

# 非饱和膨胀土的结构损伤模型及其 在土坡多场耦合分析中的应用\*

卢再华<sup>1,2</sup>, 陈正汉<sup>1,3</sup>, 方祥位<sup>1</sup>, 郭剑峰<sup>1</sup>, 周海清<sup>1</sup>

(1. 解放军后勤工程学院 建筑工程系, 重庆 400041;

2. 解放军海军工程大学 理学院, 武汉 430033;

3. 西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室, 重庆大学, 重庆 430033)

(本刊编委陈正汉来稿)

**摘要:** 针对原状膨胀土对气候变化反映敏感的特点和其具有胀缩性、裂隙性、超固结性等力学特性, 以非饱和土力学和损伤力学为基础, 建立了一个非饱和膨胀土的弹塑性损伤本构模型及相应的固结模型。把原状膨胀土看成是由未损部分和损伤部分的复合体, 未损部分用非饱和土的非线性本构关系描述, 损伤部分用损伤演化方程和两个屈服面(即, 加载屈服面和剪切屈服面)描述。其中的损伤演化方程包括加载引起的损伤和干湿循环引起的损伤两个方面, 用作者研制的 CT\_三轴试验确定。设计了相应的有限元程序 UESEPC; 对非饱和膨胀土边坡进行了三相多场耦合问题的数值分析。分析分为 4 个阶段, 得到了边坡在每一分析阶段的应力场、位移场、孔隙水压力场、孔隙气压力场、含水量场、基质吸力场、结构损伤演化场和塑性区扩展的动态图, 较好地揭示了膨胀土边坡在开挖和气候变化条件下逐渐发生失稳滑动的现象及其机理。

**关键词:** 非饱和膨胀土; 弹塑性损伤模型; 固结; 边坡; 降雨; 蒸发; 数值分析

**中图分类号:** TU435 **文献标识码:** A

## 引言

膨胀土在我国分布很广, 涉及 10 多个省区。膨胀土具有超固结性、胀缩性和裂隙性, 是一种典型的非饱和土, 其变形和强度随气候条件而剧烈变化, 对工程危害极大, 被称为岩土工程中的“癌症”, 很难治理。正在建设中的南水北调中线工程在豫冀两省要通过 170 km 的膨胀土地区, 输水干渠边坡的变形和稳定问题是工程界十分关切的事。已有的研究成果表明, 膨胀土边坡在开挖完成后的初期是稳定的, 以后在气候反复变化条件下才逐渐发生失稳滑动。因此, 只有对膨胀土边坡进行气候变化过程中的三相多场耦合分析, 才能动态模拟其从稳定到失稳的全过程, 揭示土坡的破坏机理。

为了进行分析计算, 首先必须建立非饱和膨胀土的本构模型和固结模型。Gens 和 Alonso

\* 收稿日期: 2005\_12\_07; 修订日期: 2006\_04\_11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10372115)

作者简介: 卢再华(1972—), 男, 江西人, 副教授, 博士(Tel: + 86\_27\_61285758;

陈正汉(1947—), 男, 陕西南郑人, 教授, 博士(联系人, Tel: + 86\_23\_68597849; E\_mail: chen-zhengan47@163.com)。

曾提出了一个膨胀土弹塑性概念模型(膨胀土  $G_A$  模型)<sup>[1]</sup>。该模型只能描述重塑膨胀土,对描述原状膨胀土的特性无能为力。能同时反映膨胀土的裂隙性、湿胀干缩变形、软化和剪胀特性的本构模型尚未见报道。

根据原状膨胀土在三轴剪切试验过程中的 CT 扫描结果<sup>[2,3]</sup>: 剪切前试样断面相对较完整; 随剪切进行, 裂隙和空洞等结构损伤所占比例逐渐增加; 剪切到破坏状态后, 土样断面比较破碎, 结构损伤的演化较明显。因此, 本文以非饱和土理论与复合体损伤理论为基础, 建立原状膨胀土的弹塑性损伤本构模型及相应的固结模型, 并对膨胀土边坡在气候变化过程中的三相多场耦合问题进行数值模拟分析。

## 1 非饱和原状膨胀土骨架的弹塑性损伤本构关系

复合体损伤理论把土骨架看成一种复合材料, 其本构关系包括三方面内容: ①相对破碎土体的应力应变关系; ②相对完整土体的应力应变关系; ③受力与气候变化过程中完整土体转化为破碎土体的变化规律, 即结构损伤的演化方程。对原状非饱和膨胀土, 其复合体损伤模型的上述 3 个方面分析如下。

