

露天矿边坡稳定性与岩体参数敏感性研究

王旭春, 管晓明, 王晓磊, 张 鹏, 岳著文

(青岛理工大学 土木工程学院, 山东 青岛 266033)

摘 要: 根据安太堡露天矿西北帮边坡工程实践, 运用极限平衡理论的方法, 借助 Slide 软件, 探讨了进行边坡稳定性分析的 3 个关键问题, 并采用 4 种极限平衡方法进行了该边坡稳定性的计算和分析; 研究了岩体黏聚力、内摩擦角和容重参数对边坡稳定性影响的敏感性, 探讨了边坡稳定性规律, 提出了相应的加固措施。结果表明: 采用路径搜索方法确定边坡最危险滑动面时, 滑动面随机搜索次数不小于 600 次、滑体条分块数不小于 20 块为宜; 计算方法宜同时满足力和力矩平衡。经过计算和分析, 该边坡存在滑坡的可能, 最危险滑动面穿过坡脚 9 号煤层, 建议对坡脚进行重点加固。9 号煤层的黏聚力和内摩擦角及边坡上部粉砂岩 1 容重和边坡下部页岩 2 容重等岩体参数的变化对边坡稳定性影响十分明显, 建议同时采取坡顶削坡、坡底锚索加固和堆载等措施, 相当于减小了粉砂岩 1 容重, 增大了 9 号煤层的黏聚力和内摩擦角及页岩 2 容重, 从而有效提高了边坡稳定性。

关键词: 露天矿边坡; 稳定性; 参数敏感性; 极限平衡方法; 路径搜索法; 边坡加固

中图分类号: TD824.7

文献标志码: A

Study on stability of open-pit mine slope and sensitivity of rock mass parameters

WANG Xu-chun, GUAN Xiao-ming, WANG Xiao-lei, ZHANG Peng, YUE Zhu-wen

(College of Civil Engineering, Qingdao Technological University, Qingdao 266033, China)

Abstract: Based on the engineering practice of the northwest slope of Antaibao open-pit mine, limit equilibrium theory and Slide software were utilized to study three key questions to analyze the slope stability. Four kinds of limit equilibrium methods were utilized to calculate and analyze the slope stability. The impact of rock mass parameters, such as rock cohesion, internal friction angle and bulk density, on the sensitivity of the slope stability was studied, and the laws of the slope stability were analyzed, and then corresponding reinforcement measures were proposed. Results show that in the application of the path search method to ascertain the most dangerous sliding surface, the suitable number of random searches of slide surface should not be less than 600 and that of slide blocks should not be less than 20. The calculation method chosen should simultaneously meet the conditions of force and moment balance. Through the calculation and analysis, the sliding of the slope is possible. The most dangerous sliding surface goes through No. 9 coal seam at the toe of the slope, which should be reinforced as the emphasis. The changes in rock mass parameters, such as cohesion and friction angle of No. 9 coal seam, bulk density of No. 1 siltstone at the upper slope and No. 2 shale at the lower slope, affect slope stability obviously. Measures including slope cutting at the upper slope, reinforcement with anchors and stacking load at the lower slope and other measures in the meanwhile are recommended. These measures are equivalent to reducing the bulk density of No. 1 siltstone and increasing the cohesion and internal friction angle of No. 9 coal seam as well as bulk density of No. 2 shale, which can effectively improve the slope stability. No. 9 coal

seam and bulk density of No. 2 shale, which can effectively improve the slope stability.

Key words: open-pit mine slope; stability; parameters sensitivity; limit equilibrium method; path search method; slope reinforcement

安太堡露天矿年产量 3 000 多万吨, 露天矿边坡是否稳定直接影响到矿区经济效益的稳定增长和社会的和谐稳定。近几年, 随着露井联采规模不断扩大, 其西北帮采场因长期自然裸露并受井工开采的明显影响, 滑坡和地表塌陷变形等地质灾害事故有频发趋势, 对矿山的正常生产秩序和作业人员的生命以及大量生产设备等都构成了严重的威胁。因此, 有效地对露天矿边坡进行稳定性分析并提出科学的加固措施已成为目前迫切需要解决的技术难题。

