

文章编号: 1006-2467(2011)05-0772-05

大气作用下非饱和土路基湿度及影响因素分析

刘杰, 姚海林, 胡梦玲, 卢正, 陈风光

(中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘要: 基于水、蒸汽的流动方程及热能的扩散方程建立路基模型, 分析了大气作用下路基湿度变化规律, 通过改变相关的气相参数及土壤特性参数, 研究了不同气候环境影响下的非饱和土路基湿度变化规律. 结果表明: 大气对非饱和土路基湿度的影响显著, 但其影响的深度范围有限; 太阳辐射量对路基湿度的影响最大, 相对湿度次之; 此外, 路基填土的渗透系数及土水特性对路基的湿度影响较大, 路基填土的初始含水量越高, 则蒸发强度越大, 路基的失水程度越高; 在长时间小雨的降雨模式下, 雨水更容易侵入路基, 从而改变路基湿度.

关键词: 热流方程; 湿热耦合; 太阳辐射量; 湿度; 降雨模式

中图分类号: U 416.1 **文献标志码:** A

Moisture Changes and Influencing Factors of Unsaturated Soil Subgrade under Atmospheric

LIU Jie, YAO Hai-lin, HU Meng-ling, LU Zheng, CHEN Feng-guang

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Science, Wuhan 430071, China)

Abstract: Based on the water, steam flow equation and heat diffusion equation, a subgrade model was established and the moisture change rule of subgrade under the action of the atmosphere was studied. By changing the atmospheric phase parameters and the soil characteristics parameters, the unsaturated roadbed moisture change rule under the influence of different climate environment was studied. The results show that the effect of atmosphere on the unsaturated soil subgrade is significant, and the depth of the impact range is limited, the subgrade moisture change caused by solar radiation is the largest, the relative moisture is the second largest; and the influence of the permeability coefficient and soil water characteristics of the subgrade itself on the filled soil moisture change is very large; the higher the initial water content of the filled soil subgrade, and the bigger the evaporation strength, the higher the subgrade dehydrate degree; the rainwater will easier invade the subgrade, and the moisture of the subgrade will be changed at long time and small rain rainfall pattern.

Key words: heat diffusion equation; hot and moisture coupling; solar radiation; moisture; rainfall pattern

大气蒸发是大气作用的主要表现形式, 是土壤水分运动过程中的一种特殊阶段. 季节性的温度变

化可能引起气流和水流的变化, 从而造成土体内部湿度的变化. 陈建斌等^[1]通过建立大气与非饱和土

收稿日期: 2010-11-05

作者简介: 刘杰(1983-), 女, 河南省信阳市人, 博士生. 目前主要从事路基稳定性及水分迁移规律的研究.

E-mail: chouchou0205@sohu.com. 姚海林(联系人): 男, 研究员, 博士生导师, E-mail: hlyao@whrsm.ac.cn.

相互作用模型, 对长期大气作用下膨胀土边坡的动态响应进行有限元数值模拟, 并用现场实测结果类比加以验证; 杨洋^[2] 分析了大气作用下含水量、渗透系数及水蒸气扩散能力等因素对膨胀土路基蒸发强度的影响; 杨果林等^[3] 通过室内模型试验, 分别采用淋浴头和日光灯模拟降雨和蒸发作用, 研究了大气干/湿循环作用对非饱和土路基变形及其稳定性的影响; 陈守义^[4] 将非饱和土壤水动力学原理应用于计算入渗及蒸发条件下斜坡土体瞬态含水率的分布; 王政友^[5] 对土壤水分蒸发的影响因素也进行了分析。

根据现场监测及气象站所获大气影响下土壤水分的变化数据^[6-8], 大气作用对非饱和土的湿度影响很大。本文基于非饱和土湿/热耦合的非等温渗流方程, 通过引入气候环境参数而进行大气作用下非饱和土路基湿度变化的响应分析, 并通过改变气候参数, 对不同气候环境下路基湿度的影响因素进行敏感性分析。

