

层状土中土钉支护结构整体稳定性分析方法

丁 敏^{1a}, 张永兴^{1a,1b}, 王 辉²

(1. 重庆大学 a. 土木工程学院; b. 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045;

2. 重庆高速公路集团有限公司, 重庆 401121)

摘 要:根据极限平衡法的原理,采用简单条分法建立了非均质层状土中的土钉支护结构整体稳定性的分析模型,推导了安全系数的理论表达式;为了克服传统的遗传算法在迭代过程中出现的适应度值标定方式复杂、过早的收敛到局部最优解和在最优值附近收敛速度慢等缺点,提出了采用动态自适应技术和非标准的遗传操作算子改进遗传算法的新算法,并将其引入到土钉支护结构整体稳定性分析中去,建立了一种能同时确定土钉支护最危险滑动面和最小安全系数的动态自适应遗传算法(DAGA)。工程实例分析表明,采用动态自适应遗传算法进行优化,其分析效率更高,收敛速度较传统算法更快,优化结果也更加合理。

关键词:土钉支护;非均质土层;遗传算法;惩罚函数

中图分类号:TU457 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2012)02-0084-06

Analysis of Global Stability of Soil Nailing Bracing Structures in Non-homogeneous Soil

DING Min^{1a}, ZHANG Yong-xing^{1a,1b}, WANG Hui²

(1a. College of Civil Engineering; 1b. Key Laboratory of New Technology for Construction of China

in Mountainous Area, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China;

2. Chongqing Expressway Group Co.,Ltd, Chongqing 401121, P. R. China)

Abstract:Based on Swedish slices limited equilibrium method, a new computation formula of stability safety factor is presented for interior stability analysis of soil nailing wall in non-homogeneous soil. A new genetic algorithm is put forward by adopting dynamic self-adaptive technology and nonstandard genetic operators. Applying the dynamic self-adaptive technology and nonstandard genetic operators into the field of soil-nailing wall interior stability analysis, the dynamic adaptive genetic algorithm for searching the arbitrary critical slip surface is established. It is shown that the dynamic adaptive genetic algorithm has better performance in finding optimal solution, quicker convergence than traditional algorithm as well as more reasonable results.

Key words:soil nailing structure; non-homogeneous soil; genetic algorithms; penalty function

土钉支护结构整体稳定性分析是判定土钉支护结构是否正常工作的一个重要依据,在土钉支护结构设计计算和研究中具有极其重要的地位。整体稳定性分析即可以确定土钉设计所选各个参数的是否

合理,是否可行,同时也可以为其安全性和适用性提供保证。这样,如何确定土钉支护结构的最小安全系数和其对应的最危险滑动面位置,就成为土钉支护设计工作中的首要任务。

收稿日期:2011-09-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(510270004);“十一五”国家科技支撑计划资助项目(2008BAJ06B04-2)

