

考虑应变软化的鸡场镇降雨型滑坡数值分析

纪佑军, 熊 军, 蒋国斌, 王泽根

Numerical analysis of rainfall type landslide in Jichang town considering strain-softening

Ji Youjun, XIONG Jun, JIANG Guobin, and WANG Zegen

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202303036>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

膨胀土边坡非饱和渗流及渐进性破坏耦合分析

A coupling analysis of unsaturated seepage and progressive failure of an expansive soil slope

陈亮胜, 韦秉旭, 廖欢, 张寒冰 水文地质工程地质. 2020, 47(4): 132-140

考虑非饱和土基质吸力的丁家坡滑坡变形机制及稳定性评价

Deformation mechanism and stability evaluation of Dingjiapo landslide considering the matric suction of unsaturated soil

石爱红, 李国庆, 丁德民, 苑权坤 水文地质工程地质. 2022, 49(6): 141-151

双参数强度折减法研究中存在的问题分析

Analyses of the existing problems in the double parameters reduction method

陈子玉, 宋彦辉, 严豪, 陈康达 水文地质工程地质. 2019, 46(2): 125-125

基于动态残余强度的不同含水率条件下滑坡稳定性研究

Research on landslide stability under different water content conditions based on the dynamic residual strength

魏占玺, 谢东武, 毋远召, 马文礼, 李元, 李万花 水文地质工程地质. 2022, 49(2): 126-136

湘西陈溪峪滑坡变形机理及稳定性评价

A study of deformation mechanism and stability evaluation of the Chenxiyu landslide in western Hunan

刘磊, 徐勇, 李远耀, 连志鹏, 王宁涛, 董仲岳 水文地质工程地质. 2019, 46(2): 21-21

东南沿海地区玄武岩残积土雨水运移特征及滑坡失稳数值模拟

Rainfall infiltration characteristics and numerical simulation of slope instability in the basalt residual soil in the coastal area of Southeast China

张晨阳, 张泰丽, 张明, 孙强, 伍剑波, 王赫生 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 42-50



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202303036

纪佑军, 熊军, 蒋国斌, 等. 考虑应变软化的鸡场镇降雨型滑坡数值分析 [J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(4): 178-188.

Ji Youjun, XIONG Jun, JIANG Guobin, et al. Numerical analysis of rainfall type landslide in Jichang town considering strain-softening[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(4): 178-188.

考虑应变软化的鸡场镇降雨型滑坡数值分析

纪佑军¹, 熊 军¹, 蒋国斌², 王泽根¹

(1. 西南石油大学地球科学与技术学院, 四川 成都 610500;

2. 中国石油西南油气田分公司安全环保技术监督研究院, 四川 成都 610095)

摘要: 降雨入渗改变斜坡渗流场的同时也降低了土体强度, 极易诱发滑坡。滑坡过程中, 滑带土体常呈现应变软化现象。以应变软化模型为基础的双参数强度折减法的研究, 目前处于起步阶段, 以往研究及分析滑坡稳定性时均忽略了渗流场的影响。六盘水地区红棕色土保水性强, 有明显的应变软化特征, 该地曾发生多次大中型滑坡。根据红棕色土特点研究致灾机理, 有利于滑坡的防治。针对六盘水鸡场镇周家坡滑坡建立三维地质模型, 基于非饱和土流固耦合理论建立了坡体流场与应力场相互作用的数学模型, 利用有限元和考虑土体应变软化的双参数强度折减法, 对滑坡进行雨水渗流和稳定性模拟。结果表明: 在降雨后雨水多在表层土中沿坡面切向和横向流入下缘和冲沟, 并非全部垂直入渗。相对上缘其他区域, 冲沟底部饱和度上升明显, 强度下降最大。随降雨时间的延长, 坡体内形成沿冲沟的塑性贯通区, 使得滑坡稳定性大幅下降。降雨过程中对比经典折减法和考虑应变软化的双折减法所得稳定系数由偏小转为偏大, 但差距均在 4% 以内。由此可见, 红棕色土应变软化对滑坡稳定性负面影响不显著, 且随降雨而减弱, 建议对此类滑坡的防治重点在降低冲沟土体渗透性。研究结果可为同类滑坡的防治提供一定的理论依据。

关键词: 非饱和土渗流; 应变软化; 双折减法; 滑坡; 稳定性

中图分类号: P642.22; TU42

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2024)04-0178-11

Numerical analysis of rainfall type landslide in Jichang town considering strain-softening

Ji Youjun¹, XIONG Jun¹, JIANG Guobin², WANG Zegen¹

(1. School of Earth Science and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500,

China; 2. Institute of Safety and Environmental Protection Technology Supervision, PetroChina Southwest

Oil and Gas Field Branch, Chengdu, Sichuan 610095, China)

Abstract: Rainfall infiltration not only changes the seepage field of the slope, but also reduces the soil strength, which is easy to induce landslide. The soil in the slip zone often shows strain softening during the landslide process. However, the research of the two-parameter strength reduction method based on the strain softening model is still in its infancy, and the influence of seepage field has been ignored when analyzing the stability of landslides in the previous studies. The red-brown soil in the Liupanshui area has strong water retention and

收稿日期: 2023-03-16; 修订日期: 2023-09-18

投稿网址: www.swdzcgdz.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(41702340); 四川省科技计划项目(2024NSFSC0103); 中国石油—西南石油大学创新联合体科技合作项目(2020CX020000); 十三五国家科技重大专项(2017ZX05013-006-002); 四川省科技计划重点研发项目(2022YFS0447)

第一作者: 纪佑军(1983—), 男, 博士, 教授, 主要从事岩土工程、地下工程等领域教学与科研工作。E-mail: jyyoujun0319@163.com

通讯作者: 熊军(1998—), 男, 硕士研究生, 从事岩土工程中的渗流问题的研究。E-mail: 2831445246@qq.com

obvious strain softening characteristics, and many large and medium-sized landslides have occurred in this area. Understanding the disaster-causing mechanism according to the characteristics of red-brown soil is conducive to the prevention and control of landslides. A three-dimensional geological model was established for the Zhoujiapo landslide in Jichang town, Liupanshui city. Based on the fluid-structure interaction theory of unsaturated soil, a mathematical model of the interaction between the flow field and the stress field of slope was established. The rainwater seepage and the stability of the landslide were simulated by using the finite element and the two-parameter strength reduction method considering the strain softening of the soil. The results show that after rainfall, the rainwater mostly flows into the lower edge and gully along the slope in the surface soil in the tangential and transverse directions rather than all vertical infiltration. The saturation at the bottom of the gully increases significantly and the intensity decreases the most compared to other areas at the upper edge. With time extension of rainfall, a plastic penetration zone along the gully is formed in the slope, which greatly reduces the stability of the landslide. Compared with the classical reduction method, the stability coefficient obtained by the double reduction method considering strain softening in the rainfall process changes from small to large, but the difference was within 4%. It can be seen that the negative impact of red-brown soil strain softening on landslide stability is not significant and weakens with rainfall. The prevention and control of such landslides should focus on reducing the permeability of gully soil. This study provides a theoretical basis for the prevention and control of similar landslides.

