

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.150

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



# 降雨循环条件下高切坡稳定性演化过程及预测方法

靳红华<sup>1a</sup>, 王林峰<sup>1b</sup>, 任青阳<sup>1a</sup>, 张星星<sup>2</sup>

(1. 重庆交通大学 a. 山区桥梁及隧道工程国家重点实验室; b. 山区公路水运交通地质减灾重庆市  
高校市级重点实验室, 重庆 400074; 2. 重庆文理学院 土木工程学院, 重庆 402160)

**摘要:**为进一步揭示降雨循环条件下基岩型台阶状高切坡的降雨入渗及稳定性演化过程,以乐西高速马边至昭觉段某粉质黏土覆盖层基岩型台阶状高切坡为研究对象,通过室内干湿循环试验建立土体抗剪强度参数劣化数学模型;利用 Geo-studio 数值模拟软件研究多工况降雨循环下高切坡降雨入渗过程,揭示不同降雨循环工况下及雨后高切坡内部渗流场及稳定性变化规律,建立降雨型高切坡稳定系数逐年劣化方程;结合室内试验及数值模拟结果,建立该类高切坡稳定系数预测方法。研究表明:降雨入渗过程中高切坡潜在滑移面形状及位置并不发生明显变化,且表现为高切坡深处圆弧面及基岩积水面的组合型滑面;相同降雨时间内,高切坡降雨入渗深度及稳定性劣化幅度与降雨强度成正相关;单次降雨循环周期内,高切坡稳定性劣化幅度与降雨循环次数成负相关;高切坡降雨入渗深度或入渗总量越大,雨后高切坡稳定系数回升越小;高切坡稳定系数劣化系数采用土体抗剪强度参数劣化系数平均值较为安全合理,所建降雨型高切坡稳定系数预测方法具有较高的精度。

**关键词:**降雨型高切坡;干湿循环试验;数值模拟;稳定性;演化过程;预测方法

**中图分类号:** TU457 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2020)04-0012-12

## Analysis of the stability evolution process and prediction method of high cutting slope under rainfall cycle condition

JIN Honghua<sup>1a</sup>, WANG Linfeng<sup>1b</sup>, REN Qingyang<sup>1a</sup>, ZHANG Xingxing<sup>2</sup>

(1a. State Key Laboratory of Mountain Bridge and Tunnel Engineering; 1b. Mountain Road Water Transport Chongqing Municipal Key Laboratory of Geological Disaster Reduction, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, P. R. China; 2. School of Civil Engineering, Chongqing University of Arts and Science, Chongqing 402160, P. R. China)

**收稿日期:** 2020-07-06

**基金项目:**国家自然科学基金(51678097、41472262);国家重点研发计划(2016YFC0802206-3);交通运输行业高层次技术人才培养项目(2018-26);重庆市自然科学基金(cstc2020jcyj-msxmX0218);重庆市教委科学技术研究项目(KJQN201800706)

**作者简介:**靳红华(1995-),男,博士生,主要从事道路工程重大地质灾害防治技术研究, E-mail: 1589864695@qq.com。  
王林峰(通信作者),男,教授,博士, E-mail: wanglinfeng@cqjtu.edu.cn。

**Received:** 2020-07-06

**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China (No. 51678097, 41472262); National Key R & D Program of China (No. 2016YFC0802206-3); High Level Technical Personnel Training Project in Transportation Industry (No. 2018-26); Chongqing Natural Science Foundation (cstc2020jcyj-msxmX0218); Scientific and Technological Research Program of Chongqing Municipal Education Commission (No. KJQN201800706)

**Author brief:** JIN Honghua (1995-), PhD candidate, main research interest: prevention and treatment technology of major geological disasters in road engineering, E-mail: 1589864695@qq.com。  
WANG Linfeng (corresponding author), professor, PhD, E-mail: wanglinfeng@cqjtu.edu.cn。

**Abstract:** In order to further reveal the process of rainfall infiltration and stability evolution of bedrock-type stepped high cutting slopes under rainfall cycling conditions, taking the bedrock-type stepped high cutting slope of a silty clay cover layer from Mabian to Zhaojue section of Lexi Expressway as the research object, a mathematical model for the deterioration of soil shear strength parameters was established through indoor dry-wet cycle tests; Geo-studio numerical simulation software was used to study the rainfall infiltration process of the high cutting slope under multi-case rainfall cycles, which reveals the internal seepage field and stability change rules of high cutting slopes under different rainfall cycle conditions and after rain. And the annual degradation equation of the stability coefficient of the rainfall-type high cutting slope has been established; Combining the results of indoor experiment and numerical simulation, a method for predicting the stability coefficient of this type of high cutting slope has been established. The research results show that the shape and position of the potential sliding surface of the high cutting slope does not change significantly during the process of rainfall infiltration, and it appears as a combined sliding surface of the circular surface and the bedrock water surface at the depth of the high cutting slope; In the same rainfall period, the depth of rainfall infiltration and the extent of stability degradation of high cutting slopes are positively correlated with rainfall intensity; The degree of stability degradation of high cutting slopes in a single rainfall cycle is negatively correlated with the number of rainfall cycles. The greater the depth of rainfall infiltration or the total rainfall infiltration of high cutting slopes, the smaller the recovery of the stability coefficient of high cutting slopes after rain; It is relatively safe and reasonable to use the average value of the degradation coefficient of the shear strength parameter of the soil for the degradation coefficient of the high cutting slope stability coefficient. And the prediction method for the stability coefficient of rainfall-type high cutting slope has high accuracy.

**Keywords:** rainfall-type high cutting slope; dry-wet cycle test; numerical simulation; stability; evolution process; prediction method

近年来,中国山区大型交通工程基础设施大规模建设,随之而来的岩土边坡稳定性问题也与日俱增。以云贵川渝为例,当地群山环伺、山高谷深、地势陡峭、地质构造及地形地貌条件复杂特殊,公路工程势必依山而建,常在山腰或山脚处形成长达几公里的工程高切坡,受当地经济发展、交通量需求、道路等级要求、财政投资等因素限制,绝大多数工程切坡缺乏有效的支护措施,大量无支护裸露的工程切坡为降雨型滑坡的产生提供了一定的物质来源<sup>[1]</sup>。据统计,中国每年平均发生新老滑坡次数约  $3 \times 10^5$  起,其中,降雨型滑坡次数占滑坡总次数的 90% 以上,当降雨条件(降雨类型、降雨强度、降雨历时)达到一定阈值时,该类边坡极易发生失稳破坏,进而造成巨大财产、经济损失。

