

遮熱性舗装を対象とした路面温度低減効果 の評価方法に関する研究

平方和幸¹・新田弘之²・伊藤正秀³

¹正会員 工修 福田道路株式会社 技術研究所 研究員
(〒959-0415 新潟県西蒲原郡西川町大潟字中ノ島 2031)

²正会員 工修 独立行政法人土木研究所 材料地盤研究グループ 主任研究員
(〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6)

³正会員 独立行政法人土木研究所 基礎道路技術研究グループ 上席研究員
(〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6)

本研究は、遮熱性舗装の開発研究や性能評価を行うに当たって必要となる、路面温度低減効果の評価方法について検討を行ったものである。数種類の遮熱性舗装を用いた室内におけるランプ照射試験の結果、または夏季以外の屋外での路面温度から、夏季の屋外の路面温度を予測する式を回帰分析から導き、実測値との適合性を検討した。

その結果、室内試験から予測した場合、排水性舗装が60℃に対する夏季の路面温度は95%信頼区間で最大幅が±2.2℃以内であった。また、夏季以外の路面温度から予測した場合は95%信頼区間の最大幅が±1.5℃以内であった。

Key Words : *heat reflection pavement, evaluation test method, irradiation test method*

1. はじめに

都市域ではヒートアイランド現象が問題となっており、この現象の軽減・抑制に関して各方面から様々なアプローチが行われている。それらの一つとして舗装の路面温度を低減させ舗装面から大気への熱輸送量を低減する技術の開発が進められている。

この舗装には保水性舗装、遮熱性舗装などがあり、路面温度低減効果の評価が行われている。しかし、これらの評価には実大供試体を用いて路面温度の測定が必要であるとともに、夏季でなければ温度低減効果が確認できないといった問題点があった。このため、新しい材料の開発や、夏季以外に施工された路面の温度低減効果の評価などに不便が生じていた。

そこで、本研究では排水性舗装をベースとした遮熱性舗装を対象として、試験時期を選ばない評価方

法について検討を行った。具体的には、次の2種類であり、①室内におけるランプ照射試験の結果から夏季（1日の最高気温が30℃超える時期）の路面温度を予測する方法、②夏季以外の屋外の路面温度から夏季の路面温度を予測する方法、について検討を行った。

2. 室内ランプ照射試験からの夏季路面温度の予測

(1) 検討方法

a) 室内試験装置および試験条件

室内試験では、ランプ照射による方法が検討されているが^{1), 2)}、ランプの種類、供試体の構造、試験条件などは定まっていない。そこで本研究では図-1に示す試験装置を用い、ランプを供試体表面の上空に垂直に設置し照射高さ（試験は42・47・57・67cm

で実施)を変えられるものとした。ランプはこれまでの検討³⁾をもとに太陽光に近い波長特性を持つ水銀ランプを使用した。路面温度は表面骨材内の温度とし、供試体中央の 5cm 四方の範囲内に設置して熱電対を用いて 10 分間隔で路面温度の測定を行った。試験条件はこれまでの報告⁴⁾をもとに表-1とした。

b) 供試体および構造

供試体の表層に使用した混合物を表-2に示す。ここで遮熱性舗装および明色舗装には 13mmTop 排水性混合物を母体アスコンとして使用し、表面に遮熱材料(4種類)または明色材料を塗布した。供試体のサイズは 30×30cm(以下,30cm 供試体)とし、予備試験において1層構造(表層:5cm)では蓄熱による影響が大きくみられたため、3層構造(表層,基層,路盤:各5cm)とした。図-2に示すように室内試験の供試体は放熱を防ぐために表面以外に断熱材を施し、屋外試験の供試体は表・基層の周囲に断熱材を施した。

供試体の構造が異なると熱容量が異なることから路面温度の傾向が変わると考えられた。そこで、4×4mの実大供試体(以下,4m 供試体)による測定も行った。4m 供試体の構造は図-3の通りとし、骨材内に熱電対を埋設したものを供試体の中心から半径 50cm の範囲に3箇所表面に設置し測定を行った。

c) 予測方法

これまで報告³⁾したように、類似の構造を持つ混合物の間では、路面温度の上昇・下降を対比した場合、直線的関係が得られ、両者の比較がしやすいことが分かっている。そこで、排水性型の遮熱性舗装と排水性舗装(以下,比較舗装)を用いて以下の方法で室内試験の路面温度から夏季の路面温度を予測する方法を検討した。

