

文章编号: 0559-9350(2007)06-0674-09

## 大气作用下膨胀土边坡的动态响应数值模拟

陈建斌<sup>1</sup>, 孔令伟<sup>1</sup>, 郭爱国<sup>1</sup>, 赵艳林<sup>2,3</sup>

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 湖北武汉 430071; 2. 广西大学土木建筑工程学院, 广西 南宁 530004

3. 桂林工学院土木工程系, 广西 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, 通过考虑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。采用该模型, 分析了在气候变化条件下, 不同坡比和不同覆盖条件下非饱和膨胀土边坡的各种动态响应。计算结果表明, 该模型能较好分析计算非饱和土表层的蒸发量及草皮对边坡土层含水率和变形的影响; 采用分阶段变渗透系数的方法, 能有效反映出降雨入渗和蒸发蒸腾过程中膨胀土所表现的不同渗透特性; 而边坡的安全系数随气候变化而波动, 降雨时边坡的稳定性比蒸发时低, 蒸发可提高表层土体吸力, 草皮覆盖亦有利于边坡的稳定性。

关键词: 大气—非饱和土相互作用模型; 膨胀土边坡; 动态响应; 变渗透系数; 数值模拟

中图分类号: TU443

文献标识码: A

在膨胀土地区, 常常会出现边坡、路基、房屋的渐进式破坏<sup>[1,2]</sup>。目前对大气与非饱和土相互作用的研究多集中在降雨入渗方面, 如 Ng 等<sup>[3]</sup>采用渗流有限元法分析了边坡在降雨作用和各种参数组合条件下的非饱和瞬态渗流; Cho 等<sup>[4]</sup>采用二维有限元流固耦合程序分析了边坡降雨入渗过程及边坡稳定性。对大气的蒸发效应影响研究, 最具代表性的是 Wilson 等<sup>[5]</sup>以热湿耦合控制方程为基础, 采用 Perman-Wilson 蒸发公式搭建的土体与大气之间的桥梁, 该模型为室内一维土柱蒸发试验所验证; Cui 等<sup>[6]</sup>在此基础上描述了土体的温度和吸力变化特征, 并考虑了降雨、温度和风速等对岩土介质力学性质的影响。Thomas 等<sup>[7]</sup>采用非饱和土力学流固耦合理论研究了大气作用下土体的变形问题, 分析了土体湿度与变形的季节性变化规律, 但未考虑实际蒸发和热效应; Alonso 等<sup>[8]</sup>采用热湿力耦合的有限元程序对在不同气候条件下路堤变形、含水率和温度进行了模拟, 但缺乏试验的有效佐证。膨胀土作为一类对气候变化极为敏感的典型非饱和土, 在降雨和蒸发过程中赋存着不同的水力特性, 且大气作用下的植被蒸腾对其水分变化的影响亦不容忽视。为此, 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, 分析水分迁移引发的非饱和土应力变形行为, 建立大气—非饱和土相互作用模型, 对大气长期作用下膨胀土边坡的动态响应进行有限元数值模拟, 并与现场实测结果类比验证模型。

## 1 大气—非饱和土相互作用模型

1.1 土壤热湿耦合非等温流水分运动方程 土壤的热湿耦合非等温流水分运动方程如下<sup>[9]</sup>:

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

收稿日期: 2006-07-10

基金项目: 国家重大基础研究前期研究专项(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(Q110301)

作者简介: 陈建斌(1974—), 男, 湖北武汉人, 博士, 工程师, 主要从事岩土工程方面的研究。E-mail: c1j2l3@tom.com

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

式中:  $D_v$  为蒸汽扩散系数;  $P_v$  为土中水蒸气压;  $k$  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;  $T$  为绝对温度;  $\lambda_l$  为土体的导热系数;  $\lambda_v$  为土的体积热容;  $Q_t$  为边界热量。

Edlefsen 于 1943 年提出热湿耦合控制方程中吸力变量  $\psi$  和  $P_v$  联系式<sup>[10]</sup>:

$$P_v = P_{vs} \left( e^{-\frac{\psi}{RT}} \right) = P_{vs} h_{rain} \quad (3)$$

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;  $\rho$  为水的密度;  $h_{rain}$  为空气相对湿度。

## 1.2 应力变形控制方程

$$d\epsilon_{ij} = \frac{1+\mu}{E} d(\sigma_{ij} - u_a) - \frac{\mu}{E} d(\sigma_{kk} - 3u_a) \hat{q} + \frac{d(u_a - u_w)}{H_t} \hat{q} \quad (4)$$

式中:  $\epsilon$  为变形;  $\sigma$  为应力;  $E$  为弹性模量;  $\mu$  为泊松比;  $H_t$  为与吸力相关的体积模量;  $u_a$  为孔隙气压力;  $u_w$  为孔隙水压力;  $\sigma_{ij}$  为 Kronecker 函数。

## 1.3 水流和温度边界条件

1.3.1 水流边界条件 降雨量采用实测数据, 蒸发量采用计算实际蒸发量的 Penman-Wilson 公式<sup>[11]</sup>

$$E = \frac{R_n + \eta E_a}{\Gamma + \eta A} \quad (5)$$

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;  $\eta$  为温度常数;  $E_a$  为潜在蒸发量,  $E_a = f(u) P_a (B - A)$ , 其中  $f(u) = 0.35(1 + 0.15u)$ ,  $u$  为风速,  $P_a$  为在蒸发面上空气的蒸气压,  $B$  为空气相对湿度的倒数,  $A$  为土表面相对湿度的倒数。

