

基于 COMSOL 的露天边坡流固耦合 稳定性分析及加固对策

COMSOL Stability Analysis of Open-pit Slope Fluid-structure Interaction and Control Measures

周磊, 李琦, 章璐玮(安徽马钢矿业资源集团姑山矿业有限公司, 安徽 当涂 243111)

摘要:以安徽省某铁矿露天边坡监测项目为依托,采用勘探和模拟相结合来研究露天边坡稳定性,并提出治理措施。基于强度折减法,利用 COMSOL Multiphysics 数值模拟软件分别建立了自然工况、渗流作用和采用预应力锚杆加固后的渗流作用下的有限元模型。结果表明:在自然工况下的边坡处于稳定状态,而渗流作用下的边坡安全系数仅为 1.12,稳定性较差,其主要表现特征为坡体内部朝向坡面,由坡角延伸至坡顶处形成滑动弧面。采用预应力锚杆加固边坡后,在渗流作用下的边坡变为稳定状态,研究结果可为类似的露天边坡安全治理以及防护提供经验参考。

关键词:露天边坡;稳定性分析;强度折减法;渗流作用;预应力锚杆

中图分类号: TD854 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2022)05-0020-04

Abstract: Based on the open-pit slope monitoring programme of an iron mine in Anhui Province, open-pit slope stability was studied by combining exploration and simulation, and control measures were proposed herein. Based on SSR method, finite element models were built respectively under natural working conditions, seepage effect and working conditions reinforced with prestressed bolts by use of the COMSOL Multiphysics numerical simulation software. As indicated by study results, the slope was stable under natural working conditions. However, slope stability became poor under seepage effect, with a safety factor of only 1.12, featured by the formation of circular slip, inside to surface, bottom to top. After reinforcement with prestressed bolt, the slope became stable in spite of seepage effect. The research results can provide an empirical reference for the safety management and protection of similar open-pit slopes.

Key words: open-pit slope; stability analysis; SSR method; seepage effect; prestressed bolt

1 前言

某矿山露天开采已结束,露天边坡的边坡角 $35^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 。西部边坡受后期采矿影响较大,曾出现过第四系滑坡、泥石流,局部台阶存在楔形滑动及断层交错等现象,节理裂隙的倾斜与边坡倾向基本一致,但由于节理倾角较陡,岩体结构一般,完整程度较差。该区边坡基岩主要为高岭土化辉长闪长岩和铁矿体,前者呈中等风化~强风化,具碎裂结构,局部风化剧烈形成高岭土岩,使边坡面呈现散体结构特点,铁矿体附近的闪长岩中具一定的铁矿化和铁矿脉产出,以中等风化为主,呈镶嵌~碎裂结构。该区潜在破坏模式主要有圆弧型破坏、顺层破坏或小型楔形破坏。

数值模拟是研究边坡工程问题的一种有效、方便和快速的方法^[1-4]。基于合理的本构模型,可以

快速建立任意条件下边坡的数值计算模型,计算不同工况下边坡的变形。有限元/差分强度折减理论是一种新方法,用于模拟边坡变形和失稳过程,通过降低岩土体的强度参数来获得边坡的安全系数^[5-7]。通过使用有限元/有限差分强度折减法,结合相关数学方法和图像处理技术^[8-11],可以直观地显示边坡变形和失稳过程,并很好地解释边坡失稳机理。西部边坡属于不稳定的工程地质分区,可能会出现边坡失稳和滑坡,对矿山安全生产有一定影响。

鉴于此,为确保边坡稳定,在现有研究的基础上,以安徽省某铁矿露天边坡监测项目工程实际为背景,结合 COMSOL Multiphysics 软件进行数值分析,更加全面系统地研究露天边坡稳定性,并提出加固方案,为类似的露天边坡研究治理提供参考借鉴。

2 工程地质和水文地质概况

2.1 区域地质条件

区域内底层主要包括沉积相地层和火山岩相地层,总结前人的经验可知,划分的因素可归为 5 类, RQD、岩土层的成因类型、风化程度、岩体结构和力学试验指标,主要划分四个工程地质岩组,分别是第

[作者简介] 周磊(1985-),男,副总经理,高级工程师,主要从事采矿工程技术和管理工作。

[引用格式] 周磊,李琦,章璐玮. 基于 COMSOL 的露天边坡流固耦合稳定性分析及加固对策[J]. 中国矿山工程,2022,51(5):20-23.

