

破損・不用陶器のリサイクル

—コンクリート用骨材としての可能性—

近畿職業能力開発大学校附属

滋賀職業能力開発短期大学校

秦

啓 祐

Recycling of useless Earthenware

— Possibility for Substitute of Aggregate —

Keisuke HATA

要約 滋賀県の地場産業の一つである信楽焼き（陶器）の破損した、あるいは不用の陶器のリサイクルを目指して、コンクリートの骨材としての可能性について調査した。その結果、以下のことを得た。陶器の釉薬面は硬く、吸水率の高い材料である。陶器に施釉している釉薬は、セメントとの付着力を低下させる。陶器コンクリートの圧縮強度は、陶器の粉碎形状の大きさが小さい程大きくなる。

1. 緒言

昨今の材料開発においては、環境を意識した材料の開発が行われている。その一例として、使用済み製品の再利用に向けての研究開発が盛んである。例えば、解体材（木材、コンクリート、鉄筋等）、タイヤ、そして日常よく使用される生活用品や食品容器、等数多くの材料を再利用した製品化が行われている¹⁾³⁾。ところで、日常よく使用される生活用品の中に食器類等で使う陶器があるが、この材料の場合、新しい陶器に混入して使用する使い方がある。さらには、処理場で陶器やタイルなど不燃物を埋め立て用（タイル用も含めて年間約308 t⁴⁾）、コンクリートの混和材として研究⁵⁾等の利用がある。



図1 破損、不用陶器

そこで本研究の目的は、破損及び不用陶器の再利用を、ここでは滋賀県産の「信楽焼き」陶器の再利用

（破損、不用陶器、図1）を探るべく、コンクリートの骨材、特に粗骨材の代替材料、あるいは粗骨材との併用についての可能性について調査、研究した。

2. 実験方法

2.1 使用材料

本実験では、コンクリートの調査設計における骨材（粗骨材）の代替材料として、陶器製骨材【滋賀県産の信楽焼き陶器を粉碎したもの。以後、陶器と称す。】を用いた。セメントは、普通ポルトランドセメント（密度：3.15g/cm³）である。細骨材は滋賀県の野洲川産の川砂（密度：2.60g/cm³）である。なお、比較用として、普通コンクリートを用意し、粗骨材は滋賀県の野洲川産の砂利（密度：2.69g/cm³）を用いることにした。

2.2 かさ密度、吸水率、硬さ

陶器の密度は、かさ密度（表乾密度）で表示した。陶器の硬さは、バーコル硬度計（GYZJ 934-1、Barber Colman Company製）を用いて、陶器の釉薬施釉面、及び釉薬施釉面と直角方向の断面（素焼きの状態の面）の2面を各10箇所測定し、その平均値で表した。陶器の吸水率は、JIS A 5207の7.6の吸水試験に従った。比較材としての普通コンクリート用の骨材（粗骨材、細骨材）の吸水率についても、JIS A 1110及びJIS A 1109に準じて、算出した。

2.3 供試材

JIS A 1132に準じ、陶器を骨材（粗骨材）の代替材料として、コンクリートを調合した。表1に普通コンクリートの調合を示す。

骨材（粗骨材）の代替材料として用いる陶器は、玄能で粉砕し、粉砕片の大きさ（以後、粉砕形状と称す）を以下のように調製した。30mm網ふるいを通過し、25mm網ふるいに留まった陶器の粉砕片を粉砕形状

25mmとした。以下、25mm網ふるいを通過し、20mm網ふるいに留まったものを粉砕形状20mmとし、20mm網ふるいを通過し、15mm網ふるいに留まったものを粉砕形状15mmとそれぞれ定義し、陶器を調製した。図2は、粉砕した陶器の写真である。

