

基于GeoSMA-3D的岩质边坡异形滑动面搜索方法

王述红, 李忠, 侯钦宽, 李友明

(东北大学资源与土木工程学院, 辽宁沈阳 110819)

摘要: 针对岩体结构面发育特征的不确定性, 提出一种岩质边坡异形滑动面搜索方法. 以III, IV结构面岩体为研究对象, 结合GeoSMA-3D (geotechnical structure and model analysis-3D) 程序中块体切割和关键块体判别模块, 将滑坡体设定为几何多面体. 岩体的内部块体组合形成多面体, 以多面体的表面表征滑动面. 引入层次分析法, 建立滑动面准量化评价准则. 以小盘岭边坡为例, 将异形滑动面判定准则导入GeoSMA-3D程序中, 研究表明边坡存在6个关键块体, 组合滑动面有3个, 潜在滑动面安全系数为1.046, 滑动面几何形态与实际边坡拟合度高达95%, 验证了岩质边坡滑动面搜索方法的合理性.

关键词: 岩质边坡; 滑动面; GeoSMA-3D; 关键块体; 层次分析法

中图分类号: TU 457 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2024)08-1159-08

Search Method for Irregular Sliding Surface of Rock Slope Based on GeoSMA-3D

WANG Shu-hong, LI Zhong, HOU Qin-kuan, LI You-ming

(School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: LI Zhong, E-mail: 1850184129@qq.com)

Abstract: Given the uncertainty in the development characteristics of rock discontinuities, a method for searching for irregular sliding surfaces in rock slopes was proposed. Using the rock masses of rock discontinuities III and IV as research objects, and utilizing the block cutting and key block identification modules in the GeoSMA-3D (geotechnical structure and model analysis-3D) system, the sliding mass is set as a geometric polyhedron. The internal block combinations of the rock mass form the polyhedron, with the surface of the polyhedron representing the sliding surface. The analytic hierarchy process is introduced to establish semi-quantitative evaluation criteria for the sliding surface. Using the Xiaopanling slope as a case study, the criteria for determining the irregular sliding surface were integrated into the GeoSMA-3D system. The study identifies six key blocks and three combined sliding surfaces. The potential sliding surface has a safety factor of 1.046, and the geometric shape of the sliding surface aligns with the actual slope with a fitness of up to 95%. This validates the rationality of the proposed method for searching sliding surfaces in rock slopes.

Key words: rock slope; sliding surface; GeoSMA-3D; key block; analytic hierarchy process (AHP)

岩体被结构面切割成岩块, 块体理论^[1-2]指出岩体工程的稳定性由某些关键岩块控制. 由此, 岩体稳定性分析转变为对岩体工程中的关键块体进行研究. 块体理论的出现, 给学者们提供了一个研究岩体稳定性的新模型. Goodman^[3]对块

体理论进行总结和补充, 该研究为块体理论的发展奠定了坚实基础. 此后, 以块体理论为核心的岩体稳定性研究得到快速发展. 王述红等^[4-5]在结构面数字摄像测量技术的基础上, 基于块体理论, 自主研发了岩土工程结构与模型分析

收稿日期: 2023-04-04

基金项目: 中国-中东欧国家高校联合教育项目(2021111); 国家自然科学基金资助项目(U1602232); 辽宁省重点科技计划项目(2019JH2-10100035); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N2301005, N2301006).

作者简介: 王述红(1969-), 男, 江苏泰州人, 东北大学教授, 博士生导师.

(GeoSMA-3D)程序,该程序可快速识别岩体工程中的关键块体,对岩体的稳定性进行评价. Cheng等^[6]提出一种分析任意形状块体可移动性和稳定性的通用算法. Zhang等^[7]结合块体理论分析了TBM(tunnelling boring machine)掘进过程中掌子面的稳定性. Zheng等^[8]考虑到岩体内部结构面分布的随机性,提出了基于块体理论的随机块体稳定性分析方法. Jia等^[9]结合传统关键块体理论和力传递算法提出一种改进块体稳定性分析方法,计算出了随机块体的安全系数. 文献[10-13]对块体理论的发展作出了巨大贡献,但利用块体理论确定岩质边坡滑动面的研究却鲜有发现.

工程岩体的开采和治理过程中,边坡稳定性分析不可或缺. 岩质边坡滑动面的确定对边坡稳定性分析及滑坡体体积估算具有重要意义,因此,边坡滑动面搜索是稳定性分析的一项基础工作. 土质边坡滑动面的研究开展较早,目前可以实现任意形状滑动面的搜索. 松散的岩质边坡滑动面的确定方法可以参考土质边坡,但对于较为坚硬的岩质边坡,滑动面形状由岩体内部结构面控制. 对于此类岩质边坡的滑动面,张文等^[14]考虑裂隙频率和危险滑动面产状之间的关系,提出一种岩质边坡滑动面的确定方法. 李宁等^[15]应用摩擦-接触型界面单元模型对岩质边坡潜在滑动面进行搜索,并对其他岩体界面单元模型,如无滑动面模型、Sharma等^[16]提出的薄层实体单元模型、Goodman等^[17]提出的Goodman节理单元模型进行了研究. 针对边坡稳定性研究,目前主要采用极限平衡法分析,其中Morgenstern-Price法^[18]和严格Janbu法^[19]是严格条分法中应用比较广泛的. 对于由不连续结构面切割的岩体边坡,基于斜条块的Sarma法^[20]被认为是最合适的方法. 朱大勇等^[21]对Morgenstern-Price法、严格Janbu法和Sarma法进行改进,使得其在岩体工程稳定性分析中应用更加有效.

