

文章编号: 1008-2786-(2019)2-295-08

DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000423

基于遗传算法的反倾层状岩质边坡极限分析上限解

徐青松^{1,2}, 刘兴荣³, 王东坡^{4*}, 欧阳朝军¹

(1. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 甘肃省科学院 地质自然灾害防治研究所, 兰州 730000;

4. 成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 成都 610059)

摘 要: 倾倒破坏是反倾层状边坡主要的失稳类型之一, 而当反倾层状边坡内存在软弱夹层、外倾结构面等因素时, 传统的纯剪断或纯折断破坏将不再适用, 如何有效地建立一种该类型边坡的稳定性分析方法对边坡工程设计显得尤为重要。在此基础上, 本文针对反倾层状岩质边坡平动-转动组合破坏问题, 利用塑性极限分析上限定理, 结合相关联流动法则和变形协调条件建立容许运动场, 构建考虑平动加转动的岩质边坡稳定性极限分析理论计算模型, 进一步采用遗传优化算法进行全局极值搜索, 得到基于遗传算法的平动加转动岩质边坡极限分析稳定性系数上限解和相应的最优折断面。采用该方法与改进的 Goodman-Bray 方法进行对比, 计算结果表明所提方法具有一定的适用性。同时利用该方法, 对反倾岩质边坡的稳定性影响因素进行了敏感性分析。

关键词: 反倾岩质边坡; 极限分析上限解; 遗传算法; 最优折断面

中图分类号: TU457

文献标志码: A

在工程领域中, 基于极限平衡的垂直条分法是反倾岩质边坡稳定性计算和设计参数选择的常用方法。Goodman 和 Bray 最早提出了基于极限平衡的 G-B 法^[1], 在此基础上, 陈祖煜^[2]、黄润秋^[3]、位伟^[4]、张以晨^[5]、卢海峰^[6]等学者均进行了改进和实际运用, 极限平衡方法考虑了较多假设, 且在具有多个层面的岩质边坡中忽略了其层面作用力, 具有一定的局限。

近年来, 极限分析法渐渐发展为边坡稳定性分析中的另一种方法^[7-9]。在反倾边坡中的运用也越来越广, 王东坡^[10]、赵炼恒^[11]等利用极限分析方法中的上限定理, 给出了边坡稳定性系数计算方法及

边坡破裂面, 上述研究多集中在均质边坡, 而极限分析法在反倾层状岩质边坡应用较少。

实际上, 层状边坡发生破坏时, 岩块沿破坏面可能发生折断或剪断破坏, 而当反倾层状边坡内存在软弱夹层、外倾结构面等, 在降雨、地震等外加因素影响下不再是纯剪断或纯折断破坏, 这样传统的纯转动或者纯平动破坏机制就难以适用了。

本文考虑反倾层状边坡剪断和折断复合破坏, 构建反倾层状边坡平动-转动组合破坏机制, 在极限分析上限定理的基础上, 考虑层间粘聚力所产生的内能耗散, 并基于遗传算法, 克服了传统优化方法易陷入局部最优解的缺点, 可以较快给出反倾边坡

收稿日期(Received date): 2018-06-21; 改回日期(Accepted date): 2019-02-07

基金项目(Foundation item): 国家重点研发计划(2017YFC1501003); 甘肃省科学院与中科院合作项目(2017HZ-03); 四川省教育厅科技计划项目(18ZA0043)。[National Key R&D Program of China(2017YFC1501003); Cooperation Project Between Gansu Academic and Chinese Academic Science(2017HZ-03); The Projects of the Sichuan Department of Education(18ZA0043)]

作者简介(Biography): 徐青松(1993-), 男, 四川宣汉人, 硕士研究生, 主要研究方向: 山地灾害数值模拟。[XU Qingsong(1993-), male, born in Yibin, Sichuan Province, M. Sc. candidate, research on numeric simulation of mountain disaster] E-mail: 1342071344@qq.com

* 通讯作者(Corresponding author): 王东坡(1984-), 男, 甘肃天水人, 副教授, 主要研究方向: 山地灾害机制分析及防治。[WANG Dongpo(1984-), male, born in Tianshui, Gansu Province, associate professor, research on mechanism and mitigation technology of mountain disaster] E-mail: wangdongpo2014@cdut.edu.cn

在平动加转动运动场下的边坡稳定性系数的全局最优上限解,与极限平衡分析方法进行对比,寻找尽可能小并且适用于不同工况下的反倾边坡稳定性系数,进一步采用本方法探寻反倾边坡最优折断面。本文所提理论方法对反倾边坡稳定性分析和该类边坡工程设计具有一定指导作用。

1 基于平动加转动运动场的稳定性极限分析

1.1 反倾层状边坡地质力学模型

考虑层状岩块的平动和转动,建立如图 1 所示的反倾边坡运动地质力学模型,预先假设坡面和边坡破坏面是任意形状;建立图 1 所示的坐标系,使 X 轴和 Y 轴分别垂直和平行于岩层节理。

