

DOI:10.19431/j.cnki.1673-0062.2022.01.001

湖南省湘西州某红层边坡稳定性分析及加固措施

张志军, 王希贤, 伍玲玲, 章求才, 贺桂成, 喻清

(南华大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 衡阳 421001)

摘要:为了研究泸溪县兴隆场镇总管村2组都岚山红层滑坡稳定性,采用Geo-Studio软件对其安全系数和内部应力应变情况进行分析。分析结果如下:利用Sigma/W模块发现该红层边坡在坡脚和坡顶中下部存在水平应力集中现象,水平应变分布则是两端大中间小,体积应变表现为边坡上缘应变较大而下缘较小;将Sigma/W分析结果导入Slope/W,得到更加符合实际边坡的安全系数为1.137,由此可以判断该边坡整体暂时处于稳定状态;将水平应力分布、水平位移分布、水平应变分布、体积应变和安全系数结合起来分析,精确地判断该红层边坡处于整体稳定,坡度较高区域局部可能浅层牵引滑塌,弥补了单纯依靠极限平衡法或者有限单元法的不足。

关键词:体积应变;稳定性分析;安全系数;加固措施

中图分类号:U416.14 **文献标志码:**A

文章编号:1673-0062(2022)01-0001-06

Stability Analysis and Reinforcement Measures of a Red Bed Slope in Xiangxi Prefecture, Hunan Province

ZHANG Zhijun, WANG Xixian, WU Lingling, ZHANG Qiucan, HE Guicheng, YU Qing

(School of Resource Environment and Safety Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China)

Abstract: In order to study the stability of dulanshan red bed landslide in group 2, Zongguan village, Xinglongchang Town, Luxi County, Geo-Studio software is used to analyze its safety factor and internal stress-strain. The analysis results are as follows: using Sigma/W module, it is found that there is horizontal stress concentration in the middle and lower part of the slope toe and slope top, the distribution of horizontal strain and horizontal displacement is large at both ends and small in the middle, and the volumetric strain is large at the upper edge of the slope and small at the lower edge; By importing the Sigma/W a-

收稿日期:2021-10-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51774187;51804164;51974163);湖南省自然科学基金项目(2019JJ50498);湖南省高新技术产业科技创新引领计划项目(2020SK2024);湖南省教育厅科研基金项目(18B276)

作者简介:张志军(1978—),男,教授,博士生导师,主要从事岩土灾害预测与控制等方面的研究。E-mail:zzj181@163.com

analysis results into Slope/W, it is more in line with the actual slope, and the safety factor is 1.137, therefore, it can be judged that the slope is temporarily stable; The horizontal stress distribution, horizontal displacement distribution, horizontal strain distribution, volumetric strain and safety factor are combined to accurately judge that the red bed slope is in overall stability, and shallow traction collapse may occur in some areas with high slope, which makes up for the deficiency of relying solely on limit equilibrium method or finite element method.

key words: volumetric strain; stability analysis; safety factor; reinforcement measures

0 引言

随着公路和铁路等工程建设的增加,红层边坡稳定性问题将会普遍存在工程建设中,特别是在湘西土家族苗族自治州这样一个红层边坡遍布的地区,滑坡将威胁到人民的生命和财产,造成不可估量的损失。例如,2007年7月27日,湖南省泸溪县潭溪镇朱雀洞村隔丹青河的南岸山体发生大面积红层边坡滑坡,造成四栋房屋倒塌^[1];2014年因吉首地区普降大雨,吉首市丹青中学操场西北侧红层边坡发生滑塌,对师生安全造成严重影响。红层边坡的研究不仅仅具有巨大学术意义,还存在巨大工程价值,引起岩土工程技术人员的高度重视^[2-3]。

