

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2017.04.09

露天矿顺倾软岩边坡稳定性三维效应及其应用

王 东¹, 赵明明¹, 贾宏君^{1,2}

(1. 辽宁工程技术大学矿业学院, 辽宁 阜新 123000;

2. 内蒙古锡林郭勒白音华煤电有限责任公司露天矿, 内蒙古 锡林郭勒 026000)

摘要: 为揭示并充分利用露天矿顺倾软岩边坡稳定性的三维效应, 以白音华二号露天煤矿横采南端帮为工程背景, 应用 FLAC^{3D} 对不同空间形态条件下的边坡稳定性进行了数值模拟研究, 分析了边坡破坏模式、稳定性、滑坡规模随横采工作帮与内排土场间追踪距离及开挖坡角的变化规律。结果表明, 随着追踪距离和开挖坡角的增大, 三维滑体的底界面首先由浅部弱层过渡为台阶状, 最终过渡为深部弱层; 边坡的稳定系数随着追踪距离的增大呈负指数规律减小, 随着开挖坡角的增大近线性减小; 滑体走向长度随追踪距离的增大近线性增大, 倾向宽度随开挖坡角的增大而减小。绘制了白音华二号露天煤矿南端帮边坡开挖坡角与允许追踪距离间的关系曲线, 据此提出了边坡稳定性控制开采方案, 经现场实施, 效果显著。

关键词: 软岩边坡; 顺倾弱层; 三维效应; 追踪距离; 控制开采

中图分类号: TDJ167

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2017)04-0053-06

Three dimensional effects of dip bedded soft rock slope stability in surface mines

WANG Dong¹, ZHAO Mingming¹, JIA Hongjun^{1,2}

(1. College of Mines, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, China; 2. Inner Mongolia's Xilingol Baiyinhua China Coal and Electricity Co., LTD Open Pit Mine, Xilingol, Inner Mongolia 026000, China)

Abstract: In order to reveal and make full use of the three dimensional effects of dip bedded soft rock slope stability in surface mines, the slope stability based on the background of the southern slope cross exploitation in Baiyinhua 2nd surface mine which was under different spatial forms was studied by numerical simulation with FLAC^{3D}, then analyzes the change rules of the failure mode, the inner dump and the excavation angle, slope stability and sliding scale for different tracking distance between the working wall. It is shown that the bottom interface of the 3d sliding mass shift from the shallow weak layer to stepped surface firstly with the increase of the tracking distance and excavation slope angle, and then the deep weak layer finally; the slope stability factor decreases with increasing tracking distance following the law of negative exponent; it decreases nearly linearly while the excavation angle increase; the slide masses' strike length increases nearly linearly with the increase of the tracking distance; the dip direction width of the slide masses decreases with the increase of excavation angle. We propose the slope stability control program of mining based on the relationship between the excavation angle and the tolerant tracking distance, the result extinguished.

收稿日期: 2017-01-04; 修订日期: 2017-02-12

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(U1361211); 国家自然科学基金(51474119); 国家自然科学基金(51104084); 辽宁省煤炭资源安全开采与洁净利用工程研究中心开放基金(LNTU15KF08)

第一作者: 王 东(1978-), 男, 辽宁法库人, 教授, 博士生导师, 主要从事露天开采及边坡工程领域的教学和科研工作。E-mail: lntu_wd@163.com

通讯作者: 赵明明(1993-), 男, 河南新乡人, 硕士, 主要从事边坡稳定性研究。E-mail: 1402271936@qq.com

Keywords: soft rock slope; dip bedded weak layer; three dimensional effects; tracking distance; controlling mining

0 引言

在我国锡林郭勒盟、呼伦贝尔盟等地区的软岩露天煤矿,滑坡的数量多、规模大,且难于防治,尤其是顺倾软岩边坡,稳定性极差,是露天矿生产安全的重大隐患。治理这类边坡最有效的方法是通过将传统的走向拉沟、倾向推进的纵向开采过渡为倾向拉沟、走向推进的横向开采,合理控制横采工作帮与内排土场间的追踪距离,借助采场与内排土场对边坡的支挡作用,改善和控制边坡的稳定性。因此,采用适当的方法科学分析边坡三维稳定性成为解决该问题的关键。

