

文章编号:1674-2869(2010)12-0043-04

基于矢量和法的矿山边坡稳定性分析

罗 勇,周春梅,吴燕玲,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:基于矢量和法的矿山边坡稳定分析方法在边坡的荷载和滑面已知的情况下,运用有限元法计算滑裂面上的真实应力分布,得出滑裂面上各处静滑动摩擦力合力方向的反方向即安全系数的计算方向 θ ,并在此方向上由抗滑力与滑动力的矢量和得出矢量法安全系数 $F(\theta)$. 本文运用矢量分析法计算出大冶东露天采场 F9 断裂带内某边坡的安全系数,将计算结果与极限平衡法和有限元强度折减法计算结果进行了分析和比较,分析表明该法与已得到工程验证的有限元强度折减法模拟该边坡渐进破坏的定向分析结果相吻合,说明了矢量分析法的可行性和工程实用性.

关键词:矢量和法;安全系数;边坡稳定性;大冶铁矿

中图分类号:X45 **文献标识码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1674-2869.2010.12.011

0 引 言

边坡稳定性分析一直是岩土工程中的一个重要研究领域. 目前工程上通常使用的边坡稳定性分析方法中最常用的就是极限平衡法和有限元强度折减法. 由于力的矢量特征,抗滑稳定性分析应该在力的矢量特征上进行稳定性分析. 对此,葛修润等^[1]曾对力的矢量和意义下的安全系数进行了讨论,刘艳章^[2]提出了基于矢量法安全系数的边坡抗滑稳定的矢量分析法,并给出了安全系数计算方向的确定方法,定义了矢量法安全系数,推导出了矢量法安全系数的定义表达式. 目前,矢量和法多用于坝基的稳定性分析,在高陡岩质边坡稳定性分析的适用性和精度需要进一步研究. 本文计算了大冶铁矿边坡的抗滑稳定安全系数,并将该法计算的结果与重度增加法和有限元强度折减法的计算结果进行了对比分析,表明了该法的工程适用性.

1 矢量和法安全系数的确定

矢量和法安全系数 $F(\theta)$ 的定义是:在边坡潜在滑面上,总抗滑力矢在整体下滑方向上投影的代数和 $\sum R(\theta)$ 与总下滑力矢在此方向上投影代数和 $\sum T(\theta)$ 的比值^[3]:

$$F(\theta) = \frac{\sum R(\theta)}{\sum T(\theta)}$$

(1)

1.1 安全系数的计算方向

如图 1 所示,有限元法计算出滑裂面上任意一点 i 处在其局部坐标系 $X'O'Y'$ 下的应力为 σ_i 和 τ_i , i 处的一微弧段为 Δl_i ,点 i 处滑裂面的切线与总体坐标系 X 轴正向的夹角为 α_i .

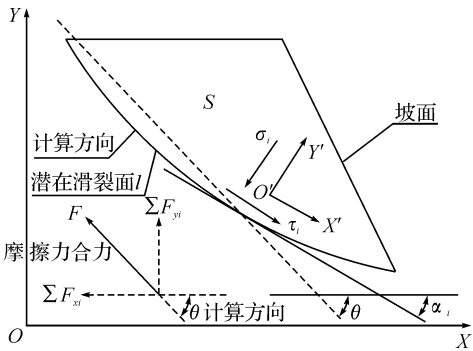


图 1 确定计算方向示意图

Fig. 1 Sketch for determination of calculating direction

根据摩擦理论,边坡的潜在滑裂面上的任意一点 i 的滑动方向应沿着该点的滑裂面的切向方向,由修正的粘着理论可知该点应力在滑裂面切向方向的分量 τ_i 与 Δl_i 的乘积为该点处静滑动摩擦力的大小,该点的滑动趋势方向与其静滑动摩擦力方向相反. 对于整个滑体而言,其静滑动摩擦

收稿日期:2010-11-11

基金项目:国家自然科学基金项目(No:50874080,41002112);湖北省自然科学基金重点项目(2009CDA002);湖北省教育厅科学技术研究计划优秀中青年人才项目(Q20101509).

