

# 蒸发蒸腾作用下非饱和土的吸力和变形影响因素分析

陈建斌<sup>1</sup>, 孔令伟<sup>1</sup>, 赵艳林<sup>2,3</sup>, 吕海波<sup>2</sup>

(1. 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;  
2. 广西大学 土木建筑工程学院防灾减灾研究所, 南宁 530004; 3. 桂林工学院 土木工程系, 桂林 541004)

**摘 要:** 采用热湿耦合非等温流方程, 结合实际蒸发和植物蒸腾的边界条件, 考虑了水分迁移所引发的非饱和土应力变形行为, 从而建立了大气-非饱和土相互作用模型。采用该模型对控制非饱和土吸力和变形的大气蒸发和植物蒸腾等多参数进行了影响程度分析。结果表明, 控制地面吸力和变形的主导因素是外部气象条件, 尤其太阳净辐射量和风速, 土体水力和热力特性参数影响程度有限; 在植被覆盖条件下, 吸力变化主要取决于植物叶面积指数 *LAI*, 而总蒸发量的大小决定了地表变形量。

**关 键 词:** 非饱和土; 大气蒸发; 植物蒸腾; 吸力; 变形; 影响因素

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

## On influence factors of suction and deformation of unsaturated soil under evaporation and transpiration effect

CHEN Jian-bin<sup>1</sup>, KONG Ling-wei<sup>1</sup>, ZHAO Yan-lin<sup>2,3</sup>, LÜ Hai-bo<sup>2</sup>

(1.State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. Research Institute of Preventing and Mitigating Disasters, College of Civil Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China; 3.Department of Civil Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

**Abstract:** Based on the equations of coupled heat-moisture anisothermal flow and the behaviors of stress-strain of unsaturated soil, an interaction model of atmosphere-unsaturated soil is established with the boundaries of actual evaporation and vegetation transpiration. The influence of climatic evaporation and vegetation transpiration on the suction and deformation of soil surface are analyzed by the interaction model. It is shown that the major governing factor for the suction and deformation of soil surface is outer climatic condition where solar net radiation and wind velocity are the most contribution, while the internal hydraulic and thermal parameters of soil property play a less role in the estimation of evaporation. With the cover of vegetation, the behavior of suction depends on the leaf area index (*LAI*), while the magnitude of total evaporation and transpiration determines the deformation of soil surface.

**Key words:** unsaturated soil; climatic evaporation; vegetation transpiration; suction; deformation; influence factor

## 1 引 言

气候的变化控制着地球表面水量平衡, 降雨入渗造成土表面含水率升高, 蒸发蒸腾又从土体中提取水分, 这就引发了一系列岩土工程问题, 如地面发生季节性胀缩变形, 特别是对水分极为敏感的膨

胀土, 其效果更为明显。在我国膨胀土分布较广、年蒸发量较大的广西地区, 就时常发生地面失水开裂造成房屋受损的情况<sup>[1]</sup>。

考虑蒸发效应一直以来是农学、土壤学和气象学的范畴。在土木工程行业中, 通常根据《膨胀土地区建筑技术规范》(GBJ112-87)<sup>[2]</sup>选取经验性的

收稿日期: 2006-07-03 修改稿收到日期: 2006-09-20

基金项目: 国家重大基础研究前期研究专项 (No. 2003CCA02200); 交通部西部交通建设科技项目(200631878530); 中国科学院武汉岩土力学研究所领域前沿基金项目 (No. Q110301)。

作者简介: 陈建斌, 男, 1974 年生, 博士, 工程师, 现工作于武汉市市政工程设计研究院有限责任公司, 主要从事岩土工程方面的研究和设计。  
E-mail: c1j2b3@tom.com

湿度系数和大气影响深度来计算降雨蒸发情况下土层湿度变化,以此来计算大气对地基变形的影响。Thomas 等<sup>[3]</sup>(1993年)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。Thomas 等<sup>[4,5]</sup>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作用与实际是不吻合的,而且植被蒸腾的影响也是不容忽视的。因而,本文采用热-湿耦合非等温流方程,结合实际蒸发和植物蒸腾的边界条件,考虑了水分迁移所引发的非饱和土应力变形行为,从而建立了大气-非饱和土相互作用模型。采用该模型对控制非饱和土吸力和变形的大气蒸发和植物蒸腾等多参数进行了影响程度分析。