20 世纪 60 年代末以来,人们基于对边坡三维稳定性的研究提出了各种各样的计算方法,例如 HOVLAND^[1]、HUNGR^[2]、HUANG^[3]、陈祖煜^[4]、张常亮^[5]、卢坤林^[6-7]对经典二维极限平衡法进行了扩展,形成了一系列三维方法。但是由于各种分析方法都做了大量相似的假设,导致其不能完全适用各种复杂且变化不定的地质条件,这就使得各种计算方法具有一定的局限性^[8]。自 20 世纪 70 年代有限元^[9]方法首次被应用于边坡稳定性分析以来,数值模拟开始被广泛应用在边坡研究领域,解决了很多实际工程问题,逐步成为岩土工程研究和设计的主流方法之一^[10-14]。本文采用有限差分软件 FLAC^{3D}对白音华二号露天煤矿南端帮进行数值模拟,分析边坡不同空间形态的滑坡模式和稳定性变化规律,并分析变化规律形成的内在机制,进而研究露天矿顺倾软岩边坡稳定性的三维影

响因素,为合理设计边坡稳定控制开采方案提供依据,为类似边坡工程提供参考。

1 边坡工程地质条件分析

白音华二号露天煤矿南端帮地层倾角为 $8^{\circ} \sim 12^{\circ}$,由第四系粉细砂、第三系黏土、白垩系泥岩、3#煤与粉、细砂岩构成,边坡内无大型断裂,自上而下发育 3 个顺倾的炭质泥岩弱层,为典型的顺倾软岩边坡。组成边坡的岩体结构类型有 3 种:以细颗粒均匀连续介质为主的第四系、以红黏土为主的第三系地层均属松散土体结构,空隙多,透水性能好,力学强度低;浅部基岩地层风化裂隙较发育,完整性较差,其中煤层破碎、透水性较强,属典型的层状碎裂结构;浅部煤系风化程度高,存在大量无序的裂隙,呈网状排列,属碎裂结构岩体;深部煤系地层由泥岩、砂岩及煤层组成,质地较松散,为层状块裂结构。边坡曾先后于 2010 年 9 月 11 日和 2011 年 5 月 16 日发生两次巨型滑坡,使得其上部主要为排弃物料、红黏土、泥岩等滑动形成的松散土体。滑体稳定后,测得其整体边坡角约为 12° 。为回采下部压煤,拟在滑体前缘约 50 m 处采用横采方式向 3-3#煤降深,整体边坡将高达 200 余米,为避免老滑坡体复活,需要对不同空间形态边坡的三维稳定性进行研究,从安全角度确定边坡开挖的空间形态和尺寸。图 1 为滑坡区中部的典型工程地质剖面,描述了边坡的地层岩性、弱层赋存特征、横采降深位置及临近滑坡前、滑坡后的断面形态;通过实验分析获得的各地层岩体物理力学参数见表 1。

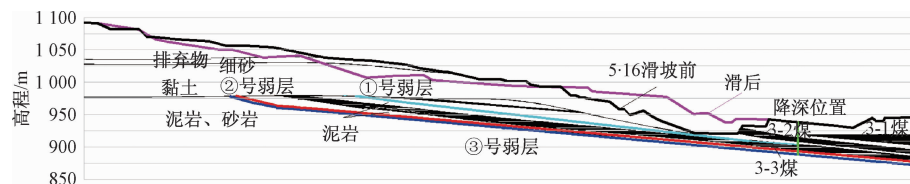


图 1 滑坡区典型工程地质剖面

Fig. 1 Typical engineering geologic profile of sliding area

表 1 岩土体物理力学指标

Table 1 Geotechnical physical mechanics index

岩石名称	容重 $\gamma/(\text{g} \cdot \text{cm}^3)$	内聚力 C/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{^\circ})$	抗拉强度 σ_t/kPa	弹性模量 E/MPa	泊松比 μ
松散滑坡体	1.76	16.7	20.5	0	50	0.36
泥岩	2.0	35.0	23.5	3	180	0.30
砂岩	2.05	65.0	27.5	3	150	0.24
弱层	1.98	3.50	6.6	1	20	0.39
煤	1.30	36.0	23.5	4	200	0.23

