文章编号:1674-2869(2025)04-0461-06

露天矿排土场边坡稳定性分析与滑坡防治

聂 正[1,2,3],张电吉*[1,2],周昌育[1],蒋琴琴[1],柳 锐[1]
1. 武汉工程大学资源与安全工程学院,湖北 武汉 430074;
2. 磷资源开发利用教育部工程研究中心(武汉工程大学),湖北 武汉 430074;
3. 深部金属矿智能开采与装备全国重点实验室(东北大学),辽宁 沈阳 110819

摘 要:露天矿排土场的边坡安全是矿山日常生产的保障。以某露天矿排土场为研究对象,选取了4处典型剖面,采用数值模拟的方法,计算了自然工况和降雨工况下4处剖面边坡的稳定性,计算结果:表明降雨工况下4处边坡安全系数均降低了约40%,且降雨时一处剖面边坡已经处于不稳定状态。从孔隙水压力、土体自重的角度分析了降雨对边坡的影响,决定对该处边坡采取锚杆支护和截排水设施结合的治理措施,并对加固后的边坡进行数值模拟,计算得到自然工况下边坡的安全系数从1.22提升到了2.03,提升了约66%;降雨工况下边坡的最小安全系数从0.83提升到了1.37,相比于未采取治理措施升高了约60%,无论是自然工况还是降雨工况下,边坡的安全性均显著提高。

关键词:露天矿排土场;边坡稳定性;数值模拟;边坡治理
中图分类号:TU452;TV139.16 **文献标识码**:A **DOI**:10.19843/j.cnki.CN42-1779/TQ.202305024

Analysis of slope stability and prevention of landslide in open-pit mine dump

NIE Zheng[1,2,3], *ZHANG Dianji*[*1,2], *ZHOU Changyu*[1], *JIANG Qinqin*[1], *LIU Rui*[1]
1. School of Resources and Safety Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China;
2. Engineering Research Center of Phosphorus Resources Development and Utilization (Wuhan Institute of Technology), Ministry of Education, Wuhan 430074, China;
3. State Key Laboratory of Intelligent Deep Metal Mining and Equipment (Northeastern University), Shenyang 110819, China

Abstract: Slope safety of open-pit mine dump is a guarantee of daily mine production. Taking an open-pit mine dump as the research object, we selected four typical profile slopes, and calculated the stability of the four profile slopes under natural and rainfall conditions by numerical simulation. The calculation results showed that the safety factors of all four slopes reduce by about 40% under rainfall conditions, and one profile slope is already in an unstable state during rainfall. The influences of rainfall on the slope were analyzed from the perspectives of pore water pressure and soil body weight, and the slope stability was controlled by adopting a combination of anchor support and drainage facilities. Numerical simulation was carried out on the reinforced slope, and it was found that the safety factor of the slope under natural working conditions is improved from 1.22 to 2.03 with an increase of about 66%. The minimum safety factor of slope under rainfall conditions increases from 0.83 to 1.37, which is about 60% higher than that without treatment measures. The safety of slope is greatly improved under both natural and rainfall conditions.

Keywords: open-pit mine dump; slope stability; numerical simulation; slope treatment

收稿日期:2023-05-29
基金项目:武汉工程大学第十四届研究生教育创新基金(CX2022593)
作者简介:聂 正,博士研究生。Email:2581378760@qq.com
***通信作者**:张电吉,博士,教授。Email:dianjizhang@wit.edu.cn
引文格式:聂正,张电吉,周昌育,等.露天矿排土场边坡稳定性分析与滑坡防治[J].武汉工程大学学报,2025,47(4):461-466.

2023年2月22日，内蒙古自治区阿拉善盟阿拉善左旗新井煤业有限公司露天煤矿发生大面积滑坡坍塌，造成了极大的经济损失和人员伤亡[1]。由于边坡失稳带来的灾害严重威胁了人民的生命财产安全，因此边坡稳定性一直是岩土工程界关注的重要课题[2-3]。

