論文 廃瓦骨材を用いたポーラスコンクリートの透水性および保水性に関 する実験的研究

古田 麻奈*1・石黒 覚*2・山中 正善*3

要旨:本研究では,廃瓦骨材を舗装材料へ有効利用し,夏季の路面温度上昇の抑制を目的として,粒径の異なる2種類の廃瓦をそれぞれ用いたポーラスコンクリートを作製し,透水性および保水性に関する試験を実施した。その結果,連続空隙率が増加するに伴い透水係数は増加し,同一空隙率においては粒径の大きな廃 瓦ポーラスコンクリートの透水係数が大きくなった。透水性に関しては粒径の大きな骨材を使用した方が優れている。また,連続空隙率の増加に伴い,廃瓦ポーラスコンクリートの保水率は減少したが,同一空隙率では,粒径の小さな廃瓦を使用した方が,保水率は大きくなった。 キーワード:廃瓦,ポーラスコンクリート,透水性能,保水性能

1. はじめに

廃瓦は瓦製造工場の不良品や家屋解体などにより大量 に継続して発生するため、廃棄処理される一方で、その 有効利用も積極的に進められている。廃瓦は微細な空隙 を持ち、保水性を有することから、ヒートアイランド現 象を緩和する効果が期待されている。また、ポーラスコ ンクリートは透水性、保水性に優れており、夏季の路面 温度低減効果をもっている^{1.2}。本研究では、廃瓦骨材 を舗装材料へ有効利用し、特に夏季の路面温度上昇の抑 制を目的として、粒径範囲の異なる2種類の廃瓦骨材を 用いたポーラスコンクリートを作製した。本論文では、 基本的な特性のうち、廃瓦ポーラスコンクリートの空隙 率、透水係数、保水性および圧縮強度に関する実験結果 について報告する。

2. 実験概要

2.1 使用材料

使用材料およびその物性値を表-1 に示す。骨材とし て粒径 3~5mm および 5~10mm の廃瓦(図-1)を用いた。 ここで、粒径 3~5mm を廃瓦 S, 粒径 5~10mm を廃瓦 L と記述する。廃瓦は三重県内の家屋解体で排出されたもので、レンガが1%以下の含有率で少量含まれている。 図-2に本研究に用いる廃瓦の粒度曲線を示す。





材料	記号	種類および物性			
セメント	С	普通ポルトランドセメント(密度: 3.16g/cm ³)			
骨材	S	廃瓦(表乾密度:2.15g/cm ³ , 絶乾密度:1.83g/cm ³ , 実積率:64.8%, 吸水率:17.4%, 骨材粒径 3~5mm, 粗粒率:4.67)			
	L	廃瓦(表乾密度: 2.21g/cm ³ , 絶乾密度: 1.97g/cm ³ , 実積率: 59.2%, 吸水率: 12.2%, 骨材粒径 5~10mm, 粗粒率: 2.93)			
混和剤	SP	高性能減水剤(ポリカルボン酸コポリマー)			

表-1 使用材料

*1 三重大学大学院 生物資源学研究科共生環境学専攻 (学生会員)

*2 三重大学 生物資源学部共生環境学科教授 農博 (正会員)

*3 朝日土木(株) 代表取締役専務

廃瓦は多孔質材料であり、気乾状態で廃瓦を用いると、 練混ぜ中に練混ぜ水の一部を吸水することに起因して、 施工性能の著しい低下や製造物の性能低下といった課題 が指摘されている³⁾。そこで、練混ぜ中における廃瓦の 吸水を抑制し、施工性能を確保するために、練混ぜる前 に廃瓦に吸水させる処置をした。そのときの廃瓦の含水 率を**表-2**に示す。

2.2 配合設計

配合表を表-3 に示す。ポーラスコンクリートの配合 設計は、ポーラスコンクリート河川護岸工法の手引きを 参考に行った⁴⁾。設計空隙率を 30, 25, 20, 15%の4種 類とし、ペーストの水セメント比を 25%とした。ここで、 単位骨材量は骨材の実積率を基に算出し、設計空隙率は セメントペースト量によって調整した。練混ぜ時には、 骨材と骨材の間にペーストが入り込むことから、これを 考慮するために、実積率に補正係数を乗じて単位骨材量 を決定した。補正係数は既往の研究から 0.92 とした⁵⁾。 2.3 供試体作製方法

