

20. 保水性舗装の比熱・熱伝導率・放湿性の測定

Measurement of Specific Heat, Thermal Conductivity, and Diffusible Humidity
for Water-absorptive Pavement

地象部 小作好明、廣島 実

1. はじめに

東京都では、ヒートアイランド対策の一つとして、水を含むことができる保水性舗装を施工している。また、土木技術研究所構内に試験工区を設け、基礎的な実験を行っている。しかし、基礎資料としての保水性舗装の比熱や熱伝導率などの熱物性値については値が定かではない。そこで、熱物性値を測定するための試料を切り出し、保水性舗装の比熱と熱伝導率、放湿性の測定を行った。また、比較用として密粒度舗装、低騒音舗装についても比熱と熱伝導率の測定を行った。

なお、本調査は建設局道路管理部からの受託研究として実施した。

2. 試料

熱物性値の測定に使用した試料を表-1 に示す。測定した舗装は、密粒度舗装（以下、密粒度）、低騒音舗装（以下、低騒音）、保水性舗装（以下、保水A、保水B）の4種類である。密粒度と低騒音は、測定用に30×30×10cmの試料を新規に作成した。保水Aと保水Bは、土木技術研究所構内の試験工区から切出し、上層のアスファルト混合物の最大粒径は13mm、下層は20mmである。保水材は保水Aが塩化カルシウム入り保水材で、保水Bが高炉スラグ系保水材である。保水Aと保水Bともに75%浸透で保水材を充填したものである。

図-1 に各舗装の粒径分布を示す。保水Aと保水Bは、上層と下層を一体として切出した試料なので、粒径が大きい骨材が含まれる。保水Aの試料は、

13.2mm以上の骨材が多く含まれるが、保水Bは13.2mm以上の骨材が少なく、低騒音舗装の粒度に近い試料である。

表-1 熱物性値の測定試料

記号	舗装の種類	混合物種	厚さ (cm)	備考
密粒度	密粒度舗装	密粒度改質型(13)	10	30×30×10cmの試料を作成
低騒音	低騒音舗装	特殊開粒度(13)	10	30×30×10cmの試料を作成
保水A	保水性舗装	上層 特殊開粒度(13)	5	試験工区から切出し75%浸透保水性舗装塩化カルシウム入り保水材
		下層 特殊開粒度(20)	5	
保水B	保水性舗装	上層 特殊開粒度(13)	5	試験工区から切出し75%浸透保水性舗装高炉スラグ系保水材
		下層 特殊開粒度(20)	5	

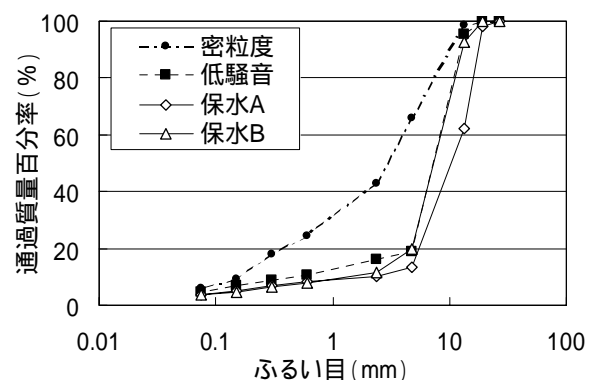


図-1 測定試料の粒度分布

3 比熱の測定

(1) 比熱の測定方法

比熱の測定方法には、表-2 に示すような測定方法がある。そのうち、混合法は、加熱した粉砕試料を低温の水に入れ、水の温度上昇を測定する方法である。この方法は、熱の損失があるので、測定結果の評価が難しい。断熱カロリーメータ法は、断熱カロリーメータ中で試験体を加熱し、与えた熱量と試験体の温度上昇から比熱を測定する方法である。こ