当有草皮覆盖时, 实际总蒸发量分为植物蒸腾量和土壤本身的蒸发量<sup>[12]</sup>, 即:

土壤表面蒸发量

$$ET = E [1 - (-0.21 + 0.7 \sqrt{LAI})] \quad (6)$$

植物蒸腾量

$$PT = E (-0.21 + 0.7 \sqrt{LAI}) \quad (7)$$

式中:  $LAI$  为植被的叶面积指数。

1.3.2 温度边界条件 采用 Wilson 公式<sup>[10]</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。

上述控制方程的有限元分析采用 Geoslope office 软件不同模块之间的组合来实现 (包括 Sigma  $w$ 、Vadose  $w$ ), 该软件可仿真非饱和土应力变形与热湿耦合渗流。

## 2 现场膨胀土边坡试验背景

在膨胀土广泛分布的广西南宁地区建立了两个膨胀土边坡的原位监测系统, 其中缓坡 I 坡度为  $16^\circ$ , 坡高 2.4m, 坡面分为裸土区和草皮覆盖区; 陡坡 II 坡度为  $21^\circ$ , 坡高 2.6m, 无草皮覆盖。试验方法及仪器采用 6 参数小型气象站、烘干法、温度传感器、测斜管、沉降板和双环渗透仪, 跟踪测试 2005 年 5 月 15 日 ~ 2006 年 1 月 8 日共 238d 之内边坡变形、含水率、温度等随气候的演化规律<sup>[12]</sup>。边坡的工程地质情况及物理力学性质指标见表 1, 其中红褐色黏土具有弱膨胀性, 灰白色黏土具有中 ~ 强膨胀性。

表 1 现场边坡工程地质条件及土体物理力学性质指标

| 厚度<br>/m  | 岩性描述                   | 密度/<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | 天然<br>含水率<br>(%) | 塑限<br>(%) | 塑性<br>指数<br>(%) | 黏粒<br>含量<br>(%) | 自由<br>膨胀率<br>(%) | 饱和渗透<br>系数/(m/s)      | 弹性<br>模量/<br>kPa  | 泊松<br>比 $\mu$ | C<br>/kPa | $\varphi$<br>/(°) |
|-----------|------------------------|-----------------------------|------------------|-----------|-----------------|-----------------|------------------|-----------------------|-------------------|---------------|-----------|-------------------|
| 0~0.5     | 根植土                    | 1.99                        | 14.7             | 18.4      | 15.9            | 22              |                  | $4.33 \times 10^{-7}$ | 11490             | 0.29          | 11.2      | 35.9              |
| 0.5~1.25  | 红褐色黏土, 可塑, 裂隙发育, 弱膨胀性  | 1.97                        | 25.2             | 22.4      | 23.2            | 40              | 55               | $5.87 \times 10^{-9}$ | 6210              | 0.31          | 14.7      | 30.5              |
| 1.25~1.85 | 灰白色黏土, 裂隙发育, 可塑, 中强膨胀性 | 1.89                        | 32.8             | 29.1      | 48.7            | 64              | 98               | $1.27 \times 10^{-9}$ | 4027              | 0.37          | 10.5      | 18.6              |
| 1.85~2.2  | 棕黄色黏土, 含分散铁锰结核, 硬塑状    | 1.97                        | 26.6             | 22.1      | 26.9            | 46              | 70               |                       | 5176              | 0.36          | 26.0      | 18.5              |
| 2.2~2.8   | 青灰色泥岩, 强风化             | 2.13                        | 19.6             | 16.3      | 18.1            | 24              |                  |                       | $6.3 \times 10^5$ | 0.28          | 55.4      | 37.5              |
| 2.8~5.5   | 粉土~粉细砂, 青灰色            | 2.11                        | 18.6             | 1.78      |                 |                 |                  |                       | $8.6 \times 10^6$ | 0.35          | 21.7      | 27.0              |

### 3 边坡动态响应数值模拟

采用大气-非饱和土相互作用模型, 对监测期大气作用下现场膨胀土边坡的各种动态响应进行数值模拟, 包括实际蒸发蒸腾量、土体温度、含水率、吸力、变形, 将计算结果与现场实测数据进行对比, 并采用极限平衡法分析边坡了稳定性。计算对象为边坡 I (裸土区、草皮区) 和边坡 II, 假设为二维平面问题, 沿边坡中部截取 3 个计算断面, 单元划分见图 1 和图 2, 计算时间总长为 238d, 时间步长为 1h, 共 5712 步, 记录步长为 24h。

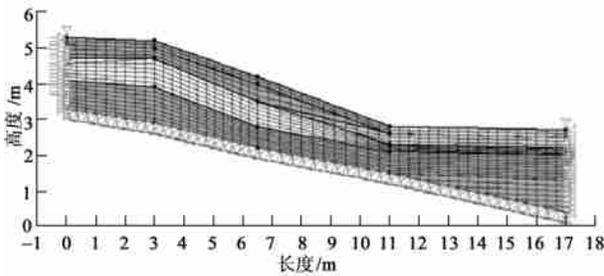


图 1 坡 I 计算模型(单位:m)

