

論文 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

三島 直生¹・中川 武志²・畑中 重光³・北野 博亮⁴

要旨：本報では、ポーラスコンクリート舗装に関する、基本的な熱特性を把握することを目的とした実験を行った。その結果、湿潤状態で放置されたポーラスコンクリートの表面温度は、乾燥状態のポーラスコンクリートと比較すると、4~5℃程度低くなり、その効果は3日以上持続すること、湿潤状態で放置されたポーラスコンクリートの表面温度に、骨材粒径、試験体厚さ、仕上げ方法、および結合材の水セメント比は影響しないこと、および、ポーラスコンクリートと他の舗装材料との表面温度の違いには、日射反射率以外に容積比熱の影響が大きいと考えられることなどが明らかとなった。

キーワード：ポーラスコンクリート、屋外実験、表面温度、骨材粒径、水分蒸発量、日射反射率

1. はじめに

近年、夏季における都市部のヒートアイランド現象が問題となっている。この原因としては、自動車やエアコンの室外機等の熱源の都市部への集中が挙げられるが、この傾向をさらに加速させているのが、コンクリートおよびアスファルトによる地表面の被覆である。本来、地盤およびそれを覆っていた植物には、雨水を貯蔵し、晴天時にはその水分の蒸発潜熱により過度の温度上昇を抑える働きがある。しかし、現状の一般的な建物外壁および道路舗装では、雨水は下水を通じて河川等へ排出され、地表温度を抑えるために貯蔵されるシステムはない。さらに、コンクリートおよびアスファルトといった材料の熱容量が大きいことも、都市部のヒートアイランド現象に悪影響を及ぼす。

このような問題に対して舗装の分野では、舗装部分に保水性や貯水性を持たせ、その蒸発潜熱により舗装の表面温度を抑制する試みが行われており、一部では既に実用化されている。

使用材料としては、大きく分けてアスファルト系、セメント系、およびセラミックス系がある。例えば、アスファルト系ではポーラスアスファルト舗装¹⁾が、セメント系ではポーラスコンクリート舗装²⁾およびポーラスコンクリートブロック³⁾が、セラミック系では煉瓦を含む多孔質ブロック⁴⁾が検討されているが、いずれも内部の空隙に存在する水分の蒸発潜熱を利用している。また、最近の研究報告では、舗装基盤となる多孔質材料そのものの保水性のみでは表面温度の抑制効果の持続性に問題があるために、吸水率の大きな再生骨材の利用⁵⁾や、基盤材への吸水性材料の混合¹⁾、空隙への保水材の充填

³⁾、不織布などによる貯水槽から舗装底面への揚水⁴⁾、舗装材下部への雨水の貯留^{2),6)}など、舗装材料の含水率を上げるための様々な工法、システムが提案されている。しかし、舗装基盤材の中でも、ポーラスコンクリートの熱特性に及ぼす調合や製造方法の影響に関する基礎的な研究は少なく、その性能に関しては不明な点が多い。

一方、筆者らはこれまでに、ポーラスコンクリートの圧縮強度をはじめとする各種の基礎物性に及ぼす骨材粒径の影響に関して、一連の研究を行ってきた^{7),8)}。

本研究では、骨材粒径および製造方法の異なるポーラスコンクリート舗装を対象として、夏季の屋外における、基礎的な熱特性を把握することを試みる。

2. 実験概要

2.1 実験の要因と水準

表-1に本実験の要因と水準を示す。水分状態は乾燥状態、水中で24時間吸水させた試験体を気中放置した状態(以下、湿潤)、の2つの状態とした。

使用材料は、ポーラスコンクリート(POC)以外に、一般に舗装に用いられることの多い普通コンクリート

表-1 実験の要因と水準

要因	水準
水分状態	乾燥 [*] 、湿潤
材料の種類	ポーラスコンクリート(POC)、普通コンクリート(NC)、アスファルト(AS)
骨材の種類	6号、7号、8号、6+8号
締め固め方法	コテ仕上げ、振動締め
試験体厚さ	50 mm、100 mm、150 mm
結合材のW/C	46%、30%

[注]*: 7号および6+8号の振動締め、アスファルト、普通コンクリートの試験体のみ、湿潤の測定と同時に乾燥状態での測定を行った。 — : 基本水準

*1 三重大学 大学院工学研究科建築学専攻助教 博士(工学) (正会員)

