

文章编号: 1000-7598-(2005)09-1414-03

禁忌搜索在确定土坡危险滑动面中的应用

韩同春, 杨晓军

(浙江大学 岩土工程研究所, 杭州 310027)

摘要: 在土坡稳定的计算过程中常采用经典的极限平衡法。对每一条可能的圆弧滑动面通过条分法计算其安全系数, 最小的安全系数就代表了土坡的实际安全系数。在此过程中, 滑动面的圆心坐标和半径可以视为安全系数的函数, 滑动面的圆心坐标和半径是自变量, 安全系数就是函数值。这样, 土坡安全系数的计算过程实际上是对安全系数这个函数求极值的过程。通过将土坡的安全系数视为圆心坐标和滑弧半径的函数, 应用连续变量的禁忌搜索技术计算土坡稳定安全系数, 提高土坡稳定计算的可靠性。

关键词: 土坡稳定; 安全系数; 禁忌搜索

中图分类号: TU 413

文献标识码: A

Application of tabu search to calculating safety factor of slope stability

HAN Tong-chun, YANG Xiao-jun

(Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Slope stability calculations are usually done in the framework of limit equilibrium analysis. Safety factors are calculated for every slip surface; and the lowest value of safety factor characterizes the safety of the entire slope. During the calculating process of slope stability safety factors are treated as function of the coordinates of the potential slip surface center and radius of the potential slip surface. By applying tabu search for continuous variables the safety factors of slope stability are calculated. The safety factor calculated by tabu search is globally optimal. Thus the reliability of slope stability calculation is improved.

Key words: slope stability; safety factor; tabu search

1 引言

土坡稳定分析是土力学的基本问题, 条分法是土坡稳定分析常用的方法, 条分法中先假定可能的滑动面, 然后将滑动面上的岩土体分成若干条, 对作用于各个土条上的力进行力与力矩的平衡分析, 从而求出极限平衡状态下的土坡稳定安全系数 F_s 。由于土条受到的未知力的个数大于静力平衡方程个数, 土坡稳定分析是一个超静定问题。工程中常对土条的受力进行简化, 这样就产生了不同的计算方法, 如瑞典圆弧法、简化毕肖普法等。

当土坡的地质条件、地下水位等情况以及相应的计算方法确定后, 土坡的稳定系数就取决于危险滑动面的位置, 也就是滑动面的位置决定了土坡的安全系数。由于在土坡稳定的计算中事先无法确定危险滑动面的位置, 只能通过试算, 通过比较不同

滑动面的安全系数来确定最危险滑动面, 从而确定土坡安全系数。因此, 危险滑动面位置的确定就成为土坡稳定分析的关键。一些学者在这方面做了大量工作, 以探索危险滑动面位置分布的规律。张天宝在瑞典圆弧法的基础上^[1], 通过数学推导建立了土坡稳定安全系数与滑动面位置之间的函数关系, 并编制了相应的图表、曲线简化了边坡设计。但对于具有不同土层或有地下水渗流等复杂情况的土体, 危险滑动面和各个土层都有关系, 有多少个土层就有可能出现多少个安全系数 F_s 的极小值区, 这样在进行危险滑动面搜索时找到真正的极小值区就成为关键。目前常用的二分法、0.618 优化搜索法由于方法本身的问题, 无法保证得到的解为全局最优解^[2]。本文将禁忌搜索技术应用于土坡危险滑动面安全系数的计算, 提高了搜索的效率, 同时使搜索得到的安全系数更具有代表性。

2 禁忌搜索

2.1 禁忌搜索简述

禁忌搜索是一个在问题解空间中搜索行走的过程, 通过在这个过程中引入禁忌技术, 也就是禁止重复以前的搜索, 避免重复搜索, 达到求解最小值的目的, 实际上是对人脑思维过程的一种模拟^[3]。禁忌搜索的开发最初是用于组合优化问题, 后来有人将禁忌搜索技术引入具有连续变量函数的极值求解。

一般的禁忌搜索过程如下^[4]:

(1) 给定一个解 x 和搜索步长 h , 解的邻域 $N(x, h)$ 定义为

$$N(x, h) = \{y \mid |y - x| \leq h\} \quad (1)$$

(2) 给定一个初始可行解和搜索步长集合 $H = \{h_1, h_2, \dots, h_n\}$, 同时开始搜索前, 要清空禁忌搜索列表。

(3) 对当前解的每一个邻域进行搜索, 即在邻域中随机移动形成一个可行解, 比较该可行解的目标值和当前最优解的目标值, 如果目标值小于当前最优解, 则将当前值更新为当前最优解, 同时将相应的搜索步加入到禁忌列表中。

(4) 如果满足终止条件则停止搜索, 否则以当前搜索到的当前最优解作为新的起点, 开始新的迭代过程。

2.2 禁忌搜索的改进

2.2.1 当前最优解的更新

在前面所述邻域的搜索中, 仅接受目标值小于当前最优值的解, 这样做的结果使算法丧失了爬山的能力(目标值高), 而只能向山下(目标值低)移动, 导致算法容易陷入局部最小值。尤其是对于具有多个土层以及有地下水渗流等复杂情况的土体。根据张天宝的研究, 土体中每个土层都会对最危险滑动面产生影响, 有多少个土层就有可能出现多少个安全系数 F_s 的极小值区, 采用常规的禁忌搜索技术很容易陷入局部极小值, 导致得到的解并不是土坡真实的安全系数, 为此要对常规禁忌技术进行改进。改进的方法就是将当前领域中具有最小目标值的解作为当前最优解, 而不管它的目标值是否小于当前最优解^[5]。

2.2.2 搜索轨迹的引入

禁忌搜索的过程也是在解的空间行走的过程, 在这个过程中后来的搜索的解空间可能会与原来已经搜索过的解空间重合, 进行了重复搜索。为此引入搜索轨迹, 记录已经搜索到的极小值路径, 当搜

索接近这些轨迹时, 该搜索步被自动禁止, 这样就提高了搜索效率。

2.2.3 搜索的局部强化

当搜索到邻域中某一可行解为极小值时, 对于连续变量函数来说, 由于搜索步长和变量(土坡稳定分析中为滑弧圆心坐标和半径)的间隔不可能取得足够细, 这样搜索到的极小值可能位于一个解的凹陷盆地的中部, 而不是凹陷的底部, 这时可采用局部邻域搜索, 对当前这个点的邻域再进行搜索, 在搜索过程中为了获取更高的解精度, 可适当缩短搜索步长和变量间距。

3 土坡稳定分析

3.1 函数表达式

这里以简化毕肖普法为例进行说明, 土坡安全系数表达式为

$$F_s = \frac{\sum \frac{1}{m_{ai}} [c_i b_i + (w_i - u_i b_i) \tan \varphi_i]}{\sum w_i \sin \alpha_i + \sum Q_i \frac{e_i}{r}} \quad (2)$$

$$m_{ai} = \cos \alpha_i + \frac{\tan \varphi_i \sin \alpha_i}{F_s} \quad (3)$$

式中 c_i 为土条 i 的凝聚力; b_i 为土条 i 的宽度; w_i 为土条 i 的重量; u_i 为土条 i 底部水压力; φ_i 为土条 i 的内摩擦角; α_i 为土条 i 底坡角; Q_i 为作用于土条 i 的水平作用力; e_i 为作用于土条 i 的水平作用力合力至滑弧圆心的距离; r 为滑弧半径。

当危险滑动面确定后, 通过土条划分应用式(2)就可以计算出土坡的安全系数, 也就是说实际上滑动面位置决定了土坡的安全系数。对于圆弧滑动, 危险滑动面由圆心 $O(x, y)$ 和半径 r 确定, 换一种说法, 土坡安全系数实际上是危险滑弧圆心和半径的函数, 即

$$F_s = f(x, y, r) \quad (4)$$

其中 $x_a \leq x \leq x_b$, $y_a \leq y \leq y_b$, $r_a \leq r \leq r_b$, $x_a \sim x_b$, $y_a \sim y_b$, $r_a \sim r_b$ 分别为圆心坐标和半径的取值范围。

这样, 土坡安全系数的计算就转化为函数求最小值问题, 该函数具有圆心坐标 (x, y) 和半径 r 三个变量, 前面所述函数在土坡土层条件复杂时可能存在多个极值区域。

