

論文 家屋解体廃瓦を用いたポーラスコンクリートの温熱特性

坂口 稔*1・上原 匠*2・西尾 秀登*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」という）がポーラスコンクリート（以下、「POC」という）の温熱特性に与える影響を把握することを目的に、家屋解体廃瓦を粗骨材に用いた POC 平板供試体を用いて屋外温度計試験を実施した。その結果、家屋解体廃瓦を用いた POC は、標準的な骨材を用いた POC と比較して、熱しやすく冷めやすい性質および、熱を伝えにくい性質を備えることを明らかにした。また、水を供給することにより、普通コンクリートと比較して表面温度を最大で 7℃程度、内部温度（深さ 5cm）を最大で 8℃程度低減できることを明らかにした。

キーワード: ポーラスコンクリート, 家屋解体廃瓦, ヒートアイランド現象, 容積比熱, 熱伝導率

1. はじめに

著者らはこれまでに家屋解体廃瓦の有効利用を目的に、家屋解体廃瓦のポーラスコンクリート用骨材への適用を目指した研究¹⁾に取り組んできた。その結果、家屋解体廃瓦を用いた POC（以下、「家屋解体廃瓦 POC」という）は、強度面からその利用先は歩道用舗装など、高強度が必要とされない用途に限定されてしまうものの、透水性歩道用舗装への適用には強度面および透水性能から見て問題ないことを明らかにした。さらに、家屋解体廃瓦の優れた吸・保水性能に起因して、家屋解体廃瓦 POC は、標準的な骨材（砕石）を用いた POC（以下、「砕石 POC」という）と比較して、約 2.5 倍もの吸水性能を備えることも明らかにした。

ところで、現在都心部でのヒートアイランド現象が大きな環境・エネルギー問題として取り上げられ、各都市において様々な対策が講じられている。ヒートアイランド現象対策の一つとして、舗装改良が挙げられ、保水性舗装や遮熱性舗装の採用が各地でなされている。

ここで、家屋解体廃瓦 POC は優れた吸水性能を備えることから、透水性舗装に採用した場合、降雨や打ち水などで給水させることにより、ヒートアイランド現象の抑制につながると考えられる。そこで本研究では、多孔質構造である家屋解体廃瓦が POC の温熱特性に与える影

響の把握を目的に、家屋解体廃瓦 POC を用いて屋外自然環境下における温度計試験（以下、「屋外試験」という）を実施した。なお、比較対象には砕石 POC に加えて普通コンクリート（以下、「NC」という）も用いた。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合設計

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廃瓦（記号：Bd）を、その比較対象には、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。表-2 に、各 POC の配合および基本的な物性試験結果を示す。POC の設計空隙率は 20%、水セメント比は 23%および、細骨材モルタル容積比 (s/m) は 20%の 1 水準とした。なお、各 POC の配合名は、使用粗骨材に応じて表記した。

2.2 平板供試体作製方法

図-1 に屋外試験に用いた平板供試体の概要を示す。練混ぜ方法は既往の研究と同じ方法で行い、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¹⁾を実施して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て、上下 2 層

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%）
	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 社団法人 瓦チップ研究会 代表理事

表-2 ポーラスコンクリートの配合表および基本的物性

配合名	粗骨材	補正係数	W/C (%)	s/m (%)	W	C	S	Bd	G	SP [C×(%)]	全空隙率 (%)	透水係数 (cm/s)	圧縮強度 (N/mm ²)	曲げ強度 (N/mm ²)
					(kg/m ³)									
BdPOC	家屋解体廃瓦	0.92	23	20	94	408	149	1079	-	1.2	22.7	0.815	14.3	3.5
7GPOC	7号砕石	0.92			97	424	155	-	1374	0.8	20.7	0.298	15.9	3.5
6GPOC	6号砕石	0.85			98	426	155	-	1370	0.8	16.7	0.520	32.3	4.8