*2 三重大学 大学院工学研究科建築学専攻大学院生 工修 (正会員)

*3 三重大学 大学院工学研究科建築学専攻教授 工博 (正会員)

*4 三重大学 大学院工学研究科建築学専攻助教 博士(工学)

(NC), およびアスファルト(AS)も使用した。また POC 用粗骨材として、それぞれ粒径の異なる単粒度砕石 6号(5~13 mm), 7号(2.5~5 mm), 8号(1.25~2.5 mm), および 8号と 6号を 2:1 の比率で混合した複数粒径(以下 6+8号)の骨材を使用した。POC の締固めの方法は、コテ仕上げのみと振動締固めの 2種類とした。

POC の基本水準は、7号砕石を用いて振動締固めにより打設された試験体とし、試験体厚さ t および結合材の水セメント比 W/C の各要因は基本水準の試験体のみで変化させた。

2.2 使用材料および調査

表-2 に使用材料を、表-3 に実験で使用したコンクリートの調査表を示す。POC の調査は、締固め方法によらず同一とした。POC の設計空隙率は 30% とし、 $W/C=30\%$ の POC のみ設計空隙率を 20% としたものを作成した。一般に透水性舗装として用いられる場合には 15~20% 程度の空隙率が多い⁹⁾が、本実験では歩道および建物外溝を対象とし、またその熱特性の改善を目的としているため舗装としては大きめの値を設定している。

比較用の AS には、再生密粒度アスファルトを用いた。

表-4 にアスファルトの配合表を示す。

2.3 試験体の作成方法

POC および NC の練り混ぜには傾胴式ミキサを用いた。まず、骨材およびセメントを投入し 30 秒間空練りした後、水を投入し 2 分間(8号砕石を用いた場合には 3 分間)練り混ぜた。

ただし、 $W/C=30\%$ の POC のみは揺動攪拌式ミキサを用いたペースト先練り方式とし、手順はセメントおよび水を投入し、2 分間練り混ぜた後に骨材を投入し 2 分間練り混ぜた。

型枠には、 $300 \times 300 \times 100$ mm の角形鋼製型枠および $\phi 100 \times 200$ mm のプラスチック製円柱型枠を用いた。角形試験体は表面および内部温度の測定用に各水準につき 1 体ずつ、円柱試験体は空隙率および圧縮強度の測定用に各水準につき 4 体ずつ作成した。振動締固めの円柱試験体のうち 1 体は高さ 100mm に切断して水分蒸発量の測定に用いた。

POC の打設は、角形、円柱試験体共に 2 層に分けて試料を打ち込み、各層を突き棒で突き固めた。角形試験体については 1 層目を突き固めた後に表面をならして(この時点で試験体高さの半分となるよう調整した)、試験体の内部に熱電対を固定し、その上から 2 層目の打ち込みを行った。

試験体の振動締固めは、型枠に余盛りした試料上面に高周波バイブレータを固定した鉄板を置き、10 秒間締

表-2 コンクリートの使用材料

材料	種類	
セメント	普通ポルトランドセメント(密度:3.20g/cm ³)	
骨材	6号	粒径 5~13 mm, 表乾密度 2.70g/cm ³ , 実積率 56.0%
	7号	粒径 2.5~5 mm, 表乾密度 2.70g/cm ³ , 実積率 53.3%
	8号	粒径 1.25~2.5 mm, 表乾密度 2.70g/cm ³ , 実積率 54.4%
混和剤(SP)	高性能 AE 減水剤(ポリカルボン酸系)	

表-3 ポラスコンクリートおよび普通コンクリートの調査表

種類	使用骨材	W/C (%)	単位量(kg/m ³)				
			W	C	S	G	SP
POC	6, 7, 6+8号	46	80	175		1512	
	8号		92	200		1512	
	7号(低W/C)	30	117	390		1512	0.39
NC	6+7号+S	60	180	300	700	1050	

表-4 再生密粒度アスファルトの配合表(単位: %)

