

文章编号: 1001-1986(2008)03-0052-04

# 露天煤矿边坡稳定性评价方法的耦合应用

李荣伟<sup>1,2</sup>, 侯恩科<sup>1</sup>, 赵洲<sup>1</sup>, 张志华<sup>1</sup>

(1. 西安科技大学地质与环境工程系, 陕西 西安 710054;

2. 四川矿山安全技术培训中心, 四川 成都 610000)

**摘要:** 将有限差分法、极限平衡法(简化 Bishop 法)、可靠度分析法(简化一次二阶矩法)耦合应用于露天煤矿边坡稳定性评价, 确定了可靠度法设计中的可靠度数值问题, 并采用力学行为、稳定系数及破坏概率等 3 项综合指标分析了边坡稳定性, 旨在建立一种有效的耦合方法, 多角度分析边坡工程的即时状态。研究结果表明, 该分析方法可行, 结果可信。

**关键词:** 边坡稳定性; 三维数值分析; 强度折减法; 极限平衡法; 可靠度分析

中图分类号: TD 324.71 文献标识码: A

## The coupling application of methods for evaluating slope stability of open-pit

LI Rong-wei<sup>1,2</sup>, HOU En-ke<sup>1</sup>, ZHAO Zhou<sup>1</sup>, ZHANG Zhi-hua<sup>1</sup>

(1. Dept. of Geology and Environment Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

2. Sichuan Mine Safety Technology Training Centre, Chengdu 610000, China)

**Abstract:** In order to establish an efficient coupling method for analyzing the temporal status of the engineering slope from different viewpoints this paper educes the reliability level used in possibility design method by coupling FLAC<sup>3D</sup> with possibility design method (FOSM) and equilibrium method (simplified Bishop method), and judges the stability of slope by synthesis index composed of mechanical behavior, stability factor and the failure probability. The study results indicated that this method is feasible and credible.

**Key words:** slope stability; 3D numerical analysis; strength reduction method; limit equilibrium method; reliability analysis

边坡工程是一个复杂的非线性问题。影响边坡工程性质和状态的因素很多, 任何一种分析方法和计算模型都不可能准确、定量地包容它们; 而且, 所有影响因素均有高度的不确定性, 从理论上讲, 任何一个“准确”测定的因素值, 只是一个即时样本, 是一个近似值; 在控制边坡稳定性的各因素间, 具有固有的相关性, 它们之间作用极为复杂, 很难用数学模型进行描述。

当其中一个因素的某性质发生变化, 都可能引起整个边坡工程的性态变化, 自然也引起稳定性评价指标的变化。所以, 如果用单一的稳定性指标, 正确无误地表征边坡的稳定状态, 几乎是不可能的。换个角度讲, 单一的稳定系数值和破坏概率值都属于线性思维, 因为模型一定, 输入参数一定, 其输出结果必然一定。尽管这些评价指标长期广泛地用于工程实践, 但终究是用线性思维方式来考虑非线性问题, 必然会造成分析结果与实际的较大差异。

本文以内蒙古某露天煤矿为例, 由外排土场和采掘帮坡构成的复合边坡作为研究对象, 将有限差分法、极限平衡法、可靠度分析法(简化一次二阶矩法)耦合应用, 采用力学行为、稳定系数及破坏概率等 3 项综合指标分析复合边坡的稳定性, 旨在建立多种方法的耦合应用, 从多个角度分析边坡工程的即时状态, 达到与采用非线性思维和非线性方法具相似结果的目的。主要计算耦合步骤为:

a. 采用 FLAC<sup>3D</sup> 数值模拟法研究边坡的应力、位移、塑性区分布变化规律等力学行为。

b. 依据数值分析提供的剖面位移等值线图, 勾勒出边坡的潜在破坏面; 采用 FLAC<sup>3D</sup> 强度折减法计算相应部位的材料安全储备系数, 得到最大可能的潜在滑移面; 通过两种方法对比确定计算采用的滑移面。然后借助极限平衡分析法中的简化 Bishop 法计算边坡稳定系数; 将强度折减法和极限平衡法所得稳定系数进行比较, 对比验证稳定系数的可靠性, 并分析边坡的稳定性。

