

論文 再生骨材を用いたポーラスコンクリートの蒸発冷却効果

篠崎 真澄*¹・半井 健一郎*²

要旨: 環境保全の観点から、再生骨材の利用拡大やヒートアイランド現象の対策が求められている。本研究では、簡易処理された低品質の再生骨材を用いたポーラスコンクリートを保水性舗装材へと適用することを提案する。吸水試験や保水試験、実際の冷却効果を検討するための屋外曝露試験を実施した。普通骨材との比較や粒径の影響を検討した結果、再生骨材の付着モルタル分が吸水量や保水量の増加に寄与しており、ポーラスコンクリートに再生細骨材を用いることで冷却効果を高められることが確認された。

キーワード: 再生骨材, ポーラスコンクリート, ヒートアイランド現象, 保水性舗装材, 毛细管張力

1. はじめに

高度経済成長期に建設されたコンクリート構造物の多くが更新時期を迎え、コンクリート塊の発生量の増加が見込まれる¹⁾。再生骨材の活用が進められているが、モルタル分の付着によって吸水性が高く、普通骨材と比較して品質が劣る。これまではほとんどが道路用路盤材や埋戻し材として再利用されてきた²⁾が、道路投資額の低下³⁾に伴い、新たな再利用方法が求められている。コンクリート用骨材としての再生骨材の利用促進のため、2007年にはJIS A 5021, JIS A 5022, JIS A 5023が制定され、付着モルタル分の処理レベルに応じてH, M, Lと区分された。しかし、骨材としての品質を高めるためには高度な処理が必要不可欠となるため、資源の有効利用との両立が課題となる。

また近年、都市部の温度が上昇するヒートアイランド現象が問題となっている。日本の道路の多くでは施工性に優れたアスファルト舗装が採用されているが、コンクリート舗装とすることで路面温度の低減効果が期待できる⁴⁾。さらに、連続粗大空隙を持つポーラスコンクリート（以下PoCと称す）も注目されている。PoCは高い保水性や吸水性、透水性を特徴とするため、降雨時に保水、晴天時や高温時に水分が蒸発する。その際、気化熱としてエネルギーが消費されることで、冷却効果が期待できる⁵⁾。ここで、吸水性、保水性は小粒径の骨材を用いることで向上することが報告されている⁶⁾。

環境対応型の建設材料として、PoCの特徴をさらに高めるため、再生骨材をPoCに適用するための研究が進められている⁷⁾。PoCは、通常のコンクリートのように高い構造耐力を受け持つ必要はほとんどないため、吸水性が高いという再生骨材の特徴を長所として活用できる可能性がある。強度に関しては、再生骨材を用

表-1 供試体名および条件

供試体	骨材		形態	空隙率 [%]	W/C [%]
	種類	粒径 [mm]			
再生G	再生骨材	5-20	ポーラスコンクリート (PoC)	25	25
普通G	普通骨材				
再生S	再生骨材				
普通S	普通骨材				
再生Wチップ	再生骨材	5以下	ウッドチップ混入 PoC	30	30
普通Wチップ	普通骨材				
再生コンクリート	再生骨材	20以下	通常のコンクリート	4.5	60
普通コンクリート	普通骨材				

いることで若干低下するが、そもそも高い強度を要求されていないため、PoCとして必要な強度は十分に確保できる⁷⁾。

そこで本研究では、再生骨材の利用拡大とヒートアイランド現象の対策を目的とし、簡易処理による低品質の再生骨材Lを用いたPoCを保水性舗装材へと適用することを提案した。強度の低下要因となることで利用を阻害してきた付着モルタル分の吸水性の高さを活用することで、PoCの吸水・保水性をさらに高め、水分蒸発時の冷却効果が期待でき、再生骨材の普及へ繋がることと期待される。また、骨材粒径の違いをパラメータとすることで、冷却効果に及ぼす粒径の影響を検討した。

2. 試験概要

2.1 供試体の概要

骨材は再生骨材と普通骨材を使用し、それぞれ粗骨材（最大粒径20mm）Gと細骨材Sを用いた。再生骨材は簡易処理を施した区分Lを用いた。供試体名および条件を表-1、配合表を表-2、骨材の物理特性を表-3