作者简介:罗 勇(1987-),男,湖北松滋人,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.*通信联系人

力就是滑裂面各点处静滑动摩擦力的合力,合力方向的反方向为整个滑体的潜在滑动趋势方向.而矢量和法安全系数的计算方向就是滑体的整体滑动趋势方向,也就是滑裂面各点处静滑动摩擦力合力方向的反方向,将每点的静摩擦力的合力分别投影到 X 和 Y 轴后的比值即可得到计算方向与水平线的角度为:

$$\theta = \arctan \frac{\sum F_{yi}}{\sum F_{xi}} \quad (2)$$

其中: $F_{xi} = \tau_i \Delta l_i \cos \alpha_i$, $F_{yi} = \tau_i \Delta l_i \sin \alpha_i$ 分别为 $\tau_i \Delta l_i$ 在 X 和 Y 轴方向上的投影.

1.2 边坡矢量和法安全系数表达式

矢量和法安全系数基于以下几点假设^[4]:

- a. 以二维问题为研究对象,边坡所构成的区域为 Ω ,在 Ω 内的潜在滑动面 s 为已知.
- b. 边坡计算区域的应力分布状态使用有限元等数值方法计算得到,其中边界、荷载及材料强度参数由前期勘察报告得到.
- c. 滑动面上的岩土体的强度特征服从 Mohr-Coulomb 强度准则.在应力分布已知时,岩土体的抗剪强度由下式确定:

$$\tau_f = c + \sigma_n \tan \varphi \quad (3)$$

- d. 边坡整体下滑趋势方向按照式(2)进行确定.

图 2 所示为抗滑稳定性分析时计算安全系数的示意图.以滑裂面为研究对象,滑面上一点处的岩土体黏聚力为 c_i ,内摩擦角为 φ_i ,滑体作用于基岩上的荷载为正应力 σ_i 和剪应力 τ_i ,基岩作用在滑体上的反力为 σ'_i 和 τ'_i ,他们是一对大小相等,方向相反的作用力与反作用力.矢量和法安全系数表达式的计算如下:

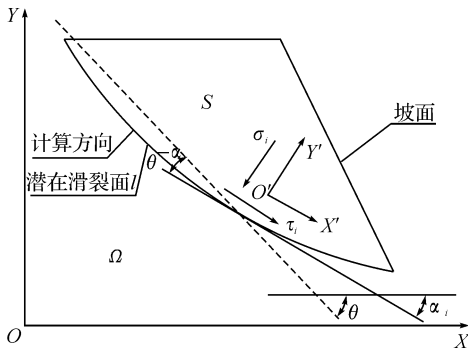


图 2 安全系数求解示意图

Fig. 2 Sketch for calculating safety factor

滑裂面上的滑动力由自重及外载引起,在微段 Δl_i 内,将引起滑动力的 σ_i 和 τ_i 分别沿安全系数计算方向的反方向进行投影有: $\tau_i \Delta l_i$ 的投影 $T_x^i = \tau'_i \Delta l_i \cos(\theta - \alpha_i) = \tau_i \Delta l_i \cos(\theta - \alpha_i)$, $\sigma_i \Delta l_i$ 的

投影 $T_\sigma^i = \sigma'_i \Delta l_i \sin(\theta - \alpha_i) = \sigma_i \Delta l_i \sin(\theta - \alpha_i)$ 则有

$$\sum T(\theta) = \sum T_x^i + \sum T_\sigma^i \quad (4)$$

滑裂面上的抗滑力由岩土体的黏聚力、摩擦力和基岩对滑裂面法向反力提供,在微段 Δl_i 内,将引起抗滑力的黏聚力与摩擦力之和抗剪强度 τ_{fi} 与法向应力 σ'_i 分别沿安全系数的计算方向投影有: $\tau_{fi} \Delta l_i$ 的投影 $R_\tau^i = \tau_{fi} \Delta l_i \cos(\theta - \alpha_i)$

$\sigma'_i \Delta l_i$ 的投影 $R_\sigma^i = \sigma_i \Delta l_i \sin(\theta - \alpha_i)$

