

文章编号: 1000-7598-(2004) 01-0037-08

土钉支护稳定分析的模拟退火-随机投点耦合算法

邹广电, 蒋婉莹

(南京水利科学研究院土工研究所, 江苏 南京 210024)

摘 要: 充分地考虑土钉支护的特殊性, 建立了一个比较精确的基于一般破裂面的土钉支护稳定性分析方法。对土钉支护内部稳定分析和外部稳定分析分别建立其优化数值分析模型; 然后导入模拟退火算法和随机投点法, 结合两者的特长建立了一种可有效求解该模型的耦合算法, 并编制了相应的计算程序; 通过工程实例证明了基于一般破裂面的土钉支护稳定性分析方法的有效性, 并得出了若干对土钉支护稳定分析具有参考意义的结论。

关 键 词: 土钉支护; 一般破裂面; 稳定分析; 模拟退火算法; 随机投点法; 耦合算法;

中图分类号: 0241

文献标识码: A

Stability analysis of soil nailing based on coupling algorithm of simulated annealing algorithm and random disposal-method of points

ZOU Guang-dian, JIANG Wan-ying

(Geotechnical Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

Abstract: Fully considering the speciality of soil nailing, a rather precise method of stability analysis of soil nailing based on general fracture surface is presented. The optimization numerical models for inner and exterior stability analysis are firstly proposed, and then a coupling algorithm of simulated annealing algorithm and random disposal-method of points is introduced for solving the model. Such a coupling algorithm is mainly based on the combination of merits of two kinds of optimization method. Several practical examples have been used to testify the efficiency and ability of the proposed method. Not only the effectiveness of it is demonstrated, but also several important conclusions being able to be referred in the stability analysis of soil nailing are simultaneously drawn.

Key words: soil nailing; general fracture surface; stability analysis; simulated annealing algorithm; random disposal-method of points; coupling algorithm

1 前 言

土钉支护的稳定分析(包括内部稳定分析和外部稳定分析)一般采用的是极限平衡分析方法, 滑动面或破坏面的形状常假定为双折线、圆弧线、抛物线或对数螺线中的一种, 比较著名的分析方法国外有法国的 Schlosser 方法、美国的 Davis 方法、德国的 Stocker 方法、英国的 Bridle 方法等; 国内有太原煤矿设计院方法、北京工业大学方法、洛阳总参科研三所方法、清华大学方法和北京治建总院方法等; 这些方法从各个不同的角度满足了部分工

程实践的需要。但普遍存在的一个误区是, 把土钉支护的稳定性分析与一般边坡的稳定性分析等同, 而实际上破裂面是无任何固定形状的。众所周知, 土钉支护是由在土体内放置一定长度和密度的土钉体构成的, 土钉与土共同工作所形成的能大大提高原状土强度和刚度的复合土体是土钉支护的根本机理, 土钉的作用正是基于这种主动加固的机制; 通过土钉与土的相互作用, 达到改变土体的变形与破坏形态的目的, 以此显著地提高土坡的整体稳定性; 与此同时, 土钉支护的一个重要特征是分布密度大, 靠土钉的相互作用能形成复合整体作用, 从而, 对

土坡破裂面的形状产生显著的影响,这是土钉与锚杆的一个很大的不同之处。锚杆也能提高土坡的整体稳定性,但由于其密度小,对土坡破裂面形状的影响就会大大小于土钉。因此,可以说,对于土钉支护,影响破裂面形状的因素甚至更甚于一般边坡问题,其破裂面形状取决于坡面的几何形状、土的强度参数、土钉间距、土钉能力以及土钉的倾斜角度等等。在实际工程中,如仅仅采用双折线、圆弧线、抛物线或对数螺旋曲线等作分析和设计,或甚至采用更简单的,如按挡土墙概念作内部稳定分析的德国方法,则很有可能造成较大的差异而危及土钉支护的安全。鉴于在绝大多数情况下,土钉支护的稳定性如何是决定土钉支护安全与否的控制因素,因此,有必要引起足够的重视,以建立一个更为精确的基于一般破裂面的土钉支护稳定性分析方法。

综上所述,本文从土钉支护的特殊性出发,同时考虑到现有方法通常将内部稳定分析和外部稳定分析作为独立课题分别进行分析的习惯,分别建立对土钉支护内部稳定分析和外部稳定分析的优化数值分析模型,然后,导入模拟退火算法和随机投点法,结合两者的特长建立了一种可有效求解本文模型的耦合算法,并编制了相应的计算程序。

2 稳定分析的基本方法-毕肖普法

2.1 基本公式

在土钉支护的稳定分析中,采用最多的是瑞典圆弧法,由于本文以一般破裂面作为分析的基础,因而瑞典圆弧法不再适用。毕肖普法是被公认的较为精确而又简便的方法,经潘家铮院士^[1]改进的毕肖普法适用于任意形状破裂面的稳定分析,故被本文采用。

如图 1(a)是一任意土钉支护坡面的示意图,破裂面亦是任意形状的。

毕肖普法^[2]的基本原理在于考虑分条间水平作用力 E 的影响,但不考虑分条间剪力的作用。如图 1(b)是毕肖普法下的任意分条的受力图。文献[1]根据破裂面上的极限平衡条件,推出了如下的可适用于任意破裂面的毕肖普法安全系数计算公式:

$$K = \frac{\sum [c_i \Delta x_i + (W_i - U_i \cos \alpha_i) f_i] \sec^2 a_i / \left(1 + \frac{f_i}{K \tan a_i} \right)}{\sum Q_i + \sum W_i \tan a_i} \quad (1)$$