为降低红层边坡工程建设引发地质灾害的可能性,有效开发利用土地资源,国内外许多学者在红层边坡稳定性方面做出了很多研究。计算机数值计算方法和刚体极限平衡法作为边坡稳定分析的重点方法,现如今已获得了许多重大成果。进入21世纪,有限单元法、离散单元法和有限差分法等数值分析方法均取得了突破性重大进展^[4-6]。蔺晓燕、杨泽等^[7]通过SLOPE/W软件分别对4种模型使用Morgenstern-Price法求出稳定系数Fs;A. Ardestani和M. Amini等^[8]采用极限平衡法求解了边坡的安全系数。

然而,即使是最优化极限平衡法^[9],仍然视边坡岩土体为刚体。虽能给出物理意义明确的边坡稳定性系数以及可能的破坏面,但此方法仍然存在可以改进的地方,有限元法则将边坡岩土体看成是变形体,能够有效克服刚体极限平衡法的缺陷。借助Geo-studio软件,结合有限元法与极限平衡法,通过将水平应力分布、水平位移分布、水平应变分布、体积应变和安全系数结合起来分析,精确地判断红层边坡所处状态,并根据分析结果给出相应加固措施。

施工人员在湘西土家族苗族自治州的公

路和住宅边坡施工时,时常遇到红层。该红层边坡岩土体以砂岩和泥岩为主,具有亲水性强、透水性弱、遇水软化失水崩解以及强度低的特点^[10]。在缓倾红层边坡开挖的情况下,坡脚产生临空面,边坡沿缓倾面发生滑塌的几率增大^[11-12]。本文以湘西土家族苗族自治州地区一处红层边坡为典型例子,对其展开稳定性分析,并提出加固措施^[13],为以后边坡治理工程提供借鉴。

1 工点概况

1.1 地层岩性

该边坡的地层岩性自上而下分为两层。首层为粉质黏土,呈褐黄色,可塑状,干强度中等,韧性中等,无摇震反应,该层在斜坡平缓处均有分布。下层为中风化泥质粉砂岩,紫红色,中厚层状,泥质结构,主要成分为黏土质矿物,中风化,裂隙较发育,岩心多呈现短柱状,较破碎,属软岩,锤击声哑,具体参数见表1。

表1 岩石物理力学参数

Table 1 Rock physical and mechanical parameters

岩性	弹性模量/MPa	重度/(kN·m ⁻³)	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角/°
粉质黏土	6 100	19	0.3	16.47	13.47
中风化泥质粉砂岩	30 000	24	0.3	1 000	32

1.2 水文地质条件

边坡地势险峻,地形位置很高(见图1)。区内水系属长江水系的沅水支流辰水流域,其次级支流为合水溪,由多条小溪汇流而成,自北西往南东方向流淌,在泸溪县黄桑乡溪口村汇入辰水,溪宽5~30 m,小溪整体弯道多,水流平缓。

1.3 区域概况

泸溪县兴隆场镇彭总管村2组都岚山边坡,

东距兴隆场镇约5 km,有乡道连接,中心地理坐标为:东经109°52'58"、北纬28°03'12",自兴隆场沿能滩至兴隆场公路北东距泸溪县城60 km。

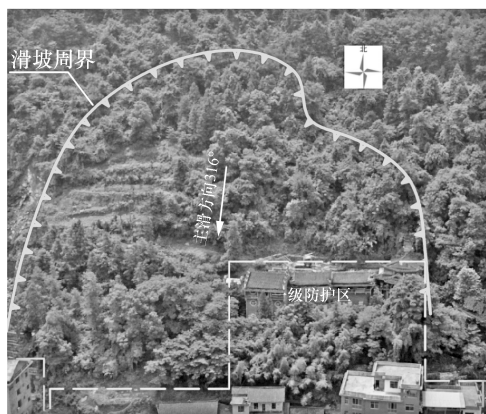


图1 红层边坡航拍图

Fig. 1 Aerial photograph of red bed slope

根据相关现场查看资料,结合现场情况,进行现场地质调查,综合岩石力学特性、节理裂缝特征、边坡坡角和周边环境,决定采用2-2'作为主剖面进行稳定性分析,现场剖面图如图2所示。

