

应用模式搜索法寻找最危险滑动圆弧*

Determination of the most dangerous slip surface with pattern search method

莫海鸿 唐超宏 刘少跃
(华南理工大学建筑工程系, 广州, 510640) (广东省水利水电机械施工公司, 广州, 510370)

文 摘 基于圆弧滑动面的假定, 提出了一种运用模式搜索法确定边坡最危险滑动面及其对应的最小安全系数的方法, 突破了传统方法在搜索最危险滑动面时必须划定圆心搜索范围的束缚, 从而提高了边坡稳定性分析的可靠性。

关键词 模式搜索法, 边坡稳定性, 最危险滑动面, 最小安全系数

中图法分类号 TU 43

作者简介 莫海鸿, 男, 1955 年生, 1988 年获博士学位, 1988 年~ 1990 年在同济大学做博士后研究, 现为华南理工大学建筑工程系教授, 主要从事岩土工程的研究和教学。

Mo Haihong Tang Chaohong

(Department of Civil Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, 510640)

Liu Shaoyue

(Guangdong Hydro- Power Mechanical Construction Corp, Guangzhou, 510370)

Abstract Based on the assumption of circular slip surface, the pattern search method was used to determine the most dangerous slip surface and the corresponding minimum safety factor. The new method smashes the trammels of the traditional methods with which a range of the center of the circle must be given to determine the most dangerous slip surface. The new method raises the reliability of the slope stability analysis.

Key words pattern search method; slope stability; the most dangerous slip surface; minimum safety factor.

1 前 言*

由凝聚性土类组成的均质或非均质土坡, 一般假定它的稳定问题是平面应变问题, 滑裂面是个圆柱面^[1]。用极限平衡理论分析边坡稳定性, 无论用 Bishop 法, Janbu 法或 Spencer 法, 关键在于确定最危险滑动面及其对应的最小安全系数。如何较快地确定最危险滑动面圆心的大概位置, 国内外的许多学者都作了大量细致的研究。费伦纽斯(Fellenius)提出的经验方法^[2]得出对于均匀粘性土, 最危险滑动面一般通过坡脚。在国内, 成都科技大学水利系的张天宝^[3]在瑞典法的基础上, 通过数学推导, 建立了简单土坡稳定安全系数 F_s 与圆心坐标 x, y 及滑弧半径 r 之间的函数关系, 又根据多元函数的极值条件, 导出了使 F_s 值为极小时需要满足的极值条件方程组 $\frac{\partial F_s}{\partial x} = 0, \frac{\partial F_s}{\partial y} = 0$ 及 $\frac{\partial F_s}{\partial r} = 0$ 。用数值解法解算这组方程组, 即可求出最危险滑动面的位置和相应的 $F_{s, \min}$ 。此外, 大量的研究结果表明, 均质边坡的最危险滑动面圆心一般位于过边坡中点的铅直线和坡面中垂线之间。搜索最危险滑动面圆心、半径, 最早使用图解法, 计算机出现后, 最初采用穷举法, 后来采用二分法^[4], 最近又出现了遗传进

化算法^[5]等方法。虽然这些方法都有一定理论依据, 在工程实践中也得到了广泛的应用, 但这些方法的局限性也是显而易见的。

穷举法受列举圆心、半径的数量多少的影响。列举数量少, 精度就低, 列举数量多, 则计算次数会大得惊人, 况且, 要实现真正的穷举也是不可能的; 二分法有可能陷入局部极小值; 遗传进化算法的理论则较为复杂。而且, 虽然二分法及遗传进化算法较之穷举法有了很大改进, 但仍需要计算者给定圆心搜索区域。当给定的圆心搜索区域不准确, 不包含真正的最危险滑动面圆心时, 以上方法均不能在给定的圆心搜索区域以外进行搜索, 也就无法求出真正的最危险滑动面及其对应的最小安全系数。这正是以上方法的最大缺陷。为此, 本文提出用模式搜索法^[6]搜索最危险滑动面及其对应的最小安全系数。该方法采用最优化技术, 无需计算者给定圆心搜索区域, 即可由初值开始自动搜索最危险滑动面及其对应的最小安全系数, 初值由程序自动给出。此法所求的结果为全局最优解。