## 2 大气-非饱和土相互作用模型的建立

### 2.1 土壤水分运动方程

土壤中非饱和和渗透是一个典型的热湿-耦合非等温流过程,特别是在大气持续日照、地表面温度梯度非常大的情况下,温度变化会极大地影响水分迁移,进而影响土壤蒸发。其中水分迁移不仅有液态水,还包括气态水扩散。为此,Philip 和 De Vries (1957年)<sup>[6]</sup>、De Vries<sup>[7]</sup>(1958年)提出了由 Milly<sup>[8]</sup>(1984年)修改的质量-能量基础上的水-气-热耦合运移理论,提出土中液、气两相水流在水热梯度共同作用下的运动模型,表述如下:

$$\frac{1}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial x} (D_v \frac{\partial P_v}{\partial x}) + \frac{1}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial y} (D_v \frac{\partial P_v}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial x} (k_x \frac{\partial(\psi + y)}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (k_y \frac{\partial(\psi + y)}{\partial y}) + Q = \lambda \frac{\partial \psi}{\partial t} \quad (1)$$

$$L_v \frac{\partial}{\partial x} (D_v \frac{\partial P_v}{\partial x}) + L_v \frac{\partial}{\partial y} (D_v \frac{\partial P_v}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial x} (\lambda_{lx} \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\lambda_{ly} \frac{\partial T}{\partial y}) + Q_t = \lambda_v \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

式中:  $D_v$  为蒸汽扩散系数;  $P_v$  为土中水蒸气压;  $k_x$ ,  $k_y$  为渗透系数;  $\psi$  为基质吸力;  $Q$  为边界流量;  $\lambda$  为土-水特征曲线斜率;  $y$  为位置水头;  $\rho_w$  为水的密度;  $L_v$  为水的蒸发潜热;  $\lambda_{lx}$ ,  $\lambda_{ly}$  为土体的导热系数,  $\lambda_v$  为土的体积热容;  $Q_t$  为边界热量;  $T$  为绝对温度。

通过 Edlefsen 和 Anderson (1943年)提出的关系式,将热-湿耦合控制方程中变量  $\psi$ ,  $P_v$  建立联系:

$$P_v = P_{vs} (e^{-\frac{\psi w}{\rho_w RT}}) = P_{vs} h_{rair} \quad (3)$$

式中:  $P_{vs}$  为饱和蒸气压;  $w$  为水蒸气的克分子量;  $R$  为通用气体常数;  $h_{rair}$  为空气相对湿度。其他符号同式(1)、式(2)。

### 2.2 水流和温度边界条件

#### 2.2.1 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,其中以蒸发的量化较为困难。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。为此, Wilson 以 Penman 蒸发公式<sup>[10]</sup>为基础,通过考虑土表相对湿度变化,推出了计算非饱和土表面实际蒸发量的 Penman-Wilson 公式<sup>[11,12]</sup>:

$$E = \frac{\Gamma R_n + \eta E_a}{\Gamma + \eta A} \quad (4)$$

式中:  $E$  为实际蒸发量;  $\Gamma$  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;  $\eta$  为湿度常数;  $E_a$  是潜在蒸发量,  $E_a = f(u)P_a(B-A)$ , 其中  $f(u)$  是风函数,  $f(u) = 0.35(1+0.15u)$ ;  $u$  为风速;  $P_a$  为在蒸发面上空气的蒸汽压;  $B$  为空气相对湿度的倒数,即  $1/h_{rair}$ ;  $A$  为土表面相对湿度的倒数,即  $1/h_A$ 。

当有草皮覆盖时,必须考虑植物的蒸腾作用,因此土壤表面实际蒸腾蒸发量将进行修正,总体实际蒸发量分为植物蒸腾量和土壤本身的蒸发量<sup>[13]</sup>。即

土壤表面蒸发量  $E_s$  为

$$E_s = E \{1 - (-0.21 + 0.7\sqrt{LAI})\} \quad (5)$$

植物蒸腾量  $PT$  为

$$PT = E (-0.21 + 0.7\sqrt{LAI}) \quad (6)$$

式中:  $E$  为实际蒸发量;  $PT$  为植物蒸腾量;  $LAI$  为植被的叶面积指数,可以定义为每平方米地面积上覆盖植物的叶片总面积。

植物蒸腾量依赖于植物实际根部水分提取量,该水分提取量取决于植物水分限制函数,即

$$AT = PRU \cdot PML \quad (7)$$

式中:  $AT$  为根部结点实际蒸腾量;  $PRU = \frac{2PT}{R_T}$

$(1 - \frac{R_s}{R_T})A_s$ ;  $R_T$  为植物根部总长度;  $R_s$  为当前根部结点长度;  $A_s$  为当前根部结点贡献面积;  $PML$  为植

