

文章编号: 1673-9469 (2018) 02-0103-05

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2018.02.023

矿山采洞与软弱带相对位置对边坡稳定性的影响分析

单钟锬, 骆波, 许泽舟, 程传阁

(河海大学 地球科学与工程学院, 江苏 南京 211100)

摘要: 以陕西某滑坡为例, 采用非连续变形 (DDA) 理论, 研究沿岩层平行分布的采洞组与软弱带相对位置对边坡稳定性的影响。在对滑坡特征、基本地质条件与力学参数进行调查研究的基础上, 建立滑坡实际模型进行计算分析。分析结果表明, 采空区群会影响坡体内应力场, 且其与软弱带相对位置的改变会影响坡体稳定性。当采空区群距软弱带为采空区高的 2 ~ 5 倍时会降低坡体的稳定性, 而当采空区距软弱带为采空区高度 5 ~ 6 倍时, 最为危险, 之后影响随着距离增大而降低, 当采空区距软弱带大于采空区高度的 8 倍时坡体稳定。

关键词: 采动滑坡; 采空区位置; DDA; 滑坡稳定性

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

Analysis on the influence of relative positions of mine caves and weak-soft zone on slope stability

SHAN Zhongkun, LUO Bo, XU Zezhou, CHENG Chuange

(College of Earth Science and Engineering, Hohai University, Jiangsu, Nanjing, 211100, China)

Abstract: Taking a landslide in Shaanxi as an example, the influence of relative position of mine caves that parallel to the strata and weak-soft zone on slope stability is studied by using the discontinuous deformation (DDA) theory. On the basis of the landslide's characteristics, basic geological conditions and mechanical parameters, the landslide practical model for calculation and analysis is established. The analysis results show that the mine caves affect the distribution of slope stress field and different relative positions of mine caves and weak-soft zone have different effects on the slope stability. If the distance between mine caves and weak belt is 2-5 times longer than the height of mine cave, the stability of slope will be reduced. When the distance between mine caves and weak belt is 5-6 longer times than the height of mine cave, the slope is the most dangerous, and then relieves with increasing distance. When the distance between mine caves and weak belt is more than 8 times longer than the height of gob, slope will be safe.

Key words: mining landslide; location of mined-out area; DDA; landslide stability

随着人类对资源需求的增大, 地下工程活动越发频繁, 由矿山地下开采诱发的矿区崩滑地质灾害也层出不穷^[1]。采矿诱发地质灾害很大程度上与矿洞有关, 研究矿洞分布对边坡稳定性的影响对日后地下洞室设计、安全施工具有重要意义。当前对滑坡的评价方法主要有工程类比法、极限平衡法、数值分析法等。其中工程类比法主观性较强, 评价结

果易受各种因素影响^[2]。极限平衡理论是工程领域应用最广、可靠性最高的一种评价方法。利用极限平衡理论结合模型试验, 在研究采矿对滑坡稳定性的影响因素方面已经取得一定成果^[3]。数值分析法可以精准模拟采矿的动态过程, 计算边坡内应力场变化, 对研究由采矿诱发的滑坡的形成机制和影响因素有极大的帮助^[4]。部分学者从采矿的动态过程

收稿日期: 2017-10-27

基金项目: “十一五” 国家科技支撑计划项目 (2008BA29B03-2)

作者简介: 单钟锬 (1994-), 男, 浙江绍兴人, 硕士, 主要从事岩体结构与工程稳定方面的研究。

入手,研究矿洞增大条件下滑坡状态的变化过程,得出滑坡的形成机制^[5]。部分学者以采动区应力变化为切入点,研究矿洞存在条件下,坡体内应力区变化^[6]。但从矿洞分布方面阐述采洞与边坡稳定性关系的成果较少。本文采用非连续变形分析方法进行数值计算^[7-8],结合数值软件动态模拟和条分法思想,计算边坡失稳过程各阶段稳定系数,并根据速度突变条件确定坡体整体稳定系数,评价坡体稳定性。同时结合边坡稳定系数研究采洞与软弱带相对位置对坡体稳定性的影响,使洞室的开挖设计、滑坡预防治理更具针对性,以降低滑坡风险和损失,减少滑坡防治费用,具有很高的经济效益和社会效益。

