

基于不稳定块体失效概率的开挖面稳定性分析

王存根¹, 王述红¹, 穆徽江², 簪世明¹

(1. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 中国南方航空股份有限公司 北方分公司, 辽宁 沈阳 110004)

摘 要: 基于团队开发的网络模型, 利用一般块体理论进行块体分析, 可以得到开挖面上不稳定块体的安全系数、体积及其棱长. 利用棱长和迹长推出块体生成概率, 并与安全系数一起求出块体失效概率. 然后将失效概率大于失效标准的块体定为失效块体, 并提出将开挖面上失效块体体积占所有不稳定块体体积的比例作为评价开挖面稳定性的指标, 从而提出基于不稳定块体失效概率的开挖面稳定性分析方法. 基于一个实际边坡工程, 利用上述方法对其进行开挖面稳定性分析.

关 键 词: 不稳定块体; 失效概率; 开挖面; 稳定性; 结构面

中图分类号: TU 45 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2016)04-0568-05

Stability Analysis of Excavation Surface Based on Failure Probability of Unstable Block

WANG Cun-gen¹, WANG Shu-hong¹, MU Xi-jiang², ZAN Shi-ming¹

(1. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. North Branch, China Southern Airlines Co., Ltd., Shenyang 110004, China. Corresponding author: WANG Shu-hong, E-mail: wangshuhong@mail.neu.edu.cn)

Abstract: Based on the spatial network model developed by our team, the general theory of block was used for block analysis, the safety factor, the volume and the edge length of unstable blocks in the excavation surface were obtained. The block generation probability can be first determined by the edge length and the trace length, then the block failure probability was calculated by the block generation probability and the safety factor. The failure block was identified when the failure probability of block is greater than the standard value. The ratio of the failure volume of rock blocks to the unstable volume of rock blocks was used as an evaluation index on the excavation surface stability, and a stability analysis method of the excavation surface was proposed on the basis of the unstable blocks failure probability. An example was given to evaluate the stability of the excavation surface based on this method.

Key words: unstable block; failure probability; excavation surface; stability; structural plane

在坚硬和半坚硬地层中, 岩体被结构面切割成各种类型的空间镶嵌块体, 而人工开挖可能引起开挖面上某些块体失稳, 并导致整个岩体工程的失稳. 对于这种渐进性失稳模式, 利用极限平衡法将位于潜在滑裂面上的岩体作为一个整体处理以及对整个岩体进行强度折减的方法都会使计算结果偏于激进. 而块体理论^[1-2]就是研究上述块

体化岩体模型破坏机制的最有效方法之一, 其核心内容是通过分析开挖面周围块体稳定性来搜索关键块体, 进而分析岩体工程开挖面的稳定性. 因此, 基于块体理论研究块体化岩体开挖面稳定性具有重要意义.

目前, 块体理论研究成果很多, 主要介绍块体稳定性及其在岩体稳定性方面的应用. 关于块体

收稿日期: 2015-02-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51474050, 51179031, 51074042); 国家自然科学基金外国青年学者研究基金资助项目(51250110531, 51350110534); 国家重点基础研究发展规划项目(2013CB227902); 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室项目(SKLG2012K009, SKLG2014K011); 辽宁省高等学校优秀人才支持计划项目(LN2014006); 国家高端外国专家项目(GDT20142100008, GDW20142100050).

作者简介: 王存根(1990-), 男, 河北衡水人, 东北大学博士研究生; 王述红(1969-), 男, 江苏泰州人, 东北大学教授.

稳定性,文献[3-4]分别提出了不同的块体确定方法和平移运动块体的稳定性分析方法,其中文献[4]利用矢量法进行计算,有利于计算机编程,应用更为广泛;虽然块体可能平动或转动,而文献[5-6]从理论上解决块体转动时的稳定性分析,但是实际应用中还是只考虑包括掉落、单面滑动和双面滑动等的平动;文献[4,7]提供了每种情况下块体安全系数的算法,基于此就可以评价开挖面上每个块体的稳定性.另一方面,关于块体化岩体稳定性的研究,主要集中在关键块体识别及其支护设计^[8-9],而只有少数学者利用块体信息建立开挖面稳定性评价指标.文献[10]提出块体的总失效概率为系统内所有块体几何不稳定的概率及其力学不稳定概率的乘积.综上所述,块体理论及其在工程中的应用已经非常成熟,但是针对基于空间网络模型的块体化岩体开挖面稳定性评价,应该将目光集中在开挖面附近的块体;若有随机因素生成危险块体,应当考虑安全系数和生成概率的失效概率来评价;另外,块体体积的大小也应当被考虑,因为体积足够小的块体失效概率再大也构不成大的威胁.