物根部水分限制函数，即随根部周围吸力的变化，根部提取水分能力的限定函数。当吸力为 0 kPa 时，根部充分吸水；而当吸力达到 1 500 kPa 时，根部吸水停止。

2.2.2 温度边界条件

采用 Wilson 公式<sup>[9]</sup>：

$$T_s = T_a + \frac{1}{\eta f(u)}(R_n - E) \quad (8)$$

式中： $T_s$  为土表面温度； $T_a$  为土表面空气温度；其他符号同式 (4)。

2.3 应力-变形控制方程

设应力-变形分析仅考虑二维平面应变，即  $d\varepsilon_z = 0$ ，则应力平衡方程表示如下：

$$\{\Delta\sigma\} = [D]\{\Delta\varepsilon\} - [D]\{m\}\{\Delta(u_a - u_w)\} + \{\Delta u_a\} \quad (9)$$

式中： $[D]$  为刚度矩阵，可参见有限元理论相关书籍； $\{m\} = \{1/H_t, 1/H_t, 0\}$ ； $H_t$  为与吸力相关的体积模量； $u_a$  为孔隙气压； $u_w$  为孔隙水压。假设气相保持不变，为大气压力，则上式可以转换为

$$\{\Delta\sigma\} = [D]\{\Delta\varepsilon\} + [D]\{m\}\{\Delta u_w\} \quad (10)$$

2.4 有限元求解

以方程式 (1)、式 (2) 和式 (10) 为控制方程，进行有限元求解。该方程式有限元的程序实现可以采用 Geoslope office 软件<sup>[14]</sup>不同模块之间的组合来实现（包括 Sigma/w、Vadose/w），该软件可以完成非饱和土应力变形以及热-湿耦合渗流分析。

3 多参数变化下影响因素分析

影响土体蒸发量、吸力以及变形的因素是多方面的。不仅有外部气象因素，如太阳净辐射量、风速、相对湿度及空气温度等，还包括土体本身的水力和热力参数的影响，如非饱和土-水特征曲线、渗透系数函数和导热系数等。基于大气-非饱和土相互作用模型，文献[15]就控制地面实际蒸发量的外部气象因素和土性水力和热力参数进行了影响程度分析。本文仍采用与文献[15]相同的方法，对影响土体表层吸力和变形的多参数进行了分析。

3.1 外界气象条件

分析所用的外界气象资料是来自于广西南宁试验场地的小型气象站在 2005 年 5~9 月所观测到的气象参数。该场地最高气温为 24.22~38.90 °C，最低气温为 20.68~26.09 °C；最大相对湿度为

91.85 %~100 %，最小相对湿度为 32.32 %~99.99 %；风速为 0~4.717 m/s；降雨量为 0~98.4 mm/d；太阳净辐射量为 2.79~18.5 MJ/(m<sup>2</sup>·d)。

3.2 计算模型

分析对象为一有限均匀土柱，高度为 2.5 m，宽度为 1.0 m，将其作为一个一维问题来考虑，沿高度方向上单元划分为 5 等份，宽度上为 1 等份。土体来自广西南宁现场边坡试验场地的灰白色膨胀土，其土-水特征曲线见图 1，渗透系数函数为 Fredlund 和 Xing 的方法<sup>[16]</sup>的预测结果，见图 2，其中饱和渗透系数为 1.27 × 10<sup>-9</sup> m/s，体积压缩系数  $M_v = 10^{-7}$ ，导热系数  $\lambda = 1.78 \text{ J}/(\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{°C})$ ，弹性模量为 4 027 kPa，泊松比为 0.367，与吸力相关的体积模量  $H_t = 75 \text{ 000 kPa}$ 。选取现场监测数据中某天的气象数据作为标准气象参数，即最高气温为 35.04 °C，最低气温为 24.68 °C，最大相对湿度为 99.99 %，最小相对湿度为 46.74 %，风速为 0.482 m/s，降雨量为 0 mm，净辐射量为 14.2 MJ/(m<sup>2</sup>·d)，实际蒸发量为 5.21 mm/d。采用以上标准参数计算所得的表层吸力为 205.8 kPa，沉降变形为 3.8 mm。分别在各气象参数所在合理范围内改变数值量，并对膨胀土的标准土性参数，如饱和渗透系数、体积压缩系数和导热系数放大或缩小一定倍数，来求取各参数变化对非饱和土吸力和变形的影响规律。

