

砂質土中の水分・熱移動カラム試験と熱解析に関する考察

法政大学 学生会員 ○遠藤 智嗣
 法政大学 正会員 草深 守人
 法政大学 正会員 橋本 保

1. はじめに

現在、ヒートアイランド現象が深刻化している。ヒートアイランド現象の原因としては、人工排熱の増加、地表面被覆の人工化、都市形態の高密度化などによる熱収支変化があげられる。ヒートアイランド現象の抑制対策の一つに保水性舗装工法があるが、持続的な路面温度低減効果を確保するために、表層はもちろんのこと、より体積の大きな路盤内部の水分保持及び水分移動の向上が必要であると考え。そこで、本研究では、保水性舗装工法の持続的な路面温度低減を図るために、路盤内部の水分保持及び水分移動に着目し、不飽和状態にある路盤材料の水分移動特性を実験的に明らかにし、かつ熱移動解析を試みることにした。

2. 試験方法

本試験では、はじめに粒度分布の異なる 12 種類の川砂を用意し、保水性試験を実施した。用意した川砂は、基準となる静岡県大井川産の川砂の均等係数 U_c と平均粒径 D_{50} をもとに、粒径加積曲線を回転・平行移動させたものである。保水性試験では、複数の異なる粒度分布を有する粒度調整材料に対する水分移動特性について主に実験面から考察を加え、十分な保水性を有する路盤材料の選定を試みた。次に、選定した材料を用いて、積層カラム熱照射試験を行い、地表面の潜熱・顕熱輸送による冷却効果を実験と解析面から考察した。

3. 試験結果と考察

(1) 保水性試験概要

12 種類に分けた川砂に対する保水性試験を、吸引法吸水過程、吸引法排水過程および加圧法排水過程で実施した。吸引法吸水過程では、圧力水頭 200 cm~0 cm の間を 18 段階、吸引法排水過程では、0 cm~200 cm の間を 5 段階、加圧法排水過程では、0 cm~1000 cm の間を 4 段階に分け、合計 27 段階の保水性試験を日本地盤工学会基準 (JGS0151-2000) に従い実施した。

(2) 水分特性曲線と不飽和透水係数

図 1 に水分特性曲線の実験値に van Genuchten モデル式(1)を当てはめた一例を示す。このように川砂のような粗粒な土のマトリックポテンシャル ψ と体積含水率 θ の関係は、van Genuchten モデルによって比較的良く表現できることが分かる。

$$S_e(\theta) = \left(\frac{1}{1 + (\alpha\psi)^n} \right)^m \quad (1)$$

ここで、 S_e は有効飽和度、 α は限界毛管水頭 ψ_{cr} の逆数、 n と m は定数である。

式(1)の各定数を後述の積層カラム試験で使用する二種類の川砂 ($U_c=3.37, D_{50}=0.58$) と ($U_c=5.80, D_{50}=0.2$) の試験値から決定し、水分特性曲線を作成することによって、不飽和土中の透水係数 $K(\theta)$ は下式に従って推定できる。

$$K(\theta) = K_s S_e^{\frac{1}{2}} \left[1 - \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad (2)$$