目前, 已有众多学者展开了露天矿边坡稳定性研究, 并取得了不少成果。何满潮等^[1]建立了适用于具有复杂岩体结构和非齐次边界条件的软岩边坡稳态评价的 MSARMA 方法; 朱乃龙^[2]、蔡美峰^[3]、金爱兵等^[4]研究了深凹露天矿边坡的稳定性; 王家臣等^[5]研究确定了露天矿边坡的节理岩体强度和破坏模式; 肖江等^[6]利用物理模拟的方法研究了复杂地质条件下露天矿边坡的稳定性; 孙树海等^[7]通过建立模糊综合评价模型来判断露天矿边坡的稳定性。

本文根据安太堡露天矿西北帮边坡工程实践, 分

析了边坡存在的安全隐患; 讨论了采用极限平衡法进行边坡稳定性研究的 3 个关键问题; 在此基础上, 对该露天矿边坡稳定性进行了计算和分析。通过对岩体黏聚力、内摩擦角和容重参数的敏感性研究, 找到以上参数对露天矿边坡稳定的影响规律, 可以有效地指导边坡加固和综合治理。

1 工程概况

安太堡露天矿西北帮区内山丘连绵、沟壑纵横、植被稀少, 基本为第四系黄土覆盖。地形大致为中部低, 两边高, 地势自上而下呈台阶状分布, 边坡高度 250 ~ 300 m, 露天矿西北帮边坡航拍图如图 1(a) 所示。该露天矿西北帮边坡底部东西宽约 500 m, 南北长约 1 000 m, 边坡上部堆载了露天矿排土场, 边坡总高度达 256 m, 露天矿西北帮边坡工程状况如图 1(b) 所示。由于边坡底部的工业广场是矿区工作人员办公活动场所, 底部道路也是煤炭运输的重要通道, 因此, 一旦边坡发生大面积滑塌, 必然造成不可挽回的损失。

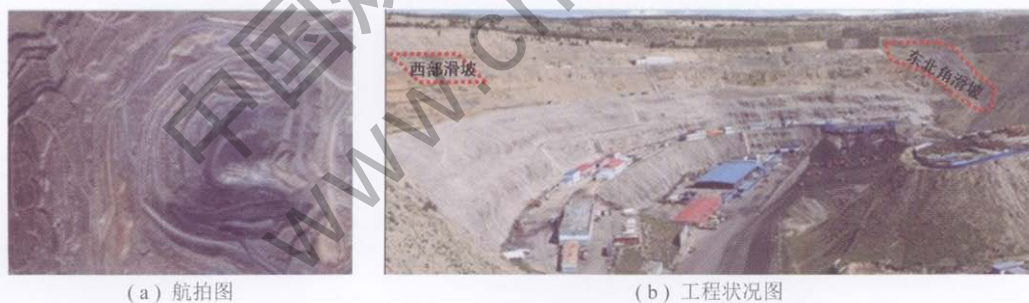


图 1 露天矿西北帮边坡

Fig. 1 The northwest slope of open-pit

该边坡长期自然暴露, 受风吹、日晒、雨水冲刷等自然营力作用, 造成坡体表层岩体结构松散、强度降低, 随时可能出现局部边坡塌滑, 对边坡底部工业广场内的作业人员和煤炭的安全运输都构成严重的威胁。主要隐患包括以下几个方面:

(1) 随着采掘工程规模的不断扩大, 导致边坡向临空侧变形逐渐增大, 边坡表面的张拉裂缝将逐渐增多。

(2) 露天开采形成边坡底部的矿坑如同一个巨大的汇水漏斗, 大量地表降雨将通过地表裂缝灌入边坡内部, 造成内部水压急剧增大, 容易导致出现滑坡; 同时, 降雨、岩层涌水和施工积水浸泡、侵蚀边坡底部

基岩, 将进一步加剧边坡的不稳定状况。

(3) 工业广场的西部和东北角已形成两个上、下贯通的滑体通道, 它们均处于自然状态而未作任何处理。目前, 虽然滑体体积不是非常大, 但是, 如果遭遇强降雨、地震等极端情况, 容易引起连锁反应, 以致造成大的灾害。