本文基于GeoSMA-3D程序中对关键块体的研究,提出一种新的岩质边坡异形滑动面搜索方法. 从边坡表面结构面迹线的相互关系出发,由边坡表面向内部搜索滑动面. 考虑滑动面上不同位置块体的作用,引入层次分析法,建立滑动面准量化评价准则,最后确定边坡潜在异形滑动面. 该方法可快速识别边坡异形滑动面,为边坡治理提供依据.

1 异形滑动面搜索

1.1 结构面筛选

自然岩体中结构面数量巨大,在岩体中的分布错综复杂,如图1所示. 结构面作为岩体内部的薄弱结构,破坏时的抗剪强度远低于岩体自身的抗压强度. 岩质边坡沿着结构面发生剪切破坏时,破坏面为岩体内部结构面的组合. 但是,并非所有结构面都会导致岩体发生失稳破坏,对于绝大部分结构面,它们仅将岩体切碎成岩块,产状以及自身几何形态决定此类结构面不会影响岩体稳定性. 若在搜索岩质边坡异形滑动面时考虑岩体的所有结构面,会极大地降低异形滑动面搜索的效率和准确性,因此需要对结构面数据进行筛选.

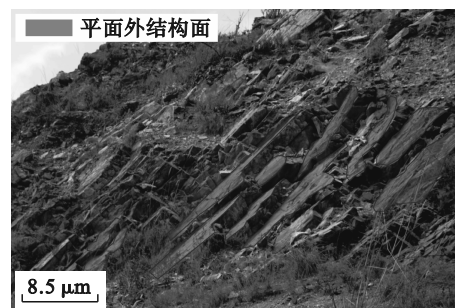


图1 自然岩质边坡及结构面示意图

Fig. 1 Schematic diagram of natural rock slope and structural plane

工程岩体存在大量结构面,受自然因素及人为因素的影响,结构面尺寸存在较大差异. 根据分布规模大小,结构面可分为5级^[22]. 岩体在Ⅲ,Ⅳ级结构面作用下的破坏面没有Ⅰ,Ⅱ级结构面明显的“优势”,组合成的滑动面的形状也没有土质边坡中规则. 但Ⅲ,Ⅳ级结构面在岩体中却广泛存在,如何考虑Ⅲ,Ⅳ级结构面之间组合形成滑动面十分重要. 因此本研究确定岩质边坡异形滑动面考虑Ⅲ,Ⅳ级结构面作为研究对象.

GeoSMA-3D程序中采用圆盘结构面模型,结构面的筛选考虑圆盘结构面中的半径和倾角,圆盘的半径反映了结构面的大小,而结构面的倾角大小为满足块体具有滑动性提供依据. 采用式(1),式(2)对结构面进行筛选.

$$r_i \geq 1.5 \text{ m}, \quad (1)$$

$$\gamma_i \geq \phi_{\max}. \quad (2)$$

式中: r_i, γ_i 为第*i*个结构面的半径和倾角; ϕ_{\max} 为结构面的最大内摩擦角.

较小的结构面数量巨大,对滑动面的贡献度小.因此本研究考虑半径大于 1.5 m 的结构面参与构成异形滑动面.

考虑到岩块在斜坡上不受力状态下保持静止的最大坡度为结构面的内摩擦角,因此,采用结构面的最大内摩擦角作为临界条件,考虑倾角大于等于内摩擦角的结构面.

1.2 滑动面搜索

在三维平面中,滑坡体为几何实体.以岩质边坡的楔形体滑坡为例,如图 2 所示,在滑坡的启动阶段,楔形体滑体为一个整体,滑坡体与边坡表面的交线 M 为一个封闭的几何图形,楔块滑体则是由多个块体构成的三维多面体,滑坡体与边坡内部的接触面即为滑动面.

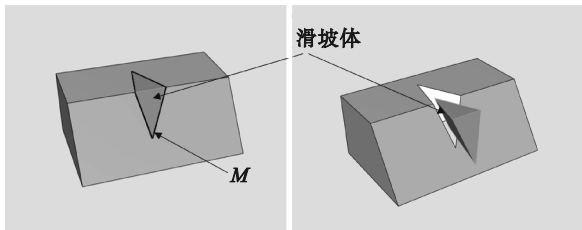


图 2 楔形体滑坡示意图

Fig. 2 Schematic diagram of wedge landslide

滑动面的搜索流程可简化为坡面迹线构成的封闭图形判定、设定圆弧临界滑动面,以及棱锥组合多面体.由于实际岩质边坡发生滑坡时的边坡形态和滑坡发生的位置不同,本研究考虑边坡形状为平面或者接近平面这种情况的岩质边坡异形滑动面的确定方法,因此,提出以下两点假设:

假设 1 圆盘结构面完全贯通.即不考虑结构面之间的黏结作用;

假设 2 边坡的表面为平面.不同边坡形状涉及到不同的坡面函数,不同函数的计算复杂程度不同,所以本文以平面边坡形状对异形滑动面的确定原理进行阐述.