### 1.1 相对破碎土体的应力应变关系

相对破碎的膨胀土受力后的塑性变形大, 可采用弹塑性模型描述。膨胀土  $G_A$  模型能描述膨胀土的胀缩性, 但土体变形分为微观结构变形和宏观结构变形两个层次, 需分别计算两个层次的变形才能得到土体总变形, 模型比较复杂。作者曾对膨胀土  $G_A$  模型进行了改进<sup>[4]</sup>, 并将殷宗泽提出的抛物线剪切屈服面引入到该模型中<sup>[5]</sup>, 使其能反映膨胀土的剪胀特性和反复胀缩特性, 可用于描述相对破碎膨胀土的应力应变关系, 基本内容如下

弹性变形

$$d\varepsilon_v^e = d\varepsilon_{vp}^e + d\varepsilon_{vs}^e, \quad d\varepsilon_s^e = (1/3G)dq, \quad (1)$$

$$d\varepsilon_{vp}^e = \frac{k}{v} \frac{dp}{p}, \quad d\varepsilon_{vs}^e = \frac{k_s}{v} \frac{ds}{s + p_{atm}}, \quad (2)$$

式中  $p$ 、 $q$ 、 $s$  分别称为净平均应力、偏应力和基质吸力(以下简称吸力);  $d\varepsilon_v^e$ 、 $d\varepsilon_s^e$  分别是弹性体变增量、弹性偏应变增量;  $d\varepsilon_{vp}^e$ 、 $d\varepsilon_{vs}^e$  分别为与净平均应力变化相关的弹性体变增量、与吸力变化相关的弹性体变增量;  $G$  为剪切模量;  $k$  是与净平均应力加载相关的弹性刚度系数;  $v$  是土的比容;  $k_s$  是与吸力加载相关的弹性刚度系数;  $p_{atm}$  为大气压力。

湿胀变形 膨胀土的湿胀变形较大, 且膨胀变形随围压增大而减小。为此模型引入膨胀函数  $f_d$  来计算吸力降低时的弹性体变增量。

$$d\varepsilon_{vs,d}^e = \frac{f_d k_s}{v} \frac{ds}{s + p_{atm}} \quad (ds < 0), \quad f_d = t_d \left[ 1 - \frac{p}{p_0} \right]^n, \quad (3)$$

其中  $d\varepsilon_{vs,d}^e$  是吸力减小引起的湿胀变形,  $t_d$  是膨胀系数, 反映土的膨胀性强弱;  $p_0$  为某吸力下屈服净平均应力;  $n$  为膨胀因子, 反映膨胀变形随围压衰减快慢程度。

塑性变形 改进的膨胀土  $G_A$  模型的屈服面如图 1 所示, 包含两个屈服面: 加载屈服面(LY)和剪切屈服面(SY)。分别用  $f_1$  和  $f_2$  表示加载屈服面和剪切屈服面, 则它们可用以下方程表达

$$f_1(p, q, s, p_0^*) = q^2 - M^2(p + p_s)(p_0 - p) = 0, \quad (4)$$

$$p_s = K_s, \quad (5)$$

$$p_0/p_c = \left[ p_0^*/p_c \right]^{[M(0)-k]/[M(s)-k]}, \quad (6)$$

$$\lambda(s) = \lambda(0)[(1-r)\exp(-\beta s) + r], \quad (7)$$

$$f_2(p, q, s, \epsilon_s^p) = (aq/G) \sqrt{q/[M_2(p + p_s) - q]} - \epsilon_s^p = 0, \quad (8)$$

式中  $p_0^*$  是饱和状态下的屈服净平均应力;  $M$  是临界状态线(CSL)的斜率;  $p_s$  是某吸力下临界状态线在  $p$  轴上截距;  $\kappa$  为反映粘聚力随吸力增长的参数;  $p_c$  为参考应力;  $\lambda(s)$  是某吸力下净平均应力加载屈服后的压缩指数, 当土饱和时, 即为  $\lambda(0)$ ;  $r$  为与土最大刚度相关的常数,  $r = \lambda(s \rightarrow \infty) / \lambda(0)$ ;  $\beta$  为控制土刚度随吸力增长速率的参数;  $a$  是反映膨胀性强弱的参数;  $M_2$  是比  $M$  略大的参数;  $\epsilon_s^p$  为塑性偏应变; 模型采用关联流动法则, 剪切屈服面 SY 的硬化参量为塑性偏应变  $\epsilon_s^p$ , LY 屈服面的硬化规律为