收稿日期: 2007-10-30

作者简介: 李荣伟(1974—), 男, 甘肃陇西人, 工程师, 硕士, 主要从事地质与岩土工程方面的研究工作。

- c. 采用简化一次二阶矩法,以该滑移面进行边坡可靠度分析,提供边坡整体破坏概率。
- d. 根据以上方法,相互交叉验证,进行边坡可靠度的综合分析。

## 1 研究区地质概况

研究区平均开采深度188 m,可采煤层最大埋深为250 m,自上而下出露的地层为:第四系粉土或粉细砂土、新近系红粘土、白垩系煤系及下伏基岩。其中,煤系自上而下出露有2煤组、3煤组及煤层顶、底板泥岩、砂质泥岩或泥质砂岩,或粉砂质泥岩与泥质砂岩互层。区内构造简单,无大的断层;有第四系孔隙潜水含水层,2、3煤组裂隙承压含水层,以及新近系粘土和2、3煤组含水岩组底板发育的由泥岩、砂质泥岩、粉砂岩组成的稳定隔水层(局部地段缺失)。第四系潜水以大气降水补给为主。煤系孔隙承压含水岩组主要由大气降水通过含水层掩伏露头下渗补给及隔水层的局部薄弱地段越流渗透补给。地下水径流方向与本地区地层倾向基本一致。

## 2 三维数值模拟分析边坡的力学行为

作者曾采用FLAC<sup>3D</sup>快速拉格朗日分析法,在考虑地下水作用及不考虑地下水作用两种情况下的位移场、应力场和塑性区分布规律,从模拟实际工况下的力学行为入手,分析了研究区边坡的稳定性<sup>[1]</sup>。

根据该研究成果,从真三维状态下的位移场和塑性区整体分布规律来看,排土场坡肩、采掘边坡不同部位的位移分布规律不同。排土场内部的位移以“整体沉降”为主,排土场靠近边坡附近也可能发生“圆弧状”破坏;中间分隔带以指向采坑的“顺层滑移”为主;外排土场堆载对采掘边坡的稳定性存在一定不良影响;采掘边坡潜在的破坏形式主要表现为“顺层滑移”、卸荷或剪切产生的“隆起”。另外,分析结果表明,两种情况下的位移、应力和塑性区分布差异较大,地下水对露天煤矿边坡稳定影响显著。

## 3 稳定系数法分析边坡的稳定性

### 3.1 FLAC<sup>3D</sup>强度折减法分析边坡稳定性

强度折减法中边坡稳定的稳定系数定义为:使边坡刚好达到临界破坏状态时,对岩土体的抗剪强度进行折减的程度<sup>[2]</sup>:

$$c_F = c/F_{\text{trial}}, \quad \phi_F = \tan^{-1}((\tan \phi)/F_{\text{trial}}), \quad (1)$$

式中  $c_F$  为折减后的粘聚力;  $\phi_F$  为折减后的内摩擦角;  $c$  为折减前的粘聚力;  $\phi$  为折减前的内摩擦角;  $F_{\text{trial}}$  为折减系数。

计算时,首先选取初始折减系数,折减土体强度参数,将折减后的参数作为输入,进行数值模拟计算。若程序收敛,则土体仍处于稳定状态,然后再增加折减系数,直到不收敛为止。折减系数即为边坡的稳定系数,此时的滑移面即为实际滑移面。

本文在未考虑地下水的情况下,修改计算模型(保留  $x=600\sim800$  m)。选取典型剖面  $x=700$  m,按非相关流动法则(剪胀角为零),采用FLAC<sup>3D</sup>强度折减法求得稳定系数为1.433,基本接近设计值1.20。

根据上面分析,边坡稳定性受地下水影响较大,因而实际稳定系数应更小。另外,从强度折减法计算后的剪应力增量云图(图1)所反映的边坡潜在的破坏面位置(图2),可以看出,复合边坡潜在的破坏形式与前面的应力应变分析结果一致。

