

露天开采

# 基于有限元法的露天采场边坡稳定性综合评价

Comprehensive Evaluation of Slope Stability in Open-pit Mining Based on Finite Element Method

刘家灵, 杜安鹏(中国建筑材料工业地质勘查中心河南总队, 河南 信阳 464000)

**摘要:**本文提出一种基于有限元法的露天采场边坡稳定性综合评价方法。以某露天采场为研究对象,构建了边坡的几何模型,选取了合理的岩土体力学参数,并通过有限元法对边坡的应力、位移及安全系数进行了数值模拟与分析。在多种荷载组合工况下,计算了边坡的安全系数,并识别出不同剖面的失稳模式。研究结果表明,该方法能够准确反映边坡在自重、爆破振动及地震荷载下的力学行为,有助于提高采场的安全性和运营效率。

**关键词:**有限元法; 露天采场; 边坡稳定性; 综合评价

**中图分类号:** TD823 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2024)06-0073-04

**Abstract:** This article proposes a comprehensive evaluation method for the stability of open-pit mining slope based on finite element method. Taking a certain open-pit mining site as the research object, a geometric model of the slope was constructed, reasonable rock and soil mechanics parameters were selected, and the stress, displacement, and safety factor of the slope were numerically simulated and analyzed using finite element method. Under various load combinations, the safety factor of the slope was calculated and the instability modes of different profiles were identified. The research results indicate that this method can accurately reflect the mechanical behavior of slopes under self weight, blasting vibration, and seismic loads, which helps to improve the safety and operational efficiency of mining sites.

**Key words:** finite element method; open pit mining site; slope stability; comprehensive evaluation

## 1 前言

随着露天矿山开采规模的不断扩大,采场边坡的高度和坡角逐渐增加,边坡的稳定性问题愈加突出。采场边坡失稳可能引发严重的安全事故,造成重大经济损失和环境破坏,因此边坡稳定性分析成为矿山安全生产中的关键环节。传统的边坡稳定性评价方法在面对复杂的地质条件和多变的外部荷载时,往往难以准确预测边坡的失稳风险。近年来,随着计算技术的快速发展,有限元法凭借其在非线性问题中的高精度和灵活性,逐渐成为解决复杂边坡稳定性问题的重要工具。

## 2 工程概况

矿区位于低山丘陵地带,海拔高度差较大,露天

采场边坡的高度范围为55~186 m。开采方式采用自上而下的水平分层法,台阶高度为15 m,运输系统为公路汽车运输,矿石通过破碎系统和2.4 km长的带式输送机运送至石灰石预均化堆场。矿区自然条件较为复杂,最大相对高差达到268.7 m,地形起伏大,基岩大面积裸露,植被覆盖较少。气候属温带季风气候,年平均降水量约为685.5 mm,降水主要集中在7~9月,占全年降水量的40%~73%<sup>[1]</sup>。气象条件对边坡稳定性具有一定影响,暴雨天气可能加剧边坡的变形与失稳风险。在地质条件方面,矿区内断裂构造较发育,主要存在F1、F2等断层,对矿体的完整性和边坡稳定性有一定影响。矿区地下主要含水层为碳酸盐岩岩溶裂隙含水岩组,富水性弱。矿区含水层地下水位标高(+100 m)低于矿床最低开采标高(+276 m)。

## 2 有限元模型构建

### 2.1 建立边坡几何模型

在本研究中,露天采场边坡几何模型的建立基

[作者简介] 刘家灵(1983—),男,汉族,大学本科,高级工程师,主要从事岩土工程研究。

[引用格式] 刘家灵,杜安鹏.基于有限元法的露天采场边坡稳定性综合评价[J].中国矿山工程,2024,53(6):73-75+82.

于矿区的实际地质条件和开采情况。为对边坡稳定性进行精确分析,模型选取了典型的7个剖面,包括剖面C-C'、E-E'、F-F'、H-H'、J-J'、K-K'和L-L',覆盖了矿区不同区域的代表性边坡,能够较好地反映矿区的整体边坡状况。

依据工程钻孔数据,选取具有代表性的剖面。通过现场测量和地质勘探,获取每个剖面的坡高、坡角、台阶高度、台阶宽度等几何参数<sup>[2]</sup>。剖面设计依据实际矿区的边坡结构特点。各剖面的台阶高度统一为15 m,边坡地形及坡面的设计见表1。

