

文章编号: 1000-7598 (2009) 05-1209-07

蒸发条件下路基对气候变化的 响应模型及影响因素分析

杨 洋, 姚海林, 卢 正

(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, 武汉 430071)

摘 要: 以受大气影响下的公路路基为研究对象, 建立了蒸发条件下路基对气候变化的响应模型, 该模型考虑了温度-水-应力的耦合作用, 采用非饱和土实际蒸发量作为边界条件。采用该模型对大气蒸发条件下南宁某公路路基的蒸发过程进行了模拟分析, 结果表明, 用实际蒸发量作为边界条件的热-水-应力模型可以较好地模拟大气在蒸发条件下路基的响应过程。在蒸发过程中, 水蒸气的扩散对路基的蒸发量和含水率的影响较大。通过用正弦波描述昼夜蒸发强度的变化, 研究了天气的周期变化对蒸发过程的影响, 可以看出, 天气周期变化对表层影响很大, 但影响的深度有限。天气周期变化影响下的表层含水率并不是单调减小, 而是随着蒸发强度的变化有一个干湿过程。

关 键 词: 数值模拟; 大气蒸发; 热-水-应力耦合; 水蒸气扩散

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

Model of subgrade soil responding to change of atmosphere under evaporation and its influential factors

YANG Yang, YAO Hai-lin, LU Zheng

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

Abstract: Based on the equations of coupled thermo-fluid-mechanics, a model of subgrade soil responding to the change of atmosphere is established with the boundaries of actual evaporation. The influence of climatic evaporation on a certain subgrade soil is analyzed by the model. It is shown that the behavior of subgrade soil can be perfectly modeled by the equation of coupled thermo-hydro-mechanics with the formulation considering actual evaporation. The water vapor diffusion is very important to evaporation and volumetric water content under the condition of evaporation. By studying the influence of the periodic change of weather on the subgrade soil by simulating the difference of evaporation with sine wave, it has an important influence on surface layer. There is a desorption-absorption cycle of moisture of surface layer with the periodic change of evaporation.

Key words: numerical simulation; evaporation; thermo-hydro-mechanical coupling; water vapor diffusion

1 引 言

路基填土在经过压实后处于非饱和状态, 非饱和土的含水率对其力学特性有着重要的影响。因此, 正确预测填土内含水率状态的变化对于其变形和稳定性分析都有着重要的实际工程意义。非饱和状态的路堤含水率变化主要是受大气降雨和蒸发的影响, 降雨入渗使含水率增加, 蒸发使含水率减少。大气蒸发在农业、土壤和水利领域上应用比较广泛, 也有不少研究学者将其应用到岩土工程中。《公路

路基手册》中提到公路路基在设计时要考虑路基的温度和含水率的情况, 路基的水温情况受气候的影响很大, 如气温、降水、湿度、蒸发量、风向和风力等。Thomas 等^[1]采用一维 Richard 水分运动方程模拟了在气候变化下土体脱湿变干行为。之后 Thomas 等^[2-3]采用非饱和土力学流固耦合理论, 分析了土体湿度、变形的季节性变化规律, 计算模型中蒸发边界条件均直接取自气象观测所得的潜在蒸发量。然而, 土壤蒸发是一个涉及到土体热湿耦合条件下水分迁移和大气多气象参数的复杂过程, 是

收稿日期: 2008-05-23

基金项目: 交通部西部交通建设科技项目 (No. 200531849305)。

第一作者简介: 杨洋, 男, 1980 年生, 博士, 主要从事非饱和土方面的研究。E-mail: yangy2002dell@163.com

大气和土壤相互作用的结果,简单地采取气象观测蒸发量或是采取经验性参数来考虑蒸发效应与事实是不吻合的。Wilson 等^[4]建立了非饱和土中热流-水流-蒸汽流耦合方程,并对室内砂样干燥试验进行了数值模拟;Blight^[5]系统地阐述了土与大气相互作用的概念并将水体平衡、能量平衡的分析方法应用于岩土工程分析中;卢再华^[6]对膨胀土边坡进行了土与大气相互作用的数值模拟;Cui 等^[7]采用 Wilson 提出的模型对法国某试验现场非饱和土中的含水率和温度变化进行了数值模拟;陈建斌等^[8-9]重点分析了在气候等外界因素对非饱和土的蒸发量的影响因素;贺再球^[10]研究了非饱和土气态水迁移规律及耦合计算公式与液态水的混合迁移情况。在研究中考虑了实际的气候边界条件,但计算模型采用的相对简化的温度和湿度的模型,对外界气象因素研究得比较多,对于天气的周期变化对土的影响深度以及水蒸气扩散在蒸发中的作用研究得很少。