ここで、 K_s は飽和透水係数である。推定例を図 2 に示す。

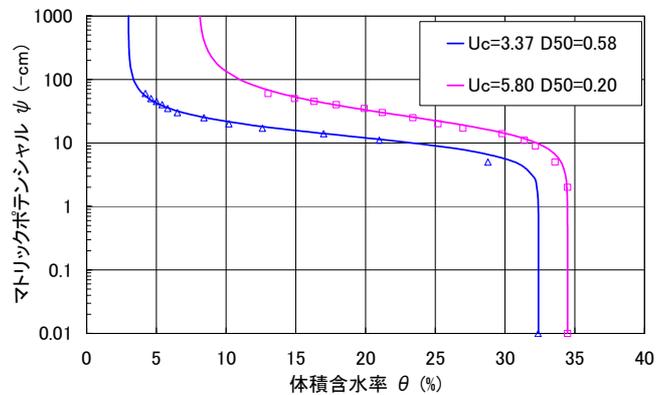


図 1 van Genuchten モデルと実測値

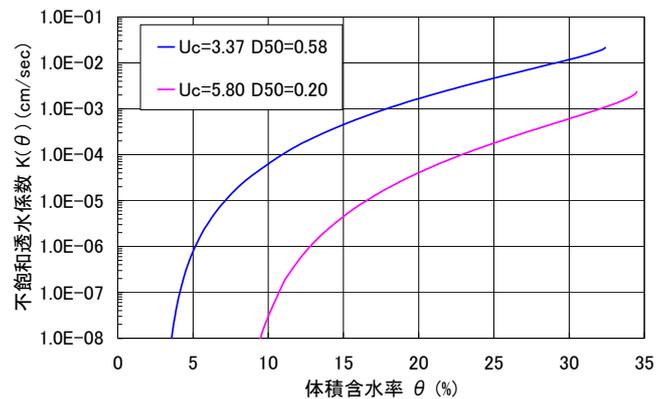


図 2 式(2)より推定された不飽和透水係数

(3) 積層カラムによる吸水・蒸発試験

写真 1 に示すように各積層カラムに同一の乾燥密度に調整した試料を充填し、カラム吸水試験を行った。また、カラム上空から散光形ビーム電球による定常放射エネルギーを照射することによってカラム上端表面からの蒸発量を測定した。具体的には、はじめに 1 層目から 5 層目までに川砂 ($U_c=3.37, D_{50}=0.58$) を充

填, 照射を行った. 次に, 川砂 ($U_c=5.80$, $D_{50}=0.2$) を充填した 6 層目カラムを追加し, 散光型ビーム電球の高さを一定間隔で変更しながら照射を行った. 各過程における蒸発量の比較を表 1 に示す. また, 表 1 より求めた定常時の地表面温度と蒸発速度を図 3 に示す.

照射過程の蒸発速度は, 地表面温度とほぼ線形関係にあり, 光源が地表面に近づく(温度が上昇する)につれて蒸発速度が遅くなる傾向にある. これは, 地表面に照射されるエネルギー量が過大に増加すると地表面に向かう上向き水分移動量が蒸発量に追いつかないことを示している.

湿潤カラムと乾燥カラムの地表面温度差は, 光源高さが低いほど大きく, 乾燥地表面温度 60°C 前後(夏季晴天時最大地表面温度に近い)に相当する照射エネルギー(6 層, 照射高 $h=56\text{ cm}$)では, 潜熱輸送による地表面温度の低下量は 15°C 程度であり, 保水性舗装の施工現場で測定されている路面温度の低下量とほぼ同程度の値を示した.

(4) 熱移動解析

図 4 は, 5 層積層カラム試験モデルの地表面温度を実験値と熱輸送解析値と比較したものである. 解析に使用した熱伝導率は別途実施した不飽和土の熱伝導率試験結果¹⁾を使用し, 照射エネルギーは地表面で測定した黒体温度からステファン・ボルツマン則に従って設定した. 同図によると定常状態に至る以前の初期区間で解析値と実測値に差が生じているものの, 後半の定常区間では比較的よい対応を示した. なお, 初期区間における両者の差は, 本解析では上向きの水分移動に定常を仮定しているためである.

4. 結論

本研究では, 粒度分布の異なる川砂に対し保水性試験, 積層カラム照射試験を行い, 路盤材料の保水能力, 路盤内の水分移動や潜熱による冷却効果について以下の示唆を得た.

- ① van Genuchten モデルは, 砂質土の水分特性関数として有効なモデルと考える.
- ② 静岡県大井川産の川砂に対しては均等係数 $U_c=5.80$, 平均粒径 $D_{50}=0.2$ で配合した路盤材料が他の粒度調整材料の中で最も保水能力を有する.
- ③ 積層カラム照射試験では, 全照射過程において潜熱・顕熱輸送による地表面温度の低下現象が見られた. しかし, この温度低減効果は, 土中の水分フラックス J_w が照射エネルギー密度に対応する最大可能蒸発量 E_{max} 以下では, 水分フラックス J_w に反比例して減少する.
- ④ カラム照射実験によると, 上向き水分量フラックス $J_w = 1.314 \times 10^{-4} \text{ kg/m}^2/\text{sec}$ の土に対して照射エネルギー 671 W/m^2 を連続照射したとき, 潜熱輸送による地表面の温度低下量は約 15°C 前後である.



