

文章编号: 1673-3363-(2013)04-0573-05

地下采矿对岩质坡体稳定性影响的 参数敏感性分析

徐洪^{1,2}, 姚光华^{1,2}

(1. 外生成矿与矿山环境重庆市重点实验室(重庆地质矿产研究院), 重庆 400042;

2. 煤炭资源与安全开采国家重点实验室重庆研究中心, 重庆 400042)

摘要 为了获得地下采矿对岩质坡体稳定性的影响规律, 采用数值模拟方法, 结合正交试验, 分别就开采过程中煤层厚度、开采深度、采空区的面积、工作面与坡体的相对位置以及煤层倾角等因素变化对坡体稳定性的影响过程及其敏感性进行了分析。结果表明, 采矿活动对坡体稳定性的影响随采空区面积和煤层厚度的增加而增加, 随煤层倾角以及采空区与坡体距离增大而减小, 开采深度对坡体稳定性的影响表现在先增加后降低, 当深度在 200~250 m 时开采对坡体稳定性的影响最大。在满足生产需求的条件下, 控制采空区面积是减少开采对坡体稳定性影响的最有效手段。

关键词 岩质坡体; 参数敏感性; 稳定性; 安全系数变化率

中图分类号 TD 323

文献标志码 A

Influence parameter sensitivity of underground mining on rock slop stability

XU Hong^{1,2}, YAO Guang-hua^{1,2}

(1. Chongqing Key Laboratory of Exogenic Mineralization and Mine Environment, Chongqing Institute of Geology and Mineral Resources, Chongqing 400042, China; 2. Chongqing Research Center of State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, Chongqing 400042, China)

Abstract To obtain the influence of underground mining activity on rock slop stability, by using numerical simulation and orthogonal experiment, the influencing process of main factor changes (e.g. coal seam thickness, mining depth, goaf size, relative position between coal face and slop, coal seam dip angle) on rock slop stability and the parameter sensitivities during mining process were analyzed in this paper. The results show that the influence degree of mining activity on rock slop stability increases with the increase of goaf size and coal seam thickness, and decreases with the increment of coal seam dip angle and relative position between coal face and slop. Meanwhile, the influence of mining depth on slop stability firstly increases, then decreases, while mining in the depth between 200~250m. most influence the slop stability. When meeting the production demands, the goaf size control is the best method to reduce the influence of mining activity on rock slop stability.

Key words rock slop; parameter sensitivity; slop stability; change rate of safety coefficient

收稿日期: 2012-06-19

基金项目: 重庆市国土资源和房屋管理局科技计划项目(CIGMR1101)

作者简介: 徐洪 (1979-), 男, 重庆市潼南县人, 博士, 高级工程师, 从事地质灾害地质环境方面的研究。

E-mail: njzy_fengyu@qq.com

Tel: 023-88316083

地下矿产资源的开发破坏了岩土体原有的自然平衡状态,致使采空区周边岩体发生相应的移动及变形,并逐步发展至地表,从而产生相应的地质环境问题,目前国内外学者对此做了大量的研究与探索。对于山区开采而言,地下煤层开采引起的山体失稳破坏,是影响山区煤矿安全生产和生态环境的重要因素,也是山区煤矿采矿沉陷与采动损害的重要特点之一^[1]。文献[1-4]分别从采煤沉陷理论、数值模拟以及相似模型试验等方面对山区地下开采所引发的地表移动以及坡体变形破坏规律等进行了分析研究,得到了一系列具有指导意义的结论及规律,对于山区地下采矿所引发的地表损害评价及控制起到了很好的借鉴作用。显然,采矿活动诱发的坡体稳定性问题涉及 2 方面的主要因素:1) 坡体自身因素,如坡体的岩土结构组合、坡体几何形态、坡体裂隙发育情况等;2) 采矿工程活动的因素,包括采空区范围、开采深度、煤层倾角等。尽管前人在研究中对于上述因素有所涉及,但对于各参数对坡体稳定性的影响程度尚无相关的研究,而对各参数进行相应的研究,找出其中主要的影响因素,并针对主要因素采取措施,才能够在预防和控制采矿活动所引发的坡体稳定性问题过程中起到事半功倍的效果。鉴于此,本文拟从人类工程活动角度探讨不同的采矿参数对岩质坡体稳定性的影响。