*1 群馬大学大学院 工学研究科社会環境デザイン工学専攻 (学生会員)

*2 群馬大学大学院 工学研究科准教授 博士(工学) (正会員)

表-2 コンクリートの配合

シリーズ名	目標空隙率, 空気量[%]	W/C	単位量[kg/m ³]							高性能AE 減水剤 [kg/m ³]	AE剤 [kg/m ³]
			W	C	普通骨材		再生骨材		ウッドチップ		
					S	G	S	G			
再生G	25	25	81	326	0	0	0	1,363	0	2.28	0
普通G	25	25	81	326	0	1,617	0	0	0	2.28	0
再生S	25	25	81	326	0	0	1,352	0	0	2.28	0
普通S	25	25	81	326	1,623	0	0	0	0	2.28	0
再生Wチップ	30	25	81	326	0	0	1,232	0	407	0	0
普通Wチップ	30	25	81	326	1,402	0	0	0	407	0	0
再生コンクリート	4.5	55	170	308	0	0	758	893	0	0	7.71
普通コンクリート	4.5	55	170	308	863	1,060	0	0	0	0	7.71

表-3 使用骨材の物理特性

骨材	区分	粒径[mm]	吸水率[%]	表乾密度[g/cm ³]
再生骨材	粗骨材	L	20-5	6.05
	細骨材	L	5以下	6.66
普通骨材	粗骨材	-	20-5	0.88
	細骨材	-	5以下	1.61

に示す。PoCの目標空隙率は25±3%、W/Cは25%とし、骨材粒径の違いによる影響を評価するためにペーストおよび骨材の体積を統一して300×300×60mmの平板を作製した。比較用に、ウッドチップ(Wチップ)を混入したPoCと通常のコンクリートを再生骨材、普通骨材を用いて作製した。Wチップは粒および繊維状態で最大30mm、起源は樹皮部を含む国産杉としている。なお、再生S、普通S、再生Wチップならびに普通Wチップの各PoCは圧縮振動プレス機を用いて作製し、屋外空中養生を28日間行った。再生Gと普通GのPoC、および通常のコンクリートは突固めによって作製し、20±3℃の条件で屋内空中養生を28日間行った。

2.2 試験方法

(1) 吸水試験

社団法人インターロッキングブロック舗装技術協会(JIPEA)の「保水性舗装用コンクリートブロックの品質規格」を参考に実施した。なお、供試体作製時の寸法は300×300×60mmだが、吸水試験においては後述する曲げ強度試験終了後の供試体を100×100×60mmに切断してそれぞれ併用した。供試体を105℃の乾燥炉で24時間乾燥し質量を測定、その後大容器内にてスノコを使用し底面から浮かせた状態で供試体を設置し、供試体の底面から5mmまで浸水させた。浸水開始から5分、10分、20分、30分、60分、90分、2時間、4時間、6時間、12時間、24時間、48時間、72時間において質量を測定した。測定時は、浸水面に付着している水分を絞った布でぬぐった。測定結果を用いて、式(1)より吸水量を算出した。

$$a_t = \frac{m_t - m_0}{V} \quad \text{式(1)}$$

ここで、 a_t : 吸水量[g/cm³]、 m_0 : 供試体の乾燥質量[g]、

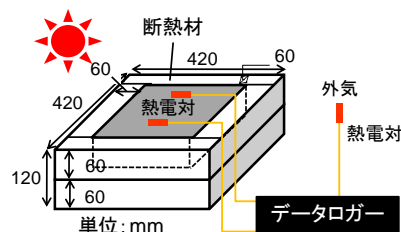


図-1 屋外曝露試験の概要

m_t : 時間 t における供試体の質量[g]、 V : 供試体の体積[cm³]とする。なお、JIPEAでは30分の吸い上げ高さを指標としているが、これは供試体における吸水の割合を算出しているため、吸水性の大きく異なる材料を相互に比較できないと考え、本研究では吸水量を指標とし検討した。