- ① 夏季,室内試験の各舗装の測定結果について比較舗装との相関式を求める。
- ② ①で得られた式から屋外で測定される最高路面温度を考慮して比較舗装が60℃時の各遮熱性舗装の路面温度を求める。
- ③ ②で得た結果を基に室内試験の路面温度から夏季の路面温度を求める予測式を導く。

(2) 検討結果

a) 供試体サイズの影響

2つのサイズの路面温度を比較した結果の例を図-4に示す。このように日射のある日中には供試体のサイズの影響(温度差)は小さいが、夜間では30cm 供試体の放熱のしやすさの影響が大きくなり、両者の温度差が大きくなる結果となった。

最高路面温度の場合には30cm 供試体と4m 供試体の路面温度が大きく異なることから1日の最高

路面温度を評価対象の温度とした。なお、両サイズの最高路面温度に関して温度差を求めた結果、以下のような関係式を得た。

$$Y = 0.97X \quad R^2 = 0.98 \quad (1)$$

ここで、

Y : 4m 供試体の最高路面温度 (℃)

X : 30cm 供試体の最高路面温度 (℃)

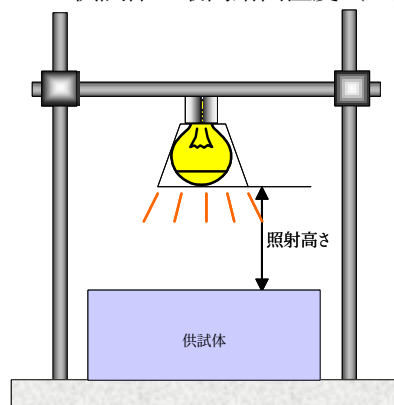


図-1 室内試験装置

表-1 試験条件

試験条件		備考
温度	30℃	理科年表を参考に東京の夏季の気象を模した
湿度	70%	
照射時間	8時間	
温度測定間隔	10分	

表-2 表層に用いた混合物

No.	混合物名	最大粒径	空隙率	備考
1	遮熱性混合物A	13mm	20%	No.6を母体として表面に遮熱材料または明色材料を塗布 比較舗装
2	遮熱性混合物B	13mm		
3	遮熱性混合物C	13mm		
4	遮熱性混合物D	13mm		
5	明色性混合物	13mm		
6	排水性混合物	13mm		

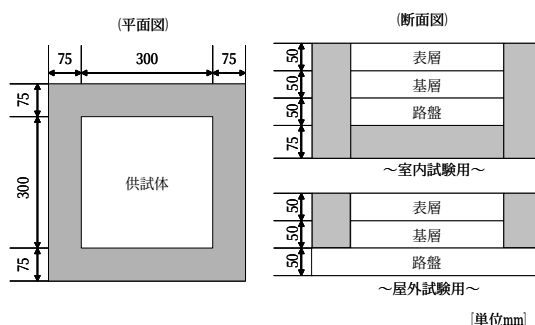


図-2 供試体の構造 (30cm 供試体)

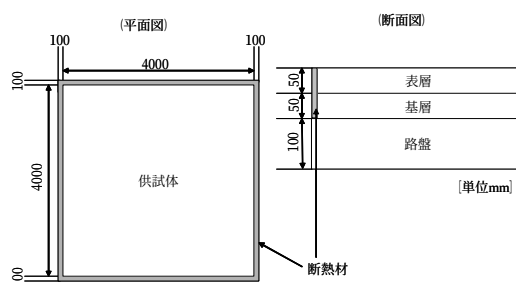


図-3 供試体の構造 (4m 供試体)

