]	75%
	細骨材セメント比[(S+P)/C]	3.5
	廃陶器微粉末置換率[P/(C+P)]	0, 20, 30, 40, 50%
測定項目		圧縮強度(材齢 28 日)
		色彩 ($L^*a^*b^*$ 値, H V/C 値)

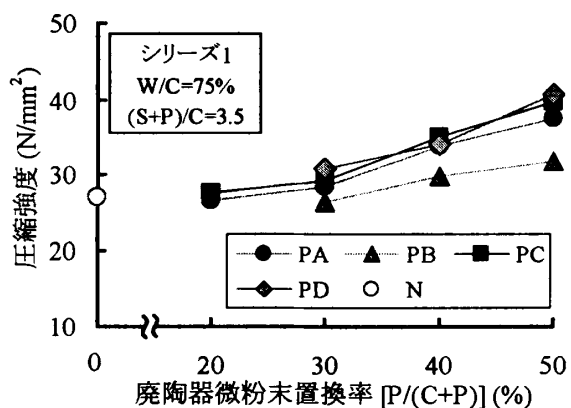


図-3 圧縮強度と廃陶器微粉末置換率の関係

2 日間恒温恒湿室($20 \pm 1^\circ\text{C}$, $\text{RH}90 \pm 5\%$)中に静置し、その後脱型し材齢 28 日まで標準水中養生($20 \pm 1^\circ\text{C}$)を行った。

圧縮強度は、JSCE-G 506 1999「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」に準じて材齢 28 日で試験を行った。色彩は、脱型後恒温恒湿室($20 \pm 1^\circ\text{C}$, $\text{RH}60 \pm 5\%$)内で材齢 28 日まで養生した供試体の型枠面に対して分光色差計により測色した。

4.2 実験結果および考察

(1) 圧縮強度と廃陶器微粉末置換率の関係

図-3 に圧縮強度と廃陶器微粉末置換率の関係を示す。廃陶器微粉末を細骨材置換したモルタルは、置換率の増加に伴い圧縮強度が大きく

表-3 モルタルと廃陶器微粉末の色彩値

供試体	色 彩	$L^*a^*b^*$ 表色系			マンセル 表色系 H V/C
		L^*	a^*	b^*	
N(比較)		67.49	0.71	4.89	9.0Y 6.7/0.7
PA(粉体)		56.99	17.82	17.39	1.3YR 5.7/4.8
PA-20		66.68	2.96	7.70	9.1YR 6.6/1.3
PA-30		66.90	3.89	7.61	7.4YR 6.6/1.4
PA-40		66.70	5.75	8.99	5.5YR 6.6/1.9
PA-50		63.45	7.85	10.38	4.2YR 6.3/2.3
PB(粉体)		67.45	9.15	12.51	4.4YR 6.7/2.8
PB-30		69.12	0.74	6.55	2.8Y 6.9/0.9
PB-40		68.98	1.69	7.35	1.0Y 6.8/1.1
PB-50		68.76	1.96	6.79	0.3Y 6.8/1.1
PC(粉体)		58.48	2.79	4.66	6.8YR 5.8/0.9
PC-20		65.50	0.54	5.57	3.2Y 6.5/0.8
PC-30		66.94	0.63	4.73	2.5YR 6.6/0.7
PC-40		63.12	1.01	5.09	1.6Y 6.2/0.8
PC-50		63.96	1.14	4.58	0.9Y 6.3/0.7
PD(粉体)		76.22	-2.25	-1.16	4.3B 7.6/0.6
PD-30		69.80	-0.80	5.34	8.6Y 6.9/0.7
PD-40		70.01	-0.73	5.81	7.8Y 6.9/0.8
PD-50		69.73	-0.96	3.90	0.6GY 6.9/0.5

