

露天转地采人工境界矿柱法对边坡稳定性的影响

路 峰, 尤春安, 栾武臣, 杜 文, 赵 坤, 吕孝鹏

(山东科技大学 土木建筑学院, 山东 青岛 266590)

摘 要:通过 ANSYS 数值模拟强度折减法, 分析了归来庄金矿采用人工境界矿柱法对边坡稳定性的影响, 对比了在人工境界矿柱构建之前、构建过程中和构建之后的边坡稳定性, 表明人工境界矿柱具有良好的支撑作用, 对归来庄金矿边坡稳定起到了重要作用。

关键词:边坡; 稳定性; 人工境界矿柱; 露天转地采

中图分类号: TD82

文献标志码: A

文章编号: 1672-3767(2013)04-0040-05

The Influence of Artificial Boundary Pillar Method in Open-pit to Underground Mining Slope Stability

Lu Feng, You Chun'an, Luan Wuchen, Du Wen, Zhao Kun, Lü Xiaopeng

(College of Civil Engineering and Architecture, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: The slope stability before, in and after the process of designing artificial boundary pillar was compared in Guilai village Gold Mine through ANSYS numerical simulation of strength reduction method. It is found that the supporting rule of the artificial boundary pillar for the open-pit slope stability is important for the slope stability of Guilai village Gold Mine.

Key words: slope project; stability; artificial boundary pillar; open-pit to underground mining

在矿山系统中, 随着露天开采的延伸, 剥采比及剥离费用的不断增加, 露天开采成本不断提高, 我国一些露天矿山开始相继转入地下开采^[1]。在露天转地下开采过程中, 人工境界矿柱的构建对边坡稳定性有着重要影响。目前, 对受自身条件影响的露天边坡的稳定性研究^[2-4]较多, 缺乏对露天坑底构建人工境界矿柱前后边坡稳定性变化的研究。本研究分别针对人工境界矿柱构建前期、构建过程中和构建之后的边坡稳定性, 分析了人工境界矿柱对边坡的影响。

山东黄金归来庄金矿浅部采用露天开采, 设计露采坑底境界标高-30 m, 平面最大尺寸 570 m×331 m, 最大深度 180 m。经过近 20 年的开采, 开采深度较深, 形成比较陡峭的露天高边坡, 截至 2010 年 7 月, 已接近最终境界, 深部采用地下开采。为了保证目前的产量, 充分利用资源, 本研究创新性提出提前开采露天转地下的境界矿柱, 并用钢筋混凝土回填, 形成地下开采的人工境界矿柱, 以解决矿井的产量衔接问题。

1 露天转地采人工境界矿柱构建对边坡稳定性的影响

影响边坡稳定性的因素很多^[5], 基于单一露天开采影响下的边坡破坏形式和地下采动对边坡稳定性影响因素分析, 可综合判断露天地下联合作用下边坡将整体出现两种典型的滑动现象, 一是岩体沿坡面下滑, 二是岩体向深部采空区下滑(边坡坡面的塌陷)。因此, 在进行露天与地下联合开采时, 地下采空区上方的人员、设备受到脚底岩体的变形与坍塌的威胁, 生产工人与露天大型采掘设备随时都有可能因采空区塌陷而被

收稿日期: 2013-05-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(51274131)

作者简介: 路 峰(1984—), 男, 山东栖霞人, 硕士研究生, 从事地下工程、边坡工程方面的研究. E-mail: lufeng0111@126.com

掩埋,导致重大的人员伤亡事故以及财产损失。

在采空区留设结构整体性较好,强度和稳定性比天然矿柱提高 2~3 倍的人工境界矿柱(图 1),能够对边坡起到更好的支撑作用。同时,境界矿柱的安全与否,也会严重影响地下开采的安全。

2 有限元计算模型的建立

2.1 有限元强度折减法基本原理

有限元强度折减法基本原理是通过不断降低岩体强度使有限元计算最终达到破坏状态,强度降低的倍数就是强度折减安全系数^[6-7]。即将坡体的 c 和 ϕ 同时除以一个折减系数 ω ,得到一组折减后的 c', ϕ' 值,取代了原来的 c, ϕ 值,然后作为新的材料参数输入进行计算,直至计算不收敛或关键部位发生位移突变时,坡体达到极限状态发生剪切破坏。据有限元计算结果可自动得到坡体的破坏滑动面,并获得强度折减安全系数 ω 。其中:

$$c' = c/\omega; \quad (1)$$

$$\phi' = \arctan(\tan\phi/\omega)。 \quad (2)$$

式中: c —岩体粘聚力,MPa; c' —折减后岩体粘聚力,MPa; ϕ —岩体内摩擦角, $^\circ$; ϕ' —折减后岩体内摩擦角, $^\circ$; ω —安全系数。