针对在大气影响下公路路基,基于考虑水蒸气在内的温度-水-应力耦合控制方程,建立了蒸发条件下路基对气候变化的响应模型,采用非饱和土实际蒸发量作为边界条件,对南宁快速环道高速公路路基进行蒸发模拟,重点对水蒸气扩散在蒸发中的作用以及昼夜蒸发强度的周期变化对蒸发过程及深度的影响进行了模拟分析。

2 控制方程

2.1 应力控制方程

在饱和-非饱和的岩土体中,总应力增量 $d\sigma$ 和有效应力增量 $d\sigma'$ 可分别用增量形式表示为

$$d\sigma = d\sigma' - \alpha m d p \tag{1}$$

$$d\sigma' = D_T (d\varepsilon - d\varepsilon_T) \tag{2}$$

式中: D_T 为切线弹塑性模量矩阵; $d\varepsilon$ 为总应变增量; $d\varepsilon_T$ 为温度引起的应变增量, $d\varepsilon_T = m \frac{\beta_s}{3} dT$; m 为法向应力单位列阵; β_s 为固体颗粒的热膨胀系数; K_s 为固体颗粒的体积模量; p 为孔隙中气体和液体两种流体的平均压力,且 $p = S_w p_w$; S_w 为孔隙水饱和度; p_w 为孔隙水压力; α 为 Biot 系数。

根据虚功原理,增量型的应力平衡方程为

$$\int_{\Omega} \delta \varepsilon^T d\sigma - \int_{\Omega} \delta u^T db d\Omega - \int_{\Gamma} \delta u^T d\hat{t} d\Gamma = 0 \tag{3}$$

式中: $d\sigma$ 为总应力增量; db 、 $d\hat{t}$ 分别为体积力和面力增量; $\delta \varepsilon$ 、 δu 分别为虚应变和虚位移。

将式(1)、(2)代入式(3)整理,可得增量型平衡方程为

$$\int_{\Omega} \delta \varepsilon^T D_T \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} d\Omega - \int_{\Omega} \delta \varepsilon^T \alpha m \frac{\partial p}{\partial t} d\Omega - \int_{\Omega} \delta \varepsilon^T D_T m \frac{\beta_s}{3} \frac{\partial T}{\partial t} d\Omega - \frac{d\hat{f}}{dt} = 0 \tag{4}$$

其中:

$$d\hat{f} = \int_{\Omega} \delta u^T db d\Omega - \int_{\Gamma} \delta u^T d\hat{t} d\Gamma \tag{5}$$

2.2 流体连续方程

土-大气相互作用主要体现在二者之间水体和能量(热量)之间的交换,而路堤-大气的水体交换通过液态水流动和水蒸气流动两种方式来实现。

在孔隙介质中,水的饱和度是毛细管压力以及温度的函数,有:

$$\left. \begin{aligned} S_w &= S_w(p_c, T) \\ p_c &= p_a - p_w \end{aligned} \right\} \tag{6}$$

式中: p_c 为毛细管压力,即基质吸力。假设孔隙气体连通,气体方程自动满足,则 $p_c = -p_w$ 。

根据质量守恒原理,考虑了水蒸气的影响,经过推导,可以得出水蒸气和液态水的连续性方程:

$$\begin{aligned} & [(1-S_w)\rho_{gw} + S_w\rho_w] \dot{u}_{i,i} + \left[n(1-S_w) \left(R_h \frac{\partial \rho_{gws}}{\partial T} + \rho_{gws} \frac{\partial R_h}{\partial T} \right) - \beta_{swg} \right] \frac{\partial T}{\partial t} + \left[\rho_w \frac{S_w n}{K_w} + (\rho_w - \rho_{gw}) D_s + \right. \\ & \left. n(1-S_w) \frac{\rho_{gw} M_w}{\rho_w RT} \right] \dot{p}_w = \nabla [\rho_w k_w \nabla (p_w + \rho_w gh) + \rho_w D_{PV} \nabla p_w] + \nabla [\rho_w D_{TV} \nabla T] \end{aligned} \tag{7}$$