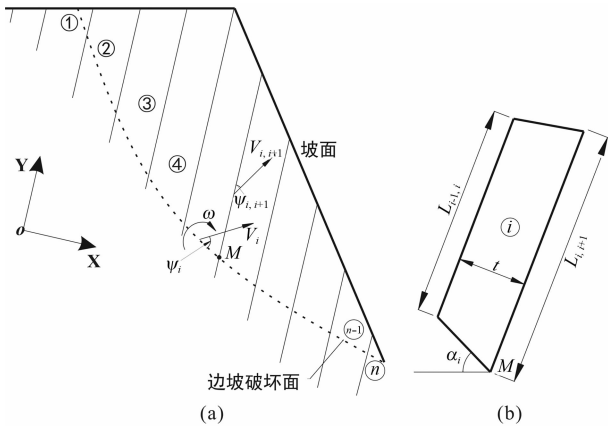


图 1 地质力学模型

Fig. 1 Geomechanical model

本文分析中,为使求解简化,对该模型进行如下假设:

- (1) 假设分层岩石边坡岩体为理想刚塑性体,岩块自身内部无能量耗散;
- (2) 岩土材料以及岩块间断面满足摩尔库伦屈服准则和相关联流动法则。

1.2 速度场建立

如图 1 所建立的平动和转动的反倾层状边坡运动模型中,记岩块底边的平动速度为 V_i ,任取其中处于极限平衡状态的第 i 块岩块(如图 1(b)),设岩块底边破坏面与水平线的夹角为 α_i ,X 轴与水平方向的夹角为 a (切坡倾角),并假设第 i 块和第 $i+1$ 个岩块间交界面长度为 $L_{i,i+1}$,岩块底边长度为 L_i ,

绕岩块最低点 M(M 坐标 (x_i, y_i)) 的转动速度为 ω_i ,根据模型假设和岩块间速度间断面流动法则可以推出平动加转动运动场的边坡具有相同的转动速度 $\omega^{[12]}$ 。如图 1 所示,岩块内任一点 (x, y) 速度:

$$u = u_i - \omega(y - y_i) \quad (1)$$

$$v = v_i + \omega(x - x_i) \quad (2)$$

式中: u_i 和 v_i 为底边的平动速度 V_i 沿 X 轴和沿 Y 轴分量, u 和 v 为岩块内任意点沿 X 轴和沿 Y 轴分量(即垂直和平行于节理方向)。

由于岩块相对剪切位移方向与倾倒转动方向相反^[13],于是,第 i 块和第 $i+1$ 块速度间断面表示为:

$$u_{i,i+1} = u'_{i,i+1} - u''_{i,i+1} \quad (3)$$

$$v_{i,i+1} = v'_{i,i+1} - v''_{i,i+1} \quad (4)$$

式中: $u_{i,i+1}$ 和 $v_{i,i+1}$ 为第 i 个和第 $i+1$ 个岩块间的垂直和平行于节理方向的速度间断, $u'_{i,i+1}$ 和 $v'_{i,i+1}$ 为平动引起的速度间断, $u''_{i,i+1}$ 和 $v''_{i,i+1}$ 为绕岩块最低点转动引起的岩间速度间断。

由文献[14],相邻滑体单元的速度多边形要满足矢量闭合可得:

$$u'_{i,i+1} = u_{i+1} - u_i \quad (5)$$

$$v'_{i,i+1} = v_{i+1} - v_i \quad (6)$$

$$u''_{i,i+1} = -\omega(y_{i+1} - y_i) \quad (7)$$

$$v''_{i,i+1} = \omega(x_{i+1} - x_i) \quad (8)$$

图 2 为层状岩块速度矢量闭合示意图。

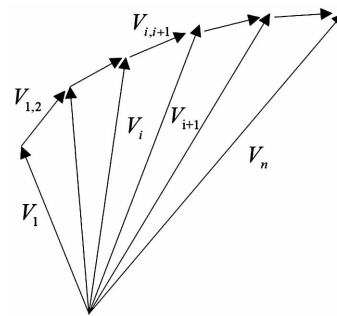


图 2 岩块速度矢量示意图

Fig. 2 Schematic diagram of rock velocity vectors

由图 1 中的几何关系,并记 $\beta_i = \alpha_i - a$

岩块底和岩块间满足假设(2)可得:

$$-\tan(\beta_i - \psi_i) = v_i/u_i \quad (9)$$

$$\pm \tan\psi_{i,i+1} = u_{i,i+1}/v_{i,i+1} \quad (10)$$

式中: ψ_i 为岩块底部材料的内摩擦角, $\psi_{i,i+1}$ 为岩块间材料的内摩擦角。

将式(5)、(6)、(7)、(8)代入(3)、(4),并将所得公式进行递推,最终可得:

$$u_{i+1} = M_i \cdot u_i + \left(\sum_{k=1}^i b_k \cdot \frac{M_i}{M_k} \right) \cdot \omega \quad (11)$$

$$u_{i,i+1} = N_i \cdot u_i + \left(\sum_{k=1}^i d_k \cdot \frac{N_i}{N_k} \right) \cdot \omega \quad (12)$$

