

降雨作用下某滑坡的稳定性研究

刘强¹, 阿发友^{2,3}, 沈显泽^{2,3}

(1. 国家石油天然气管网集团有限公司华南分公司, 广州 510600; 2. 昆明理工大学国土资源工程学院, 昆明 650093; 3. 自然资源部高原山地地质灾害预报预警与生态保护修复重点实验室, 昆明 650093)

摘要: 以百昆成品油管道建水站 MJ053 滑坡为分析对象, 在结合滑坡野外调查和室内外试验工作的情况下, 结合非饱和土的渗流理论, 应用数值模拟方法对降雨作用下的滑坡形成机理和稳定性进行研究, 分析滑坡在连续 3 d 强降雨作用下的稳定性变化情况。结果表明: 滑坡受强降雨影响明显, 滑坡在极端强降雨条件下, 滑坡土体位移在短时间内迅速增大, 稳定性则下降至不稳定状态, 该滑坡必须进行治理。

关键词: 滑坡; 稳定性; 降雨; 数值模拟

中图分类号: P642.22; P642 **文献标识码:** A

STUDY ON STABILITY OF A LANDSLIDE UNDER RAINFALL

LIU Qiang¹, A Fa-you^{2,3}, SHEN Xian-ze^{2,3}

(1. South China Branch of National Petroleum and Natural Gas Pipeline Network Group Co., Ltd., Guangzhou 510600, China; 2. Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China; 3. Key Laboratory of Geohazard Forecast and Geocological Restoration in Plateau Mountainous Area, Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China, Kunming 650093, China)

Abstract: In this paper, the MJ053 landslide of the Baise-kunming oil product pipeline located in Jianshui County, China, is taken as the object of analysis, the formation mechanism and stability of the landslide under the action of rainfall are studied by using the numerical simulation method combined with the percolation theory of unsaturated soil, and the stability change of the landslide under the action of the continuous heavy rainfall for three days is analyzed. The results show that the landslide is obviously affected by heavy rainfall. Under the condition of extreme heavy rainfall, the displacement of the landslide soil increases rapidly in a short time, and the stability of the landslide decreased to an unstable state, and the landslide must be treated.

Key words: landslide; stability; rainfall; numerical simulation

1 引言

西南地区地质环境条件复杂多变, 地质灾害极

为频发。输油管道作为长距离线状工程, 在西南地区穿越各种各类地质环境, 面临的地质灾害具有多样性、复杂性和普遍性的特点, 给输油管道安全防控

带来了很大挑战。由于管道建设里程的不断增加和山区地质灾害的易发性,地质灾害已经成为管道安全运营的头号威胁。据不完全统计,截至 2014 年兰成渝输油管道、中贵输气管道、西气东输管道沿线地质灾害多达 282 处,涉及崩塌、滑坡、泥石流等,其中滑坡灾害 107 处,占比达 38%^[1]。由此可见,滑坡是威胁管道安全运营的主要地质灾害之一。在滑坡的作用下,输油管道受到土体的推挤、拉压或者复合作用而产生变形变位甚至管道的破裂对管道的运营管理工作带来了极大的挑战^[2-4]。2017 年发生的百昆成品油管道建水站 MJ053 滑坡,就是典型的输油管道滑坡灾害,该滑坡长约 90 m,宽 80 m,滑体平均厚度约 3 m,最大滑动距离约为 1.00 m。输油管道正好由东向西穿过滑坡体,滑坡直接威胁到输油管道的安全运营。因此,为保证管道安全运营,分析研究输油管道滑坡的稳定性,为滑坡防治提供可靠的依据是必须进行的工作。