## 2.2 选取岩土体力学参数

在本次项目中,岩土体的力学参数选取基于室内试验和现场测试的结果,试验项目包括岩石常规试验、单轴抗压试验、单轴压缩变形试验和结构面直

剪试验。根据测试结果,该表涵盖不同岩性的容重、内聚力、内摩擦角、变形模量和泊松比等参数,具体见表2。

表1 边坡地形及坡面设计

剖面	边坡高度/ m	台阶坡面角/ (°)	整体坡角/ (°)
C-C'	120	35	32
E-E'	186	37	34
F-F'	160	34	30
H-H'	140	33	32
J-J'	55	30	28
K-K'	100	36	33
L-L'	90	32	31

表2 边坡岩土体的主要物理力学参数

岩性	容重/ kN·m <sup>-3</sup>	内聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)	变形模量/ GPa	泊松比
崮山组白云岩(∈3g)	24	280	35	3.8	0.25
张夏组第五岩性段白云质灰岩(∈2zh5)	24	320	36	4.0	0.23
张夏组第四岩性段花斑灰岩(∈2zh4)	25	380	40	5.0	0.22
张夏组第三岩性段鲕粒灰岩(∈2zh3)	25	380	40	5.2	0.22
张夏组第二岩性段豹皮灰岩(∈2zh2)	26	400	40	5.6	0.22
张夏组第一岩性段薄层泥质条带灰岩(∈2zh1)	26	400	40	5.8	0.20
徐庄组页岩(∈2x)	24	320	35	2.3	0.26

边坡岩土体在复杂应力状态下的力学行为可采用摩尔-库仑准则描述,具体见公式(1)。

$$f(\sigma_1, \sigma_3) = \sigma_1 - \sigma_3 \frac{1 + \sin\phi}{1 - \sin\phi} - 2c \frac{\cos\phi}{1 - \sin\phi} = 0 \quad (1)$$

式中, $\sigma_1$ 为最大主应力; $\sigma_3$ 为最小主应力; $c$ 为内聚力; $\phi$ 为内摩擦角。通过该公式,可以确定岩土体在不同受力状态下的应力分布和破坏条件。

边坡变形是计算过程中需要重点分析的内容,本研究采用线弹性假设,岩土体的应力与应变关系可以通过广义胡克定律(Generalized Hooke's Law)描述<sup>[3]</sup>。广义胡克定律在三维应力状态下的表达式为公式(2)。

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{1}{E}(\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)) \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E}(\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)) \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E}(\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)) \end{aligned} \quad (2)$$

式中, $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ 分别为岩土体在 $x, y, z$ 方向的应变; $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 分别为 $x, y, z$ 方向的正应力; $E$ 为岩土体的弹性模量; $\nu$ 为泊松比。通过该公式,可以准确描述岩土体在三维应力状态下的变形行为,为数值模拟提供了基础。

为了更加精确的描述岩土体的受力状态,本研究采用了应力张量分析方法。应力张量 $\sigma$ 的表达式为公式(3)。

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中, $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 为主应力; $\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$ 为剪应力。应力张量能全面描述岩土体在各个方向的受力状态,进一步预测边坡的潜在滑动面和失稳模式。

## 2.3 划分网格与设定边界条件

网格划分基于边坡几何特征与地质单元分布情况,采用四边形单元进行离散化处理<sup>[4]</sup>。根据矿区

边坡的几何复杂性,网格单元尺寸统一为5 m,同时在边坡的顶部、坡脚及断层处进行适当加密,以提高局部应力与变形的计算精度。剖面模型按照边坡的实际剖面构建,共选取了7个剖面进行网格划分,每个剖面均代表不同区域的边坡几何特点。典型剖面的有限元网格划分如图1至图7所示。