1 控制方程

1.1 理论方程

路基与大气中的水依靠液态水的流动和水蒸气的扩散作用而进行交换, 将 2 种流动相结合, 分别考虑水分扩散和平流过程中产生水蒸发扩散^[9] 的二维流动方程及非饱和土的热传导方程为:

$$\frac{1}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial x} \left(D_v \frac{\partial p_v}{\partial x} \right) + \frac{1}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial y} \left(D_v \frac{\partial p_v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ k_{w,x} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\Psi}{\rho g} + y \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ k_{w,y} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\Psi}{\rho g} + y \right) \right\} + Q_w = \frac{\partial \theta_w}{\partial t} \quad (1)$$

$$L_v \frac{\partial}{\partial x} \left(D_v \frac{\partial p_v}{\partial x} \right) + L_v \frac{\partial}{\partial y} \left(D_v \frac{\partial p_v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + W_t = \zeta \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

式中: k_w 为液相的渗透系数; p_v 为水蒸气压力; Ψ 为基质吸力; ρ_w 为水的密度; Q_w 为边界流量; W_t 为边界热量; L_v 为水的潜化热; ζ 为土体的体积比热; t 为时间; λ 为土体的热导率; D_v 为水蒸气的扩散系数; θ_w 为的路基湿度; g 为重力加速度。

1.2 边界条件

1.2.1 蒸发边界条件 非饱和土体表面实际蒸发率的表达式为^[9]

$$E_v = \left[N + 0.35 \eta \bar{p}_v^a (1 + 0.146 v_w) \times \left(RH_a^{-1} - RH_r (\Psi)^{-1} \right) \right] \left[\Gamma + \frac{\eta}{RH_r (\Psi)} \right] \quad (3)$$

式中: Γ 为饱和蒸汽压与温度关系曲线的斜率; N 为土体表面的净辐射量; η 为湿度常数; \bar{p}_v^a 为蒸汽面上方空气中的水蒸气压力; RH_a 、 $RH_r (\Psi)$ 分别为空气的相对湿度和地表相对湿度; v_w 为风速。

1.2.2 温度边界条件 Wilson 等^[9] 提出以下大气温度与地表温度的换算公式:

$$T_s = T_a + \frac{N_n - E_v}{0.35 \eta (1 + 0.146 v_w)} \quad (4)$$

式中: T_s 为地表土体的温度; T_a 为大气温度; N_n 为总净辐射量; E_v 为非饱和土表面的实际蒸发率。

1.2.3 水流量边界条件 水流量边界可看作 2 个阶段: ① 供水控制阶段, 地表的净入渗量为土体表面的流量; ② 土壤入渗能力控制阶段, 地表的净入量由总的降雨量与径流量之差来确定。

2 算例分析

2.1 模型建立及计算参数选取

所建立的二维路基模型如图 1 所示, 同时, 根据文献[10]中所获某地区夏季的平均气候条件, 引入 Williams 等^[11] 所建黏土在 Van Genuchten 模型中的参数, 设定路基模型的初始含水量(湿度)为 $\theta_0 = 22\%$ 。所获气象环境及土体特性的关键计算参数分别为: $RH = 80\%$; $v_w = 1.5 \text{ m/s}$; 平均气温 $32.5 \text{ }^\circ\text{C}$; $N = 12.9 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$; 地层温度 $20 \text{ }^\circ\text{C}$; 饱和渗透系数 $1.25 \times 10^{-9} \text{ m/s}$; 比热容 $0.71 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{ }^\circ\text{C})$; $\lambda = 285.12 \text{ kJ}/(\text{d} \cdot \text{m} \cdot \text{ }^\circ\text{C})$ 。填土的土水特征曲线见图 2。图中, θ 为黏土湿度。

