

# 降雨条件下湖南省红层地区浅层土坡失稳机理研究

姚腾飞<sup>1,2</sup>, 徐跃冰<sup>3,4,5</sup>, 韩函<sup>3,4,5\*</sup>, 王璨<sup>1,2</sup>

- (1.湖南省地质灾害调查监测所,湖南长沙410004;  
2.湖南省地质灾害监测预警与应急救援工程技术研究中心,湖南长沙410004;  
3.有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室,湖南长沙410083;  
4.湖南省有色资源与地质灾害探查湖南省重点实验室,湖南长沙410083;  
5.中南大学地球科学与信息物理学院,湖南长沙410083)

**摘要:**红层是典型的“易滑地层”,在降雨条件下很容易发生浅层土质滑坡,因此研究红层地区浅层土质边坡在降雨条件下的稳定性十分重要。本研究以湖南省红层区浅层土质边坡为例,采用修正Green-Ampt入渗模型,对不同坡度、降雨强度、饱和渗透系数和初始含水率条件下的红层地区浅层土质边坡的稳定性进行研究,分析得到了各因素对边坡稳定性的影响规律。边坡坡度 $<45^\circ$ 时,安全系数随坡度增大而减小,边坡坡度 $>60^\circ$ 时,安全系数随坡度增大而增大;湿润锋随降雨强度的变化不明显,安全系数随降雨强度的增加变化不明显;随着饱和渗透系数的增加,湿润锋深度增加,边坡安全系数减小;安全系数随初始含水率的增加而减小。研究结果可为红层地区边坡防护工程提供一定的理论依据和实践指导。

**关键词:**红层;土质边坡;边坡稳定性;降雨入渗;修正Green-Ampt模型

**中图分类号:**P642.2 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2024)04-0101-10

## Study on instability mechanism of shallow soil slopes in the red beds of Hunan Province under rainfall conditions

YAO Tengfei<sup>1,2</sup>, XU Yuebing<sup>3,4,5</sup>, HAN Han<sup>3,4,5\*</sup>, WANG Can<sup>1,2</sup>

- (1.Hunan Institute of Geological Disaster Investigation and Monitoring, Changsha Hunan 410004, China;  
2.Hunan Geological Disaster Monitoring, Early Warning and Emergency Rescue Engineering Technology Research Center, Changsha Hunan 410004, China;  
3.Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals and Geological Environment Monitoring, Ministry of Education, Changsha Hunan 410083, China;  
4.Hunan Nonferrous Resources and Geological Hazards Exploration Key Laboratory of Hunan Province, Changsha Hunan 410083, China;  
5.School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha Hunan 410083, China)

**Abstract:** Red beds are typically considered as “prone-to-slide strata”, and shallow soil landslides can easily occur under rainy conditions. Therefore, it is of great importance to study the stability of shallow soil slopes in red bed areas under rainfall conditions. In this research, the shallow soil slopes in the red bed areas of Hunan Province is taken as an example, the stability of shallow soil slopes in red bed areas under different slope gradients, rainfall intensities,

收稿日期:2024-03-22; 修回日期:2024-05-22 DOI:10.12143/j.ztgc.2024.04.013

基金项目:湖南省地质院科研项目“湖南省典型地质背景区地质灾害成灾模式及致灾因素评价体系研究”(编号:HNGSTP202202)

第一作者:姚腾飞,男,汉族,1984年生,高级工程师,水工环地质专业,主要从事水文地质、环境地质、地质灾害防治方面的研究,湖南省长沙市天心区五凌路8号,84900861@qq.com。

通信作者:韩函,男,汉族,1998年生,硕士研究生,地质工程专业,研究方向为岩土可靠度分析,湖南省长沙市岳麓区麓山南路932号,776167866@qq.com。

引用格式:姚腾飞,徐跃冰,韩函,等.降雨条件下湖南省红层地区浅层土坡失稳机理研究[J].钻探工程,2024,51(4):101-110.

YAO Tengfei, XU Yuebing, HAN Han, et al. Study on instability mechanism of shallow soil slopes in the red beds of Hunan Province under rainfall conditions[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(4): 101-110.

saturated hydraulic conductivities, and initial water contents is investigated by employing the modified Green-Ampt infiltration model, the specific impact patterns of these factors on slope stability is also analyzed. When the slope gradient is less than  $45^\circ$ , the safety factor decreases as the slope increases; when the slope gradient is greater than  $60^\circ$ , the safety factor increases with the slope. The wetting front depth changes insignificantly with the rainfall intensity, and the safety factor changes insignificantly with the rainfall intensity; the depth of the wetting front increases and the safety factor of the slope decreases as the saturated hydraulic conductivity increases; the safety factor decreases as the initial water content increase. The results can provide a theoretical basis and practical guidance for slope protection engineering in red bed areas.

**Key words:** red bed; soil slope; slope stability; rainfall infiltration; modified Green-Ampt model

## 0 引言

红层指的是在各个历史时期沉积形成的具有红色外观的地层,在岩石圈表层分布最广,沉积厚度最大<sup>[1]</sup>。国内的红层一般于中生代以后的河湖相沉积形成,广泛地分布于我国的东南、西南和西北地区,这与我国的一带一路等重大战略实施区域相重合<sup>[2]</sup>。湖南红层一般形成于白垩纪晚期至古近纪早期,成岩程度不高,并且富含蒙脱石、伊利石等粘土矿物。水的力学效应是诱发滑坡最主要的因素之一,湖南地处亚热带季风气候区,降雨充沛,红层地层属于典型“易滑地层”<sup>[3]</sup>。

对于红层的研究成果,国内外一些学者对红层的物理力学性质以及水理性质展开了研究,Hecht等<sup>[4]</sup>研究发现二叠纪红层岩石结构与物理力学性质之间存在联系;Zhang等<sup>[5]</sup>采用常用的试验方法对红层软岩的崩解性进行了研究,并推导出解体断裂演化模型。谢小帅等<sup>[6]</sup>对滇中红层泥岩试样分别进行了单轴和三轴压缩试验,分析了水岩作用下红层软岩的力学特性,同时通过观察软岩的微观结构,总结出了滇中红层软岩遇水软化的机制。Liu等<sup>[7]</sup>则在前人的基础上,研究红砂岩在不同流态下的软化过程,并结合数值模拟手段讨论了不同流型影响软化过程的物理和力学效应,并揭示了红砂岩在多种流态水中的软化机制。