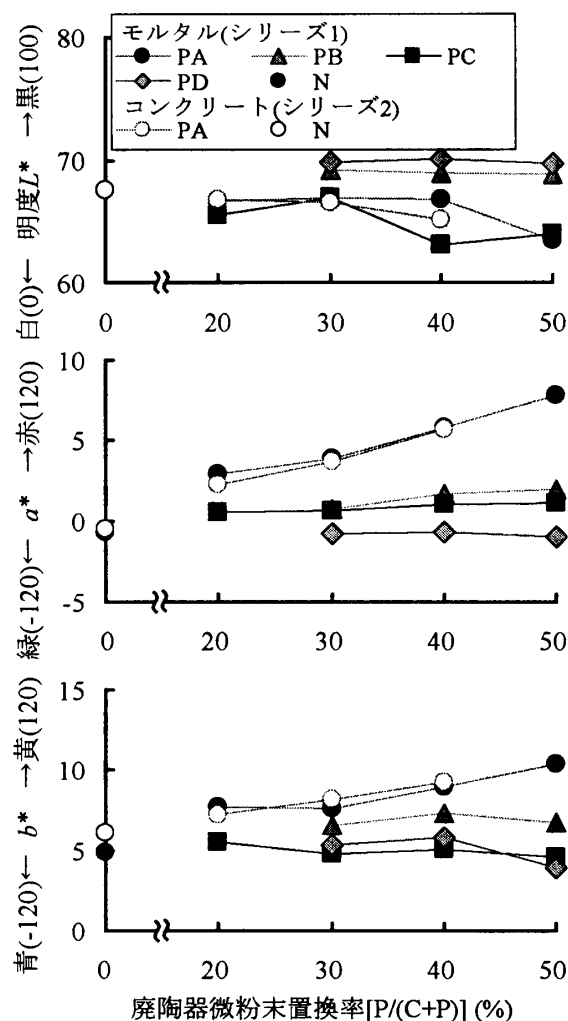
注)供試体名：PA(廃陶器の種類)-20(廃陶器微粉末置換率)
PA, PB, PC, PD：廃陶器微粉末のみ

なる傾向にある。これは、廃陶器微粉末量が増加するほど硬化体組織が緻密化すること、廃陶器微粉末がモルタルの練混ぜ水を吸水し見かけの水セメント比が低下することに起因すると考えられる。廃陶器微粉末 PB は他の廃陶器に比べ強度が低い、これは粉碎後の粒度が若干大きいことが原因と考えられる。

(2) 色彩評価

表-3 にモルタルと廃陶器微粉末の色彩測定結果を、図-4 に $L^*a^*b^*$ 値と廃陶器微粉末置換率の関係を示す。明度を表す L^* 値は、廃陶器の種類によって若干の変動はあるが、廃陶器微粉末置換率に関わらず比較用の無置換供試体とほぼ同程度の値を示した。色相と彩度を表す a^* 値と b^* 値は、赤色系の廃陶器微粉末 PA の場合、置換率の増加に伴い各値が明確に増加する傾向にある。一方、PA 以外の廃陶器微粉末に関しては、置換率の増加に伴う値の変化が小さく、無置換供試体と明確な差異は得られなかった。

一方、マンセル表色系において廃陶器微粉末 PA を用いたモルタルの色彩は、色相が YR(黄赤)、

図-4 $L^*a^*b^*$ 値と廃陶器微粉末置換率の関係

明度が 6 から 7 の中高明度、彩度が 1 から 3 の低彩度に分布しており、京都東山伝統的地区の景観素材を対象とした色彩調査結果³⁾を概ね満足した。

5. コンクリートによる試験(シリーズ 2)

5.1 実験概要

(1) 実験要因

表-4 にシリーズ 2 の実験要因を示す。本研究は、廃陶器微粉末をコンクリート用着色材料として再利用することを目的としている。そこでシリーズ 1 の結果より着色効果が最も高かった赤色系の廃陶器微粉末 PA を細骨材置換したコンクリートを作製し、そのフレッシュ性状、各種強度、変形特性および色彩について実験的に検討を行った。

(2) コンクリートの配合

表-5 にコンクリートの示方配合を示す。水セメント比[W/C]は 60%，廃陶器微粉末置換率[P/(C+P)]は 0～40%となるように配合を決定した。目標スランブは 8 ± 2 cm，目標空気量は 4 ± 1 %とした。スランブ試験時のタッピングと目視観察により十分な粘性を確認し，スランブと空気量調整のため細骨材率と混和剤量を調整した。

(3) コンクリート供試体の養生方法と試験項目

各種強度試験用供試体は材齢 1 日で脱型後，所定の試験材齢(7, 28, 91 日)まで標準水中養生($20 \pm 1^\circ\text{C}$)を行った。

