

論文 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

坂口 稔^{*1}・上原 匠^{*2}・杉浦 領亮^{*3}・亀井 則幸^{*4}

要旨: 本研究では、家屋解体時に発生する廃瓦（以下、家屋解体廃瓦）のポーラスコンクリート（以下、POC）用粗骨材への適用を目指し、家屋解体廃瓦を用いた POC の基本的物性を把握することを目的に、各種試験を実施した。その結果、家屋解体廃瓦の吸水率は、瓦製造時に発生する規格外品を破砕した廃瓦（以下、規格外品廃瓦）と比較して大きく、また、家屋解体廃瓦を用いた POC は歩道用透水性舗装として十分な透水性能および強度が確保できること、規格外品廃瓦を用いた POC と比較して 1.3 倍、標準的な骨材（砕石）を用いた POC と比較して 2~2.5 倍の吸水性能を備えていることが明らかとなった。

キーワード: ポーラスコンクリート、廃瓦、家屋解体

1. はじめに

著者らはこれまでに、規格外品廃瓦を対象に、その有効利用を目的としてコンクリートおよび POC 用骨材への適用を目指した研究¹⁾²⁾に取り組んできた。その結果、規格外品廃瓦を用いたコンクリートは、標準的な骨材（砕石）を用いたコンクリートと同等以上の強度及び耐久性を備えたコンクリートであることを明らかとした。また、規格外品廃瓦を用いた POC は、歩道用透水性舗装への適用が可能であることも明らかとしている。

ところで、瓦は日本各地で生産および使用され、国内において、家屋の建て替え等に伴い発生する廃瓦の量は、年間 100 万 t に迫るといわれており、処理問題が生じている。また、平成 23 年 3 月に発生した東日本大震災のような災害が発生した場合、廃瓦の発生量は 100~200 万 t に達するともいわれている。

そこで、これまで著者らが研究対象としてきた規格外品廃瓦と同様に、家屋解体廃瓦をコンクリートおよび

POC 用骨材として適用させることが出来れば、処理問題の解決に繋がり、目指すべき循環型社会の実現に向け、前進することが可能となる。よって本研究では、家屋解体廃瓦の有効利用可能な用途開発を念頭に、家屋解体廃瓦の POC 用粗骨材への適用を目指し、家屋解体廃瓦を用いた POC を製造してその基本的な物性を把握することを目的とした。

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。粗骨材として家屋解体時に発生する廃瓦（記号：Bd）を、その比較対象には規格外品として発生する廃瓦（記号：Bs）および標準的な骨材として JIS A 5001 で分類される道路用単粒度砕石（記号：G）を用いた。規格外品廃瓦は、標準的な粗骨材として用いた 7 号砕石（粒径：5~2.5mm）および 6 号砕石（粒径：13~5mm）と同程度の粒径に篩

表-1 使用材料

材料	記号	種類および物性
セメント	C	普通ポルトランドセメント（密度：3.16 g/cm ³ ）
細骨材	S	砕砂（表乾密度：2.67 g/cm ³ ，吸水率：1.24%，粗粒率：2.77）
粗骨材	Bd	家屋解体廃瓦（表乾密度：2.21 g/cm ³ ，実積率：57.9%，吸水率：11.17%，破砕値：25.82%）
	Bs	7号規格外品廃瓦（表乾密度：2.24 g/cm ³ ，実積率：60.1%，吸水率：10.18%，破砕値：23.11%）
		6号規格外品廃瓦（表乾密度：2.24 g/cm ³ ，実積率：61.3%，吸水率：8.85%，破砕値：23.11%）
	G	7号砕石（表乾密度：2.69 g/cm ³ ，実積率：55.5%，吸水率：0.88%，破砕値：7.31%）
6号砕石（表乾密度：2.65 g/cm ³ ，実積率：59.9%，吸水率：0.66%，破砕値：7.31%）		
混和剤	SP	高性能AE減水剤（ポリカルボン酸系）