利用强度折减法,以塑性区的贯通作为边坡破坏的标准,利用 ANSYS 软件进行计算,得出人工境界矿柱高度对边坡稳定性的影响,进一步分析边坡的安全系数随着人工境界矿柱高度的变化规律。

在进行有限元强度折减计算时,岩土材料需要选用合理的本构模型,安全系数的大小与采用的本构关系密切相关,岩土材料一般选用理想弹塑性本构模型。在岩石、土壤的有限元分析中,采用 DP 材料可得到较为精确的结果。

2.2 有限元模型的建立

本研究运用有限元软件 ANSYS,采用强度折减系数法^[8-9]模拟边坡岩体,分析边坡的稳定性。计算模型与网格划分按照边坡高度 170.9 m,综合边坡角为 54° 。计算模型采用简化的二维平面模型,为了减少边界条件的影响,模型计算范围竖直方向向下延伸 150 m,水平方向取 100 m。在模型两侧施加 X 向约束,在模型的底部施加 Y 向约束。计算模型忽略水平构造应力的影响,主要考虑自重重力场的影响。

2.3 计算采用的物理力学参数

归来庄金矿位于沂沭断裂带中段西侧,平邑-方城凹陷的南部边缘,总体为倾向北东的单斜构造。区域内中生代岩浆岩较为发育,岩性主要为灰岩、二长闪长玢岩、二长斑岩等。根据试验得到的岩石试块力学参数,在建立模型时对其进行一定的简化处理,考虑裂隙、结构面对岩石强度的削弱,采用强度折减法将其折减弱化为岩体的力学参数。计算时所采用的矿体及围岩的主要力学参数如表 1 所示。

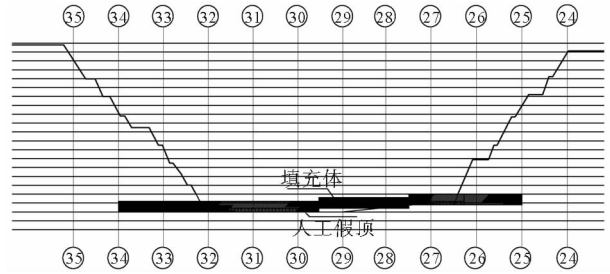


图 1 人工假顶结构断面图

Fig. 1 Structure sectional drawing of artificial roof

表 1 计算采用的物理力学参数表

Tab. 1 Physical and mechanics parameters in calculation

岩性	密度/(kg/m ³)	弹模/GPa	泊松比	粘聚力/MPa	内摩擦角/ $^\circ$
灰岩	2705	15	0.25	0.260	33
白云岩	2754	13	0.23	0.214	34
二长闪长玢岩	2558	12	0.25	0.244	35
金矿体	2430	10	0.20	0.140	30
人工矿柱(C20 砼)	2600	20	0.20	1.300	40

3 人工境界矿柱形成前边坡稳定性分析

对不扩帮延伸开采到-38 m 水平未进行地下开采的露天边坡进行有限元数值模拟。首先按岩体的原始强度参数进行有限元模拟计算,如果计算过程收敛,说明坡体仍处于稳定状态。然后选取折减系数,将岩体强度参数 c 和 ϕ 同时折减,将折减后的参数作为强度参数值,重新进行有限元计算。从小到大依次逐渐调整折减系数,直到计算不收敛或者坡面出现较大位移为止,此时的折减系数即为边坡体的稳定安全系数^[10]。计算结果如图 2 所示。