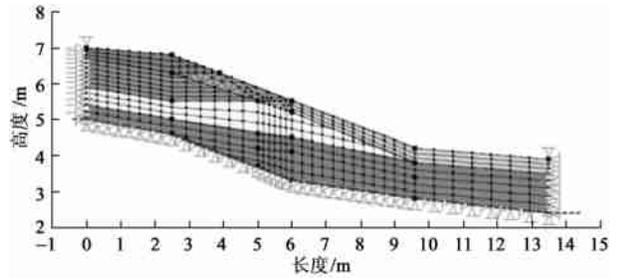


图 2 坡 II 计算模型(单位:m)

**3.1 初始和边界条件** 边坡初始应力场取为自重应力场, 据土层的工程地质条件, 下卧层中青灰色粉细砂呈现饱和状态, 吸力为零, 该层以上土体的吸力假定按静水压力线性增长。

**流量条件:** 在大气降雨条件下, 地表边界流量为降雨量。当单位降雨量超过土体的入渗能力时, 自动转换为定水头边界条件; 地表边界蒸发量用式(5)度量。降雨量和计算蒸发所需的气温、相对湿度、风速、净辐射量和降雨量等气象参数采用图 3 的现场实测值。

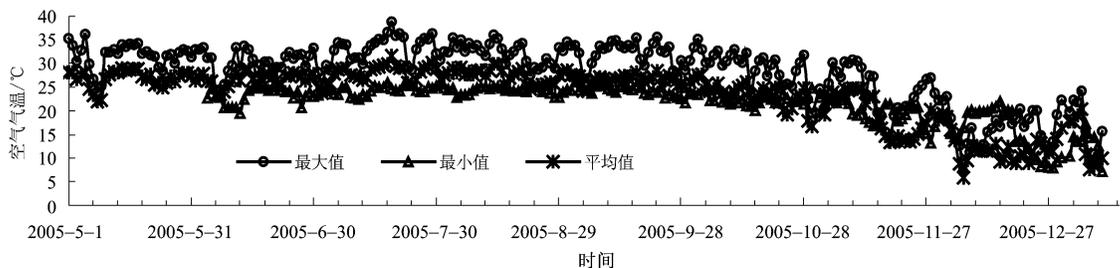
**温度边界条件:** 边坡坡顶和坡脚平台外假设不发生热量交换; 边坡底部上设定一个温度边界函数, 数据来自现场实测 (见图 4); 边坡坡面的温度边界条件用式(8)描述。

**位移边界条件:** 根据现场实测位移数据, 定义边坡坡顶外侧边界上的水平位移条件, 其中, 表层水平位移见图 5, 位移沿深度加大呈线性递减, 影响深度为 1.5m, 该边界的垂直位移设为零。边坡坡脚平台外边界假定固定不动, 底部青灰色泥岩亦作为不动层。

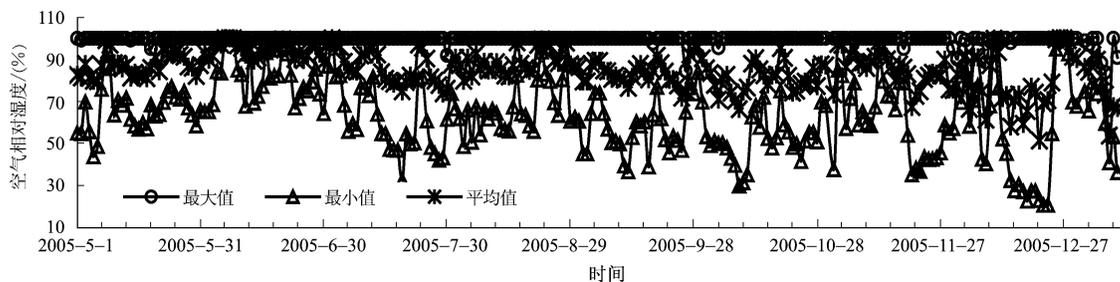
**3.2 土体热物理力学参数及植被生理参数** 现场边坡土体主要考虑表层根植土、红褐色黏土、灰白色黏土和棕黄色黏土 (见表 1), 其中棕黄色黏土可视为与灰白色黏土有相同的热力和水力参数。

**3.2.1 导热系数和体积热容** 导热系数  $\lambda_1$  和体积热容  $\lambda_v$  的定义参见农学上的概念, 本文采用的是 Johansen 方法<sup>[13]</sup> 和 De Yries 公式<sup>[10]</sup>, 建立土体导热系数和体积热容与含水率的关系曲线, 见图 6 和图 7。

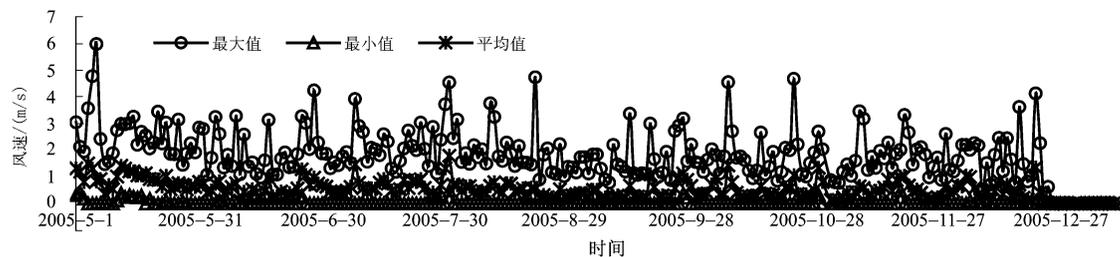
3.2.2 力学和水力参数 采用理想弹塑性模型。根据现场含水率和温度的实测结果<sup>[12]</sup>,认为表层膨胀土的强烈风化带在 40~60cm, 此处的膨胀土因经反复干湿循环而导致变形模量衰减, 假定降雨时为干湿循环试验后的弹性模量, 即表层红褐色黏土  $E=4267\text{kPa}$ , 灰白色黏土  $E=1135\text{kPa}$ ,  $\mu$  值不变。蒸发干