综上所述, 该露天矿西北帮边坡处于容易滑坡的危险状态, 边坡稳定性研究将对矿区的安全生产具有十分重要的意义。

2 边坡稳定性研究

由于极限平衡法应用广泛, 因此在边坡稳定性分

析中具有不可替代的作用。采用极限平衡法分析边坡稳定性,需要考虑以下 3 个关键问题:

(1) 岩土体与水力学参数的合理选取。岩土体的物理力学参数的选取是边坡稳定性分析与边坡加固设计的基础和关键问题,应该根据现场勘探资料和室内试验,并综合考虑边坡施工特性等因素,分别采用 RMR 法和 BQ 法对边坡岩体质量进行分级评判,同时选用几种较通用和成熟的方法综合评判,以得到合理取值^[8]。一般情况下,水力学参数的选取应结合本地区的降雨情况,同时考虑静水压力和渗透压力的作用,来找出最危险的水压力组合^[9]。

(2) 最危险滑动面的随机搜索和合理确定。考虑到岩石的变异特性以及岩石的不均匀不连续性,应该采用随机搜索方法确定“最危险滑动面”的位置。确定滑动面的搜索次数和条分块数时,必须进行分析和验证,以保证稳定系数计算的准确性。

(3) 极限平衡分析方法的合理选择。极限平衡方法中,摩根斯坦-普拉斯法^[10]、斯宾塞法^[11]、萨尔玛法^[12]以及 MSARMA 法^[13]同时满足力和力矩平衡,计算所得稳定系数在任何条件下都是准确的(遇到数值问题除外),其他极限平衡方法不能够同时满足力和力矩平衡,只有在一定条件下稳定系数才准确。因此,稳定系数计算应优先采用能够同时满足力和力矩平衡的方法。

2.1 岩体物理力学参数取值

在边坡及矿坑内采集岩块和岩体结构面试样,进行了室内岩体力学实验,并通过选择几种通用、较成熟的方法确定了边坡岩体物理力学参数,结果见表 1。

表 1 岩体物理力学参数取值^[8]

Table 1 Physical and mechanical parameters of the rock mass

序号	岩性 名称	厚度/ m	容重/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模 量/GPa	黏聚 力/MPa	内摩擦 角/($^{\circ}$)
1	砂岩	40	23.8	4.2	300	33
2	泥岩	9	24.9	2.8	25	29
3	粉砂岩 1	21	23.2	4.6	250	34
4	砂岩 2	16	23.8	5.5	375	37
5	4 号煤	11	14.4	1.0	125	24
6	页岩 1	8	24.5	2.4	300	32
7	粉砂岩 2	11	26.0	4.8	400	38
8	页岩 2	18	25.8	3.0	300	32
9	9 号煤	12	13.3	1.2	150	25
10	砂岩 3	27	23.8	6.9	375	36

2.2 最危险滑动面的合理确定

选用 Slide 软件研究不同随机搜索次数和滑体条分块数下的稳定系数,以合理确定最危险滑动面。Slide 软件在极限平衡理论的基础上采用竖向条分法来计算土、石质二维边坡稳定,能够通过随机搜索方法分析和确定圆弧与非圆弧的最危险滑动面,并能够计算边坡的稳定系数,应用十分广泛。

Slide 软件采用两种方法来确定非圆弧滑动面:块搜索方法,路径搜索方法。如果边坡内部存在明确的软弱层,应该采用块搜索方法以保证最危险滑动面穿过该软弱层;反之,如果边坡内部不存在明确的软弱层且不能完全确定滑动面的位置,应该采用路径搜索方法并通过输入随机搜索次数来确定最危险滑动面。

本文采用满足力和力矩平衡的摩根斯坦-普拉斯方法和路径搜索方法,选取该露天矿西北帮边坡的典型剖面作为计算模型,如图 2 所示。计算时考虑:地震烈度设为 7 度;地震加速度为 $0.15g$;考虑边坡内部地下水的影响,并设定相应地下水位线。计算最小稳定系数时考虑以下两种情况:① 滑体条分次数足够,滑动面搜索次数逐渐增多,计算结果如图 3(a) 所示;② 滑动面搜索次数足够,滑体条分块数逐渐增多,计算结果如图 3(b) 所示。