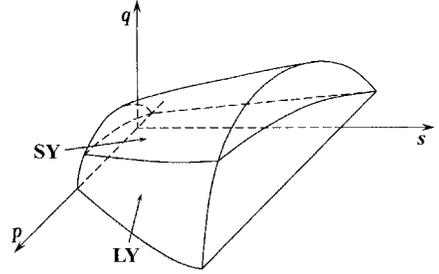


图1 改进的膨胀土 G\_A 模型的屈服面图

$$dp_0^*/p_0^* = [v/(\lambda(0) - k)] d\epsilon_s^p \quad (9)$$

应当指出, 在吸力增加时膨胀土的干缩变形有塑性体变, 描述这一特点可引如吸力增加屈服面<sup>[1]</sup>。

### 1.2 相对完整土体的应力应变关系

对于相对完整的膨胀土受力作用的本构关系, 本文采用非饱和土增量非线性弹性模型描述<sup>[6]</sup>, 膨胀土的湿胀变形仍采用膨胀函数  $f_d$  反映。膨胀土切线弹性模量  $E_t$  的表达式为

$$E_t = p_{atm} \left[ 1 - \frac{R_f(1 - \sin \phi')(\sigma_1 - \sigma_3)}{2(c' + \tan \phi^b) \cos \phi' + 2(\sigma_3 - u_a) \sin \phi'} \right]^2 \times (k^0 + m_1 s) \left( \frac{\sigma_3 - u_a}{p_{atm}} \right)^m, \quad (10)$$

式中  $R_f$  为破坏比;  $c'$ 、 $\phi'$ 、 $\phi^b$  分别为膨胀土的有效凝聚力、有效内摩擦角和吸力内摩擦角;  $k^0$ 、 $m$  和  $m_1$  都是土性参数; 其物理意义如下: 根据膨胀土三轴剪切试验结果<sup>[7]</sup>, 归一化的初始弹性模量  $\lg(E_t/p_{atm})$  和归一化的净平均应力  $\lg(\sigma_3 - u_a)/p_{atm}$  的关系是直线, 用下式表达

$$E_t = k p_{atm} [(\sigma_3 - u_a)/p_{atm}]^m, \quad (11)$$

其中,  $k$  与归一化的吸力  $s/p_{atm}$  也呈线性关系

$$k = k^0 + m_1 \left( s/p_{atm} \right). \quad (12)$$

另外, 南阳膨胀土在不同吸力及不同净室压力情况下的切线泊松比  $\mu_t$  的变化不大, 近似地可视为常数。

### 1.3 结构损伤演化方程

根据南阳原状膨胀土在三轴剪切试验过程中的 CT 扫描结果<sup>[8]</sup>, 膨胀土结构损伤演化方程为

$$D = D_0 + \exp[(p_0/p) \epsilon_s^{p_{atm}}] - 1 \quad (D \leq 1), \quad (13)$$

式中  $D_0$  为土样的初始损伤值;  $p_0$  为原状膨胀土的前期固结压力,  $\epsilon_s$  为偏应变。吸力较低时(小于大气压力)  $s$  取大气压力, 这样低吸力时由方程(13)描述的曲线仍为指数函数形式。

除了剪切引起的损伤演化外, 反复的湿胀干缩也会引起膨胀土的裂隙损伤演化, 文献[9]根据干湿循环条件下膨胀土裂隙演化的 CT 试验结果, 得到了干湿循环过程中裂隙损伤演化方程如下

$$D = \exp(A \epsilon_s^Z), \quad (14)$$

式中  $A$  为反映膨胀土的膨胀性强弱的系数;  $Z$  为控制式(14)所描述的曲线形状的参数;  $\epsilon_s$  为干湿循环过程中累计干缩体变。

总的损伤演化方程为

$$D = D_0 + \exp[(p_0/p) \varepsilon_s^{p/p_{atm}}] - 1 + \exp(A \xi_v^Z) \quad (15)$$