诱发滑坡的因素具有多样性,但降雨是诱发滑坡的最主要因素之一^[5-6]。目前,降雨诱发滑坡机理受到国内外学者的重视,并进行了大量的研究工作。研究主要从降雨诱发滑坡的机理出发,分析降雨入渗以后斜坡体内的水-岩(土)相互作用对斜坡稳定性的影响^[7-8]。研究方法主要有物理模型试验和数值模拟分析等^[9]。在参考前人研究的基础上,本文以百昆成品油管道蒙自管理处 MJ053 滑坡为例,利用 Geo-Studio 数值模拟软件,分析滑坡在连续 3 d 强降雨作用下的位移场和稳定性变化情况,为滑坡防治提供依据,具有一定的理论意义和实际意义。

2 滑坡区地质环境条件

滑坡位于百昆成品油管道建水站 MJ053 处,管道穿越滑坡区(图 1)。场地地貌单元属丘陵,微地貌特征呈南东高北西低。滑坡分布高程 1 347~1 363 m,纵向上呈“缓-陡”台阶状地貌,前缘中下部较缓,为 2°~8°,滑坡上部斜坡坡度相对较大,坡度 15°~45°。滑坡主滑方向为 312°,滑坡平面形态上呈弧形,滑坡平均长约 90 m,平均宽度约 80 m,总面积约 7 200 m²,滑坡体平均厚度约 3 m,总体积约为 2.16×10⁴ m³,属浅层小型土层滑坡。滑坡区地表变形迹象主要表现为裂缝发育(图 2),滑坡区共发育裂缝 8 条(L1 至 L8),裂缝最宽达 0.1~10 cm,并局部发生错动,形成 0.1~1.5 m 的滑坡后壁(图 3)。



图 1 滑坡整体照片



图 2 原治理水沟严重变形破坏



图 3 滑坡后缘裂缝

根据野外钻探资料,滑坡区所揭露的地层岩性主要为素填土(Q₄^{pl})、黏土(Q₄^{al+pl})和泥质粉砂岩(N)(图 4)。滑坡区水文地质条件简单,按地下水赋存条件及运移形式,可分为松散岩类孔隙水、基岩裂隙水两个大类。滑坡区无泉点,雨季钻孔内测得稳定地下水埋深为 0.50~0.80 m,旱季测得稳定地下水埋深为 1.50~3.00 m。

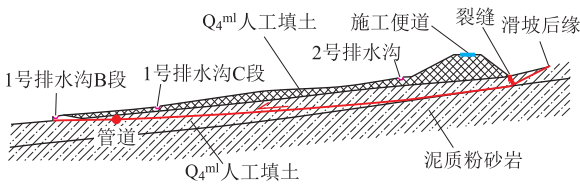


图 4 滑坡典型工程地质剖面图

3 降雨作用下滑坡的数值模拟研究

3.1 模拟软件的选取

Geo-Studio 数值模拟软件是由世界著名的岩土软件开发公司 GEO-SLOPE 在 20 世纪 70 年代研发的针对岩土、采矿、地质和环境工程等领域的一套模拟分析软件,是世界知名的岩土工程分析软件之一^[10-11]。不同于传统计算滑坡稳定性时采用的极限平衡法,Geo-Studio 采用的是有限元法,有限元法不仅不需要假设滑动面,还能计算涉及到水-土的相互作用和强度与变形相关的稳定性计算问题,同时还能求解在不同时刻的边坡应力状态,具有较强的实际应用价值和科研价值。

3.2 模型的建立

滑坡位于一处山间丘陵地带,为了让计算剖面能最大程度反映出滑坡的地形地貌以及地层和结构特征,结合前期的勘查成果,选取图 4 为此次数值模拟的计算剖面。模型左侧高 17 m,右侧高 32 m,水平长 138 m,尺寸与实际剖面保持一致。结合滑坡规模,此次模型共选取滑坡区已揭露的 4 种地层,由上至下分别为:第四系残坡积层(Q_4^{el+dl})粉质粘土、上第三系(N)全风化泥质粉砂岩、上第三系(N)强风化泥质粉砂岩和上第三系(N)中风化泥质粉砂岩。模型采用四边形和三角形进行网格划分,共划分网格 392 个、节点 439 个,并在滑坡前缘和人工便道堆积体设置监测点 A(34,37)和监测点 B(118,48),以便观测滑坡前缘和后缘随降雨时程的变形情况。具体计算模型如图 5。