*1 名古屋工業大学大学院 工学研究科 社会工学専攻 工修（正会員）

*2 名古屋工業大学大学院 工学研究科 社会工学専攻 准教授 工博（正会員）

*3 名古屋工業大学大学院 工学研究科 社会工学専攻

*4 （有）立川実業 リサイクル事業部

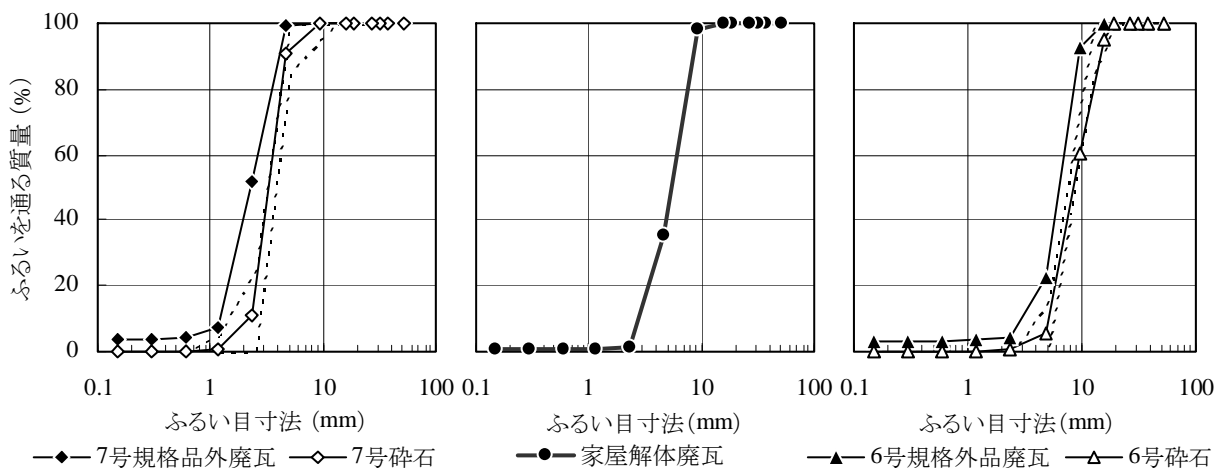


図-1 使用粗骨材の粒度分布

ったものを用い、それぞれを7号および6号規格外品廃瓦と称した。

今回対象とした家屋解体廃瓦は、中部圏で発生する家屋解体廃瓦とした。循環型社会への移行と行政指導により、家屋解体がミンチ解体から分別解体に移行したことで、廃瓦が資源として利用されるようになってきたが、未だ用途開発が求められているのが現状であり、実際の利用は、瓦特有の多孔質構造に着目した、湿地帯での管巻き材料など土質改良等である。なお、瓦の釉薬に鉛などの有害金属が含まれていた経緯から、著者らは定期的に環境基本法の規定に基づく土壌の汚染に係る環境基準（環境庁告示第46号）に基づき、有害物質の分析試験を行っており、無害であることを確認している。また、「骨材のアルカリシリカ反応性試験（化学法）（JIS A 1145）」では「無害でない」との試験結果であったが、「骨材のアルカリシリカ反応性試験（モルタルバー法）（JIS A 1146）」で確認した結果「無害」との評価が得られた。

ここで、図-1に本研究にて用いる粗骨材の粒度曲線を示す。図中の破線は、JIS A 5001に規定されている7号および6号粒径におけるそれぞれの規格値の上下限值である。図-1より、家屋解体廃瓦は6号規格外品廃瓦に近い粒度分布を示すことが確認された。また、砕石についてはJISの規格範囲内に収まっているが、廃瓦については、3種すべてにおいて規格値よりも比較的細かい粒が多い材料であることが確認できる。

今回対象とした廃瓦の実積率は、家屋解体廃瓦が57.9%と最も小さく、6号規格外品廃瓦が61.3%で最も大きく約4%の差がある。粗骨材の実積率はPOCの配合設計方法上、空隙率に影響を与えることが一般的に知られているが、副産物を利用する際のばらつきの範囲内と判断して、調整を行わないこととした。

