

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2016.02.11

基于 Geo-Studio 的离子型稀土矿边坡稳定性分析

邬长福^{1,2}, 姚贵佳¹, 陈 亮¹, 黄 亮¹, 涂志刚¹

(1. 江西理工大学, 江西 赣州 341000;

2. 江西省矿冶环境污染控制重点实验室, 江西 赣州 341000)

摘要: 原地溶浸采矿开采工艺越来越广泛运用于离子型稀土开采过程中,但在溶浸液长期渗入及化学作用下,岩体物理化学性质发生改变,使得边坡强度降低,造成边坡失稳。本文以赣南某稀土矿边坡为研究对象,运用室内模拟浸泡试验分析了该矿稀土土样的工程性质,采用数值模拟方法分析了边坡的稳定性,并给出了相关结论,为赣南离子型稀土开采过程中边坡治理工作提供参考依据。

关键词: 离子型稀土;浸矿渗流;数值分析;边坡稳定性

中图分类号: P642.22

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2016)02-0072-06

Slope stability analysis for a ionic rare earth mine in-situ leaching based on Geo-Studio

WU Changfu^{1,2}, YAO Guijia¹, CHEN Liang¹, HUANG Liang¹, TU Zhigang¹

(1. Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou, Jiangxi 341000, China; 2. Jiangxi Key Laboratory of Mining & Metallurgy Environmental Pollution Control, Ganzhou, Jiangxi 341000, China)

Abstract: The in-situ leaching mining technology is more and more widely used in the ionic rare earth mining process, but because of long-term infiltration into leaching solution and under the action of chemical, physical and chemical properties of rock mass change, make the decrease of strength of slope, slope instability. This paper, taking a mine of Jiangxi slope as the research object, indoor simulative immersion test is used to analysis engineering properties of the rare earth soil, the numerical simulation method to analyze the stability of the slope, And give the relevant conclusion, provide a reference basis for Ganzhou's ionic rare earth mining slope in the process of governance work.

Keywords: ion-absorbed rare earth; orebearing seepage; numerical analysis; stability analysis

赣南离子吸附型稀土矿床数量多,规模大,中、重、轻稀土配分齐全,素有“稀土王国”之称。这类矿床的成矿母岩以花岗岩为主,从加里东期至燕山期的花岗岩体风化壳中都有稀土矿的形成^[1],其中,燕山期的花岗岩分布最广,含矿风化壳所占比例最大。

赣南离子型稀土开采曾一度采用池浸、堆浸的采矿工艺,使当地的生态环境受到了严重破坏,原地溶浸采矿开采工艺的采用有效的缓解了这一矛盾,因为其

不用开挖山体,不破坏地表植被,同时具有开采工程量小,资源回收率高,成本低廉的等优点,使其成为当前整个稀土开采行业的主要开采方式^[2],但是由于溶浸液及降雨的长期渗入作用,使得边坡强度和稳定性降低,极易造成稀土矿滑坡,一方面损失了资源和溶浸液,另一方面还污染了环境。因此,对稀土矿边坡失稳破坏进行研究具有重大意义。

收稿日期: 2015-08-05; 修订日期: 2015-09-22

第一作者: 邬长福(1963-),男,江西鹰潭人,教授,研究方向为重大危险源辨识及评价、安全技术及安全管理和通风系统优化研究。

E-mail: wuchangfu501@163.com

1 稀土矿边坡工程概况

本次工程实例以赣南某稀土矿边坡为研究对象,该矿Ⅱ号矿体在该剖面上的路面高程为+203 m,坡顶高程为+233 m,高差 30 m,稀土边坡总体上依次为:上部是表土层,中部是全风化层,再往下是中风化层,最底部是基岩,边坡底为花岗岩,而矿体基本都赋存在全风化层中(图 1)。

2 土体采样及土体性质试验

由于矿体基本都赋存在全风化层中,溶浸液主要是与全风化层岩土发生反应,而使其相关物理力学性质改变,所以我们只对全风化层中土样进行浸矿溶浸试验,表土层、中风化层等层位土壤由于基本物理性质变化不大,采用实验测定及参考相关文献相结合的方法确定其物理性质。