AS	6号砕石	7号砕石	粗砂	細砂	粉体	再生骨材
5.8	21.7	9.4	5.7	5.7	9.5	42.4

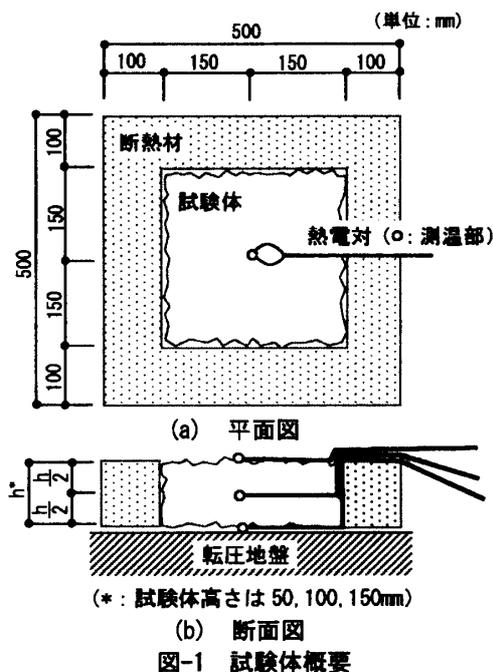


図-1 試験体概要

め固めた。またコテ仕上げの場合には、2層目を突き固めた後にコテ仕上げのみを行った。

試料の打ち込み後、材齢 2 日で脱型した。その後、角形試験体上面に表面温度測定用の熱電対を試験体と同調査のセメントペーストでコーティングして接着した。ここで、試験体表面と底面の熱電対は、試験体表面温度を正確に測定できる様に、熱電対の被覆を 80 mm 程度はがし、先端部を溶接した状態で用いた。

温度測定時には、試験体側面にスタイロフォームをアルミ箔でコーティングした断熱材を付けて用いた。図-1 に試験体の概要を示す。養生は材齢初期に一度散水した以外は屋外暴露養生とした。

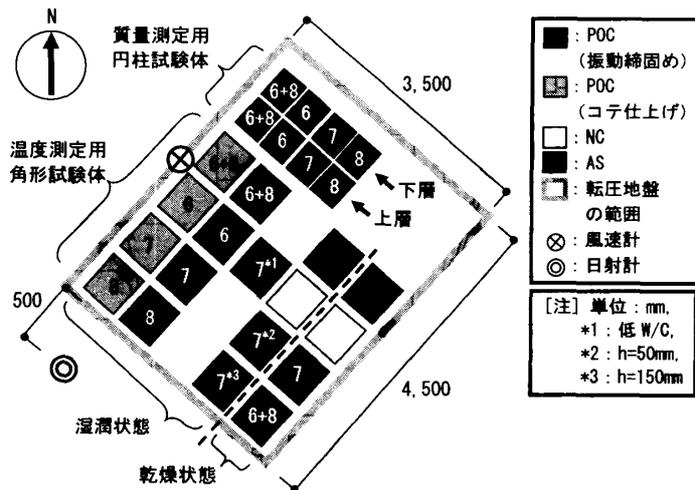


図-2 試験体の配置図

2.4 試験方法および測定項目

図-2 に実験場の配置図を示す。乾燥および湿潤状態では、まさ土を転圧した地盤に直接試験体を置いた状態で測定した。

屋外実験の測定項目は、角形試験体の表面温度・内部温度・底面温度、試験体設置位置付近の外気温、相対湿度、風速、および日射量である。試験体の各部の温度は、図-1 の様に設置した熱電対(T型)により測定している。各温度の測定間隔は 30 秒とした。外気温および相対湿度は、試験体から約 20m の位置にある百葉箱の測定値を用いた。風速は実験場脇の高さ 1.8m の位置に固定した超音波風速計を用いて計測した。日射量は実験場脇の高さ 1m の位置に日射計を固定して測定した。

試験体の水分状態が湿潤の場合においては、振動締固めした POC のみ、角形試験体と同条件で設置したφ100×100mm の円柱試験体の質量変化の測定を行い、水分蒸発量を算定した。

3. 実験結果とその考察

3.1 空隙率および圧縮強度

図-3 に、POC の圧縮強度と空隙率の関係を示す。図中には、W/C=46%のセメントペーストの圧縮強度の推定値¹⁰⁾: 62.5N/mm²を用いて既往の推定式⁷⁾から推定した両者の関係式も示す。図によれば、複数粒径の試験体は、いずれも空隙率が 20%台と小さくなっているが、これは、骨材粒径を混合したことで骨材のみの実積率が大きくなったためである。また、振動締固めを行った方が、コテ仕上げのみの場合よりも圧縮強度と空隙率の関係が高強度側にシフトしている。これは、振動により結合材が流動化し、骨材間を架橋するセメントペースト部分が強化されたことなどによると考えられる。