并有:

$$\rho_{gw} = R_h \rho_{gws} \tag{8}$$

$$R_h = \exp \left(\frac{p_w M_w}{\rho_w RT} \right) \tag{9}$$

$$\rho_{gws} = 10^{-3} \exp \left(19.84 - \frac{4975.9}{T} \right) \tag{10}$$

$$\beta_{swg} = \beta_s (1-n) (S_g \rho_{gw} + \rho_w S_w) + n \beta_w \rho_w S_w \tag{11}$$

$$D_{TV} = \frac{D_{gw}}{\rho_w} \left(h_t \frac{\partial \rho_{gws}}{\partial T} + \rho_{gws} \frac{\partial R_h}{\partial T} \right) \tag{12}$$

$$D_{PV} = D_{gw} \frac{\rho_{gw} M_w}{\rho_w^2 RT} \tag{13}$$

$$D_s = n \frac{\partial S_w}{\partial p_w} \quad (14)$$

式中： n 为多孔介质的孔隙度； ρ_{gw} 为水蒸气的密度； ρ_{gws} 为饱和水蒸气密度； D_s 为湿气容量，可以由土-水特征曲线得到； D_{pv} 、 D_{TV} 分别为水和温度对水蒸气的影响系数； M_w 为水蒸气的分子质量； K_w 为水的压缩模量； R 为气体常数； T 为绝对温度 (K)； R_h 为相对湿度； D_{gw} 为水蒸气的扩散系数 (m^2/s)。

2.3 能量守恒方程

根据能量守恒原理，考虑水蒸气、骨架变形对能量方程的影响，经过推导可以得出能量守恒方程为^[10]

$$(\rho C)_M \frac{\partial T}{\partial t} + T \beta \dot{u}_{i,i} + \rho_w C_{Vw} (q_{gw} + q_w) \nabla T = \nabla [(\lambda_{eff} + L \rho_w D_{TV}) \nabla T + \rho_w L D_{pv} \nabla p_w] \quad (15)$$

并有：

$$(\rho C)_M = (1-n) \rho_s C_{Vs} + n S_w \rho_w C_{Vw} + n(1-S_w) \rho_{gw} C_{Vgw} \quad (16)$$

$$\lambda_{eff} = (1-n) \lambda_s + n \lambda_w \quad (17)$$

$$q_{gw} = -D_{gw} \nabla \rho_{gw} \quad (18)$$

$$q_w = -\rho_w k_w \nabla (p_w + \rho_w gh) \quad (19)$$

式中： C_{Vs} 、 C_{Vw} 、 C_{Vgw} 分别为固体介质、水及水蒸气的比热； λ_s 、 λ_w 分别为固体介质及水传热系数； L 为水的汽化潜热。

2.4 有限元离散

使用 Galerkin 方法对前面的控制方程进行空间域离散，整理可得

$$K_t \dot{u} + C_{sw} \dot{p}_w + C_{st} \dot{T} = \dot{f}_s \quad (20)$$

$$C_{ws} \dot{u} + P_{ww} \dot{p}_w + H_{ww} p_w + C_{wt} \dot{T} = \dot{f}_w \quad (21)$$

$$C_{tw} \dot{p}_w + H_{tt} T + P_{tt} \dot{T} = \dot{f}_t \quad (22)$$

可以写成：

$$A \dot{x} + Cx = \dot{F} \quad (23)$$

式中： $x = \{u, p_w, T\}$ ，矩阵 A 、 C 由方程 (22) 得到，为一个互相影响非对称非线性的微分方程组，方程的部分系数和求解的未知量有关。在求解时，每一个计算时间步都需要迭代求解。

3 土-大气相互作用的边界条件

3.1 水流边界条件

水流边界主要是大气与土表的水量交换，以降雨和蒸发为主，本文主要考虑在蒸发条件下的边界条件，蒸发强度的大小主要取决于两个方面的因素。一是受辐射、气温、湿度和风速等气候条件影响；二是土壤的中含水率的大小和分布的影响。路基的地下水水位都比较深，不能充分供水。当土表持续蒸发而水分供给有限时，土处于非饱和状态，其蒸发率是逐渐降低的。因此，采用非饱和土表面实际蒸发量的 Penman-Wilson 公式^[11-12]作为蒸发边界条件：

$$E = \frac{\Delta R_n + \eta E_a}{\Delta + \eta H} \quad (24)$$

式中： E 为实际蒸发强度； Δ 为饱和蒸气压和温度关系曲线的斜率； R_n 为土表面净辐射量； η 为湿度常数； E_a 为潜在蒸发强度， $E_a = f(u) P_{gw} (I - H)$ ； $f(u)$ 为风函数， $f(u) = 0.35 \times (1 + 0.15u)$ ； u 为风速； P_{gw} 为在蒸发面上空气的蒸汽压； I 为空气相对湿度的倒数，即 $1/h_b$ ； H 为土表面相对湿度的倒数，即 $1/R_h$ 。