1 滑坡工程地质条件

陕西某岩质滑坡滑体长约 550 m、宽约 130 m、厚约 10 ~ 40 m,总体积约 168 × 10⁴ m³,主要成分为白云岩块体。滑坡区位于南秦岭薄皮逆冲推覆构造带中的一个倒转背斜南翼,倒转的地层呈向北倾斜的单斜构造,形成陡倾的顺层岩质斜坡,其他地质条件有利于滑坡的发生。同时原始山体三面临空,形成长条状突出的山梁地貌形态,山体前方为一深切的沟谷,高程 970~1 300 m,高差 330 m。复杂的地质构造活动形成了有利滑坡发生的地形地貌。滑坡区的滑床岩层为寒武系下统水沟口组粘土岩,粘土矿物含量高,强度低,遇水强度陡降,并具有糜棱岩化特征,属易滑岩层。而滑坡的岩土体结构分为两部分,上部为震旦系上统灯影组浅灰色、灰白色微晶白云岩;下部为寒武系下统水沟口组炭质粘土岩夹薄层硅质岩,二者为不整合接触,构成坡体中相对软弱的结构面。除不整合软弱结构面外,还发育两组陡倾节理结构面,其中一组结构面产状为 113° ∠ 86°,形成滑前原始地形东侧陡壁,为本次滑动提供西侧边界;第二组结构面产状为 240° ∠ 55°,为本次滑动提供了前缘临空面。

2 数值模拟

2.1 几何模型的建立

根据激光测距仪测得的滑坡剖面各控制点数据,并结合滑坡左侧边界还原,建立长 270 m,高 137 m 的滑坡模型。结合滑坡实际采洞位置(图 1)沿垂直于软弱带方向建立了 6 组间距 10 m 的包含 4 个等大

等间距平行于软弱带分布的采洞的采洞组。以第一组为例,采洞为宽 7 m,高 5 m,拱高 2.5 m 的拱矩形,模型中块体单元总数为 355,视各单元为弹性体,不可拉张不可嵌入,块体接触符合莫尔-库伦强度准则。以滑床为界上下部分岩体为不整合接触,上部岩体以附加线添加节理的方式构建块体单元,下部岩体完整性较好,分布两组节理,其中沿滑床方向的节理贯通性好,另一组较差,对贯通性好的节理取迹长为 -5,总长 350,间距 15;另一组迹长取 5,总长 250,间距 20,采用软件随机构建单元,选择莫尔-库伦弹塑性模型进行计算。图 2 为模型示意图。

采用直剪实验中的固结快剪、液塑限联合测定、筛分等室内试验,对岩土体的物理力学参数进行了测定。同时采用工程类比和参数反演等多种手段确定计算参数如表 1 所示。

2.2 边坡稳定判断依据

通过观察记录每个模型的动态变化过程判断坡体是否滑动。对于难以判断的模型,根据软弱面上测量点的位移数据,计算各阶段内的速度,若其存在突变,则说明边坡开始滑动。同时为了判断采空区分布对坡体稳定性的影响,采用条分法的思想,根据分布于软弱带单元中的 7 个测量点的的应力数据(单元的水平应力 σ_x ,垂直应力 σ_y 和剪应力 τ_{xy}),推导稳定系数计算公式(1)~(5):

$$\sigma_a = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\alpha - \tau_{xy} \sin 2\alpha \quad (1)$$

