

文章编号: 1006-4362(2024)02-0036-06

某高速公路边坡监测及稳定性模拟分析

郑家毓¹, 李帆², 何耀夫³

(1. 广东省南粤交通龙连高速公路管理处, 广州 510660; 2. 闽南理工学院, 泉州 362700;
3. 广东省南粤交通新博高速公路管理处, 广州 510660)

摘要: 以某高速公路K303+460~K303+590段滑坡病害为对象, 结合现场调查及深层水平位移监测分析其产生的主要因素, 采用Midas GTS NX有限元软件数值模拟降雨入渗作用下该边坡的稳定性。结果表明: 该路段山体滑坡是地层岩性、地质构造、超强降水以及修建高速时路堑开挖综合作用的结果; 模拟显示, 连续3d强降雨作用下, 边坡的安全系数逐渐减小, 从自然状态下的1.289降至1.159, 连续降雨3d后安全系数下降10.1%, 且滑裂带逐渐向坡底扩展。

关键词: 边坡; 监测; 稳定性; 安全系数; 数值模拟; 降雨入渗

中图分类号: U416.1⁺4 **文献标识码:** A

MONITORING AND STABILITY SIMULATION ANALYSIS OF A CERTAIN EXPRESSWAY SLOPE

ZHENG Jia-yu¹, LI Fan², HE Yao-fu³

(1. Guangdong Nanyue Transportation Investment and Construction Co., LTD. Longlian Highway Management Office, Guangzhou 510660, China; 2. Minnan University of Science and Technology, Quanzhou 362700, China;
3. Guangdong Nanyue Traffic Investment Construction Co., LTD. Xinbo Highway Management Office, Guangzhou 510660, China)

Abstract: Taking the landslide disease of K303+460~K303+590 section of a expressway as the object, combined with on-site investigation and deep horizontal displacement monitoring, the main factors of the landslide were analyzed, and the Midas GTS NX finite element software was used to simulate the stability of the slope under rainfall infiltration. The results show that the landslide in this section is the result of the comprehensive effect of stratigraphic lithology, geological structure, super precipitation and cutting excavation during highway construction. The simulation shows that under the action of heavy rainfall for three consecutive days, the safety factor of the slope gradually decreases, from 1.289 in the natural state to 1.159, and the safety factor decreases by 10.1% after three consecutive days of rainfall, and the slip zone gradually expands to the bottom of the slope.

Key words: slope; monitor; stability; safety factor; numerical simulation; rainfall infiltration

近年来高速公路边坡滑坡事故频繁发生, 高速公路滑坡灾害造成的后果十分严重, 轻则阻断交通,

重则造成重大经济损失和人员伤亡, 国内外众多学者对此类地质灾害进行了较为深入的研究^[1-3]; 同

时,随着数值分析软件的发展,采用数值模拟手段对边坡稳定性进行研究也已十分成熟:Charles W. W. NG^[4]等基于香港某高边坡,采用颗粒流有限元软件模拟分析边坡在降雨入渗条件下,降雨强度、持续时间以及边坡初始状态对其稳定性的影响;罗从双^[5]以山岭区高速公路滑坡为例,模拟研究降雨渗透-应力耦合下滑坡形成机理和破坏过程;周玮^[6]以宜兴牛犊山边坡为研究对象,采用流固耦合数值模拟方法对强降雨条件下饱和-非饱和边坡稳定性进行分析;韩佳明^[7]等建立黄土边坡渗流场计算模型,基于非饱和土渗流控制方程,采用 VG 函数和 Gardner 函数分别描述土-水特征曲线和渗透系数曲线,利用行波约化和级数展开法推导降雨入渗解析解,利用数值反演法将模型试验数据对土-水参数拟合,证明了该解析解的有效性。

针对滑坡这种自然地质灾害的研究主要集中在降雨入渗^[8-10],但具有实际工程背景的滑坡灾害必然伴随着十分复杂的因素,本文采用现场监测和数值模拟的研究方法,研究某高速公路 K 303+460~K 303+590 段产生山体滑坡的主要因素,并分析降雨入渗对边坡稳定性的影响,为类似地质灾害防治提供参考。