2 边坡稳定性三维数值模拟

数值模拟应用大型岩土工程分析软件 FLAC^{3D}。FLAC^{3D}应用离散元方法模拟材料单元体的塑性流动与破坏,相较于其它的有限元模拟方法更为准确、合理^[11]。由于采用了显示动态方程,对于线性和非线性本构模型都能适用,并且不存在物理上求解障碍。能够通过调整单元结构模拟实际变形,非常适合于模拟大变形的岩土和其他材料,也适用于对材料的软化、屈服、流动问题进行模拟。计算时采用摩尔库仑本构模型,采用强度折减法获得边坡的稳定系数。因为 FLAC^{3D}对复杂地质条件三维模型的建立有一定的困难,论文使用 ANSYS 建模,再将其导入 FLAC^{3D}生成模拟模型。

2.1 模拟模型的构建

为尽量真实反映边坡的三维效应,建立了滑坡范围内开采至 3-3#煤底板的三维模拟模型,采场与排土场追踪距离分别为 50 m、100 m、200 m、300 m、400 m,开挖坡角分别为 20°、30°、40°、50°,共计 20 个模型。模型包括南端帮、横采工作帮和内排土场三个部分(图 2)。模型的高度 H 、工作帮坡角 φ 与内排土场

边坡角 β 保持不变($H=400\text{ m}$ 、 $\varphi=12^\circ$ 、 $\beta=14^\circ$),仅改变工作帮与内排土场间的追踪距离 L 、南端帮开挖坡角 α ,相应地改变模型宽度 D ($D=L+h/\tan\beta+h/\tan\varphi$, h 为内排压帮高度, m)。模型的南帮坡面、横采工作帮坡面与内排土场坡面为自由面,四周与底部分别采用水平和垂直位移约束。

2.2 模拟结果与分析

图 3 和图 4 分别为模拟得出的各种工况边坡临界失稳时边坡的空间和二维位移云图(由于篇幅限制,仅列出追踪距离 50 m、100 m 时的模拟云图),表 2 列出了各种工况的边坡稳定系数及滑体底滑面组成情况。分析可知,当降深至 3-3#煤层底板时,在重力与开挖卸荷的双重作用下,南端帮部分边坡向临空面沿弱层发生大变形,滑坡模式为以圆弧面为侧面、以岩层面间弱层为底面的组合面滑动;当追踪距离或开挖坡角逐渐增大时,滑体的底界面逐步由①号弱层向②号弱层过渡,表明二者是影响边坡破坏模式的重要因素;滑体走向长度随追踪距离的增大近线性增大,倾向宽度随开挖坡角的增大近线性减小;在横采工作帮与内排土场的支挡作用下,老滑坡体未发生明显位移,处于稳定状态。

