

降雨条件下某露天矿不同荷载作用的边坡稳定性分析*

刘骏¹, 张千俊², 郭沙², 王文通²

(1. 中国黄金集团有限公司, 北京 100011;

2. 西南科技大学 环境与资源学院, 四川 绵阳市 621000)

摘要:降雨一直是引发滑坡灾害的主要因素之一,在历年来的滑坡事故案例中,80%以上的滑坡都有降雨伴随。以西北某露天矿边坡为研究对象,开展室内试验获取各岩层在天然状态和饱水状态下的岩石力学参数,运用拟静力法和流固耦合原理进行数值模拟,对边坡应力应变的分布变化进行了研究,分析塑性区分布状态、关键点位移的变化趋势,模拟计算确定3种不同工况(降雨、降雨+爆破、降雨+地震)下终了边坡稳定性的安全系数,判断边坡的稳定性,并分析了降雨导致地下水升降对边坡稳定性的影响。结果表明,该露天矿初步设计的边坡稳定性较好,符合相关规范,为该矿山后续的边坡开挖施工提供了相关理论依据。

关键词:露天矿边坡;降雨;边坡稳定性;流固耦合;安全系数

0 引言

随着我国采矿行业的飞速发展,露天矿山的数量也在急剧增多,而边坡在施工工程中经常发生坍塌、滑坡等灾害,因此,边坡的稳定性也成为众多学者研究的焦点。降雨作为诱发边坡失稳的主要因素^[1-2],是众人研究边坡稳定性的主要方向。为保证边坡施工的安全性,对降雨条件下矿山不同荷载作用的边坡稳定性进行安全评价是十分必要的。

目前,国内外已有诸多学者开展了降雨条件下的边坡稳定性分析。左韵琳等^[3]分析了某滑坡在自然状态和降雨条件下的边坡稳定性,并针对边坡特点提出了防范措施;郑开欢、曾强等^[4-5]分析了降雨之后岩体内不同时间段的渗流饱水状态和瞬态孔隙水压力分布,利用孔压与应力耦合作用,研究了降雨后滑坡的发生机理;毛雪松、付宏渊等^[6-7]通过数值模拟软件,对降雨入渗条件下边坡稳定性安全系数的下降情况进行了研究;姚奇等^[8]结合物理试验和数值模拟等手段研究德兴铜矿在强降雨和开挖卸荷耦合作用下边坡的变形演化规律和演化机制;李晓莲等^[9]以碎石土边坡为例,研究了降雨、地震及降雨和地震耦合作用等不同极限工况下的边坡稳定性,

发现降雨会先快速降低、后缓慢降低边坡稳定性,地震会拉裂坡顶,坡脚出现剪切破坏,边坡岩体含水量的增加会极大地加强地震对边坡稳定性的影响。

本文运用快速拉格朗日法(FLAC法)计算边坡典型剖面开挖完成后在不同工况下的安全系数,研究其应力应变分布规律,确定3种工况下边坡安全系数和边坡稳定性,并分析地下水位升降对边坡稳定性的影响,为后续矿山的正常施工提供理论依据。

