

土钉支护危险滑动面搜索的混沌优化方法

祝方才¹, 彭振斌¹, 隆 威¹, 刘光辉²

(1. 中南大学 地学与环境工程学院, 湖南 长沙, 410083;
2. 株洲工学院 土木工程系, 湖南 株洲, 412008)

摘要: 将混沌优化方法运用于土钉支护危险滑动面的搜索. 基于圆弧滑动面模型, 选择滑动面与基坑的交点和滑弧所对应的圆心角为优化变量, 以安全系数为目标函数, 利用变尺度混沌优化方法建立了危险滑动面搜索的混沌优化数学模型. 以某深基坑工程为例, 利用该方法得到了土钉支护各个施工阶段的危险滑动面, 比较了不加钉、本步已加钉和本步尚未加钉 3 种工况下的安全系数. 研究表明: 对于每一施工步, 第 1 种工况安全系数最小, 第 3 种工况安全系数最大, 第 2 种工况安全系数居中; 变尺度混沌优化方法效果主要取决于搜索次数, 其次为载波次数; 混沌优化方法具有较强的稳健性, 是一种有效的危险滑动面搜索方法, 并可推广用于非圆弧滑动面搜索.

关键词: 混沌优化; 土钉支护; 滑动面; 稳定性; 稳健性

中图分类号: TU413.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-9792(2003)06-0699-05

在分析边坡稳定性时, 必须寻求最危险滑动面, 其中最主要的是确定滑动面形式. 滑动面形式分圆弧滑动面和非圆弧滑动面 2 类. 邹广电利用障碍函数法结合随机投点法得出了圆弧滑动面全局搜索的优化方法^[1]; M. A. I. Husein 则利用 Monte-Carlo 方法搜索出非圆弧面^[2]. Monte-Carlo 方法用于土钉支护稳定性分析时, 圆弧滑面作为一种推荐的滑动面形式得到广泛使用^[3], 因此, 搜索边坡最危险圆弧滑动面具有较大的工程实用价值. 近年来, 混沌优化作为一种新的优化方法得到广泛应用^[4,5], 在土坡稳定性分析中也得到应用^[6]. 在此, 作者就混沌优化用于土钉支护稳定性分析进行研究.

1 计算模型

圆弧滑动面安全系数典型的计算方法有 2 种: 瑞典圆弧条分法和毕肖普条分法. 这里采用前一种方法. 在不考虑地下水的条件下, 瑞典圆弧条分法计算公式为:

$$K = \frac{\sum (W_i \cos \alpha_i \tan \varphi_i + c_i \Delta_i / \cos \alpha_i)}{\sum W_i \sin \alpha_i} \quad (1)$$

土钉内部整体稳定性验算公式为^[4]:

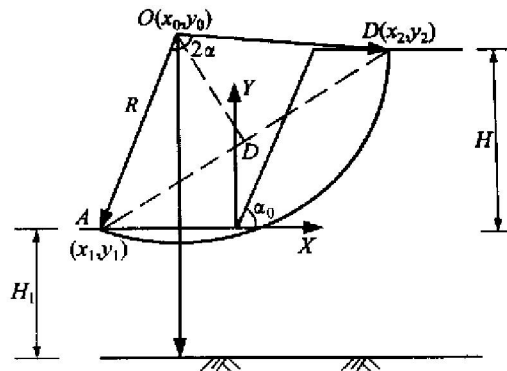
$$K = \frac{\sum [(W_i + Q_i) \cos \alpha_i \tan \varphi_i + (R_k / S_x) \sin \beta_k \cdot \tan \varphi_i + C_i (\Delta_i / \cos \alpha_i) + (R_k / S_x) \cos \beta_k]}{\sum [(W_i + Q_i) \sin \alpha_i]} \quad (2)$$

式中: W_i 为作用于土条 i 的自重; Q_i 为作用于土条

i 的地面地下荷载; α_i 为土条 i 圆弧破坏面切线与水平面的夹角; Δ_i 为土条 i 的宽度; φ_i 为土条 i 圆弧破坏面所处土层的内摩擦角; C_i 为土条 i 圆弧破坏面所处土层的粘聚力; R_k 为破坏面上第 k 排土钉的最大抗力; β_k 为第 k 排土钉轴线与该处破坏面切线之间的夹角.