(2) 保水試験

蒸発のもととなる水分の保水性を検討するため、吸水試験終了直後の供試体を用いて保水試験をした。試験はJIPEAの「保水性舗装用コンクリートブロックの品質規格」を参考に行った。供試体寸法は(1)吸水試験と同様とした。約20℃の水に24時間浸漬させた後に、20±3℃の室内で密閉式のプラスチック容器に入れて静置し、30分間水を切った。絞った布で供試体表面部に付着した水をぬぐい、直ちに質量を計測したものを湿潤質量とした。併せて、吸水試験で求めた乾燥質量と供試体の体積より、式(2)を用いて保水量を算出した。

$$W = \frac{m_w - m_0}{V} \quad \text{式(2)}$$

ここで、 W : 保水量[g/cm³]、 m_w : 湿潤質量[g]、 m_0 : 供試体の乾燥質量[g]、 V : 供試体の体積[cm³]とする。

(3) EPMA分析

PoCの内部構造を把握するため、粗骨材を用いた再生G、普通GにおいてEPMA分析を行った。保水、吸水試験終了後の供試体にメタクリル樹脂を減圧注入させることで空隙を充填し、24時間静置、十分固化した後に、供試体の中央部分の幅40mm、高さ40mm、厚さ8mmを切り出した。その後観察面(40×40mm)を

研磨後、48時間の真空乾燥を行った。乾燥後直ちに取り出し、カーボンコーティング後 EPMA 分析用供試体とした。

(4)屋外曝露試験

実際の蒸発冷却効果を評価するため、全ての供試体で屋外曝露試験を行った。供試体の上面以外を図-1のように断熱材（発泡スチロール）で覆い、周囲に遮断物がなく直射日光や降雨の影響を受ける屋外に設置した。供試体表面（2か所）と外気の温度から、水分の蒸発による表層部の温度上昇の抑制効果を評価した。

(5)曲げ強度試験

養生完了直後（材齢 28 日）および屋外曝露試験終了後（材齢 150 日）の平板について、JIS A 5371 に準拠して曲げ強度試験を行った。屋外曝露は 120 日間で、その後は含水率を統一させるために屋内で 30 日間静置した。荷重は 1 点荷重とし、荷重速度は毎分 0.1～0.2N/mm²、スパン長は 240mm とした。式(3)を用いて曲げ強度を算出し、養生終了時の平板は 3 体の平均を求め、屋外曝露試験後の平板は 1 体の結果を使用した。

$$\sigma = \frac{3}{2} \times \frac{L}{b \times d^2} \times F \quad \text{式(3)}$$

ここで、 σ : 曲げ強度[N/mm²], b : 平板の有効幅[mm], d : 平板の厚さ[mm], L : スパン[mm], F : 最大荷重[N]である。

3. 試験結果

3.1 吸水量

図-2 に吸水量の経時変化を示す。骨材径の影響については、既往の研究⁶⁾と同様に、再生骨材と普通骨材のいずれにおいても、小粒径骨材を用いた PoC ほど吸水量が大きくなった。小粒径であると PoC の空隙径も小さくなり、毛細管張力が増加したためと考えられる。

骨材種類の違いに着目すると、再生骨材を用いた PoC の方が普通骨材を用いた PoC よりも常に高い吸水量を示した。これは、3.2 保水量で後述する通り、再生骨材の吸水率の高さが要因と考えられる。同様の傾向が通常のコンクリートでも確認できた。なお、再生 W チップを除き、粗大な連続空隙を有する PoC では、通常のコンクリートよりも早期に吸水量が安定した。一方、再生 W チップは 72 時間の時点でも吸水量は増加傾向にあり、W チップを混入することで非常に緩やかな吸水傾向を示すことが明らかとなった。

3.2 保水量

図-3 に保水量を示す。再生 W チップが最も高く、次に小粒径 PoC の再生 S、普通 S となった。再生 W チップにおける吸水範囲は、再生骨材に加え W チップに