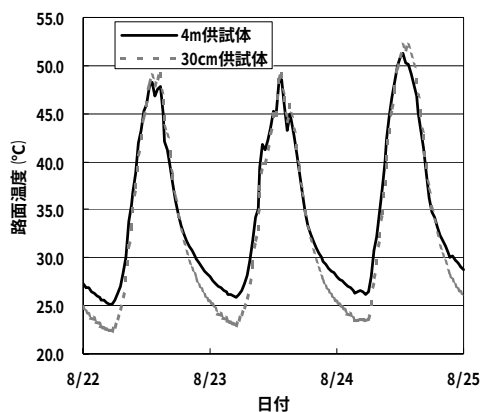


図-4 サイズ別の路面温度の変化 (No.1 供試体)

b) 測定結果 (夏季および室内試験)

図-5 は屋外において平成 15 年夏季に測定された 30cm 供試体の日々の最高路面温度をプロットしたものである。図-5 から比較舗装が 60°C の各遮熱性舗装の路面温度を求めた結果を表-3 に示す。なお、No.5 の路面温度(*)は夏季の路面温度が得られなかった為、他の供試体で夏季の路面温度と夏季以外の路面温度の関係式を求め、その式から算出した。

図-6 は照射 24 時間後の室内試験の結果である。図-6 から得られる回帰線を用いて比較舗装が 60°C の各遮熱性舗装の路面温度を求めた結果についても表-3 に示す。

c) 予測式の検討

表-3 の結果を用いて回帰分析を行った結果、表-4,5 のようになった。また、図-7 は室内試験の路面温度と夏季 (屋外) の路面温度の関係である。この結果から寄与率は極めて高く P 値も 0.05 以下で有意な回帰線と判断される。回帰分析による予測値と実測値の差は最大で 1.1°C、95%信頼区間の最大幅は ±2.2°C であり、今回対象とした遮熱性舗装の性能の差 (屋外の路面温度の幅: 7.1°C) に対して小さく実用的な精度のある予測式と考えられる。

回帰分析で得られた予測式を以下に示す。

$$Y = 1.80X - 47.25 \quad (2)$$

ここで、

Y : 夏季 (屋外) の路面温度 (比較舗装 60°C 時)

X : 室内試験の路面温度 (比較舗装 60°C 時)

夏季の路面温度 (Y) を (1) に代入することで実大サイズの路面温度を求める。

3. 夏季以外の路面温度から夏季の路面温度の予測

(1) 検討方法

a) 供試体および構造

4m 供試体を用いて、屋外での夏季以外での路面温度から夏季の路面温度を予測する方法を検討した。

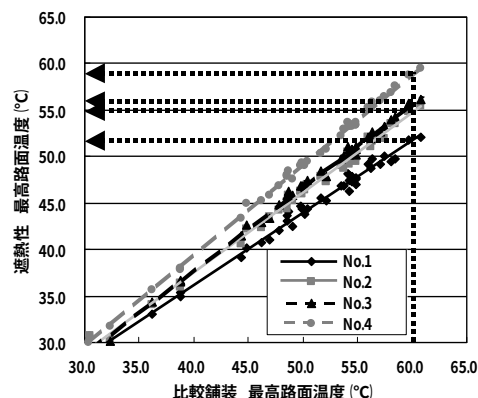


図-5 比較舗装と各舗装の関係 (夏季：屋外)

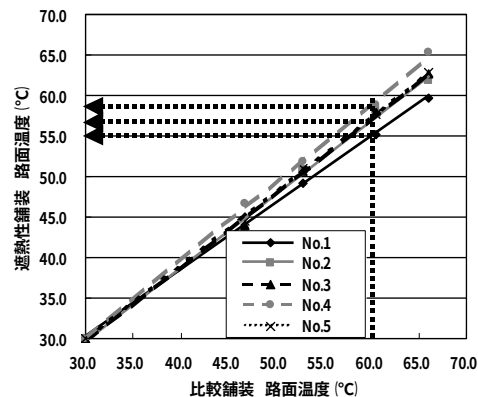


図-6 比較舗装と各舗装の関係 (室内試験)