根据矿山实际情况,在该研究区域内,采集适量的实验用全风化层稀土土壤,取土深度在地面 3 m 以下。浸矿溶液根据矿山实际情况,选用硫酸铵配置,浓度为 2%。实验中,将 5kg 稀土土壤放入到 5L 浓度为 2% 的硫酸铵水溶液中浸泡,在室内分别浸泡 3、6、9、12d 之后,将溶浸液倒出,常温下晾干之后,在实验室对其试验测定。实验测定的数据包括天然密度、天然含水率、渗透系数、粘聚力、内摩擦角等参数^[3-4](表 1、表 2)。

表 1 天然稀土岩土参数

Table 1 Geotechnical parameters of Natural rare earth			
土体类别	密度 ρ /($\text{G}\cdot\text{cm}^{-3}$)	粘聚力 C/kPa	内摩擦角 $\psi/(\text{^\circ})$
表土层	1.95	20.5	14.2
全风化层	1.72	10.1	29.5
中风化层	2.26	875	31.5
基岩	2.65	40000	51

表 2 浸矿后稀土岩土参数

Table 2 Geotechnical parameters of rare earths after leaching					
溶浸时间	密度 /(g/cm^3)	含水率 /(g/cm^3)	渗透系数 /(m/s)	粘聚力 / kPa	内摩擦角 / $(\text{^\circ})$
0 天	1.73	10.5%	9.681×10^{-7}	10.92	29.5
3 天	1.73	11.8%	—	10.19	29.9
6 天	1.71	12.8%	—	7.75	30.4
9 天	1.72	14.1%	—	5.83	31.3
12 天	1.71	14.9%	3.039×10^{-6}	5.51	31.7

3 分析方法

3.1 正交实验

本文以内摩擦角、粘聚力、坡高、坡比等四种因

素对该矿区边坡进行正交分析,因子取值范围按照该矿区实际情况而定,分为高、中、低三个层次。根据正交试验设计的基本思想,采用 $L_9(3^4)$ 正交表安排试验。因子取值及水平次序见表 3。

表 3 参数取值及水平次序

Table 3 Parameter selection and group level				
水平	坡高 h /m	粘聚力 C/kPa	内摩擦角 $\psi/(\text{^\circ})$	坡比 I/p
1	20	5	28	1:1
2	30	8	30	1:1.3
3	40	11	33	1:1.6

根据 $L_9(3^4)$ 正交试验表,并按表 3 所确定的参数,采用 Geo-Studio 软件中 Slope/w 模块,对该矿区边坡进行极限平衡分析,基于上述计算模型及正交试验方案进行计算,选取稳定性系数 F_s 作为各因子影响的评价指标,结果见表 4。

表 4 SLOPE/W 计算结果

Table 4 SLOPE/W calculation results					
实验序列	坡高 $h/(\text{m})$	粘聚力 $C/(\text{kPa})$	内摩擦角 $\psi/(\text{^\circ})$	坡比 I/p	稳定性系数 F_s
1	20	5	29	1:1	0.850
2	20	8	30.5	1:1.3	1.180
3	20	11	32	1:1.6	1.617
4	30	5	30.5	1:1.6	1.192
5	30	8	32	1:1	0.988
6	30	11	29	1:1.3	1.079
7	40	5	32	1:1.3	1.008
8	40	8	29	1:1.6	1.131
9	40	11	30.5	1:1	0.924

根据 $L_9(3^4)$ 正交表及表 3 所设计的参数,采用 Slope/w 分析程序,各因子极差分析见表 5。

表 5 各因子极差分析

Table 5 The range factor analysis				
统计参数	坡高 h/m	粘聚力 C/kPa	内摩擦角 $\psi/(\text{^\circ})$	坡比 I/p
均值(1 水平)	1.201	1.002	1.005	0.906
均值(2 水平)	1.086	1.100	1.009	1.089
均值(3 水平)	1.021	1.207	1.204	1.313
极差	0.180	0.205	0.199	0.107
因子主次	坡比 $I/P >$ 粘聚力 $c >$ 内摩擦角 $\psi >$ 坡高 h			