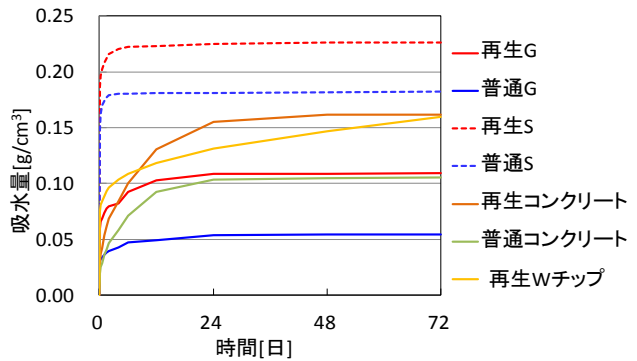


図-2 吸水量の経時変化

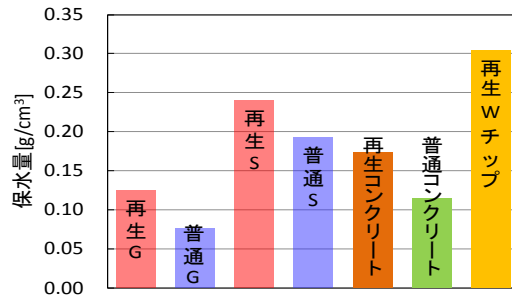


図-3 保水量

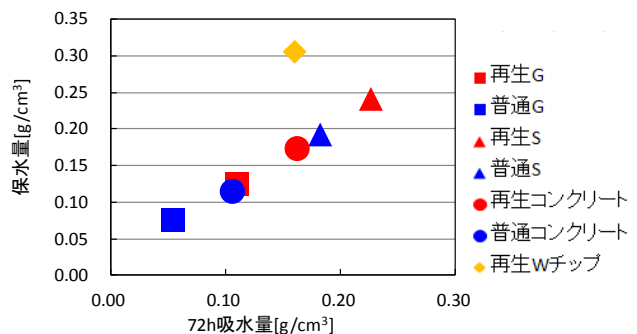


図-4 72h 吸水量と保水量の関係

も及ぶためであると考えられる。大粒径の再生 G は普通コンクリートと同程度の値を示したが、普通 G は最も低い値となった。大粒径を用いた PoC では空隙径が粗大となるためであると言える。また、再生コンクリートは普通コンクリートよりも大きい値を示し、全てのシリーズに共通して、再生骨材を用いることで保水量が大きくなった。

図-4 に 72 時間時点での吸水量（72h 吸水量）と保水量の関係を示す。再生 W チップ以外の PoC、通常のコンクリートにおいては 72h 吸水量と保水量はほぼ線形関係にあり、保水量は 72h 吸水量の約 1.1 倍であった。再生 W チップは、図-2 で述べたように緩やかな吸水傾向を示し、72 時間では吸水途上にあつたため、他と比較して 72h 吸水量に対する保水量が大きくなったと考えられる。

図-5 に、再生 S と普通 S、再生 G と普通 G、再生コンクリートと普通コンクリートにおける保水量の差分と、骨材吸水量における差分の関係を示す。骨材吸水量とは、骨材の吸水率と単位量から算出した単位体積