目前针对降雨型边坡稳定性的计算主要以降雨入渗模型为基础,建立稳定性计算与评价方法,如常金源等<sup>[2]</sup>、覃小华等<sup>[3]</sup>、汪丁建等<sup>[4]</sup>、苏永华等<sup>[5]</sup>基于 Chen-Young 改进模型建立了适用于降雨入渗条件下无限长边坡的稳定性理论计算与分析方法; Bordoni 等<sup>[6]</sup>、Tsuchida 等<sup>[7]</sup>从诱发滑坡的水文因素出发,利用现场观测调查数据建立了简化的降雨

型滑坡稳定性分析方法。但以上研究仅建立了降雨型边坡瞬时稳定性计算方法,无法获得降雨型边坡降雨入渗过程及稳定性演化过程,因此,近年来,降雨型边坡稳定性演化过程分析逐渐成为该领域的研究热点及技术难题之一,其旨在揭示边坡降雨入渗过程及其失稳破坏过程,常见手段如采用 ABSQUS、SEEP/W、FLAC3D 等数值模拟软件进行降雨入渗模拟,如任德斌等<sup>[8]</sup>、李涛<sup>[9]</sup>、韩同春等<sup>[10]</sup>、刘杰等<sup>[11]</sup>通过有限元数值模拟软件建立边坡数值模型,模拟了不同工况下的边坡降雨入渗过程,获得了诸如孔隙水压力、位移、稳定系数的分布及变化规律,揭示了降雨作用下边坡失稳机理;部分学者从降雨入渗过程中坡体抗剪强度参数劣化这一角度,针对边坡稳定性演化过程展开分析,如董金玉等<sup>[12]</sup>、李文等<sup>[13]</sup>、涂义亮等<sup>[14]</sup>、龙安发等<sup>[15]</sup>、朱泽勇等<sup>[16]</sup>以粉质黏土为研究对象,通过开展室内人工降雨模拟干湿循环试验,分析了干湿循环下粉质黏土试样力学参数演变规律及边坡破坏机理; Griffiths 等<sup>[17]</sup>、Conte 等<sup>[18]</sup>、Godt 等<sup>[19]</sup>通过建立理想的边坡滑动模型,结合实地调查建立了无限边坡在降雨入渗过程中的人渗深度及稳定系数评价方法。

以上研究多立足无限长倾斜式均土质边坡,降雨过程中,边坡稳定性理论计算多采用瞬时计算且基于滑面平行于坡表假定,但忽略了有限长人为工程切坡具有台阶,即其坡面为非直线这一事实,导致针对上覆土体下伏基岩的基岩型台阶状土质高切坡降雨入渗过程及稳定性分析认识不足;部分学者虽通过开展室内土样的干湿循环试验获得了土体抗剪强度参数劣化规律,并以此揭示降雨型边坡稳定系数演化规律,但其在边坡稳定性演化模拟分析中多采用单次降雨入渗工况,且受限于现有数值模拟手段无法输入时变坡体抗剪强度参数,导致其针对降雨循环条件下边坡入渗过程稳定性演化过程适用性较窄,进而缺乏降雨型边坡稳定性状态预测方法相关研究。基于此,笔者以乐西高速马边至昭觉段 A1 标段某降雨型粉质黏土覆盖层基岩型台阶状高切坡为研究对象,通过开展室内干湿循环试验,建立了土体抗剪强度参数劣化数学模型;利用 Geo-studio 数值模拟软件,建立了高切坡二维渗流数值模型,通过输入 2017 年实时降雨数据及自拟多工况降雨循环函数,开展了高切坡降雨入渗过程研究,揭示不同降雨循环工况下及雨后高切坡内部渗流场及稳定性变化规律,建立降雨型高切坡稳定系数逐年劣化方程;基于室内试验及数值模拟结果,建立该类降雨型高切坡稳定性预测方法,对降雨循环条件下此类高切坡稳定性评价、预测预报具有重要的科学指导意义及实用价值。

## 1 研究工点选取

公路工程高切坡坡体长期暴露于自然环境中,在气候周期性交替变化作用下,会经历“降雨”→“蒸发”→“降雨”的循环过程,长期处在干燥和加湿的干湿循环条件下,坡体会经历“湿”→“干”→“湿”的循环过程,“干”状态指坡体受自身排水过程及日照蒸发,土体含水量逐渐减少,直至天然含水量的过程;“湿”状态指坡体受降雨作用,土体含水量增加,直至趋向饱和状态的过程。周期性降雨润湿及排水蒸发即干湿交替过程对坡体产生了干湿循环作用,导致土体力学性质的劣化,周期性降雨作用后,该劣化效

应累积性发展,高切坡稳定性随之劣化,直至失稳。作为常见边坡工程病害之一,公路工程高切坡浅层失稳溜坍土体呈厚度薄、规模小及频率高的特点,其中,中国南部粉质黏土公路边坡及中西部粉土公路边坡中分布较为广泛,笔者以乐西高速马边至昭觉段 A1 标段 K41+538~K41+615 右侧粉质黏土覆盖层基岩型台阶状高切坡为研究对象,见图 1,研究工点位于乐山市马边县罗山溪附近,地处四川盆地中部,总体地貌类型属构造侵蚀剥蚀型丘陵地貌。边坡坡体主要为第四系全新残坡积( $Q_4^{dl+el}$ )粉质黏土,土层厚度 6.0~13.0 m,呈软塑~可塑状;下部不透水基岩为侏罗系上统遂宁组( $J_{2s}$ )泥岩,多成强~中风化,初勘显示,地下水水位线远低于基岩底部。工点拟采用二级平台开挖方式,高切坡单级坡高 8 m,坡率 1:1,二级边坡交接处平台宽 2 m,坡角为 45°,且不透水基岩面倾角 30°。工程区属亚热带湿润季风气候区,年内四季分明,雨量充沛,秋季多绵雨,多年平均降雨量 1 025.8 mm,降雨多集中在 5 月—9 月,约占全年降雨量的 70%,多年平均蒸发量 1 168.3 mm,蒸发量与降雨量基本持平,可认定坡体处于饱和-非饱和状态。土体力学参数见表 1。

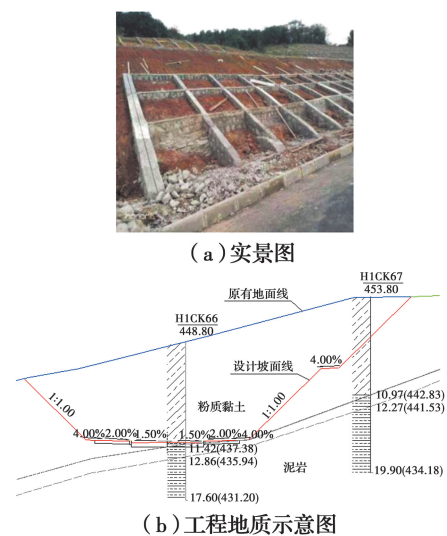


图 1 高切坡实景图及工程地质示意图(单位:m)

