

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.06.028

路基土体“锅盖效应”的数值模拟分析

宋二祥, 罗 爽, 孔郁斐, 李 鹏

(清华大学 土木工程系土木工程安全与耐久教育部重点实验室, 北京 100084)

摘 要: 基于对道面下路基土体中“锅盖效应”形成机制的定性认识, 依据非饱和土中气液传输及热传导多场耦合理论并考虑水的气液相转换, 建议了对此问题进行分析的数学模型。采用有限元方法对道面下路基一维土柱进行模拟分析, 揭示了土中水和水蒸气在变温作用下的运移及相变规律, 分析了“锅盖效应”形成条件和影响因素。数值结果显示, 土质和温度分布对路基土发生“锅盖效应”有较大影响。粉土路基较黏土或砂土路基更易形成水分聚集; 路基顶部温度较路基深处温度低时, 在温度作用下易引起路基土的“锅盖效应”。这些结果可为进一步研究道路工程中的“锅盖效应”提供参考。

关 键 词: 非饱和土; 锅盖效应; 多相渗流; 相变模型

中图分类号: TU 433

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2017) 06-1781-08

Simulation and analysis of pot-cover effect on moisture transport in subgrade soil

SONG Er-xiang, LUO Shuang, KONG Yu-fei, LI Peng

(Key Laboratory of Civil Engineering Safety and Durability of the State Ministry of Education, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Based on qualitative understanding of the so-called pot-cover effect on moisture transport in the road subgrade soil, a mathematical model is proposed to analyze multi-phase transportation, heat conduction, and water-vapor transition. A one-dimensional finite element model for subgrade soil column is developed to investigate moisture transport and phase change under temperature gradient, as well as the mechanism and influencing factors of pot-cover effect. The numerical results indicate that the temperature profile and soil texture may have significant influence on pot-cover effect. Pot-cover effect is more likely observed in silt subgrade than in sand or clay subgrade. The temperature profile of lower temperature at the top subgrade more easily leads to the pot-cover effect. These results provide reference for further understanding the pot-cover effect in subgrade soil.

Keywords: unsaturated soil; pot-cover effect; multi-phase flow; phase transition model

1 引 言

在道路工程中, 道面下路基土体因含水率增大产生湿化变形或冻胀, 进而导致的道路病害一直受到业内人士的普遍关注。一种观点认为, 道面下路基土体中含水率增加的原因之一是不透气道面的存在阻碍了路基水分的蒸发, 并称此种现象为“路面覆盖效应”^[1]。文献[2]结合西部干旱地区某机场的道面病害较系统地阐述了道面覆盖效应的存在, 对其机制进行了定性分析, 指出当地表存在不透气覆盖层时, 土中受毛细作用、温差和蒸发作用而向上

迁移的水分受到覆盖层的阻止会积聚在覆盖层下, 并将此种现象形象地称为“锅盖效应”。对于宽度较大的公路或机场跑道这一效应尤其明显, 此时道面中部下方土体较两侧边缘下方含水率往往更高, 相应的道面中间部位也更易发生破坏。显然, 深入理解道面覆盖效应或“锅盖效应”的机制对防止此种道面病害具有重要意义。本文以此为出发点, 尝试依据有关理论对道面的覆盖效应进行数值模拟分析。

道面覆盖效应的分析涉及多孔介质中水、气两相渗流、相变及传热等内容, 属于复杂的多场耦合

收稿日期: 2015-10-16

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(No.2014CB047003); 国家自然科学基金项目(No.41272279)。

This work was supported by the National Key Program on Basic Research and Development of China (2014CB047003) and the National Natural Science Foundation of China (41272279).

第一作者简介: 宋二祥, 男, 1957 年生, 博士, 教授, 主要从事岩土力学及工程方面的教学及科研工作。E-mail: songex@tsinghua.edu.cn

问题,相应的研究还有待深入。多孔介质中水、气及热量传输模型最早由 Philip 和 de Vries^[3]于 1957 年提出(以下简称为 PDV 方法)。PDV 方法引入增强因子 η 来考虑水蒸气在孔隙尺度下的扩散增强作用,弥补了 Fick 定律在描述土体水蒸气扩散问题时存在失真的缺陷,在多孔介质非等温水气运移模拟方面得到了广泛应用^[4-5]。Bear^[6]于 1972 年依据守恒原理提出了两相压力耦合方程,Whitaker^[7]于 1977 年导出了宏观尺度下各相守恒方程。

由于非饱和土多物理场耦合问题本身的复杂性,本构关系往往需要作相应简化或引入经验关系。基质吸力与饱和度关系可通过 van Genuchten 公式^[8-9]确定,水、气相变模型可采用瞬时相变平衡模型或非平衡相变模型^[10]。多孔介质的导热系数与土质、含水率及温度等因素相关^[11],确定方法可参考文献^[12-13]。

多物理场耦合问题求解多采用数值方法,计算精度及收敛性也是应关注的重要问题。目前主要采用全耦合方法或交错方法^[14]对多物理场问题进行求解。全耦合方法对控制方程离散格式整体求解,能够精确考虑各物理场相互间的耦合;交错方法则对各物理场分别求解,各场间交换信息实现相互耦合。

