

# 大冶铁矿东露天采场边坡破坏判据的研究

周 健,周春梅,肖 云,李先福

(武汉工程大学环境与城市建设学院,湖北 武汉 430074)

摘 要:通过对大冶铁矿东露天采场  $F_9$ 、 $F_{13}$  断裂带内边坡的深入研究,从整体与局部稳定性系数等方面探讨了边坡破坏判据,利用有限元强度折减法与极限平衡法计算边坡的稳定性,得出边坡处于极限平衡状态时的塑性应力及塑性应变,提出边坡破坏判据。

关键词:稳定性系数;有限元强度折减法;Geo-Slope;ANSYS

中图分类号:TD854.6 文献标识码:A

## 0 引 言

滑坡时间预报模型和预报判据研究是滑坡成功预报的重要因素,也是滑坡预报的核心。目前国内外学者提出了多种滑坡灾害预测预报的理论模型和方法,并且也确实有预报成功的实例,但是由于斜坡变形演化过程的复杂性、随机性和不确定性,加之这些理论和方法的适用性较差,某种理论模型往往只适用于某种类型的滑坡预报,因此必须建立一些具有一定适用性的滑坡预报判据<sup>[1]</sup>。

## 1 整体稳定性系数判据

稳定性系数判据经过长期的应用积累了丰富的经验,因其使用方便受到工程界的欢迎。稳定性系数为边坡滑动力与抗滑力的比值,即  $F$ =下滑力/抗滑力,当边坡的总滑动力大于抗滑力时,稳定性系数小于1,边坡处于不平衡状态;当边坡的总滑动力小于抗滑力时,稳定性系数大于1,边坡处于稳定状态;当两者相等是,稳定性系数等于1,边坡处于极限平衡状态。此时,若在边坡上加一小的滑动干扰力,边坡就会出现。从安全角度考虑,将稳定性系数判据确定为大于1的某个值比较合适,当边坡的稳定性系数低于此值时应密切注意,防止外界因素诱发滑坡的发生,并采取适当的措施,防止其滑动并做出滑坡预警预报<sup>[2]</sup>。

岩质边坡的稳定性主要由岩体结构面的强度控制,利用有限元强度折减法计算边坡的稳定性系数,并提出边坡破坏的判据模型。

### 1.1 有限元强度折减法的原理

所谓强度折减,就是在理想弹塑性有限元计算中将边坡岩土体抗剪切强度参数逐渐降低直到边坡达到破坏为止,即将边坡强度参数粘聚力  $c$  和内摩擦角  $\phi$  同时除以一个折减系数  $F_s$ ,得到一组新的  $c'$  和  $\phi'$  值,然后作为一组新的材料参数输入,当计算不收敛时,得到破坏滑动面(塑性应变和位移突变的地带),同时得到边坡的强度储备稳定性系数  $F_s$ ,有限元强度折减法计算岩质边坡稳定性原理与传统极限平衡法本质一致,但其更符合实际<sup>[3-4]</sup>。

$$c' = \frac{c}{F_s} \quad \tan \phi' = \frac{\tan \phi}{F_s} \quad (1)$$

### 1.2 有限元强度折减法数值模拟分析

a. 剖面的选取。选取Ⅲ—Ⅲ'剖面计算其稳定性系数,Ⅲ—Ⅲ'剖面处于大冶铁矿东露天采场狮子山北帮  $F_9$  断层下盘,与  $F_9$  断层及两组大型节理  $J_3$ 、 $J_4$  相交(图1)。

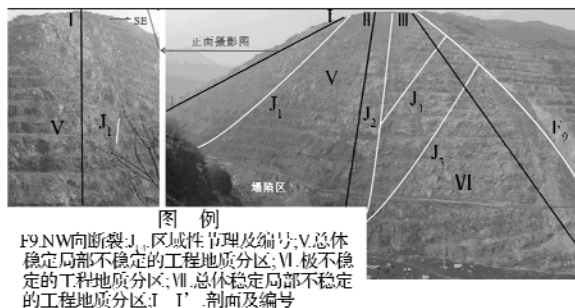


图1 Ⅲ—Ⅲ'剖面所处地理位置

Fig. 1 Location of section III—III'