式中:

$$M_i = \prod_{k=1}^i a_k \quad N_i = \prod_{k=1}^i c_k$$

$$a_k = \frac{\pm \tan \psi_{i,i+1} \cdot \tan(\psi_i - \beta_i) - 1}{\pm \tan \psi_{i,i+1} \cdot \tan(\psi_{i+1} - \beta_{i+1}) - 1}$$

$$b_k = \frac{\pm (x_{i+1} - x_i) \cdot \tan \psi_{i,i+1} + (y_{i+1} - y_i)}{\pm \tan \psi_{i,i+1} \cdot \tan(\psi_{i+1} - \beta_{i+1}) - 1}$$

$$c_k = a_k - 1 \quad d_k = b_k + (y_{i+1} - y_i)$$

同理将式(11)、(12)代入(9)、(10)可以求出 v_{i+1} 和 $v_{i,i+1}$ 。

从上式可以看出对于反倾边坡的平动-转动组合破坏机制,岩块底和块间速度间断都可以由 u_1 和 ω 进行线性表示。

1.3 反倾岩质边坡稳定性系数上限解

极限分析上限定理基于运动许可速度场下,假设岩土介质是理想的刚塑性体,利用虚功原理,只考虑速度模式(或破坏模式)和能量消耗,应力分布并不要求满足平衡条件,而且只需要在模式的变形区域内定义。令外力做功功率等于内能耗散率,从而求出稳定性系数表达式。

对于给定的破坏面,在采用强度折减法过程中,黏聚力、内摩擦角的形成机制具有差异性,对 c 和 φ 采用了不同折减系数可能更加合理,即双强度折减法,但采用两个折减系数时,可能的折减路径有无穷多个,虽有一些学者进行了相关研究^[15-17],但利用两个系数进行折减的合理性、简便性仍未见严格的论证,因此本文为简化计算,采用经典的单一折减法,即定义稳定性系数 F ,当倾倒变形体处于临界破坏状态时,经折减后的强度指标变为:

$$c_f = c/F \quad (13)$$

$$\tan \psi_f = \tan \psi / F \quad (14)$$

岩块的内能耗散主要用于克服结构面上的阻力来做功,主要集中在岩块底部和岩块间,以前述建立的运动场作为运动许可速度场,考虑结构面上的粘聚力 c 所产生的内能耗散,其计算表达式为:

$$D = D_d + D_s \quad (15)$$

$$D_d = \sum_{i=1}^n L_i \cdot C_{fi} \cdot V_i \cdot \cos \psi_{fi} \quad (16)$$

$$D_s = \sum_{i=1}^{n-1} L_{i,i+1} \cdot C_{fi,i+1} \cdot V_{i,i+1} \cdot \cos \psi_{fi,i+1} \quad (17)$$

$$V_i = \sqrt{u_i^2 + v_i^2} \quad V_{i,i+1} = \sqrt{u_{i,i+1}^2 + v_{i,i+1}^2} \quad (18)$$

式中: D_d 代表岩块底部结构面的内能耗散率, D_s 代表岩块间结构面上的内能耗散率, C_{fi} 和 $C_{fi,i+1}$ 分别代表经折减后岩块底部材料粘聚力和第 i 和 $i+1$ 块交界面材料的粘聚力, ψ_{fi} 和 $\psi_{fi,i+1}$ 分别代表经折减后岩块底部材料的内摩擦角和岩块交界面材料的内摩擦角。

岩块的外力功率主要是克服重力做功和其他竖向荷载(如地震力、水压力等)做功。

外力做功功率:

$$W = \sum_{i=1}^n (w_i + Q_i) \cdot V_i \cdot \sin(\alpha_i - \psi_i) \quad (19)$$

式中: w_i 为第 i 个岩块体的自重, Q_i 为其他竖向荷载做功。

由极限分析上限定理可知 $D = W$, 代入上式可得到稳定安全系数的上限解:

$$F = \frac{\sum_{i=1}^n L_i \cdot C_i \cdot V_i \cdot \cos \psi_{fi} + \sum_{i=1}^{n-1} L_{i,i+1} \cdot C_{fi,i+1} \cdot V_{i,i+1} \cdot \cos \psi_{fi,i+1}}{\sum_{i=1}^n (w_i + Q_i) \cdot V_i \cdot \sin(\alpha_i - \psi_i)} \quad (20)$$

