

# 岩质边坡潜在滑块搜索方法及工程应用

张胤<sup>1</sup>, 闫园园<sup>1</sup>, 杜文虎<sup>2</sup>

(1. 南京市水利规划设计院股份有限公司, 江苏 南京 210006; 2. 泗洪县水务局, 江苏 宿迁 223900)

**摘要:** 岩质边坡安全系数的搜索方法一直是工程界的热门话题, 本文基于第二类非圆弧滑动面特点, 采用模式搜索法及形搜索法分别搜索岩质边坡的潜在滑动面, 从搜索效果及搜索原理等方面, 对比其搜索结果, 总结其适用条件。结合工程实例, 比较分析以上两种搜索方法的结果, 得出在岩层分布倾角较小时, 两者分析结果非常接近, 为类似工程提供建议。

**关键词:** 边坡稳定; 滑面搜索; 非圆弧滑面

中图分类号: TU457

文献标识码: A

文章编号: 1007-7839(2016)11-0065-04

## Research and application on potential sliding block searching method of rock slope

ZHANG Yin<sup>1</sup>, YAN Yuanyuan<sup>1</sup>, DU Wenhui<sup>2</sup>

(1. Nanjing Water Planning and Designing Institute Co., Ltd, Nanjing 210006, Jiangsu;

2. Sihong County Water Authority Bureau, Suqian 223900, Jiangsu)

**Abstract:** Search method of rock slope safety factor is always a hot topic in engineering, based on the characteristics of the second type of non-circle slide surface, the pattern search method and the form search method is adopted to search the potential sliding surface of rock slope. Based on the search results and principle, comparing its results, the applicable conditions are summarized. Combined with engineering example, search results analyzed by the above two methods are compared. The results show that when the distribution of the strata dips angle is small, the analysis results are very close. Suggestions for similar projects are provided.

**Key words:** slope stability; sliding surface search; non-circle slide surface

## 0 引言

岩质边坡稳定问题是岩土力学研究的经典课题, 极限平衡法是当前广泛采用的稳定性分析方法, 基本原理是根据岩土边坡潜在滑动面上滑块沿滑动面的抗剪力与该滑块沿滑动面的剪切力的比值来确定岩土边坡的稳定性系数<sup>[1]</sup>, 因此潜在滑动面的确定对稳定系数的计算结果有重要影响。近30年来, 临界滑动面的搜索问题得到了很大的重视, 众多学者提出了不少滑面搜索技术和

方法<sup>[2-3]</sup>。

这些滑面搜索技术大致可以分为两类<sup>[4]</sup>, 第一类, 人为规定滑动面的形状 $y(x)$ , 如圆弧形、对数螺旋形、圆弧一直线型等, 其中圆弧形滑动面形式最为简单, 实际应用中采用的最多; 第二类, 在搜索当中确定滑动面的形状 $y(x)$ , 即不预先限定其形状。相比第一类滑动面, 第二类更适合复杂的岩土层、边界条件, 更适合岩质边坡滑面搜索, 本文针对第二类现有的两种临界滑动面搜索方法及其原理、优缺点做了较详细的介绍, 并

收稿日期: 2016-08-30

作者简介: 张胤(1987-), 女, 博士, 工程师, 主要从事水工结构和岩土工程数值计算及试验研究。

结合工程实例进行分析比较,给出合理的建议。

## 1 第二类滑面搜索方法

第二类滑动面形式通常可以分为  $m$  段,由  $m+1$  各顶点构成,各顶点之间的连线可以是直线,也可以是样条曲线,其中分段线性情况应用较多,而且大多数极限平衡方法也适于对这种形状的滑动面进行分析,如图 1。

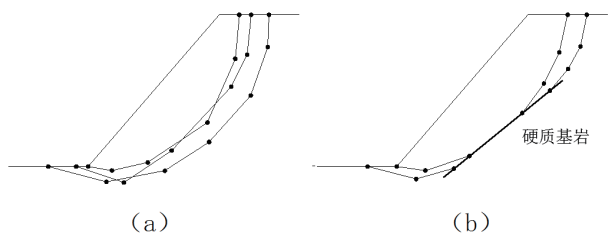


图 1 第二类滑面示意图

采用第二类搜索方法搜索得到的滑面是非圆孤滑面,入滑点和出滑点各有一个自由度,内部各点有  $x$  和  $y$  方向两个自由度,对于一个  $m$  段的滑面就有  $2(m+1)-2$  个自由度,自由度  $A$  可表示为:

$$A=2(m+1)-r \quad (1)$$

式中:

$r$  —约束的个数。

通常,计算自由度增加会给计算带来极大的不便,可以在保证精度的情况下,采取人为手段来降低计算成本,以下介绍两种常用的折线滑面搜索方法,并进行对比分析。

### 1.1 模式搜索法

模式搜索法由“探测移动”和“模式移动”构成。“探测搜索”就是在某一点沿着  $2n$  个方向进行搜索(空间有  $n$  维),目的是利用已发现的函数规律沿有利的方向寻找更好的点。

采用模式搜索法进行搜索滑面时,对于含有软弱夹层或硬质基岩的岩质边坡,可以在软弱夹层或硬质基岩方向上人为限定搜索方向  $\alpha$ 。对第  $i$  个顶点,可以由搜索起点  $V_{i0}$  起,沿角度  $\alpha_i$  方向的偏移距离  $b_i$  来确定:

$$V_i^0 = \begin{pmatrix} x_i^0 \\ y_i^0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$V_i = V_i^0 + \Delta V_i = V_i^0 + b_i \begin{pmatrix} \cos \alpha_i \\ \sin \alpha_i \end{pmatrix} \quad (3)$$

这样,每一个顶点便可以通过  $b_i$  一个变量来

确定,对于包含有  $m+1$  个顶点的滑动面,其自由度可以由  $n=m+1$  确定。

在实际岩质边坡工程中,可以假定软弱岩层面或硬质基岩面上的顶点  $\alpha_i$  的方向和此层面的方向一致,边坡内部不处在特殊地质条件下的点,其  $\alpha_i$  角可以通过经验确定,不同的  $\alpha_i$  角的选取,对计算精度的影响很小,可以忽略。

对于计算搜索滑面过程中得到的点,还需要对其存在合理性进行验证:

$$x_{i+1} \leq x_i \quad (4)$$

$$\varphi_{i+1} \geq \varphi_i \quad (5)$$

式中:

$\varphi_i$  —顶点  $i$  与  $i+1$  的连线与  $x$  轴的交角。

模式搜索法搜索过程为:首先确定某个搜索起点,计算相应的安全系数,接着以该起点为中心,在该点上下左右按一定的步长各确定一点,分别计算相应的安全系数。如果起点处安全系数大于周围各点,则以安全系数最小的点为新的起点,以同样的步长重复上述过程,直到出现某点四周不再出现安全系数更小的点,这时减小步长为原来的  $1/2$  或  $1/4$ ,如此进行下去,直到步长达到相应的精度要求为止,具体过程见图 2。

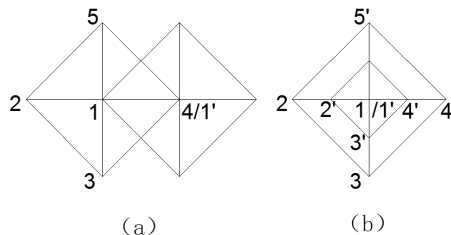


图 2 模式搜索法过程

### 1.2 单纯形法

单纯形搜索法由 Spendley 等在 1962 年首先提出,发现早期的直接搜索法需要对  $2n-2n$  个函数进行估计,在能完成一次优化迭代。故单纯形搜索法的基本思想即是:在  $n$  维空间  $R_n$  中构造一个非退化单纯形,并使用该单纯形进行搜索。“非退化”保证了与任意定点相邻的边集构成  $R_n$  的线性基。这样,在  $R_2$  中,可以构造一个三角形,在  $R_3$  中,可以构造一个四面体,以此类推,具体过程如图 3。

上述迭代的最终目的是希望在迭代过程中找到一个更优点,以替换当前最优点或者证明当前最优点即为局部最优点,多迭代过程最终返回起始点,没有替换起始点  $x_k$ ,则认为  $x_k$  为局部平

稳点。

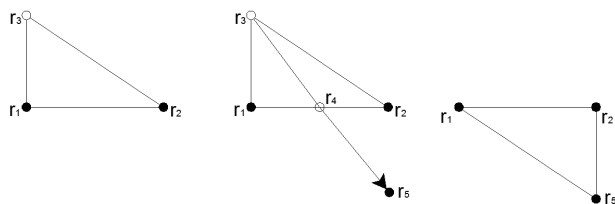


图 3 单纯形的反射过程

### 3 安全系数计算方法

在确定潜在滑动面后进行稳定性计算, 计算安全系数方法采用简布条分法, 该法相比于其他工程中常用的计算方法, 计算结果相对准确, 主要适用于复合滑动面破坏的边坡, 既可以用于圆弧滑动, 也可以用于非圆弧滑动, 适用范围更广。

