

某岩质边坡稳定性和防治措施分析研究

陈磊¹, 阿发友^{2,3}, 潘万成^{2,3}, 李青炜⁴, 沈显泽^{2,3}

(1. 中国有色金属工业昆明勘察设计研究院有限公司, 昆明 650051; 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;

4. 中冶集团武汉勘察研究院有限公司, 武汉 430080)

摘要: 云南省个旧重金属污染整治示范试验区建设过程中, 由于场地开挖平整形成高陡岩质边坡, 严重影响场区建设和运营安全。因此, 需要对其进行稳定性分析, 并提出相应的防治措施, 为边坡永久治理提供依据。通过理正极限平衡法、Geostudio 和 FLAC3D 数值模拟综合判定, 天然工况下边坡整体稳定性均处于稳定状态, 在暴雨工况和地震工况下边坡整体稳定性均呈不稳定状态。依据稳定性计算结果, 将边坡防治划分为 3 个防治区段: 重点防治区, 主要防治措施为锚索框格梁+被动防护网; 次重点防治区, 主要防治措施为清危+框格锚杆; 一般防治区, 主要防治措施为清危+被动防护网, 为边坡永久治理提供了依据。

关键词: 岩质边坡; 稳定性; 防治措施

中图分类号: P649; TU457 **文献标识码:** A

ANALYSIS AND RESEARCH ON STABILITY AND PREVENTION MEASURES OF A ROCK SLOPE

CHEN Lei¹, A Fa-you^{2,3}, PAN Wan-cheng^{2,3}, LI Qing-wei⁴, SHEN Xian-ze^{2,3}

(1. Kunming Prospecting Design Institute Of China Nonferrous Metals Industry Co., Ltd, Kunming 650051, China;

2. Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;

3. Key Laboratory of Geohazard Forecast and Geoecological Restoration in Plateau Mountainous Area, Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China, Kunming 650093, China; 4. Wuhan Survey-geotechnical

Research Institute of China Metallurgical Science and Industry Group Co. LTD, Wuhan 430080, China)

Abstract: Yunnan province plans to build a demonstration and experimental zone for the treatment of heavy metal pollution in these old areas, and build, discharge and manage the small selection plants with small scale, low productivity and disorderly emissions that have been formed over the years. During the construction of the test area, the high and steep rock slope was formed due to the smooth excavation of the site, which seriously affected the construction and operation safety of the site. Therefore, it is necessary to analyze the stability of the slope and put forward the corresponding prevention and control measures, so as to provide a basis for the permanent treatment of the slope. According to the comprehensive judgment of the limit equilibrium method and the numerical simulation method, the overall stability of the slope is in a stable state under the natural condition, and the overall stability of the slope is in an unstable state under the rainstorm condition and the

收稿日期: 2023-01-12 改回日期: 2023-03-09

基金项目: 国家自然科学基金地区科学基金项目(42267020); 云南省应用基础研究计划面上项目(2017FB070)

earthquake condition. According to the stability calculation results, the slope prevention and control is divided into three sections: the key prevention and control area, the main prevention and control measures are the anchor cable frame grid and passive protection net; Secondary key prevention and control area, the main prevention and control measures are clear dangerous and frame lattice bolt; General prevention and control areas, the main prevention and control measures for the clear dangerous and passive protection network.

Key words: rock slope; stability; prevention measures

在西部地区工程建设中,各种场地开挖平整总是涉及岩质边坡的稳定性问题,是影响工程建设和营运的重要安全因素之一^[1-8]。对边坡进行准确的稳定性分析评价,并进行针对性的分区分段治理,是确保边坡安全和控制合理经济投入的重要途径。

为了解决多年来形成的矿区重金属污染整治瓶颈,围绕扩大规模、提高生产力、集中排放和集中管理为导向,云南省在个旧地区建设重金属污染整治示范试验区。在试验区建设过程中由于场地开挖平整形成高陡岩质边坡,严重影响场区建设和运营安全。因此需要对其进行稳定性分析,并提出相应的防治措施,为边坡永久治理提供依据。本研究在收集场地工勘资料、进行现场踏勘和测绘基础上,对边坡岩体进行了分组和分段,采用格吉(M. Georgi)法^[9]对室内岩块试验进行折减和 Hoek-Brown 强度准则^[10-11]进行各岩组岩体参数综合取值,在此基础上利用极限平衡法和数值模拟手段,进行了分区段的边坡稳定性计算和分析,为分区分段针对性治理提供了依据。最后提出了分区分段治理的针对性防治措施,为边坡永久治理提供了依据。