に分けて締め固めた。ここで下層を締め固めた後、屋外試験で平板供試体中心部の温度を測定するためにT型熱電対を設置し、その後上層分を流し込み締め固めた。なお硬化後、平板供試体表面中央にT型熱電対をセメントペーストで貼り付けた。屋外試験に用いる際には、平板供試体と外気との熱のやり取りを平板供試体上面からに制限することを目的に、図のように平板供試体上面以外は断熱材で覆った。ただし、降雨等で平板供試体内部に浸入した水が溜まらないように、底面部には空間を空け、傾斜をつけて排水口を設けた排水構造とした。なお、POCとの比較対象に用いたNC（粗骨材最大寸法：20mm）の設計基準強度は24N/mm²である。

2.3 屋外試験環境

試験場所には周囲に日射を遮る要因のない開けた場所を選定した。気温測定用熱電対は、直接日射が当たらず空気の滞留が生じない容器に入れ、床面から約1.2mの高さに設置した。さらに試験場への日射量および降水量を計測することを目的に、全天日射量計および雨量計を供試体設置場所に設置した。試験は2011年10月から継続的に実施し、考察対象期間を夏期の舗装温度が高温となる時期とし、試験条件は水分が平板供試体内部に無い状態（晴天時）および、降雨により平板供試体内部に水が蓄えられている状態（降雨後）の2水準とした。晴天時では、使用材料の熱的物性への影響を把握するために、表面温度に加えて中心温度の変動に着目した。降雨後の変動では、コンクリートおよび粗骨材の種類の違いによる差異に着目した。

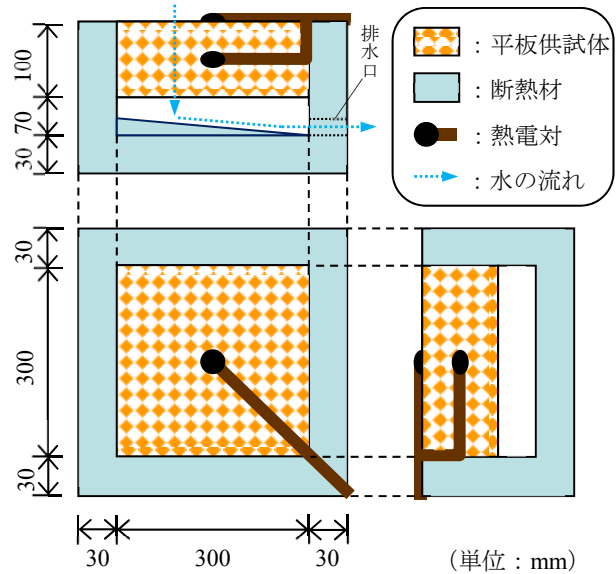


図-1 平板供試体概要

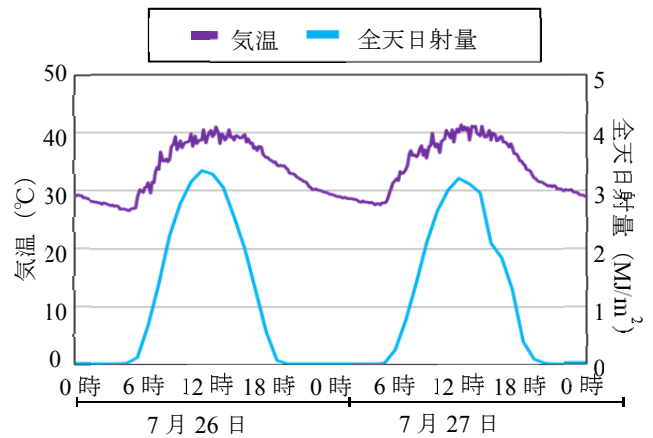


図-2 晴天時の気象条件（2012年7月26, 27日）

3. 晴天時の温度変化

3.1 試験条件

晴天時の平板供試体温度の変化についての考察対象には、快晴となった2012年7月26日および27日の2日間とした。図-2に考察対象期間における試験場における気温および日射量を示す。考察対象期間を含めた7月23日～28日の6日間は屋外試験場に設置された雨量計において降水は確認されておらず、また気象庁（名古屋地方気象台）による統計においても、降水は観測されていない。期間中の屋外試験場における最高気温は41.9°C（名古屋地方気象台：36.9°C）であった。