2 优化模型

相对地说, 当确定滑弧与边坡面的 2 个交点坐标和滑弧半径以后, 再确定滑弧与各土层的交点较简单, 因为不考虑其圆弧是否与边坡面相交. 但采用该方法时, 还要确定圆弧半径. 半径的范围与 2 个交点的距离有关, 因而难以确定. 可用圆弧对应的圆心角反算圆弧半径, 如图 1 所示.



H_1 为基坑底部与硬层之间距离; H 为基坑深度; α_0 为坡角; R 为滑弧半径; (x_0, y_0) , (x_1, y_1) , (x_2, y_2) 分别为滑弧圆心坐标、与基坑底部和坡顶交点的坐标

图 1 圆弧滑面稳定分析

收稿日期: 2003-04-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50378097)

作者简介: 祝方才(1972-), 男, 湖北公安人, 中南大学博士后, 副教授, 从事地下工程及边坡稳定性分析研究.

2.1 优化变量的选取

据图 1, 连接滑弧与坡面的 2 个交点 A 和 B 可得线段 AB, 做 AB 的垂直平分线 OD, 那么滑弧圆心就在 OD 上, 根据 $\angle AOB$ 可以求出圆心 O 的坐标, 有

$$\begin{cases} \beta = \arctan \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}, \\ R = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} / (2 \sin \alpha), \\ x_0 = (x_1 + x_2) / 2 - R \cos \alpha \sin \beta, \\ y_0 = (y_1 + y_2) / 2 + R \cos \alpha \cos \beta. \end{cases} \quad (3)$$

通过上述计算方法可以避免在搜索过程中滑弧面与坡面不相交的情况, 因而可确定 A 和 B 点坐标, $\angle AOB$ 为优化变量.

2.2 优化变量的约束条件

由图 1 可知, 在 AB 的长度保持不变时, $\angle AOB$ 越小, 则滑弧半径 R 越大, 当 $\alpha \rightarrow 0$ 时, $R \rightarrow \infty$, 此时滑弧 AB 接近于直线; 再搜索时, 精度提高不大. 当 $\alpha \rightarrow 90^\circ$ 时, A, O, B 3 点接近位于一条直线上, 这实际上是不可能的, 计算中规定 α 在一定范围内取值.

坡面较陡时, A 点可能在坡底面上, 也可能在坡面上, 但在坡底面时, 则应考虑 A 点的横坐标范围, 可取 H 的数倍, B 点则在坡顶面范围内选取. 变量的取值范围(式中 n 为正整数)为:

- a. $-nH \leq x_1 \leq 0, y_1 = 0;$
- b. $0 < x_1 < H \cot \alpha_0, y_1 = x_1 \tan \alpha_0;$
- c. $H \cot \alpha_0 < x_2 \leq nH;$
- d. $5^\circ \leq \alpha \leq 80^\circ.$

圆心的纵坐标应该大于坡高, 当有硬层存在时, 滑弧面不能穿越硬层面, 危险滑动面与边坡的交点之间应有一定的距离, 滑动面应在土层中穿过, 约束条件可以归结为:

- a. $x_2 - x_1 > 0.01H;$
- b. $R - y_0 > H;$
- c. $x_0^2 + y_0^2 < R^2;$
- d. $y_0 > H.$

3 混沌优化模型

混沌是存在于非线性动力学系统中的一种普遍现象, 其具有初值敏感性、内在随机性和遍历性等特点, 基于混沌理论的混沌优化方法相对其他优化方法来说更易跳出局部最优解.

