

論文 揚水性能を高めたポーラスコンクリートブロックの温度上昇抑制効果

永井 伴英*1・寺西 浩司*2・吉永 美香*3

要旨: 本研究では、樹脂充填材（吸水性樹脂を混入したセメントペースト）を空隙中に注入したポーラスコンクリート、および骨材寸法を通常よりも小さくしたポーラスコンクリートの揚水性能を調べた。また、これらの実環境下での温度上昇抑制効果および熱収支を検討した。その結果、1) ポーラスコンクリートに樹脂充填材を注入すると、揚水性能が向上し、蒸発潜熱が増大するため、温度上昇抑制効果が高くなる。2) ポーラスコンクリートの骨材寸法を小さくすると、温度上昇抑制効果は低下する、などの知見を得た。

キーワード: ポーラスコンクリート, 吸水性樹脂, 揚水性能, 熱収支, 保水性建材, 骨材寸法

1. はじめに

現在、ヒートアイランド現象の最も代表的な抑制対策は屋上緑化であり、都市部では、自治体などによりこの対策が積極的に推進されている。しかし、屋上緑化は、初期コストや維持管理の労力などの問題から、必ずしも順調に普及しているとはいえないのが実状である。このような事情から、屋上緑化よりも維持管理の手間の少ない材料レベルでの対策として、保水性建材^{1), 2)}や高反射塗料³⁾の使用などの方法が検討され、一部実用化されている。これらの中の保水性建材は、内部の空隙に蓄えた雨水などの蒸発潜熱により構造物表面の温度上昇を抑制しようとするものであり、現在は、道路の保水性舗装⁴⁾として主に使用されている。

筆者らは、ポーラスコンクリートの保水性建材としての特性に着目し、ポーラスコンクリートのブロックを建物の屋上スラブ面に敷設し、ヒートアイランド現象の抑制に寄与させることを考えた。この方法の場合、屋上歩行の必要な建物では、押さえコンクリートを省略できる可能性が高いという利点もある。上記の方法については、これまでの研究⁵⁾により、ある程度の温度上昇抑制効果が得られることを確認した。

このことを踏まえ、本研究では、保水性建材としてのポーラスコンクリートブロックの機能をより高める方法について検討した。そして、その実環境下での温度上昇抑制効果および熱収支を調べた。

また、これらの試験結果の考察に用いるために、揚水試験（実験-3）を行った。表-1に、測定項目および測定方法を示す。

2.1 実験ケース

表-2に実験ケースを示す。本実験では、骨材寸法を通常よりも小さくしたポーラスコンクリート、および吸

表-1 測定項目および測定方法

シリーズ	測定項目	測定方法	試験体寸法 (mm)
表面温度および水分蒸発量の測定試験 (実験-1)	表面温度	T型熱電対により10分間隔で測定	200×200×200
	質量	ロードセルにより10分間隔で測定	
	外気温度	携帯型小型温湿度計により1分間隔で測定	—
熱収支測定試験 (実験-2)	水平面全天日射量	長短波放射計により1分間隔で測定	900×900×100 (大試験体)
	日射反射量		
	天空放射量		
	上向き長波放射量		
	表面温度	T型熱電対により1分間隔で測定	200×200×100 (小試験体)
	裏面温度	T型熱電対により1分間隔で測定	
質量	電子台秤により1時間間隔で測定	(屋上スラブコンクリート)	
表面温度	T型熱電対により1分間隔で測定	—	
外気温度	携帯型小型温湿度計により1分間隔で測定	—	
揚水試験 (実験-3)	揚水高さ	1時間間隔で測定	150φ×300

表-2 実験ケース

記号	樹脂充填材	骨材寸法(mm)
PL	なし	20~13
PM		13~5
PS		2.5~1.2
PLa	あり	20~13

2. 実験概要

本研究では、実環境下において、ポーラスコンクリートブロックの表面温度および水分蒸発量の測定試験（実験-1）、および熱収支測定試験（実験-2）を行った。

*1 名城大学大学院 理工学研究科建築学専攻修士課程 (正会員)

*2 名城大学理工学部建築学科 教授・博士(工学) (正会員)

*3 名城大学理工学部建築学科 准教授・博士(環境学) (非会員)