3.2 試験結果および考察

(1) 平板供試体表面温度

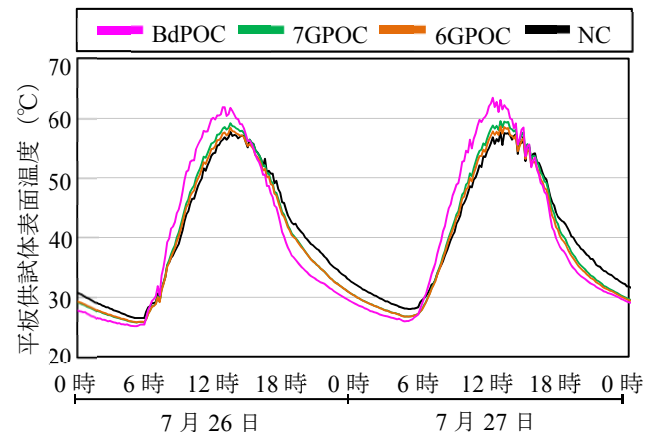


図-3 晴天時の平板供試体表面温度

図-3に各供試体の表面温度変化を示す。図-2, 3より表面温度と全天日射量を比較すると、快晴時の表面温度の変動は、全天日射量の変動に非常によく対応しており、日の出後、供試体が日射を受けると、表面温度は気温とともに上昇し始め、その後、全天日射量がピークを迎えたのち、表面温度は下降し始めることがわかる。各平板供試体表面温度の変動の様子から、温度上昇および下降時におけるグラフの傾きを比較すると、傾きの大きい順に $BdPOC > 7GPOC \approx 6GPOC > NC$ となった。グラフの傾きが大きいことは、熱しやすく冷めやすいことを表しており、家屋解体廃瓦 POC は碎石 POC と比較して、また、ポーラスコンクリートは普通コンクリートと比較して熱しやすく冷めやすい特性があることが明らかとなった。この結果には、容積比熱が関係していると考えられる。容積比熱が小さいほど、物体の単位体積あたりの温度変化に必要な熱量は小さい。すなわち、熱しやすく冷めやすい物質であるといえる。そこで、表-3に各配合の容積比熱の計算結果を示す。ところで、各 POC の全空隙率を見てみると、BdPOC は 22.7% であり、他と比較して大きい。空隙率が大きいということは、容積比熱の小さい空気の割合が増えるということであり、家屋解体 POC 平板供試体の容積比熱が小さくなった原因には、空隙率の大きさに起因する可能性も考えられる。そこで、設計空隙率 (20%) での計算結果も表中の最右列括弧内に示す。容積比熱の小さい (熱しやすく冷めやすい) 順に BdPOC (1.274 MJ/m³/K), 7GPOC (1.521 MJ/m³/K), 6GPOC (1.552 MJ/m³/K), NC (2.10 MJ/m³/K) となり、図-3のグラフの傾きの傾向と一致した。これより、POC 平板供試体の表面温度の変動は、POC の容積比熱が要因であることが明らかといえる。モルタルは同配合のものを用いていることから、各配合における容積比熱が表-3に示す値になったのは、粗骨材の影響が大きいといえる。従って、容積比熱の小さな家屋解体廃瓦を用いることで、家屋解体廃瓦 POC は「熱しやすく冷めやすい」性質を備えることが明らかとなった。

(2) 平板供試体中心温度

図-4に平板供試体中心温度の変化を示す。平板供試体の中心温度は表面温度の変動と異なり、全天日射量が変動しても表面温度ほどは鋭敏に反応せず、いくらか遅れてから変動する傾向が確認できる。これは平板供試体表面から中心部に熱が伝導されるのに時間がかかるからである。図より、グラフの傾きが大きい順に示すと、 $7GPOC \approx 6GPOC > NC > BdPOC$ となり、表面温度とは温度変化の傾向が異なっていることが明らかとなった。さらに、最高温度についても、表面温度では家屋解体廃瓦を用いた BdPOC が碎石を用いた GPOC や NC より 3~5℃程度高かったのに対して、中心温度では逆に 3~5℃程度低く

表-3 各供試体の容積比熱

配合名	材料	単位容積に占める体積	各材料の容積比熱	供試体の容積比熱
		m ³	MJ/m ³ /K	MJ/m ³ /K
BdPOC	粗骨材	0.51	1.52	1.274 (1.313)
	モルタル	0.26	1.88	
	空気	0.23	1.30E-03	
7GPOC	粗骨材	0.51	1.92	1.521 (1.521)
	モルタル	0.29	1.88	
	空気	0.20	1.30E-03	
6GPOC	粗骨材	0.52	1.89	1.552 (1.507)
	モルタル	0.30	1.88	
	空気	0.17	1.30E-03	
NC	-	1.00	-	2.10