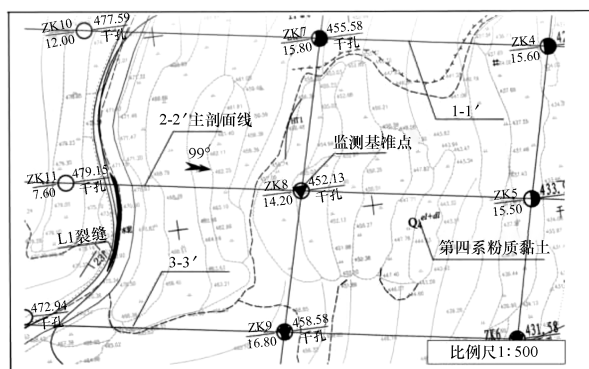


图2 主剖面位置图

Fig. 2 Location of main section

2 计算模型

2.1 红层滑坡特征分析

相比下部强度较高的泥质砂岩,上部粉质黏土强度较低,且风化痕迹明显。上部强度较低的粉质黏土对边坡稳定性起控制作用。

2.2 简化模型

通过分析,该边坡坡体呈现两层结构,相对强度较小的粉质黏土在上,强度相对较高的泥质砂岩分布在下部。层面倾角25°,倾向坡外。

2.3 模型构建

利用Geo-Studio软件

1) 模型区域设定:选择地质灾害发生地点2-2'主控剖面为模型面域,设定斜坡高度100 m不变。

2) 本构模型确定:根据岩层垂直分布情况,将坡体概化为由粉质黏土与中风化粉质泥砂岩(中砂)两层均质材料组成的莫尔-库伦模型^[14](见图3)。

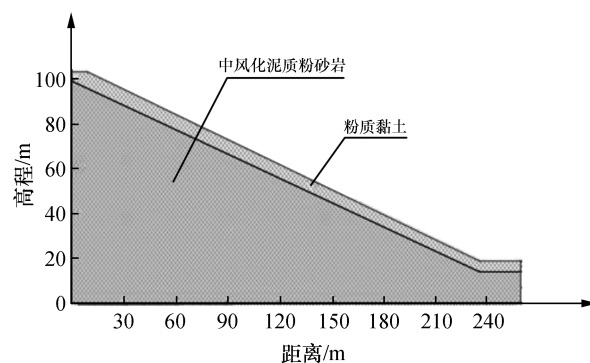


图3 简化模型

Fig. 3 Simplified model

3) 边界条件设置:模型的纵坐标方向设置为无水平位移,横坐标方向设置为无竖向位移。

4) 区域网格剖分:为保证有限元求解精度、计算速度及准确性,设定格点间距大小为1 m,在两种材料的过渡区利用三角形和四边形单元进行衔接,将模型各区域划分为多个独立单元格。

3 计算分析

3.1 水平方向应力分布

图4为水平应力分布图。如图4所示,坡脚处存在水平应力集中现象,且该处应力明显超过其他边坡部分。在坡顶下方也出现应力集中现象,因此应加强对坡底应力监测,以防坡底出现开裂。