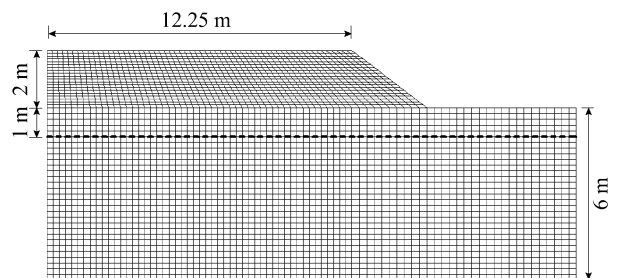


图 1 路基模型示意图

Fig. 1 Subgrade model

2.2 计算结果与分析

图 3 所示为蒸发条件下路基以下不同深度 h 处的瞬态湿度变化情况。可见, 在蒸发第 1 天, 大气作用的影响范围已经到达地表以下 0.2 m 的位置, 地表处的湿度在 1d 内急速下降 14.3% ; 随后, 大气作

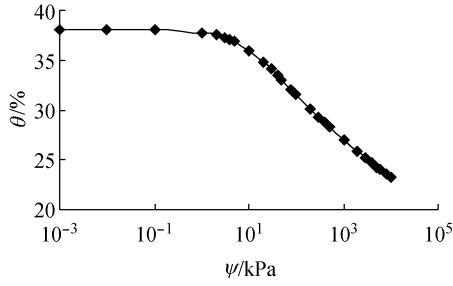


图 2 黏土的土水特征曲线

Fig. 2 Soil water characteristic curve of clay

用的影响深度及范围不断扩大,但蒸发强度逐渐减弱,地表处的蒸发强度也开始降低,路基失水的速度减缓.深度越深,湿度变化的速度和大小则越小,孔隙水压力的变化量越小,到达路基顶面以下 0.7 m 位置处的湿度不再改变.

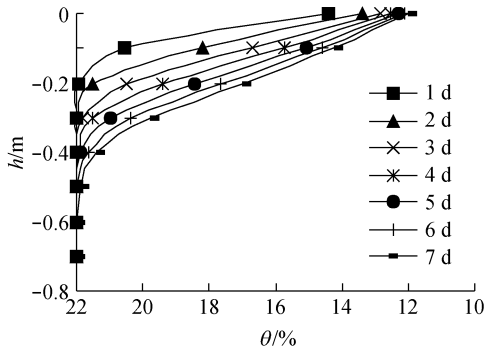


图 3 蒸发条件下路基以下不同深度的瞬态湿度变化情况

Fig. 3 Transient changes of subgrade moisture at different depths in evaporation

3 蒸发作用下路基湿度的敏感性分析

3.1 昼夜更替影响下的路基湿度变化规律

图4所示为非稳定蒸发条件下路基以下不同深

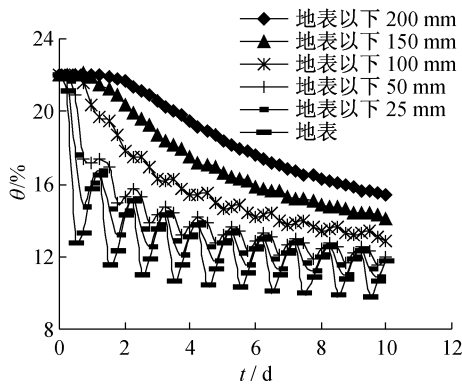


图 4 非稳定蒸发条件下路基以下不同深度的瞬态湿度变化情况

Fig. 4 Transient changes of pore water pressure of subgrade at different depths in non-steady evaporation

度处的瞬态湿度变化情况.可见:随着昼夜气象环境的变化,路基内部土体的蒸发强度呈现出递减的正弦波变化规律;随着深度加深,到达路基顶面以下 0.2 m 处时,非稳定蒸发与稳定蒸发(即不考虑昼夜更替影响的蒸发)之间已经没有差别,表明非稳定蒸发的影响范围很小,仅限于地表及以下较浅的地层,而稳定蒸发获得的结果可视为日变化的平均值,因此,可以采用不考虑昼夜更替的稳定蒸发来表示实际的蒸发情况.