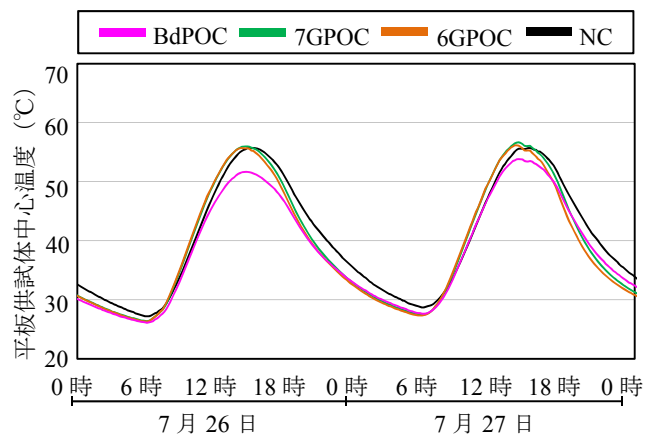


図-4 晴天時の平板供試体中心温度

なった。このような結果が得られた要因には、各材料の熱伝導率が関係していると推察される。熱伝導率の大小は、一般的に [固体] > [液体] > [気体] となる。また、各材料の熱伝導率の目安²⁾は概ね、コンクリート：1.4, 碎石：1.6, 瓦：0.9, 空気：0.02, 水：0.6 (W/m/K) 程度である。骨材内部にも空隙を持つ多孔質構造である家屋解体廃瓦の熱伝導率は、碎石と比較して小さく、表面からの熱が中心部に到達し難かったことが要因であるといえる。一般的な粘土瓦は高い断熱効果を備えており、POC 粗骨材となった状態においてもその機能が発揮されていると考えられる。従って、家屋解体廃瓦 POC を建物屋上の床板などに用いた場合、ある程度の厚みを持たせることで、その断熱効果により普通コンクリートを用いた場合と比較して階下の部屋の温度変動を抑制できるなど、省エネ効果が期待できるといえよう。

4. 降雨後の温度変化

4.1 試験条件

図-5に考察対象期間における試験場の気温および日射量を示す。降水が観測された時刻を図中に青色下矢印で示す。降水は8月6日に観測され、試験場に設置され

た雨量計によると、12～13 時の間に 7.0mm、15～16 時の間に 3.5mm の降水量を観測した。8 月 7 日以降において降水は観測されておらず、また、期間中の最高気温は、8 月 7 日の 11 時半頃に 40.9℃(名古屋地方気象台:35.4℃) を観測した。

4.2 試験結果および考察

(1) 平板供試体表面温度

図-6 に考察対象期間中の平板供試体表面温度の変動を示す。図より、8 月 5 日や 6 日午前中の温度変化の傾向が、3.2(1)と同様であることが確認される。降水が記録された 8 月 6 日の 12 時半頃になると各平板供試体は雨により冷やされ一気に温度が低下している。その後雨が止み、温度は上昇に転じるが、降雨が再び記録された 15 時半頃に再度、各平板供試体の表面温度は一気に低下している。その後は徐々に晴天時の傾向に戻っていること

がわかる。

a) 普通コンクリートとの比較

図-7 に NC と各 POC の温度差(「各 POC の温度」-「NC の温度」)を示す。図では、縦軸正方向に大きくなるほど、NC と比較して各 POC の温度が高いことを表す。NC と GPOC の温度差の傾向は、8 月 6 日の降雨前後においても、高低差が±3℃程度に収まっていることが確認できる。一方、NC と BdPOC の温度差の傾向は、降雨日(8 月 6 日)の前後において変化していることが確認できる。降雨翌日には、それまで最高表面温度が NC と比較して 5～7℃高かったのに対して、同等程度まで温度差が縮小している。また、日射量が減少する午後になると、BdPOC の温度は NC よりも低くなり、日没(18 時 50 分頃)までの差は徐々に拡がり BdPOC の表面温度は、NC より最大で約 7.5℃低くなった。日没後は徐々に温度

