

降雨入渗条件下大型排土场边坡稳定性分析*

任军, 蔡君, 陈良

(凉山矿业股份有限公司, 四川凉山彝族自治州 615000)

摘要:为研究降雨入渗条件下排土场边坡稳定性,以某大型排土场为工程背景,通过室内土-岩散体渗透试验与直剪试验获取岩土堆积体力学参数。借助有限元软件,采用应力-渗流-边坡耦合模拟分析该排土场边坡在最大降雨量为360 mm/d,降雨时长分别为6 h、12 h、18 h与24 h条件下的排土场孔隙水压力与地下水位渗流场分布特征。研究了不同降雨时长下的安全系数时变规律,研究成果可为类似排土场的边坡稳定性评价提供参考。

关键词:排土场;稳定性;降雨时长;孔隙水压力;安全系数

0 引言

露天开采是矿产资源开采的一种主要方法,我国露天开采铁矿石产量约占铁矿石总产量的77%,有色金属占52%左右,化工矿物占70.7%左右,煤矿一直低于4%,而建筑材料近100%。排土场作为露天开采的基本工序之一,是矿山剥离废石所堆砌的场所,常位于沟谷或山坡。受降雨或地表水的浸润作用,排土场内土岩混合体的抗剪强度降低,易发生边坡失稳破坏^[1-3]。降雨量、降雨时长与降雨强度等对岩土边坡的稳定性有显著影响^[4-5]。

目前,关于降雨入渗下排土场稳定性分析已经取得了一系列成果,朱永东等^[6]通过室内相似材料试验与数值模拟方法研究了降雨条件下排土场稳定性,揭示了降雨入渗下排土场浅层滑坡的破坏特征。洪振宇等^[7-8]采用数值模拟方法研究了降雨及降雨-地震耦合工况下排土场的渗流特征与安全系数时变特征,对排土场的稳定性进行了评价。曹博等^[9]在室内三轴蠕变试验与地表沉降监测的基础上确定了相应岩土体蠕变参数,结合数值模拟建立了排土场沉降蠕变理论模型。张文飞等^[10]基于Biot固结理论构建了和尚桥铁矿内排土场边坡数值模型,研究分析了降雨强度及时长对边坡孔隙水压力的影响,确定了降雨入渗下渗流规律及稳定特征。田光等^[11]分析了排土场地下水压力分布对边坡稳定性的影响机理,并借助数值模拟方法研究了不同孔隙

水压力分布下的排土场稳定性差异及安全系数变化规律。

基于此,本文以某大型排土场为工程背景,通过室内渗透试验与土-岩散体直剪试验获取岩土堆积体渗透系数以及抗剪强度。借助有限元软件,采用应力-渗流-边坡耦合模拟分析该排土场边坡在最大降雨量为360 mm/d,降雨时长分别为6 h、12 h、18 h与24 h条件下的渗流场分布规律及其稳定性,研究成果可为类似排土场的边坡稳定性评价提供参考。

1 工程概况与等级划分

1.1 工程概况

该矿山排土场位于露天采场西南侧,目前排土区域占地面积约为0.81 km²。根据矿区资料可知,场区属中山构造剥蚀地貌,斜坡地形,地势相对较高,属于旱-半干旱区,年平均降雨量为1314.4 mm,场区未见有地表水分布,雨季时可能形成暂时性流水,对场区有一定影响。降雨强度历史最大值为12 h降雨量177 mm。区域目前地形呈斜坡状,前缘坡脚高程为1340 m,后缘平台高程约为2070 m,相对高差达730 m。排土场原始地形为斜坡,斜坡下方为冲沟,场地东北高西南低,原始地形坡度为15°~25°。排土场现堆积体四周界线较明显,平面上呈“扇形”,排土场规模较大,属于典型大型边坡,如图1所示。