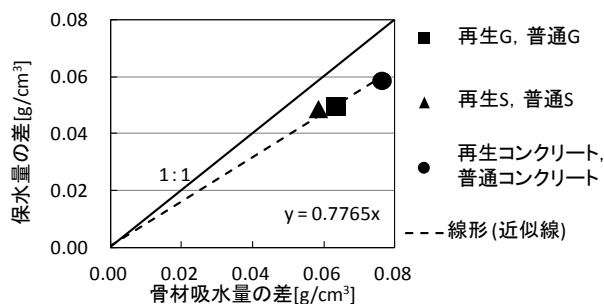


図-5 骨材吸水量と保水量の差分の関係

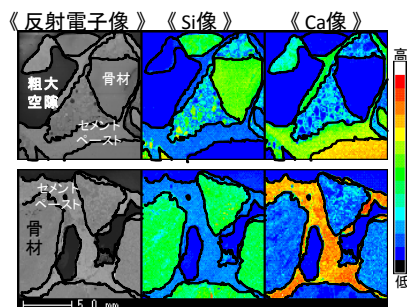
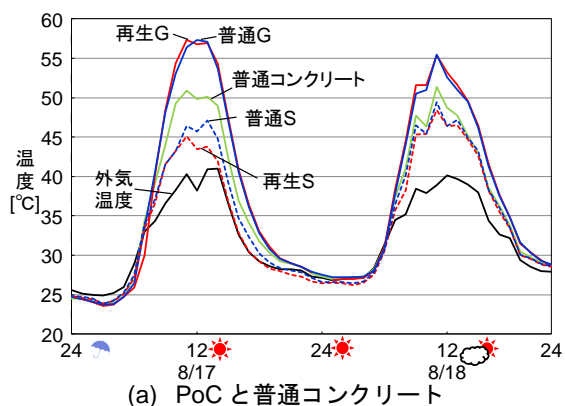
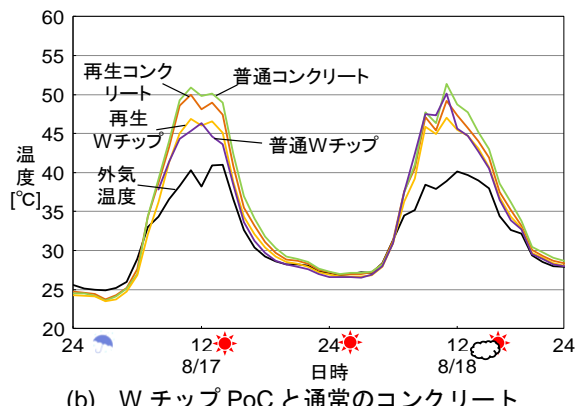


図-6 再生Gと普通GにおけるEPMA分析結果



(a) PoCと普通コンクリート



(b) WチップPoCと通常のコンクリート

図-7 屋外曝露試験による供試体表面温度の経時変化

当たりの骨材吸水量である。図より、保水量の差は骨材吸水量の差の約 0.8 倍の比例関係にあった。骨材の違いによる骨材吸水量の差が、コンクリートの保水性へ影響を与えたと言える。なお、保水量の差の方が小さくなったのは、骨材の吸水試験と比較すれば吸水が十分ではなかったためであるといえる。

3.3 EPMA 分析

図-6 に、再生 G および普通 G における EPMA 分析の結果を示す。反射電子像に加え、CaO と SiO₂ の分布から、空隙 (CaO と SiO₂ の濃度が低い領域)、骨材 (CaO と SiO₂ のいずれかの濃度が高い領域)、セメントペースト (CaO の濃度がやや高い領域) を判定するとともに、セメントペースト中に細骨材が観察された再生 G の領域を付着モルタル分と判定した。供試体作製時には付着モルタル分の周囲にセメントペーストが付着するが、EPMA の結果からは、付着モルタル分が粗大空隙に直に接している部分が確認できた。したがって図-2 で述べた通り、再生骨材の吸水性の高さは付着モルタル分によるものと言える。

3.4 屋外曝露試験

(1) 表面温度の経時変化

図-7 に屋外曝露試験による供試体表面温度 (2 点の平均値) の経時変化を示す。降雨後で気温の高かった二日間の結果を示す。(a) は普通骨材と再生骨材を用いた PoC と普通コンクリート、外気温度、(b) は W チップを混入した PoC と通常のコンクリート、外気温度を

それぞれ示した。8/16 は 20 時から 23 時にかけて 47.5mm の降雨があり、その翌日は晴天、翌々日は晴れ時々曇りとなった。いずれの日においても、外気温度は正午付近に約 40°C まで上昇した。

気温ピーク時の温度は、再生 G と普通 G では普通コンクリートよりも高く、その他は低い値を示した。粗骨材 G を用いた PoC は普通コンクリートと比較すると冷却効果がないことになるが、本実験より低いピーク外気温 35°C でのアスファルト舗装の最高温度はコンクリート舗装より約 10°C 高いこと⁴⁾を考慮すると、普通コンクリートよりも 7°C の上昇に留まった粗骨材 G を用いた PoC は、アスファルト舗装に比べて冷却効果があると考えられる。再生 S は気温ピーク時に最も低い温度を示し、普通コンクリートと比較して約 7°C 低くなった。再生 W チップは普通 W チップと遜色ない傾向を示し、降雨翌々日では気温ピーク時において普通 W チップよりも低い温度を示した。再生骨材を用いることで冷却効果の持続性が付随したと考えられる。また、日中において普通コンクリートよりも再生コンクリートの方が常に低い温度を示した。