3.2 温度边界条件

采用 Wilson 公式^[13]：

$$T_s = T_a + \frac{1}{\eta f(u)} (R_n - E) \quad (25)$$

式中： T_s 为土表面温度； T_a 为土表面空气温度。

4 蒸发过程模拟以及影响因素分析

在不同的地区因气候条件不同而在设计时重点考虑的方向不一样，在全年降雨量远大于蒸发量的地区，应该重点考虑在连续降雨入渗的情况下路基含水率的影响深度；在全年日照、蒸发量很强的地区应该重点考虑连续蒸发条件下的影响深度。

4.1 土样及参数

为了研究蒸发条件下大气对土的影响，取广西南宁市快速环道 K12+900 处的路基压实土作为对象，分析中如果不考虑边坡的边界条件对路堤中心的影响，以其作为一个一维问题来考虑。路基压实土的初始含水率取室内击实试验得到的最优含水率 (图 1)，通过换算可以得到初始体积含水率为 0.23%，饱和度 S_w 为 0.89%。参考文献 [14] 土体热参数体积比热系数 C_s 、 C_w 分别为 2.24×10^6 、 4.15×10^6 J/($m^3 \cdot ^\circ C$)，热传导率系数 λ_s 、 λ_w 分别为 6.0、0.57 J/($s \cdot m^3 \cdot ^\circ C$)，

饱和和渗透系数 k_s 为 1.25×10^9 m/s, 弹性模量为 60 MPa, 泊松比 μ 为 0.33。大气影响深度有限, 该压实土孔隙率很小, 从土-水特征曲线可以看出, 与土的基质吸力相比, 重力势在这个问题上可以忽略。

水的潜热及饱和水蒸气密度与温度的关系如下^[14]:

$$L = 4\ 200.0 \times (597.1 - 0.573T) \quad (26)$$

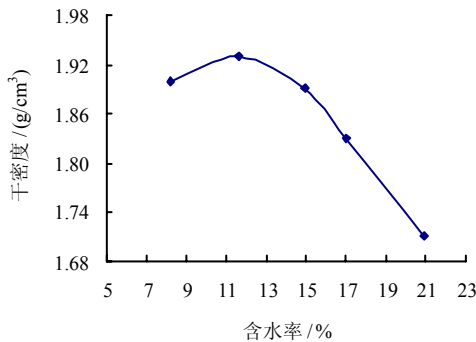


图1 击实试验
Fig.1 Compaction experiment

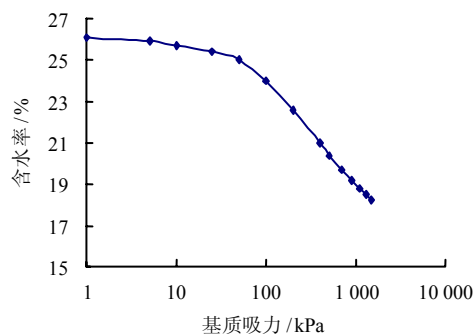


图2 土-水特征曲线
Fig.2 Soil-Water characteristic curve

广西南宁市快速环道 K12+900 处路基土的土-水特征曲线如图 2 所示, 用 Van-Genuchten 方程进行拟合, 与路基土状态有关的参数如下:

$$S_e = \left(1 + |\alpha H_c|^n\right)^{-m} \quad (27)$$

$$k_r = S_e^l \left[1 - \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}}\right)^m\right]^2 \quad (28)$$

$$S_e = \frac{S_w - S_r}{1 - S_r} \quad (29)$$

式中: $n=1.2$, $m=1-1/n$, $l=3.8$, $\alpha=0.12$, $\theta_s=0.26$, $\theta_r=0.051$; H_c 为基质吸力; S_e 为有效饱和度; θ_s 为饱和体积含水率; θ_r 为残余体积含水率; k_r 为相对渗透率。

