

DOI: 10.11779/CJGE201901007

# 降雨诱发膨胀土边坡渐进破坏研究

张良以, 陈铁林, 张顶立

(北京交通大学城市地下工程教育部重点实验室, 北京 100044)

**摘要:** 膨胀变形是膨胀土边坡失稳破坏的重要因素之一, 研究分析降雨诱发膨胀土边坡渐进破坏过程具有重要的实践意义。基于膨胀应变与基质吸力增量的线性关系, 将膨胀性引入非饱和流固耦合模型当中, 建立一种适用于膨胀土工程的非饱和渗流场-应力场-膨胀应变场多场耦合数值计算方法。结合应变软化模型, 分析单次降雨诱发下膨胀土边坡入渗过程以及边坡渐进破坏全过程。结果表明, 非饱和膨胀土边坡在单次降雨诱发后, 坡体发生以坡脚为起始逐渐向坡顶扩展的破坏, 具有明显的时间滞后性、多层逐级后退式的特点。膨胀土的膨胀性、强度参数对坡体破坏形式具有显著的影响, 膨胀土边坡破坏既保留了一般黏性土的共性也呈现出干缩湿胀的特殊性。

**关键词:** 非饱和; 膨胀土; 多场耦合; 渐进破坏; 后退式破坏

**中图分类号:** TU443

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-4548(2019)01-0070-08

**作者简介:** 张良以(1990-), 男, 博士研究生, 主要从事土工数值计算等方面的研究工作。E-mail: zhangliangyi@bjtu.edu.cn。

## Progressive failure of expansive soil slopes under rainfall

ZHANG Liang-yi, CHEN Tie-lin, ZHANG Ding-li

(Key Laboratory for Urban Underground Engineering of Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** The expansive deformation caused by rainfall is one of important factors for the failure of expansive soil slopes. Therefore, it is of great practical significance to analyze the progressive failure process of expansive soil slopes under rainfall. Based on the linear relationship between expansion strain and matrix suction increment, a numerical analysis method for multi-field coupling of unsaturated seepage, stress and expansion strain fields is proposed. Based on the strain-softening model, the infiltration process of an expansive soil slope induced by single rainfall and the complete process of its progressive failure are presented. The results show that the progressive failure of the unsaturated expansive soil slope occurs at the foot of the slope and extends gradually to the top. It has the characteristics of time delay, multistage and retrogression. The expansive and strength parameters of expansive soils have significant influences on the failure form of the slope. The failure of expansive soil slopes retains the commonness of the general cohesive soils and presents the particularity of dry shrinkage and wet expansion.

**Key words:** unsaturation; expansive soil; multi-field coupling; progressive failure; retrogressive failure

## 0 引言

随着人类工程活动范围的扩大, 膨胀土问题逐渐发展成为世界性的共同课题。膨胀土是一种随着土体含水率变化而呈现出显著胀缩变形的特殊性黏土, 由膨胀土构成的边坡破坏往往具有明显的时间滞后性及多层逐级后退式牵引性等特点<sup>[1-2]</sup>。近年来, 数值方法因其可重复性、直观性以及数据易提取等特性, 已被广大学者运用边坡稳定性分析当中。

膨胀土边坡有限元分析方法可以大体归纳为以下3个阶段: 定性分析阶段, 即根据试验或假定预设不同土层不同材料参数以此来分析膨胀土边坡的稳定与变形<sup>[3-4]</sup>; 渗流与变形非耦合阶段, 基本思路是先由非饱和渗流分析得到稳态或瞬态渗流场, 然后以此作为

初始状态进行后续边坡分析<sup>[5-6]</sup>; 非饱和流固耦合阶段, 即非饱和渗流场与应力场相互耦合, 体现土骨架与非饱和渗流场之间的相互作用, 更加合理有效地反映边坡真实状态<sup>[7-8]</sup>。

当前针对膨胀土边坡渐进破坏的研究, 主要强调膨胀土非饱和特性对边坡的影响, 如膨胀土的非饱和强度、非饱和渗流特性等<sup>[3-8]</sup>, 而对于膨胀土边坡的膨胀特性影响研究较少。其主要原因之一是对膨胀土边坡破坏机理的不明确。长期以来普遍认为, 膨胀土边坡破坏的主要原因是降雨或地下水位上升引起膨胀

**基金项目:** 国家重点研发计划项目(2017YFC0805400); 北京市自然科学基金项目(8161001)

**收稿日期:** 2018-04-10

土强度降低, 故而从各种角度考虑影响膨胀土强度参数的问题<sup>[1, 3-8]</sup>。然而, 一般性黏土随着含水率的增加强度也会降低, 一味将膨胀土问题归结为典型的非饱和土问题是否合适? 在相同坡比的情况下, 一般黏性土边坡稳定而膨胀土边坡失稳破坏的原因何在? 这都说明了膨胀土边坡具有一般黏性土边坡所不具备的特殊性, 故而基于一般黏性土发展起来的非饱和土理论并不能完全解释膨胀土的特性。长江科学院基于南水北调工程, 通过现场试验、离心模型试验等多种手段, 强调了膨胀变形对边坡失稳的重要性<sup>[9-11]</sup>。因此, 有必要把膨胀土问题当作特殊的非饱和土问题加以区别对待, 重点研究其膨胀特性的影响。

膨胀土边坡渐进破坏过程的研究目前多集中于试验手段<sup>[10-14]</sup>, 在数值研究方面<sup>[15-17]</sup>较为欠缺, 特别是在膨胀土典型的多层逐级后退式牵引性破坏的特征表现上, 难以清晰地反映降雨条件下的膨胀土边坡滑移面渐进扩展过程。原因之一是缺乏合适的膨胀土数值计算方法。相较于一般黏性土, 膨胀土既有应力-应变的弹塑性关系, 又存在含水率-应变的胀缩关系。故而如何将二者的关系有机地结合起来, 是膨胀土数值模型的关键。