水性樹脂を混入したセメントペースト（以下、樹脂充填材という）を空隙中に注入したポーラスコンクリートに対して実験を行った。これらに対しては、1) ポーラスコンクリートの深い位置にある空隙中の水分（以下、空隙水という）を上層まで揚水して蒸発させる効果、および 2) 空隙中の水分を蒸発させにくくし、長期間にわたって水分の蒸発を持続させる効果、を期待した。

2.2 表面温度および水分蒸発量測定試験（実験-1）

名城大学（名古屋市中区）4号館校舎の屋上に試験体を設置し、平成19年8月31日～10月27日の約2ヶ月間の測定を行った。

(1) 試験体

(a) 使用材料

表-3に、ポーラスコンクリートの使用材料を示す。骨材は、標準的な寸法の PL と、それよりも寸法の小さい PM, PS の3種類の単粒度骨材とした。表-4に樹脂充填材の使用材料を示す。樹脂充填材には、アルカリに強いタイプの吸水性樹脂を用いた。

(b) ポーラスコンクリート

表-5に、ポーラスコンクリートの調合を示す。ポーラスコンクリートの調合は、JCI「ポーラスコンクリートの製造・施工指針（案）」⁶⁾に示された方法に準拠して設計した。本実験では、保水可能な空間をなるべく大きく確保するために、目標空隙率を30%とした。なお、ポーラスコンクリートは、パン型強制練りミキサ（容量100L）を使用して、ペースト先練り方式で練り混ぜた。そして、突き棒で締め固めながら型枠に充填した。

(c) 樹脂充填材

PLaでは、材齢7日の時点で樹脂充填材を注入した。樹脂充填材は、表-6に示す調合とし、r/f（樹脂充填材に占める樹脂水溶液の体積割合）は、水が分離しない範囲で、できるだけ大きくなるように定めた。また、樹脂充填材は、予め練り混ぜておいたセメントペースト（水セメント比50%）に、最大吸水状態とした吸水性樹脂（樹脂水溶液）を混入して作製した。そして、これを、テーブルバイブレータで加振しながら、ポーラスコンクリートの空隙中に流し込んだ。

(2) 試験装置および測定方法

図-1に、試験体および試験装置の概要を示す。試験体の上面以外からの水分および熱の移動を防止するために、側面および底面を防水シートおよび発泡ポリスチレンフォームで覆った。そして、単管パイプで組み立てたフレームに試験体を吊り下げて、ロードセルでその質量を測定した。また、T型熱電対（深さ3cmに埋設）により試験体の表面温度を測定した。

2.3 熱収支測定試験（実験-2）

実験-1と同様の場所に試験体を設置し、2007年9月

19日～10月15日の期間に、PL, PM, PS, PLaの順に測定を実施した。

図-2に試験体の概要を示す。これらの試験体は、実

表-3 ポーラスコンクリートの使用材料

種別	仕様
セメント	普通ポルトランドセメント（密度3.16g/cm ³ ）
骨材	PL 春日井産砕石（寸法 20～13mm, 表乾密度 2.67g/cm ³ , 吸水率 0.28%, 実積率 57.3%）
	PM 春日井産砕石（寸法 13～5mm, 表乾密度 2.67g/cm ³ , 吸水率 0.28%, 実積率 59.1%）
	PS 豊田産珪砂（寸法 2.5～1.2mm, 表乾密度 2.59g/cm ³ , 吸水率 1.31%, 実積率 58.8%）
高性能 AE 減水剤	ポリカルボン酸エーテル系

表-4 樹脂充填材の使用材料

種別	仕様
セメント	普通ポルトランドセメント（密度3.16g/cm ³ ）
吸水性樹脂	吸水倍率 30 倍, 密度 1 g/ml,

表-5 ポーラスコンクリートの調合

記号	目標空隙率 (%)	水セメント比 (%)	単位水量 (kg/m ³)	絶対容積 (ℓ/m ³)		質量 (kg/m ³)		高性能 AE 減水剤 (g/m ³)
				セメント	骨材	セメント	骨材	
PL, PLa	30	25	49	62	588	196	1570	1960
PM			48	60	591	190	1572	1900
PS			56	71	573	224	1484	2880

表-6 樹脂充填材の調合

r/f* (%)	絶対容積(ℓ/m ³)				質量(kg/m ³)			
	セメントペースト		樹脂水溶液		セメントペースト		樹脂水溶液	
	水	セメント	水	吸水性樹脂	水	セメント	水	吸水性樹脂
66	204	129	644	22	204	408	644	22