收稿日期:2008-09-04

基金项目:国家自然科学基金项目(50874080),武汉工程大学校青年基金项目(Q200805)

作者简介:周 健(1984-),男,湖北公安人,硕士研究生,研究方向:防灾减灾及防护工程。

指导老师:李先福,男,博士,教授,硕士研究生导师,研究方向:地质环境与灾害防治。

Ⅲ—Ⅲ'剖面实际坡高 431.12 m,宽 566.5 m (图 2),为减少边界效应应将计算范围取为高 450 m,宽 650 m,选取位移边界条件,左右方向位移  $x$  方向固定, $y$  方向自由,地表自由,底边  $x$ 、 $y$  方向固定。

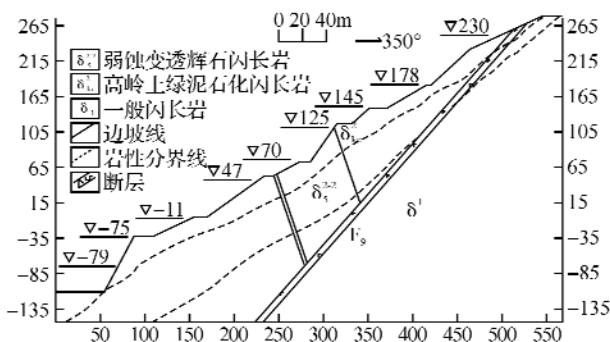


图 2 Ⅲ—Ⅲ'剖面工程地质剖面图

Fig. 2 Engineering geology view of section Ⅲ—Ⅲ'

计算采用的软件为美国 ANSYS 公司的大型有限元计算程序 ANSYS8.1,滑坡按照平面应变问题处理,岩土体采用 PLANE42 单元模拟,Ⅲ—Ⅲ'剖面有限元网格划分,共 1261 个单元,671 个节点(图 3)。

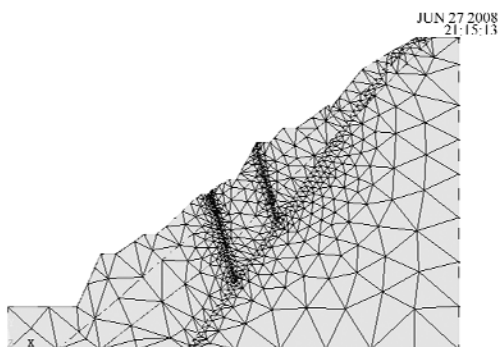


图 3 Ⅲ—Ⅲ'剖面网格划分模型图

Fig. 3 Meshing model of section Ⅲ—Ⅲ'

b. 岩体参数的选取及结果分析. 由中科院武汉岩土力学研究所报告中提供的岩体力学参数(表 1)。<sup>[5-6]</sup>

表 1 天然/饱和水状态下岩体力学参数

Table 1 Rock mechanical parameter in saturation water/nature

岩性名称	一般闪长岩	弱蚀变透辉石闪长岩	弱蚀变高岭土绿泥石闪长岩	断层(天然/饱水)
岩性符号	$\delta_1$	$\delta_5^{2-2}$	$\delta_{KC}^2$	
容重/( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	24	24	24	24
C/MPa	0.3	0.1	0.06	0.03/0.01
$\varphi/(^{\circ})$	30	30	30	18/15
泊松比	0.28	0.28	0.28	0.28
弹性模量/MPa	$2 \times 10^4$	$2 \times 10^4$	$2 \times 10^4$	$0.7 \times 10^4$

对天然状态下坡体的岩体力学参数进行折减,当折减系数  $F_s \geq 1.22$  时,有限元计算不收敛,即

天然状态下边坡的稳定性系数为 1.22;对饱和水状态下坡体的岩体力学参数进行折减,当折减系数  $F_s = 1.08$  时,坡体达到极限平衡状态,故饱和水状态下边坡的稳定性系数为 1.08。