由表 5 可以知道,随着内摩擦角、粘聚力的增加,稳定性系数 F_s 得到了显著增加,相反随边坡高度、坡比增加而稳定性系数显著减小。坡比、粘聚力、内摩擦角、坡高对于离子型稀土边坡稳定的敏感性依次减小,其中坡比对稀土边坡的敏感性要大于另外三种因子。

3.2 刚体极限平衡法

本文在有限元分析^[5]之上,通过极限平衡法中用稳定性系数作为稳定性的判断标准,来分析离子型稀土边坡的稳定性。

极限平衡法通常是在一边坡上,作一个通过坡脚的被当作是可能产生滑动的圆弧面,圆弧面上再划分垂直条块^[6]。并作出如下假设^[7-9]:

- (1) 在分析受力过程中,滑动面以上土体忽略内部变形。
- (2) 即使在破坏的状态,滑坡面包括的土体位于极限强度。
- (3) 边坡失稳时,滑坡处于平衡状态。

有限单元法先通过有限元的分析得出每个结构连接点的应力,然后假设一个滑动面,就可以得到滑动面上某点的法向和切向应力,随后依据破坏准则,求出抗滑力,下滑力与抗滑力进行积分,就可以得到整个滑动面的稳定性系数,得出以下结果:

由表 6 及表 7 可知,在采用极限平衡法中不同的算法后,并采用有限元法分析,我们可以得出这样的结论:该稀土矿边坡在天然状态与溶浸后相比,虽然稳定性系数有所降低,但其稳定性系数均在 1.05 以上,所以可以认为在离子型稀土溶浸开采过程中边坡处于基本稳定和稳定状态。

表 6 不同计算方法下边坡稳定性系数

Table 6 The slope safety coefficient under different calculation method		
计算方法	天然状态	溶浸后状态
Ordinary 法	1.098	1.085
Bishop 法	1.214	1.205
Janbu 法	1.090	1.082
Morgenstern-Price 法	1.151	1.137

表 7 边坡稳定性状态划分

Table 7 State of the slope stability				
滑坡稳定系数 F	$F < 1.00$	$1.00 \leq F < 1.05$	$1.05 \leq F < 1.15$	$F \geq 1.15$
滑坡稳定状态	不稳定	欠稳定	基本稳定	稳定

4 边坡稳定性分析

在对原地浸矿开采方式下的稀土矿边坡稳定性模拟中,本文先使用 GeoS-tudio 软件中的 SEEP/W 模块来分析稀土边坡在原地浸析条件下的渗流特征,来得出边坡内部渗流规律,然后将得到渗流情况用 SLOPE/w 模块来进行稳定性分析。SLOPE/W 是研究边坡稳定的模块,它是运用极限平衡理论结合有限元

法对边坡进行分析^[10]。

4.1 几何模型

根据该矿 II 号矿体地质资料对边坡几何模型进行简化,并建立模型(图 1),边坡高度最大为 30 m,坡角为 37°。此处共分为四个地层:第一层为表土层,层厚在 0.1~0.4 m;第二层是全风化层,平均厚度 8 m,呈山脊厚,山脚薄现象;第三层为中风化层,厚度为 2 m;第四层为基岩。然后使用 SLOPE/W 分别计算在自然条件和注液后边坡的稳定性。

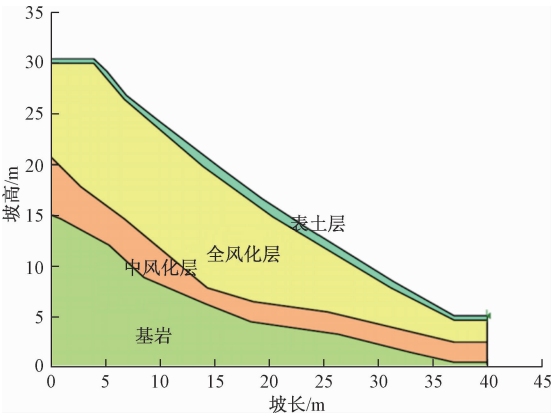


图 1 稀土矿边坡的几何模型

Fig.1 Rare earth mine slope geometry model

4.2 数学模型

边坡是否稳定与土的抗剪强度息息相关,在非饱和土中,抗剪强度主要与基质吸力相关,这也是饱和土与非饱和土最重要的区别。目前非饱和强度公式有毕肖普和弗雷德朗德这两类公式^[11-12]。