3.1 非线性规划模型

将约束条件用函数表示, 考虑到计算方便, 将约束条件统一化为 $g_i(x) > 0 (i = 1, 2, 3, 4)$ 的形式, 于是有:

- a. $x_2 - x_1 - 0.01H > 0;$
- b. $-y_0 + R - H > 0;$
- c. $R^2 - x_0^2 - y_0^2 > 0;$

d. $g_4(x) = y_0 - H > 0.$

可用不可微精确罚函数法对这类非线性规划问题求解^[5,7], 优化目标为:

$$F_s(P, \sigma) = K(P) - \sigma \sum_{i=1}^6 \min(0, g_i(x)). \quad (7)$$

式中: K 为安全系数; σ 为罚因子. 考虑到用混沌优化方法来求最优解, 这里取 σ 为一个较大值, 可取 50 000. 在实际编程计算时, 考虑到程序实现方便, 将约束条件第 1~ 3 项在搜索过程中予以排除.

3.2 混沌优化方法

混沌优化方法的遍历性保证得出的解为全局最优解, 但必须在有足够的混沌迭代次数下才能实现, 极端情况是在可行域实现穷举(实际上也是相对的), 此时必然得到最优解. 为保证搜索到真正全局最优解, 在实际优化计算时, 采用多次载波的方法逐步缩小搜索区域以获得最优解, 载波的次数较多时一般取为 2 次^[4]. 考虑到计算的灵活性, 可根据情况选用不同载波次数, 采用许海平等提出的计算方法^[5], 其寻优的步骤如下.

step 1 利用 logistic 映射产生混沌系列变量:

$$z_{k+1} = 4z_k(1 - z_k), z_k \in (0, 1).$$

对于 n 维变量, 则应取 n 个在区间(0, 1)内的不同初始值(不能为 0. 25, 0. 50, 0. 75), 得出 n 维混沌变量 z_i^k . 其中: k 为混沌迭代次数, λ 为载波次数; $i = 1, \dots, n; k = 1, 2, \dots$; 对于 step 1 来说, $k = 0, \lambda = 0$.

step 2 将混沌变量变换到优化问题求解空间, 设变量的取值范围为 $[a_i, b_i]$, 可得:

$$\alpha_i^k = a_i + z_i^k (b_i - a_i).$$

step 3 将混沌变量代入目标函数计算, 若 $F_s(\alpha_i^k) < F_s^*$, 则 $F_s^* = F_s(\alpha_i^k), \alpha_i^* = \alpha_i^k$.

step 4 $k = k + 1$. 若 $k > N$, 则停止搜索, 否则继续进行混沌变量迭代, 转 step 1.

step 5 搜索出一次载波的最优解之后, 缩小搜索区域, 进行下一次载波搜索, 搜索区域按如下方式变换:

$$\begin{aligned} \lambda &= \lambda + 1, \\ c_i &= \alpha_i^* - (b_i - a_i) / q, \\ d_i &= \alpha_i^* + (b_i - a_i) / q, \\ \text{if } \lambda > \lambda_0 &\text{ then stop else,} \\ \text{if } c_i < a_i &\text{ then } c_i = a_i, \\ \text{if } d_i > b_i &\text{ then } d_i = b_i, \end{aligned}$$

$$a_i = c_i, b_i = d_i, \text{ go to step 1.}$$

其中: q 为缩小因子, $q > 1; \lambda_0$ 为指定载波次数; N 为混沌迭代终止时的迭代次数.

混沌变量有 3 个, 即左、右出露点的横坐标和圆心角. 左出露点的纵坐标根据其横坐标大小确定二者关系进而求出其值, 右出露点纵坐标已定(位于坡顶). 采取多次载波的方式对危险滑动面左、右出露

点的横坐标进行搜索,对圆心角不进行搜索区间变换,不进行多次载波.