红层边坡稳定性也是红层研究的重点,是现在国内外学者的研究热点。许强等<sup>[3]</sup>通过一系列模型试验与数值模拟,将红层边坡的地质灾害类型进行系统分类并分析其成因机制。李保雄等<sup>[8]</sup>在分析红层软岩滑坡形成机制的基础上,对红层软岩典型滑坡进行了预测。孙乔宝等<sup>[9]</sup>通过对安-楚高速边坡进行调查,系统地对红层软岩路堤进行了研究。Wu等<sup>[10]</sup>考虑地震荷载的作用,利用FLAC3D构建边坡模型,计算地震荷载作用下的边坡临界高度,

并分析了不同工况下的边坡稳定系数。为探究降雨作用对红层边坡的影响程度,白永健等<sup>[11]</sup>利用模型试验与理论分析相结合的方法,对降雨作用下某软硬互层的红层滑坡灾害演变过程进行了研究。孟生勇等<sup>[12]</sup>通过室内模型试验,研究了降雨作用下红层边坡的破坏模式;杨旭等<sup>[13]</sup>借助能模拟软岩遇水崩解特性的相似材料,在模型试验框架中对不同降雨强度下红层软岩边坡的滑动模式进行了研究。

本研究通过现场调查与数值模拟相结合的方法<sup>[14-22]</sup>,以无限长边坡模型为例,采用可确定不同降雨历时下边坡土体含水率分布和湿润锋深度的修正Green-Ampt入渗模型<sup>[23]</sup>,对湖南省红层区浅层土质边坡进行了分析,主要研究了不同的边坡坡度、降雨强度、饱和渗透系数以及初始含水率对边坡稳定性和湿润锋深度的影响。

## 1 研究模型

为了深入了解红层地区滑坡的致灾机理,本文以无限长边坡为例,利用修正Green-Ampt入渗模型分析降雨入渗对红层地区边坡稳定性的影响,并探讨边坡失稳的内在机制。

### 1.1 修正Green-Ampt入渗模型

分析降雨入渗条件下的边坡稳定性,核心在于明确土体的含水率分布以及湿润锋深度。计算降雨作用下土体含水率的方法主要分为两种:(1)基于Richards方程的数值分析方法;(2)基于物理入渗模型的解析法,如Green-Ampt入渗模型、Philip模型和Smith模型等。数值分析方法虽然能精确求解降雨入渗的控制方程,但过程较为复杂。相比之下,以Green-Ampt入渗模型为代表的解析计算方法具有明确的模型参数、物理意义、简便的计算过程和能够满足精度的优点,因此受到了许多学者的青睐<sup>[23]</sup>。而修正的Green-Ampt入渗模型可以在保

有上述优点的基础上,确定土体在不同降雨持续时间下的含水率分布和湿润锋深度。本文采用修正的Green-Ampt入渗模型探讨降雨入渗对红层地区边坡稳定性的影响,并深入分析这一过程中的关键因素。

修正Green-Ampt模型在Green-Ampt模型的基础上,利用土水特征曲线的拟合公式,建立起土体渗透系数、基质吸力与体积含水率之间的关系,分析地表积水前的降雨渗透过程,其中土体渗透系数、基质吸力与体积含水率之间的关系为:

$$k(\theta) = k_s S_e^{3+2/\lambda} \quad (1)$$

$$\psi(\theta) = \psi_b S_e^{-1/\lambda} \quad (2)$$

式中: $k(\theta)$ ——土体的渗透系数,mm/h; $k_s$ ——土体的饱和渗透系数,mm/h; $S_e$ ——土体的相对含水率, $S_e = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r)$ ;  $\theta_s$ ——土体的饱和含水率; $\theta_r$ ——土体的残余含水率; $\psi(\theta)$ ——基质吸力,kPa; $\psi_b$ ——土体的进气值,kPa; $\lambda$ ——用于描述土体孔径分布特征的拟合系数。

对于任意给定的降雨时间 $t$ ,随着降雨的持续进行,入渗区域会达到饱和状态,此时的边界条件是由水头控制的<sup>[24]</sup>。假设降雨强度维持恒定,设为 $R$ ,记录下从开始降雨到积水出现所需的时间 $t_p$ 。根据Green-Ampt入渗模型,渗透速率 $f$ 会随着累计渗透量 $I$ 的增加而逐渐降低<sup>[23,25]</sup>。当累计渗透量达到一个特定值 $I_p$ 时,渗透速率 $f$ 将与降雨强度 $R$ 相等,这标志着边坡表层开始积水。此时,累计渗透量 $I_p$ 为:

$$I_p = \frac{(\theta_s - \theta_i) S_f}{R/k_s - 1} \quad (3)$$

式中: $I_p$ ——累计渗透量, $m^3$ ;  $\theta_i$ ——土体初始含水率; $S_f$ ——湿润锋处土体的概化基质吸力,kPa; $R$ ——降雨强度,mm/h。

综上可得,开始积水的时间 $t_p$ 为:

$$t_p = I_p / R \quad (4)$$

根据开始积水时间 $t_p$ 划分入渗边界如下:

(1)在降雨时间小于边坡开始积水的时间段内,土体的入渗区域处于非饱和状态。此时,入渗边界受流量控制,降雨会完全渗透到土体中。根据非饱和Darcy定律<sup>[26-27]</sup>,可以建立相应的入渗控制方程:

$$f = R = k(\theta) + \frac{k_s [\psi_r(\theta) - \psi_r(\theta_i)]}{z_w} \quad (5)$$

式中: $z_w$ ——湿润锋深度,m; $\psi_r(\theta)$ ——湿润锋处土体的相对吸力:

$$\psi_r(\theta) = \int_{\psi}^{\infty} \frac{k(\theta)}{k_s} d\psi = S_e^{3+\frac{1}{\lambda}} \frac{\psi_b}{3\lambda + 1} \quad (6)$$

由修正Green-Ampt入渗模型矩形剖面的含水率计算得到的湿润锋深度为:

$$z_w = \frac{Rt}{\theta - \theta_i} \quad (7)$$

式中: $t$ ——降雨时间,h; $\theta$ ——土体含水率; $\theta_i$ ——土体初始含水率。

将式(7)代入式(5)可得到如下非线性方程:

$$f = R = k(\theta) + \frac{k_s [\psi_r(\theta) - \psi_r(\theta_i)] (\theta - \theta_i)}{Rt} \quad (8)$$