ところで、廃瓦は飽水状態に至るまで数日間を要する。その間、含水率は増加傾向を示し、含水率が一定値を示

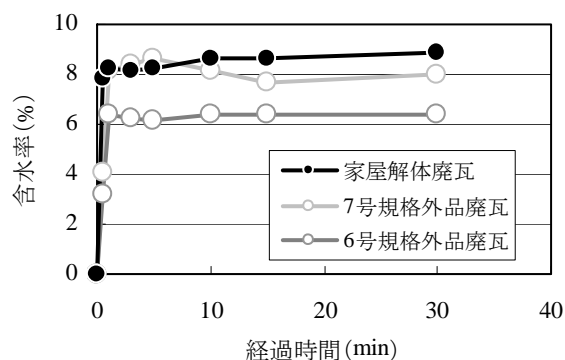
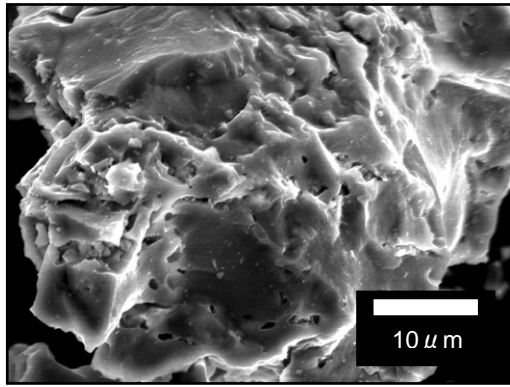


図-2 廃瓦の含水率の経時変化

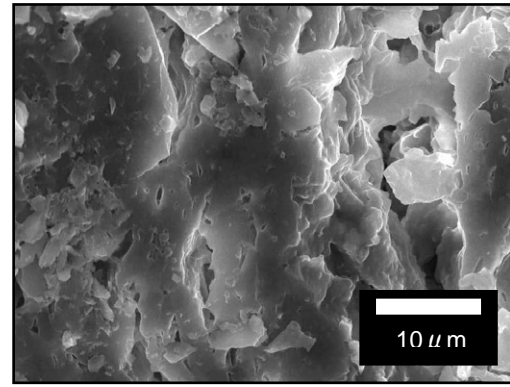
した状態が飽水状態となる¹⁾。従って、表中の各粗骨材の吸水率は、JISに準拠して、24時間吸水させた状態の試料から算出した値を示す。

既往の研究¹⁾において廃瓦は優れた吸水性能を有することから、表乾状態でコンクリート用骨材として用いた場合、硬化後の凍結融解抵抗性を著しく低下させるため、廃瓦は気乾状態で用いることが望ましいが、気乾状態のままでは練混ぜ時に練混ぜ水を吸水してしまい、施工性能の著しい低下や製造物の性能低下の原因となるとされている。そこで、練混ぜ中の廃瓦の瞬間的な吸水を抑制し、施工性能を確保することを目的として、練混ぜ直前に廃瓦に対して水を噴霧する「表面噴霧処理」を施す必要があるとしている。

本研究においても、廃瓦を用いたPOCの製造工程における施工性および硬化後の性能を確保する観点から、気乾状態の廃瓦に表面噴霧処理を施して用いることとし、廃瓦に噴霧する水量を決定することを目的に、廃瓦の含水率の経時変化試験を実施した。なお、含水率の測定はJIS A 1125に準拠して実施した。図-2に家屋解体廃瓦、7号および6号規格外品廃瓦の含水率の経時変化を示す。図-2より、廃瓦の含水率は瞬間的に急激に上昇し、その後30分後程度までほぼ一定の値をとることが確認できる。また、7号規格外品廃瓦の方が6号規格