* 收稿日期: 2023-01-03

作者简介: 任军(1975—),男,四川广元人,工程师,主要从事矿山开采安全方面的研究,E-mail:251079826@qq.com。

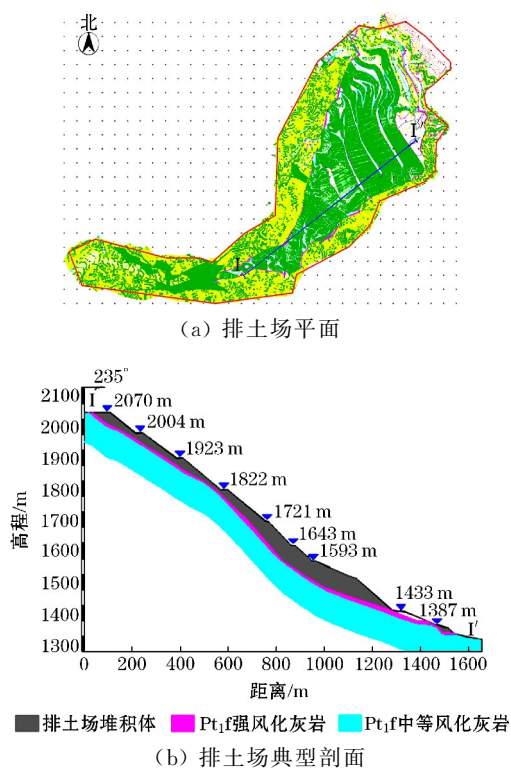


图 1 排土场平面与剖面

1.2 等级划分

根据《有色金属矿山排土场设计标准》(GB 50421—2018)第 3.3 条有以下规定。

(1) 排土场等级分级应根据单个排土场总容积和堆置高度按照表 1 的规定划分为 4 个等级。

表 1 排土场等级分级

| 等级 | 单个排土场总容积 $V/(\times 10^4 \text{ m}^3)$ | 堆置高度 H/m |
|----|--|--------------------|
| 一 | $V \geq 10\ 000$ | $H \geq 150$ |
| 二 | $2000 \leq V < 10\ 000$ | $100 \leq H < 150$ |
| 三 | $500 \leq V < 2000$ | $50 \leq H < 100$ |
| 四 | $V < 500$ | $H < 50$ |

注:排土场容积和堆置高度两者的等级差为一级时,采用高标准;两者的等级差大于一级时,采用高标准降低一级使用。

(2) 当排土场场区条件有下列情况之一时,排土场的等级应提高一级:

- a. 排土地基原地面坡度大于 24° ;
- b. 排土场基底存在工程地质、水文地质不良地段。

(3) 剥离物有下列情况之一时,排土场的等级应确定为一级:

- a. 剥离物遇水软化或剥离物含泥率大,排水不良,稳定性较差且具备形成泥石流的条件;
- b. 剥离物的溶出物具有危险、有害特性。

该排土场设计库容约为 $10\ 675 \text{ 万 m}^3$,排土场高

度为 735 m 。目前堆置高度约为 730 m ,整体坡面角最大为 27° 。因此,确定该排土场等级为一级。

2 散体力学参数确定

本次主要开展了土-岩散体室内渗透试验与直剪试验。土-岩散体渗透系数由渗透试验确定,该试验以达西定律为理论依据,根据被测土样的不同,分为常水头和变水头试验,常水头适用于粗粒土,变水头适用于细粒土。该排土场土-岩散体为粗粒土,因此,本次室内渗透试验采用常水头试验。

土-岩散体抗剪强度是指土-岩散体抵抗剪切破坏时的能力,是土-岩散体的重要力学性质之一。本次土-岩散体直剪试验采用 ZY50-5 型直剪压缩两用仪。试验时通过液压泵对样品施加不同的垂直压力,并保持上剪切盒不动。随后通过水平加荷支座拖动下剪切盒移动,进而对土-岩散体施加水平荷载,最终求得土-岩散体抗剪强度。

通过渗透试验与直剪试验测定,分别获取了该大型排土场土-岩散体渗透系数、散体内摩擦角以及黏聚力,具体见表 2。

表 2 土-岩散体力学参数

| 岩性 | 天然容重/ (kN/m^3) | 黏聚力/ kPa | 内摩擦角/ ($^\circ$) | 渗透系数/ (cm/s) |
|--------|-------------------------------------|-------------|-----------------------|-----------------------------------|
| 堆积体 | 18.4 | 33 | 34 | 1.5×10^{-2} |
| 强风化灰岩 | 24.8 | 35 | 35 | 5.0×10^{-5} |
| 中等风化灰岩 | 26.2 | 120 | 39 | 4.17×10^{-6} |