求解式(8)所示的非线性方程,得到当前降雨条件下对应的土体含水量,再代入式(7)便可得到此时的湿润锋深度。

(2)当降雨时间大于或等于边坡积水形成的时间,降雨入渗会经历两个阶段:首先是自由入渗阶段,然后是积水入渗阶段。根据修正的Green-Ampt入渗模型<sup>[23]</sup>,当降雨强度 $R$ 大于土体的入渗速率 $f$ 时,土体的入渗区域会达到饱和状态,导致边坡表面开始积水。此时,入渗边界转由水头来决定。入渗速率 $f$ 可以表示为:

$$f(t) = \begin{cases} R & (t \leq t_p) \\ k_s \left[ 1 + \frac{(\theta_s - \theta_i) S_f}{I} \right] & (t > t_p) \end{cases} \quad (9)$$

式中: $I$ ——边坡表面形成积水以后的累计入渗量, $m^3$ 。

另外,引入 $t'_p$ 表示由 $t=0$ 开始积水到累计入渗量达到 $I_p$ 时所需的时间:

$$t'_p = \frac{I_p - S_f(\theta_s - \theta_i) \ln \left[ 1 + \frac{I_p}{S_f(\theta_s - \theta_i)} \right]}{k_s} \quad (10)$$

式中: $I_p$ ——累计渗透量, $m^3$ 。

由式(9)、式(10)可得,降雨历时为 $t$ 的累计入渗量 $I$ 为:

$$I = k_s \left[ t - (t_p - t'_p) \right] + S_f(\theta_s - \theta_i) \ln \left[ 1 + \frac{I}{S_f(\theta_s - \theta_i)} \right] \quad (11)$$

式中: $t_p$ ——开始积水时间,h; $t'_p$ ——由 $t=0$ 开始积

水到累计入渗量达到 $I_p$ 时所需的时间,  $h$ 。

同样,通过求解式(11)的非线性方程可以得到累计入渗量 $I$ ,再通过式(12)得到降雨时刻 $t$ 的入渗饱和区的湿润锋深度:

$$z_w = \frac{I}{\theta_s - \theta_i} \quad (12)$$

式中: $z_w$ ——湿润锋深度, m。

一旦明确了降雨的持续时间 $t$ 和土体的饱和渗透系数 $k_s$ ,便可以根据前述的两种入渗边界来确定边坡土体的含水率分布和湿润锋深度。通过计算土体的允许入渗率 $f$ ,与降雨强度 $R$ 进行对比,就可以确定积水出现的时间 $t_p$ 。

### 1.2 降雨入渗无限长边坡模型

在红层地区,由降雨引发的滑坡大多为浅层滑坡。为了深入探索这一问题,可以借助无限长边坡模型<sup>[28]</sup>进行研究。考虑降雨入渗对边坡稳定性的影响。图1展示了这一计算模型,其中采用了改进的莫尔-库仑破坏准则来确定土体的抗剪强度:

$$\tau = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \varphi' + (u_a - u_w) \tan \varphi^b \quad (13)$$

式中: $c'$ ——土体的有效粘聚力, kPa;  $\sigma_n$ ——单位土条的正应力, kPa,  $\sigma_n = \gamma z \cos^2 \alpha$ ;  $\varphi'$ ——土体的有效内摩擦角, ( $^\circ$ );  $\gamma$ ——土体的重度,  $N/m^3$ ;  $z$ ——滑动面的深度, m;  $u_a$ 和 $u_w$ ——分别为土体的孔隙气压力和孔隙水压力, kPa;  $(\sigma_n - u_a)$ ——单位土条底部的净法向力, kPa, 通常 $u_a$ 取 $0$ <sup>[24]</sup>, 因此 $(\sigma_n - u_a)$ 就简化为 $\sigma_n$ ;  $(u_a - u_w)$ ——基质吸力, kPa;  $\varphi^b$ ——基质吸力对土体抗剪强度贡献所对应的摩擦角, ( $^\circ$ ), 其值可以根据下式进行计算:

$$\varphi^b = \arctan(S_e \tan \varphi') \quad (14)$$

进而,可得边坡安全系数的计算式:

$$F_s = \frac{\tan \varphi'}{\tan \alpha} + \frac{c' + S_e \psi(\theta) \tan \varphi'}{\gamma z \sin \alpha \cos \alpha} \quad (15)$$

式中: $\alpha$ ——边坡倾角;  $z$ ——取为湿润锋深度 $z_w$ , m。

在处理均质边坡时,可以通过公式(7)和公式(12)计算在给定降雨持续时间的边坡土体的湿润锋深度。接着利用公式(15)计算边坡的安全系数。

### 1.3 数值分析模型

为了进一步研究红层地区岩土体特性与降雨入渗相互作用下的边坡失稳机理,采用图1所示的非饱和无限长斜坡模型<sup>[23]</sup>。在这个模型中,几何参

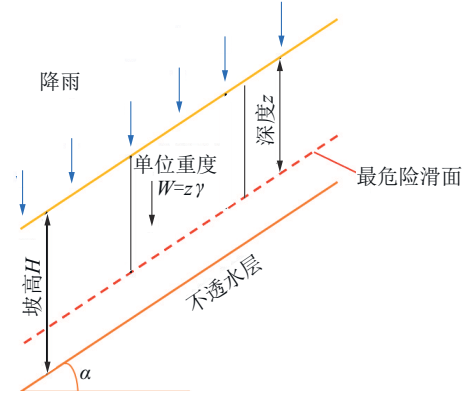


图1 红层浅层土质滑坡无限长边坡计算模型

Fig.1 Calculation model of infinite slope for shallow soil landslide in red bed

数为:边坡深度 $z=3$  m, 倾角 $\alpha=60^\circ$ ;水力边界条件:下部基岩为不透水边界;土体参数:饱和渗透系数 $k_s=0.36$  mm/h, 粘聚力 $c=5$  kPa, 内摩擦角 $\varphi=28^\circ$ , 重度 $\gamma=19.5$  kN/m<sup>3</sup>。饱和含水率 $\theta_s=40\%$ , 初始含水率 $\theta_i=33.8\%$ , 进气值 $\psi_b=2.752$  kPa, 湿润锋处土体的概化基质吸力 $S_f=424.3$  mm, 残余含水率 $\theta_r=1\%$ , 孔隙分布特征参数 $\lambda=0.319$ 。