1 工程地质概况

西北某矿区地表出露地层如下。

(1) 第四系土层(Q₄): 第四系残坡积层(Q^{4el+dl}),主要分布于矿区西北侧林山湾区域。

(2) 二叠系(P): 二叠系中统茅口组(P_{2m})。

灰岩: 浅灰—灰色中至厚层状粉晶灰岩,夹杂少量泥质灰岩、方解石团块,显水平层理,具缝合线构造,钻探深度范围内按其风化程度可分为强风化泥岩和中等风化泥岩2个亚层。

强风化灰岩(③-1): 岩芯较破碎,呈柱状及短柱状,岩质较软。

中等风化灰岩(③-2): 岩质相对较硬,在场地上不均匀分布破碎夹层及透镜体,岩芯呈短柱状、长柱状,该层厚度大,未揭穿。

* 收稿日期: 2023-05-14

作者简介: 刘骏(1990—),男,江西吉安人,硕士,工程师,主要从事矿山安全管理研究,E-mail:liuq9816@163.com。

矿山受降雨影响,易导致边坡失稳,故在本次模拟开始之前进行了一系列室内试验,获得各岩层在天然状态和饱水状态下的岩石力学参数,最终得到的岩石力学参数见表1。

表1 岩石力学参数

	密度/(t/m ³) 天然(饱水)	黏聚力 <i>c</i> /MPa 天然(饱水)	内摩擦角 φ /($^{\circ}$) 天然(饱水)	抗拉强度 σ_t /MPa 天然(饱水)	抗压强度 σ_c /MPa 天然(饱水)	弹性模量 <i>E</i> /GPa 天然(饱水)	泊松比 ν 天然(饱水)
强风化	2.41(2.48)	0.19(0.17)	27.45(24.09)	0.021(0.016)	0.34(0.27)	1.99(1.33)	0.24(0.26)
中风化(较完整)	2.65(2.69)	0.48(0.42)	36.13(33.64)	0.201(0.143)	2.76(1.98)	8.26(5.52)	0.23(0.24)
中风化(完整)	2.68(2.70)	0.56(0.48)	38.27(35.75)	0.315(0.224)	4.08(2.93)	11.01(7.37)	0.23(0.24)
微风化	2.75(2.76)	0.89(0.76)	45.40(42.54)	0.81(0.549)	9.61(6.64)	20.26(13.38)	0.21(0.22)

体积模量与剪切模量依据式(1)、式(2)进行换算:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (1)$$

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

式中, G 为体积模量,MPa; E 为弹性模量,MPa; ν 为泊松比; K 为剪切模量,MPa。

2 模型建立

2.1 计算剖面的选取

为了能更准确地反映出该矿区的稳定性,选取典型剖面1-1进行分析(以下简称剖面1),剖面1边坡高度为195 m,岩层分布较为均匀,剖面的具体位置如图1所示。

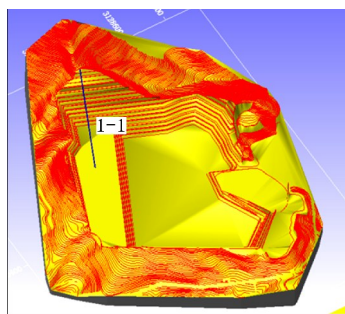


图1 剖面位置

2.2 基本假定

(1) 本次计算采用摩尔-库伦本构模型,各岩层为各向同性的弹塑性材料。

(2) 根据地质勘查报告及现场调研情况,矿区内地层单一,呈单斜产出,矿区附近并无断层、褶皱等构造。因此,忽略断层、节理裂隙等不连续面对边坡稳定性的影响^[10]。

(3) 采用拟静力法分析边坡在爆破与地震作用下的效应。

(4) 边界条件:固定其左、右边界在 X 方向上的位移,约束底部边界,其余边界采用自由边界,只考虑重力场的影响,不考虑其他外力场的影响。

2.3 本构模型

数值模拟采用的本构模型为:

$$f_s = \sigma_1 - \sigma_3 \frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi} - 2c \sqrt{\frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi}} \quad (3)$$

式中, σ_1 为最大主应力,MPa; σ_3 为最小主应力,MPa; c 为材料黏聚力,MPa; φ 为材料内摩擦角, $^{\circ}$; f_s 为破坏判断系数。

2.4 数值建模

潘永坚等^[11]通过研究,在边坡模型尺寸的选取上给了一定的建议,为了减弱边界对模拟效果的影响,最终所采用的模型大小如图2所示。本文以Rhino辅助FLAC3D完成建模,使用GRIDDLE插件对边坡周围的网格进行加密处理,并输出成为FLAC3D网格,最终的计算模型如图3所示。