の方法で使用する試験体は、内孔に加熱管を入れるため、中空円柱にする必要があり、試料を中空円柱に整形することが難しい場合は適用しにくい。プラスチックの比熱容量測定方法は、試験片と基準物質との温度差が単位時間当たりの熱エネルギーの入力の差に比例するように構成されている示差走査熱量測定装置を使用して比熱を測定する。試験片は微小にする必要があり、舗装の測定には適用できない。ファインセラミックのレーザーフラッシュ法は、試験片にレーザパルス照射後、指数関数的に減衰する温度履歴曲線を利用して比熱を測定する方法であるが、これも試験片を薄く整形する必要がある。断熱型熱量計を用いる方法は、断熱容器の中に入れた供試体に熱量を加え、温度上昇と時間から比熱を測定する方法である。供試体は、直径 5cm、高さ 10cm 程度であればよい。このことから断熱型熱量計を用いる方法によって比熱を測定することとした。

表-2 比熱の測定方法

方法	試料、供試体、試験片
混合法	粉碎試料
断熱カロリーメータ法	中空円柱
プラスチックの比熱容量測定方法(JIS K 7123)	長さ0.5mm以下 厚さ0.5mm以下 質量5~15mg
ファインセラミックのレーザーフラッシュ法(JIS R 1611)	8~10mmの平板 厚さ4mm以下
断熱型熱量計を用いる方法	直径5cm 高さ10cm

(2) 比熱の測定に用いる試験体

比熱の測定に用いる試験体については、試料の厚さが 10cm なので、直径 5cm、高さ 10cm のコアを抜き、端部を切断して、直径 5cm、高さ 8cm の円柱を比熱測定用の試験体とした。図-2 に円柱試験体作成の概略図を示す。密粒度と低騒音については、上からコアを抜いたが、保水 A と保水 B は、切り出しの際に既設舗装と一体となっていたため上からコアが抜けず、横から採取した。

(3) 比熱の測定

測定装置の概念図を図-3 に示す。試験体は、中央にドリルで穴を開けて熱電対を設置し、温度測定を行い、試験体に熱線を巻いて熱量を加える。また、測定装置は、断熱状態を保つため、内部容器と断熱

容器の温度差がなくなるように制御できる構成となっている。試験体の温度上昇と時間を測定して、次式によって比熱を求めた。

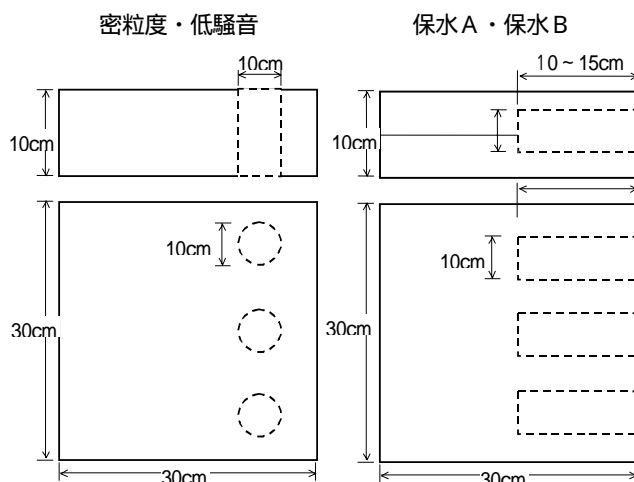


図-2 円柱試験体作成の概略図

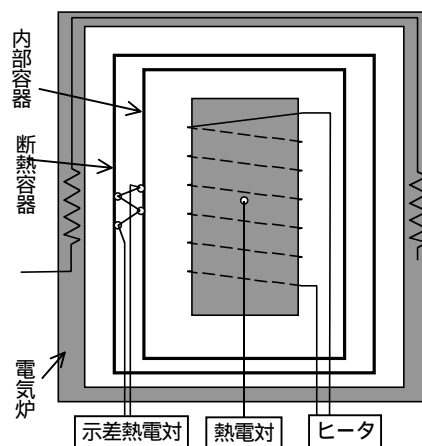


図-3 比熱測定装置の概念図

$$c = \frac{Q}{M} \cdot t - \frac{M'c'}{M}$$

c : 比熱 ($J \cdot g^{-1} \cdot K^{-1}$)
 Q : 発熱量 (W)
 M : 試験体の質量 (g)
 t : 温度上昇に要する時間 (s)
 $M' c'$: 校正熱量 ($J \cdot K^{-1}$)