3 数值模型构建

3.1 降雨工况

根据矿区资料可知,该地区属亚热带干燥型盆地气候,具有夏季长、气温日变化大、四季分明、气候温和、多风等特点。年平均气温为 $14.3 \text{ }^\circ\text{C}$,最高气温达 $35.7 \text{ }^\circ\text{C}$,最低气温为 $-3.8 \text{ }^\circ\text{C}$,年平均降雨量为 1314.4 mm 。雨量多集中在 $5 \sim 10$ 月,年蒸发量为 $1800 \sim 2300 \text{ mm}$,降雨强度历史最大值为 12 h 降雨量 177 mm 。基于此,本次降雨工况设置最大降雨量为 $360 \text{ mm}/\text{d}$,降雨时长分别为 6 h 、 12 h 、 18 h 与 24 h 。

3.2 模型建立

根据图 1(b)中的典型剖面构建数值模型,如图 2 所示,模型自上至下分别对应该排土场剖面的堆积体、强风化灰岩以及中等风化灰岩。模型共计 3506 个单元, 3796 个节点。

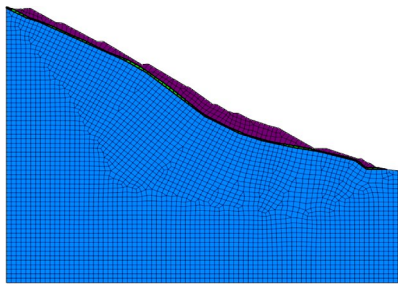


图 2 排土场数值模型

本次研究中采用固定约束边界,固定模型左右两侧、底部 x 、 y 方向和 z 方向,模型上部边界不固定,作为模型的降雨边界。

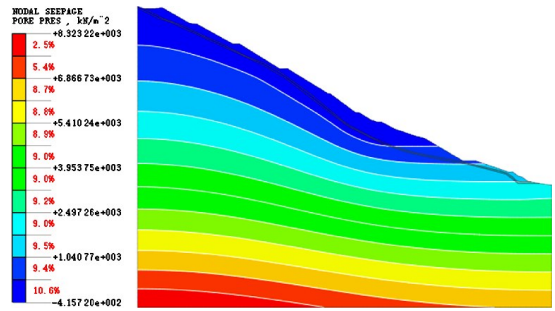
3.3 力学参数

该大型排土场的土-岩散体力学参数由室内试验及地质资料中获取,见表 2。

4 结果分析

4.1 孔隙水压力分布

采用应力-渗流-边坡耦合模拟分析可获得不同降雨时长下排土场边坡渗流场分布规律。由于篇幅限制,本文只展示了降雨 0、12 h、24 h 时段下排土场边坡孔隙水压力的分布特征,如图 3 所示。由图 3 可知,孔隙水压力随边坡深度呈线性分布。在降雨开始时,边坡表层土体最先受到影响,土体负孔隙水压力随着降雨时长不断增大,随着降雨的继续进行,直至 24 h 时,表层土体的孔隙水压力由 -680 kPa



(c) 降雨 24 h

图 3 孔隙水压力分布特征

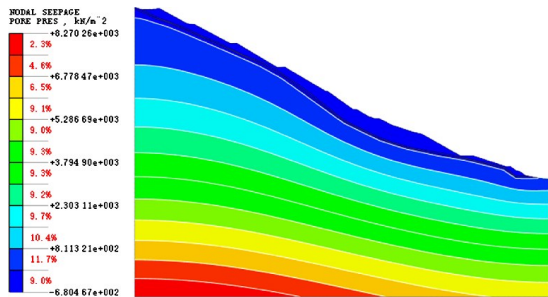
变化至 -416 kPa。这是由于雨水不断渗入土-岩散体孔隙中,改变了散体的孔隙水压力,进而对排土场边坡渗流场产生了较为明显的影响。

4.2 地下水位分布

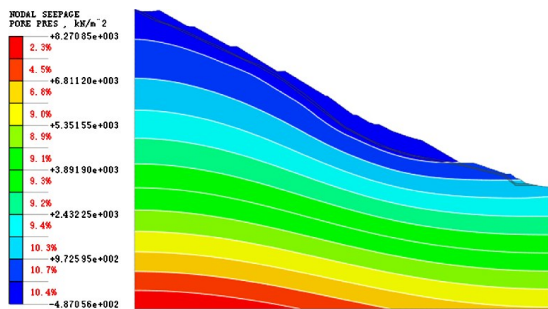
降雨 0、12 h、24 h 时段下该排土场边坡地下水位分布特征如图 4 所示。由图 4 可知,持续降雨在一定程度上改变了排土场边坡内部渗流场,随着降雨时长的增加,地下水位有随之抬升的趋势,而地下水位的抬升将对排土场边坡稳定性产生不利影响。