Keywords: seepage of unsaturated soils; strain softening; double reduction; landslide; stability

当土体接受持续降雨入渗时, 地下水位和表层土含水饱和度发生较大变化, 将引起斜坡土体的强度指标和渗透力改变, 极大地影响斜坡的稳定性^[1-2]。虽然降雨诱发的滑坡多为浅层滑坡, 且规模较小, 但季节性强降雨在夏季呈现群发态势, 造成的损失不亚于大型滑坡^[3]。

在自然状态下, 浅表土体中的水分易蒸发, 多呈非饱和状态, 斜坡土体的降雨渗流为典型的饱和-非饱和和渗流^[4-5]。国内外学者在饱和-非饱和渗流数值计算模型的优化和应用方面进行了一系列的研究。在饱和-非饱和渗流数值分析中, 非饱和土内渗透率将随含水饱和度变化而改变, 两者之间的关系可用经验公式来表征^[6], 而地下水位可用总水头表示^[7], 以避免因地下水边界上下浮动造成数学模型难以求解。石爱红等^[8]考虑了非饱和土中基质吸力对渗流的影响, 并应用于丁家坡滑坡失稳过程的模拟。李华等^[9]在饱和-饱和和渗流的基础上分析了鸡场镇“7·23”滑坡逐小时降雨下的稳定性。以往的研究中^[7-9], 对斜坡饱和-非饱和和渗流数值分析的理论和方法已较为完善, 但在分析斜坡稳定性时, 多使用传统的极限平衡与强度折减法^[10]。传统方法忽略了滑坡过程中滑带土体强度参数的弱化过程即应变软化现象, 可能导致所得到的稳定系数出现一定的偏差^[11]。

斜坡岩土形成过程中, 经历了风化、沉积和降雨

冲刷等漫长的地质作用, 物理成分和力学性质极为复杂^[12]。多数土体在荷载作用下会呈现强度弱化或应变软化现象^[13], 即土体发生剪切破坏时强度参数由峰值降低至残余状态的现象。Skempton^[14]提出了斜坡失稳过程的土体应变软化概念, 土体可能处于峰值状态、软化状态或残余状态。而后国内外学者对应变软化和传统稳定性计算方法与强度理论的结合进行了一系列的研究, 实现了应变软化与瑞典条分法^[11]、刚体极限平衡法^[15]等稳定性计算方法和摩尔库伦强度理论^[16]的耦合。在斜坡稳定性的分析方法中, 强度折减法因无需预设滑动面位置, 并且可反映岩土体参数弱化过程而被广泛应用^[17]。传统的强度折减法假定内摩擦角和黏聚力的折减系数一致。但在滑坡过程中, 滑带土的双抗剪强度参数软化速度是不同的^[18]。侯世伟等^[19]和薛海斌等^[20]在土体线性软化本构模型的基础上, 推导了应变软化过程双抗剪强度之间非等比例折减的关系, 并用于强度折减法中。但计算模型中忽略了斜坡渗流场对稳定性的影响。

2021年7月15日, 受强降雨影响, 贵州省六盘水市水城区鸡场镇周家坡一处斜坡失稳^[21-22], 造成3栋建筑倒塌, 直接经济损失达1100余万元。六盘水地区红棕色土保水性强, 有明显的应变软化特征, 曾因强降雨诱发多次大中型滑坡。根据周家坡降雨型滑坡资料, 建立滑坡三维地质模型, 运用有限元和考虑

应变软化的双参数非等比例折减法进行降雨渗流和稳定性分析,探讨不同降雨工况下滑坡的渗流规律及其对危险滑动面和稳定性的影响,对比不同强度折减法对滑坡稳定系数的影响。

1 降雨作用下滑坡稳定计算数学模型

1.1 流固耦合方程

土体三维渗流状态下的平衡方程可依据虚功原理建立^[23]。某时间上岩土介质中的虚功是与作用于其上的外力虚功相等,依照虚功原理可建立:

$$\int_V \delta \varepsilon^T d\sigma' dV - \int_V \delta \mu^T df dV - \int_S \delta \mu^T dt dS = 0 \quad (1)$$

式中: σ' ——岩土颗粒间的有效应力/Pa;

$\delta \mu^T$ ——岩土体的虚位移/m;

$\delta \varepsilon^T$ ——岩土体的虚应变;

dV ——体积微元/m³;

dS ——面积微元/m²;

f ——岩土体上的体力/(N·m⁻³);

t ——岩土体上的面力/(N·m⁻²)。

根据 Biot 有效应力原理^[24], 岩土颗粒间的有效应力与孔隙压力和饱和度之间的关系为:

$$\sigma_{ij} = \sigma'_{ij} + \delta_{ij} [p_a(1 - s_w) + p_w s_w] = \sigma'_{ij} + m \bar{p}, \quad (2)$$

$$m = [1, 1, 1, 0, 0, 0]^T$$

式中: σ'_{ij} ——岩土颗粒间的有效应力/Pa;

σ_{ij} ——岩土体上的总应力/Pa;

p_w ——孔隙内流体压力/Pa;

p_a ——孔隙内气体压力/Pa;

δ_{ij} ——张量 Kronecker 函数符号;

s_w ——含水饱和度。

通过增量可将本构关系表示为^[25]:

$$d\sigma' = D_{ep} (d\varepsilon - d\varepsilon_L) \quad (3)$$

式中: D_{ep} ——岩土体弹塑性矩阵;

$d\varepsilon$ ——总应力引起的颗粒变形;

$d\varepsilon_L$ ——孔隙流体压力引起的颗粒变形。

根据流体压力性质, 孔隙流体引起的变形无剪应变, 只有正应变。可得到其表达式:

$$d\varepsilon_L = -m \frac{d\bar{p}}{3K_s} \quad (4)$$

式中: K_s ——岩土体颗粒压缩模量/Pa。

因斜坡与大气联通, 所以气压是恒定的, 不随时间变化, 有 $dp_a/dt = 0$ 。根据有效应力原理, $\bar{p}$ 对时间的导数为:

$$\frac{d\bar{p}}{dt} = \frac{d[p_a(1 - s_w) + p_w s_w]}{dt} = \frac{s_w dp_w}{dt} + \frac{p_w ds_w}{dt} \quad (5)$$

$$\frac{ds_w}{dt} = \frac{ds_w}{dp_w} \frac{dp_w}{dt} = \omega \frac{dp_w}{dt} \quad (6)$$