作者简介:丁敏(1983-),男,博士生,主要从事支挡结构设计理论、岩土力学研究,(E-mail)aqdingmin@163.com。

张永兴(通讯作者),男,教授,博士生导师,(E-mail)cqzhang@163.com。

对于土钉支护结构整体稳定性分析,学者们基于大量的试验研究,提出了以极限平衡方法为基础的分析方法。采用极限平衡理论研究土钉支护结构的整体稳定性,通常首先假定一个潜在的滑动面,对于假设滑动面形状的不同,稳定性的分析方法可以分为楔体稳定分析法和圆弧稳定分析法。其中,最危险滑动面的形状和位置的确定成为土钉支护设计的关键。文献[1]假定土钉墙潜在破裂面为圆弧形,考虑土钉抗拔力与土条自身的阻滑力的耦合作用,利用混沌优化方法搜索最危险滑动面。文献[2]则利用复合形法寻求滑面几何控制参数,采用分步黄金分割法寻找最危险滑裂面圆弧,由此计算出与之对应的最小安全系数值。文献[3]采用在分析土钉墙整体稳定性时,潜在滑裂面为对数螺旋曲线,并借助复合形法优化理论确定最危险滑裂面的位置。但对于目标函数是多峰的、或者搜索空间很不规则的优化问题,在搜索最优解时很容易陷于局部最优解。对于深基坑开挖边坡土层分布均匀的土钉墙,其最危险滑裂面搜索可归结为一个目标函数为凸函数的优化问题,用上述方法可以得到全局最优解。但如果开挖边坡土层分布不均匀时,得到的目标函数往往是具有多峰的非凸函数,那么采用上述方法得到的就很可能是局部最优解。而遗传进化算法的优点恰好擅长搜索全局最优解,即使在所定义的适应函数(或目标函数)是不连续的、非规则的情况下,它也能以很大的概率找到整体最优解^[4]。文献[5]成功地将遗传算法应用到以圆弧滑动简单条分法为基础的土钉支护结构整体稳定性分析中。但遗传算法同样存在过早的收敛到局部最优解和在最优值附近收敛速度慢等缺点,为此,文献[6]将单纯形法引入经验遗传,提出了一种针对连续设计变量的经验遗传-单纯形算法。文献[7]将人工神经网络与遗传算法相结合,利用神经网络算法建立起优化设计变量和安全系数最小值之间的非线性映射关系,从而提高了运算速度和搜索效率。本文根据极限平衡原理和遗传算法理论^[8],提出了采用动态自适应技术和非标准的遗传操作算子改进遗传算法的新算法,并将其引入到土钉支护结构整体稳定性分析中去,建立了一种能同时确定土钉支护最危险滑动面和最小安全系数的动态自适应遗传算法模型,为土钉支护结构的优化设计提供新方法。

1 层状土中土钉支护整体稳定性分析模型

简单条分法是土钉支护整体稳定性分析的最常

用的一种方法。在分析过程中,假定滑动面为圆弧,土体为刚塑性材料,不考虑土条之间的相互作用力和力矩。本文研究了层状非均质土中土钉支护的整体稳定性的计算方法。

1.1 基本假设

1)如图1^[9],最危险滑动面为坡脚圆弧,通过土钉墙地面角点A。

2)最危险滑动面圆心位于土钉墙上方,即位于BC上方。

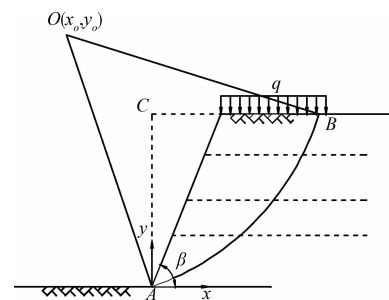


图1 稳定性分析的坐标系

1.2 模型的建立

1)土钉稳定性分析的坐标系。采用圆弧滑动简单条分法进行土钉墙整体稳定性验算,首先建立直角坐标系,以基坑底坡脚A点位坐标原点,基坑深度方向为y轴,与基坑深度垂直的方向为x轴。

2)滑动面圆弧半径。如图1所示,圆弧滑动面的圆心坐标为 $O(x_0, y_0)$,圆弧的半径为 R ,基坑深度为 H ,那么滑动面的方程为^[10-11]:

$$x_0^2 + y_0^2 = R^2 \quad (1)$$

滑动面与地面的交点为B,其坐标为 (x_B, H)

$$x_B = \sqrt{R^2 - (y_0 - H)^2} + x_0 \quad (2)$$

根据简单条分法原理,将滑动面AB等分成 n 份,则圆弧等分后的宽度和每段圆弧中点横坐标分别为:

$$b = \frac{x_B}{n} \quad (3)$$

$$x_i = \frac{b}{2} + (i-1)b \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

3)圆弧上任一点坐标及水平夹角。设任一分条中点P的坐标为 (x_i, y_i) ,该点除的圆弧切线与x轴的夹角为 θ_i ,根据图2可以得出 y_i 和 θ_i 表达式:

$$\theta_i = \arcsin \frac{x_i - x_0}{R} \quad (5)$$

$$y_i = y_0 - R \cdot \sin\theta_i \quad (6)$$

第 i 段圆弧长度为:

$$L_i = \frac{b}{\cos\theta_i} \quad (7)$$

4)土条重量。土条重量计算分成2部分,当

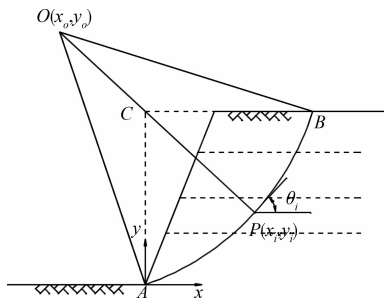


图 2 各段圆弧端点坐标

$x_i \tan \beta < H$, 土条重量为坡面至滑动面的土体重量; 当 $x_i \tan \beta \geq H$ 时, 土条重量为地面至滑动面的土体重量。

