熱・水・蒸気状水連成解析による保水性舗装の温度低減効果の検討

大阪大学大学院 学生会員 水井 裕瑛 大阪大学大学院 正 会 員 阿部 信晴

1.はじめに

都市域における熱環境緩和を目的とした保水性舗装の実用化が進んでいる。しかし,保水性舗装の熱緩和特性に関する解析的検討はこれまで十分には行われていない。そこで本報告は,保水性舗装の持つ温度低減効果を定量的に評価するため,保水性舗装の屋外試験¹⁾について熱・水分移動連成解析を行い,夏季の舗装の表面および内部における熱・水分挙動について検討を行ったものである。

2.熱・水分移動連成解析

各種舗装の屋外試験 試験はいずれも屋外に施工された保水性舗装などの舗装サンプルについて,夏季における舗装温度測定を行ったものである。舗装は表層,基層,路盤,路床から構成されており,舗装側面は発泡スチロールで断熱している。路盤材と路床材には粒度調整砕石(M-30)を用いている。保水性舗装に関しては水分供給を行わないケース(自然状態)と行うケース(給水)を試験しており,給水のケースは基層と路盤の間にアスファルト乳剤を散布し,開粒度基層部分に水が貯留される形となっている。本報告ではこれらの内,保水性舗装(硅石系シルト材)および自然状態の密粒性舗装を解析対象としている。

解析モデル 解析には高野らの熱・液状水・蒸気状水同時移動連成モデル 2)を用いている。モデルは熱・液状水・蒸気状水の各保存式中に未知変量である温度T,体積含水率 θ ,蒸気圧Pvを組み入れ、さらに液状水・蒸気状水の式中の蒸発項Evにモデル式を代入することで,表面のみでなく多孔体内部の熱・水分挙動を表現している。これら熱・水分に関する保存方程式および蒸発量算定式は以下の式で表される。

$$\frac{\dot{\rho}_{t}}{\partial v} \frac{\partial \theta}{\partial v} \frac{\partial \phi}{\partial t} + \theta \frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\rho_{t}KK_{n}g}{v} \left(\frac{\partial \psi_{m}}{\partial z} + 1 \right) \right] - E_{v}$$

$$\frac{\dot{g}}{\partial z} \frac{\partial \psi_{m}}{\partial z} + \theta \frac{\partial \rho_{t}}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\rho_{t}KK_{n}g}{v} \left(\frac{\partial \psi_{m}}{\partial z} + 1 \right) \right] - E_{v}$$

$$\frac{\dot{g}}{\partial z} \frac{\partial \psi_{m}}{\partial z} + \theta \frac{\partial \rho_{t}}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\rho_{t}KK_{n}g}{v} \left(\frac{\partial \psi_{m}}{\partial z} + 1 \right) \right] - E_{v}$$

$$\frac{\dot{g}}{\partial z} \frac{\partial \psi_{m}}{\partial z} + \theta \frac{\partial \rho_{t}}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\rho_{t}KK_{n}g}{v} \left(\frac{\partial \psi_{m}}{\partial z} + 1 \right) \right] - E_{v}$$

$$\frac{\dot{g}}{\partial z} \frac{\partial \psi_{m}}{\partial z} + \theta \frac{\partial \rho_{t}}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\rho_{t}KK_{n}g}{v} \left(\frac{\partial \psi_{m}}{\partial z} + 1 \right) \right] - E_{v}$$

$$\frac{\dot{g}}{\partial z} \frac{\partial \psi_{m}}{\partial z} + \theta \frac{\partial \rho_{t}}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\rho_{t}KK_{n}g}{v} \left(\frac{\partial \psi_{m}}{\partial z} + 1 \right) \right] - E_{v}$$

$$\frac{\dot{g}}{\partial z} \frac{\partial \psi_{m}}{\partial z} + \theta \frac{\partial \rho_{t}}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\rho_{t}KK_{n}g}{v} \left(\frac{\partial \psi_{m}}{\partial z} + 1 \right) \right] - E_{v}$$