* 樹脂充填材に占める樹脂水溶液の体積割合

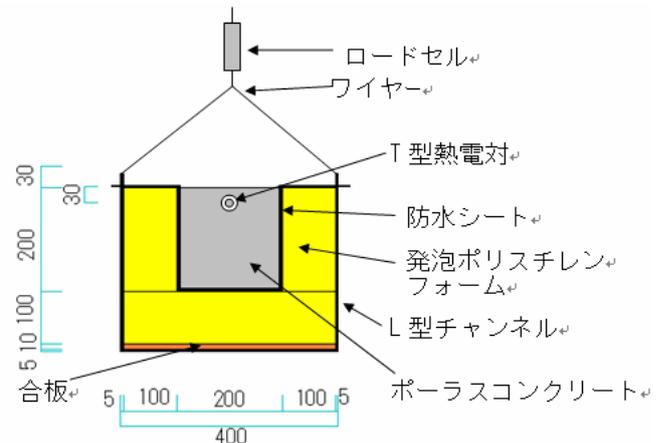
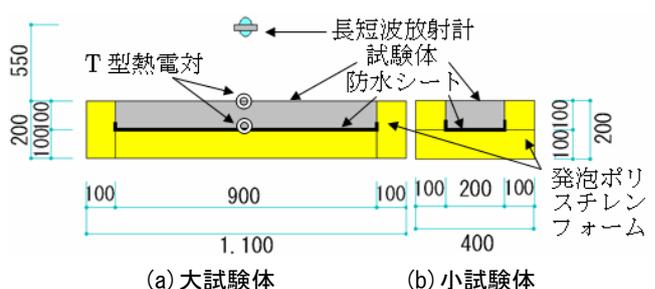


図-1 試験体の概要（実験-1）



(a) 大試験体 (b) 小試験体

図-2 試験体の概要（実験-2）

験-1と同様の調査、材料および手順で作製した。本実験では、大試験体の中央部の約55cm上方に長短波放射計を設置し(形態係数約0.6)、放射収支を連続測定した。また、大試験体の表面温度および裏面温度をT型熱電対で測定した。さらに、電子台秤を用いて小試験体の質量を毎日8~17時まで1時間ごとに測定した。なお、両試験体は、毎朝8時の時点で体積含水率が10%となるように調整した。以上のほかに、比較用として屋上スラブコンクリートの表面温度を測定した。

2.4 揚水試験(実験-3)

実験-1と同様の手順で作製した円柱供試体(150φ×300mm)をトレーに載せ、その下端1cmまでの部分を水に浸した状態とし、供試体側面の湿潤部分の水面からの高さを測定し、その値を揚水高さとした。なお、計測時に、トレー内の減少した水を補充した。また、試験は恒温恒湿室内(温度20℃、相対湿度60%)で行った。

3. 揚水試験(実験-3)の結果

図-3に、揚水試験で得られた揚水高さの経時変化を示す。同図によると、PLaでは、他のケースに比べて揚水高さが非常に高くなっており、試験終了時には供試体の上端近くまで揚水されている。また、それ以外のケースの中では、骨材寸法の小さいPSがPMおよびPLの2倍程度の揚水高さとなった。

4. 表面温度および水分蒸発量の測定試験(実験-1)の結果

本報では、全試験期間中から降雨と降雨の間が最も長かった期間(9月16日~9月24日)のデータを抜粋して検討した結果を示す(図-4~7には、9月16日の降雨終了直後から9月24日の降雨直前までのデータを示してある)。

4.1 水分蒸発量

図-4に、水分蒸発量(降雨終了直後からの試験体の質量減少量)の経時変化を示し、図-5に、1日あたりの水分蒸発量(当日と前日の水分蒸発量の差分)の経時変化を示す。図-5からわかるように、降雨直後は、ポーラスコンクリートブロックの表面近くまで空隙水が存在するため、水分が急激に蒸発しているが、経過日数3日以降は、1日あたりの水分蒸発量はほぼ一定となっている。また、図-4によると、水分蒸発量はPLaが最も少なく、次いでPSが少ない。PSでは骨材寸法が小さいため、空隙径が小さくなり、対流による水分放出がPMやPLより抑制されたものと考えられる。