根据图 3 所示, 第 i 个土条高度为:

$$Z_i = \begin{cases} H - y_i & x_i \tan \beta \geq H \\ x_i \tan \beta - y_i & x_i \tan \beta < H \end{cases} \quad (8)$$

$$w_i = \begin{cases} b \cdot \left[\sum_{j=1}^{k-1} (h_j - h_{j-1}) \gamma_j + (Z_i - h_{k-1}) \gamma_k \right] & x_i \tan \beta \geq H \\ b \cdot \left[(h_p - H + x_i \tan \beta) \gamma_p + \sum_{j=p+1}^{k-1} (h_j - h_{j-1}) \gamma_j + (H - y_i - h_{k-1}) \gamma_k \right] & x_i \tan \beta < H \end{cases} \quad (9)$$

5) 土钉长度。假设土钉支护结构的土钉数为 m 根, 其中第 j 根土钉的与圆弧滑动面的交点 $M(x_j, y_j)$, 而与坡面的交点 $N(nx_j, ny_j)$ 。土钉在圆弧滑动面以内的长度为 lf_j , 在圆弧滑动面以外的长度则为 ln_j 。如图 4 所示,

$$(x_j - x_0)^2 + (y_0 - y_j)^2 = R^2$$

$$ny_j = nx_j \tan \beta$$

$$x_j - nx_j = lf_j \cos \alpha_j$$

$$ny_j - y_j = lf_j \sin \alpha_j$$

联立上面 4 个式子, 可以求得:

$$lf_j = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4C}}{2} \quad (10)$$

其中,

$$B = 2 \cos \alpha_j (ny_j \tan \beta - x_0) + 2 \sin \alpha_j (y_0 - ny_j)$$

$$C = (ny_j \tan \beta - x_0)^2 + (y_0 - ny_j)^2 - R^2$$

土钉在圆弧滑动面以外的长度:

$$ln_j = l_j - lf_j \quad (11)$$

土钉末端的坐标为:

$$ey_j = ny_j - l_j \sin \alpha_j \quad (12)$$

$$ex_j = nx_j + l_j \cos \alpha_j \quad (13)$$

第 j 根土钉极限抗拔力为:

$$T_{nj} = \pi d_{nj} \sum_{i=1}^N q_{si} ln_i \quad (14)$$

对于非均质土, 特别是各层土的性质相差较大时, 不能简单的进行加权平均后代入上面的公式计算土钉

假设基坑处于非均质均匀地层中, 土层数为 N , 其中第 k 层土层的距地表深度、重度、粘聚力和内摩擦角分别为 h_k, γ_k, c_k 和 φ_k 。

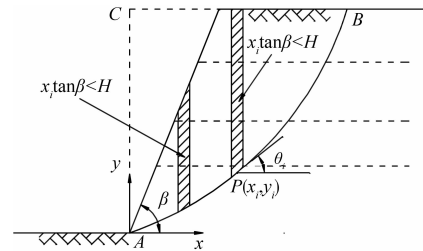


图 3 土重计算简图

当 $x_i \tan \beta \geq H$ 时, 假设土条圆弧中点位于第 k 层土层和第 $k-1$ 层土层之间, 那么 $h_{k-1} < Z_i < h_k$; 当 $x_i \tan \beta < H$ 时, 假设土条顶点位于第 p 层土层和第 $p-1$ 层土层之间, 那么 $h_{p-1} < H - x_i \tan \beta < h_p$;