当前, 针对膨胀土模型的研究大体可以分为3种: 经验模型、理论模型和实用模型。

经验模型: 基于特定边界条件的膨胀试验成果基础上, 通过统计分析而得出经验公式, 如经典的一维膨胀模型<sup>[18]</sup>和三维膨胀模型<sup>[15]</sup>等。该类模型因形式简单参数获取容易, 得到广泛的应用<sup>[19]</sup>。然而, 其缺乏严谨的数学力学理论基础, 膨胀土诸多影响因素都难以在经验模型中得到体现, 在实际工程应用当中存在一定局限性。

理论模型: 基本思路是将膨胀土的膨胀性引入非饱和和弹塑性本构模型, 如经典的 BExM 模型<sup>[20]</sup>, 双尺度毛细-弹塑性变形耦合模型<sup>[21]</sup>等其他类似模型<sup>[22]</sup>。该类模型理论基础严谨, 但涉及参数较多, 且参数测定难度大, 制约了其工程应用和推广。

实用模型: 基于湿度应力场理论<sup>[23]</sup>, 利用现有商业软件成熟的温-固耦合或二次开发技术, 构建膨胀土实用数值模型<sup>[17, 24]</sup>。相较于经验模型与理论模型, 实用模型具备一定的理论基础, 且保留了参数简单易取的特性, 与此同时模型数值化容易, 具有广阔的应用前景。

因此, 本文基于膨胀应变与基质吸力增量的线性关系, 将膨胀性引入到单相流-非饱和-流固耦合模型中, 建立一种适用于膨胀土工程的非饱和和渗流场-应力场-膨胀应变场多场耦合数值计算方法。结合应变软化模型, 对单次降雨诱发非饱和膨胀土边坡渐进破坏过

程进行分析。同时, 针对膨胀性、不同材料强度参数对边坡破坏形式的影响进行了对比研究。

## 1 理论概述

### 1.1 基本方程

基于单相流固结理论, 假设孔隙气瞬时排出 ( $p_a = 0$ ), 忽略孔隙气的影响, 仅考虑孔隙水压及基质吸力对孔隙流体的影响。根据 Bishop 有效应力原理, 应力关系可简化为

$$\sigma_{ij} = \sigma'_{ij} + \chi p_w \quad (1)$$

式中,  $\sigma'_{ij}$  为有效应力,  $\sigma_{ij}$  为总应力,  $p_w$  为孔隙水压力,  $\chi$  为有效应力参数。为了简化, 采用饱和度替代法<sup>[25]</sup>, 令  $\chi = s$ 。因此, 单元静力平衡方程可表示为

$$\frac{\partial \sigma'_{ij}}{\partial x_j} + \frac{\partial s p_w}{\partial x_i} + \rho g = 0 \quad (2)$$

式中, 非饱和土体密度  $\rho = \rho_d + ns\rho_w$ ,  $\rho_d$  为土体干密度,  $\rho_w$  为水的密度,  $n$  为孔隙率,  $s$  为饱和度,  $g$  为重力加速度。

增量应力-应变关系可以为

$$\Delta \sigma'_{ij} = D_{ijkl} \Delta \varepsilon_{kl} \quad (3)$$

式中,  $D_{ijkl}$  为土体刚度矩阵, 应变增量可由下式计算:

$$\Delta \varepsilon_{ij} = -\frac{1}{2} \left( \frac{\partial \Delta u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \Delta u_j}{\partial x_i} \right) \quad (4)$$

式中,  $u_i$  为位移矢量。

假设土体抗剪强度满足 Mohr-Coulomb 屈服准则:

$$f_s = (c + \sigma' \tan \varphi) - \tau \quad (5)$$

式中,  $\sigma'$  为有效主应力,  $\tau$  为剪切应力,  $c$  为黏聚力,  $\varphi$  为内摩擦角。

考虑土体变形的不可逆性, 引入非关联流动法则进行塑性应力修正, 其塑性势函数为

$$g = \sigma'_1 - \sigma'_3 \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad (6)$$

式中,  $\sigma'_1$ ,  $\sigma'_3$  分别为大、小有效主应力,  $\phi$  为剪胀角。当  $\phi = 0$  时, 式 (6) 退化为关联流动法则。

### 1.2 饱和-非饱和和渗流

假设土骨架内的流体渗流服从 Darcy 定律, 表达式如下:

$$q_i = -k_s \frac{K_{ij}}{\gamma_w} \frac{\partial p_w}{\partial x_j} \quad (7)$$

式中  $q_i$  为孔隙流体的速度矢量;  $K_{ij}$  为饱和渗透系数张量;  $k_s$  为饱和渗透系数的折减系数, 其值范围 0~1 之间, 用于反映非饱和和部分岩土体渗透系数的降低。折减系数  $k_s$  与饱和度  $s$  的关系可近似采用如下形式<sup>[26-27]</sup>:

$$k_s = \left( \frac{s - s_0}{1 - s_0} \right)^\lambda \quad (8)$$

式中  $\lambda$  为材料常数, 一般可取 3;  $s_0$  为残余饱和度, 对于饱和度低于  $s_0$  情况, 可以认为土中水以结合水的形式存在, 不发生流动。

假设土颗粒不可压缩, 根据连续性方程, 孔隙水压、饱和度以及流体流量应满足如下连续性方程:

$$\frac{n}{K_f} \frac{\partial p_w}{\partial t} + \frac{n}{s} \frac{\partial s}{\partial t} = \frac{1}{s} \frac{\partial Q}{\partial t} - \frac{\partial \varepsilon_v^s}{\partial t} \quad (9)$$