練混ぜにはオムニミキサを使用した。ミキサにセメント,水および混和剤を入れて120秒練混ぜた後,骨材を入れてさらに90秒練混ぜた。

供試体の締固めは、テーブル式バイブレータを用いて 行い、供試体に必要な質量を計量し、2 層に分けて型枠 に詰めた。その後、コテ型バイブレータを用いて、供試 体上部をさらに締固めた。なお、供試体は各配合におい て円柱供試体 ϕ 75×150mm(空隙率試験、圧縮強度試験 用)を 4 個、円柱供試体 ϕ 100×200mm(空隙率試験、 透水試験、保水試験用)を 3 個、平板供試体 300×300 ×50mm(現場透水量試験用)を 1 個作製した。なお、

表-2	使用廃瓦の含水率	窲
-----	----------	---

廃瓦	含水率(%)				
S	14.4				
L	12.5				

配合 No.8 は円柱供試体 φ 75×150mm (空隙率試験, 圧 縮強度試験用)のみ作製した。

2.4 試験方法

(1) 空隙率試験

日本コンクリート工学会(JCI)制定のポーラスコンク リートの空隙率試験方法(案)(JCI-SPO2)に基づき, 容積法 を用いて連続空隙率および準連続空隙率を式(1)および (2)より算出した。また, 質量法を用いて全空隙率を式(3) より算出した。

ここで,連続空隙率とは供試体の体積に占める連続空 隙の割合のことで,供試体表面から見て連続している空 隙であり,容易に水で飽和,排水される空隙と定義され ている %。準連続空隙率とは供試体の体積に占める準連 続空隙の割合のことで,供試体表面から見て連続してい るものの,水で飽和,排水するには若干の時間を要する 空隙と定義されている。独立空隙率とは供試体全体の体 積に占める独立空隙の割合のことで,供試体表面から見 て独立している空隙であり,水で飽和,排水が困難な空 隙と定義されている。空隙の模式図を図-3 に示す 7。 全空隙率とは供試体全体の体積に占める全空隙の割合で あり,供試体内全ての空隙を合わせたものである。

$$A_c + A_s = \left\{ 1 - \frac{(W_2 - W_1)/\rho_W}{V_1} \right\} \times 100$$
 (1)

ここで、A_cはポーラスコンクリートの連続空隙率(%), A_sはポーラスコンクリートの準連続空隙率(%), W₂は 24 時間気中放置後の気中質量(g), W₁は供試体の水中質



図-3 空隙の模式図⁷⁾

配合	廃瓦の	設計空	補正	W/C	水(W)	セメント(C)	骨材(S, L)	SP
No.	種類	隙率(%)	係数	(%)		単位量(kg/m ³)		{C×(%)}
1	S	30			46	183	1300	1.0
2	S	25			68	271	1300	0.8
3	S	20			90	359	1300	0.6
4	S	15	0.02	25	112	447	1300	0.4
5	L	30	0.92	23	68	274	1209	0.6
6	L	25			90	362	1209	0.5
7	L	20			113	450	1209	0.3
8	L	15			135	538	1209	0.2

表-3 配合表

量(g), ρ_wは水の密度(g/cm³), V₁は供試体の容積(cm³) である。

$$A_c = \left\{ 1 - \frac{(W_2 - W_3)/\rho_W}{V_1} \right\} \times 100$$
 (2)

ここで、W3は24時間気中放置後速やかに測定された供 試体の水中質量(g)である。

$$A_t = \left(1 - \frac{W_2/W_3}{W_6/V_3}\right) \times 100 \tag{3}$$

ここで、A_tはポーラスコンクリートの全空隙率(%)、W₆
 は 1m³ あたりのポーラスコンクリートの各材料の質量和
 (kg)、V₃は 1m³ あたりのポーラスコンクリートの各材料
 の絶対容積の和(m³)である。

(2) 透水試験

JCI 制定のポーラスコンクリートの透水試験方法 (案)(JCI-SPO3)に基づき,定水位透水試験を行い,透水係 数を測定した。透水試験装置の模式図を図-4 に示す。 なお,円柱供試体 \u0 × 200mmの上下面を1~1.5cm ず つコンクリートカッターで切断し,試験を行った。図の 越流水槽に水を満たしてから給水側水槽に注水し,供試 体を飽水させた。越流口から水を越流させ,給水側水槽 の水位を一定に保った。その後,越流水槽からの越流量 が一定になるのを待ち,時刻 ti から te までの越流量を測 定した。透水係数は式(4)~(7)より算出した。本研究にお いて,水位差は 14~15cm とした。