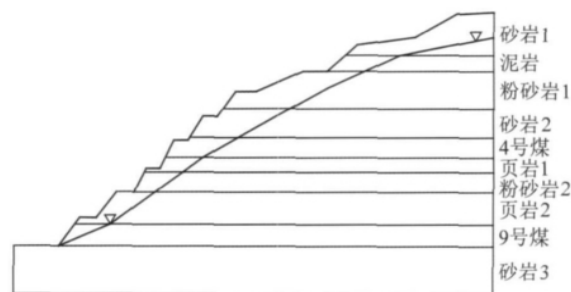


图 2 边坡稳定系数计算模型

Fig. 2 Calculation model of the slope stability coefficient

主要结论如下。

(1) 从图 3(a) 可以看出:当滑体条分次数足够时,随着搜索次数的增多,稳定系数逐渐减小,并趋于最小值。经验证,当搜索次数为 600 次时,边坡稳定系数的变化趋于稳定。因此,可以确定边坡滑动面随机搜索的次数以不小于 600 次为宜。

(2) 从图 3(b) 可以看出:当滑动面随机搜索次数足够时,随着滑体条分块数逐渐增多,稳定系数逐渐减小,并趋于最小值。经验证,当滑体条分块数为 20 次时,边坡稳定系数的变化趋于稳定。因此,可确定滑体条分块数以不小于 20 块为宜。

(3) 当滑动面搜索次数为 2 000 次,滑体条分块

数为 50 次时,采用摩根斯坦 - 普拉斯法计算边坡最危险滑动面的稳定系数为 1.204。

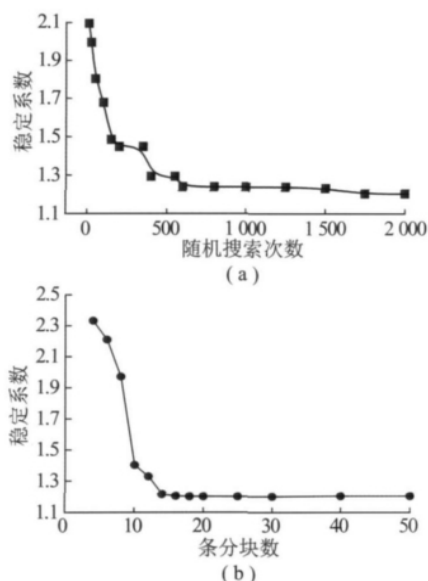


图 3 滑动面随机搜索次数和滑体条分块数与稳定系数关系
Fig. 3 Relationship between sliding surface random searchtimes, sliding blocks number and the stability coefficient

2.3 边坡强度稳定性分析

考虑到该露天矿边坡为岩质边坡,潜在危险滑动面多为非圆弧形,因此,应用 Slide 软件的非圆弧形滑动面搜索功能和路径搜索方法,采用简化简布法^[14]、修正简布法^[15]、摩根斯 - 普拉斯法和斯宾塞法 4 种边坡稳定性分析方法。计算模型与计算考虑同 2.2 节。当滑动面搜索次数为 2 000 次,滑体条分块数为 50 次时,得到的最危险滑动面如图 4 所示,稳定系数计算结果见表 2。

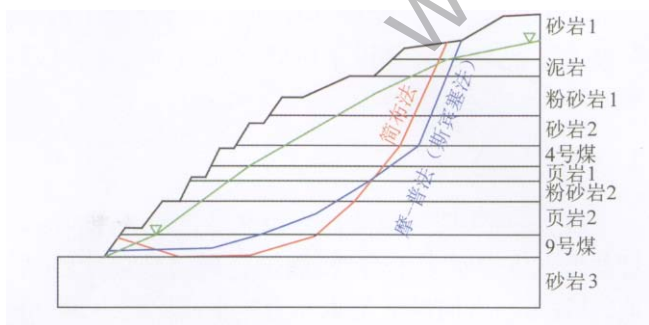


图 4 采用 4 种方法计算边坡最危险滑动面
Fig. 4 The most dangerous slide surface of the slope using four kinds methods