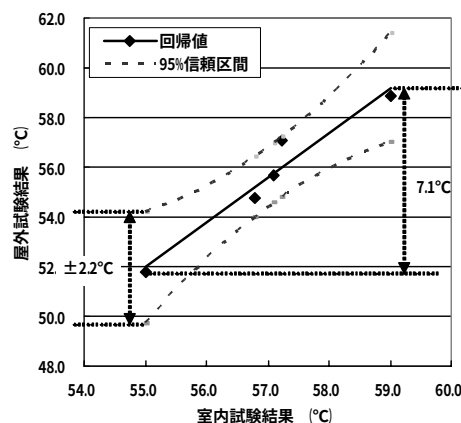


図-7 屋外と室内の関係

表-3 回帰式からの算出結果

No.	比較舗装が 60°C の時の路面温度 (°C)	
	室内試験	夏季：屋外
1	55.0	51.8
2	56.8	54.8
3	57.1	55.7
4	59.0	58.9
5	57.2	57.1(*)

表-4 回帰分析結果

相関係数	寄与率	標準誤差	観測数	P 値
0.973	0.947	0.191	5	0.005

表-5 実測値 (夏季：屋外) と予測値の差

No.	実測値	予測値	残差	95%信頼区間	
				上限値	下限値
1	51.8	52.0	-0.2	49.8	54.2
2	54.8	55.2	-0.4	54.0	56.4
3	55.7	55.8	-0.1	54.6	57.0
4	58.9	59.2	-0.3	57.0	61.4
5	57.1	56.0	1.1	54.8	57.2

供試体構造は図-3と同様にし、供試体は表-6に示す明度や材質の異なる12種類の遮熱性混合物と比較用の排水性混合物とした。

b) 測定を行うための実施条件に対する検討

屋外の結果は気象条件などによって路面温度の低減効果が異なる。遮熱性舗装の路面温度の低減効果が十分に発揮されるのは日射量が多い日（快晴または晴れ）であり、その効果は季節に関係なく表れると考えられた。そこで、快晴または晴れの日の比較舗装と遮熱性舗装の最高路面温度の関係を検討した。

c) 予測式の検討

予測方法は2. (1) c)と同様とし、室内試験の路面温度を夏季以外の路面温度に置き換えて解析した。

(2) 検討結果

a) 天気の影響

平成15年7月から翌年2月までの遮熱性舗装と比較舗装との関係を図-8に示す。快晴または晴れの日だけの結果は、全測定日の分布と比べ極めて狭い範囲に分布し、直線関係が見られた。この関係から夏季以外から夏季の路面温度の予測が容易であると予想された。しかし、全測定日に対する快晴または晴れの日の比率は19.0%と低く、これを実施条件とすると試験実施可能な日の存在確率（以下、試験実施可能率）が低くなる。そこで、精度を保ちながら試験実施可能率を上げるための実施条件について検討した。

b) 日射の影響

路面温度の上昇に与える影響は日射量が最も大きいと考えられた。しかし、日射量を基準とした場合、通常あまり計測されていないため、既存の気象データが利用できないといった問題があった。そこで、比較的容易に入手できる気象観測所の日射時間⁵⁾に着目し、さらに昼の時間（理論値）に対する日射時間（以下、日射割合）として分析を行った。

日射割合を振った場合に得られる比較舗装とNo.1 供試体の回帰線の標準誤差および試験実施可能率の関係を図-9に示す。日射割合が大きくなるほど試験実施可能率が低下する結果となった。一方、回帰線の標準誤差は日射割合が上がるほど低下し回帰性が良くなると考えられたが60%以上では上昇し回帰性が悪くなる結果となった。

c) 風の影響

これまでの報告⁶⁾より風速が路面温度に与える影響が指摘されていることから、気象観測所で得られる平均風速に着目してさらに分析を行った。

その結果、図-10に示すように一日の平均風速が気象庁の風力階級表で定めている軽風（3.3m/s）以下であれば回帰線の標準誤差への影響が小さく、日

表-6 表層に用いた混合物

No.	混合物名	最大粒径	空隙率	備考
1	遮熱性混合物A	13mm	20%	No.13を母体として表面に遮熱材料を塗布（塗布型）
2	遮熱性混合物B	13mm		
3	遮熱性混合物C	13mm		
4	遮熱性混合物D	13mm		
5	遮熱性混合物E	13mm		
6	遮熱性混合物F	5mm		遮熱効果のあるバインダを使用（混合部型）
7	遮熱性混合物G	8mm		
8	遮熱性混合物H	13mm		
9	遮熱性混合物I	13mm		
10	遮熱性混合物J	5mm		
11	遮熱性混合物K	5mm		
12	遮熱性混合物L	13mm		
13	排水性混合物	13mm		比較舗装