4.2 蒸发过程分析

为了分析南宁市快速环道路基土本身特性对蒸发强度的影响, 参照陈建斌等^[8-9]在广西南宁地区建立的小型气象站所观测到的 2005 年 5~9 月的气象资料, 选取某天的气象数据作为标准气象参数, 即平均气温为 29.86 °C, 平均相对湿度为 73.37 %, 风速为 0.482 m/s, 雨量为 0 mm, 净辐射量 14.2 MJ/(m²·d)。假定以这天的大气气候条件为标准, 连续蒸发 10 d, 来研究分析在连续蒸发的条件下土本身的特性, 如含水率、渗透能力和水蒸气扩散能力对蒸发量及蒸发过程的影响。

4.2.1 土的含水率对蒸发强度的影响

图 3 为在连续蒸发条件下, 蒸发强度与表层体积含水率的关系。从图中可以看出, 用 Penman-Wilson 公式计算描述非饱和土表面实际蒸发量的蒸发强度不再是常量, 而是随着表层含水率的降低而逐步减小^[8-9, 16], 是符合实际情况的。AB 段是稳定蒸发阶段, 连续的蒸发使土表面含水率降低。尽管含水率有所降低, 但地表处的相对湿度没有太大变化, 还是接近于饱和。在外界条件维持不变时, 认为稳定蒸发。稳定阶段蒸发强度的大小主要由大气蒸发能力决定, 此临界含水率的大小和土壤性质及大气蒸发能力有关。随着含水率的减小, 渗透系数也不断减小, 供水能力降低, 地表的蒸汽压力也随着吸力的增加而降低, 蒸发强度随之减弱, 如 BC 段所示。

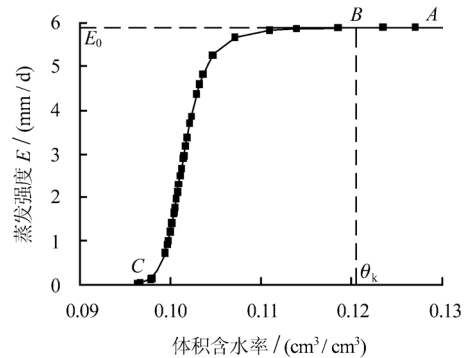


图3 蒸发强度与体积含水率关系图
Fig.3 Relationship between evaporation

4.2.2 水蒸气扩散能力对蒸发量的影响

当土的含水率很低, 渗透系数也降到很低, 土的蒸发量主要由蒸发面以下的水通过扩散的方式穿过上层干土蒸发到大气中。如不考虑蒸发过程中气态水运移, 用 Richard 水流方程计算蒸发会因为没考虑气态流对水分的补给作用, 计算得出表层吸力过大^[2, 8-9]。

在计算中必须要考虑水蒸气扩散才能更好地预

测蒸发过程。扩散系数是孔隙率和曲度的函数，随着温度升高和含水率的降低水的扩散系数也逐步增加，即

$$D_{gm} = D_v \alpha \beta \tag{30}$$

式中： $D_v = 0.229 \times 10^{-4} (1 + T/273.15)^{1.75}$ ； α 为土的挠曲因子， $\alpha = \beta^{2/3}$ ； β 为可供水蒸气流动的土横截面面积，即 $(1 - S_w)n$ 。

从式 (30) 可以看出，体积含水率对扩散系数有抑制作用，随着含水率的减小、供水蒸气流动的土横截面面积的增加，扩散能力逐步增强。为了研究体积含水率对水蒸气扩散在蒸发中的抑制作用，采用 2 种方案进行计算：

(1) 不考虑土性对水蒸气扩散的影响，即 $D_{gm} = D_v = 0.229 \times 10^{-4} (1 + T/273.15)^{1.75}$ 。

(2) 考虑土性对水蒸气扩散的影响，即 $D_{gm} = D_v \alpha \beta$ 。

图 4、5 分别为采取 2 种不同方案计算得到到含水率和蒸发量的对比结果。从图中可以看出，如果不考虑土性对水蒸气扩散的影响，计算结果相差很大，特别是在含水率很低，水蒸气扩散成为主要的蒸发方式的时候。如果不考虑土性对水蒸气扩散的影响，明显夸大了扩散对蒸发的贡献而减缓了蒸发速度。在计算水气两相流时一定要考虑到水蒸气的扩散作用，对计算结果影响比较大。图 6 为蒸发过程中不同深度处的渗透系数和水蒸气扩散系数随时间的变化，从图中也可以看出，土的渗透性随着含水率的减少快速降低，而水蒸气扩散作用慢慢增强。当渗透系数很小、液态水变得不连续时，蒸发量的大小主要由水蒸气扩散能力决定。

