

顺倾软岩边坡稳定性分析与防治

曹兰柱, 霍丽红

辽宁工程技术大学资源与环境工程学院, 辽宁阜新 123000

摘要 为了对露天矿顺倾软岩边坡稳定性进行科学的评价,以大唐胜利东二号露天矿为工程背景,基于岩体结构控制论、极限平衡理论,研究边坡煤岩体内赋存的顺倾弱层和大断层对软岩边坡的稳定性影响。通过对监测数据的整理分析,并应用自行研发的极限平衡软件定量分析了采场南帮边坡的滑坡模式、滑坡机制。结果表明,现状边坡由西向东稳定性下降,并且存在顺倾弱层,揭露的弱层若受到断层切割作用时,易发生平面楔形滑动;若未受到断层的切割作用时,易发生以弱层为底界面的切层-顺层滑动。采场南帮边坡潜在滑坡模式是以6煤层底板附近的顺倾弱层为底部界面的平面楔形滑动;F68断层是滑坡体的侧边界,断层下盘相对稳定。

关键词 顺倾软岩边坡;岩体结构控制论;软弱结构面;蠕变滑坡

中图分类号 TD824.7

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.36.008

Analysis and Control of Slope Stability of Down Dip Soft Rock

CAO Lanzhu, HUO Lihong

College of Resource and Environment Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning Province, China

Abstract In order to scientifically evaluate the slope stability of open-pit mine down dip soft rock, the stability of the soft rock slope on the down dip weak layers and the large faults in slope coal and rock is studied. Based on the rock mass structure control theory and the limit equilibrium theory, a case study of Datang Shengli East II open-pit mine is carried out. Firstly, the monitoring data are classified. Secondly, the limit equilibrium software developed by our research group is used to quantitatively analyze the landslide mode and the mechanism of the south working pit edge. The result indicates that the stability of the current slope is declined from west to east, and the down dip weak layers can be observed. If the exposed weak layer cuts the fault, a slip of plane wedge-shape would happen, or else, there will be a slip from the sliced layer to the down dip layer with the weak layer as the bottom boundary. The potential landslide mode in the south working pit edge is the slipping of plane wedge-shape, and its bottom boundary is the down dip weak layer near the 6th coal seam floor. The F68 fault is the side boundary of the slipping solid, and the lower parts of the fault are relatively stable.

Keywords dipped slope of soft rock; rock mass structure control theory; weak structure plane; creep landslide

0 引言

边坡稳定性研究是露天开采领域研究的重大课题,随着中国露天矿山工程的发展,露天煤矿软岩边坡失稳问题日趋严重,如何针对不同露天矿特有的工程及地质特征,对软岩边坡稳定性进行科学的评价,提出合理的边坡治理措施,确保露天矿实现高效、安全生产已成为世界性课题。在中国内蒙古新建的几个大型露天矿,边坡岩体煤层顶底板中常见由多个软弱夹层控制的顺倾结构面。岩体结构控制论认为岩体变形破坏主要受结构面控制^[1-3],对于存在软弱结构面的顺倾边坡,受复合滑动面控制发生破坏,基本破坏模式由软弱层面和切层部分的圆弧面组成^[4-6]。由于岩体的非均质、非连续性、各向异

性,使顺倾岩质边坡受采动影响发生蠕变滑坡^[7],为了经济有效地控制顺倾软岩边坡稳定性,提出合理的边坡防治措施,确保露天矿实现高效和安全生产,是采矿工程科学技术人员亟待解决的关键问题。本文以胜利东二号露天矿首采区南帮边坡工程为背景,从岩体结构控制论的角度出发,边坡破坏模式主要取决于节理、裂隙的发育情况。通过对地表位移监测数据整理,判定了现状边坡的稳定性状态和相对不稳定区域;基于刚体极限平衡原理和反分析法,应用自行研发的计算机软件,确定了出露弱层的抗剪强度指标,在此基础上对不同形态南帮边坡的稳定性进行计算分析,得出边坡失稳的潜在滑面,并得到满足边坡稳定条件的最佳边坡角。