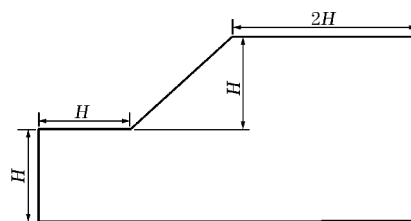


图2 模型尺寸

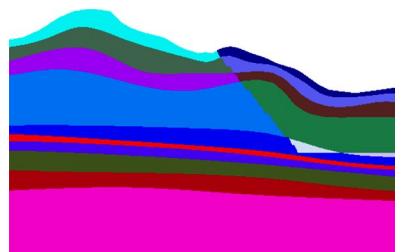


图3 开挖前模型

2.5 FLAC3D 流固耦合

当使用FLAC3D进行流固耦合分析时,往往需

要耗费大量的计算时间,但在工程计算中,可以采用不同程度的耦合方法来进行分析,从而减少计算时间^[12]。在进行方法选择时,主要是由以下3个主要因素来决定。

(1) 问题的力学时标与矿山特征时间之间的比值。

(2) 施加扰动的属性。

(3) 流固刚度与土骨架的刚度比,称为流固刚度比 R_k 。

本次模拟采用第3种透水边界来实现渗流过程,首先关闭力学计算打开渗流计算,形成稳定的孔压场之后关闭渗流计算,打开力学计算,从而实现一种假耦合计算模型。为减少形成稳定渗流场的时间,本次试验采用的参数见表2,固定模型左、右边界水头高度,坡体表面固定为零孔压边界,最终生成的稳态渗流场如图4所示。

表2 流体参数

孔隙率	渗透系数/ (cm/s)	流体模量/ GPa	流体密度/ (t/m ³)	流体抗拉强度/ MPa	比奥 系数
0.5	1e-9	2e15	1000	0	1

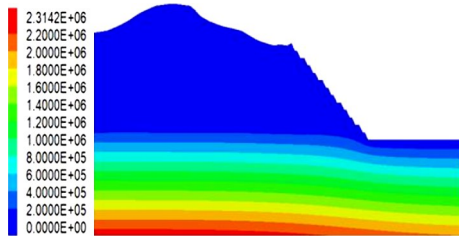


图4 稳态渗流场

3 模拟结果分析

3.1 开挖结果分析

由图5可以看出,边坡的位移主要集中在坡顶的强风化区域,最大值为15.5 cm,变形量较小。边坡表面也产生了小范围位移,这主要是由于开挖卸荷过程中引起了岩体的应力释放,以及地下水位的变化,产生了小部分塑性回弹。

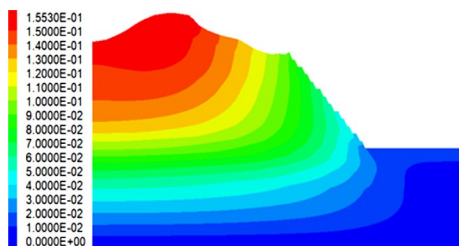


图5 边坡主位移

为了分析坡体应力应变分布规律,在临近坡面侧的坡体中沿不同高程设置监测点,采集坡体的应力应变数据,处理后的结果如图6、图7所示。

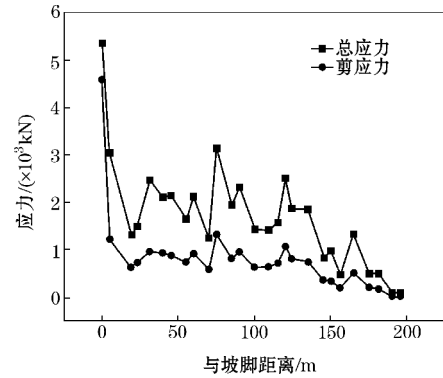


图6 应力分布

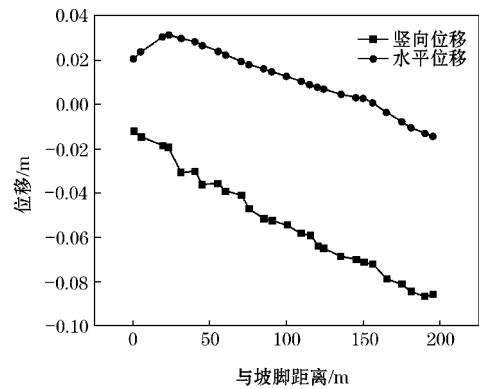


图7 位移分布

由图6可知,在边坡坡面总应力与剪应力分布规律基本一致,呈不规则分布,在坡脚处应力最大,在台阶脚处的应力较大,而在台阶面上的应力较小,随着高程的逐渐增大,应力逐渐趋近于零。由图7可知,水平位移在坡面呈先增加后减小的趋势,最大位移变形发生在坡脚第二台阶中风化较完整处,位移量为3.17 cm,表明此处可能发生了剪切破坏,需要进行加固处理。这主要是由于该台阶处为岩石破碎带,力学性能较差。竖向位移最大为9 cm,发生在坡顶强风化灰岩位置,此处位移较大,可能发生局部破坏,随着高程的逐渐增加,位移呈缓慢增大的趋势,符合一般边坡变形规律。