4.2.3 土的渗透性对蒸发的影响

保持其他计算参数不变，取不同饱和渗透系数计算得到基质吸力随深度的分布，如图 7 所示。

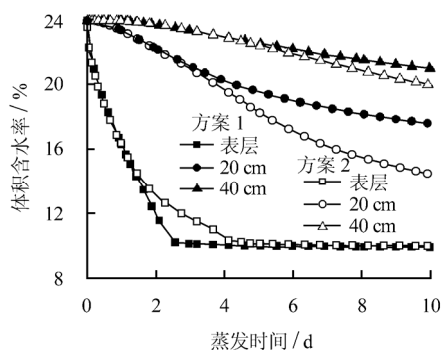


图 4 水蒸气扩散对含水率的影响
Fig.4 Influence of water vapor diffusion on and volumetric water content

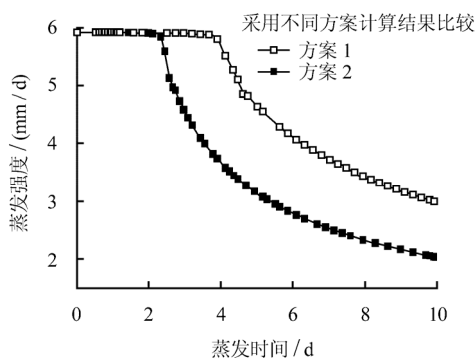


图 5 水蒸气扩散对蒸发量的影响
Fig.5 Influence of water vapor diffusion

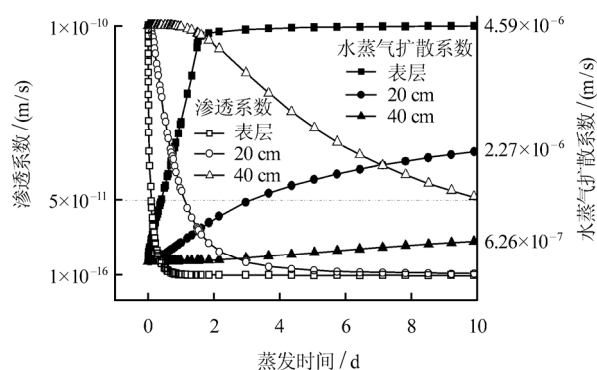


图 6 蒸发过程中水的渗透系数和水蒸气扩散系数的变化
Fig.6 The change of penetrability and water vapor diffusion

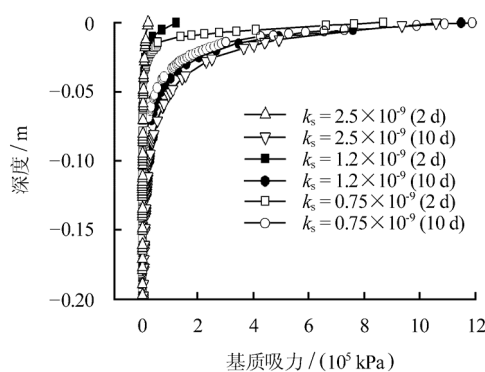


图 7 渗透系数对蒸发的影响
Fig.7 Influence of penetrability on evaporation

从图中可以看出，渗透性越大的土，表层的吸力越小，而随着深度的增加，与渗透性小的土相比，吸力反而大。这是由于在蒸发中渗透能力强的土供水能力较强，对表层含水率贡献较大，但也正是由于此原因蒸发时影响深度也大，对下层土的吸力也影响更大。从结果可以看出，同样的天气情况下，大气对土的影响范围与土本身的渗透性有着直接的关系^[15-16]，所以在计算大气影响深度时正确选取渗

透系数对计算结果非常重要。

4.2.4 昼夜蒸发强度周期变化的对蒸发的影响

由于气象因素的周期变化,昼夜蒸发强度变化明显。为了研究在大气周期变化的情况下的影响深度,用正弦波来描述蒸发强度的昼夜变化规律,即

$$E = E_{st} [\sin(2\pi t/86400) + 1] \quad (31)$$

式中:时间 t 从日出开始算起(s),在中午时蒸发量达到最大; E_{st} 为标准土面蒸发强度,可以通过考虑昼夜蒸发强度变化与不考虑昼夜蒸发强度变化时总蒸发强度相同而算出。