2 遗传算法

2.1 遗传算法的实现过程

借助遗传算法基本原理^[18], 求解 F 的最优解, 具体流程如图3所示, 下面对其实现过程进行简单的介绍:

(1) 初始化种群的生成: 随机产生 N 个初始串结构数据, 每个串结构数据称为一个个体, N 个个体构成了一个种群; 遗传算法以这 N 个串结构作为初始点开始迭代。并设置终止条件 T 。

(2) 适应值函数: 即想要优化的函数, 用于表明个体或解的优劣性, 本文结合式(20), 构造相应优化准则函数作为适应值。

(3) 选择运算: 从旧的种群中选择适应度高的染色体, 放入匹配集(缓冲区), 为以后染色体交换、变异, 产生新的染色体做准备。

(4) 交叉运算: 将两个父辈结合起来构成下一代的子辈种群。

(5) 变异运算: 施加随机变化给父辈个体来构

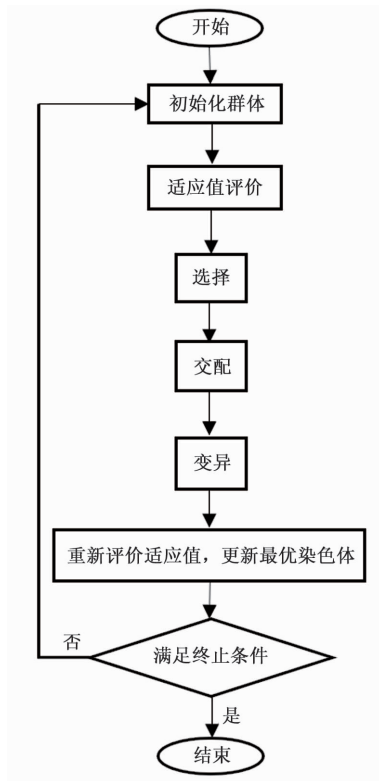


图3 遗传算法的流程图

Fig. 3 Flowchart of genetic algorithm

成子辈。

(6)终止条件判断:若 $t \leq T$ 。则 $t \leftarrow t + 1$, 转到第一步,若 $t > T$,则以进化过程中所得到的具有最大适应度的个体作为最优解输出,终止运算。

2.2 遗传算法和传统优化算法比较

与传统算法相比,遗传算法具有以下特点:①不同于从一个点开始搜索最优解的算法,遗传算法从一个种群开始对问题的最优解进行并行搜索,所以更利于全局最优化解的搜索,避免陷入局部最优解。②遗传算法并不依赖于导数信息或其他辅助信息来进行最优解搜索。③遗传算法采用的是概率型规则而不是确定性规则,因此,每次得出的结果不一定完全相同,但可将随机搜索与方向性搜索完美结合在一起。

3 算法验证及最优折断面搜索

3.1 算法验证

为验证本文方法的有效性,以表1中的物理力学参数为例,借助 Matlab 的计算工具,编写适应值函数 F ,并与工程中较常用的改进的 Goodman-Bray

方法^[1]计算结果进行对比验证。

表1 反倾层状边坡物理力学参数选用表

Tab. 1 Physical and mechanical parameters of counter-tilted rock slope

参数量	参数值
岩块重度/ $(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	24.500
岩块粘聚力/kPa	20.000
岩块底面摩擦角/ $^{\circ}$	26.000
岩块左右侧面摩擦角/ $^{\circ}$	26.000
倾倒岩块数	10.000
岩块间交界面长度/m	4.000
岩块底部长度/m	0.200
第一个岩块滑动速度 $u_1/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	1.000
第一个岩块转动角速度 $w/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	0.060

算例中,为简化遗传算法岩块面积的计算,假定每个小岩块的底面和侧面正交,并在计算中注意变量的取值范围和算法迭代次数。

以不同切坡倾角 α 为例,两者对比结果见表2。

表2 稳定性系数比较

Tab. 2 Comparison of stability coefficient

切坡倾角	改进的 Goodman-Bray 方法	平动加转动模型	相对偏差
60°	1.348	1.378	2.220%
65°	1.233	1.350	9.490%
70°	1.194	1.270	6.370%
75°	1.329	1.415	6.470%
80°	0.906	0.963	6.290%

由表2可知,利用平动加转动模型所求解的稳定性系数大于利用改进的 Goodman-Bray 方法求解的稳定性系数。但两者的相对偏差相对较小,保持在10%以内,当 $\alpha = 60^{\circ}$ 时,相对偏差为2.22%, $\alpha = 65^{\circ}$ 及以后,相对偏差均在6%以上。因而该模型和算法具有一定合理性和准确性。

3.2 最优折断面搜索

借助表1中的物理力学参数,以切坡倾角 $\alpha = 60^{\circ}$ 为实例,假设边坡高度 $H = 20 \text{ m}$,最优折断面通过坡脚,并且保证边坡倾角与层面倾角之和大于 90° ^[6],通过遗传算法65代迭代得到稳定性系数 $F = 1.378$,并将得到的 α_i 值拟合得到最优折断面,