与自然形成的天然边坡不同，露天矿排土场由矿山生产的废弃物堆积而成，其上堆积的矿渣多为松散体。因此排土场的稳定性与堆放矿渣的强度、渗透性以及堆放方式等因素息息相关[4-5]。与天然的边坡或其他类型人工边坡相比，影响排土场稳定性的因素更为复杂，研究难度也更大。为了防止排土场失稳导致矿山出现严重的安全问题，近年来国内外学者对此做了大量研究。Nguyen等[6]以波兰一矿山排土场为例，分析了降雨影响下排土场边坡的稳定性，给出了土钉结合钢网加固边坡的方法并证明了其合理性；刘金龙[7]利用数值软件对改建后排土场的稳定性进行模拟分析，探究了排土场改建后的安全性；Lin[8]以紫金山露天矿排土场为例，利用强度折减法得到排土场边坡稳定性的安全系数；陈光木[9]利用数值软件对软弱基底排土场边坡在降雨工况下进行稳定性分析，为软弱基底边坡稳定性分析提供了一套较为成熟的范例。由于不同矿山废弃物的力学特性以及堆放方式等因素的不同，每个露天矿排土场的稳定性分析的方法也不同，因此有必要对每个露天矿山排土场进行单独分析。本文以某露天矿排土场为研究对象，利用数值软件对其稳定性进行分析，并考虑降雨工况对排土场稳定性的影响，最后给出合理的边坡治理方案。

1 工程概况

该矿区最高海拔标高1 502.5 m；最低海拔标高1 170.0 m。排土场形成时间不长，场内植被稀少，周边植被较多。目前排土场仍在继续堆积弃土，排土场现状顶部最高台段高程为1 260.0 m。

排土场充水来源主要为大气降水、地表径流以及地下水入渗。矿区历年最大日暴雨量为146 mm，排土场形成后，矿坑被松散碎石土充填，填土高程上升到1 260 m，破坏了原地表的有利径流排泄条件。根据现场工程地质测绘成果，将排土场弃料划分为3个区段：[1 260~1 250 m)区段（上部矿渣）、[1 250~1230 m)区段（中部矿渣）、1 230 m及以下区段（下部矿渣）。在排土场1 250~1 230 m平台东侧曾发生过局部崩塌，该处边坡坡面较陡，崩塌体长13.0 m，高9.0 m，厚度7.0 m。局部崩塌的原因是该排土场由于土体较松散，抗剪强度低，且边坡较陡，受重力作用，在坡顶形成许多拉张裂缝。暴雨时，雨水通过裂缝进入土体，土体的抗剪强度进一步降低，最终导致滑坡的发生。

2 力学指标及边界条件的确定

2.1 岩土层力学指标

排弃物及地基岩土的力学参数指标由室内试验及现场试验确定。现场试验是结合现场条件进行的原位试验，比较符合现场实际情况；而室内试验所用的重塑土样不能完全反映现场实际情况，因此，重度、抗剪强度等指标主要依据现场试验统计结果，同时参考室内试验统计结果。

重度参数按野外大体积重度试验取值，通过现场踏勘，在排土场各台段分别进行了排弃物料的大体积重度试验，每个台段各选取6组试样进行测试，各组平均值作为重度指标。

本排土场的排弃物矿渣力学性质类似于无黏性砂土，故抗剪强度参数中内摩擦角按野外试验的天然休止角取值，黏聚力取值为0。在排土场每个区段各选取具有代表性的剖面，分别测出30组现状边坡天然状态下边坡坡角，取平均值作为内摩擦角指标。

此外，排土场基底主要为第四系残坡积粉质黏土，呈硬塑至坚硬状，其力学强度较高，与排土场稳定有关的基底介质条件和环境工程地质条件较好。其力学参数也由现场原位试验确定。

结合室内试验及现场试验，各岩土层物理力学指标如表1所示。

表1 排土场各土层力学参数

Table 1 Mechanical parameters of each soil layer in waste dump

地层名称	标高 / m	容重 /（kN/m³）		黏聚力 / kPa		内摩擦角 /（°）	
		天然	饱和	天然	饱和	天然	饱和
上部矿渣	[1 260~1 250）	20.0	21.7	0	0	30.0	30.0
中部矿渣	[1 250~1 230）	17.5	20.4	0	0	37.0	28.0
下部矿渣	1 230及以下	17.7	19.8	0	0	33.0	25.0
粉质黏土（Q_4）		14.4	17.3	28.0	25.2	24.2	21.8

2.2　渗流边界条件

大量的研究证明，滑坡的发生多是由降雨引起的[10-12]，而经过地质条件勘探以及区域地震资料等可以判断，影响排土场稳定性的主要原因是降雨。因此，对排土场稳定性的分析考虑自然工况和降雨工况2种情况。由室内渗透试验得出的矿渣饱和渗透系数如表2所示。