4.3 安全系数变化特征

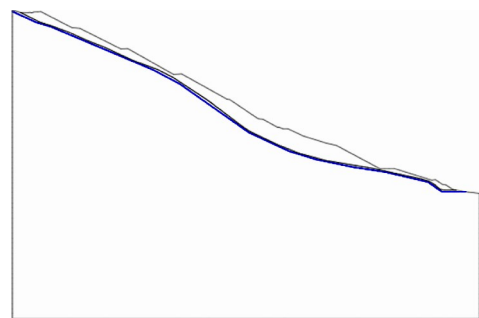
图 5 为降雨 24 h 下的排土场边坡滑面区域。由图 5 可知,排土场边坡在降雨入渗影响下,排土场滑面区域形态主要为圆弧滑动。除了局部区域有沿地基软岩层滑动外,主要沿堆排体和基岩接触面发



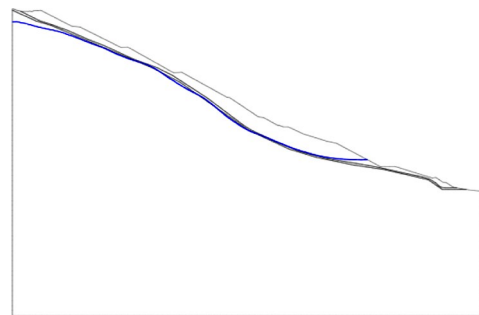
(a) 降雨 0



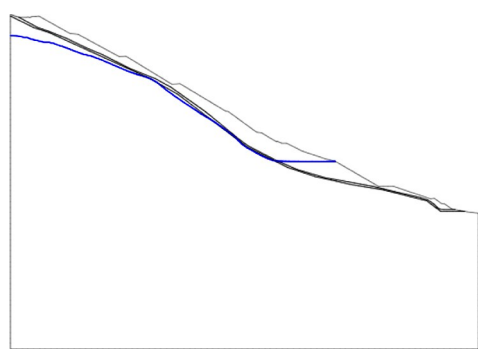
(b) 降雨 12 h



(a) 降雨 0



(b) 降雨 12 h



(c) 降雨 24 h

图 4 地下水分布特征

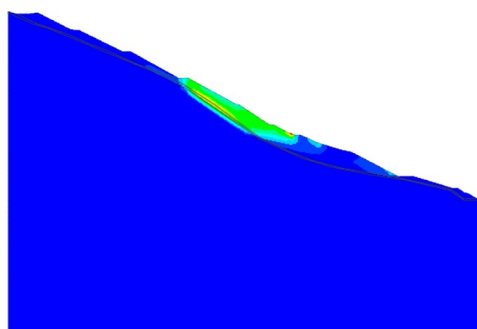


图 5 排土场边坡滑面区域

生滑动,其滑动对象为堆积体与强风化岩层,尤其以堆积体为主。

采用应力-渗流-边坡耦合模拟分析可计算获得不同降雨时长下排土场边坡安全系数,在最大降雨量为 360 mm/d,降雨时长分别为 6 h、12 h、18 h 与 24 h 条件下,该排土场边坡安全系数时程变化如图 6 所示。由图 6 可知,降雨开始 0~12 h 内,安全系数下降较为明显,这是由于雨水入渗至表层散体,引起散体抗剪强度降低,并且雨水的入渗使散体含水量增加,加大散体自重,导致边坡稳定性降低。而后在 12~24 h 内,受到表层岩土体入渗速率的限制,