四系散体结构岩组、蒙脱石化散体结构岩组、高岭土化、块状结构岩组和碎裂结构岩组。

2.2 水文地质概况

矿区深部主采区在水文地质单元中处于迳流区,深部主采区位于漏斗南侧。随着露天采区闭坑和深部开采的进行,地下水降落漏斗中心将向深部主采区转移。来自地表迳流和大气降的补给,集中于漏斗中心,由矿山排水排出。

矿区含水层主要分为以下两类:

1) 第四系孔隙含水层组

该含水层厚度为 3.46 ~ 24.38 m。上部为黏土、亚黏土,含少量碎石,下部为含砾、碎石亚黏土、碎石土等。含水性较差。

2) 碳酸盐类岩溶裂隙含水层组

为非含水层。

本水文地质单元内地下水受地形、构造和隔水地层的影响,单元内西北部表层为第四系隔水层和碎屑岩,其他部分出露地层为灰岩、岩体。单元内有两条地表迳流,一条以矿山排水的形式与地表水汇集而成,沿地势排出矿区;其矿区地下水排泄方式主要为矿井排泄和供水井开采方式排泄。

2.3 岩体

经勘察研究,并且采用工程地质类比法、经验数据类比法、对各剖面反算法等,把试验数据与现场实际水文工程地质条件充分结合,适当折减,综合确定各层岩体的物理力学参数,具体见表 1。

表 1 主要岩体力学参数

地层名称	容重/ kN·m ⁻³	弹性 模量/ MPa	泊松比	内聚力/ MPa	内摩 擦角/ (°)
第四系散体岩组	20	2	0.37	0.024	10
散体结构岩组	20.6	2	0.26	0.03	10
碎裂结构岩组	22.5	70	0.19	0.5	20
块状结构岩组	27	8 000	0.25	0.68	29
矿体	41.2	4 800	0.27	2.40	42

3 强度折减法

强度折减法最早由 Zienkiewicz 等人提出,对边坡工程的作用具有很大的影响力,逐渐被后来学者采用。在概念上,稳定安全系数和极限平衡法所给的保持高度的一致性。折减后的抗剪强度参数为

$$c_m = c' / F_r \quad (1)$$

$$\varphi_m = \arctan(\tan \varphi' / F_r) \quad (2)$$

式中, c 和 φ 是土体所能够提供的抗剪强度; c_m 和 φ_m 是维持平衡所需要的或土体实际发挥的抗剪强

度; F_r 是强度折减系数。

当达到临界破坏时的强度折减系数就是边坡稳定安全系数。“以是否形成连续的贯通区”是判定边坡达到临界破坏的评价标准之一。因此本研究采用此标准来评价边坡稳定性。

4 边坡稳定性分析

影响露天采场边坡稳定的因素有很多,大致可以分为两类:外部因素和内部因素。外部因素主要包括地下开采和大气降水。内部因素主要包括岩石结构和岩体性质。本文基于有限元强度折减法,利用 COMSOL Multiphysics 软件进行分析计算,研究边坡稳定性。

COMSOL Multiphysics 是基于有限元分析法的软件。利用偏微分方程,结合有限元分析法,解决广泛的工程问题。强大的后处理功能提供了多种方式来表示模拟结果,如应力云图、等值线、位移场等,可以方便地表示不同的物理意义。COMSOL Multiphysics 的固体力学模块可以为采矿工程问题提供更方便的解决方案,在隧道、挡土墙、开挖、边坡稳定以及岩土体模拟方向,有较强的适用性。COMSOL Multiphysics 有以下独特优势:

- ①解决多个物理场耦合问题的可能性;
- ②能直接编辑偏微分方程;
- ③支持多变量的参数控制;
- ④丰富的物理模型库;
- ⑤强大的网格划分能力,丰富的剖分风格和移动网格的能力;
- ⑥强大的后处理能力,包括数据和曲线的绘制;
- ⑦强大的 CAD 导入功能。

在 COMSOL Multiphysics 中,解决特定问题的整个过程是:构建几何模型,设置边界条件,输入材料参数,网格划分和计算可视化结果。由于该软件具有强大的耦合和仿真功能,因此本文使用该软件,在计算过程中充分考虑了自然工况、渗流作用和预应力锚杆对边坡稳定性的影响。

4.1 边坡现状分析

边坡计算模型的初始应力和孔压云图如图 1 所示。边坡的材料属性:密度 1 800 kg/m³,内聚力 30 kPa,内摩擦角 20°,杨氏模量 100 MPa,泊松比 0.3,初始孔隙比 1.0。屈服准则使用 Drucker-Prager 准则并匹配莫尔-库仑准则,采用 Richards 方程模型,水力传导率为 0.15 m/h。网格剖分方式为映射。由计算结果可知,在渗流之前,边坡岩体中的应力处于一种自然平衡状态,该状态下的应力通常被

称为原岩应力或初始应力。

从图1(a)中显著看出边坡主应力分布走向,层次感较强,并在坡顶和坡脚处出现了剪应力集中现象;