## 2 影响因素的计算方案

根据泸溪县和沅陵县这两个红层区滑坡灾害的发育特点,将坡度、降雨特性、初始含水率以及饱和渗透系数作为影响因素探索红层区土质边坡的失稳机理。

### 2.1 研究坡度对红层区浅层土质边坡稳定性影响的模拟方案

以边坡坡度 $30^\circ$ 、 $40^\circ$ 、 $50^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $70^\circ$ 、 $80^\circ$ 为基础,降雨强度则根据中国气象局的划分标准初步拟定了3种情况,即大雨1.8 mm/h、暴雨3.96 mm/h以及大暴雨9 mm/h,两两组合得出18种计算工况。研究坡度对湖南省典型红层区浅层土质边坡稳定性影响的具体方案如表1所示。

### 2.2 饱和渗透系数对红层区浅层土质边坡稳定性影响的模拟方案

以饱和渗透系数0.36、0.72、1.8、3.6 mm/h为基础,降雨强度则分为2种情况,即暴雨3.96 mm/h以及大暴雨9 mm/h,两两组合得出8种计算工况。研究饱和渗透系数对湖南省典型红层区浅层土质边坡稳定性影响的具体方案如表2所示。

### 2.3 初始含水率对红层区浅层土质边坡稳定性影



表 1 坡度对红层区浅层土质边坡稳定性影响的具体方案

**Table 1 Specific scheme for the impact of slope on the stability of shallow soil slopes in red beds**

边坡坡度/(°)	降雨强度/(mm·h <sup>-1</sup> )	降雨时长/d
30		
40		
50	1.8	
60	3.96	10
70	9	
80		

表 2 饱和渗透系数对红层区浅层土质边坡稳定性影响的具体方案

**Table 2 Specific scheme for the impact of saturated hydraulic conductivity on the stability of shallow soil slopes in red beds**

饱和渗透系数/(mm·h <sup>-1</sup> )	降雨强度/(mm·h <sup>-1</sup> )	降雨时长/d
0.36		
0.72	3.96	
1.8	9	10
3.6		

响的模拟方案

以初始含水率 5.0%、10.0%、15.0%、20.0%、25.0%、30.0%、35.0% 为基础,降雨强度则分为 3 种情况:1.8、3.96、9 mm/h,饱和渗透系数取为 0.36、3.6 mm/h,通过组合共得出 35 组计算工况。研究初始含水率对湖南省典型红层区浅层土质边坡稳定性影响的具体方案如表 3 所示。

### 3 计算结果分析

#### 3.1 坡度对红层区浅层土质边坡稳定性的影响

表 3 初始含水率对红层区浅层土质边坡稳定性影响的具体方案

**Table 3 Specific scheme for the impact of initial water content on the stability of shallow soil slopes in red beds**

初始含水率/%	降雨强度/(mm·h <sup>-1</sup> )	饱和渗透系数/(mm·h <sup>-1</sup> )	降雨时长/d
5.0			
10.0			
15.0	1.8		
20.0	3.96	0.36	10
25.0	9	3.6	
30.0			
35.0			

分析

根据坡度对边坡稳定性影响的计算方案,通过式(7)、(12)确定降雨历时为  $t$  时边坡的湿润锋深度,再根据式(15)计算边坡的安全系数。计算结果如图 2 所示。

从图 2 中可以看出,在不同的降雨强度下,坡度对边坡稳定性的影响作用相似。在同等降雨条件下,当边坡坡度  $< 45^\circ$  时,安全系数随着坡度的增加而减小;当边坡坡度为  $45^\circ \sim 60^\circ$  时,安全系数随坡角的变化情况不容易判断;但从图 2 中可以看出,当坡度  $> 60^\circ$  时,安全系数随着坡度的增加而增加。这似乎与常识不符,但根据式(15)  $F_s = \frac{\tan\phi'}{\tan\alpha} + \frac{c' + S_e\psi(\theta)\tan\phi'}{\gamma z \sin\alpha \cos\alpha} \frac{\tan\phi'}{\tan\alpha}$  随着  $\alpha$  的增加而减小。 $c'$  是固定值,当降雨强度和降雨时长确定后,  $S_e$ 、 $\psi(\theta)$  以及  $z_w$  仅与降雨完成时土体的含水率有关,与坡角无关。因此,一旦降雨强度和降雨时长确定,无论坡