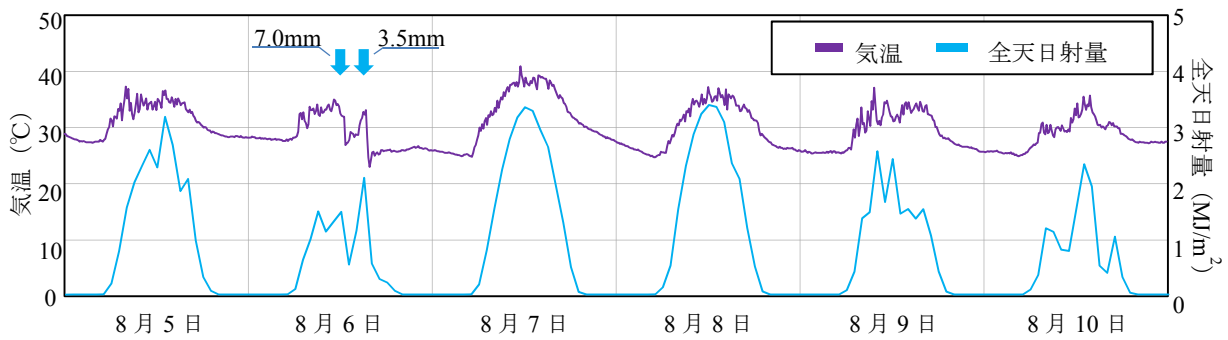


図-5 考察対象期間中の気象条件 (2012 年 8 月 5～10 日)