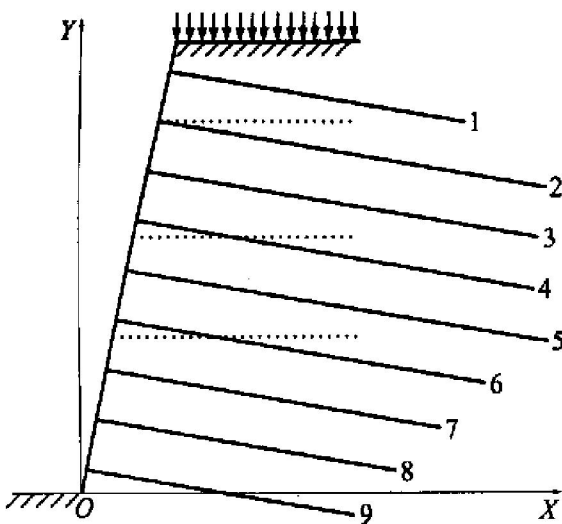
4 土钉支护危险滑动面的搜索

某深基坑采用土钉支护,其土层参数如表 1 所示.

表 1 土层参数

土层	层底标高/ m	层厚/ m	重度/ ($kN \cdot m^{-3}$)	$\varphi / (^\circ)$	c / kPa
杂填土	- 2.5	2.5	20	15	10
粘质粉土	- 6	3.5	20	23	10
粉质粘土	- 9	3.0	20	18	14
细砂	- 16	7.0	20	30	0
粘土	- 24	8.0	20	20	10

土钉倾角为 10° ,土钉钢筋是直径为 25 mm 的螺纹钢,土钉钢筋屈服抗拉强度为 310 MPa,土钉直径为 130 mm,土钉水泥浆体强度为 20 MPa,土钉水泥浆配比为 0.5,上、下共布置 9 排土钉,第 1~ 6 排钉土粘结强度为 60 kPa,第 7~ 9 排钉土粘结强度为 80 kPa,土钉水平间距和垂直间距均为 1.5 m.面层喷射混凝土为 C20,水泥、砂、碎石、速凝剂的质量比为 1: 2: 2: 0.03,喷射厚度为 100 mm,钢筋网面积为 $200\text{ mm} \times 200\text{ mm}$,保护层厚度为 30~ 50 mm,坡顶超载 20 kPa.为保证坡顶稳定,在坡顶做 1.5 m 的钢筋混凝土翻边,设计了 2 种坡度(1: 0.1, 1: 0.2),即坡角分别为 $78.7^\circ, 84.3^\circ$,基坑深为 13.75 m.这里研究前 1 种坡度,土钉布置及所建立的坐标系如图 2 所示.



图中虚线为土层分界线;直线 1~ 9 对应 Step 1~ 9

图 2 某基坑土钉布置

共分 9 步开挖,各步开挖高度和加钉高度及钉长如表 2 所示.

表 2 开挖参数

	步骤								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
H_a / m	1.5	3	4.5	6	7.5	9	10.5	12	13.75
H_b / m	1	2.5	4	5.5	7	8.5	10	11.5	13
L / m	9	12	14	12	14	12	10	9	8

注: H_a 为开挖高度; H_b 为加钉高度; L 为钉长.

土钉支护危险滑动面的确定与土钉施工情况有关,当一步开挖完成但还没有加钉时,此时段是土钉支护最危险时段,因此验算该工况的稳定性具有重要意义.为了对比,还对不加钉即素土基坑的情况进行研究.

研究表明,土钉支护危险滑动面的确定与搜索的区域、土条宽度和安全系数的计算方法等因素有关^[8],由于采用瑞典圆弧法,这里不考虑安全系数对计算结果的影响.显然宽度的取值直接影响到搜索的结果.为保证计算精度,根据搜索范围确定土条宽度,保证划分的土条数不少于 50 条.