式中 W_i 为分条自重; Q_i 为作用在分条上的水

平力; S_i 为分条底部的摩擦力; N_i 为分条底部的正向压力; U_i 为分条底部的渗透水压力; c_i 为某分条底部的凝聚力; f_i 为某分条底部的摩擦系数; α_i 为某分条的底面倾斜角; K 为土钉支护抗滑稳定安全系数。

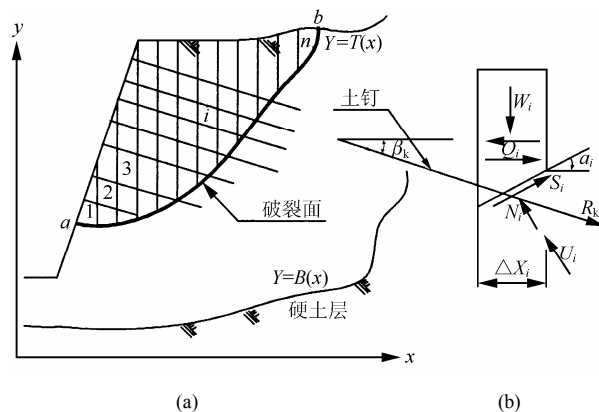


图 1 一任意土钉支护坡面示意图
Fig.1 Schematic view of a soil nailing

2.2 土钉抗力作用的正确计算策略

如何正确地计入土钉的抗力作用是土钉支护稳定分析可靠与否的关键点之一。一般假定破裂面上的土钉只承受拉力且达到最大抗力 R , 因为大量的实测结果认为, 土钉剪力的作用是次要的, 只考虑土钉的抗拉作用能使分析计算大大简化且偏于安全。如图 1(b)是一任意分条的示意图, 假设有一土钉穿过分条底面并伸入稳定土体中, 此时土钉的抗力 R_k 将对该分条产生两方面的作用, R_k 沿垂直方向的分力相当于在分条内增加了一项方向朝下的垂直分力, 而沿水平方向的分力则相当于在分条内增加了一项抵抗滑动的水平分力; 另外, 穿过某分条底面并伸入稳定土体中的土钉有可能不止一排, 假设有 N 排, 则计算该分条时须将这 N 排土钉的作用全部计入; 于是, 毕肖普法的安全系数计算公式变为如下的形式:

$$K = \frac{\sum [c_i \Delta x_i + (W_i' - U_i \cos \alpha_i) f_i] \sec^2 a_i / (1 + f_i / K \tan a_i)}{\sum Q_i + \sum W_i' \tan a_i} \quad (2)$$

式中:

$$W_i' = \begin{cases} W_i & \text{若不存在土钉穿过该分条底面} \\ W_i + \sum_{k=1}^N \frac{R_k}{S_{hk}} \sin \beta_k & \text{若存在 } N \text{ 排土钉穿过该分条底面} \end{cases} \quad (3)$$

$$Q'_i = \begin{cases} Q_i & \text{若不存在土钉穿过该分条底面} \\ Q_i - \sum_{k=1}^N \frac{R_k}{S_{hk}} \cos \beta_k & \text{若存在} N \text{排土钉穿过该分条底面} \end{cases} \quad (4)$$

式(3)和(4)中, S_{hk} 为第 k 排土钉的水平间距;
 β_k 为第 k 排土钉的入射角; R_k 为穿过该分条底面的第 k 排土钉(以下简称为“第 k 排土钉”)的最大抗力,取以下二式中较小值:

按土钉受拔条件:

$$R_k = \pi D_k L_{ak} \tau_f \quad (5)$$

按土钉受拉屈服条件:

$$R_k = 1.1(\pi d_k^2/4)f_{yk} \quad (6)$$

式(5)和(6)中, D_k 为第 k 排土钉的土钉孔径;
 d_k 为第 k 排土钉的钢筋直径; τ_f 为土钉与土体之间的界面粘结强度, f_{yk} 为第 k 排土钉的钢筋抗拉强度标准值, L_{ak} 为第 k 排土钉在破裂面一侧伸入稳定土体中的长度。

3 土钉支护内部稳定分析的优化模型

3.1 设计变量的选取

参见图2,设在土钉支护的坡面上有 a, b 两点,其 X 坐标分别为 X_1 和 X_{n+1} ;现从 a 点出发沿 X 方向以间距 $X_{n+1} - X_1/n$ 作等间距取点,这样便可得到 $(X_2, Y_2) \sim (X_n, Y_n)$ 的 n 个点,将相邻各点作直线连接便可形成如图所示的一条破裂面曲线和一个滑动土体;这意味着, $(X_1, Y_1) \sim (X_{n+1}, Y_{n+1})$ 就是本问题的设计变量;由于 Y_1, Y_{n+1} 已分别由 X_1 和 X_{n+1} 所决定, $X_2 \sim X_n$ 则因为等间距取点的缘故亦为已知值,因此独立的变量为 $(X_1, X_{n+1}, Y_2, Y_3, \dots, Y_n)$, 设 $\mathbf{X} = (X_1, X_{n+1}, Y_2, Y_3, \dots, Y_n)$, $\mathbf{X}$ 即为本问题的设计变量。