粉砕形状の大きさの違いによる圧縮強度の評価においては、粗骨材を100%陶器に代替することにした。

表1 コンクリート調合

調合強度 (N/mm ²)	スランプ (cm)	空気量 (%)	水セメント 比(%)	水 (kg/m ³)	粗骨材の最大 寸法(mm)	単位質量(kg/m ³)			単位容積(l/m ³)		
						セメント	粗骨材	細骨材	セメント	粗骨材	細骨材
37.3	18	5	54	182	25	337	1088	668	107	404	257

表2 陶器の粉砕形状別の調合

粉砕形状	単位質量(kg/m ³)					単位容積(l/m ³)					水セメン ト比(%)	スランプ値 (cm)
	水	セメント	粗骨材	陶器	細骨材	水	セメント	粗骨材	陶器	細骨材		
25mm	182	337	0	747	668	182	107	0	404	257	54	16
20mm	182	337	0	747	668	182	107	0	404	257		19
15mm	182	337	0	747	668	182	107	0	404	257		17
MIX	182	337	0	747	668	182	107	0	404	257		19
普通コンクリ ート	182	337	1088	0	668	182	107	404	0	257		18

表3 陶器代替率別の調合

陶器 代替率	単位質量(kg/m ³)					単位容積(l/m ³)					水セメン ト比(%)	スランプ 値(cm)
	水	セメント	粗骨材	陶器	細骨材	水	セメント	粗骨材	陶器	細骨材		
0%	182	337	1088	0	668	182	107	404	0	257	54	18
10%	182	337	980	74	668	182	107	364	40	257		14
25%	182	337	816	187	668	182	107	303	101	257		17
50%	182	337	544	374	668	182	107	202	202	257		17
75%	182	337	272	561	668	182	107	101	303	257		18

表2に、粗骨材の代替として用いる陶器の粉砕形状別による圧縮強度評価の調合を示す。また、表3に、

陶器の粉砕形状の大きさ、粉砕形状25mm、粉砕形状20mm、そして粉砕形状15mmの陶器を1：1：1の割

合（質量比）で混入した（以後、Mixと記す）場合の、混入率別（75%、50%、25%、10%）によるコンクリートの圧縮強度評価の調査を示す。

コンクリートの練り混ぜ水は水道水を使用した。

供試材の寸法は、直径：100mm、長さ：200mmの円柱形である。コンクリートを詰め終わってから25時間後で型枠から取りはずした。その後、材齢1週目と材齢4週目まで $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ の水中に養生した。

比較用として、2.1の使用材料で示した滋賀県の野洲川産の粗骨材による普通コンクリート（表1）を用いた。

AE減水剤は、本実験では使用しなかった。



図2 粉砕した陶器

2.4 圧縮強度試験

圧縮試験は、JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準じ、養生後、速やかに圧縮強度試験を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 陶器のかさ密度測定、吸水率測定、硬さ測定

図3は、2.1の使用材料で示した、普通コンクリートに用いる粗骨材及び細骨材のかさ密度と、骨材の代替材料である陶器のかさ密度について示したものである。図より、陶器のかさ密度は、粗骨材及び細骨材と比べて、小さな値を示す。

図4は、粗骨材、細骨材、そして陶器の吸水率について示したものである。図より、粗骨材及び細骨材と比べて、陶器は吸水率の高い材料であると言える。陶器粉砕材料の釉薬施釉部分に対して、厚み方向の部分

は素焼きの状態を呈しており、比較的多孔質の構造を形成していることから、この部分からの水分の吸収が盛んとなったものと考えられる。さらに、図3の結果と併せて判断すると、陶器は、空隙率の大きい材料であるといえる。