增量形式为

$$dD = L_1^T d\varepsilon + L_2 ds, \quad (16)$$

式中

$$L_1 = \frac{p_0}{9p_{atm}p} \varepsilon_s^{p/p_{atm}-2} \exp\left[\frac{p_0}{p} \varepsilon_s^{p/p_{atm}}\right] \times \begin{pmatrix} 4\varepsilon_x - 2\varepsilon_y - 2\varepsilon_z \\ 4\varepsilon_y - 2\varepsilon_x - 2\varepsilon_z \\ 4\varepsilon_z - 2\varepsilon_x - 2\varepsilon_y \\ 3\gamma_{xy} \\ 3\gamma_{yz} \\ 3\gamma_{xz} \end{pmatrix}, \quad (17)$$

$$L_2 = AZ \xi_v^{(Z-1)} \exp(A \xi_v^Z) [k_s / (v(s + p_{atm}))]^* \quad (18)$$

### 1.4 膨胀土总体的应力应变关系

根据复合体损伤理论

$$d\sigma^a = (1 - D)d\sigma^i + Dd\sigma^d + dD\sigma^r, \quad (19)$$

其中

$$\sigma^r = \sigma^d - \sigma^i, \quad (20)$$

式(19)中左边为土体总的应力增量; 右边第1项为相对完整土体的应力增量; 右边第2项为相对破碎土体的应力增量; 右边第3项为相对完整土体转化为相对破碎土体引起的应力差值。

相对破碎土体采用弹塑性模型, 土的变形包括弹性和塑性两部分。在非饱和土中, 除了净平均应力外, 吸力对这两部分变形也有贡献, 类似于文献[10]的推导, 可得下面的基本方程

$$d\sigma^d = D_{ep} d\varepsilon + F_{sep} ds \quad (21)$$

式中

$$D_{ep} = D_e - \frac{D_e \left( \frac{\partial f}{\partial \sigma} + \frac{1}{3} m \frac{\partial f}{\partial s} \right) \left( \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right)^T D_e}{\left[ -F' \left( \frac{\partial H}{\partial \varepsilon^p} \right)^T + \left( \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right)^T D_e \right] \left( \frac{\partial f}{\partial \sigma} + \frac{1}{3} m \frac{\partial f}{\partial s} \right)}, \quad (22)$$

$$F_{sep} = -D_e D_{es}^{-1} - \frac{D_e \left( \frac{\partial f}{\partial \sigma} + \frac{1}{3} m \frac{\partial f}{\partial s} \right) \left( \frac{\partial f}{\partial s} - \left( \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right)^T D_e D_{es}^{-1} \right)}{\left[ -F' \left( \frac{\partial H}{\partial \varepsilon^p} \right)^T + \left( \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right)^T D_e \right] \left( \frac{\partial f}{\partial \sigma} + \frac{1}{3} m \frac{\partial f}{\partial s} \right)}, \quad (23)$$

$f$  为屈服准则;  $F' = df/dH$ ,  $H$  为硬化参数;  $m = \{1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0\}^T$ 。若屈服发生在LY屈服面,  $f$  取屈服函数 $f_1$ ,  $H$  为塑性体变 $\varepsilon_v^p$ ; 若发生SY屈服,  $f$  取屈服函数 $f_2$ ,  $H$  为塑性剪应变 $\varepsilon_s^p$ 。若LY和SY同时屈服, 则

$$d\varepsilon^p = (d\varepsilon^p)^{LY} + (d\varepsilon^p)^{SY}, \quad (24)$$

相应地

$$D_{ep} = D_e - D_e d_1 \frac{b_1^T a_{22} - b_2^T a_{12}}{a_{11} a_{22} - a_{12} a_{21}} - D_e d_2 \frac{b_2^T a_{11} - b_1^T a_{21}}{a_{11} a_{22} - a_{12} a_{21}}, \quad (25)$$

$$F_{sep} = -D_e D_{es}^{-1} - D_e d_1 \frac{c_1 a_{22} - c_2 a_{12}}{a_{11} a_{22} - a_{12} a_{21}} - D_e d_2 \frac{c_2 a_{11} - c_1 a_{12}}{a_{11} a_{22} - a_{12} a_{21}}, \quad (26)$$

式中

$$b_1^T = \left( \frac{\partial f_1}{\partial \sigma} \right)^T D_e, \quad b_2^T = \left( \frac{\partial f_2}{\partial \sigma} \right)^T D_e, \quad c_1 = \frac{\partial f_1}{\partial s} - \frac{\partial f_1}{\partial \sigma} D_e D_{es}^{-1},$$

