

doi: 10.3969/j.issn.2095-1744.2020.12.017

降雨入渗及地震作用下边坡稳定性研究

张忠传^{1,2}, 何宇翔³, 杨 溢^{1,2}, 李明亮^{1,2}

(1. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 昆明 650093;

2. 云南中-德蓝色矿山与特殊地下空间利用重点实验室, 昆明 650093;

3. 大吉山钨业有限公司, 江西 赣州 341000)

摘 要:边坡滑坡给社会经济和人民生命安全带来了巨大威胁,降雨和地震是边坡滑坡的两大诱因。以云南省某矿山边坡作为研究对象,取样后在室内进行岩石力学实验,得到后期工作所需的岩石力学参数,利用霍克布朗准则推导出岩体的力学参数,运用理论计算和数值模拟分析降雨和地震对边坡稳定性影响。结果表明:1)在降雨入渗作用下,边坡出现滑坡主要是静水压力造成的;2)在地震作用下,当地震峰值加速度为0.1 g时,有效塑性区主要位于边坡中下部,增大地震峰值加速度,其范围向坡脚移动,当加速度为0.3 g时,塑性区出现贯通趋势。

关键词: Midas/GTS; 边坡; 降雨入渗; 地震

中图分类号: TD824.7

文献标志码: A

文章编号: 2095-1744(2020)12-0122-06

Study on Slope Stability under Rainfall Infiltration and Earthquake

ZHANG Zhongchuan^{1,2}, HE Yuxiang³, YANG Yi^{1,2}, LI Mingliang^{1,2}

(1. School of Land and Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology,
Kunming 650093, China;

2. Yunnan Key Laboratory of Sino-German Blue Mining and Utilization of Special Underground Space,
Kunming 650093, China;

3. Dajishan Tungsten Industry Company, Ganzhou 341000, China)

Abstract: Slope landslide has brought great threat to social economy and people's life safety. Rainfall and earthquake are the two main causes of slope landslide. Taking a slope project in Yunnan province as the research object, the rock mechanics parameters required for later work are obtained by rock mechanics experiment in laboratory after field sampling. The mechanical parameters of rock mass are deduced using Hoek-Brown criterion. The influence of rainfall and earthquake on slope stability is analyzed by theoretical calculation and numerical simulation. The results show that: 1) the slope slides under the action of rainfall infiltration is mainly caused by hydrostatic pressure; 2) under the earthquake action, when the seismic peak acceleration is 0.1 g, the effective plastic zone is mainly located in the middle and lower part of the slope. When the seismic peak acceleration is increased, the range moves to the foot of the slope, and when the acceleration is 0.3 g, the plastic zone tends to pass through.

Key words: Midas/GTS; slope; rainfall infiltration; earthquake

收稿日期: 2020-05-13

作者简介: 张忠传(1994—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为岩石力学等。

通信作者: 杨 溢(1965—), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事岩石力学和爆破工程方面研究。

引用格式: 张忠传, 何宇翔, 杨 溢, 等. 降雨入渗及地震作用下边坡稳定性研究[J]. 有色金属工程, 2020, 10(12): 122-127.

ZHANG Zhongchuan, HE Yuxiang, YANG Yi, et al. Study on Slope Stability under Rainfall Infiltration and Earthquake[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2020, 10(12): 122-127.

随着我国经济的大力发展,安全问题越来越得到重视,在交通、水利、矿山运行生产过程中,边坡的稳定性问题成为相关行业的重中之重,边坡滑坡的防治更是安全生产面临的重大问题。降雨和地震导致边坡滑坡垮塌的现象较为普遍,由于降雨和地震的作用,很可能衍生成边坡失稳的自然灾害,对人民生命和财产造成威胁。为解决这些问题,研究人员对降雨和地震对边坡的力学性质和变形破坏规律做出了大量研究。

