

基于弦高控制变量的边坡稳定分析方法

张小稳¹, 张晓芳², 李国英¹

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2. 南京市水利规划设计院有限责任公司, 江苏 南京 210006)

摘要: 针对传统圆弧法边坡稳定分析中控制变量取值范围难以确定的问题, 提出以弦高及上下交点 X 坐标值作为圆弧的控制变量, 分析了各控制变量与安全系数之间的关系, 据此提出筛选法搜索最危险滑弧, 并通过算例进行了验证.

关键词: 边坡稳定; 圆弧法; 控制变量; 全局搜索

中图分类号: TU413.62

文献标识码: A

文章编号: 1009-640X(2007)04-0062-04

Slope stability analysis based on arc height as control variable

ZHANG Xiao-wen¹, ZHANG Xiao-fang², LI Guo-ying¹

(1. *Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*; 2. *Nanjing Water Conservancy Planning and Design Institute, Ltd., Nanjing 210006, China*)

Abstract: To deal with the problems that boundaries of control variables are difficult to determine in traditional slope stability analysis with circular sliding surface method, a new method is put forward in which arc height and X values of upper and lower points of intersection are regarded as control variables of arc. The relationships between each control variable and safety factor are analyzed. Based on these analyses, a global optimization method is presented which is validated through some engineering examples.

Key words: slope stability; circular sliding surface method; control variable; global optimization method

无论是基于极限平衡理论, 还是以有限元理论为基础的边坡稳定分析, 都需要解决两个基本问题, 即搜索最危险滑动面和最小安全系数. 在 20 世纪 80 年代以前, 绝大多数的研究都集中于安全系数的定义及求解, 得出了许多被广泛认可的有效的安全系数计算方法和公式. 近 20 年来, 由于禁忌技术、模式搜索、线性-非线性规划、人工智能、Monte Carlo^[1-9]等现代优化方法的广泛研究和应用, 使最危险滑动面的搜索方法取得了卓有成效的成果. 文献[10]对现有的一些主要的临界滑动面搜索方法进行了较为详细的综述. 总的来说, 各种搜索方法的优缺点主要反映在局部与整体极值、搜索效率与搜索精度之间的矛盾上.

本文针对工程界及规范中使用最多的圆弧法边坡稳定分析中最危险滑动面搜索方面存在的一些问题进行了研究, 并提出了相应的解决方法.

收稿日期: 2007-01-17

作者简介: 张小稳(1975-), 男, 河南焦作人, 工程师, 硕士, 主要从事岩土数值计算及边坡稳定加固工作.

E-mail: zxwsml@163.com

1 控制变量的选取

传统圆弧法边坡稳定分析以圆心坐标和滑动深度作为控制变量.该方法存在两个问题:①对于复杂边坡,滑裂面与边坡面左右交点坐标值的求解较为复杂和困难,且可能出现破弧;②圆心坐标取值范围难以确定.近年来有人提出以圆弧滑裂面与边坡面左右交点 X 坐标及滑裂面圆心坐标的 Y 坐标作为设计变量,较好地解决了第①个问题.但由于土坡的边坡面形状、土质力学性质以及条分法本身的复杂性,使得该方法的目标函数及约束条件都相当复杂并为隐函数^[2],因此,要了解目标面的特征是非常困难的,其目标面既可能是单峰,也可能是多峰的.

针对上述问题,本文提出以圆弧的弦高(D_s)及圆弧滑裂面与边坡面的上下交点的 X 坐标($X_{\text{upp}}, X_{\text{low}}$)为控制变量(见图1).这3个控制变量均位于边坡面以内,其几何意义更为明确,取值范围易于确定.

2 控制变量的取值范围

建立图1所示坐标系,水平 X 轴指向滑坡方向为正, Y 轴垂直向下为正. D_s 以上下交点连线中点为轴心,垂直上下交点连线为坐标轴,指向边坡内侧为正.