收稿日期:2011-08-22;修回日期:2011-12-22

作者简介:曹兰柱,教授,研究方向露天矿开采技术与边坡稳定性分析,电子信箱:cao1962@126.com

1 胜利东二号露天矿首采区南帮边坡工程地质特征

通过对现场地质勘探、钻孔取心确定采场南帮边坡岩体发育的地层自上而下有:第四系、新生界第三系上新统、中生界白垩系下统巴彦花群胜利组。第四系以砂质黏土为主,属松散岩层及软岩类;第三系岩层孔隙率、含水率普遍较高,岩石单轴抗压强度普遍较低,属软-中硬岩类;胜利组是本区主要含煤地层,与下伏锡林组整合接触;第三系底板至6煤组底板主要由泥岩、砂岩和煤层组成,属软-中硬-硬岩类,软岩类含量占层段的65.36%;6煤组底板以下50m以砂岩、砂质泥岩、泥岩为主,属软-中硬-硬岩类,软岩类含量占层段的72.79%。在首采区拉沟位置附近有F61、F63、F65、F68和F8断层,均为正断层,走向多为N60°E左右。本区的含水层为直接充水含水层,且由上至下为第四系松散岩类孔隙潜水含水层,第三系孔隙、裂隙潜水含水层,4煤组基岩裂隙、孔隙承压含水岩组,5、6煤组裂隙、孔隙承压含水层和7—11煤组裂隙、孔隙承压含水层。整体上属水文地质条件简单的顺倾软岩矿床,边坡煤岩体内赋存较多的顺倾弱层和一系列较大的正断层。

从岩体结构控制论的角度出发,边坡破坏模式主要取决于节理、裂隙的发育情况。边坡滑坡失稳主要取决于抗滑力和下滑力之间的关系,对于胜利东二号露天煤矿南帮边坡现状,边坡滑移主要有以下两方面原因:

(1) 地质构造影响,F68断层为正断层,一般断层带岩体极为破碎,强度指标较差,因此,该断层极可能构成了天然的滑体侧向边界;

(2) 采矿工程影响,随着采剥工程的发展,逐渐将边坡内赋存的顺倾弱层揭露与边坡坡面上,被揭露的弱层极可能作为滑体的下部边界。

鉴于以上分析,胜利东二号露天煤矿采场南帮边坡存在

两种潜在的滑坡模式:当由于采剥工程发展而被揭露的弱层受到断层切割作用时,易发生平面楔形滑动;若未受到断层的切割作用时,则易发生以弱层为底界面的切层-顺层滑动。

2 基于地表位移监测的边坡稳态分析

大量滑坡变形监测结果表明,边坡的变形往往具有蠕变特点^[8],如图1所示。对位移 s 与时间 t 关系求一阶和二阶导数,可分别得到速度 v -时间曲线、加速度 a -时间关系曲线。显然,边坡在初始变形阶段(AB段),位移加速度 $a < 0$;在等速变形阶段(BC段),位移加速度 $a = 0$;当进入加速变形阶段(CD段)时,则位移加速度 $a > 0$ 。边坡在初始变形和等速变形阶段是稳定的,只有当边坡进入加速变形阶段,即预示着边坡演化将进入整体失稳破坏的临界状态时,滑坡可能即将发生,据此可判定边坡的稳定状态。