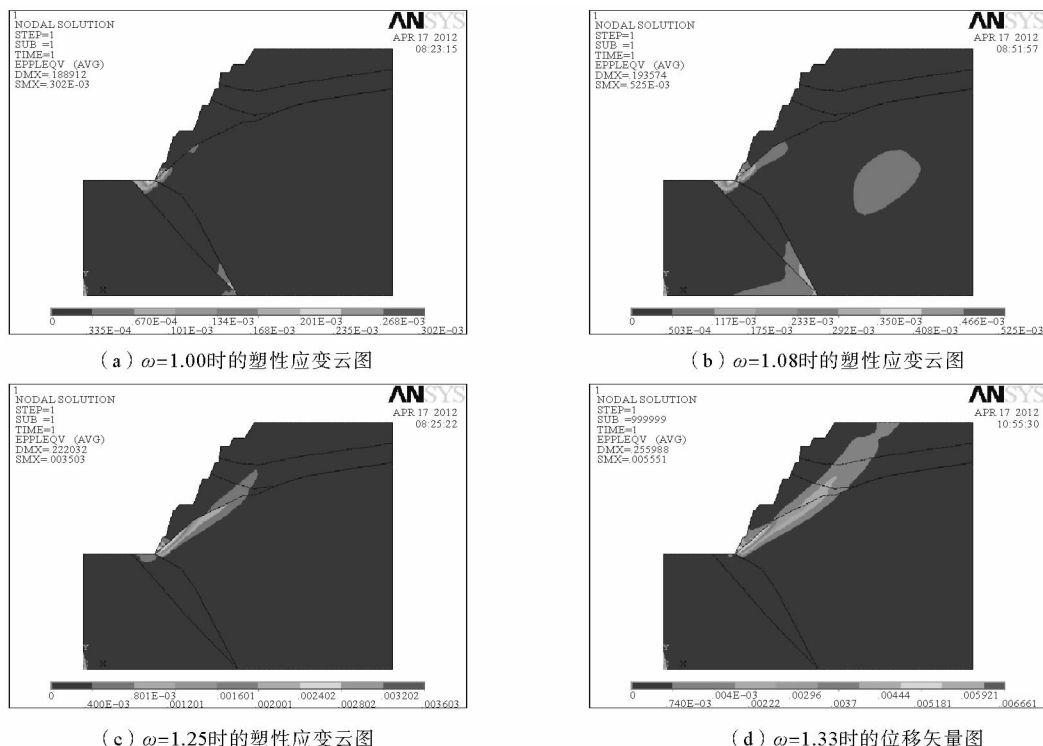


图 2 未进行地下开采的露天边坡数值分析结果图

Fig. 2 Open-pit slope numerical analysis results without underground mining

从 X 方向位移云图可以发现,边坡最大正位移出现在边坡的顶部,然后沿着坡面逐渐变小直至出现负方向的位移,坡脚处的位移都为负值;位移峰值分别为 8.129 mm 和 -25.27 mm,负向的位移值较大,但这种位移变化还不会导致边坡失稳破坏。按照这种位移变化规律继续发展,当边坡受到较大的扰动影响时,边坡局部将会首先发生破坏,位置位于坡脚处,边坡局部破坏首先会发生在坡脚位置。一旦坡脚位置发生破坏,由于上覆岩体自重影响,边坡上盘高陡边坡将会演变成整体失稳破坏。

4 人工境界矿柱形成过程中边坡稳定性分析

在露天坑底采取不剥岩方式,采用地下进路充填回采技术,回采坑底-38~-50 m 部分矿脉,用钢筋混凝土充填回采进路,使人工假顶与上盘围岩胶结成一体,通过分步开挖,逐渐形成嵌入式露天坑人工境界矿柱,如图 3 所示。

对不同厚度(3,5,8,10 和 12 m)境界矿柱形成后的露天边坡进行有限元分析,3 m 和 10 m 境界矿柱时的计算结果如图 4 和图 5 所示。

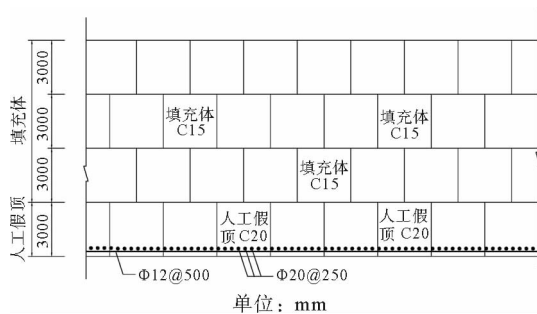
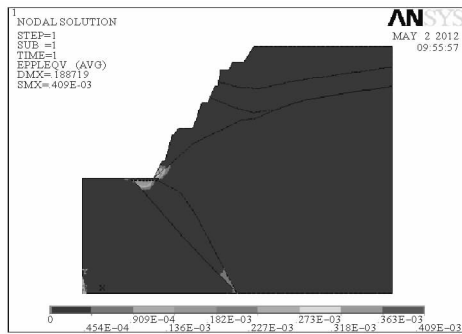
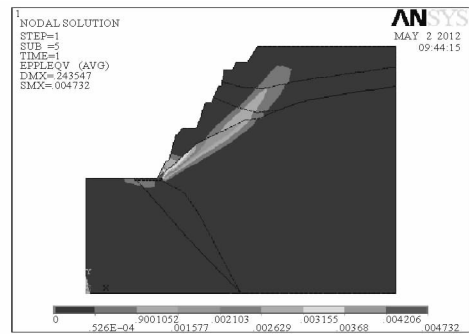


