

## 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

孟生勇, 江兴元, 杨义, 孙乾征, 史文兵

### An experimental study of spatial-temporal evolution of water-soil response and stability of a rainfall-induced accumulation landslide

MENG Shengyong, JIANG Xingyuan, YANG Yi, SUN Qianzheng, and SHI Wenbing

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202204014>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 降雨诱发直线型黄土填方边坡失稳模型试验

Model test of the linear loess fill slope instability induced by rainfall

陈林万, 张晓超, 裴向军, 张硕, 龚伟翔, 钟玉健 水文地质工程地质. 2021, 48(6): 151-160

#### 考虑非饱和浸润层厚度和累积入渗量的改进Green-Ampt模型

An improved Green-Ampt model for rainfall infiltration in the inner dumping site of an open pit coal mine

王雪冬, 李世宇, 孙延峰, 张超彪, 王翠, 朱永东 水文地质工程地质. 2021, 48(6): 64-71

#### 不同压实度下黄土填方边坡失稳的模型试验研究

A model test study of the instability of loess fill slope under different compactness

陈林万, 裴向军, 张晓超, 张硕, 钟玉健, 罗欣 水文地质工程地质. 2022, 49(2): 137-147

#### 基于无人机的滑坡地形快速重建与稳定性分析

Rapid remodeling of three-dimensional terrain and stability analyses of landslide based on UAV

张欢, 巨能攀, 陆渊, 万勋, 蹇志权 水文地质工程地质. 2021, 48(6): 171-179

#### 基于有限元软件自定义本构模型的膨胀土边坡降雨入渗分析

An analysis of rainfall infiltration of expansive soil slope based on the finite element software custom constitutive model

饶鸿, 王金淑, 赵志明, 吴光, 冯涛 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 154-162

#### 基于桩体抗剪强度的复合地基路堤稳定性分析方法

Stability analysis method for the composite foundation embankment based on pile shear strength

钟昌茂, 邱恩喜, 魏永幸, 王智猛, 刘菀茹, 万旭升, 李康乐 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 100-107



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202204014

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.

## 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

孟生勇<sup>1</sup>, 江兴元<sup>1,2</sup>, 杨义<sup>1</sup>, 孙乾征<sup>3</sup>, 史文兵<sup>1,2</sup>

(1. 贵州大学资源与环境工程学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 贵州大学喀斯特地质资源与环境教育部重点实验室, 贵州 贵阳 550025; 3. 贵州省地质矿产勘查开发局一〇四地质大队, 贵州 都匀 558000)

**摘要:** 降雨在松散堆积土中入渗引起内部水土力学的变化是影响稳定性的关键。目前研究多侧重考虑颗粒粒径、含量等因素对斜坡破坏的影响, 但是针对斜坡体内部水土响应及稳定性时空演化方面的研究存在不足。基于野外滑坡案例, 通过室内降雨滑坡模型试验、土力学试验和理论分析手段, 研究了降雨触发松散堆积体斜坡变形破坏过程及模式, 采用 Van Genuchten 模型(VG 模型)重构了土体的土-水特征曲线, 重点探究了斜坡内部水土力学变化以及稳定性时空演化规律。结果表明: (1) 堆积体斜坡破坏经历了微裂隙发育-局部破坏-整体破坏 3 个阶段, 呈现出“初期拉裂-坡面坍塌-塑性滑动”的破坏模式; (2) 入渗过程斜坡体含水率以及孔隙水压力急速增加, 而土颗粒之间基质吸力下降甚至消散, 促进了斜坡破坏发展; (3) 土体力学强度随体含水率升高呈指数下降, 体含水率为 36.3% 时, 有效黏聚力和有效内摩擦角仅为 0.27 kPa、3.39°; (4) 基于极限平衡理论和斜坡土水特征监测数据, 构建了斜坡稳定性时空演化图谱, 与模型试验破坏特征有较好的一致性。研究结果对降雨作用下的堆积层斜坡监测预警与防灾减灾提供理论支撑。

**关键词:** 堆积体斜坡; 降雨入渗; 水槽试验; 稳定性分析; 水文响应

中图分类号: P642.22; TU411

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2023)01-0104-09

## An experimental study of spatial-temporal evolution of water-soil response and stability of a rainfall-induced accumulation landslide

MENG Shengyong<sup>1</sup>, JIANG Xingyuan<sup>1,2</sup>, YANG Yi<sup>1</sup>, SUN Qianzheng<sup>3</sup>, SHI Wenbing<sup>1,2</sup>

(1. College of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China; 2. Key Laboratory of Karst Geological Resources and Environment of Ministry of Education, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China; 3. Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development Bureau 104 Geological Brigade, Duyun, Guizhou 558000, China)

**Abstract:** The change of soil and water mechanics caused by rainfall infiltration in loose soil is the key to affect

收稿日期: 2022-04-11; 修订日期: 2022-06-16

投稿网址: [www.swdzedz.com](http://www.swdzedz.com)

基金项目: 国家自然科学基金项目(42007271); 贵州省地质矿产勘查开发局地质科学技术研究项目([2021]21); 贵州省科技厅基础研究计划项目([2017]7286); 贵州大学实验室开放课题重点项目(SYSKF2022-015); 国家地质灾害自动化监测技术创新平台培育基地开放项目(KF2019-5); 贵州大学省级教改项目(2020005)

第一作者: 孟生勇(1997-), 男, 硕士研究生, 主要从事地质灾害研究工作。E-mail: [1731485988@qq.com](mailto:1731485988@qq.com)

通讯作者: 江兴元(1986-), 男, 博士, 副教授, 主要从事地质灾害评价与防治研究。E-mail: [xyjiang3@gzu.edu.cn](mailto:xyjiang3@gzu.edu.cn)

stability. At present, most studies focus on the influence of particle size, content and other factors on slope failure. However, the research on the internal water-soil response and spatial-temporal evolution of slope stability is insufficient. Based on a field landslide case, this study explores the deformation and failure processes and mode of loose accumulation slope triggered by rainfall through the flume test, soil mechanics test, and theoretical analysis. The Van Genuchten model (VG model) is used to reconstruct the soil-water characteristic curve of the soil, and the mechanical change of soil and water in the slope and the temporal and spatial evolution of stability are mainly explored. The results show that: (1) The failure processes of the accumulation slope emerge in three stages, that is, the micro-fracture development stage, local failure stage and complete collapse stage, presenting the failure mode of “initial cracking-slope collapsing-plastic sliding”. (2) The volumetric water content and pore water pressure of slope increase rapidly during infiltration, while the matric suction between soil particles decreases or even dissipates, which promotes the development of slope failure. (3) The mechanical strength of soil decreases exponentially with the increasing volumetric water content. When the volumetric water content is 36.3%, the effective cohesion and effective internal friction angle are only 0.27 kPa and 3.39°. (4) Based on the limit equilibrium theory and the monitoring data of slope soil-water characteristics, the spatio-temporal evolution map of slope stability is constructed, which is in good agreement with the failure characteristics of the model test. The research results provide theoretical support for monitoring and early warning of accumulation slope under rainfall and disaster prevention and mitigation.

