

重庆市合川区磨子岩危岩形成过程有限元数值模拟*

陈洪凯, 宋云梅

(重庆交通大学 岩土工程研究所, 重庆 400074)

摘要:重庆市合川区磨子岩危岩3个独立危岩W1~W3中,W2危岩方量最大,岩性齐全,选取W2危岩为研究对象,对它的形成过程进行数值模拟。模拟结果表明,随着采空范围的扩大,陡崖内部各点应力应变增大。模型所示开采条件下,陡崖X方向的最大位移达到0.2036 m,最大应力为7.75 MPa,陡崖顶部和采空区上方围岩应力应变变化明显,形成一个临空面附近的应力应变变化集中区;危岩体内部各点应力应变逐渐增大,后部裂缝扩展并贯通成主控结构面,岩体内部各点位移增至 $7.091 \times 10^{-3} \sim 19.339 \times 10^{-3}$ m,应力增至为-1.28~1.73 MPa。数值模拟结果对认识该地采矿活动下危岩的变形破坏特性有积极意义。

关键词:磨子岩危岩;形成过程;矿井采煤;有限元数值模拟

中图分类号:P642.21

文献标志码:A

文章编号:1672-6693(2016)01-0036-04

磨子岩陡崖屹立于重庆市合川区三汇镇北东侧,属中低山地貌,地处新华夏构造体系川东褶皱带华蓥山复式背斜的次级褶皱龙家湾背斜的东翼,裂隙发育且正下方属重庆市合川区三汇镇郑家弯煤矿磨子岩井的矿权设置,采空区占研究区面积比例为40%,区内地下采矿活动频繁。危岩沿陡崖成带状分布,南北长近1 km,共涉及3个大的独立危岩体,多个次级危岩块体,方量506 000 m³。磨子岩陡崖整体稳定性差,陡崖后侧卸荷裂隙发育,近年来发生过多处大规模崩塌,单次塌方量达5 m³,目前累计崩塌量已达600 000 m³。此后不时发生小规模崩塌,磨子岩危岩带直接影响危岩区下方村民36户115人的生命及财产安全,潜在影响襄渝铁路及三合一矿矿区的安全。

在矿山类危岩体形成过程中,采矿活动为诱发崩塌灾害的主要因素。地质构造及降雨作用使得岩体内局部形成细小的拉张裂缝,而采矿作用则使岩体内裂缝进一步加宽加深,形成主控结构面;同时随着开采深度增加或在降雨作用下,危岩体失去稳定性。邓广哲^[1]对铜州市区矿山高陡山体边坡崩塌灾害发生的影响因素及演化机理进行了分析;尹光志等人^[2]采用室内相似模型试验及有限差分基础上的Flac程序对煤层开采引起的岩体移动、压力分布以及地表沉陷规律进行了研究;彭红明^[3]对贵州省开阳磷矿矿区引起的崩塌灾害形成机理进行了数值模拟研究;任伟忠等人就原覆盖岩层条件下地下采矿的地表陷落特征^[4]及围岩变形特征^[5]进行了模型试验研究;肖江等人^[6]模拟了露天矿边坡的开挖和形成过程,得出了边坡的变形破坏模式;隋惠权等人^[7]从地质动力的角度分析了开采活动对地表变形及矿区地质灾害的影响。以上论文均以地表及围岩变形特征为研究对象对采矿活动进行分析,而刘传正^[8]则以重庆武隆鸡尾山矿区崩塌为例,分析了采矿活动对崩塌灾害的影响因素,本研究以磨子岩W2危岩为研究对象,通过有限元数值模拟,分析地下采矿对危岩变形破坏特征的影响,以便为磨子岩危岩崩塌灾害的防治提供参考资料。

1 磨子岩危岩地质模型

1.1 磨子岩危岩地质模型概况

磨子岩3个危岩体即W1~W3中,W2危岩方量最大,岩性齐全,最具有代表性,故本研究选取W2危岩作为研究对象。W2危岩体位于危岩带的中部,为滑移-剪切式破坏,危岩顶部与母岩脱离,裂缝张开宽度120~