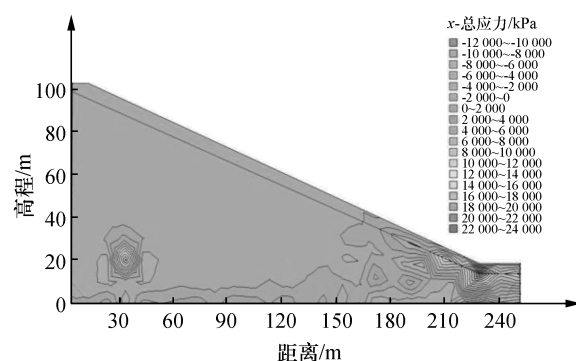


图4 水平应力分布

Fig. 4 Horizontal stress distribution

3.2 水平方向位移

结合图5可看出,边坡两端水平方向位移小,越往坡中部水平位移越大。这样就形成明显的滑坡体,并且滑坡体和滑床分界明显。

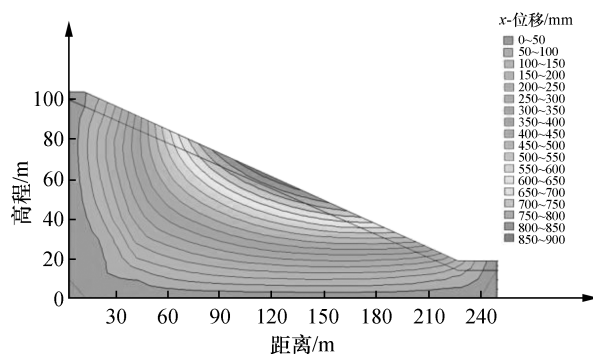


图5 水平位移分布

Fig. 5 Horizontal displacement distribution

3.3 水平方向应变

图6为水平方向应变分布图,从图6可看出,坡顶水平方向表现为负应变,范围-6至-12。在坡底,水平应变不如坡顶水平应变,方向为正,水平应变范围为4到8。与边坡两端不同的是,在边坡中部,水平位移很小,甚至趋向于零。水平应变两端大,中间小,该边坡在特殊环境下极易发生牵引式滑坡。

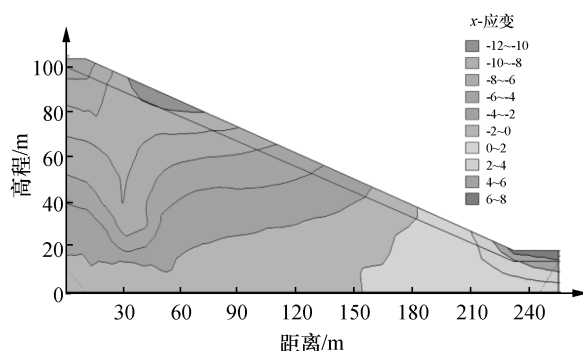


图6 水平应变分布

Fig. 6 Horizontal strain distribution

3.4 体积应变

从图7可看出,边坡上缘体积应变较大,在边坡下缘体积应变较小。同时,边坡上缘中下部位体积应变也很大。这反映坡体上缘小规模滑坡可能性非常大,相比较边坡下缘,具有明显体积不稳定性。在天然状态下整体处于基本稳定,但在高度较大的陡坎容易产生土体滑塌。

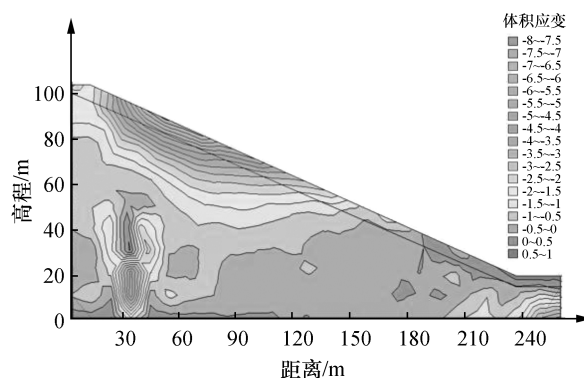


图7 体积应变分布

Fig. 7 Volumetric strain distribution

3.5 安全系数分析

将Sigma/W模块得到应力应变分析结果导入Slope/W模块中,这样既能得到安全系数值,又能考虑到整个边坡应力应变分布情况。结合极限平衡法,求得该边坡安全系数为1.137,由此可判断该边坡整体暂时处于比较稳定状态。