表 2 边坡稳定系数

Table 2 Slope stability coefficient

计算方法	简化简布法	修正简布法	摩根斯坦 - 普拉斯法	斯宾塞法
稳定系数	1.091	1.177	1.204	1.218

边坡稳定性分析的主要结论如下:

(1) 由表 2 可知,4 种计算方法得到的稳定系数十分接近。虽然稳定系数值都大于 1,但是,边坡强度储备明显不足,如果遇到暴雨渗流等不利条件,很有可能出现较大滑坡。

(2) 从最危险滑动面穿过的岩层来看,2 个滑动面最终都穿过 9 号煤,原因是 9 号煤属软弱岩层,黏聚力和摩擦力较其他岩层低很多。因此,坡脚 9 号煤层处为边坡的危险区域。

(3) 根据《岩土工程勘察规范》^[16] 4.7.7 条规定,边坡稳定系数的取值对重要工程宜取 1.30 ~ 1.50。计算结果表明,未经加固的边坡稳定系数均小于规范值,为保证工程安全,必须进行有效加固。

3 边坡岩体参数敏感性研究

边坡稳定敏感性研究是指通过分析多个不确定因素(岩土体的黏聚力、内摩擦角与容重、降雨、地震和地下水)的变化来查看边坡稳定系数的变化情况,进而确定各种因素的变化对边坡稳定的影响程度,在边坡稳定性研究中具有广泛的应用。

本文主要针对岩体黏聚力、内摩擦角和容重 3 个参数进行边坡稳定敏感性研究,并从两个方面展开:

① 考虑不同岩体的相同参数;② 考虑相同岩体的不同参数。应用 Slide 软件的敏感性分析模块,通过改变单一岩体参数来计算边坡稳定系数,并评价各个参数对边坡稳定的影响程度。计算模型如图 2 所示,选用简化简布法计算稳定系数,岩体参数按照分别考虑增大或减小表 1 值的 20% 选取,计算结果如图 5、6 所示。

3.1 不同岩体黏聚力参数敏感性

从图 5(a) 中可以看出:当 9 号煤层的黏聚力增大时,边坡的稳定系数明显增大;其他岩层黏聚力增大时,边坡稳定系数变化较小。

3.2 不同岩体内摩擦角参数敏感性

从图 5(b) 中可以看出:增大 9 号煤层的内摩擦角后,边坡的稳定系数显著增大;增大页岩 2 内摩擦角后,边坡稳定系数有一定提高;增大岩体内摩擦角后,可有效增加岩土体的抗滑摩阻力,从而有效阻碍边坡沿软弱结构面发生滑动。因此,建议边坡加固时采取措施(例如,混凝土注浆、锚索加固等)增大 9 号煤层和页岩 2 的摩擦力。