式中: ω ——土水特征曲线, $\omega = ds_w/dp_w$ 。

土水特征曲线定义了非饱和土中基质吸力对含水饱和度的影响, 基质吸力即毛细管压力可表示为 $p_c = p_a - p_w$ 。联立上式并对时间项求导得平衡方程:

$$\int_V \delta \varepsilon^T D_{ep} \left[\frac{d\varepsilon}{dt} + m \frac{1}{3K_s} (s_w + p_w \omega) \frac{dp_w}{dt} \right] dV - \int_V \delta \mu^T \frac{df}{dt} dV - \int_S \delta \mu^T \frac{dt}{dt} dS = 0 \quad (7)$$

1.2 非饱和土的抗剪强度准则及软化规律

Fredlund^[26] 在 Mohr-Coulomb 强度理论的基础上并考虑非饱和土中基质吸力的影响得到双应力状态变量强度理论公式:

$$\tau_f = c' + (\sigma - p_a) \tan \varphi + (p_a - p_w) \tan \varphi^b \quad (8)$$

式中: τ_f ——抗剪强度/Pa;

φ' ——内摩擦角/(°);

φ^b ——吸力内摩擦角/(°);

c' ——黏聚力/Pa;

$(p_a - p_w)$ ——基质吸力, 即毛细管压力/Pa。

当岩土体处于饱和状态时, 上式退化为经典 Mohr-Coulomb 准则。

岩土力学中应变软化是反映岩土体在达到峰值强度后的强度退化现象, 本质为抗剪强度参数与软化参数之间的函数关系^[15, 27]。为计算方便, 在斜坡稳定性分析中, 常将峰值强度参数过渡至残余强度参数的过程简化为线性关系^[28]。在线性软化模型中, 强度参数是软化参数 η 的函数, 见图 1。

强度参数和软化参数函数关系如下:

$$c = \begin{cases} c_p, \eta \leq \eta_p \\ c_p - \frac{c_r - c_p}{\eta_p - \eta_r} (\eta - \eta_p), \eta_p < \eta \leq \eta_r \\ c_r, \eta > \eta_r \end{cases} \quad (9)$$

$\tan \varphi =$

$$\begin{cases} \tan \varphi_p, \eta \leq \eta_p \\ \tan \varphi_p - \frac{\tan \varphi_r - \tan \varphi_p}{\eta_p - \eta_r} (\eta - \eta_p), \eta_p < \eta \leq \eta_r \\ \tan \varphi_r, \eta > \eta_r \end{cases} \quad (10)$$

式中: φ ——内摩擦角/(°);

c ——黏聚力/Pa;

η ——软化参数, 可取为等效塑性应变;

p——表示峰值状态;

r——表示残余状态。

根据式(9)、(10)可推导在软化阶段强度参数之间的关系式为:

$$\frac{c_r - c_p}{c - c_p} = \frac{\tan \varphi_r - \tan \varphi_p}{\tan \varphi - \tan \varphi_p} \quad (11)$$

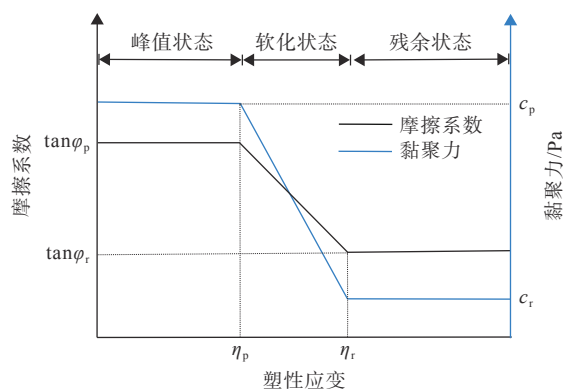


图1 强度参数软化过程

Fig. 1 Strength parameter softening process

1.3 滑坡稳定性计算的强度折减法

Zienkiewicz 等^[29]提出了计算斜坡稳定性的经典强度折减法,其原理是通过对抗剪强度指标的不断折减以实现斜坡失稳全过程的数值模拟,最终获得的折减系数即稳定系数。

$$\varphi_m = \arctan(\tan \varphi_p / F_\varphi), c_m = c_p / F_c \quad (12)$$

式中: φ_m ——折减后的内摩擦角/(°);

c_m ——折减后的黏聚力/Pa;

φ_p ——峰值内摩擦角/(°);

c_p ——峰值黏聚力/Pa;

F_φ ——摩擦角的折减系数;

F_c ——黏聚力的折减系数。

在经典强度折减法中两折减系数相等,考虑滑坡土体的线性软化过程,结合式(11)可推导土体软化过程两折减系数关系式为:

$$F_\varphi = \frac{F_c \tan \varphi_p (c_r - c_p)}{c_p (1 - F_c) (\tan \varphi_r - \tan \varphi_p) + F_c \tan \varphi_p (c_r - c_p)} \quad (13)$$

判断失稳的条件为形成贯通的塑性变形区域和滑动区土体位移曲线产生拐点,经典强度折减法将此时的折减系数视为斜坡稳定系数。

对于考虑应变软化的双抗剪强度参数非等比例折减法,Isakov 等^[30]提出了根据强度折减的临界状态下最短几何路径来确定综合稳定系数的方法,该方法物理意义明确^[31],可求出理论上的最小稳定系数^[32]:

$$F_s = \frac{1}{1 - L / \sqrt{2}},$$

$$L = \sqrt{(1 - 1/F_{s\varphi})^2 + (1 - 1/F_{sc})^2} \quad (14)$$

式中: L ——折减几何路径的长度;

$F_{s\varphi}$ ——失稳临界状态内摩擦角折减系数;

F_{sc} ——失稳临界状态黏聚力的折减系数。

2 滑坡区域概述

2.1 地质概况

周家坡滑坡地质灾害点地形高差大、坡度陡峭,滑坡发生区域坡度 $45^\circ \sim 55^\circ$, 部分区域坡度达 $60^\circ \sim 70^\circ$, 走向约为 $NE60^\circ$, 属高陡斜坡。斜坡上发育长约 140 m 的冲沟, 将其分为南北两翼。滑坡前缘为省道 218 及居民房屋, 上部后缘为公路及村民住房。

研究区为云贵高原中央黔中丘原与滇东高原交界带, 地形破碎, 且高差大。滑坡位于扬子地块六盘水断陷范围内, 多构造相互作用, 褶皱与断裂交错, 基岩体较破碎, 地质简图如图 2 所示。

研究区域地层由新到老分别为: 第四系残积土层 (Qh^{dl}), 主要为风化的玄武岩残坡积红棕色土, 部分区域厚度较大, 厚 6 ~ 34 m; 三叠系下统飞仙关组 (T_3f), 主要为紫红色的砂页岩; 二叠系中上统峨眉山玄武岩 (P_{2-3em}), 为玄武质的火山凝块岩, 岩体破碎。研究区属温带季风气候, 年降水量 940 ~ 1 450 mm。地表水主要为季节性降雨径流, 地下水主要是基岩裂隙水和土层中的孔隙水。