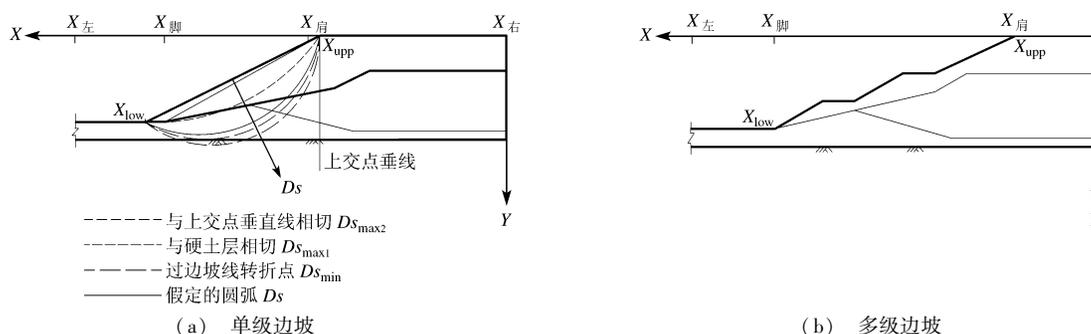


图1 边坡稳定分析计算模型

Fig.1 Calculated model of simple slope stability analysis

控制变量的取值范围就是为了保证滑弧落在边坡可能的滑弧范围以内.根据滑弧的约束条件,各控制变量取值范围为:(1)滑弧上交点高于边坡脚,下交点低于坡肩,且上交点高于下交点,即 $X_{\text{肩}} \leq X_{\text{low}} \leq X_{\text{左}}, X_{\text{右}} \leq X_{\text{upp}} \leq X_{\text{脚}}$,且 $X_{\text{low}} > X_{\text{upp}}$;(2)滑弧位于边坡内且避免破弧,即 $D_s > D_{s_{\text{min}}} > 0$, $D_{s_{\text{min}}}$ 为通过外坡面各转折点的圆弧的最大弦高;(3)滑裂面不得穿过硬土层且滑移后不出现倒坡,即 $D_s \leq D_{s_{\text{max}}} = \min(D_{s_{\text{max}1}}, D_{s_{\text{max}2}})$, $D_{s_{\text{max}1}}$ 为滑裂面与硬土层相切时的弦高, $D_{s_{\text{max}2}}$ 为滑裂面与上交点的垂直线相切时的弦高.

3 控制变量与安全系数的关系

由于 D_s 取值范围随 $X_{\text{low}}, X_{\text{upp}}$ 的变化而变化,在搜索危险滑弧过程中,本文首先对某一给定的 X_{low} 和 X_{upp} ,在 $D_{s_{\text{min}}} < D_s < D_{s_{\text{max}}}$ 范围内进行一维搜索;然后在 $X_{\text{low}}, X_{\text{upp}}$ 取值范围内进行二维搜索.为了较全面地了解边坡安全系数 F_s 随控制变量的变化情况,本文针对图1(a)和(b)所示的单级和多级边坡两个计算模型进行了计算分析.

两个计算模型得到的安全系数 F_s 等值线图见图2.可见,对于单级边坡,等值线具有同心的趋势且只有一个盆地;对于多级边坡,等值线也具有同心的趋势,但有多个极大和极小值区.分析表明,在上交点位于边坡外突点附近区域为极小值区,内凹点附近区域为极大值区.进一步考察极小值区内安全系数的分布表明,局部范围内仍出现多个极小值区域,这就是很多优化方法陷入局部极小值区的根本原因.

对于某一给定的 X_{low} 值, X_{upp} 与 F_s 的关系曲线见图3.由图3可见,坡面为单级时,该曲线较为顺滑,且为单谷;坡面为多级时,其关系曲线出现多谷.