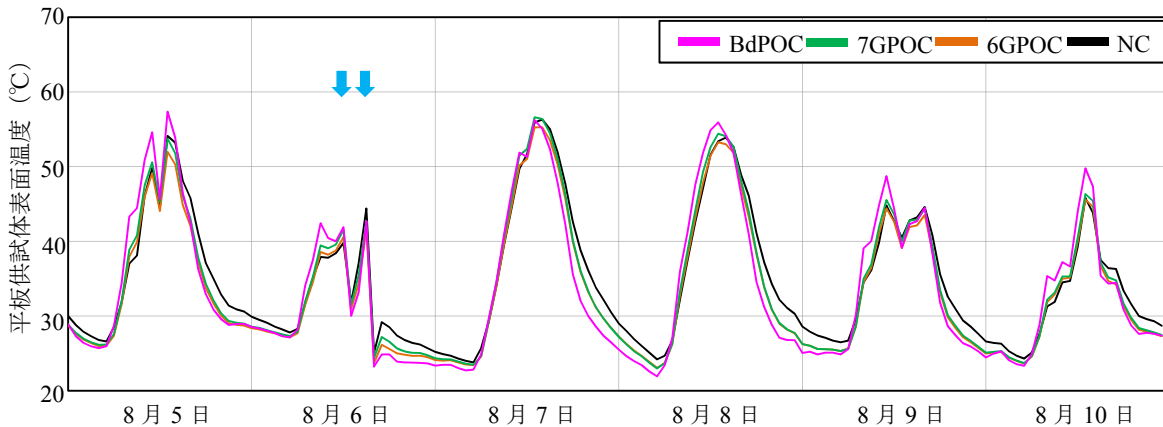


図-6 考察対象期間中の平板供試体表面温度

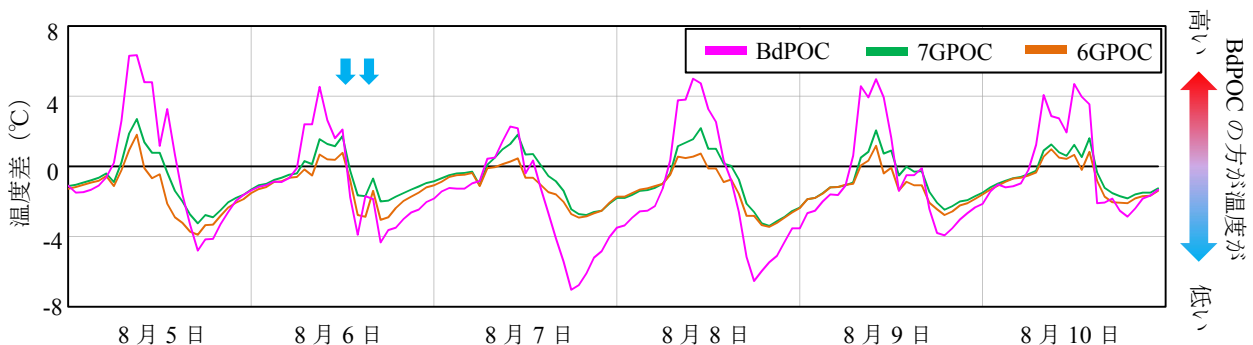


図-7 普通コンクリートとの表面温度差

差は小さくなり、翌日(8月8日)陽が昇ると、逆に BdPOC の表面温度が高くなった。降雨の2日後(8月8日)における NC と BdPOC の最高温度差は降雨前との明確な違いは確認できなかったが、日射量が減少に転じる午後後の温度差を見てみると、降雨前の温度差の変化と比較して、降雨翌日(8月7日)と同様に、日没までに温度差が6℃以上となり、降雨前とは異なる傾向を示した。NC との比較において、砕石 POC と家屋解体廃瓦 POC に温度低減差が生じたのは、降雨によって供給された水が、家屋解体廃瓦へ吸収され、この水が徐々に大気に放出される際に、平板供試体の熱を奪ったためであると考えられる。この現象は降雨3日後(8月9日)にも若干ながら確認された。ただし、降雨4日後(8月10日)になると、温度差は GPOC の傾向とほぼ同程度となり、降雨前と同様な波形となった。

以上の結果より、家屋解体廃瓦 POC の表面温度は普通コンクリートと比較して、水を与えることで最高温度を同等程度まで低減でき、日が傾く時間帯においては、最大で7℃程度温度低減が可能であることが明らかとなった。

b) 粗骨材の違いによる比較

図-8 に BdPOC と各 GPOC の平板供試体表面温度差(「BdPOC の表面温度」-「各 GPOC の表面温度」)を示す。図では縦軸正方向に大きくなるほど、各 GPOC と

比較して BdPOC の温度が高いことを表す。図より降雨前日(8月5日)では、BdPOC は各 GPOC と比較して、日の出とともに温度が高くなり、それぞれ最大温度差が約5℃(7GPOC)および、約6℃(6GPOC)となった。これは前述したように、容積比熱の差によると推察される。降雨日の翌日(8月7日)の全天日射量が増加する時間帯(午前中)を見てみると、一時は BdPOC の方が高温にはなるものの、降雨前とは異なり最大でも2℃程度の差となった。さらに、全天日射量が減少に転じる午後を見てみると、BdPOC は各 GPOC の表面温度を最大4℃程度下回ることが確認された。これらは、a)と同様に降雨によって供給された水が家屋解体廃瓦へ吸収され、この水が徐々に大気に放出される際に平板供試体の熱を奪ったためであると推察される。

(2)平板供試体中心温度

図-9 に考察対象期間中の平板供試体中心温度の変動を示す。図より、表面温度と同様に降雨前においては3.2(2)と同様な温度変化の傾向が確認されたが、降雨が確認された時間帯には、各平板供試体の中心温度は減少に転じている。

a) 普通コンクリートとの比較

図-10 に NC と各 POC の温度差(「各 POC の温度」-「NC の温度」)を示す。図では、縦軸正方向に大きくなるほど、NC と比較して各 POC の温度が高いことを表す。