3.2 相对湿度对路基湿度的影响

图5所示为相对湿度对路基以下不同深度处的湿度影响.由图5可以看出,在蒸发初期,不同相对湿度时,地表以下不同位置的湿度差别很大.相对湿度越小,湿度越小,蒸发强度越大,但增大的幅度较小.

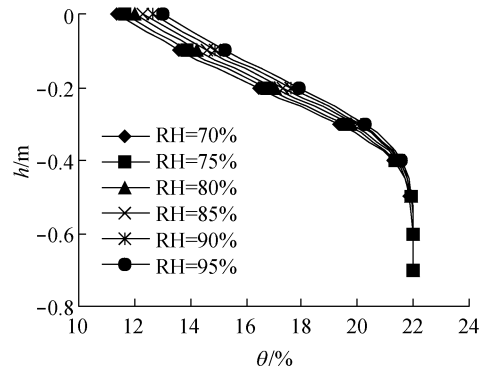


图 5 相对湿度对路基以下不同深度处湿度的影响

Fig. 5 The influence of relative moistureity on the subgrade moisture at different depths

3.3 风速和太阳辐射量对路基湿度的影响

图6所示为风速对路基以下不同深度处湿度的影响.可以看出,由于风速较大时的路基土体表面温度降幅较快,蒸发强度减弱,所以,土体的湿度并不是呈现出风速越大而湿度越小的状态,而是风速越大,路基表面的土体湿度降低的速度越慢.

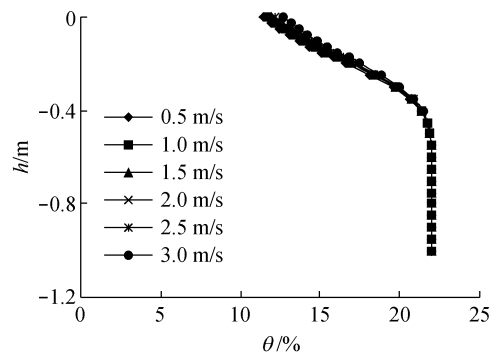


图 6 风速对路基以下不同深度处湿度的影响

Fig. 6 The influence of wind speed on the subgrade moisture at different depths

图 7 所示为太阳辐射量对路基以下不同深度处湿度的影响. 可见, 随着路基以下深度的增加, 大气影响的深度和范围逐渐扩大, 到达路基以下 0.7 m 的位置, 路基湿度不再变化.

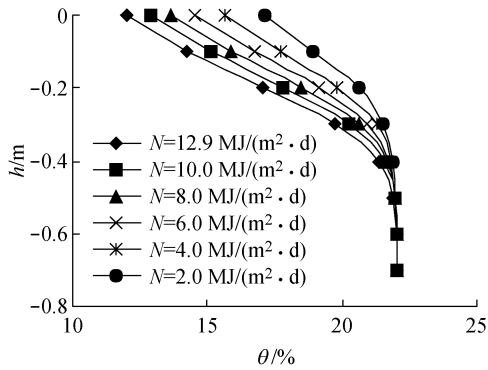


图 7 太阳辐射对路基以下不同深度处湿度的影响
Fig. 7 The influence of solar radiation on the subgrade moisture at different depths

3.4 大气温度和渗透系数对路基湿度的影响

图 8 所示为大气温度对路基以下不同深度处湿度的影响. 可以看出, 其对于路基土体水分的蒸发作用不明显, 但随着大气温度不断升高, 其湿度的变化趋势仍呈现出路基蒸发作用越强烈、路基湿度降幅越快的趋势.