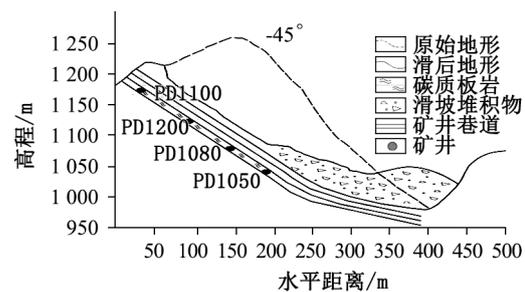


图 1 矿洞实际分布图

Fig.1 Distribution of mine caves

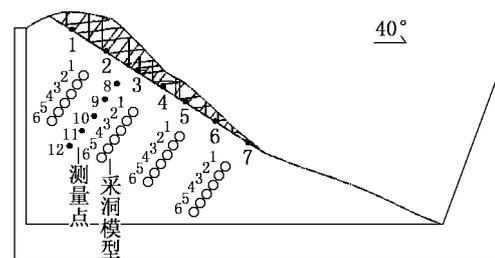


图 2 模型示意图

Fig.2 Model diagram of landslide

表1 模型计算参数
Tab.1 The model geomechanical parameters

| 位置 | 容重 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$ | 弹性模量 G/GPa | 粘聚力 c/kPa | 摩擦角 $\varphi/^\circ$ | 泊松比 μ | 抗拉强度 R_t/kPa |
|-----|--|------------------------|-----------------------|-------------------------|--------------|--------------------------|
| 块体1 | 2400 | 50 | — | — | 0.24 | — |
| 块体2 | 2700 | 150 | — | — | 0.2 | — |
| 节理1 | — | — | 150 | 25 | — | 300 |
| 节理2 | — | — | 10 | 15 | — | 50 |
| 节理3 | — | — | 200 | 25 | — | 250 |
| 节理4 | — | — | 200 | 25 | — | 300 |

注：表1中块体1代表软弱带上部岩块参数，块体2代表软弱带下部岩块参数，节理1为软弱带上部岩体节理参数，节理2为软弱带参数，节理3、4为软弱带以下岩体的两组节理参数。

$$\tau_a = \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \sin 2\alpha + \tau_x \cos 2\alpha \quad (2)$$

$$F_{\text{抗滑力}} = (\sigma_{a1} \times l_1 + \sigma_{a2} \times l_2 + \sigma_{ai} \times l_i + \dots + \sigma_{a7} \times l_7) \tan \varphi + c \cdot L \quad (3)$$

$$F_{\text{下滑力}} = \tau_{a1} \times l_1 + \tau_{a2} \times l_2 + \tau_{ai} \times l_i + \dots + \tau_{a7} \times l_7 \quad (4)$$

$$F_s = F_{\text{抗滑力}} / F_{\text{下滑力}} \quad (5)$$

式中： σ_{ai} 为测点*i*的垂直于软弱面的正应力； τ_{ai} 为测点*i*的沿软弱面方向的剪应力； l_i 为测点*i*对应的计算长度； L 为软弱面的总长度； c 为软弱面的粘聚力； φ 为软弱面的摩擦角； F_s 为稳定系数。

若速度突变存在，判断边坡开始滑动，则取滑动前最小稳定系数($F_s < 1$)作为边坡的整体稳定系数，反之则取裂缝出现之后阶段的平均稳定系数作为边坡的整体稳定系数。

2.3 计算结果及分析

对边坡进行洞室开挖计算，可得各模型各阶段的稳定性系数如图3所示。

根据稳定系数计算结果，结合各个模型的动态模拟结果(模拟过程中首次出现裂缝到贯通裂缝出

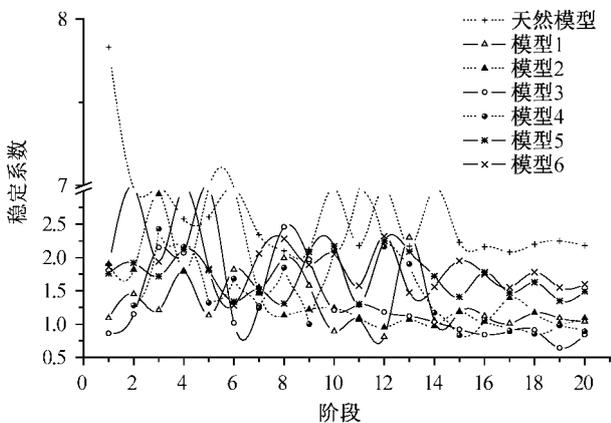


图3 各模型各阶段的稳定系数

Fig.3 Graph of stability coefficient at various stages of each model

现的阶段)和速度突变确定坡体的启动阶段，比较各模型启动阶段及模型建立初期的稳定系数的大小及变化。观察各个模型的动态运动过程，只有模型3在计算过程中发生明显滑动，结合模型3的速度随时间变化曲线(图4)和动态变化过程(图5)，确定模型3在第16阶段前后滑坡启动，则取该点0.5倍的速度变化值 $\Delta V=0.3$ 为滑坡启动判断的下限，若其他模型也存在速度变化，但小于该值，则判断该滑坡未启动。若滑坡启动则取启动前阶段最小稳定系数评价坡体的稳定性，反之则取裂缝出现之后阶段的平均稳定系数。各模型整体稳定系数见表2。