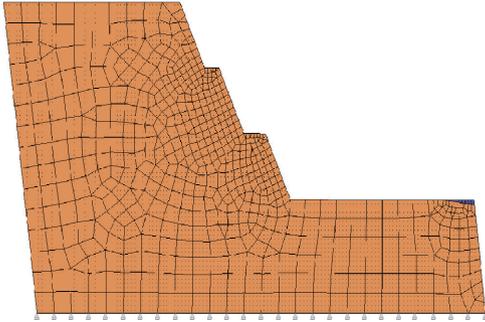


图1 C-C'边坡剖面

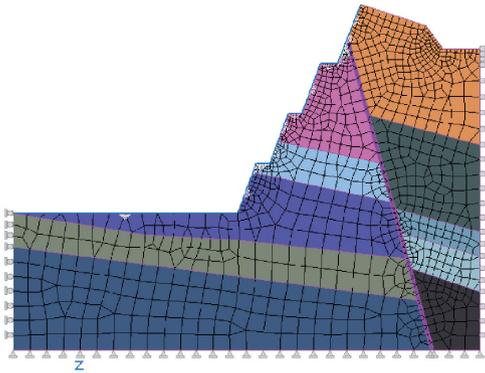


图2 E-E'边坡剖面

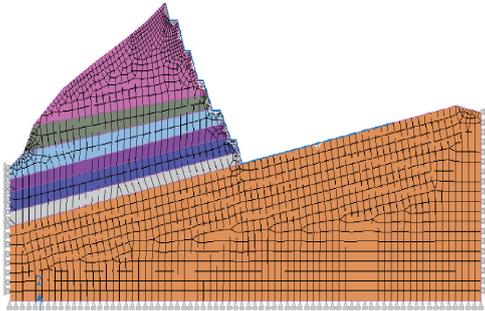


图3 F-F'边坡剖面

边坡顶部网格密度较大,底部网格相对稀疏,确保了应力和位移的合理分布。

在本研究中,模型的边界条件主要设置为位移边界,包括以下三方面:

(1)在模型的左右两侧边界上施加水平位移约束,以限制边坡在水平方向的自由运动。

(2)在模型底部施加固定约束,限制边坡在垂直方向的位移。

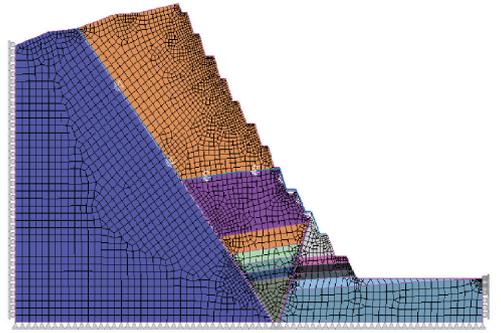


图4 H-H'边坡剖面

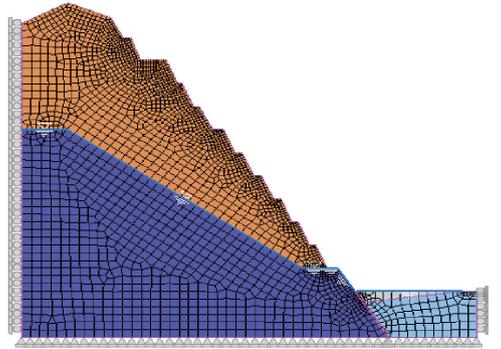


图5 J-J'边坡剖面

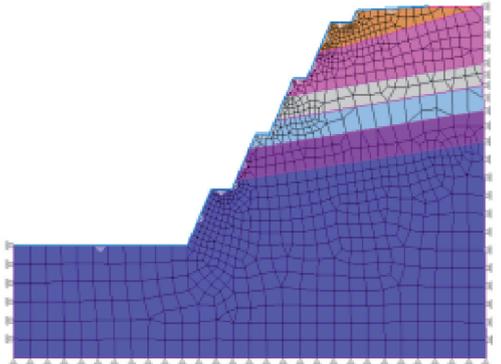


图6 K-K'边坡剖面

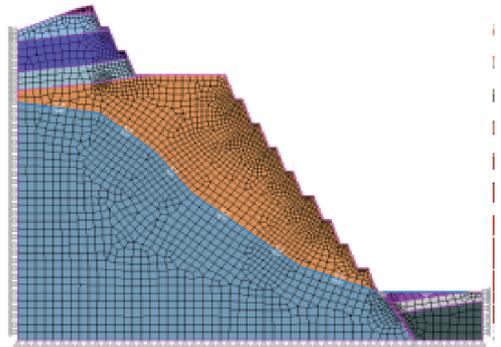


图7 L-L'边坡剖面

(3)对于边坡上表面,其余部分设定为自由边界,允许模型在该区域产生应力和位移变化,以便更好地模拟边坡失稳过程。

### 3 数值模拟与结果分析

#### 3.1 数值模拟设置工况

本次研究采用了多种荷载组合工况进行计算,以全面评估边坡在不同条件下的稳定性。根据《非煤露天矿边坡工程技术规范》(GB 51016—2014)的要求,本次数值模拟中设置三种荷载组合工况<sup>[5]</sup>。