4.1 搜索次数和载波次数对滑动面安全系数的影响

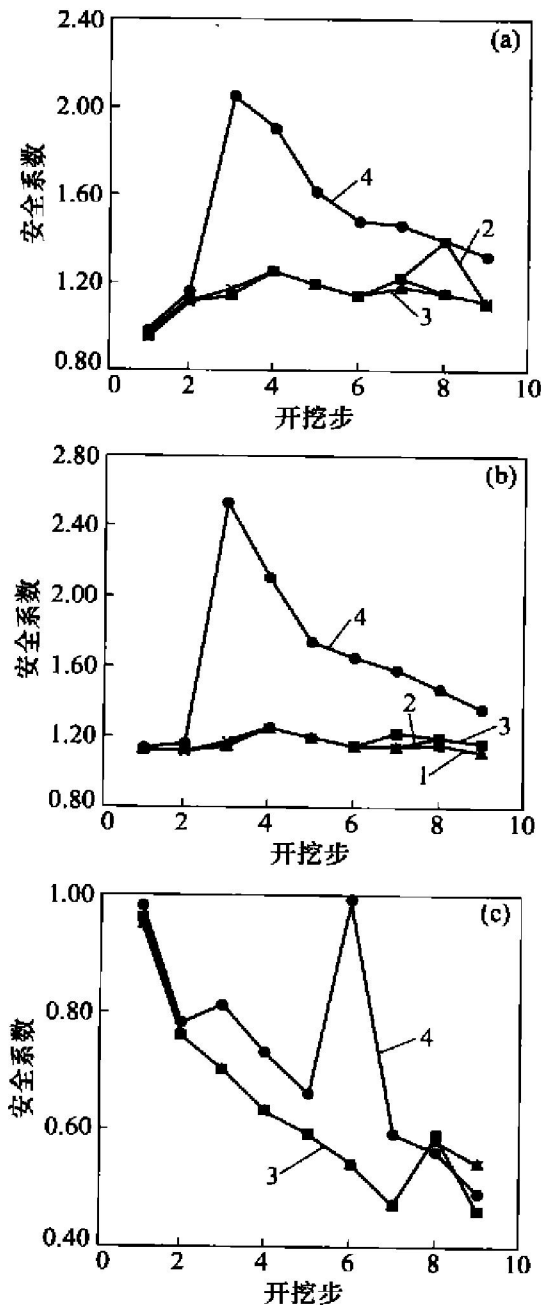
评价搜索方法优劣的因素主要有是否为全局最优解和搜索到最优解所需要的次数.计算结果表明,当混沌搜索次数达到一定值时,载波次数对于计算结果影响不大.这里给出载波次数为 10 次,搜索区间从层顶为基坑深度的 10 倍之间的区间,每一次载波的搜索次数分别取 100 000, 10 000, 1 000 和 100,这 3 种情况下的安全系数与加载步的关系如图 3 所示.

不同搜索次数下安全系数与工况的关系如图 3 所示.可见,随着搜索次数的增加,安全系数逐步收敛到某一值.显然,当次数较少时,安全系数存在较大的误差,且搜索到危险滑动面时载波的次数也增加.

需要指出的是,搜索次数达到某一较大值时,安全系数收敛到某一值.对于素土基坑,当搜索次数超过一定值($> 1\ 000$)时,随着开挖深度的增加,滑动面深度也相应增加,与常规计算结果吻合.

由计算结果得知,在加钉的情况下(含该步尚未加钉和已加钉 2 种情况),100 000 次和 10 000 次搜索得出的第 9 步开挖时(该步尚未加钉),最危险滑动面的位置差别很大,前者在坡面上部,后者靠近坡脚,而且当搜索次数很大($> 50\ 000$)时,最危险滑动面均位于坡面上部(均处于第 1 层土的范围内,没穿过土钉),与常规的计算结果不一致.为进一步考察土条宽度对滑动面安全系数的影响,采用土条宽度随搜索范围而变化的方法,在前述 2 种情况下得出前 8 步施工的危險滑动面与前面结果相同.作者认为,可能是第 1 层土的抗剪强度参数较小造成搜索最终收敛到第 1 层土内.为验证这一设想,进行了试算,发现