简布法假定滑动面为任意形状, 条间水平力的作用点在岩土条底面以上 1/3 高度处, 计算简图如图 4 所示。

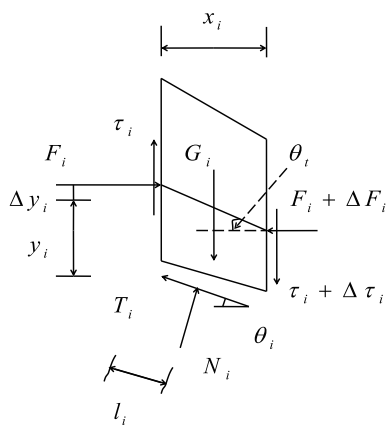


图 4 简布法计算简图

由岩土条水平方向上的平衡条件, 得:

$$\Delta F_i = N_i \sin \theta_i - T_i \cos \theta_i \quad (6)$$

由岩土条垂直方向上的平衡条件, 得:

$$N_i = (G_i + \Delta \tau_i) \sec \theta_i - T_i \tan \theta_i \quad (7)$$

根据式 (6) 和式 (7) 可得:

$$\Delta F_i = (G_i + \Delta \tau_i) \tan \theta_i - T_i \sec \theta_i \quad (8)$$

由岩土条本身的力矩平衡条件 (以土条地面中点取矩), 得:

$$\tau_i = \Delta F_i \frac{y_1}{x_1} - F_i \tan \theta_i \quad (9)$$

利用  $\sum \Delta F_i = 0$  和式 (8) 可以得到:

$$(G_i + \Delta \tau_i) \tan \theta_i - T_i \sec \theta_i = 0 \quad (10)$$

利用安全系数的定义与摩尔库伦破坏准则:

$$T_i = \frac{\tau_i l_i}{F_s} = \frac{c_i x_i \sec \theta_i + N_i \tan \theta_i}{F_s} \quad (11)$$

联合式 (7) 和式 (11) 可得:

$$T_i = \frac{1}{F_s} [c_i x_i + (G_i + \Delta \tau_i) \tan \theta_i] \frac{1}{m_i} \quad (12)$$

$$\text{式中: } m_i = \cos \theta_i + \frac{\sin \theta_i \tan \theta_i}{F_s}$$

将式 (12) 代入式 (10) 中, 得到简布法安全系数计算公式

$$F_s = \frac{\sum [c_i x_i + (G_i + \Delta \tau_i) \tan \theta_i]}{\sum (G_i + \Delta \tau_i) \tan \theta_i} \frac{1}{\cos \theta_i m_i} \quad (12)$$

式中:

$G_i$ —每一岩土条的重力;

$N_i$ —每一岩土条底部的法向反力;

$T_i$ —每一岩土条底部的切向反力;

$F_i, F_i + \Delta F_i$ —相邻岩土条的法向条间力;

$x_i$ —岩土条宽度;

$y_i, y_i + \Delta y_i$ —两相邻岩土条条间力合力作用位置;

$\theta_i$ —每一岩土条底面与水平面的夹角;

$\theta_i$ — $F_i$  与  $F_i + \Delta F_i$  作用点连线的夹角。

### 3 工程实例

为对比两种工程常用的滑面搜索方法计算结果, 结合某河道工程实例进行对比分析。

#### 3.1 工程概况

某河道地表高程 10.5 ~ 58.0 m, 地形呈斜坡加平台, 地形坡度 10° ~ 30°。地表为人工堆积建筑垃圾、冲积粉质粘土及残坡堆积粉质粘土夹碎石, 厚 0.3 ~ 11.8 m。下覆基岩为象山群石英砂岩、粉细砂岩及范家塘组砂岩、泥岩夹薄层煤层, 岩层走向 40° ~ 60°, 倾向 310° ~ 330°, 倾角 34° ~ 46°。

#### 3.2 计算模型

根据地质勘查资料 (表 1) 和边坡设计断面几何条件, 建立计算模型, 边坡左边界距离坡脚 50 m, 左边竖直高度为 50 m, 右边界距离坡顶 50 m, 右边界竖直高度为 75 m, 模型总宽度为 165 m, 坡脚高程 3 m, 坡顶高程 25 m, 坡比为 1 : 2.5, 在 8 m 高程加设 2.5m 平台, 如图 5。