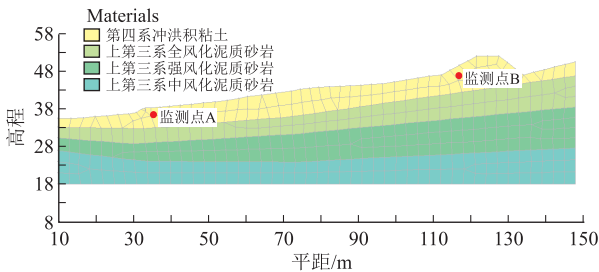


图 5 滑坡计算模型

3.3 计算参数与边界条件的选取

(1) SEEP/W 模块参数选取

模型自上而下由 4 种不同地层组成。第一层为滑体土第四系残坡积层(Q_4^{el+dl})粉质粘土,材料模型为饱和/不饱和,土体饱和含水量为 $0.432 \text{ m}^3/\text{m}^3$,最大基质吸力为 100 kPa,估计方法为样本函数,材料选择为粉质粘土;饱和渗透系数为 0.240 m/d ,估计方法为 Van Genuchten 法。根据地层设置材料的不同,可以得到不同地层岩土体的水土特征曲线,水土特征曲线见图 6 和图 7。第二到第四层参数设置方法与第一层相同,为方便描述,地层由上而下命名为地层 1~4,不同地层具体参数取值见表 1。

表 1 SEEP/W 模块地层参数表

地层	饱和含水量 $/\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$	最大基质吸力 $/\text{kPa}$	材料	饱和渗透系数 $/\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$
地层 1	0.432	100	粉质粘土	0.240
地层 2	0.126	1 000	泥质粉砂岩	5.247
地层 3	0.094	1 000	泥质粉砂岩	3.542
地层 4	0.062	1 000	泥质粉砂岩	2.153

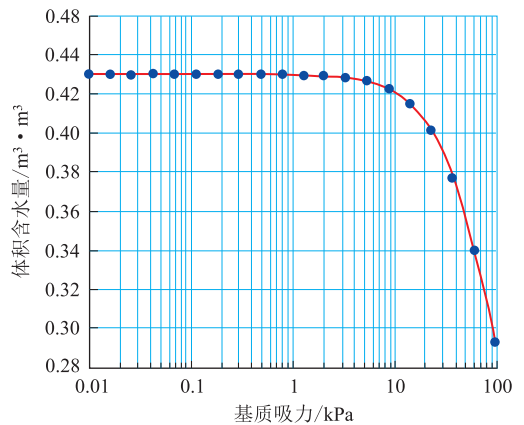


图 6 粉质粘土水土特征曲线

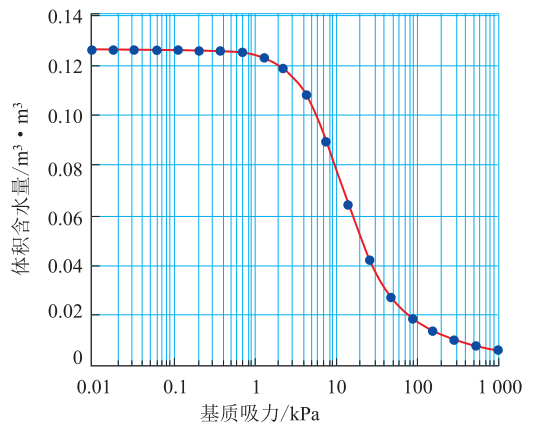


图 7 泥质粉砂岩水土特征曲线

(2) SLOPE/W 模块参数选取

稳定性计算选取摩尔-库伦计算模型,采用内置的条分法进行滑坡稳定性计算,其中涉及的主要计

算参数包括材料重度 r 、粘聚力 c 和内摩擦角 φ 。具体参数选取见表 2。

表 2 SLOPE/W 模块地层参数表

地层	重度 $r/\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$	粘聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/^\circ$
地层 1	18.2	5.5	4.0
地层 2	24.9	7.5	20.2
地层 3	25.1	9.8	22.6
地层 4	25.2	10.2	25.8