1 采矿活动引发山体失稳实例及建模

地下采矿活动与地表山体的相互影响是一个很复杂的应力应变过程,很难用数学上的解析方法加以描述,而采用数值模拟能处理解析方法无法处理的复杂的相互作用过程及本构关系,因此本文拟采用数值分析方法对上述问题进行研究,模拟计算采用大型有限元分析软件 Ansys 进行。以某一具体实例为依据,坡体岩石为吴家坪组二段灰岩和长兴组灰岩,其中长兴组为灰黑色中至厚层状灰岩、燧灰岩夹硅质灰岩、泥灰岩,顶部有时夹一层 2 m 的豹皮状白云质灰岩,厚度 95~131 m;吴家坪组由灰、深灰色薄至中厚层状粉晶灰岩、燧石灰岩组成,上端含一层灰、深灰色泥岩,粉砂质泥岩,厚 15 m 左右。开采煤层即位于吴家坪组二段之上,平均厚度约为 0.56 m。坡体为一近东西向的陡崖,陡崖高 75~100 m,坡体上部发育有与陡崖大致平行的张拉裂隙。分析坡体地形及鸟瞰图如图 1, 2。

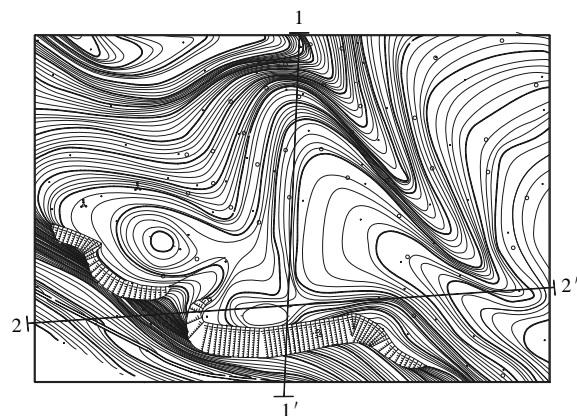


图 1 分析坡体及周边地形图

Fig.1 Topographic map of analyzed slope and its surrounding

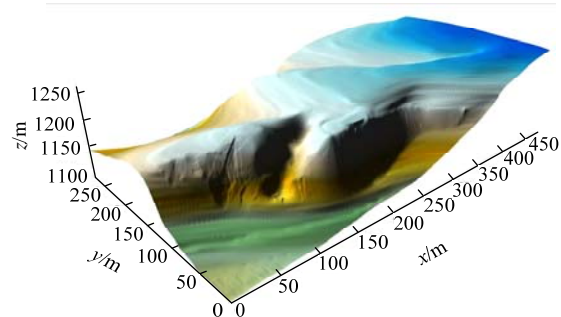


图 2 分析坡体三维鸟瞰图

Fig.2 Three-dimensional image of analyzed slope

分析中取垂直于坡体走向的 1-1' 剖面进行二维有限元分析。在实际的采矿过程中,由于不同的矿山地质条件、煤层赋存条件以及开采工艺等各不相同,因此模拟模型很难做到与实际情况完全一致,而往往需要做一定程度的简化。此处,为减少数值计算的过程,使不同条件下计算结果的差异更明显,特将模型简化如下:煤层顶底板岩性均为灰岩,采空区上方坡体为直线型、坡体基座夹一层泥岩,分析本构模型采用 D-P 准则,各岩层几何关系及分析模型如图 3, 4 所示。

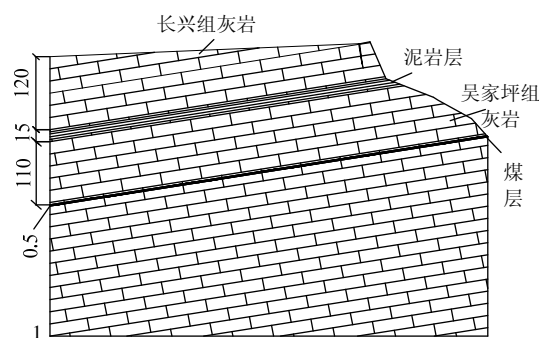


图 3 分析剖面岩层几何关系图 (m)