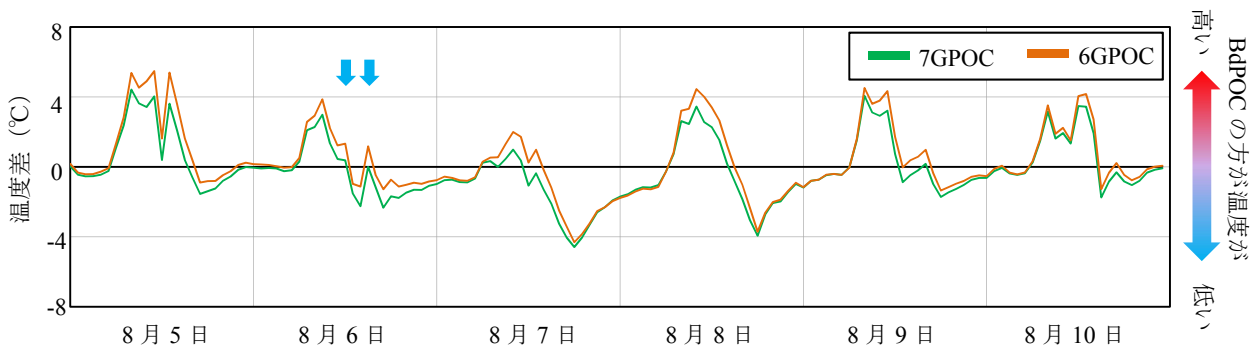


図-8 家屋解体廃瓦ポーラスコンクリートと砕石ポーラスコンクリートの表面温度差

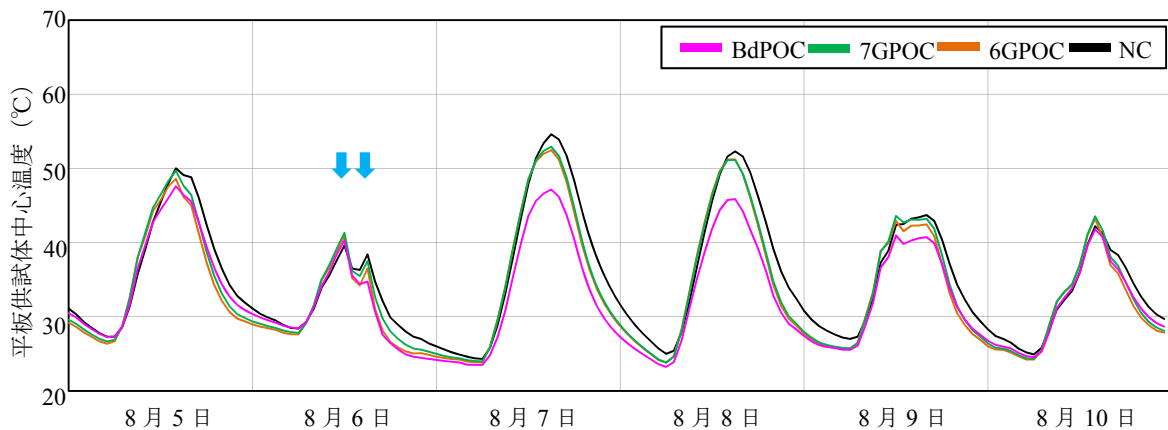


図-9 考察対象期間中の平板供試体中心温度

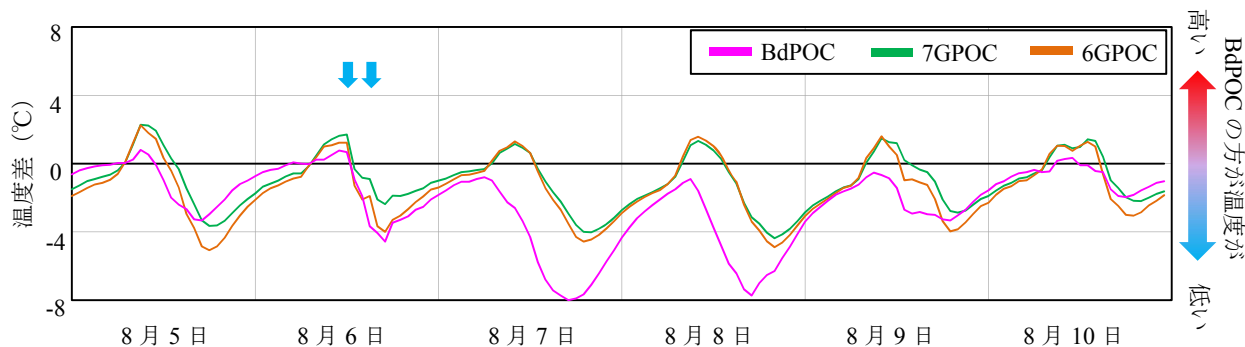


図-10 普通コンクリートとの中心温度差

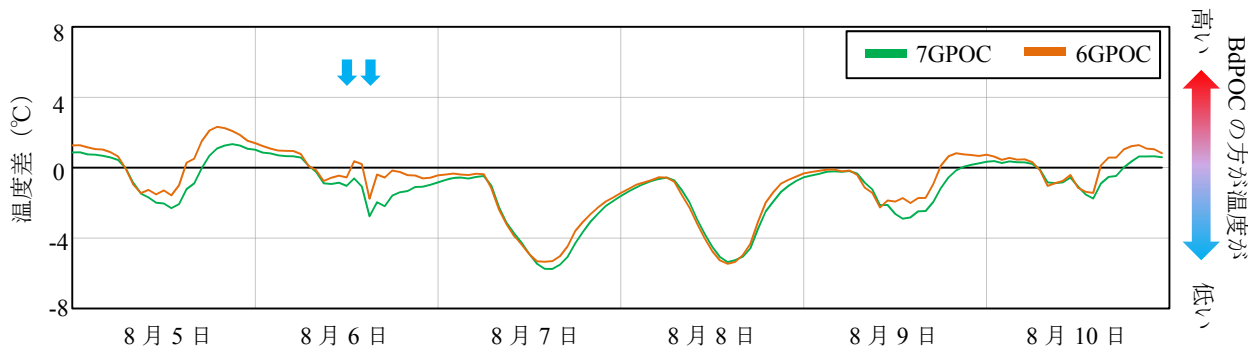


図-11 家屋解体廃瓦ポーラスコンクリートと砕石ポーラスコンクリートの中心温度差

表面温度と同様に、降雨の前後において、GPOC と NC との 1 日の周期の傾向には明確な差は確認できなかった。一方、BdPOC と NC の差を見てみると、降雨日翌日（8 月 7 日）に中心温度が NC を大きく下回っていることが確認でき、その差は正午において約 4℃、日没頃には最大で 8℃以上となった。また、その翌日（8 月 8 日）においても同程度の温度差が確認された。これはこれまでの推察と同様に、家屋解体廃瓦が降雨により供給された水を放出することで、熱量が水の潜熱として使用され、平板供試体供試体の温度上昇が抑制されたためと推察される。また、降雨 3 日後（8 月 9 日）においても、中心温度の上昇が抑制されている傾向が確認できた。

b) 粗骨材の違いによる比較

図-11 に BdPOC と各 GPOC の中心温度差（「BdPOC の中心温度」－「各 GPOC の中心温度」）を示す。図-11 では縦軸正方向に大きくなるほど、各 GPOC と比較して BdPOC の中心温度が高いことを表す。