天然条件下,边坡通常存在许多结构面,边坡后缘会形成张裂隙,部分会形成滑移面。降雨条件下,随着降雨入渗作用,张裂隙或结构面逐渐充满水,静水压力垂直作用于张裂隙或结构面,动水压力平行于两者。HOEK 等^[1]以传统水力学模型为基础,提出边坡结构的静水压力分布假设,舒继森等^[2]改进了边坡静水压力的分布假设。在地震作用对边坡的稳定性影响方面也取得了颇多成就,邓东平等^[3]在极限平衡的框架内分析地震对边坡的稳定性影响,结合直线、圆弧、任意曲线的三种滑动面,采用拟静力方法。为了克服拟静力法无法实现地震力随时间的变化和略去了地震力在边坡内部传播的缺点,饶平等^[4]采用拟动力法结合简化毕肖普法对已经进行顶部抗滑桩加固的边坡进行地震作用下的稳定性分析。乔文号等^[5]利用软件 Geo-studio 分析边坡在降雨、地震、降雨+地震等工况下的失稳破坏机制,得出降雨入渗对边坡岩土体强度软化是边坡失稳的主要诱因。陈行等^[6]基于弧形结构的抗压能力,采用弧形抗滑桩对边坡进行加固,并研究在地震的作用下边坡的动力响应和稳定性。

基于此,作者以云南某露天采场西帮边坡为研究对象,通过现场勘查、采样,进行室内力学试验,利用霍克布朗将岩石的物理力学参数转化为岩体的,结合矿山情况,引入舒继森等^[2]提出的结构面水压力分布假设分析不同降雨强度作用下对边坡后缘含张裂隙的稳定性影响,并利用有限元软件分析不同地震峰值加速度作用下边坡有效塑性区的变化过程。

1 霍克布朗破坏准则基本原理

霍克布朗破坏准则是在岩石力学领域得到广大学者认可的强度理论,是 HOEK 和 BROWN 经过大量实验得出的岩石和岩体在破坏时主应力之间的函数关系。表达式如下:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m\sigma_3 + \sigma_c^2} \quad (1)$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right) \quad (2)$$

$$m = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right) \quad (3)$$

式中: σ_1 为最大主应力,MPa; σ_3 为最小主应力,MPa; σ_c 为岩石单轴抗压强度,MPa; m 和 s 为与岩石类型和结构面有关参数; m_i 为岩体材料参数,可根据岩体类型查表或做静力学实验得出; GSI 为地质强度指数,通过岩体质量分级评分值 RMR 查表得出; D 为岩体爆破扰动参数,数值介于 0 和 1,无扰动取 0,本文取 0.3。

2 水力作用下边坡稳定性分析模型

本文采用舒继森等^[2]提出的边坡水力学模型来计算边坡在水力作用下的稳定性系数,如图 1 所示, A 点为滑动面在坡面出露点; B 点为张裂隙与滑动面交点; C 点为张裂隙坡顶出露点; D 点为 $1/2H_w$ 在滑动面或张裂隙上的出露点(H_w 为滑动面底部算起的水位高度,m); α 为滑动面倾角, $^\circ$; H 为滑动面底部到坡顶高度,m; Z_w 张裂隙内水位高度,m; H_w 滑动面底部算起的水位高度,m; r_w 为水容重,N/m³。

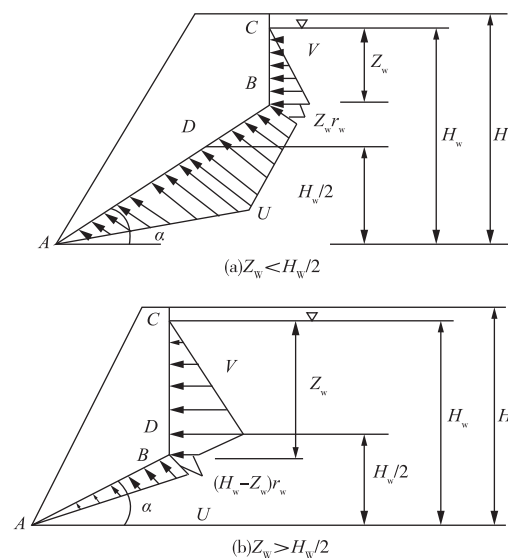


图 1 结构面水压力分布假设

Fig. 1 Assumption of water pressure distribution on structural plane

边坡稳定性系数的表达式:

$$F_s = \frac{cl + (W\cos\alpha - U - V\sin\alpha)\tan\varphi}{W\sin\alpha + V\cos\alpha + T} \quad (4)$$

式中: c 为各层岩土体的粘聚力,kPa; l 为结构面长度,m; α 为滑动面倾角, $^\circ$; W 为滑体重力,N; φ 为各岩土体内摩擦角, $^\circ$; U 和 T 分别为结构面上的静水压力和动水压力,kPa; V 为张裂隙上的静水压力,kPa。