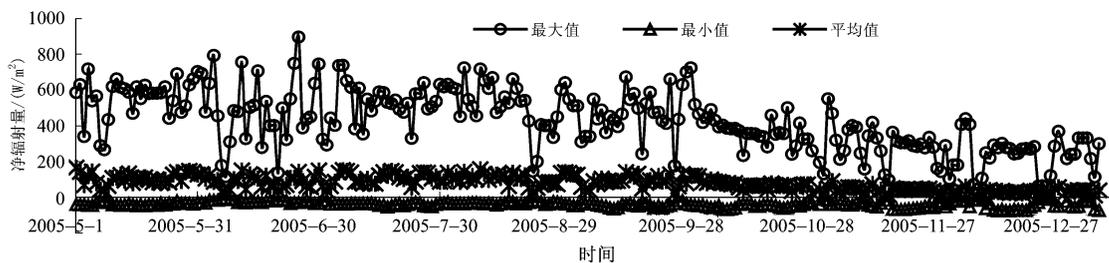
(a) 最大、最小和平均气温



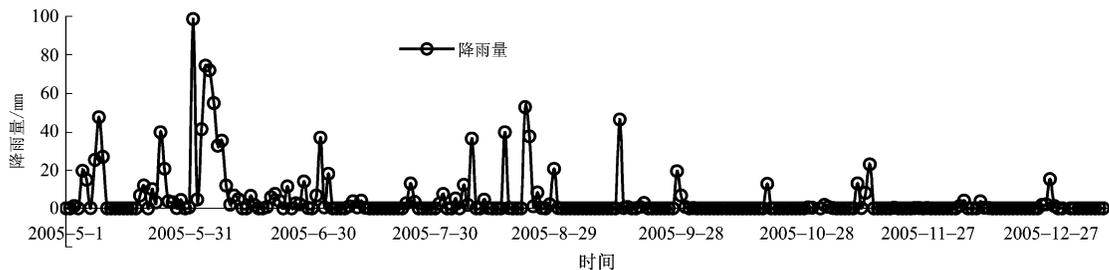
(b) 最大、最小和平均相对湿度



(c) 最大、最小和平均风速



(d) 最大、最小和平均净辐射量



(e) 降雨量

图 3 现场实测气象参数

燥时认为恢复到未经历干湿循环时的模量值。而与吸力相关的模量  $H_i$  控制了土体在非饱和状态时由于吸湿和脱湿所发生的体积变形, 在  $0 \sim 350\text{kPa}$  之间土体的  $H_i = 75000\text{kPa}$ 。

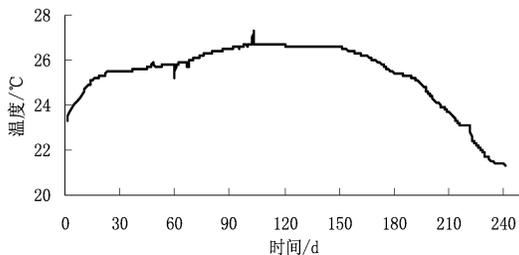


图4 边坡底部温度边界条件

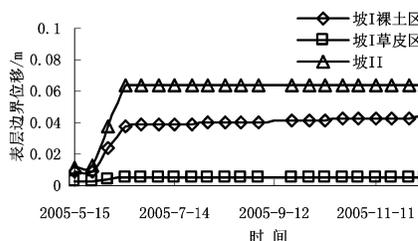


图5 边坡坡顶外侧水平位移边界条件

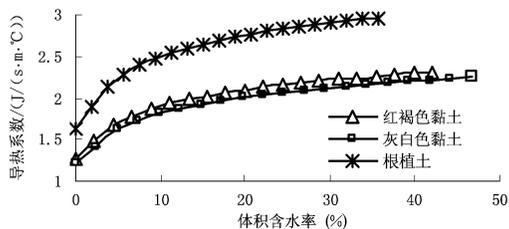


图6 导热系数函数曲线

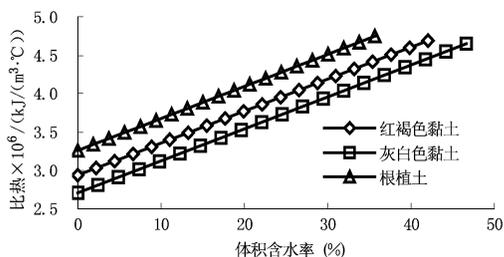


图7 体积热容函数曲线

红褐色黏土和灰白色黏土的土水特征曲线来自室内压力板试验, 采用 Fredlund 等<sup>[14]</sup> 的方法对高吸力值进行预测, 见图 8。根植土的土水特征曲线来自于颗分试验曲线为依据的经验性预测方法<sup>[15]</sup>。