写真 1 吸水・蒸発試験状況

表 1 水蒸気フラックスと地表面温度

| カラム層数 | 照射状況 | 光源高さ h (cm) | 水蒸気流量 J_w (g/cm ² /sec) | 潜熱流量 S (J/cm ² /sec) | 湿潤時地表面温度 T_s (°C) | 乾燥時地表面温度 (概算値) T'_s (°C) |
|-------|------|---------------|--------------------------------------|-----------------------------------|---------------------|----------------------------|
| 5層 | 照射 | 38 | 1.28E-05 | 0.0314 | 50.9 | 69.1 |
| | 中止 | 38 | 2.58E-06 | 0.0063 | 19.8 | 19.7 |
| 6層 | 照射 | 38 | -2.17E-06 | -0.0053 | 60.8 | 84.8 |
| | 中止 | 38 | 2.20E-06 | 0.0054 | 19.8 | 19.7 |
| 6層 | 照射 | 76 | 6.57E-06 | 0.0161 | 30.4 | 36.5 |
| | 中止 | 76 | 3.99E-06 | 0.0098 | 19.7 | 19.5 |
| 6層 | 照射 | 66 | 5.51E-06 | 0.0135 | 37.4 | 47.7 |
| | 中止 | 66 | 3.76E-06 | 0.0092 | 19.1 | 18.6 |
| 6層 | 照射 | 56 | 4.95E-06 | 0.0121 | 45.0 | 59.7 |
| | 中止 | 56 | 3.54E-06 | 0.0087 | 16.7 | 14.8 |

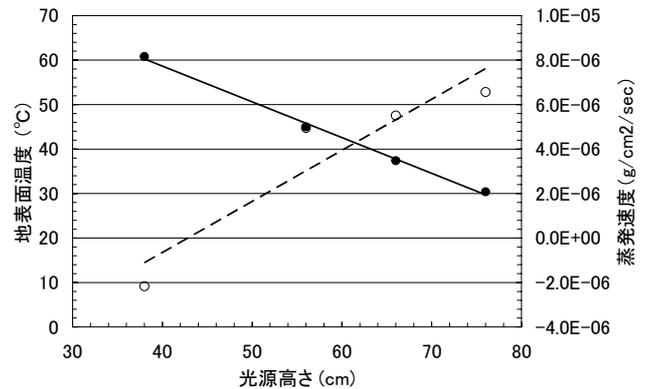


図 3 光源高さと地表面温度・蒸発速度の関係

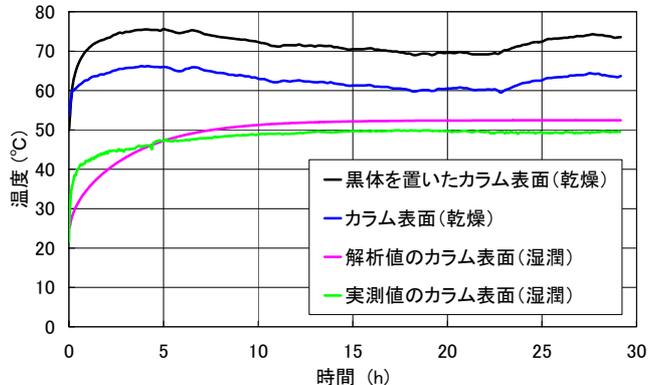


図 4 乾燥時と湿潤時の表面温度の推移

参考文献: 1) 遠藤智嗣: 湿潤土の熱伝導率の測定方法と砂の熱伝導率測定結果の評価について, 第 46 回地盤工学研究発表会論文, 2011.