则有
$$\sum R(\theta) = \sum R_\tau^i + \sum R_\sigma^i \quad (5)$$

即矢量法安全系数的表达式为

$$F(\theta) = \frac{\sum R(\theta)}{\sum T(\theta)} = \frac{\sum R_\tau^i + \sum R_\sigma^i}{\sum T_x^i + \sum T_\sigma^i} \quad (6)$$

1.3 矢量和法安全系数的求解步骤

- a. 根据地质勘查资料建立有限元数值计算模型,在模型中反应地质勘查的滑面.
- b. 对模型进行常规的弹(塑)性分析计算,得到各点的应力状态.
- c. 根据有限元弹(塑)性计算结果,计算滑面上各处剪力的矢量和,该剪力矢量和的方向即为安全系数的计算方向.通常按有限元网格划分的节点,将滑面分为若干个小段进行计算.
- d. 在安全系数的计算方向上按式(4)和(5)计算滑面上各处滑动力与抗滑力沿此方向投影的代数和.按照式(6)计算得到边坡的整体安全系数.

1.4 分析方法比较与适用性原则

矢量和法抓住了滑动是矢量问题这一本质,考虑了滑动的方向性,给出了边坡整体下滑趋势方向的确定方法.整个计算过程不需要人为增大荷载或折减材料的强度参数,也不需要对比边坡各部分的内力进行人为假定,直接根据滑裂面的真实应力分布情况和滑裂面岩土体所能提供的抗滑能力计算边坡在其整体滑动趋势方向上的抗滑稳定性系数.计算只需通过一个显式方程求解,不需要迭代计算,故计算过程简单,便于工程应用.为了计算结果的准确性,需要在极限平衡滑面附近进行网格的加密,否则计算结果可能与实际情况会有较大相差.

2 工程应用

2.1 工程地质概况

本文主要以大冶铁矿东露天采场的地质划分 IV 区(图 3)为例,运用边坡抗滑矢量和法求解其矢量和法安全系数. IV 区的岩性主要是花岗闪长岩,分布于狮子山北帮 F₉ 断裂带的西侧.岩石风化程度中等,强度较高,抗变形能力较强. IV 区为一较

大型崩滑体。整个区域内边坡底部宽为 50 m,边坡高大约为 210 m,Ⅳ区边坡的整体坡度约为 39°。

2.2 剖面的选取以及几何模型

本文选取的断面为Ⅳ区Ⅲ-Ⅲ'剖面,Ⅲ-Ⅲ'剖面处于大冶铁矿东露天采场狮子山北帮 F₉ 断层上盘,与 F₉ 断层及两组大型节理 J₃、J₄ 相交,Ⅲ-Ⅲ'剖面(图 3)的垂直坡高 431.12 m,坡长 566.5 m。为了避免计算时边界条件对坡体应力应变求解的影响,将计算范围取为高 700 m,宽 1 500 m。边界条件选取位移边界条件,左右方向位移 x 方向固定, y 方向自由,上下方向地表自由,底边 x 、 y 方向固定。Ⅲ-Ⅲ'剖面的工程地质图如图(图 4)。