(1)荷载组合 I:自重+地下水。此工况主要考虑边坡自重引起的应力分布为基础工况,适用于边坡的静态稳定性分析。

(2)荷载组合 II:自重+地下水+爆破振动力。爆破振动加速度参考了类似矿山的经验值,取加速度  $a = 0.05 \text{ g}$ ,振动作用通过拟静力抗震法计算,并采用爆破振动效应折减系数 0.25。

(3)荷载组合 III:自重+地下水+地震力。研究区抗震设防烈度为 7 度,根据《建筑抗震设计规范》的规定,采用拟静力法计算地震力的影响。水平向地震系数取  $K_H = 0.1$ ,综合影响系数  $C_Z = 0.25$ ,地震力影响通过地震系数计算如公式(4)。

$$K_c = K_H C_Z a_i \quad (4)$$

式中,  $a_i$  是考虑滑体重心高度的系数,取  $a_i = 1.0$ 。此工况用于模拟地震荷载对边坡的动态影响。

#### 3.2 分析应力与位移分布

根据模拟结果,在荷载组合 I(自重+地下水)条件下,边坡的最大主应力集中在坡脚处,坡脚和深部断层交界处的应力值达到最大。剖面 C-C' 在自重条件下的最大应力为 22 MPa,而剖面 F-F' 的最大应力为 27 MPa。在荷载组合 II(自重+爆破振动)条件下,爆破振动力使边坡应力分布更加集中,在坡脚和岩层交界处爆破振动效应使应力最大值提高了约 8%~10%,在坡脚位置最大剪应力达到 9 MPa。荷载组合 III(自重+地震力)工况下,地震荷载的作用使坡脚处的应力达到最大值,剖面 E-E' 和 K-K' 的最大应力值分别为 45 MPa 和 41 MPa。

根据总位移的计算可知,荷载组合 I 条件下,剖面 C-C' 的最大位移为 12.4 cm,而剖面 F-F' 的位移仅为 9.7 cm,位移量较大的剖面主要分布在地质条件相对较差的区域。在荷载组合 II 下,爆破振动效应导致位移量有所增加,剖面 E-E' 的最大位移为 16.2 cm,位移量的增加主要体现在坡表的中部区域。荷载组合 III(地震荷载)下,剖面 L-L' 的最大

位移为 18.7 cm,而剖面 J-J' 的最大位移为 17.5 cm,在地质条件较差或断层发育的区域,位移量远高于正常水平。

#### 3.3 计算边坡安全系数

本研究的使用强度折减法计算安全系数,抗剪强度的折减系数定义如公式(5)。

$$F_s = \frac{c}{c_r} = \frac{\tan\phi}{\tan\phi_r} \quad (5)$$

式中,  $F_s$  为边坡的安全系数;  $c$  和  $\phi$  分别为未折减时的内聚力和内摩擦角;  $c_r$  和  $\phi_r$  分别为折减后的内聚力和内摩擦角。通过逐步减少内聚力  $c$  和内摩擦角  $\phi$ ,当边坡发生失稳时所对应的折减系数即为边坡的安全系数。计算结果见表 3。

表 3 边坡的安全系数计算结果

剖面	工况 I(自重+地下水)	工况 II(自重+爆破振动)	工况 III(自重+地震力)
C-C'	3.90	3.83	3.79
E-E'	2.49	2.44	2.44
F-F'	1.79	1.67	1.62
J-J'	1.275	1.238	1.225

### 4 边坡稳定性的综合评价

根据强度折减法计算,各剖面在不同荷载条件下的安全系数差异明显。C-C' 剖面安全系数较高,在自重与地下水荷载作用下达到 3.90,显示出良好的稳定性。相对而言,J-J' 和 F-F' 剖面的安全系数较低,在地震工况下 J-J' 剖面的安全系数仅为 1.225,接近失稳状态,提示这些区域需要重点关注和监控。应力分布显示,应力集中区主要位于坡脚和岩层深部断层附近,在爆破振动和地震工况下应力明显增加。位移分析表明,边坡表面和坡脚处的位移最大,地震荷载下 J-J' 和 F-F' 剖面位移明显增大,说明这些区域存在较高的失稳风险。

为提高边坡的长期稳定性,建议采取以下措施:

(1)加强监控:对安全系数较低的区域,特别是在爆破和地震荷载作用下,进行实时监测。

(2)优化设计:针对安全系数较低的剖面,适当调整坡角和台阶高度,减小边坡坡度。

(3)边坡加固:在应力集中和位移较大的区域,采用锚杆支护或喷混凝土等加固措施。

(下转第 82 页)