1 边坡工程地质条件

1.1 地形地貌

研究边坡区域地貌属于高中山岩溶断块山地貌,植被稀少,天然地形整体上呈现上陡下缓的特征,开挖边坡坡顶天然坡度 $5^{\circ}\sim 10^{\circ}$,越往山脊地形坡度越陡,最大天然坡度达 35° 。边坡位于拟建场地北侧西段,开挖边坡总长460 m,边坡高度不一,最大高度位于边坡中部可达50 m,两侧边坡高度 $5\sim 10$ m,开挖坡度 $80^{\circ}\sim 85^{\circ}$ 。从地形地貌可以看出,边坡高度大,且开挖凌空面坡度近直立,是影响该边坡稳定性的因素之一,边坡各段高度不一,将造成各段稳定性明显具有差异。

1.2 地层岩性

根据收集的工勘资料,研究区内分布的主要地层为:第四系植物层(Q^{pd})、第四系坡残积(Q^{dl+cl})

层,下伏地层为三叠系中统个旧组(T_2g),岩性为灰岩。根据现状边坡岩体分布情况、钻孔资料以及地质资料,可将边坡的工程地质岩组划分为四大类和两个亚类,Ⅰ:强风化灰岩较软弱岩组(Ⅰ₁:强风化中厚层灰岩较软弱岩组和Ⅰ₂:强风化薄层灰岩较软弱岩组);Ⅱ:薄层状灰岩坚硬岩组;Ⅲ:中厚层状灰岩坚硬岩组;Ⅳ:中厚层状灰岩较坚硬岩组。并按照工程地质岩组将1#边坡分成5个区域(如图2和图3)。各岩组岩体结构和强度存在差异,是影响边坡各段稳定性的主要因素之一。

1.3 地质构造

研究区位于个旧市南部,对研究区影响较大的区域性断层主要为南部的红河深大断裂、西侧东西向的卡房断裂。其中卡房断层位于研究区的西侧,距离约1.5 km,其余区域性断层距离研究区均相对较远。

边坡南东段发育一条正断层(f_1),产状 $60^{\circ}\angle 60^{\circ}$,断层走向与边坡走向近垂直,两盘出露地层岩性为三叠系中统个旧组第三段,断距较小。断层两盘岩层发育牵引构造,岩体破碎,断层破碎带明显,对边坡局部稳定性有一定影响。

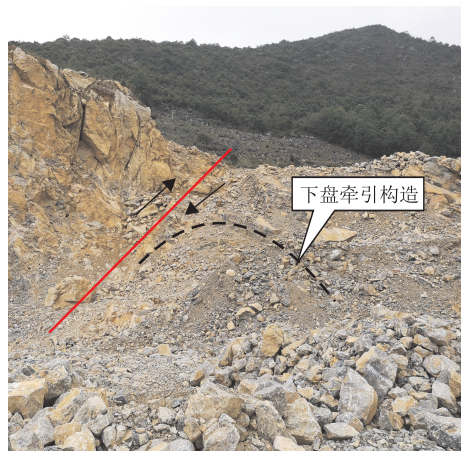


图1 f_1 断层穿越边坡位置

边坡岩层产状变化较大,如图3边坡工程地质立面图所示,岩层整体走向北西,倾向南东,边坡结构类型整体为斜交坡。由于受到断层和局部挤压的

影响,岩层倾角变化较大。边坡北西段岩层产状 $40^{\circ}\sim 45^{\circ}/70^{\circ}\sim 120^{\circ}$,薄层状灰岩坚硬岩组岩层褶皱发育。边坡中段岩层产状相对稳定,产状 $40^{\circ}\sim 45^{\circ}/115^{\circ}\sim 145^{\circ}$ 。边坡南东段位于断层下盘,局部岩层发生牵引变形,导致边坡结构类型转变为顺向坡,对边坡稳定不利。