式中  $K_f$  为流体体积模量, 一般为 2 GPa;  $Q$  为流体体积改变量;  $\varepsilon_v^s$  为体应变;  $t$  为时间。

### 1.3 土水特征曲线

在众多土水特征曲线模型中, VG 模型因参数少且拟合效果好等特点, 得到广泛的应用, 故本文模型选用 VG 模型来表达土体吸力与含水率的关系:

$$\theta = \theta_0 + \frac{\theta_s - \theta_0}{[1 + (a\psi)^n]^m} \quad (10)$$

式中  $\theta$ ,  $\theta_0$ ,  $\theta_s$  依次为含水率、残余含水率和饱和含水率;  $a$ ,  $n$ ,  $m$  为拟合参数;  $\psi$  为基质吸力 (负孔隙水压)。将饱和度与含水率的关系  $\theta = ns$  代入式 (10) 并整理可得

$$\psi = A \left[ \left( \frac{1 - s_0}{s - s_0} \right)^{\frac{1}{1-B}} - 1 \right] \quad (11)$$

令  $m = 1 - 1/n$ , 可换算得  $A = 1/a$ ,  $B = 1/n$ 。此外, 吸湿与脱湿过程具有明显的滞后性, 为了简化, 忽略此种性质, 假定吸湿与脱湿过程土水特征函数保持不变。

### 1.4 膨胀性

关于膨胀土胀缩机理的研究, 目前还没有清晰的理论解释。众多学者从宏观或微观角度提出了多种假说, 如晶格扩张理论、双电层理论、吸力势理论等。其中, 湿度应力场理论<sup>[23]</sup>值得借鉴。

一般认为, 膨胀应变与含水率之间存在直接关系, 而式 (11) 可知饱和度与基质吸力存在一一对应关系, 故假设膨胀应变与基质吸力存在如下关系:

$$\varepsilon_{ij}^s = \frac{\Delta\psi}{E_{ij}^s} \delta_{ij} \quad (12)$$

式中  $\varepsilon_{ij}^s$  为膨胀应变张量;  $\Delta\psi$  为基质吸力增量;  $\delta_{ij}$  为克罗尼克符号;  $E_{ij}^s$  为相关参数, 反映土骨架的膨胀性能, 故称之为膨胀模量。

将膨胀应变以附加应变的形式加入到总应变当中以更新总应变, 如下式所示:

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^\sigma + \varepsilon_{ij}^s \quad (13)$$

式中,  $\varepsilon_{ij}$  为总应变张量,  $\varepsilon_{ij}^\sigma$  为有效应力部分引起的应变张量。将式 (13) 代入式 (9) 即可获得所对应的

多场耦合连续性方程:

$$\frac{n}{K_f} \frac{\partial p_w}{\partial t} + \frac{n}{s} \frac{\partial s}{\partial t} = \frac{1}{s} \frac{\partial Q}{\partial t} - \frac{\partial \varepsilon_v^\sigma}{\partial t} - \frac{\partial \varepsilon_v^s}{\partial t} \quad (14)$$

至此, 由式 (2)、(3)、(7)、(11)、(12) 及 (14) 组成多场耦合基本控制方程组。

由此可见, 膨胀土的应变是由应力应变与膨胀应变两部分构成, 前者体现了应力状态对膨胀土变形的影响, 后者反映含水率变化产生的影响。同时, 在进行塑性应力修正及塑性应变计算当中, 被修正的应力部分及塑性应变当中包含了因含水率变化而变形的膨胀应变部分的影响, 体现膨胀变形的不可恢复性。

本文模型采用有限差分算法, 基于 C++ 语言实现多场耦合数值计算程序, 程序的简化计算流程如图 1 所示。

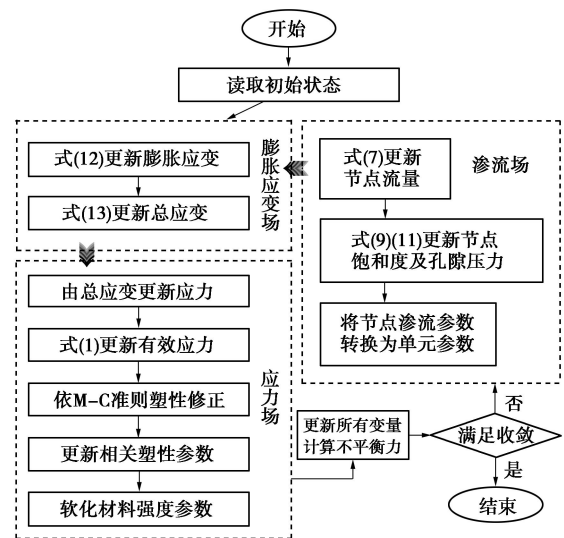


图1 计算程序简化流程图

Fig. 1 Simplified flowchart of computing program

## 2 非饱和膨胀土边坡模型

根据相关工程资料, 假设一均质膨胀土边坡, 如图 2 所示, 坡高为 15 m, 坡比为 1:2, 地基厚度 5 m, 坡脚距模型边界 8 m, 坡顶宽 12 m。坡体材料参数为: 初始模量  $E$  为 10 MPa, 泊松比  $\nu$  为 0.3, 密度  $\rho$  为 2000 kg/m<sup>3</sup>, 内摩擦角  $\varphi$  为 15°, 黏聚力  $c$  为 10 kPa, 土水特征曲线参数  $A$  为  $2 \times 10^4$ , 土水特征曲线参数  $B$  为 0.5, 孔隙率  $n$  为 0.5, 渗透系数  $k_s$  为  $1 \times 10^{-7}$  cm/s。坡体底部及两侧设置不透水边界, 并限制坡体底部的水平及竖向位移, 坡体两侧边界的水平位移。