**Keywords:** accumulation slope; rainfall infiltration; flume test; stability analysis; hydrological response

受内外营力作用,山区斜坡的表面或坡脚附近常形成大量松散堆积体<sup>[1]</sup>,在极端气候尤其是连续强降雨影响下,松散堆积体极有可能发生失稳形成破坏力极强的滑坡泥石流灾害<sup>[2]</sup>。同时,由于山区工程活动较频繁,不可避免对这些堆积体形成扰动,导致斜坡变形开裂,为降雨入渗提供优势通道,加速了堆积体的失稳。因此探究山区松散堆积体在降雨作用下的稳定性问题具有重要的现实意义。

Cuomo 等<sup>[3]</sup>、Ghosh 等<sup>[4]</sup>对滑坡变形进行区域性评估,利用地质观测并结合边坡稳定性分析手段,发现所有可能类型 and 空间尺度的滑坡都表现出明显的时空特征和演化。白永健等<sup>[5]</sup>、冯文凯等<sup>[6]</sup>结合室内试验与数值模拟,总结了降雨型滑坡在空间上的灾变过程,分析了降雨在不同入渗时期对滑坡体产生的影响。国内外研究学者都尝试通过斜坡不同位置的变形发展与稳定性演化去分析斜坡变形机制。Wang 等<sup>[7]</sup>、左自波等<sup>[8]</sup>、涂国祥等<sup>[9]</sup>、Orense 等<sup>[10]</sup>基于室内试验研究了降雨诱发滑坡的破坏模式、运动过程、斜坡体渗流规律以及孔隙水压力对斜坡的影响。Sasahara 等<sup>[11-12]</sup>、李爱国等<sup>[13]</sup>、Bordoni 等<sup>[14]</sup>研究了入渗过程斜坡体内剪切应变的变化与孔隙水压力、体积含水率、基质吸力之间的关系,利用基质吸力等参数分析降雨入渗对斜坡稳定性的影响,并基于剪切应变和孔隙水

压力的关系建立了降雨条件下的边坡失稳模型。Hu 等<sup>[15-16]</sup>针对一些松散碎石堆积体在降雨和地表径流作用下形成流化滑动的现象开展大量水槽试验,研究了松散堆积体内部潜蚀和细颗粒含量对这一现象的影响规律。张玉成等<sup>[17]</sup>、唐军峰等<sup>[18]</sup>发现水库蓄水诱发滑坡系列因素中,滑带土强度浸水弱化是较为关键的控制因素。杨宗佶等<sup>[19]</sup>通过足尺人工降雨试验模拟了典型砾石土滑坡堆积体的破坏发展过程,并采用 VG 模型分析了入渗过程中坡体吸应力的变化规律,揭示了斜坡破坏发展过程是优先流和基质流场共同作用的结果。上述研究表明,降雨入渗过程滑坡水土响应具体表现为:降雨入渗使坡体含水率逐渐增大,坡体不同深度处孔隙水压力急速增加,导致土中吸力大幅降低甚至消散,有效应力不断减小;而且,含水率的增大还会引起边坡土体重度增大和抗剪强度降低<sup>[20-23]</sup>,进一步促进斜坡破坏发展。

已有降雨诱发滑坡的研究大多侧重于考虑土体的颗粒粒径、细颗粒含量等对斜坡破坏的影响机制,而对斜坡稳定性时空演化的研究相对较少。基于此,本文以贵州省某滑坡为原型,利用自行设计的室内模拟降雨水槽模型,开展降雨条件下堆积层滑坡降雨入渗模型试验,重构试样的土-水特征曲线,分析降雨入渗过程中孔隙水压力、基质吸力和含水率的变化规

律, 探讨斜坡破坏发展过程与稳定性时空演化规律, 以期为降雨条件下堆积层斜坡的监测预警和防灾减灾提供理论指导。

### 1 试验与理论方法

#### 1.1 模型试验

##### (1) 试验原型

以贵州省思南县凉山村下街滑坡为原型。该滑坡区属于低中山沟槽地貌, 地势东南低西北高, 地形起伏较大, 最大高差 130 m。斜坡坡度 15°~30°, 主滑

方向 134°, 平面呈“长舌”型, 平均宽度 180 m, 纵长 420 m, 平均厚度 6 m, 体积约  $4.6 \times 10^5 \text{ m}^3$ 。钻探揭示滑体主要为第四系堆积物( $Q_4^{al}$ )碎石土; 滑床为中~上志留统韩家店群( $S_{2,3}h$ )泥岩, 隔水性强, 地层产状为  $135^\circ \sim 178^\circ \angle 10^\circ \sim 15^\circ$ 。2014 年 7 月持续近 3 d 的强降雨导致大量地表水汇集、入渗, 坡体后缘发育大量交错拉张、剪切裂缝。如图 1 所示, 滑坡后缘整体下错、中部局部垮塌, 前缘受挤压向前滑动, 出现多级破坏; 滑坡右侧受滑动区影响发生变形, 使 S304 省道交通中断, 大量房屋开裂、倒塌, 22 户居民受灾。