Fig.3 Geometric relationship of analyzed slope

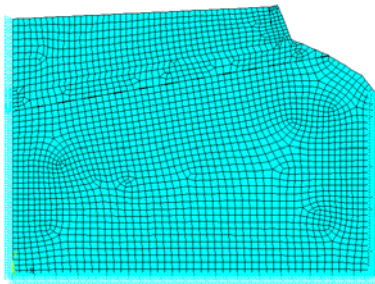


图 4 数值计算模型
Fig.4 Model of numerical analysis

分析中各类岩性参数采用类比方法获取，坡体上部裸露灰岩综合考虑风化及裂隙发育的影响，将其视为较破碎岩体，根据《工程地质勘察规范》(DBJ 50-043—2005)对岩土体性质指标的相关规定，在完整岩体参数的基础上，分别取一定的折减系数，其中弹性模量折减系数取 0.6，黏聚力的折减系数为 0.2，内摩擦角的折减系数为 0.85。此外，综合考虑解决问题的需要以及分析的难易程度，将煤层视为弹性体，不考虑其塑性变形，而灰岩及泥岩结均视为弹塑性介质。各类岩体参数见表 1。

表 1 模型岩性参数表
Table 1 Tab of lithologic parameter

岩性	弹性模量/ MPa	泊松比	密度/ (kg·m ⁻³)	黏聚力/ MPa	内摩擦角/ (°)
上部坡体	2 100	0.22	2 500	0.38	35
下部灰岩	3 500	0.22	2 500	1.90	41
泥岩	1 200	0.31	2 100	0.30	31
煤层	800	0.35	1 500		

对于开采引起的坡体变形破坏问题，起决定作用的因素是开采区的几何情况，即煤层倾角、工作面位置、采空区大小、采厚等，本文即针对以上因素进行分析。分析中采用参数折减法来获取不同条件下坡体在开采前后的安全系数，并通过开采前后安全系数的变化来反映采矿活动对坡体稳定性的影响。采矿活动引发山体破坏实例及结果如图 5、6 所示。



图 5 真实破坏
Fig.5 Real failure of slope

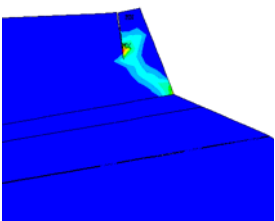


图 6 有限元计算破坏结果
Fig.6 Result of finite element analysis

2 单因素影响过程分析

煤层开采对坡体稳定性的影响主要表现在开采前后坡体安全系数的变化上，在分析过程中随着影响因素的变化，开采前的原始坡体稳定性也会发生相应的改变，这里为更好地反映开采过程对坡体稳定性的影响程度，引入安全系数变化率的概念，定义为：

安全系数变化率 = $\frac{\text{安全系数开采前} - \text{安全系数开采后}}{\text{安全系数开采前}} \times 100\%$

后续分析中均采用安全系数变化率作为开采对坡体稳定性影响程度的衡量指标。

2.1 开采厚度对坡体稳定性的影响分析

分析中将采空区设置在坡体的正下方，采空区长度取 100 m，煤层厚度从 0.5 m 增加到 5 m，安全系数的变化情况如图 7 所示。

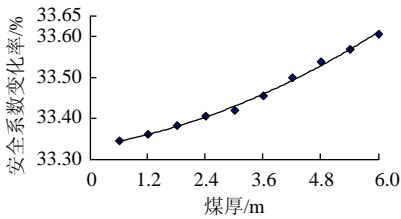


图 7 开采厚度对坡体稳定性的影响
Fig.7 Influence of coal seam thickness on slope stability

从图 7 可看出，地下采矿活动对坡体的稳定性有显著的影响，在煤层开采后，坡体安全系数下降 33% 左右，且随着煤层厚度的增加，地下开采对坡体安全系数的影响程度也相应增大，整个变化过程符合二次曲线关系，说明煤层厚度越大，其变化对坡体稳定性的影响越明显。煤层厚度从 0.5 m 增加到 5 m 过程中，安全系数变化率从 33.35% 增加到 33.65%，总变化幅度约为 0.3%。

2.2 采空区长度对坡体稳定性的影响分析

分析中设定采空区中心与坡体中心重合，采空区长度为 50~250 m，相邻 2 次计算的采空区长度相差 50 m，计算过程中整个开采范围一次性开挖完

毕。计算结果如图 8。

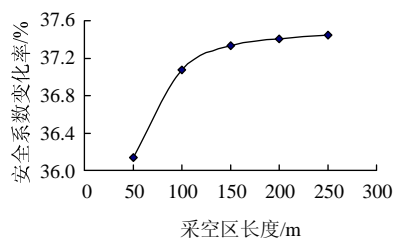


图 8 采空区长度对坡体稳定性的影响

Fig.8 Influence of goaf size on slop stability

从图 8 曲线可看出,随着采空区范围的扩大,坡体的安全系数变化率逐渐增加,坡体的稳定性相应降低,分析结果表明在采空区长度小于 150 m 之前,安全系数变化率随采空区长度的增加而显著增加,本模型中采空区长度从 50 m 增加到 100 m,安全系数的变化率的增加量达到了总增加量的 77.27%,而从 100 m 增加到 250 m 安全系数变化率的增加量为总增加量的 22.73%,可见采矿活动的初期对地面坡体的稳定性的影响最为显著,尤其是在采空区长度 100 m 以内影响最为明显。在整个变化过程中,安全系数变化率的增加量约为 1.4%。