根据上文所选参数, 首先进行围压 100 kPa 三轴压缩试验模拟, 分析不同初始饱和度下土体强度, 以验证基质吸力的影响与土水特征曲线的计算。由于模拟土体压缩过程中土体含水率保持不变, 故而无膨胀



变形产生,排除因膨胀变形导致土体抗剪强度的变化。

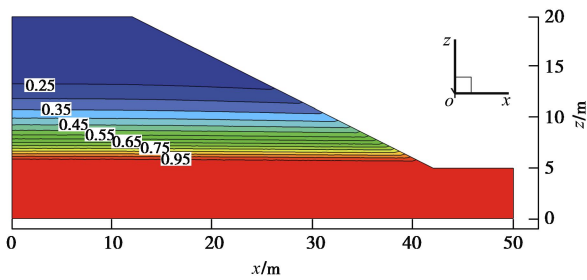


图2 边坡模型及初始饱和度分布图

Fig. 2 Slope model and distribution of initial saturation

从图3可以发现,程序计算所得的基质吸力散点与式(11)计算值(曲线V-G模型)相符;此外,随着饱和度的增加,基质吸力的减小,土体的抗剪强度呈非线性软化的特性,与前人试验所得非饱和土抗剪强度变化规律相符<sup>[28]</sup>。

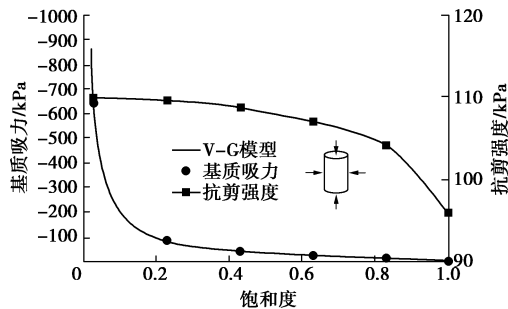


图3 基质吸力、抗剪强度与饱和度关系图

Fig. 3 Relationship among suction, shear strength and saturation

根据式(5)强度准则,假设抗剪强度参数 $c$ ,  $\varphi$ 值在土体进入塑性后随塑性应变增加而非线性减小,满足

$$\left. \begin{aligned} c &= f(\gamma_p)c, \\ \varphi &= f(\gamma_p)\varphi. \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

式中,  $\gamma_p$ 为等效塑性应变,  $f(\gamma_p)$ 为等效塑性应变相关的分段线性函数,其形式如图4所示。

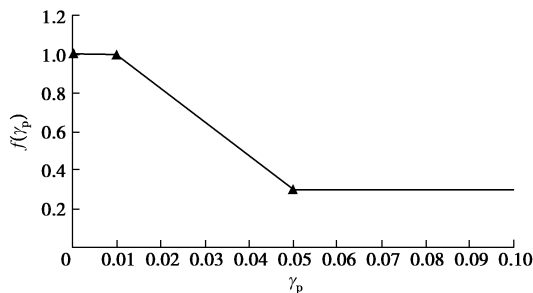


图4 应变软化模型

Fig. 4 Strain-softening model

数值模拟分为3个阶段:①初始水位位于坡底,初始孔压依高程线性分布,坡顶孔压为-150 kPa,进

行初始自重平衡。图2同时给出了初始状态下边坡饱和度和分布云图。②通过边坡上表面施加流量边界模拟降雨,降雨强度 $5 \times 10^{-7}$  m/s,历时3 d。③去除边坡表面流量边界,继续计算直至边坡破坏形式无明显变化。

### 3 计算结果分析

#### 3.1 湿度场分析

首先,选取膨胀模量为1 MPa进行边坡降雨模拟。图5为测线位置不同时刻不同埋深节点饱和度分布图。从图中可以发现,3 d的降雨过程中,暂态饱和区由表层土体逐步向深层扩散,降雨结束时,表层1.2 m土层已处于饱和状态。降雨停止后,表层土体失去雨水的补给,在自重作用下水分向下迁移,表层土体饱和度迅速下降,湿润锋向更深层土体推进,5 d时埋深1.5 m处已经受到明显的影响,饱和度显著上升。从3, 4, 5 d曲线峰值(饱和度达到1)可以发现,降雨停止后,暂态饱和区随着水分迁移逐渐缩小,水分分布逐渐均匀化。从3, 4, 5 d的影响范围可以得出,随着水分均匀化,深度土层固结度的提高,湿润锋的推进速率呈逐步下降的趋势。所得变化规律符合非饱和降雨入渗规律<sup>[5, 8, 17]</sup>。

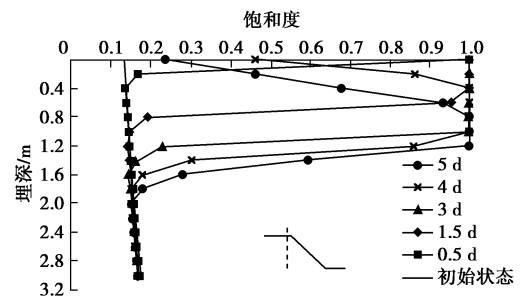


图5 湿润锋随降雨历时的演化过程

Fig. 5 Evolution process of wetting front

#### 3.2 渐进破坏过程及破坏形式分析

根据图4应变软化曲线,将材料强度降低至残余强度的单元( $\gamma_p \geq 0.05$ )判定为破坏单元,并用不同的分组加以区分。图6为膨胀模量0.1 MPa情况下不同时刻边坡破坏区分布图。