1) 封闭性判定.在滑坡启动阶段,滑坡体与岩质边坡的表面的交集为一个封闭的图形,滑动面是滑坡体与边坡内部的接触面.坡面与结构面的交集为直线,因此形成滑坡体的先决条件是边坡表面上结构面的交线构成一个封闭的图形.

根据结构面的数据可以唯一确定结构面的参数方程,对于 i 结构面圆心 (x_i, y_i, z_i) 、走向 α_i 、倾角 γ_i 、半径 r_i ,圆盘结构面可视为平面和球体的交集.

结构面平面 P_i 方程:

$$e_i(x-x_i) + f_i(y-y_i) + g_i(z-z_i) = 0. \quad (3)$$

式中: (e_i, f_i, g_i) 表示结构面的法向量;

$$\left. \begin{aligned} f_i &= -e_i \tan \alpha_i, \\ g_i &= \frac{-e_i(\cos \alpha_i + \tan \alpha_i \sin \alpha_i)}{\sqrt{(1 - \cos \gamma_i) / \cos \gamma_i}} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

球体 R_i 参数方程:

$$\left. \begin{aligned} x &= x_i + r_i \sin \varphi \cos \theta, \\ y &= y_i + r_i \sin \varphi \sin \theta \quad (0 \leq \varphi \leq 2\pi, 0 \leq \theta \leq 2\pi), \\ z &= z_i + r_i \cos \varphi. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

圆盘结构面表示的区域 P'_i 为结构面平面和球体的交集,即 $P'_i = P_i \cap R_i$.

岩质边坡的坡面为平面,根据 GeoSMA-3D 程序中的坐标系建立坡面 P 的函数方程:

$$Ax + By + Cz + D = 0. \quad (6)$$

式中, A, B, C, D 为空间平面的特征参数.

根据结构面平面 P_i 、坡面 P 以及球体的函数方程,解得任意与坡面相交的结构面的迹线参数方程:

$$\left. \begin{aligned} x &= x'_i + a_i t, \\ y &= y'_i + b_i t, \\ z &= c_i t, t \in [t', t'']. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中: $x'_i = \frac{BE + f_i D}{e_i B - f_i A}$; $y'_i = \frac{AE + e_i D}{f_i A - e_i B}$; $a_i = f_i C - g_i B$; $b_i = e_i C - g_i A$; $c_i = e_i B - f_i A$; E 为常数, $E = e_i x_i + f_i y_i + g_i z_i$; t 为参数, t' 与 t'' 为一元二次方程的 2 个根.

联立球体参数方程(5)得到关于参数 t 的一元二次方程,根据求根公式可解得参数 t 的取值范围, $t \in [t', t'']$, t' 与 t'' 为一元二次方程(8)的 2 个根,因为圆盘结构面与坡面相交,所以方程(8)必有解.

$$(a_i^2 + b_i^2 + c_i^2)t^2 + 2[a_i(x'_i - x_i) + b_i(y'_i - y_i) - c_i z_i]t = r_i^2 - (x'_i - x_i)^2 - (y'_i - y_i)^2 - z_i^2. \quad (8)$$

根据坡面结构面迹线的参数方程(7),可求得各结构面在坡面迹线的交点.

通过对坡面上各结构面与坡面的交线以及交线的交点来判断几何多边形的封闭性,对于有 n 点的集合,用 M 表示搜寻的滑坡体,封闭多边形的边数 K 和剖分中三角形的个数 N 应该满足^[23]:

$$\left. \begin{aligned} N &= 2n - n_b + 2H - 4, \\ K &= 3n - n_b + 3H - 6. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中: n_b 为边界点数; H 为中间洞数.

采用GeoSMA-3D程序对岩质边坡进行关键块体稳定性分析,识别边坡中的关键块体,用 m 表示边坡的关键块体,而关键块体在滑坡体中,因此 m 中的元素应当在 M 中,即 $m \subset M$,如图3所示.

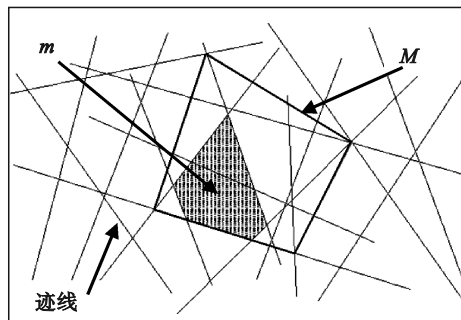


图3 坡面封闭区域搜寻示意图

Fig. 3 Schematic diagram of search in closed area of slope

2) 圆弧临界面判定.本研究确定岩质边坡异形滑动面的思路为:从边坡表面结构面迹线关系出发,先确定滑坡体在边坡表面的区域,之后由表面区域向内部进行块体间的组合.但是不能无限向内部进行块体间的组合,需要在边坡内部设置临界面.考虑到圆弧滑动滑坡体的范围较同等其他形状滑坡体的范围最大,为保证安全性,因此将边坡内部临界面的形状设为圆弧.既然是以边坡表面区域确定的滑坡体,则滑坡体一定包含边坡表面的封闭区域.所以以坡面封闭几何图形的最远两点的中点为圆心,最远两点的距离为直径,建立三维的圆弧滑动临界面,即根据坡面封闭区域建立外接球体.