3.2 試験体の熱特性

(1) 試験体の温度の経時変化

図-4 に、湿潤状態の試験体の温度の時刻歴を、図-5

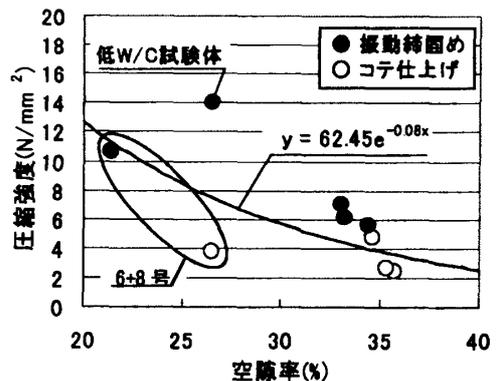


図-3 圧縮強度と空隙率の関係

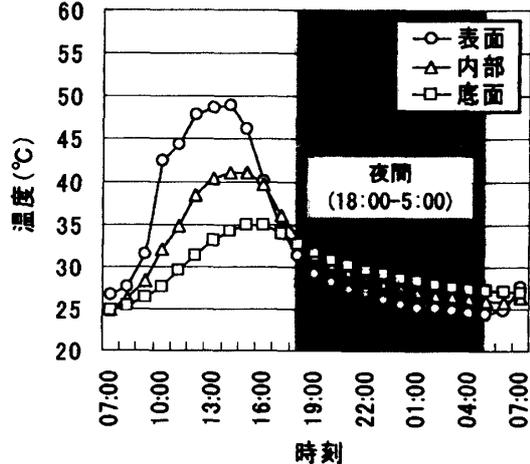


図-4 湿潤状態の試験体温度の測定結果 (測定初日, 7号 POC, 振動締固め, t=100mm)

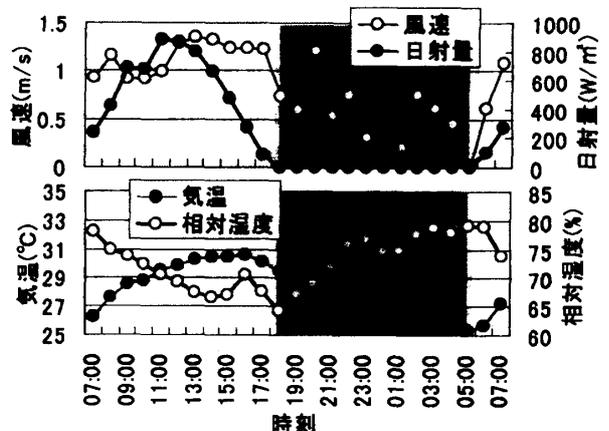


図-5 環境条件の測定結果 (測定初日)

に環境条件の測定結果を示す。試験体温度は日射量および気温と良い対応関係を示し、日射量の増加とともに表面温度が上昇し、13 時前後に最高温度に達する。また、内部および底部の温度は表面温度に少し遅れて上昇する傾向がある。日射量が減少し始めると、表面温度は急激に低下し、日没後には温度分布が逆転し、表面に近いほど低温となる。

(2) 表面温度に及ぼす各種要因の影響

図-6 に、乾燥および湿潤状態における試験体の表面温度の経時変化の比較を示す。図中のアスファルトの乾燥試験体については、測定中、熱により熱電対が剥がれた

ため、一部正確なデータが得られていないが、その部分を除外して考えると、POC および NC では、湿潤の場合に乾燥と比べて表面温度の上昇速度が低下し、最高温度も POC では約 5℃、NC では約 3℃の温度の低下が見られる。これに対して、AS では、最高温度については議論できないが、温度の上昇および下降域を見ると、湿潤と乾燥で明確な差異は見られない。

湿潤状態のみで材料による影響をみると、AS、POC、NC の順に最高温度が高くなるという既往の研究結果²⁾と同様な傾向が得られた。

図-7 に、試験体の表面温度の経時変化に及ぼす各要因の影響を示す。図によれば、6+8号を用いた場合に最高温度が 2℃程度低下する傾向がある以外は、骨材粒径、試験体厚さ、仕上げ方法および結合材の W/C の各要因は試験体表面温度に影響を及ぼさないことが解る。