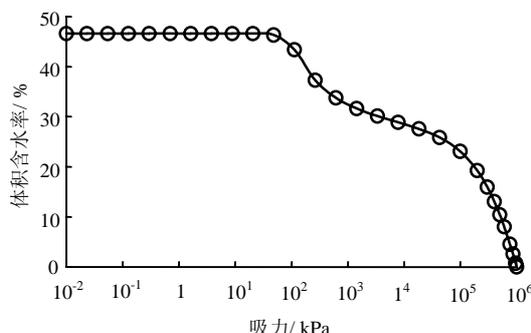


图 1 土-水特征曲线

Fig.1 Soil-Water characteristic curve

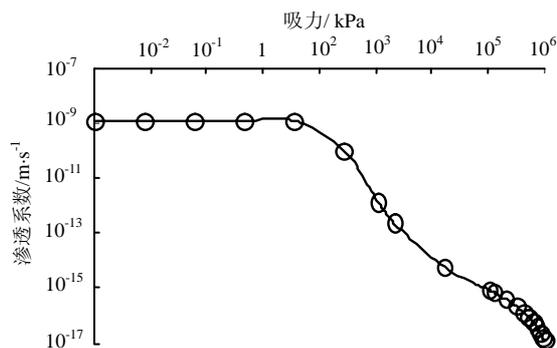


图 2 渗透系数曲线

Fig.2 Hydraulic conductivity curve

(1) 气象因子相对变动度=(计算参数-标准气象参数)/标准气象参数,表示气象参数相对于标准参数的变化范围;

(2) 土性参数放大倍率=计算土性参数/标准土性参数,表示土性参数相对于标准土性参数的放大或缩小倍数;

(3) 表层吸力敏感度=(计算表层吸力标准表层

吸力)/标准表层吸力,表示对表层吸力的影响程度;