図-6に、含水率(空隙水の残存比率)の経時変化を示す。PLaでは、他のケースより含水率の減少速度が速くなっている。また、より深部の空隙水が蒸発しており、

8日経過時点では含水率が50%以下に至っている。PLaの場合、空隙中の対流ではなく、樹脂間の水分の受け渡しにより水分が移動するものと推察される。したがって、以上の結果から、樹脂充填材の揚水性能がブロック深部の水分の効果的な蒸発に寄与することがわかる。

4.2 表面温度

図-7に、表面温度および外気温度の1日ごとの最大値の履歴、および全天日射量(名古屋地方気象台観測値)の履歴を示す。経過日数0日の時点では空隙水温がほぼ外気温度に等しいため表面温度の差が小さいが、日数が経過するにつれ、PS、PM、PLの順に高い最高表面温度を示すようになった。また、PLaはPLにごく近い挙動

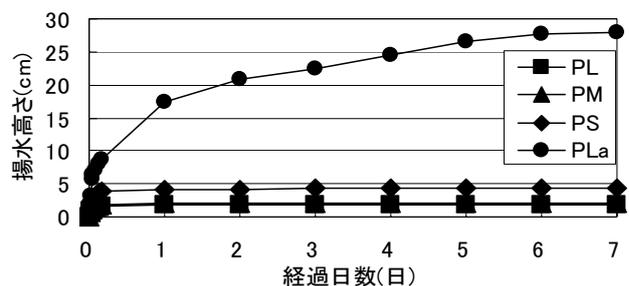


図-3 揚水高さの経時変化

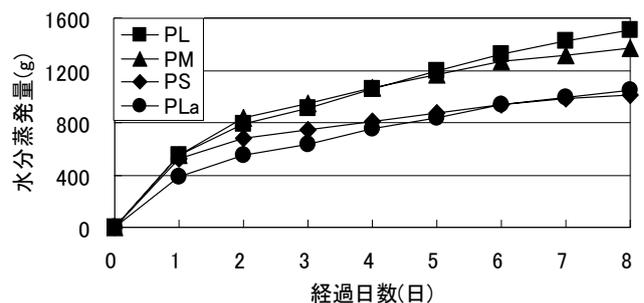


図-4 水分蒸発量の経時変化

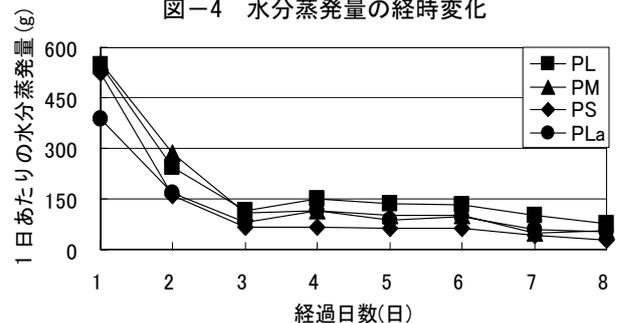


図-5 1日あたりの水分蒸発量

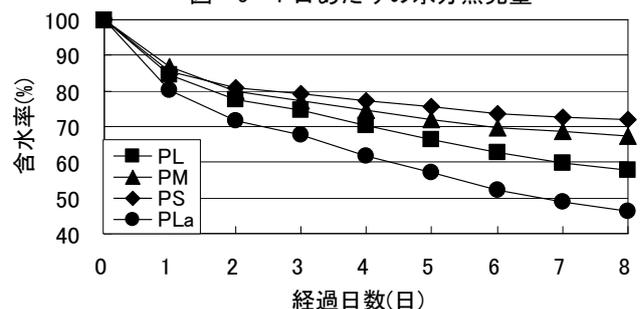


図-6 含水率の経時変化

を示した。すなわち、PLa は、図-4 に示したように、PL より水分蒸発量が少ないにもかかわらず、PL と同程度に温度上昇を抑制している。

5. 熱収支測定試験（実験-2）の結果

熱収支の測定時期は試験体によって異なるため、それらの単純な比較はできない。そこで、ここでは、晴天かつ微風であった日を抽出して比較する。

5.1 温度および水分蒸発量

図-8 に、大試験体の表面温度・裏面温度、外気温度、屋上面温度および全天日射量を示す。また、図中に示した表面温度と屋上面温度の差を、水分蒸発量とともに図-9 に示す。図-8 からわかるように、PL, PM, PS の中では PS が最も外気温度が低い時期の実験ではあったが、図-9 によると、その水分蒸発量は PL, PM に比べて遜色ない。しかし、屋上面温度との差をみると、PL は、日中を通じて約 5°C 低くなっているのに対し、骨材寸法が小さくなると温度差は小さくなっている。また、樹脂充填材を注入した PLa は、最も気温の低い時期であったに