Fig. 1 The real site and schematic diagram of engineering geology of the high cutting slope

表 1 粉质黏土及不透水基岩物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of silty clay and impervious bedrock

土体类别	$\gamma$ / ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	$c/\text{kPa}$	$\varphi/(\circ)$	天然含 水率/%	饱和和渗透 系数 $k_s/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	饱和含水 率 $\theta_s$	残余含水 率 $\theta_r$
粉质黏土	18.5	30.2	21.9	10.27	$5.0 \times 10^{-5}$	0.46	0.08
基岩	25.0						

## 2 土体强度参数劣化数学模型建立

### 2.1 模型建立

为描述土体抗剪强度  $\tau$  在周期性降雨循环过程中的变化规律,定义土体黏聚力  $c_n$  与内摩擦角  $\varphi_n$  表示土体在周期性降雨循环过程中的实时抗剪强度参数,假定干湿循环作用过程对土体强度参数劣化效应过程连续且不可逆,引入时间概念,则土体实时抗剪强度为

$$\tau_n = c_n + \sigma_n \cdot \tan \varphi_n \quad (1)$$

式中: $\tau_n$  为  $n$  次干湿循环后的土体抗剪强度, kPa; $\sigma_n$  为作用于土体单元的法向正应力, kPa。

定义土体黏聚力劣化系数为  $\zeta$ ,则土体实时黏聚力  $c_n$  与干湿循环次数  $n$  的变化关系式为

$$c_n = c_0 \cdot \zeta \text{ 或 } \zeta = c_n / c_0 \quad (2)$$

式中: $c_0$  为土体初始黏聚力, kPa。

定义土体内摩擦角劣化系数为  $\eta$ ,则土体实时内摩擦角  $\varphi_n$  与干湿循环次数  $n$  的变化关系式为<sup>[12, 14]</sup>

$$\varphi_n = \varphi_0 \cdot \eta \text{ 或 } \eta = \varphi_n / \varphi_0 \quad (3)$$

式中: $\varphi_0$  为土体初始内摩擦角, (°)。

邓华锋等<sup>[20]</sup>定义干湿循环过程中的土体抗剪强度参数降低程度为劣化度,因此,定义  $n$  次干湿循环后土体抗剪强度参数劣化程度为劣化度  $S_n$ ,则土体黏聚力劣化度  $S_{c_n}$

$$S_{c_n} = \frac{c_0 - c_n}{c_0} \times 100\% \text{ 或 } S_{c_n} = 1 - \zeta \quad (4)$$

内摩擦角劣化度  $S_{\varphi_n}$

$$S_{\varphi_n} = \frac{\varphi_0 - \varphi_n}{\varphi_0} \times 100\% \text{ 或 } S_{\varphi_n} = 1 - \eta \quad (5)$$

### 2.2 室内干湿循环试验

为进一步探寻粉质黏土坡体周期性降雨过程与室内干湿循环过程之间的联系,给出高切坡稳定性预测方法,通过现场制取粉质黏土试样展开室内干湿循环试验及直剪试验,以获得土体抗剪强度参数干湿循环劣化规律。干湿循环试验共制取土体试样数量 48 个,拟定直剪试验荷载共分为 0、50、100、200 kPa 共 4 种,每种荷载下 12 个试样共 4 组,每组平均 3 个试样,进行相应荷载条件下的 1、2、3、4 次干湿循环试验,其中,直剪试验土样固结稳定时的垂

直变形值标准为每 1 h 不大于 0.005 mm,土样实际固结稳定时间实测约 24 h,剪切速率为 0.8 mm/min,并在 3~5 min 内剪损。干湿循环试验首先将天然土样放入饱和缸中进行抽气,接着向缸内注满水,浸泡 24 h 增湿至土样饱和,然后将饱和试件放入烘箱烘干,减湿至土样天然含水率,至此,完成一次干湿循环。重复以上过程,进行第 2~4 次循环试验,试验过程见图 2~图 4。由图 3 可见,干湿循环 1 次时,粉质黏土试样周边开始出现微裂隙,随着循环次数的增加,微裂隙不断由试样四周向中间扩展,发展成为贯通裂隙,干湿循环 4 次时,试样贯通裂隙增宽加深,土体结构破坏严重,并且表现有一定的体积收缩,究其原因在于,干湿循环过程中,试样中黏土矿物吸水膨胀和失水收缩,进而土体出现干缩湿胀循环,导致土体中原生裂隙的开展和次生裂隙的发育,而产生的裂隙降低了黏土颗粒间的胶结作用,造成了不可逆的损伤累计,最终破坏了原状土体的结构,土体抗剪强度逐渐降低。所获粉质黏土试样干湿循环试验结果见表 2。



图 2 天然状态的试样

Fig. 2 Natural sample

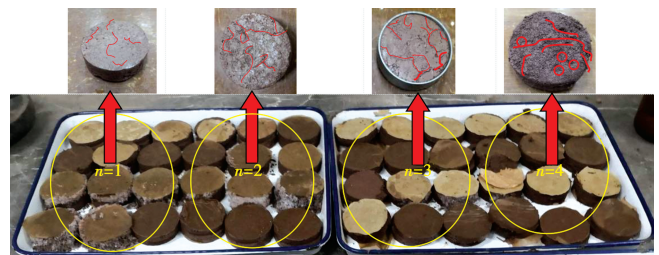


图 3 干湿循环试验后的试样

Fig. 3 Sample after dry-wet cycle test

表 2 粉质黏土干湿循环试验结果

Table 2 Dry-wet cycle test results of silty clay

工况	$\bar{c}$ /kPa	$\zeta$	$S_{c_n}/\%$	$\bar{\varphi}/(^{\circ})$	$\eta$	$S_{\varphi_n}/\%$
$n=0$	30.2			21.9		
$n=1$	25.4	0.84	15.89	21.2	0.97	3.20
$n=2$	20.5	0.68	32.12	20.9	0.95	4.57
$n=3$	19.0	0.63	37.09	20.6	0.94	5.94
$n=4$	17.5	0.58	42.05	20.5	0.94	6.39

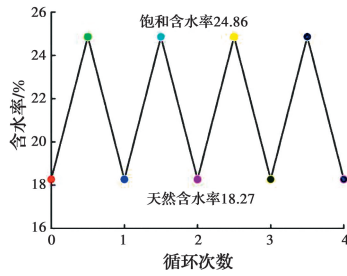


图 4 粉质黏土干湿循环试验过程

Fig. 4 Dry-wet cycle test process of silty clay

粉质黏土试样黏聚力及内摩擦角劣化曲线见图 5。由图 5 可知,干湿循环周期内粉质黏土试样黏聚力及内摩擦角与干湿循环次数呈负相关,试样抗剪强度不断降低,但试样黏聚力劣化幅度较内摩擦角剧烈,整体上看,单次干湿循环周期内试样黏聚力及内摩擦角劣化幅度随干湿循环次数增加逐渐减小,表明后续的干湿循环试验对粉质黏土试样黏聚力及内摩擦角的劣化效应逐渐减小。