本文基于前人研究成果和本团队开发的GeoSMA-3D软件,结合一个具体实际边坡工程,求得开挖面上不稳定块体的安全系数,利用棱长和迹长推出块体生成概率,进而得到失效概率,然后将大于失效标准概率的块体定义为失效块体,并提出将开挖面上失效块体体积占所有不稳定块体体积的比例作为评价开挖面稳定性的指标,从而建立基于不稳定块体失效概率的开挖面稳定性分析方法.

1 基本概念及方法

为了表述不稳定块体不利性指标和评价岩体开挖面稳定性的方法,首先将本文所用到的块体理论和GeoSMA-3D程序知识进行简单整理.

1.1 不稳定块体及其失效概率

根据文献[10],可以将块体失效概率 P_b 总结为块体生成概率 P_g 和力学失效概率 P_f 的乘积,即

$$P_b = P_g \times P_f. \quad (1)$$

在一般块体理论中,要搜索出不稳定块体要经过块体识别、有限性判定、可动性判定和稳定性判定几个步骤才能计算块体安全系数.其中,不稳定块体就是能够发生滑落、单面滑动或双面滑动等平动的块体,而其安全系数 f 就是抗滑力 F_r 和

下滑力 F_s 的比值,即

$$f = \frac{F_r}{F_s}. \quad (2)$$

当然每种运动形式的 F_r 和 F_s 计算不尽相同,详述请参考文献[4,7].而传统关键块体就是指 f 小于标准值 f_0 的不稳定块体,根据设计要求选取.如果将安全系数 f 求倒数就是 P_f , P_g 将在第2部分进行推导.那么基于失效概率就可以定义 P_b 大于标准值 P_{0b} 的不稳定块体为失效块体.

1.2 GeoSMA-3D 程序实现

GeoSMA-3D (geotechnical structure and model analysis) 是“岩土工程结构与模型分析系统”的简称.可以利用ShapeMetriX3D进行现场非接触测量并处理图形数据,然后向GeoSMA-3D输入模型几何、物理参数和工程结构面信息,从而在短时间内生成空间网络模型并进行块体分析.本文基于该系统能够建立模型并完成块体识别等一系列计算,最终输出各个不稳定块体的编号、体积和安全系数,以及其组成面的信息等.

1.3 开挖面稳定性系数

不稳定块体所组成的岩体可以用来表征开挖面整体,而失效块体可以表征开挖面上危险部分.对于块体,生成概率越大、安全系数越小其越危险;对于开挖面,危险的块体所占的体积越大就越容易失稳.基于此,本文建议用开挖面上失效块体的体积 V_k 之和与不稳定块体的体积 V_i 之和的比值,即稳定性系数 η 来表征岩体开挖面的稳定性:

$$\eta = \frac{\sum V_k}{\sum V_i}. \quad (3)$$

2 块体的生成概率

在岩体工程现场采集结构面信息时,结构面通常分两类进行处理,即确定性结构面和随机性结构面.确定性结构面规模较大且数量有限,在生成三维网络模型时按实际信息进行输入,而随机结构面繁多且往往具有一定统计规律,则按照分布函数进行建模.那么,由这两类结构面生成的不稳定块体就有三类:定位块体、半定位块体和随机块体.除了开挖面,定位块体的面全部为确定性结构面,随机块体的面全部为随机性结构面,而半定位块体的面则两者兼有.所以,定位块体的生成概率为1,那么只有确定性结构面的模型中,关键块体就相当于失效块体.下面推导不定位块体和半

定位块体的生成概率。

2.1 随机性结构面的生成概率

本文的空间网络模型采用的是圆盘结构面模型,其决定参数为中心坐标、直径和产状,两个结构面之间的关系可由间距确定,所有参数都服从一定的概率分布。因为提出的稳定性系数 η 主要强调块体体积,为了简化模型,本文只考虑其结构面直径这一个主要因素进行分析。

根据概率统计的方法就可以推导出结构面迹线与结构面圆盘直径之间的对应关系:

$$D = 4L/\pi. \quad (4)$$

式中: D 为结构面圆盘直径均值; L 为结构面迹线长均值。

因为迹线长服从负指数分布,那么结构面的直径同样服从负指数分布。则其概率密度函数和分布函数分别为

$$f(x) = \lambda \exp(-\lambda x), \lambda = 1/D; \quad (5)$$

$$F(x) = \int_0^x \lambda \exp(-\lambda x) dx = 1 - \exp(-\lambda x). \quad (6)$$