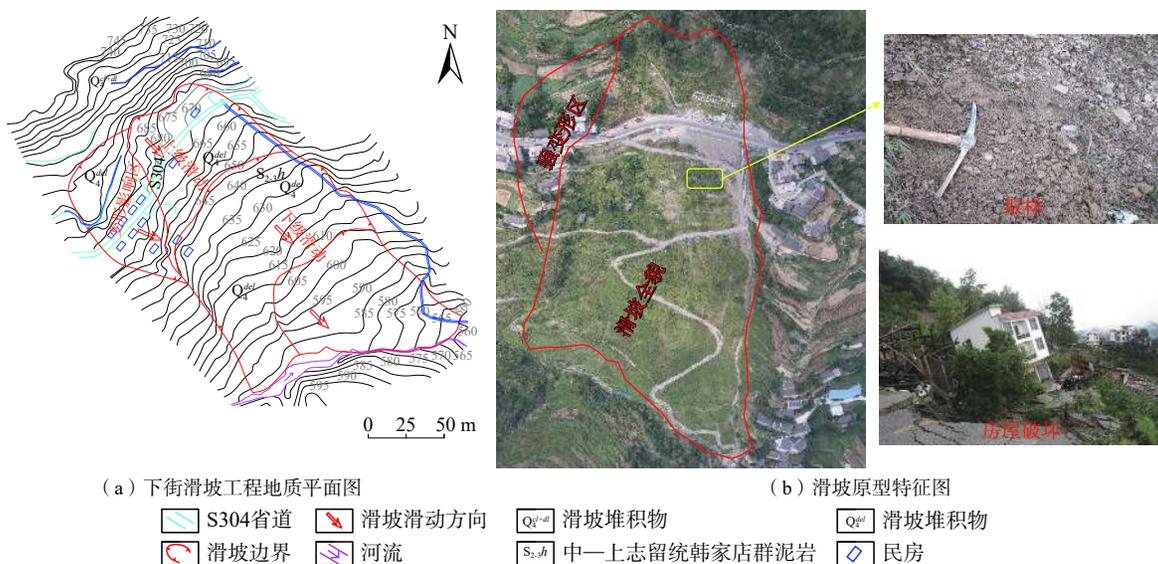


图 1 思南县凉山村下街滑坡工程地质平面图与特征图  
Fig. 1 Geomorphologic map and feature map of Xiajie landslide

##### (2) 试验材料

凉山村下街滑坡堆积体结构松散, 透水性强, 细颗粒含量较低。通过现场取样测试, 土体比重、天然含水率、饱和体积含水率、渗透系数分别为 2.33、17.5%、48.9%、 $1.04 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ 。通过筛分试验分析, 土体的限制粒径、中值粒径和有效粒径分别为 7.00、2.70、0.54 mm, 不均匀系数为 12.73, 曲率系数为 2.04, 为级配良好土。为满足室内模型试验水槽模型最大容许粒径要求, 将原始碎石土粒径  $\geq 20 \text{ mm}$  的颗粒剔除, 原始滑体和试验土体级配见图 2。

##### (3) 试验方案

基岩面与斜坡倾角分别取为 15°、25°, 试验材料取自滑坡现场, 降雨强度为暴雨级别 (45 mm/h)。试验具体流程为: ①降雨系统距离模型顶面距离为 1.40 m, 通过流量计以及喷头数量控制降雨强度并标定其均匀性, 达 92.91%。②以 13% 的初始含水率配置试验材

料, 分 6 层填筑, 模型相对密实度为 0.27, 布置数据监测剖面 I-I' 并埋设体积含水率传感器 (VWC)、孔隙水压力传感器 (P)、基质吸力传感器 (SWP) 各 9 个共 3 层, 见图 3(a)(b); 各传感器编号分别为: VWC1—VWC9、P1—P9、SWP1—SWP9。③模型堆砌完成后,

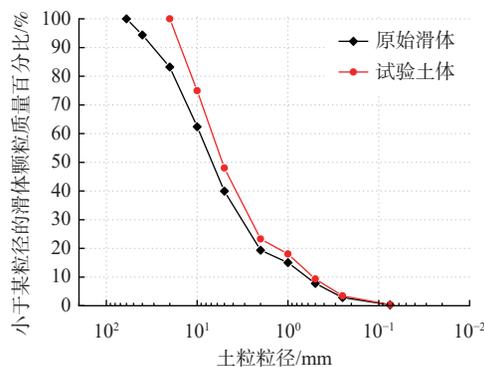


图 2 原始滑体和试验土体颗粒级配  
Fig. 2 Particle gradation of original and testing soil

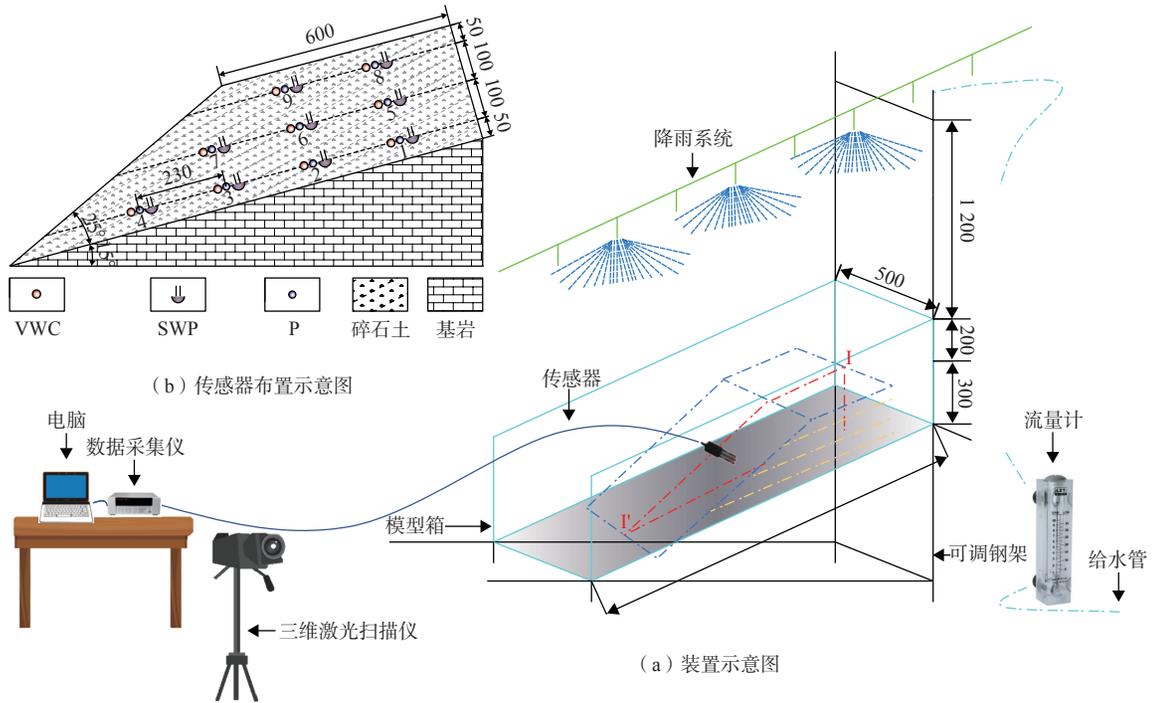


图3 试验模型装置及传感器 (单位: mm)  
Fig. 3 Test model device and sensors (unit: mm)