4 边坡加固措施

4.1 治理思路及治理方案

根据本地质灾害的基本特征与变形破坏情况,结合计算模型,提出治理工程方案:拟采用“抗滑桩+抗滑挡墙+钢管桩+截水沟”等措施进行综合永久性治理(见图8)。治理工程为两级抗滑,第一级为AB段长度约120.50 m、第二级为CD段长度约50.00 m;钢管桩为EF段,长约40.50 m。

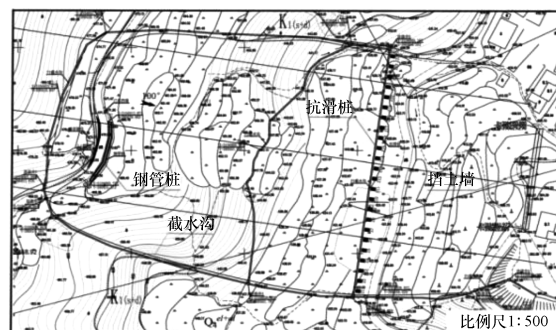


图8 治理设计平面图

Fig. 8 Governance design plan

- 1) 第一级抗滑桩布置在滑坡体中下部共24根抗滑桩,采用方形人工挖孔桩,桩顶设置冠梁。
- 2) 第二级抗滑挡墙布置在滑坡体前缘,采用现浇混凝土挡墙。
- 3) 在滑坡体周围修截水沟,并且互相联通。

4.2 分项设计

1) 抗滑桩设计

共设置 16 根 A 型抗滑桩,截面尺寸 $B\times H=2.0\text{ m}\times2.5\text{ m}$,桩间距 5.0 m。设置冠梁于桩顶,其中冠梁截面 $H\times B=1.0\text{ m}\times2.5\text{ m}$ 。

共设置 8 根 B 型抗滑桩,其截面尺寸 $B\times H=1.5\text{ m}\times2.0\text{ m}$,桩间距 5.0 m。设置冠梁于桩顶,冠梁截面 $H\times B=1.0\text{ m}\times2.0\text{ m}$ 。抗滑桩(详见图 9)均采用 HRB400 型钢筋,其混凝土强度等级均为 C30。

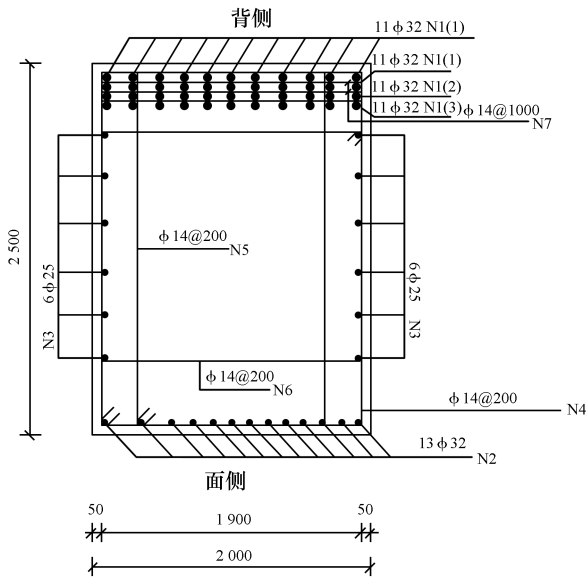


图 9 抗滑桩横截面剖面图
Fig. 9 Cross section of anti-slide pile

2) 抗滑挡墙设计

在滑坡体前缘布置现浇混凝土挡墙。抗滑挡墙布置在 CD 段,总长度 29.00 m,挡墙高度为 7.00 m,顶部宽为 1.40 m,面坡坡比为 1 : 0.20,墙背竖立,墙底反向倾斜,坡比 0.1 : 1,墙体则为 C30 混凝土现浇(详见图 10)。

3) 钢管桩设计

钢管桩设置两排,布置在公路裂缝外侧,共 79 根,钢管桩横向间距 0.80 m,纵向间距 1.0 m,呈梅花状布置,注入质量配合比为 1 : 0.45 水泥浆或水泥砂浆到钢管孔内。钢管桩冠梁截面为矩形,横截面尺寸 $B\times H=1.6\text{ m}\times0.5\text{ m}$ (详见图 11)。