(4) 表层变形量敏感度=(计算表层变形量-标准表层变形量)/标准表层变形量,表示对表层变形的影响程度。

### 3.3 计算结果分析

采用大气-非饱和土相互作用模型进行多参数影响因素分析,分析的结果见图3。

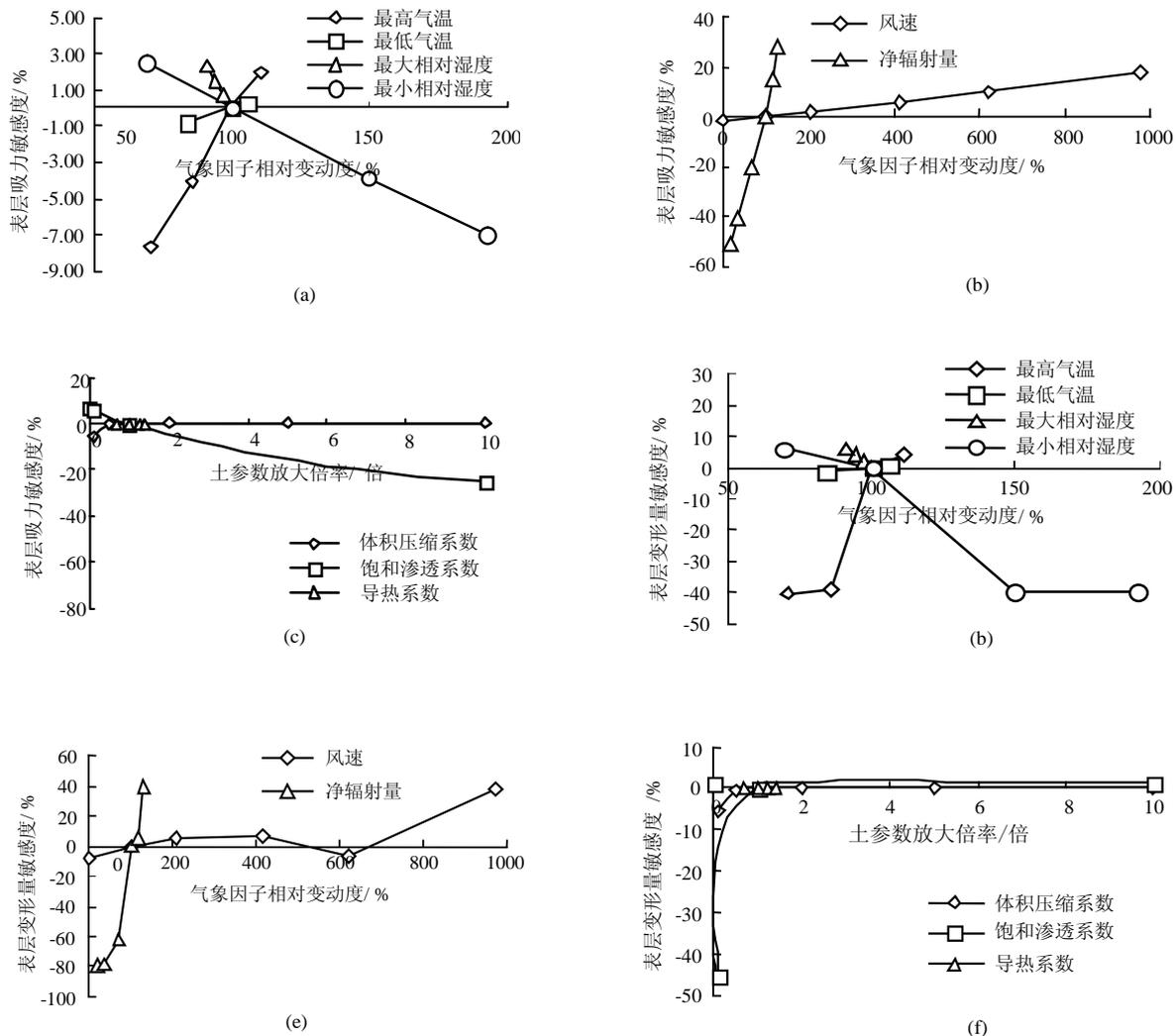


图3 多参数影响下蒸发量变化规律

Fig.3 Principle of variation of evaporation under the influence of multi-parameters

从图可见,在所测各气象数据范围内,对表层吸力和变形影响最大的是最高气温、最小相对湿度、风速和净辐射量,其中以净辐射量的影响最为明显。由于土体的蒸发量大小直接决定了表层吸力和变形的发展态势,即蒸发越强,土体吸力和变形变化也就越剧烈,而蒸发的能量主要来自于太阳净辐射量,净辐射量越大,蒸发量越大,吸力上升越快,表层收缩越大;风速会加快空气的对流和地表面饱和和空气的流通,机械能的加入无疑也会加快表层吸力和

变形的变化;而最高气温对蒸发量的影响与净辐射量的相似,这说明一天内的最高气温是与太阳辐射紧密相关,因而其对吸力和变形的影响也就不言而喻了。在其他气象参数中,变化幅度较小的最大相对湿度所产生的蒸发效应明显小于变化幅度较广的最小相对湿度;而最低气温主要在日照较小的时间段出现,此时地面基本停止蒸发,吸力和变形自然也难以发展,其影响也有限。

与气象参数相比较而言,土性参数中水力和热

力参数对吸力和变形的影响小得多。其中导热系数基本不会对土体中水分流动产生影响。而饱和渗透系数和体积压缩系数的降低，会减缓深部土层水分向上迁移提供蒸发所需水分的速度和增强土体持水能力，在一定程度上抑制了蒸发，稳定了吸力和变形量。

综上所述，针对于特定气候条件下（如南宁地区典型的亚热带气候），在控制非饱和土吸力和沉降变形的多参数影响分析中，起主导作用的是外部气象条件，而非饱和土的水力和热力参数在一定程度上会影响吸力和变形的发展变化。

#### 4 植被覆盖影响因素分析

草皮护坡和绿化已经在岩土工程中得到了广泛的应用。除了具有深根锚固作用、浅根的加筋作用、降雨截留和减小表层冲蚀外，还有一个作用就是能改变土体的孔隙水压力的变化，这也必然会影响到土体的变形和力学性状<sup>[17]</sup>。为此本节通过大气-非饱和土相互作用模型，分析了在非饱和土表层草皮覆盖情况下植物的生理参数，如叶面积指数  $LAI$  和植物根深  $R_T$  等参数的变化对总腾发量（即蒸腾蒸发量）、表层吸力和变形的影响规律。