现有边坡渗流研究表明[13-15]：降雨强度小于表土的最大入渗能力时降雨将全部入渗；降雨强度大于表土的最大入渗能力时雨水只能部分入渗。根据区域气象资料可知，研究区最大日降雨量为146 mm（约为1.7×10^{-6} m/s），表土的饱和渗透系数约为5.5×10^{-5} m/s，因此降雨将全部入渗，故模型顶部定流量边界的流量Q=1.7×10^{-6} m/s。由于排土场下伏岩土体基本为不透水层，故模型底部边界设置为不透水边界。各剖面地下水位线的平均高程分别为1 140.0、1 180.0、1 210.0、1 205.0 m，模型左右两侧地下水位线以下饱和部分设为定水头边界，地下水位线以上部分设为零流量边界。

表2　各土层饱和渗透系数

Table 2　Saturated permeability coefficients of each soil layer

地层名称	标高 / m	饱和渗透系数 /（m/s）
上部矿渣	[1 260~1 250）	5.5×10^{-5}
中部矿渣	[1 250~1 230）	8.1×10^{-5}
下部矿渣	1 230及以下	4.2×10^{-5}
粉质黏土（Q4）	基底	3.0×10^{-5}

3　数值模拟

3.1　模型建立与计算结果

本文所研究的排土场地基倾角较缓，平均28°，且基底是第四系残坡积粉质黏土，其力学强度较高，在地质勘探中未发现地基有软弱夹层，综合分析本排土场破坏形式为排土场内部圆弧破坏。为反映不同方向上的边坡稳定性，选取4条典型剖面（1-1′、2-2′、3-3′、4-4′）进行计算分析，4条剖面的具体布置如图1所示。根据排土场闭坑后的地质特征，结合排土场弃料的堆积特征与现场工程地质测绘成果，构建的排土场边坡地质模型与网格划分如图2所示。