滑坡地质剖面及据滑后出露部分推测滑动面位置见图 3。滑坡区长约 150 m, 宽约 150 m, 厚约 18 m, 滑坡体方量约 400 000 m^3 。滑体母岩为二叠系中上统峨眉山组玄武岩第一段 (P_{2-3em}^1), 经多期火山活动形成, 在强烈构造运动的作用下, 形成多组构造结构面切割的碎块状岩体。

滑床为强风化的碎块玄武岩 (P_{2-3em}^1), 粒径较大, 碎块间填充较多残积土。主要优势结构面产状为 $20^\circ \sim 35^\circ \angle 35^\circ \sim 45^\circ$ 。

2.2 滑坡失稳过程

图 4(a)为滑坡影响范围和群众撤离路线。该滑坡前缘部分坡度达 $50^\circ \sim 60^\circ$, 且无植被覆盖, 多为松散堆积的第四系残积土, 见图 4。因而在强降雨作用下, 前缘剪出口岩土体率先失稳崩落, 继而后缘岩土体失去支撑, 在重力势能作用下发生整体牵引滑动。

前缘堆积土体见图 4(b), 主要残留滑移后的第四

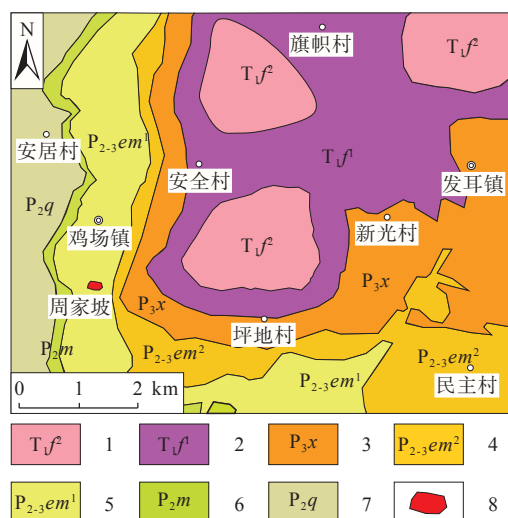


图2 研究区地质简图

Fig. 2 Geological sketch of the study area

1—三叠系下统飞仙关组第二段; 2—三叠系下统飞仙关组第一段; 3—二叠系上统宣威组; 4—二叠系中上统峨眉山组第二段; 5—二叠系中上统峨眉山组第一段; 6—二叠系中统茅口组; 7—二叠系中统栖霞组; 8—滑坡区域

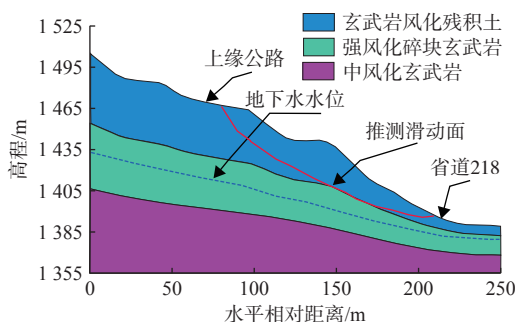


图3 周家坡滑坡地质剖面图

Fig. 3 Geological profile of Zhoujiapo landslide

系残积土和少量碎块玄武岩, 表面普遍高于原坡面。后缘残余的滑坡堆积体厚度较薄, 表面低于原坡面, 且见多级牵引下挫台坎, 受地势影响滑坡体多堆积于前缘而未发生较远运移。鸡场镇滑坡属于典型的牵引式滑坡, 按滑坡物质组成分类则为土质滑坡。

3 滑坡稳定性计算数值模型

3.1 几何模型及土体参数

通过现场钻孔勘察资料和滑坡前地表卫星高程点数据, 建立工程坐标系转换坐标, 将坐标点拟合建立地表表面, 潜水面及地层分割面, 进而建立滑坡区域三维地质模型, 几何模型见图5(a)。

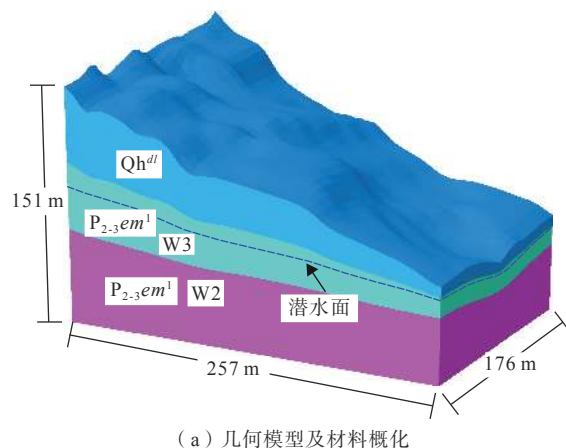
将计算区域简化为潜水面以上的非饱和区, 地层包括残积土层和滑床(夹杂土的强风化碎块玄武岩)的潜水面以上部分。以下岩层因稳定性好且受降雨



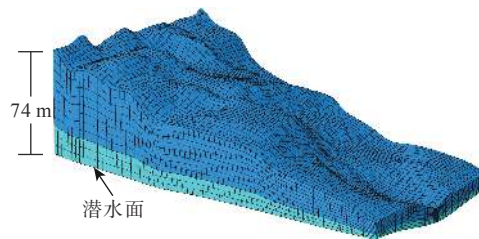
(a) 滑坡未失稳前卫星影像图 (b) 滑坡失稳后航拍图

图4 滑坡区域影像图

Fig. 4 Image map of the landslide area



(a) 几何模型及材料概化



(b) 计算区域网格剖分

图5 构建三维有限元地质模型

Fig. 5 Construction of 3D finite element geological model

影响小, 对滑坡影响较小, 不参与计算。地质模型离散化后如图5(b)所示, 划分为最大边长约4 m的六面体网格共33 396个, 节点37 788个。利用非线性有限元软件ABAQUS对该处滑坡进行数值分析, 单元类型为渗流—应力耦合单元, 其非饱和流固耦合的计算模型如前所述。

根据滑坡现场钻孔注水及声波试验, 物理力学试验和相关文献^[33-34]对该地区同类土的相关试验数据可得到地层岩土体的物理力学参数见表1。

渗透系数在饱和土中是恒定的, 而在非饱和土中则取决于饱和程度和基质吸力, Alonso等^[35]总结试验

表 1 地层岩土物理力学参数
Table 1 Physical and mechanical parameters of formation rock and soil

地层物理力学参数	玄武岩残积土	强风化碎块玄武岩-残积土	中风化玄武岩
干重度/(kN·m ⁻³)	13.1	24.6	27.1
压缩模量/MPa	5.21	57.20	3 120
泊松比	0.35	0.30	0.25
峰值黏聚力/kPa	8.41	189	1 460
峰值内摩擦角/(°)	20.16	38.40	40.36
残余黏聚力/kPa	3.82	—	—
残余内摩擦角/(°)	14.6	—	—
吸力内摩擦角/(°)	14	—	—
饱和渗透系数/(m·s ⁻¹)	8.35E-6	2.8E-6	3E-7
孔隙比	1.33	0.68	0.25