$$\frac{\dot{g}}{\partial z} \frac{\partial \psi_{m}}{\partial z} + \theta \frac{\partial \rho_{t}}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\rho_{t}KK_{n}g}{v} \left(\frac{\partial \psi_{m}}{\partial z} + 1 \right) \right] - E_{v}$$

$$\frac{\dot{g}}{\partial z} \frac{\partial \psi_{m}}{\partial z} + \theta \frac{\partial \rho_{t}}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\rho_{t}KK_{n}g}{v} \left(\frac{\partial \psi_{m}}{\partial z} + 1 \right) \right] - E_{v}$$

$$\frac{\dot{g}}{\partial z} \frac{\partial \psi_{m}}{\partial z} + \theta \frac{\partial \rho_{t}}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\rho_{t}KK_{n}g}{v} \left(\frac{\partial \psi_{m}}{\partial z} + 1 \right) \right] - E_{v}$$

$$\frac{\dot{g}}{\partial z} \frac{\partial \psi_{m}}{\partial z} + \theta \frac{\partial \psi_{m}}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\rho_{t}KK_{n}g}{v} \left(\frac{\partial \psi_{m}}{\partial z} + 1 \right) \right] - E_{v}$$

$$\frac{\dot{g}}{\partial z} \frac{\partial \psi_{m}}{\partial z} + \theta \frac{\partial \psi_{m}}{\partial z} +$$

ここに, ψ_m :マトリックポテンシャル(cm), θ_c :限界体積含水率(蒸発が起こる体積含水率の下限値), K_n :相対透水係数, R_v :蒸気状水の気体定数, V_c :液状水の流速(cm/s),L:蒸発潜熱(cal/g)である。

解析概要 解析は図-1 に示す 3 ケース(密粒度舗装・保水性舗装[自然状態・給水])を行った。全天日射量,長波放射量,大気温度・湿度の気象データには 1999 年 8 月 28 日試験時(晴天・風速 2m 以下)のデータを用いた。表-1 に各材質のパラメータを示す。蒸発量に関係する材質パラメータの値は,実測値の自然状態(保水)

に対する給水(保水)の温度低下が主に潜熱効果によるものとし,解析結果における自然状態と給水の表層温度差が試験結果のものと一致するよう決定した。また保水性舗装のアルベドは乾燥時0.40,飽和時0.25と表面の水分量により変動するものとした。初期水分量は、自然状態は初期水分の少ない乾燥状態(各材質の限界体積含水率),給

		表-1	材質パラメ	・ータ		
		密粒性舗装	保水性舗装	開粒度基層	粗粒度基層	路盤・路床
	間隙率 n(%)	3.4	10.4	24.6	6.7	10.0
	限界体積含水率 θ_{c} (%)	0.34	1.04	2.46	0.67	1.0
	内部蒸発係数 K_G (s/cm^2)	1.0×10 ⁻⁹	7.0×10^{-7}	1.0×10^{-9}	1.0×10^{-9}	1.0×10^{-9}
	固体部分の比重 $\rho_s \left(g/cm^3\right)$	2.51	2.21	2.58	2.53	2.46
i	固体部分の比熱 C _c (cal/g·°C)	0.22	0.22	0.22	0.22	0.29
	アルベド Al	0.08	$0.25 \sim 0.40$			
	熱伝導率 $\lambda (W/m \cdot K)$	1.60~1.62	1.38 ~ 1.45	$1.25 \sim 1.42$	$1.55 \sim 1.60$	1.49 ~ 1.56
	固有浸透係数 K (cm²)	1.0×10^{-12}	2.0×10^{-12}	1.0×10^{-8}	1.0×10^{-11}	1.0×10 ⁻¹⁰
	不飽和浸透特性(V.G.式係数)2	10	0.005	15	5	5
	na	1.4	2	1.9	1.5	1.6
	屈曲度 7	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67
	蒸発面補正係数 ξ	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
	表層大気間の水蒸気輸送係数 (s/cm)	0.03	給水:0.35 自然状態:0.10			