(2) 温度上昇率の経時変化

図-8 に屋外曝露試験における温度上昇率の経時変化を示す。ここで温度上昇率とは、外気温度が変動する中での冷却効果を経時的に検討するために本研究で導入した指標で、次式に示すように、外気温度に対する普通コンクリートの表面温度の上昇が 1 となるよう

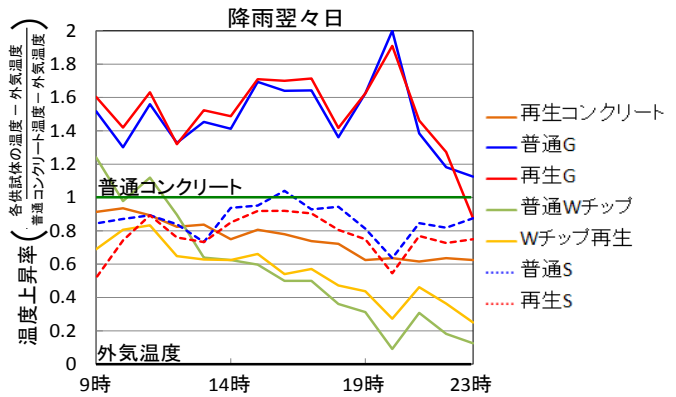
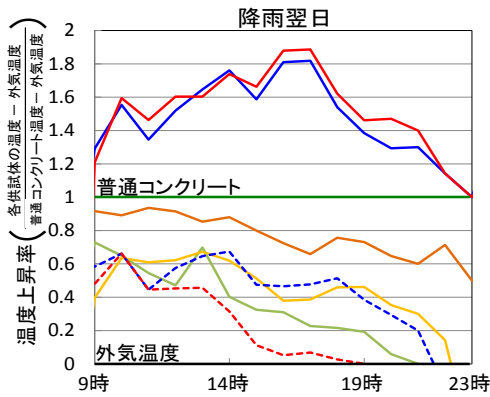