(3) SIGMA/W 模块参数选取

此模块主要用于分析滑坡在降雨过程中的变形和应力分布情况,材料分类选择有效参数(w/孔隙水压力),材料模型选择弹塑性(w/孔隙水压力),需要输入的主要参数为有效弹性模量和泊松比。该类参数此次勘查工作并未测定,因此主要以邻近地区已探明的同类土体数值和经验值综合参考取值,水压属性和材料参数与前面两种模块中的数值相同(表 3)。

表 3 SIGMA/W 模块地层参数表

地层	泊松比	有效弹性模量/kPa
地层 1	0.334	5.0×10^3
地层 2	0.242	1.5×10^5
地层 3	0.227	1.8×10^5
地层 4	0.195	2.5×10^5

渗流分析中,结合建水县历史降雨特点,该地区历史上有记录的单日最大降雨量为 144 mm/d,为分析滑坡在极端降雨条件下渗流场、变形和稳定性的变化过程,因此此次降雨边界条件结合建水县历史最大单日降雨量,设定为 150 mm/d,且日降雨量小于滑体土的饱和渗透系数。降雨持续时间设置为 3 d,并设定每 12 h 为一个检测节点,模型左右两侧参考地下水出露情况按位置水头分别取 33 m 和 48 m,模型底部设为不透水边界;在 SIGMA/W 模块分析中,边界条件结合滑坡区实际情况,模型底部固定水平和垂直方向,模型右侧固定水平方向。完成上述操作后,开始计算。

3.4 模拟结果分析

(1) 降雨过程中,滑坡最大位移分布变化如图 8 所示。

在图 8 中,滑坡发生的位移部分同样集中在表层粉质粘土中,并与前文产生剪应变区域完全吻合。其中人工便道堆积体处产生的位移量最大,在降雨后 12 h 时,此处最大位移为 1.149 m,24 h 后增加到 1.169 m,48 h 后为 1.191 m,而 72 h 后则达到了 1.202 m。根据前文对孔隙水压力的分析,人工便道堆积体在降雨过程中基质吸力大幅下降,且由于