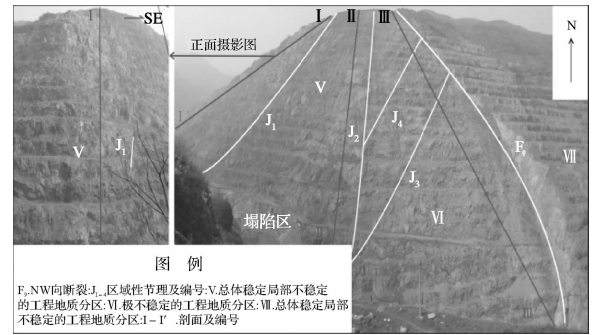


图 3 大冶采矿场Ⅳ区Ⅲ-Ⅲ'剖面

Fig. 3 The location of section Ⅲ-Ⅲ' in the pit of Daye Iron Mine

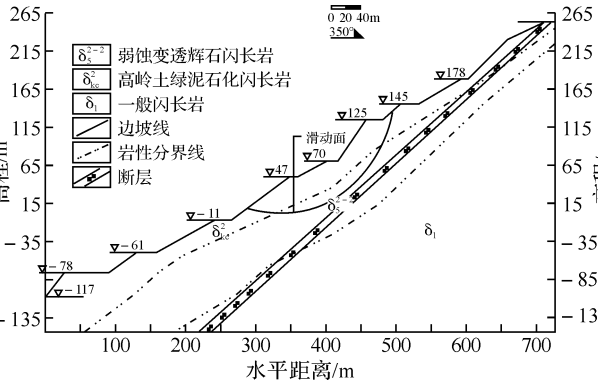


图 4 Ⅲ-Ⅲ'剖面工程地质图

Fig. 4 Engineering geology view of section Ⅲ-Ⅲ'

2.3 力学参数的取值

参考中国科学院岩土力学研究所 1995 年编写的《大冶铁矿狮子山北邦 A 区尖 F₉ 断层上盘—60~—96 m 边坡稳定性和滑坡防治研究》报告中提供的岩体参数,如表 1。

2.4 计算过程 and 数据分析

2.4.1 网格划分 本文借助于有限元通用软件 ANSYS 进行模拟岩土体的应力—应变关系。此边坡按照平面应变问题处理,岩土体采用 Plane42 单元进行模拟,对Ⅲ-Ⅲ'剖面有限元网格划分,共

1 630 个单元,806 个节点(见图 5)。

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	δ_1	δ_2^{2-2}	δ_{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	0.22
弹性模量/GPa	9.2	3.7	3.7	1.5

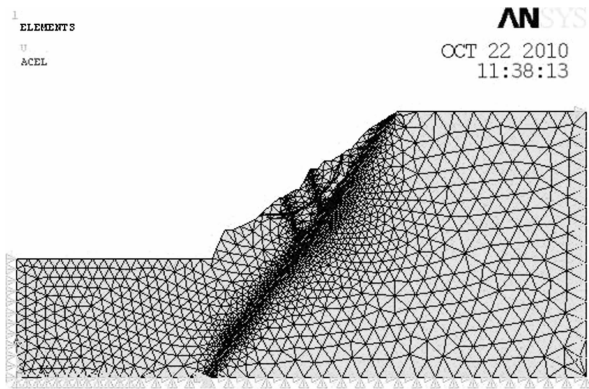


图 5 网格划分模型图

Fig. 5 Meshing model of section Ⅲ-Ⅲ'

2.4.2 分析与计算结果 本文是在剖面处于天然饱和水的状态,根据周健^[5]使用 GEO-SLOPE 软件已经计算得到的瑞典条分法搜索出的最危险滑面作为临界滑动面,该滑面为圆弧滑面,具体的形状见图 4 滑动面上部为滑体部分,通过有限元法得出边坡的实际应力分布,具体见图 6。

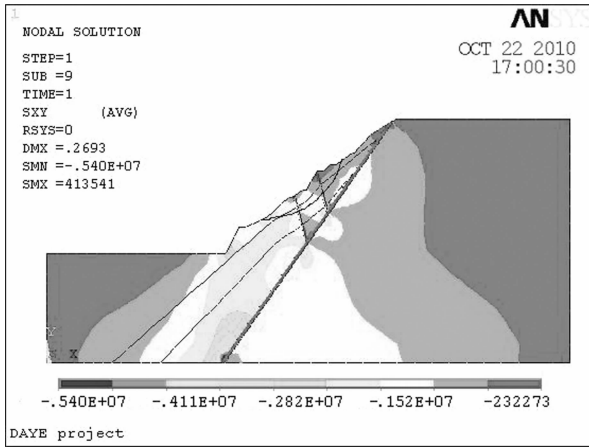


图 6 xy 方向剪应力云图

Fig. 6 Nephogram of shear stress in xy

本文基于大型有限元商用程序 ANSYS 的用户可编程特性 APDL 语言进行自定义算法的二次开发,根据前述矢量法安全系数的定义式和求解

步骤,为该算例编写了相应的计算程序,得到该边坡给定滑面上各处剪力的矢量和的方向即安全系数的计算方向 θ 为 28.69° ,安全系数 $F(\theta)$ 的值为 1.25,计算 θ 的过程中需要以 $\tan\alpha$ 的值为基础进行求解.