分析的对象、标准气象参数等条件仍同于上节。在无覆盖情况下，计算所得土柱的表层吸力为 205.8 kPa，沉降变形为 3.8 mm。通过改变草皮的叶面积指数和根深  $R_T$  来分析该气候条件下非饱和土的相应响应，其中  $LAI$  的变动范围为 0.5, 1.0, 2.0, 2.5, 3.0；根深为 0.125, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0, 1.25, 1.5 m。对于表层吸力和变形敏感度计算所采用的标准参数为该天气条件下在无覆盖时所得的吸力和变形量。

总腾发量敏感度 = (计算总腾发量 - 实际总腾发量) / 实际总腾发量，表示植物生理参数变化对总腾发量的影响程度；其他定义同于上节。

计算结果见图 4~9。

从图 4~6 中可见，植物的蒸腾量随着叶面积指数  $LAI$  的增大而增大。这是因为  $LAI$  越大，植物在单位土体面积上具有较大的表面积，这样就加大了植物吸收更多太阳净辐射量的可能性，通过植物根部能从土体中提取更多水分。而且植物的蒸腾量随根深的加大也变大，但是当根深为 0.75~1.0 m 之后，蒸腾量有轻微的减小。这表明，植物根系越发达，越能提高根部吸水的范围，但是当根深达到了一定程度时，由于植物  $LAI$  的限制，无法接受更多

的太阳净辐射量，也就没有多余的能量来提取水分，蒸腾量自然会下降。相对于总腾发量而言，当根深小于 0.75 m 时， $LAI$  越小，表明土体表面无覆盖区的面积就越大，主要以土表蒸发为主，这种现象随着根深的减小就越明显；反之， $LAI$  越大，蒸发形式以植物蒸腾为主，且随着根深的减小，其总腾发量越小，但  $LAI=3.0$  时，基本无土表蒸发。但总体上来讲，总腾发量是不会超过潜在蒸发量的。

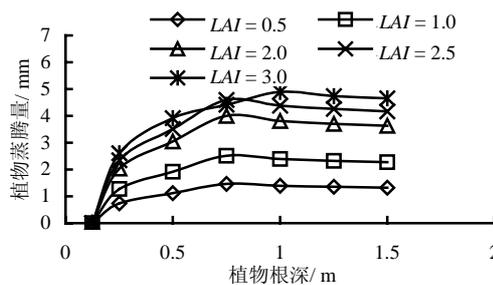


图 4 不同  $LAI$  条件下植物蒸腾量与植物根深的关系  
Fig.4 Vegetation transpiration changing with root depth under different  $LAI$

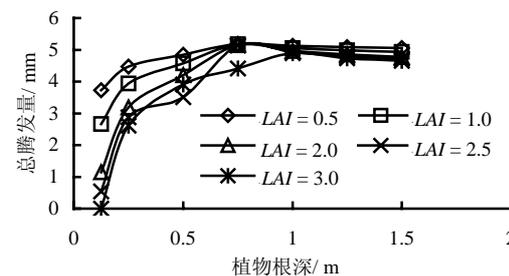


图 5 不同  $LAI$  条件下总腾发量与植物根深的关系  
Fig.5 Total evaporation and transpiration changing with root depth under different  $LAI$

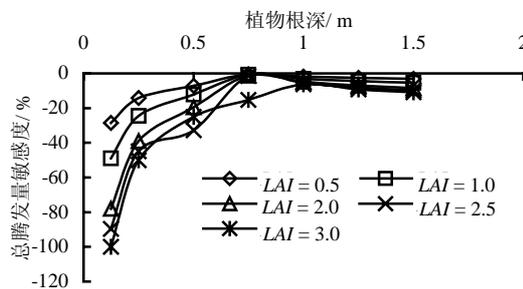


图 6 不同  $LAI$  条件下总腾发量敏感度与植物根深的关系  
Fig.6 Sensitivity of total evaporation and vegetation changing with root depth under different  $LAI$

从图 7 和 8 中可见，就土表吸力而言，植被根部的深浅对其没有太大的影响，其数量的变化主要取决于植物的  $LAI$ 。因为  $LAI$  决定了非饱和土表层的蒸发形式， $LAI$  越小，土表蒸发量越大，土表吸