对上述4个边坡进行自然工况与降雨工况下的稳定性计算，得出边坡内潜在的最危险滑面与对应的安全系数，如图3所示。

对排土场边坡稳定性评价标准K_s取为1.20，由计算结果得知：自然工况下排土场边坡各典型

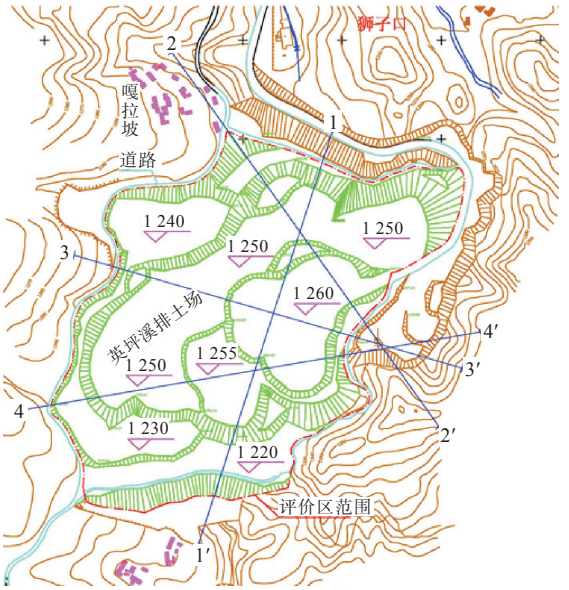

图1　排土场边坡分析剖面布置图

Fig. 1　Layout plan for slope analysis of waste dump

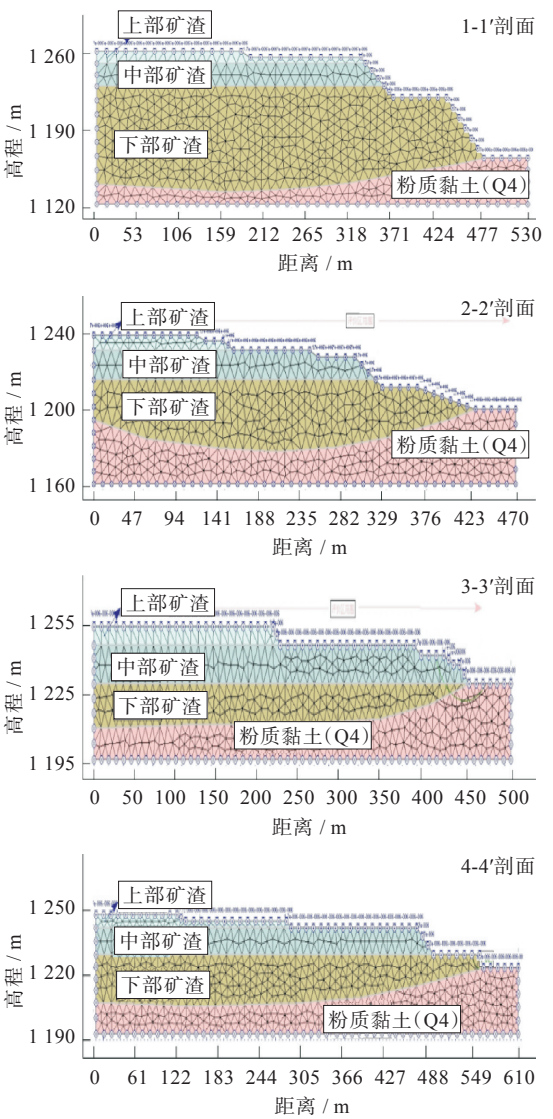

图2　各剖面模型及网格划分

Fig. 2　Slope models and grid division for each profile

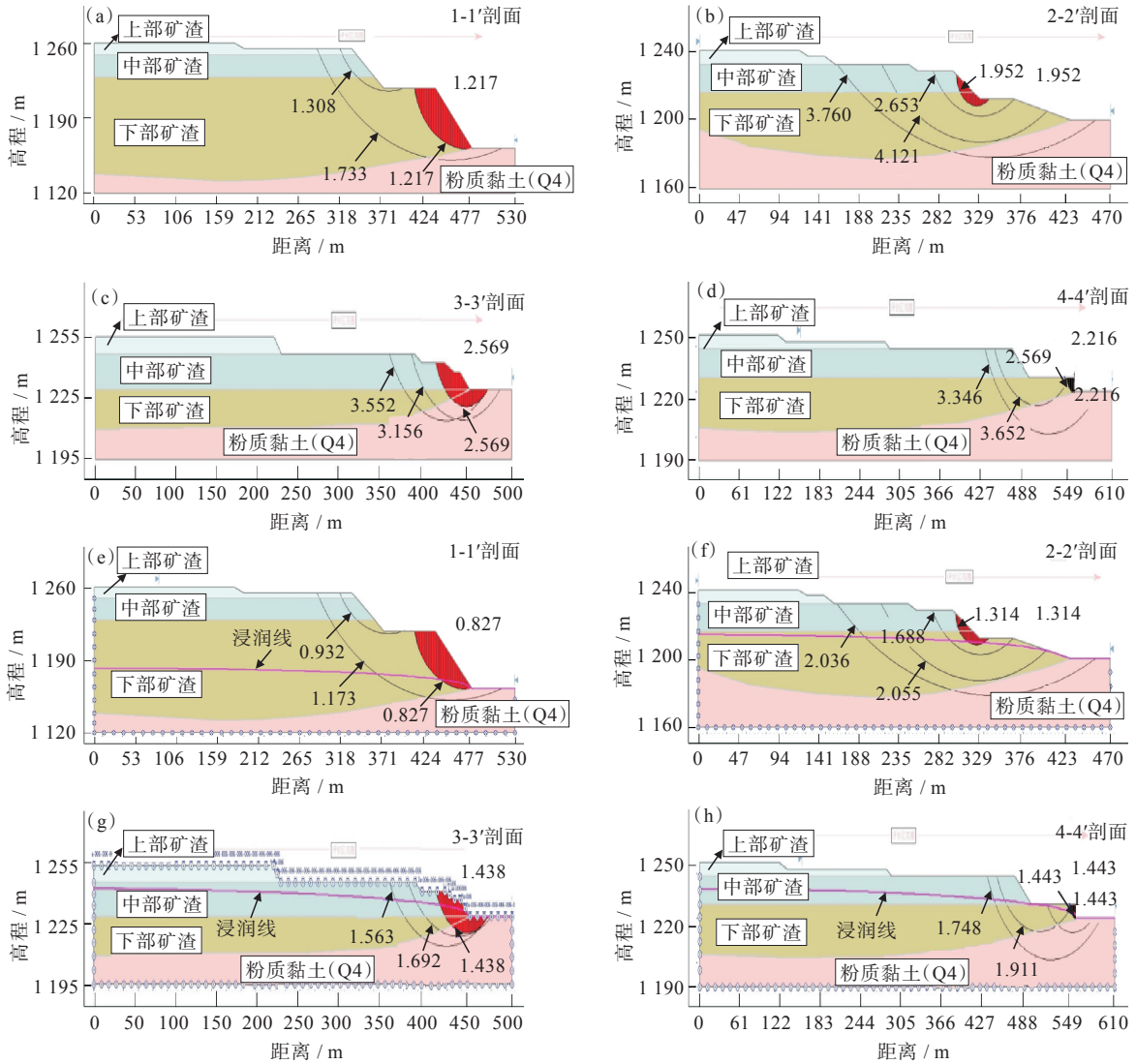

图3 各剖面潜在最危险滑动面及安全系数:(a–d)自然工况,(e–h)降雨工况

Fig. 3 Most dangerous sliding surface and safety factor of each profile slope:(a–d) natural conditions,(e–h)rainfall conditions

计算剖面的稳定性系数均大于1.20,处于稳定状态;降雨工况下1-1′剖面的稳定性系数小于1.00,处于不稳定状态,而2-2′、3-3′、4-4′剖面处于稳定状态。

以安全系数1.20作为评价标准,对各剖面潜在滑动面最小安全系数及边坡稳定状态评价整理如表3所示。

表3 各剖面潜在滑动面最小安全系数

Table 3 Minimum safety factor of each profile

剖面	安全系数		稳定状态
	自然工况	降雨工况	