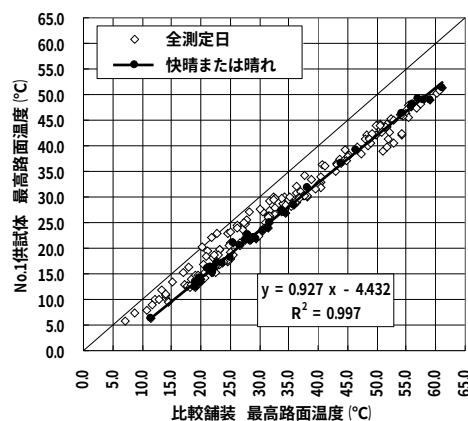


図-8 比較舗装とNo.1 舗装との関係

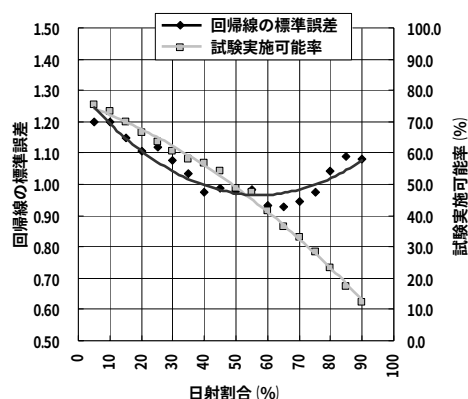


図-9 日射割合のみを実施条件とした場合

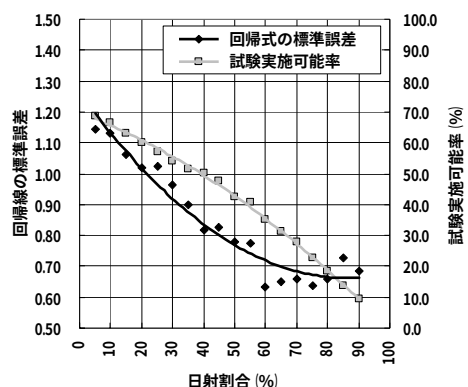


図-10 日射割合と平均風速（軽風以下）を実施条件とした場合

射割合が大きくなるほど標準誤差も低下する結果となった。また、これらの影響を実施条件として得ら

れる回帰式は $Y = 0.925X - 4.448$ となり図-8中の式と同程度であること,実測値と回帰値の差もほぼ $\pm 1.0^{\circ}\text{C}$ であること(図-11),さらに試験実施可能率も19.0%から35.1%まで上昇することから,日射割合と平均風速を測定の際の実施条件とした。

d) 測定結果(夏季および夏季以外)

2. (2) b)と同様に夏季の最高路面温度から比較舗装の路面温度が 60°C の各舗装の路面温度を求めた。また,例えば比較舗装の路面温度が 20°C 時の各舗装の路面温度で実施条件を満足した夏季以外の最高路面温度を求めた。その結果を表-7に示す。

e) 予測式の検討

表-7の結果を用いて予測式を求める為の回帰分析を行った。分析結果を表-8,9,図-12に示す。

分析結果より,寄与率は極めて高くP値も0.05以下で有意な回帰線と判断される。回帰分析による実測値と予測値の差は最大で 1.6°C ,図-12より95%信頼区間の最大幅は $\pm 1.1^{\circ}\text{C}$ であり,今回対象とした遮熱性舗装の性能の差(屋外の路面温度の幅: 10.2°C)に対して小さく実用的な精度のある予測式と考えられる。

回帰分析で得られた予測式を以下に示す。

$$Y = 1.53X - 28.99 \quad (3)$$

ここで,

Y:夏季の屋外路面温度(比較舗装 60°C 時)