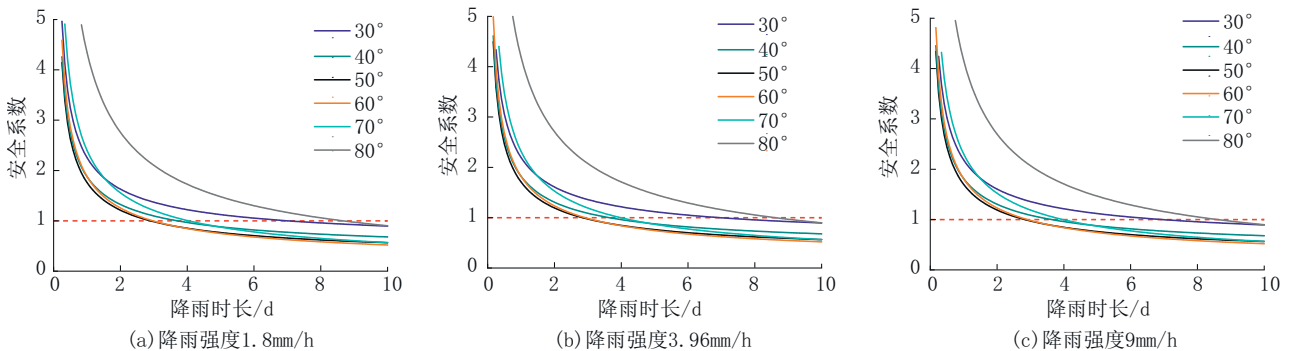


图 2 不同降雨强度下坡度对边坡稳定性的影响

Fig.2 Effect of slope on slope stability under different rainfall intensities

角取多少度,  $\frac{c' + S_e \psi(\theta) \tan \varphi'}{\gamma z}$  都为定值。对  $\frac{c' + S_e \psi(\theta) \tan \varphi'}{\gamma z \sin \alpha \cos \alpha}$  进行改写, 可得  $\frac{2c' + 2S_e \psi(\theta) \tan \varphi'}{\gamma z \sin 2\alpha}$ , 因此, 当  $30^\circ \leq \alpha < 45^\circ$  时,  $\frac{c' + S_e \psi(\theta) \tan \varphi'}{\gamma z \sin \alpha \cos \alpha}$  随着  $\alpha$  的增加而减小; 当  $45^\circ \leq \alpha \leq 80^\circ$  时,  $\frac{c' + S_e \psi(\theta) \tan \varphi'}{\gamma z \sin \alpha \cos \alpha}$  随着  $\alpha$  的增加而增加。综上所述, 当  $30^\circ \leq \alpha < 45^\circ$  时, 边坡安全系数随着坡度的增加而减小; 而当  $45^\circ \leq \alpha \leq 80^\circ$  时, 需要比较  $\frac{2c' + 2S_e \psi(\theta) \tan \varphi'}{\gamma z \sin 2\alpha}$  随  $\alpha$  增加的速率和  $\frac{\tan \varphi'}{\tan \alpha}$  随  $\alpha$  减小的速率, 因此, 当  $45^\circ \leq \alpha \leq 80^\circ$  时, 安全系数随坡角的变化没有固定的规律, 但从图2中可以观察到, 当  $60^\circ \leq \alpha \leq 80^\circ$  时, 边坡的安全系数随坡度的增加而增加。

由以上模拟结果可以得出, 坡度对红层区浅层土质边坡的稳定性有较大的影响, 当坡度  $< 45^\circ$  时, 边坡安全系数随着坡度的增加而减小; 当坡度为  $45^\circ \sim 60^\circ$  时, 边坡安全系数随坡角的变化没有固定的规律, 而当坡度  $\geq 60^\circ$  时, 边坡安全系数随着坡度的增加而增加。

### 3.2 降雨强度对红层区浅层土质边坡稳定性的影响分析

图3展示了在不同的坡度下, 3种不同的降雨强度对边坡稳定性的影响, 在不同的坡度下, 降雨强度对边坡稳定性的影响微乎其微。图4展示了3种不同的降雨强度对湿润锋深度的影响, 降雨强度对湿润锋深度几乎没有太大的影响, 故对确定边坡(即坡角确定)而言, 降雨强度对安全系数的影响较小。

### 3.3 饱和渗透系数对红层区浅层土质边坡稳定性的影响分析

图5展示了在不同的降雨强度下, 4种不同的饱和渗透系数对边坡稳定性的影响, 从图中可以看出, 饱和渗透系数对红层区浅层土质边坡的稳定性有较大影响, 在同等条件下, 饱和渗透系数越大, 浅层土质边坡的安全系数越小, 这是由于较大的饱和渗透系数更有利于雨水的入渗和湿润锋的扩展(见图6), 导致土体的基质吸力减小、抗剪强度降低, 最

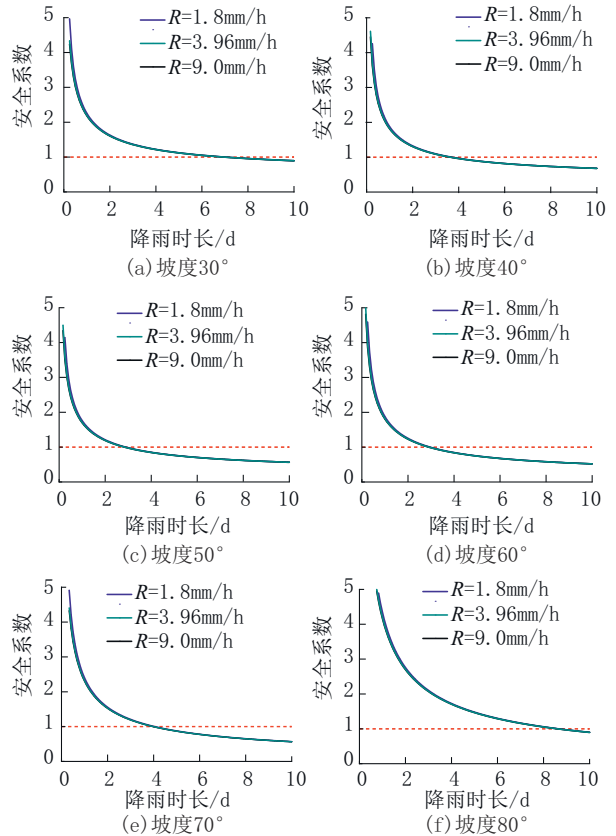


图3 不同坡度下降雨强度对边坡稳定性的影响  
Fig.3 Effect of rainfall intensity on slope stability under different slopes

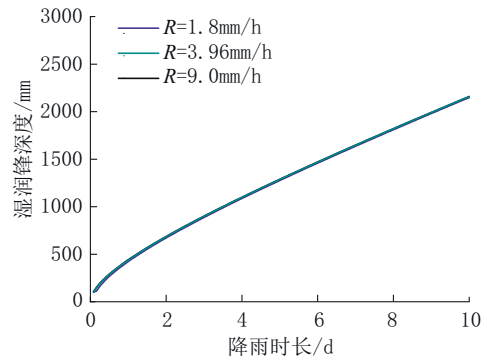


图4 降雨强度对湿润锋深度的影响  
Fig.4 Effect of rainfall intensity on the depth of wetting front

终使得边坡的安全系数越来越低。

图7展示了在不同的饱和渗透系数下, 降雨强度对边坡安全系数的影响, 从图7中可以看出, 在不同的饱和渗透系数下降雨强度对安全系数的影响较小, 这与前面的结论相符。

图8展示了在不同的饱和渗透系数下降雨强度

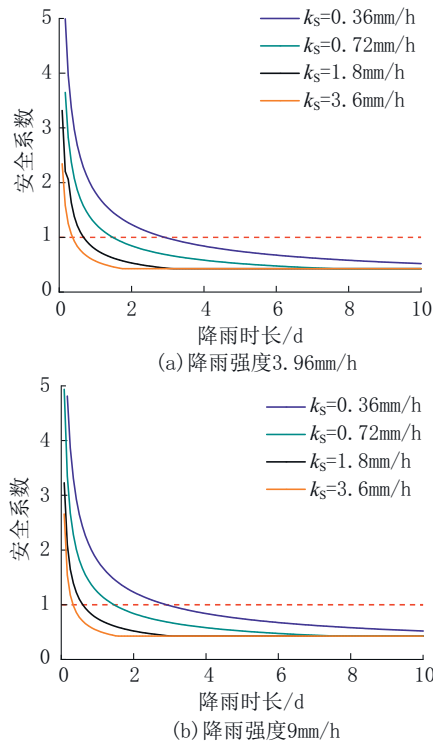


图 5 不同降雨强度下饱和和渗透系数对边坡稳定性的影响  
 Fig.5 Effect of saturated hydraulic conductivity on slope stability under different rainfall intensities