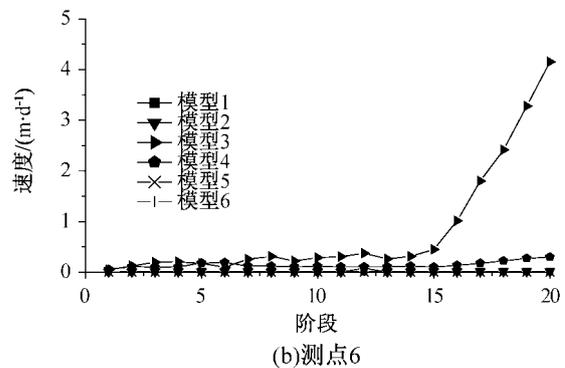
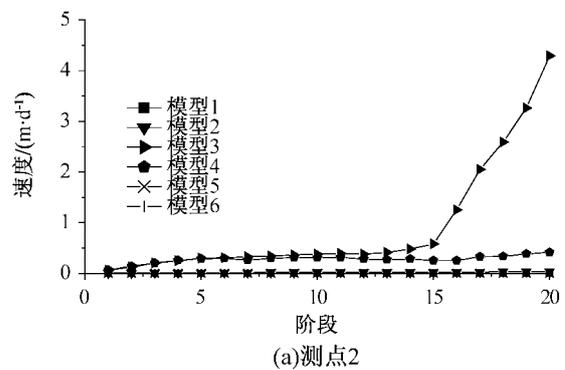


图4 各模型测点2、测点6处速度与时间变化曲线

Fig.4 Speed and time curve of each model at measure point 2 and measure point 6

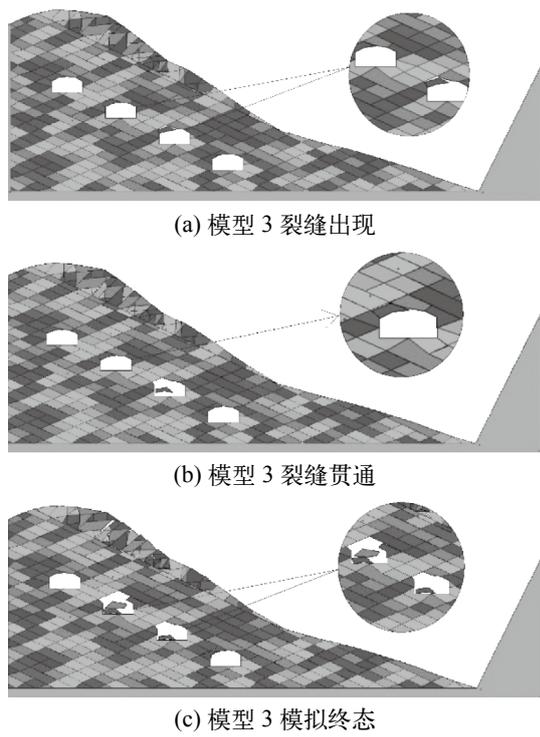


图5 模型3破坏过程图

Fig.5 Diagram of failure process of model 3

表2 各模型整体稳定系数统计表
Tab.2 Integral stability coefficient

| 状态 | 自然状态 | 模型1 | 模型2 | 模型3 | 模型4 | 模型5 | 模型6 |
|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 稳定系数 | 2.17 | 1.09 | 1.07 | 0.84 | 0.90 | 1.54 | 1.64 |

比较各模型整体稳定系数，可将采空区对边坡稳定性的影响按采空区群与软弱带相对距离分为3类：(1)当采空区群中心与软弱带的距离在采空区高的2~5倍时，采空区群的存在会一定程度降低坡体的稳定性，可能诱发坡体的滑动；(2)当采空区群中心与软弱带的距离在采空区高的5~6倍时，采空区群的存在极大的降低了坡体的稳定性，最可能导致滑坡的发生；(3)当采空区群中心与软弱带的距离在采空区高的8倍以上时，采空区群的存在对坡体稳定性影响较低，基本不会造成滑坡的产生。

3 实例验证

滑坡实际采洞分布与模型3一致，对比开挖前后各测点的应力曲线(图6—图9)，开挖后坡内水平应力场明显减小。其中测点9处水平应力先集中，后在第5阶段开始释放，之后急剧减小转变为拉应力直至第15阶段最大到拉应力。测点10的水平应力远小于自然状态，一直呈减小趋势直至转化为水

平拉应力。而采洞的破坏也以左下角张拉开裂起始，直至顶部坍塌右侧洞壁向左滑移为止。而在测点12处，开挖后模型的水平应力状态与自然状态基本一致，12测点附近也未出现裂缝。剪应力场在开挖后