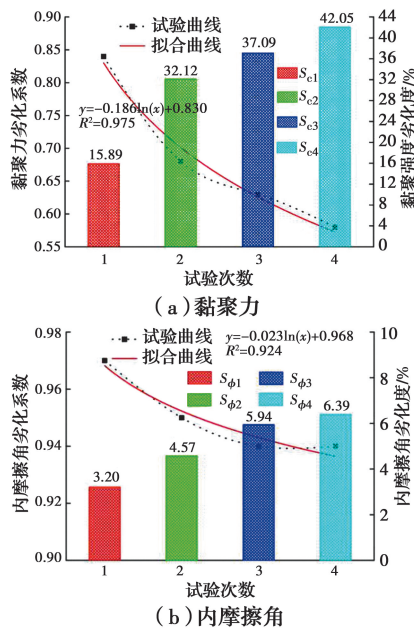


图 5 粉质黏土抗剪强度参数劣化规律

Fig. 5 Law of deterioration of shear strength parameters of silty clay

### 3 Geo-studio 降雨入渗数值模拟

#### 3.1 模型建立

以乐西高速马边至昭觉段 A1 标段 K41+538~K41+615 右侧粉质黏土覆盖层基岩型台阶状高切坡为研究对象,利用 Geo-studio 数值模拟软件建立该处高切坡二维渗流数值模型(图 6)。模型边坡坡顶长度设置为 24 m(1.5 H'),H'为 2 个单级坡高总

和),左边界至坡脚的距离设置为 24 m(1.5 H'),坡顶部到底部边界的距离设置为 32 m(2 H'的方式进行扩大),且不透水基岩面倾角为 30°,最终有限元模型尺寸设计如图 6 所示。模型底部边界设定为竖直约束和水平约束边界;左右边界为水平约束边界;高切坡坡表及坡脚左侧路面设置为降雨入渗及潜在的排水边界,为考虑雨后高切坡稳定性回升,同时还将坡表设置为蒸发辐射边界;考虑计算精度与计算时步,将模型划分为 6 492 个节点和 6 321 个单元。

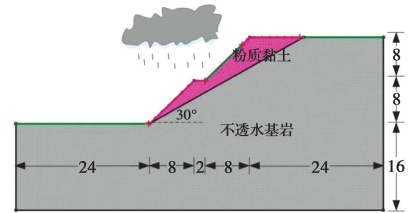


图 6 高切坡有限元模型尺寸图(单位:m)

Fig. 6 Dimensional drawing of high cutting slope finite element model (unit: m)

模型边坡坡体为均质非饱和粉质黏土,根据 GENUCHTEN 研究发现,其渗透系数为基质力的函数,而非常数,即基质力随含水量的变化而变化。土体非饱和特性参数如表 1 所示,利用 Geo-studio 数值模拟软件内置的非饱和粉质黏土样本函数及实验测定的饱和含水率( $\theta_s=0.46$ )和残余含水率( $\theta_r=0.08$ )数据,生成覆盖层粉质黏土的土水特征曲线及渗透系数函数,见图 7。

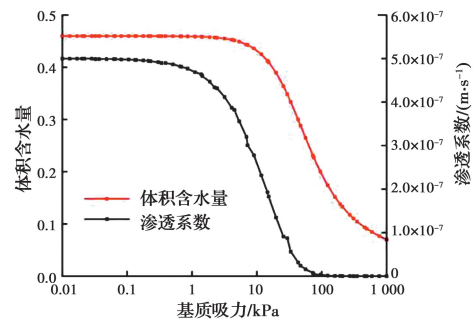


图 7 粉质黏土土水特征曲线及渗透系数函数

Fig. 7 Soil water characteristic curve and permeability coefficient function of silty clay

#### 3.2 模拟工况选定

##### 3.2.1 实时降雨工况

1)降雨工况 收集了中国气象数据网关于乐山市马边县 2017 年的降雨资料,将高切坡降雨入渗模拟过程周期定为 1 个单位年,由于研究工点全年降雨量主要集中在 6 月—8 月,仅给出研究工点处 6

月—8月的降雨数据,见图 8,其余月份降雨量反映在图 9 中。

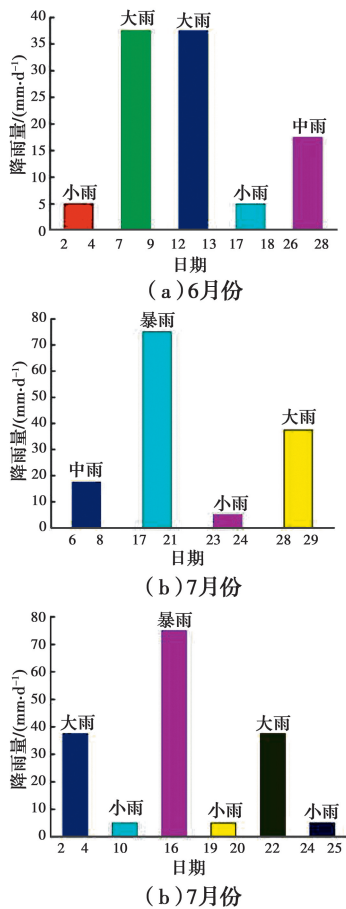


图 8 6月、7月及8月份降雨量

Fig. 8 Rainfall data for June, July and August

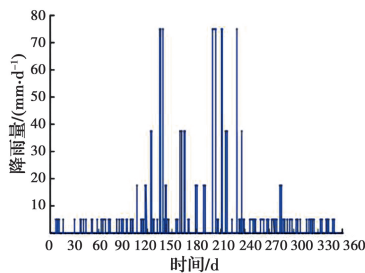


图 9 2017 年模拟降雨量数据

Fig. 9 Simulated rainfall data for 2017

统计研究工点处水汽蒸发及辐射强度、温度、空气湿度见表 3。

表 3 模拟参数表

Table 3 Simulation parameter table

月份	辐射强度/(kJ·(m <sup>2</sup> ·d) <sup>-1</sup> )	温度/℃	空气湿度/%
6月	28 339	26	30
7月	28 339	29	30
8月	28 339	28	30
其余	4 183	20	20