图8为50h内考虑昼夜蒸发强度变化(非稳定蒸发)与不考虑强度昼夜变化(稳定蒸发)两种情况下的土的含水率比较。从图中可以看出,气候的周期变化规律对表层土的影响很大,但影响深度有限。对于本算例来说,地表下10cm处还受到周期变化规律的影响;20cm处几乎不受影响,但总体的趋势还是含水率不断减少。在计算或研究中,气候周期变化对土的影响深度可以通过模型很好的预测。在一定深度以下,周期变化影响很小,可以用稳定蒸发近似替代实际发生的情况。从图中还可以看到这样一个现象,周期变化下的表层含水率并不是单调减小。这是由于白天蒸发强度大时含水率快速降低,但到了夜间蒸发强度减小,在水力梯度的作用下,表层的水分得到补充,含水率增加,随着蒸发强度的再度增强,含水率再次减小。

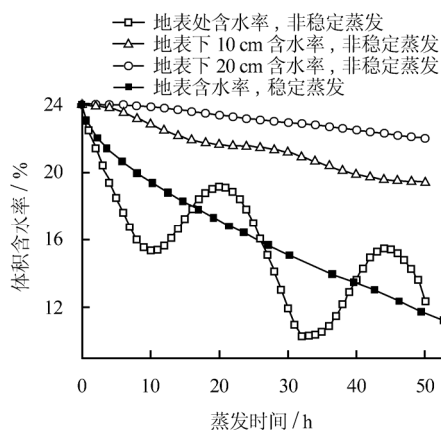


图8 昼夜蒸发强度变化的影响深度

Fig.8 Influence depth of the periodic on evaporation change of day and night

5 结论

针对在大气自然气候影响下公路路基,采用非饱和土实际蒸发量作为边界条件,结合考虑水蒸气在内的温度-水-应力耦合控制方程,建立了蒸发条

件下路基对气候变化的响应模型。对南宁某路基在大气蒸发条件下的蒸发过程进行了模拟分析,用实际蒸发量作为边界条件的热-水-应力模型,可以较好地模拟大气在蒸发条件下路基的响应过程。

影响蒸发量主要取决于两个方面,一是受辐射、气温、湿度和风速等气象因素的影响,通过 Penman-Wilson 公式可以很好地把这些气象因素转化为计算的边界条件;二是受土壤自身特性的影响。通过对路基压实土的模拟计算,可以看出,在蒸发过程中且含水率很低时,水蒸气扩散能力决定着蒸发量的大小。天气的周期变化对表层土含水率的影响比较大,但影响深度有限。

本文主要研究了土自身的特性参数,如渗透系数、水蒸气扩散系数等对蒸发条件下大气影响深度的影响。可以看出,在外部气象条件维持不变的情况下,土本身的性质如渗透系数、水蒸气扩散系数等对蒸发的影响较大。在蒸发过程中,随着含水率的降低,土壤通过渗透输水的能力大幅降低,此时蒸发强度的大小就主要由土层内水蒸气的扩散的能力控制。

通过用正弦波描述昼夜蒸发强度的变化,研究了天气的周期变化对蒸发过程的影响。可以看出,天气周期变化对表层影响很大,但影响的深度有限,周期变化下的表层含水率并不是单调减小,而是随着蒸发强度的变化有一个干湿过程。在需要考虑干湿循环对土体的破坏范围的时候,可以通过本模型计算得出天气周期变化的影响深度。

参考文献

- [1] THOMAS H R, REES S W. The numerical simulation of seasonal soil drying in an unsaturated clay soil[J]. *International Journal for Numerical & Analytical Methods in Geomechanics*, 1993, 17(1): 119—132.
- [2] THOMAS H R, REES S W. Seasonal ground movement in unsaturated clay: an examination of field behaviour[J]. *Geotechnique*, 1994, 44: 353—358.
- [3] THOMAS H R, ZHOU Z. A comparison of field measured and numerically simulated seasonal ground movement in unsaturated clay[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 1995, 19(4): 249—265.
- [4] WILSON G W, FREDLUND D G, BARBOUR S L. Coupled soil-atmosphere modeling for soil evaporation[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1994, 31(2): 151—161.