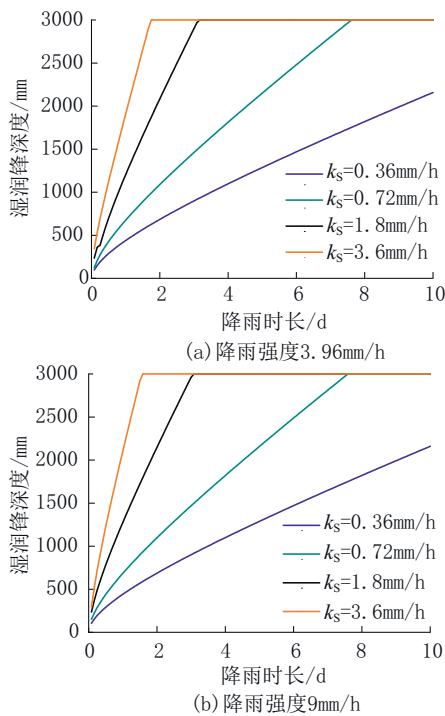


图 6 不同降雨强度下饱和和渗透系数对湿润锋深度的影响  
 Fig.6 Effect of saturated hydraulic conductivity on the depth of wetting front under different rainfall intensities

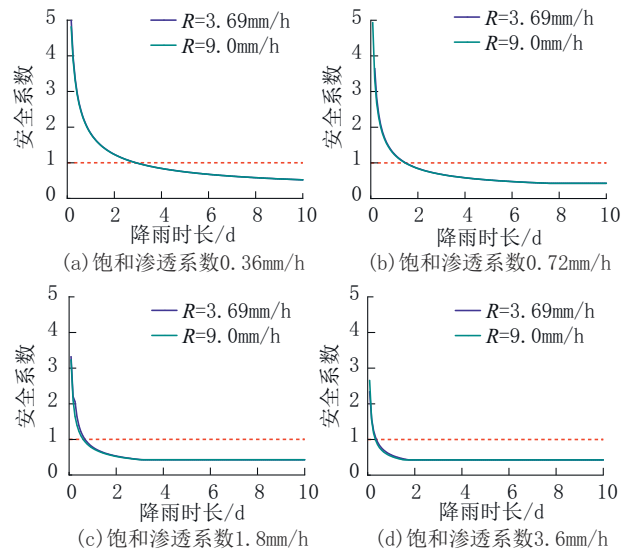


图 7 不同渗透系数下降雨强度对边坡稳定性的影响  
 Fig.7 Effect of  $R$  on slope stability under different  $k_s$

对湿润锋深度的影响,从图中可以看出降雨强度对湿润锋深度的影响比较小,可进一步得出结论,降雨强度对边坡安全系数的影响较小,这与前面所得结论相吻合。当土体的饱和渗透系数增加至 1.8 mm/h 以及 3.6 mm/h 时,降雨强度对湿润锋深度的影响仍然比较小。

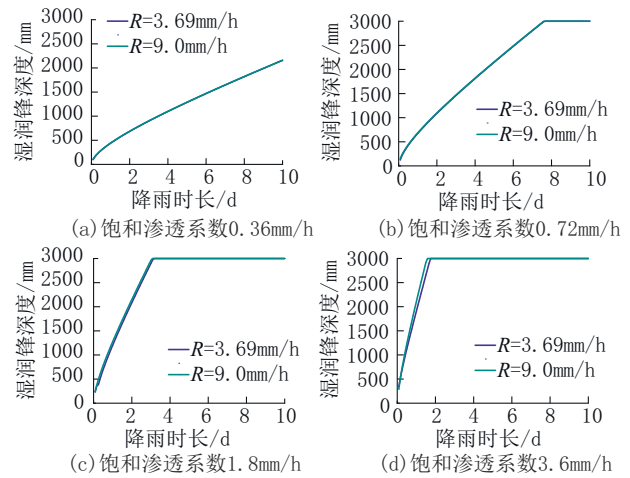


图 8 不同渗透系数下降雨强度对湿润锋深度的影响  
 Fig.8 Effect of rainfall intensity on the depth of wetting front under different hydraulic conductivities

综上所述,饱和渗透系数对安全系数的影响较为明显,随着饱和渗透系数的增加,湿润锋深度增加,边坡的安全系数减小。这是由于较大的渗透系数有利于雨水的入渗和湿润锋的扩展,使得土体的

基质吸力下降,削弱了土体的抗剪强度,导致边坡的安全系数减小。此外,当边坡土体的饱和渗透系数取不同的值时,降雨强度对浅层边坡安全系数的影响较小,之所以会出现这种情况可能是由于土体的初始含水率较高。

### 3.4 初始含水率对红层区浅层土质边坡稳定性的影响分析

### 影响分析

图9展示了在3种降雨强度下,不同的初始含水率对边坡稳定性的影响,此时,土体的饱和渗透系数取为0.36 mm/h,从图中可以看出,初始含水率对红层区浅层土质边坡的稳定性有较大的影响,在同等条件下,初始含水率越大,浅层土质边坡的安全系数越小。

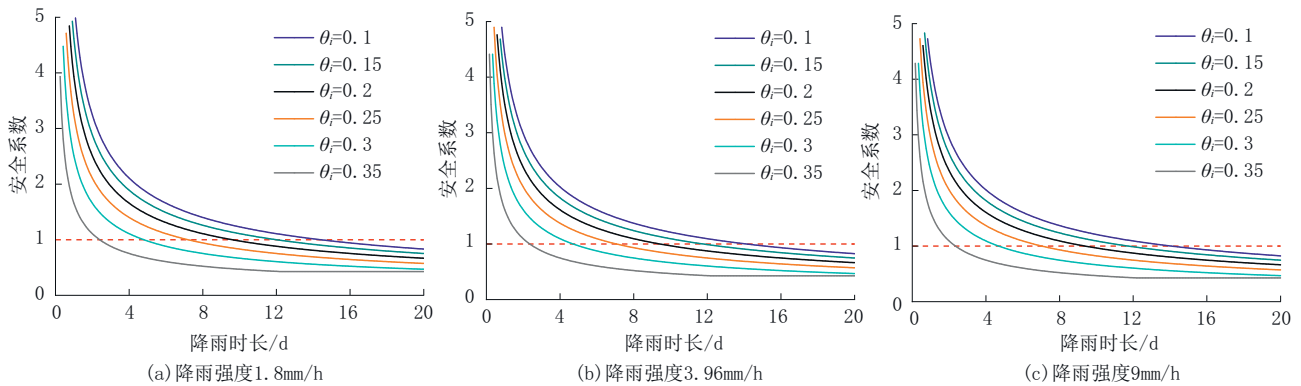


图9 不同降雨强度下初始含水率对边坡稳定性的影响

Fig.9 Effect of initial water content on slope stability under different rainfall intensities