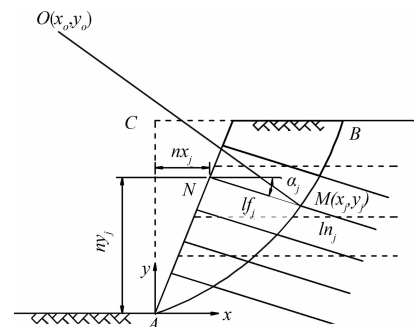


图 4 土钉支护结构稳定性分析简图

极限抗拔力, 而需要对土钉处于各层土中极限抗拔力进行分项计算, 经过修正后的极限抗拔力公式为:

$$\text{令 } dy_j = H - ey_j, cy_j = H - y_j$$

$$T_{nj} = \pi d_{nj} \cdot$$

$$\begin{cases} 0 & h_1 > cy_j \\ qk_1 [(dy_j - cy_j) + \min((h_1 - dy_j), 0)] & + \\ \pi d_{nj} \cdot \left\{ \begin{array}{l} 0 & dy_j \leq h_{i-1}, h_i \leq cy_j \\ \sum_{i=2}^{N-1} qk_i [(h_i - h_{i-1}) + \min((dy_j - h_i), 0)] & + \\ + \min((h_{i-1} - cy_j), 0) \end{array} \right\} & \\ \pi d_{nj} \cdot \left\{ \begin{array}{l} 0 & dy_j \leq h_{N-1} \\ qk_N [(dy_j - cy_j) + \min((cy_j - h_{N-1}), 0)] & \end{array} \right\} & \end{cases} \quad (15)$$

6) 最危险滑动面。根据上述几何参数关系, 并考虑土钉抗拉作用, 土钉支护结构整体稳定性安全系数计算公式为:

$$F_s = \frac{S_h \sum_{i=1}^n c_{ik} L_i + S_h \sum_{i=1}^n (\omega_i + qb) \cos \theta_i \cdot \tan \varphi_{ik} + \sum_{j=1}^m T_{nj} \cdot \left[\cos(\alpha_j + \theta_j) + \frac{1}{2} \sin(\alpha_j + \theta_j) \cdot \tan \varphi_{jk} \right]}{S_h \gamma_k \gamma_0 \sum_{i=1}^n (\omega_i + qb) \sin \theta_i} \quad (16)$$

其中: γ_k 为整体滑动分项系数,可取 1.3; γ_0 为基坑侧壁重要性系数; c_{ik} 为第 i 分条滑动面处土体粘聚力; φ_{ik} 为第 i 分条滑动面处土体内摩擦角; S_h 为土钉的水平间距。

1.3 滑动面圆心范围

在滑动面搜索的过程中,圆心的范围取值应尽可能的大,从而使得最危险滑动面的圆心落在范围内,但取值范围过大会造成搜索效率降低和计算时间增长,同时还有可能产生一些不合理的滑动面。文献[3]中,圆心的横坐标向坡脚 A 左右分别取 4 倍坡高的范围,纵坐标自坡肩向上 4 倍坡高,坡肩向下到坡底的范围。而文献[5]中则认为,圆心取定的范围应该是 $x \in [0, 4H], y \in [H, 5H]$ 。

根据转动理论滑动体中每一点的速度将垂直圆心和坡脚的连线,当圆心位于 A 点的右侧,如图 5 所示的 O_2 ,坡脚 A 点速度 v_{A2} 是倾斜向上的,说明整个滑动体将发生斜向上的滑动,这与土钉支护的边坡失稳时的实际情况不符。而对于圆心位于 O_3 ,滑动面与坡面交于 D 的情况同样与实际情况相违背,这是由于 v_{D2} 的方向是斜后方^[12]。图中 O_1 才是滑动面圆心正确的位置,无论 v_{A1} 还是 v_{B1} 的方向都是斜前方,因此,它的取值范围应该为:

$$x \in [-4H, 0], y \in [H, 4H]$$

$$R^2 > (y_0 - H)^2 + \left(\frac{H}{\tan \beta} - x_0 \right)^2$$

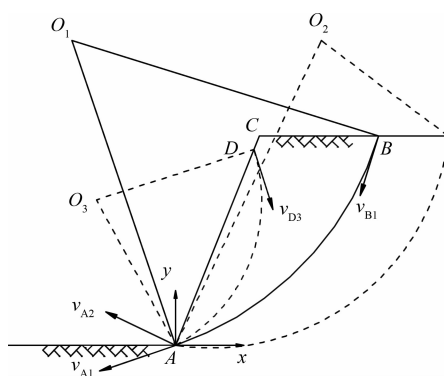


图5 圆心位置

2 基于 DAGA 法土钉结构最危险滑动面搜索

土钉支护结构的整体稳定性分析的关键在于寻求最危险滑动面以及与之对应的最小安全系数。而

寻求最危险滑动面的过程实际上就是一个动态搜索的过程,它在数学上是一个动态优化的过程。因此,提出的动态自适应遗传算法搜索滑动面方法,能够克服收敛到局部最优解和在最优值附近收敛速度慢的缺点,提高运算速度和搜索效率,从而得到全局优化解。