1 工程概况

1.1 滑坡概况

该滑坡路段属丘陵地貌,地形起伏大,标高 310~510 m,山体高差达 200 m。丘陵自然坡角为 20°~30°。该边坡坡脚标高约 315 m,滑坡后缘标高约为 365 m,高差约 50 m,高速公路路线桥梁的 5#、6#、7# 位于该滑坡的坡脚处,滑坡失稳对高速的安全运行有一定的危害(图 1)。



图 1 边坡全貌及滑塌区域示意图

1.2 滑坡形态

通过滑坡两侧的裂缝以及前缘土体剪出隆起、后缘错落等一系列变形特征、微地貌对滑坡边界进行判定,圈定的平面形态详见图 2。

本滑坡平面形态总体呈鸭梨状,滑坡体纵向长约 110 m,前部宽 130 m。主滑方向为 170°,前缘高程约 315 m,后缘高程 365 m,相对高差 50 m,总体坡度角 20°~30°;圈定的滑坡体面积约 9 350 m²。滑坡中部坡面出现不连续平台错断,高差约为 0.8~3.0 m。后缘周界出现小规模的拉裂,滑坡中部见错落台阶,高差约为 0.5~3.0 m。

2 现场调查及监测分析

根据现场调查,该滑坡后缘周界出现小规模的拉裂,坡顶见拉裂缝,属于牵引式土体滑坡。该边坡表层土质疏松,孔隙多,受连续强降雨影响,土体含水量不断增大并趋于饱和,从而使土体自重加大,同时抗剪强度下降,从而降低坡体稳定性,边坡失稳导致局部滑塌,滑塌体侵入路线桥梁桥墩一侧。

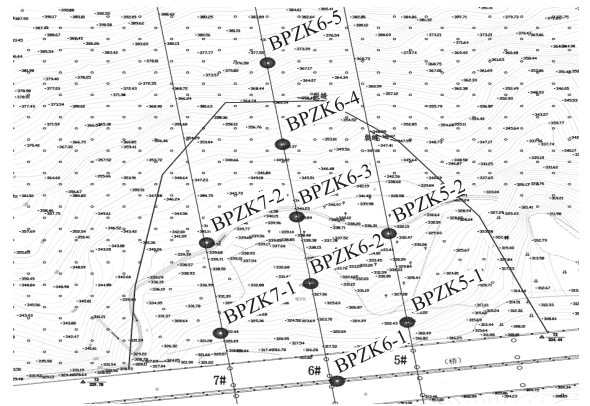


图 2 滑坡平面形态及监测点布置图

测斜孔布设要穿过滑面或推测滑面,底部进入稳定岩层不少于 5 m,根据现场实际情况沿垂直路线方向间距 30 m,布置了 3 条断面,分别对应着路线桥梁 5#、6#、7# 墩。共计布设 7 个测斜孔,对该段自然山坡进行深层水平位移监测,孔位及点号如图 2 所示(●为监测点)。监测位移曲线详见图 3~图 9,监测数据如表 1 所示。从监测数据可知,最大临空向累计深层水平位移量大多发生在表层土层,可见边坡粉质黏土层发生滑移且滑移趋势较大。

表 1 深层水平位移监测成果分析汇总表

孔号	临空向位移最大 增长量/mm (对应深度/m)	临空向累计最大 位移量/mm (对应深度/m)
BPZK5-1	-3.854(1.5)	1.5(0.5)
BPZK6-1	-3.075(2.5)	2.5(8.0)
BPZK6-2	-1.549(10.5)	10.5(0.5)
BPZK6-3	1.908(14.0)	14.0(0.5)
BPZK6-4	1.487(0.5)	0.5(1.0)
BPZK6-5	-1.573(7.0)	7.0(29.0)
BPZK7-1	1.469(4.5)	4.5(0.5)