其中,研究工点处近 10 年来全年水汽蒸发及辐射强度约为 3 340~4 190 MJ/m<sup>2</sup>·a,考虑蒸发量与降雨量基本持平,6 月—8 月模型辐射强度占全年辐射强度的 70%,其余月份占 30%,故将 6 月—8 月模型边界条件每日辐射强度设为 28 339 kJ/m<sup>2</sup>·d,其余月份设为 4 183 kJ/m<sup>2</sup>·d;空气湿度对边坡稳定性分析影响不大,6 月—8 月设为 30%,其余月份设为 20%;考虑 6 月—8 月温度较高,分别设为 26、29、28℃;各类型降雨均取国家气象局规定的降雨量标准表中相应降雨类型的平均值<sup>[21]</sup>,即小雨、中雨、大雨、暴雨分别取 5、17.5、37.5、75 mm/d。

2)稳定性分析 利用 Geo-studio 数值模拟软件瞬时分析计算边坡在 2017 年降雨周期内各时刻边坡的降雨入渗过程,并获得该高切坡稳定系数时程曲线,见图 10。

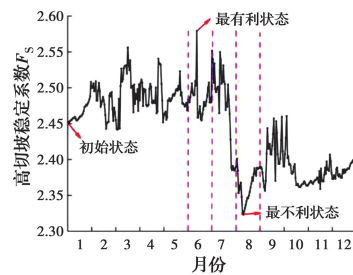


图 10 2017 年高切坡稳定系数时程曲线图

Fig. 10 Time-history curve of high cutting slope stability coefficient in 2017

由图 10 可见,该高切坡 2017 年全年稳定状态整体处于波动状态,全年稳定系数劣化 0.053,高切坡最有利状态位于 6 月中旬,原因在于该阶段内研究工点处降雨较少,高切坡经历长时间太阳辐射及排水,坡体内部孔隙水压力逐渐消散,边坡稳定性较好;边坡最不利状态位于 8 月上旬,原因在于该阶段内研究工点降雨较多,高切坡经历长时间降雨入渗,坡体软化,坡体自重加大,孔隙水压力逐渐增大,边坡稳定性较差,两者相差 0.256,可见,雨季高切坡稳定状态劣化较大,应及时加强边坡监测,做好疏排水措施。

考虑研究工点处若干年内降雨条件无较大差别,则该高切坡稳定系数逐年劣化方程为

$$F_s = 2.451 - 0.053a \quad (6)$$

式中: $a$  为考察年限,按年计。该式可推广为

$$F_s = F_0 - \Delta F \cdot a \quad (7)$$

式中： $F_0$  为考察年限内高切坡稳定系数初始值； $\Delta F$  为单年内高切坡稳定系数劣化值。

参照《建筑边坡工程技术规范》(GB 50330—2013)<sup>[22]</sup>对永久边坡安全系数的规定,当该边坡工程安全等级分别为一级、二级及三级时,其稳定系数应大于 1.35、1.30 及 1.25,在不加任何支护措施的前提下,由式(6)可知,研究对象在常年周期性降雨下其稳定系数将分别在第 20.77 年、21.72 年、22.66 年劣化至安全系数临界值,在第 27.38 年时劣化至失稳破坏临界值。

### 3.2.2 典型降雨工况

1)降雨工况拟定 为进一步揭示粉质黏土覆盖层基岩型台阶状高切坡在不同降雨循环作用下其稳定性变化规律,考虑粉质黏土坡体低渗透性,初拟 3 种典型雨型进行坡体降雨入渗特征分析及稳定性分析,其中降雨循环结束后观察期设为 4 d,期间模型边界每日辐射强度设为  $28\ 339\ \text{kJ}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ 。渗流计算过程中,根据所拟降雨工况设置 90 个时间步,每个时间步长时长为 8 h,计算过程共计 30 d,每个时间步最大迭代次数为 50 步,迭代误差小于 1% 视为收敛,以揭示降雨循环入渗过程及降雨循环后高切坡内部渗流场及稳定性变化规律,见图 11。

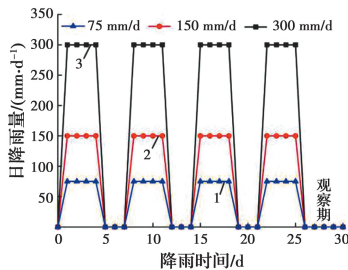


图 11 降雨循环工况雨型函数

Fig. 11 Rain cycle function of rainfall cycle

表 4 降雨工况

Table 4 Rain conditions

工况	日最大降雨量/(mm·d <sup>-1</sup> )	降雨循环次数	单次间隔时间/d	观察期/d
1	75	4	2	4
2	150	4	2	4
3	300	4	2	4

2)稳定性计算与分析 各工况降雨周期内高切坡内部湿润峰动态变化过程如图 12~图 14 所示,可见,整个降雨周期内,Geo-studio 软件自动搜索高

切坡潜在滑移面位置及形状并未发生明显变化,边坡潜在滑移面形态无明显的尺寸效应,均表现为边坡深处圆弧面和基岩积水面的组合型滑面;相同降雨时间内高切坡降雨入渗深度  $z_f$  与降雨强度成正比相关;降雨结束后,观察期内高切坡入渗深度逐渐减少,究其原因在于该阶段内模型边界施加了蒸发与辐射条件,导致坡体孔隙水压消散加速,土体有效应力提高,高切坡稳定性逐渐提高。

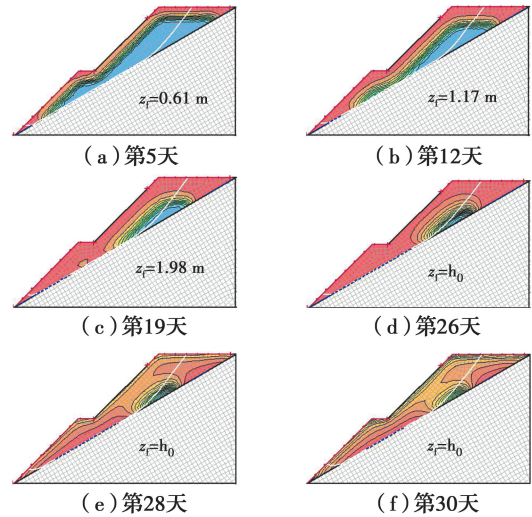


图 12 工况 1 高切坡降雨入渗过程

Fig. 12 Rainfall infiltration process of high cutting slope under working condition 1