2.1 目标函数

对于最危险滑动面可有圆点 O 和坡脚 A 两点坐标确定,因此 O 点的纵、横坐标则成为染色体的基因表现型^[13]。根据上面推导的非均质土的安全系数表达式,在给定圆点 O 的搜索范围的情况下,安全系数的目标函数可表示为:

$$\begin{cases} F_{s,\min} = f(x_0, y_0) \\ -4H \leq x_0 \leq 0 \\ H \leq y_0 \leq 4H \\ R^2 > (y_0 - H)^2 + \left(\frac{H}{\tan \beta} - x_0 \right)^2 \end{cases} \quad (17)$$

2.2 编码方式确定和初始化种群

遗传算法染色体编码通常可采用二进制编码、格雷编码和浮点数编码等。对于土钉整体稳定性分析问题,为了提高遗传算法的精度,同时改善计算的复杂性和运算效率,采用浮点向量法编码更加方便。浮点数编码是指将个体的每个基因值用某一范围内的一个浮点数来表示,个体编码长度等于其决策变量的位数^[14-15]。

在土钉整体稳定性分析模型中,滑动面所对应的圆心坐标 (x_0, y_0) 设计变量,采用一个浮点向量 $V = [x_0 \ y_0]$ 表示。当进化代数计数器 $t \leftarrow 0$ 时,随机产生 n 个染色体构建初始种群,其中第 i 个染色体为 $V_i = [(x_0)_i \ (y_0)_i]$,其中 $(x_0)_i$ 和 $(y_0)_i$ 为 V_i 的基因^[16]。

2.3 适应度函数的设计

适应度是用来衡量种群中各个个体在优化计算中能达到、接近于或有助于得到最优解的好坏程度。而度量个体的适应度的函数称之为适应度函数。适应度函数是区分种群中个体优良程度的标准,同时也是算法演化的动力。

由于滑动面圆心的位置存在一定的范围,因此土钉整体稳定性分析是一个有约束的优化问题,在构建适应度函数时,采用将约束以动态方式合并到其中,即形成一个具有变化的惩罚项的适应度函数。

罚函数的作用是在解空间中无对应可行解的个体计算适应度时,处以一个惩罚,从而降低其个体的适应度,使该个体被遗传到下一代群体中的概率减小,便于指导搜索,从而提高了找到全局最优解的概率。由于土钉结构整体稳定性分析中安全系数计算是一个有约束的极小值的问题,所以必须将目标函数进行转换才能建立适应度函数。因此,转换后的适应度函数为:

$$f(X, \lambda) = F_{s, \min}(X) + \lambda \Phi(X) \quad (18)$$

式中: $F_{s, \min}(X)$ 为原目标函数; λ 为惩罚因子; $\Phi(X)$ 为不等式约束函数。

通过适应度函数将土钉整体稳定性分析的约束最优化问题转化为无约束最优化问题。式(18)表明,当点 X 不满足约束条件时,说明它在可行域之外,需对目标函数的值加以惩罚;或者当点 X 位于约束边界附近时, $\lambda \Phi(X)$ 将趋于无穷大,迫使迭代点只能在可行域内移动。

2.4 竞争、选择操作

根据 V_i 所对应的适应度的大小采用最佳保留策略来进行优胜劣汰操作,将迄今为止最佳个体直接传递到下一代或至少等同于前一代,确保最优个体不会被交叉、变异等遗传运算所破坏,从而保证遗传算法的收敛性。

2.5 交叉、变异操作

交叉操作是遗传算法中最重要的遗传操作,是区别于其他进化运算的重要特征。算术交叉运算是将种群内两个相配的染色体按照线性的方式相互交换它们之间的部分基因,从而产生新的染色体。

变异操作是以一个很小的概率随机地改变染色体上的某一或某些基因而产生新的个体,即以变异概率随机改变某一染色体 $V_i = [(x_0)_i \quad (y_0)_i]$ 中一个或者几个基因,从而产生新的染色体。