并和 Aydan 等^[19] 采用悬臂梁弯曲模型提出的 Aydan 基准面以及 Adhikary 等^[20, 21] 在此基础上改进(与 Aydan 基准面成角 $\beta = 12^\circ \sim 20^\circ$) 得到 Adhikary 基准面进行对比,结果如图 4 所示:

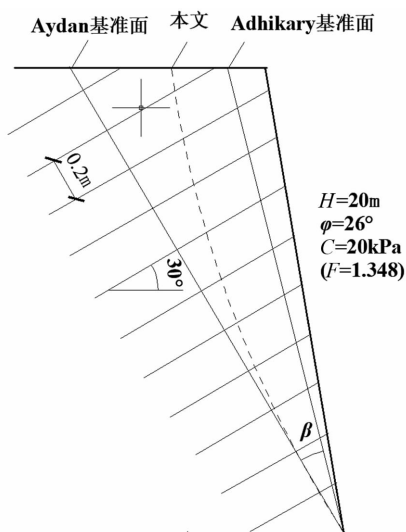


图4 折断面搜索示意图

Fig. 4 Schematic diagram of fracture surface searching

由图 4 可以看出,本文搜索得到的最优折断面近似抛物线形,在此工况下,岩层在自重条件下的最优折断面位于 Aydan 基准面之上,因为 Aydan 模型迭代中未考虑粘聚力 c 的影响,而本文中进行了考虑,同时说明本文搜索结果部分岩层断裂面位置未达到预定断裂面;同时岩层最优折断面位于 Adhikary 基准面之下,说明该工况下岩层在自重条

件下是比较稳定的,与稳定性系数 $F = 1.348$ 值较相符合。

3.3 层面强度对最优折断面的影响

对表 1 中参数所对应的反倾层状边坡,取层面倾角为 30° ,假设边坡高度 $H = 20$ m,最优折断面通过坡脚,讨论层面强度(c, φ 值)对最优折断面的影响,分析下面两种工况变化:(1)不同结构面粘聚力 c 取 15 kPa, 20 kPa, 25 kPa,其最优折断面如图 5(a) 所示;(2)不同结构面摩擦角 φ 取 $20^\circ, 26^\circ, 32^\circ$,其最优折断面如图 5(b) 所示。由图 5 可知,最优折断面的形态和破坏面的位置与结构面粘聚力和摩擦角均有关,伴随 c 值和 φ 值的增大,折断面不断向边坡外侧移动,但当 c 值和 φ 值较大时,折断面的形态发生明显变化,说明此时不再满足本文运动假设,同时根据图(a)和图(b)对比可以看出,在本文运动工况下,内摩擦角 φ 对反倾边坡破坏面的影响大于结构面粘聚力 c 。

4 稳定性系数参数分析

影响反倾层状边坡破坏的因素有很多,且岩层倾角,边坡的几何组合(坡高、坡角、岩层厚度),结构面强度,外力作用等因素对坡体稳定性的影响,前人都做了细致的研究并得出相应的结论^[22-25],而岩层的层面强度,岩体属性变化等研究却相对较少。基于极限分析下的平动-转动组合破坏机制,本文将讨论切坡倾角 α ,岩层的层面强度(c, φ 值)与反

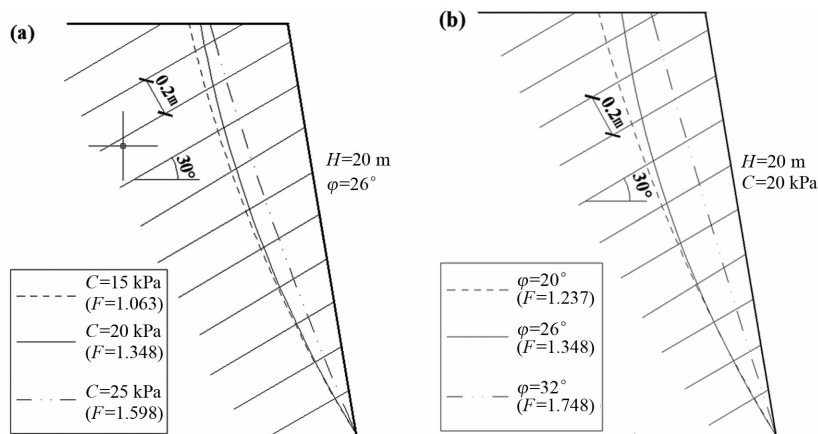


图5 最优折断面搜索

(a) 不同结构面粘聚力下的最优折断面搜索;(b) 不同结构面摩擦角下的最优折断面搜索

Fig. 5 The results of searching optimal fracture surface

(a) Searching optimal fracture surface under different cohesive forces;(b) Searching optimal fracture surface under different frictional angle