### 1.3 整体稳定性系数判据

东露天采场高陡岩质边坡按照工程的安全等级划分为一级边坡,其稳定安全系数按照平面滑动法或折线滑动法  $F_s \geq 1.35$ ,按照圆弧滑动法  $F_s \geq 1.30$ ,故Ⅲ—Ⅲ'剖面在饱水状态下处于稳定到欠稳定状态,故应长期监测坡体的位移变化,下雨天应密切观察边坡体上的宏观变形迹象,一旦有变化异常的宏观变形及异常反映,应及时通知有关部门做好应急救援,并减少诱发滑坡发生的外界因素(如地下开采、爆破),采取合理的防止措施。计算不同工况下的边坡的稳定性系数,当边坡的稳定性处于如下判据(表 2)时,应做出相应的预报工作。

表 2 整体稳定性系数判据

Table 2 Criterion of whole stability coefficient

	安全	长期预报	临滑预报
平面滑动	$F_s \geq 1.35$	$1.35 \geq F_s \geq 1.05$	$F_s \leq 1.05$
圆弧滑动	$F_s \geq 1.30$	$1.30 \geq F_s \geq 1.05$	$F_s \leq 1.05$

## 2 塑性应力与塑性应变判据

图 4~5 是Ⅲ—Ⅲ'剖面饱和水状态下,有限元边坡处于极限平衡状态时塑性应力、塑性应变有限元计算结果. 由图 4 可见, $xy$  方向剪应力在 17~70 m、125~150 m 范围内发生应力集中,这些地方最容易发生破坏;由图 3~5 可见  $xy$  方向的塑性剪应变沿断层及节理面基本已经贯通,可见整个坡体处于极限平衡状态。

塑性应力与塑性应变预报判据为:塑性应力在岩体结构面内集中,且塑性剪应变岩体结构面内贯通,则边坡处于极限平衡状态,一旦有触发因素,滑坡随即发生,必须做临滑预报<sup>[7]</sup>。

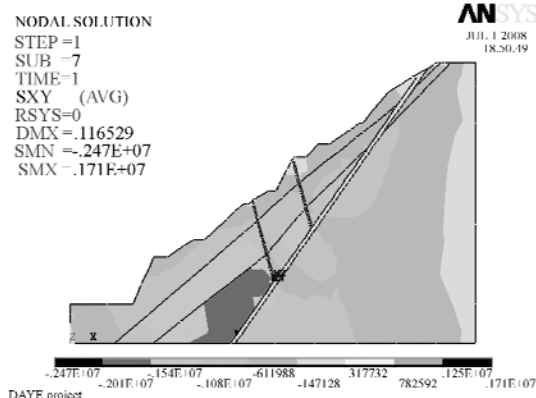
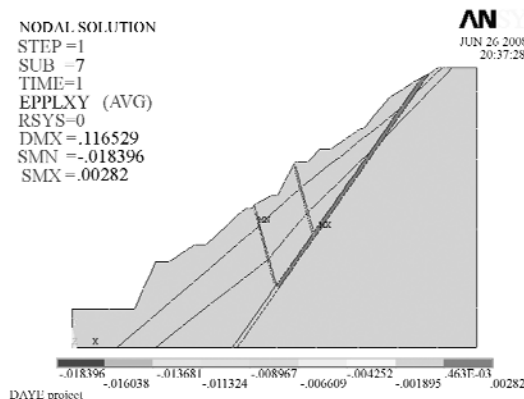


图 4  $xy$  方向剪应力云图

Fig. 4 Nephogram of shear stress in  $xy$

图 5  $xy$  方向塑性剪应变云图Fig. 5 Nephogram of shear strain in  $xy$ 

### 3 局部稳定系数判据

岩质边坡的稳定性主要受岩体结构面的控制,岩体结构面的强度、长度、密度、贯通率,发展方向等因素不仅影响边坡的整体稳定性,同时也极大的影响边坡局部的稳定性,在边坡整体稳定较好的情况下,局部岩体也可能发生坍塌和变形破坏,因此,有必要提出局部岩体的稳定系数判据。

