

水厂铁矿边坡开挖 FLAC^{3D} 数值模拟与分析

苗胜军¹, 李长洪¹, 佟慧超², 任奋华¹

(¹ 北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083; ² 北京市路政局顺义公路分局, 北京 101300)

摘要:本文在地质环境资料调研、岩石力学试验和地应力测量等工作的基础上,以 Mohr-Coulomb 屈服准则为力学模型,采用 FLAC^{3D} 三维有限差分方法,对首钢水厂铁矿 IV 工程地质区开挖过程中边坡岩体应力场、位移场、破坏场进行了数值模拟计算,并对模拟结果进行了系统分析,以指导矿山安全开采。

关键词:边坡; FLAC^{3D}; 数值模拟; 应力; 位移; 破坏

中图分类号: TD854.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-4172(2008)01-0029-05

FLAC^{3D} Numerical Simulation & Analysis of Slope Excavation in Shuichang Iron Mine

MIAO Shengjun¹, LI Changhong¹, TONG Huichao², REN Fenhua¹

(¹ Civil and Environmental Engineering School, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

² Shunyi Department, Beijing Municipal Highway Bureau, Beijing 101300, China)

Abstract: Based on the geological environment investigation, rock-mechanics experiments and in-situ stress measurement, numerical simulation on the stress, deformation and failure distribution and varying regularities of slope rock-mass is carried out during the excavation of IV engineering geological district in Shuichang iron mine. The simulation result is analyzed systematically and used to guide safety-production.

Key words: slope; FLAC^{3D}; numerical simulation; stress; deformation; failure

水厂铁矿位于河北省迁安市境内,是一座大型变质岩型磁铁矿床。矿山于 1968 年建成投产,1998 年按年产铁矿石 1 100 万 t 进行了规模调整设计。随着矿山整体边坡不断的加高、加陡,采场局部边坡的变形破坏常有发生。本文以水厂铁矿北区采场 IV 区边坡开挖为研究对象,通过 FLAC^{3D} 有限差分计算,对该区开挖过程中应力场、位移场、破坏场的发展变化过程进行模拟研究,进而指导矿山安全开采。

1 FLAC 计算程序简介

FLAC(Fast Lagrangian Analysis of Continua) 软件是美国 ITASCA 咨询集团公司开发研制的,可实现对岩石、土和支护结构等岩土工程建立高级三维模型,进行复杂的数值分析与设计等,具有应用广泛、运行速度快、功能强大、实践证明等特征^[1-2]。

利用 FLAC 软件进行地质力学数值分析的步骤一般为 7 步:1) 定义模型分析的目标;2) 产生一个

物理系统的概念图;3) 构造和运行简单的理想化模型;4) 收集特殊问题的数据;5) 准备一系列详细的模型运行;6) 执行模型计算;7) 当前结果的解释。

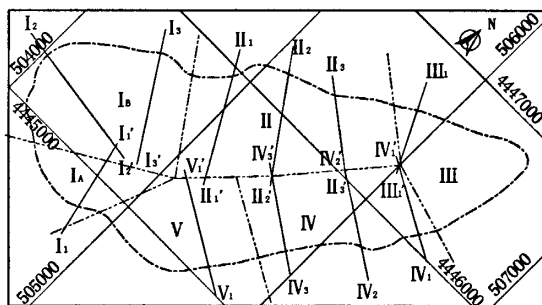


图1 水厂铁矿工程地质分区示意图

Fig. 1 Engineering geological districts of Shuichang Iron Mine

2 边坡开挖三维计算模型的建立

2.1 本构关系

根据现场取样和岩石力学试验结果,计算中采用 Mohr-Coulomb 屈服准则判断岩体的破坏,关系如下:

基金项目:国家“十五”科技攻关计划课题:“大型深凹露天矿高效运输系统及强化开采技术研究”(编号:2004BA615A-05)
作者简介:苗胜军(1979-),男,讲师,博士

$$f_i = \sigma_1 - \sigma_3 \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} - 2C \sqrt{\frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}} \quad (1)$$