(4) 比熱の測定結果

表-3 に各舗装の比熱の測定結果を示す。ただし、比熱の値は、乾燥状態の常温から 45 までの平均的な値である。密度はノギス法による値である。各舗装において、密度が小さい試験体で、比熱の値が小さくなる傾向が見られるが、比熱の値は、密粒度で 0.83 ~ 0.85、低騒音で 0.81 ~ 0.83、保水 A で 0.81 ~ 0.82、保水 B で 0.86 ~ 0.88 $J \cdot g^{-1} \cdot K^{-1}$ の値が

得られた。機械工学便覧¹⁾によると、アスファルトの比熱は $0.92 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ (20)となっており、測定結果はこれよりやや小さめの値となった。

表-3 比熱の測定結果

記号	密度 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	比熱 c ($\text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	熱容量 c ($\text{J} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
密粒度	2.376	0.85	2.02
	2.388	0.85	2.03
	2.365	0.83	1.96
低層音	2.124	0.83	1.76
	2.121	0.83	1.76
	2.117	0.81	1.71
保水A	1.954	0.82	1.60
	1.914	0.81	1.55
	1.940	0.82	1.59
保水B	2.281	0.88	2.01
	2.215	0.88	1.95
	2.154	0.86	1.85

4 熱伝導率の測定

(1) 熱伝導率の測定方法

熱伝導率の測定方法には、表-4 に示すような測定方法がある。保護熱板法(GHP 法)は、平板状試験体の両面の温度差と熱流量を定常状態にし、伝熱面積、熱流量、温度差、試験体の厚さから熱伝導率を求めるものである。熱流計法(HFM 法)は、加熱板と冷却熱板に熱流計と試験体を重ねて挟み、温度差と熱流量を定常状態にし標準板の熱抵抗と試験体の熱抵抗を比較する方法であり、平板比較法は、試験体と標準板を重ねて温度差を与え、それぞれの表面温度差を測定して標準板の熱伝導率から試験体の熱伝導率を求める。保護熱板式熱流計法は、保護熱板法と熱流計を併用した方法であり、熱流量と試験体表面の温度差、試験体の厚さから熱伝導率を求める。円筒法は、加熱管に中空円柱の試験体を巻き、半径方向に定常的な熱流を与え、熱流量、試験区間の長さ、内径、外径、内外径の温度差から熱伝導率を求める方法である。ファインセラミックのレーザーフラッシュ法による熱伝導率測定は、試験片にレーザーパルス照射して得られた温度履歴曲線によって熱拡散率と比熱を求め熱伝導率を算出する方法である。

今回の測定では、試料の形状を考慮して縦 30cm × 横 30cm の試験体で、直接的に熱伝導率を測定できる保護熱板法(GHP 法)とした。

表-4 熱伝導率の測定方法

方法	試験体
保護熱板法(GHP法) (JIS A 1412-1)	30 × 30cm 厚さ5cmまで
熱流計法(HFM法) (JIS A 1412-2)	30 × 30cm 厚さ10cmまで
平板比較法 (JIS A 1412-2附属書A)	20 × 20cm 厚さ10 ~ 25mm
保護熱板式熱流計法 (JIS A 1412-2附属書B)	90 × 90cm 厚さ20cmまで
円筒法 (JIS A 1412-3)	中空円柱
ファインセラミックのレーザーフラッシュ法 (JIS R 1611)	8 ~ 10mmの平板 厚さ4mm以下

(2) 熱伝導の測定に用いる試験体

図-4 に平板試験体作成の概略図を示す。熱伝導率の測定に用いる試験体については、試験体の表面が平滑でない場合、試験体と熱板の接触抵抗が不均一になるため熱流分布も不均一になり、正確な表面温度の測定が困難になる。そのため、表面を平滑化するために上下面を切断して縦 30cm × 横 30cm × 高さ 5cm の熱伝導率測定用の試験体とした。