試験項目は，JIS による試験方法に準拠し，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，乾燥収縮の測定を行った。乾燥収縮試験は，供試体($100 \times 100 \times 400$ mm)を材齢 7 日まで標準水中養生した後， $20 \pm 1^\circ\text{C}$ ，RH60 ± 5 %の環境下で実施した。乾燥収縮ひずみの測定は，コンタクトゲージ法で行った。

5.2 実験結果および考察

(1) フレッシュ性状

表-5 にコンクリートのフレッシュ試験結果

表-4 実験要因(シリーズ 2)

要因	仕様
廃陶器微粉末	PA
配合要因 水セメント比[W/C]	60%
廃陶器微粉末置換率[P/(C+P)]	0, 20, 30, 40%
測定項目	圧縮，曲げ，割裂引張強度 静弾性係数，乾燥収縮 色彩 ($L^*a^*b^*$ 値，H V/C 値)

を示す。スランブおよび空気量は，廃陶器微粉末を細骨材に置換しても混和剤の使用により，目標値の許容範囲内に収まった。本実験の配合および置換率の範囲であれば，廃陶器微粉末を細骨材の一部に置換したコンクリートは，そのフレッシュ性状を管理できることが明らかとなった。

(2) 強度および変形特性

図-5 に材齢 7, 28, 91 日での各種強度試験の結果を，図-6 に静弾性係数試験結果を示す。シリーズ 2 では粒度の若干大きい廃陶器微粉末を使用した，シリーズ 1 のモルタル試験結果と同様に圧縮強度は廃陶器微粉末置換率の増加に伴い大きくなる傾向にあり，材齢 28 日では最大

表-5 コンクリートの示方配合およびフレッシュ試験結果

配合名	P/(C+P) (%)	P/(P+S) (%)	W/C (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m^3)					混和剤(ml/m^3)		スランブ (cm)	空気量 (%)
					W	C	P	S	G	Ad ₂	Ad ₃		
N	0	0	60	48	174	290	0	870	974	290	870	7.5	3.7
PA-20	20	8.7		46			72	762	1012	544	1450	9.0	4.5
PA-30	30	15.6		44			125	674	1050	829	1658	8.5	3.3
PA-40	40	25.4		42			194	569	1088	967	2902	9.0	3.1

注)Ad₃のAE助剤は1%溶液を使用，配合名：PA(廃陶器の種類)-20(廃陶器微粉末置換率)

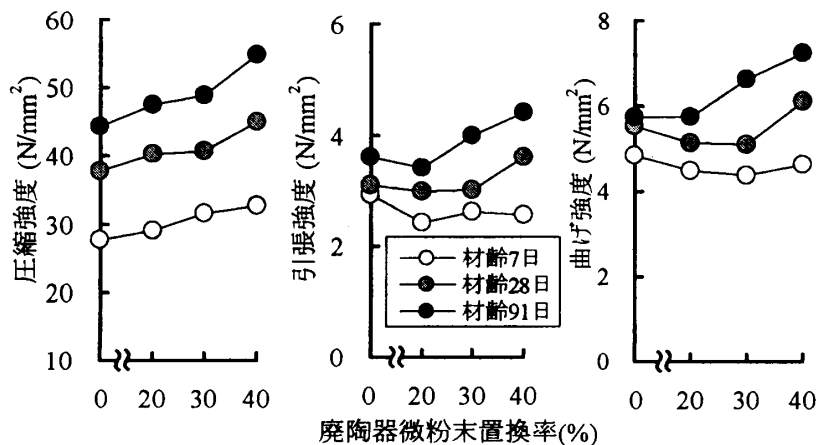


図-5 各種強度と廃陶器微粉末の関係

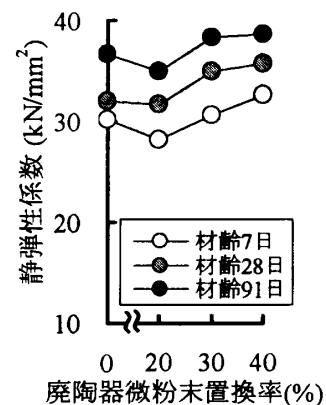


図-6 静弾性係数と廃陶器微粉末の関係

19%の強度増加を示した。引張および曲げ強度に関しては、若材齢において廃陶器微粉末置換によっては若干強度低下を示すものもあるが、全体としては無置換の場合と同程度の値を示した。静弾性係数は、材齢 7 日の置換率 20%において若干低下する以外は、圧縮強度と同様置換率の増加に伴い大きくなる傾向にあった。