倾岩质边坡稳定性系数之间的关系。

4.1 切坡倾角与稳定性系数之间的关系

以图 1 为基本计算模型,利用表 1 中的参数,保持其他条件不变,同时边坡倾角与层面倾角之和大于 90° 的情况下,改变切坡的倾角,得到不同 α 下的稳定性系数变化,并与改进的 G-B 法对比,结果如图 6 所示。由图 6 可知:①两种方法相比,岩质边坡的稳定性系数随着切坡倾角变化的趋势相同,但基于遗传算法的岩质边坡平动-转动组合破坏模式的边坡稳定性系数上限解平均而言相对偏高,但相对偏差较小。②岩质边坡的稳定性系数随着切坡倾角的增大而呈现减小趋势,由本文计算方法所得图可知,当 $\alpha < 40^\circ$ 时,边坡稳定性系数基本保持不变,平均为 $F = 2.230$,此时,边坡处于稳定状态,不会发生边坡失稳破坏。当 $40^\circ < \alpha < 60^\circ$ 时,稳定性系数随着切坡倾角的增加急剧减少,两者近似呈线性关系,此时边坡变形失稳趋势也逐渐增加。当 $\alpha > 60^\circ$ 时,稳定性系数随着切坡倾角增加而较缓慢减少,在 70° 后,边坡岩块可能会出现本文的破坏模型。

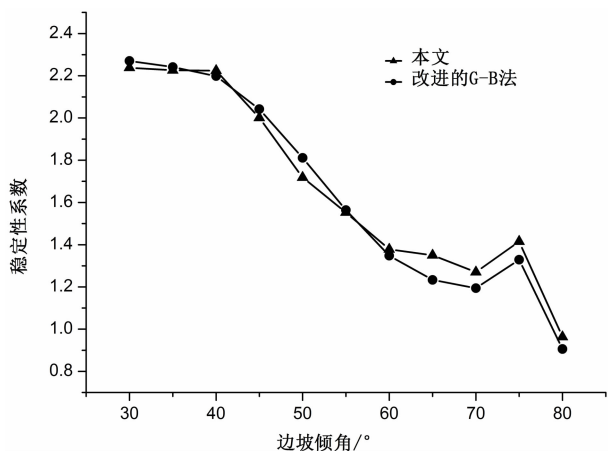


图 6 不同方法下切坡倾角与稳定性系数关系图

Fig. 6 the result of Relationship between slope angle and stability coefficient by using different methods

4.2 层面强度与稳定性系数之间的关系

以图 1 为基本计算模型,利用表 1 中的基本参数,取切坡倾角 $\alpha = 40^\circ$,分析下面两种工况变化:(1)不同结构面粘聚力 c 取 5 kPa、10 kPa、15 kPa、20 kPa、25 kPa、30 kPa,保持其他条件不变,得到不同粘聚力 c 下的稳定性系数变化,结果如图 7 所示。(2)不同层面摩擦角 $\psi_{i,i+1}$ 取 20° 、 25° 、 30° 、 35° 、 40° 、 45° 、 50° ,保持其他条件不变,得到不同层面摩擦角

下的稳定性系数变化,结果如图 7 所示。由图 7 可以看出边坡层面内摩擦角和粘聚力对反倾层状边坡稳定性存在较为显著的影响,边坡稳定性系数随层面内摩擦角和结构面粘聚力增长呈近似线性增长趋势。

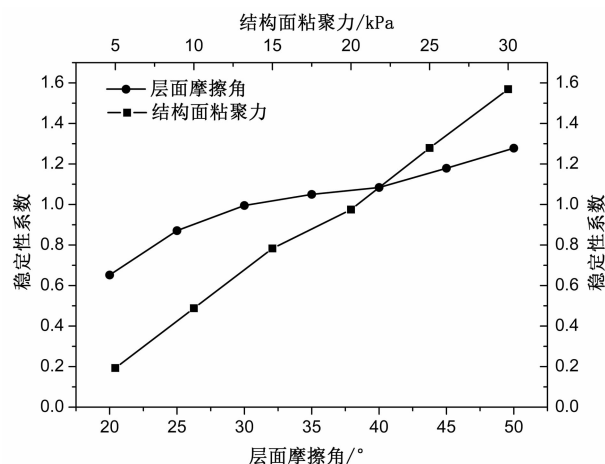


图 7 不同粘聚力、摩擦角与稳定性系数关系图

Fig. 7 Relationship between cohesion, friction angle and stability coefficient

5 结论

本文研究了基于平动-转动组合破坏模式的反倾层状边坡稳定性系数上限解及其相应的最优折断面,并对反倾岩质边坡的稳定性影响因素进行了敏感性分析。得出结论如下:

(1)考虑边坡平动-转动运动模型与改进的 Goodman-Bray 方法给出的结果相近。参数分析结果与实际情况较相符合。表明该方法对于反倾层状边坡计算具有一定的正确性与适应性。

(2)考虑边坡结构面上粘聚力产生的内能耗散条件下,所搜索的最优折断面近似呈抛物线形,并且位于 Aydan 基准面和 Adhikary 基准面之间。同时随着层面粘聚力和摩擦角的增大,最优折断面不断向边坡外侧移动。

(3)边坡稳定性系数随着切坡倾角增加而普遍呈下降趋势;边坡稳定性系数随层面内摩擦角和结构面粘聚力增长近似呈线性增长趋势。

参考文献 (References)

- [1] GOODMAN R E. Methods of geological engineering in discontinuous rocks[M]. New York: West Publishing Company, 1976: 300 -

- 368.
- [2] 陈祖煜, 张建红, 汪小刚. 岩石边坡倾倒稳定分析的简化方法[J]. 岩土工程学报, 1996, **18**(6): 96–99. [CHEN Zuyi, ZHANG Jianhong, WANG Xiaogang. Simplified method for analysis of toppling stability of rock slope[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, **18**(6): 96–99]
- [3] 陈红旗, 黄润秋. 反倾层状边坡弯曲折断的应力及挠度判据[J]. 工程地质学报, 2004, **12**(3): 243–246. [CHEN Hongqi, HUANG Runqiu. Stress and flexibility criteria of bending and breaking in a countertendency layered slope[J]. Journal of Engineering Geology, 2004, **12**(3): 243–246]
- [4] 位伟, 段绍辉, 姜清辉, 等. 反倾边坡影响倾倒稳定的几种因素探讨[J]. 岩土力学, 2008, **29**(z1): 431–434. [WEI Wei, DUAN Shaohui, JIANG Qinghui, et al. Research on some factors influencing the toppling stability in anti-inclined slope[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, **29**(z1): 431–434]
- [5] 张以晨, 仵磊, 沈世伟, 等. 反倾层状岩质边坡倾倒破坏力学模型[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2011, **41**(S1): 207–213. [ZHANG Yichen, NAI Lei, SHEN Shiwei, et al. Mechanical models of anti-dip layered rock slope toppling failure[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2011, **41**(S1): 207–213]
- [6] 卢海峰, 刘泉声, 陈从新. 反倾岩质边坡悬臂梁极限平衡模型的改进[J]. 岩土力学, 2012, **33**(2): 577–584. [LU Haifeng, LIU Quansheng, CHEN Congxin. Improvement of cantilever beam limit equilibrium model of counter-tilt rock slopes[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(2): 577–584]
- [7] 陈惠发. 极限分析与土体塑性[M]. 北京: 人民交通出版社, 1995: 3–7, 28–60. [CHEN Huifa. Limit analysis and soil plasticity[M]. Beijing: China Communications Press, 1995: 3–7, 28–60]
- [8] 杨小礼. 用于岩土极限分析的非线性能量耗散理论[J]. 中南大学学报自然科学版, 2005, **36**(4): 710–714. [YANG Xiaoli. Nonlinear energy dissipation theory for limit analysis in geotechnical engineering[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2005, **36**(4): 710–714]
- [9] ALEJANO L R, GÓMEZ-MÁRQUEZ I, MARTÍNEZ-ALEGRÍA R. Analysis of a complex toppling-circular slope failure[J]. Engineering Geology, 2010, **114**(1–2): 93–104.
- [10] 王东坡, 何思明, 欧阳朝军, 等. 地震荷载下边坡破裂面形状及其稳定性判识[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2011, **47**(6): 13–17. [WANG Dongpo, HE Siming, OUYANG Chaojun, et al. Surface and shape of slope fracture under seismic load and determination of its stability[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2011, **47**(6): 13–17]
- [11] 赵炼恒, 罗强, 李亮, 等. 层状岩体边坡动态稳定性拟静力上限分析[J]. 岩土力学, 2010, **31**(11): 3627–3634. [ZHAO Lianheng, LUO Qiang, LI Liang, et al. Upper bound quasi-static analysis of dynamic stability of layered rock slopes[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(11): 3627–3634]
- [12] 王云岗, 熊凯, 凌道盛. 基于平动加转动运动场的边坡稳定上限分析[J]. 岩土力学, 2010, **31**(8): 2619–2624, 2665. [WANG Yungang, XIONG Kai, LING Daosheng. Upper bound limit analysis of slope stability based on translational and rotational failure mechanism[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(8): 2619–2624, 2665]
- [13] 伍法权. 云母石英片岩斜坡弯曲倾倒变形的理论分析[J]. 工程地质学报, 1997, **5**(4): 19–24. [WU Faquan. Theoretical analysis of bending and toppling deformation of mica quartz schist slope[J]. Journal of Engineering Geology, 1997, **5**(4): 19–24]
- [14] 王根龙, 伍法权, 祁生文, 等. 加锚岩质边坡稳定性评价的极限分析上限法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, **26**(12): 2556–2563. [WANG Genlong, WU Faquan, QI Shengwen, et al. Research on limit analysis upper bound method for stability evaluation of anchored rock slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(12): 2556–2563]
- [15] 唐芬, 郑颖人, 赵尚毅. 土坡渐进破坏的双安全系数讨论[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, **26**(7): 1402–1407. [TANG Fen, ZHENG Yingren, ZHAO Shangyi. Discussion on two safety factors for progressive failure of soil slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(7): 1402–1407]
- [16] YUAN Wei, BAI Bing, LI Xiaochun, et al. A strength reduction method based on double reduction parameters and its application[J]. Journal of Central South University, 2013, **20**(9): 2555–2562.
- [17] BAI Bing, YUAN Wei, LI Xiaochun. A new double reduction method for slope stability analysis[J]. Journal of Central South University, 2014, **21**(3): 1158–1164.
- [18] 弥宏亮, 陈祖煜. 遗传算法在确定边坡稳定最小安全系数中的应用[J]. 岩土工程学报, 2003, **25**(6): 671–675. [MI Hongliang, CHEN Zhuoyi. Genetic algorithm used in determining the global minimum factor of safety of slopes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, **25**(6): 671–675]
- [19] AYDAN A Ö, KAWAMOTO P T. The stability of slopes and underground openings against flexural toppling and their stabilisation[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1992, **25**(3): 143–165.
- [20] ADHIKARY D P, DYSKIN A V, JEWELL R J, et al. A study of the mechanism of flexural toppling failure of rock slopes[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1997, **30**(2): 75–93.
- [21] ADHIKARY D P, DYSKIN A V. Modelling of Progressive and Instantaneous Failures of Foliated Rock Slopes[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2007, **40**(4): 349–362.
- [22] 程东幸, 刘大安, 丁恩保, 等. 层状反倾岩质边坡影响因素及反倾条件分析[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(11): 127–131. [CHENG Dongxing, LIU Da'an, DING Enbao, et al. Analysis on influential factors and toppling conditions of toppling rock slope[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**