1.4 水文地质条件

研究区根据地层岩性的差异及地下水赋存形式、赋水空间、水力特征,可将拟建场区内地下水划

分为孔隙水和岩溶水两种,地下水以岩溶水为主。边坡区钻孔未见地下水位,附近无地下水出露。

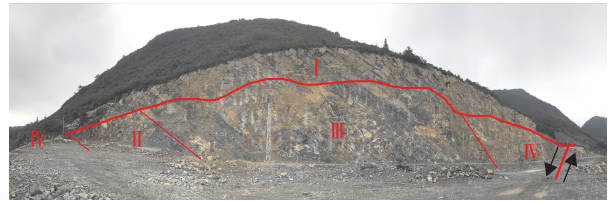


图2 边坡地形地貌和岩组划分

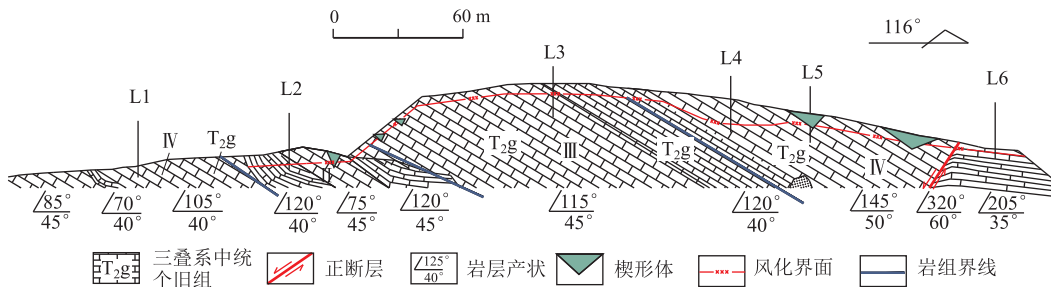


图3 边坡工程地质立面图

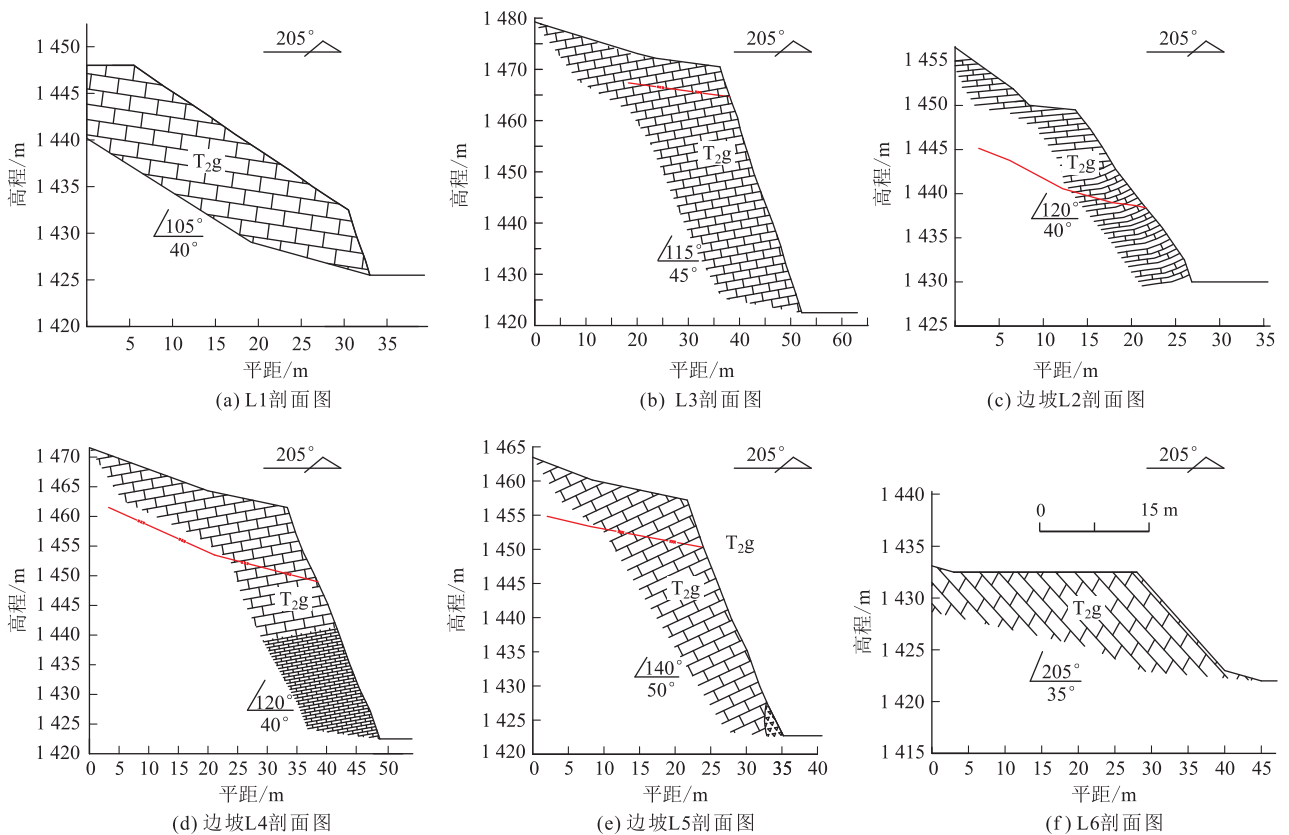


图4 边坡不同部位剖面图

2 极限平衡法边坡稳定性分析

2.1 岩体参数的确定

由于未进行岩体参数的现场大剪切试验,本次

岩体参数取值主要采用格吉(M. Georgi)法对室内岩块试验进行折减和 Hoek-Brown 强度准则进行综合取值,各岩组所采用的岩体参数见表1。

表 1 边坡岩体力学参数综合取值

岩组	密度 ρ /g · cm ⁻³	粘聚力 c /MPa	内摩擦角 φ /°	变形模量 E_m /MPa
I ₁ :强风化中厚层灰岩较软弱岩组	2.73	0.06	13.28	1.0
I ₂ :强风化薄层灰岩较软弱岩组		0.05	11.91	0.9
II:薄层状灰岩坚硬岩组		0.18	28	3.65
III:中厚层状灰岩坚硬岩组	2.75	0.18	29	4.1
IV:中厚层状灰岩较坚硬岩组		0.18	28	4.1

2.2 各岩组段边坡稳定性计算