数据采集各位置传感器初始数据, 利用三维激光扫描仪获取斜坡形态。

(4) 相似性分析

为了使模型试验结果尽可能与滑坡实际变化一致, 试验在几何、物理性质及边界条件上与滑坡原型保持相似。(a)几何相似: 按照缩尺比约 1 : 360 开展模型试验, 模型长、宽、高分别为 1.2, 0.5, 0.3 m, 设计坡度为 40°。(b)物理性质相似: 试验材料取自滑坡原型, 为满足试验要求剔除了少部分大颗粒, 但保留了原型土体宽级配的特性, 以反映松散堆积体的结构和物理性质。(c)边界条件相似: 原型土体结构较松散, 渗透性好, 斜坡主要发生非饱和浅层破坏, 且不存在潜在地下水上升影响; 因此, 模型试验前缘边界设计为透水边界, 保证土体的非饱和状态和自由透水条件。

1.2 理论分析

(1) 土-水特征曲线

Brooks-Corey(BC)模型<sup>[24]</sup>、Van Genuchten(VG)模型<sup>[25]</sup>及 FredlundXing(FX)模型<sup>[26]</sup>被广泛用来拟合土体的土-水特征曲线。BC模型是与土体“孔径分布指数( $\lambda$ )”相关的幂函数, 根据进气压力值( $\psi_b$ ), 该模型为非光滑或开放形式, 比较适用于吸力变化较小的情况, 如可排出孔隙水的粗粒土。模型表达式为:

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \begin{cases} 1, & \psi < \psi_b \\ (\psi_b/\psi)^\lambda, & \psi \geq \psi_b \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $S_e$ ——有效饱和度;  
 $\theta$ ——体积含水率/%;  
 $\theta_r, \theta_s$ ——残余、饱和含水率/%;  
 $\psi$ ——基质吸力/kPa。

VG模型是一个封闭、平滑的模型, 表达式为:

$$S_e = \{1/[1+(\alpha\psi)^n]\}^m \quad (2)$$

式中:  $\alpha, n, m$ ——拟合参数, 其中  $m=n-1/n$ 。

FX模型的一般表达式为:

$$\theta = C(\psi)\theta_s\{1/\ln[e+(\psi/\alpha)^n]\}^m \quad (3)$$

式中:  $C(\psi)$ ——修正因子, 可确保含水率为 0 时模型吸力值为  $10^6$  kPa。

(2) 边坡稳定性分析理论

通常使用“无限斜坡稳定性模型”的极限平衡理论对降雨诱发的浅层滑坡进行稳定性评价, Lu等<sup>[27]</sup>将经典评价模型扩展至非饱和条件, 其表达式为:

$$F_s(z, t) = \frac{\tan \varphi'}{\tan \beta} + \frac{c' - \sigma^s(z, t) \tan \varphi'}{(\gamma_d + \gamma_w \theta(z, t) z \sin \beta \cos \beta)} \quad (4)$$

式中:  $F_s(z, t)$ ——不同时刻不同深度处稳定性系数;  
 $z, t$ ——深度、时间;  
 $\sigma^s(z, t)$ ——吸应力, 是  $\psi(z, t)$  与  $S_e$  的函数;  
 $\gamma_d, \gamma_w$ ——土体干重度、水的重度/( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ );

$c'$ ——有效黏聚力/kPa;

$\phi'$ ——有效内摩擦角/(°);

$\beta$ ——斜坡倾角/(°)。

## 2 试验结果

试验降雨历时 90 min, 累计降雨量 67.5 mm, 斜坡破坏过程见图 4, 经历 3 个阶段:

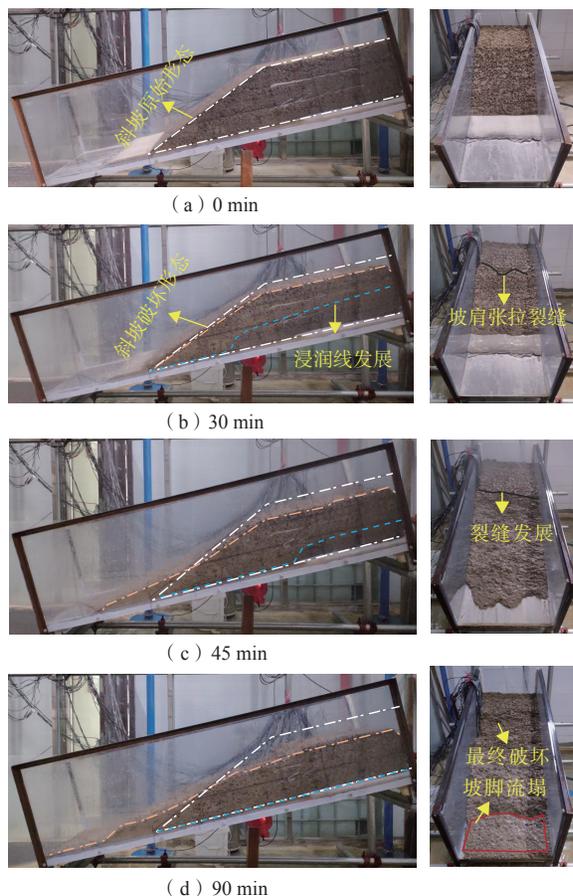


图 4 斜坡模型破坏发展过程

Fig. 4 Development process of slope

(1)微裂隙发育阶段,  $t=0 \sim 30$  min。降雨初始, 坡顶面雨水入渗, 土体浸润线迁移方向大致与斜坡面平行; 随着入渗的持续, 湿润锋逐渐下移至斜坡中下部, 坡体含水率逐渐增大。而且, 斜坡面水分沿坡面向下流动, 坡肩和坡面位置发生局部侵蚀。此阶段坡顶沉降约 5 cm, 由于沉降不均匀性和坡面侵蚀作用, 在坡顶及坡面附近开始出现张拉微小裂缝, 坡面向下发生短距离蠕动, 见图 4(b)。