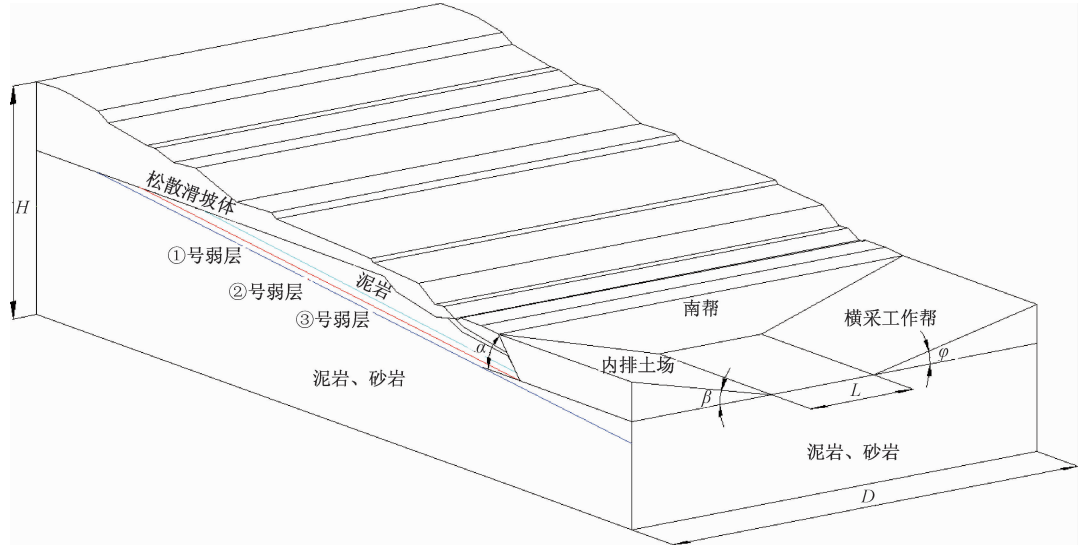


图 2 数值模拟模型及其参数示意图

Fig. 2 Sketch of numerical simulation model and its parameters

表 2 边坡稳定性与滑体底滑面构成

Table 2 Calculation results of slope stability and characteristics of bottom surface of slide body

追踪距离/m	开挖坡角 20°		开挖坡角 30°		开挖坡角 40°		开挖坡角 50°	
	F_s	底滑面描述	F_s	底滑面描述	F_s	底滑面描述	F_s	底滑面描述
50	1.38	①号弱层	1.31	①号弱层	1.24	①号弱层	1.19	①号弱层
100	1.26	①号弱层	1.19	①号弱层	1.14	台阶状	1.09	台阶状
200	1.16	①号弱层	1.11	台阶状	1.08	台阶状	1.06	台阶状
300	1.12	台阶状	1.08	台阶状	1.06	②号弱层	1.04	②号弱层
400	1.10	台阶状	1.06	台阶状	1.04	②号弱层	1.03	②号弱层