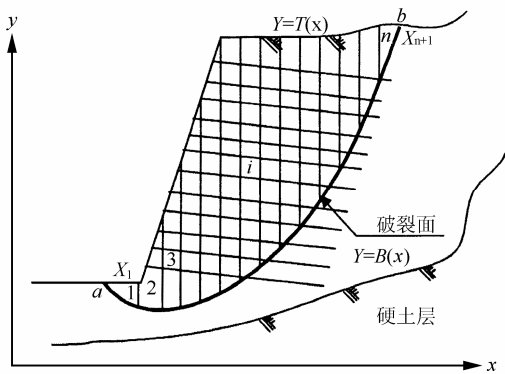


图2 陡坡式土钉支护坡面示意图

Fig.2 Schematic view of steep-slope type of soil nailing

3.2 目标函数

求得土钉支护的最小稳定安全系数 K 及相应的真实最危险破裂面为本文的目标,因而,可取 K 为目标函数,即优化数值分析要求:

$$\begin{aligned} K(\mathbf{X}) &\rightarrow K_{\min} \\ \mathbf{X} &\in \Omega \end{aligned} \quad (7)$$

这里 Ω 为设计变量的有效空间。

3.3 约束条件

3.3.1 设计变量基本可行空间约束

设计变量基本可行空间约束是指由设计变量 $(X_1, X_{n+1}, Y_2, Y_3, \dots, Y_n)$ 所形成的破裂面,必须处在由土钉支护坡面形状和地基条件所决定的破裂面基本可能范围内,具体说来,就是 X_1 和 X_{n+1} 不得超越土钉支护坡面的左右最外侧, $Y_2, Y_3, \dots, Y_n$ 则向上不得超越坡面曲线 $T(x)$, 向下不得超越硬土层表面曲线 $B(x)$ (图2);可由数学式表示如下:

$$X_1 \geq X_{\min} \quad (8)$$

$$X_{n+1} \leq X_{\max} \quad (9)$$

$$B(X_i) < Y_i < T(X_i) \quad (i = 2, 3, \dots, n) \quad (10)$$

式中 $X_{\min}$ 为土钉支护坡面沿左面最外侧的 x 坐标, $X_{\max}$ 为土钉支护坡面右面最外侧的 x 坐标。

这里须说明的是,如果地质条件未给出明确的硬土层情况,则可根据实际的地基土质条件酌情确定和给出基本可行空间的下部边界曲线 $B(x)$ 。

3.3.2 有效破裂面约束

有效破裂面约束是指所形成的破裂面必须为有效破裂面。

即使设计变量满足了其基本可行空间约束,形成的破裂面有可能依旧是无效的。如某些分条底部可能形成过大的负向倾角,某些分条底部应为正向倾角却形成了负向倾角,这些都会使稳定计算失真而失去实际意义。一般来说,在破裂面剪出口附近较易形成负向倾角但大致不会超过 $30^\circ \sim 40^\circ$;而正向倾角与负向倾角的交汇点离开破裂面剪出口处的距离一般为大约破裂面总长的 $1/4 \sim 1/3$,因此,应规定该位置(即交汇点)到破裂面剪进口为止的分条的底部倾角为正向倾角。具体可由数学式表示如下:

$$a_i \geq a_{\min}, \quad (i = 1, 2, \dots, m-1) \quad (11)$$

$$a_j > 0 \quad (j = m, m+1, \dots, n) \quad (12)$$

式中 $a_{\min}$ 为负向倾角控制值,一般可取 $a_{\min} = -30^\circ \sim -40^\circ$; m 表示正向倾角与负向倾角的交汇点后面的第一条分条,一般可取 $m = n/4 \sim n/3$

并取整数。

3.4 优化模型

综合以上所述, 可得土钉支护内部稳定分析的优化模型如下:

$$\begin{aligned} & \min K(X) \\ & X \in \Omega \\ & \Omega = \left\{ X \left| \begin{array}{l} X_1 \geq X_{\min} \\ X_{n+1} \leq X_{\max} \\ B(X_i) < Y_i < T(X_i) \quad (i=2, 3, \dots, n) \\ a_i \geq a_{\min} \quad (i=1, 2, \dots, m-1) \\ a_j > 0 \quad (j=m, m+1, \dots, n) \end{array} \right. \right\} \end{aligned} \quad (13)$$

3.5 直立式土钉支护的内部稳定分析

对图 3 所示的直立式土钉支护, 当破裂面剪出口穿过坡脚时, 优化模型与上述相同; 但当沿着直立墙变化和移动时, 其设计变量将有所不同; 由于破裂面剪出口将固定在直立墙上, 因而, X_i 将恒定不变, 取而代之的将是 Y_i , 因此, 独立的变量为 $(Y_1, X_{n+1}, Y_2, Y_3, \dots, Y_n)$, 即 $X = (Y_1, X_{n+1}, Y_2, Y_3, \dots, Y_n)$ 成为优化问题的设计变量。 Y_1 的约束条件则可由数学式表示如下:

$$Y_b < Y_1 < Y_t \quad (14)$$

将(13)式中的 $X_1 \geq X_{\min}$ 以(14)式代之, 便可得到当破裂面剪出口固定在直立墙上时的直立式土钉支护内部稳定分析的优化模型。

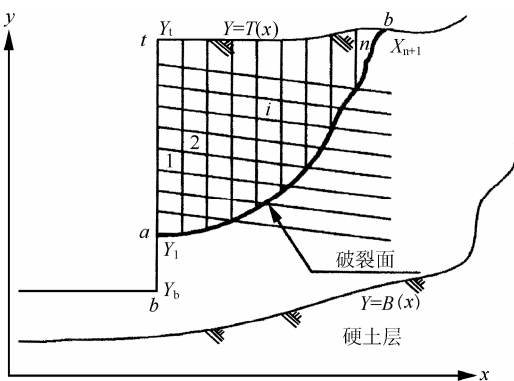


图 3 直立式土钉支护坡面示意图

Fig.3 Schematic view of erection type of soil nailing

4 土钉支护外部稳定分析的优化模型

对于土钉支护的外部稳定分析(图 4), 其设计变量和目标函数与内部稳定分析完全一致, 所不同的仅仅是其设计变量的约束条件, 以下作具体的阐述。

在土钉支护的外部稳定分析中(图 4), 由土钉包络线 $Z(x)$ 、 c 点左侧的坡面部分、 f 点右侧的坡面部分和硬土层表面曲线 $B(x)$ 所共同包围和形成的范围将成为设计变量的基本可行空间; 而须注意的是, 其中 $Z(x)$ 的 cd 部分为最底部的那排土钉的位置线, 而 ef 部分为垂直线。由设计变量 $(X_1, X_{n+1}, Y_2, Y_3, \dots, Y_n)$ 所形成的破裂面必须处在其基本可行空间以内, 具体可用数学式描述如下:

$$X_c \leq X_1 \leq X_{\min} \quad (15)$$

$$X_f \leq X_{n+1} \leq X_{\max} \quad (16)$$

$$\text{若 } X_c \leq X_i \leq X_{\min} \quad \text{或} \quad X_f \leq X_i \leq X_{\max}$$

$$B(X_i) < Y_i < T(X_i) \quad (17)$$

$$\text{若 } X_c \leq X_i \leq X_f \quad B(X_i) < Y_i < Z(X_i) \quad (18)$$

另外, 由于问题的特殊性, 有效破裂面约束只需规定所有分条的底部倾角不小于某一负向倾角控制值便可, 即

$$a_i \geq a_{\min}, \quad i=1, 2, \dots, n \quad (19)$$

式中 $a_{\min}$ 为负向倾角控制值, 取法与前述相同。

于是可得土钉支护外部稳定分析的优化模型如下:

$$\begin{aligned} & \min K(X) \\ & X \in \Omega \\ & \Omega = \left\{ X \left| \begin{array}{l} X_c \leq X_1 \leq X_{\min} \\ X_f \leq X_{n+1} \leq X_{\max} \\ B(X_i) < Y_i < T(X_i) \text{ 若 } X_c \leq X_i \leq X_{\min} \\ \quad \text{或 } X_f \leq X_i \leq X_{\max} \\ B(X_i) < Y_i < Z(X_i) \text{ 若 } X_c \leq X_i \leq X_f \\ a_i \geq a_{\min}, i=1, 2, \dots, n \end{array} \right. \right\} \quad (i=2, 3, \dots, n) \end{aligned} \quad (20)$$

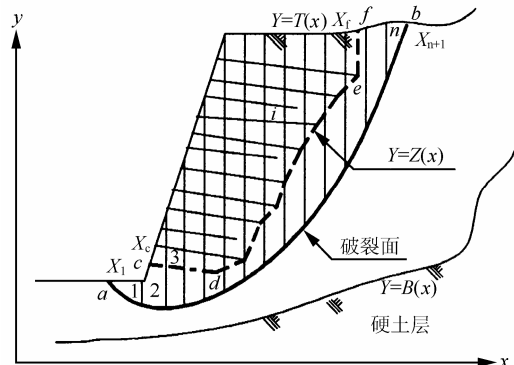


图 4 土钉支护外部稳定分析示意图

Fig.4 External stability analysis of soil nailing

6 模拟退火-随机投点耦合算法

6.1 基本概念

式(13)或式(20)都构成了一个相当复杂的非线性规划问题,其安全系数的峰值区分布将会是错综复杂的,为保证搜索不陷入局部优化点并同时确保算法的高效性,找出一个兼顾解的质量以及运算时间的较好算法是必要的。

模拟退火算法是一种解非线性规划问题的有效近似算法,属全局优化算法的一种;它源于对固体退火过程的模拟,采用 Metropolis 接受准则,并用一种称为冷却进度表的参数控制算法进程,使算法在多项式时间里给出一个近似最优解。