(2)局部破坏阶段,  $t=30 \sim 45$  min。浸润线下移至斜坡下部, 坡顶沉降约 7 cm, 前缘向前滑移了约 20 cm, 坡顶和坡面发育的裂缝进一步扩展并发生局部坍塌。

坡脚附近有较小颗粒汇集, 形成流滑现象, 见图 4(c)。

(3)整体破坏阶段,  $t=45 \sim 90$  min。浸润线已完全迁移至模型底部, 坡顶下沉近 10 cm, 大量滑体堆积于坡脚附近; 此时降雨入渗形成稳定渗流并自坡体流出, 斜坡进一步发生破坏, 并呈现出“多级式后退型”破坏, 见图 4(d)。

斜坡破坏过程呈现出“初期拉裂-局部坍塌-塑性滑动”破坏模式, 与滑坡原型实际变化一致。

## 3 分析与讨论

### 3.1 土水响应规律

图 5 为斜坡内不同深度处体积含水率、基质吸力以及孔隙水压力变化规律。降雨初期,  $t=5$  min 时, 5 cm 深度处 9 号点 (VWC9) 的体积含水率迅速激增到 28.1%。  $t=13$  min, 坡肩发生局部破坏, 基质吸力迅速下降至 11.1 kPa; 此时斜坡中部 15 cm 深度处 (VWC7) 的体积含水率短时间内激增至 37% 并保持相对稳定。  $t=18$  min, 雨水入渗至斜坡坡脚, 基质吸力迅速降至 11.8 kPa。  $t=24$  min, 坡面受坡肩坍塌及基质吸力骤减影响而发生局部破坏。  $t=62$  min, 坡肩出现大规模坍塌, 使得 VWC7 的体积含水率短时间内出现骤减现象, 见图 5(b);  $t=66$  min, 坡脚 Z=25 cm 深度附近受坡面坍塌影响而发生多次滑动, 使得该位置处 VWC4 的体积含水率发生多次突升和骤减, 见图 5(c)。入渗过程体积含水率变化特征为: 靠近坡表处 (VWC9、VWC7、VWC4) 的体积含水率达 45% ~ 47.1%, 明显高于斜坡后缘的体积含水率 (37% ~ 38%); 而斜坡底层位置 (VWC1) 的体积含水率达到 48.75%, 其原因是在降雨作用下土体中较小颗粒不断向斜坡前缘及底部运移, 并在斜坡前缘基覆面附近汇集, 形成相对隔水带, 降低了基覆面附近土体的渗透性, 使底层土体较长时间处于饱和状态。

图 5(d) 为斜坡不同深度处的孔隙水压力变化曲线, 整体上呈现出“急速上升”、“出现裂纹或坍塌而骤降”以及“缓慢上升”的演化过程。  $t=8$  min 时, 降雨入渗至后缘监测点 (P8) 附近, 孔隙水压力迅速上升至 0.4 kPa; 当坡体产生微裂隙或坍塌时, 孔隙水压力突降至 0.15 kPa。其他监测点孔隙水压力的变化呈现出类似规律, 其原因是坡体产生裂隙或坍塌使得传感器短时间暴露在空气中, 孔隙水压力耗散较快。值得注意的是, 靠近坡肩 (P9) 的孔隙水压力在入渗过程中变化不明显, 峰值约为 0.16 kPa, 原因是试验过程中坡肩附近变形破坏较明显, 坡肩土体被冲刷侵蚀, 孔隙水