在坡面搜索的封闭区域的各交点中,设点 $A(x_a, y_a, z_a), B(x_b, y_b, z_b)$ 两点距离最大,任取两点 (x_i'', y_i'', z_i'') 和 (x_n'', y_n'', z_n'') ,距离 l_{AB} 满足:

$$l_{AB} = \max \left\{ \sqrt{(x_i'' - x_n'')^2 + (y_i'' - y_n'')^2 + (z_i'' - z_n'')^2} \right\}. \quad (10)$$

3) 滑动面组合. GeoSMA-3D程序将建立起的边坡模型块体化,以式(11)建立的圆弧面作为临界判别面,考虑圆弧面和坡面所围区域中的块体.如图3所示,其中 m 表示该边坡的关键块体, M 表示搜寻的滑坡体.考虑 M 区域内的块体,以 M 边界线为迹线的块体出发,以块体之间的接触为条件,考虑相互接触的块体,生成滑动面.

$$\left. \begin{aligned} & \left(x - \frac{x_a + x_b}{2} \right)^2 + \left(y - \frac{y_a + y_b}{2} \right)^2 + \left(z - \frac{z_a + z_b}{2} \right)^2 \leq \left(\frac{l_{AB}}{2} \right)^2, \\ & Ax + By + Cz + D \leq 0. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式(11)表示由坡面封闭区域距离最远的两点建立起的半球体,半球体的边界即为圆弧临界面.

在块体化的边坡中可以得到边坡中各块体的点坐标,将各点坐标代入式(11)所示的判别式中,筛选圆弧面内的各点.岩质边坡被有限个结构面切割,因此将滑坡体视为一个三维平面中的有界多面体, M' 为有界多面体的一个超平面,滑动面则为有界多面体除了 M' 面的其他面的组合.根据滑坡体由多组结构面切割,所以得到多面体的表达式:

$$M' = \{ \mathbf{x} \in R^3 \mid \mathbf{A}\mathbf{x} \leq \mathbf{b} \}. \quad (12)$$

式中: \mathbf{x} 表示三维空间 R^3 中任意列向量; \mathbf{A} 是关于结构面平面法向量的矩阵; \mathbf{b} 是由边数 K 组成的常数列向量.

岩质边坡滑坡体是由多组结构面切割构成的有界多面体,将多面体分解为多个棱锥组合,棱锥顶点在坡面圆心处.用棱锥组合构成多面体,滑动面为棱锥底面组合.从结构面迹线在坡面围成的区域 M 出发,不在同一直线上的3点可以确定1个平面,以 M 的边界线作为初始棱锥的1条棱线,之后根据共用的点来确定下一个棱锥.根据欧拉定理对多面体进行判别.

$$F + V - Q = 2. \quad (13)$$

式中, F, V, Q 分别代表多面体面、顶点、棱线的数量.

根据欧拉定理对搜寻的多面体的合理性进行判别,满足条件的多面体即为可能的滑坡体,棱锥底面的组合面则为可能的滑动面.

1.3 潜在滑动面确定

采用极限平衡法分析岩质边坡稳定性时,将滑坡体视为一个整体,实际岩质边坡滑动面上的滑坡体由岩块构成,滑动面上不同位置岩块的安全系数不尽相同.基于滑动面上不同位置块体安全系数的差异,引入层次分析法^[24],提出了一种考虑块体位置的滑动面安全系数修正方法.图4为层次分析法确定滑动面上不同位置块体重重的流程图.

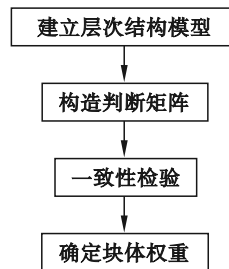


图4 确定块体权重流程图

Fig. 4 Flow chart of determining block weights

1) 建立层次结构模型.采用层次分析法将滑动面上不同位置的滑块作为研究的一个研究层.滑动面上的滑坡体在滑坡启动阶段时为一个整体,但滑坡开始时,总是滑坡体的下部块体首先发生运动,然后自下而上发生破坏.对于滑坡与不滑坡的临界状态来说,下部块体安全系数越小,滑坡越容易发生;同理,上部块体安全系数大并不能说明滑坡不会发生.总的来说,滑动面上不同位置块体的安全系数对滑坡的贡献大小是不一样的,所以需要考虑块体在滑动面上的位置差异.由于缺少客观样本,所以本研究采用层次分析法赋予不同位置岩块安全系数对应的权重来修正滑动面的安全系数.而层次分析法作为一种主观分析法,赋权过程中主观因素太强,需要合适的分区数量来平衡修正滑动面的安全系数和主观因素带来的误差两者之间的关系.若分区数量太少,则权重误差会比较大;若分区数量太多,则计算过程复杂.综合考虑各种因素,如图 5 所示,本研究根据滑坡区域外轮廓大小,将滑动面均匀分为 9 个区域.如果滑动面上出现 2 个以上岩块占据多个区域的主要部分时,本研究认为超过当前分区面积 50% 时为占据主要部分,此时无需用层次分析法修正滑动面安全系数.