数据提出式(15):

$$K = \frac{k_w}{k_0} = \frac{a_w}{a_w + [b_w \times (u_a - u_w)]^{c_w}} \tag{15}$$

式中: u_a ——孔隙内气体压力/Pa;
 u_w ——孔隙内水压力/Pa;
 $(u_a - u_w)$ ——基质吸力/Pa;
 k_w ——土体非饱和状态的渗透系数/(m·s⁻¹);
 k_0 ——土体饱和渗透系数/(m·s⁻¹);
 K ——渗透系数折减系数;
 a_w 、 b_w 、 c_w ——土体材料系数, 结合对同类土相关试验数据^[9]拟合后分别取 1, 0.001, 0.75。

由于毛细管力的作用, 在非饱和土中土体具有一定的保水性。根据余沛等^[36]对六盘水地区玄武岩风化土的综合平板压力法测得的土水特征曲线, 表征基质吸力和饱和度之间的关系, 由试验数据和经验公式所得的土体渗透系数折减系数 K , 饱和度和基质吸力关系如图 6 所示。

3.2 流场与应力场边界及计算条件

滑坡岩土体采用考虑基质吸力的弹塑性修正 Mohr-Coulomb 本构模型, 基质吸力对含水饱和度和渗透系数的影响通过土水特征曲线与渗透系数曲线定义。模型数值计算共分为地下水稳定渗流分析, 降雨渗流分析和稳定性分析 3 个步骤。在地下水稳定渗流分析中, 模型整体施加重力荷载, 模型四周边界约束法向位移, 底面固定约束; 将底面(地下水水位面)设为不透水边界, 坡面设为透水边界, 并在底边设置地下水水头边界。

为了得到计算前的平衡状态, 需保证在降雨渗流

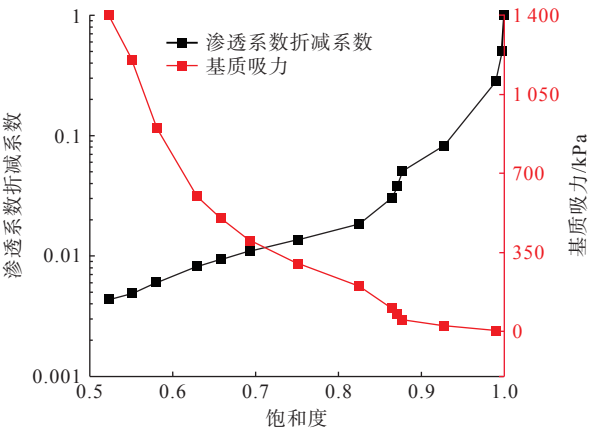


图 6 玄武岩残积土土水特征曲线和渗透系数曲线
Fig. 6 Moisture absorption curve and permeability coefficient curve of basalt residual soil

分析和稳定性分析前不应有位移, 就要得到初始应力场及渗流场, 使得内外力达到平衡。通过地下水稳定渗流的边界荷载条件, 模拟地下水稳定渗流后的滑坡的应力、孔隙压力, 将得到的单元应力和孔隙压力作为初始应力和初始流场再导入计算模型, 实现初始应力的平衡(图 7)。经计算导入初始应力与流场前后滑坡稳态渗流下最大位移由平衡前的 7.53 m 下降至 0.28 mm, 基本满足计算精度要求。

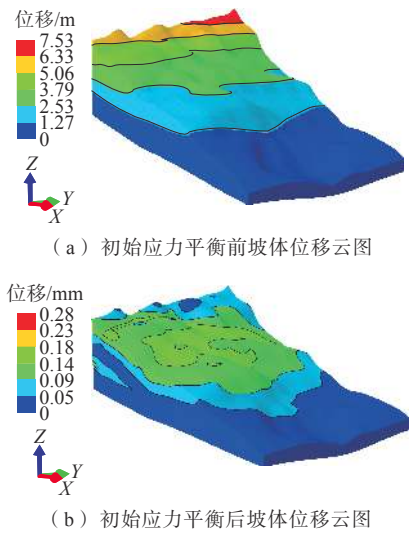


图 7 初始应力平衡前后位移云图
Fig. 7 Displacement nephograms before and after initial stress balance

在降雨渗流分析中, 除继承以上边界条件外, 将降雨以流量边界的形式施加于坡面法向, 降水量在降雨模拟的时间历程内由零线性增加至峰值, 滑坡前最大降雨量为 130 mm/d, 考虑坡度的法向入渗有效峰值降雨量设置为 110 mm/d。考虑到研究区域地表土层

多裂隙和虫穴等,渗透性能较好,故计算时假设降雨完全入渗,不产生地表径流。

在稳定性计算中,采用经典强度折减法和考虑应变软化的双参数非等比例折减法,由式(13)和土体参数可得两折减系数关系式为:

$$F_{\varphi} = 1.685F_c / (0.975 + 0.71F_c) \quad (16)$$

利用场变量将强度参数和稳定性分析的时间相关联,使初始强度参数随时间历程而不断软化,在时间历程内折减系数设置范围为 $F_c=0.5\sim 3.0$,软化关系依据式(12)(16)确定,在各时间点上计算滑坡在强度参数软化后的状态直至出现失稳临界状态。双折减法的综合稳定系数通过 Isakov 法计算所得。

4 计算结果分析

4.1 地下水稳定渗流和降雨渗流

图8为不同降雨时间下滑坡土体的饱和度的云图。在降雨前滑坡地下水流动形式为由计算区域的高水位(高程1433 m)流向坡底低洼区(高程1386 m),在潜水面土体呈饱和状态,潜水面以上基质吸力随高程上升而上升,土体饱和度呈下降趋势。符合土水特征曲线定义的变化规律。

对比降雨前后,土体饱和度出现明显的上升,且在坡底出现饱和浸润区,饱和度和坡底部浸润区面积随着降雨时间的增加而明显增加。由饱和度剖面云图中可见,滑坡上缘的渗流主要集中于表面,内部饱和度则几乎没有改变。这是因为降雨入渗后浅表土体的饱和度升高,基质吸力下降,使得有效渗透系数上升,形成高渗透带,而由于内部土体有效渗透系数较低和地势影响,沿坡面法向入渗至坡体内部的雨量远小于沿坡面切向和横向的高渗透表层土入渗至坡底和冲沟的雨量。由图可见冲沟底部和坡底土体下