从时间上可以发现,膨胀土边坡发生破坏的时间并不一定发生在降雨期间(0~3 d),其原因是雨水入渗以及膨胀性的发挥均需要一定的时间,随着湿润区的扩大,膨胀应力的发挥、土体强度的下降以及土体重度的上升等多因素共同作用下,随着破坏的累积,膨胀土边坡呈现出渐进性的破坏特征。

坡脚处由于边坡形态易发生剪应力集中,并且在坡面与坡底的双重水分补给作用下,膨胀变形发展迅

速, 故而坡脚处极易形成初始剪切带。随着湿润锋向深部迁移, 湿润锋交界面上土体因膨胀变形的不同, 易产生剪应力集中, 其与坡脚处的剪切带相互贯通, 并逐步向坡顶延伸, 产生坡体中下部初始滑移面, 如图 6 (a)。后方坡体因失去前方土体的支撑, 在自重作用下失稳, 产生二次滑移。同时, 已滑移的土体经由滑移面向其后部土体传递应力, 牵引起其后土体加剧了坡体的二次滑移, 滑移面出现开叉的现象, 如图 6 (b)。随着滑移面的扩展贯通, 破坏区的扩大, 后方坡体再次发生滑移, 滑移面延伸至坡顶, 形成最终的破坏形式, 如图 6 (c)。降雨引起非饱和膨胀土边坡的破坏呈现出由坡脚起始, 向坡顶延伸, 多层次, 逐级后退式牵引性滑坡特征。

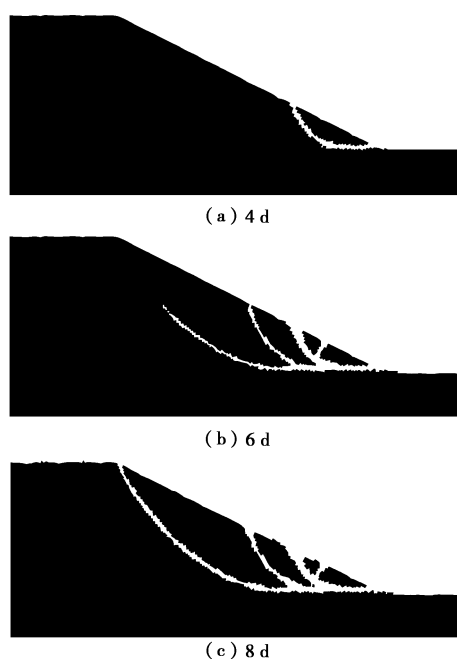


图 6 不同时刻破坏区分布图

Fig. 6 Failure process of slope

### 3.3 膨胀性影响分析

为了说明膨胀特性对降雨条件下膨胀土边坡的影响, 在相同条件下, 逐步扩大土体的膨胀性, 膨胀模量依次选取 1.0, 0.2, 0.1 MPa 进行模拟分析。图 7 为第 3 天与第 5 天测线处不同埋深节点饱和度分布图。图 7 (a) 降雨 3 d 后, 随着膨胀性的增大 (膨胀模量减小), 湿润锋的影响范围明显缩小, 由 1.2 m 下降到 0.4 m。这是因为土体吸水膨胀, 土体被压密, 渗透性下降, 抑制了降雨水分的入渗。而图 7 (b) 为雨后 2 d (5 d) 在自重作用下水分迁移。可以发现, 湿润锋扩散以及表层土体水分迁移因膨胀性的增大而减小, 呈现一定的阻水作用。模拟结果呈现出的膨胀性对土体非饱和渗流的影响, 体现了渗流场、应力场及膨胀应变场之间相互作用关系。

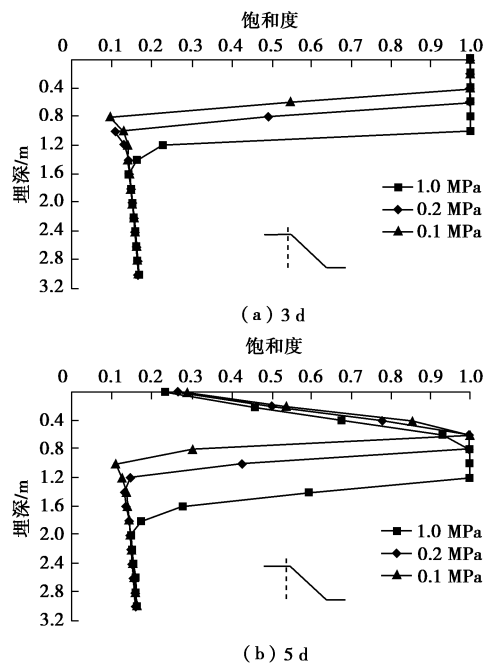


图 7 不同膨胀性土体饱和度分布图

Fig. 7 Distribution of saturation under different expansion characteristics

图 8 为不同膨胀模量下边坡破坏区最终分布图。可以发现, 当膨胀性较低 (膨胀模量 1 MPa), 如图 8 (a) 所示, 虽然滑移面产生分叉, 形成多个滑块特征, 然而其并未于坡面贯通, 并且滑移面位置贴合较近, 坡体呈现出整体式滑移破坏特征。随着膨胀性的增加, 坡体破坏形式逐渐转变多级后退式破坏形式, 初始滑移面更靠近坡底, 形成局部滑块, 如图 8 (b)。当膨胀模型达到 0.1 MPa 时, 滑坡破坏具备明显的多级逐级后退式滑坡的特点, 由坡脚局部破坏, 逐级扩大至坡顶, 形成数个滑块。