力下降就越快。而土表的变形量与总腾发量有关，总腾发量越大，土表变形量也越大，见图9。

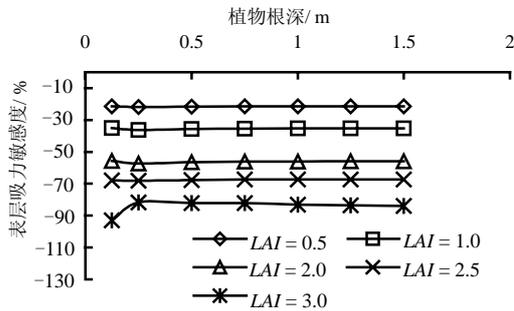


图7 不同 LAI 条件下表层吸力敏感度与植物根深的关系

Fig.7 Sensitivity of surface suction changing with root depth under different LAI

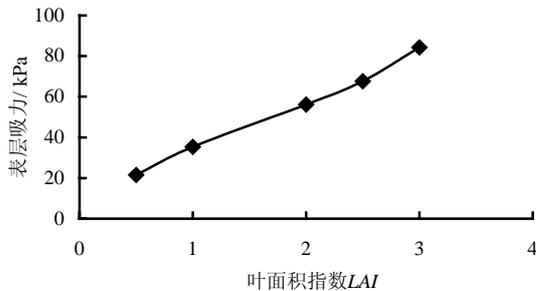


图8 叶面积指数 LAI 与表层吸力的关系曲线  
Fig.8 Relationship of leaf area index LAI and surface suction

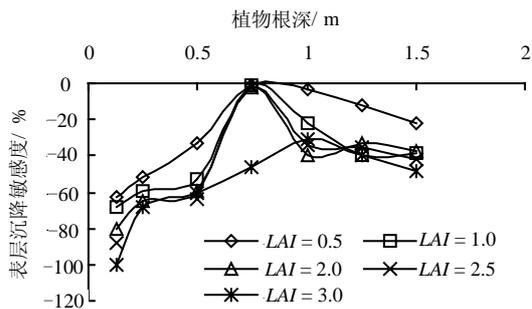


图9 不同 LAI 条件下表层沉降敏感度与植物根深的关系

Fig.9 Sensitivity of surface settlement changing with root depth under different LAI

综上所述，以南宁地区多雨炎热气候条件为依据，通过大气-非饱和土相互作用模型，可以确定植被的叶面积指数 LAI 和植物根数  $R_T$ ，这在一定程度上能满足选择符合岩土工程植被防护中最佳物种的需要。但是，仅从这两方面入手是不够的，还要综合考虑当地的地理、土壤成分、肥力以及植物根

部锚固和加筋作用，这样才能选取合适的植被种类，以达到预期的效果。

### 5 结论

(1) 采用热-湿耦合非等温流方程，结合实际蒸发和植物蒸腾的边界条件，考虑了水分迁移所引发的非饱和土应力变形行为，建立了大气-非饱和土相互作用模型。

(2) 在南宁地区多雨炎热气候条件下，控制土体的吸力和变形的主导因素是外部气象条件，其中以太阳净辐射量和风速最为明显。而土体自身特性参数中饱和和渗透系数和体积压缩系数影响程度有限，导热系数对吸力和变形几乎没有太大影响。

(3) 植物的蒸腾量随着叶面积指数 LAI 的增大而增大，当根深为 0.75~1.0 m 之后，蒸腾量有轻微减小。对于总腾发量而言，当根深小于 0.75 m 时，LAI 越小，主要以土表蒸发为主，这种现象随着根深的减小就越明显；反之，LAI 越大，蒸发形式以植物蒸腾为主，且随着根深的减小，其总体蒸发量越小；当 LAI=3.0 时，基本无土表蒸发。但总体上来讲，总腾发量是不会超过潜在蒸发量的。

(4) 就土表吸力而言，植被根部的深浅对其没有太大的影响，其数量的变化主要取决于植物的 LAI。而土表的变形量是与总腾发量有关，总腾发量越大，土表变形量也越大。

致谢：中国科学院武汉岩土力学研究所郭爱国副研究员在现场气象站的安装、调试和试验工作中给予笔者诸多的帮助和指导；法国国立路桥大学崔玉军教授与笔者进行了有益探讨并提出了宝贵建议。在此一并向他们表示由衷的感谢！

### 参考文献

- [1] 柯尊敬, 黄绍铨. 膨胀土工程性质的研究总报告[R]. 南宁: 广西大学土木系, 1995.
- [2] GBJ112-87, 膨胀土地区建筑技术规范[S].
- [3] Thomas H R, Rees S W. The numerical simulation of seasonal soil drying in an unsaturated clay soil[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 1993, 17(1):119-132.
- [4] Thomas H R, Rees S W. Seasonal ground movement in unsaturated clay an examination of field behaviour [J]. *Geotechnique*, 1994, 44:353-358.
- [5] Thomas H R, Zhou Z. A comparison of field measured and numerically simulated seasonal ground movement in