部饱和度有较为明显的上升,符合上述雨水在滑坡非饱和土体内的汇流规律。

4.2 降雨对滑坡稳定性的影响

利用经典强度折减法和考虑应变软化的双参数非等比例折减法,分别计算地下水稳定渗流和降雨瞬态渗流情况下滑坡失稳的渐进破坏过程。稳定性计算直至产生大位移而不收敛为止。随折减过程坡内土体抗剪强度将不能和剪应力配套而出现塑性区,而后土体塑性变形区在坡内贯通形成屈服面即为最危险滑动面,滑坡土体将沿屈服面滑动而失稳。取坡脚土体为位移监测对象,以位移拐点作为滑坡失稳的判断标志,对应的折减系数即为稳定系数,见表2。

与经典强度折减法相比,在地下水稳定渗流时考虑应变软化的双折减法计算的综合稳定系数更小,这符合前人^[15-16]对比两方法在不考虑渗流的土坡稳定性计算中的结论。随着降雨时间的增加,土体饱和度上升,双折减法计算与经典强度折减法所得的稳定系数均呈现下降趋势,且两稳定系数逐渐相近直至降雨2 d和2.5 d时双折减法所得安全系数由偏小转为偏大。这是因为随降雨的进行,根据双应力强度原理和前人试验结论^[37]相较于内摩擦角土体有效黏聚力软化更大,故降雨对以内摩擦角发挥主要强度作用的双折减法计算结果的影响不及经典折减法显著。整个降雨过程两方法的 F_s 值相近,差距均在4%以内。

降雨2.5 d滑坡双参数折减直至失稳后的塑性区云图如图9所示,滑坡内部发育圆弧形滑动面,前缘剪出口岩土体先失稳滑出,后缘冲沟和公路路基岩土体失去支撑,相继在重力作用下拉裂进而引发整体牵引滑动。

滑坡体沿X方向长度为160 m, Y方向长度为153 m,最大厚度26.3 m,滑动区域体积372 450 m³,与现场推

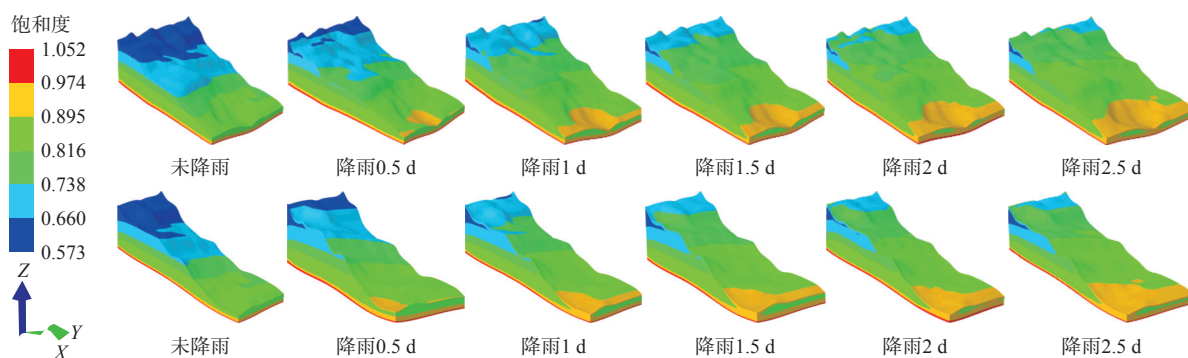


图8 滑坡土体饱和度云图(上)和滑坡剖面饱和度云图(下)

Fig. 8 Landslide saturation nephogram (top) and landslide profile saturation nephogram (bottom)

表 2 不同折减法滑坡稳定系数
Table 2 Stability coefficients of landslide with different reduction methods

模拟工况	经典强度折减法 F_s	考虑应变软化的双折减法		
		F_{sc}	F_{sp}	综合稳定系数 F_s
稳定渗流	1.32	1.41	1.202	1.311
降雨0.5天	1.27	1.35	1.176	1.268
降雨1天	1.24	1.31	1.158	1.239
降雨1.5天	1.22	1.28	1.145	1.218
降雨2天	1.16	1.22	1.116	1.172
降雨2.5天	1.09	1.16	1.086	1.126

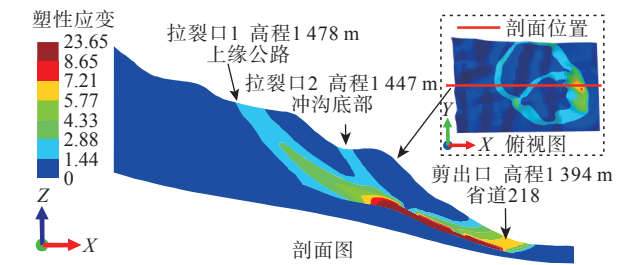


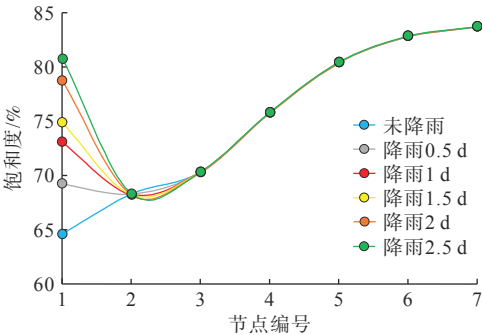
图 9 滑坡临界状态俯视和剖面塑性应变云图
Fig. 9 Top and profile plastic strain nephograms of landslide critical state

测滑动土方量误差为 6.1%。可见考虑应变软化的双参数折减法对滑坡失稳过程的模拟具有一定的可靠性。

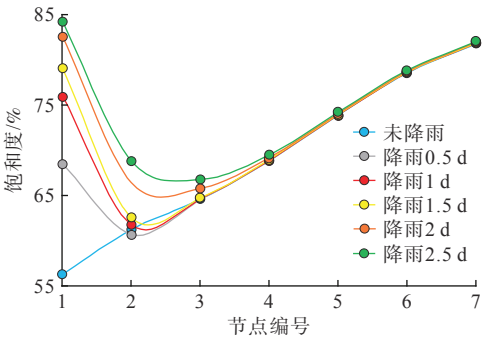
在地下水稳定渗流下的强度折减计算的滑坡临界状态中, 冲沟底部未出现塑性区。随着降雨时间的增加, 沿冲沟底部逐渐出现塑性变形, 在降雨 2.5 d 冲沟底部率先拉裂而公路路基处后发生拉裂, 符合现场观测下滑坡的失稳过程。冲沟底部形成塑性区, 是降雨条件下滑坡稳定系数显著下降的原因之一。

为进一步探究冲沟的塑性贯通区生成原因, 在图 9 模型中部剖面上取从滑坡表面两处拉裂口至屈服面上缘交汇点处两段屈服面上各 7 个节点的饱和度, 如图 10 所示。曲线图中可见拉裂口 1 至交汇点屈服面内部节点的饱和度仅在坡面上上升明显, 内部饱和度几乎无变化。拉裂口 2 至交汇点屈服面节点饱和度有明显的、不同程度的上升。