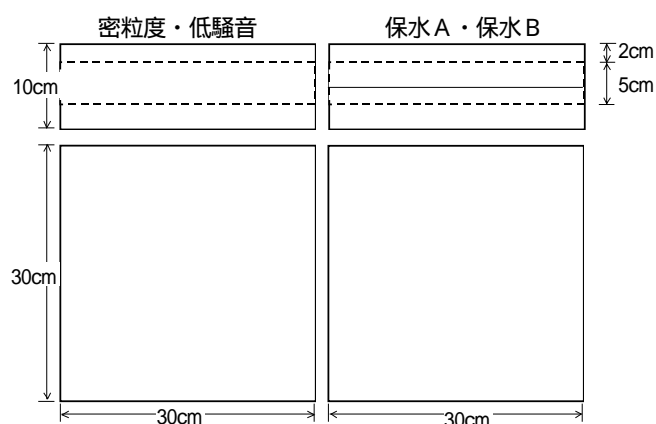


図-4 平板試験体作成の概略図

(3) 熱伝導率の測定

熱伝導の測定は、JIS A 1412-1「熱絶縁材の熱抵抗及び熱伝導率の測定方法 - 第 1 部：保護熱板法(GHP 法)」に従って行った。保護熱板法には、試験体 1 枚方式と 2 枚方式があるが、今回の測定では作業性から 1 枚方式とした。測定装置の概念図を図-5 に示す。加熱板は主熱板と保護熱板で構成され、その境界にギャップという断熱域がある。1 枚方式の場合、逆流防止用の補助熱板と加熱板を熱的に平衡を保つことによって熱移動が生じないようにする。

試験体の表面温度の測定は、熱電対を片面5点ずつ取り付け、その測定値の平均値を表面温度とした。主熱板に供給する平均電力、伝熱面積、温度差、試験体の暑さを測定して、次式によって熱伝導率を求めた。

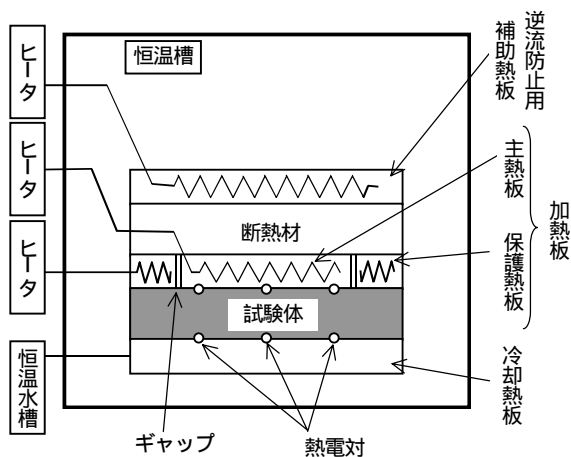


図-5 熱伝導率測定装置の概念図

$$= \frac{d}{A \cdot T}$$

$$= I \cdot V$$

- ：熱伝導率 ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)
- ：主熱板に供給する平均電力 (W)
- d : 試験体の質量 (g)
- A : 伝熱面積 (m^2)
- T : 温度差 (K)
- I : 電流 (A)
- V : 電圧 (V)

(4) 熱伝導率の測定結果

試験体の上下表面の平均温度が 20、30、40 となる場合について熱伝導率を測定した。保水性舗装については、試験体を乾燥炉で十分に乾燥させた場合の乾燥状態と、試験体を水に浸して十分に水分を含ませてから布で拭き取った表面乾燥飽水状態（表乾状態）の二つの状態でも測定した。表-5 に各舗装の熱伝導率の測定結果を示す。平均温度は、試験体の上下表面の平均値であり、温度差は、上下面の表面温度差の値である。

アスファルトの熱伝導率は、機械工学便覧¹⁾によると $0.74 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ (20)、理科年表²⁾では $1.1 \sim 1.5 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ (常温)となっており、測定結果は、理科年表に近い値となった。

表-5 熱伝導率の測定結果

記号	含水状態	平均温度 T_m ()	温度差 T (K)	熱伝導率 ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)
密粒度	乾燥	19.8	8.6	1.60
		29.9	8.9	1.60
		39.8	9.2	1.60
低騒音	乾燥	19.6	10.0	1.29
		29.8	10.2	1.29
		39.9	10.5	1.30
保水A	乾燥	20.4	9.8	1.00
		30.5	10.1	1.01
		40.5	10.3	1.02
	表乾	19.8	10.3	1.44
		30.1	10.1	1.47
		40.2	10.1	1.53
保水B	乾燥	19.8	10.3	1.38
		30.0	10.1	1.38
		40.0	10.6	1.39
	表乾	19.7	9.8	1.46
		29.9	10.0	1.47
		40.0	10.1	1.49