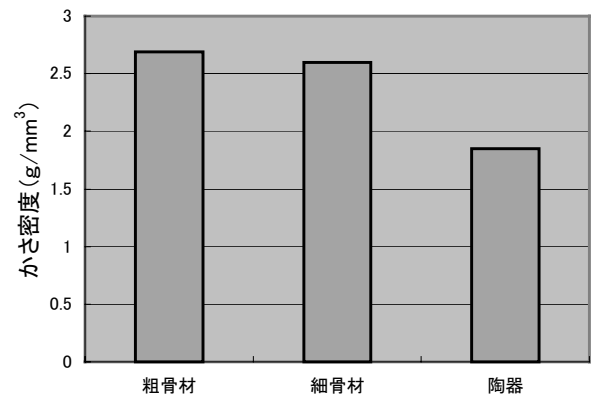


図3 骨材のかさ密度

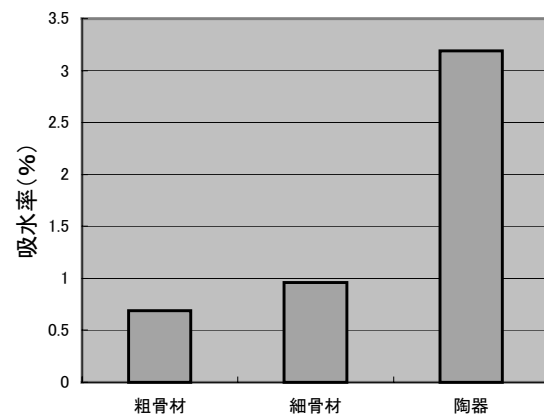


図4 骨材及び陶器の吸水率

次に、図5は、骨材及び陶器の硬さについてパーコール硬度で表したものである。なお、比較材として、2.1で示した普通コンクリート用の粗骨材及び釉薬を施釉する前の素焼きの陶器を用意した。図より、陶器釉薬表面の硬さは、粗骨材と同程度の硬さを示している。これは、陶器表面に施している釉薬の膜（層）の硬さが影響しているものと考えられる。一方、釉薬の施釉面と比べて、陶器の施釉面の内部は素焼きの状態を呈しているため硬さは小さい値を示すものと考えられる。なお、表4は、陶器のパーコール硬度を、ピッカース硬度、ブリネル硬度、そしてロックウエル硬度に換算したものである。

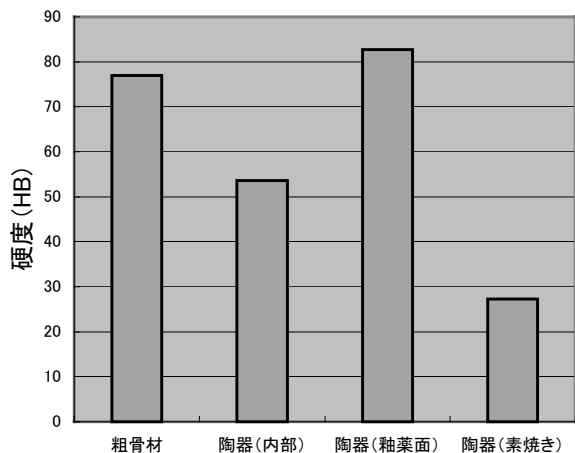


図5 骨材の固さ

表4 硬度一覧

	バーコル 硬度	ピッカース 硬度	ブリネル 硬度	ロックウエル 硬度
粗骨材	77	84	92	86
陶器(内部)	53.67	35	35	39
陶器(釉薬面)	82.75	100	111	92
陶器(素焼き)	27.2			

3.2 陶器コンクリートの圧縮強度

図6は、表2に示す調合により、陶器を粗骨材の代替材料（代替率：100%）として用いた場合の、コンクリート圧縮強度に及ぼす粉砕形状の影響について示したものである。比較用として、普通コンクリートの圧縮強度を示す。図より、粉砕形状の大きさは小さくなる程、圧縮強度は高い傾向を示している。材齢一週目と材齢四週目を比べると、材齢四週目の場合のほうがその傾向はより顕著に表れている。粉砕形状の違いによる圧縮強度への影響の原因として、以下のことが考えられる。粉砕形状は、図2に示す様に、厚みの薄い扁平状の形状をしており、その厚み方向と直角方向の両面の平らな広い面積の部分には釉薬が施釉されている。これより、単位体積当たり粉砕形状が小さくなることは、釉薬施釉面積が広くなることと同じことである。そこで、この釉薬面の大きさから評価してみると、以下のことが考えられる。施釉された面は比較的平滑に仕上がっているためにモルタルあるいはセメントペーストの付着力が弱くなっていると考えられる。それ故に、釉薬面の面積が大きくなればなる程、モルタルあるいはセメントペーストとの付着性は悪くなる