2.4.3 结果的对比分析 将本文的计算结果同以前用其他方法^[6]计算所得结果对比,见表 2.

表 2 极限平衡法、有限元强度折减法、矢量和法计算结果比较

Table 2 The comparison of the result calculated from limit equilibrium method, Strength reduction FEM and vector analysis method

计算方法	极限平衡法	有限元强度折减法	本文矢量和法(VSAM 法)
最小稳定性系数	1.34	1.23	1.25

由表 2 可知,矢量和法与极限平衡法和有限元强度折减法之间的相对误差为 7.2%和 1.6%,这个相对误差在允许的范围内,这说明基于矢量和法的安全系数是符合实际情况的.极限平衡法中采用的是重度增加法来计算的.该法计算得到的系数较高的原因在于重度增大的过程中,正应力的增大比例超过了剪应力的增大比例,增大容重时其抗剪强度得到了提高.而有限元强度折减法同矢量和法计算所得相对误差较小的原因在于选取具体的滑面,本文选取的计算滑动面为最危险圆弧滑动面.按照强度安全系数的定义是滑裂面上各处的抗滑力对滑弧圆心的力矩与各处滑动力对滑弧圆心的力矩之比,故求得的安全系数同本文的矢量法安全系数一样带有明确的物理意义.

由于本文的分析方法是建立在运用有限元进行应力分析的基础上,所以其精度依赖于有限元这种数值方法的计算精度.具体的计算精度与模型的建立和滑面的选取有很大关系,滑面越陡,矢量法安全系数越小,计算方向与水平线夹角越大,圆弧滑面与非圆弧滑面的适用性也不同,误差相对也较大.在运用有限元进行弹塑性分析时可能会出现计算不收敛的情况,其原因可能为模型的物理原因或人为因素.同时采用弹性与弹塑性分析的应力分布计算得到的结果也有一定相差.

3 结 语

a. 基于矢量和法的边坡稳定性分析方法是一种新的边坡稳定性分析方法,不同于目前广泛使用的极限平衡条分法及有限元强度折减法^[7],它是建立在边坡真实应力状态和整体下滑趋势方向上的分析方法.对于任意形状的边坡滑面,其物理意义明确、公式简洁、不需要迭代计算,只需进行一次非线性数值计算就可以得到任意滑面的安全系数.

b. 本文采用矢量和法对该边坡的稳定性进行分析,将得到的稳定性系数与有限元强度折减法计算得到的稳定性系数对比分析发现二者安全系数接近,与边坡实际稳定性现况符合,说明了基于矢量和法安全系数的稳定性分析方法在边坡稳定性分析中的合理性和可靠性.

参考文献:

[1] GE X R, FENG D X, GU X R, et al. Stability and deformation analysis of complex rock foundations of several large dams and hydropower stations in China [C]//Proceedings of International Workshop on Rock Foundation. Rotterdam: A. A. Balkema, 1995: 243 - 248.

[2] 刘艳章. 边坡与坝基抗滑稳定的矢量和分析法研究 [D]. 中国科学院研究生院, 2007.

[3] 吴振君, 葛修润. 求解边坡矢量和安全系数的条分法 [J]. 岩土力学, 2009, 30(8): 2337 - 2342.

[4] 刘艳章, 葛修润. 基于矢量法安全系数的边坡与坝基稳定分析 [J]. 岩土力学, 2007, 26(10): 2130 - 2140.

[5] 周健. 大冶铁矿东露天采场岩体结构特征与典型地段边坡稳定性分析 [D]. 武汉工程大学, 2009.

[6] 曾凯波, 周春梅. 基于重度增加法的大冶铁矿边坡稳定性分析 [J]. 武汉工程大学学报, 2009, 31(12): 32 - 35.

[7] 郭明伟, 李春光. 基于矢量和分析方法的边坡滑面搜索 [J]. 岩土力学, 2009, 30(6): 1775 - 1782.

[8] 栗塔山, 彭维杰, 周作益, 等. 最优化计算原理与算法与程序设计 [M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2002.

(下转第 51 页)