为了降低进化过程中出现局部最优解的可能性,分别对交叉算子和变异算子进行改进。其方法是,对于适应度较小的个体,将交叉算子 p_c 和变异算子 p_m 取较大值,这样可以提高搜索速度;而对于适应度较大的个体,交叉算子 p_c 和变异算子 p_m 则取较小值,这样可以降低收敛于局部最优解的可能性^[17-18]。

交叉概率公式为:

$$p_c = \begin{cases} p_{c1} + \frac{p_{c1} - p_{c2}}{2} \cos\left(\frac{f' - f_{\text{avg}}}{f_{\text{max}} - f_{\text{avg}}}\pi\right) & f' \geq f_{\text{avg}} \\ p_{c1} & f' < f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (19)$$

变异概率公式为:

$$p_m = \begin{cases} p_{m1} + \frac{p_{m1} - p_{m2}}{2} \cos\left(\frac{f' - f_{\text{avg}}}{f_{\text{max}} - f_{\text{avg}}}\pi\right) & f' \geq f_{\text{avg}} \\ p_{m1} & f' < f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (20)$$

其中: p_{c1} 、 p_{c2} 为交叉概率的上、下限; p_{m1} 、 p_{m2} 为变异概率的上、下限; f' 是交叉的 2 个个体中适应度较大值; f_{avg} 、 f_{max} 分别表示当前种群的平均适应度和个体的最大适应度^[19]。

2.6 迭代终止

循环执行 2.3—2.5 步的操作,直到目标函数 $f(X, \lambda)$ 达到满意值或达到预先设定的代数时,终止计算。这时 $f(X, \lambda)$ 所对应的设计变量组合为最危险滑动面。

3 工程应用

一个尺寸为 110 m×78 m 的高层建筑基坑,深度为 7.8 m。其土层分布最上层为 1.9 m 填土,第 2 层为 0.8 m 的细砂层,第 3 层为 2.7 m 的粉质粘土层,第 4 层为 1.8 m 的粉土,以下为强分化砂岩,其厚度大于 12 m。各土层相关物理力学参数见表 1。基坑采用土钉支护结构,土钉墙面与水平面的夹角为 80°。土钉层数为 6 层,其水平间距和垂直间距均为 1.2 m,土钉钻孔直径为 φ 110 mm,土钉入射角为 10°,钢筋采用 II 级 φ 25 螺纹钢。土钉墙面板采用厚度为 100 mm 的喷射混凝土。混凝土设计强度等级为 C20,钢筋网采用 φ 8@250 mm×250 mm。图 6 为该基坑的土层分布情况以及土钉支护形式。

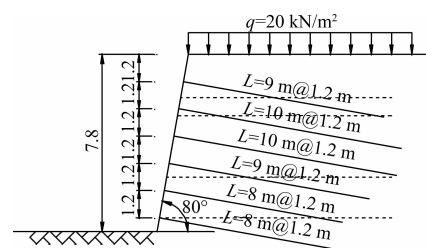


图 6 土钉支护坡面图

表 1 土体的物理力学指标

土类	土层厚度/ m	重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	粘聚力/ kPa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)	摩阻力/ kPa
填土	1.9	18.5	18.0	13.5	20
细砂	0.8	19.7	0.0	28.0	65
粉质粘土	2.7	20.1	31.5	25.0	52
粉土	1.8	20.8	25.0	22.0	58
强分化砂岩	12.0	21.5	92.0	35.0	108

采用本文方法求取的最小安全系数为 1.262 8 所对应的圆心坐标为 (-6.8, 16.8)。在搜索最危险

滑动面时,一些文献有时为了计算的简便将层状土层转化为均质土考虑,即将土层参数均值化。均值化方法分为2种,即直接平均和加权平均,前者是将所有土层简单数学平均,后者则根据土层厚度的贡献平均^[20]。

本文也采用加权平均法对该实例进行了计算。将非均质的层状土转化为均质土后,即对土层重度、粘聚力、摩擦角、土的摩阻力分别进行加权平均后得到的数据进行计算。结果表明,当圆心位于(-5.8, 13)时,安全系数达到最小值1.322 1,与分层计算时所得最小安全系数为1.262 8存在一定的差别。从而验证了土性参数的取值对工程计算的影响很大,这说明将层状土转化为均质土的计算结果是欠准确的。