3.2 终了边坡稳定性分析

本文按以下3种工况进行模拟计算:降雨(地下水)、降雨(地下水)+爆破、降雨(地下水)+地震。矿区所属的地区地震烈度为6度,通过式(4)可得矿区水平方向设计地震加速度,对于垂直方向上地震加速度,一般取值为水平设计地震加速度的2/3,爆破水平设计加速度参数通过式(5)可得,不考虑爆

破水平设计加速度。

$$F_i = \frac{\alpha_h \cdot \xi \cdot G_{Ei} \cdot \alpha_i}{g} \quad (4)$$

式中, F_i 为边坡上某质点 i 爆破震动荷载的静力等效值; α_h 为水平方向上的设计地震加速度代表值, 对设计烈度为 6, 7, 8, 9 度时, 分别取 $0.05g$ 、 $0.1g$ ($0.15g$)、 $0.2g$ ($0.3g$) 和 $0.4g$; ξ 为效应折减系数值, 除另有规定外, 应取 0.25 ; G_{Ei} 为集中在边坡上某质点 i 的重力作用值; α_i 为边坡上某质点 i 的地震惯性力的动态分布系数, α_i 在设计烈度为 7, 8, 9 度时, 分别取 3.0 、 2.5 、 2.0 ; g 为重力加速度, 取 9.81 m/s^2 。

$$F_i = \frac{1}{\beta_1} \frac{\alpha_i}{g} W_i \quad (5)$$

式中, β_1 为爆破作用下的动力折算系数; W_i 为边坡上第 i 条块的岩体重量; α_i 为边坡上第 i 条块岩体中爆破震动的峰值质点振动加速度; α_i/g 为爆破地震系数。

根据规范^[13], 确定该矿区露天矿边坡危害等级为 I 级, 边坡工程安全等级为 I 级, 该边坡终了开采高度为 $100 \sim 300 \text{ m}$, 边坡地质环境复杂等级为中等复杂。不同的荷载组合边坡设计安全系数推荐值见表 3。

表 3 不同荷载组合总体边坡的设计安全系数

边坡工程安全等级	边坡工程设计安全系数		
	荷载组合 I	荷载组合 II	荷载组合 III
I	1.25~1.20	1.23~1.18	1.20~1.15
II	1.20~1.15	1.18~1.13	1.15~1.10
III	1.15~1.10	1.13~1.08	1.10~1.05

注: 荷载组合 I 为降雨(地下水); 荷载组合 II 为降雨(地下水)+爆破振动力; 荷载组合 III 为降雨(地下水)+地震力。对台阶和临时性工作边坡, 允许有一定程度的破坏, 设计安全系数可适当降低。

由图 8 至图 10 可知, 剖面 1 在 3 种工况下皆满足设计要求, 且有一定的富余量, 表明该矿区边坡皆处于稳定状态, 初步设计符合相关规范。

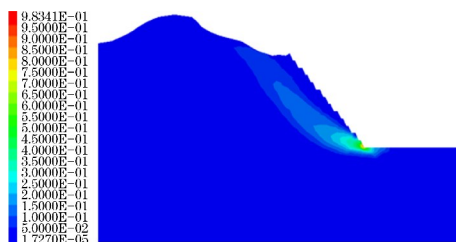


图 8 降雨工况

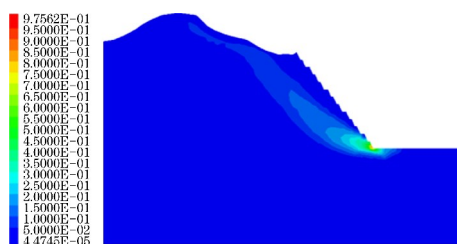


图 9 降雨+爆破工况

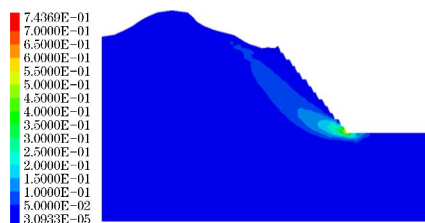


图 10 降雨+地震工况

3.3 地下水对边坡稳定性的影响

为了研究地下水位升降对边坡稳定性的影响, 通过改变地下水左边界水头高度的方法来探究地下水在不同高度下对边坡的影响大小。在天然状态下最终结果如图 11 所示(图中横坐标 0 为最低开采平面)。

