

基于地形和地质特征的露天边坡稳定性分析及其防治对策研究

文 / 刘克昭 河北钢铁集团矿山设计有限公司

陈彦亭 河北钢铁集团矿山设计有限公司

摘要: 为了研究露天矿边坡稳定性问题及其防治对策,以柏泉铁矿区的边坡作为工程案例。利用有限元软件,建立了该矿区边坡的二维数值模型,并采用Bishop法与Janbu算法对三个不同剖面的边坡进行了稳定性分析。分析涵盖了静态条件、暴雨以及地震等多种荷载工况,以准确评估边坡在不同环境下的安全系数。研究表明:在暴雨与地震荷载条件下,边坡的安全稳定性系数值偏低,表明存在潜在的滑坡风险。针对这一问题,本文进一步提出了一系列针对性的安全防护措施,旨在提高边坡的稳定性,降低滑坡等地质灾害的发生概率。这些措施为依托项目提供了科学的参考依据,对于保障矿区的安全生产和环境保护具有重要意义。

关键词: 边坡稳定性; Bishop法; Janbu法; 安全稳定性系数; 防治对策

【DOI】 10.12254/j.issn.2096-6539.2025.02.125

引言

随着我国经济的快速发展和基础设施建设的不断推进,露天采矿、道路建设等工程日益增多,边坡稳定性问题日益突出。露天边坡稳定性分析及其防治对策研究对于确保工程安全和环境保护具有重要意义。针对露天边坡的稳定性,国内不少的专家学者开展了研究,例如,张研等人^[1]为了快速、准确地预测边坡稳定性,其提出一种基于天牛须优化算法的边坡稳定性分析模型。基于该模型,建立了边坡影响因素与稳定性的非线性映射关系,并将该模型应用于京-新高速公路的边坡稳定性分析;成永飞等人^[2]采用理论与数值模拟的方法研究了重庆涪陵区某土质边坡汛期失稳的过程,其认为该边坡在降雨条件下极易在土层界面处产生“下高上低”的短暂饱和区,并在此基础上针对二维边坡渗流模型进行了影响因素分析;谢盛青等人^[3]以某铁矿山正在进行生态恢复项目为研究背景,研究其尾矿砂与胶凝材料混合的方法对露天采矿形成的坑洞进行填充,其提出为了保障边坡和充填站的安全性,建议对充填站附近的边坡实施增强监测;杜昌华等人^[4]以西南地区某露天矿山为研究对象,采用极限平衡分析与数值模拟技术分析了在渗流作用下的边坡孔隙水压力及渗流场的变化,并探讨了这些因素对边坡稳定性的影响,研究表明:降雨的渗透作用会改变边坡内的孔隙水压力,降低岩土体的力学性能,并改变渗流场的分布,这些因素共同作用导致边坡稳定性的下降;刘泉等人^[5]以某矿山废石场边坡为案例,运用Geostudio软件进行了数值模拟,探究了在Ⅷ级地震影响下,该废石场边坡质点的位移和应变的时程变化,以及安全系数的时程动态。研究结果显示,在地震作用的期间,该废石场边坡的最大质点位移和最大质点应变分别仅为8厘米和0.0025,而最小安全系数为1.65,这超过了规定的最低安全系数标准1.10,说明该废石场边坡在地震作用下保持稳定。

本文以河北钢铁集团矿业有限公司承德柏泉铁矿露

天采矿场边坡为研究对象,采用有限元软件建立二维边坡模型,分别求解了其边坡在静力荷载下与地震动力荷载下的安全稳定性系数,以期能为工程项目的建设提供参考借鉴作用。

一、工程依托项目

(一) 工程简介

河北钢铁集团矿业有限公司承德柏泉铁矿(以下简称“柏泉铁矿”)位于河北省承德市平泉市平泉镇二道河子村,距离平泉市城区5公里处,隶属于平泉市平泉镇管辖。柏泉铁矿露天采场北部564m以上边坡为风化岩质边坡,岩性为片麻岩,边坡高度约12m~24m,分4个开采台阶,564m~588m已并段,总体坡度约60°,由于上部岩石风化严重,局部产生滑塌。从现场踏勘来看,边坡区域结构面主要分三种情况。治理区西部区域揭露边坡风化严重,边坡裸露出部分岩石风化壳,由于靠界边坡较陡,部分风化破碎严重的岩体已出现局部滑坡,岩层层理不明显,台阶宽度不足10m,治理区西部岩体如1所示。



图1 矿区内治理区边坡岩体图

(二) 边坡地质条件

对矿区场地地貌单元属低山山地,场地地势总体东高西低、北高南低,绝对标高介于563.53-603.61m之间,地势起伏较大。根据工程勘察揭露,在最大勘探深度30.0m范围内,拟建场地地基土层主要由杂填土和岩石组成。根据地基土类别及其工程地质性质,共分为4层,即主要分别为杂填土、全风化花岗岩片麻岩、强风化