#### 3.3 分析结果

采用模式搜索法和单纯形搜索法搜索到的

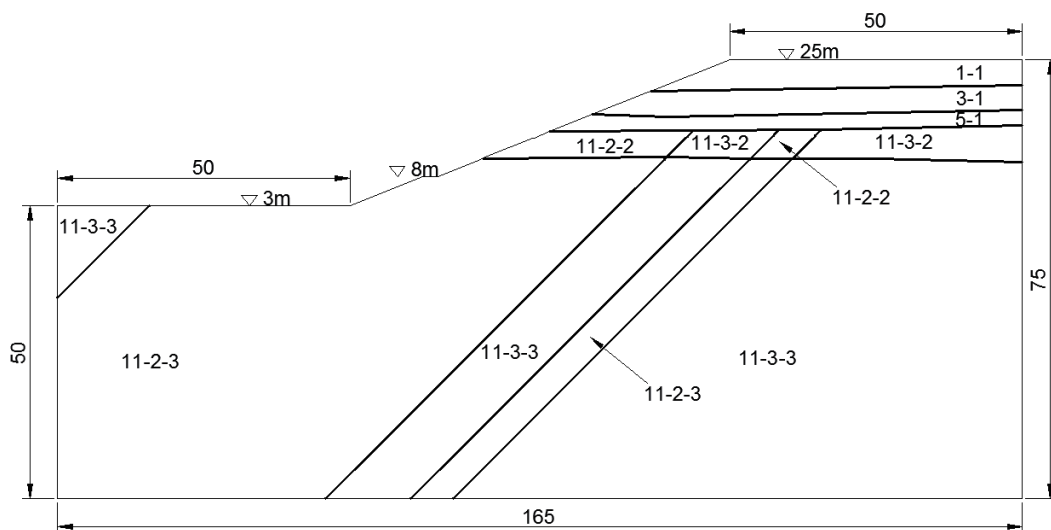


图5 工程边坡型计算断面

滑面, 及其相应安全系数结果如图6所示。可知,

#### 4 结论

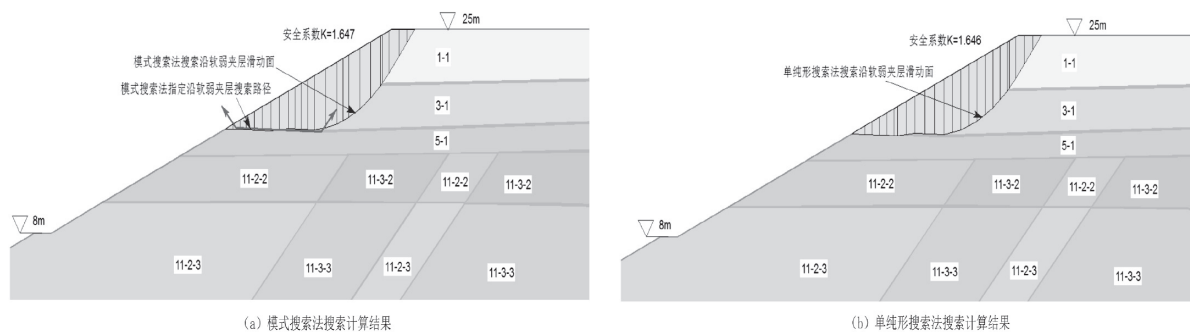


图6 两种滑面搜索方法对比分析

表1 岩土层物理力学指标

岩土层	天然重度 (KN/m <sup>3</sup> )	C (kPa)	$\varphi(^{\circ})$
1-1	18.9	25	12
3-1	18.7	20.1	14.8
5-1	19.7	40.7	17.4
11-2-2	24.5	180	30
11-2-3	25.4	160	27
11-3-2	24.5	170	29
11-3-3	25.4	300	38

两种搜索方法在搜索到的滑面差距很小, 安全系数上单纯形法略低于模式搜索法, 但差距也只是0.001, 可以忽略不计。

鉴于以上工程应用结果, 对于岩层分布倾角较小的岩质边坡, 采用“模式搜索法”与“单纯形法”进行计算的结果非常接近, 故此两种方法均可作为此类岩质边坡潜在滑弧的分析方法。

#### 参考文献

- [1] 赵洪波. 边坡非圆弧潜在滑动面全局优化的新方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2006(22): 3725-3729.
- [2] 郑建华, 王世梅. 搜索土质边坡折线临界滑动面的方法[J]. 灾害与防治工程, 2006(01): 39-43.
- [3] 李亮, 迟世春, 郑榕明, 等. 土坡非圆临界滑动面求解的混合搜索方法[J]. 中国公路学报, 2007, 20(6): 1-6.
- [4] 宋子岭, 杨添, 赵立春. 含多层软弱夹层的顺向岩质边坡稳定性评价方法对比分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2016, 02: 20-25.

(责任编辑: 王宏伟)