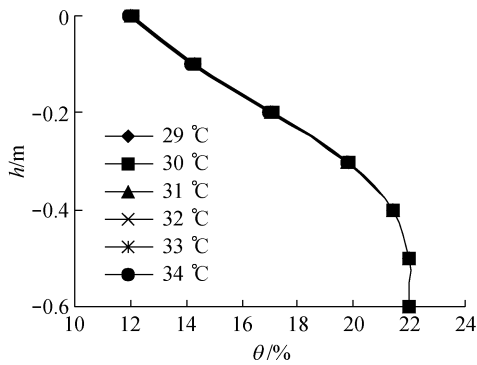


图 8 大气温度对路基以下不同深度处湿度的影响
Fig. 8 The influence of air temperature on the subgrade moisture at different depths

图 9 所示为渗透系数对路基以下不同深度处湿度的影响. 可见: 在较浅的土层中, 当渗透系数较低时, 由于供水能力较弱, 路基深层的水还来不及为浅土层供水, 土体蒸发作用已经很强烈, 因而路基表层土体脱水速度比渗透系数较高的土体快; 在较深的土层中, 由于表层土体吸力增大, 渗透系数较高的土体, 在吸力作用下向上供水的趋势较强烈, 蒸发强度更大, 因而在土层较深的位置, 渗透系数较高的土体的湿度小于渗透系数较低的土体.

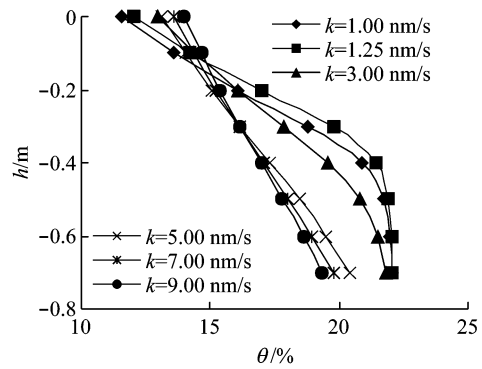


图 9 渗透系数对路基以下不同深度处湿度的影响
Fig. 9 The influence of permeability on the subgrade moisture at different depths

3.5 初始含水量和降雨模式对路基湿度的影响

图 10 所示为初始含水量对路基以下不同深度处湿度的影响. 由图可见, 在蒸发初期, 蒸发强度与初始含水量成正比关系, 但由于初始含水量的基数较大, 因而初始含水量较大的路基地表含水量依然比初始含水量较低的路基高. 随着蒸发时间的增加, 不同初始含水量时的路基, 其路基表面湿度之间的差距不再明显. 路基初始湿度越大, 蒸发作用越强烈, 路基的湿度变化越大.

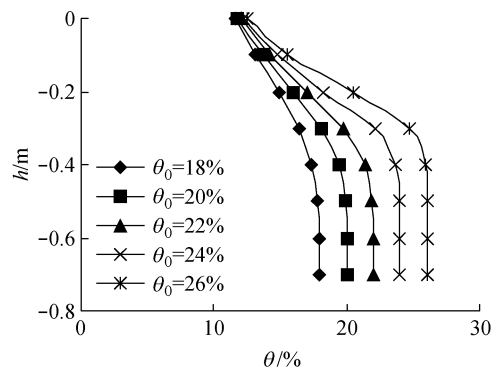


图 10 初始含水量对路基以下不同深度处湿度的影响
Fig. 10 The influence of initial water content on the subgrade moisture at different depths

建立暴雨、大雨、中雨及小雨 4 种降雨工况, 降雨强度分别为 60, 30, 15, 8 mm/d. 图 11 所示为降雨与蒸发后路基以下深度处瞬态湿度的变化情况. 可见, 在降雨总量相同的情况下, 小雨模式对路基湿度的影响最大, 而且路基湿度随着雨量的增大而减小. 因为小雨模式持续时间最长, 雨水向下渗流较多, 降雨后, 蒸发作用随着雨量的减小而有所增强, 但由于降雨后的初始含水量较高, 因而路基湿度在蒸发 3 d 后依然呈现出雨量越小而路基湿度反而较大的状态.