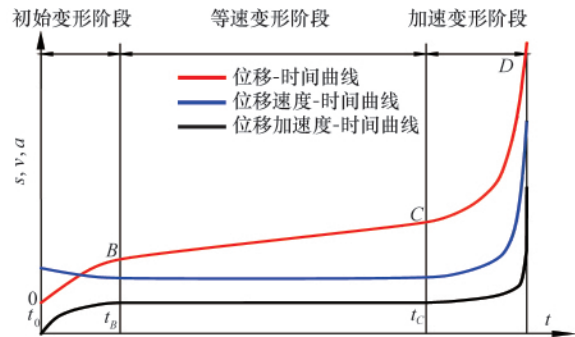


图1 典型边坡位移—时间特征曲线

Fig. 1 The displacement-time characteristic curves of typical slope

为了实时掌握首采区南帮边坡随露天矿剥采工程发展的动态稳定性,确保测量人员的安全,边坡地表位移监测主要以自动变形监测为主线性布置,如图2所示。CL1监测点、

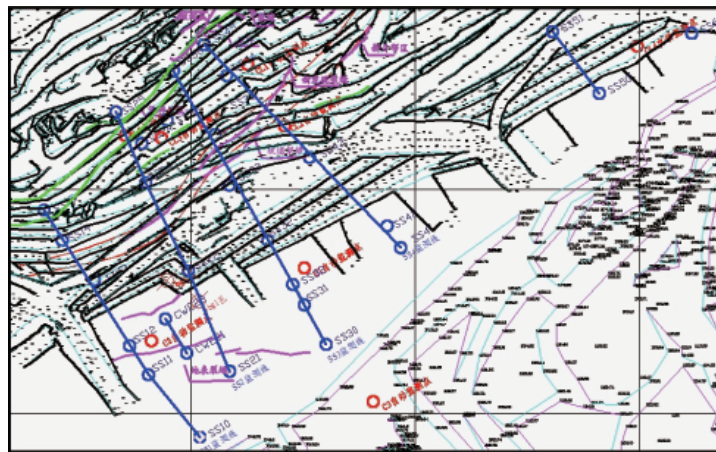


图2 地表位移监测点布置平面图

Fig. 2 Plane figure for monitoring points' arrangement of surface displacement

CL3监测点和CL5监测点位于采场内F68断层上盘,CL2监测点布设于F68断层下盘,CL4监测点布设于南帮边坡东侧的第一个延深水平上,C1、C2监测点布设在南帮边坡西侧坡