3 工程概括

研究矿山为深凹露天矿,最高台阶高度 1 920 m,采场底部标高 1 540 m,最大采深 380 m。采矿由上及下进行剥采,推进方向垂直矿体走向,目前同时工作的台阶 67 个。矿区为亚热带高原季风气候,平均降雨量为 1 056.20 mm。位于易发地震带边缘,根据规范得知矿区地震烈度Ⅷ度,加速度 0.2 g,该区域矿区属于不稳定区域。图 2 为露天采场全貌照片,图 3 为边坡安全隐患区域现场调查照片。



图 2 露天采场全貌
Fig. 2 Overview of open pit slope

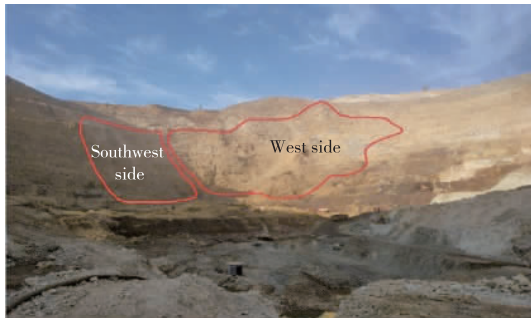


图 3 边坡安全隐患区域现场调查图
Fig. 3 Site survey of slope safety hazard area

4 现场取样以及室内静力学试验

以采场西帮区域的岩体作为研究对象,西帮区域主要岩体有角砾岩、黏土层、灰岩以及斑岩。取样对象为灰岩、斑岩以及角砾岩。

根据岩石力学实验要求,将岩样进行切割、打磨。制成 50 mm×100 mm 的标准试件。单轴压缩实验采用 600 kN 的电液压式试验机,对轴向位移进行控制,在岩石试样的两侧贴上应变片,实验数据会通过应变片自动保存到电脑里。计算机导出应力-应变曲线,根据曲线得出岩样的弹性模量和泊松比,数据如表 1 所示。

表 1 岩石试件弹性模量与泊松比

Table 1 Rock specimen elastic modulus and poisson's ratio		
Sample	Modulus of elasticity E/MPa	Poisson's ratio μ
Breccia	5.14×10^4	0.31
Porphyry	1.50×10^4	0.24
Limestone	2.55×10^4	0.27

岩体的抗拉强度采用岩体抗压强度的 1/10 表示^[7],参考相关文献[8]可得出三种岩性的抗拉、抗压强度参数,如表 2 所示。利用岩石试样进行单轴抗压强度试验得到各岩石的抗压强度参数,然后根据不同的试样类型查表得出各岩体的岩体力学参数 m_i ,利用霍克布朗强度准则计算出参数 m 、 s ,最后推导出岩体的抗压和抗拉强度。通过岩体变形模量确定方法计算出各种岩体的剪切强度及内摩擦角,通过类似矿山的岩体性质类比得渗透系数,岩体力学参数见表 3。

表 2 三种岩性的抗拉、抗压强度参数

Table 2 Three lithologic tensile and compressive strength parameters						
Sample	m_i	m	s	Compressive strength of rock/MPa	Compressive strength of rock mass/MPa	Tensile strength of rock mass/MPa
Porphyry	23.0	0.98	0.000 10	106.48	1.06	0.106
Breccia	22.5	0.72	0.000 04	58.6	0.37	0.037
Limestone	13.0	0.45	0.000 05	28.3	0.20	0.020

表 3 岩体力学参数表

Table 3 Rock mass mechanics parameter table							
Rock mass	Bulk density/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	Compressive strength/ MPa	Cohesion/ MPa	Internal friction angle/($^\circ$)	Bulk modulus/ MPa	Shear modulus/ MPa	Permeability coefficient/ ($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$)
Breccia	26.07	0.37	0.29	40.6	1.24×10^3	2.86×10^3	0.004 0
Limestone	26.56	0.20	0.11	34.6	0.37×10^3	0.69×10^3	0.284 3
Clay layer	20.97	0.10	0.05	30.0	0.19×10^3	0.2×10^3	0.237 0
Porphyry	23.72	1.06	0.61	43.3	1.32×10^3	2.09×10^3	0.088 9