式中: σ_1 、 σ_3 分别是最大和最小主应力, C 、 φ 分别是黏聚力和内摩擦角。当 $f_i > 0$ 时, 材料将发生剪切破坏。通常状态下, 岩体的抗拉强度很低, 因此可根据抗拉强度准则 ($\sigma_3 \geq \sigma_t$) 判断岩体是否产生拉破坏^[3-4]。

表 1 岩体力学参数

Table 1 Parameters of rockmass mechanics

代号	名称	密度 $\rho / \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	弹性模量 E / MPa	泊松比 ν	黏聚力 C / MPa	内摩擦角 $\varphi / ^\circ$	体积模量 K / MPa	剪切模量 G / MPa
Q	第四系人工堆积物	2 000	15	0.3	0.125	18	2.51	5.8
ArS ²⁻⁵	黑云母斜长片麻岩	2 630	6 600	0.21	3.825	36	3 793.1	2 727.3
Fe	磁铁矿	2 850	8 500	0.23	2	36	5 246.9	3 455.3
ArS ²⁻³	紫苏黑云斜长片麻岩	2 650	6 880	0.22	3.9	35	4 047.6	2 819.7
Mr	混合花岗岩	2 500	7 020	0.23	2.8	31	4 333.3	2 853.7
ArS ²⁻²	辉石斜长片麻岩	2 600	6 077	0.24	3.02	35	3 895.5	2 450.4
F1、F3	断层	1 200	10	0.25	0.4	24	—	—

2.2.2 矿区地应力场分布规律

为了互相验证和补充, 水厂矿区地应力测量同时采用应力解除法和水压致裂法。得到矿区地应力场分布规律如下: 1) 三个主应力中两个主应力倾角接近水平方向, 另一个接近垂直方向, 最大主应力 σ_1 基本位于水平方向; 2) 应力解除法三个测点的最大水平主应力方向平均为 93.9° , 水压致裂法三个钻孔的最大水平主应力方向平均为 78° , 均接近于东西向, 这与华北地区的主应力方向基本一致; 3) 使用线性回归的方法, 对各个测点的应力值进行了回归, 得到最大、最小水平主应力和垂直主应力随深度变化的规律:

$$\sigma_{\text{hmax}} = 0.93 + 0.0438H \quad (2)$$

$$\sigma_{\text{hmin}} = 0.61 + 0.0269H \quad (3)$$

$$\sigma_v = 0.12 + 0.0259H \quad (4)$$

式中: σ_{hmax} 、 σ_{hmin} 、 σ_v , MPa; H 为测点埋深, m。

2.3 数值模型建立

如图 1 所示, IV 区边坡走向与采场长轴方向一致, 为 NE 向, 倾向 NW 向, 呈单面边坡, 包括 IV-1、IV-2、IV-3 三个分析剖面。开挖前的计算模型 X 方向宽 700 m, Z 方向高 535 m ($-365 \sim +170$ m), Y 方向长 788 m。总体模型的单元总数 51 996 个, 节点总数 56 791 个, 开挖前模型如图 2 所示。

开挖完成后剖面 IV-1 处 ($Y=0$) 边坡没有台阶, 边坡角 41° , 坡底标高 -180 m。剖面 IV-2 处 ($Y=440$ m) 边坡台阶标高 $+10$ m, 台阶宽度 40 m,

2.2 岩体力学参数及地应力场分布规律

2.2.1 岩体力学参数的确定

在现场勘查和试验的基础上, 综合考虑地质条件和工程经验折减法对水厂铁矿北区采场 IV 区边坡岩体的主要岩组进行了分析, 得到岩体及断层的计算模型参数如表 1 所示^[5-6]。

上部边坡角 44° , 下部边坡角 48° , 坡底标高 -276 m。剖面 IV-3 处 ($Y=788$ m) 边坡台阶标高 -50 m, 台阶宽度 20 m, 上部边坡角 46° , 下部边坡角 48° , 坡底标高 -305 m。