增加第 1 层土的 c 或 φ 时,最危险滑动面的深度随着开挖深度的增加而增加,可以判定第 1 层土为基坑稳定的“薄弱”土层。由图 3 可知,其安全系数大于 1,即处于稳定状态,可推断土钉支护的安全系数必大于 1。



(a) 一已开挖尚未加钉; (b) 一已加钉; (c) 一不加钉;
搜索次数: 1—100 000; 2—10 000; 3—1 000; 4—100

图 3 不同搜索次数下安全系数与工况的关系

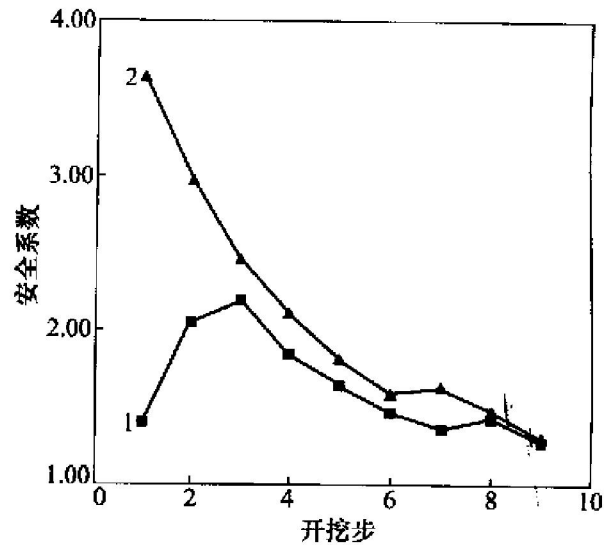
可见,一次载波的混沌搜索次数对于搜索结果非常重要。当搜索次数较少时,该次载波得出的最优解可能是一个全局次优解,因此,即使采用较大的载波次数,也难以达到较好的寻优效果。当确定危险滑动面搜索范围时,若考虑滑动面左出露点可位于坡面或坡底面,则要注意由于上部土层强度较小造成最危险滑面可能陷入其中,在计算过程中应不考虑第 1 层土,使得危险滑动面能够穿过部分或全部土钉。贺可强等

认为就土钉支护这类陡直边坡而言^[9],若发生整体破坏,其最危险滑动面必然通过坡脚,考虑到土钉支护可能发生深部滑移失稳,因此,假定滑动面左出露点位于坡脚以左,采用前述的土条宽自适应确定方法(至少 50 条),搜索次数为 1 000,载波次数为 5,搜索范围为从层顶到基坑深度的 10 倍之间的区间,得出危险滑动面安全系数,如图 4 所示。

由图 4 可知,随着开挖的进行,安全系数逐渐减小(尚未加钉工况有例外),且每步开挖完成后尚未加钉的安全系数小于该步已加钉时的安全系数,因此,土钉支护施工过程中最危险的阶段为开挖已完成但尚未加钉的时段,对此需要特别注意。