花岗片麻岩与风化花岗片麻岩。

(三) 边坡安全等级

根据《承德柏泉铁矿深部扩界采矿工程初步设计》及采场现状实测图，采场坑底标高为420m，治理区域最终边坡高为度180m，按照《非煤露天矿边坡工程技术规范》(GB51016-2014)，边坡危害等级 二级，边坡安全等级为二级，采场剩余服务年限5年左右，故本工程设计标准按矿山5年考虑。

二、边坡安全稳定性数值模型计算

(一) 计算参数的选取

参考《中国地震动参数区划图》(GB 18306—2015)附录C，该场地抗震设防烈度为6度，设计基本地震加速度值为0.05g(第三组)。同时依据《承德柏泉

铁矿采场北侧边坡防护治理工程地质勘察报告(详细勘察)》、现场踏勘、工程类比、相关经验综合确定，各种岩体的物理力学参数，见表1所示。

对于暴雨工况下，假设坡体处于饱和状态，考虑岩土体力学参数的劣化，根据已有的工程经验，将重度在天然状态的基上加1kN/m³。

(二) 计算方法与计算工况

对现已形成的边坡采用极限平衡法进行计算分析。治理区边坡西部564m以上区域整体边坡破坏模式为圆形破坏，1-1剖面 and 2-2剖面采用Bishop法进行极限平衡计算，治理区边坡东部岩层为顺倾，边坡破坏模式为平面破坏、折线形破坏，3-3剖面采用Janbu法进行极限平衡计算。另外计算工况见表2所示。

表1 岩土体物理力学计算参数

土层名称	平均厚度 (m)	天然密度 (kg/m ³)	弹性模量 (Mpa)	泊松比	黏聚力 (kPa)	内摩擦角 (°)
杂填土	4.0	1800	22	0.34	2	15
全风化花岗片麻岩	13.5	2000	62.3	0.32	30	25
强风化花岗片麻岩	11.2	2200	105.2	0.3	50	40
中风化花岗片麻岩	20	2400	500	0.28	60	45

表2 工况计算一览

工况名称	工况内容说明
现状天然工况	该区域工程勘察 564m 台阶钻孔深度 30.0m 内未见地下水。故本次边坡分析确定区域边坡计算现状天然工况，即自重荷载。
现状暴雨工况	现状暴雨工况下，把暴雨导致的岩体劣化因素加入到计算条件中(根据已有的工程经验，将重度在天然状态的基上加 1kN/m ³)，分别对 3 组剖面的稳定性进行分析。
地震工况	根据规范中的抗震设防烈度等规定，该区域抗震设防烈度为 6 度，基本地震加速度值为 0.05g，设计特征周期为 0.45s，地震分组为第三组。可确定综合水平地震系数取 0.05。针对该场地工程地质条件确定动载条件，即自重荷载 + 地震力。

本次边坡稳定性评价中有关安全系数的限值在参考《非煤露天矿边坡工程技术规范》(GB51016-2014)、《露天矿山岩质边坡工程设计规范》(T/CSRME009-2021)、《建筑边坡工程技术规范》(GB50330-2013)和《滑坡防治工程设计与施工技术规范》(DZ/T0219-2006)基础上，结合本工程的地质条件、边坡尺度、边坡工程安全等级，确定适宜本工程的安全系数限值。现状天然工况条件：Fs≥1.2；暴雨工

况条件：Fs≥1.15；地震工况条件：Fs≥1.1。

(三) 数值计算结果

对上述断面建立模型，并采用表1的岩土体物理力学参数进行数值计算，分别求得564m以上区域整体边坡分别进行天然工况、暴雨工况和地震工况的稳定性分析，其中，三个断面的安全稳定性系数结果见表2所示，另外，限于文章篇幅，本文仅给出1-1剖面边坡的安全稳定系数计算云图见图2所示。

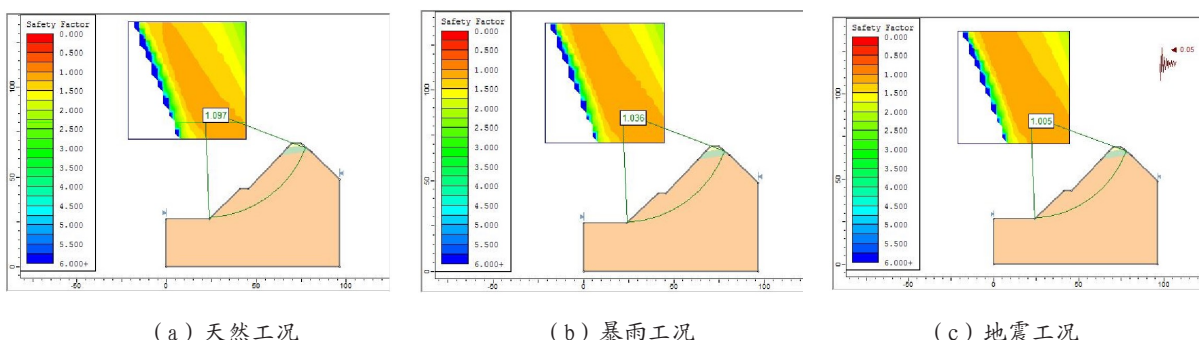


图2 1-1剖面边坡稳定性计算云图

表 2 边坡稳定性计算结果统计表

序号	剖面	计算方法	天然工况	暴雨工况	地震工况
1	1-1	Bishop 法	1.097	1.036	1.005
2	2-2	Bishop 法	1.192	1.18	1.087
3	3-3	Janbu 法	1.171	1.13	1.087