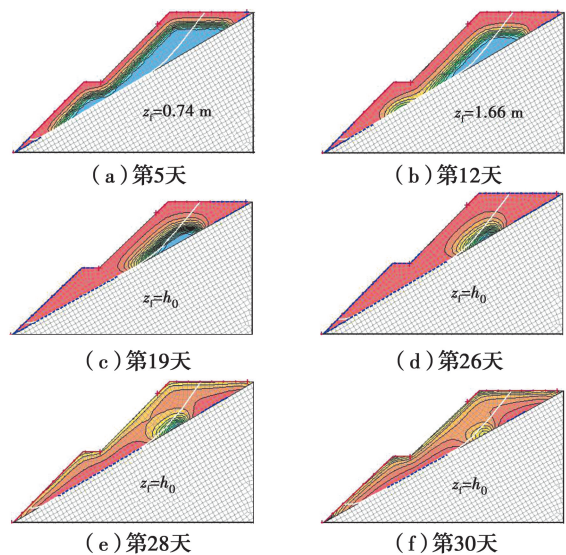


图 13 工况 2 高切坡降雨入渗过程

Fig. 13 Rainfall infiltration process of high cutting slope under working condition 2

各降雨工况高切坡稳定性演化过程见图 15。由图 15 可见,降雨强度一定时,随着降雨时间的增

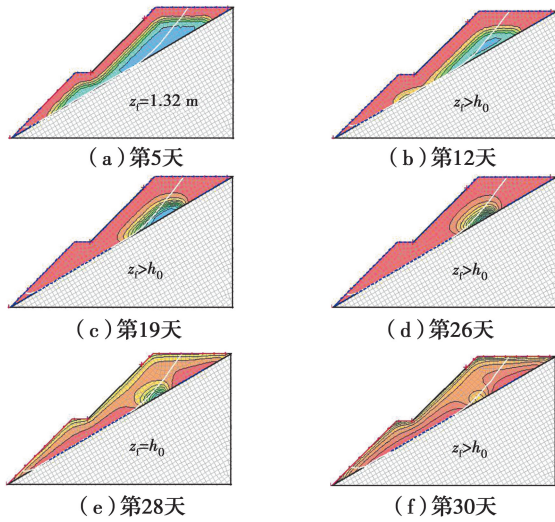


图 14 工况 3 高切坡降雨入渗过程

Fig. 14 Rainfall infiltration process of high cutting slope under working condition 3

大,边坡稳定性逐渐下降;工况 1、工况 2 及工况 3 降雨周期内导致高切坡稳定系数累计分别下降 0.502、0.602 及 0.710,表明相同降雨时间内,高切坡稳定性劣化幅度与降雨强度成正相关。究其原因,相同时间内降雨强度越大,降雨总量越大,覆盖层坡体饱和度、孔隙水压力、饱和区域越大,降雨入渗越严重,高切坡稳定性下降越剧烈;降雨循环次数越多,相同降雨时间内高切坡稳定系数下降幅度越小,见图 16,该现象与上述室内粉质黏土抗剪强度参数劣化规律基本吻合,表明单次降雨循环周期内高切坡稳定性劣化幅度与降雨循环次数成负相关,高切坡最终会趋于稳定。各降雨工况结束后,相同观察期内,高切坡稳定系数均有回升,工况 1、工况 2 及工况 3 稳定系数分别回升 0.027、0.024 及 0.019,回升幅度分别为 1.5%、1.3%及 1%,表明工况 1 回升幅度

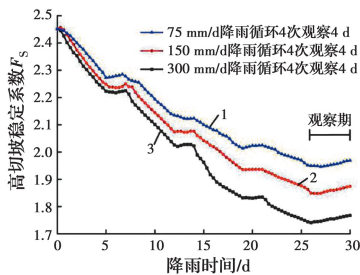


图 15 不同降雨强度下高切坡稳定系数随降雨循环次数变化曲线

Fig. 15 Variation curve of stability coefficient of high cutting slope with cycle times under different rainfall intensities

最大,工况 2 次之,工况 3 最小,究其原因在于工况 1 降雨入渗总量最小,雨后孔压水压消散最快,边坡排水过程较快,非饱和区域增大较快,高切坡稳定性恢复最快,相同观察期内高切坡稳定系数回升幅度最大。

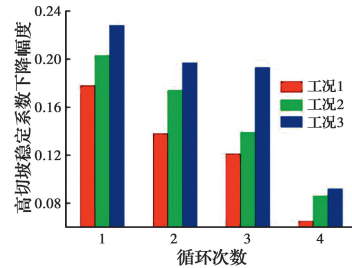


图 16 高切坡稳定系数下降幅度随降雨循环次数变化

Fig. 16 Variation of stability coefficient of high cutting slope changes with the number of rainfall cycles

### 4 高切坡稳定系数预测方法

#### 4.1 室内试验法

结合室内干湿循环试验,将单次干湿循环后的粉质黏土试样抗剪强度参数视为单次降雨循环后高切坡坡体抗剪强度参数初始值,并计算高切坡稳定系数,见图 17。

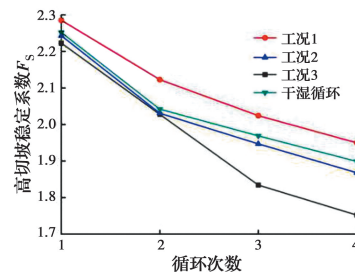


图 17 干湿循环与降雨循环高切坡稳定系数对比

Fig. 17 Comparison of high cutting slope stability coefficient between dry and wet cycles and rainfall cycles

由图 17 可见,由室内干湿循环试验所获抗剪强度参数计算得到的高切坡稳定系数与 Geo-studio 软件模拟工况 2 循环降雨下的高切坡稳定系数基本吻合,当循环次数小于 2 次时,工况 1 所示降雨循环试验高切坡降雨强度较小,坡体内湿润锋下渗较浅,无法较真实地模拟室内干湿循环试验“湿”状态,导致高切坡稳定系数显著大于室内干湿循环试验;当循环次数小于 2 次时,工况 3 降雨循环周期内由于高切坡初始降雨强度较大,其较好地模拟了坡体饱和-天然状态,故两者吻合较好,当循环次数大于 2 次



时,由于坡体排水较慢,孔隙水未完全消散,坡体未达到“干”状态,而室内干湿循环试验可保证试样处于天然状态,由室内干湿循环试验所得高切坡稳定系数高于降雨循环试验,故工况 2 较好地代表了室内干湿循环试验,其中,当循环次数分别为 1、2、3 及 4 时,两者分别相差 0.009、0.011、0.022 及 0.031,表明随着循环次数的增加,两者差值逐渐增大,究其原因,当坡体趋于完全饱和时,在为时 4 d 的非降雨时段内,辐射强度 28 339 kJ/m<sup>2</sup>·d 坡体排水未完全,孔隙水未完全消散,见图 14(d)、(e)、(f),但该误差在工程范围内可以接受。