(cm)である。
$$v = \frac{Q}{A \times (t_2 - t_1)}$$
(5)

ここで, v は流速(cm/s), Q は時刻 t1 から t2 までの越流量 (cm³), A は透水供試体の断面積(cm²), (t2-t1)は測定時間 (s)である。

$$K_T = v/i \tag{6}$$

ここで, K_T は測定時の水温 T℃における透水係数(cm/s) である。

$$K_{15} = K_T \times \eta_T / \eta_{15} \tag{7}$$

ここで、 K_{I5} は水温を 15 とした場合の透水係数の推定 値(cm/s)、 η_T/η_{15} は、水の粘性係数の比に関係する補正 係数である。

(3) 現場透水量試験

ポーラスコンクリートの施工現場で透水性能を評価す る方法として、排水性アスファルト舗装で用いられる現 場透水量試験による浸透量の測定が適用されている ⁵⁾。 平板供試体に試験機を接着させ、試験機のバルブを一気 に全開にし、水頭 600mm から 400ml の水量が流下する 時間を 0.1 秒単位で測定し、これを 4 回繰り返す。水 400ml の流下に要した時間の 2~4 回目の 3 データを算術平均し、



測点iにおける透水量を式(8)より算出した。

 Vwi = (400/t) × 15
 (8)

 ここで、Vwi は測点 i における透水量(ml/15 秒)、t は流下

 平均時間(秒)である。

本研究では、上記の日本道路協会制定の現場透水量試 験方法に基づき、300×300×50mmの平板供試体の透水 量を室内において測定した。なお、求めた透水量は直径 15cmの円形から厚さ5cmの平板供試体に15秒間で浸透 する水量を表している。

(4) 保水試験

廃瓦をポーラスコンクリート用骨材として用いること によるポーラスコンクリートの保水性への影響を検討す るため,文献8)で用いられた保水試験を適用した。透水 試験に用いた円柱供試体を20℃,相対湿度60%の恒温恒 湿槽内で乾燥させ,その時の質量変化を測定し,式(9)を 用いて保水率を算出した。供試体の空隙に存在する水分 量を測るため,試験終了後,供試体を105℃で24時間炉 乾燥し,供試体質量を計測した。

保水率(%)=供試体の空隙に存在する水分量(ml)÷ 供試体の空隙容積(ml)×100 (9)

なお,実験においては,円柱供試体の側面を塩化ビニ ルテープで巻き,供試体を24時間以上水中で飽水させた。 水中より取り出して,試験開始時に供試体から水が垂れ ないよう3時間自然放置した後,試験を開始した。測定 用供試体は各配合において3個ずつ使用した。

(5) 圧縮強度試験

コンクリートの圧縮強度試験方法(JIS A 1108)に従っ て、材齢 28 日の強度を測定した。 φ75×150mm の円柱 供試体を4個ずつ使用し、養生条件は水中養生とした。 なお、試験前に供試体上下面をセメントペーストキャッ ピングした。

3. 実験結果および考察

3.1 空隙率試験

φ100×200mm 供試体の空隙率を表-4 に示す。廃瓦 L は全ての配合において,準連続空隙率が1%以下であっ た。また,全空隙率に関わらず,廃瓦Lの準連続空隙率 は廃瓦Sよりも小さくなった。

よび連続空隙の割合を表-5 に示す。全空隙率が減少す るに伴い, 準連続空隙率は増加し, 連続空隙率は減少し た。配合 No.4 を除いた廃瓦 S, L で比較すると、準連続 空隙の割合の平均は廃瓦Sで5.4%,廃瓦Lで2.9%,連 続空隙の割合の平均は廃瓦Sで87.0%,廃瓦Lで92.0% であった。この結果から、廃瓦Sポーラスコンクリート は全空隙に占める準連続空隙の割合が大きく、連続空隙 の割合が小さくなり、一方、廃瓦Lポーラスコンクリー トは全空隙に占める準連続空隙の割合が小さく、連続空 隙の割合が大きい傾向となることがわかった。これは, 骨材粒径の大きさが連続空隙の割合に関係するからであ ると考えられる。すなわち、粒径の小さな廃瓦Sは実積 率が大きく、空隙の径も小さくなるため、準連続空隙の 割合が大きく、連続空隙の割合が小さくなると考えられ る。