3.2 计算过程

(1) 将 x, y, r 取值范围中点作为一个初始解, 代入式(2)得出安全系数的初始值, 同时也作为当前的最优解。

(2) 对当前解, 定义搜索步长集为

$$\begin{aligned} h_1 &= b - a \\ h_2 &= h_1 / 10.0 \\ h_3 &= h_2 / 10.0 \\ &\vdots \\ h_n &= h_{n-1} / 10.0 \end{aligned}$$

(a , b) 为变量的取值范围, 计算中 n 值一般取 5 或 6。

(3) 对每个步长 h_i 进行循环, 得出该邻域中的最小安全系数, 如果该值小于最优解, 则更新最优解。

(4) 满足终止条件, 停止循环。否则, 以最优解为当前解, 转入第 2 步。

这里的终止条件包括迭代次数和搜索到的最优解与当前最优解相比差值在用户定义的允许范围内。

3.3 实例分析

地下车库开挖深度为 4.2 m, 场地土层分布自上而下为: (1) 人工填土, 为碎石层, 厚 2.0 m; (2)

粘土层, 为硬壳层, 厚 1.5 m; (3) 淤泥质粘土, 厚 13.3 m。采用放坡开挖, 下面是一个典型的计算剖面。

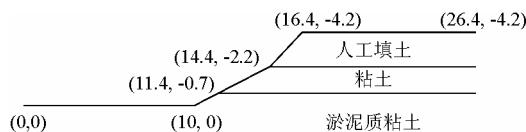


图 1 稳定计算剖面图 (单位: m)

Fig.1 Section of stability calculation(unit:m)

计算时分别采用禁忌搜索算法和 0.618 优化算法, 给出 3 个不同的圆心搜索范围, 搜索范围不断增大, 计算结果列于表 1 中。计算结果显示, 对于不同的圆心搜索范围, 禁忌搜索计算出来的安全系数基本是一致的, 而 0.618 优选法存在较大差别, 表明 0.618 优选法在某些情况下陷入了局部最优解, 而禁忌搜索计算结果则与搜索范围没有关系, 只要搜索包含了危险圆心位置, 都可以找到危险圆心位置, 是一种全局最优算法。

表 1 禁忌搜索计算结果和 0.618 优化算法计算结果比较

Table 1 Comparison of the results between calculated by tabu search and 0.618 optimal method

危险滑弧圆心搜索范围/m				0.618 优选算法				禁忌搜索			
$X_{\min}$	$X_{\max}$	$Y_{\min}$	$Y_{\max}$	危险滑弧圆心坐标/m		危险滑弧半径	安全系数	危险滑弧圆心坐标/m		危险滑弧半径	安全系数
				X_0	Y_0	r/m	F_s	X_0	Y_0	r/m	F_s
5.0	20.0	-20.0	-4.2	11.41	-9.18	10.78	1.174	12.89	-6.36	7.13	1.077
10.0	20.0	-20.0	-4.4	12.55	-8.22	9.90	1.133	13.01	-6.87	7.46	1.084
10.0	15.0	-30.0	-4.4	10.54	-9.14	10.74	1.226	12.56	-6.80	7.68	1.088

4 结 语

本文将土坡的安全系数视为危险圆弧圆心位置和滑弧半径的函数, 土坡安全系数的计算过程转化为在圆心位置和滑弧半径取值范围求解最小值, 而该函数由于土坡土层分布的复杂性, 可能具有多个局部极值区, 通常的计算方法容易陷入局部最小值区, 本文在禁忌搜索技术的基础进行改进, 将其应用到土坡稳定分析中, 提高了边坡稳定分析的可靠性。

参 考 文 献

- [1] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算 (第二版)[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996.
- [2] 马忠政, 祁红卫, 侯学渊. 边坡稳定验算中全面搜索的一种新方法[J]. 岩土力学, 2000, 21(3): 256—259.

- MA Zhong-zheng, QI Hong-wei, HOU Xue-yuan. A new roundly method for slope stability checking[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2000, 21(3): 256—259.
- [3] Fred Glover. Tabu search—wellsprings and challenges[J]. **European Journal of Operational Research**, 1998, 106: 221—225.
- [4] Nanfang Hu. Tabu search method with random moves for globally optimal design[J]. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, 1992, 35: 1 055—1 070.
- [5] Machado J M, YANG Shi-you, NI Pei-hong, et al. A common tabu search algorithm for the global optimization of engineering problems[J]. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, 2001, 190: 3 501—3 510.