#### 3.1 局部稳定性系数的计算

计算采用边坡工程中运用最广泛的加拿大 Geo-Slope 公司研制边坡稳定性计算软件 Slope/w,其原理是极限平衡法,包括 Ordinary、Bishop 法、Janbu 法、Morgenster-Price 法等。Slope/w 程序可以自动搜索稳定性系数最小滑动面,即最危险滑动面,并给出最小安全系数。

模型仍选用 III III' 剖面,岩体参数取饱和水状态下的参数。图 6~9 分别是 Ordinary、Bishop、Janbu、Morgenster Price 法得出剖面最危险滑动面。最小稳定性系数分别为 0.873、0.882、0.914、0.808(表 3)。

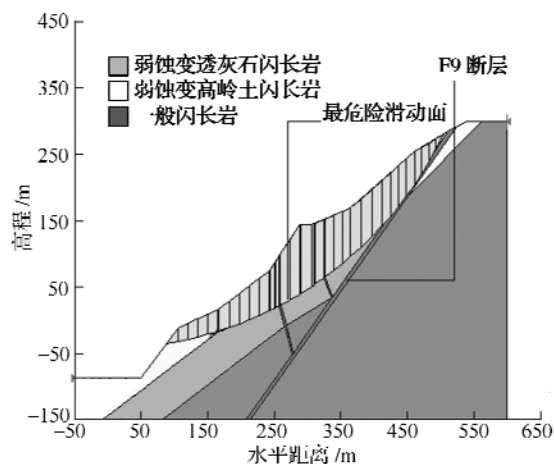


图 6 Ordinary 法得出剖面最危险滑动面

Fig. 6 The most dangerous sliding surface by Ordinary

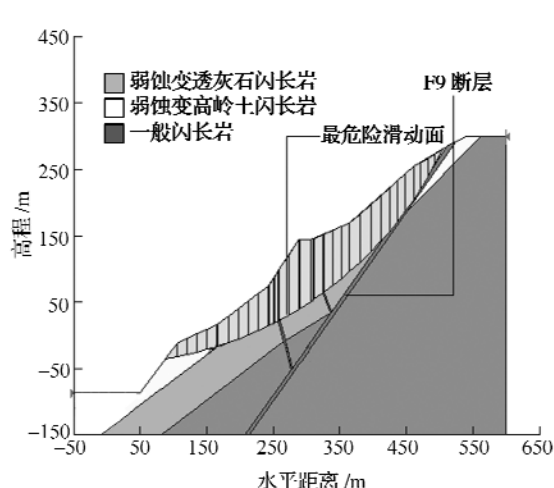


图 7 Bishop 法得出剖面最危险滑动面

Fig. 7 The most dangerous sliding surface by Bishop

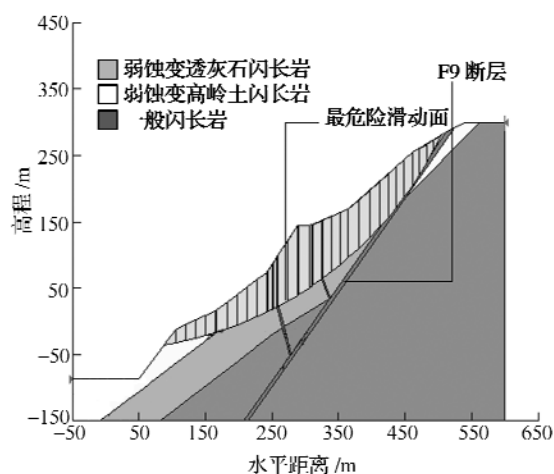


图 8 Janbu 法得出剖面最危险滑动面

Fig. 8 The most dangerous sliding surface by Janbu

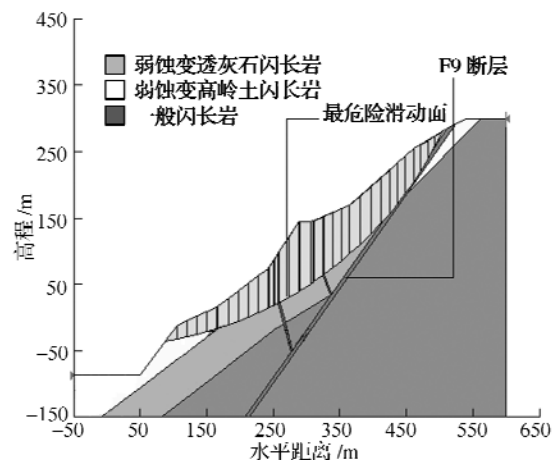


图 9 Morgenster-Price 法得出剖面最危险滑动面

Fig. 9 The most dangerous sliding surface by Morgenster-Price

表 3 计算出的最小稳定性系数

Table 3 The minimum stability coefficient by geo-slope

计算方法	Ordinary	Bishop	M P	Janbu
最小稳定性系数	0.873	0.882	0.914	0.808

### 3.2 局部稳定系数预报模型与判据

由以上计算结果显示,Ⅲ Ⅲ'剖面在饱水状态下整体稳定差  $F_s < 1$ ,存在局部不稳定,故局部不稳定系数的判据以最不利工况下的稳定性系数  $F_s$  与 1 的关系(表4)。

表4 局部稳定性系数判据

Table 4 Criterion of local stability coefficient

最不利工况	$F_s \geq 1$	安全
	$F_s < 1$	临滑预报

## 4 结 语

通过建立相应的模型对边坡进行稳定性计算,可以得出边坡处于极限平衡状态时的塑性应力应变分布,从而对边坡破坏进行预报。但因为边坡演化过程具有复杂性、随机性和不确定性,加之某些理论和方法的适用性较差,一种理论模型往往只适用于某些类型的边坡,因此准确地预报滑坡是非常困难的。要想做到准确预报,必须建立一些具有一定适用性的边坡破坏判据。