由图 8 和图 10 中非饱和土的渗流规律, 在降雨影响下冲沟处土体内部饱和度显著上升。上缘公路拉裂口至交汇点屈服段土体内部饱和度则无变化。饱和度上升在降低土体强度参数的同时, 也增加了土体重量使下滑力上升。降雨作用下滑坡内饱和度的不均匀上升, 使得稳定性计算中沿冲沟塑性区的形成, 进一步降低了滑坡的稳定性。



(a) 拉裂口1至交汇点屈服面节点饱和度



(b) 拉裂口2至交汇点屈服面节点饱和度

图 10 节点饱和度变化曲线

Fig. 10 The saturation change curves on the node

5 结论

(1) 滑坡上缘雨水主要沿坡面切向和横向流入下缘和冲沟, 并非全部垂直入渗, 表层土饱和度变化很小。坡底土体内部饱和度明显上升, 下缘受渗流力影响更强。

(2) 随降雨的进行, 两种方法所得的稳定系数均呈现下降趋势, 与经典折减法相比考虑应变软化的双折减法所得的稳定系数由偏小转为偏大。可见降雨对以内摩擦角发挥主要强度作用的双折减法计算结果的影响不及经典折减法显著。两方法的 F_s 值差距均在 4% 以内。

(3) 在降雨 2.5 d 天双参数折减至失稳过程中, 滑坡前缘岩土体先失稳滑出, 后缘冲沟和路基土体失去支撑, 相继拉裂引发整体牵引滑动。滑动区域体积与现场推测值误差为 6.1%。

(4) 随降雨时间的延长, 冲沟内部相比于上缘公路饱和度上升显著, 使得冲沟底土体有效渗透系数增加, 又加速抬升其内部土体饱和度, 强度下降最大, 折减过程坡内形成沿冲沟的塑性贯通区, 使稳定性大幅下降。可降低冲沟底土体渗透性以防治此类滑坡。

参考文献 (References) :

- [1] 孟生勇, 江兴元, 杨义, 等. 降雨诱发堆积体滑坡水土响应与稳定性时空演化试验研究 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(1): 104 - 112. [MENG Shengyong, JIANG Xingyuan, YANG Yi, et al. An experimental study of spatial-temporal evolution of water-soil response and stability of a rainfall-induced accumulation landslide[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(1): 104 - 112. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 宋德光, 吴瑞安, 马德芹, 等. 四川泸定昔格达组滑坡灾害运动过程模拟分析 [J]. 地质通报, 2023, 42(12): 2185 - 2197. [SONG Deguang, WU Ruian, MA Deqin, et al. Simulation analysis of landslide disaster movement process in Xigeda Formation, Luding County, Sichuan Province[J]. Geological Bulletin of China, 2023, 42(12): 2185 - 2197. (in Chinese with English abstract)]
- [3] ZHANG Xia, LI Peng, LI Zhanbin, et al. Characteristics and formation mechanism of the July 25, 2013, Tianshui Group-occurring geohazards[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2017, 76(5): 219.
- [4] 张晨阳, 张泰丽, 张明, 等. 东南沿海地区玄武岩残积土雨水运移特征及滑坡失稳数值模拟 [J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(4): 42 - 50. [ZHANG Chenyang, ZHANG Taili, ZHANG Ming, et al. Rainfall infiltration characteristics and numerical simulation of slope instability in the basalt residual soil in the coastal area of Southeast China[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(4): 42 - 50. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 熊超, 孙红月. 基于多因素-多尺度分析的阶跃型滑坡位移预测 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2023, 53(4): 1175 - 1184. [XIONG Chao, SUN Hongyue. Step-Like Landslide Displacement Prediction Based on Multi-Factor and Multi-Scale Analysis[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2023, 53(4): 1175 - 1184. (in Chinese with English abstract)]
- [6] VAN GENUCHTEN M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated Soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1980, 44(5): 892 - 898.
- [7] 曹渊, 王铁良, 王文科, 等. 饱和-非饱和渗流三维数学模型及数值方法 [J]. 固体力学学报, 2013, 33(增刊 1): 79 - 83. [CAO Yuan, WANG Tieliang, WANG Wenke, et al. 3-d theoretical model and numerical method of saturated-unsaturated seepage[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2013, 33(Sup 1): 79 - 83. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 石爱红, 李国庆, 丁德民, 等. 考虑非饱和土基质吸力的丁家坡滑坡变形机制及稳定性评价 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(6): 141 - 151. [SHI Aihong, LI Guoqing, DING Demin, et al. Deformation mechanism and stability evaluation of Dingjiapo landslide considering the matric suction of unsaturated soil[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(6): 141 - 151. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 李华, 史文兵, 朱要强, 等. 贵州省水城县“7·23”灾难性滑坡形成机制研究 [J]. 自然灾害学报, 2020, 29(6): 188 - 198. [LI Hua, SHI Wenbing, ZHU Yaoqiang, et al. Study on the formation mechanism of “7 · 23” catastrophic landslide in Shuicheng County, Guizhou Province, China[J]. Journal of Natural Disasters, 2020, 29(6): 188 - 198. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 吴益平, 卢里尔, 薛阳. 基于临界状态的边坡渐进破坏力学模型分析及应用 [J]. 地质科技通报, 2020, 39(5): 1 - 7. [WU Yiping, LU Lier, XUE Yang. Application of landslide progressive failure mechanical model based on the critical stress state[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2020, 39(5): 1 - 7. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 陈亚烽, 陈国庆, 严明, 等. 基于一阶线性应变软化理论的边坡稳定性研究 [J]. 地质科技通报, 2022, 41(6): 180 - 188. [CHEN Yafeng, CHEN Guoqing, YAN Ming, et al. Study on slope stability considering first-order linear strain-softening theory[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(6): 180 - 188. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 刘建强, 许强, 郑光, 等. 贵州省鸡场滑坡地下水化学特征反映的水-岩(土)作用 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(2): 132 - 140. [LIU Jianqiang, XU Qiang, ZHENG Guang, et al. Water-rock/soil interaction reflected by the chemical characteristics of groundwater of Jichang landslide in Guizhou Province[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(2): 132 - 140. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 闫玉平, 肖世国. 考虑滑带强度参数分区取值的堆积层滑坡稳定性分析方法 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(2): 44 - 49. [YAN Yuping, XIAO Shiguo. Stability analysis method for bedrock-talus landslides considering strength parameter partition of slip shear band[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(2): 44 - 49. (in Chinese with English abstract)]