定义高切坡稳定系数劣化系数  $\omega$  表示在周期性降雨循环过程中其稳定性劣化规律,进而引入时间概念表征随降雨循环次数变化的高切坡稳定系数为  $F_{S_n}$

$$F_{S_n} = F_0 \cdot \omega \quad (8)$$

由图 18 可发现,所研究高切坡稳定系数劣化规律与粉质黏土土样  $c_n$  及  $\varphi_n$  平均值劣化规律一致,且劣化程度虽有误差但误差范围内高切坡稳定系数整体基本吻合,高切坡稳定系数劣化规律描述采用坡体  $c_n$  及  $\varphi_n$  劣化系数平均值量化大于数值模拟劣化结果,用该值偏于安全,在工程范围内可以接受。

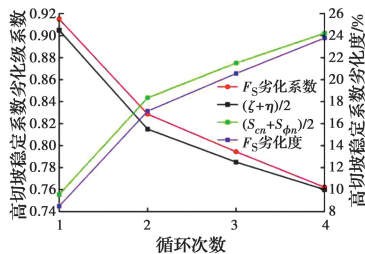


图 18 高切坡稳定系数劣化图

Fig. 18 Degradation diagram of stability coefficient of high cutting slope

因此,针对所研究粉质黏土覆盖层高切坡,式(8)可转换为

$$F_{S_n} = F_0 \cdot \frac{\zeta + \eta}{2} \quad (9)$$

#### 4.2 数值模拟拟合法

对于某一特定高切坡,降雨入渗过程中,决定高切坡稳定性的主要因素为降雨时间  $T$  及降雨强度  $q$ ,基于此,可获得高切坡在不同降雨时间及降雨强度作用后的稳定性情况,利用 MATLAB 2016a 数据

分析软件对模拟数据进行拟合,其中,为更准确地描述降雨强度  $q$  随时间的变化趋势,仍采用典型雨型函数并用降雨总量  $Q$  刻画降雨时间  $T$  内的降雨强度,可以发现,针对所研究粉质黏土覆盖层高切坡,高切坡降雨实时稳定系数  $F_s$  与降雨总量  $Q$ 、降雨时间  $T$  满足如下二元函数关系,如图 19 所示。

$$F_s = 2.389 - 0.015T - 0.001Q \quad (10)$$

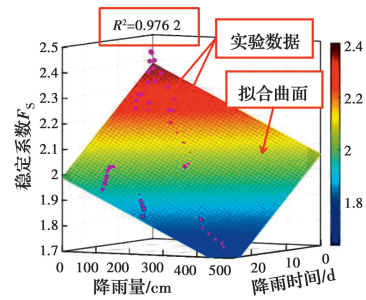


图 19 高切坡稳定系数与降雨总量及降雨时间的关系

Fig. 19 Relationship between stability coefficient of high cutting slope and total rainfall and rainfall time

为进一步探究降雨总量及降雨时间对高切坡稳定性的影响,利用多元回归理论对两变量进行 SPSS 拟合,得到回归模型参数,见表 5。结果显示,回归模型系数同 MATLAB 2016a 所得模型系数一致,降雨总量  $Q$ 、降雨历时  $T$  变量均通过了  $t$  检验,且两变量方差膨胀系数 VIF 均小于 5,表明两变量不具有共线性,故两变量均能引入线性回归模型,且模型相关系数  $R^2 = 0.9762$ ,证明模型拟合度较高。

表 5 多元回归模型参数

Table 5 Parameters of multiple regression model

模型参数	系数	$t$ 检验	Sig	VIF
$T$	-0.015	-27.563	0.000	1.744
$Q$	-0.001	-18.389	0.000	1.744

图 20 为模型标准化残差 P-P 图,由图 20 可见,各点近似一条直线且均分布于直线附近;图 21 为模型回归残差分布直方图,由图 21 可见,直方图形态与标准正态分布近似,即表明模型的残差符合正态分布假设。

综上,对于所建粉质黏土覆盖层基岩型台阶状高切坡,认定其降雨实时稳定系数  $F_s$  与降雨总量  $Q$ 、降雨时间  $T$  满足式(10)的函数关系是合理的。

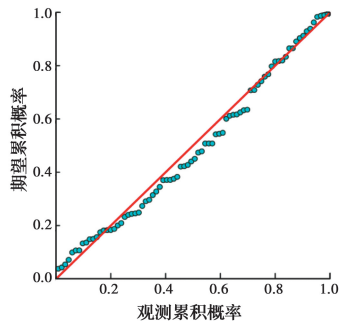


图 20 标准化残差 P-P 图

Fig. 20 P-P chart of standardized residuals

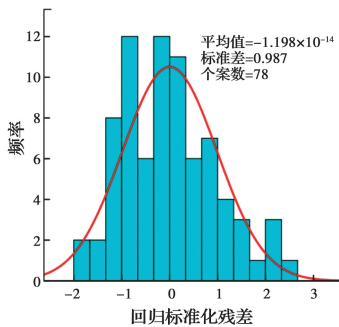


图 21 回归残差分布直方图

Fig. 21 Regression residual distribution histogram

## 5 结论

以降雨型粉质黏土覆盖层基岩型台阶状高切坡为研究对象,通过室内干湿循环试验建立了土体抗剪强度参数劣化数学模型;利用 Geo-studio 软件揭示了其在不同降雨工况下的降雨入渗过程及稳定性演化过程,并给出了该类降雨型高切坡的稳定性预测方法,主要结论如下:

1)通过室内干湿循环试验及直剪试验获得了土体抗剪强度参数干湿循环劣化规律,建立了土体抗剪强度参数劣化数学模型。

2)以高切坡 2017 年实时降雨数据为例,利用 Geo-studio 数值模拟软件获得了高切坡在该年内的稳定性演化过程,建立了高切坡稳定系数逐年劣化方程;通过自拟 3 种典型雨型函数,利用 Geo-studio 数值模拟软件开展了高切坡在不同降雨强度、不同降雨历时下的降雨入渗特征及稳定性分析,结果表明:整个降雨周期内,高切坡潜在滑移面为高切坡深处圆弧面和基岩积水面的组合型滑面;相同降雨时间内,高切坡降雨入渗深度及稳定性劣化幅度与降雨强度成正相关;单次降雨循环周期内,高切坡稳定

性劣化幅度与降雨循环次数成负相关;高切坡降雨入渗深度或入渗总量越大,雨后高切坡稳定系数回升越小。

3)针对所研究粉质黏土覆盖层高切坡,所拟工况 2 下高切坡稳定系数与以室内干湿循环试验所获抗剪强度参数计算得到的高切坡稳定系数劣化规律基本吻合,降雨循环作用下,高切坡稳定系数劣化系数采用土样  $c_n$  及  $\varphi_n$  平均值是偏安全合理的;基于 Geo-studio 数值模拟结果给出了该类高切坡在不同降雨量及降雨时间下的稳定性预测方法,所获结果精度较高。