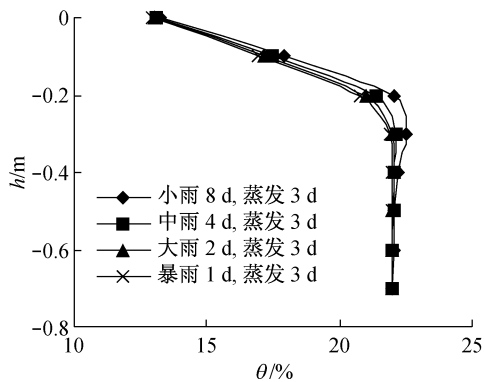


图 11 降雨与蒸发后路基以下不同深度处瞬态湿度的变化情况

Fig. 11 Transient changes of subgrade moisture after rain-evaporation

4 结论

(1) 大气对非饱和土路基的作用显著,但其影响范围有限。

(2) 在太阳辐射量不变的情况下,大气温度的改变对路基蒸发量及湿度的影响不大.随着时间推移,风速越大,路基表面的温度降幅越快,但其蒸发作用反而有所减弱。

(3) 随着路基填土的渗透系数增大,土壤的蒸发作用增强,路基湿度的变化显著;路基填土的初始含水量越高,蒸发强度越大,路基失水程度则越高。

(4) 在相同的降雨量情况下,长时间小雨量的降雨模型更容易使雨水侵入路基,并引起路基湿度的改变,在相同蒸发时间内的蒸发量也较高。

参考文献:

- [1] 陈建斌,孔令伟,赵艳林,等. 大气作用下膨胀土边坡的动态响应数值模拟[J]. 水力学报, 2007, 38(6): 674-682.
CHEN Jian-bin, KONG Ling-wei, ZHAO Yan-lin, et al. Numerical simulation of dynamic response of expansive slope to atmospheric conditions[J]. *Shuili Xuebao* 2007, 38(6): 674-682.
- [2] 杨洋. 蒸发条件下路基对气候变化的响应模型及影响因素分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(5): 1209-1220.
YANG Yang. Model of subgrade soil responding to change of atmosphere under evaporation and its influential factors[J]. *Rock and Soil Mechanics* 2009, 30(5): 1209-1220.
- [3] 杨果林,刘义虎. 不同气候条件膨胀土路堤土压力的变化规律试验研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(8): 948-955.
YANG Guo-lin, LIU Yi-hu. Study on earth pressures in expansive soil roadbed under weather influence[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering* 2005, 27(8): 948-955.
- [4] 陈守义. 考虑入渗和蒸发影响的土坡稳定性分析方法[J]. 岩土力学, 1997, 18(2): 8-12.
CHEN Shou-yi. A method of stability analysis taken effects of infiltration and evaporation into consideration for soil slopes[J]. *Rock and Soil Mechanics* 1997, 18(2): 8-12.
- [5] 王政友. 土壤水分蒸发的影响因素分析[J]. 山西水利, 2003(2): 26-28.
WANG Zheng-you. Effect factors analysis of soil moisture evaporation[J]. *Shanxi Water Resources* 2003(2): 26-28.
- [6] 陈建斌,孔令伟. 非饱和土的蒸发效应与影响因素分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(1): 36-40.
CHEN Jian-bin, KONG Ling-wei. Evaporation effect in unsaturated soil and its influential factors[J]. *Rock and Soil Mechanics* 2007, 28(1): 36-40.
- [7] 陈建斌. 大气作用下膨胀土边坡的响应试验与灾变机理研究[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2006.
- [8] 高彦斌,崔玉军. 法国鲁昂试验路堤与大气相互作用数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增1): 3079-3085.
GAO Yan-bin, CUI Yu-jun. Numerical simulation of interaction between atmosphere and experimental embankment in rouen, france[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering* 2007, 26(Sup. 1): 3079-3085.
- [9] Wilson G W, Fredlund D G, Barbour S L. Coupled soil-atmosphere modeling for soil evaporation[J]. *Can Geotech J* 1994, 31(2): 151-161.
- [10] GB50176-93, 民用建筑热工设计规程[S].
- [11] Williams J R, Ying O. Estimation of infiltration rate in vadose zone: Application of selected mathematical models[M]. Washington: Washington Environmental Protection Agency, 1998.