$$\begin{aligned}
c_2 &= \frac{\partial f_2}{\partial s} - \left[ \frac{\partial f_2}{\partial \sigma} \right]^T \mathbf{D}_e \mathbf{D}_{es}^{-1}, \quad a_{11} = A_1 + \mathbf{b}_1^T \left[ \frac{\partial f_1}{\partial \sigma} + \frac{1}{3} \mathbf{m} \frac{\partial f_1}{\partial s} \right], \\
a_{22} &= A_2 + \mathbf{b}_2^T \left[ \frac{\partial f_2}{\partial \sigma} + \frac{1}{3} \mathbf{m} \frac{\partial f_2}{\partial s} \right], \quad a_{12} = \mathbf{b}_1^T \left[ \frac{\partial f_2}{\partial \sigma} + \frac{1}{3} \mathbf{m} \frac{\partial f_2}{\partial s} \right], \\
a_{21} &= \mathbf{b}_2^T \left[ \frac{\partial f_1}{\partial \sigma} + \frac{1}{3} \mathbf{m} \frac{\partial f_1}{\partial s} \right], \quad A_1 = - \frac{\partial f_1}{\partial H_1} \left[ \frac{\partial H_1}{\partial \varepsilon^p} \right]^T \left[ \frac{\partial f_1}{\partial \sigma} + \frac{1}{3} \mathbf{m} \frac{\partial f_1}{\partial s} \right], \\
A_2 &= - \frac{\partial f_2}{\partial H_2} \left[ \frac{\partial H_2}{\partial \varepsilon^p} \right]^T \left[ \frac{\partial f_2}{\partial \sigma} + \frac{1}{3} \mathbf{m} \frac{\partial f_2}{\partial s} \right],
\end{aligned}$$

其中的  $H_1$  和  $H_2$  分别为  $\varepsilon_v^p$  和  $\varepsilon_s^p$ 。

相对完整土体采用增量非线性弹性模型

$$d\sigma^i = \mathbf{D}_e d\varepsilon + \mathbf{F}_{se} ds, \quad (27)$$

$$\text{其中} \quad \mathbf{F}_{se} = - \mathbf{D}_e \mathbf{D}_{es}^{-1}. \quad (28)$$

将相对破碎土体的应力增量、相对完整土体的应力增量和损伤增量表达式代入式(19), 即得到土体总的应力增量表达式

$$d\sigma^a = (1-D)(\mathbf{D}^i d\varepsilon^i + \mathbf{F}_s^i ds^i) + D(\mathbf{D}^d d\varepsilon^d + \mathbf{F}_s^d ds^d) + \sigma^r (\mathbf{L}_1^T d\varepsilon^i + L_2 ds^i). \quad (29)$$

为了和弹性刚度矩阵  $\mathbf{D}$  区别起见, 损伤变量  $D$  在此处改记为  $D$ 。式中上标  $a, i$  和  $d$  分别代表总的土体、相对完整土体和相对破碎土体。假设整个土体单元中相对完整土和相对破碎土在受力过程中的应变和吸力协调变化, 则得到

$$\begin{aligned}
d\sigma &= ((1-D)\mathbf{D}^i + D\mathbf{D}^d + \sigma^r \mathbf{L}_1^T) d\varepsilon + ((1-D)\mathbf{F}_s^i + D\mathbf{F}_s^d + \sigma^r L_2) ds = \\
&\quad \mathbf{D}^{dmg} d\varepsilon + \mathbf{F}_s^{dmg} ds,
\end{aligned} \quad (30)$$

式中,  $\mathbf{D}^{dmg}$  为与应变相关的弹塑性损伤刚度矩阵;  $\mathbf{F}_s^{dmg}$  为与吸力相关的弹塑性损伤刚度矩阵。

## 2 非饱和土中气相和液相的本构关系

用复合体损伤理论只能建立土骨架的本构关系。对非饱和土而言, 还必须建立气相和液相的本构关系。通常, 假设水、气运动都可用达西定律描述, 气相服从理想气体的状态方程。水量变化按文献[7]提出的增量非线性模型计算, 方程如下

$$d\varepsilon_w = \frac{dp}{K_{wt}} + \frac{ds}{H_{wt}}, \quad (31)$$

$$K_{wt} = (1 + e_0)/(G_s \cdot \beta_s), \quad (32)$$

$$H_{wt} = - (\ln 10) \frac{(s + p_{atm}) \cdot (1 + e_0)}{G_s \cdot \beta_p}, \quad (33)$$

式中  $K_{wt}$ 、 $H_{wt}$  分别是与净平均应力相关的水的体积模量和与吸力相关的水的体积模量;  $e_0$ 、 $G_s$  分别是初始孔隙比、土粒比重。  $\beta_p$  和  $\beta_s$  分别为与净平均应力相关的水量变化指标、与吸力相关的水量变化指标。