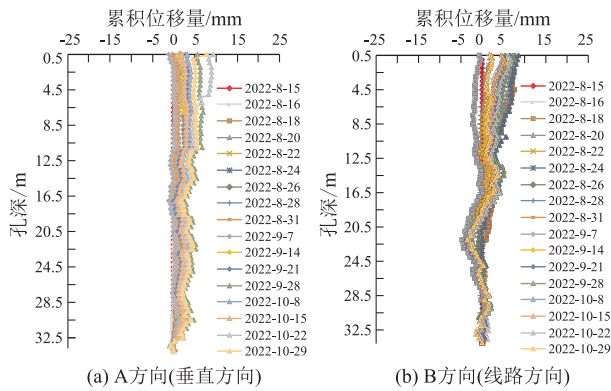


图3 BPZK5-1 测斜孔深层水平位移曲线图

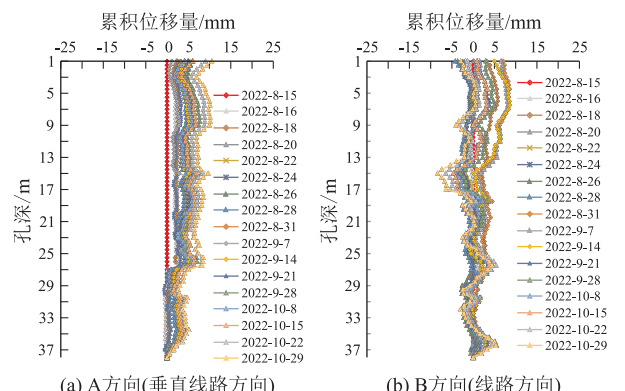


图7 BPZK6-4 测斜孔深层水平位移曲线图

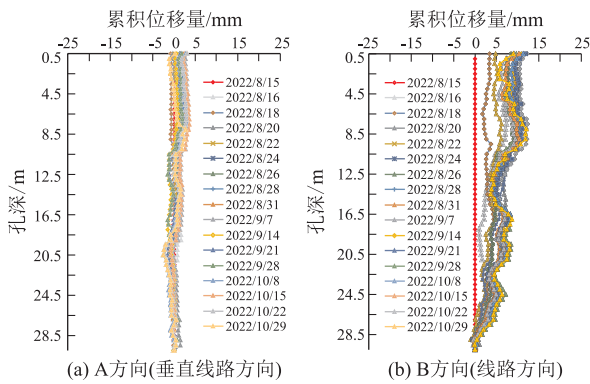


图4 BPZK6-1 测斜孔深层水平位移曲线图

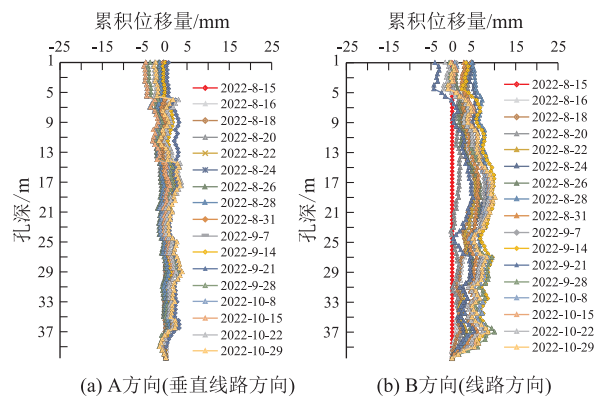


图8 BPZK6-5 测斜孔深层水平位移曲线图

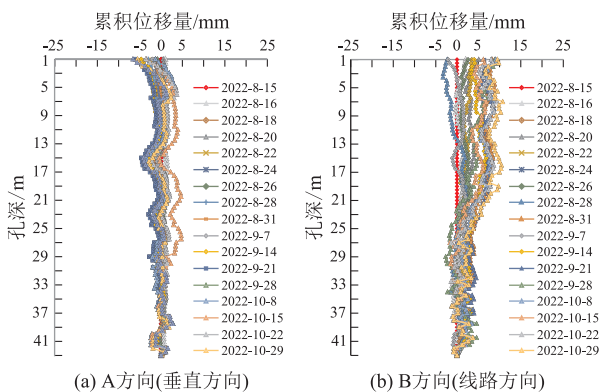


图5 BPZK6-2 测斜孔深层水平位移曲线图

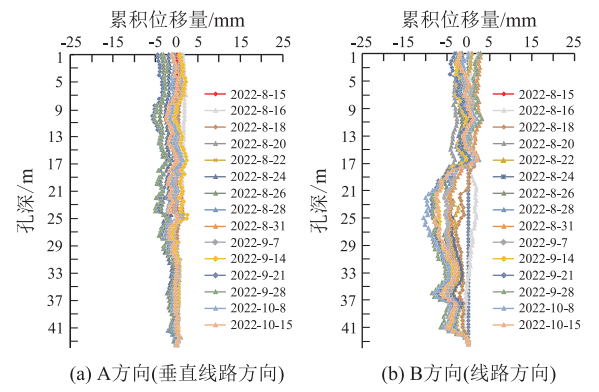


图9 BPZK7-1 测斜孔深层水平位移曲线图

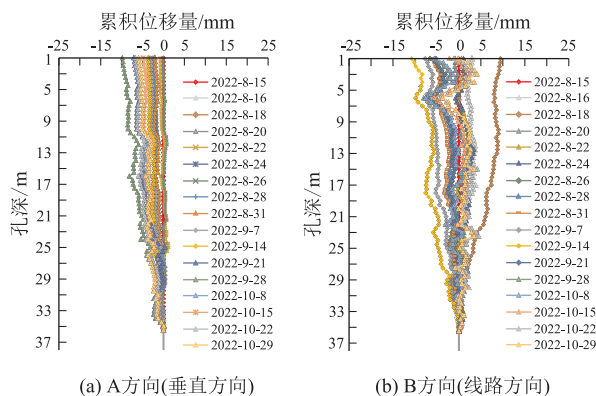


图6 BPZK6-3 测斜孔深层水平位移曲线图

3 数值模拟分析

3.1 计算模型

根据滑坡的现场情况及监测数据,选取主滑断面进行数值模拟,为研究该路段边坡在自然状态和降雨 3 d 状态下的安全系数、位移场、应变场,分析降雨入渗对边坡的影响,采用 Midas GTS NX 