もかわかわらず、他の試験体に比べて多い蒸発量を示し、屋上面よりも約 7°C 低い表面温度となった。

5.2 日射反射率

図-10 に各試験体の日射反射率を示す。同図によると、PLa の日射反射率が他のケースよりも高くなっている。これは、樹脂の影響で試験体表面の明度がやや高くなったことが原因であると考えられる。なお、本実験で PLa

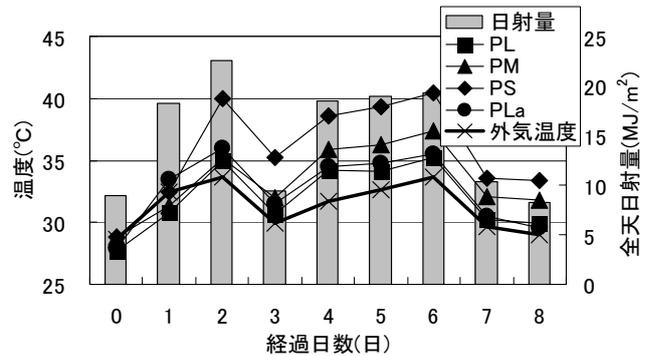


図-7 表面温度、外気温度（1日ごとの最大値）および全天日射量の経時変化

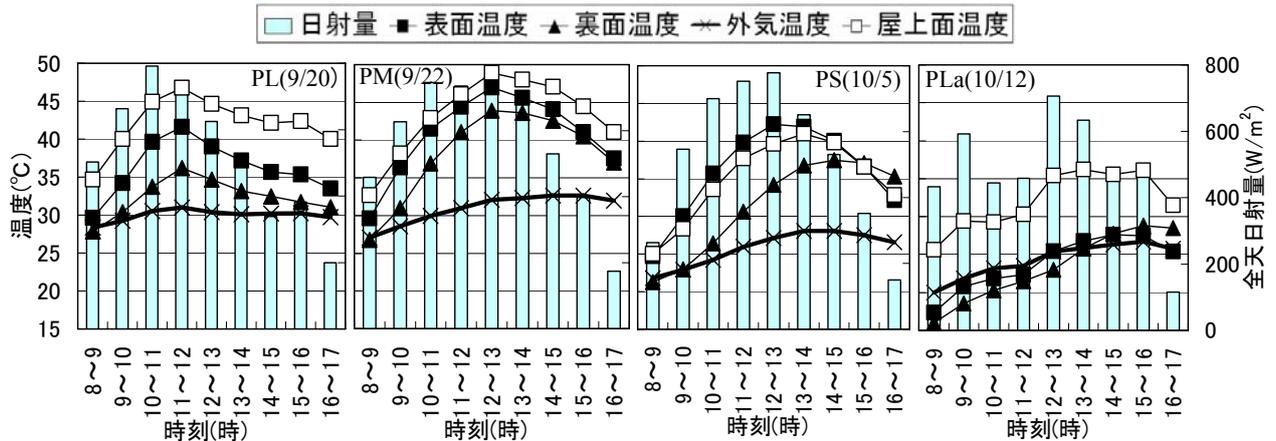


図-8 表面温度・裏面温度、外気温度、屋上面温度および全天日射量

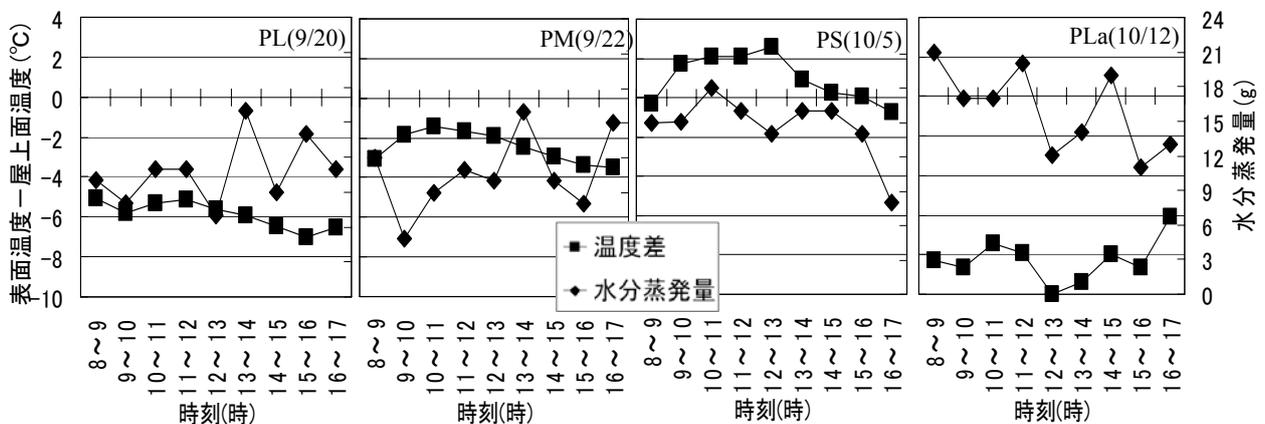


図-9 表面温度と屋上面温度の差および水分蒸発量

の温度上昇抑制効果が最も高くなったことに対しては、このことも影響したものと考えられる。

5.3 熱収支

本研究では、毎時の熱収支を把握するため、以下のように測定結果を処理した。長短波放射計により得られた四成分放射量 ($S \downarrow$, $S \uparrow$, $L \downarrow$, $L \uparrow$) は各計測値を1時間ごとに平均した。また、試験体周囲を断熱したため、鉛直下向きおよび水平方向への熱移動はないものと見なした。水分蒸発による潜熱放出量は、式(3)による試験体の質量変化と式(2)による単位水分質量あたりの蒸発潜熱量の積で算出した。蓄熱量は式(4)で求めた。ここで、各ポーラスコンクリート熱容量 CAP_{poc} は骨材などの混合比と質量より概算した含水率を考慮して算出した。対流熱伝達量 H は測定できなかったため、式(1)の残差として求めた。

$$S \downarrow - S \uparrow + L \downarrow - L \uparrow = H + \iota E + \Delta Q \quad (1)$$

$$\iota = 2.5 \times 10^6 - 2400 T_{poc} \quad (2)$$