本文模型在文献^[15]提出的非瞬态平衡模型基础上进行修正来考虑水、气相变,采用 Chung 和 Horton 相关工作^[13]来考虑导热系数与含水率间的关系,数值计算采用向后差分的时域积分以保证无条件稳定^[16],采用全耦合方法保证求解精度。本文模型亦可用于土体水动力学等其他领域^[4-5]。

2 数值模型

本节基于已有研究梳理给出多孔介质多相流分析的控制方程及计算条件,包括多孔介质中流体、气体质量和热量守恒方程,并对部分方程进行修正。

2.1 基本假定

多孔介质中多相传质传质示意图如图 1 所示。模型考虑了土颗粒、液态水、水蒸气和空气共 4 相。

为建立多孔介质中多相渗流传质传热数学模型,现作如下假定:

(1) 假定上述 4 相在全域内连续。微元尺度大于表征单元尺度 REV (representative elementary volume)。在 REV 以上,各相物性参数不随微元尺寸增大而变化。

(2) 假定任意时刻任意位置处,模型 4 相温度相同,即局部热平衡假定。

(3) 模型中需要考虑水气两相的蒸发和冷凝,为简便起见,不考虑土-水特征曲线的滞回。

(4) 假定空气和水蒸气组成的混合物满足理想气体状态方程。

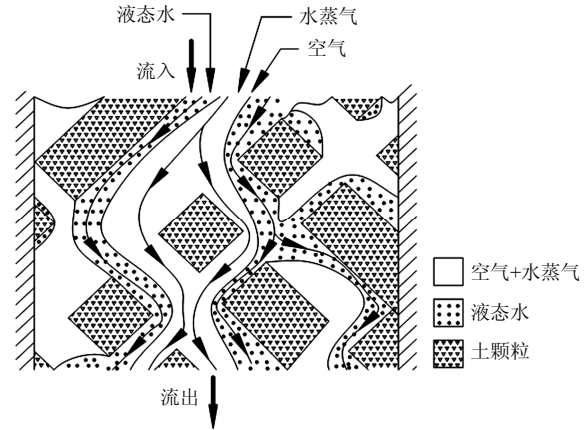


图 1 非饱和土内多相渗流示意图

Fig.1 Schematic diagram of multi-phase flow in unsaturated porous media

2.2 质量与热量守恒方程

2.2.1 气液两相质量守恒

Bear^[6]于 1972 年提出水压-气压耦合的两相质量守恒偏微分方程为

$$\phi \frac{\partial(\rho_l S_l)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_l \mathbf{v}_l) = -\dot{m} \quad (1)$$

$$\phi \frac{\partial(\rho_g S_g)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_g \mathbf{v}_g) = \dot{m} \quad (2)$$

式中:下标 l 和 g 分别代表液相和气相; \mathbf{v}_l 和 \mathbf{v}_g 分别为流体和气体流速矢量; ρ 为密度; ϕ 为介质孔隙率; S 为饱和度($S_l + S_g = 1$); \dot{m} 为相变速率。当考虑温度对基质吸力修正时可以表达为^[3]

$$\mathbf{v}_l = -\frac{k_{rl}}{\mu_l} \mathbf{K} (\nabla P_l - P_c G_{wT} \frac{1}{\sigma_0} \frac{d\sigma(T)}{dT} \nabla T) \quad (3)$$

$$\mathbf{v}_g = -\frac{k_{rg}}{\mu_g} \mathbf{K} \nabla P_g \quad (4)$$

式中: P 为压强; $P_c(P_c = P_g - P_l)$ 为基质吸力; \mathbf{K} 为本征渗透率张量;渗透率张量分量与渗透系数关系为 $K = \mu_l k / (\rho_l g)$; k_r 为相对渗透率; μ 为动力黏度; $\sigma(T)$ 为温度 T 对应的表面张力; σ_0 为 25 °C 时的表面张力; G_{wT} 为表征土-水特征曲线随温度变化的增益因子^[17],为简便起见,本文取 7。

忽略气相受到的重力,假定饱和度 S_l 仅与基质吸力 P_c 有关,液体密度 ρ_l 不变,式 (1)、(2) 的等

号左边第1项可分别表达为

$$\varphi \frac{\partial(\rho_l S_l)}{\partial t} = \varphi \rho_l \frac{dS_l}{dP_c} \frac{\partial P_c}{\partial t} \quad (5)$$

$$\varphi \frac{\partial(\rho_g S_g)}{\partial t} = \varphi \rho_g \frac{dS_g}{dP_c} \frac{\partial(P_g - P_l)}{\partial t} + \varphi S_g \frac{\partial \rho_g}{\partial t} \quad (6)$$