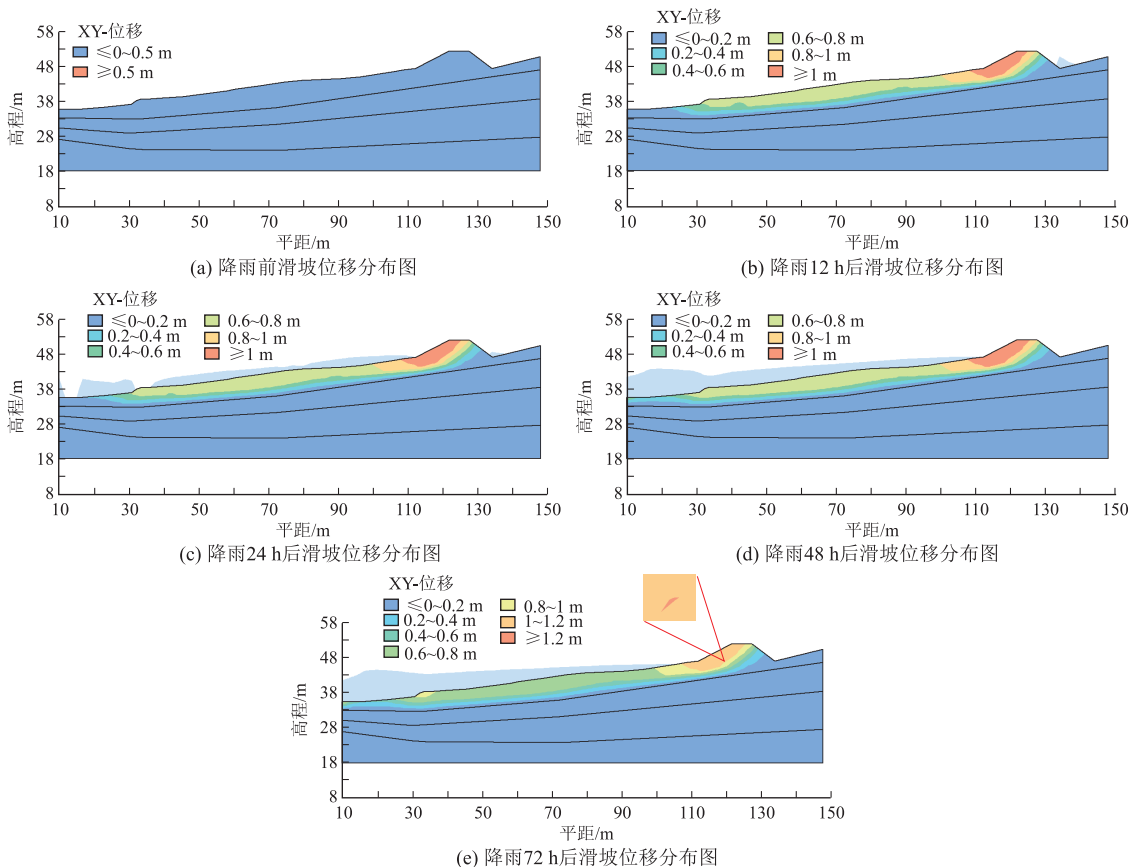


图 8 降雨过程中滑坡位移分布变化云图

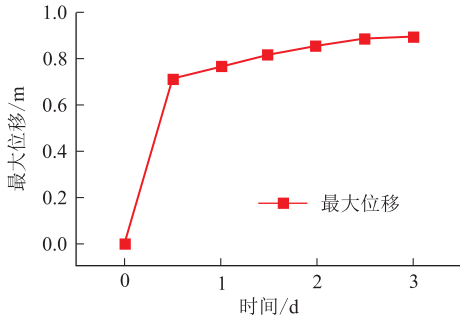


图 9 监测点 A 处最大位移变化情况

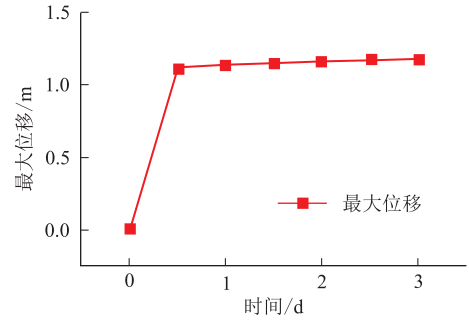
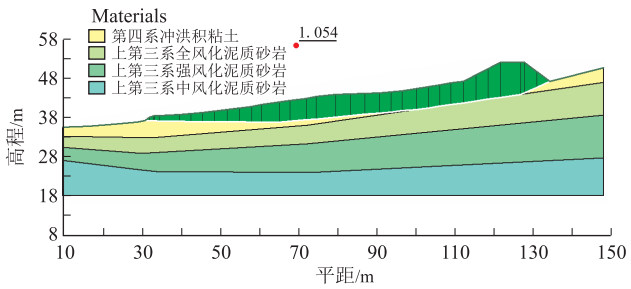
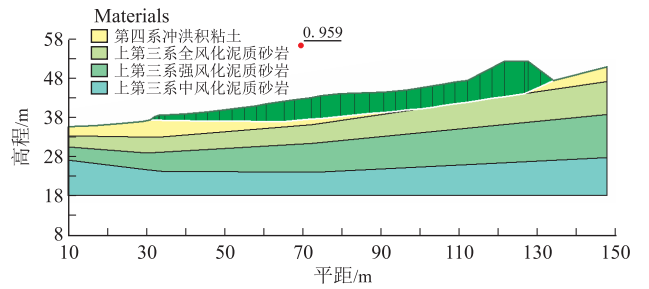