## 3 非饱和膨胀土的弹塑性损伤固结模型

用  $n$ 、 $s_r$ 、 $\gamma_w$ 、 $k_w$ 、 $k_a$  分别为土的孔隙率、饱和度、水的容重、渗水系数、渗气系数; 用  $u$ 、 $v$ 、 $P_1$  和  $P_2$  分别表示土的  $x$  方向位移分量增量、 $y$  方向位移分量增量、孔隙水压力增量和孔隙气压力增量, 利用连续方程、运动方程、几何方程和本构方程, 则得非饱和膨胀土的弹塑性损伤固结理论在二维条件下的控制方程组为

$$D_{11} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + D_{12} \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} + D_{14} \left[ \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right] + D_{41} \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} + D_{42} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + D_{44} \left[ \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} \right] +$$

$$\left[ F_1 \frac{\partial}{\partial x} + F_4 \frac{\partial}{\partial y} \right] P_1 - \left[ (1 + F_1) \frac{\partial}{\partial x} + F_4 \frac{\partial}{\partial y} \right] P_2 - b_x = 0, \quad (34)$$

$$D_{41} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + D_{42} \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} + D_{44} \left[ \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right] + D_{21} \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} + D_{22} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + D_{24} \left[ \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} \right] +$$

$$\left[ F_4 \frac{\partial}{\partial x} + F_2 \frac{\partial}{\partial y} \right] P_1 - \left[ F_4 \frac{\partial}{\partial x} + (1 + F_2) \frac{\partial}{\partial y} \right] P_2 - b_y = 0, \quad (35)$$

$$a_1 \frac{\partial}{\partial t} \left[ \frac{\partial u}{\partial x} \right] + a_2 \frac{\partial}{\partial t} \left[ \frac{\partial v}{\partial y} \right] + a_3 \frac{\partial}{\partial t} \left[ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right] + a_4 \frac{\partial P_1}{\partial t} + a_5 \frac{\partial P_2}{\partial t} -$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ k_1 \frac{\partial P_1}{\partial x} \right] - \frac{\partial}{\partial y} \left[ k_1 \frac{\partial}{\partial y} (P_1 + \gamma_w y) \right] = 0, \quad (36)$$

$$b_1 \frac{\partial}{\partial t} \left[ \frac{\partial u}{\partial x} \right] + b_2 \frac{\partial}{\partial t} \left[ \frac{\partial v}{\partial y} \right] + b_3 \frac{\partial}{\partial t} \left[ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right] + b_4 \frac{\partial P_1}{\partial t} + b_5 \frac{\partial P_2}{\partial t} -$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ k_2 \frac{\partial P_2}{\partial x} \right] - \frac{\partial}{\partial y} \left[ k_2 \frac{\partial P_2}{\partial y} \right] = 0, \quad (37)$$

其中,  $D_{ij}$  为  $D^{\text{dng}}$  中的元素,  $F_i$  是  $F_s^{\text{dng}}$  中的元素

$$\begin{cases} a_1 = a_2 = (1/3K_{\text{wt}})(D_{11} + D_{21} + D_{31}) + n s_r, & a_3 = (1/3K_{\text{wt}})(D_{14} + D_{24} + D_{34}), \\ a_4 = -a_5 = \frac{1}{H_{\text{wt}}} + \frac{1}{3K_{\text{wt}}} + (F_1 + F_2 + F_3), & b_1 = 1 - a_1, \\ b_2 = 1 - a_2, & b_3 = -a_3, & b_4 = -a_4, & b_5 = a_4 + n(1 - s_r)/(u_a + P_{\text{atm}}), \end{cases} \quad (38)$$

式中,  $b_x$  和  $b_y$  分别为  $x$  和  $y$  方向的体力分量。

## 4 数值分析结果

根据上述非饱和膨胀土的弹塑性损伤固结模型,应用伽辽金权余法可得二维控制方程组的有限元表达式,编制了相应的有限元程序 UESEPCD<sup>[11]</sup>。利用该程序,对一个非饱和膨胀土边坡进行了开挖和降雨蒸发循环过程的数值模拟。整个计算过程分为 4 个阶段: ①开挖前膨胀土场地的降雨\_蒸发作用阶段(一次降雨\_蒸发循环); ②开挖完工瞬时; ③开挖完工后的应力调整阶段(历时 3 天); ④挖方边坡的降雨\_蒸发循环作用阶段(共经历 4 次降雨\_蒸发循环)。采用四边形单元对膨胀土场地进行离散,开挖前和开挖后的有限元网格分别如图 2 和图 3 所示。计算断面高 25 m,宽 48 m。开挖后的边坡高为 10 m,坡比 1:2。