図-8 温度上昇率の経時変化

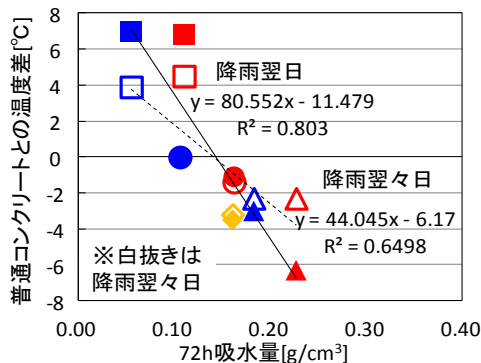


図-9 普通コンクリートとの温度差と72h 吸水量

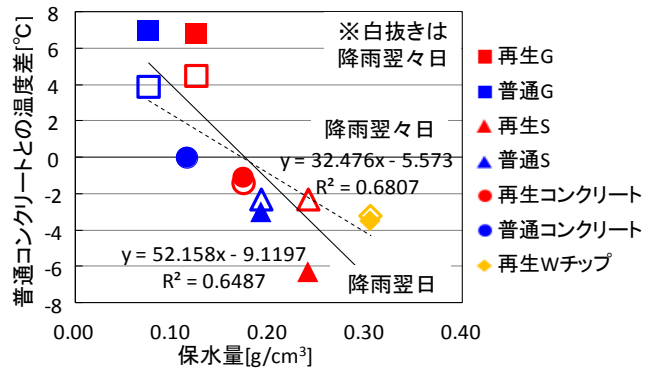


図-10 普通コンクリートとの温度差と保水量

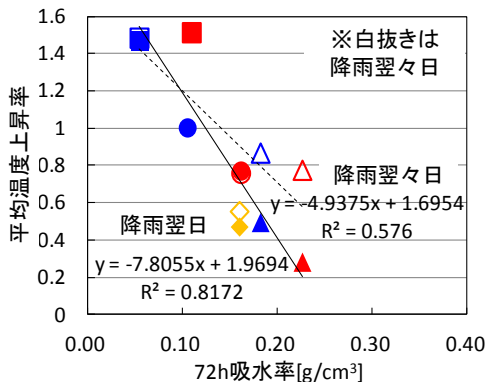


図-11 平均温度上昇率と72h 吸水率

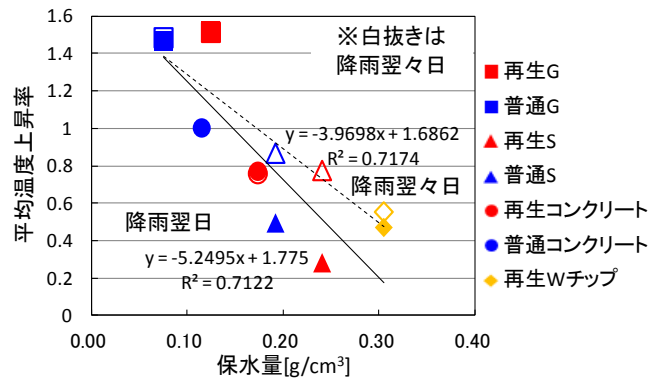


図-12 平均温度上昇率と保水量

に設定した。

$$a = \frac{T_c - T_a}{T_{Nc} - T_a} \quad \text{式(4)}$$

ここで、 a ：温度上昇率、 T_c ：任意の供試体の表面温度[°C]、 T_a ：外気温度[°C]、 T_{Nc} ：普通コンクリートの表面温度[°C]である。なお、普通コンクリートの表面温度が外気温度よりも高い9時から23時までの時間を対象とした。

降雨翌日では、再生Gや普通Gは17時付近まで温度上昇率が増加し、日没後の19時以降で低下した。保水量が少ないため降雨翌日にはほとんどの水分を蒸発し、熱容量が小さいため熱を保持しやすい。よって日中は蓄熱したと考えられる。降雨翌々日でも同様の傾

向が示された。再生Sおよび普通Sは、降雨翌日において1.0よりも低い値を示し、普通コンクリートより冷却効果があった。特に再生Sは16時頃には外気温度に近づいており、高い冷却効果が示された。しかし翌々日ではどちらも冷却効果が薄れ、多少の変動はあるものの温度上昇率は普通コンクリートと同程度となった。翌々日の天候は晴れ時々曇りであり、日射量が少なくなった影響も考えられるが、降雨翌々日の13時以降、小粒径PoCの温度上昇率が上昇したことから、冷却効果をもたらす保有水分量が少なくなったと考察できる。一方、降雨翌日の再生Wチップ、普通Wチップの温度上昇率は常に1.0より低い値を示し、継続的に温度上昇率が低下した。この傾向は降雨翌々日でも継続して見られた。

以上のことより、細骨材を用いた PoC は持続性が見られず、保水量の大きい W チップ混入 PoC が冷却効果の持続性に有効であることが分かった。

(3)表面温度と最大吸水量および保水量の関係

図-9 に普通コンクリートとの温度差と 72h 吸水量, 図-10 に温度差と保水量の関係を, 図-11 に 9 時から 23 時における温度上昇率の平均値と 72h 吸水量, 図-12 に温度上昇率の平均値と保水量の関係を示す。図中の実線は降雨翌日, 点線は降雨翌々日における近似線を示している。

図-9, 図-10 において, 72h 吸水量や保水量が大きいほど冷却効果が大きくなった。図-11, 図-12 においても同様の傾向を示した。よって, 72h 吸水量や保水量が大きいほど冷却効果が大きいと言える。なお, 降雨翌日は温度差や温度上昇率と 72h 吸水量が, 降雨翌々日には温度差や温度上昇率と保水量の相関がそれぞれ高かった。この違いは, 72h 吸水量と保水量の関係が他とは異なる再生 W チップによるものである。吸水が緩やかであるという W チップの特徴により, 持続的な冷却効果に寄与したものと考えられる。