随机投点法常被应用于非线性规划问题,对设计变量不多的小规模优化问题往往可显示奇效,但对设计变量众多的大规模优化问题则常常无能为力。

经过深入细致地分析可以发现,本文的设计变量可以被分为两个层次, (X_1, X_{n+1}) 为第一层次, $(Y_2, Y_3, \dots, Y_n)$ 为第二层次, (X_1, X_{n+1}) 相当于为破裂面画定框框,而 $(Y_2, Y_3, \dots, Y_n)$ 则相当于这个框框之下调整和变化,第一层次变量的 (X_1, X_{n+1}) 显得较为简单明了,其几何意义相当于在边坡的左侧和右侧仅沿 X 方向进行搜索,故本文在这个层次里导入随机投点法,而将变量较多的第二层次罩在第一层次下面应用模拟退火算法求解;这样,在第一层次,仅有 X_1 和 X_{n+1} 这两个设计变量,随机投点法可发挥良好的效果;而在第二层次中,其模拟退火算法的搜索将会是快速而有效的。这样取长补短,既可保证搜索不陷入局部优化点,又可使两个层次的总必要搜索时间不会太长,从而,保证了算法的有效性。

6.2 随机投点法的实施及其耦合原理

(1) 根据土钉支护的实际情况,给出真实破裂面在支护坡面左右两侧的可能移动范围,参见图5的虚线矩形,分别用 i 和 e 来表示,并假设移动范围 i 的左右控制坐标为 X_{i_min} 和 X_{i_max} ,移动范围 e 的左右控制坐标为 X_{e_min} 和 X_{e_max} ; $X_{e_min} \sim X_{e_max}$ 即为 X_1 的搜索范围,而 $X_{i_min} \sim X_{i_max}$ 为 X_{n+1} 的搜索范围。

(2) 以式 $X_1 = \lambda * (X_{e_max} - X_{e_min}) + X_{e_min}$ 在移动范围 e 内随机取点,将其作为 X_1 的可能取点,同样以式 $X_{n+1} = \lambda * (X_{i_max} - X_{i_min}) + X_{i_min}$ 在移动范围 i 内随机取点,将其作为 X_{n+1} 的可能取点,这样,便得到了真实破裂面的一个可能出口 $(X_1, Y_1)^0$ 和可能进

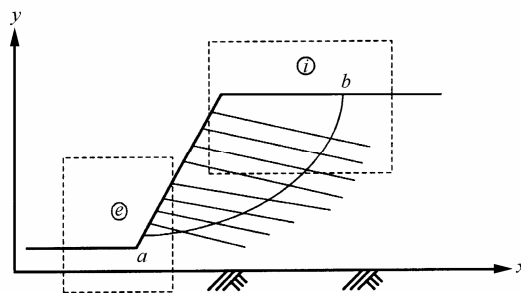


图5 随机投点法的实施及其耦合原理图示
Fig.5 Random disposal-method of points and coupling elements

口 $(X_{n+1}, Y_{n+1})^0$ 。这里, λ 为 $(0, 1)$ 上服从均匀分布的随机数,完全由计算机的随机数发生器自行生成。

(3) 在 $(X_1, Y_1)^0$ 和 $(X_{n+1}, Y_{n+1})^0$ 所划定的破裂面水平框框下对第二层次设计变量 $(Y_2, Y_3, \dots, Y_n)$ 应用模拟退火算法进行搜索和优化,并在模拟退火算法中设置记忆器(以下将有详细说明),得到其记忆器内所记存的安全系数的最小值 K_{min}^0 。

(4) 在 X_1 和 X_{n+1} 的可能移动范围 i 和 e 内反复地随机取点,然后,重复步骤(3)并与前一次在第二层次中的记忆器内所记存的安全系数的最小值 K_{min}^j 作比较,随时记下其中的最小值 K_{min} ;如果随机取点次数达到了约定的最大总迭代次数 N_{max} ,并且 K_{min}^j 的改善次数达到 M 次以上,则停止迭代,输出 K_{min} 和其相应的最危险破裂面;如果 K_{min}^j 的改善次数达到了 M 次以上但随机取点次数未达 N_{max} ,则继续迭代直到达到 N_{max} 为止;如果迭代次数尽管已达到了约定的最大总迭代次数 N_{max} ,但 K_{min}^j 的改善次数在 M 次以下,则增加迭代次数直至 K_{min}^j 的改善次数达到 M 次以上为止,然后,停止迭代。这里 N_{max} 和 K 的改善次数 M 均为控制计算精度的指标,对于本文的优化模型,取 N_{max} 为1万次以上, M 为30次以上,大部分情况都可得到满意的解答;在CPU为奔腾III-1.0G的微电脑上其迭代时间大约50 min。

(5) 对于以上随机投点法的实施,如果是进行破裂面剪出口固定在直立墙上时的直立式土钉支护内部稳定分析,只需以 Y_1 , Y_b 和 Y_i 分别代替 X_1 , X_{e_min} 和 X_{e_max} 即可。

6.3 模拟退火算法的实施及其改进

模拟退火算法的一般形式是:从选定的初始解开始,在借助于控制参数 t 递减时产生的一系列Mapkob链中,利用一个新解产生装置和接受准则,重复进行包括“产生新解-计算目标函数差-判断是否接受新解-接受(或舍弃)新解”这四个任务的试

验, 不断对当前解迭代, 从而, 达到使目标函数最优的执行过程。

针对第二层次优化问题的特点, 对模拟退火过程中的关键步骤说明如下:

(1) 新解产生装置。产生新解的原则是必须为满足约束条件的有效解, 以下叙述各模型的新解产生装置。

土钉支护内部稳定分析的新解产生装置为:

①由计算公式 $Y_i^{ii} = T(X_i) - \zeta * (T(X_i) - B(X_i))$ 得到 $Y_i^{ii} (i \in (2, 3, 4, \dots, n))$ 。这里, ζ 为 $(0, 1)$ 上服从均匀分布的随机数, 完全由计算机的随机数发生器自行生成; 显然, 上式满足 $B(X_i) < Y_i < T(X_i)$ 。

②由计算公式 $\alpha_{i-1}^{ii} = \tan^{-1}((Y_i - Y_{i-1}) / (X_i - X_{i-1}))$ 得到 α_{i-1}^{ii} ; 如果 $i-1 \leq m-1$, 判断是否满足 $\alpha_{i-1}^{ii} \geq \alpha_{\min}$, 如满足, 则回到①继续计算 Y_{i+1}^{ii} , 不满足, 则回到①重新计算 Y_{i+1}^{ii} ; 如果 $i-1 \geq m$, 判断是否满足 $\alpha_{i-1}^{ii} > 0$, 如满足, 则回到①继续计算 Y_{i+1}^{ii} , 不满足, 则回到①重新计算 Y_i^{ii} 。

③将以上 Y_i^{ii} 的计算持续, 直至 $i = n$ 为止, 便得到一组完整的有效解。

土钉支护外部稳定分析的新解产生装置为:

①由计算公式 $Y_i^{ii} = T(X_i) - \zeta * (T(X_i) - B(X_i))$ (若 $X_c \leq X_i \leq X_{\min}$ 或 $X_f \leq X_i \leq X_{\max}$) 或 $Y_i^{ii} = Z(X_i) - \zeta * (Z(X_i) - B(X_i))$ (若 $X_c \leq X_i \leq X_f$) 得到 $Y_i^{ii} (i \in (2, 3, 4, \dots, n))$ 。与前述相同, ζ 为 $(0, 1)$ 上服从均匀分布的随机数, 完全由计算机的随机数发生器自行生成。

②由计算公式 $\alpha_{i-1}^{ii} = \tan^{-1}((Y_i - Y_{i-1}) / (X_i - X_{i-1}))$ 得到 α_{i-1}^{ii} , 判断是否满足 $\alpha_{i-1}^{ii} \geq \alpha_{\min}$, 如满足, 则回到①继续计算 Y_{i+1}^{ii} , 不满足, 则回到①重新计算 Y_i^{ii} 。

③将以上 Y_i^{ii} 的计算持续, 直至 $i = n$ 为止, 便得到一组完整的有效解。

(2) 新解接受准则。采取扩充的 Metropolis 接受准则, 判断是否接受新解。若新解可行, 且优于当前解则接受; 否则, 按 $\exp(\Delta K/t)$ 的概率接受新解。即

$$P_r(i \rightarrow j) = \begin{cases} 1, & \Delta K \leq 0, \\ \exp(\Delta K/t), & \Delta K > 0 \end{cases} \quad (21)$$

这里, $\Delta K = K^j - K^i$; $P_r(i \rightarrow j)$ 为转移概率; t 为控制参数。

(3) 停止准则。在 S 个相继的 Mapkob 链中解无任何变化就终止算法。

根据模拟退火思想设计出求解第二层次优化问题的具体算法如下:

步骤 1 使用“新解产生装置”产生初始解 $(Y_2^0, Y_3^0, \dots, Y_n^0)$, 并计算相应的目标函数值 K^0 ; 给出控制参数 t 的初值 t_0 , 控制参数 t 的衰减常数 α , Mapkob 链的长度 L_k , 停止准则 S 的数值; 令 $t = t_0$, $n = 0$ 。

步骤 2 使用“新解产生装置”产生新解 $(Y_2^{ii}, Y_3^{ii}, \dots, Y_n^{ii})$, 并计算相应的目标函数值 K^{ii} ;

步骤 3 计算新解与当前解的目标函数值之差 ΔK 。然后, 由接受准则计算 $P_T(\Delta K, t)$, 取 $(0, 1)$ 上服从均匀分布的随机数 δ , 若 $P_T(\Delta K, t) \geq \delta$, 则接受新解, 否则, 放弃新解。

步骤 4 累计重排次数 n 。若 $n < L_k$ 转步骤 3, 否则, 转步骤 5。

步骤 5 判断停止准则是否满足。若不满足, 则令 $t = \alpha t$, $n = 0$ 转步骤 3, 满足, 则停止迭代, 得本次最优解 $K_{\min}$ 。

由于模拟退火算法的随机性, 终止解可能不是整个过程所遇到的解中最优的, 因而, 如简单地取终止解作为最优解, 可能漏掉本已取得的较好近似解或甚至整体最优解。为此, 本文对上述算法进行了部分改进, 设置了一个记忆器, 具体可描述如下:

设变量 K^* 和 X^* 分别用于记忆当前遇到的安全系数最优解及其相应的真实最危险破裂面; 当第一次接受新解时, 令 K^* 和 X^* 分别等于当前解及其目标函数值; 以后每接受一个新解时, 就将当前解的目标函数值与 K^* 作比较, 若优于 K^* , 就用当前解替换 K^* 和 X^* 。最后算法结束时, 将所得最优解与记忆器中的解比较, 取较优的一个作为当前最优解。

经过上述改进后的模拟退火算法具有较好的稳定性, 可以获得更好的近似解甚至整体最优解。

7 工程实例分析

利用本文所建立的优化模型和模拟退火-随机投点耦合算法, 笔者运用美国微软公司 (Microsoft Company Limited) 的 Visual Basic 6.0 编制了边坡稳定分析的通用程序。以下为两个工程实例的分析和计算。