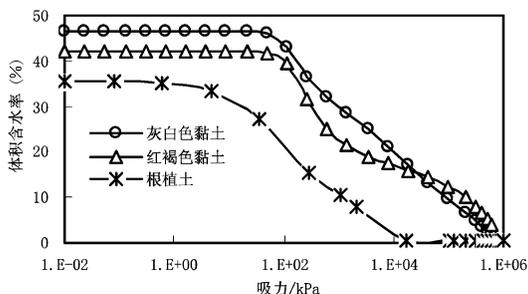


图8 土水特征曲线

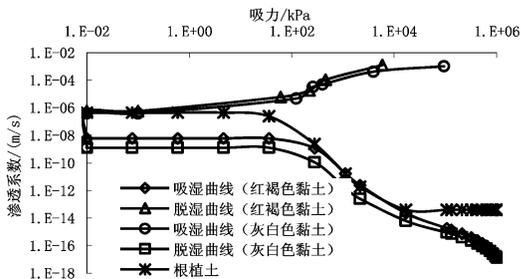


图9 渗透系数曲线

膨胀土在大气降雨和蒸发过程中, 由于裂隙的开合使其渗透性呈现不同的状态, 为尽量与实际吻合, 将分阶段变渗透系数用于大气-非饱和土相互作用模型中, 即降雨时表层膨胀土的渗透系数函数设为原位吸湿试验所得的渗透系数, 降雨结束后假定表层膨胀土趋于饱和, 裂隙闭合; 蒸发时, 表层膨胀土的渗透系数认为恢复到室内脱湿试验结果, 采用 Fredlund 等<sup>[14]</sup> 的方法进行预测, 见图 9 所示, 但根植土仍采用脱湿时的渗透系数函数。

3.2.3 植被的生理参数 草皮的绿色期定为 160d, 叶面积指数  $LAI$  最大设定为 1.0(图 10)。根深为地表以下 20cm 之内, 根部水分提取的限制吸力设为 1500kPa。

### 3.3 计算结果分析与对比

3.3.1 蒸发量 表 2 为现场监测各边坡不同部位的蒸发蒸腾量计算结果, 从表 2 可以看出, 由于水分限制, 实际蒸发量小于潜在蒸发量, 且边坡各个部位的蒸发基本一致, 即边坡的水分蒸发比较均匀。而边坡 II 坡顶处蒸发量之所以大于坡中和坡脚处, 是由于

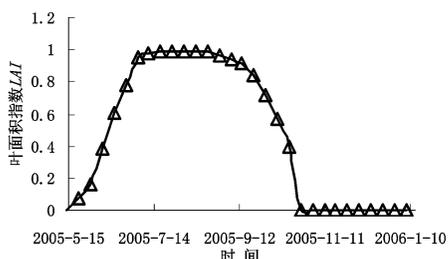


图10 叶面积指数 LAI 生长曲线

该处表层根植土的持水能力较差, 渗透性大于其它部位的表层膨胀土, 水分更易迁移所致, 可见土体本身的渗透性也是影响蒸发的一个重要因素; 边坡 I 草皮覆盖区的蒸发量明显大于其它两个边坡表层土性相同的部位, 植物蒸腾量占总腾量 20% 左右, 说明草皮覆盖对土体表层水分变化有较大影响。

表 2 大气作用下各边坡的蒸发蒸腾量对比(单位: mm)

| 边坡      | 潜在蒸发总量 | 计算蒸发量 |     |     | 计算植物蒸腾量 |     |     | 计算总腾量 |     |     |
|---------|--------|-------|-----|-----|---------|-----|-----|-------|-----|-----|
|         |        | 坡顶    | 坡中  | 坡脚  | 坡顶      | 坡中  | 坡脚  | 坡顶    | 坡中  | 坡脚  |
| 坡 I 裸土区 |        | 831   | 831 | 831 | 0       | 0   | 0   | 831   | 831 | 831 |
| 坡 I 草皮区 | 1504   | 693   | 691 | 704 | 209     | 208 | 217 | 902   | 899 | 921 |
| 坡 II    |        | 1243  | 825 | 876 | 0       | 0   | 0   | 1243  | 825 | 876 |

3.3.2 土体温度 各边坡计算的土体温度变化基本一致, 图 11 为边坡 II 坡中 10、20cm 深度处土温时程变化曲线。可见, 表层土温计算值与实测值具有相同的变化趋势。

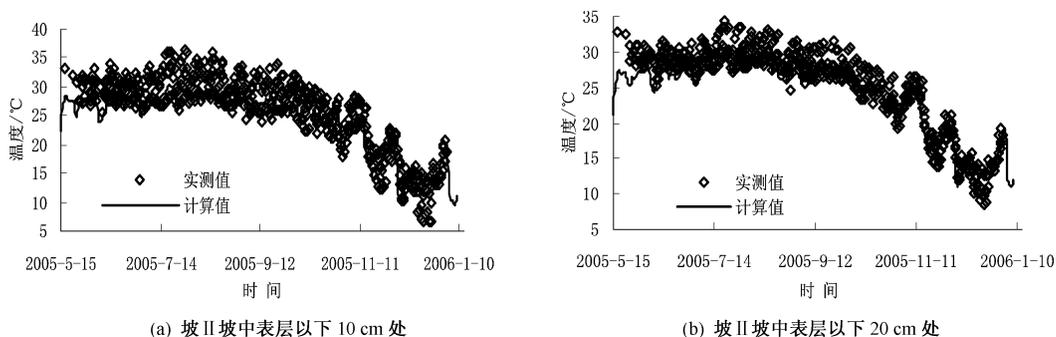


图 11 坡 II 坡中各深度处温度时程曲线

边坡坡中土温沿深度的变化曲线(见图 12)表明, 在太阳辐射量较大的 6、7 月份, 土体温度梯度较大, 而辐射量较小的 10 月和 12 月, 土体温度梯度较前者要小。