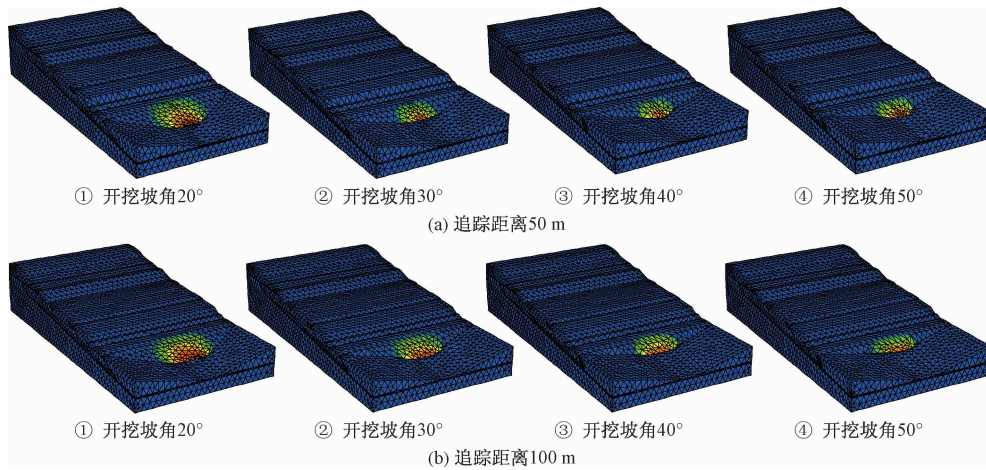


图 3 边坡临界失稳时的空间位移云图

Fig. 3 Spatial displacement distribution of critically instable slope

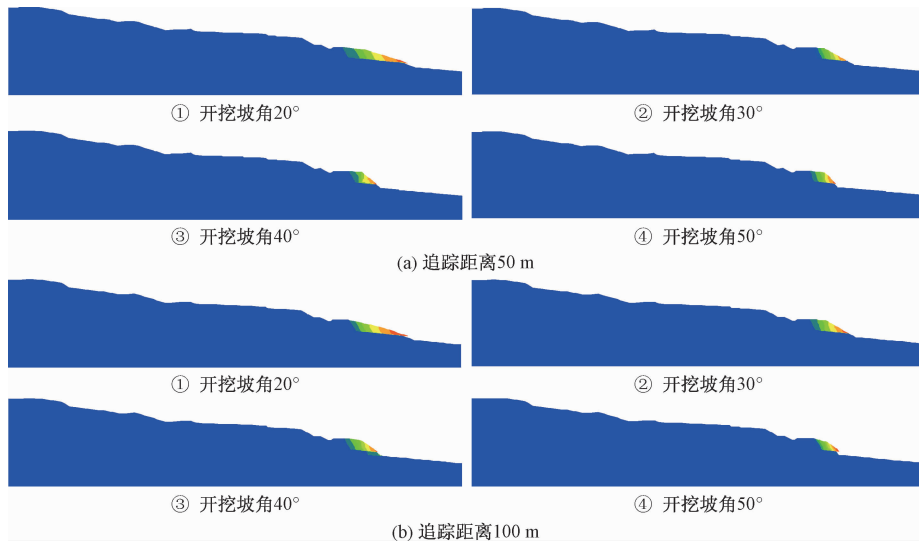


图 4 边坡临界失稳时的二维位移云图

Fig. 4 Displacement distribution in profile of critically instable slope

图 5a 和图 5b 分别为追踪距离、开挖坡角与边坡稳定性间的关系曲线,表明边坡的稳定系数随着开挖坡角的增大近线性减小,随着追踪距离的增大呈负指数规律减小;追踪距离越大,开挖坡角变化对稳定性的影响越显著。

此外,根据图 5 可确定给定安全储备系数条件下,开挖坡角分别为 20°、30°、40° 和 50° 时所对应的允许追踪距离(表 3),进而绘制不同安全储备系数条件下开挖坡角同允许追踪距离间的关系曲线(图 6),可用于确定任意开挖坡角所对应的允许安全距离(表 3)。

3 边坡稳定性技术方案研究

根据数值模拟分析成果,制定充分利用三维效

应的的开采方案,合理规划排土空间,缩短剥离运距,以确保边坡安全稳定,并尽可能回收端帮压煤。

表 3 不同安全储备系数与开挖坡角对应的允许追踪距离

Table 3 Tolerant tracking distance for different safety storage coefficient and excavation angle

开挖坡角/(°)	允许追踪距离/m		
	安全储备系数 1.1	安全储备系数 1.2	安全储备系数 1.3
20	500	201	105
30	305	158	88
40	214	129	74
50	188	110	63

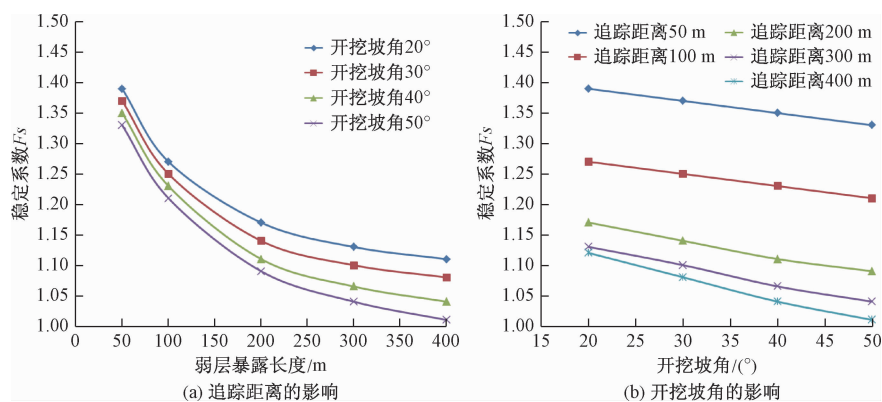


Fig. 5 Influences on slope stability of tracking distance and excavation angle

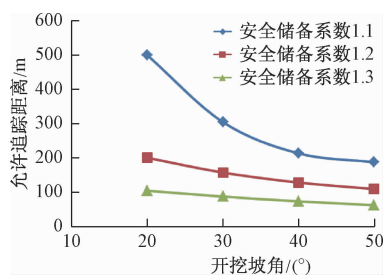


图 6 开挖坡角与允许追踪距离之间的关系
Fig. 6 Relationship between excavation angle and tolerant tracking distance

