

文章编号: 1000-7598-(2000)03-0256-04

边坡稳定验算中全面搜索的一种新方法

马忠政, 祁红卫, 侯学渊

(同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘要: 提出圆弧滑动法中一种新的搜索方法——三向搜索法。圆弧滑动法可以利用其共性而不局限于一些经验假设, 在坡顶线及其下部各道坡线间都存在一个安全系数最小的圆弧, 针对这些圆弧的寻找, 给出了具体办法, 并给出几个计算实例。

关键词: 圆弧滑动法; 二分法; 三向搜索; 破弧; 多级放坡

中图分类号: TU 457 文献标识码: A

作者简介: 马忠政, 男, 1971 年出生, 博士, 工程师, 从事高层建筑与地基共同作用、城市地下空间开发利用及土木工程软件开发研制等方面研究。

A new roundly search method for slope stability checking

MA Zhong-zheng, QI Hong-wei, HOU Xue-yuan

(Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract A new search method of arc slipping method, which is called three orientation search method in the article, is given. It is pointed out that there always exists an arc with the least safe coefficient between one slope top line and each of those lines which is below the slope top line. In order to find all these arcs, a concrete method is given, and finally some examples are described.

Key Words: arc slipping method; two-division method; three-orientation searching method; broken arc; multi-level slope

1 前 言

在基坑施工中, 放坡是一种重要形式, 其最重要的问题是边坡稳定问题。边坡稳定问题是一个非常复杂的问题, 从滑动面来说, 有圆弧假设、折线假设及任意函数曲线假设; 从介质来说, 有软粘土、砂土、粉土及中间土以及这些土层的非常丰富的自然存在组合; 从应力方法上说, 有总应力法与有效应力法, 有考虑渗流力与不考虑渗流力; 从划分方法上说, 有简单瑞典条分法与 BISHOP 法。但应用较广泛的方法来说, 圆弧滑动法还是最主要的方法, 在全国规范和一些地区性规范中, 都有规定。以往手工验算或计算软件还不发达时, 人们努力寻找一些规律, 比如粘性土边坡中采用临界圆心^[1] (由坡脚处的一个经验角度 α 与坡顶的一个经验角度 β 共同确定临界圆心) 以及表示 $c-\varphi$ 土的普通情况的 Taylor 曲线等, 试图降低搜寻安全系数最小的滑弧面的工作量^[2], 但计算精度不高, 并且可能漏掉危险滑弧面。随着计算机技术的发展和计算机软件的开发研制, 计算机计算代替手工劳动, 边坡稳定验算应不再注重这些经验划分, 而应更注重边坡的共性, 即滑动面的几何特点、下滑力 S 与抗滑力 R 的力学特点及岩土水介质的物理特点, 从而将边坡稳定验算统一于普遍的计算模式, 使计算验证非常方便、全面、快捷、统一。

的方式找出放坡尤其是多级放坡的所有的危险滑动面。下面介绍该方法 (对于采用其他滑动面假设的, 可类似处理)。

2 三向搜索圆弧圆心

为了便于陈述, 对于简单的一级放坡, 坡顶线设定为 1 号坡线, 坡面为 2 号坡线, 坡脚线为 3 号坡线。对于 n 级放坡, 则从第一级坡到第 n 级坡上的各线分别为 1 号, 2 号, i 号, $\dots$ $(2n+1)$ 号坡线, 第 i 级放坡的坡顶线为 $(2i-1)$ 号, 坡脚线为 $(2i+1)$ 号, 坡面线为 $2i$ 号, 见图 1, 图 2。

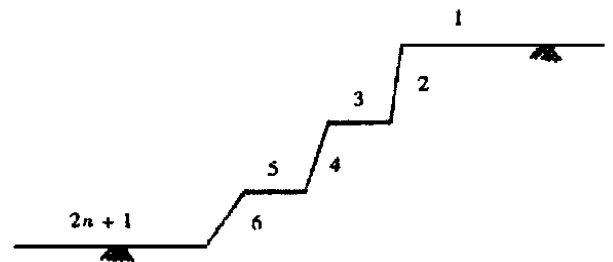


图 1 边坡线编号
Fig. 1 Serial number of the slope line

收稿日期: 1999-08-09.