(3) 測定 3 日目までの表面温度

測定初日から 3 日目までの表面温度の経時変化は、ほぼ同様な傾向を示した。図-8 には、13 時の時点における表面温度と経過日数の関係を示す。この間、全ての試験体は外からの水分は与えていない。図によれば、全ての試験体において、経過日数とともに表面温度が上昇する傾向がある。この原因は明確ではないが、日射量の変化などの外的条件によるものと考えられる。また、図(a)からは、AS は 2 日目以降、乾燥と湿潤の温度差はなくなっている(1 日目のデータは前述した理由にて割愛)が、POC および NC は、3 日目においても乾燥に比べて湿潤試験体の方がそれぞれ 4℃ および 2℃程度低い温度になっている。この理由に関しては次節の水分蒸発量の測定結果と合わせて考察する。

POC の乾燥状態のものは、表面温度が AS と同程度まで上昇している。既往の研究においては、AS の表面温度が他の舗装材料よりも高くなる理由として、日射反射率の違いを挙げている³⁾。但し本実験結果は、表-6 に示す各試験体を用いて測定した反射率の違いを考慮しても矛盾する。また、図(b)によれば、6+8号の POC のみ、他の骨材粒径の試験体と比べて表面温度が低くなっている。ただし、同試験体は他の試験体と比べて空隙率が小さい。以上の結果を考察すると、試験体の表面温度に対しては、日射反射率だけでなく、容積比熱が影響していると予想される(ただし、POC の容積は空隙を含んだものとする)。本実験の場合には、7 号のポーラスコンクリートの空隙率は 33%であり、ほぼ同一の材料を使用している NC と比

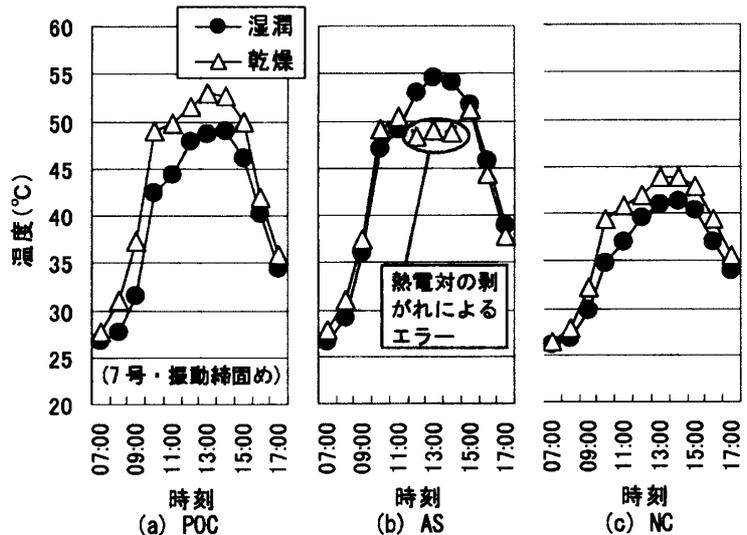


図-6 表面温度の経時変化に及ぼす試験体の水分状態の影響 (測定初日, 試験体厚さ t=100mm)

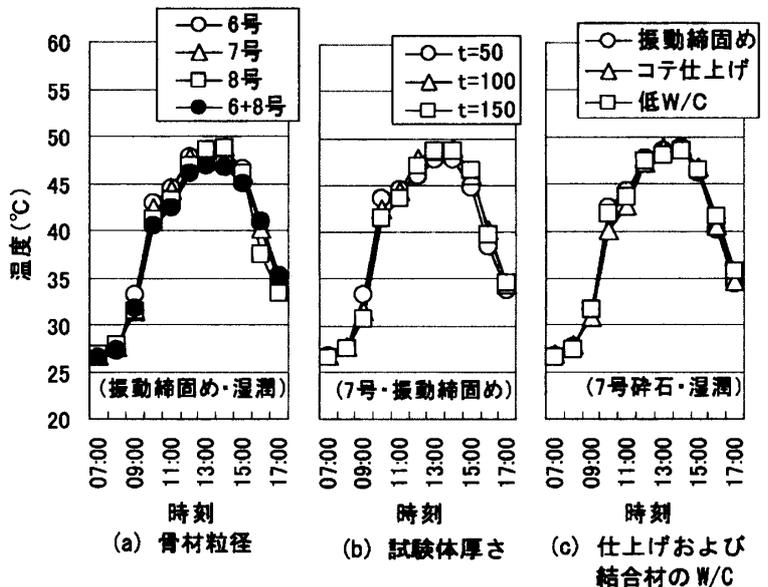


図-7 表面温度の経時変化に及ぼす各要因の影響 (測定初日, 特記が無ければ試験体厚さ t=100mm)