图10展示了在3种降雨强度下,不同的初始含水率对湿润锋深度的影响,此时,土体的饱和渗透系数取为0.36 mm/h,从图中可以看出,初始含水率

对湿润锋深度有较大的影响,在同等条件下,初始含水率越大,湿润锋深度越深。这是由于初始含水率越大会越有利于湿润锋的扩展。

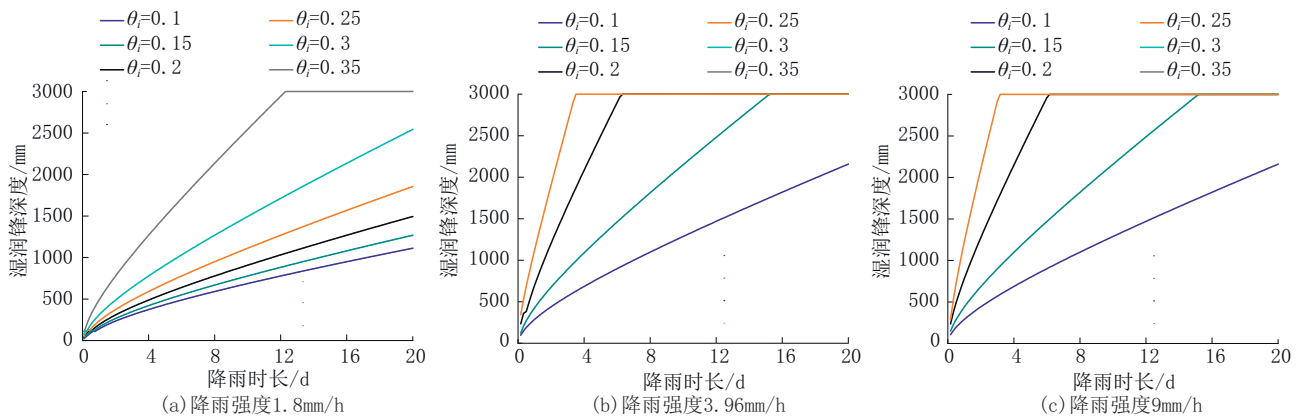


图10 不同降雨强度下初始含水率对湿润锋深度的影响

Fig.10 Effect of initial moisture content on the depth of wetting front under different rainfall intensities

## 4 结论

本文以无限长边坡模型为例,采用可确定不同降雨历时下边坡土体含水率分布和湿润锋深度的修正 Green-Ampt 入渗模型,对湖南省红层区浅层土质边坡进行了分析,主要研究了不同的边坡坡度、降雨强度、饱和渗透系数以及初始含水率对边

坡稳定性和湿润锋深度的影响,模拟分析的结果表明:

(1)坡度对红层区浅层土质边坡的稳定性有较大的影响,当坡度 $<45^\circ$ 时,边坡安全系数随着坡度的增加而减小;当坡度为 $45^\circ\sim 60^\circ$ 时,边坡安全系数随坡角的变化没有固定的规律,而当坡度 $\geq 60^\circ$ 时,



边坡安全系数却随着坡度的增加而增加。

(2)降雨强度对湿润锋深度几乎没有太大的影响,故对确定边坡(即坡角确定)而言,降雨强度对安全系数的影响较小。

(3)饱和渗透系数对浅层边坡的安全系数有着显著的影响。随着饱和渗透系数的增加,湿润锋深度增大,边坡安全系数减小。这是因为较高的渗透系数促进了雨水的入渗和湿润锋的扩展,降低了土体的基质吸力,从而削弱了土体的抗剪强度,导致边坡的稳定性下降。

(4)初始含水率对红层区浅层土质边坡的稳定性有较大的影响。在相同条件下,初始含水率越大,湿润锋扩展得越快、越深,边坡安全系数越小。

(5)需要注意的是,本研究使用的修正Green-Ampt入渗模型是基于一定假设的简化模型,该模型针对的是均质土体,而实际土体往往是非均质的。这种假设可能会影响模型预测的准确性。此外,模型未能完全捕捉到复杂的水文地质过程,土体中水流和热流的相互作用可能会影响模型对降雨入渗过程的描述精度。本研究使用的方法在处理非线性问题时可能存在局限,比如在极端气候条件下的边坡稳定性分析可能需要借助更复杂的模型。