図-7 に乾燥収縮ひずみの経時変化を示す。廃陶器微粉末を細骨材置換した場合、乾燥収縮は若干大きくなる傾向にあるが、その差異は小さい。また、置換率の変化に伴う乾燥収縮の差異はほとんど観察されなかった。

(3) 色彩評価

表-6 に色彩測定結果を示す。図-4 にはコンクリートの色彩測定結果もプロットした。モルタル(シリーズ 1)とコンクリート(シリーズ 2)で廃陶器微粉末置換率が同じでも、水セメント比、粗骨材の有無など配合、使用材料が異なるため、 $L^*a^*b^*$ 値およびマンセル値に若干の差異がみられる。しかし、 $L^*a^*b^*$ 表色系において置換率の増加に伴い、 a^* 値および b^* 値は増加傾向を示しており、コンクリートに置換した場合においても廃陶器微粉末による着色効果が得られた。また、廃陶器微粉末を置換したコンクリートのマンセル値は、京都東山伝統的地区の景観素材を対象とした色彩調査結果³⁾を概ね満足した。

6. まとめ

- (1) 廃陶器微粉末を細骨材置換したモルタルの圧縮強度は、置換率の増加に伴い大きくなった。
- (2) 廃陶器微粉末を細骨材置換したコンクリートの圧縮強度および静弾性係数は、置換率の増加に伴い大きくなった。引張強度と曲げ強度は、置換率によっては若干小さな値を示すものもあるが、全体としては無置換の場合と同程度の値を示した。
- (3) 赤色系(植木鉢)の廃陶器微粉末を用いた場合、モルタルおよびコンクリートへの着色効果が高く、廃陶器微粉末置換率 20~40%の範囲で細骨材置換した場合、京都東山伝統的地区の景観素

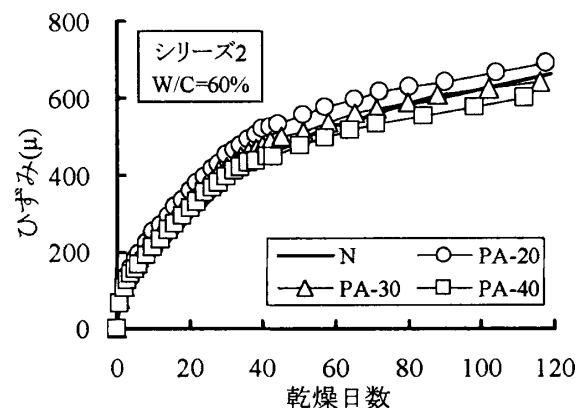


図-7 乾燥収縮ひずみの経時変化

表-6 コンクリートと廃陶器微粉末の色彩値

供試体	色彩	$L^*a^*b^*$ 表色系			マンセル表色系 H V/C
		L^*	a^*	b^*	
N(比較)		67.56	-0.55	6.09	7.4Y 6.6/0.8
PA(粉体)		56.27	17.71	18.33	1.9YR 5.6/4.8
PA-20		66.71	2.25	7.28	0.1Y 6.6/1.2
PA-30		66.45	3.71	8.18	8.1YR 6.6/1.5
PA-40		65.08	5.67	9.25	6.0YR 6.5/1.9

注) PA：廃陶器微粉末のみ

材を対象とした色彩調査結果を概ね満足した。

以上の力学的特性および色彩に関する検討結果より、廃陶器微粉末 PA はコンクリート用着色材料として適用の可能性を有すると考えられる。

謝辞

本研究の遂行にあたり、滋賀県工業技術開発センター信楽窯業技術試験場のご協力を頂きました。ここに記して、厚く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) (社)日本材料学会編：コンクリート混和材料ハンドブック，エヌ・ティー・エス，2004
- 2) (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
- 3) 川崎敏弘，加藤光彦，平尾和洋，山本直彦：京都東山伝統的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，平成 16 年度日本建築学会近畿支部研究報告集，No.44，pp.461-464，2004