有限元软件对该路段边坡进行模拟,二维边坡模型共划分 5 788 个单元、5 927 个节点,模型左侧高 136 m,右侧高 15 m,底部宽 355 m,降雨及渗流边界设置在坡顶面,初始水位线根据勘察报告钻孔揭露确定,

位移边界采用自动约束,静力荷载只考虑土体自重,边坡二维模型如图 10 所示。

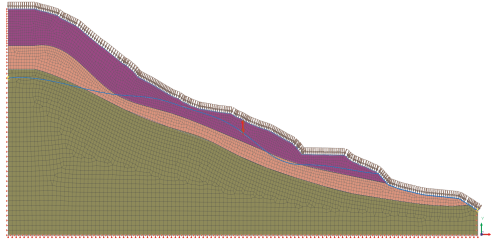


图 10 边坡二维有限元模型

3.2 参数确定

根据勘察钻孔揭露,该边坡从上至下主要为粉质黏土、全风化泥质粉砂岩和强风化泥质粉砂岩,根据本工程现场勘察报告,边坡岩土体物理力学参数如表 2 所示。岩土体的渗透性函数和土水特征曲线采用 Van Genuchten 函数模拟。依据中国气象局对降雨强度所划分的标准,采用特大暴雨强度等级

进行模拟,考虑 300 mm/d 的降雨强度持续 3 d 的条件下对边坡的影响,从而模拟边坡在当地最不利降雨条件下的稳定性。

表 2 自然状态下边坡岩土体物理力学参数表

岩土层	弹性模量 /MPa	泊松比	饱和容重 /kN·m ⁻³	内摩擦角 /°	黏聚力 /kPa	渗透系数 /m·d ⁻¹
粉质黏土	16	0.30	20.0	30	35	0.041
全风化泥质粉砂岩	120	0.30	23.0	40	60	0.763
强风化泥质粉砂岩	400	0.25	27.3	50	80	1.944