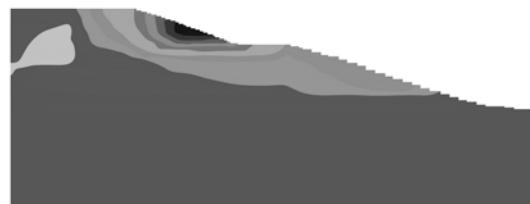


图1 剪应力增量云图

Fig. 1 Contour of shear stress increment

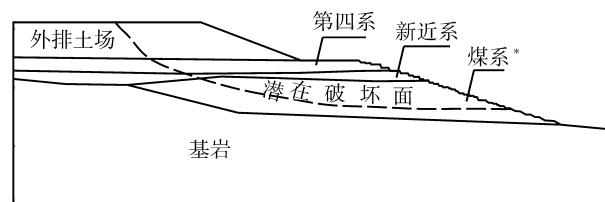


图2 计算剖面

Fig. 2 The calculation section

\*煤系包括2-1中煤、3-1煤、3-2煤、3-3煤及其顶板。

### 3.2 极限平衡稳定系数法分析边坡的稳定性

根据上面强度折减法得到的最可能的潜在滑移面(图2)。各岩土层强度参数选取统计标准值<sup>[1]</sup>,采用理正软件,应用简化Bishop法计算该断面边坡稳定系数,其结果为 $FS=1.242$ 。

### 3.3 极限平衡法和强度折减法稳定系数对比

可以看出,FLAC<sup>3D</sup>折减法计算的稳定系数比简化Bishop法高15.4%。由于简化Bishop计算的稳定系数是偏于安全的,所以FLAC<sup>3D</sup>折减法计算的

结果是合理的。FLAC<sup>3D</sup> 强度折减法同极限平衡法相比, 不仅能满足力的平衡方程, 而且也满足应力和应变关系, 计算所得的稳定系数同简化 Bishop 法相差不大, 可以应用于边坡的稳定性分析。

另外, 从强度折减法计算后的剪应力增量图(图 1)可以看出, 排土场边坡潜在的破坏形式为“圆弧型”, 采掘边坡潜在的破坏形式为“切层—顺层型”, 部分剖面上存在潜在的多级破坏面, 这与前面的应力应变分析所得结果一致。

#### 4 可靠度概率法分析边坡稳定性

在岩土工程的可靠性分析中, 常用的方法有均值一次二阶矩法(MFORM)、改进的一次二阶矩法(验算点法 AFORM)、蒙特卡罗模拟法(MSCM)。本文采用简化一次二阶矩法(FOSM)进行边坡的可靠度分析<sup>[3-5]</sup>。

简化一次二阶矩法(FOSM)的基本思想是利用 Taylor 级数展开极限状态函数后忽略两次以上的项, 只考虑一阶原点矩(即均值)和二阶中心矩(即方差)这两个特征参数, 近似地计算状态函数的均值和方差, 求得可靠指标和破坏概率, 用以评价边坡的可靠性, 也称为可靠指标法。作为一种实用的近似概率设计法, 由于概念清楚, 计算简便, 目前在露天矿边坡工程设计中应用较多。

简化一次二阶矩法是专门针对最小可靠度指标破坏面的搜索并进行该破坏面的可靠度分析而提出, 也就是说实质上它是针对某一指定破坏面进行可靠度分析的一种方法, 因此可用来分析前面数值分析提供的潜在破坏面的可靠度。

##### 4.1 最小可靠度指标的定义

以往确定最小可靠度指标, 通常按下述步骤进行:

a. 系统生成一系列试算面, 使用一组确定性的土参数的“设计”值(一般略低于强度参数的均值), 分析每个试算面, 稳定系数(FS)最小者定义为最危险的破坏面;

b. 在这个最危险破坏面基础上, 使用随机的状态变量, 如土体强度均值和标准差, 进行边坡可靠性分析, 求得可靠度指标。

从其确定步骤可以看出, 这个可靠度指标实质上是确定性的最危险破坏面所对应的局部最小可靠度指标, 不一定为全局最小的可靠度指标。倘若将其定义为最小可靠度指标, 容易引起误解, 是不合适的。