4) 截水沟设计

根据《湖南省暴雨洪水查算手册》(修编版)(湖南省水利电力厅)(2015 年)滑坡区水文资料汇总表如表 2。

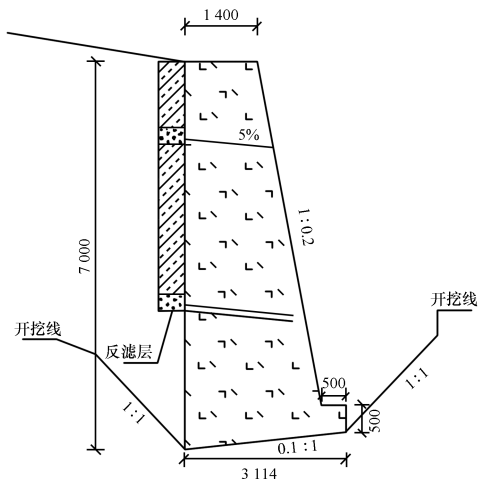


图 10 抗滑挡墙大样图
Fig. 10 Detail drawing of anti-slide retaining wall

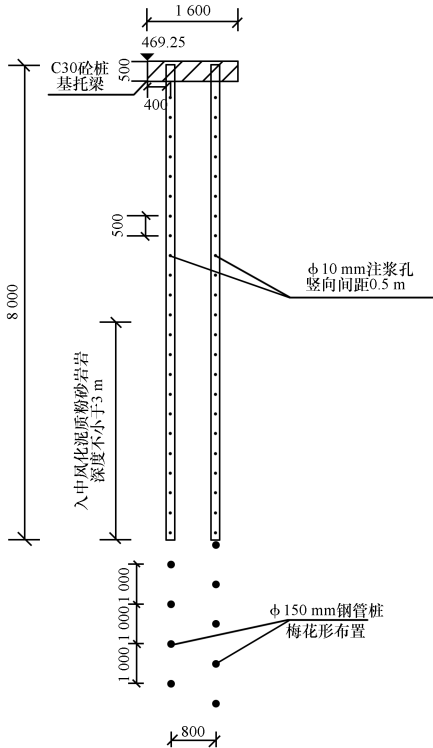


图 11 钢管桩剖面图
Fig. 11 Steel pipe pile section

表 2 滑坡区水文资料汇总表
Table 2 Summary of hydrological data in landslide area

项目	时间/h			
	1/6	1	6	24
t 时间暴雨量 H_t/mm	16	43	78	119
离差系数 C_v	0.15	0.38	0.41	0.47

两者之间的关系为 $C_s=3.5C_v$
根据 1 : 500 地形图圈定各段的汇水面积,按

公路科学研究所提出的坡面汇流。

经验公式进行查算:

$$Q_p = 0.278(S_p - 1)F$$

式中:

Q_p —涉及频率地表水汇流量, m^3/s ;

P_s —设计降雨强度, mm/h ;

F —汇水面积, km^2 。

按此公式计算得到排水沟分段水力计算表(见表3)。

表3 排水沟分段水力计算表

Table 3 Sectional hydraulic calculation table of drainage ditch

洪水 频率/%	$S_p/$ ($mm \cdot h^{-1}$)	$Q_p/$ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	P1 截水沟	P2 截水沟	P3 截水沟
$P=2$	72.8	0.187	0.014	0.094	0.187
$P=5$	85.6	0.276	0.02	0.035	0.276

截水沟截面尺寸0.5 m×0.5 m,壁厚100 mm。排水沟坡降不小于3.0%,

采用C25素混凝土现浇。排水沟基底持力层要求承载力不小于120 kPa,不同持力层间设沉降缝。在地形坡度骤变处设置伸缩缝,平缓段每15 m留一伸缩缝,伸缩缝宽2 cm,油麻、沥青堵塞。对沟底坡度大于5%段设置跌水,跌水平台顺坡向长500 mm,垂直高100 mm。过路涵管直径800 mm。