$$E = \frac{W_i - W_{i-1}}{3600 A_{poc}} \quad (3)$$

$$\Delta Q = \frac{CAP_{poc}}{3.6} (T_{poc,i} - T_{poc,i-1}) \quad (4)$$

ここに、 $S \downarrow$: 全天日射量(W/m^2), $S \uparrow$: 日射反射量(W/m^2), $L \downarrow$: 天空放射量(W/m^2), $L \uparrow$: 上向き長波放射量(W/m^2), H : 対流熱伝達量(W/m^2), ι : 蒸発潜熱量(J/kg), E : 試験体単位面積あたり水分減少量($kg/m^2 \cdot sec$), ΔQ : 蓄熱量(W/m^2), T_{poc} : 試験体平均温度($^{\circ}C$), W : 小試験体の質量(kg), A_{poc} : 小試験体の表面積(m^2), CAP_{poc} : 試験体単位面積あたりの熱容量($kJ/m^2 \cdot ^{\circ}C$), 添字 i : 時刻 ($i-1$ は1時間前を表す)。

図-11 に熱収支の計算結果を示す。同図によると、全体的な傾向として、全放熱量 (負の熱量の合計) に占める潜熱量の割合は比較的高い。また、温度上昇抑制効果の高かった PLa の場合は、他のケースに比べて、潜熱による放熱の割合が高くなっている。以上のことから、本研究のように、蒸発潜熱を利用して温度上昇を抑制するというアプローチは有効に機能するものと判断される。

6. まとめ

本研究では、樹脂充填材 (吸水性樹脂を混入したセメントペースト) を空隙中に注入したポーラスコンクリート、および骨材寸法を通常よりも小さくしたポーラスコンクリートの揚水性能を調べた。また、これらの実環境下での温度上昇抑制効果および熱収支を検討した。その結果から得られた知見は、以下の通りである。

- (1) ポーラスコンクリートブロックの空隙中に樹脂充填材を注入すると、揚水性能が向上し、表面からの蒸発潜熱が増大する。
- (2) 本実験の範囲では、樹脂充填材を空隙中に注入したポーラスコンクリートの温度上昇抑制効果が最も高い。また、ポーラスコンクリートの骨材寸法を小