结构面直径不小于 x 的概率为

$$P(x) = 1 - F(x) = \exp(-\frac{\pi}{4L}x). \quad (7)$$

2.2 不定位块体和半定位块体的生成概率

块体面的数量至少为 4,所以先推导四面体生成概率再进行推广。对于一个不定位四面体来说,由 4 组结构面从岩石主体分离而成,面的编号分别为 1[#], 2[#], 3[#], 4[#], 每个面与另外 3 个面交切分别形成 3 条棱,即每一个面上都有 3 条棱。若 1[#] 面内最长棱的棱长为 x_1 , 2[#] 面内最长棱的棱长为 x_2 , 3[#] 面内最长棱的棱长为 x_3 , 4[#] 面内最长棱的棱长为 x_4 , 则这 4 个结构面能构成该块体的前提条件是简化圆盘直径至少要同时大于各自面内的最大棱长。

若四组结构面实测迹长均值分别为 l_1, l_2, l_3 和 l_4 , 则由式(7)可知, $n^{\#}$ ($n = 1, 2, 3, 4$) 面直径大于 x_n 的概率为

$$P_n(x) = \exp(-\frac{\pi}{4l_n}x_n). \quad (8)$$

4 个面同时大于各自面内最大棱长的概率为

$$P(x) = \prod_{i=1}^4 \exp(-\frac{\pi}{4l_i}x_i) = \exp[-\frac{\pi}{4}(\sum_{i=1}^4 \frac{x_i}{l_i})]. \quad (9)$$

式(9)为估算非定位四面体生成概率的公式,推广到更为普遍的情况,当不定位块体由 n 组结构面形成时,形成块体的概率为

$$P(x) = \exp(-\frac{\pi}{4} \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{l_i}). \quad (10)$$

由式(10)可见,块体大小一定时,结构面直径越大,或出露迹线越长,则形成该块体的概率越大;各组结构面一定时,块体越大,即棱长越长,则形成块体的可能性越小,同时可以看到,块体的大小服从负指数分布。

半定位块体与不定位块体的区别在于有一条或多条确定性结构面(或自由面)参与形成块体,因此在计算概率时需将其剔除,只将概率分布结构面的相关信息带入到公式(10)中。若一半定位块体有 n 个面组成,其中确定性结构面有 m 个,自由面有 k 个,则其中概率分布结构面有 $n - m - k$ 个,半定位块体产生概率为

$$P(x) = \exp(-\sum_{i=1}^{n-m-k} \frac{\pi}{4l_i}x_i). \quad (11)$$

3 实例分析

可以用基于不稳定块体失效概率的开挖面稳定性系数评价任何形式的块体化岩体开挖面,如巷道、边坡等。本文选取某块体化岩体边坡作为研究对象。

3.1 工程概况及其空间网络模型

小盘岭边坡在辽宁省建兴高速公路 K48 + 690 ~ K48 + 850 段,全长 160 m。边坡开挖顶面到开挖路面的高度约为 30.1 m。岩体强风化、较破碎、节理裂隙发育、岩体条件较差,成为该工程的攻克难题。现场图片如图 1 所示,边坡原始坡度约为 30°,为了高速公路开挖至接近 80°,现在考虑公路安全进行削坡。本文先拟建 60°边坡岩体空间物理模型,进行块体分析,然后进行不同角度开挖,进行比较分析。



图 1 小盘岭路堑边坡

Fig. 1 Cutting side slope of Xiaopanling road

首先以 30 m × 50 m × 100 m 的尺寸建立岩体简化模型并削坡至 60°(见图 2 a),然后输入了

39 条确定性结构面和 3 组随机性结构面(见图 2b,数据见附表 1),最终形成的空间模型和块体分析结果分别如图 2c 和图 2d 所示,深色块体为关键块体,即安全系数小于 0.8 的块体.图 3 为不同开挖角度下关键块体显示图.

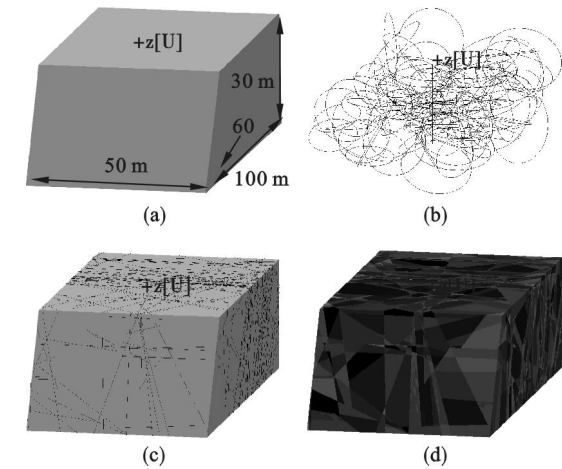


图 2 樊屯边坡空间网络模型
Fig. 2 Spatial net model of Fantun slope
(a)—岩体简化模型;(b)—圆盘结构面;
(c)—结构面迹线;(d)—块体显示.