2 模式搜索法

模式搜索法^[6]是一种最优化计算方法, 用于求 n

搜索出使 F_s 最小的半径;再给出新的圆心,求出新的使 F_s 最小的半径。按此步骤,反复求圆心和半径,直到找出最小的 F_s 。

本文的方法还可以应用到其它的计算方法,如 Spencer 法等。

4 计算实例以及与二分法的比较

现以文献[4]中图 5- 15 的算例为例进行计算分析。土坡的参数及荷载如图 2 所示,各土层计算参数如表 1。

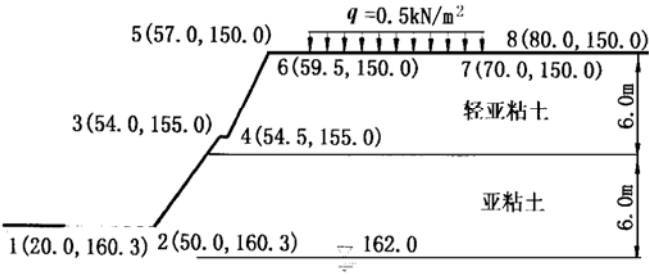


图 2 边坡及地基剖面图

Fig. 2 Section of slope and foundation

表 1 各土层计算参数

Table 1 Parameters of soil layers

土层	土类	重度 γ /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	粘聚力 c /kPa	内摩擦角 φ /($^\circ$)
I	轻亚粘土	19.9	28.0	18.0
II	亚粘土	20.0	25.0	22.0

本例在文献[4]中原以简化 Bishop 法计算,为便于对比分析,本文也以简化 Bishop 法进行计算。分别用模式搜索法及二分法进行搜索,采用二分法时,给出 3 个不同的圆心搜索范围(第 1 个圆心搜索范围与文献[4]相同);采用模式搜索法时,给出 8 个不同的圆心坐标初值,计算结果分别列于表 2 和表 3。

表 2 二分法计算结果

Table 2 Results computed with the equinox method

圆心搜索范围/m				危险滑弧 心横坐标 X_C/m	危险滑弧 心纵坐标 Y_C/m	危险滑弧 半径 R_C/m	安全 系数 F_s
$X_{\min}$	$X_{\max}$	$Y_{\min}$	$Y_{\max}$				
10.0	60.0	50.0	120.0	45.938	117.813	46.46	2.53
20.0	55.0	70.0	110.0	40.234	99.375	63.86	2.80
00.0	70.0	40.0	155.0	48.125	133.438	64.45	2.38

由表 2 可见,对于不同的圆心搜索范围,二分法的计算结果,最危险滑动面及其对应的最小安全系数变化较大,说明该法计算结果与圆心搜索范围有很大关系,而且当圆心搜索范围没有包含真正的最危险滑动面圆心时,由于无法在给定的圆心搜索范围以外搜索,因而不能得到真正的最危险滑动面及其对应的最小安

全系数。

表 3 模式搜索法计算结果

Table 3 Results computed with the pattern search method

编号	圆心初始坐标 /m		危险滑弧圆 心横坐标 X_C/m	危险滑弧圆 心纵坐标 Y_C/m	危险滑弧 半径 R_C/m	安全 系数 F_s
	X_0	Y_0				
1	48.0	138.0	48.457	137.664	29.15	2.37
2	48.0	110.0	48.457	137.664	29.15	2.37
3	48.0	160.0	48.457	137.664	29.15	2.37
4	35.0	138.0	48.457	137.664	29.15	2.37
5	65.0	138.0	48.457	137.664	29.15	2.37
6	30.0	40.0	48.457	137.664	29.15	2.37
7	65.0	35.0	48.457	137.664	29.15	2.37
8	35.0	158.0	48.457	137.664	29.15	2.37

用模式搜索法计算无需给定圆心搜索范围,即可以自动搜索最危险滑动面及其对应的最小安全系数。为了验证本方法的有效性,给出 8 个不同的圆心初值,从表 3 的计算结果可以看到,无论初始点在最终结果附近(见表中的 1 点),还是在最终结果的上、下、左或右(见表中的 2, 3, 4, 5 点),均可以找到最佳的结果。即使给出的初始点离最佳点较远,是一些极不合理的点(见表中的 6, 7, 8 点),用本文的方法同样可以找出最危险的滑动圆弧,说明用本文的方法不会陷入局部极小值中。

从以上的计算结果,可以看到本文方法的合理性和优越性。为了使用方便和减少迭代计算次数,笔者根据前人的研究成果给定圆心的初值,并编在计算程序中。计算时只需输入边坡参数和土层参数即可。本例给出若干圆心初值,仅为验证圆心初值与最终计算结果无关。