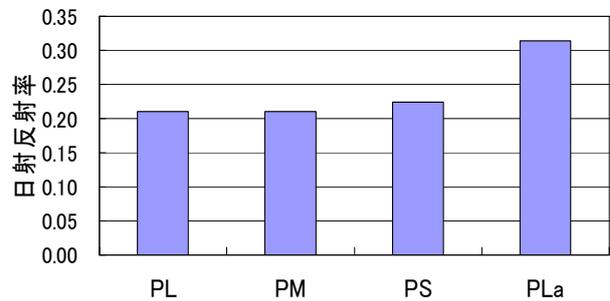


図-10 各試験体の日射反射率

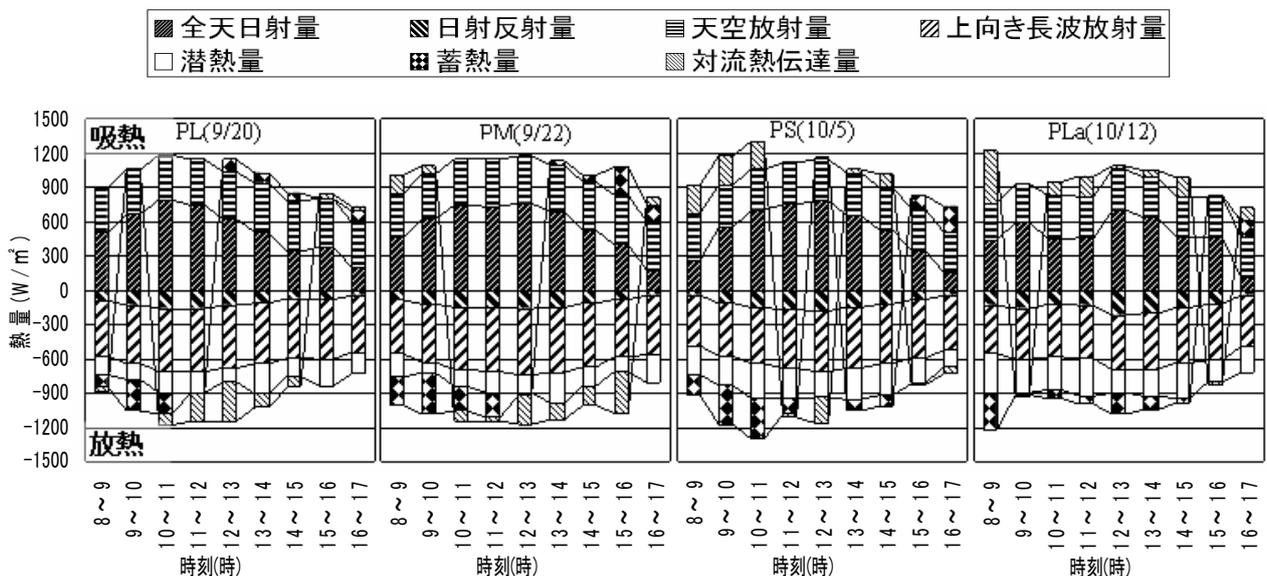


図-11 熱収支

さくすると、温度上昇抑制効果は低下する。

- (3) 潜熱を利用した温度上昇の抑制というアプローチは、熱収支の分析結果からも有効であると考えられる。

謝辞

本研究の実施に際し、当時名城大学学生・諏訪達也君の助力を得た。ここに付記し謝意を表します。

参考文献

- 1) 萩原伸治:保水性コンクリート, コンクリート工学, Vol.45, No.5, pp.142-146, 2007.5
- 2) 菊田真代, 橘高義典, 田村雅紀:セルラーコンクリートの基礎的研究(その1 吸水性樹脂を混入したコンクリートの吸放水性状), 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp.921-922, 2002.8
- 3) 森山正和:ヒートアイランドの対策と技術, 学芸出版社, 2004.8
- 4) 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, 2008.7
- 5) 永井伴英, 寺西浩司, 吉永美香:ポーラスコンクリートブロックの温度上昇抑制効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.2, pp.361-366, 2008.7
- 6) 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・施工法に関する研究委員会報告書, pp.145-163, 2003.5