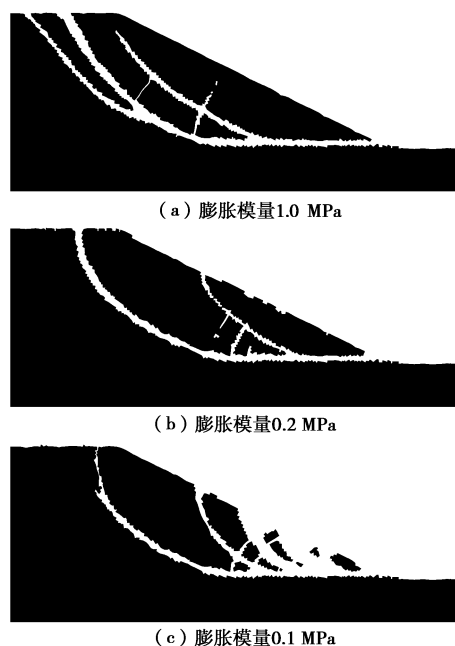


图 8 不同膨胀性条件下边坡破坏特征

Fig. 8 Slope failure under different expansion characteristics

此外, 在相同降雨条件下, 无膨胀性边坡破坏形式与膨胀模量 1 MPa 时结果相近, 这说明当土体膨胀性较低时, 降雨引起的强度衰减对边坡失稳破坏的起主导作用, 呈现出一般黏性土共性特点。而随着膨胀性的提高, 膨胀变形所占比重增加, 边坡破坏形式逐渐呈现出膨胀土典型的破坏特征。

### 3.4 强度参数影响分析

非饱和膨胀土边坡的破坏不仅由膨胀变形导致, 还与坡体材料的强度参数密切相关。为了说明土体强度对降雨条件下膨胀土边坡的影响, 在相同条件下, 采用单因素分析法, 在表 1 的基础上修改坡体的抗剪强度参数  $c$ 、 $\varphi$  值, 进行 5 组模拟分析。

图 9 为 5 组不同土体材料强度参数下边坡破坏区分布图。由图 9 (a) ~ (c) 可知, 随着黏聚力的增大, 破坏区的范围变化不明显, 滑移块数量明显减少, 破坏形式由多级后退式滑移转变为整体式滑移。从图 9 (a)、(d)、(e) 可知, 随着内摩擦角的增加, 破坏区范围在缩小, 滑块数量减少, 破坏形式无明显变化。

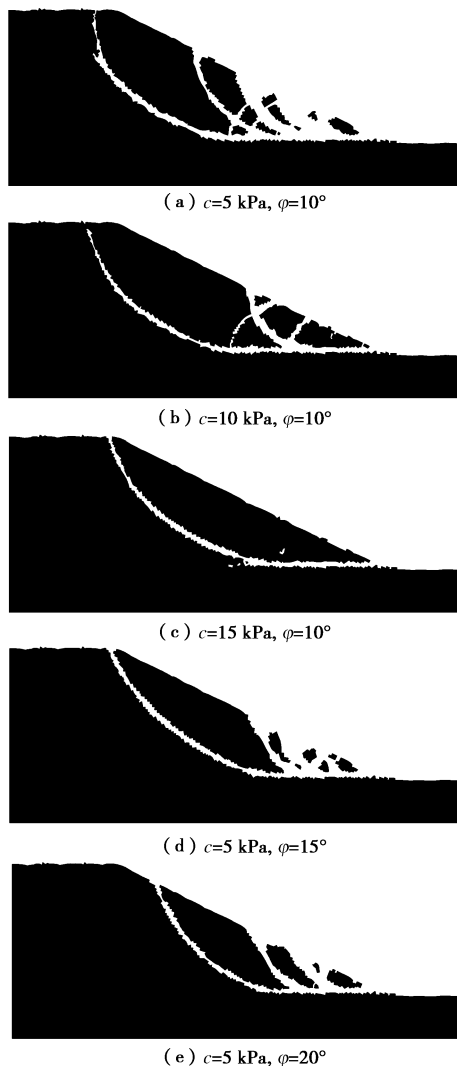


图 9 不同强度参数破坏特征

Fig. 9 Slope failure under different strength parameters

从上述结果可知, 土体强度对降雨诱发膨胀土边坡的破坏有明显的影响。其中, 摩擦角  $\varphi$  对坡体局部滑块的数量及大小具有显著的影响, 并控制着坡体破坏范围, 而黏聚力  $c$  影响着坡体的破坏形式。

## 4 结 语

本文以单相固结理论为基础, 基于膨胀应变与基质吸力改变量之间的关系假定, 提出一种能够有效反映膨胀土干缩湿胀特性的膨胀应变场-渗流场-应力场多场耦合数值计算方法。结合应变软化模型, 有效地模拟因单次降雨诱发非饱和膨胀土边坡破坏的全过程, 清晰呈现出坡体多层逐级后退式牵引性滑坡特征。计算结果表明, 坡体的破坏形式与膨胀土的膨胀性、强度参数存在密切的关系。

此外, 膨胀土边坡破坏并不一定发生在降雨期, 在雨后一段时间, 边坡依旧可能因为水分迁移分布而逐渐发生滑动失稳破坏。膨胀土边坡破坏既保留了一般黏性土的共性也呈现出干缩湿胀的特殊性, 在二者共同影响下, 形成了膨胀土边坡特有的工程特性。故而在后续的工程分析当中应该充分考虑膨胀性的影响。