図-6 に平均温度約 30 における乾燥状態の熱伝導率と密度の関係を示す。舗装の種類が異なり、粒度も異なるので一概には言えないが、密度が大きくなると熱伝導率も大きくなる傾向があることが示唆される。

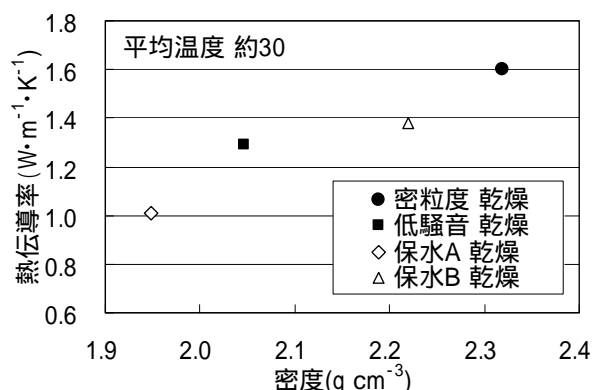


図-6 密度と熱伝導率

図-7 に乾燥状態と表乾状態における保水性舗装の熱伝導率を示す。水分を含むことによって保水Aの熱伝導率は、 $1.00 \sim 1.02 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ (乾燥)から $1.44 \sim 1.53 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ (表乾)になり、保水Bは、 $1.38 \sim 1.39 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ (乾燥)から $1.46 \sim 1.49 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ (表乾)になった。保水性舗装は、乾燥状態よりも水分を含んだ状態の方が熱伝導率の値が大きくなり、その値は、保水A、保水Bともに $1.5 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ 程度になった。また、平均温度が高くなると小さい値ではあるが、熱伝導率の値も大きくなる傾向があった。

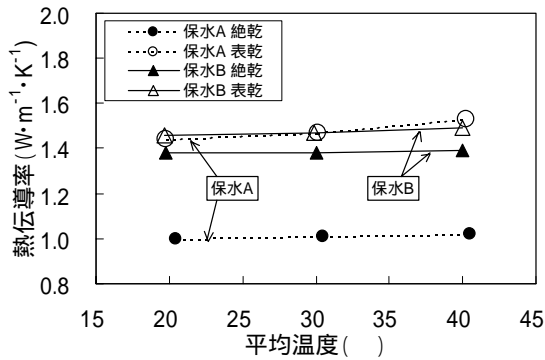


図-7 保水性舗装の熱伝導率 (乾燥、表乾)

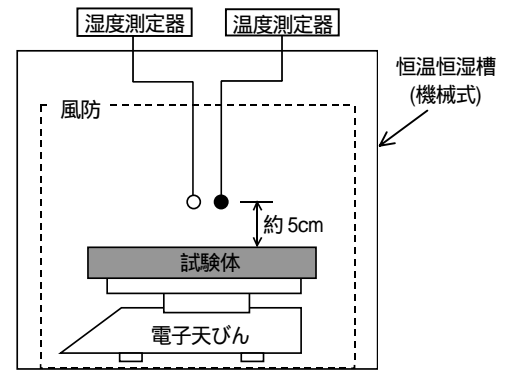


図-8 放湿性の測定装置の概念図

5 放湿性の測定

(1) 放湿性の測定

放湿性の測定は、JIS A 1470-1「調湿建材の吸放湿性試験方法 - 第 1 部：湿度応答法-湿度変動による吸放湿性試験方法」に従って行った。ただし、JIS の吸放湿性試験方法は、試験体を一定湿度の下で養生した後、材料が雰囲気中の湿気を吸収し、平衡状態になるようとする過程（吸湿過程、ステップ 1）と材料が雰囲気中に湿気を放出し、平衡状態に推移する過程（放湿過程、ステップ 2）において湿気の変化量を測定するものである。