b) 規格外品廃瓦



a) 家屋解体廃瓦

写真-1 廃瓦表面のSEM像

外品廃瓦よりも大きい値を示すことが確認できるが、これは7号規格外品廃瓦の方が骨材粒径は小さく、表面積が大きいと水と触れやすいことから、吸水量が大きくなったと推察される。ここで、家屋解体廃瓦の含水率の経時変化に着目すると、家屋解体廃瓦の粒度分布は、先に述べたように7号規格外品廃瓦よりも6号規格外品廃瓦に近いにもかかわらず、7号規格外品廃瓦と同等以上に含水率が上昇することが確認できる。写真-1に家屋解体廃瓦および規格外品廃瓦の表面を走査型電子顕微鏡で撮影した画像（以下、SEM像）を示す。両者のSEM像を比較してみると、家屋解体廃瓦は、規格外品廃瓦と比較して、表面の所々に比較的大きな穴が開いていることが確認できる。これは、屋根瓦として利用されている間に水分が凍結するなどの経年劣化の影響を受け、瓦の細孔が大型化したことや、規格外品廃瓦は現在の発達した技術で製造された高品質な瓦であることから、製造された年代の異なる瓦の品質差によるものとも推察される。これらの要因により、家屋解体廃瓦の吸水率が規格外品廃瓦の吸水率よりも高い値を示したと考えられる。なお、今回の含水率の経時変化試験結果より、練混ぜ時の表面噴霧処理において噴霧する水量はそれぞれ、家屋解体廃瓦：8.9%、7号規格外品廃瓦：8.0%、および6号規格外品廃瓦：6.3%とした。

経年劣化した使用済みの瓦を対象とすることから、廃瓦の強度を確認することを目的に破砕値試験を行った。

試験は、英国規格「BS 812-Part 110 Method of determination of aggregate crushing value」に準拠して行った。家屋解体廃瓦は、砕石と比較すると、3倍以上の値を有するが、規格外品廃瓦との差異は小さいことがわかる。なお、人工軽量骨材の標準的な破砕値は33~41%である。家屋解体廃瓦は、経年劣化の影響や、製造時の技術による影響などから強度に対して懸念が持たれたが、今回の試験結果から、十分な強度を有することが明らかとなった。

セメントは普通ポルトランドセメントを用い、結合材のダレ落ち防止を目的に、細骨材として砕砂を所定の容積割合で用いるとともに、フレッシュ性状の制御を目的に、混和剤に高性能AE減水剤を用いた。

2.2 配合設計

配合表を表-2に示す。POCの配合設計は、日本コンクリート工学協会におけるポーラスコンクリートの設計・施工の確立に関する研究委員会より発行された同報告書³⁾を参考に行った。設計空隙率を20%、水セメント比を23%、および細骨材モルタル容積比(s/m)を20%とし、補正係数は予備実験より全空隙率がおおむね20%となるような値を用いた。ここでPOCの配合設計では、単位粗骨材量は粗骨材の実積率を基に算出され、設計空隙率の制御はモルタル（またはペースト）量で調整される。ただし実際には、粗骨材と粗骨材の間にモルタル（またはペースト）が入り込むことから、これを考慮するた

表-2 配合表

配合名	補正係数	W/C (%)	s/m (%)	W	C	S	Bd	Bs	G	SP [C×(%)]
				(kg/m ³)						
家屋解体廃瓦POC	0.92	23	20	94	408	149	1079	-	-	1.2
7号規格外品廃瓦POC	0.91			85	371	135	-	1132		1.2
6号規格外品廃瓦POC	0.87			90	390	142		1104		1.2
7号砕石POC	0.92			97	424	155	-	1373.5	0.8	
6号砕石POC	0.85			98	426	155	-	1369.6	0.8	