根据 van Genuchten 模型^[8], 相对渗透率可以表达为

$$k_{rl} = \sqrt{S_{el}} [1 - (1 - S_{el}^{1/m})^m]^2 \quad (7)$$

$$k_{rg} = 1 - k_{rl} \quad (8)$$

式中: m 为 van Genuchten 模型参数, S_{el} 为有效饱和度, 定义为

$$S_{el} = \frac{S_l - S_{lr}}{1 - S_{lr}} \quad (9)$$

式中: S_{lr} 为残余饱和度, 本文假定它不随温度变化。为建立有效饱和度 S_{el} 和基本未知量间的关系, 采用 van Genuchten-Mualem 模型^[8, 18]

$$S_{el} = \begin{cases} [1 + (\alpha H_c)^n]^{-m}, & H_c > 0 \\ 1, & H_c \leq 0 \end{cases} \quad (10)$$

式中: α 、 n ($m = 1 - 1/n$) 需根据试验确定; H_c 为基质吸力 P_c ($P_c = \rho_l g H_c$) 所对应的水头。

2.2.2 水蒸气质量守恒

引入水蒸气占气相的质量分数 ω_v , 水蒸气质量守恒方程可以表达为^[6]

$$\varphi \frac{\partial(\rho_g S_g \omega_v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_g \omega_v \mathbf{v}_g - \mathbf{D}_v^* \rho_g \nabla \omega_v) = \dot{m} \quad (11)$$

式中: \mathbf{D}_v^* 为多孔介质扩散张量, 可表达为^[5]

$$\mathbf{D}_v^* = \tau \varphi S_g \mathbf{D}_v \quad (12)$$

式中: \mathbf{D}_v 为水蒸气在空气中的扩散张量; τ 表征了多孔介质的迂曲度, 可以表达为

$$\tau = \frac{(\varphi S_g)^{7/3}}{\varphi^2} \quad (13)$$

同时, 引入放大因子 η 对扩散系数进行修正^[5]

$$\eta = 9.5 + 3 \frac{\theta}{\theta_s} - 8.5 \exp \left\{ - \left[\left(1 + \frac{2.6}{\sqrt{f_c}} \right) \frac{\theta}{\theta_s} \right]^4 \right\} \quad (14)$$

式中: f_c 为土中黏土的质量分数; θ 和 θ_s 分别为含

水率和饱和含水率。

2.2.3 热量守恒方程

在局部热平衡假定下, 各相的温度相同, 表征单元尺度 (REV) 下热量守恒方程^[7]为

$$(\rho c)^* \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot ((\rho c)_l \mathbf{v}_l T + (\rho c)_g \mathbf{v}_g T) - \nabla \cdot (\mathbf{k}_{eff} \nabla T) = -L \dot{m} - Q_s \quad (15)$$

式中: $(\rho c)^*$ 为质量平均后等效热容; \mathbf{k}_{eff} 为各相等效导热系数; L 为水气转化汽化热。忽略对流引起的热量变化, 土体两相渗流传热的基本控制方程为

$$\left. \begin{aligned} \varphi \rho_l \frac{dS_l}{dP_c} \frac{\partial P_c}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_l \mathbf{v}_l) &= -\dot{m} \\ \varphi \rho_g \frac{dS_g}{dP_c} \frac{\partial(P_g - P_l)}{\partial t} + \varphi S_g \frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_g \mathbf{v}_g) &= \dot{m} \\ \varphi \frac{\partial(\rho_g S_g \omega_v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_g \omega_v \mathbf{v}_g - \mathbf{D}_v^* \rho_g \nabla \omega_v) &= \dot{m} \\ (\rho c)^* \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (\mathbf{k}_{eff} \nabla T) &= -L \dot{m} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

式中: P_l 、 P_g 、 ω_v 、 T 为基本未知量。

以上控制方程为对流扩散型方程, 可采用 COMSOL Multiphysics 求解。该软件在求解偏微分方程时, 空间采用有限单元离散, 时间积分采用向后差分格式。

2.3 非瞬时平衡相变模型

在考虑水、气相变转化时可采用非瞬时平衡或瞬时平衡模型。瞬时相变平衡模型假定任意时刻水、水蒸气及空气组成的混合物中水蒸气压力总是饱和蒸气压, 即相变平衡瞬时完成。借鉴 Whitaker^[7]相关工作, 引入蒸气压 P_{vs} 与饱和度 S_l 及温度 T 相关的本构方程 $P_{vs} = f(S_l, T)$ 后即可对问题进行求解^[3-5]; 非平衡相变模型则认为, 水、气两相平衡并非瞬时完成, 使用该模型时需确定相变速率大小。Davarzani 等^[15]在对土柱体干燥试验进行数值模拟时采用非瞬时平衡相变模型, 模型引入蒸气压平衡松弛时间 t_{eq} , 考虑孔隙率和饱和度影响, 得到相变速率为

$$\dot{m} = \frac{(S_l - S_{lr}) \varphi}{t_{eq}} (\rho_{veq} - \rho_v) \quad (17)$$