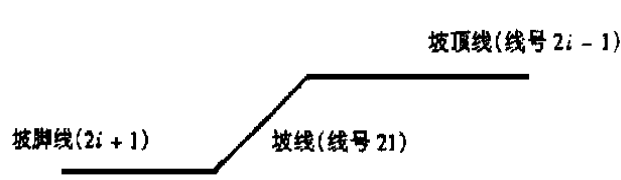


图 2 第 i 级坡线编号
Fig. 2 Serial number of the i th level slope line

圆心搜索的最常用的数学方法是二分法。其原理如下:

设有函数 $F(x)$ 在领域 $x \in [a, b]$ 上连续且只存在一个极值, 则极值求法如下:

(1) 设该区间的中点 $x_1 = (a + b)/2$, 用等分段值 $s = \text{abs}(b - a)/4$ 将该区间四等分, 另两个等分点值 $x_2 = x_1 + s, x_3 = x_1 - s$ 。

(2) 求三个点对应函数值分别为 $F(x_1), F(x_2)$ 和 $F(x_3)$ 。

(3) 令三个函数值中最小值为 $F_{\min}$, 记为 $F_{\min} = \min(F(x_1), F(x_2), F(x_3))$, $F_{\min}$ 对应的 x 记为 $x_{\min}$ 。

(4) 三者的平均值 $F_{\text{ave}} = (F(x_1) + F(x_2) + F(x_3))/3$ 。

(5) 当 $|(F_{\min} - F_{\text{ave}})/F_{\min}| < u$ (精度值), 则 $F_{\min}$ 为所求, 否则, 令 $a = x_{\min} - s, b = x_{\min} + s$, 回到 (1) 重新计算。

要对圆弧进行周密的搜索而不漏掉任何危险圆弧, 周密的做法是认为圆弧下端点可以落在该级坡顶线以下的任一级坡线上, 而圆弧上端点则落在该级坡的坡顶线上, 这样可以找出所有的危险滑弧。

为此, 作者提出“三向搜索”方法, 采用二分法, 沿三个方向搜索圆心, 见图 3 示意。设圆弧的下端点落在坡面线(或坡脚线)上, 上端点落在坡顶线上。利用二分法沿三个方向搜索圆心: 第一向是下端点沿坡面(或坡脚)方向, 第二向是上端点沿坡顶线方向。如果端点在第一条线或最后一条线上, 其搜索范围可设为基坑深度的若干倍, 落在其他线上, 其搜索范围则是该线长度; 第三个方向则是沿两个端点连线(弦线)的中垂线方向, 搜索范围是端点连线上部的中垂线。

3 “破弧”排除

在搜索中, 还要考虑搜索进程中的特殊情况, 即滑动圆弧线与坡线相交的情况, 作者称之破弧, 如图 4 所示, 这样的滑弧面是不可能的, 应以排除。为了排除破弧, 第三向搜索范围不是前述的上部中垂线的全部, 而是能够排除破弧的部分线段。

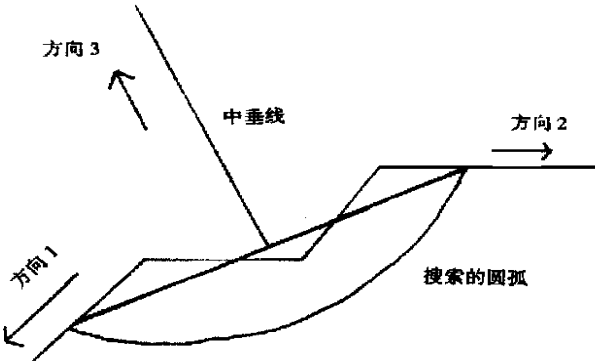


图 3 “三向搜索”示意图
Fig. 3 The sketch map of three orientation searching method



图 4 破弧示意图
Fig. 4 Sketch map of broken arc

通过如下处理方法, 可以排除破弧: 连接可能的圆弧两个端点成弦线, 找出所有在弦线下方的坡脚拐点(不是坡顶点), 如图 5 中 AB 连线下方的 C, D, K 等点, 分别连接下端点(A 点)与这些点的连线, 如 AC, AD, AK , 作这些连线的中垂线与弦线(AB) 的中垂线的交点, 如 F_1, G_1, H_1 , 求出这些交点中最靠近弦线中点(E) 的点, 如 H_1 点, 则该两点间的中垂线部分(EH_1) 为第三个方向的搜索范围, 在此范围内搜索将可排除所有的破弧。