5 降雨入渗情况下的边坡破坏机理

地下水位线随着降雨入渗的持续而升高,土体饱和度增大使得基质吸力下降,边坡岩体的抗剪能力伴随着非饱和土的基质吸力下降而降低,可能造成边坡失稳。岩体一直处于非饱和状态,当降雨入渗时,边坡内气体逐渐被雨水挤压排出,土体逐渐饱和而进入饱和渗流。

5.1 水力作用对边坡稳定性的影响

根据水文地质资料,分别选取中雨 25 mm/d、大雨 50 mm/d、暴雨 80 mm/d、大暴雨 120 mm/d 的雨量为降雨入渗对边坡稳定性的研究工况。边坡后缘裂隙水位高度随着降雨入渗的增大而升高。

张裂隙充水高度:

$$h_w = \frac{Q_0 k}{e} \sin \alpha = \frac{16.67 \Psi q A k}{e} \sin \alpha \quad (5)$$

式中: k 为渗透系数, m/d ; Q_0 为张裂隙降雨入渗量 ($Q_0 = 16.67 \Psi q A$, 其中 Ψ 为径流系数; q 为降雨强度, mm/d ; A 为汇水面积, m^2), m^2/d ; e 为自然常数 2.718; α 为滑动面倾角, $(^\circ)$ 。

以矿山边坡为研究对象,将以下四种情况下的相关参数代入式 4 得出相对应的稳定性系数 F_s 。

- 1) 自然条件下 F_{s1} ;
- 2) 只考虑静水压力条件下 F_{s2} ;
- 3) 只考虑动水压力条件下 F_{s3} ;
- 4) 同时考虑静水压力、动水压力的影响 F_{s4} 。

计算结果如表 4 所示(q 为降雨强度, h_w 为张裂隙充水高度)。

表 4 不同条件下边坡稳定性系数与水位高度的关系

Table 4 Relationship between slope stability coefficient and water level under different conditions

q/mm	h_w/m	F_{s1}	F_{s2}	F_{s3}	F_{s4}
0	0	1.325	1.325	1.325	1.325
25	12.63	1.325	1.312	1.324	1.310
50	63.13	1.325	1.215	1.315	1.202
80	101.08	1.325	1.132	1.305	1.106
120	151.63	1.325	1.066	1.290	1.031

由图 4 可知,随着后张裂隙充水高度的增大,边坡稳定性减小。动水压力对边坡的稳定性影响较小,且稳定性系数随着张裂隙充水高度的增加无明显变化。静水压力对边坡稳定性影响较大,且随着边坡后张裂隙充水高度的加深稳定性剧烈下降。因此,可以得知静水压力相较于动水压力,对边坡稳定性的影响更为显著,为了使研究更加方便,有时可忽略动水压力。

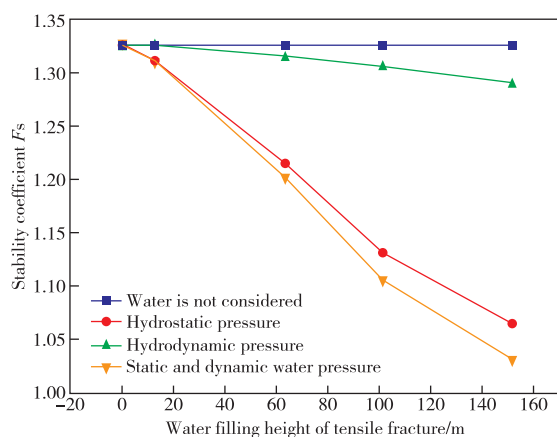


图 4 裂隙深度与边坡稳定性系数关系图

Fig. 4 Relationship between fracture depth and slope stability coefficient

6 地震作用下的边坡失稳机制

地震作用下边坡失稳是滑体上部受拉及底部受剪的复合破坏,即在地震惯性力的作用下,边坡下滑力增大以及底部形成塑性区,导致抗滑力降低。

目前判定边坡失稳的依据主要有以下三种:

- 1) 位移突变判据:滑体上部监测点相对于边坡不滑动部分有位移突变或者监测点的位移时程曲线不收敛。
 - 2) 滑动面贯通判据:边坡出现由坡面到顶部的塑形贯通区。
 - 3) 计算不收敛:有限次非线性迭代方程出现不平衡力不能收敛的情况。
- 限于篇幅影响,本文重点研究在不同地震峰值加速度作用下边坡塑性区的发展规律,故采用滑动面贯通判据。