4 结 论

1)运用简单条分法对层状非均质土中土钉支护结构进行了稳定性分析,得出了最危险滑动面的搜索模型和最小安全系数的计算公式。通过实例对比分析了非均质层状土和等效均质土计算方法,分析结果表明采用等效均质土的计算明显提高了土钉支护结构的最小安全系数,对于其整体稳定性是不利。

2)为了解决遗传算法中过早的收敛到局部最优解和在最优值附近收敛速度慢等缺点,采用动态自适应技术改进遗传算子,不仅大大提高空间搜索能力,而且提高了种群中表现优良个体的交叉率和变异率,从而提高获得优化的全局最优解可能性。

3)将DAGA法应用到土钉支护结构的整体稳定性分析领域,建立了一种能有效搜索土钉支护结构的最危险滑动面极其对应的安全系数的全局优化算法。算例分析表明,与传统的遗传算法相比,本文提出的DAGA法在运算速度和搜索效率更具优势。

参考文献:

- [1] 祝方才,彭振斌,隆威,等. 土钉支护危险滑动面搜索的混沌优化方法[J]. 中南工业大学学报,2003,34(6): 699-703.
ZHU FANG-CAI, PENG ZHEN-BIN, LONG WEI, et al. Search of dangerous slide surface of soil nailed wall through chaotic optimization approach[J]. Journal Central South University of Technology, 2003, 34(6): 699-703.
- [2] 陈肇元,崔京浩. 土钉支护在基坑工程总的应用[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1997.
- [3] 秦四清,王建党,王清,等. 土钉支护机理与优化设计[M]. 北京:地质出版社,1999.
- [4] 朱剑锋,陈昌富,徐日庆. 基坑土钉支护可靠性分析优化算法[J]. 岩土力学,2010,31(7):2336-2341.
ZHU JIAN-FENG, CHEN CHANG-FU, XU RI-QING. An optimization method of reliability analysis of foundation pit reinforced with soil nail[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(7): 2336-2341.
- [5] 侯世伟,杜修力,李立云,等. 土坡稳定分析中的最危险滑裂面问题[J]. 地下空间与工程学报,2010,6(3): 650-654.
HOU SHI-WEI, DU XIU-LI, LI LI-YUN. The sliding-plane in analysis of the soil slope stability[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6(3): 650-654.
- [6] DU XIU-LI, ZENG DI. Structural physical parameter identification based on evolutionary simplex algorithm and structural dynamic response[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2003, 2: 225-236.
- [7] 刘大鹏,周建中,杨俊杰. 土钉支护结构优化设计中的混合粒子群优化算法[J]. 资源环境与工程,2009,23: 137-141.
LIU DA-PENG, ZHOU JIAN-ZHONG, YANG JUN-JIE. Hybrid particle swarm optimization algorithm in optimization design of soil nail bracing[J]. Resources Environment & Engineering, 2009, 23: 137-141.
- [8] 韩培超. 基于分层遗传算法的土钉支护方案研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2010.
- [9] BISHOP A W. The use of slip circle in the stability analysis of slopes[J]. Geotechnique, 1955, 5(1): 7-17.
- [10] 朱彦鹏,王秀丽,李忠,等. 土钉墙的一种可靠性自动优化设计法[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(1): 3123-3130.
ZHU YAN-PENG, WANG XIU-LI, LI ZHONG, et al. Optimal design method of reliability for soil nailed walls[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(1): 3123-3130.
- [11] IWAMURA K, LIU B. A genetic algorithm for chance constrained programming[J]. Journal of Information & Optimization Science, 1996, 17(2): 40-47.
- [12] BOERINGEP D W, WERNER D H. A comparison of particle swarm optimization and genetic algorithms for a phased array synthesis problem[J]. Antennas and Propagation Society International Symposium, 2003, 1(1): 181-184.
- [13] ZOLFAGHARI A R, HEATH A C, MCCOMBIE P F. Simple genetic algorithm search for critical non-circular failure surface in slop stability analysis[J]. Computers and Geotechnics, 2005, 32: 139-152.