### 参考文献:

- [1] 殷坤龙,张桂荣. 浙江省突发性地质灾害预警预报[M]. 武汉:中国地质大学出版社,2005:6-11.
- [2] 廖秋林. 峡库区千江坪滑坡的发生、地质地貌特征、成因及滑坡判据研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005,(9):3147-3152.
- [3] 郑颖人,赵尚毅. 用有限元强度折减法进行边坡稳定性分析[J]. 中国科学工程,2002,(11):57-61.
- [4] 肖云,周春梅,吴燕玲,等. 露天采场高陡岩质边坡典型地段稳定性分析[J]. 武汉工程大学学报,2009,31(3):34-37.
- [5] 中国科学院武汉岩土力学研究所. 大冶铁矿狮子山北帮A区尖  $F_9$  断层上盘—60 m ~ -96 m 边坡稳定性和滑坡防治研究[R]. 黄石:大冶铁矿,1995.
- [6] 中国科学院武汉岩土力学研究所. 大冶铁矿狮子山北帮A区尖  $F_9$  断层上盘—84 m ~ -120 m 边坡稳定性和滑坡防治研究[R]. 黄石:大冶铁矿,1998.
- [7] 凌荣华,陈月娥. 塑性应变与塑性应变率意义下的滑坡判据研究[J]. 工程地质学报,1997,(12):57-61.

## Study on criterion of slope failure in eastern open pit in Daye

ZHOU Jian, ZHOU Chun-mei, XIAO Yun, LI Xian-fu

(School of Environment and Civil Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** In this paper, an in-depth study on the slopes in  $F_9$ ,  $F_{13}$  in eastern open pit in Daye (Hubei) iron mine and a discussion on overall stability and local factors has been done. The stability coefficient is calculated by using FEM strength reduction and limit equilibrium method. It finds out the plastic stress and the plastic strain of the slope in the state of limit equilibrium and gets slope damage criterion model in the article.

**Key words:** stability coefficient; FEM strength reduction; geo slope; ANSYS

本文编辑:萧 宁