另外,通过计算分析,发现计算结果与分条数有关。只有当分条数达到某一数值时,安全系数才能够收敛于同一点,此时的分条数才是恰当的。分条数太少时,有可能求出安全系数 F_s 值相同的若干对圆心和半径。当分条数足够多时,本文的方法求出的圆心和半径是唯一的,也就是说,一定能搜索出最危险滑动面。具体的分条数,应根据具体土坡的几何参数和土层参数确定。在上面的例子中,当整个计算域分条数为 100 时(最危险滑动圆弧段内分条数为 75 条),即可得到唯一的全局最优解;而当计算域分条数为 20 条时,不同的初始点会求得具有相同最小安全系数 F_s 的若干对圆心和半径,这些圆弧的位置与唯一解非常接近,安全系数与唯一解的安全系数相差不到百分之五。

考察土层情况较复杂的边坡,各土层计算参数见

表 4, 计算结果如图 3 所示。

表 4 各土层计算参数
Table 4 Parameters of soil layers

土层	土类	重度 γ /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	粘聚力 c /kPa	内摩擦角 φ /($^\circ$)
I	粉土	19.6	12.0	22.4
II	粉土	19.8	17.0	25.8
III	粉质粘土	19.6	15.0	29.2
IV	粉土	20.1	21.0	31.3
V	粉土	20.0	18.0	32.8

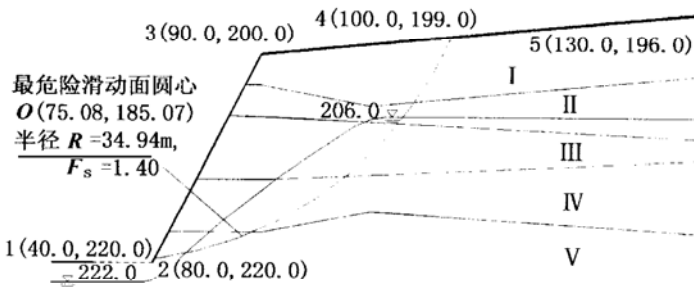


图 3 边坡及土层剖面图
Fig. 3 Section of slope and soil layers

本例中仍以简化 Bishop 法计算稳定安全系数, 采用模式搜索法搜索最危险滑动面。

计算时圆心初值分别选取 $A(75, 185)$, $B(75, 160)$, $C(75, 200)$, $D(95, 185)$ 及 $E(55, 185)$ 等数个较分散的点, 整个计算域分条数为 200 时(最危险滑动圆弧段内分条数为 61 条), 可以得到唯一的最小安全系数及其对应的滑动圆弧。从计算结果来看, 即使对于如此复杂的土层分布情况, 用本文的方法同样可以搜索出唯一的全局最优解。

5 结 语

本文引入了模式搜索法来确定边坡最危险滑动面及其对应的最小安全系数。模式搜索法是一种成熟的最优化计算技术, 可用于求解 n 维极值问题。笔者把安全系数视为圆心坐标和滑弧半径的函数, 将圆弧滑动法与模式搜索法结合, 用求函数极小值的方法来推求最危险滑动圆弧的圆心和半径。文中通过一个实例将模式搜索法与二分法进行了比较, 说明了用模式搜索法无需给定圆心搜索范围, 即可自动搜索出最危险滑动面的位置, 突破了传统方法在搜索最危险滑动面时必须划定圆心搜索范围的束缚。最重要的是, 提高了边坡稳定性分析的可靠性。

参 考 文 献

- 1 华东水利学院土力学教研室. 土工原理与计算. 北京: 水利电力出版社, 1979
- 2 Fellenius W. Calculation of stability of earth dams. In: Transactions of the 2nd Congress on Large Dams. Washington D C, 1936, 4
- 3 张天宝. 土坡稳定分析圆弧法的数值解研究. 成都工学院学报, 1978(1, 2)
- 4 江见鲸, 宋昆仑, 傅德炫等. 土建工程常用微机程序汇编. 北京: 地震出版社, 1992
- 5 肖专文, 张奇志, 梁力等. 遗传进化算法在边坡稳定性分析中的应用. 岩土工程学报, 1998, 20(1): 44~ 46
- 6 席少霖, 赵凤治等. 最优化计算方法. 上海: 上海科学技术出版社, 1983
- 7 克列因·Γ K. 散体结构力学. 北京: 人民铁道出版社, 1960
- 8 Bishop A W. The use of the slip circle in the stability analysis of slope. Geotechnique, 1955, 5(1)
- 9 Bishop A W, Morgenstern N R. Stability coefficients for earth slope. Geotechnique, 1960, 10(4)