在简化一次二阶矩法中, 最小可靠度指标的定义为: 以一系列试算面为确定性的破坏面, 进行边

坡稳定性概率分析, 获得的所有可靠度指标中的最小值。毫无疑问, 按上述定义的可靠度指标最小值才是真正全局最小的可靠度指标。这样, 其对应的概率破坏面也未必与确定性的最危险破坏面一致。

##### 4.2 可靠度指标的表达式

取状态函数  $MS=FS-1$ ( $MS$  为安全储备)和极限状态方程为  $FS-1=0$ , 按均值一次二阶矩方法, 若  $FS$  服从正态分布, 其可靠度表达式为:

$$\beta = \frac{E[FS]-1}{\sigma[FS]} = \frac{FS(\mu_{x_i})-1}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial FS}{\partial X_i} \right)^2 \sigma^2[X_i] + 2 \sum_{i,j=1}^n \left( \frac{\partial FS}{\partial X_i} \right) \left( \frac{\partial FS}{\partial X_j} \right) \rho \sigma[X_i] \sigma[X_j]}} \quad (2)$$

式中  $n$  为土参数( $c_1, \phi_1, c_2, \phi_2, \dots$ )的数量;  $E[FS]$  为  $FS$  的期望值;  $\sigma[FS]$  为  $FS$  的标准差;  $\mu_{x_i}$  为土参数  $X_i$  的均值;  $\sigma[X_i]$  为  $X_i$  的标准差;  $\rho$  为  $X_i$  和  $X_j$  之间的相关系数。

在实际应用中, 定量地计算稳定系数对每个土参数的偏导数。方法是: 采用大于和小于参数均值 1 个标准差  $\sigma[X_i]$  的土参数值, 求得相应的稳定系数  $FS^+$  和  $FS^-$  并代入式(3):

$$\frac{\partial FS}{\partial X_i} = \frac{FS^+ - FS^-}{2\sigma X_i}, \quad (3)$$

再将式(3)代入式(2), 整理即得简化一次二阶矩法的可靠度表达式:

$$\beta = \frac{FS(\mu_{x_i})-1}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{FS_i^+ - FS_i^-}{2} \right)^2 + 2\rho \sum_{i,j=1}^n \left( \frac{FS_i^+ - FS_i^-}{2} \right) \left( \frac{FS_j^+ - FS_j^-}{2} \right)}} \quad (4)$$

若  $FS$  服从对数正态分布, 则可靠度指标为:

$$\beta = \frac{E[\ln FS]}{\sigma_{\ln FS}}, \quad (5)$$

式中  $E = (\ln FS) = \ln(E[FS]) - \frac{\sigma_{\ln FS}^2}{2}$ ;

$$\sigma_{\ln FS} = \sqrt{\ln \left( 1 + \left( \frac{\sigma_{FS}}{E(FS)} \right)^2 \right)}.$$

##### 4.3 可靠度计算

首先, 采用理正软件, 以状态变量均值求解得稳定系数  $FS=1.422$ 。然后, 对计算涉及的地层, 依次采用大于和小于粘聚力、内摩擦角参数均值 1 个标准差  $\sigma[X_i]$  的参数值, 其它岩土体强度参数的选取参照文献<sup>[1]</sup>, 采用理正边坡稳定分析软件, 以简化 Bishop 法计算稳定系数, 求得相应的稳定系数  $FS^+$  和  $FS^-$  如表 1。稳定系数的均值为 1.403。

表1 稳定系数表  
Table 1 The table of stability factor

指标	指标值	指标	指标值	指标	指标值	指标	指标值
$FS_1^+$	1.495	$FS_4^+$	1.452	$FS_7^+$	1.505	$FS_{10}^+$	1.440
$FS_1^-$	1.291	$FS_4^-$	1.391	$FS_7^-$	1.279	$FS_{10}^-$	1.375
$FS_2^+$	1.420	$FS_5^+$	1.508	$FS_8^+$	1.442	$FS_{11}^+$	1.512
$FS_2^-$	1.359	$FS_5^-$	1.279	$FS_8^-$	1.381	$FS_{11}^-$	1.278
$FS_3^+$	1.487	$FS_6^+$	1.457	$FS_9^+$	1.500	$FS_{12}^+$	1.448
$FS_3^-$	1.284	$FS_6^-$	1.399	$FS_9^-$	1.295	$FS_{12}^-$	1.382