X:夏季以外の屋外路面温度(比較舗装 20°C 時)

f) 予測式の適用範囲の拡大

e)では夏季以外の比較舗装の路面温度を 20°C とした場合の予測式を導いた。しかし,夏季以外の路面温度は 20°C ばかりではないため,あらゆる路面温度に対応する式を検討した。

比較舗装 20°C 以外の場合でも式(3)と同様の関係式(4)が成り立つと考え,各温度での傾き a および切片 b を求めた。結果を表-10に示す。

$$Y = aX_1 + b \quad (4)$$

ここで,

Y:夏季の遮熱性舗装の路面温度

(比較舗装 60°C 時)

a, b :表-10より任意の比較舗装の路面温度から得られる回帰式の傾きおよび切片

X_1 :夏季以外の遮熱性舗装の最高路面温度

a, b は,比較舗装の温度を定めると定まるため,回帰により式(5),(6)が求まった。

$$a = \left\{ (2.087 \times 10^{-5}) X_2^2 + (-1.240 \times 10^{-2}) X_2 + (1.771) \right\} \quad (5)$$

$$b = \left\{ (9.791 \times 10^{-3}) X_2^2 + (-1.657) X_2 + (5.832 \times 10) \right\} \quad (6)$$

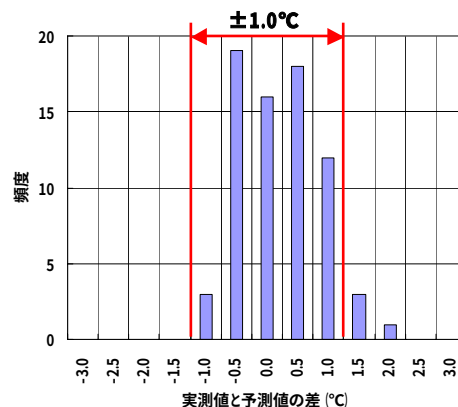


図-11 実測値と回帰値の差

表-7 回帰式からの算出結果

No.	比較舗装が 60°C 時の路面温度($^{\circ}\text{C}$)	比較舗装が 20°C 時の路面温度($^{\circ}\text{C}$)
1	50.4	14.0
2	53.4	15.3
3	56.6	17.9
4	51.7	17.8
5	51.5	15.0
6	51.1	15.5
7	54.1	15.8
8	59.7	19.9
9	60.6	20.4
10	58.0	19.1
11	57.7	19.4
12	55.5	17.4

表-8 回帰式からの算出結果

相関係数	寄与率	標準誤差	観測数	P値
0.978	0.956	0.769	12	3.98E-08

表-9 実測値(屋外)と予測値の差

No.	実測値	予測値	残差	95%信頼区間	
				上限値	下限値
1	50.4	50.4	0.0	49.4	51.4
2	51.7	51.6	0.1	50.8	52.4
3	54.1	53.1	1.0	52.5	53.8
4	58.0	58.2	-0.2	57.4	58.9
5	53.4	52.4	1.0	51.6	53.1
6	51.5	51.9	-0.4	51.1	52.7
7	59.7	59.4	0.3	58.5	60.3
8	57.7	58.6	-0.9	57.8	59.5
9	56.6	56.3	0.3	55.7	56.9
10	51.1	52.7	-1.6	52.0	53.4
11	60.6	60.2	0.4	59.1	61.2
12	55.5	55.6	-0.1	55.0	56.1

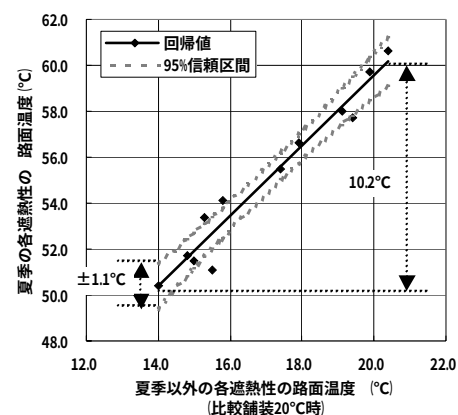


図-12 夏季と夏季以外の路面温度の関係

ここで

X_2 : 夏季以外の比較舗装の最高路面温度

比較舗装の温度を式(5), (6)に入れ a, b を求め, 式(4)に入れることで, 任意の路面温度測定結果から夏季の路面温度が予測できることになる. 本予測式は, 95%信頼性区間の幅で $\pm 1.0^\circ\text{C}$ 程度となった.