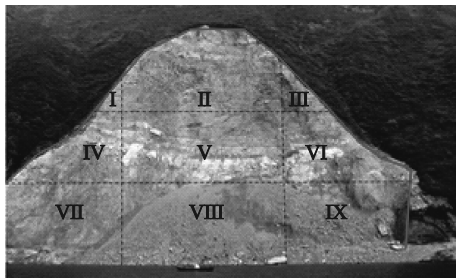


图 5 层次分析法滑动面区域示意图
Fig. 5 Schematic diagram of AHP sliding surface area

2) 构造判断矩阵.根据滑动面上不同区域的滑块对滑坡的贡献,将两侧对应位置区域上的块体对滑坡的贡献值视为相同,即将原本的 9 个不同的贡献值缩短为 6 个,贡献度参考表 1,具体贡献值详见表 2,建立判断矩阵 D .

$$D = \begin{bmatrix} 1 & a_1/a_2 & a_1/a_3 & a_1/a_4 & a_1/a_5 & a_1/a_6 \\ a_2/a_1 & 1 & a_2/a_3 & a_2/a_4 & a_2/a_5 & a_2/a_6 \\ a_3/a_1 & a_3/a_2 & 1 & a_3/a_4 & a_3/a_5 & a_3/a_6 \\ a_4/a_1 & a_4/a_2 & a_4/a_3 & 1 & a_4/a_5 & a_4/a_6 \\ a_5/a_1 & a_5/a_2 & a_5/a_3 & a_5/a_4 & 1 & a_5/a_6 \\ a_6/a_1 & a_6/a_2 & a_6/a_3 & a_6/a_4 & a_6/a_5 & 1 \end{bmatrix}$$

根据表 1 标度体系中的关系,确定各区域的贡献值大小,见表 2.

表 1 标度体系
Table 1 Scale system

| 量化标准 | 因子重要性比较 |
|---------|--------------------|
| 1 | a_i 和 a_j 同样重要 |
| 3 | a_i 比 a_j 稍微重要 |
| 5 | a_i 比 a_j 明显重要 |
| 7 | a_i 比 a_j 强烈重要 |
| 9 | a_i 比 a_j 极端重要 |
| 2,4,6,8 | 相邻标度的中值 |

表 2 图 5 中滑动面区域贡献值
Table 2 Contribution value of each region in Fig.5

| 区域 | I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII | IX |
|-----|---|----|-----|----|---|----|-----|------|----|
| 贡献值 | 1 | 3 | 1 | 4 | 5 | 4 | 7 | 9 | 7 |

根据表 2 中各个区域位置的滑块对滑动面滑动的贡献程度,确定判断矩阵 D 为

$$D = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{4} & \frac{1}{5} & \frac{1}{7} & \frac{1}{9} \\ 3 & 1 & \frac{3}{4} & \frac{3}{5} & \frac{3}{7} & \frac{1}{3} \\ 4 & \frac{4}{3} & 1 & \frac{4}{5} & \frac{4}{7} & \frac{4}{9} \\ 5 & \frac{5}{3} & \frac{5}{4} & 1 & \frac{5}{7} & \frac{5}{9} \\ 7 & \frac{7}{3} & \frac{7}{4} & \frac{7}{5} & 1 & \frac{7}{9} \\ 9 & 3 & \frac{9}{4} & \frac{9}{5} & \frac{9}{7} & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

3) 一致性检验.

步骤 1 计算一致性指标:

$$I_c = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (15)$$

式中, λ_{\max} 表示判断矩阵 D 的最大特征值,当 $\lambda_{\max} = 6, n = 6$ 时, $I_c = 0$.

步骤 2 查找一致性指标 I_r , 根据判断矩阵 D 的元素来查找随机一致性指标, $n = 6, I_r = 1.24$.

步骤 3 计算一致性比例 R_c .

$$R_c = \frac{I_c}{I_r} \quad (16)$$

代入数据计算得 $R_c = 0$, 当 $R_c < 0.1$ 时, 认为判断矩阵的一致性可以接受, 判断矩阵的一致性满足要求.

4) 确定块体权重.采用几何平均法(方根法), 权重计算公式为

$$w_i = \frac{\left(\prod_{j=1}^6 a_{ij}\right)^{\frac{1}{6}}}{\sum_{i=1}^6 \left(\prod_{j=1}^6 a_{ij}\right)^{\frac{1}{6}}} \quad (17)$$

式中, a_{ij} 为判断矩阵 D 的元素.

计算得到各区域的权重, 由于滑动面分为 9 个区域, 其中 I 与 III 区域、IV 与 VI 区域、VII 与 IX 区域的对应位置权重相同, 因此对权重归一化得到各区域块体重量的对应值, 见表 3.

表 3 各区域块体权重
Table 3 Weight of blocks in each region

| 区域 | I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII | IX |
|----|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 权重 | 0.024 5 | 0.073 6 | 0.024 5 | 0.098 1 | 0.122 6 | 0.098 1 | 0.171 9 | 0.214 9 | 0.171 9 |

5) 修正滑动面安全系数. 滑块位于滑动面不同区域对滑动的影响程度不一样, 不同区域的滑块对滑动的影响权重如表 3 所示. 结合滑块与滑动面的接触面积以及滑块计算出来的安全系数, 得到如下滑动面的安全系数表达式:

$$F = \sum_{i=1}^9 w_i F_i \quad (18)$$

式中: w_i 表示滑动面上 i 区域的权重, 其值见表 3; F_i 表示 i 区域的平均安全系数, $F_i = c_{i,n} F_{i,n}$, $c_{i,n}$ 为 i 区域中的第 n 个块体的面积与 i 区域的总面积之比, $F_{i,n}$ 为 i 区域中的第 n 个块体的安全系数.