图 3 人工境界矿柱断面图

Fig. 3 Structure sectional drawing of artificial boundary pillar



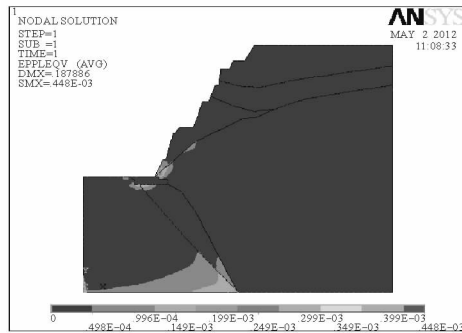
(a) $\omega=1.00$ 时的塑性应变云图



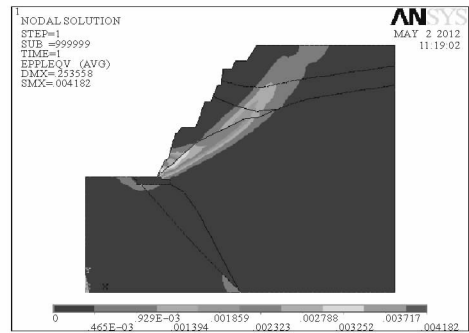
(b) $\omega=1.34$ 时的位移矢量图

图 4 3 m 厚度时数值分析结果图

Fig. 4 Numerical analysis results of 3 m thickness



(a) $\omega=1.00$ 时的塑性应变云图



(b) $\omega=1.39$ 时的位移矢量图

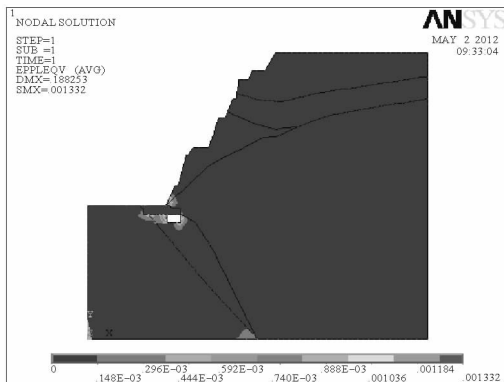
图 5 10 m 厚度时数值分析结果图(矿柱构建中)

Fig. 5 Numerical analysis results of 10 m thickness during artificial boundary pillar building

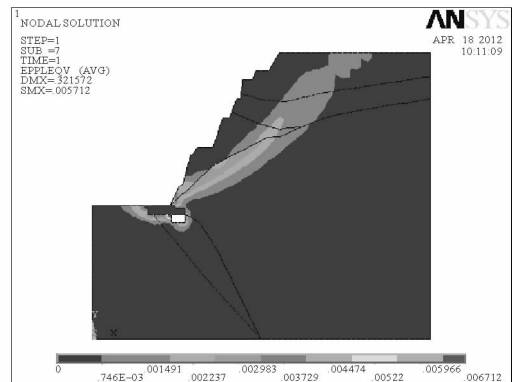
根据 X 方向位移可以看出,边坡最大正位移出现在边坡的顶部,然后逐渐变小直至出现负方向的位移。3 m 厚度境界矿柱时的位移极值为 8.23 和 -24.9 mm,10 m 厚度时为 9.15 和 -23.9 mm。随着境界矿柱厚度的增加,正向位移逐渐变大,负向位移的绝对值逐渐变小。

5 人工境界矿柱形成后边坡稳定性分析

人工境界矿柱形成后,在境界矿柱的安全保护下进行地下开采,采用进路充填回采技术。地下开采对露天边坡的稳定性影响,计算结果如图 6 所示。



(a) $\omega=1.00$ 时的塑性应变云图



(b) $\omega=1.38$ 时的塑性应变云图

图 6 10 m 厚度时数值分析结果图(矿柱构建后)

Fig. 6 Numerical analysis results of 10 m thickness after artificial boundary pillar building