肩附近的地表面上,C3监测点布置于南排的北帮上。由此可根据监测结果分析F68断层对边坡稳定性的影响,掌握边坡现有的状态,判定相对不稳定区域,监测结果见图3。

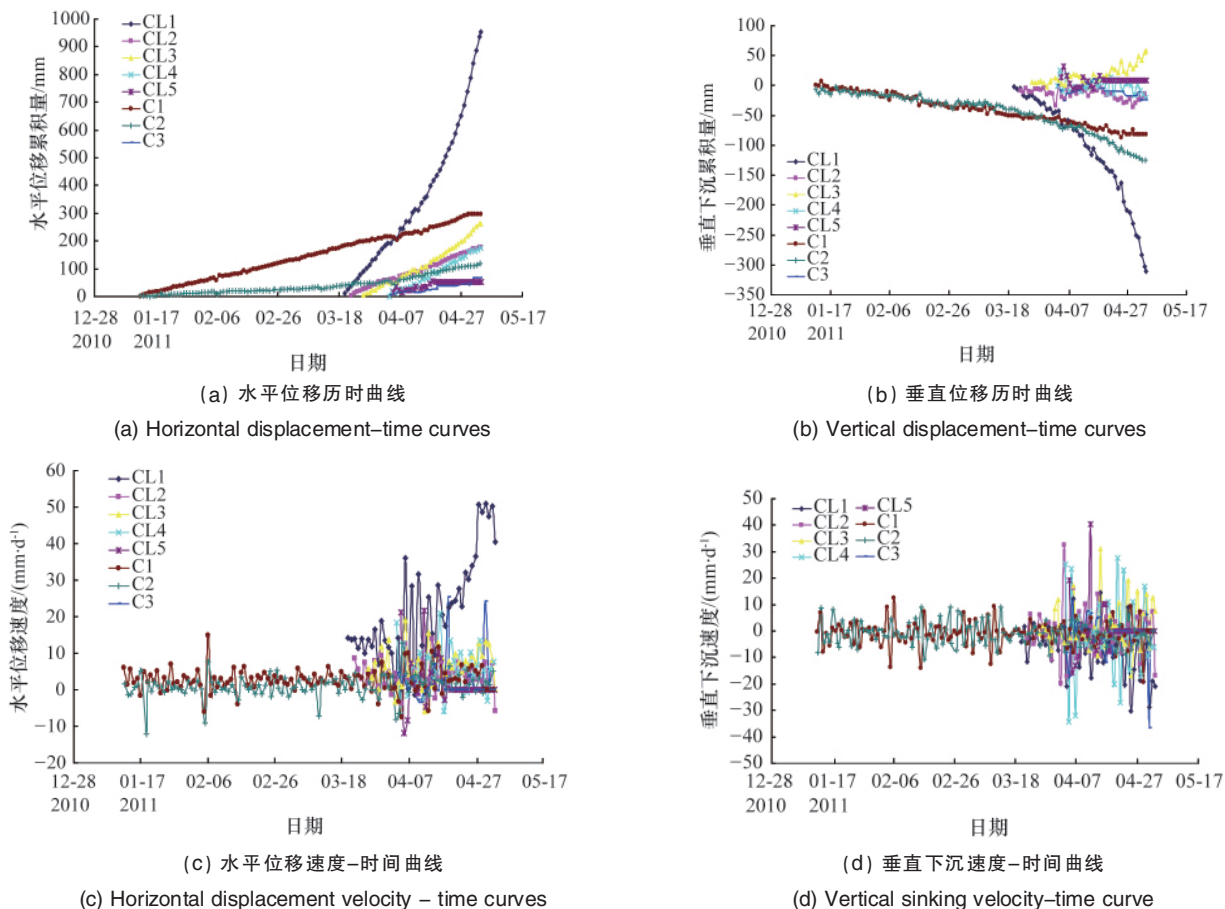


图 3 各 GPS 监测点水平位移历时曲线

Fig. 3 The horizontal displacement-time curves of GPS monitoring points

由图 3 分析可知,断层上盘监测点(CL5 监测点因电路故障停止测量)的变形速度明显大于下盘监测点,且速度逐渐增加,说明断层上盘岩土体处于加速变形阶段,即临滑阶段;CL2 监测点的水平位移速度和垂直位移速度值均较稳定,说明 F68 断层下盘附近的边坡岩土体处于等速变形阶段;CL4 监测点的水平位移速度和垂直位移速度均在一定范围内震荡,且震荡幅度较大,说明现有边坡东侧稳定性较差,考虑到地层向东有一定倾斜,一旦下部弱层被揭露,滑坡有可能发生。C1、C2 监测点的水平位移速度和垂直位移速度均不大,且值较稳定,说明现有边坡西侧地表附近岩土体处于等速变形阶段,即相对稳定。

3 边坡稳定性定量分析

刚体极限平衡分析法是分析岩土体稳定性出现最早的方法,也是发展最完善的方法,因其物理意义明确,计算结果可靠,方法简单而在实际工程中广泛应用。刚体极限平衡法是根据极限平衡的原理,建立条块的静力平衡方程,满足摩尔-库仑破坏准则、应力边界条件和力平衡条件。公式如下:

$$\tau = \frac{c' + \sigma'_n \cdot \tan \varphi'}{F_s} \quad (1)$$

$$\Delta T = \frac{c' \cdot \Delta x \cdot \sec \alpha + (\Delta N - u \cdot \Delta x \cdot \sec \alpha) \cdot \tan \varphi'}{F_s} \quad (2)$$

其中, σ'_n 和 τ 是满足摩尔-库仑强度准则的正应力和剪应力, c' 和 φ' 是黏聚力和内摩擦角, F_s 为稳定系数, ΔN 和 ΔT 是条块底的法向力和切向力; α 为条块底倾角, Δx 为条块长度, u 为孔隙水压力。