降雨時刻（8 月 6 日 12 時半頃）から 3 日後（8 月 10 日）の日没時刻頃まで BdPOC の中心温度は GPOC の中心温度を下回り続けた。これは吸水率の大きな家屋解体廃瓦が降雨により給水された水を家屋解体廃瓦に吸水していたためと推察される。これより、POC は家屋解体廃瓦を用いることにより、温度上昇抑制機能が向上することが明らかとなった。

5.まとめ

本研究から得られた知見を以下に示す。

- (1) 家屋解体廃瓦ポーラスコンクリートは、標準的な骨

材を用いたポーラスコンクリートと比較して、家屋解体廃瓦の容積比熱の小ささに起因して、「熱しやすく冷めやすい」性質を備えることが明らかとなった。

- (2) 家屋解体廃瓦ポーラスコンクリートは、標準的な骨材を用いたポーラスコンクリートと比較して、家屋解体廃瓦が多孔質構造であり微細な空隙を多く含むことから熱伝導率が小さくなることに起因して、熱が伝わりにくい断熱効果を備えることが明らかとなった。
- (3) 家屋解体廃瓦ポーラスコンクリートは普通コンクリートと比較して、水を供給することで表面温度が最大 7℃、内部温度で最大 8℃程度温度低減が可能であることが明らかとなった。
- (4) 家屋解体廃瓦ポーラスコンクリートは降雨等により内部へ水が供給されることで温度上昇が抑制されることが明らかとなり、その効果は家屋解体廃瓦の優れた吸保水性能により数日間継続することが明らかとなった。

参考文献

- 1) 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 POC の基本的物性, コンクリート工学年次論文集, Vo34, No.1, pp.1552-1557, 2012
- 2) 例えば, 理科年表 平成 25 年版: 国立天文台, pp.414-416