2.3 采空区位置对坡体稳定性的影响分析

同样设定采空区长度为 100 m,选择采空区中心位置分别位于坡体中心、与坡体中心相差 100, 200, 300 m,各种情况下坡体安全系数的变化情况如图 9。

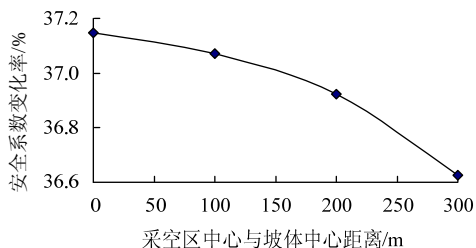


图 9 采空区位置对坡体稳定性的影响

Fig.9 Influence of goaf position on slop stability

图 9 的分析结果表明,采矿活动与坡体的相对位置关系不同,其对坡体稳定性的影响也不一样,当采矿活动正好位于坡体下方时,采矿对坡体稳定性的影响最大,随着采空区距坡体距离的增加,坡体的稳定性受采矿活动的影响会逐渐减小。图中,安全系数变化率随距离的变化关系符合二次曲线关系,说明开采位置距离坡体越远,采矿活动中心的移动对坡体稳定性影响的减小速度也就越快。整个过程中,安全系数变化率的下降量约为 0.5%。

2.4 煤层倾角对坡体稳定性影响分析

设定采空区长度为 100 m,位于坡体的正下方,煤层厚度 3 m,分别设置煤层倾角 $0^\circ \sim 80^\circ$,倾斜方向为逆坡向。有限元计算结果如图 10。

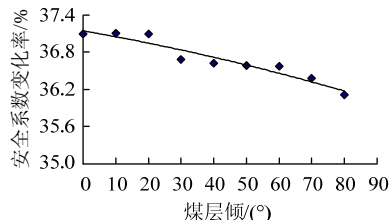


图 10 煤层倾角对坡体稳定性的影响

Fig.10 Influence of coal seam pitch on slop stability

从图 10 可看出,煤层倾角对坡体的影响大致服从线性关系,坡体倾角越大,采矿活动对坡体稳定性的影响反而越小,当煤层倾角从 0° 变化到 80° 时,安全系数的变化率降从 37.1% 下降到大约 36.1%,下降幅度约为 1%。

2.5 采矿深度对坡体稳定性的影响

设定采空区长度为 100 m,开采煤层厚度 3 m,开采深度分别为 50~300 m,每间隔 50 m 设置一个计算点,坡体安全系数的变化率如图 11。

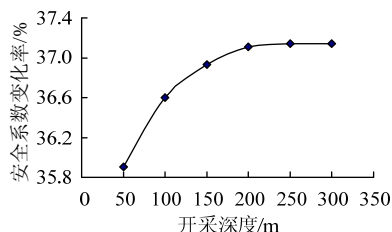


图 11 开采深度对坡体稳定性的影响

Fig.11 Influence of mining depth on slop stability

从图 11 可看出,开采深度对坡体稳定性的影响主要表现在随着开采深度的增加,采矿活动对坡体稳定性的影响总体上有增大的趋势,本实例中当开采深度从 50 m 增加到 300 m 时,安全系数的变化率从 35.9% 增加到 37.1%。随着开采深度的不同,开采对坡体稳定性的影响过程也相应地发生变化,首先在开采深度小于 200 m 时,随着开采深度的增加,开采对坡体稳定性的影响程度增加较快,当开采深度超过 200 m 时,开采对坡体稳定性的影响程度不再增加,相反随着开采深度的增加,开采对坡体稳定性的影响还有下降的趋势。