3.3 孔隙水压力分布

图 11 为连续降雨 3 d 条件下边坡的孔隙水压力等值线云图,从图中可知,随着降雨时间的增加,孔隙水压力逐渐增大,在经过长时间强降雨的作用下,边坡受到的冲刷作用较大,且孔隙水压力也较大,边坡稳定性较差。

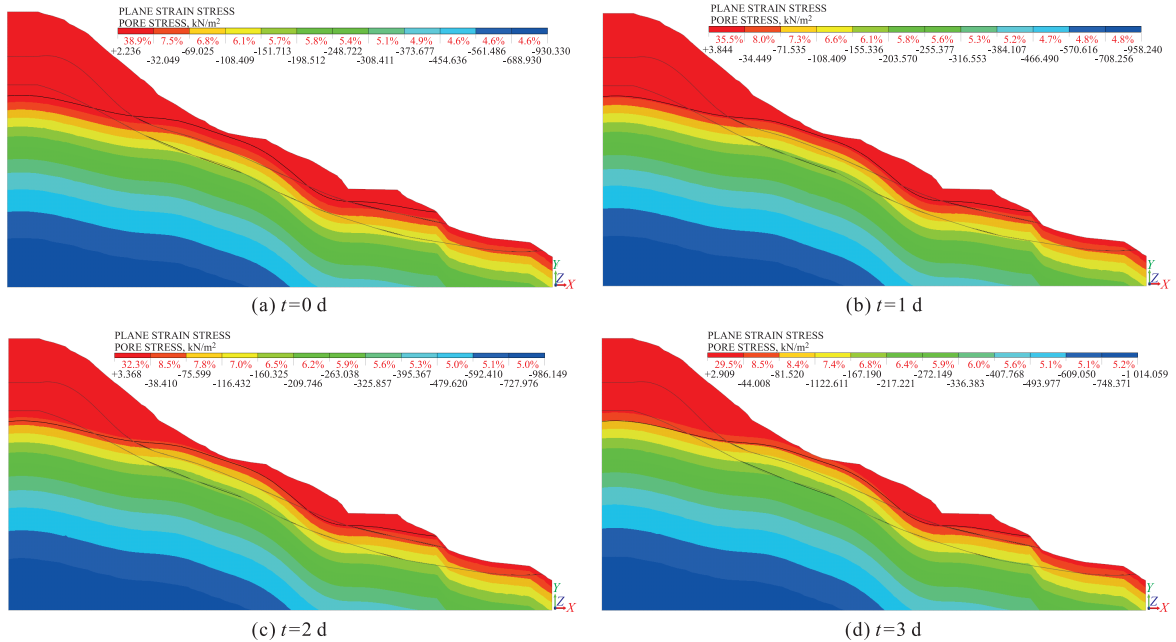


图 11 边坡孔隙水压力等值线云图

3.4 塑性区分布

潜在滑裂带如图 12 所示,可以看到由于粉质黏土强度较低,滑裂带主要在粉质黏土层,随着降雨时间增加,滑裂带逐渐向坡底扩展,可见降雨作用降低了边坡的稳定性,边坡发生滑坡危害的风险增大。

3.5 安全系数分析

边坡经历 3 d 连续降雨下的安全系数如图 13 所示,从图中可知,随着降雨时间的增加,边坡的安全系数逐渐减小,自然状态下的安全系数为 1.289,

降雨 3 d 后安全系数下降 10.1%,为 1.159,可见,在连续强降雨作用下,边坡稳定性受到的影响较大。

4 滑坡成因分析

(1) 地层岩性

坡体的上部岩层主要为第四系松散堆积物,包括坡洪积粉质粘土、残积粉质粘土以及碎石等,渗水性较好;下部为泥盆系泥质粉砂岩、粉砂岩、灰岩等强风化岩,风化强烈且风化不均,在水的作用下粉砂