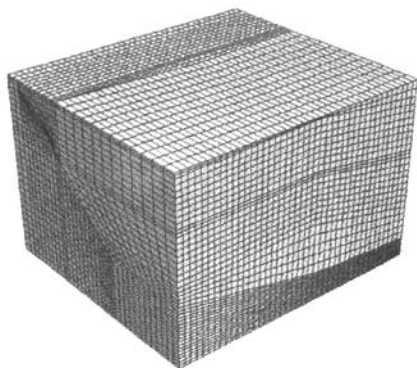


图 2 开挖前网格图形

Fig. 2 Simulation grid before slop excavation

计算过程中, 在 $Y=440$ m 的剖面附近设置了 4 个数值监测点。具体位置在坡顶上部、边坡台阶以及坡趾处, 如图 3 所示。

2.4 开挖模拟过程

本次研究对 IV 区边坡的开挖过程进行了模拟。开挖主要分为四步。如图 4 所示, 第一步开挖的岩体主要为上部表层的第四纪人工填土, 厚度约 70 m, 开挖的水平标高约 $+40$ m 到 $+110$ m; 第二步开挖的岩体主要为辉石斜长片麻岩, 厚度约 150 m 到

170 m,开挖的水平标高约-50 m到±0 m;第三步开挖的岩体主要为磁铁矿,厚度约137 m到155 m,开挖到水平标高约-120 m到-200 m;第四步开挖的岩体主要为磁铁矿,厚度约100 m到150 m,开挖的水平标高约-180 m到-300 m。开挖完后的边坡形状和边坡分步开挖过程分别如图3和图4所示。

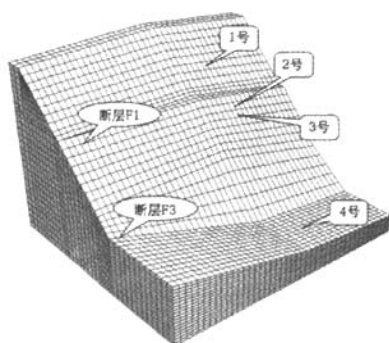


图3 边坡开挖最终形状及监测点布置

Fig.3 Final shape of excavated slope and monitoring points

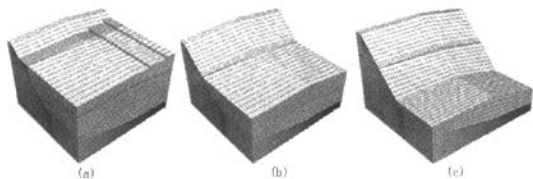


图4 边坡分步开挖过程

Fig.4 Stage-by-stage excavation of slope

3 计算模拟结果及分析

3.1 应力场模拟结果及分析

3.1.1 最大主应力场模拟结果及分析

图5和图6分别为边坡整体及IV-2剖面最大主应力场模拟结果。可以看出:最大主应力由上到下逐渐增大,分布较均匀,这与实测地应力分布规律相符;坡底和坡趾局部主应力达到最大值,近30 MPa,说明这些区域可能会产生应力集中,应引起注意;坡顶在建模时考虑了有人工堆积填土的覆盖,所以最大主应力值大于零;另外,从图6还可以看出:断层F3对边坡开挖后最大主应力分布产生一定影响,断层两边的云图错开,这对边坡稳定是不利的,也应引起注意。