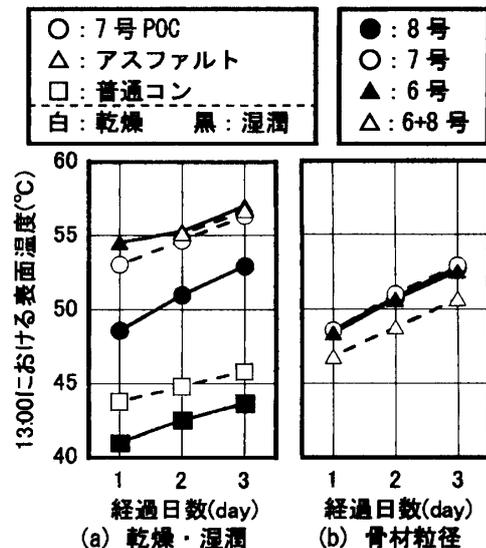


図-8 表面温度と経過日数の関係

表-6 日射反射率の測定結果

試験体種類		日射反射率 ^{*1}	
		乾燥	湿潤 ^{*2}
POC	6号	0.27	0.14
	7号	0.26	0.14
	8号	0.26	0.14
	6+8号	0.29	0.17
	7号(低W/C)	0.28	0.14
普通コンクリート		0.57	0.24
アスファルト		0.08	0.07

[注]*1: 太陽高度=24.4~31.6° の範囲で測定
*2: 表面に散水し湿潤状態として測定

べると 67%しか固相を含まないことになる。このため、NC と比べると POC は熱しやすく冷めやすい材料であるため、1 日のサイクルでは本実験結果のような大きな温度差となったとも考えられる。

(4) 質量変化量

図-9 に、試験体設置後の水分の蒸発等による質量変化量の測定結果を、図-10 に質量変化量の累積の計算結果を示す。累積の計算では、6:30~18:30 の間の変化量を昼とし、18:30~6:30 の変化量を夜として示す。また、初期状態は水切りの状態とした。このため、初期の質量変化量には地盤への水分の流出量も含まれる。測定には各水準 2 本の φ100×100mm の円柱体を用い、結果はそれらの値を平均した。

両図によれば、骨材粒径に依存した保水性の傾向、すなわち、小径骨材を用いた方が大量の水分を放出するといった傾向が現れているのは 1 日目の昼間のみであり、2~3 日目では、質量変化量はほぼ同程度となっている。さらに、夜間には、地盤からの蒸発により供給されると考えられる水分により、質量増加の傾向を示す。これによる質量増加は粒径および日にちによらずほぼ一定となっている。

(5) ポーラスコンクリート舗装の温度低減メカニズム

上記の(3)~(4)節で示した結果をあわせて、本実験条件における POC 舗装の温度低減メカニズムに関する考察を行う。

まず、乾燥試験体との温度差が 3 日間持続した [図-8(a)参照] のは、図-10 に示すように、3 日目まで一定量の水分蒸発による蒸発潜熱が確保されていたためと考えられる。

また、6+8 号を除き、3 日目まで表面温度に対する骨材粒径の影響が全く見られなかった [図-8(b)参照] のは、水分蒸発量が粒径によって変わらないためである。

ここで、1 日目の昼の水分蒸発量が粒径によって異なる点が表面温度の傾向と矛盾する。乾燥試験体との温度差が 3 日間ともほぼ一定であった [図-8(a)参照] ことから考えると、これは恐らく、図-10 に示す 1 日目の昼