当修正后的滑动面安全系数 $F < 1.05$ 时, 认为滑动面存在滑动风险, 视为潜在滑动面.

2 工程验证

本文选取辽宁省小盘岭边坡^[25]为研究对象, 全长约 160 m, 从边坡开挖路面至开挖顶面的高度约 30.10 m, 由于岩体风化严重, 比较破碎, 节理裂隙发育, 岩体条件较差.

将结构面数据^[26]导入到 GeoSMA-3D 程序中, 对边坡的关键块体进行稳定性分析, GeoSMA-3D 程序可以可视化输出岩体内部结构面迹线、关键块体的位置以及关键块体的信息等, 见图 6.

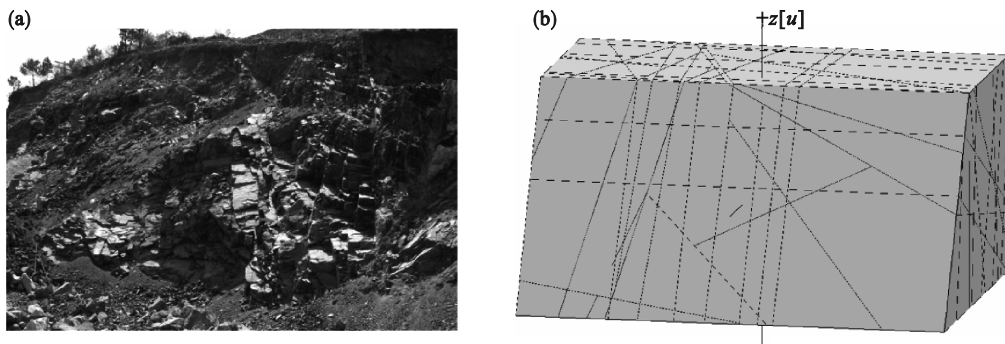


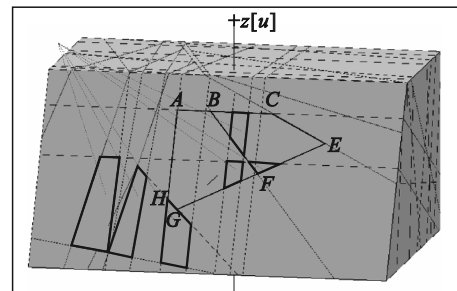
图 6 小盘岭边坡现场与筛选结构面迹线图^[25]

Fig. 6 The site of Xiaopanling slope and trace map of screening structure planes^[25]

(a) 一边坡现场图片; (b) 一表面结构面迹线.

关键块体是岩质边坡发生滑坡等灾害时优先发生破坏的岩块, 对于滑坡来说, 关键块体就像是楔子, 一个受力集中点, 边坡随着关键块体的破坏而随之发生破坏. 关键块体是滑坡体的重要支点, 因此, 关键块体识别对岩质边坡稳定性分析至关重要.

对岩质边坡滑动面进行搜索时, 滑坡体必须包含关键块体部分. 图 7 是运用 GeoSMA-3D 程序对小盘岭边坡进行关键块体稳定性分析的关键块体位置图以及滑坡体在坡面的区域图.



注: 粗线区域为关键块体

图 7 边坡关键块体与滑坡体区域

Fig. 7 Area of key blocks and sliding masses of slopes

根据本文提出的岩质边坡滑动面的确定方法,以小盘岭边坡为例,得到滑动面与坡面相交区域 $ABFGH$ 与 $ACEGH$. 根据 GeoSMA-3D 程序输出的数据,与区域 $ABFGH$ 相关的滑动面 1 个,与区域 $ACEGH$ 相关的滑动面 2 个,根据输出信息,建立滑坡体三维模型见图 8,各滑坡体安全系数与滑块面积分布图如图 9 所示.各滑动面详细信息见表 4.

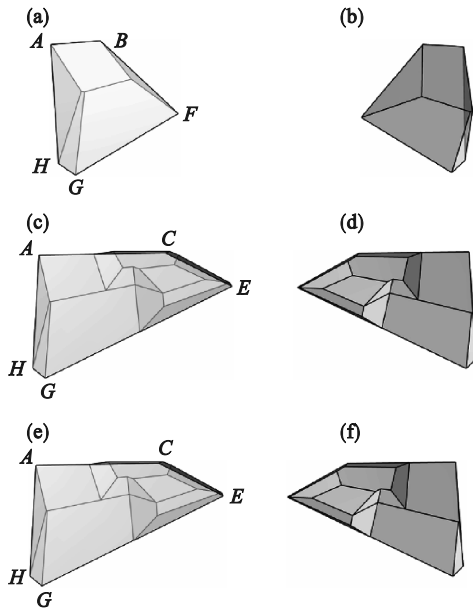


图 8 滑坡体三维模型

Fig. 8 3D model of sliding masses

(a)—滑坡体 1 的正视图; (b)—滑坡体 1 的后视图;
(c)—滑坡体 2 的正视图; (d)—滑坡体 2 的后视图;
(e)—滑坡体 3 的正视图; (f)—滑坡体 3 的后视图.