3.2 単位ペースト量と透水係数の関係

単位ペースト量と透水係数の関係を図-5 に示す。廃 瓦S,Lともに指数曲線で近似できた。また,廃瓦S,L ともに単位ペースト量の増加に伴い,透水係数は減少し た。これは、単位ペースト量が増加することにより、空

配 合 No.	廃瓦	準連続 空隙率 (%)	連続空 隙率 (%)	全空隙 率(%)	独立空 隙率 (%)
1	S	1.0	23.4	24.6	0.3
2	S	0.9	17.5	20.3	1.9
3	S	1.2	11.9	14.9	1.8
4	S	1.8	7.3	11.1	2.0
5	L	0.4	26.7	27.6	0.5
6	L	0.7	21.7	23.0	0.6
7	L	0.8	15.3	18.1	2.0

表-4 φ100×200mm 供試体の空隙率

表一5	全空隙に占める準連続・	連続空隙の割合

ШĄ	1 1 1 1	全空隙に占める			
No.	廃瓦	準連続空隙の	連続空隙の割合		
		割合(%)	(%)		
1	S	3.9	94.9		
2	S	4.4	86.2		
3	S	8.0	80.0		
4	S	16.6	65.6		
5	L	1.5	96.7		
6	L	3.0	94.4		
7	L	4.3	84.9		

隙率が小さくなったためである。なお,透水係数は透水 性舗装の下限値 0.01cm/s を満たしている⁸⁾。

3.3 連続空隙率と透水係数の関係

連続空隙率と透水係数の関係を図-6に示す。廃瓦S, L ともに指数曲線で近似でき、連続空隙率が増加すると 透水係数も増加した。また、廃瓦Lは全体的に廃瓦Sよ りも透水係数が大きくなる傾向がある。すなわち、同じ 連続空隙率でも骨材粒径が大きく,実積率が小さいこと により、透水係数も大きくなることを示す。これは、上 記3.1 で述べたように、廃瓦Sポーラスコンクリートの 準連続空隙率は廃瓦Lよりも大きくなり,連続空隙率は 廃瓦Lよりも小さくなるためと考えられる。また,表-4 の配合 No.1 の連続空隙率は配合 No.7 に比べて 8.1%大 きいが,透水係数はほぼ同じであった。この結果より, 透水係数には連続空隙率だけでなく、空隙の径の大きさ も関係すると考えられる。すなわち、粒径の小さい廃瓦 S は空隙の径も小さくなることから,透水係数が廃瓦 L よりも小さくなったと考えられる。したがって、透水性 に関しては、廃瓦Sよりも廃瓦Lを使用したポーラスコ



ンクリートの方が優れている。

3.4 連続空隙率と透水量の関係

連続空隙率と透水量の関係を図-7 に示す。なお,空隙率の値は,本供試体と同時に作製した円柱供試体のものを代用した。廃瓦 S,L ともに累乗曲線で近似でき,ほぼ同一の曲線で表された。なお,他の近似曲線と比較して,決定係数 R²の相関が強いため,累乗曲線で近似した。また,廃瓦 S,L 供試体は連続空隙率が増加すると透水量も増加した。得られた透水量の値は,配合 No.4を除いて,車道および側帯における基準値 1000ml/15 秒を上回っている⁵。

3.5 保水試験

保水率の経時変化を図-8 に示す。全ての配合で乾燥 開始1日目の保水率の低下がもっとも大きくなった。時 間の経過とともに保水率の低下は減少傾向となった。乾 燥30日目における配合 No.1,5および6の保水率は他と 比べて小さくなった。これは表-5 から、上記配合の供 試体は、全空隙に占める準連続空隙の割合が小さく、連