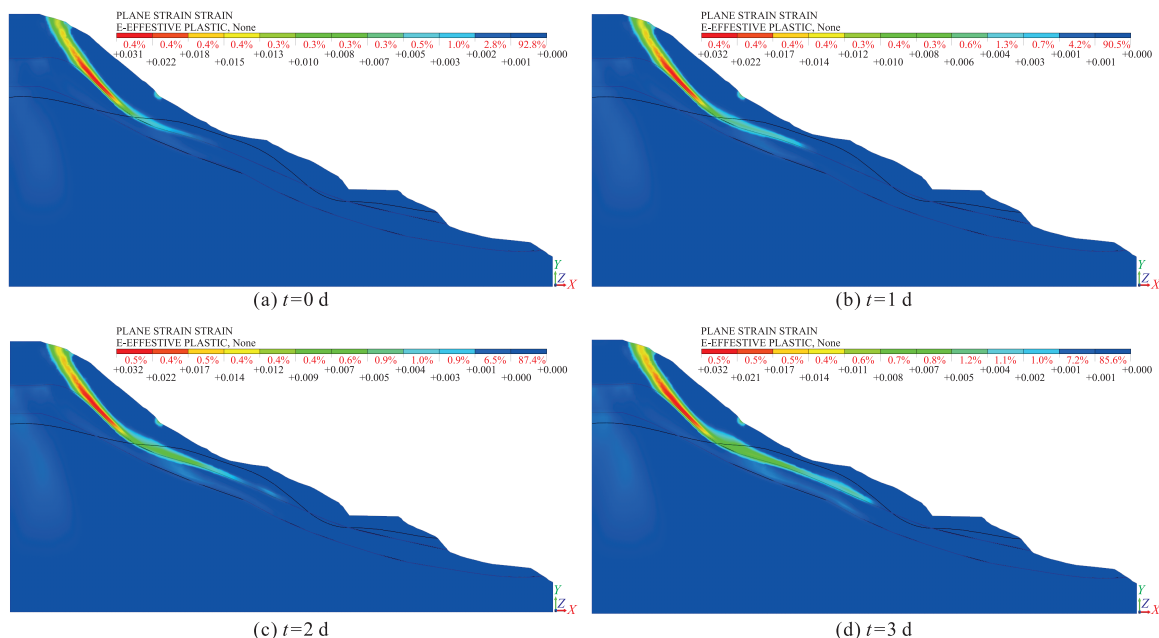


图 12 边坡塑性区云图

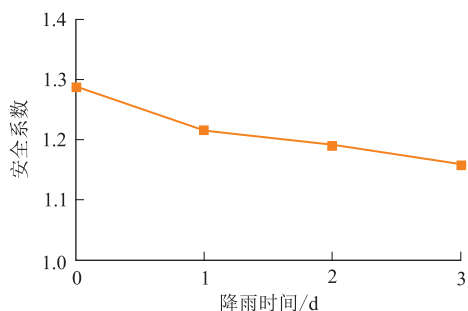


图 13 边坡稳定系数

岩风化土易软化,强度极低,透水性较差。坡残积粉质粘土遇水抗剪强度大大降低,容易产生滑坡。

(2) 地质构造

滑坡体范围位于构造断裂带内,局部钻孔揭露断裂痕迹,降水容易通过构造破碎带下渗,使得岩土体抗剪强度降低,对坡体的稳定性不利,且本边坡的岩层倾向与坡体一致,为顺层滑坡,易导致山体滑坡。

(3) 雨水的作用

由于滑坡所处位置在地形较为陡峭的山谷地段,在特大暴雨的作用下,雨水的渗透作用导致残积层及全风化层含水率较高,同时滑床主要为全强风化粉砂岩,其界面属滞水面,长时间的强降雨致使滑裂带土体发生软化,大幅降低了层间结合力,且其抗剪强度也大幅下降。

(4) 人类工程活动

由于在坡脚处修建高速时的开挖施工,新形成

的临空面使原有平衡稳定的边坡遭到破坏,给滑坡发生滑移提供了剪出空间。

5 结论

该路段山体滑坡的产生原因主要有以下几个方面:

- (1) 地层岩性。构成坡体的上部岩层为第四系松散层,透水性较好,在降雨的作用下其抗剪强度大幅降低。
- (2) 地质构造。地表水、雨水沿构造破碎带下渗,降低岩层抗剪强度,且本边坡的岩层倾向与坡体一致。
- (3) 雨水作用。连续强降雨时雨水下渗致使滑裂带土体发生软化,大幅降低了岩土体层间结合力,且岩土体的抗剪强度也大幅减小。同时经模拟发现,在 3 d 连续强降雨的作用下,边坡的安全系数逐渐减小,从自然状态下 1.289 降低到 1.159,连续降雨 3 d 后安全系数下降 10.1%,且滑裂带逐渐向坡底扩展。
- (4) 路堑开挖。坡脚处修建高速时的开挖施工,新形成的临空面使原有平衡稳定的边坡遭到破坏,给滑坡发生滑移提供了剪出空间。

参考文献

[1] 黄润秋. 20 世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 433-454.

- [2] Fang Weihua, You Rongqiang, Hou, et al. Slope stability analysis under rainfall infiltration condition using the minimum potential energy method[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2023, 23(2): 117-121.
- [3] Gengqian N, Zhonghui C, Lingfei Z, et al. Three-dimensional stability analysis of unsaturated slopes under variable rainfall conditions using a numerical method [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2023, 82(2): 199-203.
- [4] Hu X, Zhao Z, Ni X. Influence of stress state on soil-water characteristic curve[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2013, 41(2): 150-155.
- [5] 罗从双. 某高速公路滑坡的成因分析及数值模拟[J]. 中外公路, 2014, 34(03): 6-9.
- [6] 周玮, 闵望, 喻永祥, 等. 宜兴牛牯山某高边坡降雨条件下饱和-非饱和边坡稳定性分析[J]. 工程勘察, 2023, 51(1): 7-12.
- [7] 韩佳明, 董照, 苏三庆, 等. 均质非饱和边坡降雨入渗解析解及在黄土边坡的应用[J]. 岩土力学, 2023, 44(1): 241-250.
- [8] 蒋中明, 熊小虎, 曾铃. 基于 FLAC~(3D)平台的边坡非饱和降雨入渗分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(3): 855-861.
- [9] 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.
- [10] 许四法, 姜伙军, 孙昌一, 等. 降雨强度对双层软弱夹层边坡稳定性影响分析[J]. 浙江工业大学学报, 2022, 50(5): 492-497.

作者简介: 郑家毓(1995—), 男, 福建福州人, 主要从事高速公路养护管理相关工作。E-mail: jiaiyuzheng@163.com

《地质灾害与环境保护》征订启事

本刊主管单位:四川省教育厅;主办单位:成都理工大学、地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室。学术性期刊,季刊。1990年创刊,国内外公开发行。大16开,每期112页,约22万字。欢迎订阅。

定价: 2008~2024年每期定价15元,全年4期,年定价60元;2005~2007年每期定价10元,全年4期,年定价40元;1991~2004年过刊每套定价154元(包括:总第3期~总28,30~53期,计42册);也可分年分期选订:1991~1993年,半年刊,每册定价1.00元;1994~1997年,季刊,每册定价2.00元;1998~1999年,季刊,每册定价3.00元;2000~2001年,季刊,每册定价4.00元;2002~2004年,季刊,每册定价5.00元。

订阅办法

1. 2000年起开始邮发,邮发代号62-140,可在全国各地邮局订阅。
2. 本刊已参加“全国非邮发报刊联合征订”,代号5314号。
3. 向本刊编辑部订阅: 请用邮局汇款。收款单位:《地质灾害与环境保护》编辑部。
地址:成都市成华区二仙桥东三路1号 成都理工大学;邮政编码:610059。
编辑部联系电话:(028)84078481。

《地质灾害与环境保护》编辑部

2024年6月25日