### 参考文献:

- [1] KOHV M, TALVISTE P, HANG T, et al. Retrogressive slope failure in glaciolacustrine clays: Sauga landslide, western Estonia[J]. *Geomorphology*, 2010, **124**(3/4): 229 - 237.
- [2] 康卫东, 杨小荟, 张俊义, 等. 安康罗家梁膨胀土滑坡特征与成因分析[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 2007(1): 91 - 94. (KAN Wei-dong, YANG Xiao-hui, ZHANG Jun-yi, et al. Landslip characteristic and its genesis of expansive soil in Luojiangliang, Ankang Area[J]. *Journal of Northwest University (Nature Science Edition)*, 2007(1): 38 - 40. (in Chinese))
- [3] 卫 军, 谢海洋, 李小对, 等. 基于非饱和土理论的膨胀土边坡稳定性分析[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2004, **32**(4): 38 - 40. (WEI Jun, XIE Hai-yang, LI Xiao-dui, et al. Analysis of the stability of the expansive soils slope based on unsaturated soil theory[J]. *J Huazhong Univ Sci & Tech(Nature Science Edition)*, 2004, **32**(4): 38 - 40. (in Chinese))
- [4] 刘义高, 周玉峰, 郑健龙. 增湿条件下膨胀土路堑边坡稳定性数值分析[J]. *岩土工程学报*, 2007, **29**(12): 1870 - 1875. (LIU Yi-gao, ZHOU Yu-feng, ZHENG Jian-long. Numerical analysis of cutting slope stability in expansive soils considering water-increased state[J]. *Chinese Journal of*

- Geotechnical Engineering, 2007, **29**(12): 1870 - 1875. (in Chinese))
- [5] 王一兆, 隋耀华. 降雨入渗对边坡浅层稳定性的影响[J]. 长江科学院院报, 2017, **34**(4): 122 - 125. (WANG Yi-zhao, SUI Yao-hua. Influence of rainfall infiltration on slope stability at shallow layer[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2007, **34**(4): 122 - 125. (in Chinese))
- [6] 谢瑾荣, 周翠英, 程 晔. 降雨条件下软岩边坡渗流-软化分析方法及其灾变机制[J]. 岩土力学, 2014, **35**(1): 197 - 203. (XIE Jin-rong, ZHOU Cui-ying, CHENG Ye. Method of seepage-softening analysis and disaster mechanism in soft rock slope under rainfall[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, **35**(1): 197 - 203. (in Chinese))
- [7] 徐 晗, 饶锡保, 汪明元. 降雨条件下膨胀岩边坡失稳数值模拟研究[J]. 长江科学院院报, 2009, **26**(11): 52 - 57. (XU Han, RAO Xi-bao, WANG Ming-yuan. Numerical simulation on failure mechanism of expansive rock slope under rainfall[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2009, **26**(11): 52 - 57. (in Chinese))
- [8] QI S, VANAPALLI S K. Hydro-mechanical coupling effect on surficial layer stability of unsaturated expansive soil slopes[J]. Computers & Geotechnics, 2015, **70**: 68 - 82.
- [9] 龚壁卫, 程展林, 郭熙灵, 等. 南水北调中线膨胀土工程问题研究与进展[J]. 长江科学院院报, 2011, **28**(10): 134 - 140. (GONG Bi-wei, CHENG Zhan-lin, GUO Xi-ling, et al. Research progress on the stability of expansive soil slope in the middle route of south-to-north water diversion project[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2011, **28**(10): 134 - 140. (in Chinese))
- [10] 程展林, 李青云, 郭熙灵, 等. 膨胀土边坡稳定性研究[J]. 长江科学院院报, 2011, **28**(10): 102 - 111. (CHENG Zhan-lin, LI Qing-yun, GUO Xi-ling, et al. Study on the stability of expansive soil slope[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2011, **28**(10): 102 - 111. (in Chinese))
- [11] 程永辉, 程展林, 张元斌. 降雨条件下膨胀土边坡失稳机理的离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(增刊1): 416 - 421. (CHENG Yong-hui, CHENG Zhan-lin, ZHANG Yuan-bin. Centrifugal model tests on expansive soil slope under rainfall[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(S1): 416 - 421. (in Chinese))
- [12] REGMI R K, JUNG K, NAKAGAWA H, et al. Study on mechanism of retrogressive slope failure using artificial rainfall[J]. Catena, 2014, **122**(12): 27 - 41.
- [13] 詹良通, 吴宏伟, 包承纲, 等. 降雨入渗条件下非饱和膨胀土边坡原位监测[J]. 岩土力学, 2003, **24**(2): 151 - 158. (ZHAN Liang-tong, NG W C, BAO Cheng-gang, et al. Artificial rainfall infiltration tests on a well-instrumented unsaturated expansive soil slope[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, **24**(2): 151 - 158. (in Chinese))
- [14] KHAN M S, HOSSAIN S, AHMED A, et al. Investigation of a shallow slope failure on expansive clay in Texas[J]. Engineering Geology, 2016, **219**: 118 - 129.
- [15] 黄 斌, 程展林, 徐 晗. 膨胀土膨胀模型及边坡工程应用研究[J]. 岩土力学, 2014, **35**(12): 3550 - 3555. (HUANG Bin, CHEN Zhan-lin, XU Han. Expansion model of expansive soil and its application to slope engineering[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, **35**(12): 3550 - 3555. (in Chinese))
- [16] WANG B, VARDON P, HICKS M. Preliminary analysis of rainfall-induced slope failures using the material point method[C]// Proceeding of the 12th International Symposium on Land Slides. Naples, 2016.
- [17] 丁金华, 陈仁朋, 童 军, 等. 基于多场耦合数值分析的膨胀土边坡浅层膨胀变形破坏机制研究[J]. 岩土力学, 2015, **36**(增刊1): 159-168. (DING Jin-hua, CHEN Ren-peng, TONG Jun, et al. Research on failure mechanism of shallow instability of expansive soil slope based on multifield coupling numerical analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, **36**(S1): 159 - 168. (in Chinese))
- [18] HUDER J, AMBERG G. Quellung in mergel, opalinuston und anhydrit[J]. Schweizerische Bauzeitung, 1970, **88**(43): 975 - 980. (HUDER J, AMBERG G. Swelling in menl, opalinus clay and anhydrite[J]. Schweizerische Bauzeitung, 1970, **88**(43): 975 - 980. (in German))
- [19] 左清军, 陈 可, 谈云志, 等. 基于时间效应的富水泥质板岩隧道围岩膨胀本构模型研究[J]. 岩土力学, 2016, **37**(5): 1357 - 1364. (ZUO Qing-jun, CHEN Ke, TAN Yun-zhi, et al. A time-dependent constitutive model of the water-rich argillaceous slate surrounding a tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, **37**(5): 1357 - 1364. (in Chinese))
- [20] ALONSO E E, VAUNAT J, GENS A. Modelling the mechanical behaviour of expansive clays[J]. Engineering Geology, 1999, **54**(1/2): 173 - 183.
- [21] 李 舰, 赵成刚, 黄启迪. 膨胀性非饱和土的双尺度毛细-弹塑性变形耦合模型[J]. 岩土工程学报, 2012, **33**(11): 2127 - 2133. (LI Jian, ZHAO Cheng-gang, HUANG Qi-di.