* 收稿日期:2014-10-26 修回日期:2015-10-13 网络出版时间:2015-12-02 13:29

资助项目:国家自然科学基金(No. 51378521; No. 11272185);2013年重庆高校创新团队建设资助项目(No. KJTD201305);重庆市两江学者计划专项经费资助项目

作者简介:陈洪凯,男,教授,博士,研究方向为动力地力学、地质安全理论及工程结构健康,E-mail:chkcxf@163.com;通信作者:宋云梅,E-mail:sym90310@sina.com

网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/detail/50.1165.n.20151202.1329.054.html

450 cm,可见深度 20~42 m,底部充填少量岩屑,裂隙壁面见擦痕,属滑移式危岩,主滑方向 308°。危岩体形状类似于板状,长约 102 m,均厚 38 m,均高 70 m,形成危岩体的体积约 271 000 m³。W2 危岩体正面图及平面图分别如图 1、2 所示。



图 1 磨子岩 W2 危岩正面图

Fig. 1 Front view of W2 perilous rock

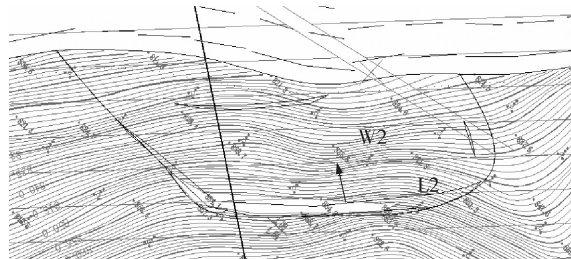


图 2 磨子岩 W2 危岩平面图

Fig. 2 The plan of W2 perilous rock

据地面调查与区域地质资料,危岩坡面近于直立,岩层产状 125°∠20°,为反向坡。W2 危岩体上部岩体主要岩性为三叠系下统飞仙关组(T1f),以紫色钙质页岩、灰色泥质灰岩、石灰岩、鲕状灰岩为主。厚度较稳定,厚 435.4~575.9 m,平均厚

度 500.5 m。危岩体下部及基岩组成岩性为二叠系上统长兴组(P2c),以灰、深灰色中厚及厚层状含燧石灰岩夹泥质灰岩和白云质灰岩为主,上部与中下部燧石结核成层状分布,顶部、中部与底部含少量团块状燧石结核。含丰富动物化石,该层平均厚约 175 m。磨子岩 W2 危岩地质剖面示意图如图 3 所示。

1.2 磨子岩 W2 危岩破坏解体机制

采矿活动改变地质体结构,引起上覆岩体应力调整,陡崖顶部岩体产生拉应力,岩体沿已有结构面张开形成拉张裂缝,采矿活动导致岩体的完整性下降。随着采空范围的不断扩大以及降雨的作用,裂缝不断扩展,向下贯通,形成贯通裂缝,最终形成危岩体。脱离了母岩的危岩体在自重作用下,裂缝底部应力集中,岩体产生剪切变形,当变形到一定程度时,危岩体被剪断而发生崩塌破坏。其滑移-剪切示意图如图 4 所示。