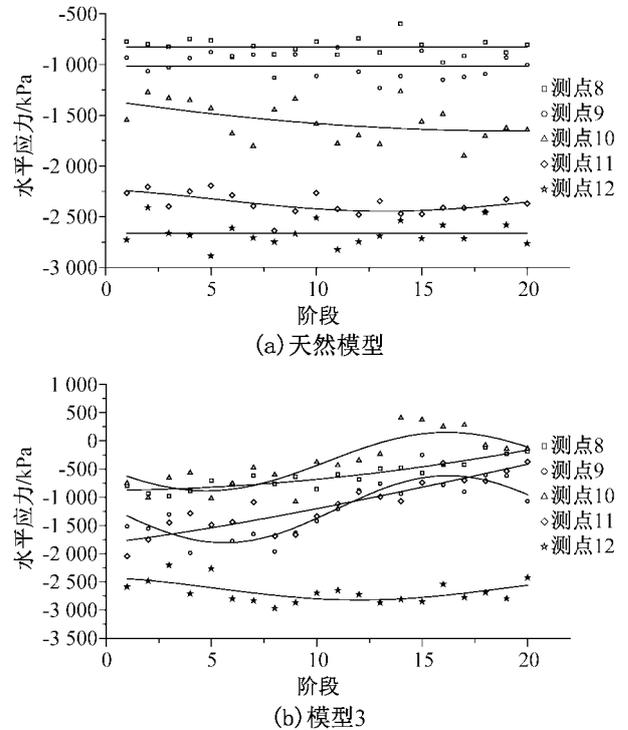


图6 水平应力随时间变化图

Fig.6 Variation of horizontal stress with time-

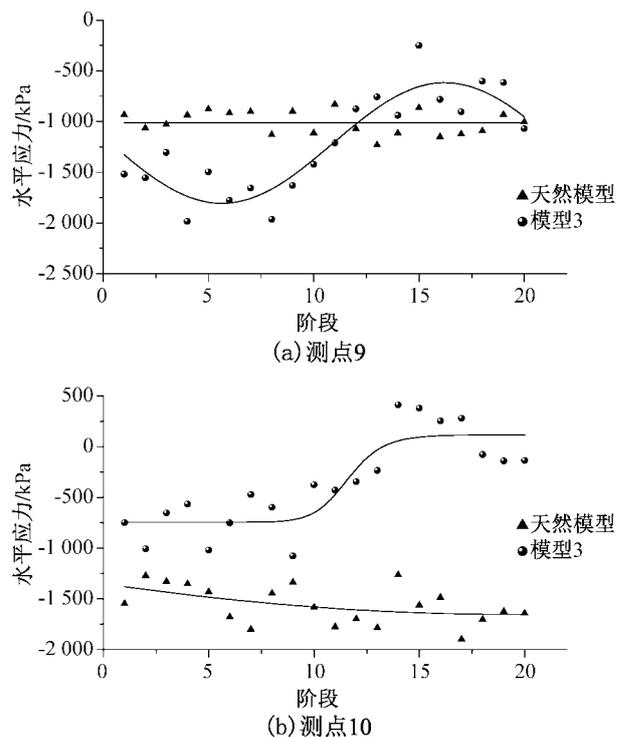


图7 测点9和测点10水平应力图

Fig.7 Horizontal stress of measure point 9 and measure point 10

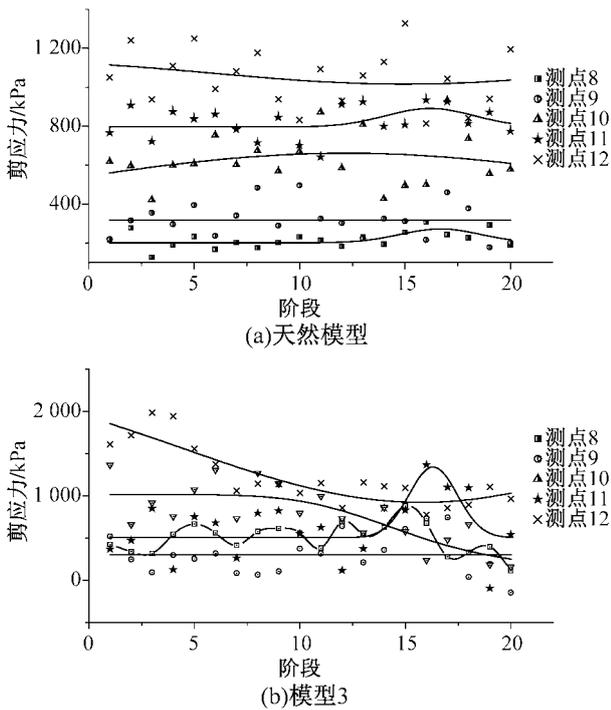


图8 剪应力随时间变化图
Fig.8 Variation of shear stress with time-

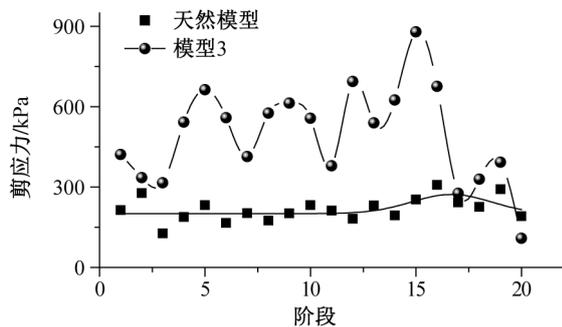


图9 测点8 剪应力图
Fig.9 Shear stress of measure point 8

较自然状态整体呈增大趋势，其中测点8处剪应力在第5阶段突然增大，随后基本保持不变，直至第16阶段有大幅增大又至17阶段迅速回落，与滑坡破坏过程基本吻合。

通过对应力场的分析，采洞的存在导致了采洞之间及采洞顶板的应力集中，减小了采洞周围一定区域的压应力场。随着时间发展，采洞周围应力场由压应力转化为拉应力，采洞率先发生破坏，进而影响软弱带附近剪应力场。由于软弱带处局部剪应力场的增大，至剪应力大于软弱带抗剪强度时裂缝产生，随着破坏的进一步发展直至大裂缝贯通，边坡失稳。

4 结论

- 1) 采空区群的存在影响了坡体内应力场的分布，且采空区群与软弱带的相对位置不同会对坡体应力场的影响不同，从而造成了坡体稳定性的差异。
- 2) 当采空区群与软弱带距离在采空区高的2~5倍之内时，均会对坡体的稳定性造成不利影响。这主要是由于软弱带强度较低，此区域开挖会进一步破碎岩体，降低软弱带抗剪强度最终降低边坡的稳定系数。