1-1′	1.217	0.827	不稳定
2-2′	1.962	1.314	稳定
3-3′	2.569	1.438	稳定
4-4′	2.216	1.443	稳定

3.2 计算结果分析

从4个剖面的计算结果可以得知,降雨很大程度上降低了边坡的安全系数,且1-1′剖面边坡在降雨工况下处于不稳定状态。因此以1-1′剖面为例,分析降雨使边坡安全系数降低的原因。

根据太沙基有效应力原理[16]可知,孔隙水压力的增加会降低岩土体的有效应力。在边坡内选取5个节点作为研究对象,选取节点位置及各节点孔隙水压力随时间变化如图4所示(降雨时间为24 h)。

由图4可以得知,降雨开始(或发生)时,边坡内孔隙水压力显著上升,随着降雨的继续,孔隙水压力呈逐渐上升趋势;在降雨24 h后,边坡内孔隙水压力较初始状态时的孔隙水压力有明显的上升。

随着边坡内孔隙水压力的升高,边坡岩土体的有效应力不断降低,边坡整体稳定性随之降低。此外,随着降雨的发生,边坡内含水率提高,使得边坡岩土体的自重增加,这也一定程度上降低了边坡安全系数;同时,水会对岩土体的抗剪强度指

标产生“弱化现象”，使得边坡的整体强度降低，这也是导致边坡失稳的一大因素。

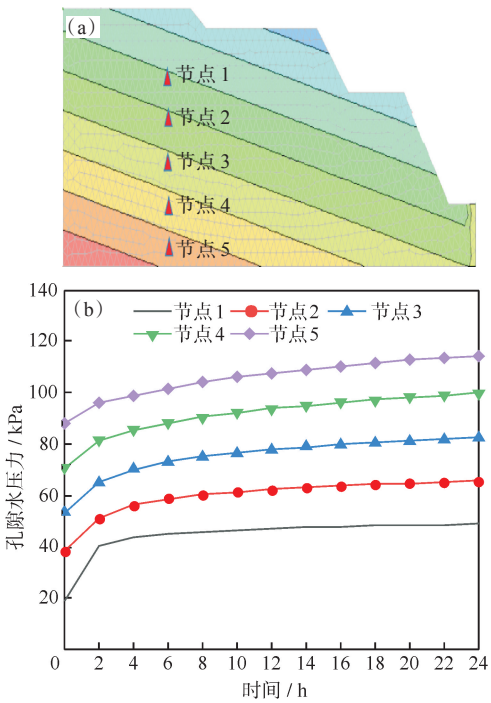

图4　选取节点孔隙水压力随时间变化图：(a)5个节点位置，(b)各节点孔隙水压力随时间变化

Fig. 4　Changes of pore water pressure of selected nodes over time: (a)position of 5 nodes, (b)variation of pore water pressure at each node over time