## 参考文献:

- [1] 陈洪凯, 杨世胜, 唐红梅. 高切坡研究现状及趋势分析 [C]//公路边坡及其环境工程技术交流会, 2005. CHEN H K, YANG S S, TANG H M. Research status and trend of high-cut slope [C]//Highway Slope and Environmental Engineering Technology Exchange Conference, 2005. (in Chinese)
- [2] 常金源, 包鑫, 伍法权, 等. 降雨条件下浅层滑坡稳定性探讨[J]. 岩土力学, 2015, 36(4): 995-1001. CHANG J Y, BAO H, WU F Q, et al. Discussion on stability of shallow landslide under rainfall [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(4): 995-1001. (in Chinese)
- [3] 覃小华, 刘东升, 宋强辉, 等. 强降雨条件下基岩型层状边坡入渗模型及稳定性研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(11): 3156-3164. QIN X H, LIU D S, SONG Q H, et al. Infiltration model of bedrock laminar slope under heavy rainfall and its stability analysis [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(11): 3156-3164. (in Chinese)
- [4] 汪丁建, 唐辉明, 李长冬, 等. 强降雨作用下堆积层滑坡稳定性分析[J]. 岩土力学, 2016, 37(2): 439-445. WANG D J, TANG H M, LI C D, et al. Stability analysis of colluvial landslide due to heavy rainfall [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(2): 439-445. (in Chinese)
- [5] 苏永华, 李诚诚. 强降雨下基于 Green-Ampt 模型的边坡稳定性分析[J]. 岩土力学, 2020, 41(2): 389-398. SU Y H, LI C C. Stability analysis of slope based on Green-Ampt model under heavy rainfall [J]. Rock and

- Soil Mechanics, 2020, 41(2): 389-398. (in Chinese)
- [6] BORDONI M, MEISINA C, VALENTINO R, et al. Hydrological factors affecting rainfall-induced shallow landslides: From the field monitoring to a simplified slope stability analysis [J]. Engineering Geology, 2015, 193: 19-37.
- [7] TSUCHIDA T, ATHAPATHTHU A M R G, HANAOKA T, et al. Investigation of landslide calamity due to torrential rainfall in Shobara City, Japan [J]. Soils and Foundations, 2015, 55(5): 1305-1317.
- [8] 任德斌, 汪莹, 于世海. 边坡在降雨及地震作用下的稳定性分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2017, 33(3): 439-446.
- REN D B, WANG Y, YU S H. Analysis on stability of gravel slope under rainfall and earthquake [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2017, 33(3): 439-446. (in Chinese)
- [9] 李涛. 考虑降雨及开挖影响下的厚覆盖层边坡渗流特征及稳定性[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(5): 1708-1714.
- LI T. Seepage characteristics and stability of overburden slope considering rainfall and excavation [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2016, 47(5): 1708-1714. (in Chinese)
- [10] 韩同春, 黄福明. 双层结构土质边坡降雨入渗过程及稳定性分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2012, 46(1): 39-45.
- HAN T C, HUANG F M. Rainfall infiltration process and stability analysis of two-layered slope [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2012, 46(1): 39-45. (in Chinese)
- [11] 刘杰, 曾铃, 付宏渊, 等. 土质边坡降雨入渗深度及饱和区变化规律[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(2): 452-459.
- LIU J, ZENG L, FU H Y, et al. Variation law of rainfall infiltration depth and saturation zone of soil slope [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50(2): 452-459. (in Chinese)
- [12] 董金玉, 赵志强, 杨继红, 等. 干湿循环作用下滑带土的变形演化和强度参数弱化试验研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2016, 48(Sup2): 1-7.
- DONG J Y, ZHAO Z Q, YANG J H, et al. Research on the deformation evolution and the strength weakening of slip soil under wetting-drying cycle [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2016, 48(Sup2): 1-7. (in Chinese)
- [13] 李文, 曾胜, 赵健, 等. 干湿循环作用下长沙绕城高速公路粉质黏土的损伤特性[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(5): 1360-1366.
- LI W, ZENG S, ZHAO J, et al. Damage characteristics of Changsha ring expressway silty clay during dry-wet cycle [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2017, 48(5): 1360-1366. (in Chinese)
- [14] 涂义亮, 刘新荣, 钟祖良, 等. 干湿循环下粉质黏土强度及变形特性试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(12): 3581-3589.
- TU Y L, LIU X R, ZHONG Z L, et al. Experimental study on strength and deformation characteristics of silty clay during wetting-drying cycles [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(12): 3581-3589. (in Chinese)
- [15] 龙安发, 陈开圣, 季永新. 不同降雨强度下红黏土边坡干湿循环试验研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(Sup2): 193-196.
- LONG A F, CHEN K S, JI Y X. Experimental study on wetting-drying cycles of red clay slopes under different rainfall intensities [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(Sup2): 193-196. (in Chinese)
- [16] 朱泽勇, 贺桂成, 李丰雄, 等. 干湿交替条件下红土边坡破坏机理试验研究[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(2): 73-77.
- ZHU Z Y, HE G C, LI F X, et al. Experimental investigation on the failure mechanism of red soil slope under cyclic wetting and drying [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2018, 35(2): 73-77. (in Chinese)
- [17] GRIFFITHS D V, HUANG J S, DEWOLFE G F. Numerical and analytical observations on long and infinite slopes [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2011, 35(5): 569-585.
- [18] CONTE E, TRONCONE A. Simplified approach for the analysis of rainfall-induced shallow landslides [J].

- Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2012, 138(3): 398-406.
- [19] GODT J W, ŞENER-KAYA B, LU N, et al. Stability of infinite slopes under transient partially saturated seepage conditions [J]. Water Resources Research, 2012, 48(5): 5505-5518.
- [20] 邓华锋,肖瑶,方景成,等. 干湿循环作用下岸坡消落带土体抗剪强度劣化规律及其对岸坡稳定性影响研究 [J]. 岩土力学, 2017, 38(9): 2629-2638.
- DENG H F, XIAO Y, FANG J C, et al. Shear strength degradation and slope stability of soils at hydro-fluctuation belt of river bank slope during drying-wetting cycle [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38 (9): 2629-2638. (in Chinese)
- [21] 孔锋,王一飞,方建,等. 中等排放情景下中国未来不同强度降雨变化及其对总降雨贡献的预估(2006—2100年) [J]. 水利水电技术, 2017, 48(12): 14-21, 40.
- KONG F, WANG Y F, FANG J, et al. Pre-estimation on variations of rainfalls with different intensities and their contributions to total rainfall under emission scenarios in China from 2006 to 2100 [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, 48 (12): 14-21, 40. (in Chinese)
- [22] 建筑边坡工程技术规范: GB 50330—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- Technical code for building slope engineering: GB 50330-2013 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)