毕肖普认为有效应力可表示为:

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w)$$

抗剪强度公式为:

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a) \tan \varphi' + \chi(u_a - u_w) \tan \varphi'$$

其中: c' ——有效粘聚力/kPa;

σ ——总应力/kPa;

u_a ——孔隙气压力/kPa;

φ' ——有效内摩擦角/(°);

u_w ——孔隙水压力/kPa。

弗雷德朗德等通过试验证明了抗剪强度可以使用独立状态变量 $\sigma - u_a$ 、 $u_a - u_w$ 说明,公式如下:

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a) \tan \varphi' + \chi(u_a - u_w) \tan \varphi'^b$$

其中: c' ——有效粘聚力/kPa;

σ ——总应力/kPa;

u_a ——孔隙气压力/kPa;

φ' ——有效内摩擦角/(°);

u_w ——孔隙水压力/kPa。

当 u 接近 u_w 时 $u_a - u_w$ 也就接近零,此时,非饱和的土壤强度公式就变为饱和土体的公式。

4.3 注液条件

结合本矿山实际情况,山脊部位矿层厚,所需溶浸液也相应的要多些。依山脊、山坡、山脚划分三个浸析采区,注液间隔为 7 d,一采区注液 7 d 后,二采区才开始注液,二采区注液 7 d 后,三采区开始注液。按固液比(体积比)为 1:0.33 计算总注液量: $28800 \times 0.33 = 9504 \text{ m}^3$ 。约为 9504。0~7 d 每天注液 100 m^3 左右即 0.0356 m/d ,7~14 d 每天注液 200 m^3 左右即 0.0712 m/d ,15 天后每天注液 300 m^3 左右即 0.1068 m/d 。注液时间总共 45 d。

5 结果与分析

5.1 稀土矿边坡孔隙水压力分布

根据上文的计算模型及有关的初始条件,通过 seep/w 软件分别模拟了未注液、注液 1 d、10 d、20 d、30 d、45 d 时稀土矿边坡孔隙水压力分布情况,得到以下稀土边坡在各时间段内的孔压分布图(图 2)。

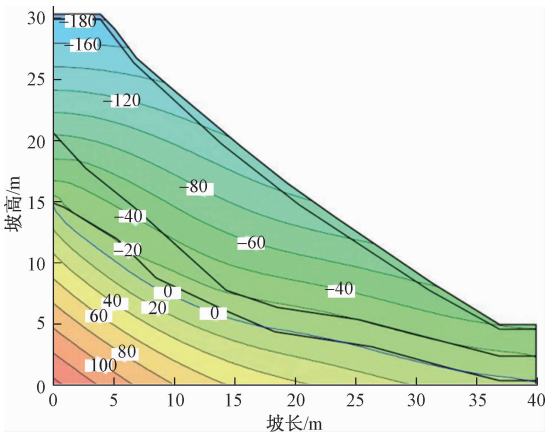


图 2 进行注液前孔隙水压力分布图

Fig.2 Pore water pressure distribution within no liquid injection

从图 2 中可知,在未开始注液时,孔压力沿着地下水水面由下往上逐渐减少,地下水水面处孔压为零,并且处于基岩内,坡顶(负)孔压最大,为 -180 kPa,坡底(正)孔压最大,为 100 kPa。

从图 3~图 5 可以得出:注液渗流随着注液时间的增加,溶浸液进一步入渗到边坡内。注液 1 d 时,坡顶的孔压是 -180 kPa,注液 10 d 时,坡顶孔压增加到 -160 kPa,并且全风化层中(负)孔压开始上升,尤其