- (11): 127–131]
- [23] 李明霞,董联杰. 层状反倾边坡变形特征及影响因素分析[J]. 计算力学学报, 2015, **32**(6): 831–837. [LI Mingxia, DONG Lianxia. Analysis of Deformation Characteristics and Influencing Factors of Layered Anti-dip Slope [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2015, **32**(6): 831–837]
- [24] 韩贝传,王思敬. 边坡倾倒变形的形成机制与影响因素分析[J]. 工程地质学报, 1999, **7**(3): 213–217. [HAN Beichuan, WANG Sijing. Analysis of formation mechanism and influencing factors of slope tilting deformation [J]. Journal of Engineering Geology, 1999, **7**(3): 213–217]
- [25] 左保成,陈从新,刘小巍,等. 反倾岩质边坡破坏机理模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(19): 107–113. [ZUO Baocheng, CHEN Congxin, LIU Xiaowei, et al. Modeling experiment study on failure mechanism of counter-tilt rock slope [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(19): 107–113]

Upper Bound Limit Analysis of Counter-Tilted Rock Slope Based on Genetic Algorithm

XU Qingsong^{1,2}, LIU Xingrong³, WANG Dongpo^{4*}, OUYANG Chaojun¹

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, Chengdu 610041, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Gansu Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

4. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: Toppling failure is one of the main instability types of anti-dip layered slope. Nevertheless, when anti-dip layered slope contains weak interlayer, extroversion structural plane and others, pure shear model or pure fracture failure model will not be applicable. On the contrary, it is important to establish a simple and reasonable method to analyse the stability of anti-dip slope stability for slope engineering design. The failure model with the motion of translation and rotation simultaneously occurs in counter-tilted rock slope. However, it remains unclear how the geomechanical model is established. Firstly, the upper bound theory of plastic limit analysis was used to establish the admissible motion field by combining the related flow rule and the compatibility condition of deformation. Based on the condition that the external force power was equal to the internal energy loss rate in the plastic deformation zone, the virtual power equation was then established. In addition, the objective function of slope stability was obtained by strength reduction. The genetic optimization algorithm was furtherly used in order to obtain upper bound solution and optimal fracture surface through an extremum searching. Thus, a genetic algorithm based upper bound method for limit analysis of rock slope with translational and rotational motion was proposed. Our results demonstrate that the proposed method is reasonable and efficient compared to Goodman-Bray solution. Meanwhile, the proposed approach in this paper was implemented to analyse the parameter sensitivity of slope stability.

Key words: counter-tilted rock slope; upper bound limit analysis; genetic algorithm; optimal fracture