从图1(b)中可以得出边坡受自重影响,层状清晰,压力分布均匀,底部的压力值最大,随高度的增大,压力值逐渐减小。

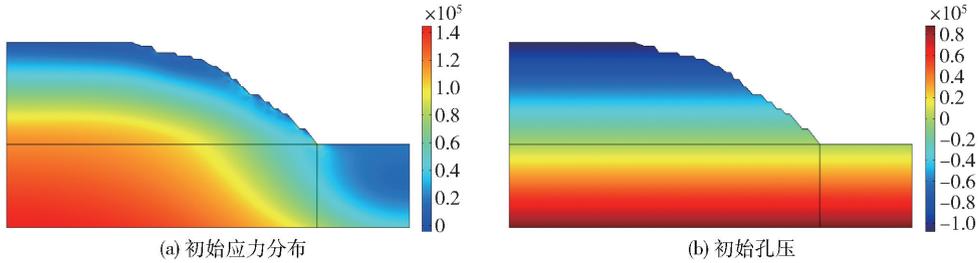


图1 初始应力和初始孔压分布

4.2 不同工况下边坡稳定性分析

1) 自然工况

把设置好属性的模型在自然工况下计算得出的

安全系数为 1.32,边坡处于稳定状态。观察图2中位移可知,边坡坡角出现了位移集中的表现,坡角有较小的塑性变形。

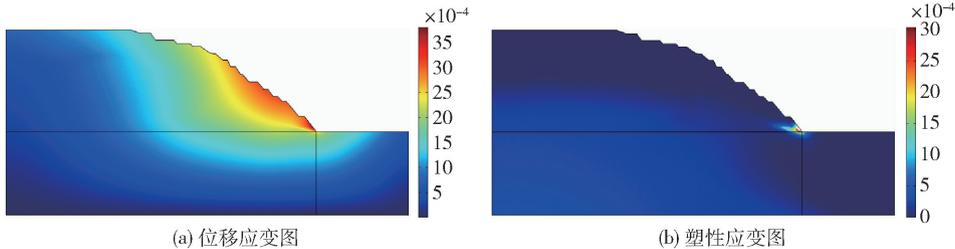


图2 位移和塑性应变图

2) 渗流作用

因矿区常年夏季有阴雨天气,所以渗流作用对边坡稳定性的影响成为本次研究的重点,根据当地天气和水文资料,模拟了一场为时5d、降雨量为0.105 m³/h的渗流作用,并将5d分为10个时程,每个时程12h,以分析渗流作用下边坡安全系数为1.12,已经是欠稳定状态。图3(a)为渗流第1时程饱和度云图,图3(b)为渗流第10时程后饱和度云图

图。边坡的饱和度在第1时程开始显著变化,水渗入边坡,土体从非饱和状态变为局部饱和状态,或由非饱和到饱和渐变向内扩展。

通过观察渗流作用后的塑性应变和位移云图如图4所示,边坡将产生连续贯通的滑动面和失稳破坏。边坡的位移表现为从边坡内部向表面逐渐增加,从边坡上部表面到坡角逐渐聚集,最大和最明显的位移发生在坡角处,具体如图4(b)所示。

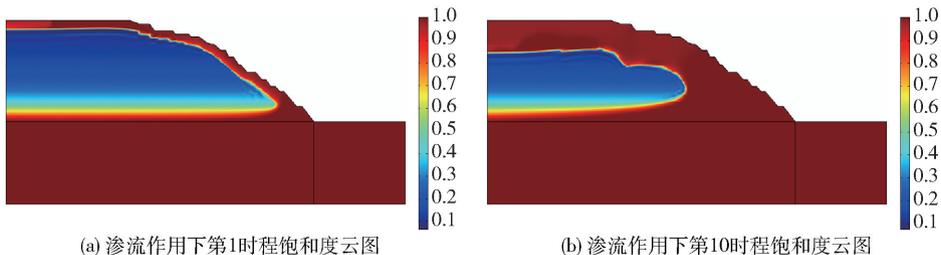


图3 渗流作用下的饱和度云图

5 边坡加固措施

5.1 加固措施

根据反复的现场勘探和数值模拟分析,初步确定露天边坡需要重点治理的滑面,经分析,边坡上部的削坡减载可提高边坡的稳定性,但由于边坡表面存在排水设施、管道工程以及充填站等矿用设施,不可能

实施削坡减载的解决方案,因此,该工程不适合使用削坡减载。地表水截流和排水是一种有效的解决方案,特别是对于崩塌地段,并且地表水的截排被证明在减缓滑坡和改善露天边坡稳定性方面是有效的。该边坡最终采用预应力锚杆加固,在边坡上清楚危岩和浮石后,沿垂直于边坡的方向施加预应力锚杆。