如图 4 所示,L1、L2、L3、L4、L5 和 L6 为边坡各岩组不同部位的典型计算剖面位置。由于研究边坡整体为斜交坡,受断层的影响,岩体较为破碎,稳定性不受岩层面控制,且未发现其他贯通性控制结构面,可将边坡等效为均质节理化岩体边坡。因此,在边坡整体稳定性方法的选择上,采用理正软件中的 Bishop 法和 GeoStudio 数值模拟方法进行最危险滑移面自动搜索和稳定性计算,并以两者中取小值为原则,作为边坡永久治理依据。

工况按照天然、地震(本地区地震设防烈度为Ⅶ度,设计地震基本加速度为 0.15 g)和暴雨(裂隙饱

表 2 3 种工况下边坡的稳定系数

工况	位置	稳定性系数		综合判定
		Bishop 法	GeoStudio	
天然	L1	1.25	1.18	稳定
	L2	1.18	1.16	稳定
	L3	1.23	1.26	稳定
	L4	1.30	1.26	稳定
	L5	1.33	1.36	稳定
	L6	1.72	1.63	稳定
地震	L1	1.06	1.10	基本稳定
	L2	0.93	1.03	不稳定
	L3	0.96	1.07	不稳定
	L4	0.97	1.11	不稳定
	L5	0.95	1.14	不稳定
	L6	1.24	1.36	稳定
暴雨	L1	1.13	1.05	基本稳定
	L2	1.01	0.91	不稳定
	L3	1.03	0.90	不稳定
	L4	1.10	0.94	不稳定
	L5	1.11	0.96	不稳定
	L6	1.29	1.22	稳定