めに、実積率に補正係数を乗じ単位粗骨材量を決定する。なお、補正係数は試し練り等の予備実験をもとに定めること³⁾とされている。

2.3 供試体作製方法

練混ぜには公称容量 0.06 m³の水平 2 軸型強制練りミキサを用いた。ミキサにセメント、粗骨材および細骨材を投入して空練をした後、練混ぜ水（混和剤含む）を投入し練り混ぜた。なお、廃瓦を用いた POC を製造する場合には、まず廃瓦を全量ミキサに投入し、所定量の表面噴霧処理を施した後、すぐさま練混ぜに用いた。表面噴霧処理は、強制練りミキサ内に廃瓦を投入後、ミキサを作動させながら電動噴霧器により廃瓦全体に均等に水が掛かるように噴霧した。噴霧時間は、電動噴霧器の時間当たりの噴霧量を基に、廃瓦の種類と練混ぜ量に応じて算出した。

練混ぜ後ミキサから排出し切返しを行った後、フレッシュ性状判定試験²⁾を実施して製造した POC のフレッシュ性状を確認し、供試体作製可と判断された場合、供試体を作製した。

供試体の締固めは、表面振動機（振動数 160Hz、振幅 0.8mm）を用いて実施し、供試体に収まるべき質量を計量し、2 層に分けて型枠に詰めた。なお、供試体は各配合においてφ100×200mm（円柱供試体）を 5 体、100×100×400mm（角柱供試体）を 3 体ずつ作製し、各種試験において適宜使用した。

2.3 試験方法

試験項目は、空隙率試験（JCI-SPO2-1）、透水試験（JCI-SPO3-1）、圧縮強度試験（JIS A 1108）、曲げ強度試験（JIS A 1106）である。

さらに、家屋解体廃瓦を POC 用粗骨材として用いることによる POC の吸水性能に与える影響の把握を目的に、φ100×200mm の供試体を用いて、POC の含水率試験を JIS A 1125 に準拠して実施した。なお、POC 供試体は、廃瓦が飽和状態になるまで水に浸漬させた後、空隙内の水抜きを目的に、24 時間恒温室（20±5℃）内で表面の乾燥対策を施し気中保管したものを用いた。

各配合において作製した供試体のうち円柱供試体については、5 体全てに対して空隙率試験および透水試験を行った後、5 体中 3 体に対して材齢 28 日において圧縮強度試験を行い、他の 2 体に対しては含水率試験を行った。また、角柱供試体については、材齢 28 日において曲げ強度試験を行った後、2 つに破断された供試体に対して空隙率試験を行い、その平均をそれぞれの角柱供試体の空隙率とした。

3. 実験結果および考察

3.1 連続空隙率と透水係数

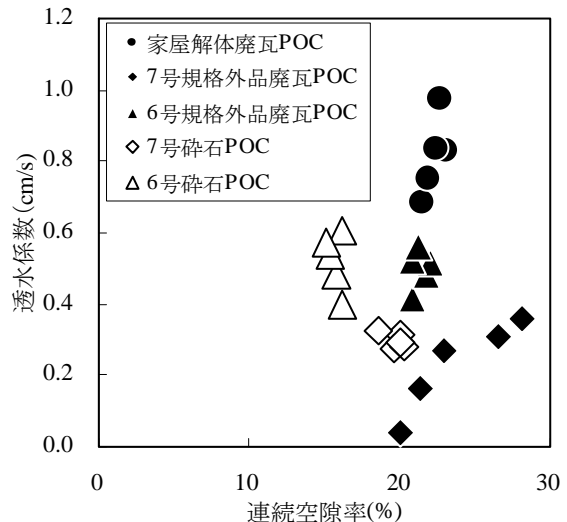


図-3 連続空隙率と透水係数

図-3 に連続空隙率と透水係数の関係を示す。一般的には、連続空隙率が大きくなるほど透水係数が大きくなる傾向があることが知られている。しかし、図-3 において、連続空隙率にばらつきが生じた 7 号規格外品廃瓦 POC ではその傾向が明確に現れたが、他の POC では対象となる供試体の空隙率のばらつきが小さいため、明確な傾向は確認できなかった。