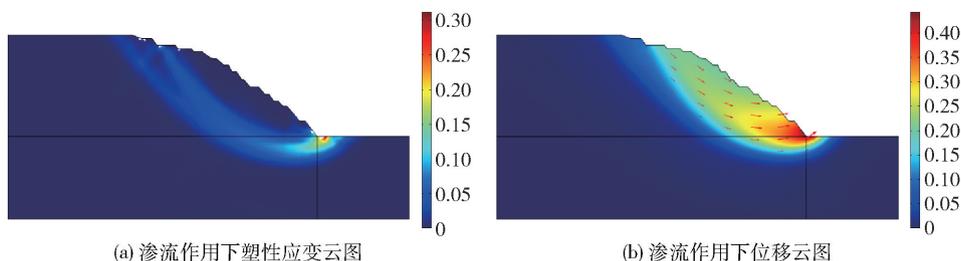


图4 渗流作用下的塑性应变和位移云图

5.2 加固后渗流作用下稳定性分析

降雨5 d后的安全系数为1.12,为欠稳定状态,在COMSOL Multiphysics中对坡面进行建模,做加固

处理,模拟施工和预应力锚杆加固后的安全系数为1.38,大于规范上的1.15,变为稳定状态。加固后的塑性应变和位移云图如图5所示。

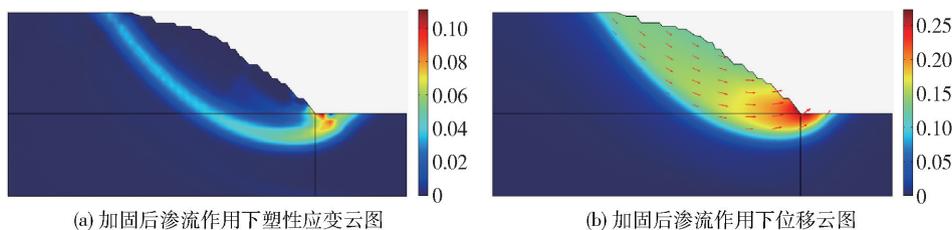


图5 加固后渗流作用下的塑性应变和位移云图

6 结论

本文采用基于强度折减法的COMSOL Multiphysics数值模拟软件对安徽省某露天矿边坡进行了分析和治理,得出了以下结论:

(1)在自然工况下,基于强度折减法,采用COMSOL Multiphysics数值模拟软件计算出边坡安全系数为1.32,处于稳定状态。在渗流作用下,模拟了一场为时5 d、降雨量为 $0.105 \text{ m}^3/\text{h}$ 的渗流作用,安全系数为1.12,为欠稳定状态,其主要表现特征为边坡土体内部朝向坡面,由坡角延伸至坡顶处形成滑动弧面。

(2)对边坡典型剖面采用预应力锚杆加固法后,用软件模拟相同渗流作用得到的安全系数为1.38,处于稳定状态。

(3)通过模拟分析可知,采用预应力锚杆加固法可以有效加固类似边坡。基于强度折减法对露天边坡进行模拟分析,可以更直观地得出自然工况、渗流作用和锚固后边坡的稳定性,数值模拟结果和现场勘探具有一定的合理性,研究结果可为类似的露天边坡安全防护提供借鉴。

[参考文献]

[1] 历一帆,杨溢,叶志程,等.基于Midas-GTS/NX的崩塌边坡治理及稳定性分析[J].工业安全与环保,2022,48(6):15-19.

[2] 谢承煜,刘承波,朱佳妮,等.多场耦合作用下天然土质边坡安全性数值仿真研究[J].湘潭大学学报(自然科学版),2021,43(3):94-105.

[3] 蔡亚飞.渗流-应力耦合和降雨入渗作用下的边坡稳定性分析及加固措施[D].衡阳:南华大学,2019.

[4] 蔡亚飞,蔡春明.渗流-应力耦合及降雨入渗作用下的边坡稳定性分析[J].南华大学学报(自然科学版),2019,33(3):33-39+43.

[5] 王述红,何坚,杨天娇.考虑降雨入渗的边坡稳定性数值分析[J].东北大学学报(自然科学版),2018,39(8):1196-1200.

[6] 李炎隆,陈波,马成成,等.基于ABAQUS的降雨入渗条件下基坑边坡稳定性分析[J].应用力学学报,2017,34(1):155-161+203-204.

[7] 谷岩.基于Geo-Slope露天边坡稳定性分析及治理方案选择[J].采矿技术,2016,16(4):22-23.

[8] 郑颖人,赵尚毅,张鲁渝.用有限元强度折减法进行边坡稳定分析[J].中国工程科学,2002(10):57-61+78.

[9] 费康,彭劼.ABAQUS岩土工程实例详解[M].北京:人民邮电出版社,2017.

[10] 程学磊,崔春义,孙世娟.COMSOL Multiphysics在岩土工程中的应用[M].北京:中国建筑工业出版社,2014.

[11] 艾敏,王光进,杨玉婷,等.降雨条件下尾矿库稳定性计算分析[J].矿冶,2019,28(5):7-14.