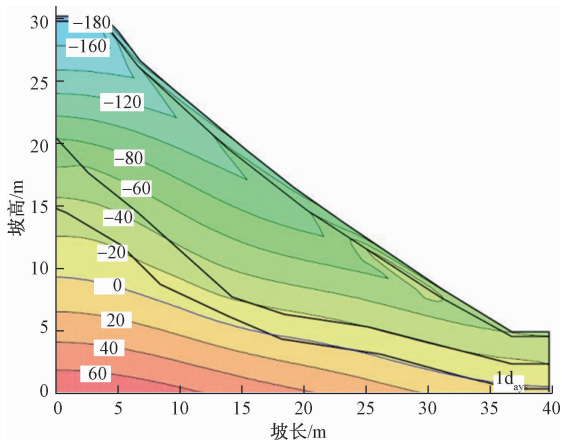


图 3 注液 1 d 孔隙水压力分布图

Fig.3 Pore water pressure distribution within liquid injection 1 day

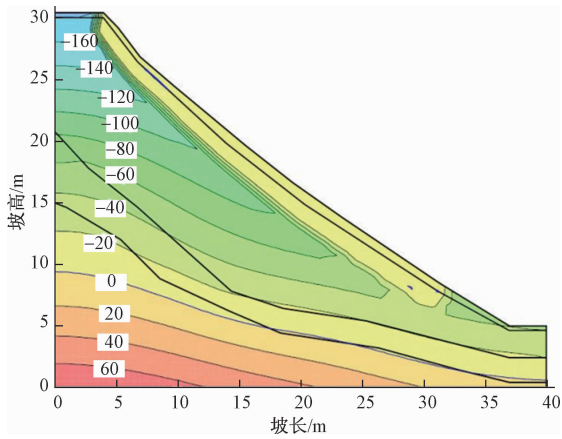


图 4 注液 10 d 孔隙水压力分布图

Fig.4 Pore water pressure distribution within liquid injection 10 day

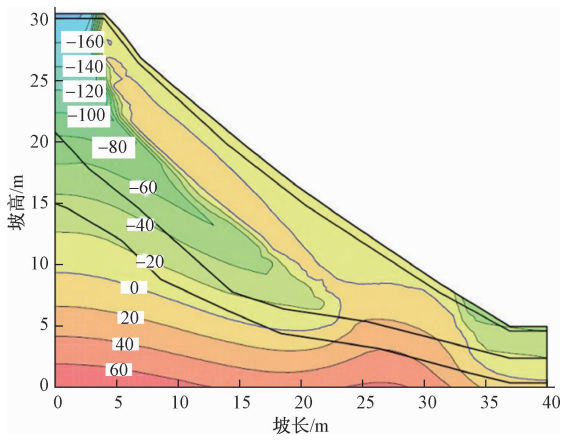


图 5 注液 20 d 孔隙水压力分布图注液

Fig.5 Pore water pressure distribution within liquid injection 20 day

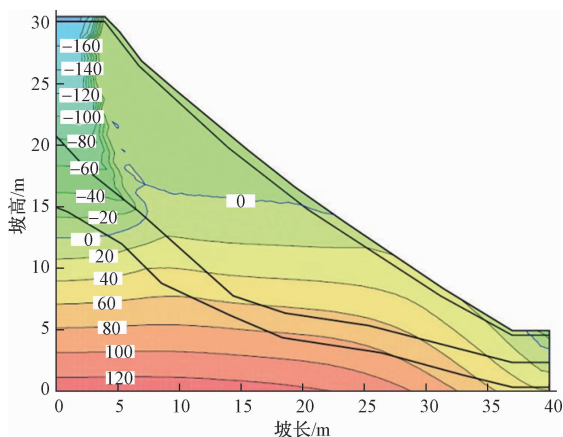


图 6 注液 30 d 孔隙水压力分布图

Fig. 6 Pore water pressure distribution within liquid injection 30 day

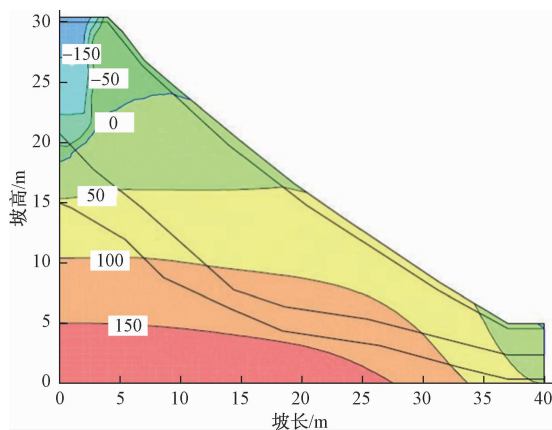


图 7 注液 45 d 孔隙水压力分布图

Fig. 7 Pore water pressure distribution within liquid injection 45 day

是沿坡面向内表土层及全风化层达到 -20 kPa; 注液 20 d 时, 零孔压线大部分分布于全风化层内, 并且平行于坡面出现一条 (正) 孔压带; 注液 30 d 注时, 全风化层中 (负) 孔压继续上升, 此时零孔压线达到坡高 15 m 处并且与坡面相交, 零孔压线与坡面相交处下坡面为 (正) 孔压, 容易出现边坡失稳, 注液结束后, 坡顶孔压上升到 -150 kPa, 同时水位线也抬升至坡高 20 m 处, 边坡面上 (正) 孔压范围扩大, 失稳范围及概率增大 (图 6、图 7)。