式中: ρ_{veq} 为相变平衡时的饱和蒸气密度, 考虑弯液面影响时可根据 Kelvin 公式由自由水面饱和蒸气密度计算如下:

$$\rho_{\text{veq}} = \rho_{\text{vs}} e^{-H_c M_w g / RT} \quad (18)$$

式中: M_w 为水的摩尔质量; R 为气体常量; ρ_{vs} 为自由水面饱和蒸气密度, 其与温度的关系为^[12]

$$\rho_{\text{vs}} = \frac{e^{31.37 - 6014.79T^{-1} - 7.92 \times 10^{-3} T}}{10^3 T} \quad (19)$$

t_{eq} 可以通过在给定特征孔隙尺度 l_{por} 下蒸气发生扩散需要的时间近似估计为

$$t_{\text{eq}} = \frac{l_{\text{por}}^2}{D_v^*} \quad (20)$$

在文献[15]的数值模型中, 水气只发生蒸发, 液相饱和度越高, 蒸发速率越快; 但在饱和度降低时冷凝速率变慢, 这与实际不符。因为当饱和度较低时, 基质吸力较大, 水蒸气更容易液化。因此, 本文对该模型进行了修正, 基于式 (17), 提出如下考虑蒸发和冷凝时的相变模型

$$\dot{m} = \begin{cases} \frac{(S_l - S_{lr})\phi}{t_{\text{eq}}} (\rho_{\text{veq}} - \rho_v) & \rho_{\text{veq}} > \rho_v \\ \frac{(1 - S_l)\phi}{t_{\text{eq}}} (\rho_{\text{veq}} - \rho_v) & \rho_{\text{veq}} \leq \rho_v \end{cases} \quad (21)$$

式 (21) 实质是对冷凝时液化速率进行了修正, 当饱和度降低时, 冷凝速率加快, 符合实际。

2.4 初边值条件

为简便起见, 本文暂取较宽路面中心下方土体分析其中的水气运移规律, 此时可近似取一维土柱, 其顶部为路面板下方的路基土顶面, 底部取到路基土内一定深度处。

2.4.1 液气相初边值

对气相, 初始状态下气压在各个高度处均为大气压 P_{atm} , 即 $P_g|_{t=0} = P_{\text{atm}}$, 气相上边界不透水, 下边界维持 P_{atm} ; 对液相, 初始含水率全域均为 $\theta_l|_{t=0} = 10\%$, 液相的边界条件为顶部不透水, 底部恒定含水率 $\theta_l = \theta_l|_{t=0}$; 对水蒸气相, 初始状态水蒸气的质量分数取平衡状态质量分数 ω_{sat} , 即 $\omega = \omega_{\text{sat}}$, 顶部不透水, 底部维持平衡态质量分数 ω_{sat} 。

2.4.2 温度初边值

本文分析对象为路面板下一定深度的路基, 其顶部与路面板底接触。路基与路面板界面附近温度变化复杂, 需进行一定简化。温度沿深度变化实测表明, 昼夜温差影响深度不超过 30 cm ^[19]; 沙漠地区路基路面温度实测数据显示^[20], 路基顶部昼夜温差在 $5 \sim 15 \text{ }^\circ\text{C}$ 范围且与路面板厚度相关。在夏季白天, 路基顶部温度较路基底部高, 到夜晚则恰好相

反; 在冬季, 路基顶部温度始终比路基底部温度低^[20-21]。因此, 本文确定温度取值为: 在夏季, 假定模型底部温度维持在 298.15 K (即 $25 \text{ }^\circ\text{C}$) 且与全域初始温度相同, 顶部温度每天在 $20 \sim 30 \text{ }^\circ\text{C}$ 间随时间按正弦规律变化; 在冬季, 假定模型底部温度维持在 288.15 K (即 $15 \text{ }^\circ\text{C}$) 且与全域初始温度相同, 顶部温度每天在 $0 \sim 10 \text{ }^\circ\text{C}$ 间变化。夏季与冬季温度初边值条件分别表达为

$$\left. \begin{aligned} T_{\text{ini}}|_{t=0} &= 298.15 \text{ K} \\ T_{\text{bottom}} &= 298.15 \text{ K} \\ T_{\text{top}} &= 298.15 \text{ K} - 5 \text{ K} \sin\left(\frac{2\pi}{24 \times 3600} t\right) \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

$$\left. \begin{aligned} T_{\text{ini}}|_{t=0} &= 288.15 \text{ K} \\ T_{\text{bottom}} &= 288.15 \text{ K} \\ T_{\text{top}} &= 278.15 \text{ K} - 5 \text{ K} \sin\left(\frac{2\pi}{24 \times 3600} t\right) \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

模型示意图及对应的初边值条件如图 2 所示。

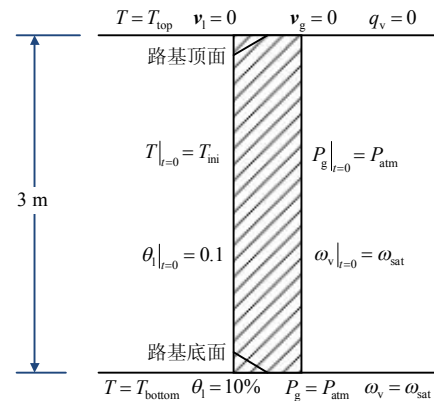


图 2 模型示意图及初边值条件
Fig.2 Schematic diagram of the numerical model with initial and boundary conditions