$D_s \sim F_s$ 关系曲线(见图4)表明,对于均质边坡,曲线顺滑且为单谷;对于非均质边坡,曲线呈锯齿型。

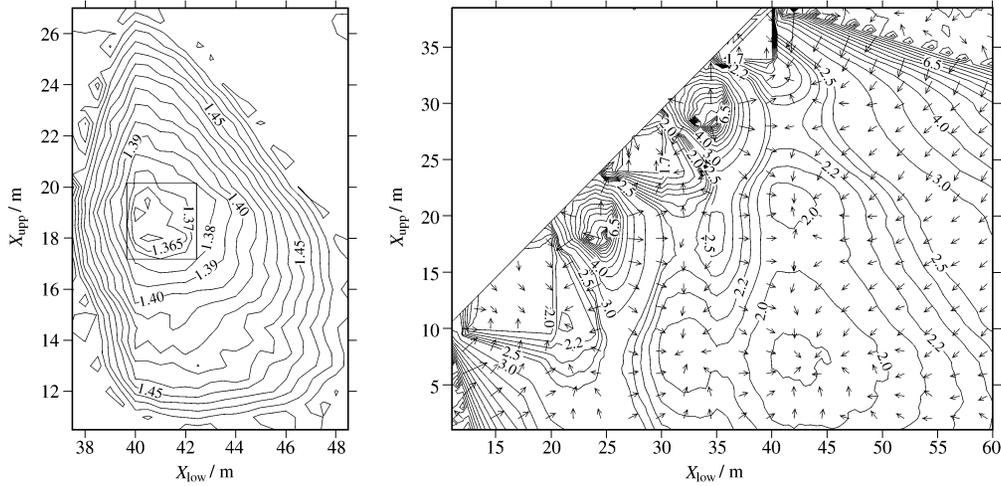


图2 安全系数等值线

Fig.2 Safety factor contours

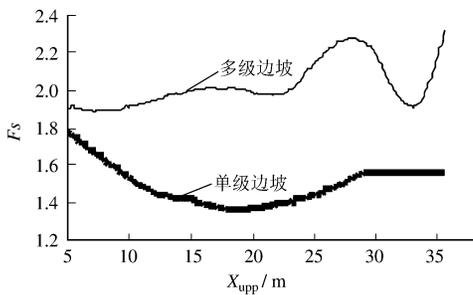


图3 $X_{upp} \sim F_s$ 关系曲线

Fig.3 $X_{upp} \sim F_s$ curves

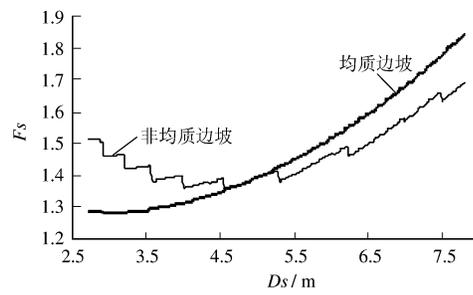


图4 $D_s \sim F_s$ 关系曲线

Fig.4 $D_s \sim F_s$ curves

4 搜索方法的选择

根据前述控制变量之间以及控制变量与安全系数 F_s 之间的关系,本文对最危险滑弧的搜索采取两级搜索的办法。

4.1 一级搜索

对于某一给定 X_{low} 和 X_{upp} ,在 $D_{s_{min}} < D_s < D_{s_{max}}$ 范围内进行一维搜索.对于均质边坡,可采用黄金分割法、二次插值法等优化搜索方法,不易陷入极小值误区;对于非均质边坡,宜采用枚举法或者几种优化方法相结合的搜索方法.本文计算采用枚举法。

4.2 二级搜索

一级搜索后的自由度 $n=2$,有多种优化方法可供选择.为了能准确得到最危险滑弧和最小安全系数,避免陷入局部极值,并要求较高的计算效率,本文引入“筛选法”进行搜索。“筛选法”分为两步:第一步,初步选择合适的步长,采用区格法计算并绘制可行域内 F_s 等值线图;该步步长若过大,则可能丢掉一些极小值区;过小则计算费时.第二步,根据 F_s 等值线图筛选若干个 F_s 极小值区,并缩小步长分别进行计算,求得全局最小的安全系数.根据作者经验,一般两步即可得到满意结果;如不满意,可重复第二步计算过程。

5 算例

选用澳大利亚计算机应用协会委托 Monash 大学设计的边坡稳定分析程序的考核题为算例.计算模

型见图5.