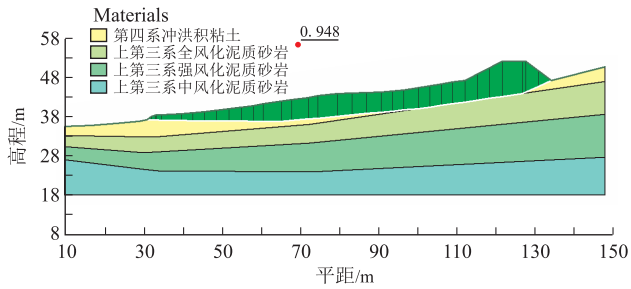
图 10 监测点 B 处最大位移变化情况



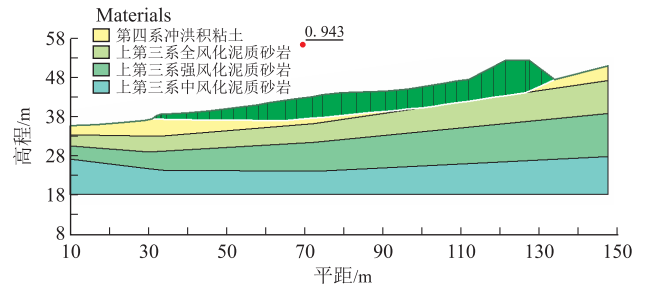
(a) 降雨前滑坡稳定性系数分布图



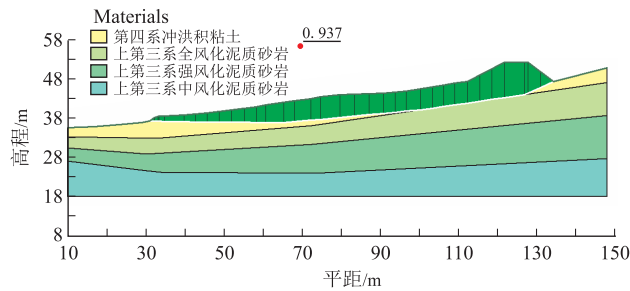
(b) 降雨 12 h 后滑坡稳定性系数分布图



(c) 降雨 24 h 后滑坡稳定性系数分布图



(d) 降雨 48 h 后滑坡稳定性系数分布图



(e) 降雨 72 h 后滑坡稳定性系数分布图

图 11 降雨过程中滑坡稳定性系数变化云图

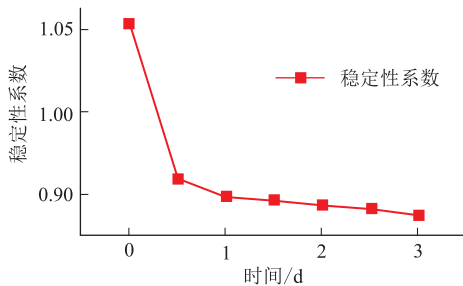


图 12 降雨过程中滑坡稳定性系数变化趋势图

堆积体坡度较大,临空条件相较表层其他区域更好,

因此在此处产生了最大的滑动位移,除人工便道堆积体产生了最大位移外,滑坡表层在降雨 72 h 后整体位移也超过了 0.4 m,此时滑坡已产生了较大滑动,处于不稳定状态。根据图 9 和图 10 可知,监测点处位移同样在 12 h 后迅速增大,分别达到 0.72 m 和 1.12 m,之后位移增速迅速减小,并逐渐趋于稳定。