从以上计算结果可以看出,天然工况下边坡整体稳定性系数最小值为 1.16,处于稳定状态,在暴雨工况和地震工况下边坡整体稳定性系数最小值分

别为 0.9 和 0.93,边坡均处于不稳定状态。因此,对边坡进行治理是十分必要的。

3 边坡稳定性数值模拟分析

3.1 边坡模型及监测点布置

边坡为岩质建筑高边坡,边坡坡度为 75°~85°,自然坡度以 10°~25°为主,岩层倾角为 35°~50°,边坡总长约为 460 m,宽为 50 m,高为 5~50 m,由边坡地形地貌图可知边坡可分为两段(即 L1~L2 剖面段与 L3~L6 剖面段),因此为了使模型更加直观清晰,研究边坡分为两个建模模型。模型材料为灰岩岩体,所采用的岩体物理力学参数由表 1 及式(1)计算可得表 3。模型几何形状分别见图 5、图 6。

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)}; G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (1)$$

式中,K 为体积模量;G 为剪切模量;E 为变形模量。

L1~L2 剖面段模型网格模型尺寸 240 m×80 m×60 m,合计划分 39 429 个单元。L3~L6 剖面段模型网格模型尺寸 350 m×100 m×100 m,合计划分 129 834 个单元。

表 3 L1~L2 剖面段岩体参数

岩组	ρ /kg · m ⁻³	K/GPa	G/GPa	ν
I ₁	2 730	2.75	0.42	0.35
I ₂		2.75	0.41	0.32
II		2.76	1.43	0.28
III	2 750	3.25	1.59	0.29
IV		3.09	1.51	0.29

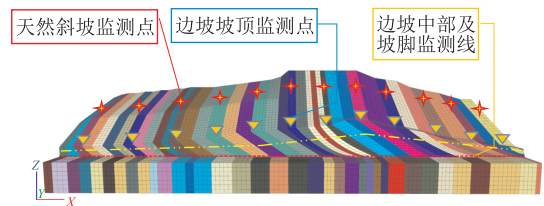


图 5 L1~L2 剖面段边坡模型

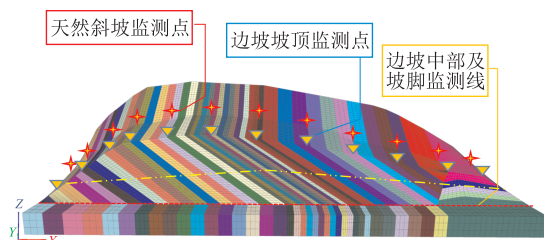


图 6 L3~L6 剖面段边坡模型

为了更加直观分析边坡稳定性,两个模型沿边

坡走向及倾向分别共布置了 48 个监测点,研究其不同工况下的位移、应力、应变的变化情况。即在自然斜坡、边坡后缘、边坡中部、边坡坡脚处设置监测点,具体位置详情分别见上图 5 及图 6。

研究边坡为 Mohr-Coulomb 本构模型;边坡接触面性质为岩层面,其本构关系为库仑剪切关系。

由于研究边坡在天然状态下大部分趋于稳定,因此以天然+裂隙水工况条件作为边坡稳定性数值模拟背景。模拟计算时对模型底部和两侧施加静力约束条件,即约束模型底面水平向和垂直向速度以及模型侧面水平向速度。

3.2 模拟数据分析

3.2.1 整体稳定性及位移矢量分析

通过强度折减法计算边坡稳定的安全系数,结果见下图 7、图 8。由图可知,天然+裂隙水工况下边坡整体安全系数分别为 1.051、1.09,处于基本稳定状态,该结果相比于极限平衡法计算结果和 geostudio 计算结果偏大的原因主要为三维数值模型边界条件的影响;但整体位移矢量箭头可清晰体现边坡潜在滑动方向即向边坡临空面产生滑动。