通过对岩石物理力学性质试验,综合确定岩体物理、力学指标,如表 1 所示。为尽可能反映采场边坡的稳定性,选择具有代表性的剖面作为本次计算分析的基础,依据现场实际情况及对南帮边坡的初步判断分析,鉴于 F68 断层上盘布置的 SS2 监测线和 SS4 监测线位移量较大,变形速度较快,假设其处于极限平衡状态,进行弱层岩土体物理力学指标反分析,通过多次试算确定弱层的黏聚力和内摩擦角,最终得出 c' 为 0.01MPa, φ' 为 10° , 利用自行研发的刚体极限平衡计算软件,

表 1 岩体物理力学指标

Table 1 Rock mass physical and mechanical parameters

地层	黏聚力 c' /MPa	内摩擦角 φ' /($^\circ$)	岩体容重 γ /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)
第四系	0.01	28	20.5
第三系	0.07	21	18.5
泥岩	0.08	23	22.2
粉砂岩	0.11	31	22.2
煤	0.61	44.5	13.2
弱层	0.01	10	10

对 SS2 监测线 F68 断层上盘计算剖面 (图 4) 和 SS4 监测线 F68 断层上盘计算剖面 (图 5) 进行分析, 由计算结果分析可得, 这些岩体力学指标基本符合滑坡实际, 说明采用的岩体力学指标是可靠的。经上述验证, 可进一步分别计算 SS2 监测线剖面 和 SS4 监测线剖面 现状边坡整体滑移、清理断层上盘后边坡、清理断层下盘后边坡、设计最终边坡、坡角为 20° 时边坡和坡角为 18° 时的边坡稳定性。计算结果见表 2。

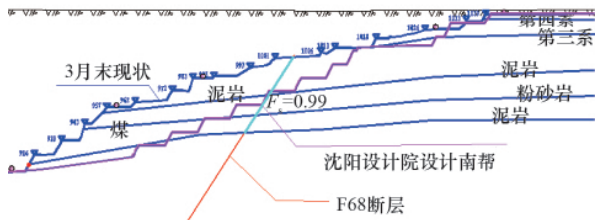


图 4 SS2 监测线 F68 断层上盘计算剖面

Fig. 4 Calculated profiles of SS2 monitoring line on the F68 normal fault

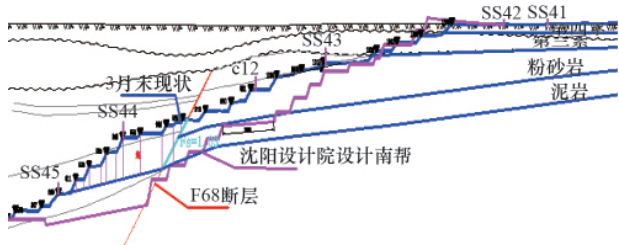


图 5 SS4 监测线 F68 断层上盘计算剖面

Fig. 5 Calculated profiles of SS4 monitoring line on the F68 normal fault

表 2 稳定性分析结果

Table 2 Results of stability analysis

剖面 名称	边坡稳定系数 F_s						坡角 为 20°	坡角 为 18°
	断层 上盘	现状 边坡	清理 断层	清理 断层	最终 设计 值			
	现状 边坡	整体 滑移	上盘 后	下盘 后				
	现状 边坡	整体 滑移	上盘 后	下盘 后				
SS2 监 测线 剖面	0.99	1.14	1.11	1.13	1.13	1.27	1.38	
SS4 监 测线 剖面	1.03	1.09	1.09	1.06	1.05	1.16	1.27	