しかし、測定しようとする材料は、保水性舗装であり、散水や降水などで水分が供給されることが想定されるので、吸湿過程を考えず、放湿過程のみの測定を行った。

図-8 に放湿性の測定装置の概念図を示す。測定装置は、恒温恒湿槽、電子天びん、温度測定器、湿度測定器、槽内かくはん用のファンから構成される。

放湿性の測定用の試験体は、電子天びんの測定範囲になるように縦 20×横 20×厚さ 5cm のものを使用した。放湿性の測定は、試験体を温度約 30 の水に 24 時間浸水させた後、試験体表面の水分を拭き取った表乾状態として、雰囲気温度 30、雰囲気相対湿度 53% (JIS 吸放湿試験における放湿過程の中湿域) の恒温恒湿槽内で 120 時間 (5 日間) 放湿状態にして試験体の質量を測定した。なお、放湿面は上面だけにするため、試験体の側面と下面はアルミテープ等で断湿した。また、表面状態を統一するため、平滑な平面とした。

(2) 放湿性の測定結果

図-9 に単位面積当たりの放湿量、図-10 に放湿勾配（単位面積、単位時間当たりの放湿量の変化量）、図-11 に残存水分量を示す。また、潜熱輸送量の時間変化を図-12 に、表-6 に放湿性の測定用試験体の基本物性、時間平均した放湿勾配と時間平均した潜熱輸送量の値を表-7 に示す。ただし、放湿勾配から潜熱輸送量の換算は、気化熱の式³⁾を $=2.50 \times 10^6 - 2.4 \times 10^3 \times T$ () $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $T = 30$ として $=2.428 \times 10^6 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ の値を用いた。測定の初期には、急速に放湿し、時間とともに放湿性が低下していくが、120 時間後でも放湿を続けている様子が分かる。また、保水 A の方が保水 B よりも放湿性が良いことから、放湿性は、舗装の空隙状態と含み得る含水量によって左右されることが考えられる。

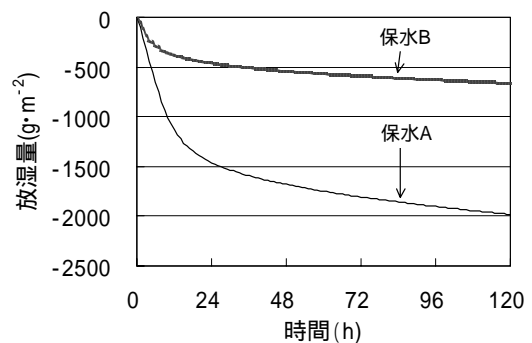


図-9 放湿量

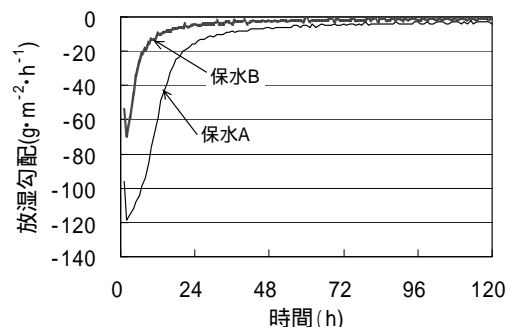


図-10 放湿勾配

表-6 放湿性の測定用試験体の基本物性

	保水A	保水B
乾燥密度 (g/cm ³)	1.965	2.198
含水比 (mass%)	3.0	1.3
空隙率(%)	22.5	12.7

表-7 平均放湿勾配と平均潜熱輸送量

時間 hr.	保水A	保水B	保水A	保水B
	平均 放湿勾配 g・m ⁻² ・h ⁻¹	平均 放湿勾配 g・m ⁻² ・h ⁻¹	平均 潜熱輸送量 W・m ⁻²	平均 潜熱輸送量 W・m ⁻²
0～12	94.4	31.7	63.7	21.4
12～24	27.3	6.8	18.4	4.6
24～36	10.9	3.9	7.4	2.6
36～48	7.3	2.8	4.9	1.9
48～72	5.3	2.1	3.6	1.4
72～96	4.0	1.6	2.7	1.1
96～120	3.4	1.4	2.3	0.9

6. まとめ

比熱は、密粒度舗装で 0.83～0.85 J・g⁻¹・K⁻¹、低騒音舗装で 0.81～0.83 J・g⁻¹・K⁻¹、保水性舗装で 0.81～0.82 J・g⁻¹・K⁻¹ と 0.86～0.88 J・g⁻¹・K⁻¹ の値が得られた。