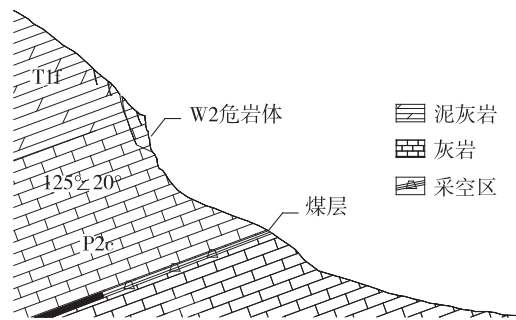


图 3 磨子岩 W2 危岩地质剖面示意图

Fig. 3 Geological sketch section of W2 perilous rock

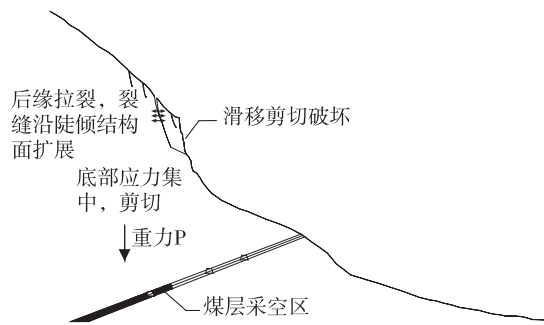


图 4 磨子岩 W2 危岩滑移-剪切示意图

Fig. 4 Shear-slip schematic diagram of 2 perilous rock

2 磨子岩危岩有限元模型

根据矿井掘进过程中山体及危岩体关键部位的位移及应力变化特征,采用 ansys 10.0 有限元数值模拟分析软件,选取 W2 危岩体为原型建立二维有限元数值模型;由于危岩体内各种结构面(如层理面、卸荷裂隙等)分布复杂且调查资料有限,该模型不考虑危岩体内各种结构面的作用。在所建二维数值模型 X=0 和 Y=0 两个坐标轴上,均施加 X 和 Y 方向位移常数为 0 的位移边界约束,采用平面四节点四边形单元 PLAN42 将整个模型划分为 2 001 个单元,划分单元后的有限元模型如图 5 所示。

模型参数的选取:根据地质勘察资料,W2 危岩体主要地层岩性为灰岩,灰岩弹性模量为 3×10⁴ MPa,泊松比为 0.25,岩体内摩擦角天然状态下取值为 40°,饱和取值为 38.5°;粘聚力天然状态下取值为 2 900 kPa,饱和取值为 2 600 kPa;岩体天然容重

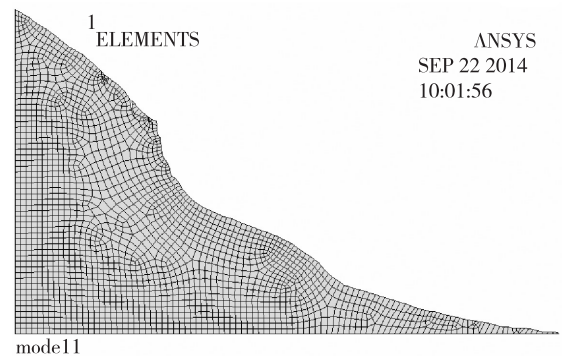


图 5 磨子岩 W2 危岩有限元网格图

Fig. 5 The grid map of the finite element of No. 2 perilous rock

为 $26.72 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$, 饱和容重为 $26.77 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$ 。由于暴雨工况下危岩的稳定性较差, 模型以采矿活动为单一分析因素, 故模型参数均选取饱和参数。

3 矿井掘进过程中山体位移及应力变化特性分析

为分析采矿过程中山体内部位移及应力的变化过程, 以采矿深度为单一分析因素, 模拟过程按采矿活动分为 3 个阶段: 阶段一为未开挖阶段; 阶段二为采空区初步形成, 开采深度约占模型所示煤层深度的 $1/3$; 第三阶段采空区进一步扩大, 开采深度约占模型所示煤层深度的 $2/3$ 。有关位移和应力模拟结果分别见封二彩图 6、封三彩图 7。

3.1 山体位移变化特性分析

对比矿井开采前后, 分析 3 个开挖阶段下 X 方向上的位移变化特性。从封二彩图 6 可以看出:

1) 在初始状态即未开采状态, 陡崖顶部在自重及卸荷作用下位移最大, 最大位移为 0.0383 m , 危岩体后部裂缝尖端位移为 0.0375 m , 危岩体内各点位移在 $-0.764 \times 10^{-3} \sim 1.347 \times 10^{-3} \text{ m}$ 之间(封二彩图 6a)。

2) 在初步开采条件下, 即当采空区初步形成时, 采空区上覆岩体位移逐渐增大, 成为除陡崖后部外第二个位移较大的区域, 最大位移为 0.0686 m ; 危岩体后部裂缝尖端位移逐渐增大, 在封二彩图 6b 图所示开采情况下, 位移为 0.0381 m , 有扩展趋势; 危岩体逐渐形成并且位移逐渐增大, 危岩体内各点位移增大至 $0.525 \times 10^{-3} \sim 2.202 \times 10^{-3} \text{ m}$ 。