3 数值计算

3.1 参数取值

参数取值的合理性将决定计算结果的正确性。为了对比不同土质条件下路基含水率变化规律, van Genuchten 模型参数 α 和 n 分别取典型砂土、粉土和黏土的参数^[22], 给出的土-水特征曲线见图 3。土体导热系数与含水率的关系可以表达为^[13]

$$k_{\text{eff}}(\theta) = b_1 + b_2 \theta + b_3 \theta^{0.5} \quad (24)$$

式中: b_1 、 b_2 、 b_3 为拟合参数。不同土质水热相关参数取值参见表 1。

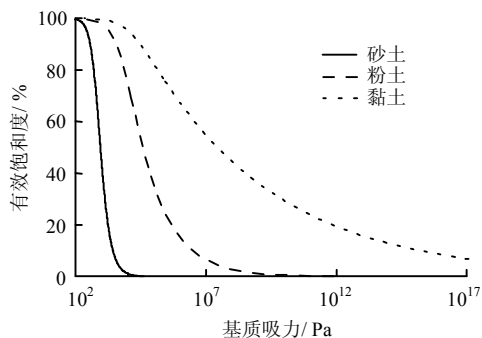


图 3 土的土-水特征曲线

Fig.3 Soil-water characteristic curves of soil sample

表 1 土体水热参数取值

Table 1 Hydraulic and thermal properties of the soils

土名	n	α / m^{-1}	$l_{\text{por}} / \text{mm}$	$k / (\text{m/s})$	b_1	b_2	b_3
砂土	2.68	14.5	1	8.25×10^{-5}	0.228	-2.406	4.909
粉土	1.37	1.6	0.01	6.94×10^{-7}	0.243	0.393	1.534
黏土	1.09	0.8	0.001	0.55×10^{-9}	-0.197	-0.932	2.521

土、水 and 气 3 相的质量热容、水的汽化热及蒸气的扩散系数等取值参考文献[23]。除特别说明外，材料参数取值如表 2 所示。

表 2 多孔多相介质材料参数

Table 2 Properties of the multi-phase porous media

$S_{\text{tr}} / \%$	φ	$\rho_s / (\text{kg/m}^3)$	$\rho_w / (\text{kg/m}^3)$	$c_s / (\text{J/(kg} \cdot \text{K)})$	$c_w / (\text{J/(kg} \cdot \text{K)})$	$L / (\text{J/kg})$	$D_{\text{va}} / (\text{m}^2/\text{s})$	$\mu_l / (\text{Pa} \cdot \text{s})$	$\mu_g / (\text{Pa} \cdot \text{s})$
10	0.4	2 650	1 000	724	4 180	$2\,260 \times 10^3$	2×10^{-5}	0.001	1.81×10^{-5}

注: S_{tr} 为残余饱和度, φ 为孔隙率, ρ_s 为多孔介质密度, ρ_w 为水的密度, c_s 为多孔介质热容, c_w 为水的热容, D_{va} 为空气中蒸气扩散系数, μ_l 为水的动力黏度, μ_g 为空气的动力黏度。

3.2 模型验证

在对道面覆盖效应进行模拟分析前, 先进行 2 个基本问题的计算, 以在一定程度上说明本文模型的合理性。

3.2.1 土中水的蒸发

取高度为 30 cm 的一维土柱, 顶部 10 cm 非饱和, 其余部分均饱和。初始时刻全域温度为 25 °C, 气压为标准大气压, 水蒸气密度为饱和蒸气密度。底部和顶部均为不透水边界, 底部不透汽, 顶部气压维持在标准大气压。现令顶部边界处水蒸气质量分数维持在 0.1%, 顶部温度维持 35 °C, 底部温度保持初始值, 计算 30 d 内各物理量的变化。图 4 为不同时刻水的有效饱和度分布情况。图 5 为整个模型内水分累计蒸发量。

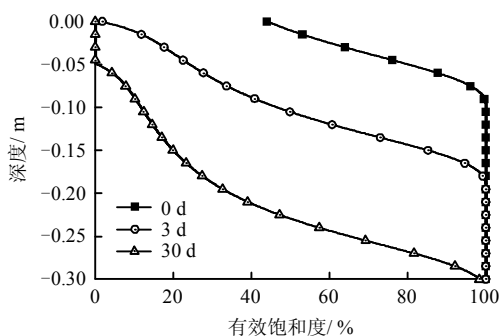


图 4 不同时刻有效饱和度分布(0、3、30 d)

Fig.4 Effective saturation profile at different times (after 0 d, 3 d and 30 d)