熱伝導率は、密粒度舗装で 1.60 W・m⁻¹・K⁻¹、低騒音舗装で 1.29～1.30 W・m⁻¹・K⁻¹、保水性舗装の乾燥状態で 1.00～1.02 と 1.38～1.39 W・m⁻¹・K⁻¹、保水性舗装の表乾状態で 1.44～1.53 と 1.46～1.49 W・m⁻¹・K⁻¹ の値が得られた。保水性舗装は、乾燥状態よりも水分を含んだ状態の方が熱伝導率の値が大きくなり、その値は、1.5 W・m⁻¹・K⁻¹ 程度になった。

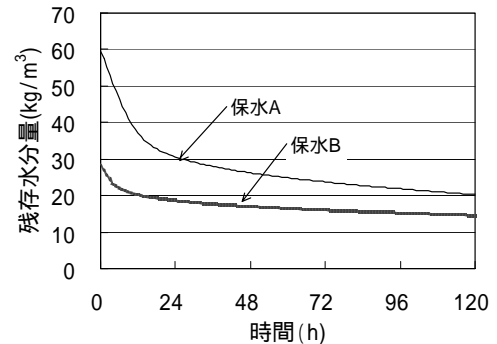


図-11 残存水分量

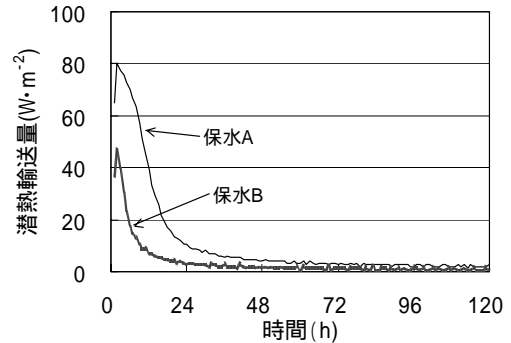


図-12 潜熱輸送量

保水性舗装の放湿性については、雰囲気温度 30℃、雰囲気相対湿度 53%における放湿量の結果が得られ、基礎資料を収集することができた。

謝辞

本測定にあたっては、(株)太平洋コンサルタント、(財)建材試験センター 中央試験所、(財)東京都道路整備保全公社 土木材料試験センターの協力を頂きました。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 日本機械学会(1985)：機械工学便覧 A6 熱工学、丸善
- 2) 国立天文台(2003)：理科年表 平成 16 年、丸善
- 3) 近藤純正(1994)：水環境の気象学-地表面の水収支・熱収支-、朝倉書店
- 4) 日本規格協会(1999)：熱絶縁材の熱抵抗及び熱伝導率の測定方法 - 第 1 部 保護熱板法(GHP 法) JIS A 1412-1
- 5) 日本規格協会(1999)：熱絶縁材の熱抵抗及び熱伝導率の測定方法 - 第 2 部 熱流計法(HFM 法) JIS A 1412-2
- 6) 日本規格協会(1999)：熱絶縁材の熱抵抗及び熱伝導率の測定方法 - 第 3 部 円筒法 JIS A 1412-3
- 7) 日本規格協会(1997)：ファイナセラミックスのレーザーフラッシュ法による熱拡散率・比熱容量・熱伝導率試験方法 JIS R 1611
- 8) 日本規格協会(1987)：プラスチックの比熱容量測定方法 JIS K 7123
- 9) 日本規格協会(2002)：調湿建材の吸放湿性試験方法 - 第 1 部 湿度応答法-湿度変動による吸放湿性試験方法 JIS A 1470-1
- 10) 日本道路協会(1988)：舗装試験法便覧、日本道路協会
- 11) 國分正胤(1969)：土木材料実験、技報堂
- 12) 峰岸順一、小林一雄、竹田敏憲(2004)：保水性舗装の路面温度低減機能の持続性と路面性状、平 16. 都土木技研年報、75-86
- 13) 峰岸順一、小林一雄、竹田敏憲(2004)：路面温度低減舗装の室内評価手法の検討、平 16. 都土木技研年報、99-110