图7为边坡台阶处(Z=370 m)最大主应力水平剖面图。可以看出:从坡面向边坡内部,最大主应力值逐渐增大;断层F1两边的云图错开,说明F1

断层对边坡的最大主应力场也产生了不利影响,应引起注意。

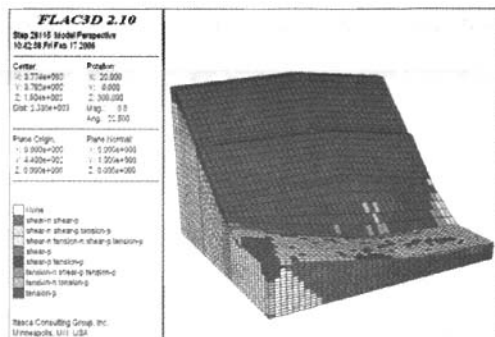


图5 边坡最大主应力场

Fig.5 The maximum principal stress distribution of slope

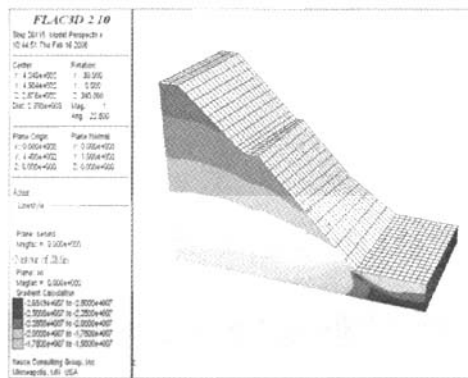


图6 边坡IV-2剖面最大主应力场

Fig.6 The maximum principal stress distribution of IV-2 section

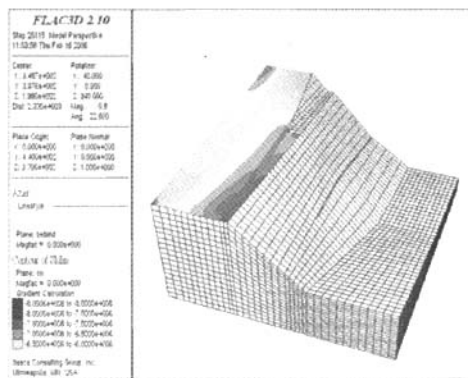


图7 边坡台阶处水平剖面最大主应力场

Fig.7 The maximum principal stress distribution of level section

3.1.2 最小主应力场及剪应力场模拟结果及分析

最小主应力场和剪应力场的模拟过程与最大主应力场相同,最小主应力值也遵从自上而下逐渐增

大的规律,最大值达到了 13.3MPa;最小主应力未出现负值,说明开挖模拟过程中未出现拉应力;另外还能看出:断层 F3 对应力云图产生了影响。剪应力最大值出现在坡趾附近,说明该区域有可能出现剪切破坏。

3.2 位移场模拟结果及分析

边坡在开挖中会产生荷载释放,坡体会随着开挖过程,向被挖空的方向产生水平位移,所以水平位移是评价边坡稳定性的一个重要因素。根据模型,本文主要考虑了 X 方向的水平位移。

图 8 为边坡 X 方向的水平位移。可以看出:最大水平位移发生在坡面处,达到了 0.94 m,随着向边坡内部的延伸,位移值逐渐减小。图 9 为边坡 IV-2 剖面水平位移场。可以看出:随着向坡面的靠近, X 方向位移最大值出现在坡趾上方约 100 m 处,达到 0.4 m,应引起注意。