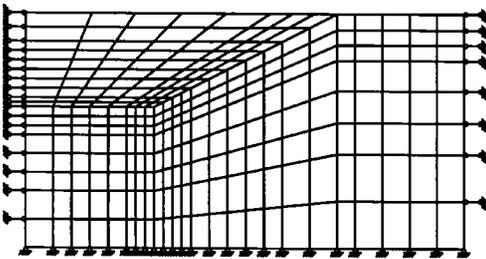


图 2 开挖前的有限元计算网格

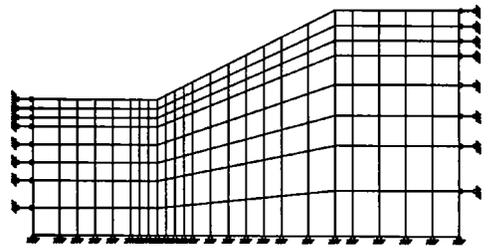


图 3 开挖后的有限元计算网格

限于篇幅,本文仅给出挖方边坡经 4 次降雨\_蒸发循环作用的部分计算结果。图 4~ 图 6 分别是第 4 次降雨\_蒸发循环后的剪应力场、损伤场和塑性区分布情况。与前 3 次降雨\_蒸发循环后的计算结果比较可知:整个边坡土体的剪应力变化不大,仅坡脚上方坡面处的土体的剪应力稍微增加;边坡土体的损伤值呈现明显的发展趋势,坡脚附近土体的损伤值已增大到 0.8,损伤值为 0.45 的等值线逐渐从坡面浅层向上延伸接近坡顶,较深处的损伤值为 0.4 的等值线

却基本不变。降雨蒸发主要影响边坡表面的土体,在多次降雨\_蒸发的干湿循环作用下,边坡表面的土体发生反复的收缩、膨胀,裂隙损伤程度逐渐增加。与开挖引起的卸荷裂隙损伤不同,此时土体受到的损伤主要是胀缩引起的裂隙损伤。土体损伤程度加大后,即使所受到的剪应力不变,但土体的力学性能劣化,从而使更多的土体单元发生塑性屈服。边坡塑性区逐渐由坡脚向坡面和坡肩延伸。

上述数值分析结果表明:开挖卸荷作用使得

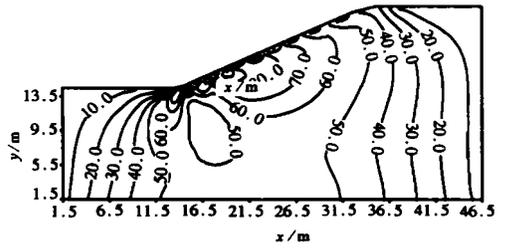


图4 第4次降雨\_蒸发循环后的边坡剪应力分布(单位: kPa)

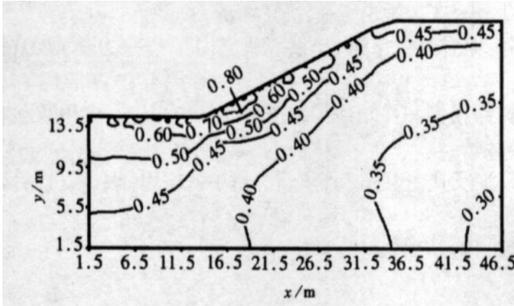


图5 第4次降雨\_蒸发循环后的边坡损伤场

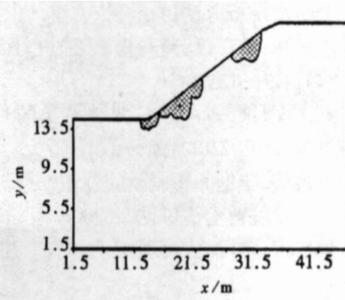


图6 第4次降雨\_蒸发循环后的塑性区分布图

边坡土体产生剪切变形,造成边坡出现剪切裂隙损伤;在随后的降雨蒸发循环作用下,膨胀土边坡表面的土体胀缩裂隙损伤逐渐加大,土体的力学性能劣化,使塑性区沿边坡表面浅层逐渐发展,变形加大并导致边坡产生滑塌和滑坡破坏。文献[12]对膨胀土边坡破坏的机理分析如下:膨胀土滑坡酝酿于旱季,发生在雨季。干旱时,土体大量干缩,裂隙扩张加深,土体进一步被破坏。雨季来临,降水灌入裂隙中,润滑裂隙面,降低其抗剪强度,并湿润土体增加主动土压力,产生滑动,而且这种滑坡往往相互牵引逐级滑动,造成边坡大规模破坏。本文对膨胀土边坡在开挖和降雨蒸发过程中裂隙损伤演化的数值分析结果基本上定量地描述了上述规律。