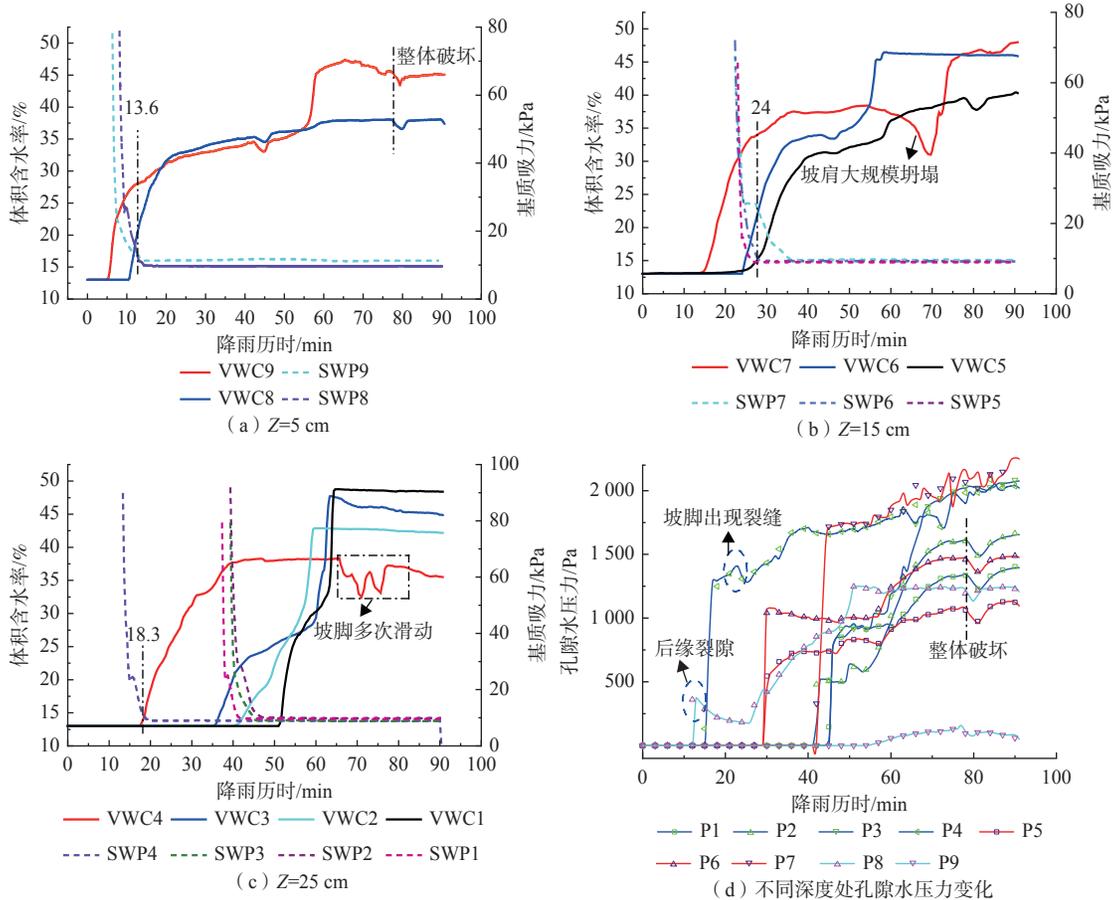


图 5 不同深度处含水率、基质吸力以及孔隙水压力变化

Fig. 5 Relationship between water content, substrate suction and stability factor at different depths

压力耗散较快。由于斜坡产生的变形破坏影响, 坡表附近(P7)的孔隙水压力峰值可达 2 kPa, 而坡体后缘峰值约为 1.61 kPa。试验表明, 入渗时体积含水率发生突变的过程中, 基质吸力迅速下降, 在斜坡底部甚至消散; 而孔隙水压力则快速上升, 有效应力下降, 降低了土体的抗剪强度, 促进了斜坡变形破坏, 使坡体稳定性进一步降低。

### 3.2 边坡稳定性分析

#### (1) 土体强度特征

设计 5 组不同含水率土样直剪试验, 结果见图 6。体积含水率为 12% 时,  $c'$  和  $\varphi'$  分别为 4.49 kPa、37.08°; 随着含水率逐渐升高,  $c'$  和  $\varphi'$  大幅度被削弱; 体积含水率增加到 36% 时,  $c'$  和  $\varphi'$  为 0.27 kPa、3.39°, 衰减 90% 以上。构建不同含水率条件下  $c'$  和  $\varphi'$  的指数函数表达式, 见式(5)和式(6), 为后文构建不同深度和含水率条件下的斜坡稳定性演化提供依据。

$$c' = 12.06e^{(-0.09x)} \quad (5)$$

$$\varphi' = 133.21e^{(-0.124x)} \quad (6)$$

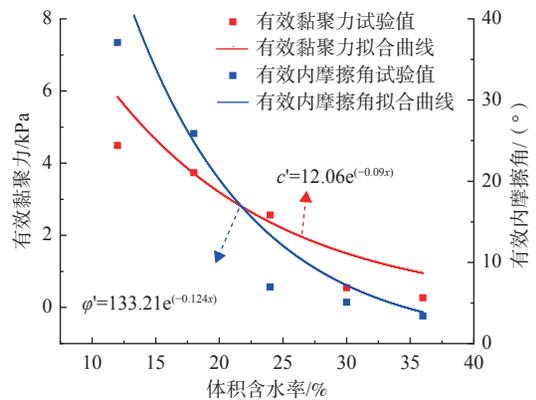


图 6 不同含水率条件下试样强度衰减曲线  
Fig. 6 Strength decay curve of sample under different volumetric water contents

#### (2) 土-水特征曲线

基于土体中基质吸力与含水率的耦合关系进行土-水特征曲线的重构(图 7)。FX 模型与 BC 模型与试验数据的相关性较低, 特别是斜坡高含水率阶段, 模型拟合度较差, 在入渗过程中对优先流的响应不如 VG 模型( $R^2=0.83$ )。另外, 土体颗粒级配对模型拟合

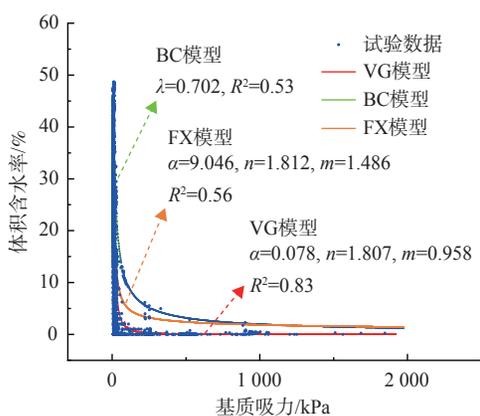


图 7 试验土体的土-水特征曲线

Fig. 7 SWCC of the experimental soil

参数有较大影响<sup>[28, 29]</sup>。因此,基于 VG 模型构建的土-水特征模型。

### (3) 边坡稳定性分析

结合边坡稳定性评价模型、土体强度演化函数及土-水特征曲线,通过 MATLAB 程序计算监测点位置稳定性系数;监测点之间的稳定性系数通过 Origin 绘制“XYZ 等高线图”进行映射(图 8),其原理是通过已知监测点数据插值计算。稳定性分析所用参数以  $t=10 \text{ min}$  为例进行说明: $c'$ 、 $\phi'$ 根据土体强度特征衰减函数而得,不同深度处  $\phi'$ 变化较小,取均值;吸力通过监测数据由 VG 模型计算而得;坡角为  $25^\circ$ 、残余含水率为 3%,具体见表 1。