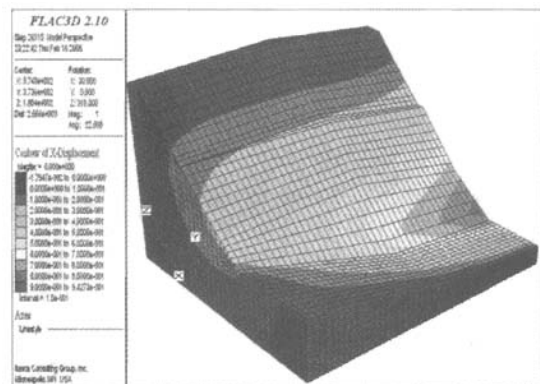


图 8 边坡 X 方向的水平位移场

Fig. 8 The level deformation distribution of slope

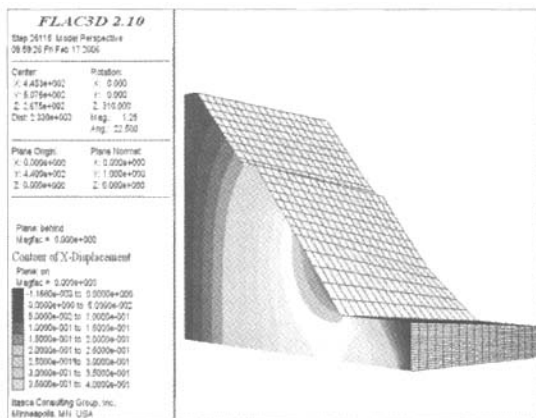


图 9 边坡 IV-2 剖面水平位移场

Fig. 9 The level deformation distribution of IV-2 section

图 10 为边坡位移矢量场,代表边坡开挖变形趋势。

势。此图表明边坡总位移方向为 X 方向,坡底的位移方向略微向上,说明坡底有拱起的趋势,应予以注意。

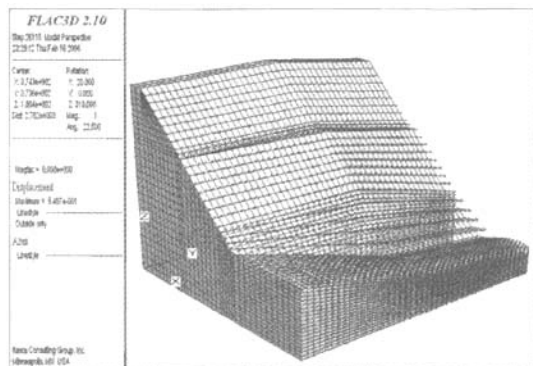


图 10 边坡位移矢量场

Fig. 10 The deformation distribution of slope

边坡稳定性不仅取决于位移量的大小,与边坡的位移速度也有很大关系,所以对边坡的位移速度的监测也是评价边坡稳定性的重要指标。图 11 为 1-4 号监测点水平位移速度曲线,从图中可以看出:四条曲线同时有四个突起,说明每次开挖之后都是边坡变形最快的一段时期,之后位移速度逐渐趋于缓慢,边坡趋于稳定。

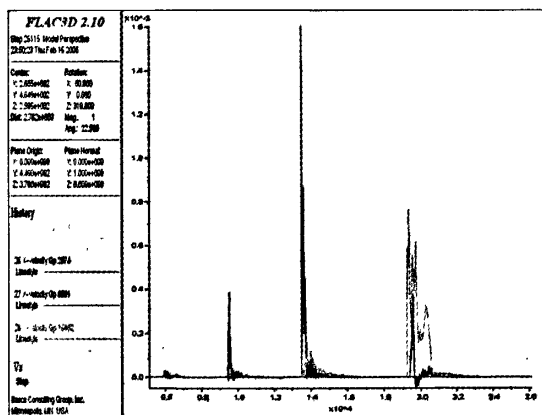


图 11 水平位移速度监测曲线

Fig. 11 The monitored curve of level deformation velocity

3.3.3 破坏场模拟结果及分析

图 12 为边坡的破坏场。通过此图可以看出边坡的主体是稳定的,未发生塑性破坏。边坡坡面大约 20 m 左右厚的绝大部分浅层岩体发生了拉伸破坏,面积遍及坡顶到坡趾。边坡台阶处发生了剪切破坏,面积只涉及台阶附近。坡趾和坡底发生了拉伸与剪切的复合破坏,坡底所涉及的深度最大可达上百米。

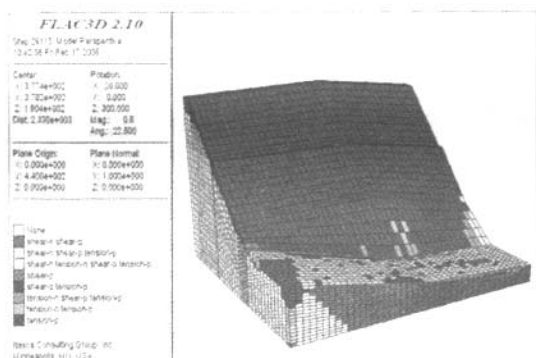


图12 边坡的破坏场

Fig. 12 The failure distribution of slope

4 结论

本文采用 FLAC^{3D} 三维有限差分计算方法,对首钢水厂铁矿Ⅳ区边坡岩体应力场、位移场、破坏场进行了系统研究和分析,并对Ⅳ-2剖面的四个典型位置进行了监测,模拟结果如下:边坡的整体并未发生较大的破坏应力和位移,没有产生大范围的破坏,所以边坡的整体是稳定的;但坡面的浅层部分局部

出现了拉应力,坡趾和台阶处的剪应力值比较大,坡面的浅层部分尤其是台阶和坡趾处的位移值较大,坡底有隆起的趋势,坡面的浅层部分、台阶、坡趾和坡底发生了塑性破坏。以上这些现象都表明边坡的局部是不稳定的,尤其是台阶和坡趾等关键部位更应该引起注意,建议应根据实际情况对上述部位进行适当的加固。