- 3) 当采空区与软弱带距离在采空区高度5~6倍时，最为危险。主要因为采洞的存在使周围应力场由压应力转化为拉应力，造成了滑带上剪应力集中，正应力减小，抗剪强度最低，边坡最易沿软弱带破坏。在洞室开挖设计时应尽量避免。
- 4) 当采洞与软弱带距离大于最危险距离后，其影响随着距离增大而降低，且在距离大于采空区高度8倍之后，对边坡稳定性基本无影响。在矿山开发利用时应尽量利用这点，保证工程安全。

参考文献:

- [1] 王涛, 吴树仁, 石菊松, 等. 国内外典型工程滑坡灾害比较[J]. 地质通报, 2013, 32(12): 1881-1899.
- [2] 张茂省, 李同录. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究[J]. 工程地质学报, 2011, 19(4): 530-540.
- [3] 古迅. 地下采煤引起斜坡滑动的一个实例——韩城电厂滑坡成因分析[J]. 地质科学, 1988(1): 81-90.
- [4] 许强, 黄润秋, 殷跃平, 等. 2009年6·5重庆武隆鸡尾山崩滑灾害基本特征与成因机理初步研究[J]. 工程地质学报, 2009, 17(4): 433-444.
- [5] 赵建军, 王玉川. 缓倾煤层采空区滑坡形成机制数值模拟研究[J]. 煤炭学报, 2014, 39(3): 424-429.
- [6] 王玉川, 赵建军. 缓倾煤层采空区上覆山体滑坡形成机制分析[J]. 工程地质学报, 2013, 21(1): 61-67.
- [7] 石根华. 数值流形方法与非连续变形分析[M]. 裴觉民译. 北京: 清华大学出版社, 1997.
- [8] SHI G H. Block System Modeling by Discontinuous Deformation Analysis[M]. Southampton: Computational Mechanics Publications, 1993.

(责任编辑 王利君)