算例1采用均质材料,算例2采用非均质材料,材料参数见表1.算例1的裁判答案为0.991~1.000,算例2为1.385~1.390.本文采用Bishop法^[9],计算过程及结果见表2,计算值略小于裁判答案.由计算过程可以看出,程序第一步可以搜索到最危险滑弧区域附近,第二步可以得到满意的计算结果.

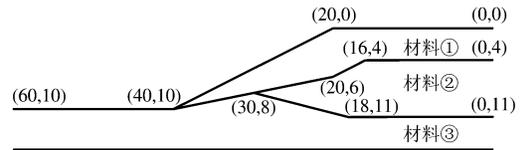


图5 算例计算模型

Fig.5 Calculated model of example

表1 算例材料参数

Tab.1 Material parameters of calculation example

计算方案	材料分类	$c / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-2})$	$\varphi / (^{\circ})$	$\gamma / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$
算例1	①	3.00	19.60	20.00
	①	0	38.00	19.50
算例2	②	5.30	23.00	19.50
	③	7.20	20.00	19.50

表2 算例计算过程及结果

Tab.2 Calculation process and results

计算方案	计算步骤	计算条件		搜索步长/m			计算结果			
		$X_{\text{low}} / \text{m}$	$X_{\text{upp}} / \text{m}$	step1	step2	step3	$X_{\text{low}} / \text{m}$	$X_{\text{upp}} / \text{m}$	D_s / m	F_s
算例1	1			2.00	2.00	0.100	40.00	19.00	2.600	0.986 300
	2	39.50~40.50	17.90~18.90	0.10	0.10	0.010	40.00	18.40	2.490	0.985 200
算例2	1			0.10	0.10	0.050	41.00	18.00	4.616	1.384 853
	2	39.00~41.00	18.00~20.00	0.10	0.10	0.01	40.60	18.20	4.569	1.380 476

6 结 语

(1)针对传统圆弧法滑弧控制变量取值难以确定的问题,选取均位于土坡范围以内的 D_s, X_{upp} 和 X_{low} 作为控制变量,几何意义明确,取值范围易于确定,且避免破弧的出现,为整体了解 F_s 的分布奠定了基础.

(2)针对现有搜索方法局部极值与整体极值、搜索效率与搜索精度之间的矛盾,应用筛选法进行最危险滑弧搜索.该方法结合能全面反映极小值区分布情况的 F_s 等值线图进行搜索,从而避免陷入局部极值.同时,第一步计算中通过选取合理的步长,有效地提高了计算效率;第二步对筛选区域缩小步长进行计算,可以保证计算精度.

参 考 文 献:

[1] 韩同春,杨晓军.禁忌搜索在确定土坡危险滑动面中的应用[J].岩土力学,2005,26(9):1414-1416.
 [2] 李文秀,杨少冲,陈二忠.高陡山区开采自然坡失稳分析的神经网络方法[J].岩土力学,2006,27(9):1564-1566.
 [3] 邹广电.边坡稳定分析条分法的一个全局优化算法[J].岩土工程学报,2002,24(3):309-312.
 [4] 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[J].岩土工程学报,1998,20(1):44-46.
 [5] 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.
 [6] 莫海鸿,唐超宏,刘少跃.应用模式搜索法寻找最危险滑动圆弧[J].岩土工程学报,1999,21(6):696-699.
 [7] 李亮,迟世春,林皋.引入退火机制的复合形法在边坡最小安全系数搜索中的应用[J].水利学报,2005,36(1):83-87.
 [8] 张鲁渝,张建民.基于Monte Carlo技术的临界滑面搜索算法的实现及改进[J].岩土工程学报,2006,28(7):857-862.
 [9] 陈祖煜.土质边坡稳定分析-原理、方法、程序[M].北京:中国水利水电出版社,2003.
 [10] 王成华,夏绪勇.边坡稳定分析中的临界滑动面搜索方法述评[J].四川建筑科学研究,2002,28(3):34-39.