通过表2与图2可知，边坡稳定性计算结果表明：治理范围内564m以上台阶边坡，因结构面存在，在其天然工况条件下，边坡稳定性安全系数小于安全限值；暴雨工况条件下，1-1剖面和3-3剖面边坡稳定性安全系数小于安全限值；地震工况条件下，边坡稳定性安全系数小于安全限值。需对台阶边坡进行加固，提高其稳定性。

三、边坡安全稳定性防护措施

(一) 治理思路

本次边坡防护治理范围为564m水平及以上区域边坡，首先对600m水平以上松散边坡岩体进行削坡清理，降低边坡高度，对588~600m台阶和564m~588m台阶削坡放缓坡面角；其次根据柏泉采场北部治理区边坡的岩体风化、破碎程度和岩层倾向情况，对削坡后的治理区采用分区治理的方式，治理区分为 I、II、III治理区。其中，I治理区岩体风化破碎严重，采用锚杆挂网喷射混凝土治理；II治理区岩体较为完整，主要采用锚杆挂网喷射混凝土治理；III治理区边坡岩体破碎且倾角较陡，采用锚索+锚杆+挂网喷射混凝土治理。

(二) 治理措施

1. 削坡及人工清理平整边坡

因岩层产状与边坡坡向相同且小于边坡坡角（边坡坡角约为60°，岩层倾角约为46°），需对边坡进行削坡扩帮清理，在现有地形条件下尽可能的降低台阶坡面角。对600m水平以上松散边坡岩体进行削坡清理，降低边坡高度，对588~600m台阶和564m~588m台阶削坡放缓坡面角，588~600m台阶坡面角控制在40°，564m~588m东部台阶坡面角控制在40°~45°。

2. 采用支护结构的形式进行加固边坡稳定性

I治理区对削坡后坡面进行喷锚网支护，坡面上部布置3排3m 全长黏结锚杆，锚杆采用φ28 HRB400热轧带肋钢筋制作，锚杆间距 3m。588m坡面挂网喷射混凝土，喷射C20混凝土厚度10cm，喷射混凝土钢筋网需与全长黏结锚杆端头连接固定以增强护面结构的整体稳定性能。

II治理区采用喷锚网支护，坡面上部布置3排9m全长黏结锚杆，锚杆采用φ28 HRB400热轧带肋钢筋制作，锚杆间距3m。564m坡面挂网喷射混凝土，喷射C20混凝土厚度10cm。喷射混凝土钢筋网需与全长黏结锚杆

端头连接固定以增强护面结构的整体稳定性能。喷射混凝土面层每隔20~25m设2cm宽伸缩缝，缝内填塞沥青麻筋；面层埋设φ75PVC泄水管，间距3m×3m梅花型布置。

III治理区为岩质边坡，边坡削坡后进行锚索+锚杆支护，坡面挂网喷护混凝土。坡面上部布置2排9m全长黏结锚杆，全长黏结锚杆采用φ28、HRB400螺纹钢制作锚杆间距3m；锚杆下部布置5排预应力锚索，锚索垂直间距5m，锚索水平间距4m，锚索布置详见边坡立面图。锚索纵向采用钢筋混凝土梁连接，纵向梁截面尺寸为400mm×400mm，C30钢筋混凝土现浇。

结束语

本文以柏泉铁矿区的边坡为工程研究背景，借助有限元软件建立其边坡的二维模型，分别计算了三个不同剖面边坡的静力、暴雨与地震荷载工况下的安全稳定性系数。其次，基于求解出的安全稳定性系数值较低，本文给出了该依托项目的安全防护措施。其研究内容为依托工程项目起到了借鉴与参考的作用。

参考文献

[1] 张研, 唐北昌, 孟庆鹏. 基于天牛须优化算法的相关向量机边坡稳定性分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2024, 18(05): 1-8

[2] 成永飞, 李云. 降雨条件下上覆强透土层边坡稳定性分析[J]. 中国水运(下半月), 2024, 24(05): 155-157.

[3] 谢盛青. 充填站荷载作用下露天坑边坡稳定性分析[J]. 中国矿山工程, 2024, 53(02): 31-38.

[4] 杜昌华, 宋景辉, 李蕊, 等. 露天煤矿含断层顺倾边坡渗流与稳定性分析[J]. 露天采矿技术, 2024, 39(02): 51-55.

[5] 刘泉, 王晨. 地震动力响应下某矿山排土场边坡稳定性分析[J]. 有色金属(矿山部分), 2024, 76(02): 76-79.

作者简介: 刘克昭(1986.11), 男, 汉, 硕士研究生, 工学硕士, 高级工程师, 主要研究方向: 从事结构工程设计及工业建筑设计研究。

基金项目: 河北省重点研发计划项目(22375403D)