4　治理措施及效果分析

由以上分析可知，水对边坡稳定性存在系统性负面效应，导致边坡失稳风险显著提升，因此，设置排水设施是一种合理有效的边坡治理措施。在排土场1-1′剖面，采取锚杆支护的治理方式，并设置了截排水系统，边坡目前处于稳定状态。综合考虑边坡滑移面位置及经济等因素，确定的锚杆设置情况见图5，锚杆的参数见表4。

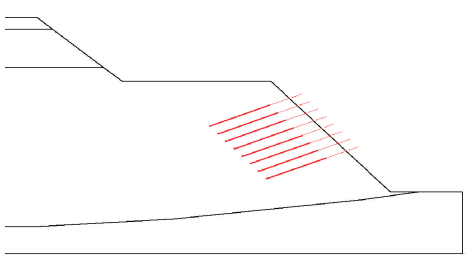

图5　锚杆的布置情况

Fig. 5　Arrangement of anchor rods

表4　锚杆参数

Table 4　Parameters of anchor rods

弹性模量 / GPa	抗拔强度 / MPa	直径 / mm	抗拉强度 / MPa
200	360	25	360

锚固段长度30 m，自由端长度10 m，锚杆安设角为20°，锚固间距为5 m。

在滑移面顶部平台布设截水沟，将水流旁引，截水沟结构见图6。

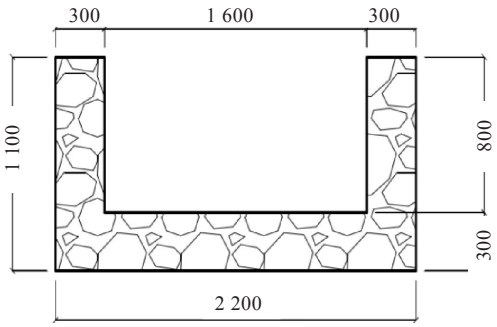

图6　截水沟结构图（单位：mm）

Fig. 6　Structural diagram of intercepting ditch (unit: mm)

已加固过的1-1′剖面边坡稳定性的计算结果如图7所示（降雨工况，降雨时长为24 h）。由图7可知，在降雨的初期边坡安全系数显著降低，而后在降雨结束前呈略微递减趋势，但由于采取了锚杆支护以及设置了排水系统，边坡的最小安全系数为1.37，较未采取抗滑措施时提高了约60%，且采取抗滑措施后安全系数大于1.20，表明采取的

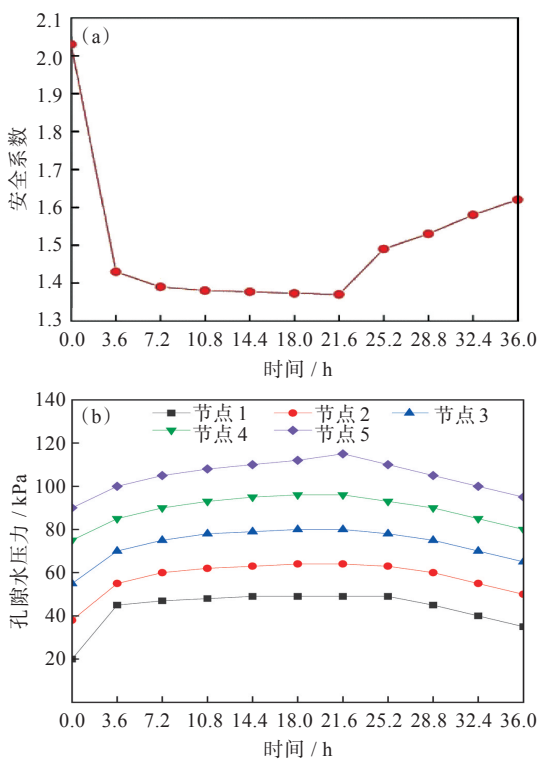

图7　治理后1-1′剖面计算结果：(a)安全系数随时间的变化，(b)孔隙水压力随时间的变化

Fig. 7　Calculation results of 1-1′ profile after governance: (a)changes of safety factor over time, (b)pore water pressure changes over time