3.1 边坡稳定性控制开采方案的提出

综合考虑工程现状、运输系统布置需求、岩石块体

滚动距离及边坡安全需要,确定在东部滑体前缘 50 m 处开掘初始沟,初始沟南端帮边坡角为 45° ,内排追踪距离为 30 m。

为加快矿山工程发展速度,上部采用纵采、下部采用横采,即 3-1#煤层底板以上工作线仍然走向布置,由南向北推进;3-1#煤层底板以下倾向布置,由西向东推进,待转入下一条区时再过渡为由西向东推进。根据露天矿纵采与横采的产量规模、工程位置以及运输系统上的正常接续,确定横采工作线长度约 200 m。第一个条区剥采工程结束后形成的采坑形态及其所对应的开拓运输系统布置方式见图 7b。

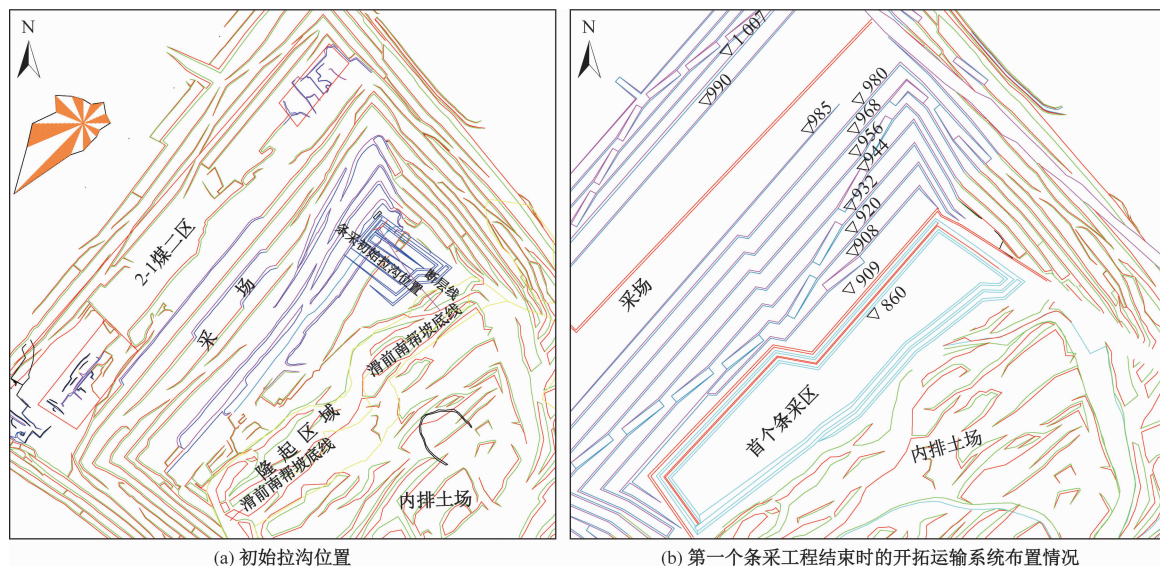


图7 初始沟位置及开拓运输系统布置平面图

Fig.7 Plan of initial pull ditch and development-haulage system

3.2 效益分析

提出的边坡稳定性控制开采方案于2012年初开

始在白音华二号露天矿实施,截止到 2014 年末,多采
出 3#煤 1 457 t,累计 $4.1 \times 10^7 \text{ m}^3$ 剥离物由外排转为

内排,大大节省了运输成本,减少了外排征地费用;同时,有效规避了纵采扰动而极易诱发滑坡灾害所引发的人员伤亡、设备损坏以及由此造成的损失,延长了露天矿服务年限,经济社会效益显著。

4 结 论

(1) 含多个顺倾弱层的软岩边坡的滑坡模式为以出露弱层为底面、以椭球面为侧面的切层-顺层滑动,随着追踪距离和开挖坡角的增大,三维滑体的底界面首先由浅部弱层逐步过渡为台阶状,最终过渡为深部弱层。