と推測され、供試材の圧縮強度は低くなるものと考えられる。

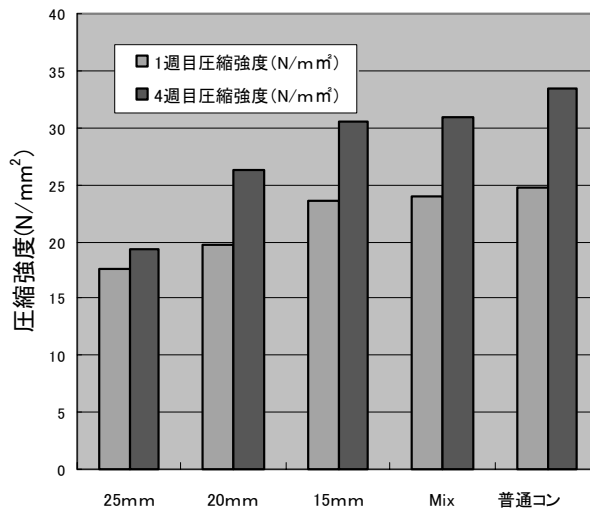


図6 粉砕形状の違いによる圧縮強度への影響

図7及び図8は、粉砕形状別による圧縮強度試験後の供試材の写真観察である。図9は、比較用としての普通コンクリートである。図7は、粉砕形状15mmの陶器を骨材として用いた場合の、材齢一週目 (a) と材齢四週目 (b) の供試材の圧縮強度試験後の状態を示す。



図7(a) 材齢一週目供試材（粉砕形状：15mm）



図7(b) 材齢四週目供試材（粉砕形状：15mm）



図9 材齢一週目供試材（普通コンクリート）



図8(a) 材齢一週目供試材（粉砕形状：25mm）



図8(b) 材齢四週目供試材（粉砕形状：25mm）

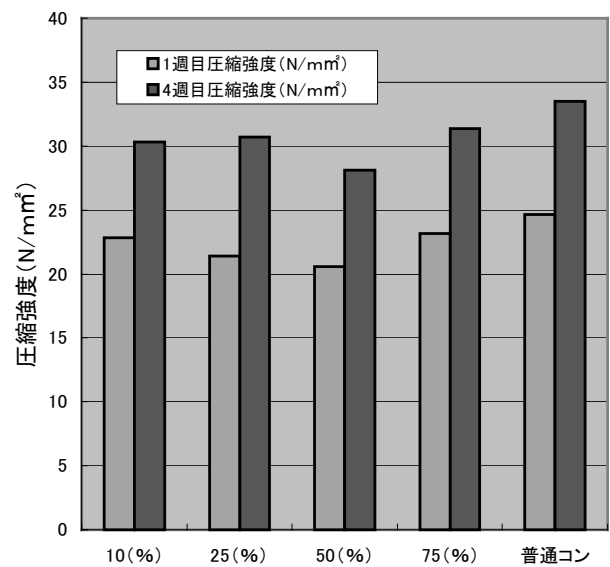


図10 圧縮強度に及ぼす骨材中に占める陶器の混入率の影響

同様に、図8(a)、(b)は、粉砕形状25mmの陶器を使用した場合について示す。

図6に示した様に、圧縮強度に及ぼす粉砕形状の大きさの影響に、材齢及び粉砕形状の大きさの影響が表れている。しかし、図7及び図8で観察する限り、材齢や粉砕形状の大きさの違いによる影響は顕著には表れていない。一方、それぞれの粉砕形状で材齢一週目と材齢四週目を比較すると、材齢四週目の場合、粘り