3.3.3 含水率 为便于计算所得的体积含水率与现场测试的重力含水率对比, 将体积含水率转换为重力含水率, 各边坡坡中边坡表层含水率与不同深度含水率计算结果如图 13 和图 14 所示。

从图中类比结果可以看出, 计算重力含水率在时间和深度方向上与实测值变化趋势一致, 且数值上也较接近, 由于现场土层分布并非完全均匀, 导致计算和实测之间存在一定的偏差。

从计算重力含水率沿深度的分布来看, 大气降雨和蒸发对边坡土层 50cm 左右深度内的直接影响剧烈。对从坡 I 裸土区和草皮区含水率分布(图 13、图 14)看, 草皮覆盖下表层的含水率在降雨时要略大于裸土区, 在蒸发时要小于裸土区, 充分展现出植物在降雨时水分截留作用和蒸发时水分提取作用。

3.3.4 边坡变形 图 15 和图 16 为各边坡关键部位的表层水平位移和垂直沉降计算结果, 由于 2005 年 6 月初发生了强降雨, 导致坡 I 和坡 II 发生了较大的变形, 图 17 与图 18 为 2005 年 6 月 9 日边坡坡顶沿深度方向上的水平位移及相应的位移等值线图。

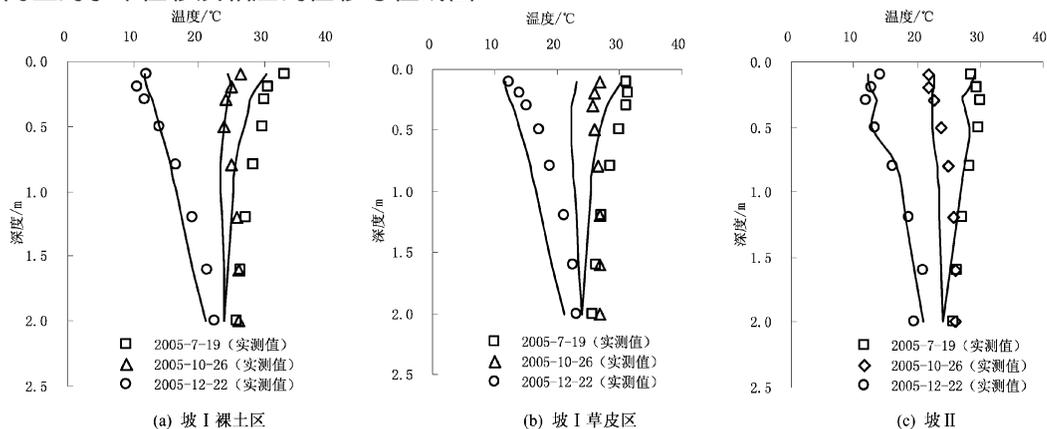
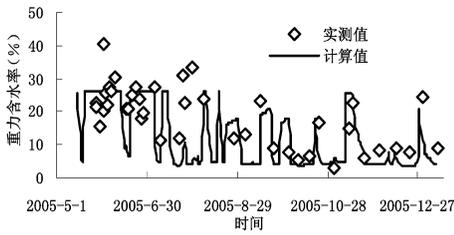
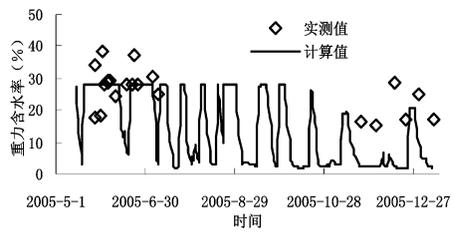