骨材粒径に着目すると、粒径の小さな 7 号規格外品廃瓦および 7 号砕石を用いた POC と比較して、粒径の大きな 6 号規格外品廃瓦および 6 号砕石を用いた POC の方が、同程度の空隙率においてより大きな透水係数を示すことが確認できる。また、家屋解体廃瓦を用いた POC は、6 号規格外品廃瓦 POC とほぼ同様の傾向を示しており、これは家屋解体廃瓦が 6 号規格外品廃瓦に近い粒度分布であることから、POC 供試体の内部も似たような構造となっているためと推察される。また、家屋解体廃瓦の実積率は 57.9% と他の骨材と比較して比較的小さいことから、空隙の径が大きくなったことも透水係数が大きな値を示した要因として推察される。

なお、試験結果より、家屋解体廃瓦 POC は、透水性舗装における透水係数の下限値⁴⁾である 0.01 cm/s を十分に満たしていることから、透水性能からみて、今回製造した POC は透水性舗装材料として用いることに問題はないことが明らかとなった。

3.2 全空隙率と強度

(1) 圧縮強度

図-4 に全空隙率と圧縮強度の関係を示す。図-3 の結果と同様に、全空隙率にばらつきが生じた 7 号規格外品廃瓦 POC では、全空隙率が大きくなるに従い圧縮強度が小さくなる一般的な傾向が確認されるが、他の POC では、対象となる供試体の空隙率のばらつきが小さいため明確な傾向は確認できなかった。

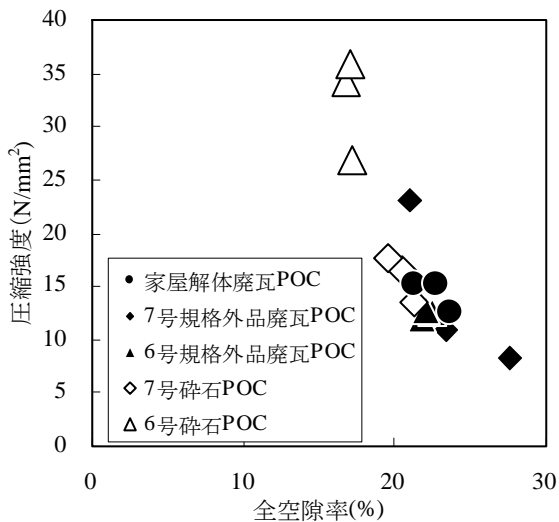


図-4 全空隙率と圧縮強度

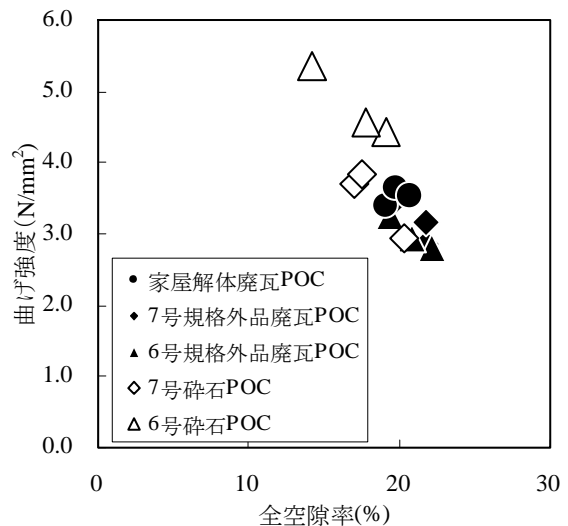
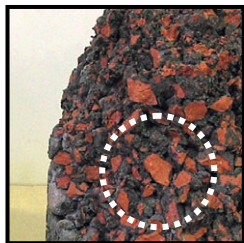