边坡在坡脚处应力比较集中,较早进入塑性区,随着折减系数的不断增大,边坡的塑性区由坡脚不断向上延伸发展,直至贯通到坡顶,此时边坡发生破坏。从边坡临界状态的塑性应变云图看,不同厚度的境界矿柱下边坡的破坏方式相同,都是沿着坡面破坏,为圆弧形破坏。运用强度折减法计算得到的不同厚度境界矿柱下的边坡安全系数,可以发现,随着境界矿柱厚度的增加,边坡的安全系数得到提高,整体安全系数为1.34~1.38。

6 结论

1)人工境界矿柱构建之前,对开采到-38 m水平的单一露天边坡进行数值模拟,坡脚位置负向的位移值较大,这种位移状态下边坡不会发生破坏。边坡的安全系数为1.33,符合工程安全等级为一级的边坡工程,可以为后续工程提供安全保证。

2)人工境界矿柱构建之前,当 $\omega=1.08$ 时,在-30 m台阶(运输道)以下部位出现局部的塑性连通区,说明此时将出现局部破坏,需进行局部加固处理,以防边坡的坡跟出现局部失稳而影响边坡整体的稳定性。

3)人工境界矿柱构建过程中,边坡最大正位移出现在边坡的顶部,然后逐渐变小直至出现负方向的位移。对不同厚度(3 m和10 m)的境界矿柱形成中的露天边坡进行有限元分析,可见,随着境界矿柱厚度的增加,正向位移逐渐变大,负向位移的绝对值逐渐变小,安全系数由1.34变为1.39,这表明人工境界矿柱形成后对露天边坡具有支撑作用。

4)人工境界矿柱构建后,地下开采使得边坡的安全系数由开采前的1.39下降为1.38,为地下开采提供安全保证。

参考文献:

- [1]徐长佑. 露天转地下开采[M]. 武汉:武汉工业大学出版社,1989:1-8.
- [2]常春,周德培,王泳嘉,等. 露天矿开采深度对边坡稳定性的影响[J]. 岩石力学与工程学报,1998,17(3):248-252.
Chang Chun,Zhou Depei,Wang Yongjia, et al. The effect of excavation depth of openmine on slope stability[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,1998,17(3):248-252.
- [3]孙玉科,姚宝魁,许兵. 矿山边坡稳定性研究的回顾与展望[J]. 地质工程学报,1998(4):305-311.
Sun Yuke,Yao Baokui,Xu Bing. Research of stability of slope on the open pit in china[J]. Journal of Engineering Geology, 1998(4):305-311.
- [4]秦四清. 斜坡失稳的突变模型与混沌机制[J]. 岩石力学与工程学报,2000,19(4):486-492.
Qin Siqing. Nonlinear catastrophe model of slope instability and chaotic dynamics mechanism of slope evolution process[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2000,19(4):486-492.
- [5]孙世国,蔡美峰,王思敬. 地下与露天复合采动效应及边坡变形机理[J]. 岩石力学与工程学报,1999,18(5):497-502.
Sun Shiguo,Cai Meifeng,Wang Sijing. Effect of combined underground and open pit mining and deformation mechanism of slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,1999,18(5):497-502.
- [6]赵尚毅,郑颖人,张玉芬. 极限分析有限元法讲座-Ⅱ有限元强度折减法中边坡失稳的判据讨论[J]. 岩土力学,2005,26(2):332-336.
Zhao Shangyi,Zheng Yingren,Zhang Yufen. Study on slope failure criterion in strength reduction finite element method[J]. Rock and Soil Mechanics,2005,26(2):332-336.
- [7]宋二祥. 土工结构安全系数的有限元计算[J]. 岩土工程学报,1997,19(1):1-7.
Song Erxiang. Finite element analysis of safety factor for soil structures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997,19(1):1-7.
- [8]宋二祥,高翔,邱月. 基坑土钉支护安全系数的强度参数折减有限元方法[J]. 岩土工程学报,2005,27(3):258-263.
Song Erxiang,Gao Xiang,Qiu Yue. Finite element calculation for safety factor of soil nailing through reduction of strength parameters[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2005,27(3):258-263.
- [9]Zheng Y R,Zhao S Y,Deng C J, et al. Development of finite element limiting analysis method and its application to geotechnical engineering[J]. Engineering Sciences,2006,8(12):39-61.
- [10]刘小丽,周德培. 岩土边坡系统稳定性评价初探[J]. 岩石力学与工程学报,2002,21(9):1378-1382.
Liu Xiaoli,Zhou Depei. Study on evaluation method of system stability for rock and soil slopes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2002,21(9):1378-1382.