のない破壊が生じており、大きな剥離現象が表れている。供試材の表面から内部に向けて、陶器、モルタルあるいはセメントペーストの剥離が発生しており、特に、陶器の釉葉面からのモルタルの剥離が目立つ。陶器釉葉面からのモルタルあるいはセメントペーストの剥離は、陶器の釉葉面が圧縮の負荷方向に沿って平行に配列されているところで多く発生しているものと考えられる。

図10は、図6で示した粉碎形状Mixのものを骨材とし、表3に示す調合により作製した供試材により圧縮強度に及ぼす骨材中に占める陶器の混入率の影響について、材齢の違いから示したものである。

材齢の影響は、普通コンクリートの場合と同様に、陶器を用いた場合でも同様の圧縮強度の変化が表れている。しかし、陶器の混入率の影響は顕著に表れていない。陶器を50%混入した場合若干低い傾向を示すが、陶器を10%混入させても、75%混入させてもほぼ同じ圧縮強度を示している。

図11及び図12は、骨材の中に混入される陶器の割合が75%の場合と10%の場合での、材齢一週目の圧縮試験後の写真観察である。

陶器の混入率が多い程、モルタル及びセメントペーストの剥離が激しくなっている。これは、以下のことが考えられる。

陶器の量が多くなる程、釉葉面の占める割合が広くなること、そして、陶器が多くなることにより、粉碎された陶器の釉葉面が圧縮方向に沿って配列される確率が高くなることから、モルタルあるいはセメントペーストとの付着力が弱くなってしまふものと考えられる。

以上のことより、陶器の占める割合が少ない程、負荷に対しての抵抗力は大きいと考えられる。しかし、図10で示した様に、陶器の占める割合の影響は顕著に表れていないことから考えると、モルタルあるいはセメントペーストの釉葉面との付着性との関係以外に、粉碎形状を作製する際に陶器が均一に分布されていないことが考えられる。また、粉碎形状の違う陶器が供試材全体に均等に分布されていないことも考えられる。今後、陶器の混入方法についての検討が必要である。

3.3 破壊面観察

図13は、図11で示した供試材（粉碎形状の大きさ：Mix）の圧縮試験後の写真である。①は、陶器の



図11 材齢一週目供試材（混入率：75%）



図12 材齢一週目供試材（混入率：10%）

釉葉が施釉された面を示す。②は、剥離した陶器（釉葉面）と接触していたモルタルあるいはセメントペーストの部分を示す。③は、セメントペースト、細骨材等を示す。

①は、陶器釉葉施釉面からモルタルあるいはセメントペーストが剥離した状態を示している。②は、モルタルあるいはセメントペーストから陶器が剥離された状態を示している。陶器の釉葉面及びモルタルあるいはセメントペースト表面は平滑に形成されている。これより、剥離が容易に発生しているのが推測できる。

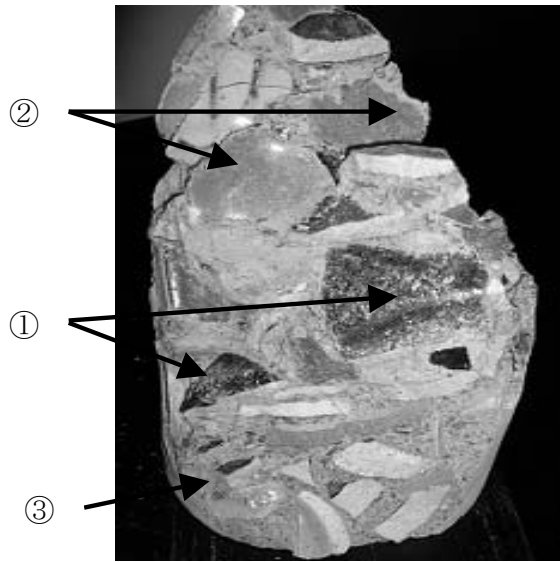
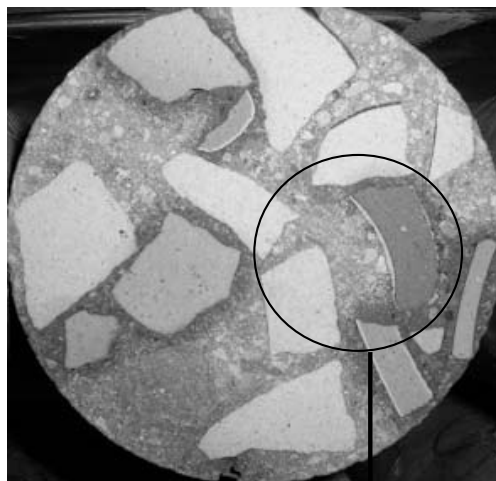
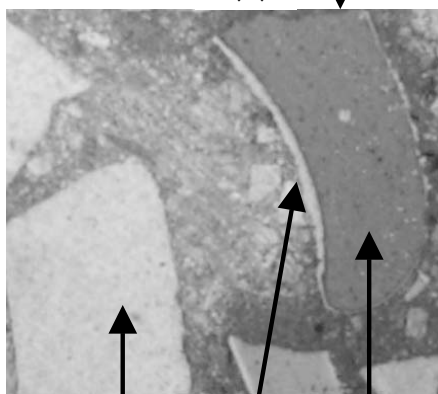