図-5 全空隙率と曲げ強度



a) 家屋解体廃瓦POC

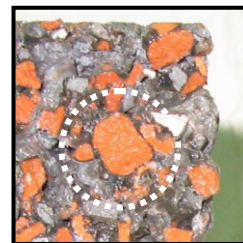


b) 規格外品廃瓦POC

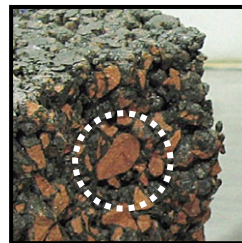


c) 砕石POC

写真-2 圧縮強度試験後の供試体破断面



a) 家屋解体廃瓦POC



b) 規格外品廃瓦POC



c) 砕石POC

写真-3 曲げ強度試験後の供試体破断面

砕石 POC に着目してみると、骨材粒径が大きい 6 号砕石 POC の方が 7 号砕石 POC よりも大きな値をとる傾向が確認できる。これは、骨材粒径が大きい分、骨材周囲のモルタル厚が増し、これにより圧縮強度が増したと推察される。

一方、規格外品廃瓦 POC に着目してみると、粗骨材粒径に関わらずほぼ同程度の値をとることが確認できる。ここで、写真-2 に各 POC の圧縮強度試験後の供試体破断面を示す。これらより、砕石 POC 供試体の破断面には結合材破壊や粗骨材と結合材間の界面破壊のみが確認されたのに対し、家屋解体廃瓦 POC および規格外品廃瓦 POC 供試体の破断面を観察すると、写真中白破線で囲まれた箇所のような、廃瓦自体が破壊される骨材破壊が顕著に確認できた。これにより、家屋解体廃瓦 POC および規格外品廃瓦 POC の場合は結合材や界面の破壊よりも粗骨材破壊が先行して発生することが明らか

かとなった。これは、家屋解体廃瓦および規格外品廃瓦の破壊値がそれぞれ 25.82%および 23.11%と砕石の破壊値 (7.31%) の 3 倍以上の値であり、廃瓦の強度が砕石の強度よりも低いことが要因である。従って、廃瓦 POC の圧縮強度は、砕石 POC に確認されたような粗骨材表面の結合材強度よりも、粗骨材 (廃瓦) の強度に支配されているといえる。

(2) 曲げ強度

図-5 に全空隙率と圧縮強度の関係を示す。これより、骨材の種類に関わらず全空隙率が大きくなるほど曲げ強度は小さくなるという一般的な傾向が確認された。また、写真-2 に示すように曲げ強度試験後の供試体破断面においても廃瓦の破壊が顕著に確認できたことから、廃瓦 POC の曲げ強度を支配する要因も圧縮強度の場合と同様に、廃瓦の強度であるといえる。なお、歩道用舗装の設計曲げ強度 2.5~3.5N/mm² 以上⁴⁾を満たしていることか

ら、家屋解体廃瓦 POC は、強度面からみて歩道用舗装材料として問題ないことが明らかとなった。

3.3 ポーラスコンクリートの吸水性能

表-3にそれぞれの配合別の含水率を、図-6に各 POC の単位体積当たりの吸水量を示す。これより、家屋解体廃瓦 POC が単位体積あたりに吸水できる量は、規格外品廃瓦 POC の約 1.3 倍、砕石 POC の約 2~2.5 倍多く、家屋解体廃瓦 POC は優れた吸水性能を備えることが明らかとなった。これは、POC の吸水量と廃瓦の吸水率では吸水条件の差異（飽和状態と 24 時間吸水）から単純に比較することはできないが、家屋解体廃瓦と規格外品廃瓦の吸水率の差が一因として挙げられる。さらには、単位モルタル量の違いなども考えられるが、今回の試験結果からは明らかにすることはできなかった。

これより、家屋解体廃瓦 POC を舗装材料として適用した場合、降雨や打ち水等で給水された際、より多くの水を内部に吸収することが可能であり、ヒートアイランド現象等の対策となる温度上昇抑制効果の向上が可能となることが期待される。