- abstract)]
- [14] SKEMPTON A W. Residual strength of clays in landslides, folded strata and the laboratory[J]. *Géotechnique*, 1985, 35(1): 3 – 18.
- [15] 何成, 唐辉明, 申培武, 等. 应变软化边坡渐进破坏模式及稳定性可靠度 [J]. *地球科学*, 2021, 46(2): 697 – 707. [HE Cheng, TANG Huiming, SHEN Peiwu, et al. Progressive failure mode and stability reliability of strain-softening slope[J]. *Earth Science*, 2021, 46(2): 697 – 707. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 何忠明, 吴维, 付宏渊, 等. 基于应变软化模型的软岩高边坡过程稳定性研究 [J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2013, 44(3): 1203 – 1208. [HE Zhongming, WU Wei, FU Hongyuan, et al. Process stability of soft rock high slope based on strain softening model[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2013, 44(3): 1203 – 1208. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 黄盛锋, 陈志波, 郑道哲. 基于灰色关联度法和强度折减法的边坡稳定性影响因素敏感性分析 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2020, 31(3): 35 – 40. [HUANG Shengfeng, CHEN Zhibo, ZHENG Daozhe. Sensitivity analysis of factors influencing slope stability based on grey correlation and strength reduction method[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2020, 31(3): 35 – 40. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 陈国庆, 黄润秋, 周辉, 等. 边坡渐进破坏的动态强度折减法研究 [J]. *岩土力学*, 2013, 34(4): 1140 – 1146. [CHEN Guoqing, HUANG Runqiu, ZHOU Hui, et al. Research on progressive failure for slope using dynamic strength reduction method[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(4): 1140 – 1146. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 侯世伟, 张永峰, 张皓, 等. 基于局部软化阶梯双折减法的土坡稳定性研究 [J]. *防灾减灾工程学报*, 2022, 42(4): 705 – 713. [HOU Shiwei, ZHANG Yongfeng, ZHANG Hao, et al. Research on progressive failure of slope based on softening law and step double reduction method[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2022, 42(4): 705 – 713. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 薛海斌, 党发宁, 尹小涛, 等. 边坡强度参数非等比例相关联折减法研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(增刊 2): 4005 – 4012. [XUE Haibin, DANG Faning, YIN Xiaotao, et al. Research on method of slope strength parameters non-proportional associated reduction[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(Sup 2): 4005 – 4012. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 彭双麒, 许强, 郑光, 等. 碎屑流堆积物粒度分布与运动特性的关系——以贵州纳雍普洒村崩塌为例 [J]. *水文地质工程地质*, 2018, 45(4): 122 – 129. [PENG Shuangqi, XU Qiang, ZHENG Guang, et al. Relationship between particle size distribution and movement characteristics of rock avalanche deposits: a case study of the Pusa village rock avalanche in Nayong of Guizhou[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2018, 45(4): 122 – 129. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 党杰, 董吉, 何松标, 等. 机载 LiDAR 与地面三维激光扫描在贵州水城独家寨崩塌地质灾害风险调查中的应用 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2022, 33(4): 106 – 113. [DANG Jie, DONG Ji, HE Songbiao, et al. Application of airborne LiDAR and ground 3D laser scanning in geological hazard risk investigation of Dujiazhai collapse in Shuicheng, Guizhou[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2022, 33(4): 106 – 113. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 曾攀. 有限元分析及应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004. [ZENG Pan. Finite element analysis and applications[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. (in Chinese)]
- [24] BIOT M A. General theory of three-dimensional consolidation[J]. *Journal of Applied Physics*, 1941, 12(2): 155 – 164.
- [25] 陈卫忠, 伍国军, 贾善坡. 2010. ABAQUS 在隧道及地下工程中的应用 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 232 – 235. [CHEN Weizhong, WU Guojun, JIA Shanpo. Application of ABAQUS in Tunnel and Underground Engineering[M]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2010: 232 – 235. (in Chinese)]
- [26] FREDLUND D G, MORGENSTERN N R. Stress state variables for unsaturated soils[J]. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 1977, 103(5): 447 – 466.
- [27] 陈亮胜, 韦秉旭, 廖欢, 等. 膨胀土边坡非饱和渗流及渐进性破坏耦合分析 [J]. *水文地质工程地质*, 2020, 47(4): 132 – 140. [CHEN Liangsheng, WEI Bingxu, LIAO Huan, et al. A coupling analysis of unsaturated seepage and progressive failure of an expansive soil slope[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(4): 132 – 140. (in Chinese with English abstract)]
- [28] CARTER J P, YEUNG S K. Analysis of cylindrical cavity

- expansion in a strain weakening material[J]. *Computers and Geotechnics*, 1985, 1(3): 161 – 180.
- [29] ZIENKIEWICZ O C, HUMPHESON C, LEWIS R W. Associated and non-associated visco-plasticity and plasticity in soil mechanics[J]. *Géotechnique*, 1975, 25(4): 671 – 689.
- [30] ISAKOV A, MORYACHKOV Y. Estimation of slope stability using two-parameter criterion of stability[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2014, 14(3): 6014004.
- [31] 赵炼恒, 曹景源, 唐高朋, 等. 基于双强度折减策略的边坡稳定性分析方法探讨 [J]. 岩土力学, 2014, 35(10): 2977 – 2984. [ZHAO Lianheng, CAO Jingyuan, TANG Gaopeng, et al. Discussion on slope stability analysis with double strength reduction technique[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(10): 2977 – 2984. (in Chinese with English abstract)]
- [32] 郑永来, 吴卓睿. 基于最短折减路径法的边坡安全系数研究 [J]. 地质科技通报, 2022, 41(6): 28 – 34. [ZHENG Yonglai, WU Zhuorui. Estimation of slope safety factor based on trajectory reduction method[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2022, 41(6): 28 – 34. (in Chinese with English abstract)]
- [33] 王参松. 贵州玄武岩残积土工程力学特性试验研究 [D]. 武汉: 武汉科技大学, 2012. [WANG Cansong. Testing study on engineering mechanical properties of basalt residual soil in Guizhou[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2012. (in Chinese with English abstract)]
- [34] 田小波, 刘鑫. 贵州玄武岩残积土现场渗透试验研究 [J]. 土工基础, 2012, 26(4): 123 – 125. [TIAN Xiaobo, LIU Xin. *In-situ* permeability tests in Guizhou basalt residual soils[J]. *Soil Engineering and Foundation*, 2012, 26(4): 123 – 125. (in Chinese with English abstract)]
- [35] ALONSO E, GENS A, LLORET A, et al. Effect of rain infiltration on the stability of slopes[J]. *Unsaturated Soils*, 1995(1): 241 – 249.
- [36] 余沛, 柴寿喜, 魏厚振, 等. 不同干密度下玄武岩残积土土水特征曲线分析 [J]. 工程勘察, 2012, 40(7): 1 – 5. [YU Pei, CHAI Shouxi, WEI Houzhen, et al. Analysis on soil-water characteristic curve of basalt residual soil considering influence of the different dry densities[J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2012, 40(7): 1 – 5. (in Chinese with English abstract)]
- [37] 李晋鹏, 汪磊, 王俊, 等. 考虑抗剪强度衰减特性的膨胀土边坡稳定性分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(6): 29 – 36. [LI Jinpeng, WANG Lei, WANG Jun, et al. Stability analysis of expansive soil slopes considering shear strength decay characteristics[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2022, 33(6): 29 – 36. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 王支农