实例 1 引自文献[3] (彭明祥等, 2001 年), 为广州市天河区某 27 层大厦的基坑土钉支护, 其剖面图见图 6, 各土层的计算参数列于表 1。

土钉钻孔直径为 $\Phi 110$ mm, 与水平面夹角 (入射角) 为 10° , 钢筋采用 II 级 $\Phi 25$ 螺纹钢; 预应力锚杆钻孔直径为 150 mm, 与水平面夹角为 20° , 拉杆采用 $3 \times 7 \Phi 5$ 高强度低松弛钢绞线, 其抗拉强度标准值 $f_{yk} = 1860$ N/mm²。

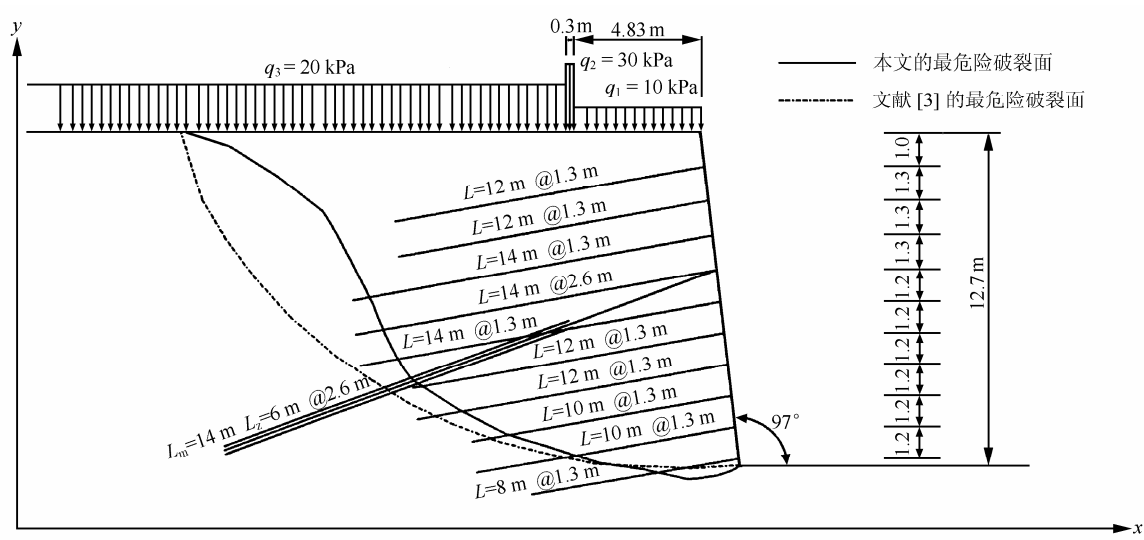


图 6 实例 1 的土钉支护坡面图
Fig.6 Schematic view of soil nailing of example 1

表 1 例 1 的土层计算参数 Table 1 Data of soils of example 1					
土层名称	土层厚度 h / m	重度 $\gamma / \text{kN} \cdot \text{m}^3$	凝聚力 C / kPa	内摩擦力 $\varphi / (^\circ)$	抗剪强度 τ_f / kPa
人工填土	1.4	18.5	12.0	10.0	40.0
冲积细砂	1.4	19.0	0.0	28.0	80.0
坡积粉质粘土	2.4	19.5	28.0	20.0	100.0
残积粉质粘土	9.0	20.0	25.0	18.0	100.0
强风化粉砂岩	5.0	21.0	80.0	28.0	250.0

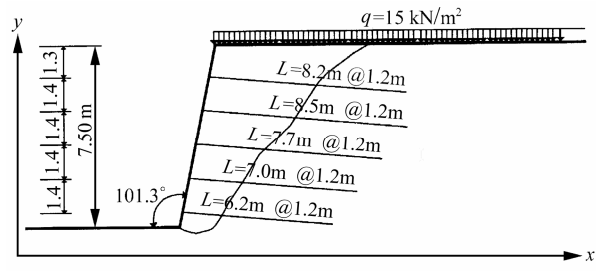


图 7 实例 2 的土钉支护坡面图
Fig.7 Schematic view of soil nailing of example 2

利用本文所建立的优化模型和模拟退火-随机投点耦合算法，对施工期间最大开挖深度达 12.7 m 时的内部稳定进行分析，得到其最小安全系数为 1.26，相应的最危险破裂面如图 6 所示；文献[3]利用圆弧破裂面所得到的最小安全系数为 1.35，其最危险滑弧也绘于图 6 中；相互比较后显示，安全系数下降了 7 %左右，同时，由于土质分层的复杂性以及坡面的几何形状、土的强度参数、土钉间距、土钉能力和土钉的倾斜角度等众多因素的影响，使得真正的最危险破裂面与最危险圆弧破裂面有较大的差别。