加固措施有效。此外,在降雨还未结束前边坡的安全系数略微提升,这还是由于设置了截排水系统,如图7(b)所示,在降雨结束前,边坡内的孔隙水压力已经得到降低,这与降雨未结束边坡安全系数略微提高相对应。以往排土场的排水主要依靠径流,设置排水系统后,有效地疏干边坡,提高了边坡的整体稳定性。

5 结 论

通过对排土场4处典型剖面边坡的稳定性分析可知,降雨大大降低了排土场边坡的安全系数,4处剖面边坡的安全系数均降低了约40%,且1-1′剖面在降雨工况下已经处于不稳定状态。降雨会导致边坡自重增加、弱化岩土体的抗剪强度、使坡体孔隙水压力上升而降低了岩土体的有效应力,因此降雨工况下边坡稳定性较大幅度地降低。对1-1′剖面处边坡采取锚杆支护以及截排水系统相结合的治理办法,从数值模拟的结果可以看出:治理后的1-1′剖面自然工况下边坡的安全系数从1.22提升到了2.03,提升了约66%,降雨工况下边坡的最小安全系数从0.83提升至1.37,较未治理时安全系数提高了约60%,从现场监测及数值模拟的结果表明现有的治理措施合理有效。

参考文献

[1] 新华社.习近平对内蒙古阿拉善左旗一露天煤矿坍塌事故作出重要指示要求千方百计搜救失联人员全力救治受伤人员切实维护人民群众生命财产安全和社会大局稳定李克强作出批示[EB/OL].(2023-02-22) [2023-07-05]. https://weibo. com/1699432410/MueflmRoD.

[2] 殷跃平.中国地质灾害减灾战略初步研究[J].中国地质灾害与防治学报,2004,15(2):1-8.

[3] 李元松,王玉,朱冬林,等.边坡稳定性评价方法研究现状与发展趋势[J].武汉工程大学学报,2021,43(4):428-435.

[4] 高庆,杨润基,卢许佳,等.排土场边坡不同成因及动力稳定性分析的优化设计研究[J].有色金属(矿山部分),2023,75(2):84-90.

[5] 蓝宇.基于数值模拟的露天矿排土场高陡边坡稳定性分析与治理[J].矿业研究与开发,2023,43(3):77-82.

[6] NGUYEN P M V, WRANA A, RAJWA S, et al. Slope stability numerical analysis and landslide prevention of coal mine waste dump under the impact of rainfall: a case study of Janina mine, Poland [J]. Energies, 2022, 15(21): 8311.

[7] 刘金龙.某矿露天坑改建排土场后稳定性分析及评价[J].有色金属(矿山部分),2023,75(2):125-130,148.

[8] LIN B X. Stability analysis of dump slope: taking Zijinshan open-pit mine as an example [J]. Mobile Information Systems, 2022, 2022: 9009528.

[9] 陈光木.降雨对露天矿软弱基底排土场边坡稳定性的弱化效应[J].矿业研究与开发,2022,42(12):56-62.

[10] 谭银龙,许万忠.降雨入渗对裂隙岩质边坡稳定性影响分析[J].地质灾害与环境保护,2022,33(2):78-85.

[11] 张新启,龚爱民,徐兴倩,等.考虑含水率变化影响的红黏土边坡双强度折减法研究[J].水利水电技术,2020,51(9):181-186.

[12] 李媛,孟晖,董颖,等.中国地质灾害类型及其特征:基于全国县市地质灾害调查成果分析[J].中国地质灾害与防治学报,2004,15(2):29-34.

[13] 李秀珍,何思明.基于Mein-Larson入渗模型的浅层降雨滑坡稳定性研究[J].灾害学,2015,30(2):16-20.

[14] MEIN R G, LARSON C L. Modeling infiltration during a steady rain [J]. Water Resources Research, 1973, 9(2): 384-394.

[15] 胡庆,吴益平,苗发盛,等.基于Mein-Larson入渗模型的凹形边坡稳定性分析[J].中国地质灾害与防治学报,2021,32(6):26-35.

[16] 刘杨,彭亮,祝鑫,等.降雨条件下含缓倾软弱夹层矿山高边坡稳定性分析[J].矿业研究与开发,2022,42(7):71-79.

本文编辑:苗 变