#### 参考文献(References):

- [1] 周翠英,刘镇,薛翊国,等.关于红层灾变基础研究的若干思考[J].工程地质学报,2023,31(3):689-705.  
ZHOU Cuiying, LIU Zhen, XUE Yiguo, et al. Some thoughts on basic research of red beds disaster[J]. Journal of Engineering Geology, 2023, 35(3): 549-557.
- [2] 程强,寇小兵,黄绍槟,等.中国红层的分布及地质环境特征[J].工程地质学报,2004,12(1):34-40.  
CHEN Qiang, KOU Xiaobing, HUANG Shaobin, et al. The distributes and geologic environment characteristics of red beds in China[J]. Journal of Engineering Geology, 2004, 12(1): 34-40.
- [3] 许强,唐然.红层及其地质灾害研究[J].岩石力学与工程学报,2023,42(1):28-50.  
XU Qiang, TANG Ran. Study on red beds and its geological hazards[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(1): 28-50.
- [4] Hecht C A, Bönsch C, Bauch E. Relations of rock structure and composition to petrophysical and geomechanical rock properties: Examples from Permocarboriferous red-beds[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2005, 38(3): 197-216.
- [5] Zhang Z T, Gao W H, Zeng C F, et al. Evolution of the disintegration breakage of red-bed soft rock using a logistic regression model[J]. Transportation Geotechnics, 2020, 24: 100382.
- [6] 谢小帅,陈华松,肖欣宏,等.水岩耦合下的红层软岩微观结构特征与软化机制研究[J].工程地质学报,2019,27(5):966-972.  
XIE Xiaoshuai, CHEN Huasong, XIAO Xinhong, et al. Micro-structural characteristics and softening mechanism of red-bed soft rock under water-rock interaction condition[J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27(5): 966-972.
- [7] Liu Z, He X F, Zhou C Y. Influence mechanism of different flow patterns on the softening of red-bed soft rock[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2019, 7(5): 155.
- [8] 李保雄,苗天德.红层软岩顺层滑坡临滑预报的强度控制方法[J].岩石力学与工程学报,2003,22(S2):2703-2706.  
LI Baoxiong, MIAO Tiande. Strength controlling forecast method of critical landslide along red-soft-mudstone layer[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2003, 22 (S2) : 2703-2706.
- [9] 孙乔宝,刘涌江,李华昆,等.安楚高速公路红层软岩公路路堤病害处治方法[J].公路交通科技,2005,22(6):50-53.  
SUN Qiaobao, LIU Yongjiang, LI Huakun, et al. The red beds embankment disaster treatment of Anning-Chuxiong Highway [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22(6): 50-53.
- [10] Wu G X, Chen X S, Ding J, et al. Determination of critical height of slope filled by red-bed soft rock under seismic loading [J]. Advanced Materials Research, 2011, 261-263: 1655-1659.
- [11] 白永健,葛华,冯文凯,等.乌蒙山区红层软岩滑坡地质演化及灾变过程离心机模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,2019,38(S1):3025-3035.  
BAI Yongjian, GE Hua, FENG Wenkai, et al. Centrifugal tests on geological evolution and sliding process for red-bed soft rock landslide in wumeng mountain area[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(S1): 3025-3035.
- [12] 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.
- [13] 杨旭,周翠英,刘镇,等.华南典型巨厚层红层软岩边坡降雨失稳的模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,2016,35(3):549-557.  
YANG Xu, ZHOU Cuiying, LIU Zhen, et al. Model tests for failure mechanism of typical soft rock slopes of red beds under rainfall in South China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(3): 549-557.
- [14] 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.
- [15] 张抒,唐辉明,刘晓,等.基于饱和渗透系数空间变异结构的斜坡渗流及失稳特征[J].地球科学,2018,43(2):622-634.  
ZHANG Shu, TANG Huiming, LIU Xiao, et al. Seepage and instability characteristics of slope based on spatial variation

- structure of saturated hydraulic conductivity[J]. *Earth Science*, 2018,43(2):622-634.
- [16] 刘磊磊,梁昌奇,徐蒙,等.考虑参数旋转各向异性空间变异性的边坡大变形概率分析[J].*地球科学*,2023,48(5):1836-1852.  
LIU Leilei, LIANG Changqi, XU Meng, et al. Probabilistic slope large deformation analysis considering soil spatial variability with rotated anisotropy[J]. *Earth Science*, 2023,48(5):1836-1852.
- [17] 蒋先平,张鹏,卢艺伟,等.物质点强度折减法边坡失稳判据选择方法[J].*地质科技通报*,2022,41(2):113-122.  
JIANG Xianping, ZHANG Peng, LU Yiwei, et al. Slope failure criterion for the strength reduction material point method [J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2022, 41 (2):113-122.
- [18] 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.
- [19] 吴凯峰,郑志勇,余海兵.基于应变软化特征的含软弱层公路边坡稳定性研究[J].*地质科技情报*,2019,38(6):150-156.  
WU Kaifeng, ZHENG Zhiyong, YU Haibing. Stability evaluation of highway slope with soft layer based on strain softening characteristics[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2019,38(6):150-156.
- [20] 苗朝,张勇,李乾坤,等.基于PFC2D的缓倾顺层滑移-溃曲型岩质滑坡破坏机制分析[J].*钻探工程*,2023,50(5):11-17.  
MIAO Zhao, ZHANG Yong, LI Qiankun, et al. The deformation mechanism analysis of gently inclined and consequent sliding-buckling rock landslides based on PFC2D [J]. *Drilling Engineering*, 2023,50(5):11-17.
- [21] 李乾坤,苗朝,程英建,等.川东巴中市恩阳区近水平土质滑坡破坏模式及专业监测预警[J].*钻探工程*,2023,50(5):43-51.  
LI Qiankun, MIAO Zhao, CHENG Yingjian, et al. Damage patterns of near-horizontal soil landslides and professional monitoring and warning in Enyang District, Bazhong City, East Sichuan[J]. *Drilling Engineering*, 2023,50(5):43-51.
- [22] 杨子跃,王济君,徐鹏.降雨-堆载耦合作用下深厚填土边坡稳定性分析[J].*钻探工程*,2023,50(4):94-102.  
YANG Ziyue, WANG Jijun, XU Peng. Stability analysis of deep fill slope under the influence of rainfall-surcharge coupling [J]. *Drilling Engineering*, 2023,50(4):94-102.
- [23] 蒋水华,刘贤,黄发明,等.考虑多参数空间变异性的降雨入渗边坡失稳机理及可靠度分析[J].*岩土工程学报*,2020,42(5):900-907.  
JIANG Shuihua, LIU Xian, HUANG Faming, et al. Failure mechanism and reliability analysis of soil slopes under rainfall infiltration considering spatial variability of multiple soil parameters[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020,42 (5):900-907.
- [24] Dou H Q, Han T C, Gong X N, et al. Probabilistic slope stability analysis considering the variability of hydraulic conductivity under rainfall infiltration-redistribution conditions [J]. *Engineering Geology*, 2014,183:1-13.
- [25] Cho S E. Infiltration analysis to evaluate the surficial stability of two-layered slopes considering rainfall characteristics[J]. *Engineering Geology*, 2009,105(1-2):32-43.
- [26] Dou H Q, Han T C, Gong X N, et al. Effects of the spatial variability of permeability on rainfall-induced landslides[J]. *Engineering Geology*, 2015,192:92-100.
- [27] 豆红强,韩同春,龚晓南,等.降雨条件下考虑饱和和渗透系数变异性的边坡可靠度分析[J].*岩土力学*,2016,37(4):1144-1152.  
DOU Hongqiang, HAN Tongchun, GONG Xiaonan, et al. Reliability analysis of slope stability considering variability of soil saturated hydraulic conductivity under rainfall infiltration [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016,37(4):1144-1152.
- [28] Li D Q, Qi X H, Phoon K K, et al. Effect of spatially variable shear strength parameters with linearly increasing mean trend on reliability of infinite slopes[J]. *Structural Safety*, 2014,49:45-55.

(编辑 王文)