続空隙の割合が大きいため、保水率の低下が大きくなったと考えられる。

連続空隙率と乾燥7日目の保水率の関係を図-9に示 す。廃瓦S,Lともに指数曲線で近似できた。なお,他 の近似曲線と比較して,決定係数R²の相関が強いため, 指数曲線で近似した。廃瓦S,Lともに連続空隙率の増 加に伴い保水率は減少した。廃瓦Lと比べて廃瓦Sは連 続空隙率の増加に伴う保水率の低下がやや緩やかであっ た。各配合で差はあるものの7日経過しても保水率60% 以上は維持していた。これは,廃瓦が内部に微細な空隙 を持っており,材料内部に水を保持できることも関係す ると考えられる。

また,図-10に示すように、1m²(厚さ 0.2m)あたりの 保水量に換算すると²⁾,実験の空隙率の範囲において, 乾燥時間 7 日の保水量は 20~25kg/m²程度になった。配 合 No.4 は試験開始時の保水量は小さいが,他の配合と比 べて時間経過による減少傾向が緩やかであった。これは, 配合 No.4 は全空隙率が小さいため保水量は小さいが,連









続空隙率も小さいため、保水率が高くなっているからで あると考えられる。

3.6 圧縮強度

圧縮強度と全空隙率の関係を図-11 に示す。廃瓦 S, L ともに、圧縮強度は全空隙率の増加に伴い低下し、そ の関係を指数曲線でよく近似できた。これは、全空隙率 の増加が単位ペースト量の減少によるためである。廃瓦 S, L を比較すると、同一全空隙率において、廃瓦 L の 圧縮強度の方が大きくなった。これは骨材粒径が大きい と骨材周囲のペースト厚が増すため、廃瓦 S よりも L の 圧縮強度が増加したと考えられる。

4. まとめ

本研究では,廃瓦を使用したポーラスコンクリートの 透水性や保水性を把握することを目的とした実験を行っ た。得られた知見を以下に示す。

- 透水係数は単位ペースト量の増加に伴い減少し,連 続空隙率の増加に伴い増加した。これらの関係は、 指数曲線で近似することができた。
- 2) 同一空隙率における透水係数は、骨材粒径の大きい 廃瓦Lポーラスコンクリートの方が大きくなった。 これは、廃瓦LはSと比べて全空隙に占める連続 空隙の割合が大きくなるためと考えられる。
- 廃瓦S,Lともに連続空隙率が増加すると透水量も 増加した。

- 係瓦ポーラスコンクリートの保水率は,連続空隙率の
 の増加に伴い減少した。また、同一空隙率では、廃
 瓦 S を用いた方が、廃瓦 L に比べて保水率は大き
 くなった。
- 5) 全空隙率の増加に伴い単位ペースト量が減少する ため,圧縮強度は低下した。また,同一空隙率にお いては,廃瓦Lの圧縮強度は廃瓦Sに比べて大き くなった。

参考文献

- 三島直生、中川武志、畑中重光、北野博亮:屋外実 験によるポーラスコンクリート舗装の熱特性に関 する基礎的研究、コンクリート工学年次論文集、 Vol.30, No.2, pp.337-342, 2008
- 路面温度上昇抑制舗装研究会:「保水性舗装」技術 資料,保水性舗装技術資料 Ver.3,2011.7 <
 www.coolhosouken.com/images_h2/data02.pdf > (参照 2015.12.9)
- 天野佑樹、上原 匠、梅原秀哲、武長佑樹:三州瓦 廃材のコンクリートへの有効利用、コンクリート工 学論文集, Vol.21, No.2, pp.1-11, 2010.5
- 4) 財団法人先端建設技術センター:ポーラスコンクリート河川護岸工法の手引き、山海堂、pp.104-113、 2001.4
- 5) 坂口 稔, 上原 匠, 杉浦領亮, 亀井則幸: 家屋解 体時に発生する廃瓦を用いたポーラスコンクリー トの基本的物性, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.1552-1557, 2012
- 6) 日本コンクリート工学会:「性能設計対応型ポーラ スコンクリートの施工標準と品質保証体制の確立 研究委員会」報告書,日本コンクリート工学会, pp.136-137, 330-339, 2015.6
- 7) 中川武志ほか:空気室圧力法を応用したポーラスコンクリートの空隙率測定方法,日本建築学会構造系論文集, Vol.73, No.629, pp.1043-1050, 2008.7
- 前川明弘、山本 晃,三島直生、畑中重光:小粒径 ポーラスコンクリートの各種特性に関する実験的 研究、コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.1397-1402, 2006