4 坡脚两边的圆弧搜索

在一些研究资料里经常有关于滑弧面或通过坡脚、或正好通过坡址、或通过坡面的经验报道。比如, 对于均质粘土, 认为其最危险滑弧线通过坡址。但是, 这样做些经验规定, 可能会漏掉危险滑裂面, 因为理论上, 滑动面坡顶线与下方任意坡线之间都存在无数滑弧线, 其中在该两线间都有一个安全系数最小的滑弧, 如图 6。统一的形式是以坡脚(图 5 中的 K, C, D 等点) 为分界点, 在其左右两边都找出一个安全系数最小的圆弧。

5 安全系数最小的滑弧

如前所述, 第 i 级放坡从 $(2i - 1)$ 号坡顶线到该号

线以下的各号线 $2i+k(k \geq 0, \text{为整数})$ 都存在着圆弧群, 其中安全系数最小的滑弧即为该两个坡线间的最危险滑弧。从 n 级放坡的所有坡顶线向下级坡线搜索, 共可以找到 $n(n+1)$ 个这样的滑弧。关于这一点, 从已有的许多放坡计算的程序来看, 往往没有找全, 而漏

掉的可能正好是最危险的圆弧。如图 7 所示, 就是某个市场软件验算多级放坡的结果, 从中可以看出, 二级坡顶非常危险, 但其滑弧被漏算了。笔者提出的方法则是对每个坡顶进行搜索, 因而可以全部找出安全系数最小的滑动面而无漏算。

6 实 例

采用圆弧滑动法, 编制多级放坡 (包括 1 级) 整体稳定计算程序, 可以对任意级的放坡进行验算 (均采用总应力法), 找出所有安全系数最小的滑动面。下面举几个实例。

例 1 土层 2 层, 见表 1。

表 1 土层信息表

Table 1 The information of soil layers				
土层 编号	土层顶坐标 m	容重 $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	摩擦角 ($^{\circ}$)	粘聚力 kPa
1	0	19.3	15	20
2	2.5	18.0	35	100