6.1 地震工况的设计

在地震对边坡的稳定性研究中,本文采用数值模拟软件 Midas/GTS 输入真实地震波,其水平方向时程加速度波形如图 5 所示,选取模型仅受自重作用、受自重和地震峰值加速度分别为 0.1g、0.2g 和 0.3g 的四种工况进行模拟。

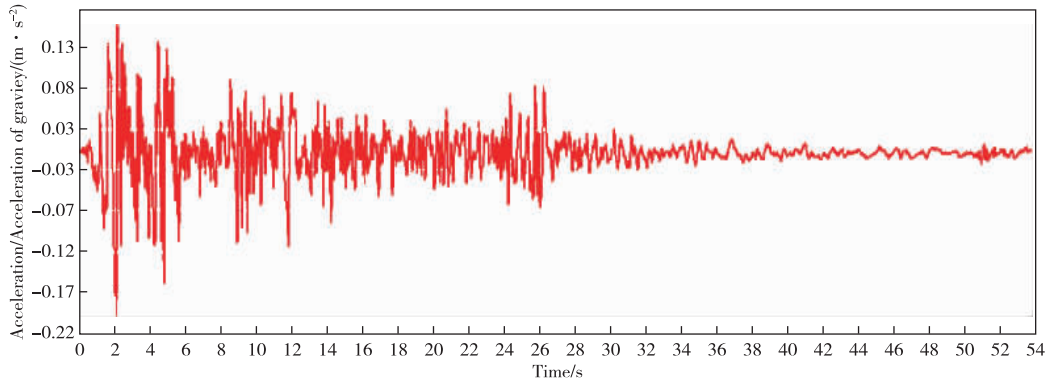


图5 时程波形图

Fig. 5 Time history waveform

6.2 有效塑性区分析

使用有限元软件 Midas/GTS 分析边坡稳定性时,采用了滑动面贯通判据,虽然无法定量的判断边坡稳定程度,且塑性区贯通往往不意味着边坡立即失稳(该判据偏保守),但是可以通过塑性区发展趋势来判断边坡稳定程度。图 6~9 为软件模拟结果。当地震峰值加速度为 0.1g 时,有效塑性区主要分布在边坡中上部,随着峰值加速度的增大,塑性区向坡脚发展,屈服面积越来越大,当到达 0.3g 时,屈服面积最大,可以看出边坡越来越不稳定,塑性区出现贯通趋势。