- Constitutive modeling with double-scale pore structure for coupling of capillary hysteresis and stress-strain behaviours in unsaturated expansive soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **33**(11): 2127 - 2133. (in Chinese))
- [22] 李吴刚, 杨庆, 刘文化, 等. 基于 SFG 模型的非饱和膨胀土本构模型研究[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(8): 1449 - 1453. (LI Wu-gang, YANG Qing, LIU Wen-hua, et al. Constitutive model for unsaturated expansive clays based on SFG model[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(8): 1449 - 1453. (in Chinese))
- [23] 缪协兴, 杨成永, 陈至达. 膨胀岩体中的湿度应力场理论[J]. 岩土力学, 1993, **14**(4): 49 - 55. (MIAO Xie-xing, YANG Cheng-yong, CHEN Zhi-da. Humidity stress field theory in swelling rock mass[J]. Rock and Soil Mechanics, 1993, **14**(4): 49 - 55. (in Chinese))
- [24] 王凯, 刁心宏. 膨胀岩湿度应力场本构模型二次开发研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, **34**(增刊2): 3781 - 3792. (WANG Kai, DIAO Xin-hong. Secondary development study of swelling rock humidity stress field constitutive model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, **34**(S2): 3781 - 3792. (in Chinese))
- [25] 路德春, 杜修力, 许成顺. 有效应力原理解析[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(增刊1): 146 - 151. (LU De-chun, DU Xiu-li, XU Cheng-shun. Analytical solutions to principle of effective stress[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(S1): 146 - 151. (in Chinese))
- [26] SINGH R, FRANZINI J B. Unsteady flow in unsaturated soils from a cylindrical source of finite radius[J]. Journal of Geophysical Research, 1967, **72**(4): 1207 - 1215.
- [27] CHANG C S. Analysis of consolidation of earth and rockfill dams[D]. Berkeley: University of California, 1976.
- [28] VANAPALLI S K, FREDLUND D G, PUFAHL D E, et al. Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1996, **33**(3): 379 - 392.

## 《岩土工程学报》征订启事

《岩土工程学报》创办于1979年,是我国水利、土木、力学、建筑、水电、振动等六个全国性学会联合主办的学术性科技期刊。由南京水利科学研究院承办,国内外公开发行。主要刊登土力学、岩石力学领域中能代表当今先进理论和实践水平的科学研究和工程实践成果等。报道新理论、新技术、新仪器、新材料的研究和应用。欢迎国家自然科学基金项目及其他重要项目的研究成果向本刊投稿,倡导和鼓励有实践经验的作者撰稿,并优先刊用这些稿件。主要栏目有黄文熙讲座、综述、论文、短文、工程实录、焦点论坛、讨论和简讯等。

本刊被《中文核心期刊要目总览》连续多年确认为核心期刊,并在建筑类核心期刊中位于前列;本刊被科技部“中国科技论文统计源期刊”(中国科技核心期刊)及“中国科技论文与引文数据库”收录;本刊被中国科学院“中国科学引文数据库”收录;本刊被“中国知网”全文收录及“中国学术期刊综合评价数据库”收录;本刊被“工程索引 Ei Compendex 数据

库”和“日本科学技术振兴机构数据库 JST”等国际数据库收录。本刊网址([www.cgejournal.com](http://www.cgejournal.com))全文发布本刊所有刊载文章。

本刊读者对象为土木建筑、水利电力、交通运输、矿山冶金、工程地质等领域中从事岩土工程及相关专业的科研人员、设计人员、施工人员、监理人员和大专院校师生。

本刊为月刊, A4 开, 双栏排版, 192 页, 每月中旬出版, 每期定价 40 元, 全年定价 480 元。

本刊国际标准刊号 ISSN 1000 - 4548, 国内统一刊号 CN 32 - 1124/TU, 国内发行代号 28 - 62, 国外发行代号 MO 0520。欢迎广大读者在全国各地邮局订购, 也可在编辑部订购(不另收邮费)。编辑部订购地址: 南京虎踞关 34 号《岩土工程学报》编辑部; 邮编: 210024; 联系电话: 025-85829534, 85829543, 85829553, 85829556; 传真: 025-85829555; E-mail: [ge@nhri.cn](mailto:ge@nhri.cn)。

(本刊编辑部)