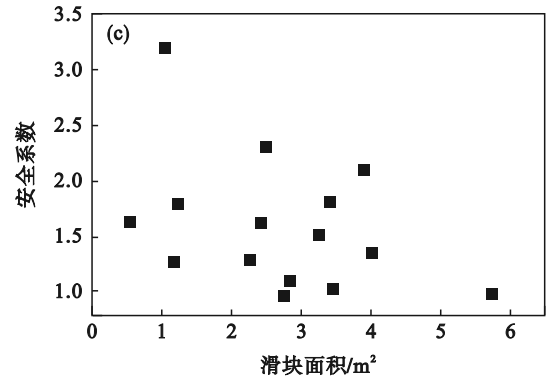


图 9 滑坡体安全系数与滑块面积分布图

Fig. 9 Safety factor and slider area distribution diagram of sliding mass

(a)—块体 1; (b)—块体 2; (c)—块体 3.

表 4 滑动面信息

Table 4 Sliding surface information

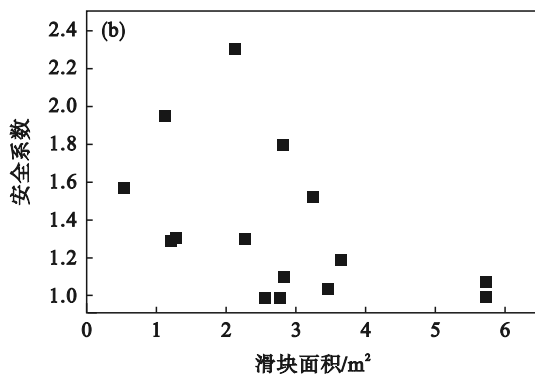
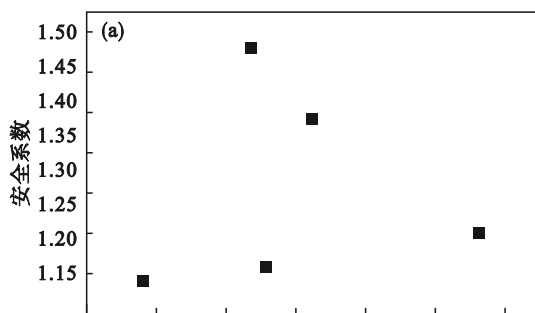
| 坡面区域 | 滑动面编号 | 滑动面面积/m ² | 滑动面上块体数量 | 安全系数 |
|---------|-------|----------------------|----------|-------|
| $ABFGH$ | 1 | 14.50 | 5 | 1.046 |
| $ACEGH$ | 2 | 36.79 | 15 | 1.449 |
| | 3 | 36.02 | 15 | 1.405 |

根据潜在滑动面的判别条件,坡面区域 $ABFGH$ 的滑动面 1 的安全系数小于 1.05,因此将滑动面 1 判定为小盘岭岩质边坡的潜在滑动面. 根据现场的监测数据,发现坡面区域 $ABFGH$ 的 ABF 段结构面之间的间距增大,模拟确定的区域 $ABFGH$ 与现场检测到的危险区域大致重合,滑动面区域拟合度高达 95%. 说明本文提出的滑动面的搜索方法以及基于层次分析法确定出的滑动面符合工程实际.

3 结 论

1) 针对 III, IV 结构面岩体,考虑岩体内结构面组合构成滑动面,用多面体的面表征滑动面的方法,可实现任意形状滑动面的搜索,滑动面搜索结果更加符合工程实际. 通过对小盘岭边坡的应用表明,所得滑动面具有良好的精度要求,与实际边坡不稳定区域拟合度高达 95%.

2) 岩质边坡异形滑动面由多组结构面组合构成,考虑滑动面上由于结构面位置差异引起的安全系数差异,引入层次分析法对滑动面不同区域内结构面进行分类赋权,采用加权安全系数代替平均安全系数进行边坡稳定性计算,计算结果更能反映边坡滑动面真实安全状态.



3) 基于 GeoSMA-3D 程序, 开发滑动面搜索与危险滑动面确定模块, 该模块在关键块体搜索的基础上, 进一步确定边坡异形滑动面, 开发的算法模块为边坡稳定性定量化评价提供依据。

参考文献:

- [1] 石根华. 岩体稳定分析的赤平投影方法[J]. 中国科学, 1977, 7(3): 260-271.
(Shi Gen-hua. Stereographic projection method for stability analysis of rock mass[J]. *Science in China*, 1977, 7(3): 260-271.)
- [2] 石根华. 岩体稳定分析的几何方法[J]. 中国科学, 1981, 11(4): 487-495.
(Shi Gen-hua. Geometric method of rock mass stability analysis[J]. *Science in China*, 1981, 11(4): 487-495.)
- [3] Goodman R E. Block theory and its application [J]. *Géotechnique*, 1995, 45(3): 383-423.
- [4] 王述红, 杨勇, 王洋, 等. 基于数字摄像测量的开挖空间模型及不稳块体的快速识别[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(sup1): 3432-3438.
(Wang Shu-hong, Yang Yong, Wang Yang, et al. Spatial modeling and quick identification of unstable rock blocks based on digital photogrammetry [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(sup1): 3432-3438.)
- [5] 王洋, 王述红, 郭牡丹, 等. 隧道掌子面节理信息快速数字识别及稳定性分析[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(11): 1734-1739.
(Wang Yang, Wang Shu-hong, Guo Mu-dan, et al. Fast digital identification of joint information of tunnel work face and its stability analysis [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, 33(11): 1734-1739.)
- [6] Cheng X L, Liu L P, Xiao J, et al. A general block stability analysis algorithm for arbitrary block shapes[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2021, 9: 723320.
- [7] Zhang Z X, Wang S F, Huang X, et al. Application of block theory for evaluating face stability under disc cutters loading of TBM: case study of a water-conveyance tunnel project [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019, 90: 249-263.
- [8] Zheng J, Kulatilake P H S W, Deng J H, et al. Development of a probabilistic block theory analysis procedure and its application to a rock slope at a hydropower station in China[J]. *Engineering Geology*, 2015, 188: 110-125.
- [9] Jia C, Li Y, Lian M Y, et al. Jointed surrounding rock mass stability analysis on an underground cavern in a hydropower station based on the extended key block theory[J]. *Energies*, 2017, 10(4): 1-17.
- [10] Greif V, Vlcko J. Key block theory application for rock slope stability analysis in the foundations of medieval castles in Slovakia [J]. *Journal of Cultural Heritage*, 2013, 14(4): 359-364.
- [11] Menéndez-Diáz A, Argüelles-Fraga R, García-Cortés S, et al. Stability analysis of a tunnel using LIDAR data and the key block method[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2016, 75(2): 469-483.
- [12] Huang T K, Chen J C, Chang C C. Stability analysis of rock slopes using block theory [J]. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 2003, 26(3): 353-359.
- [13] Fu G Y, Ma G W, Qu X L, et al. Stochastic analysis of progressive failure of fractured rock masses containing non-persistent joint sets using key block analysis [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2016, 51: 258-269.
- [14] 张文, 陈剑平, 王清. 基于裂隙频率的裂隙岩质边坡最危险滑动面的确定[C]//第九届全国工程地质大会论文集. 青岛, 2012: 706-710.
(Zhang Wen, Chen Jian-ping, Wang Qing. Determination of the most dangerous sliding surface of fractured rock slope based on fracture frequency [C]//Proceedings of the 9th National Engineering Geology Conference. Qingdao, 2012: 706-710.)
- [15] 李宁, 郭双枫, 姚显春. 边坡潜在滑动面模拟方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(12): 2377-2387.
(Li Ning, Guo Shuang-feng, Yao Xian-chun. A simulating method of the potential sliding surface of slope [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(12): 2377-2387.)
- [16] Sharma K G, Desai C S. Analysis and implementation of thin-layer element for interfaces and joints [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1992, 118(12): 2442-2462.
- [17] Goodman R E, Taylor R L, Brekke T L. A model for the mechanics of jointed rock [J]. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 1968, 94(3): 637-659.
- [18] Morgenstern N R, Price V E. The analysis of the stability of general slip surfaces [J]. *Géotechnique*, 1965, 15(1): 79-93.
- [19] Janbu N. Slope stability computations [C]//Hirschfeld E, Poulos S. Embankment Dam Engineering. New York: John Wiley, 1973: 47-86.
- [20] Sarma S K. Stability analysis of embankments and slopes [J]. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 1979, 105(12): 1511-1524.
- [21] 朱大勇, 李焯芬, 黄茂松, 等. 对 3 种著名边坡稳定性计算方法的改进[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(2): 183-194.
(Zhu Da-yong, Lee C F, Huang Mao-song, et al. Modification to three well-known methods of slope stability analysis [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(2): 183-194.)
- [22] 陈娜. 基于三维激光扫描的边坡岩体结构信息提取和变形监测研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2018.
(Chen Na. The structural information and deformation monitoring of rock slope based on 3D laser scanning technology [D]. Wuhan: Wuhan University, 2018.)
- [23] 张永春, 达飞鹏, 宋文忠. 三维散乱点集的曲面三角剖分[J]. 中国图象图形学报, 2003, 8(12): 1379-1388.
(Zhang Yong-chun, Da Fei-peng, Song Wen-zhong. Surface triangulations based on 3D arbitrary point-sets [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2003, 8(12): 1379-1388.)
- [24] 王斐笠, 王述红, 高红岩, 等. 关键块体失稳表征系数与岩坡稳定性评价[J]. 交通运输工程学报, 2018, 18(4): 44-52.
(Wang Fei-li, Wang Shu-hong, Gao Hong-yan, et al. Instability characterization coefficient of key block and evaluation of rock slope stability [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2018, 18(4): 44-52.)
- [25] 穆嫩江. 碎裂岩体块体力学分析及其岩坡稳定性评价[D]. 沈阳: 东北大学, 2013.
(Mu Xi-jiang. Block mechanics analysis and cataclastic rock slope stability assessment [D]. Shenyang: Northeastern University, 2013.)
- [26] Wang S H, Huang R Q, Ni P P, et al. Fracture behavior of intact rock using acoustic emission: experimental observation and realistic modeling [J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2013, 36(6): 903-914.