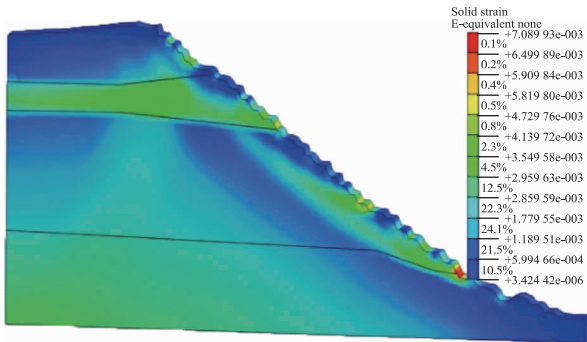


图6 自重状态下有效塑性云图

Fig. 6 Effective plastic nephogram under self weight

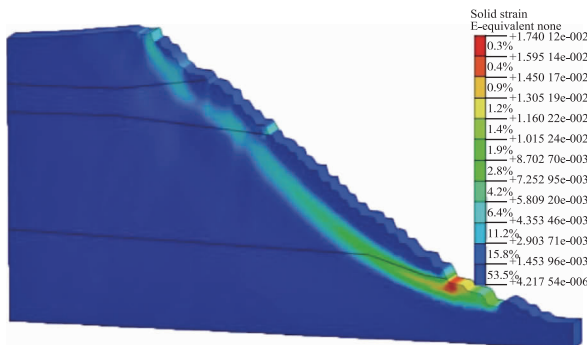


图7 地震峰值加速度 0.1g 时有效塑性云图

Fig. 7 Effective plastic nephogram with seismic peak acceleration of 0.1g

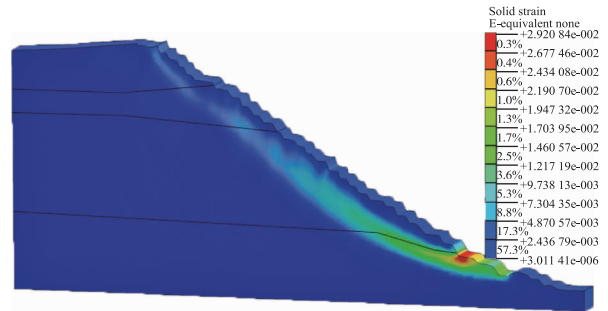


图8 地震峰值加速度 0.2g 时有效塑性云图

Fig. 8 Effective plastic nephogram with seismic peak acceleration of 0.2g

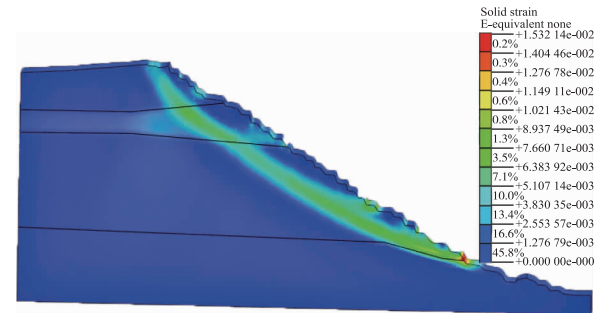


图9 地震峰值加速度 0.3g 时有效塑性云图

Fig. 9 Effective plastic nephogram with seismic peak acceleration of 0.3g

7 结论

1) 可以利用霍克布朗破坏准则将岩石的物理力学参数转化为岩体的。

2) 介绍了边坡结构面水力分布假设,并利用不同的降雨强度计算出边坡后缘裂隙的充水高度,然后计算得出在水力作用下,影响边坡稳定的主要是静水压力。同时用数值模拟软件对地震作用下的边坡稳定性进行分析。

参考文献:

[1] HOEK E, BRAY J W. Rock slope engineering[M].

- London; Revised Second Edition, 1977; 12-14.
- [2] 舒继森, 唐震, 才庆祥. 水力学作用下顺层岩质边坡稳定性研究[J]. 中国矿业大学学报, 2012, 41(4): 521-525.
- SHU Jisen, TANG Zhen, CAI Qingxiang. Study on stability of bedding rock slope under hydraulic action[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2012, 41(4): 521-525.
- [3] 邓东平, 李亮, 赵炼恒. 地震作用下边坡稳定性分析的拟静力法研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(10): 3578-3588.
- DENG Dongping, LI Liang, ZHAO Lianheng. Quasi static method for slope stability analysis under earthquake[J]. Journal of Central South University (Natural Science Edition), 2014, 45(10): 3578-3588.
- [4] 饶平平, 童磊磊, 师昀巍. 基于拟动力法的抗滑桩加固边坡地震稳定性分析[J]. 世界地震工程, 2020, 36(1): 189-196.
- RAO Pingping, TONG Leilei, SHI Yunwei. Seismic stability analysis of slope reinforced by anti slide piles based on pseudo dynamic method [J]. World Earthquake Engineering, 2020, 36(1): 189-196.
- [5] 乔文号, 汤华, 尹小涛, 等. 降雨和地震耦合作用下老南瓜塘边坡稳定性分析[J]. 公路工程, 2020, 45(4): 53-60.
- QIAO Wenhao, TANG Hua, YIN Xiaotao, et al. Slope stability analysis of Laonanguatang under the coupling effect of rainfall and earthquake [J]. Highway Engineering, 2020, 45(4): 53-60.
- [6] 陈行, 陈文字, 宋兴海, 等. 地震作用下弧形抗滑桩加固边坡的动力响应及稳定性分析[J]. 安全与环境工程, 2020, 27(4): 79-86, 101.
- CHEN Xing, CHEN Wenyu, SONG Xinghai, et al. Dynamic response and stability analysis of slope reinforced by arc-shaped anti slide pile under earthquake[J]. Safety and Environmental Engineering, 2020, 27(4): 79-86, 101.
- [7] 李凌峰. 滇西铅锌矿软岩巷道变形及支护技术研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2017.
- LI Lingfeng. Study on deformation and support technology of soft rock roadway in western Yunnan lead zinc mine[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2017.
- [8] 何宇翔. 降雨入渗和地震作用下边坡稳定性研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2019.
- HE Yuxiang. Study on slope stability under rainfall infiltration and earthquake [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2019.