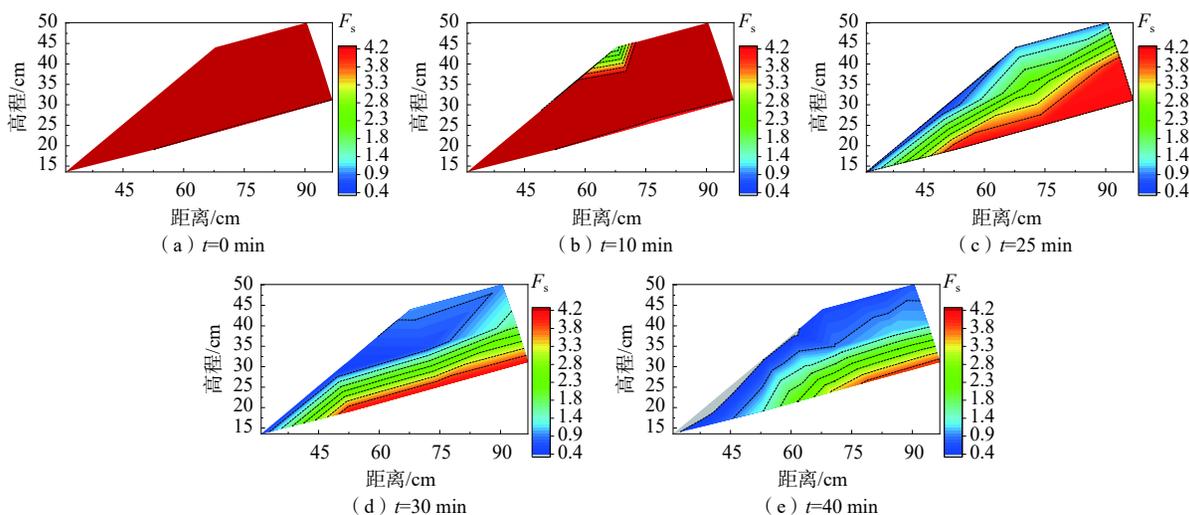


图 8 斜坡不同时刻稳定性系数演化云图

Fig. 8 Evolution nephogram of slope stability coefficient at different time points

表 1 斜坡稳定性分析土体参数 ( $t=10 \text{ min}$ )

Table 1 Soil parameters for slope stability analysis ( $t=10 \text{ min}$ )

参数	Z/cm	$c'/\text{kPa}$	$\phi'/(\circ)$	$\gamma_d/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	$\beta/(\circ)$	$\theta_s/\%$	$\theta_r/\%$
	5.06	3.14					
	12.47	3.33					
数值	12.83	3.34	28.74	11.86	25	3	49
	15.00	3.37					
	25.27	3.45					

图 8(a)–(e)为斜坡不同时刻稳定性系数( $F_s$ )演化云图,云图表现出的发展破坏特征与试验结果基本一致。降雨初期,斜坡坡肩及坡面附近最先发生沉降和局部剪切变形,微裂隙开始孕育发展,稳定性系数下降至 1.8 左右,见图 8(b)。随着降雨过程持续,斜坡微裂隙进一步发展,促进了降雨入渗,结合图 5(d)孔隙水压力的变化,加速了斜坡剪切变形,导致坡面局部坍塌。 $t=25 \sim 30 \text{ min}$  阶段,坡面局部位置稳定性系数降至  $0.5 \sim 0.9$ ,发生破坏并向斜坡前缘滑动,坡脚附

近见有较小颗粒汇集,形成流滑现象,见图 8(c)(d)以及图 4(c)。 $t=40 \text{ min}$  左右,斜坡后缘及坡面大部分区域稳定性系数下降至  $0.4 \sim 0.9$ ,坡面已基本坍塌;坡脚附近稳定性系数下降至  $0.4$  以下,并发生多次滑动破坏,坡面最终形成稳定的渗流并不断对坡面形成塑性滑动破坏,见图 8(e)以及图 4(d)。云图显示斜坡后缘稳定性比前缘及坡肩附近下降的速度慢,原因是降雨入渗过程土体中的较小颗粒不断向斜坡前缘及基覆面运移并汇集,降低了基覆面附近土层的渗透性。

## 4 结论

(1)降雨条件下堆积体滑坡变形破坏过程经历 3 个阶段,即微裂隙发育、局部破坏及整体破坏阶段,表现出“初期拉裂—坡面局部坍塌—塑性滑动”破坏模式,与实际变化具有很好的对应性。入渗过程破坏区上部发育拉裂缝,下部受挤压作用向前缘滑动,坡脚

处产生局部流土现象。

(2)含水率增加,试样的有效内摩擦角和有效黏聚力呈指数下降。体积含水率为 36.3% 时,有效内摩擦角和有效黏聚力分别衰减了 93%、91%, 土体强度被大幅度削弱。

(3)堆积体斜坡变形破坏与含水率、孔隙水压力及基质吸力的变化密切相关。孔隙水压力不断增加导致斜坡体有效应力及基质吸力降低,使斜坡抗剪强度逐渐减小。不同深度处的孔隙水压力变化对斜坡出现变形反应敏感,坡体出现裂纹或坍塌时孔压会短暂耗散较快而发生骤降。

(4)VG 模型较好的拟合了堆积体斜坡的土-水特征曲线( $R^2=0.83$ )。斜坡稳定性时-空演化具体表现为:坡肩及坡脚首先发生局部破坏并孕育拉张裂缝, $F_s$  首先下降至 1 以下。裂缝促进了降雨入渗,使坡体基质吸力不断减小,降低斜坡的抗剪强度,整体稳定性不断降低。

#### 参考文献 (References) :

- [ 1 ] HUANG Runqiu, FAN Xuanmei. The landslide story[J]. *Nature Geoscience*, 2013, 6(5): 325 – 326.
- [ 2 ] ZHANG S, ZHANG L M, CHEN H X. Relationships among three repeated large-scale debris flows at Pubugou Ravine in the Wenchuan earthquake zone[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2014, 51(9): 951 – 965.
- [ 3 ] CUOMO S, DI P A, MARTINELLI M. Modelling the spatio-temporal evolution of a rainfall-induced retrogressive landslide in an unsaturated slope[J]. *Engineering Geology*, 2021, 294: 106371.
- [ 4 ] GHOSH S, BORA A, NATH S, et al. Analysing the spatio-temporal evolution of an active debris slide in Eastern Himalaya, India[J]. *Journal of the Geological Society of India*, 2014, 84(3): 292 – 302.
- [ 5 ] 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(增刊 1): 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(Sup 1): 3025 – 3035. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 6 ] 冯文凯,胡云鹏,谢吉尊,等.顺层震裂斜坡降雨触发灾变机制及稳定性分析——以三溪村滑坡为例[J].岩石力学与工程学报, 2016, 35(11): 2197 – 2207.