3 多因素复合影响及参数敏感性分析

敏感性分析是分析和研究各因素的不确定性

变化对坡体稳定性（安全系数）的影响程度。如果某因素在一定范围内变化时使安全系数产生了较大的变化幅度，则说明该因素是敏感性强的，反之则是敏感性弱的。敏感性分析着重于寻找敏感性强的不确定性因素，从而为分析坡体稳定性、判断是否需要采取治理对策及确定治理途径提供依据。目前对参数敏感性分析点的方法有很多，如：神经网络法^[5]、灰色理论^[6]、回归分析^[7]、正交试验方法^[8-9]等，本文在对采矿活动对坡体稳定性影响的分析中采用正交试验方法。根据本文实例的具体情况，采用 5 因素 4 水平正交试验，因素及其水平见表 2。

表 2 正交试验因素水平表
Table 2 Table of factors level of orthogonal experiment

水平	开采厚度/m	开采位置/m	开采深度/m	开采长度/m	煤层倾角/(°)
1	0.5	0	100	50	10
2	1.0	50	200	100	30
3	1.5	100	300	150	50
4	2.0	150	400	200	70

位置是指采空区前端边界距坡脚的距离。根据正交试验的设计原理，选用正交试验表 L16（4⁵），具体见表 3。

表 3 正交试验设计及计算结果表
Table 3 Design of orthogonal experiment and the result

试验号	开采厚度	开采位置	开采深度	开采长度	煤层倾角	安全系数变化率/%
1	1	1	1	1	1	28.25
2	1	2	2	2	2	43.04
3	1	3	3	3	3	44.25
4	1	4	4	4	4	45.18
5	2	1	2	3	4	39.38
6	2	2	1	4	3	44.21
7	2	3	4	1	2	40.18
8	2	4	3	2	1	41.78
9	3	1	3	4	2	43.81
10	3	2	4	3	1	43.11
11	3	3	1	2	4	30.67
12	3	4	2	1	3	36.64
13	4	1	4	2	3	44.0
14	4	2	3	1	4	39.21
15	4	3	2	4	1	43.56
16	4	4	1	3	2	39.11

根据上述正交试验计算结果，得到不同因素对岩质坡体稳定性影响的极差分析表，见表 4。

表 4 5 因素 4 水平极差分析表
Table 4 Range analysis of five factors and four levels

水平均值	采厚	位置	采深	长度	倾角
水平 1	40.18	38.86	35.56	36.07	39.18
水平 2	41.39	42.39	40.66	39.87	41.45
水平 3	38.56	39.67	42.26	41.46	42.28
水平 4	41.47	40.68	43.12	44.19	38.61
极差	2.91	3.53	7.56	8.12	3.67
顺序	长度>采深>倾角>位置>采厚				

从以上极差分析可以看出，在人类采矿活动对岩质坡体稳定性的影响因素中，采空区长度对坡体稳定性的影响最大，其次分别为开采深度、煤层倾角以及采空区与坡体的相对位置，而煤层的开采厚度对于坡体稳定性的影响最小。

4 结 论

1) 地下采矿活动对坡体稳定性具较大的影响，一般情况单因素影响下采矿后的坡体稳定性较采矿前降低约 20%~40%，多因素复合影响下采矿活动对坡体稳定性的影响可达到 45%左右。

2) 不同的开采条件对地表坡体稳定性的影响各不相同，其中，采空区长度越大、煤层越厚，开采对地表坡体稳定性的影响就越大；采空区距离坡体越远、煤层倾角越大，开采活动对坡体稳定性的影响反而越小；而开采深度对坡体稳定性的影响则表现为先增加后减小，当开采深度在 200~250 m 之间时，开采对坡体稳定性的影响最大。

3) 在采矿活动过程中，开采因素对地表坡体稳定性影响先后顺序为：采空区长度、开采深度、煤层倾角、采空区与坡体的相对位置关系以及开采厚度。在满足生产要求的条件下，控制开采工作面的长度是降低地下开采对坡体稳定性影响的最有效方法。

参考文献：

[1] 何万龙. 山区开采沉陷与采动损害[M]. 北京：中国科学技术出版社，2003：108-147.

[2] 刘新喜，陈向阳. 地下开采沉陷对滑坡灾害的影响分析[J]. 中国安全科学学报，2010，20(12)：3-7.

LIU Xin-xi, CHEN Xiang-yang. Effect analysis of underground mining subsidence on landside disasters[J]. China Safety Science Journal, 2010, 20(12): 3-7.

[3] 戴华阳，翟厥成，胡友健. 山区地表移动的相似模拟试验研究[J]. 岩石力学与工程学报，2000，19(4)：501-504.

(下转第 582 页)