3.5 曲げ強度試験

曲げ強度の結果を図-13 に示す。同一シリーズごとに, 左(濃色)は材齢 28 日における屋外曝露前の強度, 右(薄色)は曝露後の強度を示している。

材齢 28 日において, 再生骨材を用いた PoC は普通骨材の PoC より強度が低下し, 既往の研究と同様の結果となった。

屋外曝露後における変化に着目すると, ほとんどのシリーズで曝露前の強度より増加した。材齢 28 日までの養生は気中で行ったため, 曝露中の降雨によって水分が供給され, 追加的に水合が促進されたためと考えられる。なお, 普通 G と再生 W チップでは曝露後の強度は下がったが, 曝露後の強度は 1 体だけの値であることから実験誤差の可能性もある。今後, 詳細に検討をしたい。また, 本試験は曝露期間が 120 日間と, 耐久性の検討としては十分な期間ではないため, さらなる長期的な曝露試験が必要である。

4. まとめ

本研究の範囲内で得られた主な知見を以下に示す。

- (1) 吸水試験および保水試験の結果, 骨材の粒径が小さいほど, また, 再生骨材を用いると, 吸水量や保水量は大きくなった。再生骨材と普通骨材の骨材吸水量の差は, 保水量における差と同程度であり, 再生骨材の付着モルタル分が吸水量や保水量の増加に寄与しているといえた。
- (2) 普通骨材や再生骨材を用いた場合には, 72 時間時

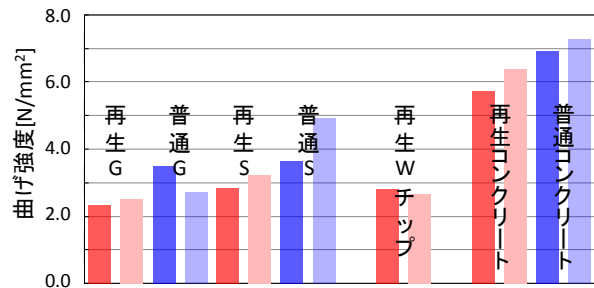


図-13 材齢 28 日と曝露後の曲げ強度

点の吸水量と保水量には高い相関があったが, ウッドチップを混入した場合, ウッドチップの緩やかな吸水特性により保水量が特に大きくなった。

(3) 屋外曝露試験において表面温度変化を計測した結果, 降雨翌日では, 細骨材を用いたポーラスコンクリートで冷却効果が確認された。特に, 再生細骨材を用いたポーラスコンクリートが気温ピーク時に最も低い温度を示し, 普通コンクリートよりも約 7°C 低くなった。ただし, 降雨翌々日においても持続的な冷却効果が確認されたのは, ウッドチップを混入したもののみであった。

(4) 吸水量や保水量と冷却効果には相関があり, 降雨翌日では特に吸水量と, 降雨翌々日では保水量との相関が高かった。

(5) 再生骨材を用いたコンクリートは, 普通骨材を用いたコンクリートより強度が低下した。しかし, ほとんどの場合で曝露後は強度が増加する傾向がみられた。

参考文献

- 1)国土交通省：建設リサイクルに関する今後の動向, 2005.10
- 2)国土交通省：平成 20 年度建設副産物実態調査結果について, 2011.3
- 3)国土交通省：一般, 有料, 地方単独別の道路投資額の推移, 2009.4
- 4)君島健之ほか：コンクリート舗装のヒートアイランド緩和効果, セメント・コンクリート論文集, No.60, pp.635-641, 2006.
- 5)寺西浩司ほか：温度上昇抑制効果を有するポーラスコンクリートブロックの開発, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.589-590, 2008.
- 6)前川明弘ほか：小粒径ポーラスコンクリートの基礎的特性に関する実験的研究, セメント・コンクリート論文集, No.60, pp.264-269, 2006.
- 7)添田政司ほか：ポーラスコンクリートへの再生骨材の適用性に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.2, pp.1117-1122, 1998.