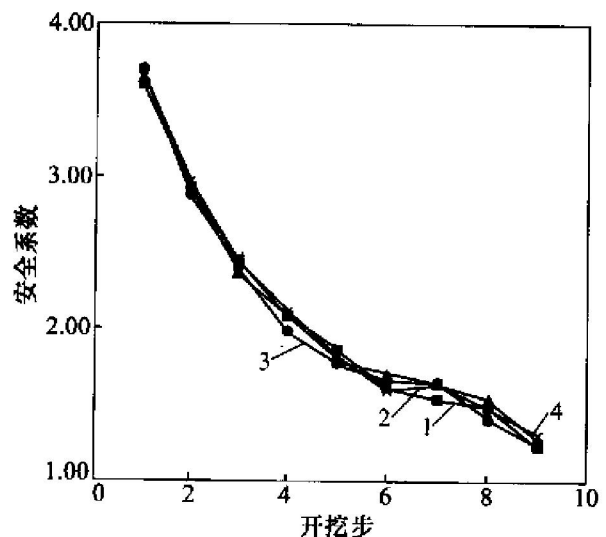
4.2 搜索范围对滑动面安全系数的影响

为考察搜索范围对滑动面安全系数的影响,比较了搜索范围分别为从层顶到基坑深度的 1, 2, 5 和 10 倍时各步开挖已加钉的安全系数,搜索结果如图 5 所示。



1—该步已施工尚未加钉; 2—已加钉

图 4 各开挖步对应的安全系数



1~4—对应搜索范围为基坑深度 1, 2, 5 和 10 倍

图 5 搜索范围对滑动面安全系数的影响

由图5可知,不同的搜索范围得出的安全系数较接近.由计算结果可知危险滑动面的位置有一定的差异.从安全系数来看,混沌搜索方法具有较强的稳健性.安全系数相近而危险滑动面位置存在一定差异,这可能是计算精度和安全系数计算方法造成的,有待进一步研究.

5 结 论

a. 混沌优化的搜索次数是决定其优化结果的关键因素,必须大于某一值才能得到近似全局最优解,搜索范围对于安全系数的影响不大(当搜索范围足够大时),但滑动面位置有一定的差异,从安全系数来看,混沌优化具有较强的稳健性.

b. 当基坑上层土抗剪强度参数较小时,滑动面搜索范围易陷入该层土中.土钉支护施工最危险阶段处于开挖完成但尚未加钉的阶段,应予以注意.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Husein M A I, Hassan W F, Sama S K. Global search method for locating general slip surface using Monte Carlo techniques [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, 127(8): 688-698.
- [3] 陈肇元, 崔京浩. 土钉支护在基坑工程中的应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.
- [4] 金敏, 沈德耀. 变焦混沌优化焦炉燃烧专家控制系统[J]. 中国有色金属学报, 1999, 9(3): 631-635.
- [5] 许海平, 朱奕, 张彤, 等. 变尺度混沌优化方法在电站经济运行中的应用[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2000, 32(4): 55-58.
- [6] 李凡, 段建立, 吴敏. 采用混沌变异演化算法在边坡稳定分析中的应用[J]. 合肥工业大学学报, 2002, 25(1): 109-112.
- [7] 席少霖. 非线性最优化方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 1992.
- [8] 张明聚, 陈肇元, 宋二祥. 土钉支护设计的修正条分法[J]. 工程勘察, 1997, (6): 1-5.
- [9] 贺可强, 阳吉宝, 王胜利. 对“遗传算法在土钉支护结构优化设计中的应用”讨论的答复[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(2): 267-268.

Search of dangerous slide surface of soil nailed wall through chaotic optimization approach

ZHU Fang-cai¹, PENG Zhen-bin¹, LONG Wei¹, LIU Guang-hui²

(1. School of Geoscience and Environmental Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;

2. Department of Civil Engineering, Zhuzhou Institute of Technology, Zhuzhou 412008, China)

Abstract: Search of dangerous slide surface of soil nailed wall is carried out using chaotic optimization method. Based on circular slide surface assumption, with safe coefficient as goal function, through selecting coordinates of two points of intersection of slide surface with a soil nailed wall and central angle as variables of optimization, a chaotic optimization model is established. With certain deep pit project as example, dangerous slide surfaces of all construction steps are gotten using this method. Safe coefficients of 3 kinds of operating modes including not adding nails, already adding nails of this step and not adding nails of this step, are compared. For each construction step, safe coefficient of the first kind of operating modes is minimum, that of the third kind is the biggest, and that of the second kind is in the middle. Effects of mutative-scaled chaotic optimization depend mainly on search frequency, and the carrier frequency is a less important influencing factor. Chaotic optimization method, which has strong robustness, is an effective method in search of circular dangerous slide surface, and it can be spread to search non-circular dangerous slide surface.

Key words: chaotic optimization; soil nailed wall; slide surface; stability; robustness