また試験結果より、今回対象とした POC を 10cm 厚の舗装材料に用いたとすると、その最大保水量（吸水量と空隙量の合計）はそれぞれ家屋解体廃瓦 POC : 40kg/m²、7 号規格外品廃瓦 POC : 37 kg/m²、6 号規格外品廃瓦 POC : 35 kg/m²、7 号砕石 POC : 29 kg/m²、6 号砕石 POC : 23 kg/m² となり、近年頻繁に発生しているゲリラ豪雨等の浸水被害に対して、廃瓦 POC 舗装は遊水地の役割を果たし、減災効果に大きく役立つといえよう。

4. まとめ

本研究から得られた知見を以下に示す。

- (1) 家屋解体廃瓦は吸水率が規格外品廃瓦と比較して大きいことが明らかとなった。この要因として、経年劣化による影響や、瓦製造当時の製造技術の差によるものと推察される。
- (2) 家屋解体廃瓦に施す表面噴霧処理における噴霧量は、その質量比で 8.9% が適量である。
- (3) 家屋解体廃瓦を用いた POC は、透水性舗装における透水係数の下限値 (0.01 cm/s) を満たしていることから、透水性能からみて透水性舗装用材料として用いて問題ない。
- (4) 家屋解体廃瓦を用いた POC は、歩道用舗装の設計曲げ強度 (2.5~3.5N/mm²) を満たしていることから、強度面からみて歩道用舗装材料として用いて問題ない。
- (5) 家屋解体廃瓦を用いた POC 用粗骨材として用いることにより、POC の吸水性能が向上する。

今後、家屋解体廃瓦 POC を用いて温度変化の計測等を

表-3 POCの飽和時の含水率

配合名	含水率 (%)
家屋解体廃瓦POC	10.7
7号規格外品廃瓦POC	8.4
6号規格外品廃瓦POC	7.8
7号砕石POC	4.7
6号砕石POC	3.5

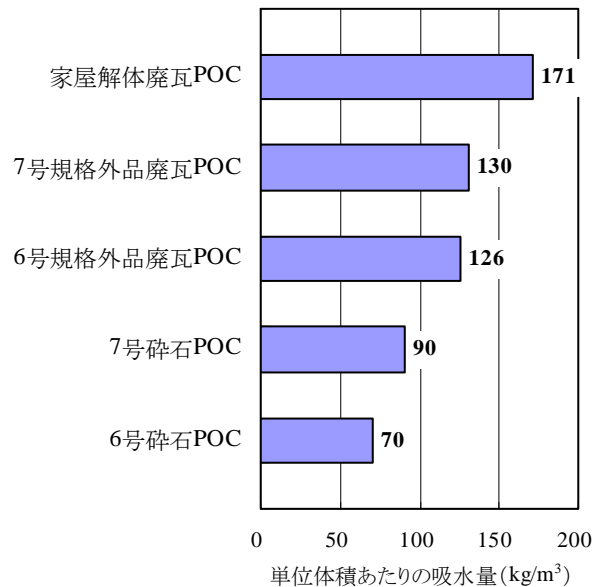


図-6 各POCの単位体積あたりの吸水量

実施し、家屋解体廃瓦が POC の温度上昇抑制効果にどれほど寄与するか確認することが、家屋解体廃瓦の有効利用の促進、また、循環型社会への前進に繋がると考える。

謝辞

本研究を進めるにあたり、竹本油脂株式会社よりご協力を頂きました。また、試験を実施するにあたり、平原英樹さん、尾澤敏行さん、猪飼元紀君に多大なご協力をいただきました。ここに記して、深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 天野佑樹, 上原匠, 梅原秀哲, 武長祐樹: 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
- 2) 坂口稔, 上原匠, 猪飼元紀: 瓦廃材を用いたポーラスコンクリートの基本的物性, セメント・コンクリート論文集, vol.65, 2012.3 発刊予定
- 3) 日本コンクリート工学協会: ポーラスコンクリートの設計・施工法の確立に関する研究委員会報告書, 2003.5
- 4) 社団法人日本道路協会: 舗装施工便覧, 2006