図13 材齢四週目の圧縮試験後の破損した供試材



(a)



④

⑥

⑤

(b)

図14 円柱状の供試材を輪切りにした切口面の写真

図14 (a) は、円柱状の供試材を輪切りにした切口面の写真である。図14 (b) は、図14 (a) の丸印部分を拡大した写真である。④は、陶器の釉薬の施釉面を示す。⑤は、陶器内部の素焼きの部分を示す。⑥は、陶器の釉薬施釉面の断面部分を示しており、素焼きの外周部分に白い層を形成（釉薬の層）している。

剥離現象は、この釉薬面とモルタルあるいはセメントペーストとの境界部分での発生が多い。これは、この釉薬部分が平滑に仕上げられていることによるものと考えられる。一方、④の釉薬面の内部である⑤の素焼き部分の表面は、凹凸状に形成されている。ここでのモルタルあるいはセメントペーストとの付着力は、釉薬面と比べると、比較的大きいと考えられる。⑤の表面での付着に関しては、以下のことが考えられる。モルタルあるいはセメントペーストがこの表面の凹凸状部分に入り込み、機械的な結合であるアンカー効果が生じてくることから、付着力が大きくなるものと考えられる。

以上、陶器のモルタルあるいはセメントペーストからの剥離現象は、陶器の釉薬面を中心に発生しやすいと考えられる。今後、釉薬面とモルタルあるいはセメントペーストとの付着性についての詳細な検討が必要である。

4. まとめ

信楽焼きの破損陶器あるいは不用陶器のリサイクルとして、コンクリートの骨材への可能性について調査した。その結果、以下のことが得られた。

- 1) 陶器は吸水率の高い材料であり、釉薬面は硬質な面を形成している。
- 2) 釉薬面におけるモルタルあるいはセメントペーストの付着性は良くないと考えられる。
- 3) 陶器コンクリートの圧縮強度は、陶器の粉碎形状の大きさが小さい程大きくなる。

謝辞

本研究を遂行するに当たり、実験及びデータ整理に協力いただいた、山下健次氏（現、三伸機材株式会社）に深く感謝いたします。

最後に試料を提供して頂いた信楽陶器工業協同組合橋本浩氏に感謝いたします。

[参考文献]

- 1) 井上忠信, 長井寿, 材料, 52, 1107(2003).
- 2) 永瀬隆行, 永本郁子, 塩野剛司, 西田俊彦, 材料, 56, 580(2005).
- 3) 井上正一, 黒田保, 松井信作, 吉野公, 材料, 53, 1077(2004).
- 4) <http://www.sig.shiga-irc.go.jp>
- 5) 信楽陶器工業協同組合, 「破損・不用陶器等のリサイクルに関する研究」報告書(平成13年度)