放坡形式如图 8。求各坡线上的安全系数最小滑弧。

计算结果见图 9 和表 2。从结果可以看出, 由于在坡半腰土质发生较大的变化, 坡址左右两个滑弧差距很大, 滑弧 1 的下端点正好位于土层分界处。

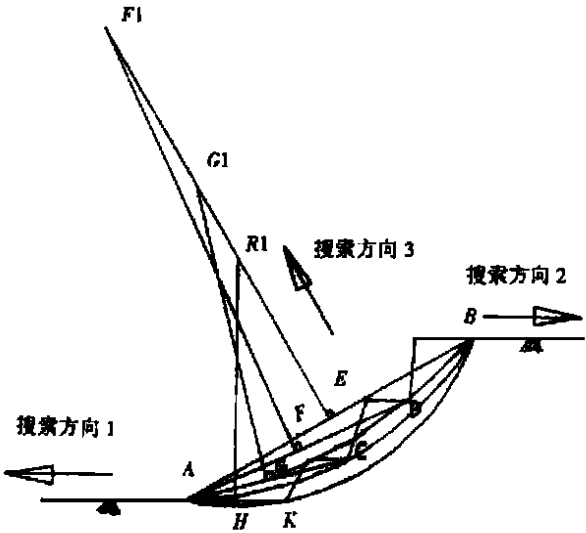


图 5 排除“破弧”示意图
Fig. 5 Sketch map of eliminating broken arcs



图 6 坡脚两边均搜索一安全系数最小的圆弧
Fig. 6 Arcs with the minimum safe factor beside slope feet

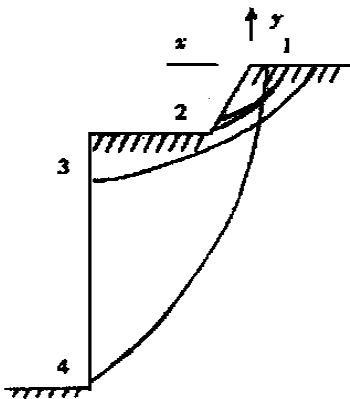


图 7 二级坡顶中漏掉的危险圆弧
Fig. 7 The missed dangerous arc in the second level slope

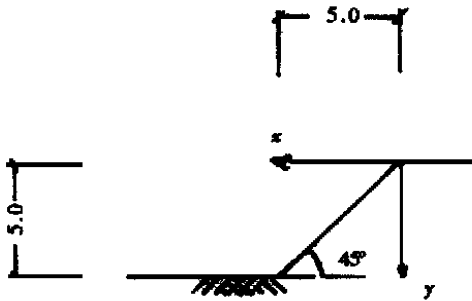


图 8 一级放坡
Fig. 8 First level slope

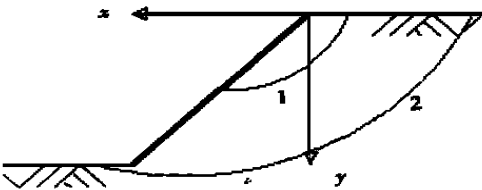


图 9 滑弧线
Fig. 9 Sliding arc lines

表 2 安全系数、圆心和半径

Table 2 Safe factors center and radius

圆弧 编号	圆弧安全 系数 k	圆心 x_c 坐标 m	圆心 y_c 坐标 m	圆弧半径 r m
1	3.061	2.30	-1.15	3.65
2	4.934	3.64	-3.90	9.19

例 2 土层 2 层, 见表 3。

表 3 土层信息表

Table 3 The information of the soil layers

土层 编号	土层顶坐标 m	容重 $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	摩擦角 ($^{\circ}$)	粘聚力 kPa
1	0	19.3	26	6
2	10	18	12	15

放坡如图 10。求各坡线间安全系数最小的滑弧。计算结果如图 11 和表 4。从结果可以看出, 坡址左右两边的滑弧线非常接近。

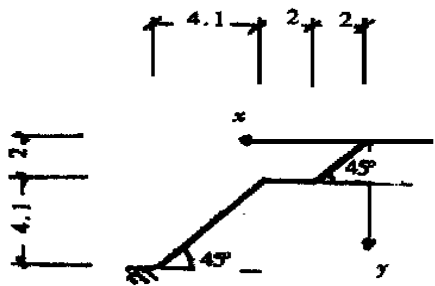


图 10 二级放坡
Fig. 10 Second level slope

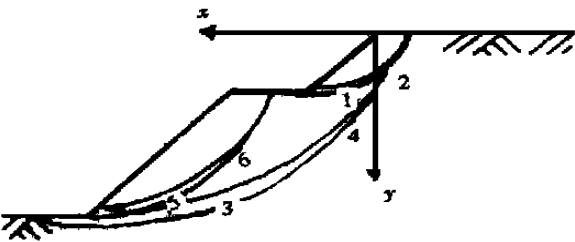


图 11 滑弧线
Fig. 11 Sliding arc lines

表 4 安全系数、圆心和半径

Table 4 Safe factors center and radius

圆弧 编号	圆弧安全 系数 k	圆心 x_c 坐标 m	圆心 y_c 坐标 m	圆弧半径 r m
1	1.804	1.56	-0.72	2.61
2	1.783	1.58	-0.39	2.56
3	1.316	7.29	-2.87	8.73
4	1.317	7.48	-2.40	8.77
5	1.271	7.90	0.80	5.05
6	1.283	7.92	1.20	4.99

利用文中的方法, 可以完全地找到坡线间所有的安全系数最小的滑弧, 由于抓住了滑弧的共性, 不利用一些经验结论。通过计算还可以看到, 在土质比较接近的粘土层中, 坡脚附近确实是最危险滑弧易经过的地方, 且这是经过最一般的搜索, 接近粘土层滑坡的经验结论, 但对于在土质变化较大的土层中, 则没有这样的规律(见例 1)。还可以看到, 在坡脚两边均存在一个安全系数最小的滑弧面, 如果这样的滑弧实际上可能就是一个, 则计算表现为他们在坡脚附近非常接近, 甚至重合, 安全系数也几乎相等(见例 2)。

7 结 语

所有的边坡稳定验算问题都可归结为安全系数最小的滑动面的求解问题。不仅要求解出每个滑动面的几何参数, 更重要的是找出所有的这样的滑动面, 无一遗漏, 才能保证边坡的绝对安全, 对于多级放坡更是如此。文中提出的方法与程序较好地解决了圆弧滑动法中的全面搜索问题, 从而可以保证边坡的安全。当然, 如前言所述, 滑动面形式存在非常多的可能性, 但无论如何, 安全系数最小的滑动面与坡线必然有两个交点, 因此存在的最危险滑动面的数目及搜索方向同样可用此方法处理。

参 考 文 献

1 陈昶颐, 叶书麟. 基础工程学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1990. 353~371.
2 胡中雄. 土力学与环境工程学[M]. 上海: 同济大学出版社, 1997. 270~287.