表中,  $FS_1^+$ 、 $FS_1^-$  分别表示:

$f(c^+, E[\emptyset_1], E[c_2], E[\emptyset_2], \dots, E[c_6], E[\emptyset_6])$ 、  
 $f(c^-, E[\emptyset_1], E[c_2], E[\emptyset_2], \dots, E[c_6], E[\emptyset_6])$ ;

$FS_2^+$ 、 $FS_2^-$  分别表示:

$f(E[c_1], \emptyset^+, E[c_2], E[\emptyset_2], \dots, E[c_6], E[\emptyset_6])$ 、  
 $f(E[c_1], \emptyset^-, E[c_2], E[\emptyset_2], \dots, E[c_6], E[\emptyset_6])$ ;

其它, 依此类推。

如此, 当相关系数为零时, 可求得可靠度指标  $\beta=1.53$ , 又因随机变量抗剪强度参数  $c$  和  $\emptyset$  服从正态分布, 故  $FS$  服从正态分布, 根据可靠度指标查标准正态分布表得边坡破坏概率为  $P_f=6.30\%$ 。

#### 4.4 结果分析

从以上可靠度计算结果来看, 边坡整体的均值稳定系数(或采用变量均值求得的稳定系数)较高, 相对于设计稳定系数( $FS=1.20$ )有一定富余, 说明边坡整体处于稳定状态, 与边坡力学行为分析结论基本一致。由简化一次二阶矩法求得的边坡均值稳定系数(1.403)与采用状态变量均值计算出来的稳定系数(1.422)比较接近, 证明本次采用强度折减法与简化一次二阶矩法耦合进行三维空间边坡总体可靠度计算是成功的, 结果是可信的。根据可靠度分析得出的边坡整体破坏概率较高( $6.30\%$ ), 处于可接受的破坏概率范畴( $3 \times 10^{-3} \sim 10 \times 10^{-3}$ )之外<sup>[6]</sup>, 说明该边坡工程处于不可接受的风险水平。

可靠度分析结果表明, 边坡整体破坏概率高于1%, 因而该边坡工程处于较高的风险水平, 需采取适当措施, 与前面分析结论基本吻合。

#### 5 结论

从本文分析可以看出, 采用 FLAC<sup>3D</sup> 数值模拟法、极限平衡法及可靠度法耦合进行三维空间边坡稳定性分析是可行的, 结果是可信的。分析结果表明, 该边坡工程处于较高的风险水平, 需采取适当措施。另外, 可以看出不同分析方法的计算结果存在差异。因简化一次二阶矩法是二维分析, 而边坡稳定性问题实质上是个三维问题, 考虑三维效应, 故简化 Bishop 法、简化一次二阶矩法得到的均值稳定系数要比由强度折减法进行 3D 数值分析获得的均值稳定系数小, 其差异与计算方法自身原理有关, 也与可靠度指标求取的输入值有关。这也从一个侧面反映了边坡工程问题解的不唯一性。

#### 参考文献

- [1] 李荣伟, 侯恩科, 刘天林. 基于三维数值模拟的露天煤矿复合边坡稳定性分析[J]. 煤田地质与勘探, 2008, 36(2): 43-46.
- [2] 赵尚毅, 郑颖人. 用有限元强度折减法求边坡稳定系数[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(3): 343-346.
- [3] 谭晓慧, 王建国, 刘新荣, 等. 边坡稳定的有限元可靠度分析[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2006, 29(1): 102-104.
- [4] 汪献忠, 徐鼎平. 边坡稳定性数值分析方法的应用与局限[J]. 矿业快报, 2006, 447(8): 21-24.
- [5] 龚宏伟, 易念平, 张信贵. 对边坡工程稳定系数的思考[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2006, 31(3): 265-270.
- [6] 章青, 卓家寿. 三峡船闸高边坡稳定分析的界面元法与评判标准[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(3): 285-288.