(2) 边坡的稳定系数随着追踪距离的增大呈负指数规律减小,随着开挖坡角的增大近线性减小;追踪距离越大,边坡中的侧向压力作用越小,当边坡体的内聚力很小时,三维效应很小,这时可以从二维角度计算合理的开挖角度;滑体走向长度随追踪距离的增大近线性增大,倾向宽度随开挖坡角的增大而减小。

(3) 绘制了露天煤矿南端帮边坡开挖角度与允许追踪距离间的关系曲线,可用于确定给定安全储备系数时任意开挖坡角对应的允许追踪距离。

(4) 设计并实施了露天煤矿南端帮边坡稳定性控制开采方案,为露天矿最大限度安全回收煤炭资源、延长服务年限、保持正常生产接续提供了强有力的技术支持,同时为类似条件下边坡工程提供了参考。

参考文献:

- [1] HOVLAND H J. Three-dimensional slope stability analysis method [J]. Journal of Geotechnical and Environmental Engineering, 1977, 103 (9), 971 - 986.
- [2] HUNGR O. An extension of Bishop's simplified method of slope stability analysis to three-dimensions [J]. Geotechnique, 1987, 37, 113 - 117.
- [3] HUANG C C, TSAI C C. New method for 3D and asymmetric slope stability analysis [J]. Journal of Geotechnical and Environmental Engineering, 2000, 126(10), 917 - 927.
- [4] 陈祖煜, 弥宏亮, 汪小刚. 边坡稳定三维分析的极限平衡方法[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(5): 524 - 529.
CHEN Zuyu, MI Hongliang, WANG Xiaogang. A three-dimensional limit equilibrium method for slope stability analysis [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(5), 524 - 529.
- [5] 张常亮. 边坡稳定性三维极限平衡法研究[D]. 西安: 长安大学, 2008.

ZHANG Changliang. Study on the three-dimensional limit equilibrium of slope stability [D]. Xi'an: Chang'an University, 2008.

- [6] 卢坤林, 朱大勇, 甘文宁, 等. 一种边坡稳定性分析的三维极限平衡法及应用[J]. 岩土力学, 2013, 35(12): 2276 - 2282.
LU Kunlin, ZHU Dayong, GAN Wenning, et al. 3D limit equilibrium method for slope stability analysis and its application [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 35(12): 2276 - 2282.
- [7] 卢坤林, 朱大勇. 坡面形态对边坡稳定性影响的理论与试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(1): 35 - 42.
LU Kunlin, ZHU Dayong. Theoretical and experimental study of effects of slope topography on its stability [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(1): 35 - 42.
- [8] 师文豪, 杨天鸿, 王培涛, 等. 露天矿边坡岩体稳定性各向异性分析方法及工程应用[J]. 岩土工程学报, 2014, 10: 1924 - 1933.
SHI Wenhao, YANG Tianhong, WANG Peitao, et al. Anisotropy analysis method for stability of open-pit slope rock mass and its application [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 10: 1924 - 1933.
- [9] 郑颖人, 赵尚毅, 邓楚键, 等. 有限元极限分析法发展及其在岩土工程中的应用[J]. 中国工程科学, 2006, 12: 39 - 61 + 112.
ZHENG Yingren, ZHAO Shangyi, DENG Chujian, et al. Finite element limit analysis method and its application in geotechnical engineering development [J]. Engineering Science, 2006, 12: 39 - 61 + 112.
- [10] 张先伟, 王常明, 张国柱, 等. 三维边坡地质体建模方法及工程应用[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(2): 329 - 335.
ZHANG Xianwei, WANG Changming, ZHANG Guozhu, et al. A three-dimensional geological slope modeling method and its engineering application [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(2): 329 - 335.
- [11] 黄润秋, 许强. 显式拉格朗日差分分析在岩石边坡工程中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 1995, 14(4): 346 - 354.
HUANG Runqiu, XU Qiang. Application of explicit Lagrange finite-difference method in rock slope engineering [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1995, 14(4): 346 - 354.

(下转第 63 页)