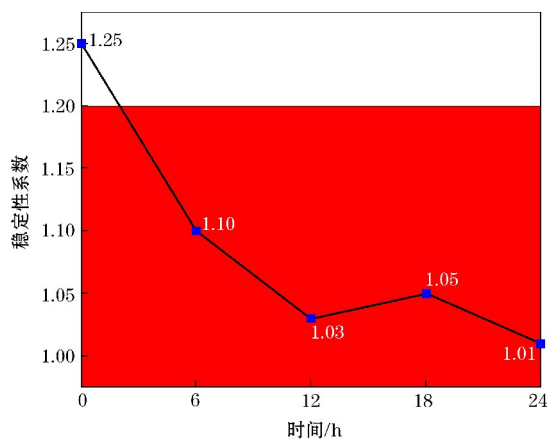


图 6 边坡安全稳定性系数变化曲线

渗入岩土体深部的雨水有限,将会继续向深部缓慢渗透,因此,安全系数下降不明显且已趋于缓和。

由前文可知,该排土场等级为一级,《有色金属矿山排土场设计标准》(GB 50421—2018)第 7.4 条有以下规定。

(1) 安全稳定性标准应根据排土场等级和计算工况确定。

(2) 自然工况条件下,排土场整体安全稳定性标准应符合表 3 的规定。计算安全系数不应小于表 3 中规定的数值。

表 3 排土场整体安全性标准

| 排土场等级 | 安全标准 |
|-------|-----------|
| 一 | 1.25~1.30 |
| 二 | 1.20~1.25 |
| 三 | 1.15~1.20 |
| 四 | 1.15 |

(3) 排土场整体安全稳定性应校核降雨工况。降雨工况下,排土场整体安全稳定性标准可在表 3 规定的基础上降低 0.05,最低安全系数不得低于 1.10。

因此,在降雨入渗下其安全系数大于 1.20 时,可认为处于稳定状态。由数值模拟结果获取到的安全系数变化可知,在最大降雨量为 360 mm/d,降雨时长为 24 h 以下时,该排土场边坡安全系数均小于 1.20,表明该大型排土场在该降雨工况下处于不稳定状态。

5 结论

(1) 降雨入渗下,土体负孔隙水压力随着降雨时长不断增大,持续降雨对排土场边坡渗流场产生了较为明显的影响。

(2) 随着降雨时长的增加,地下水位不断上升,同时降雨增加了岩土体自重,降低了土-岩散体的抗剪强度,最终导致排土场边坡稳定性降低。

(3) 该排土场属于一级排土场,在最大降雨量为 360 mm/d,降雨时长为 24 h 以下,该排土场边坡将处于不稳定状态。

参考文献:

- [1] 关晓峰,崔旋,徐云富.不同雨型下降雨入渗及其对排土场边坡稳定性影响研究[J].有色金属(矿山部分),2020,72(5):51-54.
- [2] 董法,郭忠林,柳群荣,等.降雨条件下边坡稳定性评价方法研

- 究[J]. 化工矿物与加工, 2019, 48(8): 32-35+40.
- [3] 邓义龙. 基于非饱和土渗流理论的降雨入渗黄土边坡稳定性分析[J]. 中国勘察设计, 2020(9): 106-108.
- [4] 付宏渊, 曾铃, 蒋中明, 等. 降雨条件下公路边坡暂态饱和区发展规律[J]. 中国公路学报, 2012, 25(3): 59-64.
- [5] 王立. 多雨型下不同边坡稳定性的数值分析[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2014.
- [6] 朱永东, 王雪冬, 孙延峰, 等. 降雨条件下内排土场浅层破坏与运动特征[J]. 煤炭学报, 2022, 47(12): 4431-4442.
- [7] 洪振宇, 何玉琼, 李明, 等. 不同降雨条件非饱和渗流作用下大型弃土场稳定性分析[J]. 矿业研究与开发, 2021, 41(5): 101-106.
- [8] 洪振宇, 何玉琼, 李明, 等. 降雨-地震耦合作用下某大型弃渣场稳定性分析[J]. 矿业研究与开发, 2021, 41(6): 43-47.
- [9] 曹博, 黄云龙, 张院生, 等. 承载河道下高大内排土场沉降蠕变三维反演分析[J]. 安全与环境学报, 2022, 22(3): 1306-1314.
- [10] 张文飞, 任奋华, 郭奇峰, 等. 降雨作用下和尚桥铁矿内排土场边坡稳定性分析[J]. 金属矿山, 2022(5): 205-211.
- [11] 田光, 韩流, 舒继森, 等. 孔隙水压力重分布对排土场边坡稳定性影响规律研究[J]. 煤矿安全, 2021, 52(8): 239-242+247.