(2) 降雨过程中,滑坡稳定性变化如图 11。

通过对图 11 与图 12 分析可知,滑坡稳定性在强降雨发生后的 12 h 迅速由降雨前的 1.054 下降

至 0.959,此时滑坡已处于不稳定状态。随后稳定性系数随着降雨时间的增加变化很小,在 24 h 后下降至 0.943,而在 72 h 后下降至 0.937,逐渐趋于稳定。

4 结论

本文以百昆成品油管道建水站 MJ053 滑坡为分析对象,在进行滑坡野外调查和室内外试验工作的基础上下,结合非饱和土的渗流理论,应用数值模拟方法对降雨作用下的浅表土质滑坡形成机理和稳定性进行研究。主要结论如下:

(1) 强降雨对滑坡的稳定性影响非常明显。在强降雨条件下,滑坡各项参数在 12 h 后便已迅速产生较大变化,滑坡由降雨前的基本稳定状态转化为不稳定状态。根据模拟结果可以推断,雨水通过入渗作用,降低了滑坡表层土体的基质吸力,破坏了滑坡内部的土体结构并降低了土体的抗剪强度,导致滑体位移开始增加,内部变形逐渐变大,进而导致滑坡失稳。

(2) 滑坡在日降雨量为 150 mm 的强降雨作用下,表层土体基质吸力基本丧失、孔隙水压力增大并趋于饱和。滑坡在不同时刻的最大位移量均发生在人工便道堆积体和滑坡前缘处,分别为 0.344 和

1.202 m,同时滑坡的稳定性系数也由降雨前的 1.054 下降至 0.937,滑坡必须进行治理。

参考文献

- [1] 陈腾辉,阿发友,黑明昌,等. 输油管道纵向穿越滑坡的成灾机理研究[J]. 地质灾害与环境保护,2022,33(1):57-62.
- [2] 朱朝军. 川气东送管道工程白杨坪地段滑坡的治理[J]. 油气田地面工程,2010,29(7):4-5.
- [3] 张佳璐. 兰成渝输油管道剑阁段滑坡稳定性及治理监测研究[D]. 西南石油大学,2017.
- [4] 席莎. 滑坡区埋地管道变形破坏的临界判据与敏感区段研究[D]. 中国地质大学(北京),2018.
- [5] 文海家,张岩岩,付红梅,等. 降雨型滑坡失稳机理及稳定性评价方法研究进展[J]. 中国公路学报,2018,31(2):15-29+96.
- [6] 武博强,张葆永,冯军强,等. 降雨入渗对碎石土高路堤边坡稳定性的影响研究[J]. 地质灾害与环境保护,2022,33(1):63-70.
- [7] 杨潇,梅红专. 湖北崇阳县大药菇山区降雨型滑坡成因机理分析[J]. 资源环境与工程,2021,35(4):500-504+520.
- [8] 刘顺青,蔡宇宸,程涛,等. 降雨入渗条件下下蜀土边坡稳定性分析[J]. 地质灾害与环境保护,2022,33(2):32-37.
- [9] 张明,胡瑞林,谭儒蛟,等. 降雨型滑坡研究的发展现状与展望[J]. 工程勘察,2009,37(3):11-17.
- [10] 李力. 基于 Geo-studio 的土质滑坡降雨入渗模拟及稳定性分析[J]. 华北自然资源,2021,(2):100-101.
- [11] 张碧燕,刘扬. 某边坡基于 Geo-Studio 软件的稳定性分析及加固措施设计[J]. 安徽建筑,2022,29(6):104-106.

作者简介: 刘强(1990—),男,广东阳春人,工程师,主要从事油气管道外管道管理的相关工作。E-mail:liuqiang@pipechina.com.cn

通讯作者: 阿发友(1979—),男,云南人,副教授,主要从事地质灾害防治的教学和研究工作。E-mail:afayou@163.com