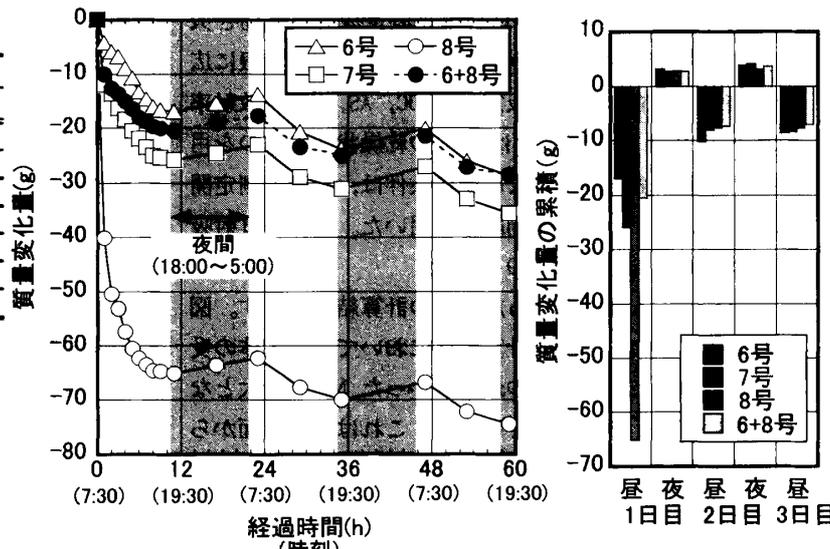


図-9 質量変化量の経時変化

図-10 質量変化量の累積

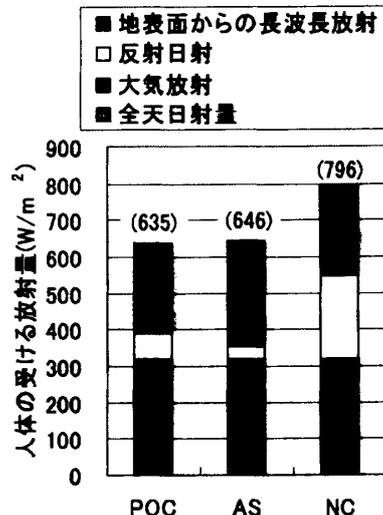
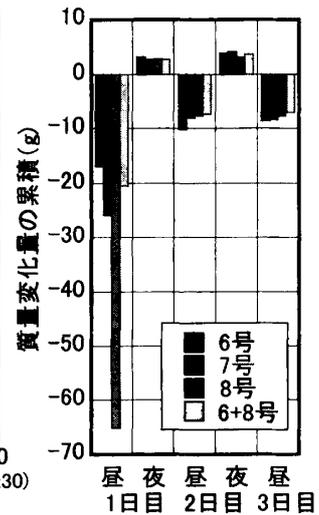


図-11 人体の受ける放射量の計算値 [()は合計量を示す]

間に減少している水分のうち、蒸発潜熱により試験体温度を低下させるために使われている量は、2~3 日目の昼間の減少量と同程度であり、残りの水分は地盤方向に流下している、もしくは試験体温度の低減には寄与していない可能性が高い。

図-9 および 10 によれば、夜間に補給される水分と比べて昼間の水分蒸発量の方が多いため、試験体の質量は低下し続ける傾向にある。この余分に放出される水分は、非常に緩慢な蒸発速度から考えて、測定開始前の湿潤状態としたときにセメントペースト硬化体中の微細空隙に取り込まれたものだと考えられる。このため、さらに長期間の測定を継続した場合には、試験体の乾燥が進み、乾燥状態の試験体の温度に近づいていくことが予想される。

(6) 人体の受ける放射量

本実験から得られた結果から、中村の方法¹¹⁾を用いて、舗装材料ごとの、屋外の立位の人体が受ける短波長放射

(日射と地面で反射した日射)・長波長放射(地面と天空)の放射量の評価を試みる。ここで、対象は無限に広い舗装面上に立つ人体を仮定し、POC, AS, NCの放射率はすべて0.9、日射反射率は表-6の乾燥状態のものを用いた。舗装の表面温度および環境条件は、湿潤の測定開始後1日目の13:00の実測結果を用いた。人体の日射吸収率は0.66、放射率は0.9とした。

図-11に、人体の受ける放射量の計算結果を示す。図から解るように、今回の計算条件においては、人体の受ける放射量は、表面温度の最も低かったNCが最大となり、続いてAS, POCの順となった。これは、地表面からの長波放射よりも日射反射の影響が大きいためである。

4. まとめ

本論文では、ポーラスコンクリート舗装に関する、基本的な熱特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。