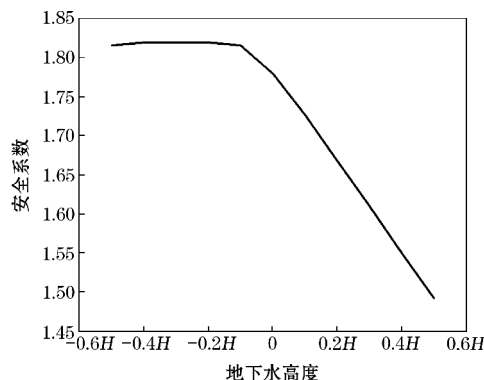


图 11 安全系数变化趋势

由图 11 可以看出, 不同地下水位对边坡稳定性造成一定影响, 其安全系数从 1.820 下降至 1.485 。通过这些数据可以说明, 当边坡内部地下水位在坡面以下时, 边坡安全系数基本稳定不变, 对边坡造成的影响并不大, 当地下水位升高至一定高度时, 边坡稳定性将会迅速降低。因此, 在实际工程中应重视地下水对边坡稳定性的影响。

4 结论

(1) 通过数值模拟手段, 探究了边坡坡面上应力应变的分布规律, 应力沿坡脚从下至上逐渐减小, 在软弱夹层及台阶脚处会出现应力集中现

象。水平位移在坡面呈先增加后减小的趋势,竖向位移随着高程的增加呈缓慢增大的趋势。

(2) 通过分析,发现软弱夹层会影响边坡的局部稳定,需在夹层处采取加固措施,防止破坏的发生。

(3) 当地下水上升至边坡坡面以上时将会对边坡稳定性造成一定的影响,在实际工程中应当重视地下水对边坡稳定性的削弱作用。

(4) 该矿区初步设计的边坡稳定性较好,符合相关规范,可为该矿区边坡开挖提供相关理论依据。

参考文献:

- [1] 王靖. 某降雨型滑坡稳定性分析及治理措施研究[J]. 建筑与预算, 2022(5): 46-48.
- [2] 储益旭, 周建伟, 白玉辉, 等. 基于 FLAC3D 的强降雨作用下临夏红层滑坡稳定性研究[J]. 甘肃科技, 2021, 37(24): 26-29.
- [3] 左韵琳, 黄东晓. 强降雨条件下滑坡稳定性分析及防治措施研究[J]. 水利技术监督, 2023(2): 223-227.
- [4] 郑开欢, 罗周全, 罗成彦, 等. 短时强降雨对排土场碎石土边坡稳定性的影响[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2016, 36(6): 39-47.
- [5] 曾强. 土体非饱和渗流特性对边坡稳定性影响[J]. 水利科学与寒区工程, 2022, 5(1): 10-14.
- [6] 付宏渊, 曾铃, 王桂尧, 等. 降雨入渗条件下软岩边坡稳定性分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(8): 2359-2365.
- [7] 吴谦, 毛雪松, 刘龙旗, 等. 某弃渣场边坡稳定性的可靠度分析[J]. 桂林理工大学学报, 2017, 37(3): 475-480.
- [8] 姚奇, 李小双, 李启航. 多变降雨入渗-开挖卸荷耦合下岩体变形特征研究[J]. 中国矿业, 2023, 32(4): 91-99.
- [9] 李晓莲, 余云燕, 陈志敏. 降雨与地震共同作用下碎石土边坡的稳定性分析[J]. 施工技术, 2015, 44(13): 64-71+101.
- [10] 刘小平. 酸性条件下石灰岩力学特性试验研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2022.
- [11] 潘永坚, 王华俊, 卿翠贵, 等. 公路边坡数值模型几何尺寸的影响分析[J]. 公路交通技术, 2021, 37(4): 13-18.
- [12] 豆换换, 张彦洪, 田泽润, 等. 降雨对黄土边坡稳定性的影响研究[J]. 水利规划与设计, 2023(4): 95-98.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 非煤露天矿边坡工程技术规范: GB 51016—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.