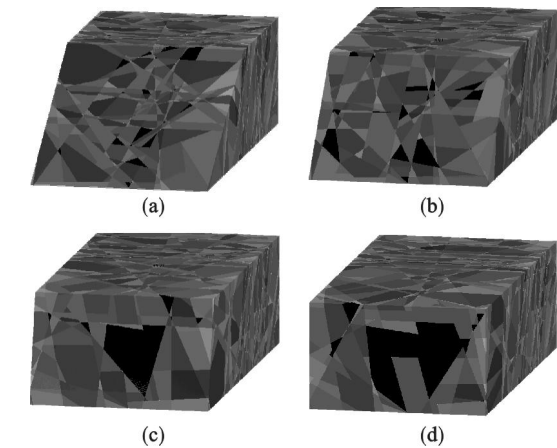


图 3 关键块体显示
Fig. 3 Display of key blocks
(a)—30°;(b)—45°;(c)—75°;(d)—90°.

3.2 工程不稳定块体分析

通过块体分析可以得到包括块体体积、面的数量、滑动面数量、安全系数、形成此块体的结构面编号、块体各棱棱长,以及形成该棱的两个结构面的编号等信息.经计算,当开挖倾角为 60°时,共生成不稳定块体 40 个,不定位块体、半定位块体和定位块体分别为 2,31 和 7 个,其信息在此不一一列出.然后利用式(10),式(11)和式(1)计算其生成概率及失效概率,失效概率大于 0.8 为标准确定失效块体.通过式(3)确定该边坡开挖面的稳定性系数,不同开挖角下的块体分析结果如表 1 所示.

表 1 不同开挖角度下块体信息						
Table 1 Block data with various excavation angles						
开挖 角度 (°)	不稳 定块 体数	不稳 定块 体体 积/m³	失 效 块 体 个 数	失 效 块 体 体 积 m³	关 键 块 体 个 数	关 键 块 体 体 积 m³
30	35	84.06	14	3.828	19	16.236
45	39	189.18	7	20.228	17	99.386
60	40	273.29	9	31.28	18	189.810
75	37	484.71	10	56.470	17	205.850
90	24	1 777.05	9	362.75	12	761.420

由表 1 可以得到 3 种计算开挖面稳定性系数 I 的方式:失效块体与不稳定块体的体积比值 I_1 及其个数比值 I_2 ,还有关键块体体积与不稳定块体体积比值 I_3 .将 I 标准化处理,即不同开挖角度的 I_1 和 I_3 都是以开挖角 θ 为 60°时的 I_1 为标准,而 I_2 以开挖角 θ 为 60°时的 I_2 为标准,所得的标准化数值与开挖角 θ 的变化曲线见图 4.

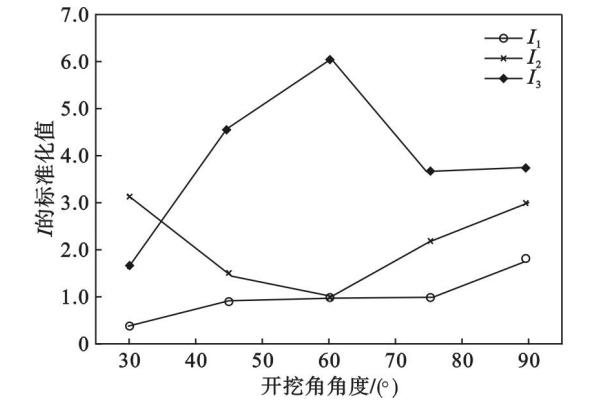


图 4 不同稳定性系数的变化曲线
Fig. 4 Curves of different instability factors

由图 4 可知,考虑了体积和生成概率 2 个因素的 I_1 随着开挖角增大逐渐增大;而未考虑体积而只考虑个数影响的 I_2 与实际情况相差较远,这是由于岩体块体化程度较低时 I_2 随机性很大,只有当块体个数很多且体积相差不远的情况下 I_2 才能表征开挖面危险程度;未考虑生成概率的 I_3 表征的是关键块体所占体积比例,随着开挖角增大,块体体积变大且大多很复杂,虽然关键块体体积大于失效块体体积,但是相对于 60°标准化之后的值却减小了.这是由于块体越大、面越多其生成概率越小,许多大的关键块体并不是失效块体,而许多小的非关键块体却是失效块体.综上所述,在块体化程度较小或不均匀的情况下, I_2 随机性太大;在实际工程中,应当利用关键块体信息进行个别支护之后,再利用 I_1 进行稳定性评价.

(下转第 593 页)