- [ FENG Wenkai, HU Yunpeng, XIE Jizun, et al. Disaster mechanism and stability analysis of shattered bedding slopes triggered by rainfall: A case study of Sanxicun landslide[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(11): 2197 – 2207. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 7 ] WANG G, SASSA K. Factors affecting rainfall-induced flowslides in laboratory flume tests[J]. *Géotechnique*, 2001, 51(7): 587 – 599.
- [ 8 ] 左自波,张璐璐,王建华.降雨触发不同级配堆积体滑坡模型试验研究[J].岩土工程学报, 2015, 37(7): 1319 – 1327. [ZUO Zibo, ZHANG Lulu, WANG Jianhua. Model tests on rainfall-induced colluvium landslides: Effects of particle-size distribution[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, 37(7): 1319 – 1327. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 9 ] 涂国祥,邓辉,黄润秋.水位变动速度对某库区岸坡堆积体稳定性的影响[J].四川大学学报(工程科学版), 2011, 43(4): 63 – 70. [TU Guoxiang, DENG Hui, HUANG Runqiu. Influence on a bank slope accumulation's stability of the rising or falling speed of a reservoir water level[J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2011, 43(4): 63 – 70. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 10 ] ORENSE R P, SHIMOMA S, MAEDA K, et al. Instrumented model slope failure due to water seepage[J]. *Journal of Natural Disaster Science*, 2004, 26(1): 15 – 26.
- [ 11 ] SASAHARA K. Prediction of the shear deformation of a sandy model slope generated by rainfall based on the monitoring of the shear strain and the pore pressure in the slope[J]. *Engineering Geology*, 2017, 224: 75 – 86.
- [ 12 ] SASAHARA K, SAKAI N. Development of shear deformation due to the increase of pore pressure in a sandy model slope during rainfall[J]. *Engineering Geology*, 2014, 170(4): 43 – 51.
- [ 13 ] 李爱国,岳中琦,谭国焕,等.土体含水率和吸力量测及其对边坡稳定性的影响[J].岩土工程学报, 2003, 25(3): 278 – 282. [LI Aiguo, YUE Zhongqi, TAN Guohuan, et al. Soil moisture and suction measurement and its effect on slope stability[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2003, 25(3): 278 – 282. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 14 ] 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.
- [15] HU W, XU Q, VAN ASCH T W J, et al. Flume tests to study the initiation of huge debris flows after the Wenchuan earthquake in S-W China[J]. *Engineering Geology*, 2014, 182: 121-129.
- [16] HU Wei, SCARINGI G, XU Qiang, et al. Internal erosion controls failure and runout of loose granular deposits: evidence from flume tests and implications for postseismic slope healing[J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45(11): 5518-5527.
- [17] 张玉成, 杨光华, 张有祥, 等. 古滑坡滑带土的力学特性与库水位变化对其稳定性影响及加固措施[J]. *岩土力学*, 2016, 37(增刊 2): 43-52. [ZHANG Yucheng, YANG Guanghua, ZHANG Youxiang, et al. Influence of mechanical properties of sliding zone and water level changes on ancient landslide stability and its reinforcement measures[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(Sup 2): 43-52. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 唐军峰, 唐雪梅, 周基, 等. 滑坡堆积体变形失稳机制: 以贵州剑河县东岭信滑坡为例[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2022, 52(2): 503-516. [TANG Junfeng, TANG Xuemei, ZHOU Ji, et al. Deformation and instability mechanism of landslide accumulation: A case study of donglingxin landslide accumulation in Jianhe County, Guizhou Province[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2022, 52(2): 503-516. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 杨宗佶, 蔡焕, 雷小芹, 等. 非饱和地震滑坡堆积体降雨破坏水-力耦合行为试验[J]. *岩土力学*, 2019, 40(5): 1869-1880. [YANG Zongji, CAI Huan, LEI Xiaoqin, et al. Experiment on hydro-mechanical behavior of unsaturated gravelly soil slope[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(5): 1869-1880. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 蒋中明, 曾铃, 付宏渊, 等. 极端久雨条件下软岩边坡动态稳定性分析[J]. *中国公路学报*, 2014, 27(2): 27-34. [JIANG Zhongming, ZENG Ling, FU Hongyuan, et al. Dynamic stability analysis of soft rock slope due to extremely prolonged rainfall[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2014, 27(2): 27-34. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 朱元甲, 贺拿, 钟卫, 等. 间歇型降雨对堆积层斜坡变形破坏的物理模拟研究[J]. *岩土力学*, 2020, 41(12): 4035-4044. [ZHU Yuanjia, HE Na, ZHONG Wei, et al. Physical simulation study of deformation and failure accumulation layer slope caused by intermittent rainfall[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(12): 4035-4044. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 付宏渊, 曾铃, 王桂尧, 等. 降雨入渗条件下软岩边坡稳定性分析[J]. *岩土力学*, 2012, 33(8): 2359-2365. [FU Hongyuan, ZENG Ling, WANG Guiyao, et al. Stability analysis of soft rock slope under rainfall infiltration[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(8): 2359-2365. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 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)]
- [24] BROOKS R H, COREY A T. Hydraulic properties of porous media[J]. *Hydrol Pap*, 1964: 1-27.
- [25] 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.
- [26] FREDLUND D G, XING Anqing. Erratum: Equations for the soil-water characteristic curve[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1994, 31(6): 1026-1026.
- [27] LU Ning, GODT J W. 斜坡水文与稳定 [M]. 简文星, 王菁莪, 侯龙, 译. 北京: 高等教育出版社, 2014: 297-298. [LU Ning, GODT J W. Hillslope hydrology and stability [M]. JAN Wenxing, WANG Jing'e, HOU Long, tans. Beijing: Higher Education Press, 2014: 297-298.]
- [28] 陈卫金, 程东会, 陶伟. van Genuchten模型参数的物理意义[J]. *水文地质工程地质*, 2017, 44(6): 147-153. [CHEN Weijin, CHENG Donghui, TAO Wei. Physical significance of the parameters in the van Genuchten model[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2017, 44(6): 147-153. (in Chinese with English abstract)]
- [29] 彭建平, 邵爱军. 基于 Matlab 方法确定 VG 模型参数[J]. *水文地质工程地质*, 2006, 33(6): 25-28. [PENG Jianping, SHAO Aijun. Determination of the parameters of VG model based on Matlab[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2006, 33(6): 25-28. (in Chinese with English abstract)]