3) 随着采矿深度的扩大, 岩体位移进一步增大, 从陡崖顶部到采空区上部(包括危岩体产生的区域), 整体位移较大, 采空区上覆围岩最大位移达 0.2036 m ; 危岩体内各点位移逐渐增大, 后部裂缝尖端位移增大到 0.0617 m , 有进一步扩展并且贯通的趋势; 危岩体内各点位移达到 $7.091 \times 10^{-3} \sim 19.339 \times 10^{-3} \text{ m}$, 由此可见, 随着矿井的进一步掘进, 危岩危险性提高(封二彩图 6c)。

总的看来, 在矿井的掘进过程中, 山体整体位移增大, 危险区域逐渐扩大, 危岩体发生破坏的危险性增加。

3.2 山体应力变化特性分析

采矿活动改变了地质体结构, 内部应力发生重分布, 陡崖顶部拉应力集中, 陡崖底部压应力集中。危岩体后部裂缝有扩展趋势, 逐渐形成主控结构面; 随着采空区的进一步扩展, 主控结构面端部应力集中; 裂缝进一步扩展, 主控结构面逐渐贯通。分析山体在矿井掘进过程中 X 方向的应力变化, 结果如封二彩图 7 所示, 从中可知:

1) 初始应力状态下, 新构造运动及河流下切使得陡崖顶部应力集中, 陡崖顶部 X 方向应力最大, 最大应力为 4.46 MPa , 危岩体后部裂缝尖端表现为压应力, 应力为 -0.2360 MPa , 危岩体内部各点 X 方向的应力范围为 $-0.6649 \sim 0.0845 \text{ MPa}$ (封二彩图 7a)。

2) 初步开采条件下, 应力集中区域逐步扩大, 采空区上覆围岩应力集中, 成为除陡崖顶部外的第二个应力集中明显的区域; 陡崖顶部应力逐渐增大至 4.52 MPa ; 危岩体后部裂缝压应力逐渐减小至 -0.0017 MPa ; 危岩体内部各点应力增大, 为 $-0.1385 \sim 1.03 \text{ MPa}$ (封二彩图 7b)。

3) 随着开采范围的进一步扩大, 应力集中范围也进一步扩大, 由封二彩图 7c 可以看出, 采空区上覆围岩和陡崖顶部逐渐形成一个临空面附近的整体, 拉应力增大, 危险性增加; X 方向应力逐渐增大, 最大应力达 7.75 MPa ; 裂缝尖端有扩展趋势, 形成拉应力, 拉应力为 4.1896 MPa 。如果开采程度进一步加大, 尖端拉应力将逐渐增大, 最终贯通形成主控结构面; 危岩体内部应力逐渐增大, 岩体内部各点应力为 $-1.28 \sim 1.73 \text{ MPa}$ 。

总之, 在矿井掘进过程中, 山体内部各点拉应力逐渐增大, 集中区域逐步扩大, 采矿活动使得危岩体后部裂缝扩展并最终贯通。比较封二彩图 7 中 3 个图, 发现封二彩图 7c 中危岩体内部出现局部压应力增大的现象, 其中原因为陡崖顶部和采空区上覆岩体拉应力集中明显, 陡崖有滑移垮塌趋势, 造成岩体内部局部挤压增大。

4 结论

磨子岩危岩破坏方式为滑移-剪切破坏, 在采矿活动的作用下, 陡崖整体稳定性较差。本研究选取其中 W2 危岩作为地质模型, 利用数值模拟软件分析磨子岩危岩的破坏特征, 得出以下结论:

1) 采矿活动引起岩体内部应力重分布, 陡崖顶部拉应力集中明显, 随着采矿深度的增加, 陡崖顶部和采空区上方围岩应力应变变化明显, 形成一个临空面附近的应力应变变化集中区。模型所示开采条件下, X 方向的最大应力为 7.75 MPa , 最大位移达到 0.2036 m 。