## 5 结 语

- 1) 本文以非饱和土力学和损伤力学为基础,建立了非饱和和原状膨胀土的弹塑性损伤本构模型,能够反映原状膨胀土的裂隙性、湿胀干缩、软化和剪胀等较复杂的变形特性。
- 2) 将膨胀土的弹塑性损伤本构关系与非饱和土的固结理论相结合,得到非饱和和膨胀土的弹塑性损伤固结模型。
- 3) 对膨胀土边坡进行了气候变化过程中的三相多场耦合分析,揭示了坡体的应力、水分、位移、强度、裂隙损伤演化及塑性区发展的规律和膨胀土边坡失稳的机理,定量描述了膨胀土边坡发生浅层坍塌的部位与规模,对南水北调中线工程和西部高等级公路建设中的膨胀土边坡工程具有一定的指导意义。

## [参 考 文 献]

- [1] Gens A, Alonso E E. A framework for the behaviour of unsaturated expansive clays [J]. Canadian Geotechnique Journal, 1992, 29: 1013—1032.

- [2] 陈正汉, 卢再华, 蒲毅彬. 非饱和土三轴仪的 CT 机配套及其应用[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(4): 387—392.
- [3] 卢再华, 陈正汉, 蒲毅彬. 原状膨胀土损伤演化的三轴 CT 试验研究[J]. 水利学报, 2002, (6): 106—112.
- [4] 卢再华, 李刚. 对膨胀土 G<sub>A</sub>弹塑性本构模型的探讨[J]. 后勤工程学院学报, 2001, 17(2): 64—69.
- [5] 卢再华, 陈正汉, 曹继东. 原状膨胀土的强度变形特性及其本构模型研究[J]. 岩土力学, 2001, 22(3): 339—342.
- [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.
- [7] 卢再华, 陈正汉, 孙树国, 南阳膨胀土的变形和强度特性的三轴试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(5): 5717—723.
- [8] 卢再华, 陈正汉, 王权民, 等. 膨胀土裂隙损伤演化的 CT 试验研究[A]. 第七届全国岩土力学数值分析与解析方法讨论会论文集[C]. 大连: 大连理工大学出版社, 2001, 369—376.
- [9] 卢再华, 陈正汉, 蒲毅彬. 膨胀土干湿循环胀缩裂隙演化的 CT 试验研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(4): 417—422.
- [10] 陈正汉, 黄海, 卢再华. 非饱和土的非线性固结模型和弹塑性固结模型及其应用[J]. 应用数学和力学, 2001, 22(1): 93—103.
- [11] 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[D]. 重庆: 后勤工程学院博士学位论文, 2001.
- [12] 侯石涛, 曹可之. 膨胀土边坡[J]. 工程勘察, 1986, (2): 16—19.

## Structural Damage Model of Unsaturated Expansive Soil and Its Application in Multi\_Field Couple Analysis on Expansive Soil Slope

LU Zai\_hua<sup>1,2</sup>, CHEN Zheng\_han<sup>1,3</sup>, FANG Xiang\_wei<sup>1</sup>,  
GUO Jian\_feng<sup>1</sup>, ZHOU Hai\_qing<sup>1</sup>

(1. Department of Construction Engineering, Logistic Engineering University, Chongqing 400041, P. R. China;

2. School of Humanities and Sciences, Navy University of Engineering, Wuhan 430033, P. R. China;

3. Key Laboratory for Exploitation Southwestern Resources & Environmental Disaster Control Engineering, Ministry of Education, Chongqing University, chongqing 400044, P. R. China)

**Abstract:** Focused on the sensitivity to climate change and the special mechanical characteristics of undisturbed expansive soil, an elasto\_plastic damage constitutive model were proposed based on the mechanics of unsaturated soil and the mechanics of damage. Undisturbed expansive soil was considered as a compound of non\_damage part and damaged part. The behavior of the non\_damaged part was described using non\_linear constitutive model of unsaturated soil. The property of the damaged part was described using a damage evolution equation and two yield surfaces, i. e., loading yield and shear yield. Further more, a consolidation model for unsaturated undisturbed expansive soil was established and a FEM program named UESEPCD was designed. Numerical analysis on solid\_liquid\_gas tri\_phases and multi\_field couple problem was conducted for four stages and the fields of stress, displacement, pore water pressure, pore air pressure, water content and suction in an expansive soil slope were obtained.

**Key words:** unsaturated expansive soil; elasto\_plastic damage constitutive model; consolidation; soil slope; raining; evaporating; numerical analysis