系,而 $\sigma_c$ 分别为 100, 150, 200 kPa 时,所有试样的 $\sigma_d$ - $\varepsilon_d$ 曲线则均为双曲线型;

(2) 在给定的应变水平下,围压和水泥掺量越高,相应的动割线模量越大;

(3) 由于 EPS 是很好的弹性材料,因此, EPS 颗粒含量越高,模量衰减曲线 $E_{sec}$ - $\varepsilon_d$ 越平缓;

(4)  $E_{sec}$ 随着循环次数增大而衰减,并且随围压的增大,衰减的程度增大。

### 参 考 文 献

- [1] Yasuhara, K. Recent Japanese experiences with lightweight geomaterials[A]. **Proceedings of the International Workshop on Lightweight Geo-Materials** [C]. Tokyo: Japanese Geotechnical Society, 2002. 35 - 60.
- [2] 马时冬. 聚苯乙烯泡沫塑料轻质填土(SLS)的特性[J]. 岩土力学, 2001, 22(3): 245 - 248.  
MA Shi-dong. The properties of stabilized light soil (SLS) with expanded polystyrene [J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2001, 22(3): 245 - 248.
- [3] 董金梅. 聚苯乙烯轻质混合土工程特性的试验研究 [博士学位论文 D]. 南京: 河海大学, 2005.
- [4] 姬凤玲. 疏浚淤泥泡沫塑料颗粒混合轻质土力学特性研究 [博士学位论文 D]. 南京: 河海大学, 2005.
- [5] 王庶懋, 高玉峰. 砂土与 EPS 颗粒混合的轻质土

(LSES) 细观结构的 CT 研究[J]. 岩土力学 2006,27(12): 2 137 - 2 142.

WANG Shu-miao, GAO Yu-feng. Research on meso-structure of lightweight sand-EPS bead soil (LSES) using CT[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006,27(12): 2 137 - 2 142.

- [6] 王庶懋, 高玉峰. EPS 块体动变形特性的室内试验研究 [J]. 岩土力学, 2006,27(10): 1 754 - 1 758.  
WANG Shu-miao, GAO Yu-feng. Laboratory test study on dynamic deformation characteristics of EPS block[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006,27(10): 1 754 - 1 758.
- [7] Hyodo M, Adrian F L, Noritaka A, et al. Undrained monotonic and cyclic shear behavior of sand under low and high confining stresses. [J]. **Soils and Foundations**, 2002, 42(3): 63 - 76.
- [8] Kwang S. Static and dynamic behavior of sands treated with chemical grouts and cementitious admixtures [Ph.D. Dissertation]. New Jersey: The State University of New Jersey, 1994.
- [9] Hardin B O, Drnevich V P. Shear modulus and damping in soils: measurement and parameter effects[J]. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE**, 1972, 198(6): 603 - 624.

### 上接第 1772 页

- unsaturated clay[J]. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 1995, 19(4): 249 - 265.
- [6] Philip J R, Vries D A. Moisture movement in porous materials under temperature gradients [J]. **Transactions of the American Geophysical Union**, 1957, 38:222 - 231.
- [7] De Vries D A. Simultaneous transfer of heat and moisture in porous media [J]. **Transactions of American Geophysical Union**, 1958, 39:909 - 916.
- [8] Milly P C D. A simulation analysis of thermal effects on evaporation from soil[J]. **Water Resources Research**, 1984,20:1 087 - 1 098.
- [9] 弗雷德隆德, 拉哈尔佐著, 陈仲颐, 张在明, 陈愈炯, 蒋国澄, 等译. 非饱和土土力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- [10] Penman H L. Natural evapotranspiration from open water, bare soil and grass[J]. **Proceedings of the Royal Society of London, (Series A)**, 1948, 193:120 - 146.
- [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] Ritchie J T, Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover[J]. **Water Resources Research**, 1972, 8(5):1 204 - 1 213.
- [14] Geo - Slope International Ltd. Geo - slope Office version 5.16. [R]. Calgary: Geo-Slope International Ltd. ,2003.
- [15] 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):36—40.
- [16] Fredlund D G, Anqing Xing, Shangyan Huang. Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve [J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1994, 31(4):533 - 546.
- [17] 周德培, 张俊云. 植被护坡工程技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.