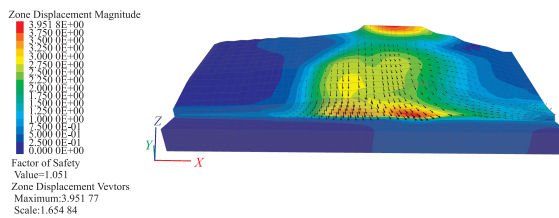


图 7 L1~L2 剖面段边坡稳定性及位移矢量图

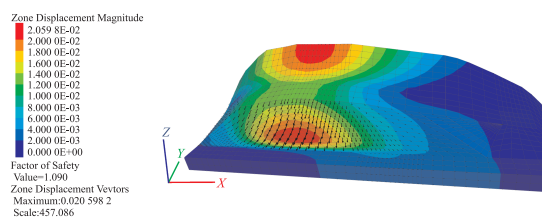


图 8 L3~L6 剖面段边坡稳定性及位移矢量图

3.2.2 监测点水平位移

通过监测点在 Y 方向上位移变化曲线可以看出(图 9、图 10):监测点均沿 Y 轴负方向滑移,其中 L1~L2 剖面段边坡最大位移为发育褶皱岩层的坡顶及中部位置,位移量为 -68 cm,表明褶皱岩层处于应力集中区,最容易在 Y 方向发生变形破坏;边坡 L3~L6 剖面段坡高最高处坡顶左侧为最大位移部位,位移量达到 -31.5 cm,说明坡高是造成边坡失稳破坏的主要原因。

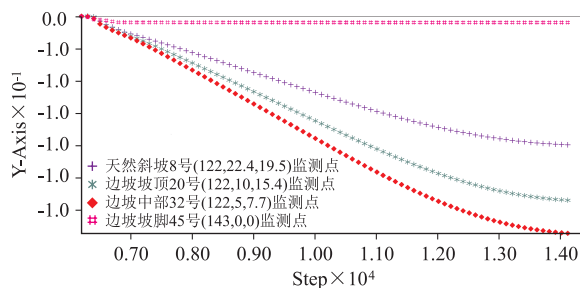


图 9 L1~L2 剖面段边坡 Y 方向监测点位移时程

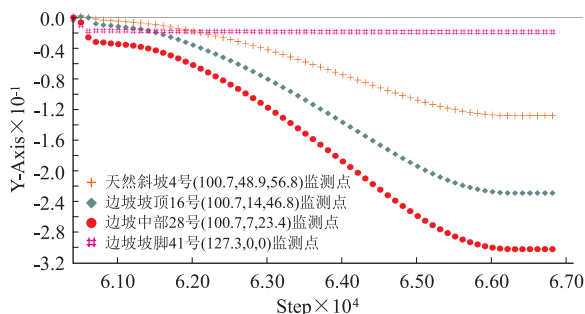


图 10 L3~L6 剖面段边坡 Y 方向监测点位移时程

3.2.3 边坡塑性区对比分析

图 11、图 12 中塑性破坏分为剪切破坏 (shear) 与拉伸破坏 (tension), 其中 n 表示该区域的应力就在屈服面上, 现在已经破坏; p 表示该区域在模型计算初期已发生破坏, 现在应力已经降到屈服面以下位置。因此 n 为判断模型是否正发生塑性破坏的条件, 若两块 n 塑性区贯通, 则表明该区域正产生塑性破坏。

通过边坡塑性区云图可以看出: L1~L2 剖面段塑性贯通区为褶皱岩层发育位置, 其破坏方式为剪切破坏; 由塑性区整体云图无法直观看出边坡 L3~L6 剖面段是否存在贯通塑性区, 因此对其最高坡高部位进行切片观测, 见图 13。

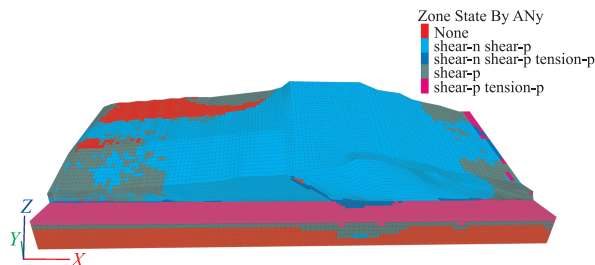


图 11 L1~L2 剖面段边坡塑性区图

由切片后的塑性区云图可以看出, 边坡 L3~L6 剖面段坡高最高部位以及其中部位置形成了贯通的剪切破坏区, 这一现象符合该剖面段 Bishop 法和 GeoStudio 软件的计算结论。