5.2 注液对稀土边坡稳定的影响

将上节求解得出的边坡孔压分布导入到饱和-非饱和土体稳定分析的 SLOPE 中, 计算在这个注液条件下, 边坡稳定性系数变化情况。具体分析如下 (图 8)。

从图 8 可知, 稀土边坡随注液时间增加, 稳定性系数在总体上是呈先减小后稳定的趋势。注液从第 1

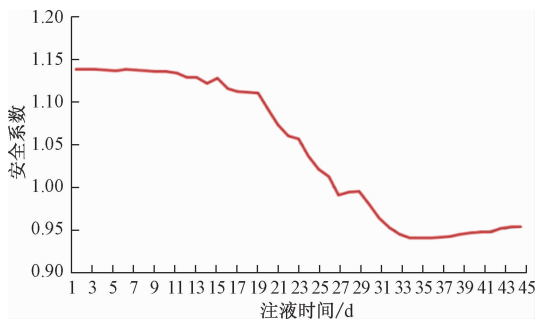


图 8 稳定性系数随注液时间变化图

Fig. 8 Safety coefficient change relations with liquid injection time

天持续到第 16 d, 边坡的稳定性系数降非常小, 约下降 0.03, 稳定性系数均大于 1.1, 边坡仍然处于稳定的状态; 但当注液到 20 d 以后, 稳定性系数开始急剧下降, 第 23 d 时, 边坡的稳定性系数已经小于 1.05, 说明边坡处于欠稳定状态, 在这个时候有破坏的可能, 第 26 d 时, 边坡的稳定性系数已经小于 1, 说明边坡说明边坡开始处于不稳定状态, 在这个时候有破坏的可能性增大, 也说明了注液对边坡的影响存在一个时间过程, 有一定的滞后性。当注液 33 d 之后, 边坡的稳定性系数也大概维持在 0.95 这个水平。此时边坡处于一个非常不稳定的状态, 应加强监测和防护工作。

6 结论

(1) 稀土土体在浸矿前后物理特性发生了变化。土壤中的细小颗粒在浸矿的过程中大大减少, 密度前后变化不大, 稀土的含水率在浸泡之后略有增加, 稀土经过浸泡之后, 渗透性系数大大提高了。

(2) 通过正交分析影响离子型稀土边坡因子的主次顺序依次为坡比 $1/p$ 、粘聚力 c 、内摩擦角 φ 、坡高 h , 其中坡比对边坡的重要性要大于其他三种因子。

(3) 稀土边坡稳定性系数随着注液时间的增加, 总体上呈先减小后稳定的趋势, 注液第 1 d 至第 16 d, 稳定性系数变化不显著且均大于 1.1, 边坡还位于稳定状态; 但当注液到 20 d 以后, 稳定性系数下降很快, 第 23 d 时, 边坡的稳定性系数已经小于 1.05, 从此时开始边坡失稳概率变大, 应加强监测和防护工作。

参考文献:

- [1] 李建康, 陈振宇, 等. 江西赣县韩坊岩体的成岩时代及成矿条件分析[J]. 岩矿测试, 2012, 31(4): 717.
LI Jiankang, CHEN Zhenyu, et al. The dating and analysis of ore forming conditions for hanfang granite

- intrusions in Ganxian, Jiangxi province[J]. Rock and Mineral Analysis, 2012, 31(4): 717.
- [2] 汤洵忠, 李茂楠, 杨殿. 我国离子型稀土矿开发的科技进步[J]. 矿冶工程, 1999, 19(2): 14-16.
TANG Xunzhong, LI Maonan, YANG Dian. The development of science and technology progress of Chinese ionic type rare-earth ore[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 1999, 19(2): 14-16.
- [3] 陈仲颐, 等. 土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.
CHEN Zhongyi, et al. Soil mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007.
- [4] 杜太亮, 张永兴, 等. 岩体基本参数对岩质边坡变形的影响[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2006, 17(1): 22-27.
DU Tailiang, ZHANG Yongxing, et al. Effects of rock mass parameters on rock slope deformation[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2006, 17(1): 22-27.
- [5] 邵龙潭, 唐洪祥, 韩国城. 有限元边坡稳定分析方法及其应用[J]. 计算力学报, 2001(1): 81-87.
SHAO Longtan, TANG Hongxiang, HAN Guocheng. The finite element slope stability analysis method and its application[J]. Chinese Journal of Computational Mathematics, 2001(1): 81-87.
- [6] 陈华明, 盛建龙. 基于极限平衡原理的边坡稳定分析的数值积分解法[J]. 西部探矿工程, 2006(4): 287-288.
CHEN Huaming, SHENG Jianlong. Based on limit equilibrium slope stability analysis of the principle of numerical integration method[J]. West-China Exploration Engineering, 2006(4): 287-288.
- [7] Chen, Zuyu, Morgenstern N R. Extensions to the generalized method of slices for stability analysis[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1983, 20(1): 104-119.
- [8] Fredlund, D. GandKrahn, J. Comparison of slope stability analysis methods of analysis[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1977, 14(3): 429-439.
- [9] 陈玮, 简文彬, 董岩松, 等. 软弱结构面对花岗岩残积土边坡稳定性影响[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2015, 26(1): 23-30.
CHEN Wei, TIAN Wenbin, DONG Yansong, et al. Influence of weak structural surface on stability of granite residual soil slopes[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2015, 26(1): 23-30.
- [10] 孟凡雷, 苏佩珍. 基于 GeoStudio 的土石坝动力安全复核[J]. 水电能源科学, 2010, 10: 53-55.
MENG Fanlei, SU Peizhen. Based on geoStudio earth-rockfill dam power safety review[J]. Water Resources and Power, 2010, 10: 53-55.
- [11] 荣冠, 张伟, 周创兵. 降雨入渗条件下边坡岩体饱和和非饱和渗流计算[J]. 岩土学, 2005, 10: 24-29.
ROU Guan, ZHANG Wei, ZHOU Chuangbing. Influence of heavy rainfall characteristics on saturated-unsaturated slope failure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 10: 24-29.
- [12] 徐平, 李同录, 李萍. 考虑非饱和渗流作用下三峡库岸滑坡稳定性研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2010, 21(1): 7-12.
XU Ping, LI Tonglu, LI Ping. Stability study on majiagou Landslide in Three Gorges Reservoir area with consideration of unsaturated seepage[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2010, 21(1): 7-12.

《中国地质灾害与防治学报》编辑部网络采编办公系统运行通知

各位作者:

您好! 为提高稿件处理和办公效率,《中国地质灾害与防治学报》编辑部已从 2013 年 3 月开始启用网络采编办公系统。

作者投稿采用新的网络平台 (www.zgdzzhyfzxb.com; <http://zgdzzhyfz.paperopen.com/>), 不再使用原电子邮件投稿系统, 特此公告, 望作者们予以支持与合作。

在使用网络系统中您有任何疑问、意见和建议, 请您电话 010-62170025 或者发邮件到 nitx@mail.cigem.gov.cn。

注意: 投稿作者请详细阅读首页导航栏——投稿须知!