图 4 显示, 在蒸发过程中, 顶部的含水率不断降低, 当顶部饱和度达到残余饱和度时, 顶部下方的水分仍不断蒸发。由图 5 可见, 蒸发速率不断减

小, 这与文献[10]计算给出的规律相符。

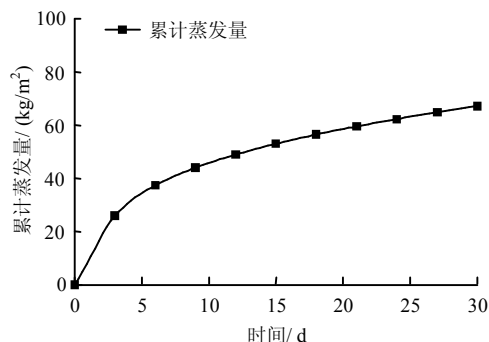


图 5 水分累计蒸发量

Fig.5 Cumulative evaporation versus time

3.2.2 温度作用下水分迁移

为从另一方面验证模型的准确性, 这里再计算一温差作用下非饱和土中水的迁移问题, 将本文模型和 Hydrus-1D 模型[22]进行对比。后者亦可应用于非饱和土质热传输问题, 但其控制方程中气压和水蒸气质量分数不是基本未知量。当不考虑气相对流和水气非瞬时平衡[10]时, 本文模型的控制方程即可退化为 Hydrus-1D 采用的形式。考虑初始体积含水率为 10%, 初始温度为 25 °C 且两端封闭的水平土柱, 计算右端降温至 10 °C 后各物理量的变化。1 d 后两模型计算的土柱含水率和温度分布的对比见图 6。

图 6 表明, 在右端降温的作用下水气向右迁移, 右端含水率增加, 离开右端一定范围内含水率降低, 计算结果合理, 且本文模型与 Hydrus-1D 模型的计算结果吻合良好。

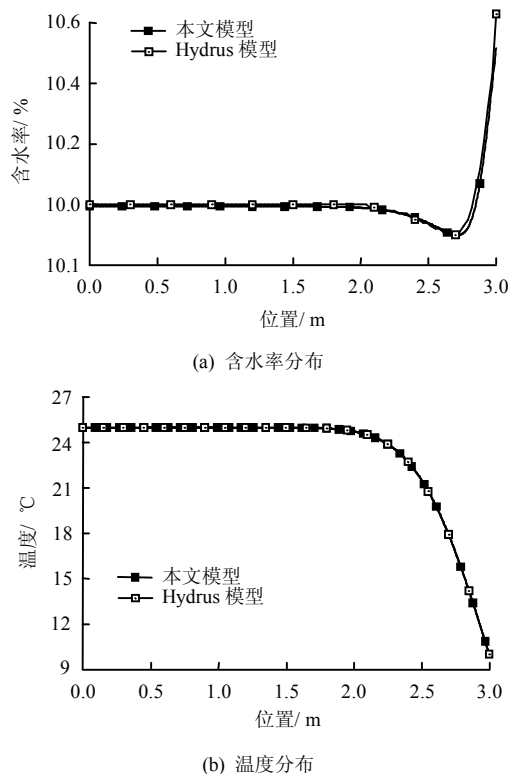


图6 含水率和温度分布对比

Fig.6 Comparison of water content and temperature profile by Hydrus model and proposed model

3.3 道面覆盖效应的模拟分析

现就图2所示3 m高土柱体进行模拟分析,土质设为粉土,考虑冬季的情况,边界条件如2.4节所述,土柱底部温度保持15℃,顶部温度每天在0~10℃间变化,计算30 d内各物理量的变化。

图7为计算给出的有效饱和度沿高度的分布。由图可见,在温差作用下,顶部约10 cm深范围内有效饱和度明显增加,顶部下方有效饱和度略微降低。这与图6显示的情况类似,也与文献[2]等指出的水分由高温区向低温区迁移的规律吻合。

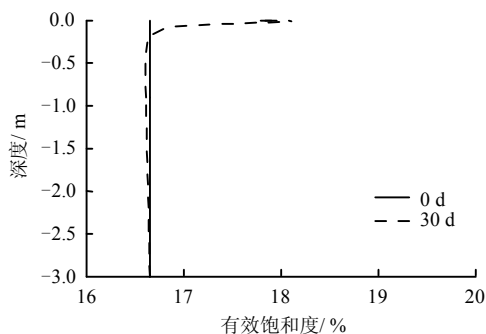


图7 有效饱和度分布曲线(0 d和30 d)

Fig.7 Effective saturation profile (after 0 d and 30 d)

图8给出了顶部10 cm范围内水的有效饱和度

随时间的变化情况。可见此处的饱和度随昼夜温度波动而波动。但由于总体上顶部平均温度低,底部温度高,顶部含水率不断增加。但随着顶部含水率的增大,顶部基质吸力减小,这又会抑制含水率的进一步增大。因此,顶部饱和度增加速度不断减缓。0~30 d内顶部有效饱和度增长率为4.3%,30 d末饱和度并未趋于稳定。增加分析时间至60 d,顶部饱和度又将增加1.4%。考虑到实测数据^[21]中冬季持续约1个月,分析时间取30 d较合理。此外,从计算结果看,1 d内因昼夜温度波动引起各量波动的幅值很小,也可近似取每天内的平均温度进行计算。