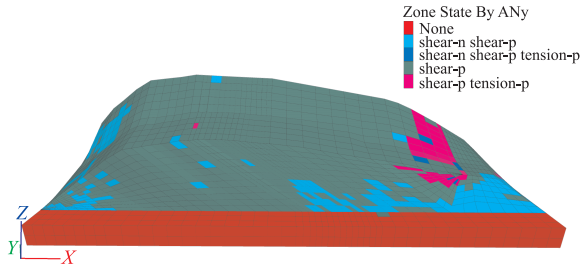


图 12 L3~L6 剖面段边坡塑性区图

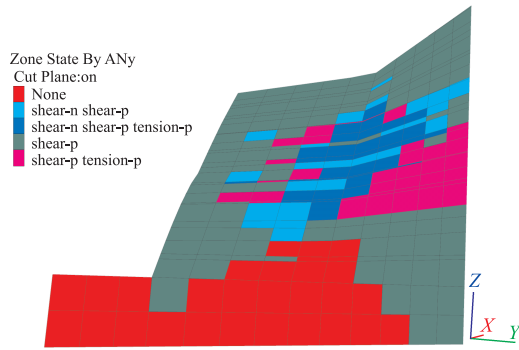


图 13 边坡 L3~L6 剖面段切片塑性云图

4 边坡治理措施

依据稳定性计算结果,将边坡防治划分为 3 个区段(图 14),其中重点防治区 1 段,长度 312 m,该段坡高大,局部受构造影响节理裂隙发育,岩组主要为强风化灰岩较软弱岩组(强风化中厚层灰岩较软弱岩组(I₁)和强风化薄层灰岩较软弱岩组(I₂))、薄层状灰岩坚硬岩组(II)和中厚层状灰岩坚硬岩组(III),天然工况下均处于稳定状态,暴雨和地震工况下处于不稳定状态,主要防治措施为锚索框格梁+被动防护网;次重点防治区 1 段,合计长度 125 m,该段坡高不大,岩组主要为中厚层状灰岩较坚硬岩组(IV),岩体节理裂隙发育,天然工况下均处于稳定状态,暴雨和地震工况下处于基本稳定状态,主要防治措施为清危+框格锚杆;一般防治区 1 段,合计长度 42 m,该段坡高不大,岩组主要为中厚层状灰岩较坚硬岩组(IV),岩体相对完整,天然工况、暴雨和地震工况下均处于稳定状态,主要防治措施为清危+被动防护网。

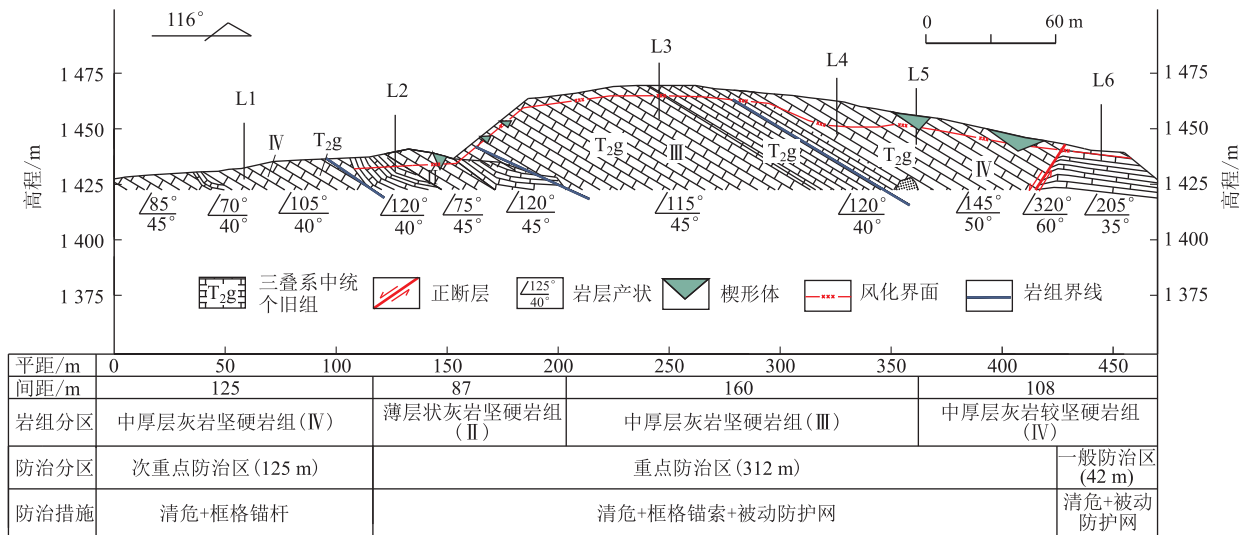


图 14 边坡防治分区及防治措施建议图

5 结论

论文以个旧重金属污染整治示范试验区场地开挖边坡为例,对边坡进行了岩组划分,利用室内岩块试验强度折减法 and Hoek-Brown 强度准则对边坡各岩组的岩体参数进行了确定,并对各岩组段的边坡稳定性用极限平衡法和数值模拟进行了计算,提出了针对性的防治措施。主要结论如下:

(1) Bishop 法和 GeoStudio 软件计算结果表明,天然工况下边坡整体稳定性系数最小值为

1.16,处于稳定状态,在暴雨工况和地震工况下边坡整体稳定性系数最小值分别为 0.9 和 0.93,边坡均处于不稳定状态。因此,对边坡进行治理是十分必要的。

(2) FLAC3D 数值模拟结果表明,天然+裂隙水工况下研究边坡整体处于基本稳定状态,其中发育有褶皱岩层部位最容易发生变形破坏。同时表明,边坡高度也是影响边坡稳定性的一个重要因素,边坡坡高越高,其整体稳定性越低,且最容易发生剪切破坏部位为边坡中部及坡脚位置。

(3) 依据稳定性计算结果,将边坡防治划分为3个区段:重点防治区,主要防治措施为锚索框格梁+被动防护网;次重点防治区,主要防治措施为清危+框格锚杆;一般防治区,主要防治措施为清危+被动防护网。为边坡的整体防治提供了思路。

参考文献

- [1] 何江达,张林.天生桥一级水电站厂区岩质坡稳定性研究[J].红水河,1996,15(4):28-33.
- [2] 吕金昕,巨能攀,郑达,等.金沙江某水电站引水洞出口边坡稳定性分析[J].地质灾害与环境保护,2010,21(1):58-62.
- [3] 张凤,聂德新.某水电站坝后开挖边坡破坏边界分析[J].地质灾害与环境保护,2015,26(3):61-64.
- [4] 张骞棋,陈渤,郑斌,等.不同开挖坡率下鄂西某公路岩质高陡边坡稳定性研究[J].地质灾害与环境保护,2021,32(3):47-51.
- [5] 张登项,许强.基于底摩擦试验的锦屏一级水电站左岸岩石高边坡变形机制研究[J].地质灾害与环境保护,2008,19(1):71-75+87.
- [6] 王芳其,李天斌,梁虹.西南某水电站拱肩槽高边坡稳定性的二维有限元分析[J].地质灾害与环境保护,2002,13(2):80-84.
- [7] 黄登梧.公路边坡防治与治理[J].建材与装饰,2013,(40):138-139.
- [8] 张玉芳,齐明柱,马华.深圳市边坡病害及其防治[J].岩石力学与工程学报,2006,25(Z2):3412-3421.
- [9] Gerzi M. On the valuation of strength and resistance condition of the rock in natural rock mass[A]. In: Proceedings of the Second Congress of the International Society for Rock Mechanics[C]. Belgrade; Yugoslavian Science Press, 1970. 365-374.
- [10] 杨立建,王小元,施晓文,等.岩质边坡岩体抗剪强度参数选取方法[J].产业与科技论坛,2020,19(5):69-71.
- [11] 朱玺玺,陈从新,夏开宗.基于 Hoek-Brown 准则的岩体力学参数确定方法[J].长江科学院院报,2015,32(9):111-117.

作者简介: 陈磊(1984—),男,云南人,工程师,主要从事岩土工程勘察、地质灾害防治的相关工作。E-mail:77119544@qq.com

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

(上接第 12 页)

- [11] 中国地质调查局.泥石流灾害防治工程设计规范(DZ/T0239-200)[S].北京:中华人民共和国地质矿产行业标准,2018.
- [12] Meyer-Peter, E. and R. muller. Formula for Bed Load

Transport[C]. Proc. 2nd. meeting, Intern. Assoc. Hyd. Res., 1948.

- [13] 陈德明,王兆印,何耘.泥石流人汇对河流影响的实验研究[J].泥沙研究,2002,(3):22-28.

作者简介: 董晓叶(1989—),女,水工环工程师,主要从事地质灾害防治相关工作。E-mail:442447029@qq.com