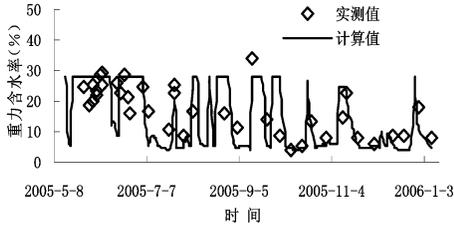
图 12 边坡坡中沿深度方向上温度分布



(a) 坡 I 裸土区

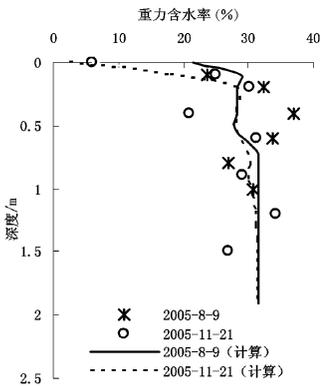


(b) 坡 I 草皮区

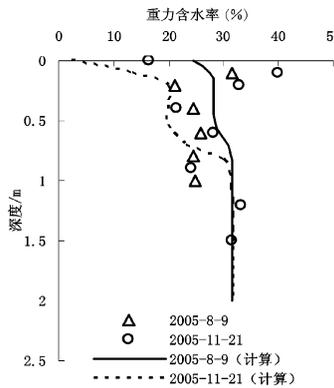


(c) 坡 II

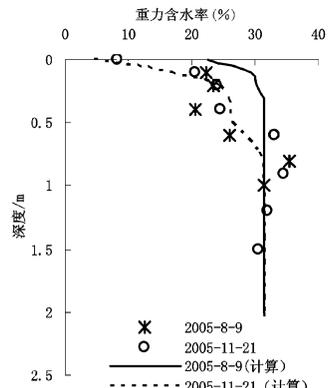
图 13 边坡坡中表层重力含水率时程曲线



(a) 坡 I 裸土区



(b) 坡 I 草皮区



(c) 坡 II

图 14 边坡坡中沿深度方向上重力含水率分布

从图 15 ~ 图 17 可看出, 边坡变形与实测值变化趋势吻合, 由于计算采用的理想弹塑性本构模型难以全面反映膨胀土的性状, 使得在变形量级上尚存在较大差异; 坡 I 裸土区和坡 II 在 2005 年 6 月初强降雨时变形较大, 而坡 I 草皮区的变形却很小, 这是草皮表面流量值较稳定所致。从图 18 的坡 II 变形等值线看, 边坡变形主要集中在含水率变化较大的表层, 而水平变形在坡中处变化明显。

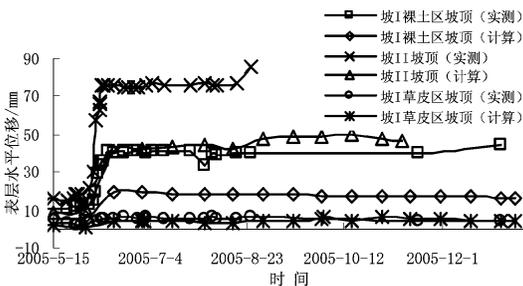


图 15 边坡计算和实测表层水平变形对比

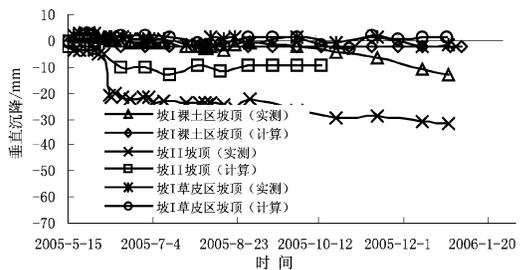


图 16 边坡计算和实测垂直沉降对比

3.3.5 边坡稳定性分析 考虑到膨胀土干湿循环的强度衰减效应,特别是久旱强降雨时,边坡表层饱和软化,强度急剧降低,在强度参数选择时,降雨时大气影响深度内的膨胀土用扰动膨胀土快剪试验值( $c=0.7\text{kPa}$ ,  $\varphi=18.7^\circ$ ),蒸发时用原状土试验值(见表1), $\varphi^b$ 取 $11.5^\circ$ 。图19与图20为用Slope/w程序计算的各边坡在监测期内稳定性变化规律及坡II强降雨最危险滑动面。

各边坡安全系数  $F_{os}$  时程曲线(图19)表明,边坡安全系数随气候而变化,降雨时的稳定性低于蒸发时,蒸发使表层土的吸力增大;坡I草皮区因植物蒸腾导致其表层土的吸力比坡I裸土区高,边坡稳定性也有所提高。边坡最危险滑动面位置(图20)则展现出,膨胀土边坡破坏主要以表层滑动为主,这与现场观测的滑坡相吻合<sup>[12]</sup>。

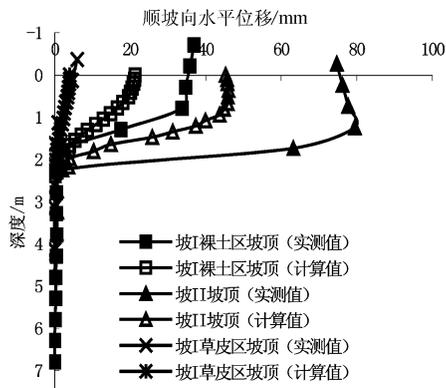


图17 边坡深度方向上计算和实测水平位移对比

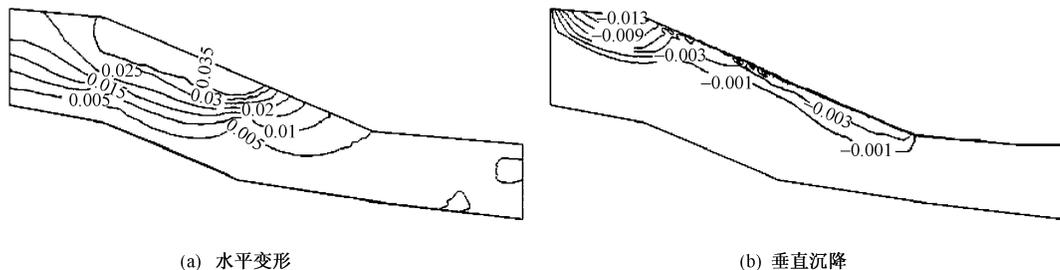


图18 坡II变形等值线图(单位:m)