分析结果表明, (1) 对 SS2 监测线剖面不考虑断层作用时, 边坡整体滑移模式为切层-顺层滑动, 即上部剪切第四系、第三系、泥岩及煤层等煤岩体形成圆弧滑面, 下部以煤底板弱层为底部滑面; 考虑断层作用时, 边坡发生局部滑移, 其滑坡模式为以煤底板弱层为底部滑面。 (2) 对 SS4 监测线剖面不考虑断层作用时, 边坡发生整体滑移为切层-顺层滑动, 即上部剪切第四系、第三系、粉砂岩、泥岩及煤层等煤岩体形成圆弧滑面, 下部以煤底板弱层为底部滑面; 考虑断层作用

时, 边坡发生局部滑移, 其滑坡模式为以煤底板弱层为底部滑面, 以 F68 正断层为侧向边界的平面楔形滑。 (3) 现状边坡稳定性较差, 削坡减重在一定程度上可以提高边坡稳定性系数, 但效果不明显。

4 结论

基于岩体结构控制理论和自行研发的极限平衡计算软件对大唐胜利东二号露天煤矿南帮边坡稳定性的分析, 揭示了顺倾软岩边坡的滑坡机制和破坏模式, 并对顺倾软岩边坡稳定性做了科学评价, 并提出相应的边坡综合治理和控制措施。主要结论如下。

(1) 边坡煤岩体内赋存较多的顺倾弱层和落差较大的正断层, 剥采活动一旦切断弱层, 这类边坡极易发生顺层滑坡, 防治难度大, 最有效的防治方法是减重压脚。

(2) 边坡稳定性及其滑移形式受断层影响较大, 随采剥工程推进所揭露的弱层受到断层切割作用时, 断层上盘岩体易发生平面楔形滑动; 整体边坡则易发生以出露弱层为底界面的切层-顺层滑动, 在边坡不同出露标高产生分层错动。

(3) 在疏干排水、滑坡监测的基础上, 采取削坡减重 (南帮最终边坡角 18°) 的综合治理措施。

参考文献 (References)

[1] 孙广忠. 岩体结构力学[M]. 北京: 科学出版社, 1988.
Sun Guangzhong. Mechanics of rock mass structure [M]. Beijing: Science Press, 1988.

[2] 孙广忠. 论“岩体结构控制论”[J]. 工程地质学报, 1993(3): 14-18.
Sun Guangzhong. Journal of Engineering Geology, 1993(3):14-18.

[3] 李扬, 杨继红, 刘汉东. 岩体结构控制下的边坡稳定性多因素敏感性分析[J]. 铁道建筑, 2011(1): 88-90.
Li Yang, Yang Jihong, Liu Handong. Railway Engineering, 2011(1): 88-90.

[4] 王振伟. 软弱结构面控制的矿山软岩边坡稳定性研究[C]//煤矿重大灾害防治技术与实践: 2008 年全国煤矿安全学术年会论文集. 北京: 中国煤炭学会, 2008.
Wang Zhenwei. Weak structure of the surface mining control study of soft rock slope stability [C]// Major Coal Mine Disaster Prevention Technologies and Practices: 2008 the National Coal Mine Safety Conference Proceedings. Beijing: China Coal Society, 2008.

[5] 谢承平. 软岩边坡主要影响因素及稳定性分析研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2009.
Xie Chengping. Soft rock slope major effect factor and stability analysis [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2009.

[6] 王建国, 王振伟, 王来贵, 等. 受控于软弱结构面的矿山软岩边坡稳定性[J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2006, 25(5): 686-688.
Wang Jianguo, Wang Zhenwei, Wang laigui, et al. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science Edition, 2006, 25(5): 686-688.

[7] 许强, 曾裕平. 具有蠕变特点滑坡的加速度变化特征及临滑预警指标研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(6): 1099-1107.
Xu Qiang, Zeng Yuping. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(6): 1099-1107.

[8] 何云明. 边坡的蠕变机理与失稳预测研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2005.
He Yunming. Study on the creep mechanism and stability drop prediction of slope[D]. Chongqing: Chongqing University, 2005.

(责任编辑 董晓军, 刘志远)