3.3 不同岩体容重参数敏感性

从图 5(c) 中可以看出:减小边坡上部岩体的容重,稳定系数均呈增大趋势,其中,粉砂岩 1 增加较大;增加边坡下部岩体的容重,稳定系数均呈增大趋

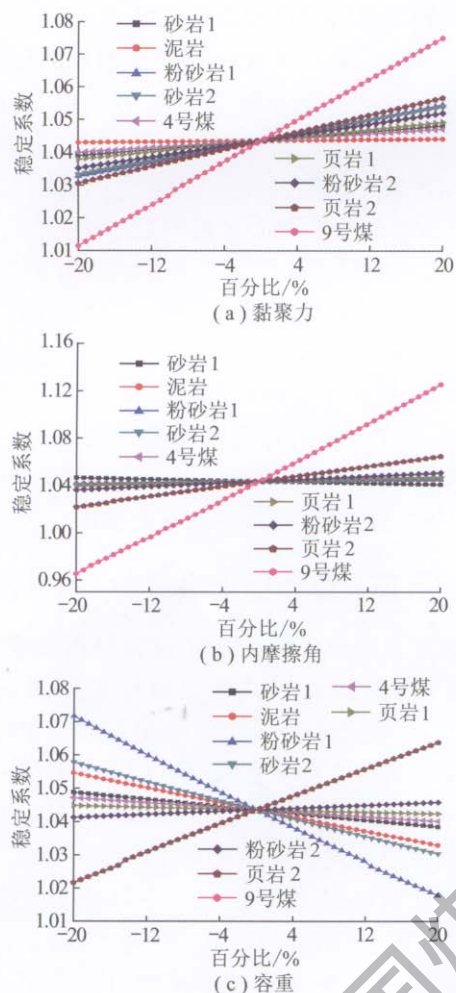


图5 不同岩体参数敏感性分析曲线

Fig. 5 Sensitivity analysis curves of different rock cohesion parameters

势,其中,页岩2增加较大。这与边坡加固采取的“坡顶削坡减载、坡脚堆载”原理完全一致:减小上部岩体的容重,相当于坡顶采取削坡措施,减轻了上部自重荷载对边坡的不利影响;增加下部岩体的容重,相当于坡脚堆载,增大了坡脚的抗滑力,有利于边坡稳定。因此边坡治理时,建议采取上部岩体削坡、下部岩体堆载的措施,并将粉砂岩1和页岩2分别作为削坡和堆载的重点,以有效提高边坡稳定性。

3.4 相同岩体黏聚力、内摩擦角与容重参数敏感性

以边坡上部粉砂岩1和边坡底部9号煤层两个典型岩层为例,分析相同岩层黏聚力、内摩擦角和容重参数改变时对边坡稳定的影响程度。计算结果如图6所示。

从图6(a)中可以看出:粉砂岩1的容重对边坡稳定系数影响最大,其次是黏聚力,而内摩擦角影响最小。从图6(b)中可以看出:9号煤层的内摩擦角对边坡稳定系数影响最大,其次是黏聚力,而容重影响最小。

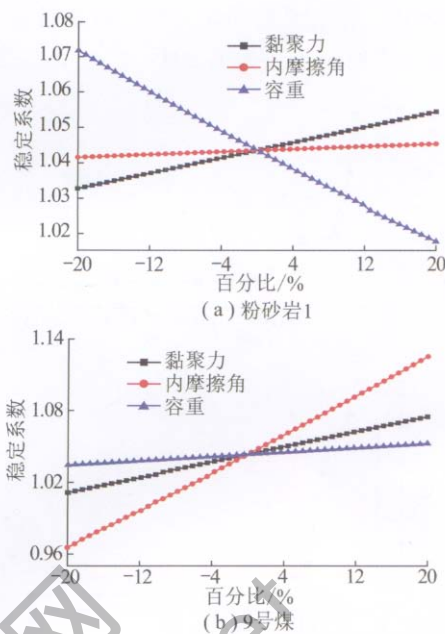


图6 粉砂岩1和9号煤黏聚力、内摩擦角与容重参数敏感性分析曲线

Fig. 6 Sensitivity analysis curves of bulk density, internal friction angle and cohesion parameters of No. 1 siltstone and No. 9 coal seam

当上部和下部岩体黏聚力、内摩擦角和容重参数改变时,对边坡稳定性的影响程度既有区别,也有联系。相同之处在于:当黏聚力增大时,均一定程度上提高了边坡的稳定性;不同之处在于:对于上部岩体,减小岩体容重(采取坡顶削坡措施)能够更加有效地提高边坡稳定性;对于下部岩体,增大内摩擦角(采取锚索等加固措施),边坡稳定性提高较为明显;虽然增大容重(即坡脚堆载)可以提高边坡稳定性,但是效果不如锚索。因此边坡治理时,建议边坡上部以削坡为重点,边坡下部以采用锚索加固为重点,可以有效提高边坡稳定性。

4 结 论

(1) 采用极限平衡法计算边坡稳定性时,选择合理的岩土体与水力学参数,确定合理的最危险滑动面,计算方法宜同时满足力和力矩平衡。其中,采用路径搜索方法时,随机搜索次数不宜小于600次,滑体条分块数不宜小于20块。

(2) 露天矿高边坡受长期开采和自然力等作用影响,稳定性将逐渐降低,存在滑坡的可能。最危险滑动面穿过坡脚的9号煤层,建议重点加固。

(3) 边坡稳定性对9号煤层的黏聚力和内摩擦角及边坡上部粉砂岩1容重和边坡下部页岩2容重较敏感。建议采取坡顶削坡、坡底锚索加固和堆载等

措施,可以有效提高边坡稳定性。

参考文献:

- [1] 姚爱军,何满潮. MSARMA 法在边坡稳态概率分析中的应用[J]. 岩石力学与工程学报,2002,21(12):1 839-1 842.
Yao Aijun, He Manchao. Application of MSARMA in the probability analysis of slope stability[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(12): 1 839-1 842.
- [2] 朱乃龙,张世雄. 深凹露天矿边坡稳定的空间受力状态分析[J]. 岩石力学与工程学报,2003,22(5):810-812.
Zhu Nailong, Zhang Shixiong. Mechanical analysis on the stability of deep furrow pit slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(5): 810-812.
- [3] 蔡美峰,乔 兰,李长洪. 深凹露天矿高陡边坡稳定性分析与优化设计[J]. 北京科技大学学报,2004,26(5):465-470.
Cai Meifeng, Qiao Lan, Li Changhong. Stability analysis and design optimization of high and steep slope of open-pit mine[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2004, 26(5): 465-470.
- [4] 金爱兵,孙金海,吴顺川. 露天矿深部开采边坡稳定性分析与治理方案研究[J]. 金属矿山,2005(6):5-9.
Jin Aibing, Sun Jinhai, Wu Shunchuan. Analysis of slope stability in deep mining of an open-pit mine and its control scheme[J]. Metal Mine, 2005(6): 5-9.
- [5] 王家臣,常来山,夏成华,等. 露天矿节理岩体边坡稳定性研究[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(18):3 350-3 354.
Wang Jiachen, Chang Laishan, Xia Chenghua, et al. Study on stability of jointed rock slope of an open iron mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(18): 3 350-3 354.
- [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(S2):3 661-3 666.
Xiao Jiang, Gao Xicai. Similar simulation research on stability of open-pit mine slope under complicated geological conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(S2): 3 661-3 666.
- [7] 孙树海,曹兰柱,张立新,等. 露天矿边坡稳定性的模糊综合评判[J]. 辽宁工程技术大学学报,2007,26(2):177-179.
Sun Shuhai, Cao Lanzhu, Zhang Lixin, et al. Fuzzy comprehensive judgment method used in slope stability of strip mine[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2007, 26(2): 177-179.
- [8] 王树仁,何满潮,武崇福,等. 复杂工程条件下边坡工程稳定性研究[M]. 北京: 科学出版社,2007.
Wang Shuren, He Manchao, Wu Chongfu, et al. Study on stability of slope under complex engineering conditions[M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [9] 周翠英,刘祚秋,尚 伟,等. 膨胀土和软岩边坡加固优化设计的几个关键问题[J]. 中山大学学报(自然科学版),2003,42(3):127-128.
Zhou Cuiying, Liu Zuoqiu, Shang Wei, et al. Some key problems in the reinforcement design of a landslide composed by expansive soils and soft rocks[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sun-yatseni, 2003, 42(3): 127-128.
- [10] Morgenstern N R, Price V E. The analysis of the stability of general slip surfaces[J]. Geotechnique, 1965, 15: 79-93.
- [11] Spencer E. A method of analysis for stability of embankment using parallel interslice force[J]. Geotechnique, 1967, 17: 11-26.
- [12] Sarma S K. Stability analysis of embankment and slopes[J]. Geotechnique, 1979, 29: 157-159.
- [13] 姚爱军,薛廷河. 复杂边坡稳定性评价方法与工程实践[M]. 北京: 科学出版社,2008.
Yao Aijun, Xue Tinghe. Evaluation methods and engineering practice of stability of complex slope[M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [14] Janbu N. Soil stability computations[A]. Hirschfeld R C, Poulos S J. Embankment Dam Engineering[C]. New York: John Wiley and Sons, 1973: 47-87.
- [15] 钱家欢,殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京: 中国水利水电出版社,1996.
Qian Jiahuan, Yin Zongze. Principle and calculation of geotechnical[M]. Beijing: China Water Power Press, 1996.
- [16] 中华人民共和国建设部. 岩土工程勘察规范(GB 50021-2001)[S]. 北京: 中国标准出版社,2002.
Ministry of Construction of PRC. Geotechnical engineering investigation specification (GB-50021-2001)[S]. Beijing: China Standards Press, 2002.