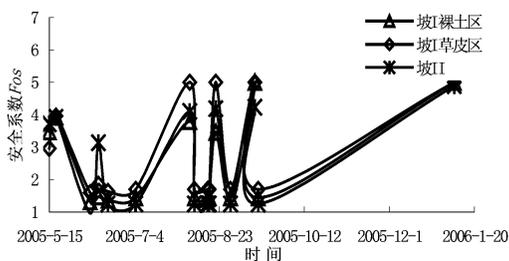


图19 边坡安全系数时程变化曲线

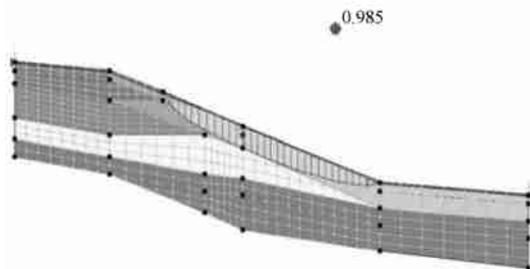


图20 坡II最危险滑动面( $F_{os}=0.985$ )

## 4 结论

(1)采用大气-非饱和土相互作用模型,可计算非饱和土表层的蒸发量及草皮对边坡土层含水率和变形的影响,草皮覆盖能增大非饱和土的蒸发蒸腾量,在降雨时提高表层土体含水率,蒸发时由于植物根部水分提取而降低表层土体含水率;(2)采用分阶段变渗透系数的方法,能有效反映出降雨入渗和蒸发蒸腾过程中膨胀土所表现的不同渗透特性,通过计算结果和现场监测数据的对比,验证了该方法的可靠性;(3)边坡的安全系数随大气降雨和蒸发而波动,降雨时边坡的稳定性比蒸发时低,蒸发可提高边坡稳定性;草皮覆盖有利于提高表层土体吸力,在绿色期内边坡稳定性有所增大。

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] Blight G E. Interaction between the atmosphere and the earth[J]. Geotechnique, 1997, 47(4): 715—766.
- [ 2 ] 缪林昌,刘松玉.南阳膨胀土的水分特征和强度特性研究[J]. 水利学报, 2002, (7): 87—92.
- [ 3 ] Ng C W W, Shi Q. A numerical investigation of the stability of unsaturated soil slopes subjected to transient seepage[J].

- Computer and Geotechnics, 1998, 22(1): 1—28.
- [ 4 ] Cho S E, Lee S R. Instability of unsaturated soil slopes due to infiltration[ J ] . Computers and Geotechnics, 2001, 28(3): 185—208.
- [ 5 ] 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.
- [ 6 ] Cui Y J, Lu Y F, Delage P, Riffard M. Field simulation of in situ water content and temperature changes due to ground-atmospheric interactions[ J ] . Geotechnique, 2005, 55(7): 557—567.
- [ 7 ] 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.
- [ 8 ] Alonso E E, Canete A, Olivella S. Moisture transfer and deformation behavior of pavements: effect of climate, materials and drainage[ A ] . Proceedings of the 3rd International Conference on Unsaturated soils[ C ] . Recife 2, 2002: 671—677.
- [ 9 ] Milly P C D. A simulation analysis of thermal effects on evaporation from soil[ J ] . Water Resource Research, 1984, 20: 1087—1098.
- [ 10 ] 弗雷德隆德, 拉哈尔佐. 非饱和土力学[ M ] . 陈仲颐等译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- [ 11 ] 陈建斌, 孔令伟, 赵艳林, 吕海波. 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.
- [ 12 ] 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.
- [ 13 ] Johansen O. Thermal Conductivity of Soils[ M ] . Trondheim, Norway, 1975.
- [ 14 ] Fredlund D G, Xing Anqing, Huang Shangyan. Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve[ J ] . Canadian Geotechnical Journal, 1994, 31(4): 533—546.
- [ 15 ] Arya L M, Paris J F. A physicoempirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data[ J ] . Soil Science Society of America Journal, 1981, 45: 1023—1030.

## Numerical simulation of dynamic response of expansive soil slope to atmospheric conditions

CHEN Jian-bin<sup>1</sup>, KONG Ling-wei<sup>1</sup>, GUO Ai-guo<sup>1</sup>, ZHAO Yan-lin<sup>2,3</sup>

(1. Institute of Rock and Soil Mechanics, CAS, Wuhan 430071, China;

2. Guanxi University, Nanning 530004, China; 3. 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, a model expressing the interaction between atmosphere and unsaturated soil is established with the actual evaporation and vegetation transpiration adopted as the boundary condition. The model was applied to numerically simulate the dynamic response of expansive soil slope of various slope ratio and coverage to long-term action of atmosphere. It is found that by using this model the unsaturated soil surface evaporation and the effect of grass coverage on soil moisture and slope deformation can be well analyzed and the different infiltration behaviors of expansive soil in the process of rainfall infiltration and evapotranspiration can be reflected if the stage changeable permeability coefficient method is adopted. The slope safety factor fluctuates with the changes of climate. Moreover, the stability of slope under the condition of rainfall is lower than that of evaporation due to the increase of surface soil suction, and the grass coverage is also helpful to improve the stability of the slope.

**Key words:** interaction model of atmosphere-unsaturated soil; expansive soil slope; dynamic response; changeable permeability coefficient; numerical simulation

(责任编辑: 韩昆)