- (1) 湿潤状態で放置したポーラスコンクリートの表面温度は、乾燥状態のポーラスコンクリートと比較すると、4~5℃程度低くなり、その効果は3日以上持続する。
- (2) 湿潤状態で放置されたポーラスコンクリートの表面温度に、骨材粒径、試験体厚さ、仕上げ方法、および結合材の水セメント比は影響しない。
- (3) ポーラスコンクリートと他の舗装材料との表面温度の違いには、日射反射率以外に容積比熱の影響が大きいと考えられる。
- (4) 人体の受ける放射量に関する計算結果からは、舗装表面からの長波放射よりも日射反射の影響が大きく、表面温度が最も低くなった普通コンクリートの場合に放射受熱量が最大となった。

5. 今後の展望

最近の関連研究では、舗装表面の大幅な温度抑制効果を得るために、複雑なシステムや高価な材料の使用を試みたものが主流となっているが、それぞれにコストや耐久性の問題、また、貯水させるシステムにおいては細菌や害虫の繁殖などの不安も残る。

一方、本実験結果からは、夜間のPOC舗装直下の地盤からの吸水と思われる現象が確認された。このことは、地盤そのものを保水層として利用できる可能性を示唆するものであり、このような特性がうまく活用できれば、POC舗装の透水性を利用して降雨を現地の地盤にそのまま浸透させ、その水分によって路面温度を低減させるといった自然の状態に近いシステムを構築できる可能性がある。さらに、この場合の舗装は通常の透水性舗装のみであるため、安価で広範囲な施工にも適していると考えられ、都市部の熱環境の改善に関する、有望な1つの解決法となり得ると思われる。

謝辞

本研究を進めるにあたり、岸田依奈さん(三重大学卒業生)、張茂剛氏、プラダン スニル氏(いずれも三重大学大学院生)の助力を得た。試験体の作成および屋外実験場の整備において、川島工業株式会社の助力を得た。本研究費の一部は、平成19年度科学研究費補助金 基盤研究(B)(研究代表者:畑中重光)によった。付記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 陳偉嬌, 水谷章夫, 大沢徹夫: 日射を受けた常時濡れ面での蒸発冷却効果及び蒸発性能の劣化-吸水性能を有する透水性アスファルト舗装材の蒸発冷却効果に関する研究(その2)-, 日本建築学会環境系論文集, No. 610, pp. 27-34, 2006. 12
- 2) 白井一義, 梶尾聡, 下山義秀, 中原大磯: 夏期におけるポーラスコンクリート舗装の表面温度特性, 舗装, Vol. 36, No. 9, pp. 16-21, 2001
- 3) 唐沢明彦ほか: 保水性コンクリートブロック舗装の路面温度上昇抑制効果に関する研究, 太平洋セメント研究報告, No. 152, pp. 44-58, 2007
- 4) 赤川宏幸, 小宮英孝: 湿潤舗装システムの開発, 舗装, Vol. 34, No. 4, 1999
- 5) 岳康幸ほか: 規格外再生骨材を用いた透水性歩道用コンクリートの開発, コンクリートテクノ, Vol. 26, No. 9, pp. 35-40, 2007
- 6) 円井基史, 梅干野晃, 浅野貴史, 板津佳恵: 蒸発冷却システムの基本性能に関する夏季屋外実験, 日本建築学会環境系論文集, No. 600, pp. 51-58, 2006. 2
- 7) 畑中重光, 三島直生, 湯浅幸久: ポーラスコンクリートの圧縮強度-空隙率関係に及ぼす結合材強度および粗骨材粒径の影響に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, No. 594, pp. 17-23, 2005. 8
- 8) 畑中重光, 三島直生, 坂本英輔, Park Kwangmin: 小粒径ポーラスコンクリートの揚水高さに関する理論的アプローチ, セメント・コンクリート論文集, No. 60, pp. 271-278, 2007. 2
- 9) 水口裕之ほか: 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(2.6.3 力学性能・耐久性能), 日本コンクリート工学協会, pp. 116-117, 2003. 5
- 10) 三島直生, 畑中重光, Thanudkij CHAREERAT, 湯浅幸久: セメントペーストの圧縮強度および弾性係数に及ぼす細孔構造の影響に関する基礎的研究, 第56回セメント技術大会講演要旨, 2002
- 11) 中村泰人: 建築都市空間内の人体に対する熱放射場の表現方法について, 日本建築学会計画系論文集, No. 376, pp. 29-35, 1986