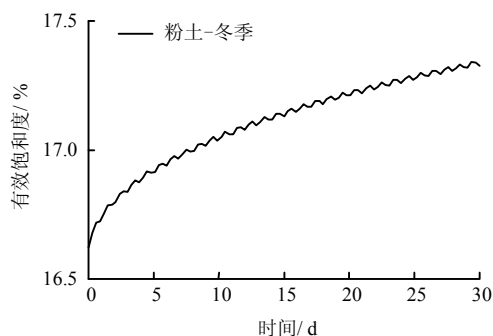


图8 顶部10 cm内有效饱和度曲线

Fig.8 Effective saturation versus time for top 10 cm

图9显示30 d时液态水和水蒸气质量流量分布对比,可见在温度梯度作用下,水蒸气质量通量较液态水质量通量大,水蒸气的迁移不可忽略。

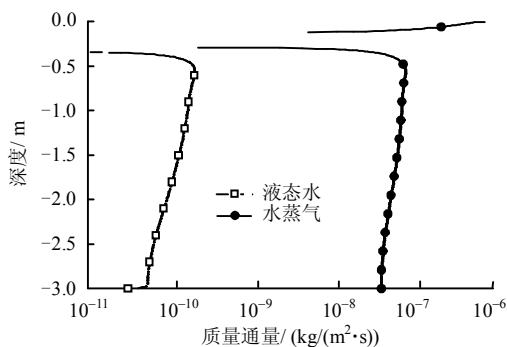


图9 水和水蒸气质量通量沿高度分布(30 d后)

Fig.9 Water and vapor flux profile (after 30 d)

从粉土土柱在冬季温度作用下各物理量变化情况出发,不难得出水气覆盖效应形成的机制:土中水蒸气受温差作用向上迁移且聚集于路基顶部,由于路基顶部温度较低,其允许的饱和蒸气密度较低而使水蒸气液化,从而增大顶部含水率;随着低温区饱和度增加,基质吸力降低,水又从基质吸力小的区域向基质吸力大的区域迁移。两者的共同作用使顶部含水率增速放缓,并最终趋于稳态。

3.4 影响因素分析

3.4.1 土质对覆盖效应的影响

这里分别考虑土质为砂土、粉土和黏土时,计算在冬季温度作用下土柱顶部含水率的变化。图 10 给出 3 种不同土质土柱顶部 10 cm 范围内含水率随时间变化的曲线。

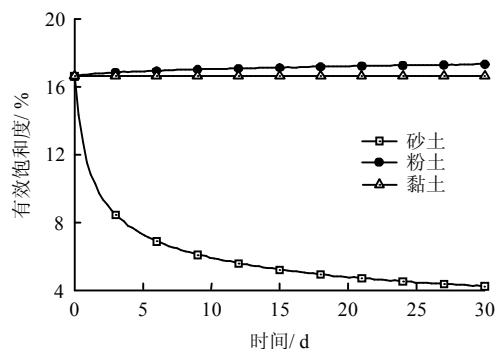


图 10 不同土质下顶部 10 cm 内平均含水率的时程变化
Fig.10 Average water content versus time for top 10 cm in different soils

从图 10 可见,当保持其他条件相同时,粉土含水率增加比砂土和黏土含水率增加更明显。当土质为砂土时,液态水向下渗流占主导,顶部含水率甚至不断降低;当土质为黏土时,由于基质吸力很大,土中空气湿度较低,水分在温度作用下迁移并不明显。从此也可以得出初步结论,即粉土路基较砂土或黏土路基更容易发生覆盖效应。

3.4.2 不同季节覆盖效应的差异

由上述分析可见,顶部较深层温度低是非饱和土层中水分向上迁移的主要动力,由此可以预见,冬季和夏季道面覆盖效应会有显著差异。图 11 分别给出考虑冬季和夏季温度情况,计算得到的粉土土柱顶部有效饱和度在 30 d 内的变化曲线,由图可见,在夏季道面覆盖下的路基顶部含水率反而会减小,因此,在夏季路基土体不易发生道面覆盖效应。

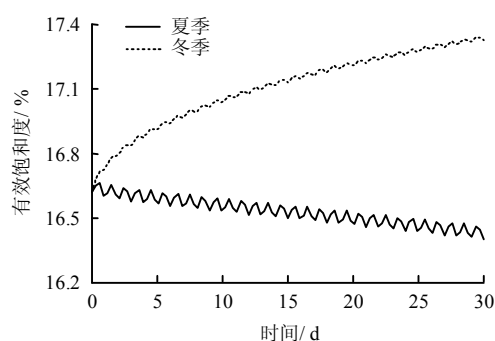


图 11 不同季节下顶部有效饱和度变化
Fig.11 Effective saturation versus time for top 10 cm for winter and summer

4 结 论

(1) 在路基顶部降温过程中,水气向上迁移,顶部有效饱和度增加。上下温差是路基中发生覆盖效应的重要因素,而冬季因路基顶部温度低于冰点,覆盖效应才明显。

(2) 土质差异对覆盖效应同样有较大影响。计算表明,粉土路基更容易发生道面覆盖效应。

(3) 考虑温度变化引起的非饱和土中的水气迁移时,水蒸气的迁移不可忽略。

道面覆盖效应的模拟是一较为复杂的多物理场耦合问题,本文仅针对此问题的初步尝试,定性来看结果较为合理,但定量模拟及与实测对比方面还需进一步开展工作。同时,本文模型尚未考虑在冬季温度更低以致路基顶部孔隙水结冰对覆盖效应的影响,这部分工作还有待完善。

致谢: 在本文研究过程中,北京航空航天大学姚仰平教授和中南大学盛岱超教授与笔者进行过不少有益的探讨,在此特致谢意!