5 结 论

本文通过调查分析研究区内地质灾害与边坡分布特征,采用Geo-studio软件模拟斜坡应力应变分布规律及边坡稳定性规律,得出以下几点结论:

1) 该边坡安全系数1.137,推断出该红层边坡整体暂时处在稳定状态。

2) 在结合Sigma/W模块分析结果后,发现该红层边坡在坡脚和坡顶中下部存在水平应力集中现象,体积应变表现为边坡上缘应变较大而下缘较小,在降雨条件下容易发生局部土体滑塌。

3) 坡顶水平方向应变呈现负应变。在坡底,水平应变明显小于坡顶水平应变,方向为正。与边坡两端不同的是,在边坡中部,水平应变很小,甚至趋向于零。在这种情况下,极易发生中型浅层牵引滑坡。

4) 根据本地质灾害的基本特征和变形破坏情

况,结合计算模型,采用抗滑桩、抗滑挡墙、截排水等治理措施相结合进行防护,确保边坡的安全稳定。

参考文献:

- [1] 李俊,彭振斌,曹佳文.某高速公路朱雀洞段红层滑坡成因机制分析与整治对策[J].中国地质灾害与防治学报,2008,20(2):15-19.
- [2] 王旭,刘东升,宋强辉.基于极限平衡法的边坡稳定性可靠度分析[J].地下空间与工程学报,2016,12(3):839-845.
- [3] KIM K N, LEE S H, KIM K S. Optimal pile arrangement for minimizing differential settlements in piled raft foundations[J]. Computers and geotechnics, 2001, 28(4): 235-253.
- [4] CHAUDHARY M A. FEM modeling of a large pile draft for settlement control in weak rock[J]. Engineering structure, 2007, 28(11): 2901-2907.
- [5] RENANI H R, MARTIN C D. Slope stability analysis using equivalent Mohr-Coulomb and Hoek-Brown criteria [J]. Rock mechanics and rock engineering, 2020, 53(1): 13-21.
- [6] OBERHOLLENZER S, TSCHUCHNIGG F, SCHWEIGER H F. Finite element analyses of slope stability problems using non-associated plasticity [J]. Journal of rock mechanics and geotechnical engineering, 2018, 10(6): 1091-1101.
- [7] 蔺晓燕,杨泽,李萍,等.地层划分对黄土高边坡稳定性分析的影响研究[J].岩土工程学报,2021,43(增刊1):76-80.
- [8] ARDESTANI A, AMINI M, ESMAEILI K. A two-dimensional limit equilibrium computer code for analysis of complex toppling slope failures[J]. Journal of rock mechanics and geotechnical engineering, 2021, 13(1): 114-130.
- [9] 章瑞环,叶帅华,陶晖.基于改进极限平衡法的多级均质黄土边坡稳定性分析[J].岩土力学,2021,42(3): 813-825.
- [10] 高芳芳.云南红层分布及其边坡工程病害分析[D].成都:西南交通大学,2010:9-15.
- [11] 程强,寇小兵,黄绍槟,等.中国红层的分布及地质环境特征[J].工程地质学报,2004,12(1):34-40.
- [12] 骆银辉,朱春林,李俊东.云南红层边坡变形破坏机制及其危害防治研究[J].岩土力学,2003,24(5): 836-839.
- [13] 宋子岭,杨添,赵立春.含多层软弱夹层的顺向岩质边坡稳定性评价方法对比分析[J].中国地质灾害与防治学报,2016,27(2):20-25.
- [14] 刘洪瑜,张玉芳,李嘉明,等.开挖方式对缓倾红层边坡稳定性的影响[J].铁道建筑,2020,60(11): 98-101.