实例 2 引自文献[4]，为位于杭州市江干区钱塘江畔凤凰规划小区内的杭州外滩服装城的基坑土钉支护，其剖面图见图 7，各土层的计算参数列于表 2。

土钉钻孔直径为 $\Phi 100 \text{ mm}$ ，与水平面夹角（入射角）为 5° ，钢筋采用 II 级 $\Phi 20$ 螺纹钢。

运用本文建立的模拟退火-随机投点耦合算法

表 2 例 2 的土层计算参数 Table 2 Data of soils of example 2					
层号	土层厚度 h / m	重度 $\gamma / \text{kN} \cdot \text{m}^3$	凝聚力 C / kPa	内摩擦力 $\varphi / (^\circ)$	抗剪强度 τ_f / kPa
1	1.8	18.0	10.0	15.0	30.56
2	0.5	17.0	5.0	5.0	30.56
3	3.03	18.7	23.7	31.5	30.56
4	1.9	18.5	12.0	30.7	30.56

对达到最大开挖深度 7.5 m 时的土钉支护进行了施工期间的内部稳定分析，得到其最小安全系数为 1.21，相应的最危险破裂面绘于图 7 中；文献[3]利用圆弧破裂面所得到的最小安全系数为 1.36，由此可见，安全系数下降了 11 %左右；同时，最危险破裂面的形状与圆弧破裂面的差别更甚于实例 1，这显然是在土钉与复杂土质分层的共同作用下所产生的结果。

对于本例, 本文还进行了开挖完毕后的土钉支护外部稳定分析, 所得到的最小安全系数为 1.43, 与文献[4]的外部稳定分析结果 $K_{\min}=1.45$ 比较, 变化甚小, 这是因为外部稳定分析是在土钉包络线的外部进行, 从而设计变量的基本可行空间被缩小, 故造成其安全系数的变化也较小, 这是符合力学定性分析规律的。

以上两个实例的分析结果显示: ① 在土钉支护的内部稳定分析中, 常用的圆弧破裂面法可能夸大了安全系数约 10 % 左右, 当圆弧破裂面法的安全系数低于 1.10 时, 其真实的安全系数很可能低于 1.0 而处于危险状态, 建议其安全系数最低不小于 1.20, 该结果与文献[12]一致。② 在土钉与复杂土质分层共同作用下, 真正的最危险破裂面与最危险圆弧破裂面有较大的差别; ③ 圆弧破裂面法下的外部稳定分析结果具有较好的可靠性。

8 结 论

(1) 所建立的土钉支护稳定分析的优化模型和模拟退火-随机投点耦合算法具有较好的客观性和有效性, 能比较正确地反映其真实的安全系数和最危险破裂面, 可作为土钉支护设计和稳定分析的有效手段。

(2) 对于土钉支护的内部稳定分析, 如果使用圆弧破裂面法, 建议其安全系数最低不小于 1.20。

(3) 土钉与复杂土质分层共同作用下的土钉支护的真实最危险破裂面一般为非圆弧破裂面, 具体形状与土质分层、坡面的几何形状、土的强度参数、土钉间距、土钉能力和土钉的倾斜角度等众多因素有关。

(4) 圆弧破裂面法下的土钉支护外部稳定分析结果具有较好的可靠性。

参 考 文 献

[1] 潘家铮. 建筑物的抗滑稳定和滑坡分析[M]. 北京: 水利出版社, 1980.
[2] Bishop A.W. The use of slip circle in the stability analysis

of slopes[J]. *Geotechnique*, 1955, 5(1): 7—17.
[3] 彭明祥, 何正勇, 杨晓弘. 土钉支护结构计算实用方法[J]. *地下空间*, 2001, 21(5): 392—398.
[4] 肖专文, 龚晓南, 谭昌明. 基坑土钉支护优化设计的遗传算法[J]. *土木工程学报*, 1999, 32(3): 73—80.
[5] Schlosser F. Analogies et différences dans le comportement et le calcul des ouvrages de soutènement en Terre Armée et par clouage des sols[A]. *Annales de l'ITBTP, Serie: Sols et Foundations*[C]. [s. l.]: [s. n.], 1983.
[6] Shen C K, Bang S, Herrmann L R. Ground movement analysis of earth support system[J]. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, 1981, 107(GT-12): 1 609—1 624.
[7] Shen C K, Bang S, Romstad K M, et al. Field measurements of an earth support system[J]. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, 1981, 107(GT-12): 1 625—1 642.
[8] Stocker M F, Korber G W, Gassler G, et al. *International Conference on Soil Reinforcement*[C]. Paris: [s. n.], 1979.
[9] Bridle R J. Soil Nailing-Analysis and Design[J]. *Ground Engineering*, 1989, (9): 52—56.
[10] 程良奎, 张作湄, 杨志银. 岩土加固实用技术[M]. 北京: 地震出版社, 1994.
[11] 陈肇元, 崔京浩. 土钉支护在基坑工程中的应用(第二版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.
[12] 张明聚, 宋二祥, 陈肇元. 基坑土钉支护稳定分析方法及其应用[J]. *工程力学*, 1998, 15(3): 36—43.
[13] 施岚青, 沙志国, 周起敬. 混凝土结构设计规范应用指南[M]. 北京: 地震出版社, 1990.
[14] 邹广电. 复杂边坡稳定分析条分法的优化方法[J]. *水利学报*, 1989, 2: 55—60.
[15] 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.
[16] Aarts E H L, Korst J H M. Simulated Annealing and Boltzmann Machines[M]. New York: John Wiley and Sons, 1989.
[17] 魏权龄, 王日爽, 徐兵等. 数学规划与优化设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 1984.