参 考 文 献

- [1] 杨三强,刘涛,马淑红,等.干旱荒漠区路面覆盖效应评价指标与评价模型研究[J].干旱区资源与环境,2013,27(5): 76—82.
YANG San-qiang, LIU Tao, MA Shu-hong, et al. The evaluation index and evaluation model of pavement coverage for arid desert area[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2013, 27(5): 76—82.
- [2] 李强,姚仰平,韩黎明,等.土体的“锅盖效应”[J].工业建筑,2014,44(2): 69—71.
LI Qiang, YAO Yang-ping, HAN Li-ming, et al. Pot-cover effect of soil[J]. *Industrial Construction*, 2014, 44(2): 69—71.
- [3] PHILP John, de VRIES D A. Moisture movement in porous materials under temperature gradients[J]. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 1957, 38(2): 222-232.
- [4] SAKAI Masaru, TORIDE Nobuo, ŠIMŮNEK Jiří. Water and vapor movement with condensation and evaporation in a sandy column[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2009, 73(3): 707—717.
- [5] SAITO Hirota, ŠIMŮNEK Jiří, MOHANTY Binayak. Numerical analysis of coupled water, vapor, and heat

- transport in the vadose zone[J]. **Vadose Zone Journal**, 2006, 5(2): 784—800.
- [6] BEAR Jacob. Dynamics of fluids in porous media[M]. New York: Elsevier, 1972.
- [7] WHITAKER Stephen. Simultaneous heat, mass, and momentum transfer in porous media: a theory of drying[J]. **Advances in Heat Transfer**, 1977, 13: 119—203.
- [8] VAN GENUCHTEN Martinus. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. **Soil Science Society of America Journal**, 1980, 44(5): 892—898.
- [9] 孔郁斐, 宋二祥. 由土体级配近似确定土-水特征曲线的一种方法[J]. **岩土力学**, 2015, 36(9): 2487—2493.
KONG Yu-fei, SONG Er-xiang. A method for estimating the soil-water characteristic curve from the grain-size distribution[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(9): 2487—2493.
- [10] SMITS Kathleen, CIHAN Abdullah, SAKAKI Toshihiro, et al. Evaporation from soils under thermal boundary conditions: Experimental and modeling investigation to compare equilibrium-and nonequilibrium-based approaches[J]. **Water Resources Research**, 2011, 47(5): 05540.
- [11] SMITS Kathleen, SAKAKI Toshihiro, LIMSUWAT Anuchit, et al. Thermal conductivity of sands under varying moisture and porosity in drainage-wetting cycles[J]. **Vadose Zone Journal**, 2010, 9(1): 172—180.
- [12] CAMPBELL Gaylon S. Soil physics with BASIC: transport models for soil-plant systems[M]. Netherlands: Elsevier, 1985.
- [13] CHUNG Sang-Ok, HORTON Robert. Soil heat and water flow with a partial surface mulch[J]. **Water Resources Research**, 1987, 23(12): 2175—2186.
- [14] HANNOT Stephan David Arjan. Modeling strategies for electro-mechanical Microsystems with uncertainty quantification[Ph. D. thesis D]. Delft: Delft University of Technology, 2010.
- [15] DAVARZANI Hossein, SMITS Kathleen, TOLENE Ryan, et al. Study of the effect of wind speed on evaporation from soil through integrated modeling of the atmospheric boundary layer and shallow subsurface[J]. **Water Resources Research**, 2014, 50(1): 661—680.
- [16] SÜLI Endre, MAYERS David. An introduction to numerical analysis[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
- [17] NIMMO J R, MILLER E E. The temperature dependence of isothermal moisture vs. potential characteristics of soils[J]. **Soil Science Society of America Journal**, 1986, 50(5): 1105—1113.
- [18] MUALEM Yechezkel. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media[J]. **Water Resources Research**, 1976, 12(3): 513—522.
- [19] 张辉, 王铁行, 罗扬, 等. 浅层黄土冬季温度场的变化规律研究[J]. **西安建筑科技大学学报(自然科学版)**, 2015, 47(2): 245—249.
ZHANG Hui, WANG Tie-hang, LUO Yang, et al. Study on temperature field variation rule of shallow loess in winter[J]. **Journal of Xi'an University of Architecture and Technology(Natural Science Edition)**, 2015, 47(2): 245—249.
- [20] 宋存牛. 沙漠地区路基路面温度场暨路面工作环境温度指标研究[D]. 西安: 长安大学, 2006.
SONG Cun-niu. Research on temperature field of embankment and pavement and temperature in index of pavement working environment[D]. Xi'an: Chang'an University, 2006.
- [21] DAWSON Andrew. Water in road structures: movement, drainage & effects[M]. Netherlands: Springer, 2008.
- [22] ŠIMŮNEK Jiří, HUANG Kangle, VAN GENUCHTEN Martinus. The HYDRUS-ET software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat and multiple solutes in variably-saturated media[M]. Bratislava: Institute of Hydrology of the Slovak Academy of Sciences, 1997.
- [23] CAMPBELL Gaylon S, NORMAN John. An introduction to environmental biophysics[M]. New York: Springer-Verlag, 2012.