2) 采矿活动使得危岩体内部各点的应力应变逐渐增大, 后部裂缝扩展并最终贯通成主控结构面。该模式所示开采情况下, 危岩体内部各点位移增至 $7.091 \times 10^{-3} \sim 19.339 \times 10^{-3} \text{ m}$, 应力增至 $-1.28 \sim 1.73 \text{ MPa}$, 因挤压

造成岩体内局部压应力增大。

3) 磨子岩危岩的数值模拟结果较好地反映了危岩体在整个采矿过程中的稳定状态,进一步分析得到了危岩内部位移及应力变化特征,基本揭示了磨子岩危岩的形成机制。

参考文献:

- [1] 邓广哲. 矿山高陡边坡崩塌灾害演化的成因分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(增刊): 45-48.
Deng G Z. Cause analysis of landslide disaster evolvement of high hilly slope in mine[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(sup): 45-48.
- [2] 尹光志, 鲜学福. 大倾斜煤层开采岩移基本规律的研究[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(4): 450-453.
Yin G Z, Xian X F. Basic behaviour of strata movement in seam with deep dip angle[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(4): 450-453.
- [3] 彭红明. 贵州省开阳磷矿洋水矿区崩塌灾害形成机理研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2012.
Peng H M. Research on formation mechanism of Yangshui Mining area collapse of Kaiyang Phosphate in Guizhou[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2012.
- [4] 任伟中, 白世伟, 葛修润. 原覆盖层条件下地下采矿引起的地表变形陷落特征模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(10): 1715-1719.
Ren W Z, Bai S W, Ge X R. Modeling test study on deformation and subsidence of ground surface induced by underground mining with thick overburden[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(10): 1715-1719.
- [5] 任伟中, 白世伟, 孙桂凤, 等. 原覆盖层条件下地下采矿引起的地表及围岩变形破坏特征模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(21): 3935-3941.
Ren W Z, Bai S W, Sun G F, et al. Research on deformation and subsidence characters of ground and surrounding rock induced by underground mining under thick covering terrain by model test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(21): 3935-3941.
- [6] 肖江, 高喜才. 复杂地质条件下露天矿边坡稳定的相似模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增2): 3661-3666.
Xiao J, Gao X C. Similar simulation research on stability of open-pit mine slope under complicated geological conditions[J]. Chinese Journal of rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(sup2): 3661-3666.
- [7] 隋惠权, 于广明. 地质动力引起岩层移动变异及突变灾害研究[J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2002, 21(1): 25-27.
Sui H Q, Yu G M. Study on calamity and abnormality of rock strata movement affected by geodynamic[J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science, 2002, 21(1): 25-27.
- [8] 刘传正. 重庆武隆鸡尾山危岩体形成与崩塌灾害成因分析[J]. 工程地质学报, 2010, 18(3): 297-304.
Liu C Z. Mechanism analysis on the Jiweishan rockfall disaster happened in Wulong, Chongqing, June 5, 2009 [J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(3): 297-304.

Resources, Environment and Ecology in Three Gorges Area

Numerical Simulation for Formation Process of Moziyan Perilous Rock in Hechuan District of Chongqing

CHEN Hongkai, SONG Yunmei

(Institute of Geotechnical Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: In the three independent perilous rocks W1~W3 of Moziyan cliffs in Hechuan district of Chongqing, we selected W2 number of perilous rock as the main object to build finite element numerical simulation model, because of its' large volume and complete lithology. The result shows that stress and strain gradually increase with the expansion of scope of mining. In the conditions of model, the maximum displacement of cliffs in X direction can reach 0.2036 m, the maximum stress is 7.75 MPa. Stress and strain change significantly on the top of cliffs and goafs, and forming a concentration area near the free surface; And the stress and stain of perilous rock increase gradually, ultimately the crack expand and though into main control structure surface, the displacement of perilous rock reaches $0.091 \times 10^{-3} \sim 19.339 \times 10^{-3}$ m, and stress reaches $-1.28 \sim 1.73$ MPa. The results of numerical simulation scientifically prove the deformation and failure characteristics of perilous rock this area under the mining activities.

Key words: the Moziyan perilous rock; formation process; coal mining; finite element numerical simulation

(责任编辑 方 兴)