从峰值段后, 模型值与试验值存在一定偏差, 但从应力-应变全过程来看, 该本构模型基本上能反映 Q_2 原状黄土的力学特性。

参 考 文 献

- [1] 刘祖典. 黄土力学与工程[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1996.
- [2] 黄文熙. 土的工程性质[M]. 北京: 水利电力出版社, 1981.
- [3] 扈胜霞, 周云东, 陈正汉. 非饱和和原状黄土强度特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(4): 660—663, 672.
HU Sheng-xia, ZHOU Yun-dong, CHEN Zheng-han. Test study on strength character of unsaturated and undisturbed loess[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(4): 660—663, 672.
- [4] 夏旺民, 郭增玉. Q_1 黄土的弹塑性损伤本构模型[J]. 岩土力学, 2004, 25(9): 1423—1426.
XIA Wang-min, GUO Zeng-yu. Elastoplastic damage model of Q_1 loess[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(9): 1423—1426.
- [5] 谢星, 赵法锁, 王艳婷, 等. 结构性 Q_2 、 Q_3 黄土的力学特性对比研究[J]. 西安科技大学学报, 2006, 26(4): 451—455, 468.
XIE Xing, ZHAO Fa-suo, WANG Yan-ting, et al. Comparative study on mechanical features of structural Q_2 and Q_3 loess[J]. **Journal of Xi'an University of Science and Technology**, 2006, 26(4): 451—455, 468.
- [6] 陈正汉, 周海清, FREDLUND D G. 非饱和土的非线性模型及其应用[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(5): 603—608.
CHEN Zheng-han, ZHOU Hai-qing, FREDLUND D G. Nonlinear model for unsaturated soils and its application[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1999, 21(5): 603—608.
- [7] 沈珠江. 理论土力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000.
- [8] 郑颖人, 龚晓南. 土的塑性力学基础[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1989.
- [5] BLIGHT G E. Interactions between the atmosphere and the earth[J]. **Geotechnique**, 1997, 47(4): 715—767.
- [6] 卢再华. 非饱和膨胀土的弹塑性损伤本构模型及其在土坡多场耦合分析中的应用[博士学位论文 D]. 重庆: 后勤工程学院, 2001.
- [7] CUI Y J, LU Y F, DELAGE P, et al. Field simulation of in site water content and temperature changes due to ground-atmospheric interactions[J]. **Geotechnique**, 2005, 55(7): 557—567.
- [8] 陈建斌, 孔令伟, 赵艳林, 等. 蒸发蒸腾作用下非饱和土的吸力和变形影响因素分析[J]. 岩土力学, 2007, 2(9): 1767—1778.
CHEN Jian-bin, KONG Ling-wei, ZHAO Yan-lin, et al. On influence factors of suction and deformation of unsaturated soil under evaporation and transpiration effect[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 2(9): 1767—1778.
- [9] 陈建斌, 孔令伟, 赵艳林, 等. 非饱和土的蒸发效应与影响因素分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(1): 34—40.
CHEN Jian-bin, KONG Ling-wei, ZHAO Yan-lin, et al. Evaporation effect in unsaturated soil and its influential factors[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(1): 34—40.
- [10] 张玉军. 气液二相非饱和岩体热-水-应力耦合模型及二维有限元分析[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(6): 901—906.
ZHANG Yu-jun. Modeling and 2D FEM analysis for coupled thermo-hydro-mechanical processes in vapor-liquid two-phase unsaturated rockmass[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2007, 29(6): 901—906.
- [11] WILSON G W. Soil evaporation fluxes for geotechnical engineering problems[D]. Saskatoon: University of Saskatchewan, 1990.
- [12] WILSON G W, FREDLUND D G, Barbour S L. Coupled soil-atmosphere modeling for soil evaporation[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1994, 31: 151—161.
- [13] 弗雷德隆德, 拉哈尔佐. 非饱和土土力学[M]. 陈仲颐, 张在明, 陈愈炯, 等译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- [14] OHNISHI Y, KOBAYASHIA, KURIKAMI H. User's Guide of THAMES[R]. Kyoto: Kyoto University, 2003.
- [15] 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(Supp.1): 3080—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(Supp.1): 3080—3085.
- [16] 雷志栋, 杨诗秀. 土壤水动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988.

上接第 1214 页