キーワード:保水性舗装,ヒートアイランド,熱・水分連成解析,潜熱

連絡先: 〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1 大阪大学大学院工学研究科 地盤研究室 TEL06-6879-7626

水は全域の初期飽和度 90%以上とし蒸発が表層で継続されるよ う設定した。境界条件は下部境界を断熱・不透水・不透気境界とし た。また上部境界は熱・蒸気状水移動量が表層・大気の各量の差に 比例するものとし,液状水に関しては不透水境界とした。なお解 析法は一次元有限差分法である。

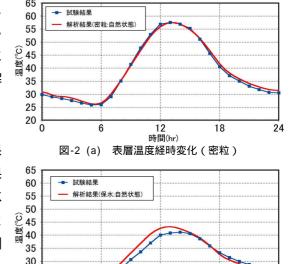
3.解析結果

図-2(a),(b),(c)に各ケースの表層温度の解析結果と試験結果 の比較を示す。各ケースともピーク温度や昼夜の変動が解析結果 と試験結果でよく一致しており,蒸発や反射率などの密粒と保水 の特性による差をよく表している。給水のケースでピーク温度と なる時間がやや早く現れている。図-3に5時から20時の3時間 毎の舗装内温度分布を比較したものを示す。密粒は各時間とも良 好な対応を示している。保水は日周期変動の傾向は一致している が、表層・基層での温度上昇が早く起こっており、給水では温度低 下時も実測より早い。これは試験では給水により舗装の熱容量が 増加していたためと考えられる。図-4 に各ケースの熱収支を示 す。吸収放射量は日射の吸収量と長波放射量の合計値で,舗装が 1日に吸収した熱量である。また吸収放射量と赤外放射量など放 出・消費熱量との差は初期に比べて舗装に蓄えられた熱量となる。 保水の2ケースを比較すると,吸収放射量は給水が大きく,赤外 放射量は自然が大きいが、給水は蒸発潜熱によって自然より温度

上昇が抑えられており ,その 潜熱量は吸収放射量の約 9%である。

4.まとめ

- 1)解析結果は試験の表層温 度上昇をほぼ良好に表して いる。
- 2)深さ方向の温度分布につ いても試験結果に近い挙動 を示しており、解析による再 現性が示されている。



時間(hr) 図-2 (b) 表層温度経時変化(保水:自然)

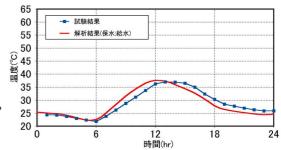
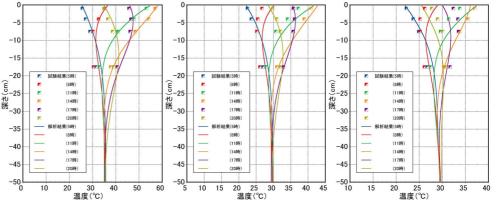


図-2 (c) 表層温度経時変化(保水:給水)



25 20

図-3 各ケースの温度分布経時変化 (左から密粒、保水(自然) 保水(給水)) ※棒横の数字は吸収放射量を100とした ときの各項目の数値を表したもの

3)解析結果は試験結果の保水性舗装の潜熱効果による温度低 減効果を適切に表しており,舗装特性を表現することができた。 4)給水·降雨などによる水分供給をモデル化することによって ***b\$#量 蒸発や毛管作用による水分量の変動がより正確に表現できると 考えられる。

参考文献

1)福田・越川・辻井・浅枝・藤野:夏季に給・散水した保水 性舗装の熱環境緩和特性に関する実験的研究,土木学会論文集,No.613/ -42,225-236,1999.2

反射日射量 潜熱量 ■保水(自然) 顕熱放射量 30 熱量(MJ/m²)

図-4 各ケースの24時間の熱収支

2)高野・福原・佐藤:乾燥-不飽和土壌中の熱・液状水・蒸気状水移動の同時連成解析 , 土木学会論文集 , No.635 / -49 , 13-29 , 1999.1