4. 結論

本研究より, 以下の成果が得られた.

- 1) 室内試験から夏季の路面温度を予測する方法
 - ・ 最高路面温度を対象とした供試体サイズの影響を把握し, 両者の変換式を導いた.
 - ・ 室内試験結果から夏季の屋外の路面温度を予測する式を導いた.
- 2) 夏季以外から夏季の路面温度を予測する方法
 - ・ 屋外での測定では, 気象条件として“日射割合 60%以上, 一日の平均風速 3.3m/s 以下”を条件とすることがよいことがわかった.
 - ・ 上記の条件を基に夏季以外の屋外の路面温度測定結果から, 夏季の屋外の路面温度を予測する式を導いた.

5. おわりに

今回, 遮熱性舗装の路面温度低減効果の評価方法を導くことが出来た. しかし, 遮熱性舗装同様に路面温度低減効果が期待される保水性舗装の評価方法についてはまだ不明な点があり今後の課題である.

なお, 本研究で用いた供試体は, (独)土木研究所と世紀東急工業(株), (株)NIPPO コーポレーション, 日本道路(株), 前田道路(株)の共同研究のものをを用いた. この場を借りて関係各位に御礼申し上げます.

表-10 回帰式の算出結果

比較舗装 路面温度 °C	回帰線				95%信頼区間 の最大幅 ±°C
	傾き a	切片 b	重相関 R2	標準誤差	
0	1.753	58.603	0.854	1.407	1.4
5	1.721	50.336	0.891	1.213	1.3
10	1.658	42.601	0.924	1.013	1.2
15	1.603	35.376	0.942	0.887	1.1
20	1.527	28.995	0.956	0.769	1.1
25	1.472	22.881	0.969	0.643	1.0
30	1.426	17.108	0.979	0.531	0.9
35	1.352	12.643	0.985	0.450	0.8
40	1.302	8.010	0.990	0.368	0.8
45	1.250	3.900	0.994	0.293	0.7
50	1.204	0.053	0.996	0.246	0.6
55	1.155	-3.224	0.996	0.225	0.6
60	1.108	-6.137	0.997	0.214	0.6

参考文献

- 1) 深沢邦彦, 福田萬大, 藤野毅: 路面温度の上昇抑制機能を有する舗装構造に関する検討 (その 2), 土木学会第 50 回年次学術講演会, V-269, pp538-539, 1993.
- 2) 長谷川淳也, 浜田幸二: 騒音低減機能を有する保水性舗装の検討, 土木学会第 57 回年次学術講演会, V-395, pp789-790, 2002.
- 3) 平方和幸, 新田弘之, 伊藤正秀: 温度低減型舗装の評価に関する一検討, 第 31 回土木学会関東支部, 2004.
- 4) 城戸浩, 新田弘之, 吉田武: 都市内環境に配慮した歩行者系舗装に関する一検討, 第 24 回日本道路会議, pp164-165, 2001.
- 5) 気象庁観測データ 平成 16 年.
- 6) 福田萬大, 浅枝隆, 藤野毅: 気象観測データを用いた舗装表面放出熱量の推定に関する研究, 土木学会舗装工学論文集, 第 4 巻, pp165-172, 1999.

RESEARCH ON THE EVALUATION METHOD OF THE ROAD SURFACE TEMPERATURE FOR HEAT REFLECTION PAVEMENT

Kazuyuki HIRAKATA, Hiroyuki NITTA, Masahide ITO

In this research, the evaluation method of the road surface temperature is studied for development of heat reflection pavement. Some kinds of heat reflection pavement, which used drainage pavement as the base mixture, were used for research. First, the prediction method of the outdoor road surface temperature of a summer was considered from the result of an indoor examination. Next, the prediction method of the outdoor road surface temperature of a summer was considered from outdoor road surface temperature other than summer.

Consequently, the practical prediction formula could be drawn from the result of a laboratory test. Moreover, the prediction formula that is practical also from the result of road surface temperature other than summer could be drawn.