参考文献

- [1] ITASCA Consulting Group, Inc. FLAC3D User Manuals [M], Version 2.1, Minneapolis, Minnesota, 2002, 6.
- [2] 龚纪文,席先武,王岳军,等.应力与变形的数值模型方法—数值模拟软件 FLAC 介绍[J].华东地质学院学报,2002(9):220-227.
- [3] 刘波,韩彦辉. FLAC 原理、实例与应用指南 [M]. 北京:人民交通出版社,2005.
- [4] 张东日,陶连金,李凤仪,等.拉格朗日元法及其应用软件 FLAC[J].矿山压力与顶板管理,1997(3):224-226.
- [5] 北京科技大学,首钢矿业公司.露天矿深部安全强化开采综合技术研究专题研究报告[R].2004.
- [6] 苗胜军.复杂岩体边坡变形与失稳预测研究[D].北京:北京科技大学,2006.

(上接第24页)

参考文献

- [1] 邓玉书.云南个旧锡矿和构造的关系[J].地质论评,1951,16(2):57-66.
- [2] 汪自芬.关于个旧锡矿成矿的几个问题[J].地质学报,1983,57(2):154-163.
- [3] 彭程电.试论个旧锡矿成矿条件及矿床类型、模式[J].云南地质,1985,4(1):154-163.
- [4] 庄永秋,王任重,杨树培,等.云南个旧锡多金属矿床[M].北京:地震出版社,1996:108-124.
- [5] Jiang Zhuwei, Nicholas H S O, Terence D B, et al. Numerical modeling of fault-controlled fluid flow in the genesis of tin deposits of the Malage ore field, Gejiu mining district, China [J]. Economic Geology, 2001(92):228-247.
- [6] 金祖德.个旧土状赤铁矿型锡矿成因商榷[J].地质与勘探,1981,17(7):32-34.
- [7] 金祖德.个旧层状赤铁矿型锡矿热液成因之否定[J].地质与勘探,1991,27(1):19-20.
- [8] 彭张翔.个旧锡矿成矿模式商榷[J].云南地质,1992,11(4):362-368.
- [9] 周建平,徐克勤,华仁民,等.个旧等锡矿中沉积组构的发现与矿床成因新探[J].自然科学进展,1999,9(5):419-422.
- [10] 张欢,高振敏,马德云,等.个旧锡矿区脉状黄铁矿和胶状结

构黄铁矿中锡的分布及其成因意义[J].矿物学报,2004,24(1):87-91.

- [11] 秦德先.个旧锡矿的矿床成因与找矿新发现[J].昆明理工大学学报:理工版,2001,26(6):38.
- [12] 秦德先,谈树成,范柱国,等.个旧—大厂地区地质构造演化及锡多金属成矿[J].矿物学报,2004,24(2):117-123.
- [13] 秦德先,黎应书,谈树成,等.云南个旧锡矿成矿年代[J].地质科学,2006,41(1):122-132.
- [14] 秦德先,黎应书,范柱国,等.个旧锡矿地球化学及成矿作用演化[J].中国工程科学,2006,8(1):30-39.
- [15] 黎应书,秦德先,党玉涛,等.锡矿床与基性岩超基性岩的关系探讨[J].中国工程科学,2005(增刊):267-274.
- [16] 黎应书,秦德先,党玉涛,等.云南个旧东区玄武岩地质地球化学特征[C]//中国科协2005年学术年会论文集,以科学发展观促进科技创新(上).北京:中国科学技术出版社,2005:366-373.
- [17] 黎应书,秦德先,党玉涛,等.云南个旧东区玄武岩岩石学特征[J].科技导报,2006,24(2):70-72.
- [18] 黎应书,秦德先,党玉涛,等.云南个旧锡矿床铅、硫同位素研究[J].地质与勘探,2006,24(2):49-53.
- [19] 黎应书,秦德先,党玉涛,等.云南个旧锡矿的玄武岩成矿[J].吉林大学学报:地球科学版,2006,36(3):326-335.