- excitation [J]. *Journal of Hunan University: Natural Sciences*, 2010, 37(10): 13-19.
- [6] SU LIANG, DONG SHI-LIN, SHIRO KATO. A new average response spectrum method for linear response analysis of structures to spatial earthquake ground motions [J]. *Engineering Structures*, 2006, 28(13): 1835-1842.
- [7] 贺拥军,周绪红,董石麟. 膜型网壳巨型网格结构的整体与局部稳定性研究 [J]. *土木工程学报*, 2005, 38(2): 13-21.
HE YONG-JUN, ZHOU XU-HONG, DONG SHI-LIN. Research of overall and local stability of reticulated mega-structure with single layer membranous latticed shell substructure [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2005, 38(2): 13-21.
- [8] HE YONG-JUN, ZHOU XU-HONG. Static properties and stability of cylindrical ILTDBS reticulated mega-structure with double-layer grid substructures [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2007, 12(63): 1580-1589.
- [9] ZHOU XU-HONG, HE YONG-JUN, XU LEI. Formation and stability of a cylindrical ILTKBS reticulated mega-structure braced with single-layer latticed membranous shell structures [J]. *Thin-Walled Structures*, 2009, 5(47): 537-546.
- [10] 苏亮,董石麟. 水平行波效应下周边支承大跨度单层球面网壳的地震反应 [J]. *空间结构*, 2006, 12(3): 24-30.
- SU LIANG, DONG SHI-LIN. Seismic response of a large span single layer reticular dome with surrounding columns considering horizontal wave passage effect [J]. *Spatial Structures*, 2006, 12(3): 24-30.
- [11] ALLAM SAID M, DATTAT K. Seismic response of a cable-stayed bridge deck under multi-component non-stationary random ground motion [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2004, 33(3): 375-393.
- [12] YE JI-HONG, ZHANG ZHI-QIANG, CHU YE. Strength failure of spatial reticulated structures under multi-support excitation [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*. 2011, 10(1), 21-36.
- [13] 陈幼平,周宏业. 斜拉桥地震反应的行波效应 [J]. *土木工程学报*, 1996, 29(6): 61-68.
CHEN YOU-PING, ZHOU HONG-YE. Seismic behavior of cable-stayed bridges under traveling wave excitation [J]. *China Civil Engineering Journal*, 1996, 29(6): 61-68.
- [14] HAO H, DUAN X N. Multiple excitation effects on response of symmetric buildings [J]. *Engineering Structures*, 1996, 18(6): 723-740.

(编辑 胡英奎)

(上接第 89 页)

- [14] SRINIIVAS M, PATNAIK L M. Adaptive probabilities of crossover and mutation in genetic algorithms [J]. *IEEE Trans. on SMC*, 1994, 24(4): 656-667
- [15] 朱剑锋,陈昌富,徐日庆. 土钉墙内部稳定性分析自适应禁忌变异遗传算法 [J]. *岩土力学*, 2010, 31(5): 1663-1669.
ZHU JIAN-FENG, CHEN CHANG-FU, XU RI-QING. Application of ATMGA to interior stability analysis of soil-nailing wall [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(5): 1663-1669.
- [16] SIMPAON A R, PRIEST S D. The application of genetic algorithms to optimization problems in geotechnics [J]. *Computers and Geotechnics*, 1993, 15(1): 1-19.
- [17] 杨云,冯亚. 自适应遗传算法在场强传播损耗预测中的应用 [J]. *微电子学与计算机*, 2010, 27(11): 121-127.
YANG YUN, FENG YA. Application of adaptive genetic algorithms in field strength propagation prediction [J]. *Microelectronics & Computer*, 2010, 27(11): 121-127.
- [18] 朱延广,许永平,周旋,等. 引入学习机制的自适应遗传算法设计与实现 [J]. *计算机工程与应用*, 2010, 46(36): 34-39.
ZHU YAN-GUANG, XU YONG-PING, ZHOU XUAN, et al. Research on adaptive genetic algorithm injected learning mechanism [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2010, 46(36): 34-39.
- [19] 田丰,边婷婷. 基于自适应遗传算法的交通信号配时优化 [J]. *计算机仿真*, 2010, 27(6): 305-308.
TIAN FENG, BIAN TING-TING. Traffic signal timing optimization based on adaptive genetic algorithm [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2010, 27(6): 305-308.
- [20] THIREEUS D. Scalability problems of simple genetic algorithms [J]. *Evolutionary Computation*, 1999, 7(4): 331-352.

(编辑 胡英奎)